



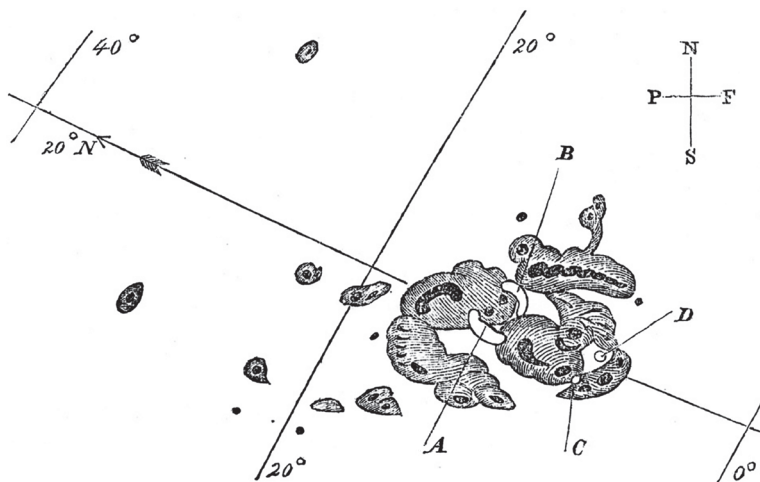
4. Sluneční vítr

*„Kdo neví, do kterého přístavu chce doplout,
tomu není žádný vítr příznivý“*

Lucius Annaeus Seneca, římský filosof

Na sluneční vítr jsme v předchozích kapitolách už několikrát narazili, pojďme se nyní tomuto fenoménu prostupujícímu celou Sluneční soustavu věnovat podrobněji. Jde o nejrůznější částice, jimiž Slunce zaplavuje své okolí. Sluneční vítr deformuje tvar magnetosfér planet, jeho poryvy jsou schopné magnetosféry dokonce rozvltnit. Na Zemi je sluneční vítr spolu s kosmickým zářením zdrojem částic pronikajících do Van Allenových radiačních pásů. Zachycené částice zde krouží kolem siločar zemského magnetického pole a intenzivně září. Nejinak je tomu i na ostatních planetách, které mají magnetické pole. Tlak částic slunečního větru působí negravitačně na všechny objekty Sluneční soustavy, a i když nejde o velký vliv, je třeba s ním v některých případech počítat. V neposlední řadě může sluneční vítr přenášet na přístroje sond nežádoucí elektrický náboj, který je třeba eliminovat.

Zemi zasahuje především tzv. *pomalý sluneční vítr*, který Slunce opouští v rovníkových oblastech a „prodírá“ se přes oblast uzavřených siločar. Naopak v polárních oblastech opouští Slunce *rychlý sluneční vítr* se zhruba dvojnásobnou rychlostí (povíme si o něm později). Průměrné hodnoty parametrů pomalého slunečního větru v blízkosti naší Země jsou v doprovodné tabulce. Machovo číslo uvedené v tabulce není nic jiného než poměr rychlosti slunečního větru k rychlosti zvuku, v tomto případě magnetozvukové vlny. V obdobích magnetických bouří se parametry slunečního větru ale mohou výrazně měnit. Například magnetické pole zamrzlé v letícím plazmoidu může mít hodnotu i přes 1000 nanotesel. Orientace sluneční magnetické siločáry je u Země zcela jiná než u Slunce.



Původní Carringtonova kresba události z roku 1859. A a B jsou zjasnění v okolí tmavých skvrn, která se během pouhých pěti minut po svém vzniku přemístila do oblastí C a D. Tmavé struktury jsou zákresy slunečních skvrn.

SLUNEČNÍ VÍTR V OKOLÍ ZEMĚ	
průměrná rychlost	350 až 450 km/s
Machovo číslo	~10
koncentrace protonů	8 protonů v cm^3
tok protonů	3×10^8 protonů na cm^2 za s
tlak slunečního větru	1 až 6 nPa
teplota částic	10 až 20 eV
magnetické pole	5 nT
zastoupení vodíku (p + e)	92 %
zastoupení jader He (α částice)	8 %
stopové příměsi	C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe

Pokud má sluneční vítr typickou rychlost 400 km/s, letí k nám jeho částice něco přes 4 dny. Za tu dobu se Slunce pootočí přibližně o 60°. Proto se směr siločáry vycházející ze Slunce liší od směru téže siločáry v blízkosti Země právě o těchto 60°.

