

HVĚZDY, PLANETY, MAGNETY

Petr Kulháněk, Jakub Rozehnal

2021

Text © Petr Kulhánek, Jakub Rozehnal
Obálka a grafika © Ivan Havlíček

ISBN 978-80-906638-6-2

HVĚZDY, PLANETY, MAGNETY

aneb třináctero příběhů o magnetech ve vesmíru



Petr Kulháněk, Jakub Rozehnal

2021

Obsah

Předmluva	10
1. Plazma a všude jenom plazma	13
<i>Plazmová vlákna a stěny</i>	15
<i>Gyrace, drifts a zrcadla</i>	20
<i>Rázové vlny a dvojvrstvy</i>	23
<i>Přepojení (rekonekce)</i>	27
<i>Vlny v plazmatu</i>	28
<i>Záření plazmatu</i>	31
<i>Elektromagnetický kolaps</i>	35
<i>Rovnováha v gravitaci a plazmatu</i>	36
<i>Víte, že</i>	37
2. Cesta tam a zase zpátky – expedice Aurora	39
<i>Historie výzkumu polárních září</i>	41
<i>Od Slunce k Zemi</i>	46
<i>V horní atmosféře</i>	49
<i>Fotografování polárních září</i>	50
<i>Strípky z expedic</i>	54
<i>Víte, že</i>	57
3. Magnetické pole Slunce	59
<i>Spektrální třídy</i>	60
<i>Stavba Slunce</i>	61
<i>Termojaderný kotel</i>	63
<i>Tekutinové dynamo</i>	65
<i>Heliosféra</i>	69
<i>Globální pole Slunce</i>	71
<i>Lokální pole Slunce</i>	72
<i>Víte, že</i>	77

4. Sluneční vítr	79
<i>Objev slunečního větru</i>	81
<i>Zrod slunečního větru</i>	84
<i>Negravitační síly</i>	89
<i>Sluneční vítr a překážky</i>	91
<i>Plazmoid z roku 2000</i>	93
<i>Na periferii a dál</i>	95
<i>Víte, že</i>	96
 Barevná příloha	97
 Některé jednotky	129
 5. Za úplnými zatměními Slunce	131
<i>Co pozorovat při zatmění</i>	133
<i>Zpracování pořízených snímků</i>	140
<i>Maďarsko (11. 8. 1999)</i>	142
<i>Zambie (21. 6. 2001)</i>	144
<i>Španělsko (3. 10. 2005)</i>	147
<i>Turecko (29. 3. 2006)</i>	149
<i>Další expedice</i>	150
<i>Víte, že</i>	151
 6. Velká cesta	153
<i>Mise Voyager</i>	153
<i>Jak sondy vypadají?</i>	155
<i>Let Sluneční soustavou</i>	157
<i>Pozdrav civilizacím</i>	159
<i>Hvězdám vstříc</i>	163
<i>Víte, že</i>	164

7. Magnetosféry kamenných planet	167
<i>Dipól a kvadrupól</i>	167
<i>Merkur</i>	168
<i>Venuše</i>	171
<i>Výzkum Venuše</i>	175
<i>Země</i>	177
<i>Cesta zemských pólů</i>	181
<i>Van Allenovy pásy</i>	184
<i>Víry na bocích magnetosféry Země</i>	185
<i>Mars</i>	187
<i>Marsovské záře</i>	188
<i>Výzkum Marsu</i>	189
<i>Magnetická pole planet</i>	191
<i>Víte, že</i>	192
8. Obří planety	195
<i>Jupiter</i>	199
<i>Výzkum Jupiteru</i>	205
<i>Saturn</i>	206
<i>Výzkum Saturnu</i>	209
<i>Uran</i>	212
<i>Výzkum Uranu</i>	213
<i>Neptun</i>	215
<i>Výzkum Neptunu</i>	216
<i>Víte, že</i>	218
9. Od pramlhoviny ke Sluneční soustavě	221
<i>První teorie</i>	221
<i>Akreční teorie</i>	224
<i>Vznik centrální hvězdy</i>	227
<i>Vznik planetesimál</i>	229

<i>Vznik planet</i>	233
<i>Migrace planet</i>	235
<i>Alternativní teorie vzniku planet</i>	238
<i>Nejstarší planeta ve vesmíru</i>	239
<i>Pozůstatky raných fází</i>	243
<i>Víte, že</i>	249
 10. Hledání cizích světů	251
<i>Protoplanetární disky</i>	253
<i>Hnědí trpaslíci</i>	254
<i>Detekční metody</i>	258
<i>Přímé zobrazení extrasolárních planet</i>	269
<i>První snímky exoplanet</i>	271
<i>Projekty kosmických interferometrů</i>	275
<i>Kolik jich je?</i>	276
<i>Víte, že</i>	278
 11. Kosmické záření	281
<i>Objev kosmického záření</i>	282
<i>Sekundární spršky</i>	287
<i>Složení, energie a původ částic</i>	290
<i>Velké observatoře</i>	292
<i>Víte, že</i>	296
 12. Magnetická pole ve vesmíru	299
<i>Jak pole vznikají</i>	299
<i>Objekty v galaxiích</i>	301
<i>Galaxie a jejich kupy</i>	306
<i>Nejsilnější pole ve vesmíru</i>	310
<i>Víte, že</i>	312

13. Jak se měří magnetická pole?	315
<i>Synchrotronní emise</i>	316
<i>Zeemanův jev</i>	317
<i>Faradayova rotace</i>	320
<i>Magnetický prach</i>	324
<i>Nepřímá měření</i>,.....	327
<i>Víte, že</i>	327
 Sondy	331
<i>Některé vesmírné agentury</i>	332
<i>Některé družice a sondy</i>,.....	333
 Rejstřík	343
Rejstřík osob	350



Předmluva

Není snad nic krásnějšího než pohled na noční oblohu posetou stříbrnými tečkami hvězd. Kotoučky planet, hvězdokupy, krásné mlhoviny a galaxie můžeme spatřit již v triedru nebo malém dalekohledu. Koho by nelákalo poznat a pochopit tento svět, jehož jsme součástí, probádat divoké krajiny cizích planet, spatřit rodící se hvězdy v rozsáhlých zárodečných mlhovinách nebo se vydat do nejbzdálenějších zákoutí vesmíru. Tyto vzdálené hlubiny dnes prohlížíme obřími dalekohledy, mimořádně kvalitními sondami a přístroji, o kterých mohli naši předchůdci jen snít. A přesto je náš pohled nedokonalý, omezený a zažíváme neustálá překvapení.

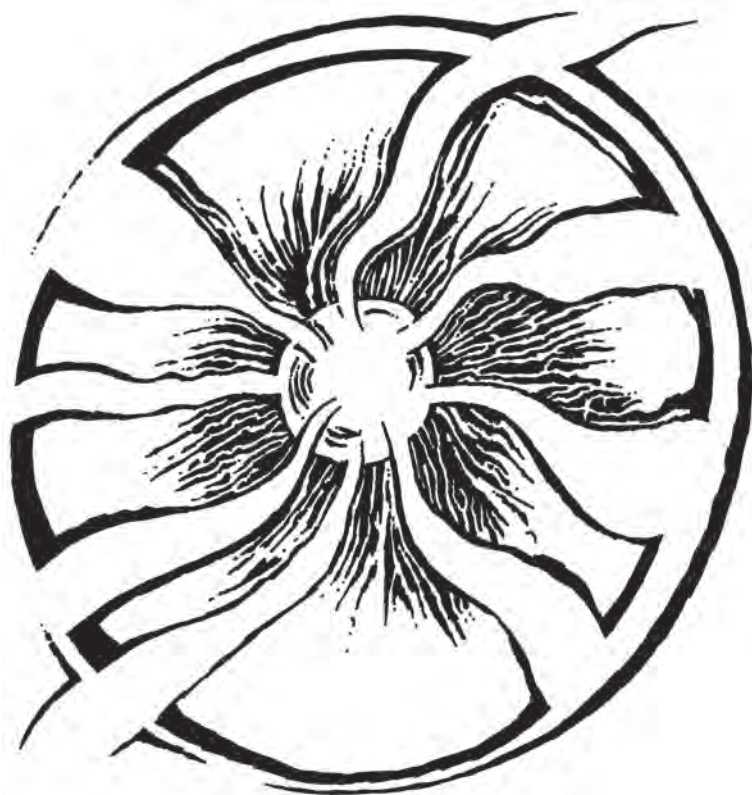
Především je často mylná naše interpretace věcí zdánlivě samozřejmých. V průběhu noci se hvězdy na obloze pohybují od východu na západ. Jak přirozená byla představa, že jsou zavěšeny na nebeské klenbě rotující kolem Země. Až Mikuláš Koperník, Galileo Galilei a Johannes Kepler na konci 16. století postupně sňali výsadní postavení Země a zavedli heliocentrický systém, ve kterém je středem Sluneční soustavy Slunce.

Byl to jediný omyl? Zdaleka ne a dnes se možná potýkáme s ještě závažnějšími. Pohled dalekohledem nás utvrzuje v tom, že vesmír je složený z hvězd, mlhovin, hvězdokup a galaxií. Přesto současné experimenty ukazují, že látka složená z atomů tvoří pouhých 5 % hmoty a energie ve vesmíru. Vesmír tedy vůbec není to, co vidíme očima a dalekohledy! Je zde 27 % temné hmoty, zatím neznámých částic, které bez zaváhání projdou celou Zemí, aniž by byly zachyceny. Víme o nich z gravitačního působení na hvězdy v galaxiích, na galaxie v kupách galaxií a na světelné paprsky letící bezbřehým vesmírem. Zdaleka největší součástí vesmíru je ale mysteriózní temná energie, jakési fluidum prostupující celý vesmír, které má za následek zrychlenou expanzi vesmíru. Tvoří plných 68 % hmoty a energie ve vesmíru. Situace se opakuje. Zdánlivě jasná fakta – pozorování známých objektů dalekohledy – a úplně jiný výsledek.

Přestože tvoří atomární látka jen 5 % vesmíru, stojí za to o ní psát. Vždyť je to svět, ve kterém žijeme. Jaká je tedy atomární látka ve vesmíru? Zde na Zemi by se mohlo zdát, že převládá skupenství pevné, kapalné a plynné. A opět omyl, do třetice. Pokud látku zahříváme ze skupenství pevného, rozruší se nejprve vazby pevné látky a stane se kapalinou. Při dalším ohřevu dojde ke změně na plyn. A co se bude dít, pokud látku zahřejeme na ještě vyšší teplotu? Některé elektrony opustí atomární obaly a začnou se volně pohybovat. V tom okamžiku látka zcela změní své chování. Objeví se v ní volné náboje – uvolněné elektrony a kladně nabitě ionty. Vzniká plazma, které na rozdíl od plynu reaguje na elektrická a magnetická pole a samo je schopno je vytvářet. Ve vesmíru k uvolnění elektronů ani nepotřebujeme vysoké teploty, ionizaci chladných mlhovin může zajistit ultrafialové záření blízkých hvězd. Právě plazma tvoří největší část atomární látky ve vesmíru, snad až 99 %. Hvězdy jsou obří horké plazmové koule, mlhoviny tvoří rozsáhlá chladná plazmová oblaka. Stav látky, který na Zemi známe jen z kanálů blesků, ionosféry a našich laboratoří, je ve vesmíru zcela běžný.

Právě o plazmatu a magnetických polích ve vesmíru je tato knížka. Podíváme se na náš svět jinak, než je obvyklé. Budeme ho sledovat z hlediska elektromagnetických dějů. A bude to pohled, který nám odhalí netušená zákoutí Sluneční soustavy, budeme sledovat cestu slunečního větru, polární záře, radiální pásy i rozsáhlou pavučinu vzájemně propojených magnetických polí Slunce, planet a měsíců. Povíme si o tom, jak podobné sluneční soustavy vznikají a kolik jich dnes známe. A na závěr se vydáme za magnetickými poli a plazmatem ve vzdálenějším okolí. Naši cestu ukončíme u magnetarů, nejsilnějších magnetů ve vesmíru.

Od prvního vydání této knihy uplynulo už čtrnáct let. Druhé vydání, které máte právě v ruce, je zcela přepracované, doplněné o nové objevy a souvislosti, které se v mezidobí vynořily. Kniha obsahuje i tři nové kapitoly, které v prvním vydání z roku 2007 nebyly.

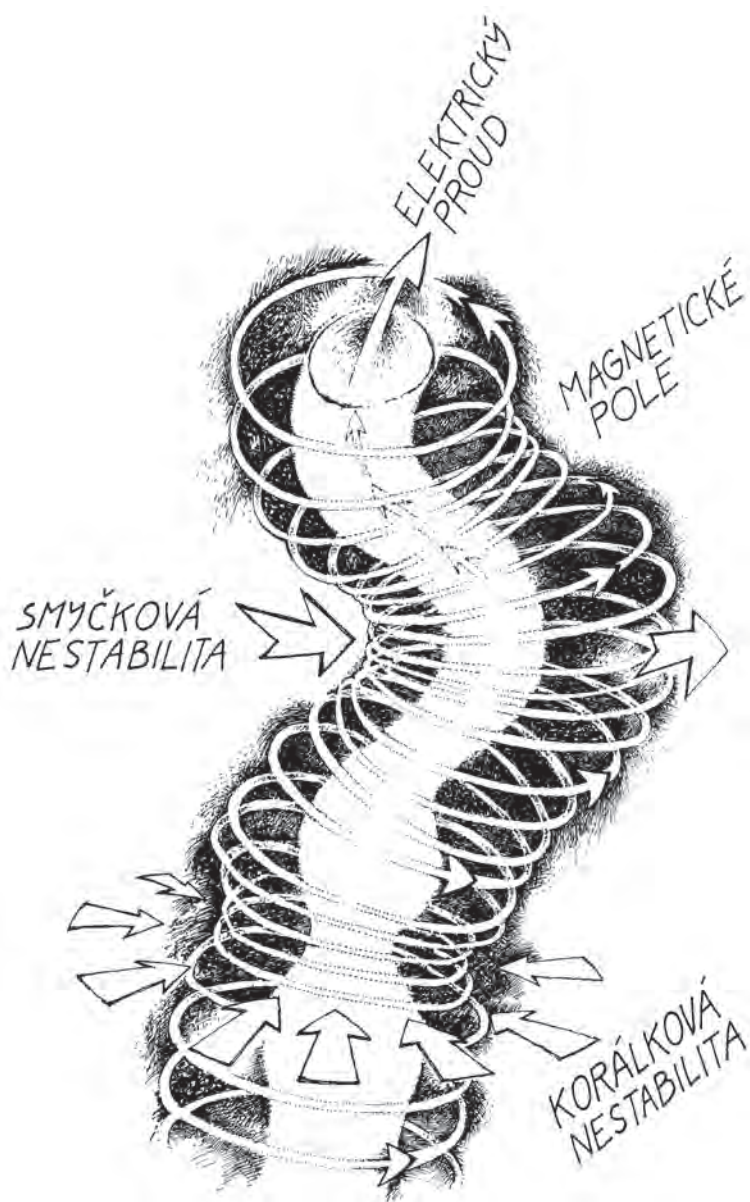


1. Plazma a všude jenom plazma

„Slovo plazma budeme používat k popisu oblasti obsahující vyrovnaný počet iontů a elektronů.“
Irving Langmuir, americký fyzik, 1928

Co je plazma? Jednoduše řečeno jde o látku, ve které se nachází volné náboje. Atomární obaly jsou alespoň částečně zbavené elektronů, které se volně pohybují plazmatem. Je-li plazmový útvar dosti rozsáhlý, nemusí být stupeň ionizace příliš veliký. Právě volné náboje způsobují, že se plazma chová zcela jinak než plyn. Plazma je vodivé a silně reaguje na elektrická a magnetická pole. V makroskopických objemech je v průměru vždy stejné množství kladných i záporných částic. Navenek se plazma proto jeví jako neutrální. Plazma je schopné svými pohyby vytvářet elektrická a magnetická pole a na tato pole reagovat. Jde o kolektivní vlastnost plazmatu jako celku. První, kdo zavedl slovo plazma pro popis ionizovaného plynu, byl americký chemik a fyzik Irving Langmuir (1881–1957), zaměstnanec laboratoře *General Electric Research Laboratory*. Učinil tak ve svém článku z roku 1928, věnovaném výbojovým trubicím, jejichž vlastnostem se věnoval. Byla to poetická doba psaní článků na psacím stroji, doplněných ručně malovanými obrázky. V českém jazyce používáme střední rod, hovoříme tedy o plazmatu ve vesmíru. Pokud přijde hovor na plazmu v ženském rodě a bavíme se o plazmě, jde na rozdíl od vesmírného plazmatu o tekutinu, která je součástí lidského těla.

Jaké jsou základní projevy plazmatu? Plazma má tendenci vytvářet lineární a plošné útvary: různě zprohýbaná plazmová vlákna a stěny. Pro gravitační působení jsou typické kulové útvary – tvar hvězd



a planet je dán gravitační silou. Pro elektromagnetickou interakci jsou naopak typické útvary lineární a plošné. V plazmatu dochází k mnoha zajímavým jevům. Typické jsou driftы neboli pohyby nabitých částic kolmé na magnetická a další silová pole. Plazmatem se může šířit velké množství nejrozličnějších vln – od magnetozvukových, které jsou analogií zvukových vln v plynech, až po elektromagnetické vlny mnoha druhů. Různé vlny jsou plazmatem také snadno generovány. V plazmatu dochází k celé řadě nestabilit, které mohou mít za následek například krátkodobé vyzaření značného množství energie doprovázené vznikem některých charakteristických struktur. K plazmatu neodmyslitelně patří vyzařování, vytváření elektrických dvojvrstev, rázových vln, urychlování nabitých částic na značné energie, driftování částic a mnoho dalších zajímavých jevů. Než se vydáme na průzkum Sluneční soustavy, pojďme se seznámit alespoň s některými z nich.

Plazmová vlákna a stěny

Vláknité struktury patří k nejběžnějším útvarům v plazmatu. V nejjednodušší situaci teče proud v ose vlákna a kolem něho se vytváří magnetické pole v azimutálním směru (ve směru kolem vlákna). Vzniklé magnetické pole působí silou na proudové vlákno a snaží se ho smrštít. Po čase se ustaví rovnováha mezi tlakovou silou samotného plazmatu, která se snaží plyn rozepnout, a silou, která vlákno stlačuje. Tato rovnováha je nestabilní a vlákno se rychle rozpadá. Stačí nepatrné zúžení, kde se automaticky vytvoří silnější pole tlačící na vlákno. Zúžení se dále prohlubuje, až dojde k přetržení vlákna. Nestabilita tohoto druhu se nazývá *korálková nestabilita*. Při prohnutí vlákna vznikne *smýčková nestabilita*. Na vnitřní straně prohnutí jsou magnetické siločáry¹ hustší a tlak magnetického pole počáteční prohnutí stále zvětšuje.

1 **Magnetická siločára** – slangové označení pro magnetickou indukční čáru, linii, v jejímž směru se zorientují magnetické piliny (drobné magnetické dipóly, střílky kompasů atd.) rozmístěné v okolí zdroje magnetického pole. Pojem siločára je poněkud zavádějící, protože v jejím směru síla v magnetickém poli nepůsobí (působí kolmo na magnetické pole). Přesto se hojně užívá.

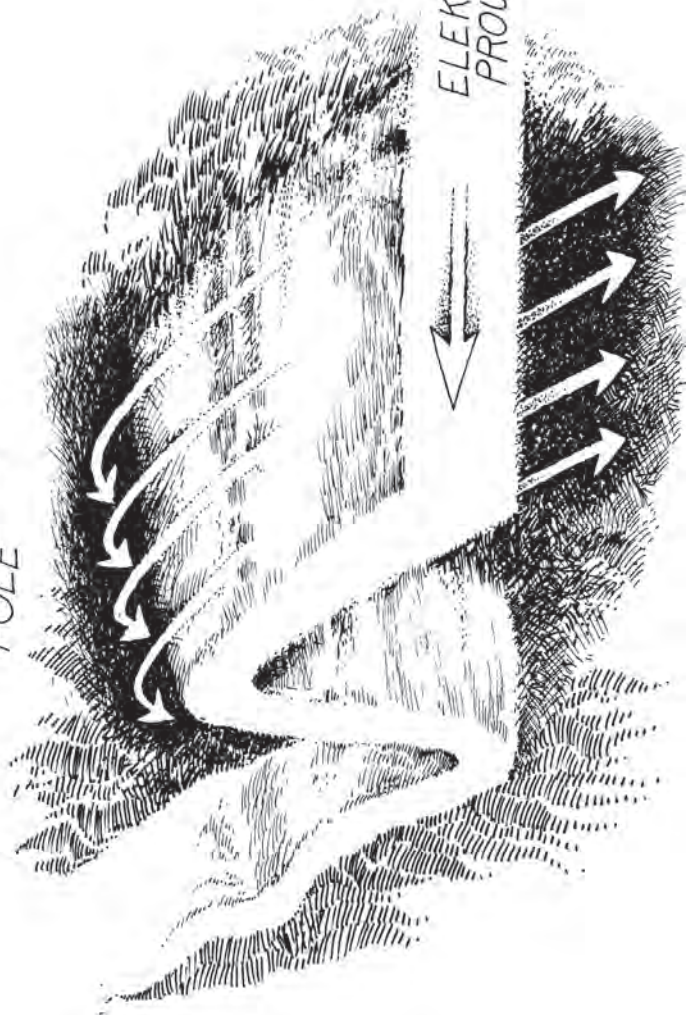
Vlákná, ve kterých teče proud kolem osy, jsou jak malá hádátka. Kroutí se, vlní, mění svojí tloušťku a tvar a brzy se rozpadají. V pozemských laboratořích lze vytvořit i vlákna, která mají opačnou konfiguraci pole a proudu. Proud zde teče kolem plazmového sloupce (to lze zařídit pomocí cívky či vhodné elektrody) a magnetické pole míří ve směru osy. Obě tyto mezní konfigurace jsou nestabilní a v laboratořích se nazývají *pinče* (z anglického „*pinch*“, tj. stlačit, stisknout). Pokud teče proud v ose, hovoříme o *zet pinči*; pokud teče kolem vlákna, hovoříme o *theta pinči*.

Plazmové vlákno se stane poměrně stabilním útvarem, má-li proudová hustota jak osovou, tak azimutální složku. Osová složka proudu generuje azimutální pole a azimutální složka proudu generuje osovou pole. Siločáry pole vypadají jako vlákna krouceného provazu. V tomto případě hovoříme o *helikálním (šroubovicovém) vlákně*. Má-li vlákno dostatek času, deformuje se do šroubovicové struktury samovolně. Ideálním stavem je situace, kdy magnetické siločáry míří ve směru proudové hustoty (lze to říci i naopak: proud teče podél magnetických siločar). V tomto případě hovoříme o *bezsilové konfiguraci*. Na nabitě částice pohybující se podél magnetických siločar totiž žádná síla nepůsobí, ta působí jen na částice, které se pohybují kolmo na siločáry. Bezsilová konfigurace vlákna má nejmenší možnou energii a proudy tekoucí podél siločar se nazývají *Birkelandovy proudy* na počest norského fyzika Kristiana Birkelanda (1867–1917), který předpověděl existenci takových proudů v ionosféře Země. První detekce Birkelandových proudů pochází ale až z doby po jeho smrti. Objeveny byly v roce 1966 navigačním satelitem 1963–38C. Podrobnější průzkum provedla družice Triad v roce 1976. Dnes známe Birkelandovy proudy tekoucí podél siločar magnetického pole v řadě astronomických objektů.

Často jsou pozorovány propletené dvojice helikálních vláken. To je způsobeno tím, že dvě vlákna se shodně orientovaným proudem se na velkých vzdálenostech přitahují (tak jako dva rovnoběžné vodiče protékané souhlasnými proudy). Na malých vzdálenostech dochází k odpuzování způsobenému azimutální složkou proudu. Tím je umožněn vznik energeticky vázaných dvojšroubovic.

MAGNETICKÉ
POLE

ELEKTRICKÝ
PROUD



Kromě nejznámější vláknité struktury se plazma může formovat do proudových vrstev neboli *plazmových stěn*, držených vlastním magnetickým polem (viz obrázky na předchozí straně). Tyto útvary známe i z pozemských pozorování, například v okolí 70° jižní i severní magnetické šířky se vyskytují svislé plazmové stěny s maximální tloušťkou několika kilometrů a lineárními rozměry v tisících kilometrů. Stěny jsou orientovány podél siločar zemského magnetického pole. Ve vrstvě probíhá výboj s proudovou hustotou přibližně $30 \mu\text{A}/\text{m}^2$, který generuje vlastní magnetické pole stlačující stěnu. Toto vlastní pole přebírá úlohu azimutálního pole u normálního vlákna. Jedním z projevů stěn jsou známé polární záře způsobené excitací atomů a molekul atmosféry.

Kde všude můžeme ve vesmíru tato vlákna a stěny nalézt? Na Zemi je to samozřejmě v kanálech blesků, které mají průměr kolem pěti centimetrů a délku několika kilometrů. Proud protékající plazmatem má stovky kiloampérů a zahřeje kanál blesku na teplotu přibližně 30 000 stupňů Celsia (to je pětikrát vyšší teplota než na povrchu Slunce). Vzniklá plazmová vlákna tvořící kanál blesku se udrží několik málo sekund a poté se rozpadají. Celková energie v typickém blesku je přibližně 6×10^8 joulů. Obdobné blesky na Venuši mají energii 2×10^{10} joulů a na Jupiteru dokonce 3×10^{12} joulů. Opusťme nyní blesky a podívejme se dále. Stěny polárních září známe nejenom na Zemi, ale například i na Jupiteru a Saturnu. Birkelandovy proudy tekoucí podél siločar planetárního pole se na Jupiteru uzavírají přes měsíc Io. Vlákna nalezneme v kometárních ohonech, stejně jako v ionosféře Venuše, kde byla detekována plazmová vlákna délky 20 kilometrů.

Nejvíce vláknitých struktur ale nalezneme na Slunci. Je doslova rájem plazmových fyziků, kde se setkáváme s mnoha plazmatickými projevy. Proudové nabitých částic tekoucí podél siločar lokálních magnetických polí intenzivně září v ultrafialovém oboru a umožňují nám snadnou rekonstrukci tvaru magnetických siločar. Ale i v optickém oboru jsou dobře patrné protuberance ovládané magnetickým polem. V dalších oborech spektra můžeme ve slunečním plazmatu spatřit celou řadu nejrůznějších lineárních útvarů.



Šroubovicové (helikální) vláknité struktury pozorujeme v mnoha mlhovinách. Zde nemáme přímá pozorování, která by potvrdila, že jde o vlákna s Birkelandovými proudy, ale existují nepřímé indicie: pozorování polarizovaného² synchrotronního záření, které vzniká jedině v oblastech s magnetickými poli, a detekce projevů vysoce energetických částic, které mohou být urychlovány ve vláknitých strukturách, bez nichž si lze plazma sotva představit.

Také v blízkosti středu Galaxie bylo pozorováno několik vláken o délce asi 200 světelných roků, která připomínají pokroucená lana a mají tedy helikální strukturu. Pravděpodobně jde také o plazmové útvary udržované magnetickým polem. Odhad velikosti polí a proudů je značně problematický a je založen jen na nejisté rozměrové extrapolaci. Vláknité struktury nacházíme i v okolí aktivních jader jiných galaxií a ve výtryscích kvazarů. Je pravděpodobné, že opět vznikají elektromagnetickou cestou.

2 **Polarizace záření** – rovina kmitů elektrického pole. Záření může mít rovinovou polarizaci, kruhovou polarizaci (rovina kmitů se stáčí), nebo být nepolarizované (rovina kmitů se chaoticky mění).

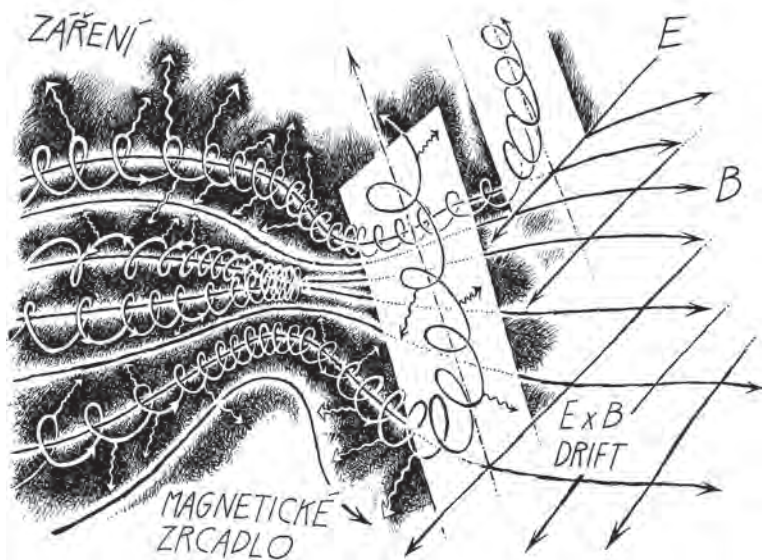
Gyrace, drifty a zrcadla

Pojďme si nyní popsat, jak se vlastně pohybují nabitě částice v přítomnosti magnetických polí. Na nabitou částici působí Lorentzova síla³, která je kolmá jak na magnetické pole, tak na rychlost částice. Výsledkem je zakřívování trajektorie částice kolmo na pole. V dokonale homogenním poli by se nabitá částice pohybovala po kružnici kolem siločar. Ve směru siločar žádná síla nepůsobí, v tomto směru se proto částice pohybuje zcela volně. Měla-li na počátku nenulovou rychlost ve směru siločar, tuto rychlost si ponechá v průběhu celého pohybu a výsledkem bude pohyb po šroubovici kolem siločar magnetického pole.

Tento základní pohyb má hned tři názvy – říkáme mu *gyrační pohyb*, *cyklotronní rotace* nebo *Larmorova rotace*. Slovo gyrace pochází z latinského *gyrus*, tj. kruh, okruh. Cyklotron je urychlovač částic, ve kterém se nabitě částice pohybují po kružnicích v magnetickém poli. A Larmorova rotace je pojmenována podle irského fyzika Josepha Larmora (1857–1942), který se zabýval nejenom pohybem nabitých částic v magnetickém poli, ale i jejich zářením a nezávisle na Lorentzovi vypočetl relativistickou kontrakci délek při pohybu těles. Jen pro představu: gyrační pohyb typických elektronů v magnetickém poli Země má poloměr řádově deset centimetrů a gyrační pohyb typických protonů stovek metrů.

Je-li pole nehomogenní, je pohyb samozřejmě složitější. V místech, kde se zhušťují siločáry magnetického pole, působí i podélná síla, která se snaží částici vytlačovat z hustších oblastí pole. Výsledkem je zmenšení stoupání šroubovice, po které částice krouží kolem siločar. Pokud částice neměla dostatečně velkou rychlost ve směru siločáry, může ji zhušťující se pole zastavit a odrazit zpět. Tomuto jevu se říká *magnetické zrcadlo*. V zemském magnetickém poli k jevu magnetického zrcadla dochází v polárních oblastech, kde je magnetické

3 **Lorentzova síla** – síla působící v magnetickém poli na nabitou částici. Tato síla je kolmá jak na magnetické pole, tak na rychlost částice. Nepůsobí na částice pohybující se podél siločar. Lorentzova síla je pojmenována podle holandského fyzika Hendrika Antoonu Lorentze (1853–1908).



pole zemského dipólu nejsilnější. I ve vzdálenějším vesmíru jsou magnetická pole tvořící magnetická zrcadla, od nichž se odrážejí nabité částice. Pokud se zrcadlo pohybuje proti částici, má částice po odrazu vyšší energii než před ním. Jde o jeden z více mechanismů urychlování částic ve vesmíru. V laboratoři se magnetická zrcadla využívají k odražení unikajícího plazmatu zpět do místa, kde ho potřebujeme pro experimenty.

Pokud se v plazmatu kromě magnetického pole objeví i další pole, například elektrické nebo gravitační, dochází k dalšímu typu pohybu – k *driftu*. Základní podmínkou vzniku driftu je, aby se magnetické i další pole v čase ani v prostoru příliš neměnily na jedné Larmorově otočce – tj. pole se nesmí příliš měnit ani za dobu jedné Larmorovy otočky, ani na rozměrech Larmorovy kružnice. Pokud se částice pohybuje v přítomnosti dalšího pole, mění se její rychlost v důsledku zákona zachování energie. A měnící se rychlost znamená proměnný Larmorův poloměr základního gyračního pohybu. Výsledek pohybu po kružnici s proměnným poloměrem je fascinující.

Částice se začne odvalovat konstantní rychlostí kolmo na obě pole. Tento pohyb nazýváme *driftem*, rychlost odvalování *driftovou rychlostí*. Křivku, po které se částice pohybuje, nazývají matematici *trochoidou*. Nejjednodušší z trochoid je *cykloida* – tu dobře známe, opisuje ji například ventilek na pneumatice jedoucího automobilu. Pokud by automobilu při zrychlování nebo při brzdění na ledu prokluzovala kola, ventilek by opisoval obecnou trochoidu.

Pokud je dalším polem elektrické pole, nezávisí výsledná driftová rychlost na náboji částice a elektrony i ionty se odvalují stejným směrem. Pokud jde o gravitační pole, driftová rychlost závisí na náboji částice: elektrony a ionty se odvalují na opačné strany a vzniká elektrický proud. V přítomnosti gravitačního a magnetického pole tedy můžeme očekávat vznik různých elektrických proudů. Dodatečným polem způsobujícím drift mohou být i odstředivé síly, které vznikají, když se částice pohybují podél zakřivené siločáry. Tak je tomu například u zemského pole, kde se částice tímto způsobem pohybují a přitom vzniká odstředivá síla ve směru od středu Země. Výsledkem je pomalý drift nabitých částic ve směru rovnoběžek, kam míří kolmice na siločáry a odstředivou sílu. Záporné elektrony driftují na východ a kladné ionty na západ.

Částice kroužící kolem siločar nutně září. Kolem pohybující se nabitě částice totiž vzniká magnetické pole. Pokud se ale částice pohybuje po kružnici nebo šroubovici, mění směr pohybu a s tím se mění i magnetické pole kolem ní. Časově proměnné magnetické pole dává vzniknout časově proměnnému elektrickému poli, to zase magnetickému a tak dále. Od nabitě částice vykonávající gyrační pohyb se šíří elektromagnetická vlna. Toto záření nazýváme *cyklotronní* nebo (při vyšších energiích) *synchrotronní* záření⁴. Právě analýzou synchrotronního záření z různých objektů můžeme zjistit, v jakých magnetických polích se částice pohybovala.

4 **Cyklotronní záření** – záření generované elektrony obíhajícími kolem magnetických siločar. Ve spektru záření dominuje cyklotronní frekvence a její násobky. **Synchrotronní záření** – záření generované relativistickými elektrony obíhajícími kolem magnetických siločar. Jde o záření s výraznou polarizací, ze které je možné určit směr magnetického pole. Záření je polarizováno v rovině dráhy elektronu, soustředěno do úzkého kužele, vyzařováno v původním směru pohybující se částice a má spojité spektrum.

Rázové vlny a dvojvrstvy

Rázové vlny jsou oblasti, ve kterých se skokem mění některé parametry prostředí. Každý asi někdy pozoroval vodu tekoucí z kopce po vozovce a typické schodovité útvary na vodní hladině, rázovou vlnu na přídi lodi nebo slyšel kuželovitou rázovou vlnu za letadlem letícím nadzvukovou rychlostí. I v plazmatu se velmi snadno vytvářejí rázové vlny, na kterých se skokem mění tlak, koncentrace částic, teplota nebo velikost a směr rychlosti částic a magnetického pole. Typické čelní rázové vlny vznikají při nalétávání částic slunečního větru na magnetosféry planet – planeta si razí cestu slunečním větrem a vzniká obdobná rázová vlna jako u lodi brázdící mořskou hladinu. Částice slunečního větru jsou na této čelní rázové vlně odklány do boků a skokem se zde mění magnetické pole.

Ve vzdálenosti přibližně 90 astronomických jednotek⁵ od Slunce (třikrát dále než Neptun) vzniká rázová vlna slunečního větru, tzv. *terminační vlna*. Na terminační vlně se skokem mění rychlost částic slunečního větru z nadzvukové na podzvukovou. Blíže si o ní povíme ve čtvrtém příběhu věnovaném slunečnímu větru.

Jiným příkladem rázové vlny je čelní rázová vlna před hvězdou pohybující se zárodečnou mlhovinou nebo mezihvězdným prostředím. Skokem se na ní mění koncentrace nabitých částic a magnetického pole. Rázové vlny jsou dobře patrné zejména na snímcích v ultrafialovém oboru. Na doprovodné kresbě (str. 24) vidíte rázovou vlnu před mladou hvězdou LL Orionis; vzniká interakcí intenzivního hvězdného větru s prostředím mlhoviny v Orionu, kterým se hvězda pohybuje. Rozměr rázové vlny je přibližně polovina světelného roku. Kresba byla vytvořena podle fotografie pořízené Hubblovým vesmírným dalekohledem roku 1995.

Poprvé se poměry na rázových vlnách zabývali skotský matematik, inženýr a muzikant William John Macquorn Rankine (1820–1872) a francouzský inženýr Pierre Henry Hugoniot (1851–1887).

⁵ **Astronomická jednotka** – jednotka vzdálenosti, přibližně jde o střední vzdálenost Země od Slunce, tedy 150×10^6 km. Astronomická jednotka se označuje symbolem au.

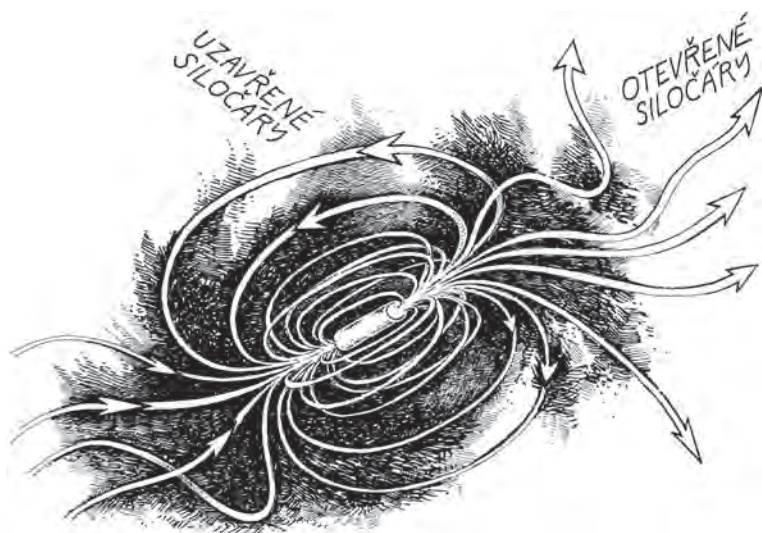


LL Orionis

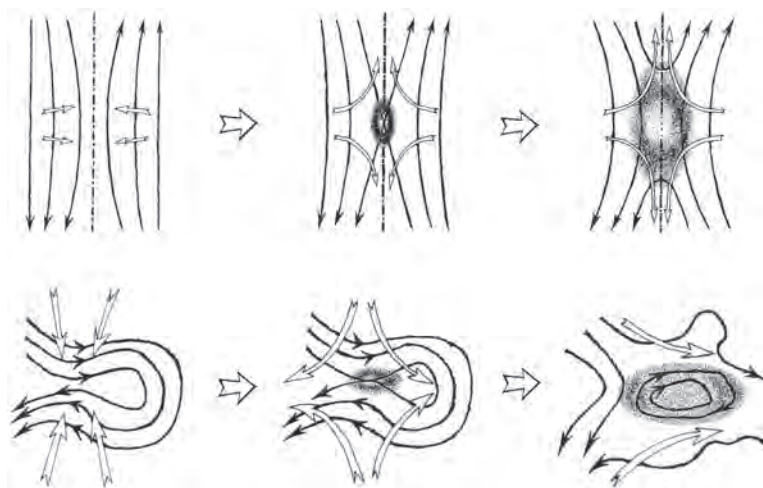
Výsledkem jejich práce byla soustava podmínek pro skoky veličin na rázové vlně, které se dnes nazývají Rankinovy–Hugoniotovy podmínky. Původně je Rankine a Hugoniot formulovali jen pro hydrodynamiku, dnes jsou zobecněny i na plazma.

Velmi specifickým skokem parametrů plazmatu je tzv. *dvojvrstva*. V literatuře se většinou označuje symbolem DL z anglického „*Double Layer*“. Dvojvrstvy se vyskytují v hojném počtu v plazmatu všude tam, kde teče elektrický proud způsobený vzájemným pohybem elektronů a iontů. Při tomto pohybu se může projevit nestabilita, která vede ke vzniku skoku elektrického potenciálu (elektrický potenciál se v malé prostorové oblasti mění z jedné hodnoty na druhou). Nabité částice na schodovitý průběh elektrického potenciálu reagují tak, že na vyšší straně potenciálu vznikne vrstva částic s převažujícím kladným nábojem a na nižší straně potenciálu se vytvoří obdobná vrstva se záporným nábojem. Tato konfigurace dala dvojvrstvě její jméno. Situace poněkud připomíná elektrody deskového kondenzátoru, k rozdělení náboje ale dojde samovolně, bez přítomnosti jakýchkoli elektrod či vnějších zásahů.

Dvojvrstvy mohou být dlouhodobě stabilními útvary. Poprvé je detekoval vynikající americký chemik a fyzik Irving Langmuir (ten, který dal plazmatu jeho jméno) v roce 1929 v laboratorním plazmatu; o tři roky později získal Nobelovu cenu za chemii. Na dvojvrstvách mohou být urychleny elektrony a ionty na značné rychlosti a magnetická energie pole v okolním plazmatu se zde může přeměnit na kinetickou energii částic. Dvojvrstvy se vyskytují všude tam, kde plazmatem tečou elektrické proudy. Nacházíme je v magnetosférách planet. Například na několiknásobku zemského poloměru vznikají ve dvojvrstvách energetické ionty. Dvojvrstvy pravděpodobně vznikají ve slunečních filamentech protékaných proudem. Zde se odhaduje skok potenciálu až na 10^{11} voltů a energie protonů urychlených ve dvojvrstvě na několik desítek gigaelektronvoltů. Pokud vznikají dvojvrstvy v plazmových vláknech v blízkosti jader galaxií, mohl by být skok potenciálu až 10^{17} voltů a uvolňovaný výkon řádově 10^{37} joule za sekundu. Výkon uvolňovaný na dvojvrstvě je součinem skoku potenciálu a proudu tekoucího dvojvrstvou.



Každý zdroj magnetického pole (na obrázku jde o dipól) má jak otevřené, tak uzavřené siločáry. Otevřené siločáry zajišťují komunikaci s okolím.



V horní řadě obrázků dochází k přepojení v oblasti opačně orientovaných siločar. V dolní řadě jde o smyčku siločar. Po přepojení vznikne plazmoid. Plnou čarou je znázorněno magnetické pole, dutými šipkami pohyb plazmatu.

Přepojení (rekonekce)

Dalším z významných jevů v plazmatu je *přepojování magnetických siločar* neboli rekonekce. Může jít o vzájemné propojování siločar z různých zdrojů nebo o náhlou změnu prostorového uspořádání siločar do energeticky výhodnější konfigurace. Přímé pozorování rekonekce magnetických siločar Země se podařilo čtveřici družic Cluster⁶ v roce 2001.

Představme si nejprve obyčejnou střelku kompasu nebo tyčový magnet. Siločáry vycházejí ze severního pólu a vracejí se do jižního pólu. To by byl ideální obrázek, pokud by v okolí nebyl žádný jiný zdroj magnetického pole. Tomu tak ale nikdy zcela není. Podívejte se na obrázek. Siločáry vycházející v blízkosti osy magnetu se nevracejí do druhého pólu – jde o otevřené siločáry, které se napojují na magnetické siločáry Země. Právě proto ukazuje kompas k severu: část siločar se do střelky nevrací, ale je propojena se siločarami zemskými a střelka se do tohoto směru pootočí.

Obdobná je situace v celé Sluneční soustavě. Magnetická pole jednotlivých zdrojů jsou vzájemně provázána a vytváří jakousi zvláštní obří pavučinu magnetických polí Sluneční soustavy. Například u Země se jen některé siločáry vracejí do zemského dipólu. V polárních oblastech jsou *otevřené siločáry*, které míří do zemského magnetického ohonu nebo se přímo napojují na siločáry sluneční.

Každý z nás asi někdy viděl elektrický zkrat. Proud si našel výhodnější cestu, zajiskřilo to a uvolnila se energie v podobě tepla. Něco obdobného je možné i v magnetickém poli. Pokud například siločáry v určité oblasti míří proti sobě, je možné, aby se přepojily do energeticky výhodnější konfigurace. Základní podmínkou je, aby v této oblasti bylo plazma s konečným odporem, které převezme uvolněnou energii. K takovému jevu dochází velmi často na Slunci.

6 **Cluster** – čtveřice stejných družic pojmenovaných podle latinsko-amerických tanců (Rumba, Salsa, Samba a Tango) vypuštěných v roce 2000 Evropskou kosmickou agenturou. Kolem Země letí ve vzájemné formaci ve vrcholech čtyřstěnu (vzdáleny 5 000 až 20 000 km) a provádějí dosud nejdetailnější prostorová měření parametrů slunečního větru a jeho interakce s magnetosférou Země.

Přepojení magnetických siločar je doprovázeno vzplanutím v ultrafialovém a rentgenovém oboru. Někdy se v místě přepojení vytvoří i plazmový útvar se sbalenými magnetickými poli, který je vymrštěn na cestu Sluneční soustavou. Magnetické pole tohoto *plazmoidu* sleduje jeho pohyb – někdy říkáme, že pole je *vmrznuté* do plazmatu. Pokud si to plazmoid namíří k Zemi, máme se po jeho střetu s naší magnetosférou na co těšit: můžeme zažít magnetické bouře, kdy se střelka kompasu podivně hýbe a ne a ne zamířit k severu, nebo uvidět rozsáhlé polární záře. Ale o tom až v příští kapitole.

Vlny v plazmatu

Plazmatem se může šířit velmi mnoho různých druhů vln na širokých škálách frekvencí. Jednotlivé částice plazmatu oscilují přirozeným způsobem na tzv. *plazmové frekvenci*⁷. Ta závisí především na hmotnosti částice. Lehké částice jsou pohyblivější a jejich charakteristická frekvence je vyšší než u částic těžších. Plazmová frekvence iontů je proto nižší než plazmová frekvence elektronů. Plazmová frekvence nabitých prachových částic je mimořádně nízká – hovoříme o *ultranízkofrekvenčních vlnových modech*, které mohou způsobit například kolaps části mlhoviny do globule, ze které později vznikne hvězda.

Přítomnost magnetického pole způsobuje anizotropní chování plazmatu: nabitě částice se jinak pohybují podél pole a jinak napříč polem. Vzniklé vlnoplochy již nemohou být kulové, jak jsme zvyklí u plynů, ale mají komplikovanější tvar.

Vlny v plazmatu lze rozdělit do dvou výrazných komplexů. První skupina vln souvisí s pohyby iontů. Jde v podstatě o analogii zvukových vln v plynech, které se chovají poměrně jednoduše: kinetická energie pohybu se mění v tlakovou energii a naopak. Vzniká periodicky se šířící podélná vlna; částice kmitají podél směru šíření. To se projeví periodickými změnami hustoty, tlaku a teploty plynu.

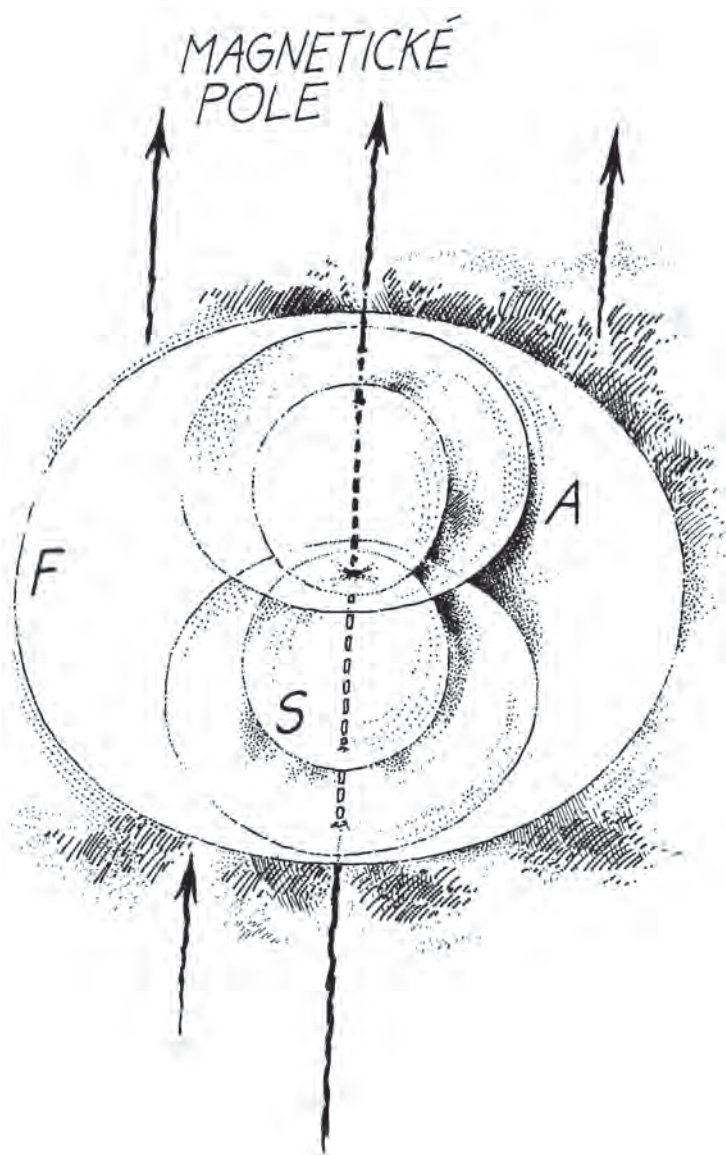
⁷ **Plazmová frekvence** – charakteristická frekvence oscilací a vln v plazmatu, která souvisí s pohyby nabitých částic. Plazmová frekvence závisí na koncentraci a hmotnosti částic. Rozlišujeme plazmovou frekvenci elektronů (je důležitá při šíření elektromagnetických vln) a iontů či protonů (je důležitá při šíření zvukových vln).

V plazmatu ovlivňuje šíření vlny navíc magnetické pole. Energie se přelévá mezi kinetickou složkou, tlakovou složkou a energií magnetického pole. Výsledkem jsou dvě typické rychlosti šíření vlny: rychlost zvuku (souvisí s přeléváním energie mezi kinetickou a tlakovou složkou) a Alfvénova rychlost (souvisí s přeléváním energie mezi kinetickou a magnetickou složkou).

Dokážete si představit energii vlnění v magnetické složce? Je to celkem jednoduché – magnetické siločáry se buď periodicky prohýbají, nebo se v prostoru pravidelně opakují místa hustších a řidších siločar. Druhé možnosti říkáme *kompresní vlna*. Zvuková vlnoplocha již není kulová, ale je anizotropní a skládá se dokonce ze tří vlnoploch, kterým říkáme *magnetoakustický komplex* (obr. na str. 30). Kdybychom se nacházeli v mlhovině a naslouchali ve správném směru, uslyšíme zvuk natříkrát. Tyto tři vlny se nazývají Alfvénova vlna (A), rychlá magnetozvuková vlna (F, z anglického „Fast“) a pomalá magnetozvuková vlna (S, z anglického „Slow“). Kolmo na pole se šíří jen F vlna. Podél pole se nejrychleji šíří F vlna a nejpomaleji S vlna. Při slabých magnetických polích vlny A a S zaniknou a vlnoplocha F bude mít přibližně kulový tvar, tak jako běžný zvuk. Zvuk v plazmatu nebude nesen neutrálními atomy, ale ionty.

Druhá skupina vln, vysokofrekvenční elektromagnetické vlny, souvisí s pohybem elektronů. Při průchodu elektromagnetických vln ionizovaným prostředím hraje klíčovou roli plazmová frekvence elektronů. Vlny vyšších frekvencí, než je plazmová, plazmatem procházejí. Vlny nižších frekvencí jsou pohlcovány kmitajícími elektrony a plazmatem neprojdou. Tento fakt je známý například z šíření vln ionosférou Země. Nalezením hranice průchodnosti lze určit plazmovou frekvenci elektronů a z ní koncentraci plazmatu.

Pokud je v plazmatu přítomno magnetické pole, je šíření elektromagnetických vln mnohem komplikovanějším jevem. Vlny se šíří zcela jinak podél pole a kolmo na toto pole. Magnetické pole tedy do šíření vln opět vnáší anizotropii. Podél pole můžeme detekovat dvě vlnoplochy: vlnoplochu *levotočivě* a vlnoplochu *pravotočivě* polarizované vlny. Ve směru kolmém na pole se obdobně jako



MAGNETOZVUKOVÉ VLNY

v anizotropních krystalech může šířit tzv. *řádná* a *mimořádná vlna*. Šíření řádné vlny magnetické pole neovlivňuje; opět plazmatem prochází, je-li její frekvence vyšší než plazmová frekvence elektronů, a opět má vlnoplocha kulový tvar. Mimořádná vlna se ale šíří jinak. V okolí plazmové frekvence elektronů je okno propustnosti, se kterým sousedí dvě neprůhledné oblasti.

Záření plazmatu

U vzdálených hvězd a mlhovin je elektromagnetické záření většinou jediným zdrojem informací o objektu. Rozborem záření lze určit rychlost objektu, jeho vzdálenost, teplotu, chemické složení, přítomnost magnetických a elektrických polí i mnoho dalších zajímavých údajů.

Existuje celá řada procesů, kterými elektromagnetické záření vzniká. Popíšme nyní tři nejdůležitější typy elektromagnetického záření. První dva souvisí se změnou velikosti nebo směru rychlosti letící nabitě částice. Pokud se mění jen velikost rychlosti částice, vzniká tzv. *brzdné záření*. Dochází k němu při srážkách elektronů s okolními částicemi. Uvolňovaný výkon je úměrný druhé odmocnině teploty plazmatu a druhé mocnině koncentrace plazmatu. Pro objekty s teplotou od milionu do deseti milionů kelvinů jde o nejvýznamnější kanál odvodu energie.

V přítomnosti magnetického pole se mění směr rychlosti pohybující se částice (pohyb se děje po šroubovicích). Takový pohyb je při nízkých energiích doprovázen vznikem *cyklotronního záření*. Při vysokých energiích (teplotách) plazmatu hovoříme o *synchrotronním záření*. Jde o silně polarizované záření relativistických elektronů pohybujících se v magnetickém poli. Uvolňovaný výkon je úměrný druhé mocnině koncentrace a druhé mocnině teploty částic.

Posledním nejdůležitějším typem záření je *rekombinační záření*. Jde o záření vyslané při pohlcení elektronu iontem nebo neutrálním atomem. Uvolňovaný výkon je opět úměrný druhé mocnině koncentrace, ale je nepřímo úměrný druhé odmocnině z teploty.

Rekombinační záření je podstatné pro plazmové útvary s teplotou přibližně do milionu kelvinů. Důležité je i čárové spektrum vznikající přeskoky elektronů v atomárních obalech.

Elektromagnetické záření ve vesmíru má enormní rozsah vlnových délek. K nejdelším patří rádiové vlny, které jsou delší než 30 cm. Například v polárních oblastech planet s magnetickým polem mohou elektrony generovat i kilometrové záření. Dalším oborem je mikrovlnné záření, které má rozsah od 0,4 mm do 30 cm. Příkladem může být reliktní záření z konce velkého třesku (400 000 let po vzniku vesmíru), kterým je vyplněn celý vesmír a které nám přináší cenné informace o raném vesmíru. V mikrovlnné oblasti vyzařují také mlhoviny, typická je vlnová délka 21 cm odpovídající přechodu mezi dvěma spinovými stavy vodíku. Radiační pásy planet vyzařují i v této oblasti vln. Mikrovlnný obor využívají některé mobilní sítě, satelitní televizní vysílání, systémy GPS pro zjišťování polohy, ale i mikrovlnné trouby pro ohřev nejrůznějších potravin, které většinou pracují na vlnové délce 12,24 cm.

Ještě kratší vlnovou délku má infračervené záření (IR, z anglického „*infrared*“), které má krátkovlnnou hranici na 0,7 μm (700 nm). Člověk vnímá infračervené záření jako teplo. Infračervené kamery běžně využívá policie i vojsko ke zviditelnění předmětů a osob, zejména v noci. Termovize je také docela známá pomůcka – používá se ke sledování úniku tepla z objektů a k úpravám fasád, oken a dveří obytných domů. Prohřívání zanícených dutin tzv. soluxem jste možná již také absolvovali, a co teprve blahodárný vliv tepla na klouby! Infračervené technologie umožňují v medicíně neinvazivně zobrazovat tkáň a tělní tekutiny. V archeologii umožnily snímky v infračerveném oboru nalézt stovky kilometrů silnic a cest, které vystavěly dávno zaniklé civilizace. Když se posadíte k televizi, běžně používáte infračervený dálkový ovladač. Obdobné ovladače využívá i celá řada dalších zařízení.