Objev slunečního větru

Proud částic ze Slunce k Zemi poprvé objevil anglický amatérský astronom Richard Christopher Carrington (1826–1875). Dne 1. září 1859 pozoroval Slunce a na slunečním disku při rutinním zakreslování poloh slunečních skvrn na své observatoři v Redhillu spatřil v blízkosti skupiny skvrn dvě nezvykle výrazné jasné oblasti, které rychle měnily svou polohu. Nezávisle na něm pozoroval toto zjasnění také další anglický amatérský astronom a nakladatel Richard Hodgson (1804–1872). Dnes víme, že šlo o přepojení magnetických siločar, které mělo za následek ohřev okolní látky, následnou sluneční erupci a vymrštění plazmoidu, který si to shodou okolností namířil směrem k Zemi. Pouhých 18 hodin po Carringtonově pozorování se 2. září 1859 na Zemi objevila mimořádně silná magnetická bouře, která trvala několik hodin. Odhadujeme, že magnetické pole bylo v rovníkových oblastech narušeno o 1 760 nT (normální sluneční pole má na hranici magnetosféry hodnotu kolem 5 nT). V dlouhých telegrafních vedeních se indukovalo napětí. Na několik hodin byla vyřazena z provozu většina z 200 000 kilometrů tehdejších telegrafních linek v Evropě a Severní Americe. V té době šlo o jediný možný způsob komunikace na větší vzdálenosti. Na některých místech došlo k obloukovému výboji a následným rozsáhlým požárům. Dokonce je zaznamenán případ telegrafistky, která byla od obloukového výboje popálena, a na rukou jí naskočily puchýře. Chování magnetického pole Země bylo nahráváno prvními magnetometry umístěnými v blízkosti Londýna a v Indii (observatoř Colaba, Mumbai). Po několik hodin byly pozorovány kvaziperiodické oscilace magnetického pole s několikaminutovou periodou. V roce 1992 byly nalezeny stopy této události v odpovídající vrstvě grónského ledovce, kde byly detekovány nitráty, jejichž vznik souvisí se zvýšeným tokem energetických protonů.



Carrington jako první upozornil, že by proběhlá magnetická bouře mohla mít souvislost s jeho pozorováním a látka ze Slunce nějak doletěla k Zemi a ovlivnila ji. Myšlenku látky opouštějící Slunce dále rozpracoval irský fyzik George FitzGerald (1851–1901). Jasně obrysy této představě ale dal až anglický astrofyzik sir Arthur Eddington (1882–1944) v roce 1910. Předpokládal, že ze Slunce uniká do okolního prostoru neustálý tok elektronů. Další posun učinil norský fyzik Kristian Birkeland, o němž jsme se už zmínili v souvislosti s napodobeninou Země (terrellou), na které simuloval vznik polárních září. Birkeland v roce 1916 předpověděl na základě sledování výskytu polárních září v závislosti na sluneční aktivitě, že ze Slunce uniká neustálý proud částic, a to nejen elektronů, ale i iontů, tedy protonů a dalších kladných částic. V pozdějších letech dávala celá řada astronomů únik částic ze Slunce do souvislosti s vysokou teplotou jeho vnější atmosféry, koróny. Velké rychlosti částic umožňují jejich únik ze Slunce.

Kompletní teorii úniku částic ze Slunce vytvořil v 50. letech 20. století americký sluneční fyzik Eugen Parker. Byl to právě on, kdo tento neustálý proud částic ze Slunce pojmenoval jako sluneční vítr. Rovnice popisující únik částic ze Slunce se nazývá Parkerova rovnice a má v blízkosti Slunce pro rychlost unikajících částic hned dvě řešení. Jim odpovídá pozorovaný pomalý a rychlý sluneční vítr. Eugen Parker je jedním z nejvýznamnějších slunečních fyziků historie. Jeho jméno nese nejen Parkerova rovnice pro sluneční vítr, ale i Parkerova plocha nulového magnetického pole Slunce, kterou objevil. Parker je spoluautorem teorie tekutinového dynama a autorem modelu přepojení magnetických siločar. Byla po něm pojmenována i sonda Parker Solar Probe, která startovala v srpnu 2018 a její mise je plánována do roku 2025. Hlavním cílem jejího výzkumu je samozřejmě Slunce. Ke konci mise se tato sonda přiblíží ke Slunci na vzdálenost pouhých 6,2 milionů kilometrů (šestnásobek průměru Slunce) a bude zkoumat vznik slunečního větru z bezprostřední blízkosti Slunce. Jde o jedinou americkou sondu pojmenovanou po žijícím vědci. Eugen Parker (*1927) byl ve svých 91 letech na startu přítomen. Sondu vynesla dne 12. srpna 2018 raketa Delta IV Heavy, fotografie na protější straně: NASA/ULA.

Zrod slunečního větru

Sluneční vítr monitoruje celá flotila družic a sond. Zmíníme se zde jen o třech z nich: o japonské družici *Hinode*, o americko-evropské sondě *Odysseus* a o nejnovější americké sondě *Parker Solar Probe*. Všechny tři totiž významně přispěly k pochopení vzniku slunečního větru v blízkosti povrchu Slunce.

Jako první k porozumění vzniku slunečního větru přispěla významnou měrou družice *Hinode*, kterou vypustila japonská kosmická agentura JAXA v roce 2006. Sonda se původně jmenovala Solar-B a po úspěšném startu byla přejmenována na *Hinode* (Východ Slunce). Družice byla navedena na heliosynchronní dráhu¹, odkud pozorovala Slunce v optickém, rentgenovém a extrémním ultrafialovém oboru. Naměřená data byla přenášena pozemskou stanicí Svalsat v norském Svalbardu. Původně tříletá mise zaznamenala několik prodloužení a mohla by fungovat až do roku 2022.

V únoru 2007 se podařil družici *Hinode* neuvěřitelný kousek. Družice přímo nafilmovala vznik slunečního větru na okraji aktivních oblastí, kde se mění charakter magnetického pole a částice plazmatu opouštějí sluneční povrch směrem do meziplanetárního prostoru. Výsledkem snímkování v rentgenové oblasti spektra byla animace pokrývající období dvanácti hodin. Na sugestivním záběru jsou vidět vlnící se siločáry magnetického pole (zviditelňuje je svit elektronů v této oblasti) a proudy plazmatu klouzající podél těchto siločar pryč od Slunce. Pohyb siločar připomínal vlnění trávy ve větru, což přesně odpovídá tomu, jak by měla vypadat Alfvénova magnetozvuková vlna. Nahrávka je o to cennější, že beze zbytku potvrdila výsledek numerické simulace, která byla provedena v Ústavu teoretické fyziky na norské Univerzitě v Oslo nedlouho předtím. Poprvé byl zaznamenán vznik slunečního větru v okolí jižního pólu Slunce v přímém přenosu a byly nafilmovány Alfvénovy vlny, které následně ohřívají korónu. O pouhý rok později se družici *Hinode*

1 **Heliosynchronní dráha** – geocentrická dráha, která kombinuje výšku a sklon takovým způsobem, že satelit prochází nad určeným místem povrchu Země vždy ve stejném slunečním čase. Na této oběžné dráze může mít satelit neustálý výhled na Slunce.

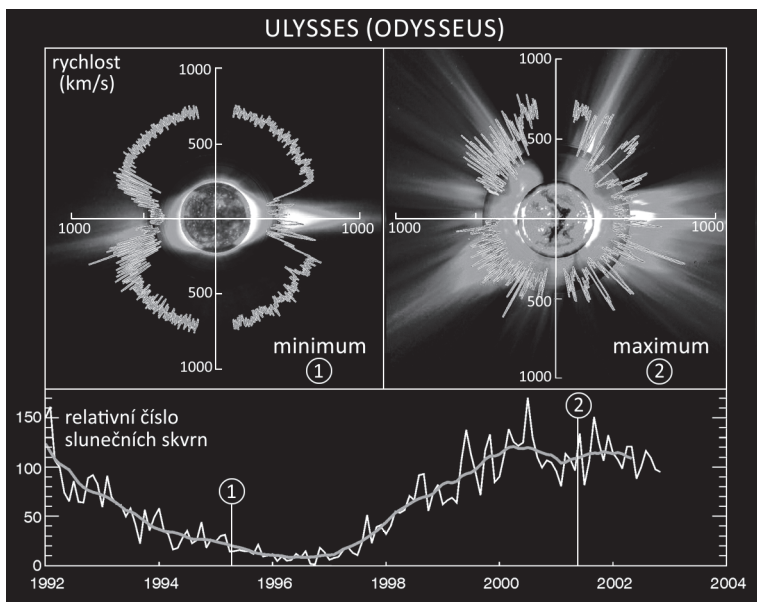
podařilo vyfotografovat i vznik pomalého slunečního větru v rovníkové oblasti Slunce.

Dalším unikátním přístrojem byla americko-evropská sonda *Ulysses* (česky *Odyseus*). *Odyseus* startoval 6. 10. 1990, v únoru 1992 prolétl kolem Jupiteru a byl nasměrován na protáhlou polární oběžnou dráhu kolem Slunce. První průlet kolem jižního pólu proběhl v druhé polovině roku 1994, kolem severního pólu v druhé polovině roku 1995. Slunce bylo těsně po maximu 22. cyklu sluneční činnosti. Druhý průlet se uskutečnil v letech 2000 (jižní pól) až 2001 (severní pól) – Slunce bylo těsně před minimem 23. cyklu sluneční činnosti. Oba průlety umožnily sledovat rozdíly ve vzniku slunečního větru v období minim a maxim sluneční činnosti.

Ukázalo se, že v období minima sluneční aktivity, kdy je pole v blízkosti Slunce přibližně dipólové, byl sluneční vítr výrazně strukturován. V oblasti rovníku, kde se částice pohybovaly napříč uzavřených siločar, opouštěl Slunce jen pomalý sluneční vítr s kolísající rychlostí o průměrné hodnotě 300 kilometrů za hodinu. Šlo o oblast do maximální heliografické šířky $\pm 30^\circ$. Ve vyšších heliografických šířkách, až do oblasti pólů, unikal rychlý sluneční vítr, klouzající podél siločar magnetického pole, s minimálně se měnící rychlostí o hodnotě 750 kilometrů za sekundu. Při průletu sondy v okolí maxima sluneční činnosti, kdy je sluneční pole neuspořádané a dochází k přepólování, byla situace ale naprosto odlišná. Ve všech směrech se střídaly oblasti pomalého i rychlého slunečního větru a žádná závislost na heliografické šířce nebyla patrná. Sonda *Odyseus* fungovala téměř 19 let. Deaktivována byla na konci června 2009.

Posledním přístrojem, o kterém se zmíníme, je unikátní sonda *Parker Solar Probe* (Parkerova sluneční sonda). Ta startovala dne 12. srpna 2018 a má protáhlou dráhu s periheliem², které se bude postupně přibližovat ze vzdálenosti 25 milionů kilometrů až na pouhých 6,9 milionu kilometrů v roce 2025 (Slunce má průměr 1,4 milionu kilometrů). Stane se prvním přístrojem, který bude sledovat vnitřní korónu z bezprostřední blízkosti.

2 **Perihelium** – nejbližší bod ke Slunce na dráze kolem něj.