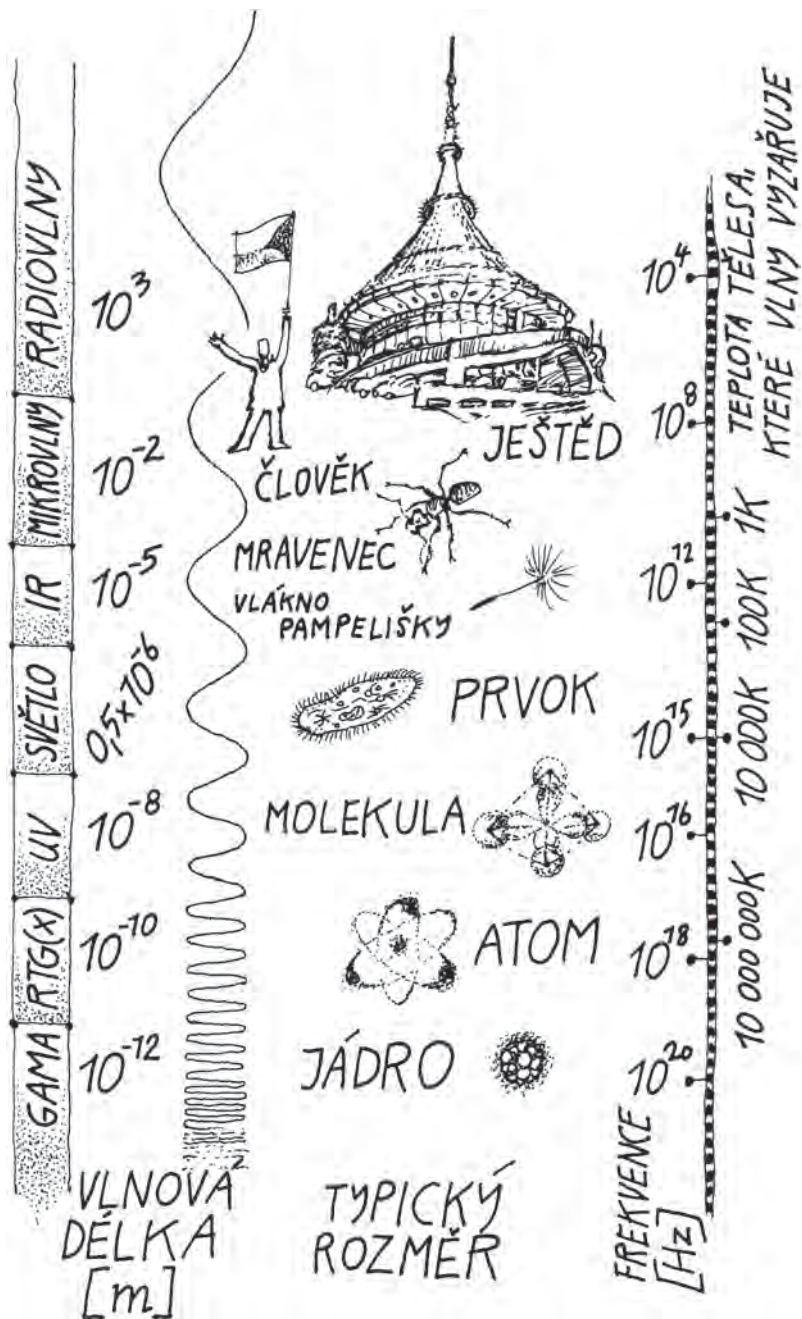
Zajímavé jsou možnosti infračerveného snímkování Země z oběžné dráhy. Z těchto snímků je možné objevit pole plodin napadená škůdci, která více vyzařují v tomto oboru spektra. Dále je možné

lokalizovat oblasti znečištění, zdroje nákaz nebo varovat před takovými klimatickými změnami jako je jev El Niño, kdy dochází k dočasnému ohřevu oceánu a následným změnám množství planktonu.

Infračervená astronomie otvírá zcela nové pohledy na vesmír. Především jde o zobrazování chladných zákoutí vesmíru, například obřích oblaků plynu a prachu, z nichž vznikají hvězdy a planety. Bez infračervené astronomie by nebylo možné porozumět procesům tvorby hvězd a akrece plynu a prachu na planetární objekty. Viditelné světlo často nepronikne prachovými kokony galaxií a infračervené záření je jediným zdrojem informací o jejich tajemném nitru.

Viditelné spektrum má vlnové délky od 400 nm do 700 nm. Po dlouhá staletí bylo viditelné světlo jediným zdrojem informací o vesmíru. Ve viditelném světle pozorujeme mnoho objektů ve vesmíru – planety, hvězdy, hvězdokupy, galaxie a mlhoviny. První nedokonalé dalekohledy jsou dnes nahrazeny obřími kolosy. Největší celistvé zrcadlo má Velký binokulární dalekohled (LBT, *Large Binocular Telescope*) nacházející se na hoře Mount Graham v jihovýchodní Arizoně. Jde o dvojici zrcadel o průměru 8,4 m, takže tento přístroj připomíná obří triedr. Na druhém místě co do velikosti celistvého zrcadla je Velmi velký dalekohled (VLT, *Very Large Telescope*) vybudovaný na hoře La Silla v Atacamské poušti v Chile. Jde o čtveřici dalekohledů, z nichž každý má zrcadlo o průměru 8,2 m. Dosud největším zkonstruovaným přístrojem je dalekohled Hobby-Eberly (HET, *Hobby-Eberly telescope*) v Davisových horách v Texasu. Má desetimetrové zrcadlo složené z 91 šestiúhelníkových segmentů, v provozu je od roku 1996. V roce 2007 byl uveden do provozu stejně veliký dalekohled SALT (*Southern African Large Telescope*) v Jihoafrické republice. V současnosti se v Atacamské poušti staví Extrémně velký dalekohled (ELT, *Extremely Large Telescope*), který bude mít segmentované zrcadlo o průměru 39 metrů. S uvedením do provozu se počítá v roce 2024.

S viditelným pásmem sousedí na krátkovlnné straně ultrafialové záření (UV, z anglického „*ultraviolet*“). Má rozsah od 10 nm do 400 nm. V ultrafialovém oboru svítí naše Slunce, mladé hvězdy,



polární záře, novy a supernovy. V lidském životě se ultrafialové záření využívá k dezinfekci, při ověřování pravosti bankovek, v zubním lékařství k vytvrzení kompozitů, část tohoto záření způsobuje opálení pokožky.

Ještě kratší vlnovou délku má rentgenové záření a gama záření. Jde o obory s vlnovými délkami kratšími než 10 nm. Přístroje pro tento obor musejí pracovat ve vesmíru, atmosféra rentgenové a gama záření nepropouští. Jmenujme alespoň rentgenovou observatoř Chandra nebo dalekohled XMM-Newton. V rentgenovém a gama oboru sledujeme nejenergetičtější procesy ve vesmíru: gama záblesky, jádra aktivních galaxií, výtrysky kvazarů, rentgenové pulzary, magnetary nebo korónu Slunce. Rentgenové paprsky využíváme především v medicíně, ale slouží také jinde, například k neinvazivnímu zjišťování konstrukčních vad. Tak krátkovlnné záření vzniká také při termojaderné fúzi a v jaderných elektrárnách.

Elektromagnetický kolaps

V roce 1957 anglický fyzik Rendel Sebastian Pease a ruský fyzik Stanislav Josifovič Braginskij odvodili nezávisle na sobě teoretickou možnost elektromagnetického kolapsu laboratorního plazmového vlákna. Průchodem proudu vláknem je uvolňována tepelná energie zahřívající vlákno. Tato energie je odnášena ven brzdným zářením. Zářivý výkon s teplotou roste. Při vysokých hodnotách proudu, a tím vysokých teplotách, je zářením odnášeno takové množství energie, že dojde k porušení rovnováhy vlákna. Vnější magnetický tlak převáží tlak látky a plazmové vlákno začíná kolabovat k centru. Přitom se jeho teplota nezvyšuje, naopak může i poklesnout kvůli prudkému odvodu energie zářením. Tento kolaps může zastavit až tlak degenerovaného plynu elektronů nebo neutronů. Scénář elektromagnetického kolapsu velmi připomíná závěrečná stadia vývoje hvězd – gravitační kolaps na bílého trpaslíka či neutronovou hvězdu (včetně závěrečného ochlazení). K elektromagnetickému kolapsu by mělo dojít při proudech větších, než je hodnota přibližně 1,6 MA odvozená Peasem a Braginským. Tato hodnota nezávisí na tvaru ani velikosti vlákna.

Tato teoretická předpověď je značně problematická, protože předpoklady Peaseho-Braginského odvození nejsou nikdy přesně splněny. Odvození bylo provedeno pro opticky řídké plazma zářící pouze rekombinačními procesy, byla uvažována jen normální srážková vodivost plazmatu; vedení proudu může být v extrémních podmínkách ovlivněno různými anomálními jevy, odvod energie může probíhat jinými kanály než zářením. Základním problémem je, že před dosažením Peaseho-Braginského proudu se vlákno rozpadá v důsledku rozvoje nestabilit, nebo se dělí na více vláken menších. Možnost elektromagnetického kolapsu tak i dnes zůstává otevřená. Pokud by se v laboratoři podařilo elektromagnetický kolaps uskutečnit, mohli bychom zkoumat látku v obdobném stavu, v jakém se nachází v nitru bílých trpaslíků a neutronových hvězd.

Rovnováha v gravitaci a plazmatu

Obecně platí velmi jednoduché pravidlo: gravitační interakce vytváří většinou kulově symetrické útvary (například hvězdy), elektromagnetická interakce vytváří lineární a plošné útvary (plazmová vlákna a stěny). Gravitačně vázaný objekt nepotřebuje interakci s okolním světem; vláknem musí protékat proud, který je v laboratoři vytvářen vnějším obvodem a ve vesmíru pohybem částic způsobeným elektromagnetickými poli. Obě konfigurace mohou mít značně rozdílné rozměry. To je dáno rozdílnou intenzitou elektromagnetické a gravitační interakce. Například poměr elektrostatické a gravitační síly pro dva protony je 10^{36} . Díky tomuto faktu můžeme v laboratorních podmínkách vytvářet vlákna malých rozměrů (milimetry, centimetry), ve kterých sledujeme látku s parametry odpovídajícími nitru hvězd. Rovnovážná konfigurace hvězdy je stabilní pro širokou škálu parametrů; rovnovážná konfigurace plazmového vlákna vykazuje celou řadu nestabilit. Přestože jsou plazmová vlákna svou podstatou nestabilní struktury, často přetrvávají značnou dobu, zejména v uspořádání s osovým i azimutálním magnetickým polem ve tvaru charakteristické šroubovice. V poslední době se zdá, že elektromagnetická interakce má pro utváření vesmírných struktur zásadní vliv, a to od nejmenších útvarů až po velkorozměrovou strukturu vesmíru.

Víte, že?

■ Víte, že dodnes není přesně známo, proč Irving Langmuir nazval ionizovaný plyn plazmatem? Pravděpodobně šlo o podobnost plazmatu s tehdy už známou krevní plazmou (obě tekutiny mají volné náboje). Langmuira k tomu mohl ale dovést i fakt, že ionizovaný plyn, který zkoumal, kopíroval tvar výbojové trubice a v řečtině slovo *plasma* znamená tvar.

■ Víte, že cyklotronní emise Jupiteru jsou natolik silné, že se využívají ke kalibraci přístrojů na sondách? Většina sond určených pro mikrovlnný obor testuje své přístroje na signálu z Jupiteru. Příkladem může být evropská mikrovlnná sonda Planck pro výzkum reliktního záření.

■ Víte, že jediným obdobím, kdy ve vesmíru nebylo plazma dominantní, byl temný věk? Takto označujeme období od konce velkého třesku, kdy se volné elektrony staly součástí neutrálních atomů, až do vzniku prvních hvězd, které mezihvězdné prostředí opět ionizovaly svým pronikavým ultrafialovým zářením.

■ Víte, že charakteristická doba změn zemského pole při magnetické bouři je několik desítek sekund? Změny polohy střelky kompasu způsobené magnetickou bouří proto snadno odlišíme od třesu rukou po bujarém večírku.

Poučení na závěr: Každý touží po tom být něčím výjimečný. Naše výjimečnost je ale dána už tím, že žijeme na Zemi – zcela atypickém zákoutí vesmíru, které není tvořeno plazmatem, tak jako vše v našem okolí.





2. Cesta tam a zase zpátky – expedice Aurora

*„Zde leží ten blázen,
chtěl dům a chtěl bazén
a opustil tvou krásnou tvář.
Má plechovej hrnek,
v něm pár zlatejch zrněk
a nad hrobem polární zář.“*
Zdeněk Svěrák, Severní vítr

Plazma na Zemi můžeme kromě kanálů blesků a laboratoří plazmových fyziků spatřit také v polárních zářích. Jde o překrásný atmosférický jev, a tak není divu, že jsme za polárními zářemi uspořádali hned dvě expedice. První proběhla v roce 2002 a druhá o deset let později, v roce 2012. Obě byly úspěšné. A tak nejenže jsme do jedné řeky vstoupili dvakrát, ale dokonce jsme při obou příležitostech spatřili pestrobarevný tanec, vznešené nebeské divadlo – polární záři.

Na první expedici v roce 2002 nás vyrazilo dvanáct ve třech autech, jedno z nich jsme si museli půjčit z půjčovny. Mělo takovou světle červenou barvu, říkali jsme mu růžové autíčko. Výfuk mu upadl již někde u Stockholmu, ale alespoň jsme experimentálně dokázali, že některé součástky jsou v autech zcela zbytečné. I bez výfuku růžové autíčko ujelo dalších více než 7 000 kilometrů.

Naše expedice se jmenovala Aurora 2002. Slovo *aurora* znamená – kromě neslavně proslulého bitevního křížníku – ještě polární záři. Také se někdy říká, že jde o výkřik Hanáka, který zakopl o ropovod Družba a zvolal: „Au, róra!“ Účastníci expedice byli převážně z ČVUT, Jakub ze Štefánikovy hvězdárny, Rosta ze Západočeské univerzity a Jirka, můj bývalý student, dnes žije ve Finsku v Tampere. Toho jsme nabírali ve Stockholmu a jeho osud ve výpravě byl od začátku nejistý. Když jsme totiž před fakultou naložili auta přístroji a potravinami, zjistili jsme, že pro členy expedice v nich již není místo. Po několikerém přeskládání jsme se do aut jakž takž napěchovali, ale ti, kteří seděli vzadu, neměli šanci na sebe ani vidět, protože mezi nimi byl vyskládán mohutný sloupec věcí až do stropu. A Jirkovo místo? To bylo samozřejmě zaplněno batohy, taškami a potravinami. A tak první úkol expedice nebyl astronomický, ale ryze lidský. Do Stockholmu jsme museli usilovně jít, abychom vyjedly místo pro svého kamaráda.

Hlavním cílem expedice bylo vizuální pozorování a fotografování struktur v polárních zářích. Valná část pozorování probíhala v Norsku, kde je statisticky výskyt polárních září velmi vysoký. Nejsevernějším námi navštíveným místem se stal Nordkapp ($71^{\circ}10'21''$). V průběhu expedice se index aktivity polárních září pohyboval mezi stupni 5 a 6 stupnice aktivity NOAA. Jde o desetistupňovou míru narušení geomagnetického pole Země vzhledem k jeho klidovému stavu. Určuje se na základě měření sítě družic NOAA (v době expedice jich bylo 17) amerického federálního úřadu NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*). Velmi intenzivní polární záře se nám podařilo spatřit celkem šestkrát, zjasněný aurorální pás byl několikrát vidět téměř po celou noc.

Expedice trvala dvacet dnů, projeli jsme přes 8 500 kilometrů, absolvovali jsme tři plavby trajektem (jedenáctihodinovou, čtyřhodinovou a jednu krátkou přes zátoku), projeli Dánsko, Švédsko, Norsko a Finsko. Hlavní cíl byl sice kladen na pozorování, ale neopomněli jsme navštívit zajímavá místa, například Univerzitu v Oulu, která je známá právě výzkumem polárních září, univerzitu v Tampere a univerzitní hvězdárnu v Helsinkách.

O deset let později, v roce 2012, jsme se pokusili v trochu pozměněném složení zážitků z pozorování polárních září zopakovat. Trasa byla vedená obdobně, jen se počet účastníků rozrostl na 16. Tentokrát mezi nimi nechyběl Ivan, autor obrázků v této knize, a byl zde i Radek, který tuto knihu vysázel. Počet aut zůstal na třech, jedním z nich byl ale vypůjčený mikrobus, jehož skutečné kvality jsme poznávali teprve v průběhu cesty. Výměna katalyzátoru ještě před překročením české hranice a pozdější výměna roky neudržených pneumatik, z nichž trčely dráty, se staly nechtěnými, ale vzrušujícími zpestřeními expedice.

Na druhé expedici nám počasí příliš nepřálo, přesto se nám dvakrát podařilo polární záře také pozorovat. Tato expedice měla ale i mnohé další cíle. Navštívili jsme řadu zajímavých míst – čtvrt kilometru dlouhý laser FLASH a stavbu tříkilometrového laseru XFEL v německé částicové laboratoři DESY, národní park Skuleskogen, švédské důlní město Kirunu, norské fjordy v Lofotech, nejsevernější místo Evropy Nordkapp, největší měděný důl v Evropě Pyhäsalmi a v něm vybudovanou mionovou observatoř, kráter Ilumetsa v Estonsku a další zajímavosti. V severském ostrovním městě Tromsø jsme v univerzitním muzeu obdivovali kopii Birkelandovy terrelly – modelu Země, který dokáže simulovat vznik polárních září.

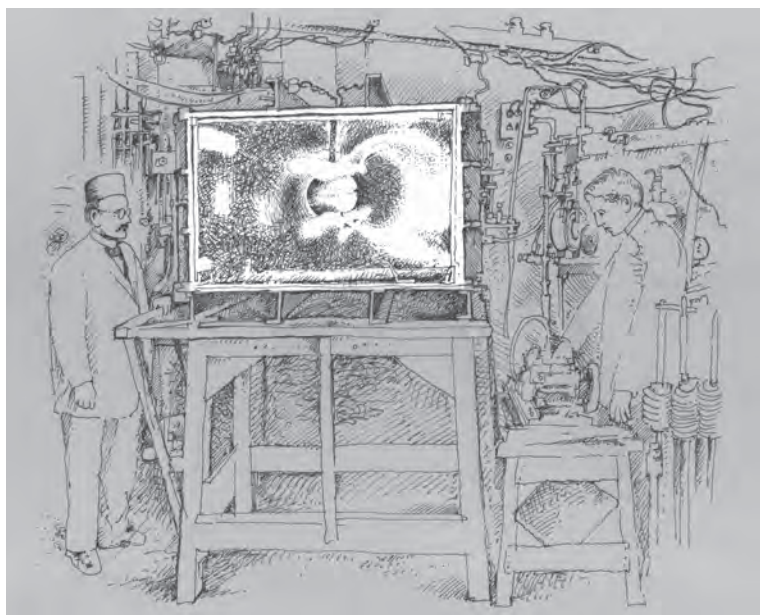
Historie výzkumu polárních září

Polární záře nejčastěji pozorovaly severské národy – Sámové a Inuité –, kteří je měli za plápolající duše mrtvých svítící si na cestě k nebeské bráně. Obdobně vnímali polární záře i severoameričtí indiáni. Někteří ztotožňovali polární záře s dušemi mrtvých, jiní s ohni šamanů. Eskymáci věřili, že polární záře jsou duše dětí, které zemřely v útlém věku a hrají si s barevnými stužkami na obloze. Ve Finsku věřili, že nebeskou září způsobují polární lišky, jejichž ohony třením o hory vytvářejí dobře viditelné jiskry. Ve Švédsku byly polární záře spojeny s odlesky táhnoucích sledů a označovaly vhodný čas pro rybaření. Ve skotských bájích jsou světla na obloze důsledkem bitvy mezi nebeskými bojovníky a padlými anděly.

První písemné zmínky o pozorování polární záře najdeme, jako obvykle, u Řeků, Římanů a Číňanů. Číňané je měli za duchy mrtvých válečníků, kteří za svou chrabrost získali výsadu bojovat za svého panovníka i po smrti. Uvažuje se také o tom, že nebeští draci plující oblohou, kteří jsou nezaměnitelně spjati s čínskou kulturou, mají původ v polárních zářích. Na odhalení skutečné podstaty polárních září si však lidstvo muselo počkat ještě téměř dvě tisíciletí.

V 16. století pozoroval polární záře na své hvězdárně Uraniborg na ostrově Hven i Tycho Brahe (1546–1601). Název *Aurora Borealis* (doslova severní záře) pochází od francouzského filosofa a astronoma Pierra Gassendiho z počátku 17. století. Inspiroval se jménem římské bohyně úsvitu Aurory a řeckým označením pro severní vítr Boreas. Prvním, kdo dal do souvislosti polární záře se Sluncem, byl francouzský geofyzik a astronom Jacques Dortou de Mairan roku 1733. Zanedlouho poté, v roce 1741, odhalil švédský astronom Anders Celsius spolu se svým asistentem Olofem Hiorterem magnetickou povahu polárních září při sledování komíhající se střelky kompasu. V roce 1745 pozoroval polární záře španělský námořník Antonio de Ulloa (1716–1795) na mysu Horn (56° jižní šířky) a potvrdil tak domněnku Jacquese Mairana, že polární záře probíhá i v jižních polárních oblastech. Roku 1770 potvrdil výskyt polárních září ve vysokých jižních šířkách anglický kapitán James Cook (1728–1779). O pět let později švédský astronom a demograf Pehr Wilhelm Wargentin (1717–1783) na základě mnohaletého pozorování zjistil, že polární záře se vždy vyskytují na mnoha místech současně a jejich výskyt pokrývá celý pás obklopující severní pól. Dnes tento pás nazýváme *aurorální ovál*.

Odhalení faktu, že polární záře se vyskytují i na jižní polokouli, a porovnání četnosti výskytu polárních září se sluneční aktivitou vedlo k první ucelené hypotéze o vzniku a povaze polární záře, kterou roku 1896 představil světu vynikající norský fyzik a vynálezce Kristian Birkeland (1867–1917). Tehdejší doba nebyla Birkelandovu vysvětlení příliš nakloněna a jeho popis polárních září současní akademičtí pracovníci nebrali příliš vážně. Skutečné ocenění Birkelandovy práce nastalo až dlouho po jeho smrti.



Slavná Birkelandova laboratoř s funkční terrellou.
Birkeland je nalevo, pomocník napravo.

Birkeland předpokládal, že nabité částice vyvržené ze Slunce jsou zachytávány magnetickým polem Země, v němž vznikají proudy tekoucí podél jeho siločar, a to jak směrem vzhůru, tak směrem dolů. Svou hypotézu podpořil Birkeland i experimentálně – sestrojil kovovou zmagnetizovanou kouli, tzv. *terellu*, kterou za sníženého tlaku ostřeloval proudem elektronů vylétávajících z elektronového děla. Terrella byla vyrobená z mosazi a potažená platiničitanem barnatým, který fosforeskoval po dopadu elektronů. Elektromagnet uvnitř koule byl mírně nakloněn od svislého směru, aby napodoboval magnetické pole Země. Terrella byla umístěná ve vakuové komoře simulující tlakové podmínky v horních vrstvách atmosféry. Zanedlouho Birkeland triumfálně demonstroval univerzitnímu obecnstvu vznik polárních září, jak by je viděl pozorovatel z vesmíru. Elektrony skutečně proudily do oblastí kolem pólů, kde budily k záření řídký plyn. V roce 1908 teorii i výsledky pokusů publikoval.

Jeho laboratoř byla velmi podivným místem, kde šlo často doslova o život. Vakuové trubice čas od času vybuchovaly, z vývěv unikaly páry rtuti, radiová sůl od Marie Curie zářila z poličky a elektrické rány byly tak běžné, že se zde lidé naučili pracovat s jednou rukou v kapse, aby při větším úrazu šel proud přes tělo mimo srdce. Pro důvěřivce si Birkeland vymyslel zdůvodnění, proč nosí v laboratoři egyptský klobouk fez. Prý proto, že chrání před nebezpečným zářením z jeho pokusů, které mu způsobují bolesti hlavy.

Birkeland byl k stáru těžce nemocen a zemřel v Japonsku v roce 1917 po předávkování léky; jeho tělo bylo převezeno zpět do Norska. Jeho práce bohužel na padesát let téměř upadla v zapomnění. Po Birkelandovi jsou dnes pojmenovány proudy v plazmatu tekoucí podél magnetických siločar a kráter o průměru 23 kilometrů na odvrácené straně Měsíce. Experiment s terrellou byl vyobrazen na norské dvousetkorunové bankovce, která je v současnosti nahrazována novou bankovkou s vyobrazením ryby. Poslední Birkelandem zkonstruovaná terrella (z roku 1913) je uložena v depozitáři Univerzity v Tromsø a je ve velmi špatném stavu. Zdejší studenti podle ní zkonstruovali kopii, která je k vidění v univerzitním Muzeu polárních září. Při druhé expedici se nám toto muzeum podařilo navštívit a terrella v chodu byla jedním z největších zážitků celé expedice. Ne nadarmo má toto muzeum na internetových stránkách slogan „*U nás uvidíte polární záře za každého počasí!*“

Po Birkelandově smrti v roce 1917 se stal nadlouho jediným zastánce Birkelandovy teorie plošných proudů v horních vrstvách atmosféry švédský fyzik Hannes Alfvén (1908–1995). Naopak zásadním odpůrcem Birkelandovy teorie byl světoznámý britskoamerický geofyzik Sydney Chapman (1888–1970). Ten zastával názor, že proudy tečou jen v ionosféře (experimentálně byla její existence prokázána až v roce 1925) a nikdy nemohou směřovat z ionosféry dolů. V té době se vědecká veřejnost klonila spíše k Chapmanovým názorům. Alfvén položil základy magnetohydrodynamiky (popis plazmatu jakožto tekutiny), zavedl pojem magnetických polí zamrzlých v látce, zabýval se pohybem nabitých částic v magnetosféře Země a navrhl několik mechanismů urychlování nabitých

částic podél siločar zemského magnetického pole. Je také prvním autorem ucelené teorie magnetických bouří.

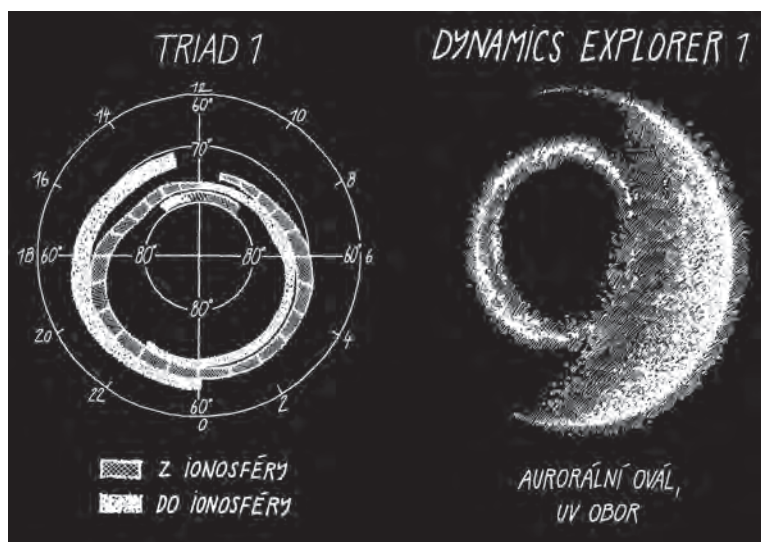
Elektrické proudy tekoucí v horních vrstvách atmosféry našel roku 1966 navigační satelit 1963–38C. První podrobná měření proudů tekoucích podél magnetického pole Země provedl satelit Triad 1 v roce 1973, který odhalil, že maximum tekoucích proudů leží na 70. geomagnetické rovnoběžce a tečou ve svislých stěnách, z nichž některé mají směr proudu vzhůru, jiné dolů. Birkelandova teorie se tak dočkala po třech čtvrtinách století experimentálního ověření. Diagram získaný satelitem Triad 1 se stal i základem loga naší první expedice za polárními zářemi.

V dnešní době jsou polární záře spolu s magnetosférou Země a slunečním větrem především předmětem výzkumu družic a sond¹. V roce 1981 byl poprvé pozorován celý aurorální ovál z vesmíru, a to družicí Dynamics Explorer 1, která pracovala do roku 1991. Fotografování z oběžné dráhy se zpravidla provádí v ultrafialovém oboru, ve kterém září některé přechody atomů kyslíku. Aurorální ovál může být široký až 5°. Vyskytuje se přibližně na 70. stupni geomagnetické šířky, kde se nacházejí poslední otevřené siločáry magnetického pole Země, a může být různě deformovaný. Jeho intenzita souvisí přímo se sluneční aktivitou. V 90. letech 20. století byly pomocí Hubbleova vesmírného dalekohledu objeveny polární záře na Jupiteru, Saturnu i Uranu. Sondy brázdící Sluneční soustavu jejich výskyt na těchto tělesech potvrdily a přidaly ještě polární záře na Marsu a Neptunu. O polárních zářích na dalších planetách si povíme v sedmé a osmé kapitole, kde se budeme podrobněji věnovat planetám naší Sluneční soustavy.

Z dalších družic a sond jmenujme alespoň sondu Wind (1994) umístěnou v Lagrangeově bodě L1² a její sesterskou družici Polar

1 **Družice a sondy** – v této knize důsledně rozlišujeme družice, které jsou na oběžné dráze kolem Země, a sondy, které se pohybují v jiných místech Sluneční soustavy.

2 **Lagrangeovy body soustavy Země-Slunce** – místa, v nichž se vyrovnají gravitační síly Slunce a Země spolu s odstředivou silou oběhu objektu kolem Slunce. Jde o pětici bodů pojmenovaných podle italsko-francouzského matematika Josepha-Louise Lagrange. Bod L1 se nachází 1,5 milionu kilometrů od Země směrem ke Slunci.



Nalevo: Proudny tekoucí z ionosféry a do ionosféry měřené satelitem Triad 1.
Napravo: Aurorální ovál vyfotografovaný satelitem Dynamics Explorer 1.

(1996–2008), která byla na oběžné dráze Země a je již neaktivní, dále družici Geotail (1992) určenou k výzkumu magnetosféry Země, sondu ACE (1997) zkoumající složení slunečního větru, čtveřici evropských družic Cluster (2000) určenou k mapování magnetosféry Země a síť amerických meteorologických družic NOAA. Polární záře jsou samozřejmě také rutinně fotografovány z Mezinárodní kosmické stanice.

Od Slunce k Zemi

Slunce je zdrojem energie pro celou Sluneční soustavu. Kromě elektromagnetického záření ze Slunce uniká celá řada částic, které mají díky vysokým teplotám ve vnější koróně vyšší než únikové rychlosti. Tyto částice zaplavující Sluneční soustavu nazýváme *sluneční vítr*. Jde zejména o elektrony, protony a menší počet jader těžších prvků. Energie a množství částic slunečního větru úzce souvisí s aktuálním stavem sluneční aktivity. Ta se mění v pravidelných jedenáctiletých

cyklech (s výjimkou minima Maunderových³ – výrazného snížení sluneční aktivity v letech 1645–1715). Sluneční vítr deformuje magnetosféry planet z původního dipólového pole do charakteristického ohonu na noční straně a typické rázové vlny na denní straně, kde se skokem mění koncentrace a rychlosti částic i hodnota indukce magnetického pole. Detailněji si o slunečním větru povíme ve čtvrté kapitole, která je mu věnována.

Do blízkosti Země přináší sluneční vítr přibližně deset částic v jednom krychlovém centimetru s rychlostí 350 až 700 km/s. Energie částic je zpravidla 15 až 50 eV⁴ a indukce magnetického pole přibližně 20 nT. V průběhu zvýšené sluneční aktivity může dojít při rekonekci slunečních magnetických siločar k výronu vysoce energetického oblaku částic se zamrzlým magnetickým polem. Dostane-li se takový oblak do blízkosti Země, vzrostou uvedené klidové parametry mnohonásobně a dojde k výrazným magnetickým bouřím.

Nabitě částice slunečního větru pronikají do magnetosféry Země a formují zde několik výrazných oblastí. V *plazmosféře* rotující spolu se Zemí je teplota částic kolem 1 eV, v *plazmovém ohonu* 1 až 10 keV. Na dva krychlové centimetry připadne v nejhustších částech plazmového ohonu zhruba jedna částice. Plazmový ohon se táhne až do stonásobku poloměru Země a má tloušťku 20 zemských poloměrů. *Hraniční vrstva magnetosféry* odděluje magnetické pole Země od okolí a je v ní přibližně jedna částice v krychlovém centimetru.

Částice dostávající se do vlivu magnetického pole Země krouží kolem siločar pole. Jak již bylo řečeno v první kapitole, typické poloměry rotačního pohybu jsou stovky metrů pro protony a řádově deset centimetrů pro elektrony. Protony mohou v důsledku srážek zachytávat elektrony a stát se vodíkovými atomy, na které již magnetické pole Země nemá vliv.

3 **Minimum Maunderových** – období odpovídající zhruba rokům 1645 až 1715, kdy sluneční skvrny byly výjimečně vzácné a sluneční cyklus byl velmi potlačen. Časově odpovídá takzvané Malé době ledové, kdy se prokazatelně alespoň severní polokoule Země ochladila. Pojmenováno je podle britských slunečních astronomů Annie Maunderové a Edwarda Maundera (byli manželé).

4 **Elektronvolt** – energie, kterou získá elektron při průchodu rozdílem potenciálů jeden volt ($\sim 1,6 \times 10^{-19}$ J).



V aurorální oblasti (kolem pólů, zhruba na 70. rovnoběžce geomagnetické šířky) dochází k elektrickému výboji, při němž se vytvářejí proudové stěny s proudovou hustotou přibližně $30 \mu\text{A}/\text{m}^2$. Proudové tečou podél siločar magnetického pole Země, a to jak směrem z ionosféry, tak směrem do ionosféry. Dodnes nejsou známy všechny mechanismy urychlování nabitých částic podél magnetického pole Země. Může jít o urychlování elektrickými dvojvrstvami, o jevy způsobené přepojením magnetických siločar nebo o další málo probádané mechanismy. Při přepojení slunečních a zemských siločar vzniká jakýsi vesmírný tobogán, po němž částice kloužou do polárních oblastí, kde nakonec polární záře vzniká. K maximálnímu urychlení částic dochází ve výškách 3 000 až 15 000 km nad zemským povrchem. Některé částice jsou přitom magnetickým polem odraženy zpět, což závisí především na úhlu jejich dopadu, jejich rychlosti a na intenzitě magnetického pole. Zjednodušeně však můžeme říci, že čím je částice rychlejší, tím větší má šanci dostat se do atmosféry – proto jsou polární záře způsobeny většinou pouze proudem elektronů, které lze urychlit mnohem snáze než těžší protony. Protonové záře mohou ale v malém množství případů také vzniknout.

Poznamenejme ještě, že definice severního magnetického pólu není úplně jednoduchá. Zemské magnetické pole má i nedipólové složky, proto rozlišujeme póly dva. *Severní magnetický pól* je skutečné místo, ke kterému míří střílka kompasu a ve kterém siločáry pole míří svisle ($86,5^\circ$ severní šířky a $164,0^\circ$ západní délky pro rok 2020). Poloha pólu se neustále mění o zhruba 50 až 60 kilometrů za rok. V současnosti se severní magnetický pól

v důsledku procesů v zemském nitru stěhuje z Kanady směrem k Rusku. *Severní geomagnetický pól* je místo, ve kterém by protínala povrch Země osa zemského magnetického dipólu (80,7° severní šířky a 107,3° západní délky pro rok 2020).

V horní atmosféře

Děj, který nastává ve chvíli, kdy urychlený elektron vstoupí do atmosféry, je již prostudován mnohem lépe. Polární záře vzniká ve výškách 70 až 1000 km její barvu ovlivňuje zejména hustota atmosféry, která má přímý vliv na intenzitu a frekvenci emitovaného elektromagnetického záření.

Nejčastěji pozorovanou barvou je zelená. Valenční elektron je v atomu kyslíku ve výškách pod 400 km, kde množství kyslíku začíná pomalu narůstat, excitován o dvě energetické hladiny nahoru. V tomto stavu je schopen setrvat průměrně necelou sekundu. Poté elektron přechází o hladinu níže, což způsobuje emisi zeleného fotonu o vlnové délce 557,7 nm. V novém stavu je elektron schopen zůstat podstatně déle, v průměru téměř dvě minuty. Pokud během této doby nedojde k interakci atomu s jinou částicí, je vyzařen červený foton o vlnové délce 630 nm, nebo 636 nm. Ke vzniku červené polární záře proto dochází ve vyšších vrstvách atmosféry, kde jsou interakce excitovaných atomů méně pravděpodobné; pozorování červené polární záře je tedy méně obvyklé. Další možností vzniku červené barvy je excitace molekulárního dusíku ve výškách kolem 90 km nad povrchem. K vybuzení elektronu je však zapotřebí přibližně tisíckrát větší energie než u atomu kyslíku. Při návratu elektronu na původní hladinu může být postupně emitováno několik odstínů červené.

Čtenáři, kteří měli to štěstí a pozorovali polární záři v našich zeměpisných šířkách, měli možnost spatřit především červenou barvu. To souvisí zejména s faktem, že atmosféra je zde buzena k záření vysoce energetickými částicemi, které zaprvé stlačují aurorální ovál k nižším geografickým šířkám a zadruhé pronikají do menších výšek nad povrchem, kde září právě molekulární dusík.

Modrá nebo fialová barva vzniká ve výškách kolem 1 000 km, kde dochází k excitaci iontů N_2^+ vzniklých ionizací molekul dusíku slunečním ultrafialovým zářením. A konečně: je-li molekula dusíku zasažena vysoce energetickým elektronem, může být emitováno slabě červené světlo. Spektrum polární záře je tedy spektrem emisním. Kromě zmíněných čar lze tu a tam detekovat i čáry H_α a H_β . Ty vznikají při rekombinaci protonů obsažených ve slunečním větru s volnými elektrony ve vysokých vrstvách atmosféry. Na rozdíl od ostatních jevů má tedy „protonová“ polární záře původ přímo v částicích slunečního větru.

Kombinací barev pak vznikají barvy další, například žlutá jako kombinace zelené a červené. Zde je třeba poznamenat, že jde o tzv. aditivní skládání barev, při kterém se jejich barva (respektive intenzita) sčítá; dochází k němu například na monitoru vašeho počítače. Základní barvy jsou R (Red, červená), G (Green, zelená) a B (Blue, modrá). Součet těchto základních barev ($R + G + B$) dá na monitoru bílou. Párové kombinace vytvoří: $R \circ G = Y$ (Yellow, žlutá), $G \circ B = C$ (Cyan, azurová), $G \circ B = M$ (Magenta, purpurová). Naopak na tiskárně nebo při kreslení na papíře základní barevné odstíny skládáme tak, že se celková intenzita míšením barev snižuje – ve skutečnosti jde o odečítání barev. Za základní odstíny zde považujeme C, M a Y. Párové kombinace při tomto skládání dají: $C \bullet Y = G$, $Y \bullet M = R$ a $C \bullet M = B$.

Zelená barva bývá v polárních zářích dominantní a všechny ostatní barvy snadno přezáří. My sami jsme na expedicích pozorovali zejména zelené záře, místy s načervenalým nádechem. Chceme-li proto opravdu ocenit krásu barevných světél, měli bychom si vzít na pomoc fotografický aparát citlivý ve všech oblastech viditelného spektra. Také my jsme po prvních okamžicích úžasu pod roztančnou světélkující oblohou začali exponovat jeden snímek za druhým.

Fotografování polárních září

Nutno přiznat, že na pořízení snímku polárních září jsme při první expedici vyrazili nepříliš vybaveni teoretickými znalostmi, částeč-

né zkušenosti s fotografováním noční oblohy nám však alespoň pomohly ve výběru vhodné techniky. V dnešní době používá většina obyvatel naší planety digitální fotoaparáty. I s nimi je možné polární záře fotografovat, ale klasický film je pro opravdu kvalitní záběry skvělou volbou. Proto jsme ho, zejména na první expedici, používali. Volba formátu – klasického kinofilmu – byla dána zejména snahou udržet náklady v rozumných mezích, s nově nabytými znalostmi však můžeme doporučit také svitkový materiál, zejména chcete-li získat podklady pro zhotovení fotografie velkého formátu, například plakátu. Pokud však nemáte s fotografováním polárních září dosud zkušenosti, je rozumné začít s kvalitním digitálním fotoaparátem nebo s přístrojem na klasický kinofilm. Z našich postřehů jsme sestavili krátký návod, jak se vybavit na podobnou expedici a na co se připravit.

Pokud chcete udělat opravdu pěkné snímky, doporučujeme zakoupit kvalitní filmy pro profesionální použití. V každé dobré sběrně či prodejně vám rádi a ochotně poradí. Volbu mezi negativním a diapositivním materiálem odůvodněte výsledným použitím. Chcete-li pouze obyčejné fotografie, bohatě postačí negativ. Ovšem pokud byste chtěli nějaký snímek vytisknout například na plakát či na velkoformátovém plotru, rozlišení negativu obyčejného kinofilmu již nebude stačit. Použijte proto buď diapositiv, případně negativ ve svitkovém formátu. Tím se dostáváme k volbě fotoaparátu. Vhodný je širokoúhlý objektiv s malou clonou (1,8–2,8) a ohniskovou vzdáleností maximálně 25 mm, čím méně, tím lépe. V zásobě jsme měli ještě objektiv 35 mm, ale pro jeho využití jsme nenašli příležitost. Kresba objektivu v tomto případě nehraje podstatnou roli, protože fotografováme plošný a difúzní objekt. Dokonce i hvězdy na pozadí mohou mít mírnou komu, protože při expozicích delších než 20 až 30 sekund (v závislosti na ohniskové vzdálenosti objektivu) se na fotografii projeví denní pohyb.

Hlavní podmínkou úspěchu je dostatečně tuhý stativ, na kterém nedochází ke chvění fotoaparátu. Bezpodmínečně nutné je také použití drátěné nebo dálkové spouště. Má-li být výsledkem vašeho snažení co největší počet kvalitních snímků, doporučujeme, abyste

si pořídili stativ, na který by se dalo připevnit více fotoaparátů. Exponovat tak budete moci současně na různé typy materiálu (například 200 a 400 ISO negativ a 400 ISO diapozitiv), takže budete moci u každého snímku volit mezi zrnitostí, slabými detaily či velkým rozlišením. Zároveň budete mít z čeho vybírat – my jsme byli spokojeni jen se čtvrtinou pořízených snímků.

Výslednou kvalitu snímku ovlivňuje, kromě použitého materiálu, také nastavení doby expozice. Obecně platí, že na správném odhadu doby expozice záleží zejména při fotografování na pozitivní materiál. Jako výborný expozimetr se ukázal digitální fotoaparát. My jsme tenkrát použili Nikon Coolpix 995, u kterého lze nastavit citlivost CCD čipu v jednotkách ISO. Během několika okamžiků máte hotový snímek, který si můžete prohlédnout a podle něj nastavit dobu expozice na klasickém fotoaparátu. Dlužno říci, že s tímto digitálním aparátem, vybaveným širokoúhlou předsádkou, se podařilo získat velice pěkné fotografie, které však, navzdory přirozenému chlazení čipu na teploty pod 0 °C, byly dosti zašumělé.

Jedním z našich cílů bylo sestavit sérii fotografií, ze kterých by se dala vytvořit alespoň krátká animace. Výsledkem byly dvě animace. První zachycuje vývoj polární záře v rozmezí asi pěti minut. Byla získána složením osmi snímků pořízených digitálním fotoaparátem, každého s dvacetisekundovou expoziční dobou. Jako podstatně obtížnější se ukázalo zachytit vývoj polární záře v krátkodobém časovém měřítku. Myslím, že všechny účastníky expedice překvapila rychlost, s jakou se polární záře vyvíjí a mění – ty nejjemnější detaily dokonce ve zlomcích sekundy. Vzhledem k nejkratším (zhruba osmisekundovým) expozicím se tedy pověstný „tanec“ zachytit nepodařilo, i když jsme měli k dispozici poměrně kvalitní tříčipovou digitální kameru Panasonic NV-MX 350EG. Jako velice užitečná se ale ukázala metoda morphingu spočívající v prolnutí dvou či tří snímků těžce části oblohy, pořízených za sebou v krátkých, přibližně dvacetisekundových intervalech. Výsledkem je animace zachycující krátkodobý vývoj – „vlnění“ okrajů zářících stěn. Nejsilnější zážitek z polárních září získáte při pozorování pouhým okem. Na chvíli oči zavřete a po otevření je scénérie úplně jiná.



V Univerzitním muzeu v Tromsø můžete fotografovat polární záře za každého počasí. Na snímku je kopie Birkelandovy terrelly v přítomí muzea. Napravo je tehdejší student ČVUT Radek Beňo, který právě spouští elektronové dělo simulující sluneční vítr. Analogie aurorálních oválů je dobře patrná.

Dnešní technologie digitálního zpracování obrazu nabízí řadu možností, jak pořízené snímky „vylepšit“. Samozřejmě nejde o úpravu celkové barvy, máme spíše na mysli snížení šumu na pozadí. Pokud naskenovaný snímek rozdělíme do jednotlivých barevných kanálů, zjistíme, že zpravidla nejvíce šumu (resp. největší zrno) se nachází v červené a případně v modré barvě (viz obrázek 1 barevné přílohy). Protože polární záře má zejména barvu zelenou, lze vhodnou funkcí (osvědčil se medián, filtr, který je obsažen v základní instalaci programu Adobe Photoshop) potlačit celkovou zrnitost obrazu takřka beze ztráty kvality obrazu. Další (a z našeho pohledu „čistší“) metodou je složení dvou snímků pořízených těsně za sebou. Tato technika je ve fotografické praxi velice často využívána, zejména v astronomii, musíme ovšem počítat s tím, že i při poměrně krátkém časovém odstupu nejsou snímky zcela totožné. Při jejich složení tak sice částečně vymizí šum pozadí, ale vznikne „nový“ snímek, který již není úplně totožný s originálem.

Strípky z expedic

Chtěli bychom se nyní s vámi podělit o několik postřehů a zajímavostí z našich dvou expedic za polárními zářemi. Jde o situace, které nás středoevropany poněkud překvapily.

■ I v severských zemích existuje síť levného ubytování, tzv. hostelů. Na rozdíl od jiných zemí světa byste s sebou měli v některých zemích mít vlastní prostěradlo. Nemáte-li ho, musíte si ho koupit nebo zapůjčit (nás to stálo 6 euro za každého). Jen tak ve spacáku bez prostěradla spát prostě nesmíte.

■ Při druhé expedici jsme si pronajali malý domek na Lofotech s domácím kinem a vířivkou. Pominu-li, že Lofoty jsou pro pozorování polárních září vzhledem k vlhkosti poněkud nevhodné, šlo o nejlevnější ubytování vůbec. Na jednoho vyšlo na zhruba sto českých korun na noc. Pronájem domků se na severu vyplatí.

■ Příjemné bylo, že i u nejzapadlejších silnic na severu jsou odpočívadla se záchody. Je v nich toaletní papír, který jednou denně přiveze speciální automobil. U nás na katedře fyziky FEL ČVUT jsme se toaletního papíru na WC po příjezdu z první expedice dočkali až po dvou dnech. Dnes už je situace naštěstí jiná.

■ V severských zemích mají všechna auta vepředu elektrické zásuvky. Na parkovištích jsou parkovací místa vybavena sloupkem s elektrickou zásuvkou. Když přijde tuhá zima, večer své auto připojí do sítě, aby mu nezamrzl motor a rozvody vody i nafty, takže ráno bez problémů s rozmrazováním opět nastartují.

■ Při přejezdu polárního kruhu bývá zvykem postavit si malou mohylu z kamenů pro štěstí. My jsme si postavili celý veliký nápis ALDEBARAN. Tak se totiž jmenuje náš server věnovaný fyzice a astronomii a vlastně i nakladatelství, v němž vyšla tato kniha.

■ Na značce „Pozor zvěř“ nejsou krávy a jeleni jako u nás, ale sobi a losi. Zatímco u nás vidíme na silnici krávu málokdy, na severských silnicích jsme soby potkávali často.

■ Dopravní policisty vidíte v severských zemích jen zřídka, ale když už, tak to stojí za to. Nás stavěli v Norsku, kde je mimo obec povoleno jet 80 km/h. Naměřili nám 104 km/h. Policista pravil: „*Take your driving licence and credit card.*“ Momentální řidič řidičák neměl a policistovi podsunul technický průkaz od staré škodovky. Policista se sice podivil, že takový řidičák ještě neviděl, ale vzal to. Kartu naštěstí neuměl přečíst, a tak vypsál složenku na 2 500 norských korun (asi 10 000 Kč). Dodnes netušíme, kde jsme měli pokutu zaplatit.

■ V severských zemích jsou u všech vodopádů a přehrad po stranách vybudovány „lososí dálnice“. Slouží k tomu, aby se ryby při svém tahu mohly dostat k pramenům řek, kde se třou. Lososí dálnici tvoří kaskáda betonových desek v korytu s mírným spádem. Voda vytvoří malé bazénky, které nejsou pro ryby překážkou.

■ Ve Finsku jsme samozřejmě navštívili pravou finskou saunu. V jedné chvíli Jakub zvolal: „Podívejte se na toho cvoka, on má čepici.“ A měl. Teprve později jsme zjistili praktičnost tohoto opatření – na horních lavicích je ohromné vedro a pálí uši. Čepice je proti vedru, ne proti zimě. Takže poučení: Do finské sauny jedine s kulichem.

■ Ve Finsku mají zajímavý vztah k alkoholu. Pivo se prodává i v litrových lahvích. Ostatní alkohol lze koupit jen ve speciálních obchodech a po deváté už vůbec nikde. Lahváče koupeného v hospodě vám povinně otevrou a nesmí přejít přes práh. Studentskou specialitou jsou speciální omyvatelné overaly na pití. Chodí v nich na různé večírky. Je to jednoduché a praktické. Po příchodu domů se snadno zbaví nevábného hospodského pachu. Osprchují se rovnou i s kombinézou.

■ Při první expedici jsme bloudili téměř neprůjezdnými ulicemi severského ostrovního města Tromsø. O deset let později, při druhé expedici, jsme byli vybaveni GPSkou a ta nás hned po přejezdu mostu, spojujícího město s pevninou, navedla do podzemí. K obrovskému údivu jsme zjistili, že naprostá většina komunikací je pod městem. V podzemí jsou i křižovatky a kulaťáky a místní vyjíždějí na povrch jen v místě, kde to potřebují.

■ Nejsevernější místo Evropy dosažitelné po pevnině, Nordkapp, je dostupné z pevniny jen podmořským tunelem. Při první expedici jsme zaplatili nemalý peníz nejen cestou tam, ale byli jsme kasírováni i na zpáteční cestě. Proto jsme chtěli Nordkapp při druhé expedici vynechat. Krátce před odjezdem jsme se dozvěděli, že díky poplatkům byla stavba tunelu uhrazena a nadále se už nebudou vybírat. A skutečně. Opuštěné mýtné brány připomínaly deset let starou minulost. Myslím, že u nás, v České republice, by se dobrovolně vybíraného poplatku nikdo nevzdal. Holt jiný kraj, jiný mrav.

■ Při vstupu do Univerzitního muzea v Tromsø jsme u kasy poněkud hlasitě probírali, kdo bude či manžel a kdo sehraje malého fakana, abychom dosáhli na rodinnou slevu vstupného. Jaké bylo překvapení, když nám kluk sedící za kasou příjemnou slovenštinou sdělil, že pro nás určitě nějakou slevu vymyslí. Šlo o slovenského studenta tamní univerzity. Nakonec jsme dostali nejen slevu, ale i zaměstnanecké kafe.

Chcete-li pozorovat polární záře v severských zemích, je ideální leden až únor, kdy je stabilní počasí, skutečná tma a mrzne, až to praští. Pokud nejste přímo otužilci, doporučujeme září, kdy jsou teploty o mnoho vyšší, ale počasí zdaleka není tak ideální, takže jde svým způsobem o sázku do loterie. Léto vzhledem k světelným podmínkám na severu není pro pozorování vhodné vůbec. Co říci závěrem? Při obou expedicích nebylo počasí nic moc extra, a přesto se nám v obou případech podařilo spatřit tančící barevné stěny – nezapomenutelný přírodní úkaz, nebeské divadlo, které patří k nejsilnějším prožitkům autorů této knihy. A vůbec nevadilo, že při první expedici kolem panovala teplota $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jednu z nocí jsme dokonce museli strávit v autech se zapnutými motory. Mrzlo až praštělo a ve stanu se opravdu spát nedalo. Pošťestilo se nám uvidět aurorální ovál z dálky i být přímo pod svítící stěnou polární záře. Naše expedice byly zejména vedeny touhou spatřit to, čemu se v našich zaměstnáních věnujeme, co učíme studenty a co nás přitahuje. A také to, o čem píšeme. A to se nám podařilo tak, jak nikdo ani v skrytu duše nedoufal. A v nejbližším slunečním maximu expedici určitě zopakujeme.

Víte, že?

■ Víte, že finská báje o lišce způsobující polární záře se stala součástí loga webového prohlížeče Firefox? Už samotné slovo „firefox“ znamená ohnivou lišku. Ta je i součástí loga prohlížeče vyvíjeného společností Mozilla.

■ Víte, že se dne 17. listopadu, kdy začínala sametová revoluce, na nebi objevila polární záře? V polovině listopadu 1989 byla zvýšená sluneční aktivita, která vedla k několika výronům koronální hmoty, z nichž jeden zasáhl Zemi právě v okamžik, kdy studenti demonstrovali na Národní třídě.

■ Víte, že se o aktuálním stavu magnetického obalu Země můžete dozvědět na stránce www.spaceweather.com? Jsou zde pravidelně zveřejňovány aktuální informace o sluneční aktivitě, o plazmoidech blížících se k Zemi a zejména Kp index, který je mírou narušení zemského magnetického pole. Má-li hodnotu do pěti, nic se neděje, nad hodnotou 5 jsou časté polární záře na severu, nad hodnotou 8 je vysoká šance spatřit polární záři i v našich končinách.

■ Víte, že v České republice je možné polární záře spatřit průměrně dvakrát do roka? Málokdo z náhodných pozorovatelů je ale odliší od odrazů světla velkých měst a dalšího světelného znečištění oblohy.

Poučení na závěr: Nikdy nepozorujte polární záře v členitém terénu na pobřeží oceánu. My při druhé expedici byli týden na Lofotech a voda byla opravdu všude. Díry v mracích se objevovaly jako zvláštní bonus jen zřídkakdy.





3. Magnetické pole Slunce

„Každý západ slunce je začátkem velmi,
velmi jasného a mocného svítání.“
Sri Chinmoy, indický spisovatel

Slunce je nám nejbližší hvězda, vzdálená od Země pouhých 150 milionů kilometrů. Světlo od Slunce k Zemi dolétne za 8 minut, takže vše, co se na Slunci odehrává, vidíme s osmi-minutovým zpožděním. Slunce je pro Zemi zdrojem životadárného tepla, které vzniká v jeho nitru slučováním jader vodíku na helium. Hvězdy získávající energii tímto způsobem nazýváme *hvězdy hlavní posloupnosti*. Jsou v první fázi svého vývoje. Později budou slučovat v nitru helium a vodík na stále těžší a těžší jádra (až po jádra železa, která jsou vázána nejefektivněji). Takové hvězdy se stanou *obry* nebo *veleobry*. Naše Slunce existuje jako hvězda hlavní posloupnosti již 5 miliard let a zásoby jaderného paliva v nitru má na dalších 7 miliard let. Podmínky pro život na Zemi zaniknou ale mnohem dříve. Postupně se zvyšující výkon Slunce způsobí, že za necelou miliardu let stoupne teplota na Zemi natolik, že ztratí veškerou vodu a stane se vyprahlou pustinou.

Hvězdy mají nejrůznější teploty. Velmi chladné hvězdy mají povrch teplý pouze 1 500 kelvinů, nejteplejší téměř 100 000 kelvinů. Teplota hvězdy se projeví především na její barvě a spektru. Astro-nomové proto dělí hvězdy podle teploty do skupin, kterým říkáme spektrální třídy. Nejteplejší hvězdy mají třídu W, následují O, B, A, F, G, K a pak již velmi chladné hvězdy tříd M, L a T. Chladné hvězdy jsou načervenalé, teplé hvězdy namodralé. Slunce má povrchovou teplotu 5 780 kelvinů, což odpovídá spektrální třídě G2 (číslo za označením dělí spektrální třídu na 10 podskupin).

Spektrální třídy

- W** Wolfovy-Rayetovy hvězdy jeví široké emisní čáry vodíku a helia. Jejich typická teplota je 80 000 K.
- O** Silné spojitě spektrum, absorpční čáry ionizovaného helia. Typická teplota 60 000 K.
- B** Absorpční čáry neutrálního helia, Balmerovy série vodíku a ionizovaného kyslíku. Barva hvězdy je modrá. Typická teplota 38 000 K.
- A** Silné čáry Balmerovy série vodíku. Objevují se čáry ionizovaného vápníku a čáry kovů. Typická teplota 15 400 K.
- F** Čáry Balmerovy série slábnou, zesilují se čáry ionizovaného vápníku a kovů. Typická teplota 9 000 K.
- G** Velmi silné čáry ionizovaného vápníku, slabé čáry Balmerovy série, početné čáry kovů, zejména železa. Barva hvězdy je žlutá. Typická teplota 6 700 K.
- K** Silné čáry kovů, slabé absorpční pásy molekul. Hvězdy mají oranžovou barvu. Typická teplota 5 400 K.
- M** Silné pásy molekul, zejména oxidu titanatého. Hvězdy mají červenou barvu. Typická teplota 3 800 K.
- L** Chladní trpaslíci, maximum záření je v infračerveném oboru, typické jsou pásy molekul FeH, CrH, H₂O, CO₂ vznikající v atmosféře hvězdy. Teplota je 1 500 až 2 200 K.
- T** Chladní trpaslíci balancující na hranici udržení termojaderné syntézy, s teplotou povrchu nižší než 1 500 K, kdy vzniká metan a ve spektru se objevují jeho typické infračervené čáry.

Chcete si zapamatovat, jak jdou spektrální třídy po sobě? Máme pro vás jednoduchou mnemotechnickou pomůcku: *Whisky Od Babičky Anastázie – Fantasticky Geniální Koupě! Moderní Léčivo Traumat.*

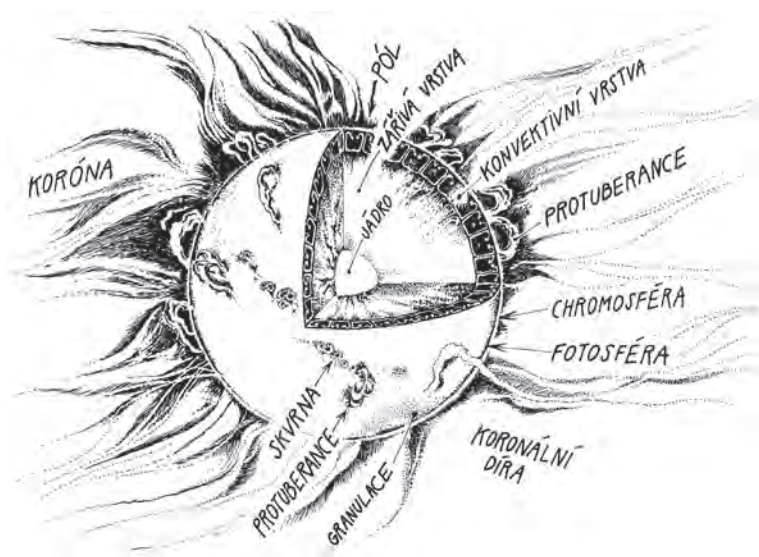
V roce 2013 byla zavedena ještě třída Y pro objekty s teplotou ve stovkách kelvinů. Jejich teplota je srovnatelná s lidským tělem, jde o hnědé trpaslíky, kteří mají sice hmotnost větší než 13 Jupiterů, což je hranice pro probíhání termojaderné syntézy, ale nižší než 80 Jupiterů, což je považováno za hranici, kdy je termojaderná syntéza dominantní a jde skutečně o hvězdu.