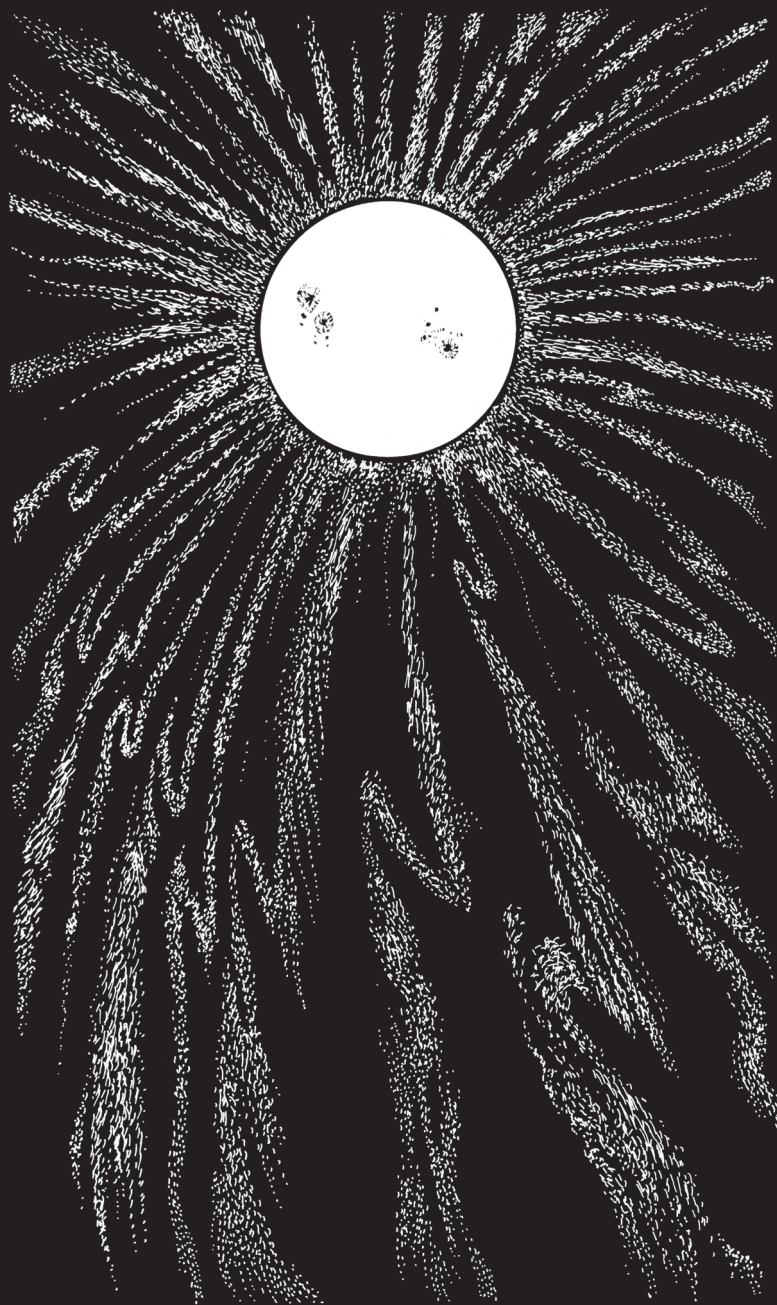


Sonda Odysseus. Měření rychlosti slunečního větru při dvou průletech kolem Slunce. První byl těsně před minimem sluneční aktivity, druhý v maximu sluneční aktivity. Sluneční aktivita je znázorněna v dolní části pomocí Wolfova čísla (relativního čísla počtu slunečních skvrn). Největší přiblížení sondy označují čísla v kroužku a svislé čáry. Zdroj: NASA/ESA/GRL/McComas.

Sondu připravil tým v Laboratoři aplikované fyziky na Univerzitě Johna Hopkinse. Má délku 3 metry a průměr 2,3 metru. Je vyrobená ze speciální uhlíkaté slitiny, která je schopna odolat vnější teplotě 1 400 °C. Sonda má speciální tepelný štít chránící ji před slunečním žářem. V místě největšího přiblížení je energetický tok slunečního záření neskutečných 650 kilowattů na metr čtvereční, což je téměř pětsetkrát více než u Země. Proto je komunikační anténa bílá, maximalizuje tak množství záření odraženého zpět do vesmíru. Součástí sondy je řada přístrojů pro sledování elektromagnetických polí: magnetometry, sondy pro měření elektrického pole, radiovln, parametrů plazmatu (elektronové a iontové teploty, rychlosti a koncentrace atd.), zařízení pro sledování částic s extrémní energií, optický dalekohled pro fotografování koróny a vnitřní heliosféry, čítač elektronů, protonů a alfa částic a mnohé další přístroje.

Prvním objevem, který překvapil sluneční fyziky, bylo pozorování *minizáblesků*. Jde o náhlé uvolnění oblaku částic s vysokou energií, který se pohybuje od Slunce a rychle expanduje do okolí. Expanze oblaku je tak rychlá, že dříve, než oblak doletí k Zemi, zanikne a splyne s pozadím. Proto nebylo možné tyto minizáblesky pozorovat dříve. Pravděpodobně jde o důsledek přepojování magnetických siločar v malém měřítku, tzv. *mikrorekonekce*. Při přepojení se magnetické pole dostane do konfigurace s nižší energií a nadbytečná energie zahřeje plazma. Jev se tak podobá koronálnímu výronu hmoty, ale odehrává se na podstatně menším měřítku. Je pravděpodobné, že takové události, kterých bylo při dvou průletech sondy Parker Solar Probe v blízkosti Slunce pozorováno větší množství, se mohou podílet na ohřevu koróny. Ohřev koróny tak může být mnohem složitějším jevem, než jsme si dosud mysleli a pravděpodobně se na něm bude podílet jak rozpad Alfvénových magnetozvukových vln, tak drobná přepojování magnetických siločar.