Stavba Slunce

Slunce má *jádro* o poloměru 140 000 km. V něm je samozřejmě teplota nejvyšší – dosahuje 15 milionů kelvinů. Zde probíhá termojaderná syntéza, při které Slunce sloučí za každou sekundu 700 milionů tun vodíku na helium. To odpovídá celkovému zářivému výkonu 4×10^{26} W. Jádro obklopuje *vrstva v zářivé rovnováze* tloušťky 340 000 km. Touto oblastí putují fotony z jádra směrem k povrchu, kam dospějí za několik set tisíc roků. Zdánlivě pomalý pohyb fotonů je způsoben jejich opakovaným pohlcováním volnými elektrony a opětovným vyzařováním v náhodném směru. Následuje *konvektivní vrstva*, kde se energie šíří prouděním. Horká sluneční hmota proudí vzhůru a po vyzaření části energie klesá chladnější hmota zpět do hlubin Slunce. Tloušťka této vrstvy je 220 000 km. U hmotnějších hvězd hlavní posloupnosti leží vrstva v zářivé rovnováze až nad konvektivní vrstvou.

Vlastní povrch Slunce se nazývá *fotosféra*; její tloušťku odhadujeme na 400 km. Charakteristická je pro ni tzv. granule, vytvářené vrcholky vzestupných a sestupných proudů z konvektivní vrstvy. Typickými útvary ve fotosféře jsou sluneční skvrny. Teplota na spodní straně fotosféry je 6 600 K, na horní straně 4 400 K. Fotosféra, chápána jako povrch Slunce, určuje jeho rozměry: poloměr Slunce činí 696 000 km. Průměrné magnetické pole na povrchu je 10 až 200 μ T, silná lokální pole ve slunečních skvrnách ale dosahují hodnoty až 0,3 T.

Viditelný povrch je nejchladnější vrstvou Slunce. V polárních oblastech, kde jsou siločáry otevřené a podél nichž stoupá tzv. rychlý sluneční vítr, se často objevují koronální díry, oblasti s velmi nízkou



ZÁKLADNÍ PARAMETRY SLUNCE

hmotnost: 2×10^{30} kg

průměr: 1 392 000 km

průměrná hustota: $1,4 \text{ g/cm}^3$

úniková rychlost: 618 km/s

tíhové zrychlení: 274 m/s^2

doba otočení (póly): 36 dní

doba otočení (rovník): 25 dní

spektrální třída: G2

teplota koróny: $1,5 \times 10^6 \text{ K}$

teplota povrchu: 5 780 K

teplota v jádře: $15 \times 10^6 \text{ K}$

hustota v jádře: 162 g/cm^3

tlak v jádře: $2,5 \times 10^{16} \text{ Pa}$

celkový výkon: $4 \times 10^{26} \text{ W}$

hustota výkonu: $0,2 \text{ mW/kg}$

tok energie u Země: $1,4 \text{ kW/m}^2$

globální mg. pole: 10 až $200 \mu\text{T}$

pole aktivních oblastí: 2 mT

pole protuberancí: 1 až 10 mT

pole skvrn: až 0,3 T

koncentrací plazmatu. Na ultrafialových a rentgenových snímcích, kde září především horká koróna, lze v oblasti koronálních děr „dohlédnout“ až na temný (chladný) povrch, který v těchto oborech spektra nezáří (viz obr. 24 v barevné příloze).

Nad viditelným povrchem neboli fotosférou se nachází relativně tenká a řídká barevná vrstva zvaná *chromosféra*. Její tloušťka je přibližně 2 500 km a teplota v ní postupně roste až na 30 000 K v horní části. Oblast nad chromosférou nazýváme *koróna*. Je to řídká atmosféra Slunce, která nemá ostré hranice a zasahuje hluboko do Sluneční soustavy. Teplota koróny v blízkosti Slunce může snadno přesáhnout i milion kelvinů a je výrazně vyšší než teplota fotosféry. Chromosféra a koróna jsou především zahřívány energií uvolňovanou při rozpadu magnetozvukových vln přicházejících z nižších vrstev Slunce. K ohřevu přispívají také častá přepojování siločar chaoticky uspořádaných magnetických polí, tzv. mikrorekonekce, a pravděpodobně i Joulův ohřev¹ elektrickými proudy způsobenými pohybem nabitých částic podél siločar magnetického pole.

Termojaderný kotel

Teplota v nitru Slunce je 15 milionů kelvinů a tlak až stovky miliard atmosfér. Za těchto pro člověka nepředstavitelných podmínek se v divokém tempu srážejí částice, ovšem jen tu a tam, zcela výjimečně, interagují a spojí se ve větší celek. Dvěma konkrétním protonům trvá velmi dlouho, než se spojí v jádro deuteria, ze kterého unikne pozitron a neutrino. V jádře Slunce je ovšem protonů obrovské množství, a tak jejich slučování přece jen z hlediska celého jádra probíhá v poměrně hojném počtu. Vzniklá jádra deuteria se sráží s dalšími protony a vzniká helium se dvěma protony a jedním neutronem v jádře. Protony, deuteriová a heliová jádra se sráží, spojují se a zase rozpadají. Výsledkem těchto reakcí je spojení čtyř jader vodíku na jedno jádro helia se dvěma protony a dvěma neutrony. Přitom se uvolní energie, kterou Slunce svítí a která je tak důležitá pro život na Zemi. Celý proces uvolňování energie ve Slunci nazýváme

1 **Joulův ohřev** – ohřev způsobený elektrickým odporem prostředí, který brání pohybu nabitých částic a část jejich energie převádí na teplo.

protono-protonovým řetězcem (neboli *pp řetězcem*); to proto, že ve výsledku se spojují protony, jádra lehkého vodíku, na větší celky.

Nepředstavujte si ale nějakou bouřlivou reakci. Jeden kilogram sluneční látky by v průměru vydával výkon pouhých 0,2 mW a nerozsvítil by tak ani žárovku. Celková hmotnost Slunce je ale obrovská, a tak je výsledný výkon celého Slunce neuvěřitelných 10^{26} W.

Protono-protonový řetězec probíhá ve hvězdách jako naše Slunce a menších. V hmotnějších hvězdách je teplota v nitru vyšší a probíhají zde i složitější reakce, kterých se účastní jádra těžších prvků (uhlíku, dusíku a kyslíku). Proto těmto reakcím říkáme CNO cyklus nebo – na počest jejich objevitele – Betheův cyklus. Výsledek je ovšem stejný jako u *pp* řetězce: i v hmotnějších hvězdách hlavní posloupnosti se nakonec spojí čtyři jádra vodíku v jedno jádro helia a uvolní se energie, která vdechne hvězdě život.

Ve skutečnosti ve hvězdách probíhají protono-protonový řetězec i CNO cyklus současně. Je-li teplota jádra hvězdy nižší než 19 milionů kelvinů, dominuje *pp* řetězec, je-li vyšší, dominuje CNO cyklus. U našeho Slunce se *pp* řetězec na celkové energetické bilanci podílí 99 procenty, zatímco Betheův cyklus jen jedním procentem.

Po generace se fyzikové celého světa snaží na Zemi zvládnout termojadernou syntézu tak, jak probíhá v nitru hvězd. Představte si, že bychom si na Zemi zapálili vlastní Slunce a z něho čerpali energii pro naše potřeby! A palivo navíc získávali z vody, které je na Zemi nepřeberné množství. Je to reálné, nebo jde jen o sen snůlků?

Ano, fúze lehkých jader na těžké je reálná možnost řešení energetických potřeb lidstva, jen nesmíme fúzní slučování začínat obyčejným vodíkem. Spojení dvou protonů na jádro deuteria je velmi pomalé, a tak je třeba začít fúzí těžkého vodíku neboli deuteria. V běžné vodě připadá na 6 500 atomů vodíku jeden atom deuteria, ve světových oceánech je tedy i deuteria nepředstavitelné množství. Řada experimentů prokázala, že tato cesta je správná a že lze za pomoci fúze získávat energii. Pod hradem Cadarache se v jižní Francii staví první pokusný termojaderný reaktor na světě, zvaný ITER. K jeho posta-

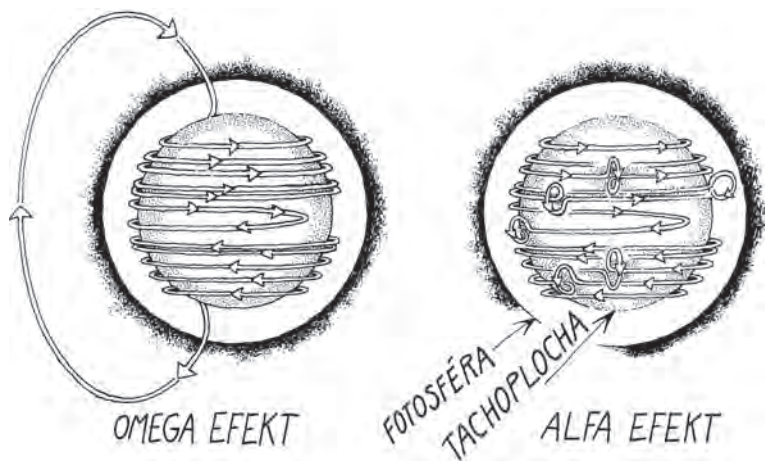
vení spojila své síly většina vyspělých zemí světa, a tak se za několik let tomuto snu přiblížíme o krůček blíž. V reaktoru bude 837 m^3 plazmatu, jehož doba udržení by měla být až 8 minut. Teplota plazmatu bude vyšší než 100 milionů kelvinů. Plazmatem poteče proud 15 MA a magnetické pole dosáhne indukce 5,3 T. V plazmatu bude probíhat slučování deuteria a tritia na helium. Stavba by měla být dokončena do roku 2030 a poté bude následovat 20 let testování této technologie budoucnosti.

Tekutinové dynamo

Jak vůbec vzniká magnetické pole Slunce? Detailní mechanismus znám není, nicméně v hrubých rysech máme představu, jak sluneční pole vzniká a jak dochází k jeho změnám. Jde o tzv. *efekt tekutinového dynama*². Představme si, že na začátku existuje nějaké prvotní, přibližně dipólové magnetické pole. Takové pole je vytvářeno elektrickým proudem tekoucím hluboko v nitru Slunce v azimutálním směru. Nitro Slunce je velmi dobře vodivé a Slunce jako celek rotuje diferenciální rotací, tj. různé vrstvy rotují s různou rychlostí. Vodivá tekutina se bude snažit strhávat magnetické siločáry ve směru svého pohybu. Tento jev je velmi dobře znám z magnetohydrodynamiky; poprvé na možnost tzv. *zamrzání siločar* poukázal švédský plazmový fyzik Hannes Alfvén. Je to podobné, jako by gumová vlákénka byla strhávána otáčejícím se hustým sirupem, tahána, kroucena a zamotávána.

Původní magnetická siločára je díky rychlejšímu pohybu Slunce v rovníkové oblasti vytahována azimutálním směrem, hovoříme o *omega efektu*. Diferenciální rotace může způsobit vytažení siločáry a její navinutí kolem dokola za přibližně 8 měsíců. Jev se nazývá podle řeckého písmene Ω (omega), kterým se ve fyzice označuje úhlová rychlost rotace. Navíc vytažená siločára poněkud připomíná tvar písmene Ω otočeného o 90° (viz obrázek na další straně).

2 **Tekutinové dynamo** – tekutinová varianta klasického dynama. Elektrické proudy vznikají při pohybu plazmatu nebo tekutého kovu a generují magnetické pole. Dipólová složka se mění na azimutální tzv. omega efektem a azimutální na dipólovou tzv. alfa efektem. Tekutinové dynamo nemůže být stacionární, jeho základní vlastností je překlápění magnetických pólů.



Existuje i jev opačný, který mění pole azimutální (v rovníkovém směru) na pole dipólové (ve směru poledníků). Tento jev má ryze statistický charakter a je docela obtížně představitelný. Chaotické změny rychlosti, které jsou v plazmatu vždy přítomné, vytvářejí chaotické změny magnetického pole. Matematickým výpočtem lze ukázat, že z chaosu vždy povstane nový řád. Chaotické poruchy pole se pomalu ale jistě spojují a vytvářejí složku pole kolmou na pole původní. Tato složka neustále s časem narůstá, až začne dominovat. Jev se nazývá *alfa efekt*, je to podle tvaru „vychlípené“ siločáry, který se podobá řeckému písmenku alfa. Omega efekt tedy mění pole dipólové na azimutální a alfa efekt pole azimutální zpět na dipólové. Periodicita překlápění slunečního pole je 11 roků. Po přibližně jedenácti letech si severní a jižní magnetický pól vymění svá místa. Tuto periodicitu kopíruje sluneční aktivita. Kompletní perioda, po níž se póly dostanou do původní polohy, je tedy 22 roků a zahrnuje dvě minima a dvě maxima sluneční aktivity. V období dipólového pole je sluneční aktivita (včetně počtu skvrn a slunečního výkonu) nejmenší, v období překlápění je naopak největší. Cyklus poprvé popsal německý astronom Heinrich Schwabe (1789–1875) v roce 1843, objeven byl ale již v sedmdesátých letech 18. století dánským astronomem Christianem Horrebowem (1718–1776), jehož práce tehdy bohužel zapadla.

Podle současných představ dochází k největším střížným změnám rychlosti v blízkosti tzv. *tachoplochy*, která se nachází na hranici mezi vrstvou v zářivé rovnováze a konvektivní vrstvou, tj. v hloubce 220 000 km pod slunečním povrchem. Je to proto, že v této oblasti dochází k obracení sestupných proudů na vzestupné a naopak. Zde je tedy nutné hledat hnací mechanismus změn magnetického pole Slunce. Hlubinné vrstvy Slunce je možné zkoumat pomocí *helioseismologie*. Plazma pod povrchem Slunce je sledováno unikátním přístrojem MDI (*Michelson Doppler Imager*) na sondě SOHO. Přístroj mapuje nitro Slunce tím, že měří rychlost magnetozvukových vln procházejících Sluncem. Tato technika pracuje na stejném principu jako ultrazvuk, kterým lékař prohlíží lidské tělo.

V roce 2000 se ukázalo, že se na tachoploše mění rychlost plazmatu skokem a v blízkosti rovníku rotuje vnější vrstva plazmatu rychleji než vnitřní. Ve středních šířkách je rozdíl rychlostí menší. Přístroj MDI objevil, že dochází k pravidelným změnám v rozdílu rychlostí mezi oběma vrstvami. Když se spodní vrstva plazmatu zrychluje, vrchní vrstva se naopak zpomaluje a rozdíl rychlostí se sníží až o 20 %. Poté dojde k opačnému jevu. Slunce ve svém nitru „tepe“ s periodou 15 až 16 měsíců. Zdá se, že lidé mají konečně k dispozici přístroje, které budou schopny rozluštit záhadu dynamu generujícího magnetické pole Slunce hluboko pod jeho povrchem.

Lepší pochopení slunečního dynamu by do budoucna mělo přinést vysvětlení několika jevů. Především jde o *jedenáctiletý cyklus sluneční činnosti*, při kterém se mění nejen počet slunečních skvrn, ale i jejich průměrný výskyt v heliografické šířce. Na počátku cyklu se skvrny objevují ve vysokých šířkách, tedy blíže pólům, na konci cyklu v nízkých šířkách, tedy blíže rovníku. Na začátku cyklu je možné pozorovat současně skvrny nového a ještě i starého cyklu. Magnetické pole skvrn zasahuje až do tachoplochy, proto je souvislost jejich výskytu se slunečním dynamem zjevná. Důležité je také objasnění polarity magnetických skvrn, tj. ze které skvrny siločáry vyvěrají a do které vcházejí. Polarita má totiž v průběhu cyklu své experimentálně nalezené zákonitosti (tzv. Haleův zákon), které dosud ale teoreticky objasněny nejsou.

Heliosféra

Podobně jako se námořní loď prodírá vodami oceánu a před její přídílí vzniká rázová vlna, pohybují se hvězdy mezihvězdným prostředím: před nimi vzniká rázová vlna magnetosféry a za nimi se táhne dlouhý magnetický ohon vyplněný ionizovaným plynem. Nejinak je tomu u našeho Slunce. Při své pouti mezihvězdným prostředím se pohybuje v hvězdném větru nabitých částic, které vyvrhují sousední hvězdy. Ve směru pohybu se vytváří *rázová vlna*, která má prohnutý tvar a částice hvězdného větru se na ní brzdí a odklánějí. Oblast skutečného magnetického vlivu Slunce nazýváme *heliosféra*. Je celá vyplněná částicemi slunečního větru. Heliosféra není kulová, jak by se mohlo zdát z jejího názvu, ale protáhlá. Její hranice je od Slunce v různých směrech různě vzdálená, zhruba 110 až 160 astronomických jednotek (au). Hraniční vrstva heliosféry se nazývá heliopauza. Jde o oblast, ve které končí vliv našeho Slunce. Na heliopauze poklesne radiální rychlost slunečního větru na nulu. Sluneční vítr je zastaven mezihvězdným prostředím, které se nachází za heliopauzou, a stane se jeho nedílnou součástí.

Velmi zajímavou oblastí uvnitř heliosféry je *terminační vlna*. Jde o místo, ve kterém rychlost částic klesá skokem na rychlost nižší, než je rychlost šíření zvuku ve slunečním větru³. Tato oblast má přibližně tvar povrchu koule a je vzdálena v závislosti na aktuální sluneční aktivitě přibližně 80 až 95 astronomických jednotek od Slunce. Zpomalení slunečního větru na terminační vlně s sebou nutně nese zvýšení hustoty letících částic. Představme si tuto situaci na příkladu automobilů jedoucích po dálnici. Pokud je provoz mírný a auta jedou rychle, mezi jednotlivými vozidly jsou velké rozestupy a hustota aut na dálnici je malá. Když ale první auto z nějakého důvodu musí zpomalit, zpomalují i ostatní vozy, rozestupy se přitom zkracují a hustota aut stoupá. Prostor mezi terminační vlnou a heliopauzou nazýváme *plášť heliosféry*.

3 **Rychlost zvuku v plazmatu** – na rozdíl od neutrálního plynu, kde se zvuk šíří díky srážkám neutrálních atomů, jde v plazmatu o interakci iontů zprostředkovanou elektrickými a magnetickými poli. Zvuk se proto šíří, na rozdíl od plynů, i v plazmatu s velmi nízkou koncentrací, a jeho rychlost je dobře definovaná.

Dosud nejvzdálenějšími objekty vypuštěnými člověkem jsou sondy Voyager 1 a Voyager 2 (obě startovaly v roce 1977). Dne 17. prosince roku 2004 se hustota plazmatu v okolí sondy Voyager 1 zvýšila na 2,5násobek původní hodnoty. Z toho lze usoudit, že sonda prošla terminační vlnou (ve vzdálenosti 94 astronomických jednotek) a vstoupila do pláště heliosféry. Sonda Voyager 2 prošla terminační vlnou ve vzdálenosti 84 astronomických jednotek dne 30. srpna 2007. Rozdílné vzdálenosti mohou být způsobeny změnou velikosti terminační vlny za tři roky, které uplynuly mezi průletem obou sond, případně nesféricností terminační vlny. Přesné určení polohy sond vzhledem ke hranici heliosféry je značně obtížné.

Obě sondy Voyager nám přichystaly ještě další překvapení. Po průchodu terminační vlnou se sondy dostaly do vnější části Sluneční soustavy, do pláště heliosféry. V blízkosti heliopauzy sondy nenalezly ostře ohraničenou oblast, jak bylo očekáváno, ale podivné magnetické bubliny připomínající magnetickou pěnu. Situace je znázorněna na dolním obrázku heliosféry Slunce na straně 68. Voyager 1 vstoupil do oblasti pěny v roce 2007 a Voyager 2 o rok později. Jednu bublinu proletí sonda zhruba za týden, průměr bublin se odhaduje na 160 milionů kilometrů (přibližně jako vzdálenost Země od Slunce). Bubliny jsou v plášti heliosféry, nicméně začíná být nejasné, zda vůbec existuje čelní rázová vlna tak, jak jsme si ji představovali. Vypadá to, že vůbec nemusí jít o nějakou ostrou hranici. Jedním z několika možných vysvětlení je představa, že k vytvoření jasně definované rázové vlny dojde jen tehdy, pohybuje-li se Slunce okolním prostředím nadzvukovou rychlostí. Rychlost šíření zvuku v plazmatu ale nezávisí jen na teplotě a hustotě plazmatu, jak je tomu u plynů, ale především na magnetickém poli. Slunce na cestě kolem jádra Galaxie, trávící přibližně 250 milionů roků, prochází oblastmi s proměnlivou intenzitou magnetického pole. Je možné, že v některých fázích letu kolem jádra Galaxie se Slunce pohybuje nadzvukově a v jiných podzvukově. S tím by mohlo souviset, že se výrazně ohraničená rázová vlna objevuje jen v některých fázích letu. V jiných je neostrá a stlačené záhyby plochy nulového pole zde vytvářejí magnetické bubliny. Nakolik je tato představa blízká realitě mohou odpovědět jedině další měření.

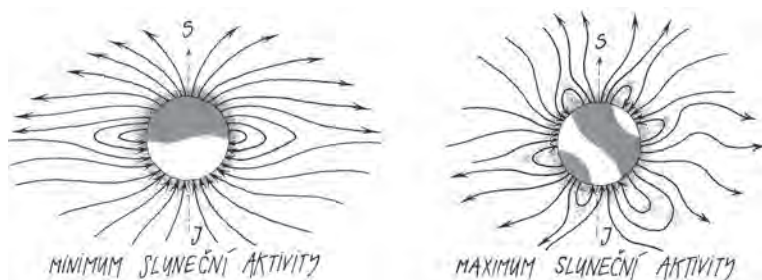
Sondy Voyager mají energetické prostředky (radioizotopové generátory) na shromažďování a zasílání základních vědeckých informací na Zemi alespoň do roku 2025.

Magnetosféra Slunce chrání Sluneční soustavu před nabitými částicemi přicházejícími z hlubin vesmíru. Kvalita tohoto ochranného štítu závisí na aktivitě Slunce a momentální velikosti slunečního magnetického pole; například vliv jedenáctiletého slunečního cyklu na změnu magnetosféry Slunce, a tím na tok kosmického záření, je poměrně dobře známý. Podle některých teorií může kosmické záření ovlivňovat počasí na Zemi a stav magnetosféry Slunce by tak mohl být z dlouhodobého hlediska spoluodpovědný například za střídání dob ledových a meziledových.

Globální pole Slunce

Globální magnetické pole Slunce se mění podle fáze cyklu sluneční aktivity. Mimo maximum je v poli nejvíce zastoupen dipólový moment, v maximu je pole výrazně složitější. Pojdme se nejprve podívat na jednodušší pole v okolí minima. Na jedné polokouli vycházejí siločáry směrem ven ze Slunce, na druhé se do Slunce vracejí. V okolí rovníku je malá oblast uzavřených siločar. Ostatní siločáry jsou otevřené a sahají daleko za hranice Sluneční soustavy.

Sluneční magnetické pole má celou řadu příspěvků, nejjednodušší z nich je tzv. dipólový člen, druhým v pořadí je pak kvadrupólový příspěvek. Magnetické pole v období minima sluneční aktivity má dipólovou složku zcela dominantní a další příspěvky zanedbatelné.



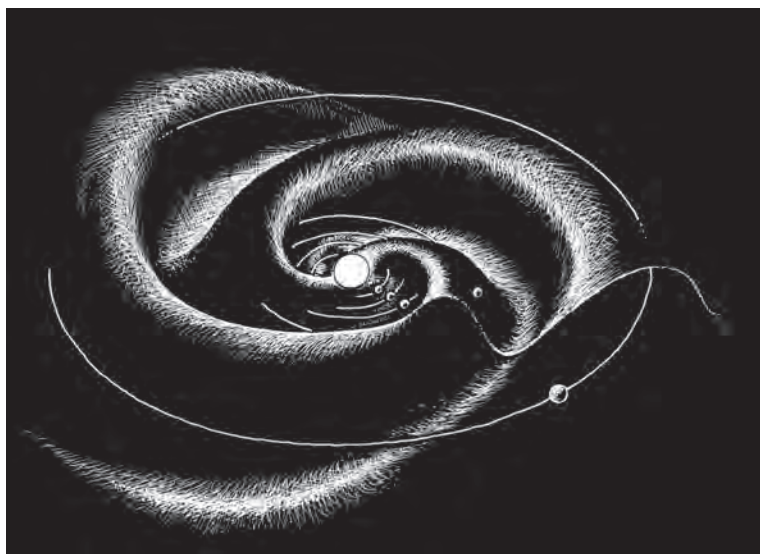
V rovníkové rovině je plocha nulového pole zvaná *Parkerova plocha* podle Eugena Parkera (*1927), který ji jako první popsal. Na jedné straně Parkerovy plochy mají siločáry směr od Slunce, na druhé směr ke Slunci. Plocha je díky rotaci Slunce zvlněná do podoby spirály, kterou nazýváme Parkerova spirála. První sondy nesoucí magnetometr a letící Sluneční soustavou zaznamenávaly při průchodu Parkerovou plochou zdánlivě nevysvětlitelnou změnu orientace magnetického pole. Dnes víme, že touto plochou procházejí při oběhu kolem Slunce všechny planety Sluneční soustavy.

Podél Parkerovy plochy teče ze Slunce pomalý sluneční vítr; jeho rychlost dosahuje stovky kilometrů za sekundu, nejvýše 500 km/s. Naopak ve směru pólů teče rychlý sluneční vítr, jehož rychlosti mohou dosáhnout až 900 km/s. Sluneční vítr, tvořený zejména protony, elektrony a alfa částicemi (jádry helia), zaplavuje celou Sluneční soustavu. Typická koncentrace u Země je značně proměnlivá, průměrně dosahuje 7 protonů v 1 cm^3 prostoru. Sluneční vítr objevil anglický astronom Richard Christopher Carrington (1826–1875) v roce 1859, kdy bylo půl dne po slunečním vzplanutí narušeno magnetické pole Země. Slunce ztrácí slunečním větrem řádově milion tun látky za sekundu. Podrobněji si o slunečním větru povíme v příští kapitole.

V maximu slunečního cyklu dochází k přepólovávání magnetického pole Slunce. V tomto období je tvar pole mnohem složitější než dipólový. V okolí Slunce se střídají oblasti otevřených a uzavřených siločar a Slunce vypadá jako „vlasatá koule“. Chaoticky se střídají oblasti rychlého a pomalého slunečního větru. Po maximu si severní a jižní magnetický pól vymění místa a v následujícím minimu budou siločáry vycházet ze Slunce na opačné polokouli než v předcházejícím minimu.

Lokální pole Slunce

Magnetické pole při povrchu Slunce je často značně komplikované. Ze slunečních skvrn například vyvěrají husté provazce magnetických siločar a do jiných skvrn se zase noří. Sluneční skvrny jsou viditel-



Parkerova plocha – plocha nulového magnetického pole

nými projevy magnetických toků v konvektivní zóně. Magnetické pole ve skvrnách typicky dosahuje hodnoty $0,1 \text{ T}$ a spolu s expanzí plazmatu proudícího z nitra způsobuje nižší teplotu skvrn oproti okolí (o přibližně $1\,500 \text{ K}$); proto se skvrny zdají být v optické oblasti tmavé. Ve skutečnosti však také září, jen méně intenzivně. V ultrafialovém oboru jsou dokonce jasnější než okolí, což je způsobeno zářícími elektrony kroužícími kolem siločar magnetického pole. Skvrny mají někdy i $50\,000 \text{ km}$ v průměru (tj. několikrát násobek průměru Země) a vyskytují se většinou ve skupinách. Poprvé byly pozorovány v roce 1611. Vnitřní tmavou část sluneční skvrny nazýváme *umbra*, vnější světlejší okolí *penumbra*. Prohlédněte si detailní fotografii slunečních skvrn na obr. 23 v barevné příloze.

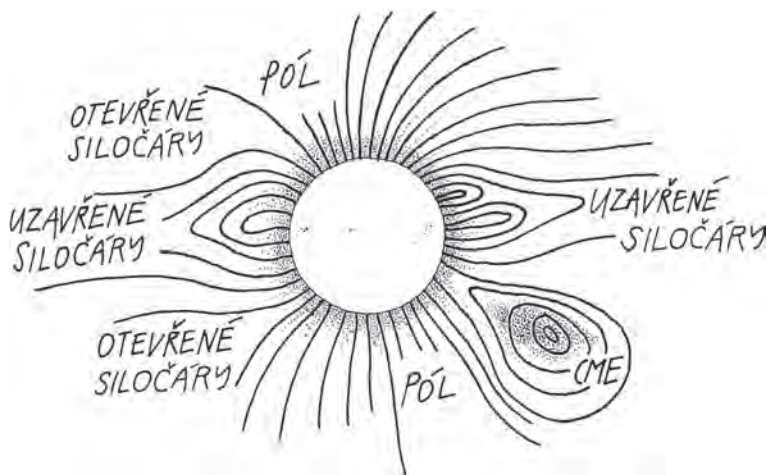
Magnetické pole skvrn zasahuje hluboko pod povrch Slunce a je ukotveno až v tachoploše na hranici mezi konvektivní vrstvou a vrstvou v zářivé rovnováze. Jak už jsme se zmínili, plazma v podpovrchové části skvrn je zkoumáno za pomoci helioseismologie, obdobně jako toky vrstev vedoucí ke vzniku slunečního dynama.



Velmi atraktivní jsou počítačové rekonstrukce magnetických siločar na základě dat ze sondy SOHO (viz obr. 25 v barevné příloze). Siločáry magnetického pole jsou dobře patrné také přímo na ultrafialových snímcích ze sondy TRACE (viz obr. 26 v barevné příloze). Jak je to možné? Jde o obdobný mechanismus jako u známého školního pokusu se železnými pilinami. Piliny se nasypou na papír a pod ně se vloží tyčový magnet. Po zatřesení papírem se piliny seřadí podél siločar a vytvoří charakteristické obrazce. U povrchu Slunce je mechanismus velmi podobný, jen namísto pilin využíváme nabitě částice. Ty krouží kolem siločar magnetického pole a září přitom v ultrafialovém oboru. Tím siločáry zviditelní a vzniknou efektní snímky siločar pole.

Zajímavým jevem je *magnetická rekonekce* (přepojení siločar), podrobněji popsaná v první kapitole. Pokud se k sobě přiblíží dvě magnetické siločáry opačného směru, může dojít k jejich přepojení do energeticky výhodnější konfigurace. Přitom se uvolní značné množství energie, která zahřeje přítomné plazma, a to vyzařuje nadbytečnou energii v celém spektrálním oboru od rádiových vln přes rentgenové záření až po gama záření. Takovou událost nazýváme *sluneční vzplanutí*. Vzplanutí jsou klasifikována do čtyř tříd (B, C, M, X), které odpovídají toku energie ve vlnovém oboru 0,1 až 0,8 nm. Vzplanutí třídy B odpovídá toku menšímu než 10^{-6} W/m², třída C toku v rozmezí 10^{-6} až 10^{-5} W/m², třída M 10^{-5} až 10^{-4} W/m² a poslední třída X jsou vzplanutí s tokem energie vyšším než 10^{-4} W/m². Podobně jako spektrální třídy hvězd se tyto třídy dělí na číselné podtřídy (například mezi třídami C a M jsou podtřídy C1 až C9).

Při magnetické rekonekci může dojít kromě slunečních vzplanutí i k odtržení oblaku plazmatu spolu s magnetickým polem a jeho následnému putování Sluneční soustavou. Takový oblak nazýváme *plazmoid* a celému jevu říkáme *koronální výron hmoty* (*Coronal Mass Ejection*, CME). K výronům CME dochází poměrně často, přičemž jejich četnost odpovídá sluneční aktivitě: v minimu dochází k CME přibližně jednou za den, v maximu až třikrát denně. Pokud se plazmoid vyvržený ze Slunce setká s magnetosférou některé planety, může ji částečně narušit, na planetě dojde k magnetickým bouřím



(směr štělky kompasu by se plynule měnil do různých směrů) a rozsáhlým polárním zářím. Ze Země uvidíme světelné efekty z CME za 8 minut, rychlé elektrony k nám doletí za 20 až 40 minut a samotný plazmoid za 1 až 4 dny. Některé plazmoidy mohou na Zemi způsobit rozsáhlé výpadky telekomunikačních sítí i další škody, proto se v současnosti tyto jevy pečlivě monitorují. Někdy se hovoří o sledování „kosmického počasí“.

Na konci roku 2000 bylo postavení planet takové, že plazmoid o celkové hmotnosti 8 miliard tun, vyvržený ze Slunce 8. listopadu 2000, proletěl 9. listopadu kolem Země, 18. listopadu dorazil k Jupiteru a 7. prosince k Saturnu; na všech třech planetách způsobil polární záře. Šlo o zcela mimořádný úkaz monitorovaný mnoha družicemi a sondami.

Celá Sluneční soustava je ponořena do magnetického pole Slunce a s jeho projevy se setkáváme na každém kroku. Jakékoli změny na Slunci se po určité době projeví v magnetosférách jednotlivých planet. Slunce svou gravitací drží planetární systém pohromadě po miliardy let a prostřednictvím svého magnetického pole dává tělesům Sluneční soustavy najevo, co se na Slunci odehrává v každém okamžiku jeho života.

Víte, že?

■ Víte, že jsou cykly sluneční činnosti číslovány? Objeveny byly v roce 1843 německým astronomem Heinrichem Schwabem, ale jsou očíslovány i do minulosti. Číslo 1 získal cyklus probíhající v letech 1755 až 1766. V době psaní této knihy (2021) probíhá cyklus číslo 25, který začal v roce 2019.

■ Víte, že jedenáctiletý cyklus sluneční činnosti nemusí trvat 11 let? Jde o průměrnou hodnotu, zaznamenán byl již devítiletý i čtrnáctiletý cyklus. V některých dlouhých obdobích se dokonce sluneční skvrny téměř nevyskytují. Příkladem může být minimum Maunderových probíhající v letech 1638 až 1715 nebo Daltonovo minimum z let 1790 až 1830.

■ Víte, že už v roce 1934 dokázal anglický astronom Thomas Cowling, že magnetické pole hvězd a planet nemůže být nikdy statické? Cowlingův výpočet, který ukázal nutnost překlápění polí, se nyní označuje jako anti-dynamo teorém (neexistuje statické tekutinové dynamo).

■ Víte, že naše Slunce v závěru svého života odhodí vnější vrstvy a vytvoří tzv. planetární mlhovinu? Takové mlhoviny nemají nic společného s planetami, jejich název pochází z období, kdy se v jednoduchých dalekohledech tyto mlhoviny jevily jako malé kotoučky připomínající planety.

Poučení na závěr: I to, co se jeví jako neměnné, má vždy svůj počátek a konec. Ani Slunce na obloze, ani ostatní hvězdy nejsou ve skutečnosti trvalou jistotou, jak by se mohlo na první pohled zdát.





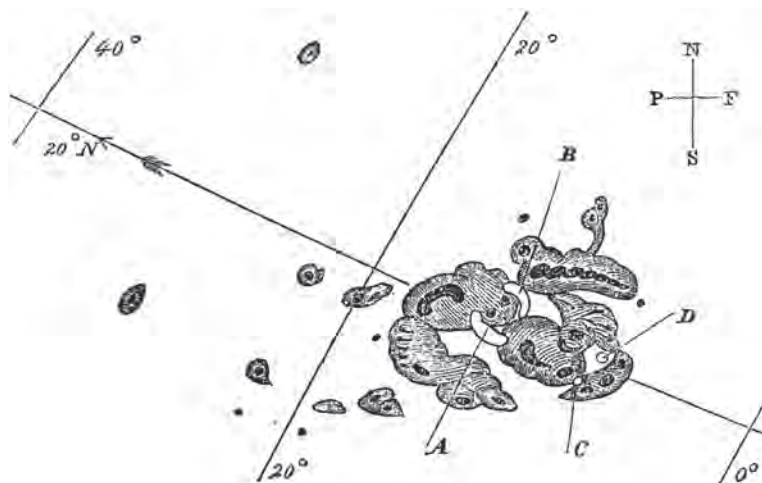
4. Sluneční vítr

*„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 magnetozykové 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 slunečního magnetického 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 *Odyssey* 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.

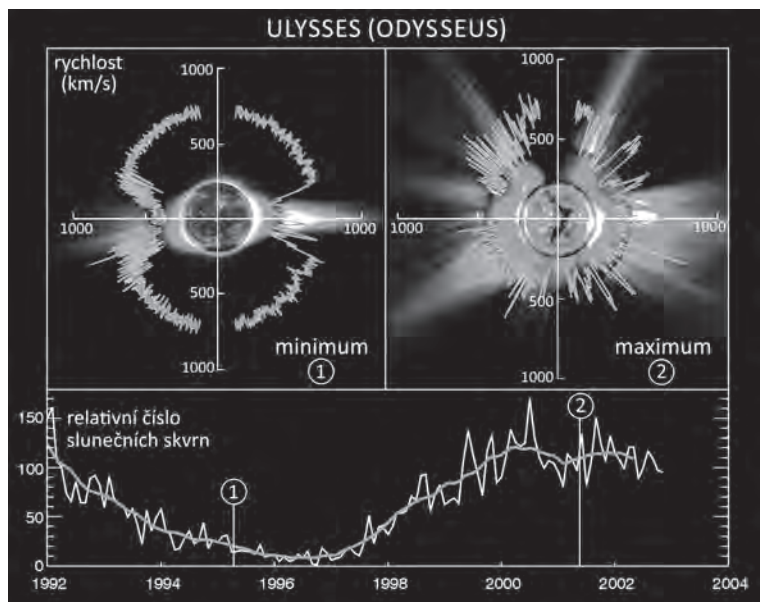
podařilo vyfotografovat i vznik pomalého slunečního větru v rovníkové oblasti Slunce.

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, unikál 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.

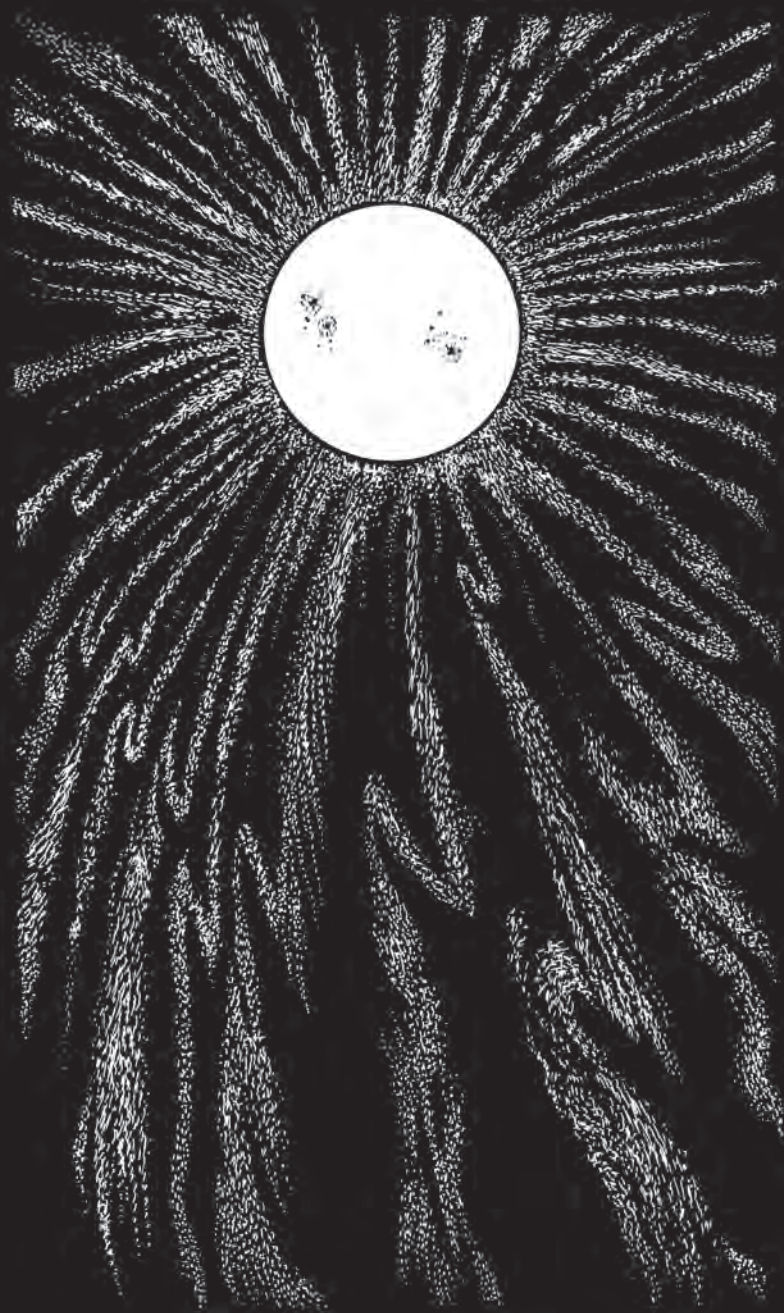


Sonda Odysseus. Měření rychlosti slunečního větru při dvou průletech kolem Slunce. První byl těsně před minimem sluneční aktivity, druhý v maximu sluneční aktivity. Sluneční aktivita je znázorněna v dolní části pomocí Wolfova čísla (relativního čísla počtu slunečních skvrn). Největší přiblížení sondy 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 Alfénových 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 zvlíná 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 naději 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 odrážejících 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 periferii 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 kaspy, 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 elektřinu. Odpadní teplo je vyzařováno do okolního prostoru.

6 **Pioneer 10 a 11** – dvojice stejných amerických sond určených k výzkumu Jupiteru, Saturnu a periferie Sluneční soustavy. SONDY 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 nabité 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 brzdícího 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.

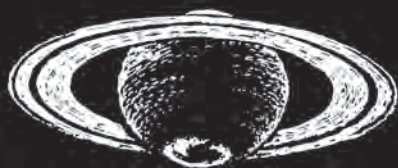
SLUNCE CME 8. 11. 2000



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.

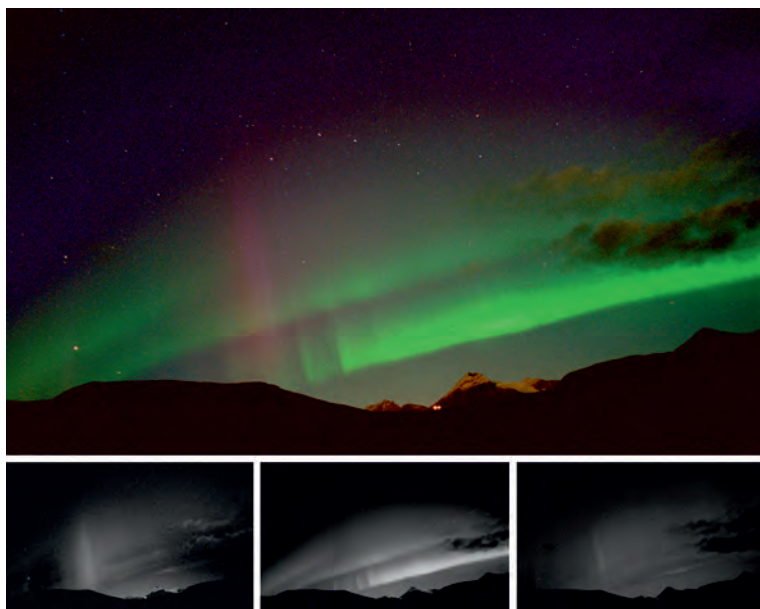
Ve vnitřní části Sluneční soustavy je poměr atomů neonu a kyslíku dán složením Slunce. Na každých 20 atomů neonu se zde vyskytuje 111 atomů kyslíku. Za heliopauzou (hranicí magnetického vlivu Slunce) jsou ale poměry zcela jiné. Podle měření sondy IBEX připadá v blízkém mezihvězdném prostředí na každých 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 vyvrhováním 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.





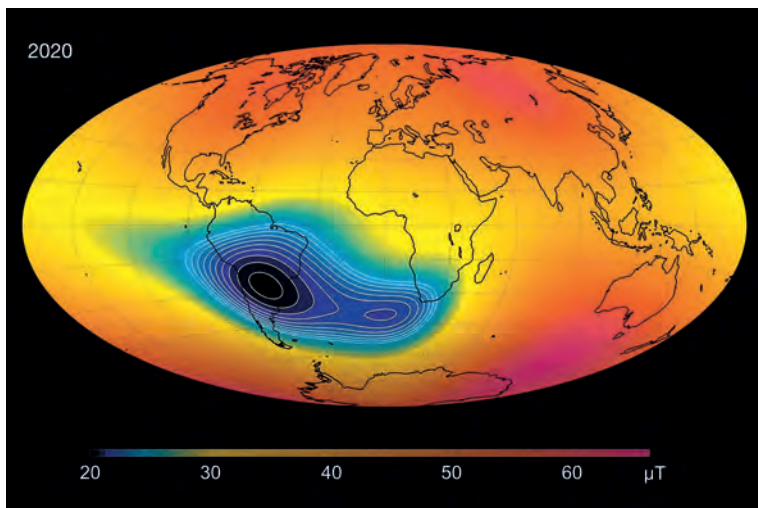
Obr. 1: Ukázka rozložení snímku do tří barevných kanálů. Zrnitost je nejvíce patrná v červené barvě (vlevo), méně pak v modré barvě (vpravo). V zeleném kanálu (uprostřed) se zrnitost téměř neprojevuje. Snímek byl pořízen dne 18. 9. 2002 v 0:52 SEČ v horách Skjomedalen na diapozitivní materiál Kodak EPL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



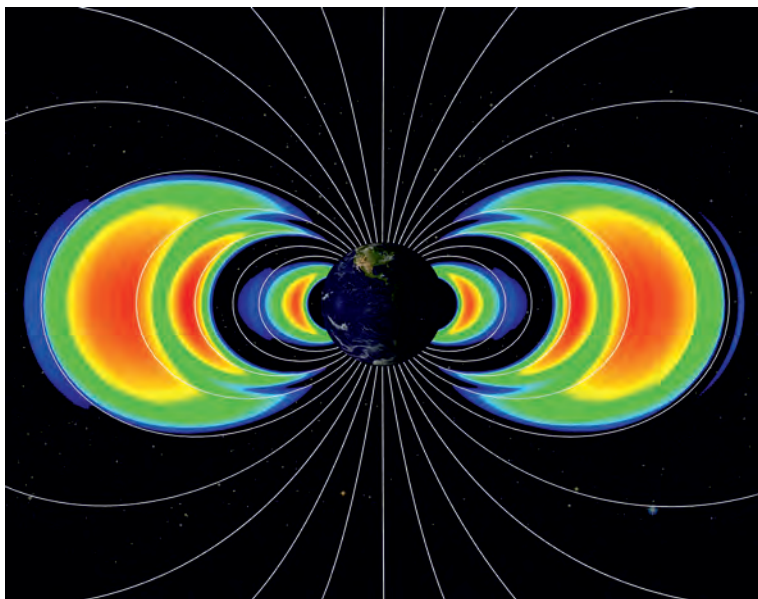
Obr. 2: Aurorální ovál a pod ním záclony polárních září dne 10. 9. 2012, 0:33, PENTAX K, ISO 800, expozice 20 s. Zkuste nalézt Velký vůz! Foto AGA.



Obr. 3: Polární záře nad Kanadou vyfotografovaná z Mezinárodní kosmické stanice dne 20. ledna 2016 astronautem Evropské kosmické agentury Timem Peakem. Jasně město napravo je Edmonton, nalevo Whitecourt. Zdroj: ESA, NASA, ISS.

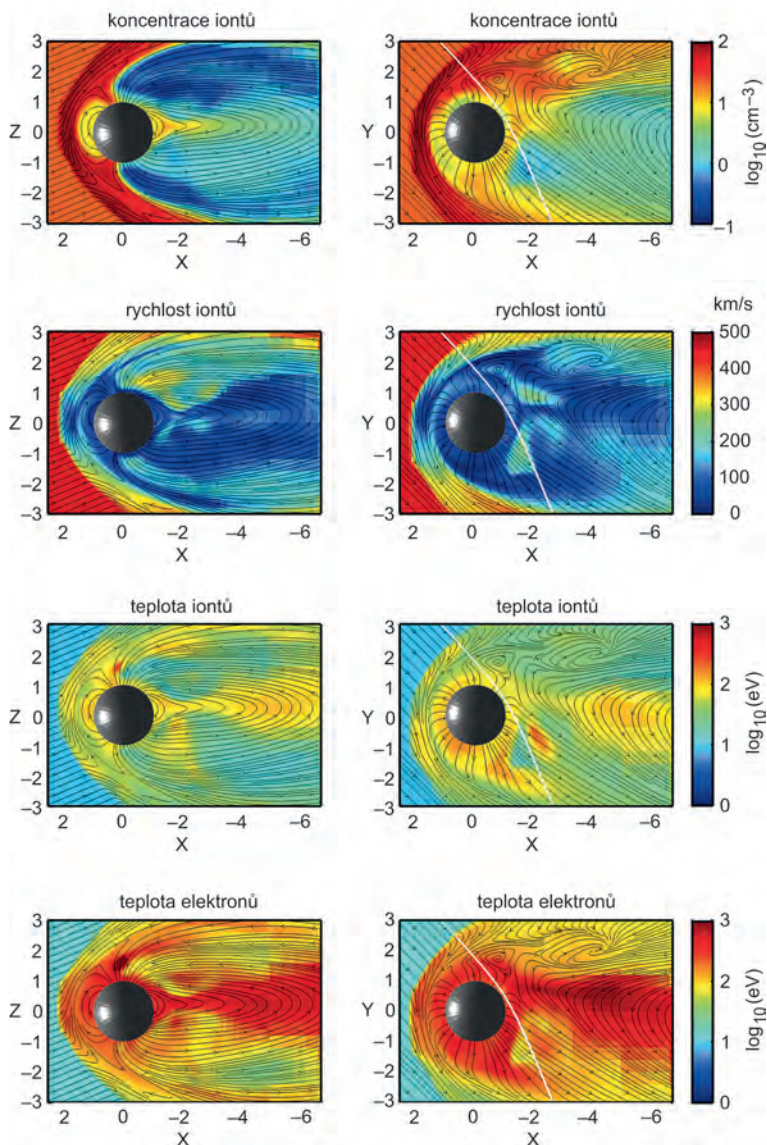


Obr. 4: Jihoatlantická anomálie. Zemské pole není na povrchu homogenní. Nejnížší hodnotu má nad Jižní Amerikou ($20 \mu\text{T}$). Nižší magnetické pole způsobí, že se vnitřní radiační pás přiblíží k povrchu na stovky kilometrů. Zdroj: NASA, ESA.

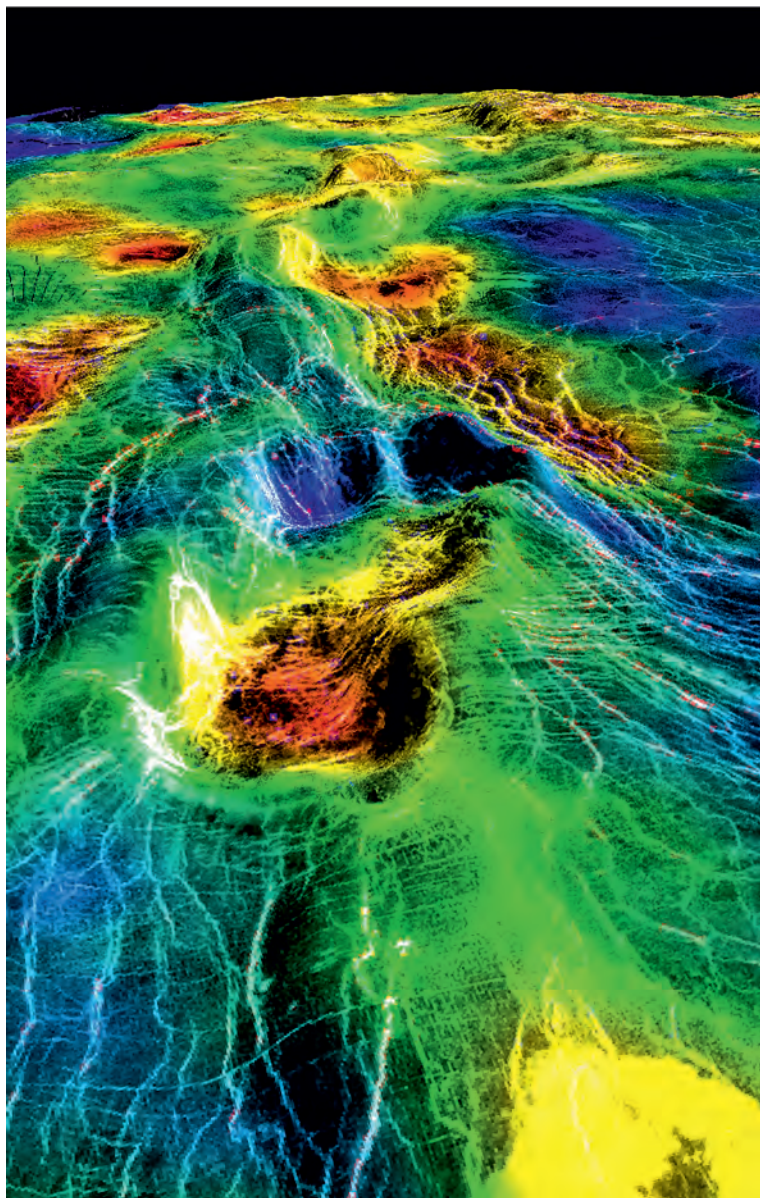


Obr. 5: Třetí radiační pás byl objeven 30. 8. 2012 sondami Van Allen Probes. Jde o dvojici sond mapujících radiační pásy. Zdroj: NASA GSFC, JHU, APL.

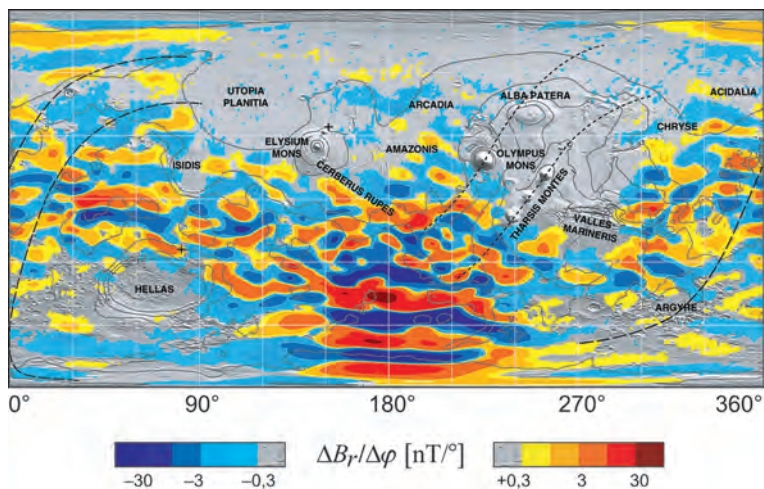
MAGNETOSFÉRA MERKURU (MESSENGER)



Obr. 6: Model magnetosféry Merkuru vytvořený na základě dat pořízených sondou MESSENGER. Osa X míří ke Slunci, Y míří v rovině oběhu, Z kolmo na oběh. Jednotky jsou v poloměrech Merkuru. Zdroj: NASA, Mehdi Benna a kol, Icarus.



Obr. 7: Pohled na povrch Venuše v oblasti Sedna Planitia vytvořený ze stereoskopického měření sondy Magellan. Barvy vyjadřují vyzařování povrchu. Kruhové útvary jsou pravděpodobně výrony magmatu. Zdroj: NASA, JPL, USGS.



Obr. 8: Remanentní magnetické pole na Marsu naměřené sondou Mars Global Surveyor v roce 2005. Střídající se pásy magnetického pole souvisí s jeho přepólováním. Zdroj: J. R. P. Connerney, Proc. Natl. Acad. Sci., MGS, ER.



Obr. 9: Povrch Marsu vyfotografovaný vozítkem Curiosity po průjezdu písčnou dunou Dingo Gap v únoru 2014. Jako měřítko snímku lze využít vzdálenost mezi stopami kol, která je 2,7 metru. Zdroj: NASA, Mars Science Laboratory, Curiosity.

SOJOURNER

5.7. – 27. 9. 1997
63×48×28 cm
hmotnost: 11,5 kg
dráha: 100 m



OPPORTUNITY

2004 – 2018
1,6×2,3×1,5 m
hmotnost: 185 kg
dráha: 45 km



SPIRIT

2004 – 2010
1,6×2,3×1,5 m
hmotnost: 185 kg
dráha: 8 km

CURIOSITY

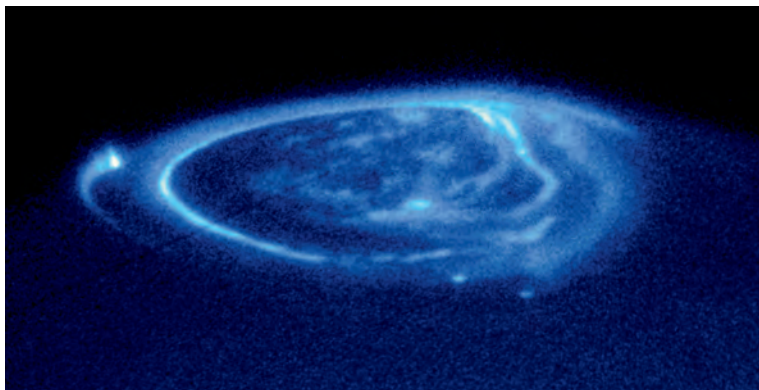
2012 – dosud
2,9×2,7×2,2 m
hmotnost: 899 kg
dráha: 25 km



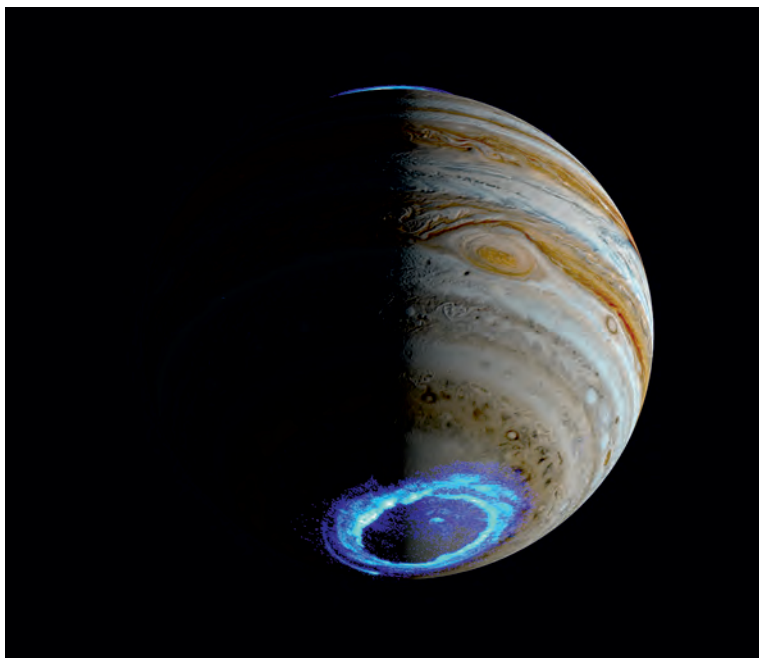
PERSEVERANCE

2021 přistání
2,9×2,7×2,2 m
hmotnost: 1 025 kg
další vybavení: dron

Obr. 10: Jednotlivá vozítka brázdící povrch Marsu. V současné době (2021) jsou aktivní jen Curiosity a Perseverance, která přistála teprve nedávno, 18. února 2021, v geologicky zajímavém kráteru Jezero. Zdroj: NASA, JPL-Caltech, ASU.



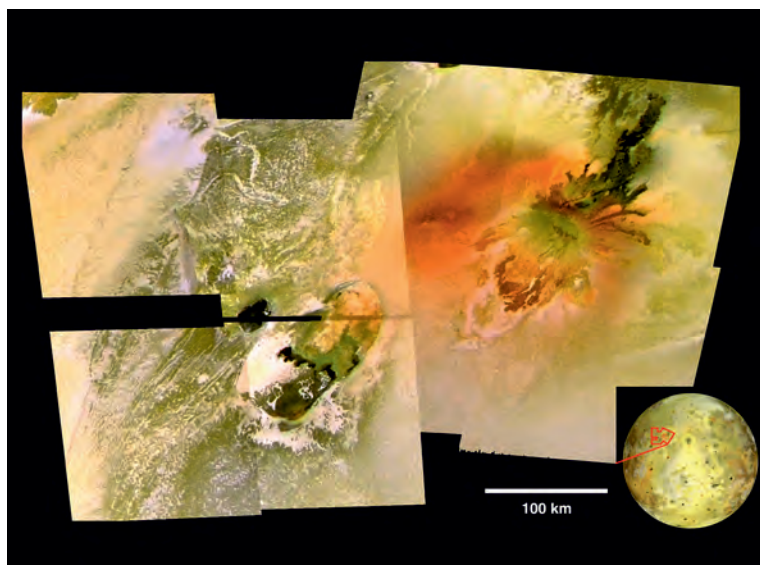
Obr. 11: Polární záře na severním pólu Jupiteru. Tři jasné skvrny jsou způsobeny narušením magnetického pole Jupiterovými měsíci Io (nalevo), Ganymed (napravo dole od středu, na okraji polární záře) a Europa (napravo dole od otisku Ganymedu). Zdroj: NASA, ESA, HST, 2000.



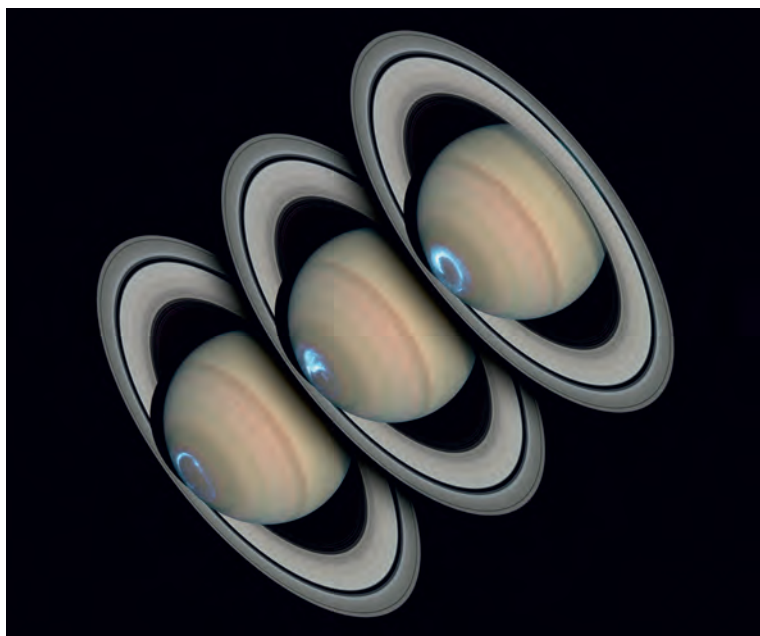
Obr. 12: Polární záře ne Jupiteru vyfotografovaná v ultrafialovém oboru sondou Juno při jejím třetím oběhu. Jako podklad je zvolena vizuální fotografie z téže sondy. Zdroj: Bertrand Bonford, Ulièle, SwRI, NASA.



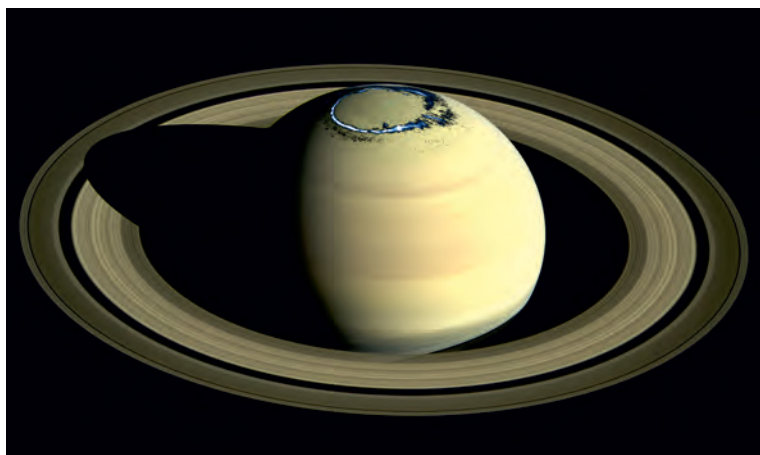
Obr. 13: Snímek Jupiterovy oblačnosti pořízený sondou Juno. Dobře patrný je pás menších bílých cyklón vyskytujících se jižně od rovníku. Zdroj: Juno, NASA.



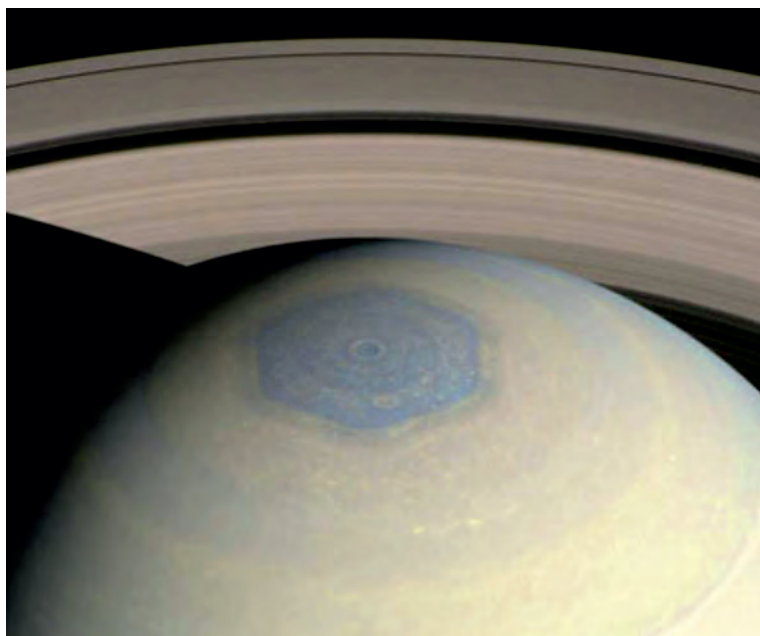
Obr. 14: Aktivní vulkán Culann Patera na Jupiterově měsíci Io, vyfotografovaný sondou Galileo. Patrné jsou proudy lávy. Io, nejvnitřnější Jupiterův velký měsíc, má rozměry přibližně jako náš Měsíc. Zdroj: Galileo Project, JPL, NASA.



Obr. 15: Polární záře na Saturnu fotografované Hubblem ve dnech 24., 26. a 28. ledna 2004 (postupně zleva). Fotografie jsou kombinací vizuálního (podklad) a UV oboru (aurora). Zdroj: NASA, ESA, J. Clarke (Boston University).



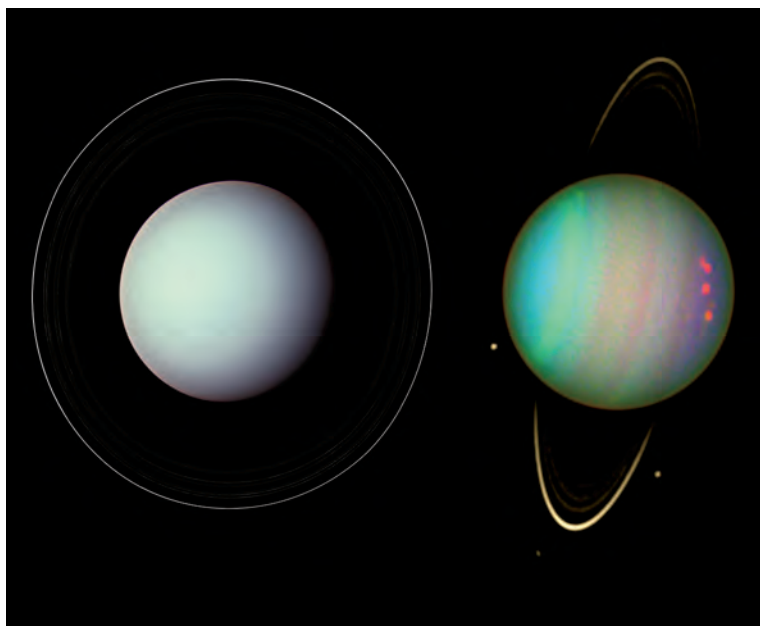
Obr. 16: Polární záře na Saturnu vyfotografovaná na severní polokouli sondou Cassini dne 20. srpna 2017 v ultrafialovém oboru. Podkladový snímek je z Cassini z roku 2016. Zdroj: NASA, JPL-Caltech, Space Science Institute, A. Bader, LU.



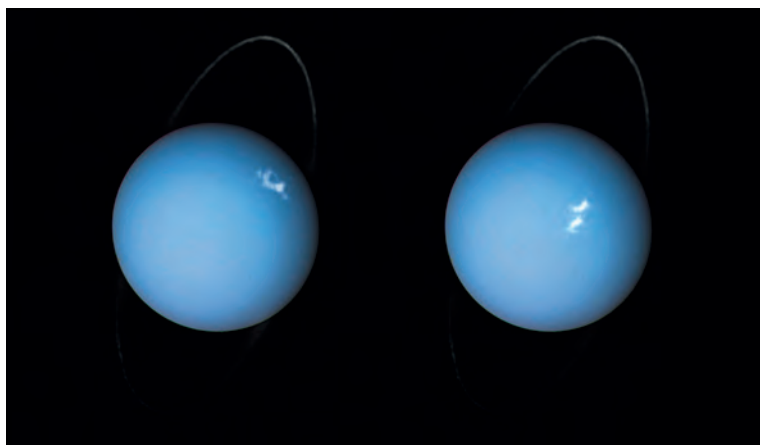
Obr. 17: Šestiúhelník na severním Saturnově pólu. Nezvyklý útvar pravděpodobně vzniká diferenciální rotací oblačných vrstev. Poprvé byl pozorován misí Voyager v roce 1981. Zdroj: NASA, ESA, Cassini, JPL-Caltech, SSI, Val Klavans.



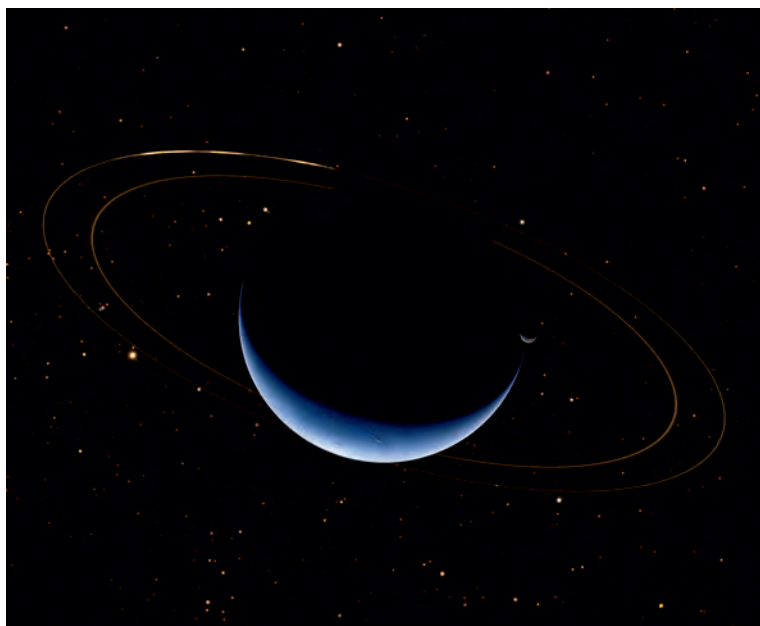
Obr. 18: Takto nějak by měl vypadat povrch Saturnova měsíce Titanu s uhlovodíkovými jezery. Tato vize vznikla v NASA na základě dat naměřených při přistání pouzdra Huygens mise Cassini. Zdroj: NASA, ESA, Cassini, Huygens.



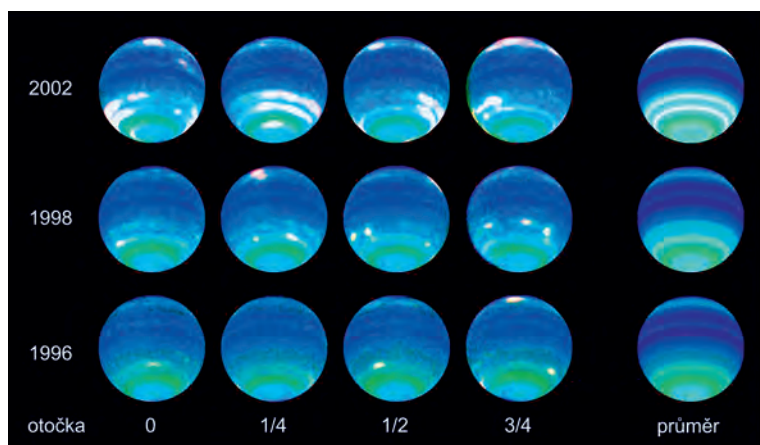
Obr. 19: Nalevo je snímek Uranu z Voyageru 2 (1986), bez známek pásové struktury. Napravo je pozdější snímek z Hubblova vesmírného dalekohledu (2003), pásová struktura je zjevně viditelná. Zdroj: NASA, JPL, Voyager 2, HST, D. Macháček.



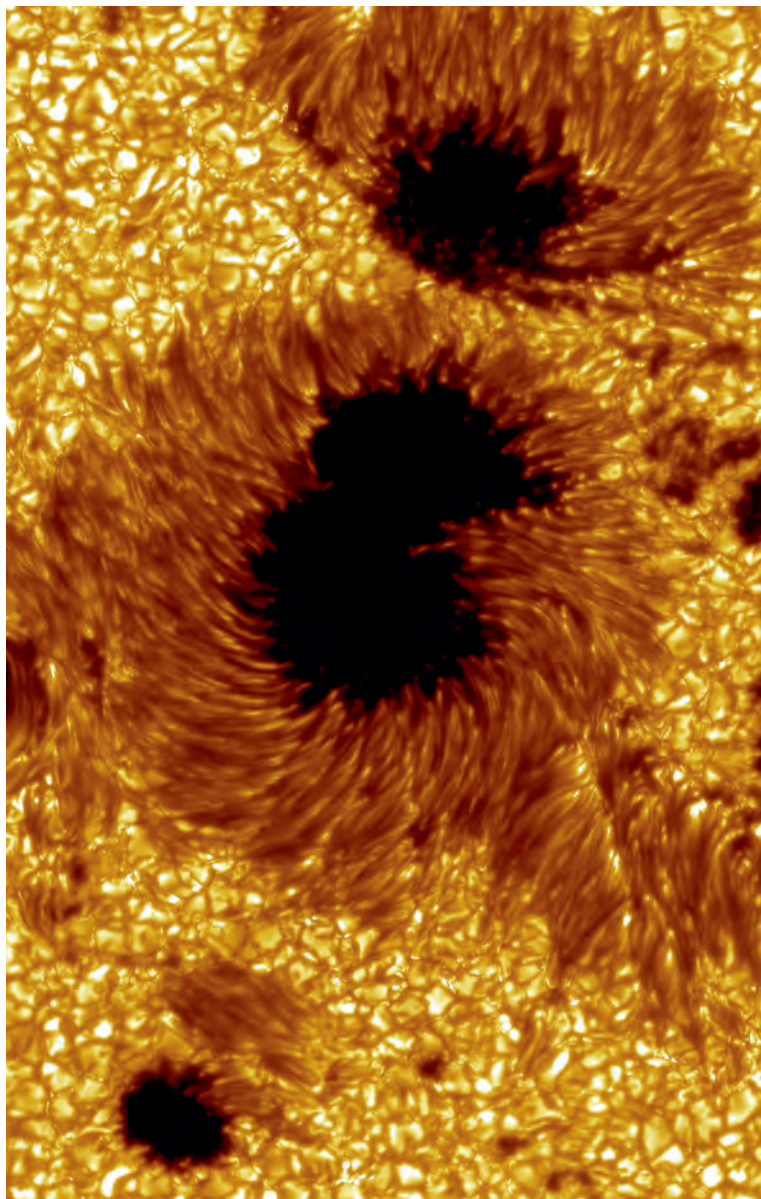
Obr. 20: Kompozitní snímek polárních září na Uranu. Podklad je z Voyageru 2, polární záře způsobené excitovaným vodíkem byly snímkovány Hubblem v letech 2012 a 2014 v UV oboru. Zdroj: ESA/Hubble/NASA/ Observatoire de Paris.



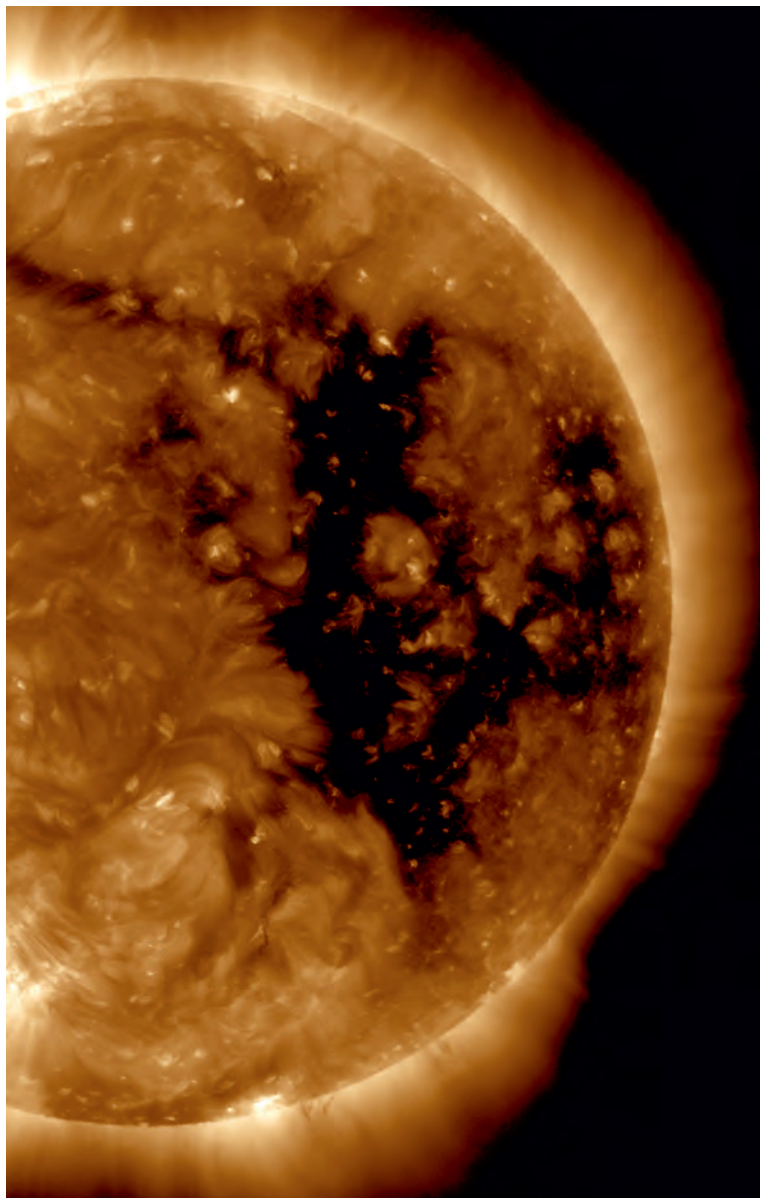
Obr. 21: Počítačový „snímek“ Neptunu, Tritonu a prstenců. Podkladem byly záběry z průletu Voyageru 2 v roce 1989. Na pozadí byly přidány hvězdy z katalogu s reálnými polohami pro okamžik „koláže“. Počítačové zpracování: Rolf Olsen.



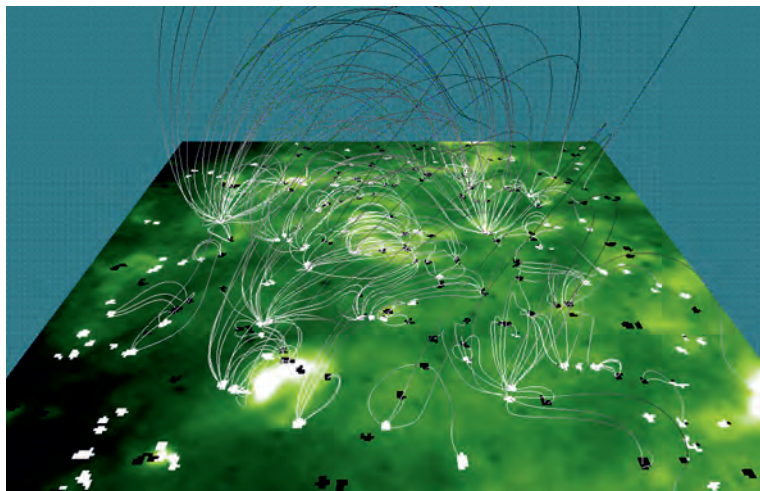
Obr. 22: Změny vzhledu Neptunu v letech 1996 až 2002. Ve sloupcích jsou Hubblovým vesmírným dalekohledem zachyceny čtyři fáze v průběhu otočky kolem osy, v posledním sloupci je hodnota průměrovaná za celou otočku. Zdroj: NASA, HST.



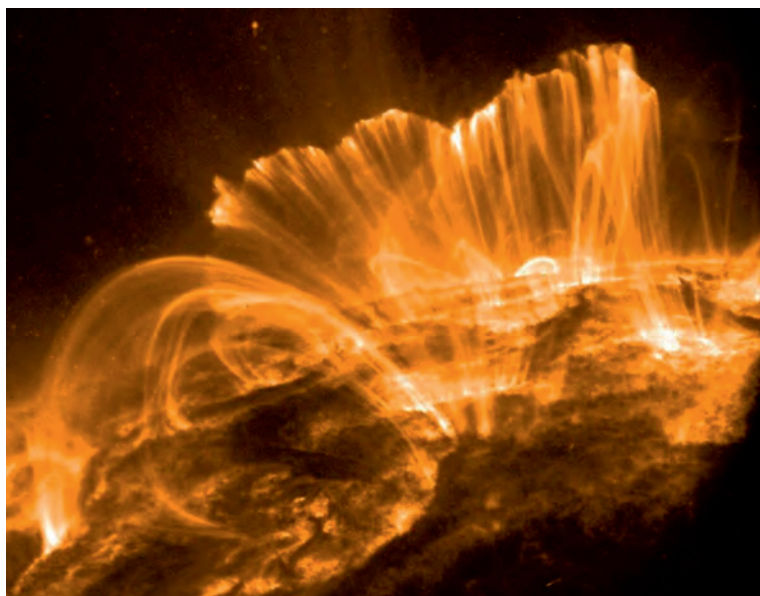
Obr. 23: Snímek slunečních skvrn a granulace pořízený Švédským slunečním dalekohledem, který pracuje na ostrově La Palma ve Španělsku. Temné centrum skvrny se nazývá umbra, vláknitá periferní část penumbra. Zdroj: SST, 2003.



Obr. 24: Rozsáhlá koronální díra vyfotografovaná sondou SDO v roce 2015 v UV oboru. Jde o oblast nízké hustoty s otevřenými siločarami magnetického pole, podél nichž uniká rychlý sluneční vítr. Zdroj: NASA/SDO/AIA/GSFC.



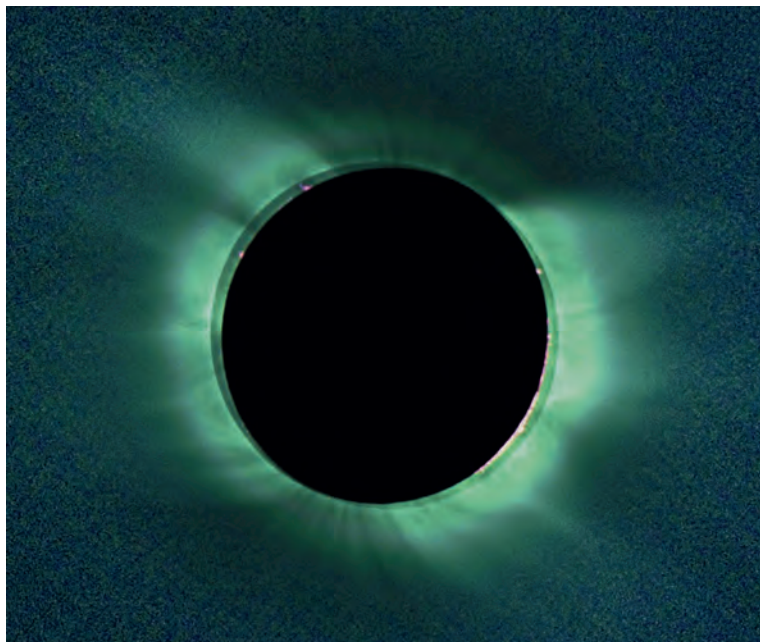
Obr. 25: Počítačová rekonstrukce magnetických siločar na povrchu Slunce z dat sondy SOHO. Siločáry vycházejí z bílých plošek a vstupují zpět v černých ploškách. Odstín povrchu odpovídá teplotě. Zdroj: SOHO/MDI+EIT, 1998.



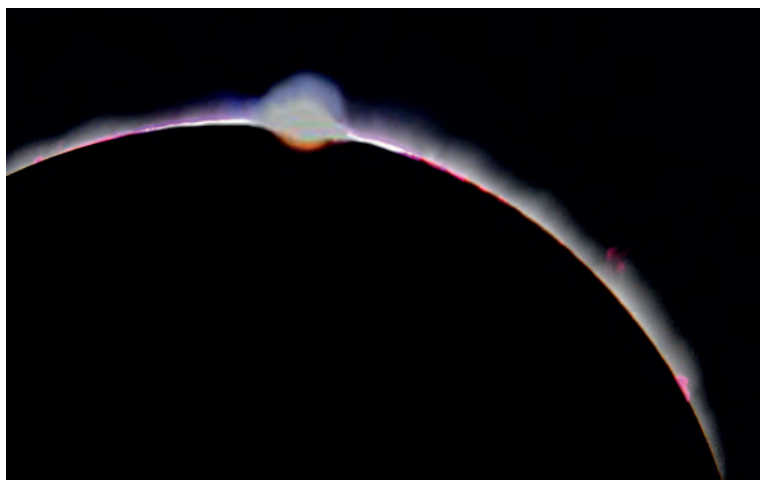
Obr. 26: Skutečné siločáry magnetického pole viditelné v ultrafialovém oboru na vlnové délce 17,1 nm. Smyčky spojují místa opačných polarit magnetického pole, které tvoří lokální dipól. Zdroj: Sonda TRACE, NASA, 2000.



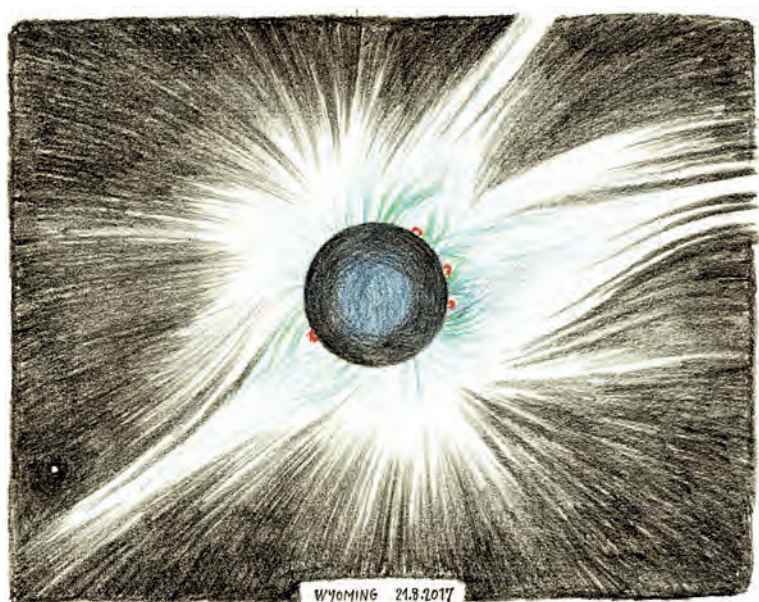
Obr. 27: Koronální výron hmoty z 31. srpna 2012. Dobře patrné jsou vláknité struktury ovládané magnetickým polem. Rychlost vyvrženého oblaku byla 1400 km/s. Plazmoid s sebou nesl zamrzlé magnetické pole. Zdroj: NASA GSFC, SDO.



Obr. 28: Kompozitní snímek složený z pěti snímků s viditelným pohybem měsíčního okraje (ostrá hrana ve vnitřní koróně). Patrné jsou protuberance z počátku i konce zatmění. Zdroj: Turecko, 29. 6. 2006, expedice Aldebaran.



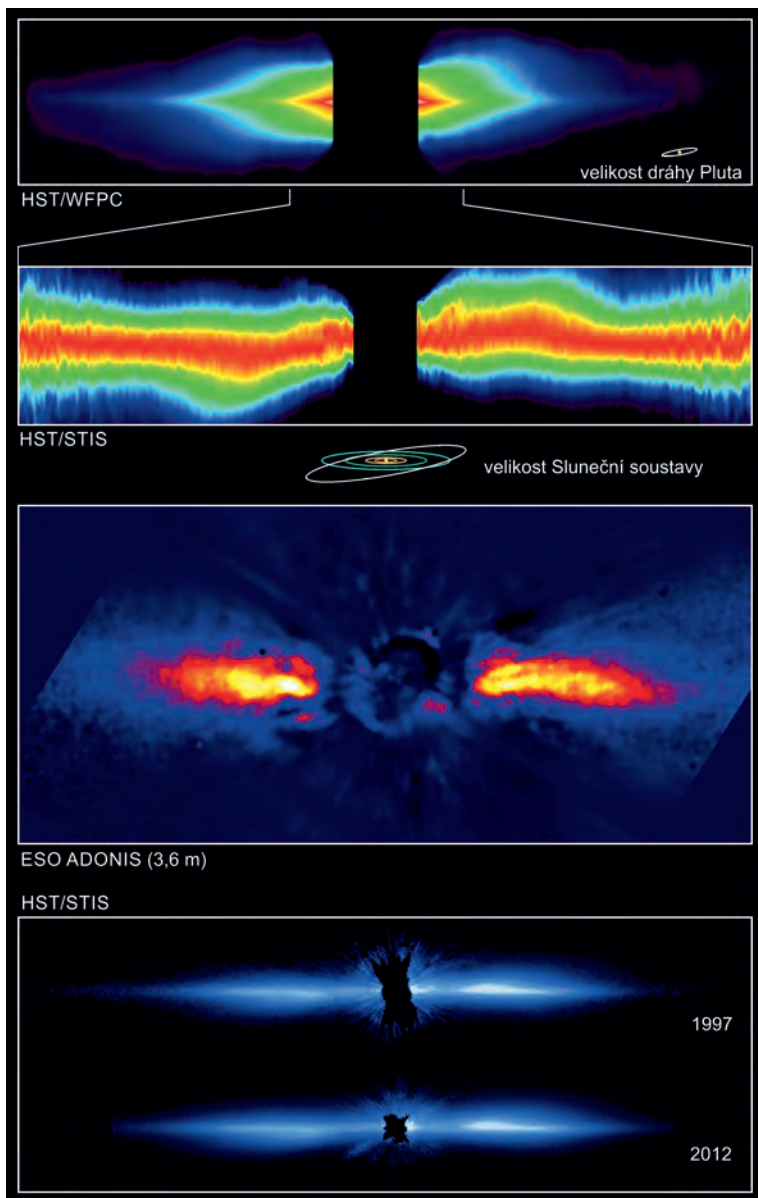
Obr. 29: Protuberance pozorované při výstupu Slunce z měsíčního stínu (třetí kontakt) při zatmění v Číně dne 22. července 2009. Zdroj: expedice Aldebaran.



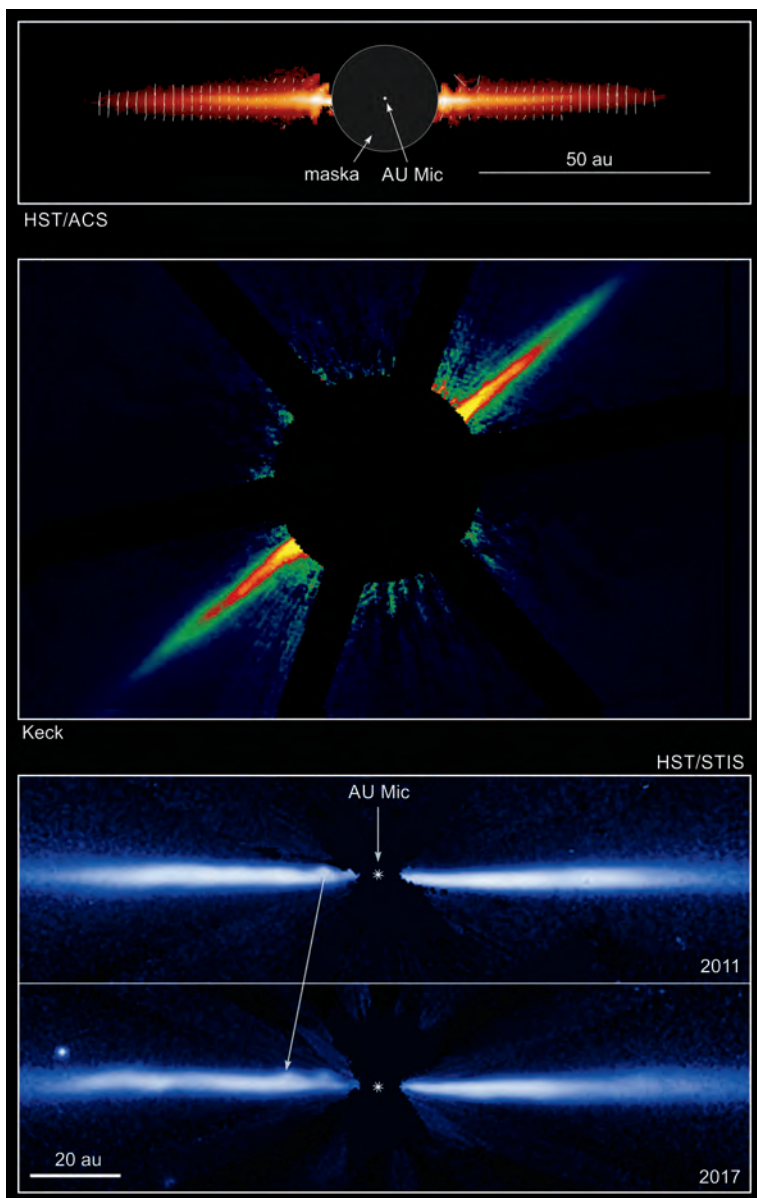
Obr. 30: Zákres koróny a protuberancí pozorovaných při úplném zatmění Slunce v USA dne 21. srpna 2017. Kresba: Ivan Havlíček, expedice Aldebaran.



Obr. 31: Expedice Aldebaranu za zatměním Slunce do Spojených států amerických. Skupinová fotografie při pozorování, Wyoming 21. srpna 2017.



Obr. 32: Protoplanetární disk v okolí hvězdy Beta Pictoris nacházející se v souhvězdí Malíře). Na spodním snímku jsou dobře patrné změny protoplanetárního disku za pouhých 15 let. Zdroj: HST/STIS/WFPC2, NASA, ESA, ESO/ADONIS.



Obr. 33: Protoplanetární disk extrémně mladé hvězdy AU Microscopii (stáří 23 milionů let). V disku je patrný vývoj chuchvalců látky. Samotná hvězda je zakryta maskou. Zdroj: HST, Keck, UCAL, J. Wisniewski, C. Grady, G. Schneider.



Obr. 34: Obří molekulární mračno v souhvězdí Kasiopeji v těsné blízkosti mlhoviny Bublina (NGC 7635). Bublina je vyfukována intenzivním hvězdným větrem hmotné centrální hvězdy. Zdroj: Twin Oaks Observatory, 2006.



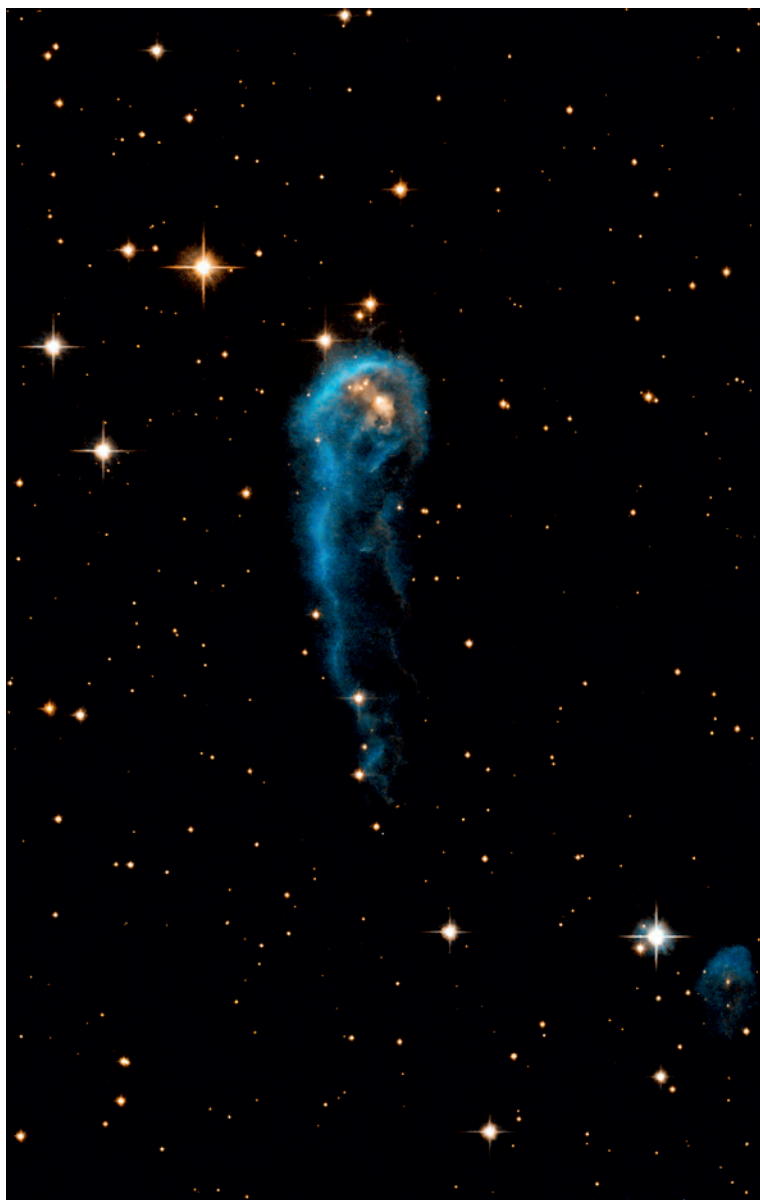
Obr. 35: Mlhovina S106 kolem čerstvě narozené hvězdy IRS 4, která žije jen sto tisíc roků. Nachází se 2 000 ly daleko, v souhvězdí Labutě. Jsou v ní stovky čerstvě narozených hnědých trpaslíků. Zdroj: NASA, ESA, HST, Utkarsh Mishra, 2020.



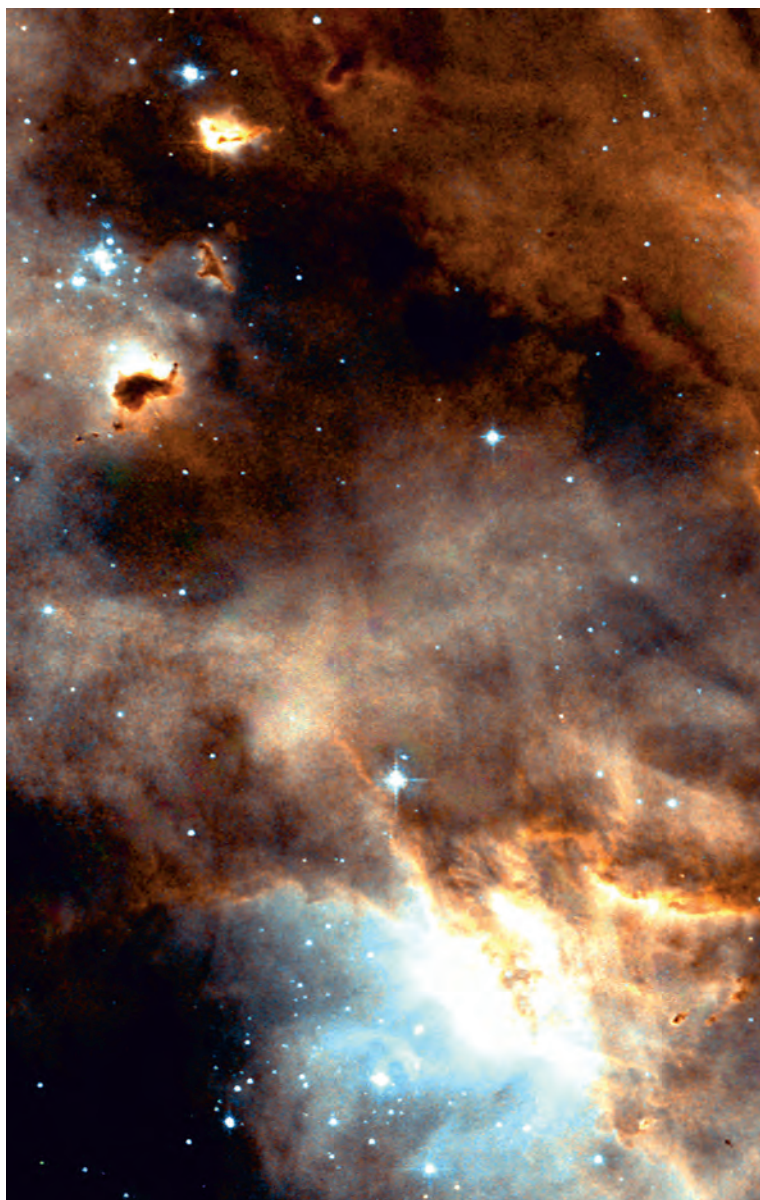
Obr. 36: Infračervený pohled na mlhovinu Duše, hvězdnou porodnici W5 vyfotografovanou Spitzerovým dalekohledem. Nachází se v souhvězdí Kasiopěji ve vzdálenosti 7 500 ly. Zdroj: NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian, 2013.



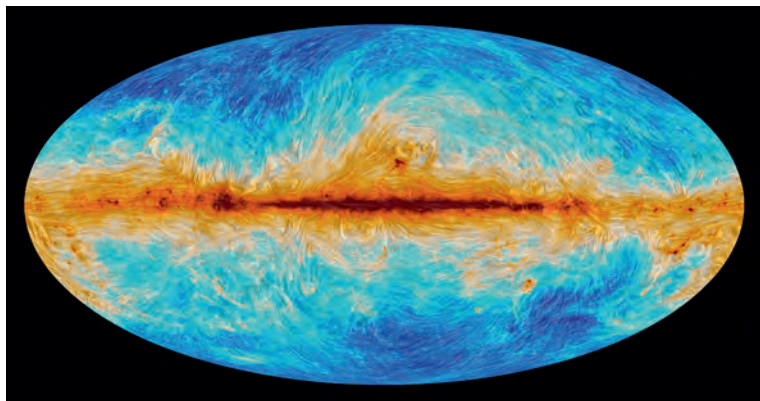
Obr. 37: Výtrysk z Herbigova-Harova objektu HH 49/50 (je nahoře) připomínající tornádo. Objekt je 450 ly daleko v molekulárním mračnu v souhvězdí Chameleon. Zdroj: SST/NASA/JPL-Caltech/J. Bally (University of Colorado), 2006.



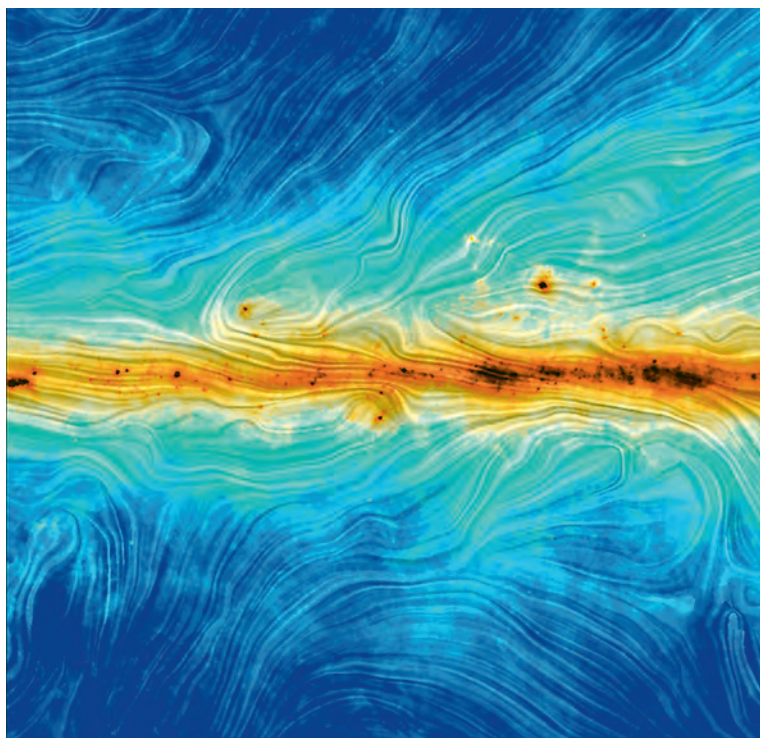
Obr. 38: Složený snímek protohvězdy IRAS 20324+4057 ve velmi raném stádiu vývoje. Nachází se v souhvězdí Labutě ve vzdálenosti 4 500 ly. Délka útvaru je 1 ly. Rodící se hvězda má hmotnost 30 000 Sluncí. Zdroj: NASA, ESA, HST, INT.



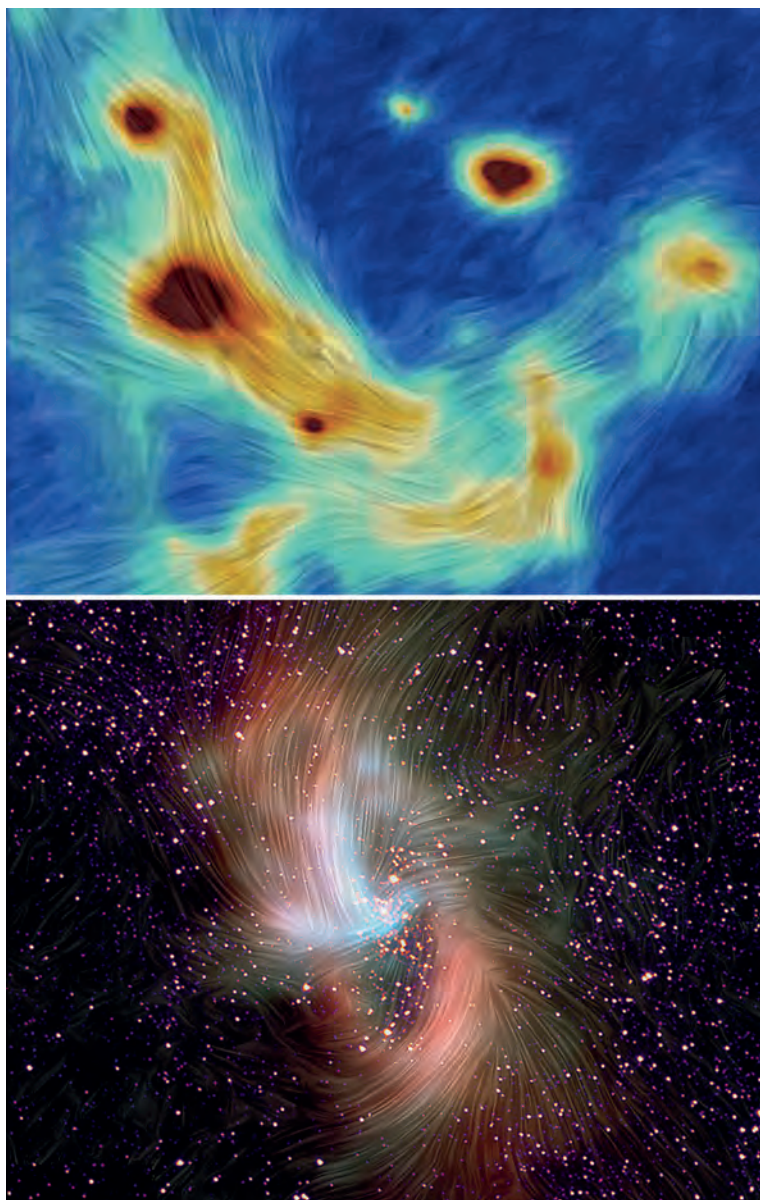
Obr. 39: Oblast N11B překotné tvorby hvězd ve Velkém Magellanově mračnu se nachází ve vzdálenosti 160 000 světelných roků. Jde o druhou největší hvězdnou porodnici v této galaxii. Zdroj: HST, NASA, ESA, AURA, Y.-H. Chu, 2004.



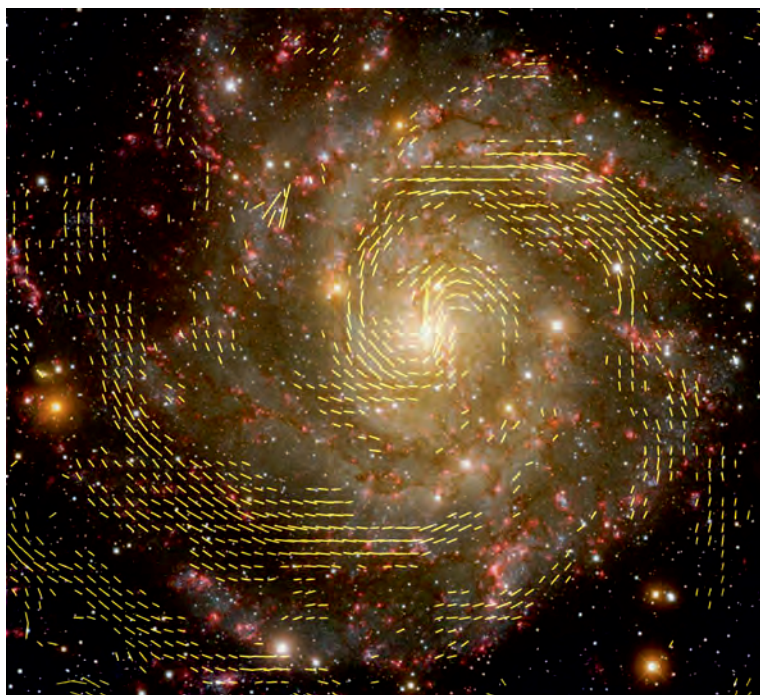
Obr. 40: Průběh magnetických siločar v naší Galaxii určený z polarizace prachových zrn. Data pořídila evropská sonda Planck, která startovala v roce 2009 a fungovala do roku 2013. Snímek byl uvolněn v roce 2018. Zdroj: ESA, Planck.



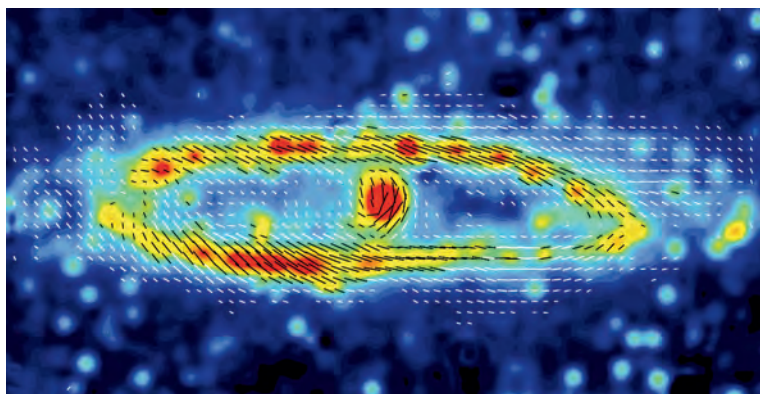
Obr. 41: Výřez předchozího obrázku o hraně 15°. Zdroj: ESA, Planck



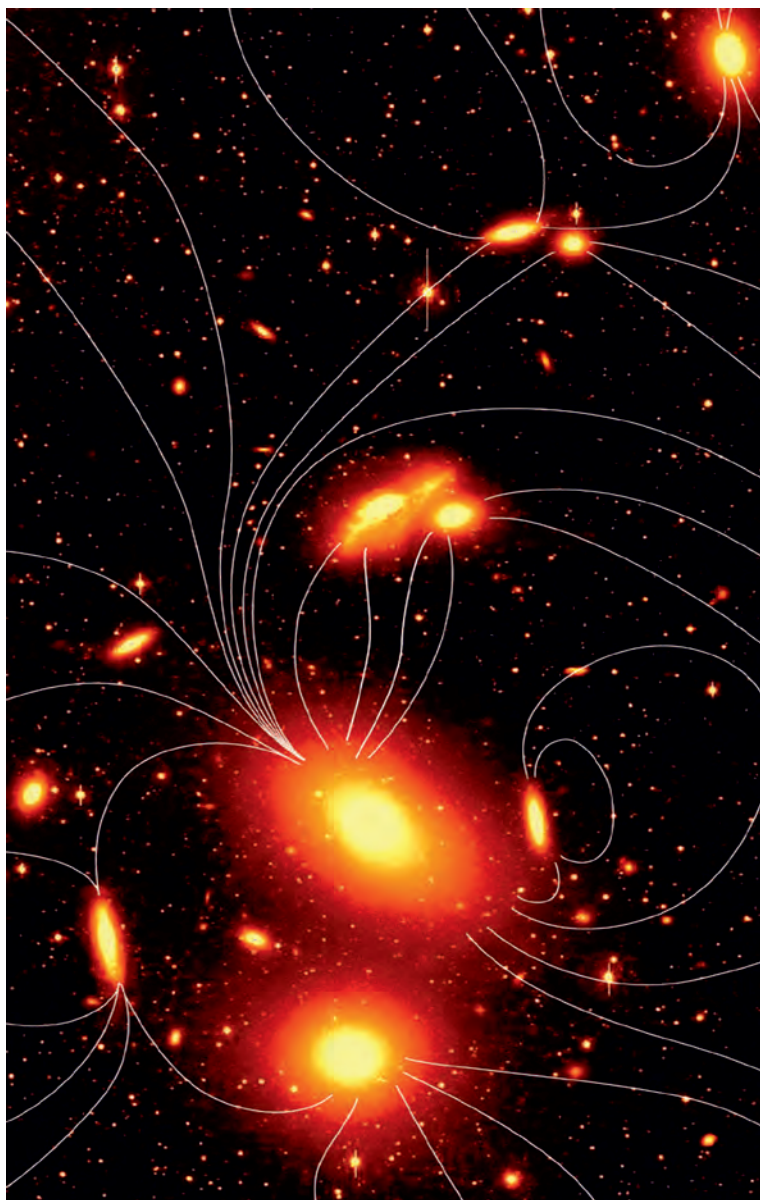
Obr. 42: Magnetické pole v okolí černé díry ve středu Galaxie (uprostřed). Horní snímek zaujímá vodorovně oblast 2 ly, dolní dvojnásobek. Průběh siločar byl určen z polarizace prachu. Nahoře: GTC, P. Roche (2018). Dole: SOFIA, HST (2019).



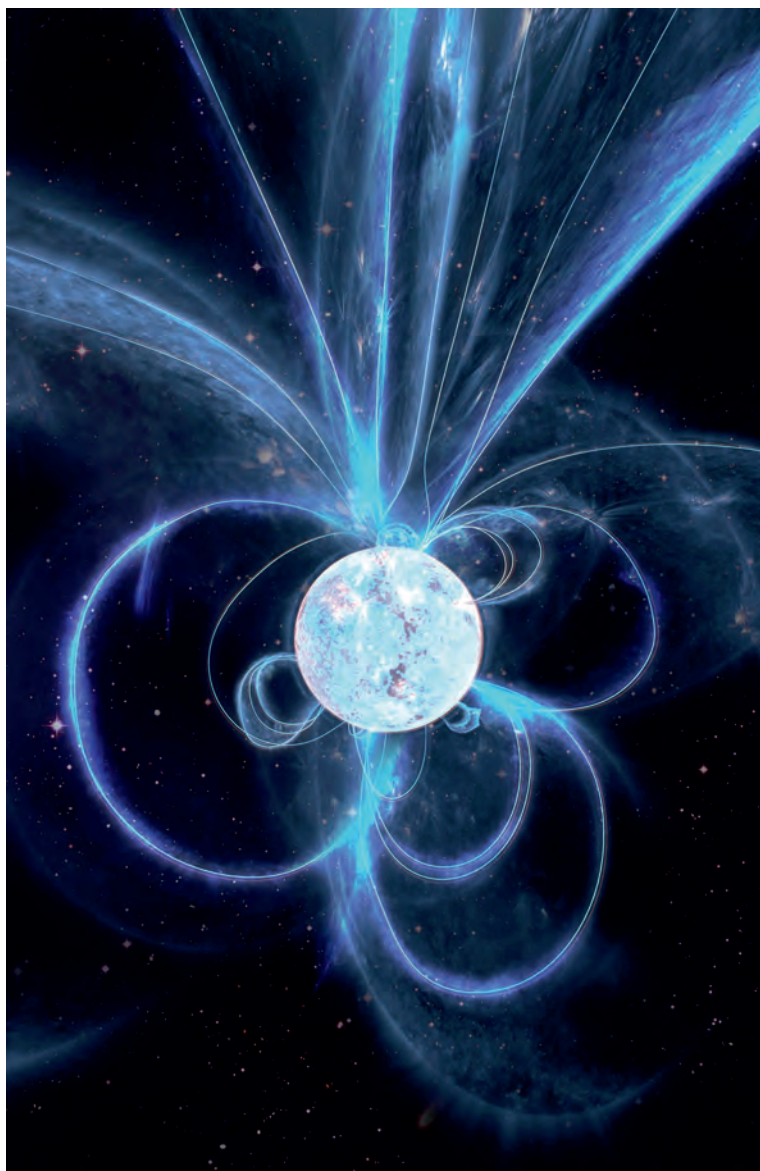
Obr. 43: Rekonstrukce magnetického pole v galaxii IC 342 ze souhvězdí Žirafy z rádiových dat sítě VLA a radioteleskopu Effelsberg. Magnetické siločáry znázorněné žlutými úsečkami míří ve směru spirálních ramen. Zdroj: VLA, Effelsberg.