Největším překvapením byl objev záhybů slunečního větru ve tvaru písmene „S“, které opakovaně vznikají v těsné blízkosti Slunce (anglicky „*switchbacks*“). V proudech slunečního větru se plazma spolu s magnetickými siločarami zvlní natolik, že vznikne protiproud mířící téměř ke Slunci. Již dříve byla pozorována různá zvlnění slunečního větru, ale ve velké vzdálenosti od Slunce jsou tyto vlnky nepatrné a nebylo známo, že je jejich původ v blízkosti Slunce natolik dramatický. Velmi zářející je rychlost jevu. Plazma se zkroutí a přetočí do tvaru písmene S řádově v sekundách, což by mohlo znamenat, že jde o důsledek nějaké nestability nebo přepojení magnetických siločar. Jednu z nadějných teorií vytvořil profesor Lennard Fisk z Michiganské univerzity. V roce 2020 ukázal, že by takové záhyby mohly vzniknout při setkání pohybující se otevřené siločáry se siločarou ve tvaru uzavřené smyčky, jejíž pole je v oblasti setkání opačně orientované. Pohybující se otevřené siločáry byly pozorovány, takže má Fiskova teorie naděje na úspěch. Na následující straně je grafické znázornění podivných záhybů v proudech slunečního větru. Tento zcela nový jev bude třeba podrobně analyzovat a pokusit se ho napodobit v numerických simulacích slunečního plazmatu.



I ze vzdálenějších sond bylo při pozorování slunečního větru zjevné, že nejde o kontinuální homogenní proud částic. Sluneční vítr se svými poryvy podobá běžnému větru víc, než by se na první pohled mohlo zdát. Sonda Parker Solar Probe ale dokáže mnohem více – sleduje jemné detaily ve slunečním větru v těsné blízkosti Slunce. Ukázala, že sluneční vítr vychází ze Slunce nespojitě v radiálních proudech. Některé chuchvalce plazmatu padají zpět do Slunce a nestanou se součástí slunečního větru. Ve slunečním větru jsou jasné zřetelné turbulentní struktury a bude nesmírně zajímavé sledovat počet a tvar těchto struktur a současně rychlost slunečního větru v závislosti na fázi sluneční aktivity a na tvaru globálního slunečního pole. K tomu ale bude třeba mít pozorovací řadu dlouhou minimálně polovinu slunečního cyklu, tj. řádově pět let. Můžeme se tedy těšit na další průlety sondy periheliem.

Negravitační síly

Na první pohled by se mohlo zdát, že veškeré pohyby ve Sluneční soustavě jsou řízeny gravitací. Na objekty pohybující se kolem Slunce ale působí i další síly. Především je to tlak slunečního záření, který je schopen ovlivnit směry kometárních ohonů či pohánět sluneční plachetnice, jež jsou levnou alternativou nákladných sond. O plachetnici poháněné tlakem slunečního záření, která letí napříč Sluneční soustavou, snily desítky spisovatelů a fyziků. Mezi nejznámějšími byli ruský teoretik Konstantin Ciolkovskij (navrhl plachetnici již v roce 1921) a spisovatel Arthur Clark v povídce „*The Lady Who Sailed The Soul*“ z roku 1960, která popisovala závod slunečních jachtařů od Země k Měsíci.

Jejich sen se splnil až v roce 2010. Japonská miniplachetnice IKAROS (*Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun*), kterou připravili ke startu odborníci z japonské kosmické agentury JAXA, startovala na palubě nosné rakety H-IIA dne 21. května 2010. Celý experiment má několik prvenství. Poprvé se podařilo úspěšně rozvinout plachtu o průměru přibližně 20 metrů, poprvé se podařilo tuto plachtu vyfotografovat za pomoci minikamer vystřelených z plachetnice v malých válečcích do prostoru vedle

plachetnice a poprvé se úspěšně podařilo zvládnout manévrování s plachetnicí, například natáčení plachty za pomoci LCD odražečů, které odráží sluneční záření jinak, když jsou zapnuté a jinak, když jsou vypnuté. Plachetnice dokonce měla přístroj pro zaznamenávání gama záblesků a několik jich skutečně zachytila, i když to nebyl její hlavní cíl.

Tlak slunečního záření má v okolí Země hodnotu kolem 5 mikropascalů. To sice není mnoho, ale dlouhodobé působení i malé tlakové síly dokáže velké věci. A životaschopná sluneční plachetnice je toho důkazem. Tlak slunečního větru je ještě o tři řády menší, v okolí Země jde o jednotky nanopascalů, ale přesto se s ním musí počítat. Například připravovaná trojice sond LISA³, která má za úkol detekovat gravitační vlny dlouhých vlnových délek, bude potřebovat extrémně přesné zaměření polohy tzv. testovacích krychlí. Změna polohy sondy způsobená slunečním větrem je pro tato měření už podstatná. Navíc elektrony slunečního větru ulpívají na některých součástkách a nabíjejí je, takže je třeba zajistit odvod náboje.