Obr. 44: Rekonstrukce magnetického pole ve Velké galaxii v Andromedě (M31) z dat pořízených radioteleskopem Effelsberg na vlnové délce 6,2 cm. Siločáry jsou naznačeny úsečkami a nejsou korigovány na Faradayovu rotaci. Zdroj: Effelsberg.



Obr. 45: Slabá magnetická pole propojují i jednotlivé galaxie v kupách galaxií. Na snímku je představa vědců z Caseovy západní univerzity o možném propojení členů Kupy galaxií v Panně. Zdroj: C. Mihos a kol., Case Western Reserve University.

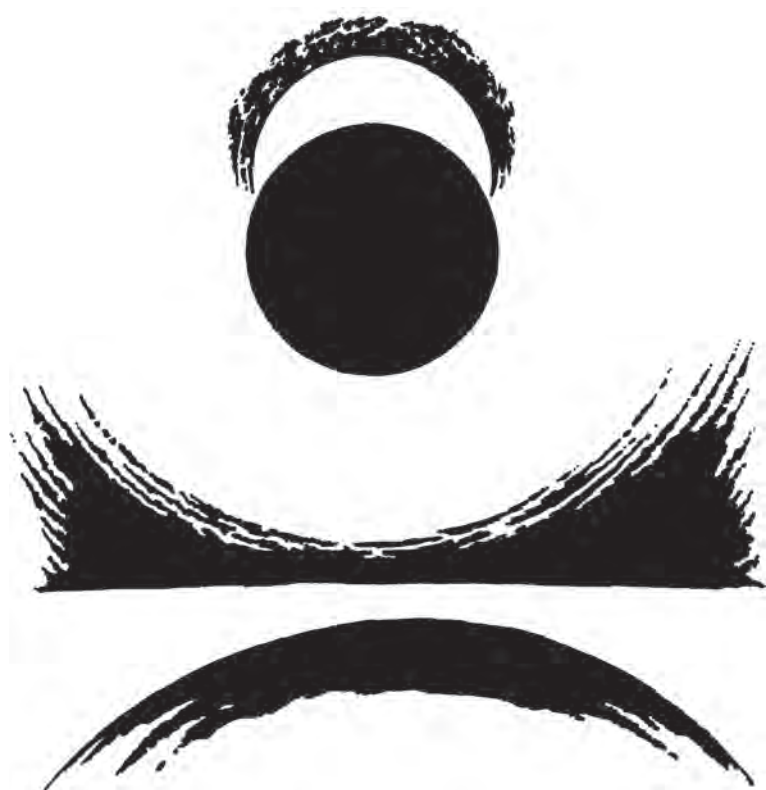


Obr. 46: Umělecká představa výtrysku z magnetaru Swift J1818.0-1607. Vědecká data: Marcus Lower, Swinburne University of Technology/CSIRO Astronomy and Space Science. Umělecké ztvárnění: Carl Knox, ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery, Swinburne University of Technology.

NĚKTERÉ JEDNOTKY

astronomická jednotka	au (astronomical unit), původně střední vzdálenost Země od Slunce, v roce 2012 ji IAU definovala jako 149 597 870 700 m přesně a změnila zkratku z AU na au. Astronomická jednotka se používá především pro určování vzdáleností ve Sluneční soustavě, pro přibližné odhady postačí hodnota 150 milionů kilometrů.
světelný rok	ly (light year), vzdálenost, kterou rovinná vlnoplocha světla urazí za rok ve vakuu bez započtení expanze vesmíru, $ly = 9,46 \times 10^{12}$ km. Menšími jednotkami jsou: světelný den, světelná hodina, světelná minuta a světelná sekunda. Většími jednotkami jsou tisíce ly (kly) a miliony ly (Mly).
parsek	pc (paralaktická sekunda), vzdálenost, ze které je vidět střední vzdálenost Země-Slunce (jedna astronomická jednotka) pod úhlem jedné obloukové vteřiny. Měří se kolmo k zornému paprsku, $1 pc = 30,9 \times 10^{12} km = 3,27 ly$. Většími jednotkami jsou kiloparseky (kpc) a megaparseky (Mpc).
elektronvolt	eV, jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením v potenciálovém rozdílu jeden volt, $1 eV = 1,6 \times 10^{-19} J$. V astronomii se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt (keV), megaelektronvolt (MeV), gigaelektronvolt (GeV). V těchto jednotkách se také vyjadřuje teplota ($E = k_B T$). Jeden elektronvolt odpovídá teplotě přibližně 11 600 K.
kelvin	K, jednotka teploty. Jednostupňový rozdíl je stejný jak v Celsiově, tak v Kelvinově stupnici. Rozdíl je jen v počátku obou stupnic, Celsiova stupnice začíná na hodnotě 273,15 K.

U jednotek často používáme různé násobky, které se označují předponami piko (10^{-12}), nano (10^{-9}), mikro (10^{-6}), mili (10^{-3}), kilo (10^3), mega (10^6), giga (10^9) a tera (10^{12}).



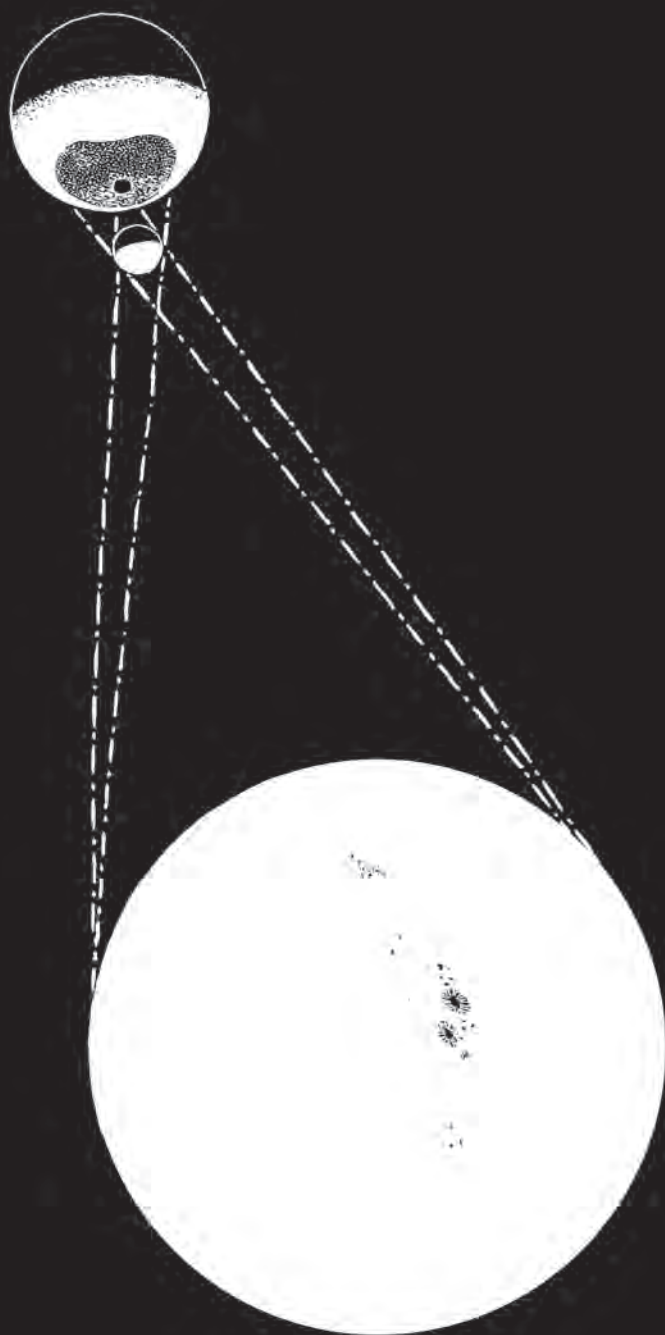
5. Za úplnými zatměními Slunce

*„Pravá tvář světa je tma,
pouze my ji nevidíme.“*

Nikola Tesla, srbsko-americký vynálezce

Neuvěřitelná náhoda tomu chtěla, že na obloze mají Slunce i Měsíc stejný úhlový průměr. Naše Slunce má průměr 1 400 000 km a je vzdálené 150 000 000 km. Podíl obou čísel dá úhlový průměr Slunce na obloze v radiánech. Vyjde 0,009 radiánu, což je 0,5°. Slunce má tedy na obloze úhlový rozměr přibližně půl úhlového stupně. Měsíc je mnohem menší, má průměr 3 476 km, je však blíže, ve vzdálenosti 384 000 km. Podíl dá opět 0,009 radiánu, tedy přibližně půl úhlového stupně.

Díky této shodě může tu a tam dojít k zákrytu slunečního kotouče Měsícem. Měsíc se při zatmění nachází mezi Zemí a Sluncem a musí proto být v novu. Oběžná dráha Měsíce kolem Země je skloněna o 5° vzhledem k oběžné dráze Země kolem Slunce, proto k zatmění nedojde vždy. Měsíc musí být poblíže uzlu své dráhy. Poměrně často dochází k částečným zatměním Slunce, nicméně pro pozorování koróny Slunce je nutné zatmění úplné. A ta jsou velmi vzácná. Za období mezi roky 2000 př. n. l. až 4000 n. l., tj. za 6 000 let, proběhlo či proběhne 14 263 zatmění Slunce, z toho jen 3 797 úplných, tj. v průměru 0,63 úplného zatmění ročně. Úplná zatmění probíhají jen v tzv. *páse totality*, který může být široký maximálně 270 km. Na jednom konkrétním místě na povrchu Země statisticky dojde k úplnému zatmění Slunce jednou za 360 let. Například v Praze bylo poslední úplné zatmění viditelné v roce 1706 a další bude vidět v roce 2135. Je tedy zřejmé, že za úplnými zatměními



Slunce je třeba cestovat, často i do exotických krajin. Když uvážíme, že úplná fáze trvá několik minut, jde o cesty mimořádně náročné na kvalitu přípravy, protože jakékoli pochybení v průběhu několika minut zatmění může být osudné. Nejdelší možná doba úplné fáze zatmění Slunce pro pozorovatele na zemském povrchu je 8 minut.

I v případě, že se Měsíc nachází přesně na spojnici mezi Zemí a Sluncem, nemusí ještě k úplnému zatmění dojít. Dráhy Měsíce kolem Země i Země kolem Slunce jsou eliptické, takže se úhlové průměry Měsíce a Slunce poněkud mění podle jejich skutečné vzdálenosti. Může se stát, že je úhlový průměr Měsíce menší než úhlový průměr Slunce – potom dojde k zatmění prstencovému, kdy na obloze zůstane viditelný tenký svítící prstenec v blízkosti okraje slunečního disku. I toto zatmění má své kouzlo, nicméně korónu Slunce při něm pozorovat nelze.

Co pozorovat při zatmění

Zatmění Slunce je především mimořádný estetický zážitek, který lidstvo fascinoval odpradáвна. Ve staré Číně věřili, že Slunce požírá zlý drak. V čínské kronice Šuťing (Shujing) existuje záznam z roku 2137 př. n. l., podle kterého přišli dva císařští astrologové Hsi a Ho o hlavu, protože včas neupozornili císaře na blížícího se draka. I ostatní národy dávaly zatmění do souvislosti s nadpřirozenými jevy. V Japonsku po generace věřili, že nadpřirozené mocnosti v průběhu zatmění otráví jejich studny, proto je při zatmění zakrývali. Na Tahiti Slunce představovalo muže a Měsíc ženu. Při zatmění docházelo k jejich milostnému aktu.

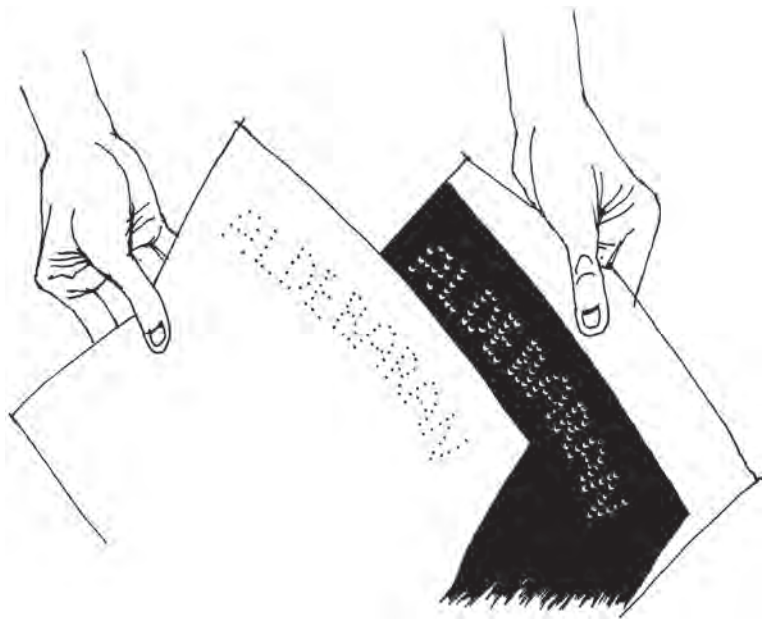
Předpovědi zatmění měly proto pro panovníky mimořádnou důležitost. Již v 7. století před naším letopočtem byla známa perioda saros, kterou objevili novobabylónští Chaldejci. Po uplynutí 18 let, 11 dní a 8 hodin se opakují velmi podobná zatmění, protože se Země, Měsíc a Slunce dostanou do téměř identického postavení. Slovo „sara“ znamenalo ve staré Babylónii jednotku míry, jako číslo mělo údajně označovat hodnotu 3 600. Název Saros pro periodu zatmění poprvé použil anglický astronom Edmond Halley (1656–1742) v roce 1691.

Dvě následující zatmění s periodou Saros se přece jen poněkud liší, a tak vznikají série zatmění. První z nich začíná jako částečné zatmění, v každém dalším (po 18 letech) je Měsíc poněkud posunut. Série pokračuje přes fázi úplných zatmění až po poslední částečné zatmění, které sérii ukončí. Jednotlivé série trvají 1 226 až 1 550 let. V sérii je 69 až 87 zatmění a 39 až 59 (většinou 43) z nich je centrálních, tj. buď úplných, nebo prstencových.

Perioda Saros není celistvým násobkem dne, „přebývá“ v ní osm hodin. To způsobuje, že dvě po sobě jdoucí zatmění se nevyskytnou na stejném místě. Pokud uvažujeme periodu rovnou trojnásobku periody Saros, budou se zatmění opakovat dokonce přibližně ve stejné oblasti na Zemi.

Dnes jsou ze známých drah nebeských těles zatmění předpovídána s vysokou přesností a podrobné informace o nich lze nalézt například na stránkách NASA. Přesto mají zatmění Slunce svou důležitost i v dnešní době. Jedině při zatmění Slunce totiž můžeme uvidět vnitřní, tzv. *bílou korónu*. To není možné ani ze specializovaných sond, kde se Slunce pozoruje koronografy a vlastní povrch slunečního disku je zakrytý pomocnou clonou. Ohybový jev na této cloně brání sledovat vnitřní korónu tímto způsobem. Struktury v bílé koróně kopírují magnetické siločáry, proto je materiál pořízený při zatmění cenným svědectvím procesů probíhajících těsně nad povrchem Slunce. Dodnes známe mechanismy ohřevu chromosféry a koróny jen v hrubých rysech.

V minulosti posloužily expedice za zatměními i dalším vědeckým cílům. Již v roce 1916 předpověděl Albert Einstein (1879–1955) na základě obecné teorie relativity, že světelný paprsek vzdálených hvězd se v blízkosti Slunce zakřivuje. Při zatmění Slunce, kdy sluneční svit neruší pozorování, jsou tedy polohy hvězd úhlově blízkých k povrchu Slunce vychýleny z normální polohy vzhledem k úhlově vzdálenějším hvězdám. U Slunce činí odchylka u povrchu 1,745" a byla poprvé pozorována sirem Arturem Stanleyem Eddingtonem (1882–1944) v roce 1919 při expedici za zatměním Slunce na Princův ostrov v západní Africe. Druhá část expedice prováděla pozorování v Sobralu v Brazílii.



Zažít úplné zatmění Slunce je neopakovatelný a těžko sdělitelný zážitek. Vzhledem k vysoké teplotě je světlo koróny namodralé, a tak se těsně před zatměním krajina ponoří do přízračného kovově modrého šera. Ptáci utichnou, zvířata jsou neklidná, teplota prudce poklesne. Na zemi se objeví letící stíny, poslední sluneční paprsky vytvoří na okraji Slunce zářící korálky, tzv. *Bailyho perly*. Během okamžiku se objeví modravě stříbrná koróna. V tuto chvíli začíná pravá podívaná. Na několik vzácných minut jsou na obloze vidět nejjasnější hvězdy a planety, u okraje Slunce se objeví protuberance. Těžko říci, zda je moudřejší fotografovat, nebo se jen kochat pohledem, který už možná nikdy neuvidíte. Je užitečné se připravit dopředu, na co se při zatmění zaměřit a vědět, co bude možné vidět.

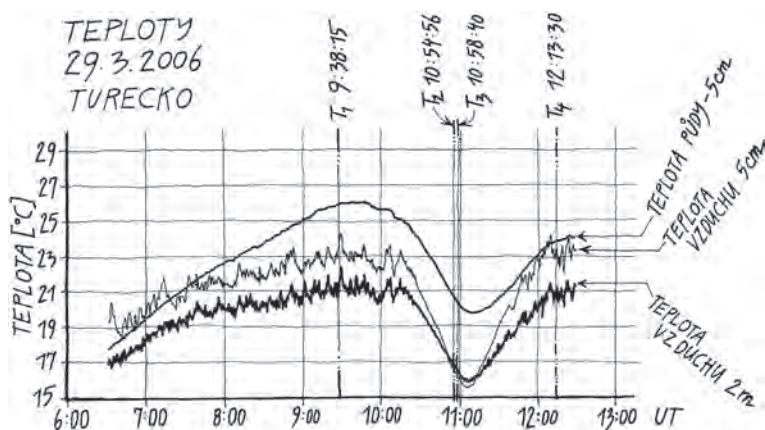
Srpečky. Najděte si nějaký hustý listnatý strom a občas se pod něj podívejte v průběhu částečné fáze zatmění. Času budete mít určité dost, částečná fáze trvá přes hodinu. Díry mezi třepotajícími se listy vytvoří primitivní dírkovou komoru, která srpek ubývajícího Slunce zobrazí na zemi. Co jedna náhodná dírka, to jeden zobrazený srpek na povrchu země. Spatříte velké množství mihotajících se



srpků. Můžete zavzpomínat na fotografie-průkopníky, kteří jednoduchou dírkovou komorou pořizovali první fotografie. Pokud není nablízku strom, nevádí. Propíchejte jehlou nebo tenkým klacíkem list papíru a namiřte ho na Slunce. Buď na zemi nebo na dalším papíru uvidíte tolik zobrazených srpečků, kolik jste udělali dírek. My jsme na jedné expedici takto zobrazili nápis Aldebaran.

Letící stíny. Pokud si naleznete stanoviště s výhledem na otevřenou, pokud možno málo členitou a světlou krajinu, můžete pár desítek sekund až minut před úplnou fází uvidět zvláštní rovnoběžné pruhy světla a stínů letící krajinou. Nejde o skutečné stíny, ale o jev obdobný mihotajícimu se svitu Slunce pod vodní hladinou – některé vlnky světlo zesílí a jiné zeslabí. V případě zatmění jde o neklid v atmosféře přibližně ve dvoukilometrové výši. Paprsky přicházející po různých cestách z úzkého srpku vytvoří interferenční pruhy. Jejich pohyb je dán pohybem vzdušných mas. Ne při každém zatmění je jev pozorovatelný. Teoreticky by měl být vidět i těsně po úplné fázi zatmění, ale o takovém pozorování nejsou záznamy. Vyfotografovat nebo nafilmovat tento vzácný jev je nesmírně obtížné, kontrast mezi světlými a tmavými pruhy není veliký a celkové osvětlení krajiny je již velmi slabé. Letící stíny pravděpodobně jako první pozoroval pastor Rydhenius v roce 1733 ve švédském Forshemu.

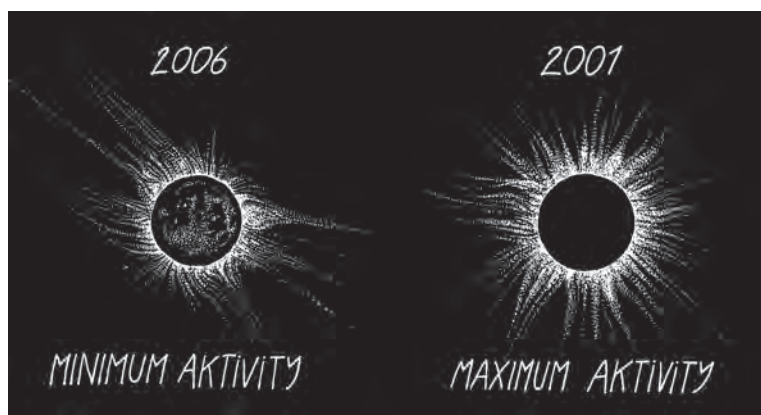
Pokles teploty a osvitu. Pokud máte možnost měřit teplotu a osvit, stojí to určitě za to. My jsme s sebou vozili nejprve jednoduchý modul, později celou meteorologickou stanici vyrobenou a zapůjčenou Hvězdárnou a planetáriem v Plzni. Při zatmění v Turecku (2006) poklesla teplota přibližně o 10 °C. Naše stanice dokázala rozložit exponenciálně ubývající světlo na jednotlivé barevné složky. V úplné fázi zcela jasně dominovala modrá barva, kovově modré přišetí je tedy skutečným fyzikálním jevem. Pokud nemáte meteorologickou stanici, teploměr ani jiné záznamové zařízení, nevádí – ponechte si v průběhu úplné fáze tričko a pokles teploty pocítíte na vlastní kůži. Také se vyplatí vézt s sebou digitální fotoaparát s možností automatické expozice. Upevněte ho na stativ, nastavte, ať udělá každou minutu fotografii krajiny, a ponechte ho osudu. Získáte krásnou animaci postupného stmívání krajiny při zatmění.



Hvězdy a planety. Určitě si předem obstarajte mapku jasných hvězd a planet v okolí Slunce při zatmění a ještě před úplnou fází ji zorientujte podle pozice Slunce, abyste přibližně věděli, kde kterou hvězdu či planetu hledat. V úplné fázi není času nazbyt a mít představu, kde jasné objekty jsou, se vyplácí.

Protuberance. Pečlivě si prohlédněte okraj Slunce – tu a tam uvidíte načervenalé jazýčky protuberancí. Jde o plazmové útvary ovládané magnetickým polem Slunce. Jak se v průběhu úplné fáze sune měsíční kotouč přes sluneční, budou některé protuberance zakryty a jiné se na konci zatmění objeví. Při fotografování protuberancí volte ty nejkratší časy (například 1/1 000 s). Gradient jasu koróny je obrovský a útvary nejbližší povrchu potřebují krátkou expozici.

Koróna. Pozorování horké koróny je nejdůležitější činností při zatmění. Dívejte se, fotografujte, filmejte. Určitě to stojí za to. V koróně uvidíte plazmová vlákna táhnoucí se do dále od slunečního kotouče. V blízkosti minima slunečního cyklu bude koróna učešána magnetickými siločarami do charakteristického tvaru, takže ihned poznáte, kde jsou sluneční póly (zde siločáry vyvěrají z povrchu Slunce) a kde je rovník (zde se plazma táhne podél siločar daleko od Slunce). V blízkosti maxima slunečního cyklu se vám naskytne úplně jiný pohled: koróna je složená z chaotických vláken často se přes sebe překrývajících. Je to způsobeno neuspořádaným magnetic-



kým polem, které má v maximu aktivity charakter „vlasaté koule“. Pokud budete mít možnost sledovat spektrum koróny, zjistíte, že se skládá ze tří různých typů. Samozřejmě je zde *spojité spektrum* neboli *kontinuum*, které označujeme písmenem K. Tato část spektra je způsobena rozptylem slunečního světla na volných elektronech. Ve spektru nalezneme také typické tmavé čáry – jde o tzv. *F korónu*. Písmeno F připomíná Josepha von Fraunhofera (1787–1826), který jako první tmavé čáry ve spektru látek podrobně zkoumal. V koróně tyto čáry vznikají absorpcí slunečního světla na prachových částicích, které Slunce stahuje ze svého okolí. Poslední částí spektra je emisní koróna zvaná *E koróna*; je tvořena světlými čarami způsobenými přechody elektronů v obalech vysoce ionizovaných kovů. Tyto čáry vznikají jen za vysokých teplot milionů kelvinů a po dlouhou dobu byla jejich existence v koróně záhadou. Když se ještě nevědělo, že v koróně jsou vysoké teploty, uvažovalo se dokonce o tom, že jde o spektrální čáry nového neobjeveného prvku, kterému astronomové dali jméno „*coronium*“. Nový, usilovně hledaný prvek, se ale do Mendělejevovy tabulky prvků vůbec nehodil.

Pokud se vypravíte za zatměním Slunce a počasí vám bude přát, rozhodně nebudete litovat, i kdybyste se pouze dívali na překrásné představení, za které vdčíme náhodě, že Slunce a Měsíc mají na obloze stejný úhlový průměr. Ale pospěšte si, Měsíc se od Země vzdaluje o 3 cm za rok...

Zpracování pořízených snímků

Fotografujte a filmujte vším, co máte po ruce. My jsme používali nejrůznější zařízení od celooblohové komory snímané obyčejným fotoaparátem na kinofilm, přes videokameru SONY CCD PRV59E Hi 8, digitální fotoaparát Nikon CoolPix 995 s čipem CCD o 3,34 megapixelch a teleobjektivem TC-E3 ED s nízkorozptylovým sklem, digitální fotoaparát Kodak Pro 14n opatřený teleobjektivy 400 mm a 600 mm a klasický fotoaparát s objektivem MTO 1000. Dnešní nabídka přístrojové techniky je samozřejmě bohatší a za relativně rozumnou cenu lze zakoupit digitální fotoaparáty s vysokým rozlišením.

Z filmů se nám osvědčil Kodak Royal Gold 200, který můžeme vřele doporučit. Rádi bychom zde popsali přibližný postup pořízení a zpracování získaných snímků; leckdy jde o mravenčí práci trvající mnohé týdny.

Pořízení sérií. Při zatmění je dobré fotografovat s nejrůznějšími expozičními dobami. Krátké expozice zobrazí jasné části vnitřní koróny, naopak dlouhé expozice zobrazí vzdálenou korónu, zatímco blízká bude přesvětlená. Smysl mají například série od jedné tisícinny sekundy po jednu sekundu, neustále opakované vzestupně a poté sestupně po celou dobu úplné fáze.

Skenování materiálů. Pokud jste používali digitální fotoaparát, jste tohoto úkolu zproštěni, i když pořízení kvalitních snímků digitálním fotoaparátem je složitější než na osvitově pružný film. Nechte své filmy naskenovat skutečnými profesionály v co možná největším rozlišení. Ušetří vám to nervy a čas.

Retušování. Na jednotlivých snímcích odstraňte na počítači největší zjevné vady – prachová zrna, vlasy, škrábance a podobné nechtěné artefakty. Při dalším zpracování by investovaný čas znehodnotily.

Centrování. Vycentrujte snímky v počítači. Jde o mravenčí práci, kdy máte dva sousední snímky ve vrstvě nad sebou a horní vrstva

je částečně průhledná, abyste viděli i spodní snímek. Snímky nelze centrovat podle černého okraje – jde o okraj Měsíce, který se v průběhu expozic posouvá. Musíte si vybrat výrazné protuberance nebo koronální vlákna a centrovat snímky podle těchto útvarů.

Sešívání mezikruží. Vyberte si několik vydařených snímků ze série (typicky pět až deset) tak, aby na nich postupně byly vidět všechny detaily od vnitřní až po vnější korónu. Z každého snímku vyřízněte mezikruží, jednotlivá mezikruží na sebe musí navazovat. Mezikruží potom spojíte pomocí Gaussova radiálního filtru (například v programu Adobe Photoshop). U snímků vzdálené koróny se tak zbavíte přesvětlených vnitřních částí, které nahradíte mezikružími ze snímků s kratší expozicí.

Radiální maska. Takto vytvořenou kompozici rozostřete v azimutálním směru (*radial blur*) a poté odečtete od nerozostřené kompozice. Vznikne jakási šedivá zprohýbaná plocha, které se říká radiální maska. Pro další zpracování je tento mezikrok podstatný.

Sloučení masky s kompozicí. Vzniklou radiální masku ponechte ve vrstvě nad kompozicí z mezikruží a metodou „*overlay*“ obě vrstvy propojte. Jako zázrakem se zvýrazní jednotlivá vlákna v koróně a získáte nádherný snímek zatmění, který bude ozdobou vašich webových stránek či pracoven.

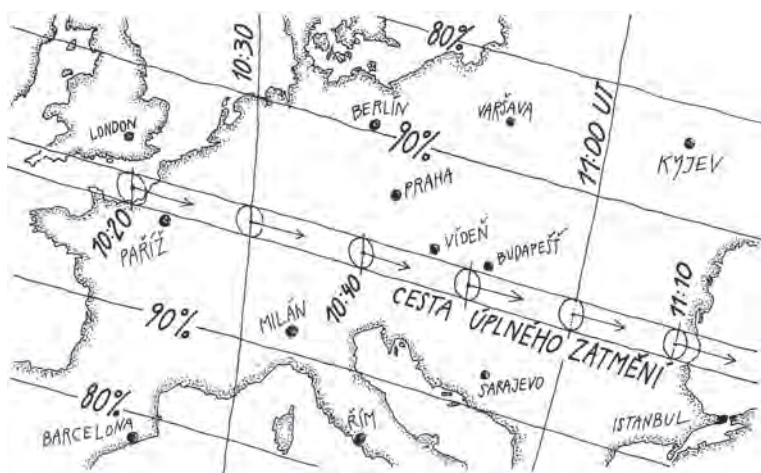
Že je to hodně práce? Ano, je. Jde o neuvěřitelnou dřinu, která však přinese krásné výsledky. U nás ji k dokonalosti dovedl profesor Miloslav Druckmüller z Vysokého učení technického v Brně. A možná nejen u nás, jeho snímky vždy oblátnou celý svět. Pokud se vám nechce do složitého zpracování snímků, máme pro vás jednu radu. V klidu a beze spěchu se jen dívejte na tu krásu vlastníma očima. Stojí to zato. Věřte, že ostatní, kteří kolem fotografují a snaží se využít každé sekundy, leckdy nemají ani čas pohlédnout na oblohu. Na závěr ale jedno upozornění – nikdy se nedívejte na Slunce při částečné fázi nechráněnými očima. Ideální je svářečské sklo číslo 12 nebo 13, které se dá snadno koupit v železářství nebo v obchodech pro kutily.

Maďarsko (11. 8. 1999)

První úplné zatmění, které jsme viděli, bylo v roce 1999 v Maďarsku. Pás totality tenkrát probíhal napříč Evropou; zasáhl jižní Anglii, Francii, Německo, Rakousko, Rumunsko i Turecko. Šlo tak o výjimečnou možnost uvidět úplné zatmění v těsné blízkosti našeho státu. Pás totality ležel jižně od Vídně a probíhal hustě obydlenými oblastmi, mj. Štýrským Hradcem, Lincem, Mnichovem a Stuttgartem. Mediální tlak zasáhl i Českou republiku, na mnoha místech se prodávaly speciální brýle na zatmění a v novinách a v televizi se nemluvalo o ničem jiném. Dodnes se vypráví úsměvná historka, jak jedna paní telefonovala na Štefánikovu hvězdárnu v Praze na Petříně a ptala se, zda může bez brýlí se svým synkem jít do lesa na procházku v den, kdy bude zatmění, a zda to není nebezpečné.

Nejčastějším cílem Čechů bylo sousední Rakousko, Francie nebo Maďarsko. Hornaté Rakousko mělo nejhorší předpověď počasí, a tak jsme se vydali do Maďarska. Pás totality zde šel přímo přes Balaton a mnoho lidí volilo právě Balaton jako cíl své cesty. Vodní plochy s vyšší koncentrací vodních par mohou ale snižovat kvalitu pozorování, proto jsme se vydali asi 30 kilometrů od Balatonu. Některé expedice byly na místě již několik dní předem. My jsme tenkrát žádné velké přípravy nedělali, s sebou jsme měli několik fotoaparátů s výkonnými objektivy, svářečské filtry pro pozorování mimo úplnou fázi a kvalitní sluneční filtr firmy Meade. K Balatonu jsme dojeli den před zatměním a našli jakés takés místo pro pozorování. Expedice se tenkrát zúčastnilo 25 lidí, jeli jsme mnoha auty, každý měl jiné zájmy a jen část z nás byli astronomové. Dnes víme, že mnohem lepší jsou expedice s menším počtem členů. U velké skupiny se obtížně shání ubytování a společných zájmů bývá pramálo.

Maďarština je nesmírně komplikovaný jazyk, a tak se naše domluva s místními omezovala na ukazování a různou gestikulaci. Stanujících skupinek bylo všude kolem velké množství, ale domorodí obyvatelé projevovali k dočasným vetřelcům značnou toleranci. Utábořili jsme se v blízkosti potoka, obloha byla jako vymetená, v potoce lovili čápi žáby, zkrátka idylka.



Ranní probuzení bylo ovšem doslova studenou sprchou. Hustý déšť a zcela zatažené nebe nedávaly žádnou naději. Bláznivý návrh, abychom rychle odjeli do Rumunska, kde mělo být v té době podle hlášení meteorologů ještě jasno, jsme naštěstí zavrhnli. V průběhu dopoledne se obloha začala nepatrně protrhávat a v jednom směru se objevilo čisté nebe. Asi dvě hodiny před úplnou fází jsme naskákali do aut a vyrazili směrem k slibným děrám v mracích. Deset minut před úplnou fází jsme zastavili na malém sjezdu ze silnice a horečnatě připravovali stativy a vše potřebné. Nebe se protrhávalo a jako zázrakem bylo po celou dobu úplné fáze jasno. Jak jsme se později dozvěděli, vyjasnilo se v celé oblasti kolem Balatonu, a tak byla naše zoufalá jízda zcela zbytečná.

Na přibližně dvě minuty úplné fáze zatmění nelze zapomenout. Těsně před ní se objevily letící stíny, krajina se ponořila do kovově modrého příšerí.auta na silnicích se zastavila a všichni v němém úžasu sledovali nejprve Bailyho perly, a poté krásně neuspořádanou korónu, jasné hvězdy i planety. Pořídili jsme řadu fotek, ale nejdůležitější byl zcela jistě osobní prožitek. Pro tenhle prchavý okamžik stálo za to jet 900 kilometrů.

Zambie (21. 6. 2001)

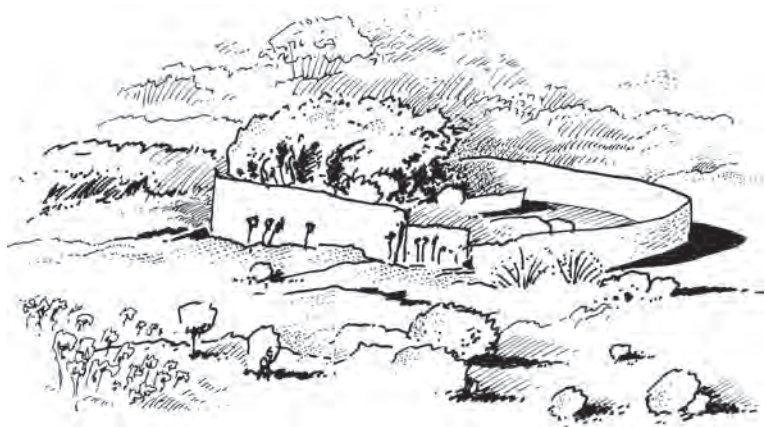
Druhé úplné zatmění, které jsme pozorovali, proběhlo v Zambii. Přípravy byly pečlivější a vybavení rozmanitější: dva fotoaparáty, videokamera, pokovený kondenzor jako celooblohová komora, zrcadlový teleobjektiv MTO 1000 s montáží zapůjčený rokycanskou hvězdárnou, modul pro měření osvitu a průběhu teploty z plzeňské hvězdárny, notebook a handheld. Expedice byla čtyřčlenná. Odlet do Jihoafrické republiky jsme naplánovali na šest dní před zatměním, aby bylo možné uskutečnit srovnávací měření modulem o jeden den dříve. Čtyři dny jsme plánovali na cestu Jihoafrickou republikou, Zimbabwe a Zambií. V Zimbabwe pár týdnů před expedicí vyvraždili několik farmářských rodin, v Zambii zastřelila policie při demonstraci člověka. Naše pocity byly smíšené. Z obav, jak stihneme projet tisíc kilometrů během čtyř dnů černou Afrikou, nás vyvedla již letecká společnost ČSA – letadlo vyletělo o dvě hodiny později. Letištní personál nás ujistil, že se nic neděje, v Londýně o nás vědí a po přiletu se o nás postarají. Letadla prý na sebe čekají. Jak naivní to byla představa! V Londýně žádný zástupce ČSA nečekal a letadlo do Johannesburgu odletělo bez nás. Personál letiště byl milý, ale pomohla až úřednice z Air France. Nejenom, že zajistila jiný let o 24 hodin později, ale vyřídila i celkem slušné ubytování v hotelu, včetně stravování, a to vše na účet ČSA.

Po přistání v Johannesburgu jsme měli všichni pocit nejistoty a strachu, který v nás vypěstovali před odletem kamarádi a známí. Úzkostlivě jsme hlídali přístroje i osobní věci před všudypřítomnými černošskými obyvateli. V kapsách měl každý z nás slzný plyn pro případ napadení. Na nádraží jsme se dozvěděli, že v Africe nejezdí vlaky, které by spojovaly hlavní města sousedních států. Autobusy do Lusaky byly na několik dní dopředu vyprodány. Prodělávali jsme první vážnější krizi. Zdálo se, že kvůli jednodennímu zpoždění se představa zatmění odsunula do neznáma. V méně reprezentativních prostorách nádraží jsme objevili místní autobusovou společnost „City to City“. Za přepážkou i před přepážkou bylo veliké množství domorodců a ještě větší množství odpadků, nicméně měli volné místo v autobuse odjíždějícím více než hodinu po západu Slunce do

Harare – hlavního města sousedního Zimbabwe. V našem průvodu ci se psalo doslova: „...a jen blázen vychází po setmění z hotelu...“. Jiná možnost, než se vydat místním autobusem přes noc napříč Afrikou, ale neexistovala. Kolem šesté hodiny ráno jsme přešli hranici do Zimbabwe. Odbavení na celnici trvalo čtyři hodiny a všude kolem panoval pekelný chaos; pokud to mělo nějaký řád, neobjevili jsme jej. Potkali jsme první opice, kterých bylo cestou mnoho. V průběhu devatenáctihodinové cesty jsme v autobuse navázali i první plodné kontakty s domorodým obyvatelstvem. Večer jsme pokračovali z Harare dalším autobusem, opět přes noc, do Lusaky v Zambii. Autobusová společnost byla ještě méně reprezentativní než „City to City“. Příšerný autobus, ze kterého černoští obyvatelé vyhazovali odpadky z oken. Jako sardinky jsme strávili další noc na cestě. K ránu přechod hranic, opět několikahodinová anabáze, vstupní víza do Zambie vystavili přímo na hranici. Hurá! Naše informace byly správné. Po příjezdu do Lusaky jsme nemohli uvěřit, že těch pár domů je skutečně hlavní město Zambie. Cestu jsme absolvovali beze ztrát na životech, na zdraví a dokonce neokradeni; naše obavy z místních obyvatel získávaly první trhliny. Zástupce zdejší univerzity nám sehnal jakési ubytování, které bylo pekelně drahé, ale neměli jsme již na výběr.

Následujícího dne jsme provedli kontrolní měření modulem na univerzitním hřišti. Měření trvalo čtyři hodiny, a tak zbyl čas si prohlédnout univerzitu, navštívit katedru fyziky a odeslat e-mail. Prodejna potravin na univerzitě měla holé regály, prodejna knih pro šest fakult zela prázdnotou a poštovní úřad byl zavřený.

V den zatmění se objevilo ohromné množství lidí. Zatmění připomínalo pouťovou atrakci. Všude se prodávalo pivo, pekly vuřty, domorodci pili, zpívali a tančili. Na některých bylo vidět, že zatmění již neuvidí. Prezident Zambie pro tisk prohlásil, že jde o boží zázrak. Počasí bylo skvělé. V 13:09 začala úplná fáze. Fotografovali jsme objektivem MTO, Nikonem, natáčeli zatmění na kameru a snažili se udržet místní obyvatelstvo v dostatečné vzdálenosti od přístrojů. Byla to paráda uvidět za dne Jupiter, Saturn, Aldebaran i další hvězdy. V blízkosti disku se rozzářily nádherné protuberance.



Zimbabwe – Velké opevnění vybudované lidem civilizace Shona

Plná fáze trvala 3 minuty a 20 sekund. Pořízený materiál jsme zpracovávali několik měsíců. Atmosféra zatmění v černé Africe v nás zanechala hluboké stopy. Na zpáteční cestě jsme se pokochali strhující krásou Viktoriiniých vodopádů na řece Zambezi, zažili cestu pravým africkým vlakem, kterým jezdí jen ten, kdo nikam nespěchá, a navštívili pozůstatky královského města lidu civilizace Shona v Zimbabwe. Poté noční jízda autobusem bez světel a okýnek (jeden z domorodců svítil dopředu baterkou) na hranici s Jihoafrickou republikou. Kilometr a půl od hranice nás šofér vysadil s tím, že je na něho vystaven zatykač a dál už musíme pěšky. Noční příchod znamenal čekání do rána na otevření hranice. Při pohledu na zoráný pás půdy s ostnatými dráty na obou stranách nás zamrazilo. Takhle podívaná až příliš připomínala bývalý totalitní režim u nás. V Jihoafrické republice nás čekal úplně jiný svět. Fungující ekonomika, dokonalé silnice a luxusní a přitom levné ubytování. Místní hoteliér pro nás zorganizoval dva výlety. Prvním byla návštěva nádherného kaňonu řeky Blyde s dech beroucími pohledy do téměř kilometr hlubokého údolí vytvořeného za tisíce let dravou řekou. Druhý výlet mířil do Krugerova národního parku, v němž je zajatcem člověk, a zvířata se volně pohybují po rozlehlých pláních. O několik dní později jsme dosedli s osmihodinovým zpožděním na letištní plochu v Ruzyni a skončila jedna moc hezká kapitola našich životů.

Španělsko (3. 10. 2005)

Španělská expedice se od všech ostatních odlišovala; zde šlo totiž o prstencové zatmění Slunce, a tak jsme celou akci od počátku pojali jako příjemný výlet. Expedice do Španěl byla desetičlenná. Cesta z Prahy proběhla bez problémů, i když šlo o 2 500 kilometrů za volantem. U Valencie jsme uhnuli do vnitrozemí, aby pozorování nerušila ranní oblačnost u moře. Před městem Requena jsme se náhodně vydali do hor po prašné cestě. Název osady Granja Meteor nás ujistil, že zde musí být to pravé místo. Usídlili jsme se na pahorku kus nad vylidněnou osadou. Nad tábořištěm rostly mandlovníky, počasí bylo nádherné a nic nám nescházelo. Den před zatměním jsme pozorovali pavouky, štíra a jinou havěť. Při zatmění jsme pořídili řadu materiálů, ze kterých vznikla animace celého průběhu zatmění. Pozorovali jsme srpečky – do kusu papíru jsme propíchlí nápis Aldebaran a zobrazili ubývající srpek Slunce na další arch papíru. Oproti předchozím expedicím jsme si vyzkoušeli projekci Slunce na papír, to je moc užitečné zařízení. Zářící diamantový prstenec Slunce se vynořoval postupně a svítící body na okraji dávaly najevo přítomnost vzdálených měsíčních hor. Celá prstencová fáze trvala 3 minuty a 50 sekund. Korónu, hvězdy ani planety při prstencovém zatmění nebylo vidět. Na obrázku na následující straně si povšimněte vnitřní části prstence – na rozdíl od vnější je poněkud hrbolatý. Tyto nepravidelnosti způsobují pohoří a údolí na okraji kotouče Měsíce.

Po zatmění naše cesta vedla napříč Španělskem přes Córdoba, Seville, Cádiz, Gibraltar a Granadu. Bylo to příjemné zpestření po celoročním shonu. V Córdobě jsme se obdivovali Mezquité, jednáctilodní mešitě postavené mezi 8. a 11. stoletím. Tato původně islámská stavba byla později doplněna o křesťanskou katedrálu. Vnitřní prostor Mezquity s nespočty sloupy vyzařuje graciózní lehkost. V modlitebně se nachází 856 sloupů z mramoru, jaspisu a dalších ušlechtilých kamenů. K silným zážitkům bezesporu patřila návštěva neskutečně rozsáhlé gotické katedrály v Seville a náhrobku Kryštofa Kolumba. Drobný řukanec dvou našich aut na křižovatce v Seville vyřešilo klubko drátu, kladivo a kleště. Bývalý fénický



Prstencové zatmění Slunce ve Španělsku dne 3. října 2005

přístav Cádiz byl naším dalším cílem. Jak již to v přístavech bývá, mísí se v Cádiz kultury a památky mnoha národů. Poprvé jsme se zde koupali v Atlantiku. Naše další cesta vedla zpět ke Středozevnímu moři. Krátká zastávka na Gibraltar, britském zámořském území, nám připomněla, že se nacházíme na samém okraji evropského kontinentu. Toužebný pohled k africkým břehům byl poslední tečkou za Atlantikem. Posledním navštíveným místem byla Granada s jednou z nejslavnějších staveb evropského kontinentu, nádhernou Alhambrou – komplexem středověkých paláců, hradeb, altánů a nádherných zahrad postavených maurskými panovníky. Ve vzpomínkách nadlouho zůstane vůně olivových a pomerančových hájů i majestátné španělské katedrály.

Turecko (29. 3. 2006)

Tahle expedice byla ze všech nejprecizněji připravená. Měli jsme s sebou celou meteorologickou stanici na měření rychlosti větru, osvětlení, tlaku, teploty, barvy světla a jiných parametrů, kterou zapůjčila Hvězdárna v Plzni. Dále velké množství fotoaparátů, dalekohledů, zařízení pro projekci atd. atd., zkrátka velká expedice se vším všady, jak má být. O místě pozorování bylo zhruba rozhodnuto v Praze, vesnička Yaylaalah nás získala již svým názvem. Nakonec jsme v její blízkosti našli drobný pahorek, který se ukázal být skvělým pozorovacím místem. V okolí nedaleké řeky rostl bambus, který mnozí z nás viděli ve volné přírodě poprvé. Naše stanoviště bylo přibližně 20 km od pobřeží, tedy dost daleko od velké vodní plochy i od hor s proměnlivým počasím na severu.

Fáze úplného zatmění trvala 3 minuty a 40 sekund a množství pořízeného materiálu bylo enormní. Sestavili jsme krásné animace zatmění i stmívání krajiny, pořídili kompozitní snímky vnitřní koróny, tentokrát nádherně uspořádané do tvaru sledujícího přibližně dipólové pole Slunce. To bylo způsobeno minimem sluneční aktivity. V okolí Slunce svítily jasné hvězdy a planety. Opět jsme využívali zobrazení Slunce na projekční plochu. Podařilo se nám vytvořit i kompozitní snímek s dobře viditelným pohybem Měsíce, který naleznete na obrázku 28 barevné přílohy.

Velmi zajímavé byly záznamy osvětlení v průběhu zatmění. Naše meteorologická stanice umožňovala zjišťovat osvětlení v různých barevných kanálech. V průběhu úplné fáze zcela jasně dominoval modrý kanál způsobený osvětlením krajiny horkou korónou. Jak už víme, právě modravé příšeří je typické pro úplnou fázi všech zatmění. S tím korespondovala naměřená barevná teplota světla, která se vyšplhala na 9 000 K.

Naši kolegové z jiné expedice pozorovali zatmění na pobřeží v nedalekém Side. Podle jejich pocitů bylo zatmění velmi světlé, my ale nic takového nepozorovali. Údajnou světlost zatmění snad mohl způsobovat odraz světla od vodní hladiny.



Jenže expedice za zatměním není nikdy jen zatmění samotné. Na téhle expedici jsme poznali mnoho mešit, antických památek, koupali se v moři, viděli Tróju, Pamukalská jezírka, trhali pomeranče přímo ze stromů, fotografovali se s českou vlajkou, přišli o kapotu, platili pokutu za rychlou jízdu...

Další expedice

Od prvního vydání knihy „*Hvězdy, planety, magnety*“ uplynulo dlouhých 14 let. V jejich průběhu jsme uspořádali ještě dvě expedice za zatměními. První z nich byla do Číny v roce 2009. Po Čínské lidové republice jsme ujeli vlaky a autobusy přibližně 5 600 kilometrů, pořídili zhruba 50 000 fotografií (konečně jsme pochopili, co to znamená „fotografovat jako Japonec“) a dvě hodiny filmových záznamů. Nezvyklé množství lidí, nezvyklá architektura, chrámy, zlatí a pískovcoví budhové, Velká čínská zeď, obrovská města, nesmírné vzdálenosti, překvapivě dobře fungující vlaková doprava a velké budovatelské nadšení místních obyvatel. Domy, které ustupují nové výstavbě, se neboří po jednotlivých exemplářích, ale po celých čtvrtích. Především jsme ale rádi, že se nám podařilo uvidět jako jedné z mála expedic zatmění Slunce dne 22. 7. 2009. Počasí nebylo zcela ideální, ale po většinu úplné fáze byl úkaz dobře pozorovatelný. Snímek třetího kontaktu s dobře viditelnými protuberancemi naleznete na obrázku 29 barevné přílohy.

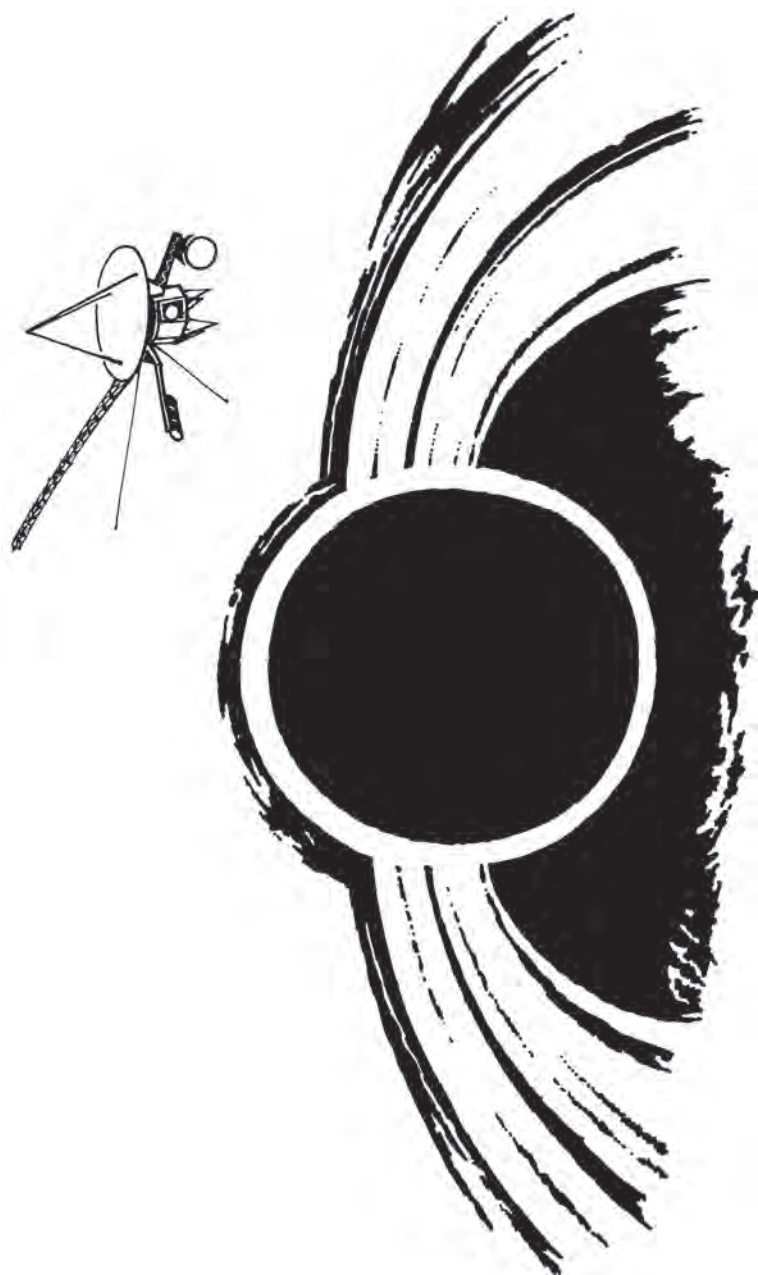
Poslední dosud uskutečněná expedice za zatměním byla do Spojených států v roce 2017. Měsíční putování po severoamerickém kontinentu bylo extrémně náročné a vydalo by na celou knížku. Ke stěžejním zážitkům, kromě zatmění Slunce, patřil Grand Canyon, Yellowstoneý národní park a detektor gravitačních vln LIGO v Hanfordu. V barevné příloze naleznete na obrázku 30 detailní kresbu zachycující jak protuberance, tak korónu při zatmění, které jsme pozorovali ve Wyomingu dne 21. srpna 2017. Na nákrese je zachycena i protuberance z prvních okamžiků zatmění, která na většině fotografií z tohoto zatmění chybí.

Ale tahle knížka není jen o exotických zemích a dobrodružstvích v nich. Vraťme se do Sluneční soustavy, ještě exotičtějšího a dobrodružnějšího místa než Turecko, Čína nebo Afrika.

Víte, že?

- Víte, že kromě částečného, úplného a prstencového zatmění Slunce ještě existuje hybridní zatmění? Takové zatmění je v některých oblastech viditelné jako prstencové a v jiných jako úplné.
- Víte, že v 21. století bude 68 úplných zatmění Slunce? Dalších 77 zatmění bude částečných, 73 prstencových a 7 hybridních. Nejbližší úplné zatmění Slunce po vydání této knihy bude 4. prosince 2021 v Antarktidě. Další úplné zatmění nastane 8. dubna 2024 v USA, Kanadě a Mexiku.
- Víte, že zatmění v Číně z roku 2009 bylo nejdelším úplným zatměním Slunce v 21. století? Trvalo 6 minut a 39 sekund. Nejdéle může úplné zatmění Slunce trvat 7 minut a 32 sekund.
- Víte, že se zatmění Slunce dá pozorovat i z vesmíru? V roce 1969 viděli astronauti Apollo 12 zatmění Slunce naší Zemí a v roce 2006 pozorovala sonda Cassini zatmění Slunce planetou Saturn.

Poučení na závěr: Chcete-li spatřit úplné zatmění Slunce, musíte být nejen ve správném čase na správném místě, ale mít ještě notnou dávku štěstí, aby pozorování přálo i počasí.



6. Velká cesta

*„Vše, co si někdo dokáže představit,
je možné uskutečnit.“*

Jules Verne, francouzský spisovatel

Od dob, kdy začala okolí naší planety brázdit tělesa vytvořená člověkem, uplynulo přes 60 let: První Sputnik opustil Zemi v roce 1957. Za šest desetiletí zkonstruovalo lidstvo dokonalé stroje, které dopravily člověka na Měsíc a postupně navštívily všechny planety Sluneční soustavy. Naši roboti se projíždějí po Marsu, umíme přistát na kometě i planetce, na oběžné dráze Země krouží obří Mezinárodní kosmická stanice, uvažuje se o vybudování stálé základny na Měsíci a cestě člověka na Mars. Kosmonautika nám přináší nejen uspokojení z poznávání cizích světů, ale i vynikající technologie, které lidstvo využívá v každodenním životě. Bez ní bychom neměli kvalitní konstrukční materiály, inteligentní textilie schopné rozvinout se na základě elektrického impulsu, některé vyspělé elektrotechnické součástky ani převodovky s kolísající osou otáčení. Jedna z objevitelských cest si však právem zaslouží pojmenování Velká cesta. Jde o pouť dvojice sond Voyager, které navštívily všechny obří planety. Téměř půl století tito poslové člověka brázdí Sluneční soustavu a nyní se ocitly na samé její hranici.

Mise Voyager

Mise dvojice kosmických lodí k obřím planetám Jupiteru a Saturnu byla schválena v květnu 1972. Šéfem projektu se stal Edward Stone, který byl později v letech 1991 až 2001 ředitelem Laboratoře tryskových pohonů (JPL, *Jet Propulsion Laboratory*) Amerického národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA). Roku 1998 převzal funkci vedoucího tohoto projektu inženýr Ed Massey. Není bez zajímavosti, že od roku 1996 vedl Ed Massey současně také projekt sluneční sondy Odyseus (Ulysses).

Misi Voyager lze rozdělit do tří částí. První trvala od roku 1977 do roku 1981, kdy měly být původně – po průletu Voyageru 2 kolem Saturnu – obě sondy ponechány svému osudu. Životnost sond byla tedy plánována na 5 let. Poté, co byly všechny cíle mise splněny bez nejmenších problémů, byl software sond na dálku pozměněn. Oproti plánu prozkoumal Voyager 2 navíc i planetu Uran a v roce 1989 doletěl k Neptunu. Po roce 1989 začalo třetí období života obou sond. Hlavním cílem se v této fázi stal výzkum mezihvězdného prostředí, proto byla mise přejmenována na VIM (*Voyager Interstellar Mission, Mezihvězdná mise Voyagerů*).

Sondy Voyager patří k nejslavnějším přístrojům vyslaným lidstvem do hlubin Sluneční soustavy. Vedle zmíněných planet nafotografovaly 48 měsíců a prozkoumaly jedinečné systémy prstenců a magnetických polí obřích planet. Tím však let Voyagerů neskončil. Po průletech kolem planet byly sice vypnuty kamery i mnohé další přístroje na obou sondách, aktivní však zůstaly detektory nabitých částic kosmického záření a magnetického pole. Data, která tyto přístroje vysílají na Zemi, nezaplňují titulní stránky novin jako snímky cizích světů získané při těsných setkáních, ale pro rozvoj astrofyziky jsou bezesporu velmi důležitá. Vždyť kosmické sondy sbírají údaje o vlastnostech prostředí, kam až dosud nikdo jiný nepronikl! Oba Voyagery se nyní pohybují na samé hranici naší Sluneční soustavy a přiléhajícího mezihvězdného prostředí; Voyager 1 míří do souhvězdí Hadonoše a Voyager 2 do souhvězdí Dalekohledu.

Celková cena za vývoj, start a provoz obou sond od startu do přiblížení Voyageru 2 k Neptunu v roce 1989 byla 865 milionů amerických dolarů. I když jde o mimořádnou částku, v přepočtu stál provoz sond v tomto období jednoho obyvatele USA 20 centů (necelých pět korun) ročně. Jde tedy o zcela zanedbatelnou částku ve srovnání s jinými výdaji USA. Prodloužení a udržování mise po roce 1989 již není zdaleka tak finančně náročné.

Na letu obou sond se podílelo mnoho vědeckých pracovníků i členů technického personálu. Někdy se náročnost projektů vyjadřuje v člověkorocích – pro misi Voyager pak vychází 11 000 člověkoroků.

Pro srovnání: odhaduje se, že postavení obří Cheopsovy pyramidy v Gize bylo ekvivalentní 30 000 člověkorokům.

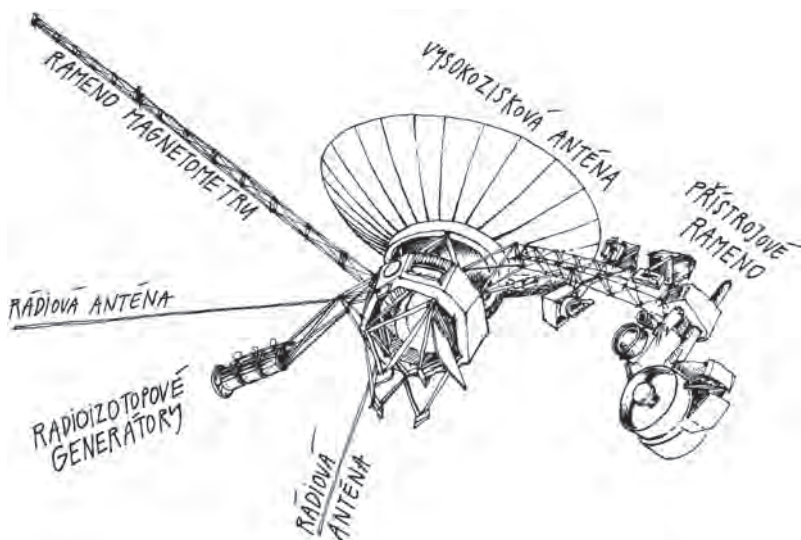
Každá ze sond je postavena z 65 000 různých součástek. Jde o skutečné součástky, nikoli jednotlivé díly elektronických obvodů – těch by bylo 5 milionů. Elektronika jedné sondy odpovídá složitostí dvěma tisícům televizních přijímačů. Klíčové systémy sondy musely být dokonale chráněny před pronikavými radiačními pásy planety Jupiter; nechráněný kosmonaut by na palubě Voyageru při průletu kolem Jupiteru obdržel tisícinásobek smrtelné dávky záření.

Zajímavým problémem byla stabilita sond. Fotografování vzdálených planet je samozřejmě poznamenáno nedostatkem světla a při dlouhé expozici tedy nesmí docházet k otáčení sondy. U planety Uran musela být sonda stabilizována tak, aby se otáčela patnáctkrát pomaleji než hodinová ručička náramkových hodinek, u Neptunu je již tak málo světla, že musel být rotační pohyb sondy Voyager 2 dokonce třicetkrát pomalejší než pohyb hodinové ručičky.

Jak sondy vypadají?

Obě sondy jsou stejné. Jako zdroj energie slouží tři radioizotopové termoelektrické generátory umístěné mimo tělo sondy na speciálním rameni. Teplo uvolněné přirozeným radioaktivním rozpadem plutonia je využito k výrobě elektřiny, která napájí přístroje, počítač, vysílač a další systémy. Pro cesty do vzdálenějších hlubin Sluneční soustavy již nelze použít jako zdroj energie panely slunečních baterií, protože sluneční svit je ve větších vzdálenostech od Slunce velmi slabý. Z vlastního těla sondy ční kromě ramene s generátory ještě dvě tenké antény pro detekci rádiových a plazmových vln, přístrojové rameno a rameno magnetometru.

Na přístrojovém rameni jsou umístěny dvě televizní kamery, širokoúhlá a úzkouhlá. Rozlišení úzkouhlé kamery je takové, že by bylo možné přečíst novinové titulky ze vzdálenosti jednoho kilometru. Dále jsou zde spektrometry pro ultrafialový a infračervený obor, radiometr, detektor kosmického záření, polarimetr na měření polarizace elektromagnetického záření a detektor nabitých částic.



Nejdelsí je rameno magnetometru. Při startu bylo složené v 60 centimetrů dlouhém pouzdře, po opuštění Země se rozvinulo do konečné délky 13 metrů. Je vyrobeno z pevného sklolaminátu. Senzor umístěný na konci ramene je orientován s přesností dvou úhlových stupňů. Na rameni jsou umístěny další senzory pro detekci magnetického pole. Komunikaci se Zemí zajišťuje vysoko-zisková anténa s průměrem 3,7 metru, která dává sondě její charakteristický tvar.

Téměř tunová sonda měla v první části mise spotřebu 400 wattů. Manévrování sond zajišťovalo 16 miniaturních hydrazinových trysek s tahem přibližně 1 newton na trysku. Jedna taková tryska by urychlila osobní automobil na rychlost 50 km/h za 6 hodin, pokud by nepůsobilo žádné tření.

Přístrojová plošina spolu s rameny se pomocí ozubeného převodu může otáčet kolem dvou os. Motorek vykoná při jednom otočení plošiny 9 000 otáček a za první dvě fáze mise od startu do roku 1989 se osa motorku otočila pětimilionkrát. Pozice sondy je sledována

pomocí setrvačníků, jejichž rotační osa udržuje svůj směr a slouží jako referenční systém. Pořízená data jsou nahrávána na mimořádně kvalitní magnetofonový pásek – představte si, že dvouhodinový záznam na staříčké videokazetě budete bez jediného selhání přehrávat jednou denně několik desítek let!

Dnes je většina systémů obou sond odpojena, přesto jsou sondy funkční a sledují parametry mezihvězdného prostředí. Z Voyageru 1, který je nejdále (152 astronomických jednotek v únoru 2021), letí signál s vědeckými daty k Zemi 21 hodin a na 34metrovou anténu sledovací sítě Deep Space Network na Zemi dopadá výkon pouhých 10^{-16} wattu. I přesto je možné dnešní technikou tento velmi slabý signál zaznamenat.

Let Sluneční soustavou

Velká cesta započala v roce 1977. Obě sondy startovaly z mysu Canaveral na Floridě a vynesly je rakety Titan IIIE Centaur. Voyager 2 startoval dříve, v srpnu 1977, a Voyager 1 o šestnáct dní později, v září 1977. Voyager 1 byl naveden na kratší a rychlejší dráhu k Jupiteru, a tak doletěl k cíli po osmnácti měsících, v březnu 1979. Voyager 2 doletěl k Jupiteru o čtyři měsíce později, v červenci 1979.

Lidstvo si tak mohlo prohlédnout tuto obří planetu podruhé zblízka – poprvé to bylo v letech 1973 a 1974, kdy k Jupiteru dolétly sondy Pioneer 10 a 11. Fotografie zaslané z Voyagerů zpět k Zemi ukázaly turbulence v Jupiterově atmosféře v dosud nevídaných detailech. Záhadná Velká červená skvrna pozorovaná od dob Galileových se ukázala být obřím atmosférickým vírem rotujícím proti směru hodinových ručiček. Voyager 1 našel devět aktivních sopek na měsíci Io, což bylo asi největším překvapením celé mise. Voyager 2 měl o čtyři měsíce později jedinečnou možnost porovnat měnění se aktivitu těchto vulkánů. Kolem Jupiteru byl nalezen slabý prachový prstenec, který sice zdaleka nedosahuje hustoty částic Saturnova prstence, nicméně doplnil obraz obřích planet o nezbytné prstence látky v jejich okolí. Detailně byly pozorovány radiační pásy Jupiteru a plazmový torus Io-Jupiter.

Oba Voyagery využily gravitační pole Jupiteru k urychlení na dráhu směrem k Saturnu. Rychlost sond vzhledem ke Slunci se při tomto manévru zvýšila o 57 000 km/h, což kvůli platnosti zákona zachování energie a hybnosti nepatrně snížilo oběžnou rychlost Jupiteru (tato hodnota je ovšem neměřitelná).

Voyager 1 dorazil k Saturnu v listopadu 1980, Voyager 2 v srpnu 1981. Sondy pořídily fantastické záběry Saturnových prstenců, které svou jemností připomínají drážky kompaktního disku. V prstencích byly zjištěny i různé záhyby a radiální struktury způsobené nabitým prachem a gravitační interakcí s drobnými měsíci. V atmosféře byly zaznamenány východní větry s rychlostí až 1 800 km/h, nesouvisějící s vrcholem oblačné vrstvy. Voyagery objevily řadu nových měsíců Saturnu.

Mise zde byla prodloužena a Voyager 2 opět využil gravitačního pole Saturnu k vymrštění na dráhu k Uranu. Obdobně byl později Uranem katapultován na cestu k Neptunu. Postupné gravitační urychlování Voyageru 2 bylo možné jen díky mimořádně příznivému geometrickému uspořádání poloh velkých planet, které se

sonda	Voyager 1	Voyager 2
start	5. 9. 1977	20. 8. 1977
nosná raketa	Titan IIIE Centaur	Titan IIIE Centaur
hmotnost sondy	815 kg	815 kg
tah trysek	16×1 N	16×1 N
výkon antény	23 W	23 W
datový tok	115 200 bit/s	115 200 bit/s
výkon generátorů	420 W	420 W
přilet k Jupiteru	5. 3. 1979	9. 7. 1979
přilet k Saturnu	13. 11. 1980	26. 8. 1981
přilet k Uranu	—	24. 1. 1986
přilet k Neptunu	—	25. 8. 1989

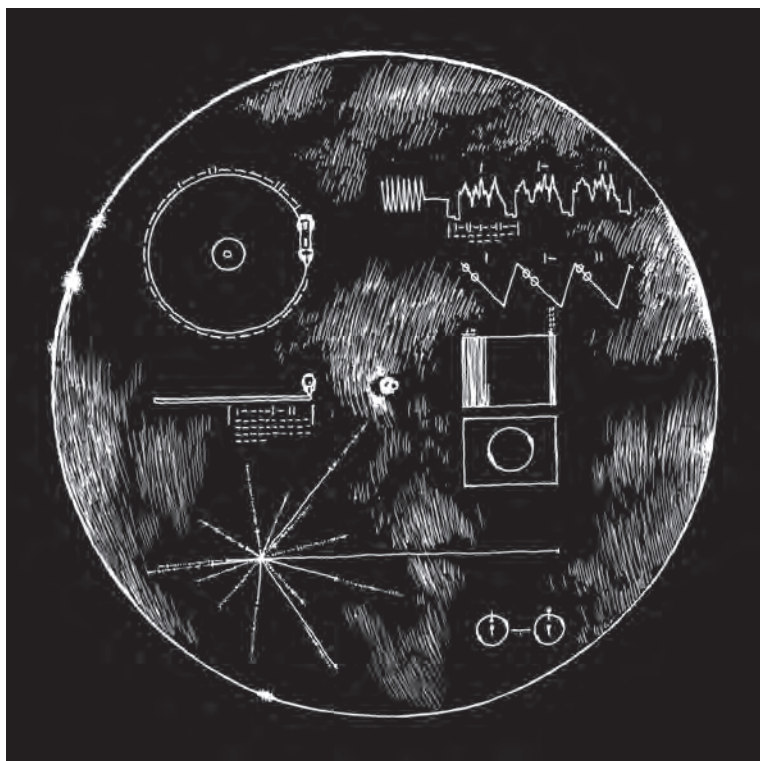
opakuje jednou za 176 let. Jediná sonda tak mohla prolétnout kolem všech čtyř obřích planet s minimálním množstvím paliva. Kdybychom vypočítali jakousi fiktivní účinnost paliva na cestě Voyageru 2 k Neptunu, došli bychom k závěru, že Voyager uletěl 13 000 kilometrů na jeden litr paliva. Tady je ovšem třeba poznamenat, že po většinu cesty sonda letěla pouhou setrvačností a palivo se spotřebovávalo pouze při manévrování. Nyní obě sondy letí volně prostorem a k dalšímu letu palivo nepotřebují.

Voyager 2 prolétl kolem Uranu v lednu 1986 a pozoroval jeho magnetosféru, radiační pásy, prstence i měsíce. K Neptunu dorazil v srpnu 1989 a prováděl výzkum atmosféry, magnetosféry, prstenců a měsíců planety. Dne 17. února 1998 se Voyager 1 dostal do větší vzdálenosti od Země než Pioneer 10, a stal se tak nejvzdálenější sondou vůbec. Obě sondy jsou nyní na hranici Sluneční soustavy.

Pozdrav civilizacím

Na sondách Pioneer 10 a 11 byl umístěn pozdrav mimozemským civilizacím. Jde o zlacenou plaketu s rytinou muže a ženy a doprovodnými piktogramy s určením naší polohy v Galaxii a základními informacemi o nás. Autorem plakety byl Carl Sagan¹ z Cornellovy univerzity v New Yorku. Na obě sondy Voyager byl umístěn pozlacený měděný disk s průměrem 30 cm (12 palců), který nese nahrávku zvukového a obrazového materiálu. Na obalu jsou opět vysvětlující piktogramy, jejichž koncepci připravil rovněž Carl Sagan. Původně měla k piktogramům patřit i rytina nahého muže a ženy, obdobně jako na plaketě umístěné na sondách Pioneer, a nahrávka měla obsahovat fotografii nahého muže a těhotné nahé ženy. NASA ale pod nesouhlasným tlakem veřejnosti autorovi tato vyobrazení zakázala, a tak je uvnitř disku nahrána jen mužská a ženská silueta. Už někde tady byly kořeny hyperkorektní doby, s níž se dnes setkáváme na každém kroku.

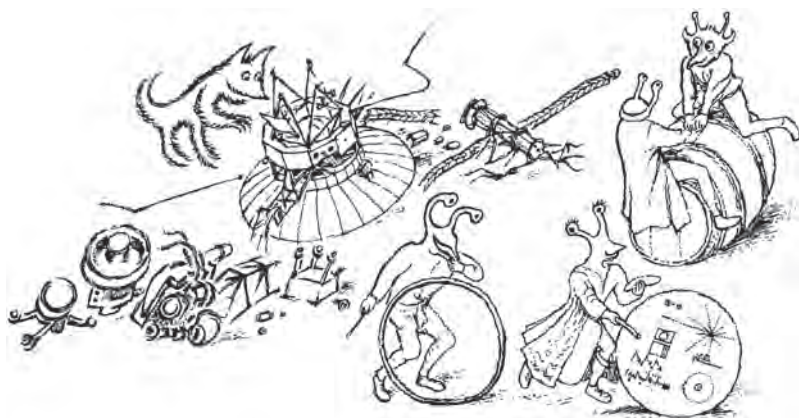
1 Carl Edward Sagan (1934–1996) – americký astrofyzik, spisovatel a neutuchající popularizátor. Sepsal přes 600 vědeckých prací a více než 20 knih. Je autorem projektu SETI na hledání mimozemských civilizací. Nejznámější je kniha *Kontakt* a televizní seriál *Kosmos: Cesta do neznáma*.



Základní jednotky vzdálenosti a času na nahrávce jsou odvozeny od přechodu mezi dvěma základními stavy atomu vodíku, které se liší vzájemnou orientací spinu elektronu a protonu. Vlnová délka tohoto přechodu je 21 cm a perioda $0,7 \times 10^{-9}$ s; právě v násobcích těchto jednotek jsou vyjadřovány délka a čas. V pravé dolní části je piktogram znázorňující oba stavy atomu vodíku. Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, a tak je naděje, že by případní nálezci mohli piktogram rozluštit.

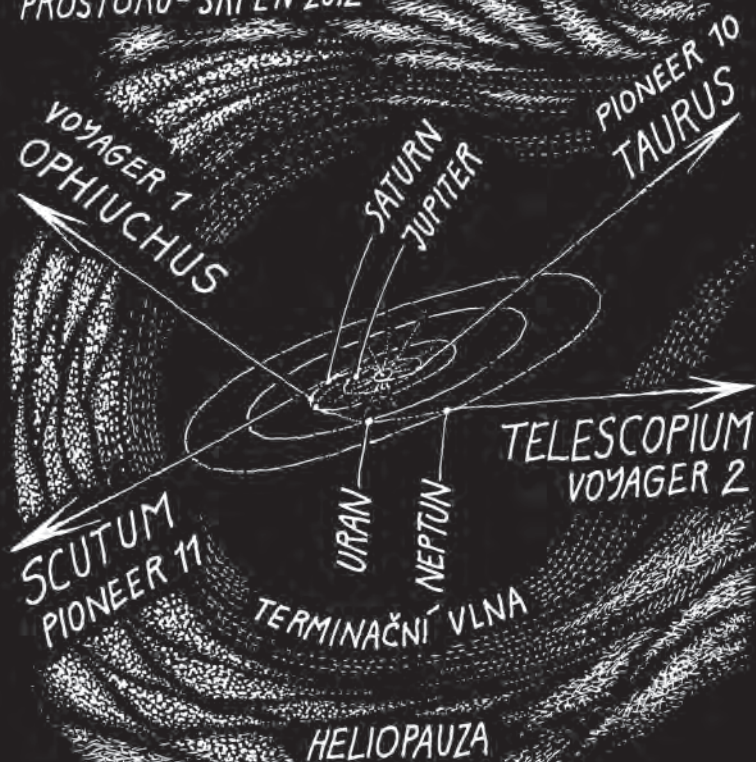
V levé horní části je umístěna rytina s vyobrazením samotného disku, na jehož obvodu je binárně zapsána správná rychlost otáčení při přehrávání. Ta činí jednu otáčku za 3,6 s. Na rytině je znázorněno i pouzdro s hrotem, pomocí kterého se dá nahrávka přehrát.

Toto pouzdro je umístěno v sondě. Pod vyobrazením disku je rytina s pohledem na disk z boku a s ukázkou použití hrotu při přehrávání. Binární zápis udává délku nahrávky na jedné straně disku (činí přibližně jednu hodinu). Pod oběma piktogramy je na pozlaceném disku diagram určující naši polohu v Galaxii, a to pomocí čtrnácti blízkých pulzarů. Na spojnicích k nim je binárně zapsána frekvence jejich pulzů. Stejný diagram byl použit u sond Pioneer. V pravé části je piktogram tvaru nahraného signálu, pod ním je znázorněno, jak dekódovat obrazovou informaci. Ještě níže je obrázek kruhu, který se objeví jako první obraz, pokud byl návod pochopen správně. Nahrávka obsahuje zvukový i obrazový materiál o planetě Zemi. Jsou zde zastoupeny přirozené zvuky (vítr, bouře, ptáci a další živočichové) i hudební ukázky z různých etnických oblastí. Nahrávka je doplněna pozdravem namluveným v 55 jazycích (včetně češtiny), 115 obrazy dokumentujícími život na Zemi a tištěným pozdravem tehdejšího prezidenta USA Jimmyho Cartera a generálního tajemníka OSN Kurta Waldheima. Na obalu disku je napařen velmi čistý vzorek uranu 238. Poločas rozpadu tohoto izotopu je 4,51 miliardy let. Z množství dceřiných izotopů vzniklých rozpadem by mohl nálezce disku určit dobu, kdy byl vyslán. Pokud uvážíme nedozírnost mezihvězdného prostoru v porovnání s velikostí sondy, je ovšem naděje nalezení disku kýmkoli zcela mizivá...



VOYAGER 1
START 5.9.1977
JUPITER 5.3.1979
TERMINAČNÍ VLNA
-PROSINEC 2004-94 AU
VSTUP DO MEZIHVĚZDNÉHO
PROSTORU- SRPEN 2012

PIONEER 10
START 3.3.1972
JUPITER 3.12.1973
POSLEDNÍ SPOJENÍ
23. 1. 2003
80 AU OD ZEMĚ



PIONEER 11
START 6.4.1973
JUPITER 3.12.1974
MISE UKONČENA
V ZÁŘÍ 1995
PRO MIZIVÉ SPOJENÍ

VOYAGER 2
START 20.8.1977
JUPITER 9.7.1979
TERMINAČNÍ VLNA
SRPEN 2007- 84 AU

Hvězdám vstříc

Voyager 1 je v současnosti (2021) nejvzdálenějším člověkem vyrobeným objektem. Dne 15. srpna 2006 překročil vzdálenost 100 astronomických jednotek (au), tj. byl stokrát dále od Slunce než Země. Dnes (2021) je ve vzdálenosti 152 au, tj. 23 miliard kilometrů. Na konci roku 2004 překročil terminační vlnu, a to ve vzdálenosti 94 au od Slunce. V této oblasti se skokem mění rychlost částic slunečního větru z nadzvukové na podzvukovou. V srpnu 2012 prošla sonda heliopauzou. Za tou již elektromagnetický vliv našeho Slunce končí a začíná skutečný mezihvězdný prostor, vyplněný hvězdným větrem sousedních hvězd. Voyager 2 je vzdálený od Slunce 127 au. Terminační vlnou prošel v srpnu 2007 ve vzdálenosti 84 au a míří ven ze Sluneční soustavy do souhvězdí Dalekohledu. Jde jen o směr letu, souhvězdí jsou jen jakési „parcely“ na obloze a hvězdy v nich spolu většinou nemají nic společného.

Obě sondy se nyní pohybují rychlostí přibližně 60 000 km/h, vzdálenost jednoho světelného roku uletí za 25 000 let. Radioizotopové generátory umístěné na sondách s nimi umožní komunikaci snad do roku 2025; poté se chrabří průzkumníci odmlčí a budou pokračovat do hlubin kosmického prostoru jako němí svědkové dávné existence naší civilizace.

sonda	datum startu	vzdálenost (au)	rychlost (km/h)	směr letu
Pioneer 10	2. 3. 1972	127	45 200	Býk
Pioneer 11	6. 4. 1973	106	41 800	Štít
Voyager 1	5. 9. 1977	152	61 700	Hadonoš
Voyager 2	20. 8. 1977	127	56 100	Dalekohled
New Horizons	19. 1. 2006	50	76 300	Hadonoš

Mise, které opustí nebo opustily Sluneční soustavu. Údaje jsou k březnu 2021.
Vzdálenosti i rychlosti jsou vztažené vzhledem ke Slunci.

Víte, že?

■ Víte, že mise Voyager byly původně součástí programu Mariner 11? Za pozdější vznik samostatného programu pro „Velkou cestu“ mohly jednak škrty v rozpočtu a jednak objev pronikavé radiace (Marinerem 10), která si vynutila podstatné změny v konstrukci sond a jejich přístrojů.

■ Víte, že každá ze sond Voyager má tři radioizotopové generátory? Každý z nich obsahuje 24 pelet s radioaktivním plutoniem 238, jehož poločas rozpadu je 88 let. Výkon generátorů z původních 420 wattů postupně klesá. Je to způsobeno úbytkem plutonia a degradací termočlánků, které převádějí teplo na elektrickou energii. Zásoby energie by mohly vydržet do roku 2025.

■ Víte, že Voyager 1 objevil zdroj dodatečného ohřevu Saturnu? V atmosféře Saturnu detekoval jen 7 % helia (Jupiter má 11 %). Ukázalo se, že těžké helium klesá v moři lehkého vodíku a odpovídající změna potenciální energie se projeví jako teplo.

■ Víte, že hranice Sluneční soustavy je dvojitá? Někdo za ni považuje heliopauzu, za níž končí elektromagnetický vliv našeho Slunce. Slunce má ale na okolí nadále gravitační vliv, tj. i za heliopauzou jsou tělesa obíhající kolem Slunce. Oortův oblak, který je zásobárnou kometárních jader, se rozprostírá až do vzdálenosti dvou světelných roků.

Poučení na závěr: Až se jednou vydáte na cestu do vzdálených cizích krajin, dívejte se kolem sebe a zkuste něco objevit. Možná se stanete nesmrtelnými jako mise Voyager.





7. Magnetosféry kamenných planet

*„Rozlehlost Země se stává bezvýznamnou
v porovnání s velikostí nebes“*

Mikuláš Koperník, astronom a matematik

Elektromagnetické jevy ve Sluneční soustavě jsou převážně ovlivněny slunečním větrem, který naráží nadzvukovou rychlostí do všech těles v okolí Slunce. U některých těles formuje tvar jejich magnetosfér, jiná obtéká jako vodivé překážky, u dalších neustále bombarduje jejich povrch. Sluneční vítr se na své pouti prostorem prodírá pavučinou utkanou z magnetických polí Slunce, planet i menších těles. Siločáry těchto polí se vzájemně propojují a navazují, obdobně jako jsou propojeny otevřené siločáry stříelky magnetu s magnetickým polem Země.

Dipól a kvadrupól

Magnetické siločáry mohou mít i velmi komplikovaný průběh. Matematicky ho lze vždy chápat jako součet jednodušších a snáze popsatelných polí¹ – monopólu, dipólu, kvadrupólu, oktapólu atd. *Monopólový člen* je v magnetickém poli, na rozdíl od pole elektrického, vždy nulový. Tento fakt je odrazem skutečnosti, že neexistují magnetické monopóly – hypotetické částice, z nichž by magnetické pole vyvěralo. V elektrickém poli je situace jiná, jednoduchým případem elektrického monopólu je proton, z něhož na všechny strany vyvěrají siločáry elektrického pole. Nejjednodušší možnou konfigurací magnetického pole je *dipólové pole*, které odpovídá poli tyčového magnetu. Pole dipólu je symetrické podél jedné osy

1 **Multipólový rozvoj** – matematická procedura, která rozloží pole na členy podle toho, jak pole ubývá se vzdáleností: monopól ($1/r^2$), dipól ($1/r^3$), kvadrupól ($1/r^4$) atd.

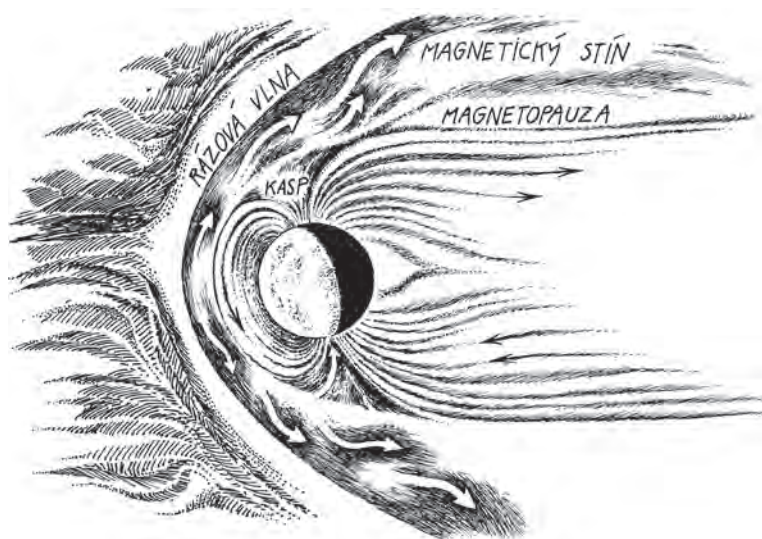
a ubývá se třetí mocninou vzdálenosti. Velikost magnetického dipólu se vyjadřuje tzv. dipólovým momentem, který je úměrný součinu magnetického pole na rovníku objektu a třetí mocniny poloměru objektu. Astronomové pokládají konstantu úměrnosti rovnou jedné. Jednotkou dipólového momentu je tedy $T \cdot m^3$ (tesla krát metr na třetí). V období minim sluneční aktivity má Slunce v nejbližším okolí pole přibližně dipólové. U planet také dominuje dipólové pole, s výjimkou období překlápění pólů.

Druhou nejjednodušší konfigurací magnetického pole je tzv. *kvadrupól*. Jde o pole, které bychom získali složením čtyř tyčových magnetů se střídající se polaritou, umístěných do tvaru kříže. Kvadrupólové pole ubývá se čtvrtou mocninou vzdálenosti. Kvadrupólový příspěvek pole se u Slunce a planet výrazně zvětšuje v obdobích přepólování magnetického pole. U zemského pole jsou pečlivě měřeny i další příspěvky, například *oktupólový*, který ubývá s pátou mocninou vzdálenosti.

Merkur

Merkur je zajímavé těleso, které se liší od ostatních planet ve třech parametrech: jde o nejmenší planetu pozemského typu, je nejbližší ke Slunci a jako jediná planeta nemá výraznou atmosféru. Poloměr Merkuru je pouhých 2 439 km (to je mezi velikostí Měsíce a Marsu). Blízkost Merkuru ke Slunci způsobuje extrémní rozdíly teplot. Na denní straně je teplota až 360 °C, noční strana je ponořena do mrazivého chladu -140 °C. Merkur má vázanou rotaci, kolem osy se otočí jednou za 59 dní a kolem Slunce oběhne za 88 dní (poměr 2:3). Nebývale vysoká hustota Merkuru 5,4 g/cm³ (pro srovnání: Měsíc má hustotu jen 3,3 g/cm³) svědčí o rozsáhlém železoniklovém jádře (procentuálně dokonce větším než u Země) a tenkém plášti složeném z křemičitanů. Na základě radarových měření nepravidelností rotace planety prokázal v roce 2007 Jean Luc Margot z Cornellovy univerzity s velkou mírou pravděpodobnosti, že alespoň část Merkurova jádra je tekutá. Rotující tekuté kovové jádro generuje dipólové magnetické pole planety. Není dosud známo, v jakém poměru je tekutá a pevná část jádra.

Z fyzikálního hlediska je Merkur velmi cenný objekt. Tím, že nemá atmosféru, je interakce jeho magnetického pole se slunečním větrem „čistá“ – je jedinou planetou, kde atmosféra nezasahuje do interakce slunečního větru s polem planety. Je proto škoda, že Merkur byl doposud kosmickými sondami navštíven jen dvakrát, a to sondami Mariner 10 a MESSENGER. Aktuálně k Merkuru letí ještě evropsko-japonská sonda BepiColombo, která startovala v roce 2018 a k planetě dolétne v roce 2025.



Magnetosféra Merkuru

První ze sond, americký Mariner 10, prolétl v období od března 1974 do března 1975 třikrát kolem planety. K prvnímu průletu došlo na noční straně dne 29. března 1974 ve výšce 723 kilometrů nad povrchem. Sonda detekovala rázovou vlnu, magnetopauzu a pole planety o velikosti 100 nT. Při třetím průletu (opět na noční straně) se sonda přiblížila dokonce na 377 km k povrchu a naměřila pole 300 nT. Existence magnetického pole u planety Merkur byla pro vědce velkým překvapením. U tak malého tělesa magnetizmus nikdo nečekal.

ZÁKLADNÍ PRVKY MAGNETOSFÉRY	
polární kasp	nálevkovitá oblast v blízkosti pólů planety, kterou pronikají nabitě částice do atmosféry. Název pochází z anglického „cusp“ (roh, cíp).
rázová vlna	oblast na denní straně planety, v níž se skokem mění magnetické pole, koncentrace i rychlost částic. Je to způsobeno interakcí se slunečním větrem.
magnetopauza	prostor mezi magnetickým polem planety a slunečním větrem. Na denní straně jde o prostor mezi rázovou vlnou a hraniční vrstvou magnetosféry.
plazmosféra	oblast plazmatu držená magnetickým polem v těsné blízkosti planety. Plazmosféra zpravidla rotuje spolu s planetou (Merkur je výjimkou).
magnetický ohon	protažená oblast otevřených siločar magnetického pole na noční straně planety, která je vyplněná plazmatem a táhne se do značné vzdálenosti.
neutrální vrstva	plocha v magnetickém ohonu, na které je magnetické pole nulové. V této oblasti tečou tzv. neutrální proudy a dochází zde k přepojování siločar.
hraniční vrstva magnetosféry	plocha oddělující mg. pole planety od okolního prostoru. Vyrovnává se na ní tlak magnetického pole (uvnitř) a tlak slunečního větru (vně).
radiační pás	oblast zachycených nabitých částic ve vnitřní části magnetosféry planety, které obíhají kolem siločar a přitom intenzivně září v rádiovém oboru.
ionosféra	ionizovaná oblast atmosféry planety. K ionizaci zpravidla dochází interakcí atmosféry s pronikavým slunečním zářením, zejména v UV oboru.
ionopauza	oblast, ve které je u planety bez magnetického pole vyrovnán tlak částic slunečního větru (vně) s tlakem elektronů a iontů ionosféry (uvnitř).

Jako druhá navštívila Merkur americká sonda MESSENGER. Její název je zkratkou z anglického *MERcury, Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging* (*Merkur, povrch, vesmírné okolí, geochemie a měření vzdáleností*). Sonda startovala v srpnu 2004, v letech 2006 a 2007 prolétla dvakrát kolem Venuše. Kolem Merkuru poprvé prolétla v lednu 2008. Další průlety proběhly v říjnu 2008 a září 2009. V březnu 2011 byla navedena na oběžnou dráhu kolem Merkuru, a stala se tak jejím prvním satelitem. Od té doby prováděla komplexní měření, na jejichž základě byl vytvořen podrobný model magnetosféry Merkuru. Tato sonda ukončila svou činnost 30. dubna 2015 řízeným pádem na povrch planety.

Z rozboru měření plyne, že Merkur má podobnou magnetosféru jako Země; jde o jakousi její zjednodušenou a zmenšenou kopii. Magnetické pole na rovníku je $0,33 \mu\text{T}$, dipólový moment $5,5 \times 10^{12} \text{ Tm}^3$. Pokud chceme porovnávat rozsah magnetické aktivity jednotlivých planet, musíme srovnávat jejich dipólové momenty, nikoli magnetická pole samotná. Magnetický dipólový moment Merkuru je více než tisíckrát menší než dipólový moment Země. Sklon rotační a magnetické osy je 10° , siločáry v současnosti vycházejí z jižní polokoule, stejně jako u Země.

Magnetosféra planety má všechny základní rysy magnetosfér podobných Zemi: čelní rázovou vlnu, hraniční vrstvu magnetosféry, magnetopauzu, polární kasy a magnetický ohon na noční straně. Magnetosféra je ale příliš malá na to, aby v blízkosti planety udržela plazma rotující spolu s planetou, tzv. *korotující plazmosféru*; tento prvek magnetosféry u Merkuru chybí.

Venuše

Venuše je někdy nazývána sestrou Země. Je to dáno obdobnou polohou ve Sluneční soustavě a obdobnou velikostí obou planet (Venuše má poloměr 6 053 km, Země 6 371 km). Tím však podobnost obou planet končí. Venuše má velmi hustou atmosféru převážně z oxidu uhličitýho CO_2 (96 %) a dusíku N_2 (3 %), v menší míře jsou zastoupeny SO_2 , H_2O , CO , He , Ne , HCl a HF . Tlak při

povrchu je 90 atmosfér a skleníkový efekt způsobuje povrchovou teplotu až 480 °C. Venuše se otočí kolem vlastní osy jednou za 243 dní, oběh kolem Slunce trvá 224 dní. Rotace je retrogradní (zpětná). Hustota planety Venuše je 5,25 g/cm³, což by mohlo svědčit o kovovém nitru.

V dávné minulosti byly podmínky na velkých terestrických (Zemi podobných) planetách pravděpodobně dosti podobné a probíhaly zde i obdobné geologické procesy. Sekundární atmosféry vzniklé odplyněním při tavení hornin po odvátí lehkých vodíko-heliových atmosfér obsahovaly z velké části oxid uhličitý. Venuše i Země mají zhruba stejné řádové zastoupení uhlíku, Země však, zejména díky živým organismům, disponuje mechanismy, kterými se oxid uhličitý z atmosféry váže do vody, minerálů a hornin. Ve vodě je oxid uhličitý buď přímo rozpuštěn, nebo vázán chemicky v podobě uhličitánových a hydrogenuhličitánových iontů. Zahříváním se oxid uhličitý z vody uvolňuje právě na úkor hydrogenuhličitánových iontů: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$.

Obrovské množství oxidu uhličitého je na Zemi chemicky vázáno ve formě vápenců. Při zvýšení teploty nad 370 °C je však oxid uhličitý vytěšňován oxidem křemičitým za vzniku křemičitanu vápenatého: $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3$. Oba popsané mechanismy uvolňování oxidu uhličitého zpět do atmosféry jsou pro nás životně důležité: plyne z nich, že čím více na Zemi poroste teplota, tím více oxidu uhličitého se bude vracet zpět do atmosféry, což zvyšování teploty ještě více urychlí. V určitém bodě by se tak mohl rozběhnout nevratný proces, který by způsobil úplný zánik života na Zemi. I toto je důvod ke studiu podmínek, jaké v současnosti na Venuši panují, a ke snaze pochopit procesy, které je vytvořily.

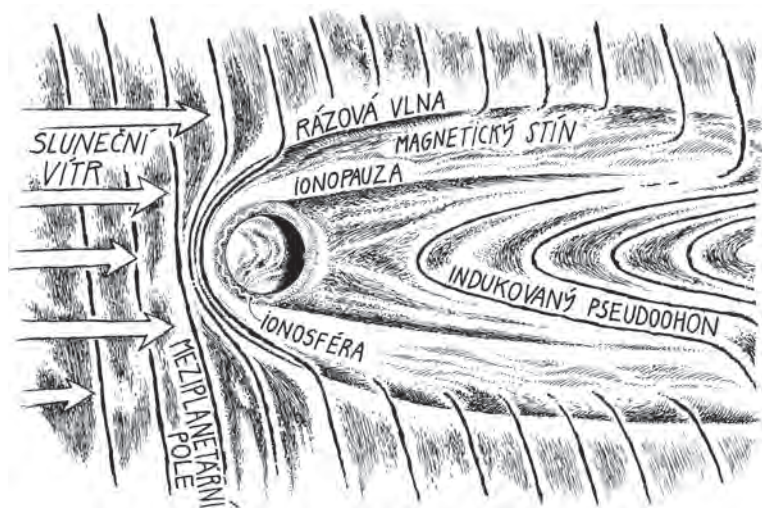
Povrch Venuše je z geologického hlediska dosti mladý, před 300 až 500 miliony let byl zřejmě kompletně přetvořen. Je tvořen rozsáhlými planinami pokrytými lávovými proudy a hornatými oblastmi utvářenými vulkanotektonickými procesy. Nejvyšším pohořím jsou Maxwell Montes v oblasti Ishtar Terra, čnějící do výšky až 9 km nad okolní terén (11,8 km nad střední úroveň).

Na radarových snímcích hornatých oblastí sahajících do výšek větších než 2,5 km, které pořídila sonda Magellan, si můžeme všimnout souvislosti mezi jasností a výškou: čím je daná oblast výše, tím jasnější je její radarový obraz. S největší pravděpodobností se zde projevuje skutečnost, že některé minerály jsou v různých podmínkách různě stabilní. V tomto případě jde o pyrit, který je stabilní za nižší teploty a nižšího tlaku (tedy ve vyšších výškách). Naopak v nížinách se tento materiál rozpadá.

Na povrchu planety najdeme mnoho útvarů geomorfologicky shodných s tvary na naší planetě, zejména vulkanická pohoří a vulkanické i impaktní krátery. Kvůli husté atmosféře však okolí kráterů vypadá poněkud jinak než na Zemi či na Měsíci. Atmosféra nedovolí uvolněnému materiálu transport na větší vzdálenosti, takže ten se ukládá téměř výhradně v blízkosti mateřského kráteru. Horké podnebí naopak udržuje roztavený materiál mnohem déle v tekutém a plastickém stavu, takže lávové proudy dotečou dále od zdroje a pokrývají rozsáhlejší oblasti.

Naproti tomu se na Venuši vyskytují útvary, které nemají na Zemi a ani v celé Sluneční soustavě obdoby. Jedná se zejména o *corony* (koncentrické kruhové struktury), které povrchu při celkovém pohledu dokonce dominují. Jiným typem útvarů jsou tzv. *arachnoidy*, pavoukovité praskliny o velikosti desítek až stovek kilometrů. Oba druhy útvarů jsou zřejmě výsledkem tektonických procesů, ovšem odlišných od těch, které známe z naší planety. Na rozdíl od Země nemá Venuše deskovou tektoniku, respektive soudí se, že má pouze jednu desku, na které se geologická aktivita projevuje četnými vulkány. Koronovité a pavoukovité praskliny jsou pravděpodobně reakcí kůry na její deformaci nadouváním a propadáním vrstev v nitru planety. V roce 2015 bylo na základě měření sondy Venus Express zjištěno, že je Venuše stále vulkanicky aktivní. Pro aktivní vulkány svědčí i proměnlivé složení atmosféry a zvýšený výskyt blesků (i desítky za minutu) poblíž některých vulkánů.

Venuši navštívila řada sond, které měřily magnetické pole i toky nabitých částic. Nedetekovaly žádné vlastní pole planety. Absence



Pseudomagnetosféra Venuše

magnetického pole by mohla být důsledkem nízkého tepelného toku z jádra, který nedostačuje k aktivaci dynama v kapalně části jádra. Vysoká povrchová teplota nám znemožňuje detekovat i případné zbytkové (remanentní) magnetické pole z minulosti v povrchových horninách. Je to proto, že teplota hornin je vyšší než Curierova teplota², a to znamená, že se případné zbytkové pole v horninách na Venuši neuchová.

Venuše, i přesto, že nemá vlastní pole, aktivně interaguje se slunečním větrem. V husté atmosféře vzniká totiž oblast nabitých částic – ionosféra. K ionizaci dochází ultrafialovým zářením a nábojovou výměnou. Venuše se proto vůči toku částic slunečního větru chová jako vodivá překážka. Kolem ionosféry se vytvoří plocha, kterou nazýváme *ionopauza*. Na ní je vyrovnán dynamický tlak částic slunečního větru s tepelným tlakem iontů a elektronů v ionosféře Venuše. Vně ionopauzy je interakce slunečního větru obdobná jako

2 **Curieova teplota** – teplota fázového přechodu u magneticky aktivních materiálů. Nad touto teplotou jsou elementární magnety uspořádány chaoticky, pod touto teplotou se vytvářejí magnetické domény jednotně uspořádaných elementárních magnetů a materiál má magnetické vlastnosti.

u klasické magnetosféry. Na denní straně vzniká rázová vlna odkláníající nabitě částice a meziplanetární magnetické pole je stlačeno a vytěsněno do okolí. Nevznikají však ani radiační pásy, ani magnetický ohon pozemského typu. Hovoříme o tzv. *indukované pseudomagnetosféře*. Pronikající meziplanetární magnetické pole má na denní straně hodnotu až 150 nT, na noční straně až 10 nT.

V meziplanetárním magnetickém poli vzniká v oblasti za překážkou brázda, do které se může vychylovat meziplanetární pole směrem k planetě a vytváří tak jakýsi magnetický pseudoohon. Ten však nemá nic společného s magnetickými ohony Merkuru nebo Země, které jsou tvořeny protaženými siločarami vlastního magnetického pole těchto planet.

Výzkum Venuše

Venuše byla v historii cílem několika desítek kosmických sond, jejichž mise bychom většinou mohli prohlásit za úspěšné. První sonda, která k planetě startovala, byla sovětská Veněra 1 roku 1961, následovaná o rok později americkým Marinerem 1. Spojení s Veněrou 1 však bylo ztraceno po 15 dnech letu a Mariner 1 byl zničen krátce po startu, ještě v zemské atmosféře. První sondou, která provedla funkční průlet okolo Venuše, byl Mariner 2, který 14. prosince 1962 vyslal záznamy svých měření ze vzdálenosti 35 000 km od planety. Výsledkem analýzy předaných dat bylo zjištění, že planeta velmi pomalu rotuje v retrográdním smyslu. Byla též detekována mimořádně hustá atmosféra sahající do výšky přes 60 km a vysoká teplota povrchu. Významným zjištěním byla nepřítomnost měřitelného magnetického pole planety.

V roce 1966 tvrdě přistálo na povrchu planety první umělé těleso – pouzdro sovětské sondy Veněra 3, která provedla přesná měření složení Venušiny atmosféry. K prvnímu měkkému přistání došlo až v roce 1970; přistávací modul sondy Veněra 7 vydržel na povrchu planety pracovat necelých 23 minut, poté byl zničen teplotou nejméně 477 °C a tlakem 91 atmosfér. První snímky z povrchu zaslal přistávací modul sondy Veněra 9 v roce 1975.

Roku 1978 se k Venuši po jedenácti letech vydala americká sonda Pioneer Venus 1, která jako první využila k povrchovému průzkumu radarová měření. Vznikla tak trojrozměrná mapa povrchu planety, která odhalila četné, do té doby neznámé útvary. Sonda měla orbitální část o průměru 2,5 m s magnetometrem na rameni délky 4,7 m; pracovala na oběžné dráze Venuše až do října 1992! Jako první provedla podrobná měření magnetického pole a definitivně potvrdila, že Venuše žádné vlastní pole nemá. Další součásti sondy Pioneer Venus byly 4 průzkumné moduly, jeden velký (o průměru 1,5 m) a tři menší (o průměrech 0,8 m). Moduly byly v listopadu 1978 nasměrovány k různým místům povrchu. Velký modul měl padák, menší nikoli. Moduly měřily složení atmosféry, teplotu, tlak, zrychlení, průnik částic slunečního větru atmosférou, rozložení infračerveného záření a další parametry. Jeden z menších modulů vysílal signály dokonce i po dopadu, a to déle než hodinu.

V první polovině 80. let 20. století probíhal průzkum Venuše pod sovětskou taktovkou. V roce 1982 přistála na povrchu Venuše sonda Veněra 13. V nehostinných podmínkách pracovala 2 hodiny a 7 minut. Stačila odvyšlat 14 barevných snímků povrchu (předchozí sondy měly jen černobílé kamery). Roku 1984 završily sondy s pořadovými čísly 15 a 16 velmi úspěšný projekt Veněra, na který navázal program Vega. Na palubě sond Vega 1 a 2, které mj. zkoumaly Halleyovu kometu, byl i záložní polohový detektor československé výroby. Československo se podílelo i na vývoji palubního analyzátoru plazmových vln. Sondy Vega 1 a 2 prováděly v roce 1985 velmi úspěšné balonové experimenty v atmosféře Venuše, při kterých se sledovaly turbulence atmosféry a měřila rychlost větru, teplota a složení.

V polovině roku 1990 dorazila k Venuši americká sonda Magellan, která provedla dosud nejpřesnější radarové mapování povrchu. Výsledkem její práce je kompletní trojrozměrná mapa povrchu planety v rozlišení až 75 m na pixel. Sonda Magellan prováděla u Venuše měření až do října roku 1996, kdy podle očekávání zanikla v její atmosféře. Od té doby stála Venuše víceméně stranou zájmu kosmických agentur, které se soustředily zejména na průzkum pla-

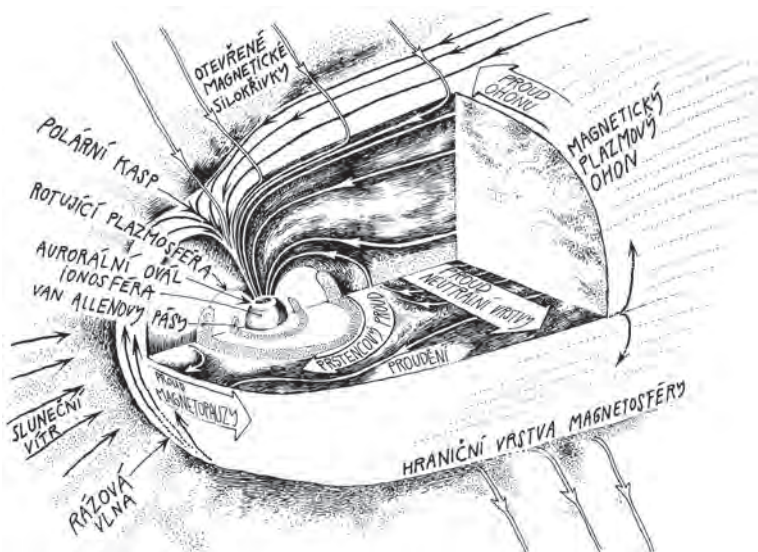
nety Mars. Okolo Venuše ještě proletěla roku 1990 sonda Galileo a v letech 1998 a 1999 sonda Cassini; cílem průletů nebyl primárně průzkum planety, ale urychlení těchto meziplanetárních sond gravitačním polem planety.

V listopadu 2005 odstartovala z ruského kosmodromu Bajkonur na nosiči Sojuz-Fregat sonda Venus Express. Jednalo se o první evropskou sondu ke druhé planetě Sluneční soustavy; k Venuši dolétla v dubnu 2006 a zkoumala ji do roku 2014, kdy byla mise ukončena. Hlavním úkolem byl průzkum husté atmosféry planety. Součástí výbavy byl i magnetometr, který s vysokou přesností třírozměrně mapoval indukovanou pseudomagnetosféru a ionosféru Venuše a zaznamenával blesky v její atmosféře. Na palubě byla ale i celá řada dalších užitečných přístrojů.

V současnosti je jedinou sondou zkoumající Venuši japonská Akacuki (Úsvit). Sonda startovala v květnu 2010, na konci téhož roku se nezdařil manévř, při němž měla být Akacuki navedena na oběžnou dráhu kolem Venuše. Sonda poté pět let obíhala Slunce a až v roce 2015 se japonským inženýrům podařilo tuto sondu zaparkovat na orbitě Venuše. Sonda zkoumá zejména atmosféru, bleskovou aktivitu a vulkanickou činnost na povrchu planety. Američané v současnosti vyvíjejí vozítko (rover), které by dokázalo překonat extrémní podmínky a pohybovat se po povrchu Venuše. Jde ale zatím jen o experimentální studii, do realizace je, zdá se, ještě daleko.

Země

Magnetosféra Země je typickou ukázkou interakce slunečního větru s dipólovým magnetickým polem planety v přítomnosti atmosféry. Jde o nejčastější typ planetární magnetosféry ve Sluneční soustavě. Na denní (návětrné, čelní) straně se tvoří *magnetická rázová vlna* charakteristického prohnutého tvaru; v matematických modelech je nejčastěji nahrazována parabolickou plochou. Na této rázové vlně se skokem mění magnetické pole, koncentrace slunečního větru a směr i velikost rychlosti částic slunečního větru. Částice obtékají rázovou vlnu a celou Zemi směrem k *magnetickému ohonu*.



Magnetosféra Země

Jde o oblast protažených siločar magnetického pole Země vyplněnou plazmatem, která se táhne do vzdálenosti 100 zemských poloměrů. Povrch Měsíce, který tímto ohonem často prolétá, je nabitý zejména elektrony z nulové vrstvy magnetického pole. Průměr magnetosféry je 20 až 30 zemských poloměrů.

Magnetosféra Země má základní rysy, se kterými jsme se již seznámili dříve: při interakci slunečního větru s magnetickým polem Země se v polárních oblastech vytvoří *polární kasy*, jakési obří nálevky, kterými mohou některé částice pronikat do atmosféry Země; dalším charakteristickým rysem magnetosféry Země jsou oblasti plazmatu korotující spolu se Zemí, které nazýváme *plazmosféra*. Mezi plazmosférou a plazmovým ohonem je *plazmopauza*, oblast s výrazně nižší koncentrací plazmatu. Některé nabité částice se zachytí na magnetických siločarách, pendlují od pólu k pólu a přitom intenzivně září. Tyto částice pocházejí jak ze slunečního větru, tak z kosmického záření a vytvářejí *vnitřní* a *vnější van Allenův radiální pás*. Daleko za Zemí se táhne magnetický plazmový ohon, který spolu s čelní rázovou vlnou dodává naší magnetosféře charakteristický tvar.

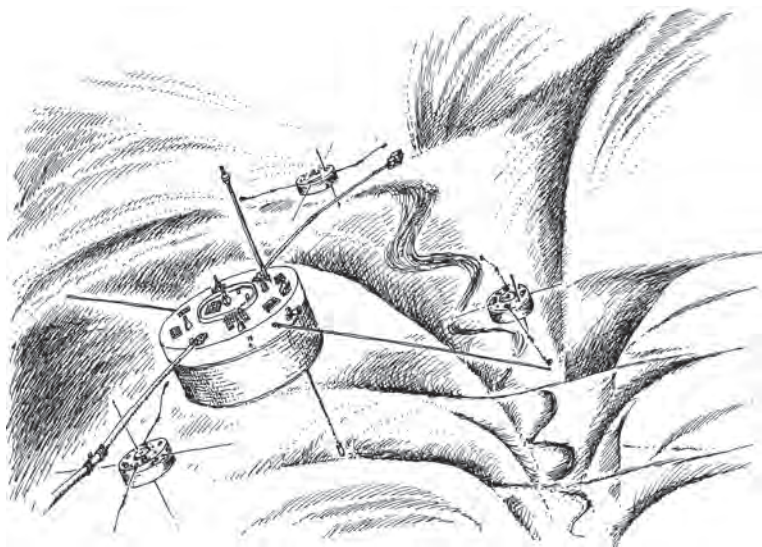
Kromě vlastního dipólového pole Země tvoří magnetosféru i další magnetická pole. Jsou způsobená pohyby nabitých částic, které vedou k typickým proudům v magnetosféře. Především jde o prstenkový proud tekoucí kolem Země v rovině rovníku a proud magnetopauzy pod čelní rázovou vlnou, na noční straně pak o proud neutrální vrstvy a proud magnetického ohonu.

Část siločar zemského pole je přirozeným způsobem propojena s meziplanetárním magnetickým polem. Poslední uzavřené siločáry tvoří v polárních oblastech plochu, po které se do horních vrstev dostávají nabitě částice, které excitují atomy a molekuly atmosféry za vzniku aurorálního oválu polárních září. Problematiku polárních září podrobněji rozebírá druhá kapitola této knížky.

Velmi častý jev je přepojování magnetických siločar. Může k němu docházet na čelní rázové vlně, v oblastech polárních kaspů i v magnetickém ohonu. Na čelní rázové vlně a v oblasti kaspů dochází k přepojování siločar slunečního (meziplanetárního) magnetického pole se siločarami zemského pole. Podmínkou je, aby měly siločáry obou polí opačný směr. V magnetickém ohonu může dojít k přepojení siločar magnetického pole Země z obou stran neutrální vrstvy (plocha nulového pole v magnetickém ohonu).

Magnetosféru Země zkoumá celá flotila družic. O některých jsme se již zmínili. Zcela výjimečné jsou čtyři družice Cluster. Letí ve formaci čtyřstěnu, vzdálenost mezi nimi se podle polohy mění od 5 000 km po 20 000 km. Dráha družic je volena tak, aby procházela čelní rázovou vlnou, polárními kaspami i plazmosférou. Jde o první prostorové měření charakteristik magnetosféry. Tyto družice také poprvé přímo sledovaly přepojení (rekonekci) magnetických siločar.

Na výzkumu ionosféry a magnetosféry Země se podílely i malé československé a později české družice MAGION (*MAGnetosphere and IONosphere*), které konstruovali pracovníci Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd. Těchto družic bylo vypuštěno celkem pět, a to za pomoci ruských nosných raket. Na přístrojovém vybavení se podílely země bývalého východního bloku. Družice MAGION 5



Čtveřice družic Cluster zkoumá magnetosféru Země ve formaci čtyřstěnu

měla celkovou hmotnost 68,5 kg a její vnější rozměry za letu byly $1,7 \times 1,08$ m. Poslední vědecká data byla z družice MAGION 5 přijata v lednu 2002.

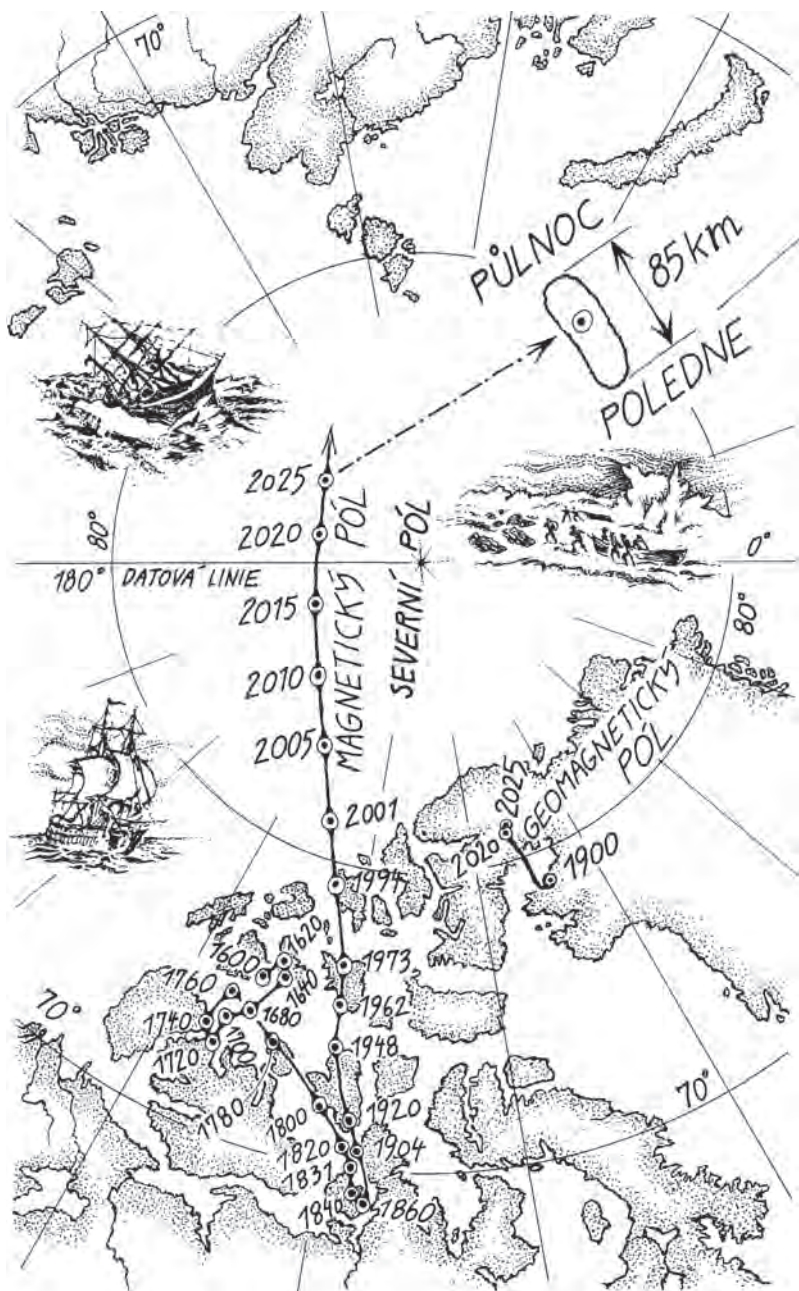
A jaké jsou charakteristiky magnetického pole Země? Na rovníku má hodnotu $31 \mu\text{T}$, tomu odpovídá magnetický dipólový moment $7,6 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$. Elektrický proud, který musí téct v nitru Země, aby takové pole vytvořil, má celkovou hodnotu 10^9 A. Dipólový moment postupně klesá, pro zajímavost v roce 1600 se jeho hodnota odhaduje na $9,36 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ a v roce 1800 na $8,61 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$. Od roku 1945 do roku 2021 poklesl magnetický dipólový moment Země o šest procent. Spekuluje se, že by tento pokles mohl souviset se současným pohybem magnetických pólů nebo být předzvěstí blížícího se přepólování. Úhel mezi magnetickou a rotační osou je $11,4^\circ$. Centrum magnetického dipólu není ve středu Země, ale 7,25 % (515 km) od středu ve směru $18,3^\circ$ severní šířky, $147,8^\circ$ východní délky; tato vzdálenost narůstá o 2,6 km za rok. Magnetický dipól Země mění v průběhu staletí jak svou polohu, tak směr.