Sluneční záření a sluneční vítr nejsou jedinými zdroji negravitačních sil působících na tělesa. Dalším důležitým činitelem je *Jarkovského jev*, který poprvé popsal ruský inženýr polského původu Jurij Jarkovskij (1844–1902) kolem roku 1900. Malá tělesa obíhající Slunce jsou zahřívána jen na straně přivrácené ke Slunci, zatímco tepelné vyzařování rotujícího objektu probíhá všesměrově. Tato nesymetrie vede ke vzniku negravitační síly, která byla poprvé pozorována radioteleskopem Arecibo⁴ u planety Golevka v roce 2003.

3 **LISA** – Laser Interferometry Satellite Antenna, projekt ESA s podporou NASA, v němž budou tři sondy obíhající kolem Slunce zjišťovat vzájemnou polohu za pomoci infračervených laserů odražejících se od testovacích krychlí, které se budou vznášet v sondách. Jejich cílem je interferometrické měření gravitačních vln. Vzájemné vzdálenosti sond budou 2,5 milionu kilometrů. Start je plánován na rok 2034.

4 **Arecibo** – do roku 2016 nejvýkonnější radioteleskop světa, ostrov Portoriko. Průměr antény 304 metrů, anténa vyplňovala celé údolí. Povrch tvořilo 40 000 hliníkových desek. Postaven byl v roce 1963. Objev: první extrasolární planeta, změření periody rotace Merkuru, objev podvojného pulzaru PSR 1913+16 (nepřímé potvrzení existence gravitačních vln), potvrzení Jarkovského jevu u planety Golevka a další. Na konci roku 2020 došlo k havárii, praskla nosná lana ohniskové kabiny a radioteleskop byl nevratně poškozen.

Zcela atypickou negravitační sílu mohou vytvářet radioizotopové generátory⁵, které jsou zdrojem energie pro sondy, jejichž cíl je na periférii Sluneční soustavy, kde jsou klasické panely slunečních baterií už neúčinné. Odpadní teplo z nesymetricky uložených generátorů je zdrojem nepatrné síly působící na sondu. Po dosti dlouhé době se sonda může odchýlit od propočtů trajektorie provedené na základě Newtonova gravitačního zákona, jak se stalo například v případě sond Pioneer⁶.

Sluneční vítr a překážky

Pojďme se nyní podívat, jaká je vzájemná interakce slunečního větru a překážek, které se mu postavily do cesty. V podstatě jsou jen čtyři možnosti:

Interakce typu Měsíc (nevodivá překážka). Měsíc nemá žádné vlastní magnetické pole, ani žádnou atmosféru. Jde o nevodivou překážku, u které se nemůže vytvořit na denní (návětrné, čelní) straně rázová vlna s typickým skokem tlaku. Část slunečního větru dopadá přímo na těleso, zbytek ho velmi těsně obtéká. Za Měsícem se vytvoří v plazmatu slunečního větru brázda, do které pronikají nabitě částice. Takto interaguje se slunečním větrem většina planetek, neaktivní jádra komet a některé měsíce planet, například Marsův měsíc Phobos.

Interakce typu Země (magnetický dipól). Země má vodivé jádro s diferenciální rotací, které generuje přibližně dipólové magnetické pole sahající do vzdálenosti několika poloměrů od mateřského tělesa. Sluneční vítr do tohoto pole obtížně proniká, nicméně ho významně deformuje do charakteristického tvaru, tzv. *magnetosféry*. Na denní straně vzniká oblouková rázová vlna, na noční straně dlouhý magnetický ohon. Typické jsou polární kasy, jakési trychtýře,

5 **Radioizotopový generátor** – zdroj energie využívaný pro mise sond do nejvzdálenějších částí Sluneční soustavy. Základem generátoru je kapsle z radioaktivního materiálu, zpravidla plutonia. Při rozpadu se uvolňuje velké množství tepla, které se v termočláncích konvertuje na elektrinu. Odpadní teplo je vyzařováno do okolního prostoru.

6 **Pioneer 10 a 11** – dvojice stejných amerických sond určených k výzkumu Jupiteru, Saturnu a periférie Sluneční soustavy. Sondas startovaly v letech 1972 a 1973.

kterými mohou nabité částice přece jen pronikat do blízkosti povrchu tělesa (slovo kasp pochází z anglického „cusp“, tj. roh, cíp). Tímto způsobem interaguje se slunečním větrem ještě Merkur a všechny obří planety.

Interakce typu Venuše (vodivá překážka). Venuše rotuje příliš pomalu na to, aby v jádře došlo k diferenciální rotaci a následné genezi magnetického pole. Nicméně má velmi hustou atmosféru, ve které dochází k fotoionizaci neutrálních atomů a molekul ultrafialovým zářením. Vzniklé plazma formuje vodivou ionosféru. Sluneční vítr potom obtéká vodivou překážku. Na denní (návětrné) straně se vytváří rázová vlna (podobná jako u těles s magnetickým polem) a pohybující se nabitě částice vytvoří *indukovanou pseudomagnetosféru*. Obdobný typ interakce probíhá u Marsu, kde je vlastní magnetické pole v současnosti zanedbatelné. Indukovanou pseudomagnetosféru má také Saturnův měsíc Titan, který se při svém oběhu kolem Saturnu občas dostává do přímé interakce se slunečním větrem a občas prochází magnetosférou Saturnu.

Interakce typu kometa (překážka s proměnnou vodivostí). Vlastní pole komet je v drtivé většině případů zanedbatelné – jde o objekty ze zmrzlého ledu a prachu s rozměry několika kilometrů, maximálně desítek kilometrů. Po většinu oběhu kolem Slunce jde o neaktivní tělesa, která se slunečním větrem interagují obdobně jako Měsíc. Jakmile se však kometa dostane do blízkosti Slunce, vytvoří se kolem ní rozsáhlá koma o rozměrech až milionů kilometrů. V komě dochází k fotoionizaci a v blízkosti jádra komety k vytvoření ionosféry. Na denní (návětrné) straně vzniklá slabá rázová vlna a kolem tělesa nevýrazná dočasná indukovaná pseudomagnetosféra, obdobně jako u Venuše.

Při interakci slunečního větru s nejrůznějšími atmosférami dochází často ke srážce s nábojovou výměnou. Jde o srážku, při níž si dva objekty vymění náboj, například elektron. Představte si, že se srazí energetický proton s pomalým atomem neutrálního vodíku, kterému přebere elektron z obalu. A výsledek? Proton s malou energií a neutrální atom s velkou energií. Situace je po srážce s nábojovou výměnou taková, jakoby si původní objekty vyměnily svou energii.

Plazmoid z roku 2000

Ve třetí kapitole (na straně 76) jsme se zmínili o plazmoidu, který postupně navštívil tři planety Sluneční soustavy, pojďme se nyní na jeho cestu podívat podrobněji.

Od 1. do 10. listopadu 2000 byla observatoří SOHO zaznamenávána zvýšená sluneční aktivita. Slunce v tomto období vyslalo do okolí pět výrazných koronálních výronů hmoty, které směřovaly k Zemi. Nejsilnější erupce byla vyvržena ze Slunce dne 8. listopadu 2000. Postavení planet bylo takové, že skupina oblaků postupně zasáhla Zemi, Jupiter a Saturn. Hlavní proud nabitých částic se setkal se Zemí 9. 11., k Jupiteru dorazil 18. 11. a na Saturn až 7. 12. Zpočátku šlo o čtyři oddělené plazmoidy, které se postupně rozplývaly, až po přibližně deseti dnech vytvořily ve vzdálenosti čtyř astronomických jednotek jedinou oblast se zvýšenou koncentrací plazmatu, která měla mnohonásobně větší rozměr než největší planeta Sluneční soustavy – Jupiter.

Jediný plazmoid rozzářil na třech planetách Sluneční soustavy polární záře. Měření u Země prováděly sondy Wind a ACE. Měření u Jupiteru bylo uskutečněno sondou Cassini, která kolem něj právě prolétávala na cestě k Saturnu. U Jupiteru byly ještě rozlišitelné různé rychlosti původních čtyř plazmoidů. Interakce plazmoidu s rázovou vlnou magnetosféry Jupiteru vytvořila polární záři, která byla pozorovatelná dokonce ze Země – sledoval ji dalekohled Antu ze čtveřice dalekohledů VLT Evropské jižní observatoře. Není vyloučeno, že do oblaku plazmatu byl absorbován i sopečný materiál vyvržený měsíčkem Io s aktivními vulkány. Stržené sopečné emise, které byly pozorovány dalekohledem Antu, se pravděpodobně staly součástí materiálu plazmoidu brázdícího Sluneční soustavu. Polární záře vzniklé v důsledku průletu plazmoidu kolem Saturnu pozoroval infračervený spektrograf STIS umístěný na Hubblově vesmírném dalekohledu. Zatím jde o jedinou událost, kdy byly pozorovány polární záře, které měly společný původ, hned na třech planetách Sluneční soustavy. Cesta plazmoidu napříč Sluneční soustavou je znázorněna na obrázku na následující stránce.

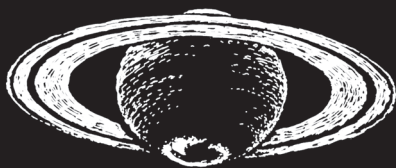
SLUNCE CME 8.11.2000



ZEMĚ 9.11.2000



JUPITER
18.11.2000



SATURN
7.12.2000

Na periferii a dál

Rychlost částic slunečního větru se až do terminační vlny příliš nemění. Letí totiž setrvačností a svou rychlost si ponechávají. S rostoucí vzdáleností od Slunce ale klesá koncentrace slunečního větru, a tím i jeho intenzita (počet částic, které prolétly jednotkovou plochou za jednotku času), takže sluneční vítr postupně slábne. Nabité částice spolu neinteragují bezprostředními srážkami, jak je tomu v neutrálním plynu, ale „na dálku“ prostřednictvím elektrických a magnetických polí. Tato interakce zajišťuje šíření magnetozvukových vln i ve velmi řídkém prostředí. Částice slunečního větru mají vyšší rychlost než zvuk, jde tedy o nadzvukové (supersonické) proudění. U Země je rychlost slunečního větru zhruba desetinásobkem rychlosti zvuku. Na terminační vlně dochází díky interakci s mezihvězdným větrem k prudkému snížení rychlosti slunečního větru na podzvukovou rychlost. Například sonda Voyager 2 naměřila snížení rychlosti z hodnoty 400 km/s na hodnotu přibližně 150 km/s. Tomu odpovídalo 2,5násobné zvýšení koncentrace částic (vzpomeňte si na už zmíněnou zácpu na dálnici). Za terminační vlnou vstupuje sluneční vítr do přechodové oblasti – pláště heliosféry, v němž rychlost slunečního větru nadále klesá. Za heliopauzou, samotnou hranicí heliosféry, je rychlost slunečního větru nulová a jeho částice se stávají součástí mezihvězdného prostředí.