Cesta zemských pólů

Magnetickým pólem nazýváme místo na povrchu Země, v němž siločáry míří kolmo k povrchu. Pak ještě zavádíme tzv. *geomagnetický pól* – jde o místo na povrchu Země, v němž povrch Země protíná osa dipólové složky magnetického pole. Pokud bychom pole Země co možná nejvěrněji nahradili tyčovým magnetem, jde o místo průsečíků jeho osy s povrchem Země. Oba póly jsou v současnosti od sebe dosti daleko, jak je patrné z obrázku na další straně. Situace je dále komplikována tím, že severní pól střelky kompasu ve skutečnosti míří k jižnímu pólu fyzického magnetu, takže by správně z hlediska fyziky měl být na severní polokouli jižní magnetický pól a na jižní polokouli severní. Historicky ale byl označen jako severní magnetický pól ten, kam míří severní část střelky kompasu. Severní magnetický pól je dle této definice na severu a jižní na jihu.

Představte si, že uspořádáte expedici k severnímu magnetickému pólu. Není to tak jednoduché jako expedice k severnímu světovému pólu. Pokud magnetický pól naleznete a zapíchnete na něm vlaječku, za hodinu už bude všechno jinak. Magnetický pól se bude nacházet přibližně 7 kilometrů od vlaječky. Jak je to možné? Magnetické póly se po povrchu Země pohybují a jejich poloha není stálá. Někdy hovoříme o krátkodobých, střednědobých a dlouhodobých variacích polohy pólů. Za krátkodobé variace označujeme změny polohy v rámci jediného dne. Poloha pólu se na povrchu Země pohybuje po nepravidelné elipse s velkou poloosou přes 40 kilometrů. Tyto denní variace jsou způsobeny interakcí rotující Země se slunečním větrem. Na grafice na následující stránce je elipsa s denní variací znázorněna na vloženém obrázku.

Napadne nás tedy, že naši vlaječku zapíchneme do středu elipsy. Ani to není řešením, protože se i tento střed pomalu přesouvá – hovoříme o tzv. střednědobé variaci. Přesun polohy pólu souvisí přímo s tekutinovým dynamem v nitru Země, které se prostě nechová jako pevně uchycený magnet. Pohyb magnetického pólu se dá vysledovat až do 16. století, přesná měření existují od poloviny 20. století. V průměru se v druhé polovině 20. století severní magnetický



pól přesouval (bez denní variace) přibližně o 10 kilometrů za rok. V devadesátých letech vzrostla jeho rychlost na 15 kilometrů za rok. V roce 2000 došlo ke změně a rychlost přesunu pólu se začala výrazně zvyšovat až na současných 55 kilometrů za rok. Pokud by tento trend pokračoval, jde o 5 500 kilometrů za století, což je 14 % obvodu Země. A kam si to magnetický pól na severní polokouli namířil? Z tradičního umístění v Kanadě, kde se nacházel po několik století, se vydal přes Aljašku směrem k ruské Sibiři. V říjnu 2017 překročil severní magnetický pól mezinárodní datovou linii (v doprovodné grafice jde o vodorovně vyznačený poledník) a ze západní polokoule se přesunul na východní. Stalo se tak 390 kilometrů od severního geografického pólu, v němž protíná povrch Země její rotační osa.

Z hlediska dlouhodobých variací magnetického pole je nejvýznamnější překlápění magnetického pole Země. K poslednímu „trvalému“ přepólování došlo před 780 000 lety. Odhaduje se, že samotný proces přepólování může trvat několik set (až tisíc) let. V jeho průběhu je Země obklopena magnetickým polem složitějšího než dipólového charakteru a dominuje kvadrupólový člen. Pole nadále chrání samotný povrch Země před většinou částic kosmického záření a slunečního větru. Pronikají ale hlouběji do atmosféry a mohou zlikvidovat ozónovou vrstvu. Dopad na biosféru tak nemusí být zanedbatelný a vášnivě se o něm v odborných kruzích diskutuje. Před zhruba 41 000 lety došlo ke krátkodobému přepólování – magnetické póly migrovaly asi 250 let a v opačné poloze setrvaly pouhých 440 roků. Podle záznamů v sedimentech a kmenech stromů dochovaných v bahně kleslo magnetické pole v onom období na pět procent předchozí hodnoty. Důkazy o tomto přepólování byly poprvé nalezeny v horninách nedaleko francouzského Laschamp, proto se někdy hovoří o *laschampské události*. Diskutuje se o tom, zda by událost nemohla souviset s vymíráním některých živočišných druhů v tomto období. Přibližně před 40 000 lety vyhynuli neandrtálci, v Austrálii vymizela zvířata větší než klokani, probudil se evropský vulkán Flegrejská pole v blízkosti Neapole a dokonce došlo k výraznějším klimatickým změnám. Pro nejrůznější spekulace, co s čím by mohlo souviset, je tedy cesta otevřená.

Van Allenovy pásy

Éra kosmonautiky začala v roce 1957, kdy Sověti vypustili na oběžnou dráhu první umělou družici – Sputnik 1. Na americké straně horečně probíhaly přípravy vypuštění první americké družice, Exploreru 1. Vůdčí osobností amerického dobývání vesmíru v období studené války byl James Van Allen, americký vědec, který nejprve vystudoval obor pevných látek, doktorát dělal z jaderné fyziky, ale profesně se nakonec věnoval kosmickému záření a nastupující kosmonautice. Právě on prosadil, aby se na první americké družice Explorer 1 a 3 umístily čítače ionizujícího záření. Proto byl hned při prvním letu americké družice objeven vnitřní radiační pás – toroidální oblast pronikavého záření nabitých částic zachycených magnetickým polem Země. Druhý pás byl objeven během jinak neúspěšné mise Pioneeru 3 a nezávisle sovětskou Lunou 1. Dnes se oběma těmito radiačním oblastem říká Van Allenovy radiační pásy.

Pásy jsou tvořeny nabitými částicemi slunečního větru a kosmického záření (elektrony, protony a ionty O^+ , He^+) zachycenými magnetickým polem Země ve vzdálenosti 1,2 až 7 poloměrů Země. V polárních oblastech se odrážejí efektem magnetického zrcadla. Vnější pás je složený především z elektronů, vnitřní obsahuje kromě elektronů i hmotnější částice, zejména protony s vysokou energií. Energie částic je od 1 keV do 100 MeV. Nejenergetičtější elektrony se nazývají zabíjäcké elektrony (*killer electrones*) a mechanismus jejich vzniku není zcela jasný. Oba pásy jsou mimořádným nebezpečím jak pro kosmické sondy, tak pro člověka.

Magnetické pole Země není dokonale symetrické. Nejslabší je v oblasti Atlantického oceánu mezi pobřežími Jižní Ameriky a Afriky. V této oblasti se vnitřní radiační pás přibližuje k Zemi na pouhých 200 kilometrů, jde proto o oblast zvýšené radiace, které se říká jihoatlantická anomálie (SAA, *South Atlantic Anomaly*). Je nebezpečím pro družice na nízkých oběžných drahách. Mezinárodní kosmická stanice má kvůli SAA dodatečné stínění, Hubblův dalekohled při průletech SAA nepozoruje. NASA zaznamenala výpadky laptopů při průletech raketoplánů touto oblastí a je pravděpodobné, že za

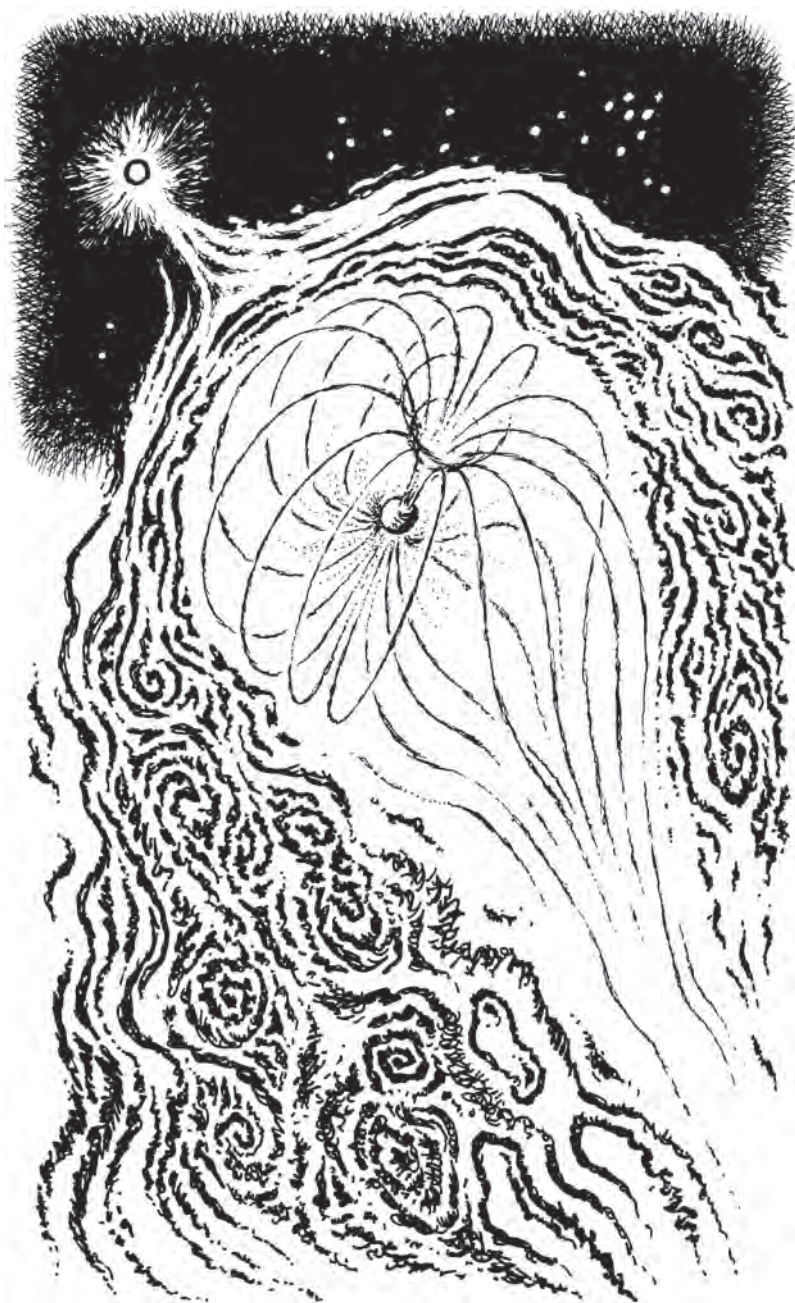
zničení japonské rentgenové družice Hitomi byl v roce 2016 odpovědný právě průlet jihoatlantickou anomálií. Mapu s vyobrazením polohy anomálie naleznete na obr. 4 barevné přílohy.

V roce 2012 startovala dvojice amerických sond určená výhradně k výzkumu Van Allenových radiačních pásů. Sondy měly před startem označení RBSP (*Radiation Belt Storm Probes, Sondy k výzkumu bouří v radiačních pásích*). Po úspěšném startu dne 30. srpna 2012 byly přejmenovány na Van Allenovy sondy (ve skutečnosti jde o družice). První úspěch se dostavil hned 2. září 2012. Satelity sledovaly neobvyklou dynamiku Van Allenových pásů a na dobu delší než měsíc se mezi oběma pásy objevil třetí ostře ohraničený torus nabitých částic (viz obr. 5 barevné přílohy). V novém pásu byly detekovány elektrony s energií vyšší než 2 MeV a pás se nacházel ve vzdálenosti mezi 3 až 3,5 zemskými poloměry od středu Země. Zdá se, že struktura Van Allenových pásů je mnohem komplikovanější, než se očekávalo, a že zde probíhá řada dosud neprozkoumaných procesů.

Víry na bocích magnetosféry Země

Sluneční vítr obtéká magnetosféry planet – klouže po čelní rázové vlně do boků a obtéká pláště magnetosféry. Jedině v polárních oblastech mohou nabitě částice pronikat do horních vrstev atmosféry. Obdobným jevem ve větším měřítku je obtékání částic mezihvězdného větru a kosmického záření na bocích heliosféry. Částice narážejí na čelní rázovou vlnu heliosféry a sklouzávají do boků. Množství kosmického záření a mezihvězdného větru, které pronikne do vnitřních částí Sluneční soustavy je výrazně závislé na sluneční činnosti. Někteří vědci dokonce předpokládají, že střídání dob ledových a meziledových souvisí s dlouhodobými změnami sluneční aktivity a množstvím částic, které do zemské atmosféry pronikne z mezihvězdného prostředí.

Sluneční vítr dokáže rozvlnit boky magnetosféry podobně, jako obyčejný vítr rozvlní hladinu rybníka. Dokonce se vlní i siločáry zemského magnetického pole obdobně jako kmitající struny kytary na velmi zpomaleném záběru. Když prudce fouká vítr nad rybníkem,



může na hladině vytvořit charakteristické víry. Jev je způsoben Kelvinovou-Helmholtzovou nestabilitou. Na hranici magnetosféry vznikají díky stejné nestabilitě obří víry o velikosti 40 000 km až 55 000 km. V těchto vírech se mísí plazma slunečního větru s plazmatem magnetosféry. Při tomto mísení se siločáry meziplanetárního pole, které jsou přinášeny slunečním větrem, dostávají tu a tam do protisměru se siločarami magnetosféry. V takové situaci dochází k přepojení siločar a průniku částic slunečního větru do vnitřní magnetosféry. Víry objevila čtveřice evropských družic Cluster, která jimi poprvé prolétla v roce 2001. Ke zpracování záznamu a k publikaci došlo až v roce 2004. Několikaleté zpoždění mezi pořízením dat a zpracováním je u velkých projektů zcela běžnou záležitostí.

Mars

Poslední z planet zemského typu je Mars se svými dvěma magneticky neaktivními měsíci Phobosem a Deimosem. Mars je výrazně menší než Venuše a Země: poloměr má jen 3 400 kilometrů. To je pravděpodobně důvod, proč si neudržel rozsáhlejší atmosféru; její zbytky dnes tvoří oxid uhličitý a malé množství vody. Oba plyny sezónně zamrzají do polárních čepiček, které jsou tvořeny zejména pevným oxidem uhličitým a jen z menší části vodním ledem. Také tloušťka námrazy je značně rozdílná – zatímco polární ledovec v Antarktidě dosahuje tloušťky několika kilometrů, maximální tloušťka polárních čepiček na Marsu dosahuje pouze několika metrů, na okrajích pouze několika centimetrů. Střední hustota Marsu je poměrně nízká, pouhých $3,9 \text{ g/cm}^3$. Mars má v současnosti pevné jádro a – stejně jako Venuše – nemá vlastní magnetické pole. Sonda *Mars Global Surveyor* nicméně detekovala zbytkové magnetické pole v povrchových horninách, které svědčí o tom, že Mars kdysi magnetické pole měl, pravděpodobně dipólového charakteru. Magnetické pole hornin na Marsu jeví výraznou orientaci (viz obr. 8 v barevné příloze). Magnetické pole bylo zjištěno dokonce i v meteoroitech, o kterých se domníváme, že pocházejí z Marsu. Odhaduje se, že v dávné minulosti mohl mít Mars magnetické dipólové pole s momentem rovným 10 % dnešního dipólového momentu Země.

Mars má, obdobně jako Venuše, indukovanou pseudomagnetosféru. Ta je ale méně výrazná než u Venuše. Přesto se podařilo detekovat ve vzdálenosti 1,5 poloměru Marsu (ve směru ke Slunci) slabou rázovou vlnu a v prostoru za Marsem (směrem od Slunce) brázdu v meziplanetárním poli, ve které byly nalezeny ionty O^+ strhávané z atmosféry Marsu slunečním větrem. Do této brázdy může vnikat (podobně jako u Venuše) meziplanetární magnetické pole a vytvořit magnetický pseudoohon.

Za dobrých pozorovacích podmínek můžeme na povrchu Marsu již malým dalekohledem sledovat i světlejší a tmavší skvrny – tzv. *albedové útvary*, díky nimž byla již prvními pozorovateli určena velmi přesně doba rotace planety. Někdy lze takto pozorovat i obrovské prachové bouře. Povrch Marsu tvoří kamenitá poušť, průměrná teplota na povrchu je kolem $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální teploty mohou krátkodobě překročit $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, minimální naopak klesají k $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na povrchu planety se dnes nenachází voda v tekutém stavu, výjimkou jsou snad jen extrémně malé oblasti na dnech některých kráterů. Kvůli nízké teplotě a malému atmosférickému tlaku, stokrát nižšímu než na Zemi, se voda na povrchu nachází pouze ve formě ledu, v atmosféře ve formě páry. Pod povrchem Marsu se však ještě stále pravděpodobně skrývá nezanedbatelné množství kapalné vody, pozůstatek řek, moří a možná i oceánů, které se na planetě rozlévaly před 3,5 miliardami let. Malá gravitace (průměr Marsu je ve srovnání se Zemí poloviční) nebyla schopna atmosféru udržet, a tak planeta o svou atmosféru záhy přišla, a tím se urychlilo i odpařování vody z povrchu.

Marsovské záře

Polární záře nám ve Sluneční soustavě už dávno zdomácněly a nikoho nepřekvapí rozzářený aurorální ovál na Zemi či na oběžných planetách. Nicméně na Marsu polární záře nikdo nečekal. Atmosféra je velmi řídká a Mars nemá magnetické pole, které by stahovalo nabitě částice slunečního větru do polárních oblastí. Přesto byly na Marsu objeveny hned tři typy polárních září. První se nazývají *difúzní* a souvisí s indukovaným magnetickým polem, které vzniká

při obtékání slabě ionizované atmosféry slunečním větrem. V indukovaném poli nabité částice krouží a excitují atmosféru ve výšce přibližně 70 kilometrů nad povrchem Marsu. Tyto záře objevila americká sonda *MAVEN*, která je od roku 2014 na oběžné dráze Marsu a sleduje děje v jeho atmosféře. Obdobné polární záře existují i na Venuši. Druhý typ polárních září souvisí se zbytkovým magnetickým polem v povrchových horninách na Marsu. Na rozhraní otevřených a uzavřených siločar zbytkového pole se objevují ve výšce 140 km nad povrchem *diskrétní* polární záře. Objevila je evropská sonda *Mars Express*, která krouží kolem Marsu od roku 2003. Posledním typem jsou velmi atypické protonové záře objevené sondou *MAVEN* v roce 2016. Protony slunečního větru jsou u Země odkláněny magnetickým polem a navíc je pro ně ionosféra neproniknutelnou vodivou překážkou. Na Marsu je ale vše jinak. V ionosféře se energetické protony spojí s elektrony a vytvoří neutrální vodík s vysokou energií. Buď zachytí volný elektron, nebo „seberou“ elektron neutrálnímu vodíku z atmosféry (tomuto procesu se říká nábojová výměna). V obou případech vznikne neutrální vodík s vysokou energií, který elektricky nereaguje a proniká hluboko do atmosféry, kde ji excituje a ionizuje. Excitované atomy potom při deexcitaci vytvářejí protonovou záři. Jak je vidět, polární záře mohou mít více podob.

Výzkum Marsu

Až do poloviny 20. století byli mnozí lidé přesvědčeni, že na Marsu existuje život; snad proto je Mars nejnavštěvovanější planetou Sluneční soustavy. K Marsu bylo dosud vysláno přes 40 sond, aktuálně (2021) je na oběžné dráze 18 sond a z nich 8 aktivních. První snímky povrchu pořídil americký *Mariner 4* v roce 1965. V následujícím desetiletí Mars podrobně zkoumaly americké sondy *Mariner* a sovětské sondy *Mars*. V roce 1975 přiletěly k Marsu dvě americké sondy *Viking*. Oba Vikingy měly přistávací moduly, které po úspěšném dosednutí na povrch zkoumaly atmosféru Marsu a hledaly stopy života na povrchu (žádné prokazatelné formy života ovšem nenalezly). V roce 1996 přilétla k Marsu sonda *Mars Pathfinder*, která na povrch dopravila první malé vozítko *Sojourner*. Od roku

1997 do roku 2006 prováděla z oběžné dráhy detailní snímkování výkonná sonda *Mars Global Surveyor*. Japonský pokus z roku 1998 o navedení sondy *Nozomi* na oběžnou dráhu Marsu byl neúspěšný. Od roku 2003 monitoruje Mars z oběžné dráhy evropská sonda *Mars Express*; přistávací modul byl při přistávání ztracen.

Následujícího roku dopravila americká mise *Mars Exploration Rover* na Mars dvě výzkumná vozítka *Spirit* a *Opportunity*. Obě dvě podrobně zkoumala povrch Marsu včetně výzkumu povrchových hornin. Spirit mj. zkoumal skálu v kráteru *Gusev*, kde našel silně magnetické minerály, zejména oxid železa Fe_3O_4 neboli magnetit. Zajímavý je také vědecký „úlovek“ druhého vozítka, Opportunity: v blízkosti roviny *Meridiani Planum*, kde přistálo, objevilo železný meteorit. Jedná se o první meteorit, který byl nalezen na jiném vesmírném tělese, než je naše Země. Vozítko Spirit zapadlo na konci roku 2009 do písečné pasti, bohužel pod takovým úhlem, že nebylo možné dobít jeho baterii a v roce 2010 bylo definitivně ztraceno spojení. Rover Spirit fungoval od roku 2004 do roku 2010, přesně

planeta	pole na rovníku (μT)	dipólový moment ($\text{T}\cdot\text{m}^3$)	vybočení dipólu (%)	sklon osy ($^\circ$)
Merkur	0,33	6×10^{12}	není známo	10
Venuše	0	0	—	—
Země	31	8×10^{15}	7	11
Mars	0	0	—	—
Jupiter	430	160×10^{18}	13	10
Saturn	21	5×10^{18}	5	< 1
Uran	23	$0,4\times 10^{18}$	30	59
Neptun	14	$0,2\times 10^{18}$	55	47

Tabulka se základními charakteristikami dipólového pole planet. Sklon osy dipólu je uváděn vzhledem k rotační ose, vybočení je uvedeno vzhledem ke středu planety.

6 let a 77 dní. Opportunity monitorovala povrch Marsu až do roku 2018, kdy její činnost ukončila prachová bouře. Vozítko Opportunity fungovalo od roku 2004 do roku 2018, přesně 14 let a 136 dní.

Nástupci Spirit a Opportunity se stala další dvě vozítka: od roku 2012 brázdí povrch Marsu *Curiosity*, jde doslova o pojízdnou vědeckou laboratoř (*Mars Science Laboratory*), která je pětikrát těžší než předchozí stroje a má na palubě desetkrát více přístrojů. Poslední vozítko, které je hitem současné techniky, přistálo v rámci mise Mars dne 18. února 2021. Jeho jméno je *Perseverance* a jeho cena se odhaduje na téměř tři miliardy dolarů. Povrch Marsu zkoumá i pomocí dronu vypouštěného do okolí. Spojení s nejnovějším přírůstkem zajišťuje sonda *Mars Reconnaissance Orbiter*, která je na oběžné dráze Marsu od roku 2006. Marsovská vozítka si můžete prohlédnout na obr. 10 barevné přílohy.

Jak je patrné, všechny sondy zkoumající Mars není možné ani vyjmenovat. Mars je středem mimořádného zájmu vesmírných agentur a nejenom té americké a evropské. Indii se podařilo na oběžnou dráhu dopravit sondu *Mangalyaan* v roce 2013. Mise byla původně plánována na tři měsíce, sonda ale komunikovala přes šest let. Spojené arabské emiráty umístily 19. července 2020 na oběžnou dráhu Marsu sondu *Hope*. Čína má od roku 2021 na oběžné dráze sondu *Tchien-wen-1*, která má na palubě vozítko, jehož přistání je plánováno na květen 2021. Mars se stal jakýmsi „Hlavním kosmickým nádražím“ ve Sluneční soustavě. Tato knížka ale není o kosmonautice a tak nám nezbyvá než početnou flotilu kosmických lodí a vozítek na Marsu opustit.

Magnetická pole planet

Každá z terestrických planet se chová v magnetickém poli Slunce a ve slunečním větru jiným způsobem. Merkur nemá atmosféru, má ale vlastní pole a tím i přirozenou magnetosféru. Venuše nemá vlastní pole, má však atmosféru, a proto vytváří kolem sebe indukovanou pseudomagnetosféru. Země má atmosféru i magnetické pole a z terestrických planet má nejrozsáhlejší magnetosféru, která

v kombinaci s atmosférou umožňuje vznik krásných polárních září. Mars v současnosti magnetické pole nemá, dříve ho však prokazatelně měl. Za pomoci slabé atmosféry vytváří nevýraznou indukovanou pseudomagnetosféru. U obřích planet – Jupiteru, Saturnu, Uranu a Neptunu – jsou magnetická pole samozřejmostí a detailně se s nimi seznámíme v příští kapitole.

Víte, že?

- Víte, že kvůli současnému rychlému pohybu severního magnetického pólu musel být změněn světový magnetický model? Model WMM (*World Magnetic Model*) se využívá pro veškerou leteckou, podvodní i další navigaci. V roce 2020 byla vydána nová verze zohledňující změnu pohybu pólů.
- Víte, že v Ústavu atmosféry Akademie věd České republiky modelují magnetosféru Merkuru? Na základě dat ze sondy MESSENGER se v oddělení vedeném Dr. Pavlem Trávníčkem provádějí simulace na superpočítači Amálka, které poskytují realistický model magnetosféry Merkuru.
- Víte, že siločáry zemského magnetického pole nejsou statické? Zemské magnetické pole rychle reaguje na aktuální stav slunečního větru, mění se rozměry magnetosféry, a siločáry vykonávají periodický kmitavý pohyb podobný kmitům kytarových strun.
- Víte, že při průletu jihoatlantickou anomálií jsou na Mezinárodní kosmické stanici striktně zakázány výstupy do volného prostoru? I přes dodatečné stínění kosmonauti při průletu touto oblastí vnímají záblesky způsobené energetickými částicemi.

Poučení na závěr: Pokud se chcete trvale usadit mimo Českou republiku, nejezděte do jižního Atlantiku. Jihoatlantická anomálie rozhodně nebude pro neadaptovaného středoevropana tím nejlepším místem pro život.





8. Obří planety

*„Za svůj dlouhý život jsem pochopil jedno:
ve srovnání s objektivní realitou je naše věda dětinská a prostá,
ale přece je tím nejlepším, co vůbec máme.“*

Albert Einstein

Obí planety jsou plynokapalné koule s obtížně definovatelným povrchem a rychlou vlastní rotací. Jupiter a Saturn jsou největší planety Sluneční soustavy a tlak v jejich nitru by měl vodík přeměnit na tekutý kov. Kovový vodík je natolik zájímavá forma látky, že se s ní seznámíme ještě dříve, než se vydáme na pouť za magnetickými poli obřích planet. Všechny obří planety tvoří ideální tekutinová dynama generující velmi silná magnetická pole. Rozsáhlé magnetosféry interagují nejen se slunečním větrem, ale i s prstenci a početnými rodinami měsíců, které všechny obří planety mají. Relativně dobře známe magnetosféry Jupiteru a Saturnu. U planet Uran a Neptun se naše představy opírají o jediný průlet sondy Voyager 2 kolem těchto těles, proto vlastnosti jejich magnetosfér známe jen rámcově.

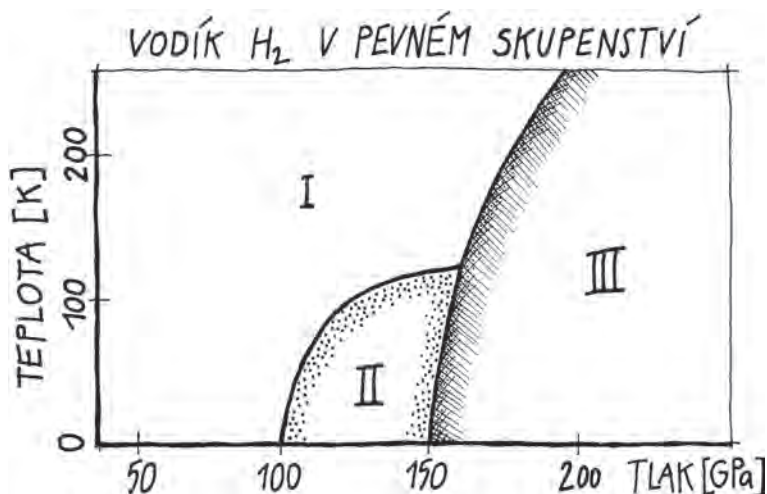
Kovový vodík

Za normální situace mají elektrony v atomárních obalech prvků *diskrétní spektrum*, tj. jejich energie může nabývat jen některých hodnot. Při přechodech mezi jednotlivými energetickými hladinami musí elektron buď absorbovat, nebo vyzářit energetické kvantum v podobě fotonu. Pokud se elektrony nachází v soustavě, kde je mnoho velmi blízkých atomů, jejich možné energetické hladiny se rozmazávají a vznikají tzv. energetické pásy dovolených a zakázaných energií. U pevných látek jsou velmi důležité tři pásy. Pro kovy je nejdůležitější *vodivostní pás*. Je to interval energií, při kterých nejsou elektrony vázány ke konkrétním jádrům a mohou

se pohybovat v látce volně. Nad vodivostním pásem bývá pás zakázaných energií, tedy energií, které elektrony mít nemohou. Tomuto pásu se říká *zakázaný pás*. Nad zakázaným pásem je pás elektronů s nejvyššími možnými energiemi základního stavu, tzv. *valenční pás*. Situace je znázorněna na obrázku na straně 198. Ve vodičích zakázaný pás buď zcela chybí (vodivostní pás splyne s valenčním), nebo je tak úzký, že ho elektrony snadno překonají díky svým tepelným fluktuacím. Naopak v izolantech je zakázaný pás natolik široký (více než 3 elektronvolty), že se valenční elektrony nemohou dostat do vodivostního pásu. V polovodičích je valenční pás zcela nebo téměř zaplněn elektrony a zakázaný pás je tak úzký (~ 1 eV), že se elektrony pomocí vnějšího popudu (světlo, teplo, elektrické pole) mohou dostat do vodivostního pásu a vést proud.

Vodík se v Mendělejevově periodické tabulce nachází ve sloupci tzv. alkalických kovů. Přesto je za normálních podmínek, na rozdíl od ostatních kovů, izolantem. V pevném skupenství je vodík krystalickým souborem slabě interagujících izolovaných molekul H_2 a byl připraven v laboratořích. Všechny elektrony jsou vázány ke svým molekulám, valenční pás je zcela zaplněný a od vodivostního pásu je oddělený zakázaným pásem o šířce větší než 13 eV. Proto je pevný vodík izolantem. V pevném stavu se vodík vyskytuje ve třech fázích. Fáze I je charakteristická volnou rotací molekul vodíku. Při teplotách nižších než 100 K a tlacích vyšších než 100 GPa přechází vodík do fáze II, ve které jsou molekuly již zamrzlé a nemohou rotovat. Za tlaků vyšších než 150 GPa vzniká fáze III, která je schopná absorbovat infračervené záření, což se dává do souvislosti s vznikem elektrického dipólového momentu u molekul vodíku, tedy s nerovnoměrným rozdělením náboje; oba elektrony se tak vyskytují s vyšší pravděpodobností jen u jednoho z protonů.

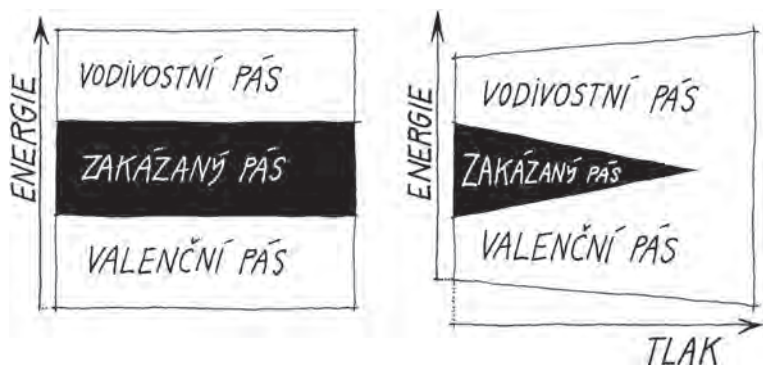
S rostoucím tlakem by se měl podle teorie zakázaný pás zmenšovat a po jeho zániku by se měl pevný vodík stát kovem. Existenci vodíku v kovovém stavu předpověděli v roce 1935 Eugen Paul Wigner (1902–1995) spolu s Hillardem Huntingtonem v Princetonu. Podle jejich teorie by se molekulární vodík měl stát kovem za tlaku 25 GPa. Přestože se o přípravu kovového vodíku v pevném stavu pokoušela



řada předních světových pracovišť, nikdy se to nikomu nepodařilo ani při tlaku kolem sta gigapascalů. Je možné, že při vysokých tlacích vznikají vodíkové molekuly s elektrickým dipólovým momentem a tento fakt působí proti očekávanému zmenšování zakázaného pásu. V roce 2016 oznámil tým Ranga Diase a Isaaca Silvery z Harvardovy univerzity syntézu pevného kovového vodíku za tlaku 495 GPa. V roce 2019 oznámili obdobný výsledek Francouzi (tlak 425 GPa). Oba experimenty jsou ale zpochybňovány. Vysoký tlak se získává v tzv. diamantové kováčce, kde je mikrometrový vzorek vodíku stlačován mezi dvěma diamantovými nástavci.

A přitom by kovový vodík v pevném stavu měl mít za pokojové teploty velmi zajímavé vlastnosti – například by měl být supravodivý a měl by být stabilní, pevný a lehký, takže by šel využít jako vynikající konstrukční materiál.

Jiná je ovšem situace s kapalným vodíkem. Ten poprvé připravil v roce 1898 James Dewar (1842–1923). Při ochlazení pod teplotu 20,4 K se vodík přeměnil na čirou kapalinu podobnou zkapalněným dvouatomárním halogenidům ze VII. skupiny periodické tabulky a v ničem nepřipomínal jednoatomární alkalické kovy I. skupiny. V roce 1996 připravili Samuel Weir, Arthur Mitchell



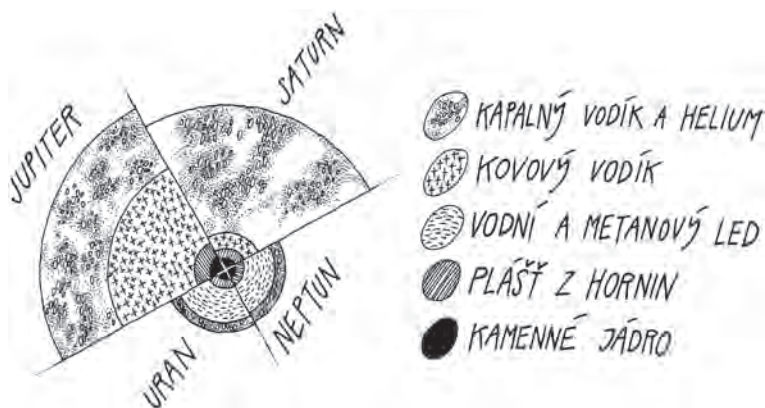
a William Nellis z Lawrenceovy národní laboratoře v americkém Livermoru (LLNL) za tlaku 140 GPa a teploty 3 000 K kapalný kovový vodík. Takových podmínek dosáhli za pomoci rázové vlny vytvořené plynovým dělem, která působila na vzorek o rozměrech několika centimetrů. Pravda, kovová fáze existovala pouhých sto nanosekund, ale první krok byl učiněn. Objev byl překvapením, kovové vlastnosti kapalného vodíku za podstatně nižších tlaků, než byly prozkoumány u pevné fáze, nikdo nečekal. Autoři experimentu zjistili, že šířka zakázaného pásu poklesla na 0,3 eV, což je srovnatelné s tepelným šumem. V takové situaci se elektrony stávají součástí vodivostního pásu a začnou se volně pohybovat materiálem. V roce 2011 byl kapalný kovový vodík připraven v Institutu Maxe Plancka za pokojové teploty a tlaku 260 až 300 GPa. Kapalný kovový vodík se chová velmi podobně jako kapalně kovové cesium či rubidium. Zdá se, že kapalný molekulární vodík za vysokého tlaku projde fázovým přechodem, kdy se vytvoří elektronový plyn s kvantovými vlastnostmi a molekulární ionty H_3^+ , H_2^+ .

Kovový vodík by měl být základním materiálem hnědých trpaslíků, malých hvězd, u kterých teplota v nitru nedosáhne hodnoty nutné pro zažehnutí účinné termojaderné syntézy. Je také přítomen pod povrchem velkých extrasolárních planet, kde enormní tlaky způsobí přechod molekulárního vodíku do kovového stavu s volnými elektrony. Ve Sluneční soustavě se předpokládá existence kapalného kovového vodíku v nitru Jupiteru a Saturnu, kde je jeho proudění zodpovědné za vysoké hodnoty magnetických dipólových momentů.

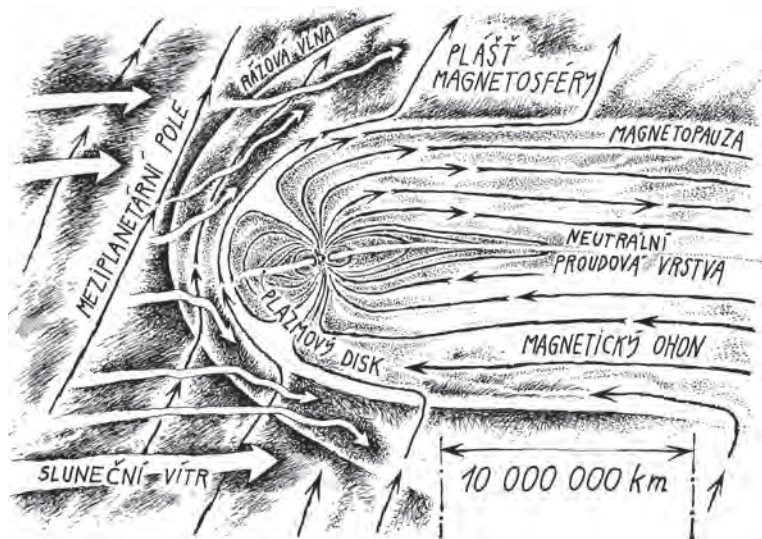
Jupiter

Magnetosféra Jupiteru je fenomén, který nemá ve Sluneční soustavě obdoby. Především se vymyká svou enormní velikostí. Ve směru ke Slunci (denní, návětrná strana) dosahuje magnetosféra až do devadesátinásobku poloměru planety. Ve směru od Slunce (noční strana) se táhne rozsáhlý magnetický ohon až k oběžné dráze Saturnu, tedy do vzdálenosti pěti astronomických jednotek! Magnetosféra je tak obrovská, že by se do ní vešlo Slunce i s korónou (viz obr. na str. 207). Lineární rozměry magnetosféry jsou stokrát větší než rozměry magnetosféry Země, objem je větší dokonce milionkrát. Magnetický moment Jupiteru je 20 000krát silnější než pozemský.

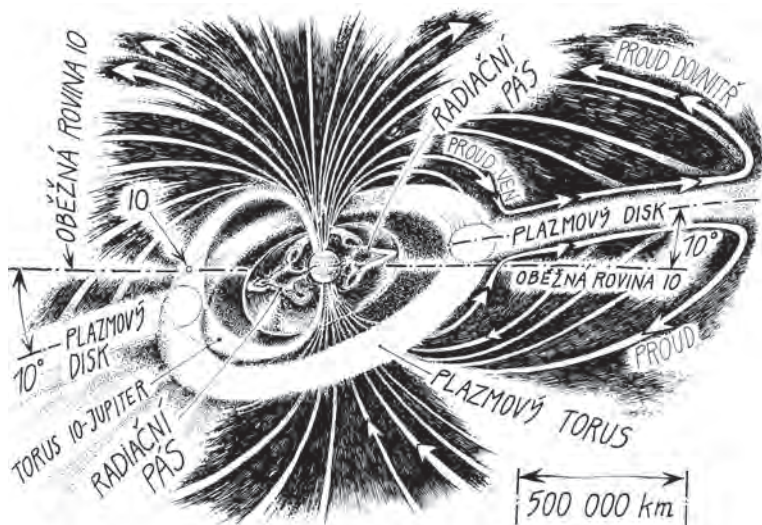
Kde hledat příčiny vzniku tak extrémně veliké magnetosféry? Samozřejmě v mimořádně velikém magnetickém momentu planety. Jupiter je největší planetou Sluneční soustavy (má průměr 143 760 km) a přitom se otočí kolem své rotační osy za nejkratší dobu (9 hodin a 55 minut). Rychlost přesunu mas pod povrchem planety je proto největší ve Sluneční soustavě. Gravitační tlak způsobuje, že vodík je v hloubce pod 0,75 poloměru planety v kovovém stavu. Rozsáhlé



Vnitřní struktura obřích planet. Pouze Jupiter a Saturn mají dostatečný tlak na vytvoření tekuté vrstvy z kovového vodíku. Detailní struktura vnitřků obřích planet není známa. Z posledních měření sondy Juno se například zdá, že by jádro Jupiteru mohlo být mnohem větší, než doposud předpokládáme, a navíc nehomogenní, s oblastmi zaplněnými tekutým kovem.



Celkový pohled na magnetosféru Jupiteru. Pole dipólu je značně deformováno.



Struktura vnitřní části magnetosféry planety Jupiter. Dominují zde radiční pásy, plazmový torus měsíce Io a plazmový disk.

rotující oblasti tekutého kovového vodíku dávají vzniknout dipólovému momentu $160 \times 10^{18} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ a poli na rovníku $430 \text{ } \mu\text{T}$. Základní představu o Jupiterově magnetosféře nám umožnily již sondy Voyager a sonda Galileo (u Jupiteru manévrovala od roku 1995 do roku 2003). Podrobnější údaje o magnetickém poli jsme ale získali až při průletu sondy New Horizons kolem Jupiteru (2007) a ze sondy Juno, která byla zaparkována na polární oběžné dráze kolem Jupiteru v roce 2016. Z numerických simulací prováděných skupinou Johannea Wichta z göttingenského *Institutu Maxe Plancka pro výzkum Sluneční soustavy* plyne, že struktura polí je konzistentní s tím, že by Jupiter nemusel mít jako zdroj pole jen centrální tekutinové dynamo, ale ještě jedno slabší dynamo v rovníkové oblasti v přechodové vrstvě mezi kovem a nekovem.

Jak vypadá struktura magnetosféry Jupiteru? Nejde o pouhou zvětšeninu zemské magnetosféry, jak by se na první pohled zdálo, i když některé prvky jsou samozřejmě podobné. Čelní rázová vlna na denní straně a magnetický ohon na noční straně udávají základní tvar magnetosféry. Stejně tak najdeme v magnetosféře Jupiteru polární kasy (nálevkovité oblasti, kterými mohou vnikat nabitě částice) a v těsné blízkosti planety radiační pásy složené ze zachycených nabitých částic. Samozřejmostí jsou i tekoucí proudy a časté polární záře. Některé prvky této magnetosféry jsou však zcela ojedinělé:

- soptící měsíc Io vytváří kolem Jupiteru plazmový torus,
- magnetosféra je zvláštním způsobem zploštěná a plazma v ní obsažené je stlačeno do tvaru disku v rovníkové oblasti,
- radiační pásy jsou velmi dynamické a reagují na vulkanickou činnost měsíce Io,
- měsíc Ganymed má vlastní magnetické pole, které je vnořené do magnetosféry Jupiteru,
- v polárních zářích se objevují zhuštění způsobené narušením pole velkými měsíci. Podívejme se na tyto rysy podrobněji.

Vliv měsíce Io. Měsíc Io (čti ijo) má výraznou vulkanickou činnost, která byla objevena již v roce 1979 sondou Voyager 1. Řada činných vulkánů obohacuje atmosféru Io o velké množství sodíku a síry. Měsíc na své dráze kolem Jupiteru prochází oblastmi nabitých částic z vnější části radiačních pásů planety. Interakce těchto částic s atmosférou měsíce Io způsobuje uvolňování částic atmosféry do volného prostoru – jde o velmi intenzivní úbytek materiálu atmosféry. Tyto částice (převážně atomy síry) jsou ionizovány ultrafialovým zářením Slunce. K ionizaci ale dochází i nárazem při styku s částicemi radiačního pásu a nábojovou výměnou. Rychle rotující magnetické pole Jupiteru potom tyto ionty zachytí a působí na ně indukovaným elektrickým polem, které je roztočí na oběžné dráze kolem planety. Tak vzniká výrazný *plazmový torus* obíhající planetu ve vzdálenosti oběžné dráhy měsíce Io. Torus je ale formován v rovině magnetického rovníku, nikoli v rovině oběžné dráhy mateřského měsíce Io, a je proto skloněn k rovině dráhy měsíce Io o 10° . Část elektrických proudů tekoucích podél siločar magnetického pole (tzv. Birke-landových proudů) Jupiteru se uzavírá přes Io. Měsíc se pohybuje vůči okolnímu plazmatu rychlostí 57 km/s a magnetické pole Jupiteru je v místě jeho oběžné dráhy 2 μT . Tomu odpovídá generované napětí na průměru měsíce (součin průměru, rychlosti a magnetického pole) 1 MV. Elektrický proud procházející měsícem má velikost řádově ve stovkách megaampérů. Detektor energetických částic na sondě Galileo našel tok elektronů přímo. Absorbovaný ohmický výkon je zhruba 1 000 GW a spolu se slapovými silami zahřívá nitro měsíce, ve kterém napomáhá udržovat sopečnou činnost. Fotografie tekoucí lávy na měsíci Io naleznete na obr. 14 v barevné příloze.

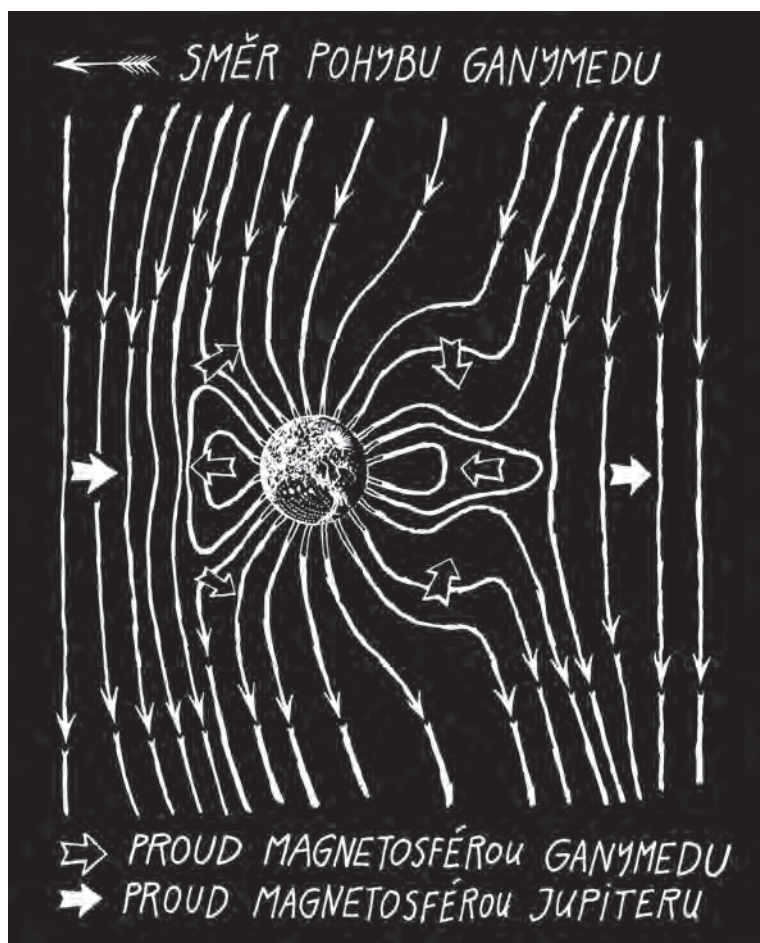
Zploštění magnetosféry. Existence nabitých částic rychle obíhajících planetu v toru deformuje dipólové pole. Pole je stlačeno v polárním směru a roztazeno ve směru rovníkovém. Průběh siločar se tak značně liší od klasického dipólu a plazma držené tímto polem je stlačeno do *rovníkového disku*.

Dynamické radiační pásy. Radiační pásy velmi rychle reagují na sopečnou činnost měsíce Io, která do nich přináší velké množství ionizované síry. Záření radiačních pásů je velmi intenzivní

a bylo objeveno již v roce 1955 americkými astronomy Bernardem Burkem (1928–2018) a Kennethem Franklinem (1923–2007). Tyto rádiové vlny z Jupiteru jsou poselstvím o silném magnetickém poli planety. Rozsah přijímaných frekvencí na zemském povrchu je 15 až 38 MHz. Nižší frekvence jsou tlumeny (popřípadě odraženy) ionosférou Země, u vyšších frekvencí se intenzita záření rychle snižuje. Vlnová délka odpovídající této frekvenci je 8 až 20 m. Rádiové vlny detekované z Jupiteru se rozdělují do sedmi různých typů (modů) podle natočení rovníku Jupiteru k Zemi a polohy měsíce Io. Liší se rozsahem frekvence a polarizací. NASA nabízí pro detekci rádiových vln z Jupiteru stavebnici pod názvem „radio Jove“. Rádiové vlny z Jupiteru si může poslechnout každý, kdo je ochoten investovat přibližně 6 000 Kč. Radiační pásy Jupiteru slouží jako referenční zdroj signálu pro některé sondy. Příkladem může být sonda Planck (2009–2013) určená pro sledování reliktního záření, jejíž přístroje byly pomocí tohoto signálu kalibrovány.

Europa. Měsíc Europa má indukovaný proměnný magnetický dipólový moment, který objevila sonda Galileo v roce 1996. Charakter měřených změn magnetického pole v blízkosti Europy odpovídá existenci vodivé a tekuté podpovrchové vrstvy, například podpovrchového oceánu slané vody. Jupiterovo magnetické pole se kvůli sklonu magnetické osy vůči ose rotační v místě Europy mění s periodou 11,2 hodiny a vyvolává ve vodivé vrstvě elektrické proudy, které generují pole Europy. Jde o proměnný dipólový moment s maximální hodnotou pole 120 nT v oblasti pólů. Typickým projevem existence pole jsou detekované hvězdy. Jde o nízkofrekvenční elektromagnetické záření vznikající šroubovitým pohybem elektronů po magnetických siločarách od jednoho pólu Europy k druhému. Záření je úzce směřováno podél siločar pole a frekvence se snižuje s délkou dráhy, kterou elektron urazí. Hvězdy vznikají i v magnetosféře Země. Z elektromagnetických vln stojí za zmínku ještě detekce záření na frekvencích okolo 10 kHz.

Ganymed. Jediným měsícem s vlastním magnetickým dipólovým momentem (a tím i vlastní magnetosférou) je Ganymed. Jeho magnetosféra je jakoby vnořená do magnetosféry Jupiteru. V rovníkové



oblasti má Ganymed uzavřené siločáry, na kterých se zachytávají nabitě částice. Magnetické pole měsíce bylo objeveno sondou Galileo v roce 1996. Hodnota pole na rovníku je 750 nT. Ganymed je dosud jediným měsícem ve Sluneční soustavě, u kterého bylo prokázáno vlastní magnetické pole. Na náčrtku se Ganymed pohybuje doleva, kde se Ganymedovy siločáry postupně napojují na siločáry planety Jupiter. Na opačné straně (napravo) se naopak Ganymedovy siločáry postupně oddělují od siločar Jupiterových. Ganymedova magnetosféra je vnořena do Jupiterovy a ta do sluneční.

Callisto. Z měření změn magnetického pole Jupiteru v blízkosti tohoto měsíce se zdá, že má, obdobně jako Europa, indukované proměnné pole způsobené podpovrchovým vodivým oceánem. Může jít o slanou vodu s příměsí čpavku. Pole ale zdaleka není tak výrazné jako u Europy.

Polární záře. Na Jupiteru probíhají časté polární záře. Jejich mechanismus je obdobný jako na Zemi: jde o excitaci atmosféry elektronů slunečního větru. Záření je nejlépe pozorovatelné v ultrafialovém oboru. Zvláštností Jupiterových polárních září jsou zřetelné uzlíky v aurorálním oválu, které vznikají narušením magnetického pole planety obíhajícími měsíci. Velké měsíce jako je Io, Europa či Ganymed a Callisto tak vytvářejí v polárních zářích planety jakési své otisky (viz obr. 11 v barevné příloze). Polární záře byly fotografovány ze Země Hubblovým dalekohledem a pak různými sondami. Nejpodrobnější fotografie ale pořizuje od roku 2016 sonda Juno (viz obr. 13 v barevné příloze). V polárních zářích detekovala horké skvrny o teplotě 550 až 900 K, které jsou tvořeny metanem a ionty H_3^+ .

Výzkum Jupiteru

Poprvé pozoroval dalekohledem Jupiter a jeho velké měsíce Io, Europu, Ganymed a Callisto v roce 1610 Galileo Galilei (1564–1642). Jupiterovy měsíce posloužily vědě v 17. století ještě jednou. Ole Christensen Rømer (1644–1710) určil v roce 1675 pomocí času zákrytů měsíců velmi přesně rychlost šíření světla. Moderní výzkum Jupiteru započal v roce 1955 objevem rádiových vln, a tím i magnetického pole této planety (Bernard Burke, Kenneth Franklin). K Jupiteru bylo dosud vysláno celkem 8 sond. První byla dvojice sond Pioneer, která zkoumala Jupiter v roce 1974. Následovala mise dvou sond Voyager, která získala podrobné informace o planetě v roce 1979. V letech 1995 až 2003 zkoumala Jupiter a jeho měsíce sonda Galileo, která byla nakonec navedena do atmosféry planety, kde shořela. Na své cestě k Saturnu zkoumala Jupiter po dobu 6 měsíců sonda Cassini, která okolo něj nejtěsněji prolétla v prosinci 2000 ve vzdálenosti 10 milionů km. V roce 2007 kolem planety Jupiter prolétla sonda New Horizons, aby pokračovala dále

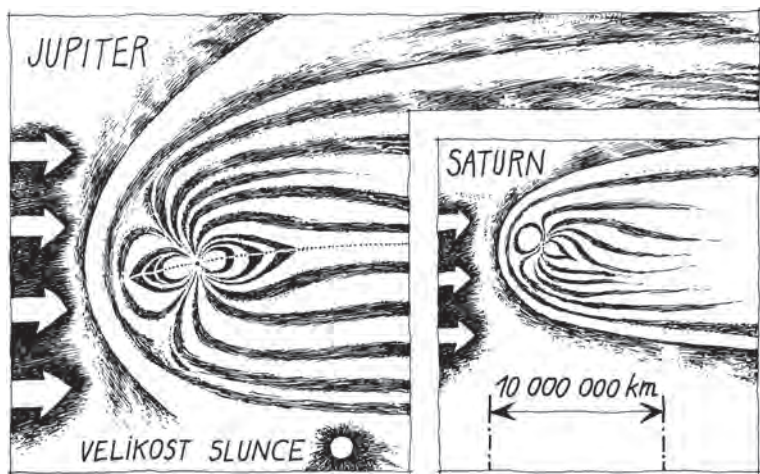
k Plutu a do vnějších částí Sluneční soustavy. V roce 2016 byla na orbitě kolem Jupiteru zaparkována sonda Juno, která chrlí podrobné snímky planety a jejího okolí dodnes. Sonda Juno zatím nejpodrobněji prozkoumala Jupiterovu velkou červenou skvrnu – obří atmosférický vír, který pozorujeme už tři století. Jedná se o anticyklónu (oblast vyššího tlaku) s členitou turbulentní strukturou. Jižně od rovníku se táhne pás menších bílých cyklón. Z infračervené analýzy plyne, že obsahují čpavek a hydrazin. Sonda Juno poprvé podrobně fotografovala polární oblasti, v nichž detekovala rozsáhlé bouře, které nejsou vázány na strukturu pásů. Měření magnetického pole prováděné touto sondou ukázalo, že lokální pole mohou překvapivě dosáhnout hodnoty až 0,9 mT a že naopak existují i malé oblasti s polem o 0,2 mT nižším než v jejich okolí. Z měření gravitačního pole planety plyne, že by její jádro nemuselo být tak malé, jak se dosud předpokládalo.

V roce 1994 nám Jupiter připravil nádhernou podívanou – po částech do něho spadla kometa Shoemaker-Levy 9. V letech 1999–2003 bylo objeveno několik desítek nových Jupiterových měsíců pomocí dalekohledu CFHT¹ (Kanadsko-francouzský dalekohled na Havaji) o průměru 3,6 metru (CCD 12 000×12 000 pixelů, David Jewitt a kol.); vesměs jde o kilometrová skaliska. Řada měsíců byla objevena i sondami, takže víme, že Jupiter má mnoho desítek měsíců (v roce 2021 je jich známo 79).

Saturn

Saturn je s průměrem 120 420 km druhou největší planetou Sluneční soustavy, magnetosféru má ale výrazně menší než Jupiter (asi 20 % velikosti). Struktura magnetického pole Saturnu je poměrně jednoduchá a připomíná zvětšeninu magnetosféry Země. V blízkosti planety má pole téměř ideální dipólový charakter. Saturn

1 **CFHT** – Kanadsko-francouzský dalekohled o průměru 3,6 metru na Havaji. Je vybudován na hoře Mauna Kea v nadmořské výšce 4 204 metrů. Na vybudování dalekohledu se podíleli: Havajská univerzita v Manoe (USA), Národní výzkumná rada NRC (Kanada) a Centrum národního vědeckého výzkumu CNRS (Francie). Dalekohled fungoval od roku 1979, v současnosti probíhá rekonstrukce, která bude ukončena v roce 2029.



Porovnání velikostí a tvarů magnetosfér Jupiteru a Saturnu. Saturn má pole téměř čistě dipólové, u Jupiteru je podstatná i kvadrupólová složka. Navíc je u Jupiteru magnetická osa skloněna o 10° vzhledem k rotační ose. Šipky v levé části naznačují směr slunečního větru přicházejícího od Slunce.