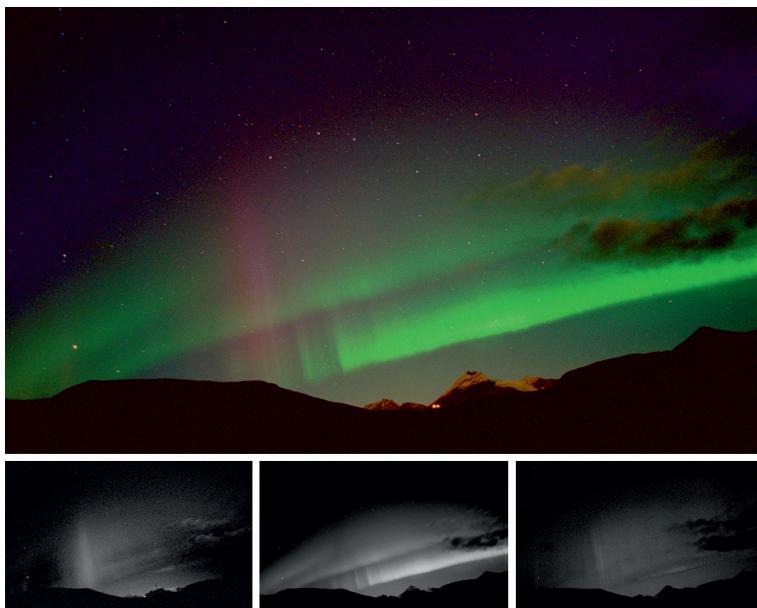
Ve vnitřní části Sluneční soustavy je poměr atomů neonu a kyslíku dán složením Slunce. Na každých 20 atomů neonu se zde vyskytuje 111 atomů kyslíku. Za heliopauzou (hranicí magnetického vlivu Slunce) jsou ale poměry zcela jiné. Podle měření sondy IBEX připadá v blízkém mezihvězdném prostředí na každých 20 atomů neonu jen zhruba 74 atomů kyslíku. Jaký je důvod tohoto různého poměru obou prvků, není jasné. Může to být způsobeno tím, že Slunce vzniklo v jiné oblasti Galaxie, než se nachází dnes. Další možností je, že v mezihvězdném prostředí jsou volné atomy kyslíku zachytávány zrny mezihvězdného prachu, a tím jejich počet poklesne. V každém případě cesta slunečního větru klouzajícího podél siločar magnetického pole na heliopauze končí. Za ní je mezihvězdné prostředí naší Galaxie – Mléčné dráhy.

Víte, že?

- Víte, že Slunce ztratí vyvrháním slunečního větru miliardu kilogramů za sekundu? Za pět miliard let existence tak Slunce ztratilo $1,5 \times 10^{26}$ kg, což je necelá setina procenta jeho hmotnosti.
- Víte, že se čtveřici družic Cluster podařilo dostat na oběžnou dráhu až napodruhé? Při prvním pokusu v roce 1998 selhala nosná raketa Ariane a dvě družice byly zničeny. Až v roce 2000 se Evropské kosmické agentuře podařilo dvěma lety dopravit všechny čtyři družice na oběžnou dráhu a vytvořit formaci letícího čtyřstěnu.
- Víte, že nejjednodušším magnetometrem je obyčejná cívka z navinutého drátu? Ve vodiči se při průletu oblastí s magnetickým polem indukuje napětí a vznikne měřitelný elektrický proud. Magnetometry se umísťují na ramena vyčnívající ze sond a zpravidla obsahují tři různě orientované cívky, z nichž každá měří jednu složku magnetického pole.
- Víte, že Sluneční vítr je také název písně Václava Neckáře? Je součástí legendárního dvojalba Planetárium, které poprvé vyšlo v roce 1977. U příležitosti zpěvákových 77. narozenin bylo dvojalbum znovu vydáno v říjnu 2020, a to opět vydavatelstvím Supraphon.

Poučení na závěr: Buďme rádi, že nás magnetosféra Země před slunečním větrem chrání. Na první pohled poetické označení „sluneční vítr“ nevystihuje skutečnost, že sluneční vítr je pro život velmi nebezpečným fenoménem.





Obr. 1: Ukázka rozložení snímku do tří barevných kanálů. Zrnitost je nejvíce patrná v červené barvě (vlevo), méně pak v modré barvě (vpravo). V zeleném kanálu (uprostřed) se zrnitost téměř neprojevuje. Snímek byl pořízen dne 18. 9. 2002 v 0:52 SEČ v horách Skjomedalen na diapozitivní materiál Kodak EPL 5075 s citlivostí 400 ISO; doba expozice 20 s, clona 2,2. Foto Jakub Rozehnal.



Obr. 2: Aurorální ovál a pod ním záclony polárních září dne 10. 9. 2012, 0:33, PENTAX K, ISO 800, expozice 20 s. Zkuste nalézt Velký vůz! Foto AGA.