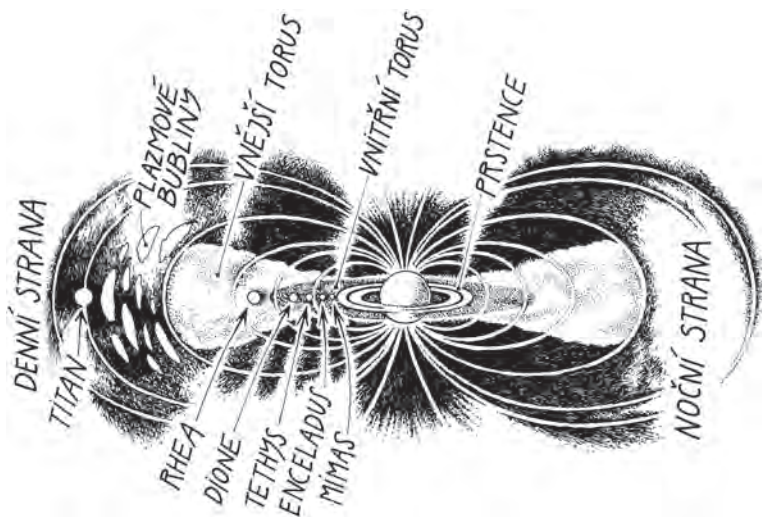
má obdobné složení jako Jupiter a jeho rotace je také velmi rychlá (perioda 10 hodin 32 minut); jsou zde tedy podmínky pro vznik silného dipólového momentu, nicméně na jeho velikosti se podepisují menší rozměry planety. Magnetické pole má na rovníku hodnotu $21 \mu\text{T}$ a celkový dipólový moment je $4,6 \times 10^{18} \text{ T} \cdot \text{m}^3$. To je 35krát menší hodnota než u Jupiteru, ale 575krát vyšší než u Země. Magnetická osa Saturnu má téměř stejný směr jako osa rotační, jejich orientace se liší o méně než 1° . Centrum magnetického dipólu je ze středu planety posunuto o 5 % poloměru planety.

Magnetosféra Saturnu má základní rysy shodné s magnetosférou Země. Výrazná čelní rázová vlna je od planety vzdálená čtyřicetinásobek poloměru planety. Na noční straně je magnetický ohon, jehož celkovou délku neznáme. Magnetický ohon planety byl detailně zkoumán sondou Cassini v letech 2005 až 2017. Sonda objevila náhlá zvýšení toku neutrálních atomů a iontů z magnetického ohonu. Tyto spršky byly ve výrazné korelaci s nárůstem kilometrového rádiového záření Saturnu, což svědčí o magnetických

bouřích, které dobře známe z magnetosféry Země. Planeta má také radiální pásy, záření z nich je ale slabé a na rozdíl od Jupiteru není ze Země měřitelné. Na Saturnu byly pozorovány rozsáhlé polární záře (viz obr. 15 a 16 v barevné příloze) a detekovány elektrické proudy obdobné jako v magnetosféře Země (například prstencový proud kolem planety a proud neutrální vrstvy magnetického ohonu). Saturn má, podobně jako Země, korotující plazmosféru, ta je však mnohem rozsáhlejší a skládá se z vnitřního a vnějšího toru. S vnitřním torem interagují prstence a měsíce z této oblasti, s vnějším torem pak již jenom měsíce Rhea a Titan. Plazmosféra sahá až k oběžné dráze Titanu, který se svou indukovanou magnetosférou patří k největším zajímavostem magnetosféry Saturnu.

Plazmosféra. Plazma uvnitř magnetosféry zaujímá spolu s radiálními pásy oblast rozsáhlého toru, jehož vnitřní část je ukončena prstenci A, B a C, které absorbují veškeré částice z této oblasti. Součástí vnitřního toru jsou měsíce Mimas, Enceladus, Tethys a Dione. Koncentrace nabitých částic dosahuje až 3 000 v jednom centimetru krychlovém. Plazmosféra včetně radiálních pásů interaguje s měsíci obíhajícími v této oblasti. Měsíce vychytávají nabitě částice a vytvářejí v rozdělení koncentrace částic v radiálním směru charakteristická minima. Vnější část toru je rozprostřena kolem dráhy měsíce Rhea a zasahuje až k dráze Titanu, kde již převažují neutrální částice. U Titanu není plazma souvislé, ale skládá se z oddělených plazmových bublin.

Titan. Titan je s průměrem 5 150 km největším Saturnovým měsícem. Má hustou atmosféru, v níž převažuje dusík s trochou metanu. Tlak atmosféry na povrchu je 1,5 atm (má plynný obal hustší než Země), teplota -180°C . Měsíc Titan je větší než planeta Merkur. Na Titanu přistálo v roce 2005 pouzdro Huygens, které na tělese neobjevilo žádné vlastní pole, jen etanová jezera. Hustá atmosféra Titanu je ionizována zářením, nábojovou výměnou i nárazem částic. Vzniklá ionosféra se chová pro nabitě částice magnetosféry Saturnu jako vodivá překážka. Dochází tak ke vzniku indukované magnetosféry, podobně jako na Venuši či Marsu. Titan je při svém oběhu kolem Saturnu pomalejší než korotující plazma



Plazmosféra Saturnu je tvořena vnitřním a vnějším torem. Plazmosféra korotuje spolu s planetou a zasahuje až k měsíci Titanu, kde dominují neutrální částice a plazma vytváří osamocené bubliny.

planety, proto nabitě částice uvolňované z atmosféry Titanu brzdí Saturnovu plazmosféru. To se projeví deformací magnetického pole v plazmosféře planety, které jako prak urychlí látku neustále přitékající z Titanovy atmosféry na rychlost okolí. Titan se pohybuje na hranici magnetopauzy, a tak se v některých částech dráhy dostává do přímého vlivu slunečního větru, jinde pak prochází magnetosférou planety. Titan je ve své oblasti zdrojem jak nabitých, tak neutrálních částic.

Výzkum Saturnu

Dalekohledem Saturn poprvé pozoroval Galileo Galilei (1564–1642) v roce 1610. Prstence byly v té době viditelné z boku, a tak se Saturn Galileovi jevil jako trojplaneta, později jako planeta s ušima a ještě jindy jako normální kotouček. Traduje se, že tím byl natolik zmaten, že na Saturn zanevřel a již se na něho do své smrti nepodíval. V roce 1655 objevil Christian Huygens (1629–1695) největší měsíc Titan a podivné chování okolí Saturnu interpretoval správně jako plochý prstenec okolo planety. Jeho dělení na několik

části bylo zjištěno Giovannim Domenicem Cassinim (1625–1712) v roce 1675. Moderní výzkum Saturnu započal v roce 1979, kdy k planetě dolétla sonda Pioneer 11. V roce 1980 fotografovala Saturn a Titan sonda Voyager 1, o rok později Voyager 2. V 90. letech byl Saturn intenzivně zkoumán Hubbleovým vesmírným dalekohledem. V letech 2000 až 2003 byla objevena řada malých měsíců s nepravidelnými drahami, a to dalekohledem MPG/ESO² o průměru 2,2 metru a Kanadsko-francouzským dalekohledem CFHT. Další dvě desítky měsíců objevil v roce 2019 tým Scotta Shepparda dalekohledem Subaru na Mauna Kea. S celkovým počtem 82 měsíců (v dubnu 2021) se Saturn stal planetou s největším počtem měsíců. Do roku 2019 v této oblasti vítězil Jupiter.

Od roku 2004 do roku 2017 pracovala u Saturnu sonda Cassini (NASA) s pouzdrzem Huygens (ESA), které přistálo na Titanu počátkem roku 2005. Tři měsíce před přiletem k Saturnu pozorovala sonda Cassini dvě bouře, které se nakonec spojily v jednu. Zdá se, že takovéto spojování bouří je jedním z běžných fenoménů atmosfér obřích planet. Zatímco na Zemi trvá průměrná bouře přibližně jeden týden a ke konci slábne, až zcela zmizí, u velkých planet trvají bouře měsíce, roky a někdy i staletí. Přesný mechanismus vzniku a vývoje bouří v atmosférách obřích planet doposud znám není.

Velkým překvapením bylo zjištění, že rotační perioda planety, určená měřením rotační modulace rádiových emisí, je o 6 minut delší než perioda, kterou o dvě desítky let předtím naměřila stejnou metodou sonda Voyager 2. První náznaky, že s rotační periodou není něco v pořádku, se ostatně objevily už v roce 1997, kdy tým z Observatoire de Paris oznámil, že jimi naměřená rotační perioda se dosti liší od té, kterou určil Voyager. Vědci nezpochybňují měření provedená Voyagerem, ale zdá se být velmi málo pravděpodobné, že by se rotace Saturnu mohla v tak krátké době zpomalit takovou měrou; proto hledají model, jež by vysvětlil změnu periody na základě proměnného vlivu změn rotace uvnitř planety na rádiové

2 **MPG/ESO** – dalekohled Evropské jižní observatoře (ESO) postavený na La Silla (Chille) společností Zeiss. Funguje od roku 1984. Původně byl observatoři ESO zapůjčen Institutem Maxe Plancka. Od roku 2013, kdy byl vrácen, se na jeho provozu podílejí obě instituce. Ohnisko má 17,6 metru.

pulzy. Zpoždění pulzů by mohlo souviset s faktem, že magnetická osa planety je prakticky totožná s osou rotace. U Jupiteru je sklon magnetické osy k ose rotace výraznější a žádné nepravidelnosti se zde nevyskytují.

Dalším překvapením spojeným s magnetosférou planety byla poloha rázové vlny, která vzniká v místech střetu částic slunečního větru s magnetickým polem planety. Toto místo sonda detekovala mnohem dříve, než se předpokládalo, a to už ve vzdálenosti tři miliony kilometrů od středu planety, což je o 50 procent dále od planety než hranice, kterou zaznamenaly sondy Pioneer a Voyager v letech 1979, 1980 a 1981.

Přístroje na palubě sondy Cassini také zaznamenaly rádiové vlny generované při elektrických výbojích. Tyto výboje měly zcela jiný charakter než ty, které zaznamenaly o dvě desítky let dříve sondy Voyager. Zatímco Voyagery zaznamenaly bouře vznikající v nižších zeměpisných šířkách blízko rovníku, které trvaly řadu měsíců, bouře detekované sondou Cassini jsou mnohem kratší a nárazovitější. Může to být způsobeno tím, že v době průletu Voyageru vrhaly prstence poměrně intenzivní stín na rovníkové partie planety, které se tak ochlazovaly. Tato zastíněná zóna se nacházela v těsném sousedství nejteplejších oblastí planety, což umožnilo vznik stabilní bouřkové oblasti. Nyní (2021) na severní polokouli Saturnu probíhá léto, takže prstence zastiňují planetu v mnohem menší míře, což by mohlo dynamiku atmosféry Jupiteru značně ovlivnit.

Detektory plazmových a rádiových vln na sondě Cassini zaznamenaly i nízkofrekvenční elektromagnetické vlny vycházející z prstenců. Pokud bychom nahrávky vln zrychlili pětikrát, dostaneme se frekvenčně do zvukové oblasti a mohli bychom poslouchat hudbu, kterou složila sama příroda. Saturnovy prstence přinesly i další překvapení: byly v nich pozorovány typické hustotní vlny. Vlivem gravitačního působení měsíců na prachové částice v prstencích dochází k rezonančnímu rozvlnění prstenců. V okolí prstenců byly také detekovány molekuly kyslíku připomínající atmosféru některých měsíců.

V roce 2006 potvrdila sonda Cassini existenci podivného šestiúhelníkového útvaru v okolí severního pólu Saturnu. Poprvé byl tento útvar, který vypadá na první pohled velmi nezvykle, vyfotografován misí Voyager v roce 1981. Barva útvaru se mezi lety 1981 a 2016 měnila od modré po zlatavou. Laboratorní experimenty s otáčející se tekutinou potvrdily, že takovéto útvary mohou vznikat. V roce 2020 Cheng Li z Kalifornského technologického institutu (Caltech) ukázal matematicky, že se mnohostěn vytvoří, pokud je bouřková oblast obtékána větry opačného směru, než je její vlastní pohyb. Fotografie Saturnova šestiúhelníku si můžete prohlédnout na obr. 17 v barevné příloze. Mise Cassini byla zakončena v roce 2017, kdy sonda prolétla některými mezerami v soustavě prstenců a poté řízeným pádem shořela v Saturnově atmosféře.

Uran

Uran je obří planeta se soustavou prstenců, složením podobná Jupiteru a Saturnu. Od ostatních planet se výrazně liší sklonem rotační osy, který činí plných 98° . Planeta se tak po oběžné dráze kolem Slunce „odvaluje“, s prstenci a drahami měsíců postavenými kolmo na rovinu oběžné dráhy. Pokud by magnetická rotační osa měla obdobný směr, byl by jeden z polárních kaspů namířen přímo směrem k dopadajícímu slunečnímu větru a magnetosféra planety by byla velmi atypická. Nicméně magnetická rotační osa je skloněna k rotační o plných $58,6^\circ$, proto jsou polární kaspy orientovány vzhledem ke slunečnímu větru obdobně jako u ostatních planet. Magnetosféra je tak zcela obdobná magnetosféře Země, jen má větší rozměry. Snad jediným výraznějším rozdílem je magnetický ohon, kvůli atypické rotaci planety stočený do tvaru vývrtky.

Rotační perioda planety je 17 hodin a 14 minut, Uran tedy rotuje pomaleji než Jupiter či Saturn a jeho menší rozměry nedostačují ke vzniku tekuté kovové fáze vodíku. Magnetické pole generuje pravděpodobně polotekutá vrstva vodního ledu a čpavku, která se nachází pod povrchovou vrstvou kapalného vodíku a helia. V centru planety je snad kamenné jádro, i když některé odhady hovoří o teplotě $7\,000\text{ }^\circ\text{C}$, při níž by jádro mělo být tekuté. Na rovníku má

pole hodnotu $23 \mu\text{T}$ a celkový dipólový moment je $0,39 \times 10^{18} \text{T} \cdot \text{m}^3$, což je dvanáctkrát méně než u Saturnu, ale padesátkrát více než u Země. Střed magnetického dipólu je vychýlen z centra planety o plných 30 % poloměru planety. Skutečný mechanismus vzniku magnetického pole planety je však nejasný, zejména vzhledem k velkému sklonu magnetické osy vůči rotační ose a k výraznému vychýlení středu dipólu mimo centrum planety. Na základě těchto indicií se soudí, že hlavním zdrojem magnetického pole jsou procesy probíhající v poměrně malých hloubkách pod povrchem, přičemž hlavní zdroj magnetického pole zřejmě neleží ve středu planety. Čelní rázová vlna sahá do vzdálenosti 33 poloměrů planety a hranice magnetosféry (magnetopauza) byla detekována na 25 poloměrech planety. Pole Uranu má pravděpodobně i vyšší momenty než jen dipólový. Jediné měření pochází ze sondy Voyager 2, která kolem planety prolétla v roce 1986. Odhaduje se, že kvadrupólový moment je zhruba stejně zastoupený jako dipólový, zastoupení vyšších momentů nebylo měřeno.

Výzkum Uranu

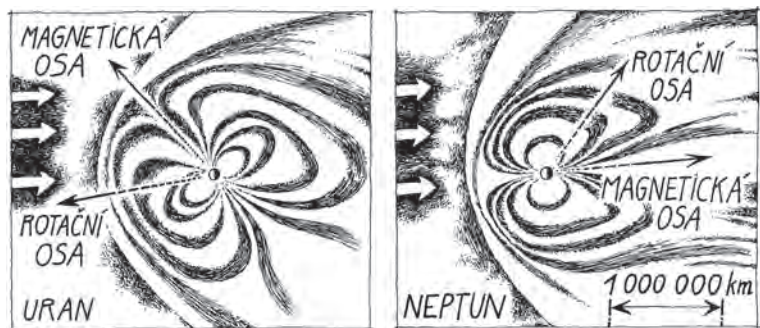
V roce 1690 Uran pozoroval John Flamsteed (1646–1719), ale zanesl ho do svého katalogu jako hvězdu číslo 34 v souhvězdí Býka. Jako planetu objevil Uran až William Herschel (1738–1822) svým třinácticentimetrovým zrcadlovým dalekohledem v roce 1781. Herschel pojmenoval nový objekt „*Georgium sidus*“ neboli „hvězda Jiříkova“ po svém mecenáši a chlebodárci, britském králi Jiřím III (podobně Galilei nazval jím nalezené Jupiterovy měsíce „*Medicejskými hvězdami*“). Toto pojmenování se však neuchytilo; na kontinentě přežívala nově objevené planeta krátkou dobu pod prostým názvem Herschel, na počátku 18. století byla však již většině známa jako Uran. Herschel objevil v roce 1787 také Uranovy měsíce Titania a Oberon. Měsíce Ariel a Umbriel objevil William Lassell (1799–1880) v roce 1851. Poslední z velkých měsíců, Mirandu, našel Gerard Kuiper (1905–1973) v roce 1948. Uranovy prstence byly detekovány v roce 1977. Kolem Uranu prolétla dosud jediná sonda, a to Voyager 2 v roce 1986. Celkový počet dnes (2021) známých měsíců je 27.

Již v malém dalekohledu snadno rozeznáme kotouček planety, který v zorném poli větších přístrojů dostane dobře viditelný modrozelený nádech způsobený stopovým množstvím metanu v atmosféře. Nesporně unikátní je rotace Uranu a poloha jeho magnetické osy. Sklon rotační osy je dokonce větší než 90° , pokud nechceme jeho rotaci chápat jako retrogradní. Důvod této anomálie je nejasný, nejčastěji je diskutována možnost srážky Uranu s nějakým velkým tělesem v období utváření Sluneční soustavy.

Díky extrémnímu sklonu rotační osy se Uran během svého oběhu střídavě přiklání ke Slunci některým z pólů nebo rovníkem. Póly díky tomu dostávají v některých obdobích od Slunce větší množství energie než rovníkové oblasti. Přesto jsou rovníkové oblasti ve skutečnosti teplejší než póly. Původ mechanismu, který přerozděluje energii, dosud není znám. Každopádně lze říci, že způsob rotace planety má zásadní vliv na proudění atmosféry. Snímky planety, pořízené při průletu sondy Voyager 2 roku 1986, kdy byla planeta ke Slunci natočená jedním z pólů, neukazují žádné výraznější atmosférické útvary; naopak snímky z Hubblova vesmírného dalekohledu či z dalekohledů Keck v období, kdy je planeta ke Slunci natočena rovníkem, naznačují přítomnost klasické pásové struktury (viz obr. 19 v barevné příloze).

Mezi další, prozatím ne zcela odhalená, tajemství planety patří její nitro. Bohužel data pořízená Voyagerem během jeho průletu nejsou pro výpočet modelu nitra planety dostačující. I tak je ale zřejmé, že nitro planety nejeví známky úplné diferenciace, jak bychom mohli předpokládat v analogii k Jupiteru nebo Saturnu. Dřívější modely předpokládaly v hloubkách kolem 7 500 km plášť z vodního, amoniakového a metanového ledu o tloušťce přibližně 10 000 km, který obklopuje křemičitanové jádro o velikosti zhruba srovnatelné se Zemí. Současné odhady teploty jádra (7 000 °C) by hovořily spíše pro jádro tekuté.

Roku 1977 byly nepřímě objeveny nejjasnější prstence Uranu. Stalo se tak při pozorování zákrytu hvězdy kotoučkem planety, kdy jasnost hvězdy několikrát měřitelně poklesla ještě před samotným zákrytem. Stejný jev nastal i po východu hvězdy zpoza kotoučku Uranu.



Porovnání magnetosfér Uranu a Neptunu. Šipky v levé části naznačují směr slunečního větru přicházejícího od Slunce.

Další prstence zachytila již i opticky sonda Voyager 2, poslední přírůstky do rodiny prstenců zaznamenal Hubbleův vesmírný dalekohled, nejdříve roku 2003 a posléze v roce 2006. Právě naposledy objevené prstence jsou zajímavé tím, že mají oproti ostatním dvojnásobný rozsah a navíc jsou složeny z prachových zrn stejné velikosti, což způsobuje rovnoměrný rozptyl slunečního světla a prstence jsou proto „barevné“.

Neptun

Neptun je poslední z velkých planet Sluneční soustavy. Má obdobnou velikost, hmotnost a rotační periodu (16 hodin a 7 minut) jako Uran, proto má pravděpodobně shodnou i vnitřní strukturu (oceán kapalného vodíku a helia, led z vody a čpavku, snad i malé kamenné jádro). Tlak vnějších vrstev nedostačuje ke vzniku tekutého kovového vodíku, jako je tomu u Jupiteru a Saturnu.

Magnetické pole na rovníku činí $14 \mu\text{T}$, čemuž odpovídá dipólový moment $0,22 \times 10^{18} \text{ T} \cdot \text{m}^3$; to je 27krát více než magnetický dipólový moment Země. Střed magnetického dipólu je vychýlen z centra planety o 55 % poloměru. Sklon rotační a magnetické osy je 47° . Nedipólový příspěvek k poli na povrchu planety je největší ze všech planet, kvadrupólový moment je dokonce větší než dipólový. Příspěvek vyšších momentů není znám. V době průletu sondy Voyager 2

v roce 1989 byla orientace magnetosféry taková, že do ní Voyager vstoupil (jako u jediné navštívené planety) přímo polárním kaspem. Magnetosféra Neptunu má obdobné rozměry jako magnetosféra Uranu. Čelní rázová vlna byla v době přiletu sondy Voyager 2 vzdálená 34 poloměrů planety a hranice magnetosféry (magnetopauza) 26 poloměrů planety. Magnetosféra Neptunu byla v době návštěvy Voyageru mimořádně klidná s velmi nízkými toky energetických částic a nebyly patrné žádné dynamické efekty. Magnetosféra Neptunu byla tehdy nejklidnější magnetosférou Sluneční soustavy. Může to být způsobeno velkou vzdáleností Uranu od Slunce a slabším tokem slunečního větru.

Výzkum Neptunu

Neptun pozoroval již Galileo Galilei, který ho zakreslil při pozorování Jupiteru, ale nezjistil, že jde o planetu. Tak se stalo, že Neptun byl objeven až v roce 1846 Johannem Gottfriedem Galle (1812–1910) na základě rozboru poruch dráhy planety Uran, které spočetli nezávisle na sobě John Couch Adams (1819–1892) a Urbain Le Verrier (1811–1877). V téže roce objevil William Lassell (1799–1880) Neptunův největší měsíc Triton. Další měsíc, Nereida, byl objeven v roce 1849 Gerardem Kuiperem (1905–1973) a Johnem Couchem Adamsem (1819–1892). Prstence byly detekovány v roce 1984 při náhodném zákrytu jedné hvězdy planetou. V roce 1989 prolétla kolem Neptunu zatím jediná sonda Voyager 2, která zkoumala samotnou planetu, soustavu prstenců, vlastnosti magnetosféry a objevila šest nových měsíců. Dalších pět měsíců bylo objeveno v letech 2002 až 2004 z pozemských pozorování. Dnes (2021) je známo 14 měsíců Neptunu.

Neptun je do značné míry podobný svému bližšímu sourozenci Uranu, ale v některých směrech se od něj odlišuje. Předně, přestože má přibližně stejný průměr, je výrazně hmotnější. To znamená, že i střední hustota jádra je vyšší, což dobře koresponduje s moderními hypotézami vzniku těchto planet. Neptun také musí nutně mít vlastní zdroj tepla, neboť vyzařuje více než dvojnásobek energie přijímané od Slunce. Původ této energie je nejasný – kdyby se

jednalo o zbytkové teplo, tedy o vyzařovanou uvolněnou potenciální energii při akreci hmoty, proč něco podobného nepozorujeme i u Uranu? Tento vnitřní zdroj tepla jistě souvisí s rozsáhlými atmosférickými bouřemi, které zaznamenal Voyager. Mračna vysoké oblačnosti dokonce vrhají na „povrch“ planety stíny, což je u plyných planet unikátní. Kromě vysoké pásovitě oblačnosti cirrovitého typu, tvořené krystalky zmrzlého metanu a dusíku, zaznamenala sonda výrazný útvar, Velkou tmavou skvrnu. V roce 1994, kdy byl Neptun pozorován Hubbleovým dalekohledem, však již tato bouře neexistovala. Zakrátko se ovšem objevila další, což ukazuje, že atmosféra planety je ve shodě s očekáváním velmi dynamická.

Atmosféry Uranu a Neptunu jsou si značně podobné – v obou případech způsobuje stopová přítomnost metanu modravé zabarvení planety. Podobné je i excentrické uložení magnetické osy planet, v případě Neptunu magnetická osa prochází dokonce ve vzdálenosti poloviny poloměru od středu planety. Rotační osa planety je skloněna o asi 28° , takže se můžeme domnívat, že anomálie magnetického pole obou planet spíše souvisí s jejich vnitřními procesy než se sklonem rotační osy.

Podobně jako Uran, je i Neptun obklopen soustavou prstenců, o kterých se dříve soudilo, že jsou neúplné. To však sonda Voyager vyvrátila. V prstencích lze pozorovat i tři výrazné oblouky nazvané *Liberté*, *Egalité* a *Fraternité*, které mohou být důsledkem gravitačního rezonančního působení měsíce Galathea.

Jak již bylo řečeno, doposud je známo 14 Neptunových satelitů. Triton, největší z nich, vykazuje retrográdní oběh, což ukazuje na jeho původ coby zachyceného tělesa Kuiperova pásu. Synchronní rotace ve spojení s retrográdním oběhem způsobuje pozvolné přibližování měsíce k mateřské planetě. Podle výpočtů by během následujících dvou miliard let mohlo dojít buď k překročení Rocheovy meze stability a následnému roztrhání tělesa, nebo k přímé kolizi s planetou. Událost bude bezpochyby znamenat výrazné obohacení materiálu prstenců – lze jen litovat, že toto vesmírné divadlo zcela jistě nestihneme.

Víte, že?

■ Víte, že jezera na Titanu, největším Saturnově měsíci, jsou složena převážně z etanu a metanu? Přítomnost uhlovodíkových jezer se předpokládala dlouho, definitivně ji ale potvrdilo až pouzdro Huygens mise Cassini, které na Titanu přistálo v roce 2005.

■ Víte, že Saturnův měsíc Enceladus má na svém povrchu gejzíry? V roce 2005 objevila sonda Cassini oblaka vodního ledu. Vzápětí se ukázalo, že jejich zdrojem je více než 200 gejzírů, které chrlí do okolního prostoru směs vodního ledu, plynných látek a pevných částic. Část mizí ve vesmíru, část dopadá na povrch jako sníh. Jevu se říká kryovulkanismus.

■ Víte, že William Herschel, objevitel Uranu, mj. zkonstruoval dalekohled s ohniskem 12 metrů? Obří teleskop se zrcadlem o průměru 122 cm postavil v anglickém Slough mezi lety 1785 a 1789. Objevil s ním Saturnovy měsíce Enceladus a Mimas. Objekty pozorované dalekohledem se staly základem Nového všeobecného katalogu (NGC). Stavbu zaplatil král Jiří III.

■ Víte, že William Herschel byl také objevitelem infračerveného záření? Sluneční světlo rozkládal hranolem a sledoval reakci teploměru na různé složky záření. Nejvyšší teplotu naměřil až za červenou barvou, kam dopadala neviditelná infračervená složka slunečního světla.

Poučení na závěr: Nebojte se snít o cizích a vzdálených světech. Je vysoce pravděpodobné, že realita je mnohem šilenější než vaše nejodvážnější představy.





9. Od pramlhoviny ke Sluneční soustavě

„Podněty, povzbuzující nás k učení a poznání, jsou ve věcech samých, kterým se učíme a které poznáváme.“

Marcus Tullius Cicero, římský filozof a státník

Ve vesmíru můžeme pozorovat přinejmenším stovky miliard galaxií, z nichž každá obsahuje řádově stovky miliard hvězd. Lidé, obklopeni zdánlivě nekonečným oceánem prostoru, dlouho spekulovali o existenci jiného světa, podobného tomu našemu. Na konci dvacátého století jsme se dočkali objevu první exoplanety a posléze rychle přibývaly další. Než se ale vydáme k cizím světům, věnujme se původu naší planetární soustavy.

První teorie

Teorii vzniku Sluneční soustavy můžeme právem považovat za jednu z nejdéle se vyvíjejících astrofyzikálních teorií. Poté, co Mikuláš Koperník (1473–1543) vzal Zemi její výsadní postavení ve vesmíru, založené na základech více než 1 000 let starého ptolemaiovského geocentrického modelu, Galileo Galilei (1564–1642) roku 1610 objevil přirozené satelity Jupiteru a William Herschel (1738–1822) objevil v pořadí sedmou planetu Sluneční soustavy, začali mnozí badatelé uvažovat o tom, jakým způsobem Sluneční soustava vznikla a jak se od svých počátků vyvíjela. Průchod novým myšlenkám umožnily mimo jiné právě objevy Galileiho a Herschela, kteří svými výzkumy vyvrátili přes jeden a půl tisíce let staré aristotelovské paradigma o neměnnosti nebeské sféry. Vynález dalekohledu dramaticky rozšířil obzory lidského chápání vesmíru a odhalil existenci těles a objektů, o kterých lidé dříve neměli ani potuchy.

Jedny z prvních novodobých úvah o vzniku Sluneční soustavy najdeme v díle *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, které roku 1755 vydal Immanuel Kant (1724–1804). Je zde načrtnutá teorie, podle které byly všechny objekty Sluneční soustavy na počátku tvořeny „elementární pralátkou“. Významného filozofa k tomuto závěru vedl poznatek, že všechny planety obíhají přibližně v jedné rovině, která je navíc blízká rovině slunečního rovníku, a dále fakt, že všechny planety, jejichž rotace byla tehdy známa, rotují ve stejném smyslu, v jakém obíhají okolo Slunce.

Na Kantovy filozofické úvahy navázal Pierre Simon de Laplace (1749–1827), který roku 1796 ve své knize *Exposition du système du Monde* poprvé představil matematicky a fyzikálně formulovanou nebulární teorii vzniku Sluneční soustavy. Předpokládal, že sluneční pramlhovina měla původní rozměr odpovídající dráze nejvzdálenější planety a postupným smršťováním a zrychlováním rotace oddělovala prstence látky, z níž pak zkondenzovaly planety. Tato hypotéza, dnes známá jako Kantova–Laplaceova nebulární teorie, dobře vysvětlovala základní mechanické aspekty Sluneční soustavy, ovšem při bližším zkoumání se z hlediska dynamiky stala neudržitelnou, neboť nedovedla vysvětlit pozorované velikosti momentů hybnosti planet a Slunce. Slunce totiž obsahuje 99,9 % hmoty Sluneční soustavy, ale je nositelem pouhých 2 % momentu hybnosti, zbytek je uložen v orbitálním pohybu planet. Pokud by Sluneční soustava skutečně vznikla podle Laplaceova scénáře, muselo by dnes Slunce rotovat o řád rychleji, než je pozorovaná hodnota.

Na problém s momentem hybnosti poukázal James Jeans (1877–1946), který vypracoval vlastní teorii, podle níž se Slunce v minulosti střetlo s jinou hvězdou. Při této kolizi měla procházející hvězda na Slunci vytvořit ohromnou slapovou¹ vlnu, která se od Slunce později zcela odtrhla a z jejíž rotujících zbytků se následně utvo-

1 **Slapová síla** – rozdíl gravitačních sil působících na různé části tělesa. Například Země působí na naše nohy větší gravitační silou než na hlavu, rozdíl je ale zanedbatelný. Slapové síly Měsíce působící na Zemi jsou příčinou přílivu a odlivu a také příčinou výměny momentu hybnosti mezi Měsícem a Zemí, která vede k postupnému vzdalování Měsíce. Obdobná slapová vazba existuje mezi Zemí a Sluncem a je pravděpodobně hlavní příčinou současného vzdalování Země od Slunce. Ve větších měřítkách působí slapové síly například při prolínání dvou galaxií.

řily planety. Tato domněnka se však při bližším zkoumání ukázala naprosto neudržitelnou. Kdyby se hvězda se Sluncem střetla přímo, vytvořila by se sice dostatečně velká vlna, ale její látka by obíhala v příliš malých vzdálenostech. Aby se dostala do vzdálenosti dnešních planet, musely by se obě hvězdy míjet v daleko větší vzdálenosti, což by ovšem zase nestačilo k tomu, aby se slapová vlna zcela oddělila od slunečního povrchu. A tak se z této teorie vyvinula další, neméně atraktivní. Podle ní bylo naše Slunce zpočátku dvojhvězdou. Její druhá složka, která později zanikla, se měla střetnout s další hvězdou, čímž se uvolnilo jakési vlákno, které bylo později zachyceno Sluncem. Pochopení podstaty stavby hvězd v první polovině 20. století však tuto teorii vyloučilo také. Látka na povrchu hvězdy je totiž velmi řídká a rozptýlený prstenec by neměl hustotu dostatečnou k tomu, aby se z něj později vytvořily zárodky budoucích planet. Látka by tedy musela být vyvržena přímo z nitra hvězdy, což snad může být při přímé kolizi principiálně možné, ale musíme si uvědomit, že látka v nitru hvězdy je vystavena extrémním podmínkám a při jejím úniku z nitra hvězdy by byla tlakem plynu a záření během několika málo okamžiků rozmetána.

Proti katastrofickým teoriím lze mít i námitky z hlediska počtu pravděpodobností. Těsné setkání nebo dokonce kolize dvou hvězd jsou vzhledem k ohromným vzdálenostem ve vesmíru události nesmírně vzácné a výjimečné. Pokud by měly planetární systémy vznikat při podobných událostech, byla by samotná existence Sluneční soustavy těžko uvěřitelnou náhodou, o existenci jiných planetárních systémů nemluvě. Přesto se Jeansova katastrofická teorie v různých obměnách udržela až do čtyřicátých let dvacátého století!

Nebulární teorie tak prodělala svou renesanci. První kvantitativní výpočty struktury pramlhoviny provedli na počátku druhé poloviny 20. století Otto Juljevič Šmidt (1891–1956) a později Viktor Sergejevič Safronov (1917–1999). Přes dlouhý vývoj, který nebulární teorie prodělala, dnes máme za to, že její základy, vytvořené před více než dvěma staletími, jsou v zásadě kvalitativně správné. Následující text proto nastiňuje současný standardní a široce přijímaný model vzniku planetárních soustav – tzv. *akreční model*.

Akreční teorie

Jak již bylo zmíněno, hlavními důvody, které vedly tvůrce nebulární teorie ke zformulování své domněnky, byly:

1. Nízké sklony drah planet vůči rovině slunečního rovníku;
2. Stejný smysl oběhu planet kolem Slunce;
3. Shodný smysl rotace všech planet (s výjimkou Venuše a Neptunu, jejichž rotace nebyla tehdy známa).

Přestože byla původní nebulární teorie vystavěna na filosofickém základě a pramenila zejména z kvalitativních úvah, odhalili její autoři velmi důležitou skutečnost – a sice tu, že planetární systém vzniká přirozeně jako „vedlejší produkt“ tvorby hvězd.

Zásobárnami stavebního materiálu pro tvorbu hvězd a jejich planetárních soustav jsou obří molekulární mračna (GMC – *Giant Molecular Clouds*). Tato oblaka mají hmotnost v rozmezí 10^4 až 10^6 hmotnosti Slunce, jejich rozměry dosahují jednotek až desítek světelných roků a střední koncentrace látky se pohybuje okolo 10^3 částic v krychlovém centimetru. Oblaka mohou mít i několik hustších jader o hmotnosti srovnatelné s hmotností Slunce a centrální koncentraci až 10^8 částic/cm³, což odpovídá hustotě hmoty řádu 10^{-12} kg/m³. To je ale řádově srovnatelné s nejdokonalejším vakuem, jakého jsme na Zemi schopni dosáhnout!

Na obr. 34 v barevné příloze naleznete obří molekulární mračno v těsné blízkosti mlhoviny Bublina (NGC 7635). Bublina je vyfukována intenzivním hvězdným větrem hmotné centrální hvězdy a její čelo se sráží s okolním obřím molekulárním mračnem. Při střetu je materiál stlačován a vytvářejí se v něm nehomogenity, možné zárodky budoucích hvězd a planetárních systémů. Mlhovina Bublina má průměr kolem 10 světelných roků a nachází se v souhvězdí Kasiopeji, kde ji můžeme snadno vyhledat i menším dalekohledem. Další hvězdnou porodnicí je mlhovina Duše na obr. 36 barevné přílohy. Nalezneme ji v souhvězdí Kasiopeji ve vzdálenosti 7 500 světelných roků. Jiné obří molekulární mračno (N11B) je na

obr. 39 barevné přílohy. Nachází se ve vzdálenosti 160 000 světelných roků v sousední malé nepravidelné galaxii – Velkém Magellanově mračnu.

Nejbližším obřím molekulárním mračnem je rozsáhlý komplex mlhovin v Orionu, které se rozprostírají ve vzdálenostech 1 100 až 1600 světelných roků od Země. Analýzy chemického složení odhalily kromě převažující směsi molekulárního vodíku a atomárního helia také molekuly oxidu uhelnatého CO, kyanovodíku HCN, oxidu siřičitého SO₂, amoniaku NH₃ a řadu dalších molekul, iontů a radikálů. Právě pozorování emisních spekter oxidu uhelnatého se používá k odhadu množství vodíku a helia, které jsou samostatně ve spektru molekulárních mračen špatně detekovatelné. Zastoupení prvků těžších než helium se v jednotlivých mračnech s časem mění. První hvězdy ve vesmíru vznikaly výhradně z vodíku a helia. Naše Slunce vzniklo ale již z oblaku, v němž byl obsah těžších prvků přibližně dvouprocentní. Nejmladší hvězdy, které dnes vznikají z oblaků v rovině galaktického disku, jsou těžšími prvky obohaceny až z pěti procent.

Ve shlukujícím se obřím molekulárním mračnu jsou krom plynu přítomna i prachová zrna, která obsahují zejména vázaný uhlík, křemík a kyslík. Tato prachová zrna hrají v počátečních fázích vzniku hvězdy a jejího planetárního systému nezastupitelnou roli, neboť pomáhají odvádět teplo uvolňované kolapsem a zabraňují tak částicím mračna, aby se vlastním tepelným pohybem rozptýlily do prostoru. Jejich typické rozměry jsou řádově 10⁻⁵ m, což znamená, že jsou velikostí srovnatelné s částicemi cigaretového kouře.

Díky své relativně malé vzdálenosti od Země je komplex mlhovin v Orionu zdrojem řady zásadních informací o dějích, které provázejí vznik nových hvězd. Nachází se zde až 30 tisíc hvězd mladších než několik milionů roků a početná populace hvězd starých jen desítky milionů roků. Okolo četných mladých hvězd jsou pozorovány prachoplynné disky (*proplydy*) staré řádově milion let, výjimečně přes deset milionů let. Právě z proplydů se za vhodných podmínek rodí budoucí planetární systémy.

parametr	GMC	GMCC	PPD
teplota (K)	10	30	100
hustota (kg/m ³)	3×10^{-18}	3×10^{-15}	1×10^{-11}
hmotnost (Slunci)	100	0,7	0,1

Typické parametry obřího molekulárního mračna (GMC), chladného jádra stíněného okolním materiálem (GMCC) a protoplanetárního disku (PPD), jenž byl předchůdcem naší Sluneční soustavy. Hmotnosti jsou určeny z Jeansova kritéria.

Při dostatečně velké hmotnosti oblaku nastane jeho gravitační kolaps. James Jeans odvodil hmotnostní kritérium, jež dává do souvislosti gravitační nestabilitu, zajišťující pokračování kontrakce, se střední hustotou oblaku a jeho teplotou. Toto Jeansovo kritérium udává minimální hmotnost zárodku v obřím molekulárním mračnu, ze kterého může vzniknout samostatný gravitačně vázaný systém. Tato hmotnost musí být podle očekávání tím vyšší, čím vyšší je teplota, tj. střední rychlost částic v oblaku, neboť se stoupající teplotou dle stavové rovnice roste tlak, a tedy i tlakový gradient. Vyšší teplota proto vede k samovolnému rozpptylu částic a rozpadu molekulárního mračna.

Velikost Jeansovy hmotnosti pro obří molekulární mračna dosahuje řádově vyšších hodnot, než je hmotnost Slunce. Při hroucení oblaku ovšem dochází ke změně teploty a hustoty, takže se mění i hodnota Jeansova kritéria – toto kritérium mohou nově splňovat i menší části oblaku. Jejich zhroucením se situace opakuje a dochází tak k fragmentaci, díky níž vznikají z jednoho původního oblaku zpravidla stovky či tisíce hvězd, jak o tom svědčí četná pozorování otevřených hvězdokup. Mladé hvězdokupy drží pohromadě zejména díky gravitaci plynu, který nebyl spotřebován na tvorbu hvězd. Jakmile je tento plyn vypuzen tlakem elektromagnetického záření a hvězdným větrem, klesne hmotnost hvězdokupy na desetinu původní hmotnosti, což významně sníží stabilitu hvězdokupy a ta se během několika desítek až stovek milionů let rozpadne.

Vznik centrální hvězdy

Po počátečním impulzu, kterým může být třeba i výbuch blízké supernovy, kolabuje veškerý materiál oblaku směrem ke svému centru. Doba pádu částic z vnitřních částí oblaku do jeho centra je kratší než doba pádu částic z jeho okraje, takže jádro oblaku se začíná výrazně zahušťovat.

Narůstající gradient tlaku uvnitř jádra však hroucení postupně zpomaluje a při poklesu rozměrů na 5 astronomických jednotek se v podstatě zastaví. Centrální útvary v těchto vývojových stádiích nazýváme *protohvězdami*. Protohvězdy mohutně vyzařují energii uvolněnou během kontrakce a díky svému obřímu povrchu mohou zářit stonásobně vyšším výkonem, než hvězdy, které z nich vzniknou. Fotografie protohvězdy, která připomíná čerstvě narozeného pulce, naleznete na obr. 38 barevné přílohy.

Zářením se však objekty ochlazují, což má za následek úbytek jejich vnitřní energie a tedy i tlaku – dochází k jejich dalšímu pozvolnému smršťování a k opětovnému zahřívání a dalšímu vyzařování; celý cyklus se neustále opakuje až do chvíle, kdy teplota v nitru protohvězdy dosáhne přibližně 10 milionů kelvinů. Při této teplotě dojde v jádře k zažehnutí termojaderných reakcí, které jsou s to pokrýt ztráty energie způsobené vyzařováním a kontrakce hvězdy, která byla dosud zdrojem energie rodící se hvězdy, se zcela zastaví. V závěrečných fázích hvězdného vývoje, po vyhoření paliva v nitru hvězdy, se však kontrakce přihlásí o slovo znovu a definitivně.

Mladičká hvězda rychle rotuje, což má za následek generování velice silných magnetických polí. Díky nim vane z hvězdy intenzivní hvězdný vítr, který interaguje s okolním materiálem a „vymetá“ nejbližší okolí. Během následujících deseti milionů let bude veškerý nespotřebovaný materiál hvězdným větrem v kombinaci s tlakem elektromagnetického záření nemilosrdně odvanut do mezihvězdného prostoru. V barevné příloze na obr. 35 naleznete velmi mladou hvězdu IRS 4 ze souhvězdí Labutě i s okolní mlhovinou.

HH47

HH OBJEKT

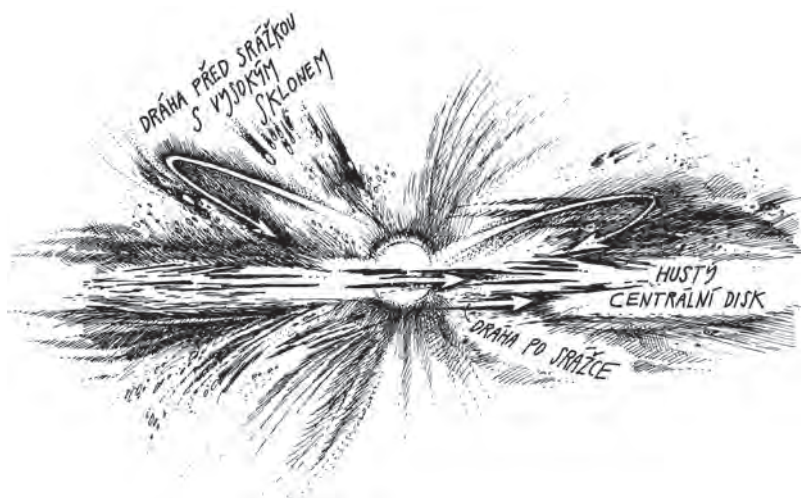


Jedním z produktů interakce hvězdného větru s prachoplynnou obálkou hvězdy jsou tzv. Herbigovy-Harovy objekty, které se vytváří na čele rázové vlny materiálu vyvrhovaného hvězdou podél magnetické osy. Materiál oblaku je zde ionizován a zahříván na teplotu kolem 10 000 kelvinů. Díky oběma jevům materiál výrazně září. Herbigovy-Harovy objekty byly původně pozorovány jako dvě protilehlé jasné skvrny v částech emisních mlhovin, teprve v 80. letech minulého století se podařilo odhalit i fokusované výtrysky materiálů a centrální hvězdu, která je zahalena mračny plynu a září v infračerveném oboru spektra. Na doprovodném obrázku je objekt HH 47, který byl v časovém období pěti let několikrát fotografován Hubbleovým dalekohledem.

Série snímků prokázala viditelné změny ve tvaru Herbigových-Harových objektů a potvrdila domněnku, že délka života těchto útvarů je v řádu stovek tisíc roků. Objekt HH 47 je součástí rozlehlého komplexu Gumovy mlhoviny v souhvězdích Plachet a Lodní zádě. V této mlhovině před přibližně jedním milionem let vzplála supernova, jejíž výbuch obohatil okolní materiál o těžké prvky a nastartoval procesy tvorby nových hvězd. Na obr. 37 v barevné příloze naleznete další z Herbigových-Harových objektů (HH 49/50), který se nachází ve vzdálenosti 450 světelných roků v molekulárním mračnu Chameleon. Objekt se svým tvarem podobá tornádu. Vznikl interakcí rázových vln protohvězdného větru s okolním plynem a prachem.

Vznik planetesimál

V okolí hvězd zůstane po jejich vzniku stále značné množství materiálu v prachoplynné obálce, která hvězdu obklopuje. Velký rotační moment brání jejímu úplnému zhroucení, ale již během fáze pomalé kontrakce hvězdy se z ní začíná utvářet tzv. *protoplanetární disk*. Příčinu jeho vzniku je nutno hledat jednak v působení odstředivých sil, jednak v odevzdávání momentů hybnosti částic na drahách s velkým sklonem při srážkách s částicemi hustší rovinné roviny. Jedná se o výběrový efekt, který se nejvýrazněji projeví právě na změnách drah částic s vysokým sklonem vůči rovníku (viz obrázek).



Díky radiometrickým metodám datování nejstarších meteoritů – *chondritů*, které nenesou známky žádné podstatné geologické přeměny, soudíme, že k vytvoření plochého protoplanetárního disku v okolí Slunce došlo v období před $(4,56 \pm 0,01)$ miliardy let.

Uvážíme-li, že náš protoplanetární disk měl hmotnost přibližně 0,04 Sluncí, střední teplotu v řádu 100 K a jeho střední hustota nepřesahovala 10^{-11} kg/m^3 , dospějeme k závěru, že v protoplanetárním disku nebylo Jeansovo kritérium splněno, viz tabulka na straně 226. Planety obíhající okolo Slunce tedy nemohly vzniknout přímým kolapsem zárodečného disku. Mezi další faktory, které znesnadňují vznik planet přímým kolapsem, můžeme zařadit rušivé účinky slapových sil Slunce a také skutečnost, že na budoucí zárodek planety mohou akreovat jen částice z blízkého okolí, vymezeného *Rocheovým lalokem*². Jde o oblast, ve které bude volná částice padat směrem k centrálnímu tělesu, v tomto případě k zárodku budoucí planety. Pokud by se částice nacházela vně Rocheova laloku, bude padat směrem ke Slunci a k akreci nedojde.

2 **Rocheův lalok** – prostorové ohraničení ekvipotenciální plochy systému dvou těles, v našem případě rodiče se planety a Slunce. Tato plocha se stejnou potenciální energií má tvar prostorové osmičky, složené ze dvou kapkovitých útvarů – Rocheových laloků. Okolní materiál se může akreovat na planetu jen tehdy, pokud je v jejím Rocheově laloku.

Uvedené skutečnosti ukazují nutnost zavedení modelu planetární akrece, avšak poznamenejme, že výše uvedené charakteristiky se týkají předpokládaných vlastností protoplanetárního disku, který byl předchůdcem dnešní Sluneční soustavy. V jiných discích mohou být předpoklady Jeansova kritéria splněny. Z fenomenologického hlediska můžeme formování planet rozdělit do čtyř základních fází:

1. Kondenzace plynu a formování malých prachových částic s typickými rozměry kolem jednoho mikrometru;
2. Akrece prachu až na planetesimály (rozměru řádově 1 km);
3. Vznik planetárních embryí (řádově o hmotnosti Měsíce) gravitačním spojováním planetesimál;
4. Vznik planet a akrece plynu na obří planety.

Počátečním procesem tvorby zárodků planet je formování prachových částic, které předpokládá kondenzaci plynu při poklesu teploty disku na 1 700 až 1 200 K, a jejich elektrostatické slepování do větších celků. Fakt, že teplota v disku klesala se vzdáleností od Slunce, vedl k chemické diferenciaci disku, neboť těkavé látky mohly kondenzovat až ve větších vzdálenostech od Slunce (například voda mohla za podmínek v protoplanetárním disku zkondenzovat do podoby ledu až ve vzdálenosti 3 až 4 au od Slunce.

Poznamenejme, že zpočátku je pro růst prachových částic rozhodující působení elektrostatických sil, neboť gravitační přitahování částic submilimetrových rozměrů je velmi slabé. Naproti tomu elektrostatická síla, působící mezi nabitými prachovými částicemi malé hmotnosti, způsobuje postupné slepování zrněk prachu do větších chuchvalců. Částice mohou být nabíjeny jednak ionizací ultrafialovým zářením, a také slunečním větrem, který byl v době vzniku Slunce mnohem intenzivnější, než je dnes. Takovéto elektrostatického slepování můžeme pozorovat i v běžném životě. Stačí se podívat za nějakou skříň, za kterou se delší dobu neluxoval prach. Zjistíme, že prach začal utvářet chuchvalce, které vznikly elektrostatickým slepováním částic nabitých statickou elektřinou, kterou v pokoji vyrábíme například chůzí po koberci.

Maximální rychlost počátečního růstu poloměru částic v protoplanetárním disku našich parametrů lze odhadnout na 6 mm za rok. Prachové částice milimetrových rozměrů tedy mohou v protoplanetárním disku narůst během jediného roku! Vzájemnou interakcí narůstajících částic s okolním plynem a převládajícími srážkami v husté centrální rovině disku dochází v časové škále řádu desítek let k poklesu narůstajících částic do centrální roviny a k jejich radiálnímu driftu směrem ke Slunci, čímž se dále zvyšuje pravděpodobnost vzájemných srážek. Takto se z prachových částic vytvořily planetesimály až do velikosti v řádu 10 až 100 m.

Druhou vývojovou etapou vzniku planet je kolizní růst, způsobený srážkami planetesimál. Tření o plyn způsobuje, že sklon oběžných drah i excentricita obíhajících planetesimál se přiblíží nule. Jejich vzájemné rychlosti při těsném přiblížení jsou proto zpravidla malé, a konstruktivní kolize (ty, při kterých dojde ke spojení srážejících se těles) proto převažují nad destruktivními (těmi, při kterých jsou kolidující tělesa rozdracena na menší). Pokud budeme sledovat změny hmotnosti planetesimál, můžeme rozlišit dva základní případy růstu planetesimál:

1. *Uspořádaný růst*, kdy je přírůstek hmotnosti za určitou dobu nepřímo úměrný velikosti objektu. Tento případ nastává, pokud je průměrná rychlost pohybu planetesimály vzhledem k okolí větší, než je úniková rychlost z jejího povrchu.
2. *Překotný růst*, kdy je přírůstek hmotnosti za určitou dobu naopak úměrný velikosti objektu. K překotnému růstu dochází, pokud je relativní rychlost sledované planetesimály vzhledem k okolním planetesimálám menší, než je úniková rychlost z jejího povrchu.

Při uspořádaném růstu rostou menší objekty rychleji než větší, naproti tomu při překotném růstu se zvětšují především velké objekty. To je způsobeno jejich vzájemnou rychlostí: při překotném růstu se vůči sobě blízké planetesimály pohybují pomalu, takže se projevuje gravitační fokusace, tedy vzájemné gravitační přitahování planetesimál. Naopak při růstu uspořádaném jsou vzájemné rych-

losti planetesimál velké, takže ke kolizím dochází jen na geometric-
kém účinném průřezu pohybujících se těles.

Podrobný model kolizního růstu, zahrnující také časový vývoj
vzájemné rychlosti planetesimál ukazuje, že v této fázi vývoje
systému probíhal nejprve uspořádaný růst balvanů na planetesimály
rozměrů cca 1 km. Díky vzájemným gravitačním interakcím a tření
o plyn se vzájemná rychlost planetesimál snižuje a dochází k jejich
překotnému růstu. Gravitační působení obíhajících velkých těles
posléze zvyšovalo vzájemné rychlosti okolních planetesimál, což
vedlo k postupnému útlumu překotného růstu, který trval po dobu
řádově 10^5 let. Poté pokračoval uspořádaný růst velkých planete-
simál, který označujeme jako oligarchický růst, a překotný růst
malých planetesimál, čímž se zvyšoval počet planetárních embryí.

Vznik planet

Během konečné fáze došlo ke vzniku terestrických planet a plyn-
ných obrů. Planetární embrya o velikosti srovnatelné s Měsícem se
náhodně srážela, což mělo za následek vznik těles hmotností srov-
natelných se Zemí v časovém období 10^8 let. Ve větších vzdálenos-
tech od Slunce docházelo ke kolapsu plynu na kamenná jádra, čímž
vznikly obří planety.

Přestože je výše popsaná akreční teorie vzniku Sluneční sousta-
vy v některých ohledech překonaná, jak uvidíme dále, vysvětluje
dobře některé základní charakteristiky Sluneční soustavy. Mezi nimi
zejména fakt, že ve vnitřní části Sluneční soustavy obíhají relativ-
ně malé planety s vysokou střední hustotou, které souhrnně ozna-
čujeme jako *terestrické planety* (planety, které se svou stavbou a fyzi-
kálními vlastnostmi podobají Zemi), ve vnějších oblastech potom
obíhají obří planety, jejichž významnou část utváří plynná atmosfé-
ra. Ty označujeme jako *joviální planety* (planety podobné Jupiteru).

Uvedené odlišnosti mezi dvěma hlavními kategoriemi planet má na
svědomí výše uvedená chemická diferenciacie disku spolu s působení-
m slunečního větru, který „odvanul“ všechny lehčí (tj. plynné)

částice do větších vzdáleností, kde mohly případně zkondenzovat do pevného skupenství. Příkladem může být voda – ta se díky vysoké teplotě v blízkosti Slunce nacházela v protoplanetárním disku pouze ve formě plynu. Voda kondenzovala na prachových zrnech v podobě jinovatky až ve vzdálenosti větší než 3 až 4 au. Vytvořila se tam jakási sněžná čára, což mělo za následek znásobení hmotnosti srážejících se prachových zrn. To vedlo k urychlení akrece planetesimál a planetárních embryí. Ačkoli tedy hustota disku s rostoucí vzdáleností klesala (tj. docházelo stále řidčeji ke srážkám částic), vznikly nejdříve obří planety a teprve posléze planety terestrické, které mohly vzniknout až po vypuzení plynu z protoplanetárního disku působením slunečního větru. V tomto období měla raná Sluneční soustava následující strukturu:

1. Ve vnitřní části rodící se Sluneční soustavy obíhala planetární embrya srovnatelné hmotnosti.
2. Ve střední části se nacházel systém již hotových obřích planet.
3. Ve vnějších částech Sluneční soustavy, za drahami obřích planet, se nacházel další disk planetesimál.

Při obíhání v plynném disku je postupné zvyšování excentricit planetárních embryí, způsobené jejich vzájemnou gravitační interakcí, případně gravitačním rušením obřimi planetami, tlumeno plynem, což znemožňuje další vzájemné srážky a vznik větších těles. Teprve po vypuzení plynu z této oblasti Sluneční soustavy mohou excentricity drah planetárních embryí postupně narůstat, což může vést ke křížení drah těles a následným kolizím.

Zde je namístě poznamenat odlišný vývoj ve dvou oblastech vnitřní části Sluneční soustavy. V oblastech blíže ke Slunci (tj. dále od Jupiteru) docházelo pouze ke vzájemné gravitační interakci mezi planetárními embryi (gravitační rušení Jupiterem je zde slabé). Excentricity obíhajících planetárních embryí proto nebyly veliké, a pokud docházelo ke srážkám, dělo se tak zpravidla při malých rychlostech. Naproti tomu v oblastech vzdálenějších od Slunce (ve vzdálenostech mezi 2 až 5 au od Slunce) docházelo k výrazným gravitačním poruchám způsobeným Jupiterem, zejména k *rezonancím*, při

kterých jsou oběžné periody těles a Jupiteru v poměru malých přirozených čísel. Tyto rezonance mají za následek rychlý nárůst excentricity těles, což vede ke vzájemným kolizím při vysokých rychlostech. Výsledkem je *fragmentace* – vznik velkého množství menších těles. Tímto způsobem vysvětlujeme vznik těles, která dnes pozorujeme v oblasti hlavního pásu planetek.

Je také dobré si uvědomit, že mnohá z planetárních embryí byla z oblasti mezi 2 až 5 au vypuzena ještě dříve, než došlo k jejich kolizi s jiným tělesem. Pokud se těleso působením rezonance dostalo na výrazně excentrickou dráhu, leželo jeho přísluní hluboko v regionu budoucích terestrických planet a jeho odsluní blízko dráhy (nebo za drahou) Jupiteru. Taková tělesa se tedy mohla buď srazit s planetárními embryi obíhajícími v blízkosti Slunce, nebo mohla být při blízkém setkání s Jupiterem vymrštna mimo oblast původního protoplanetárního disku. Výsledkem této fáze vývoje planetárního systému, trvající několik desítek milionů let, byl vznik několika terestrických planet v oblasti 0,5 až 2 au od Slunce.

Migrace planet

Z akreční teorie vzniku planetárních systémů vyplývá, že velké planety Sluneční soustavy vznikly na prakticky kruhových drahách s podobnými sklony, což je však v rozporu s dnešními pozorovanými hodnotami excentricity a sklonů obřích planet. Akreční teorie rovněž předpovídá, že za drahou poslední planety by se měl nacházet disk planetesimál, který si zachoval svou původní strukturu – tělesa na kruhových drahách s nízkými sklony, přičemž celková hmotnost disku by měla být několikanásobně vyšší než hmotnost Země. Místo toho se zde nachází Kuiperův pás s tělesy o celkové hmotnosti menší než 0,1 hmotnosti Země obíhajícími na drahách s excentricitami až 0,3 a sklony až 40°. Uvedená fakta vedla k řadě modelů, jež se více či méně úspěšně pokoušejí pozorované skutečnosti vysvětlit.

Roku 2005 byl ve Francii představen nový model vývoje Sluneční soustavy, pro který se podle místa jeho vzniku vžilo označení „*model z Nice*“. Účelem tohoto modelu bylo vysvětlit pozorované hodnoty

excentricit a sklonů drah obřích planet. Tento model vznikl syntézou následujících, dříve objevených skutečností:

1. Poté, co byla Sluneční soustava zbavena primordiálního plynu, docházelo ke gravitační interakci planetesimál s planetami, díky které mohlo z důvodu zachování momentu hybnosti docházet k systematickým změnám velkých poloos obřích planet – k migraci. Při migraci Uranu a Neptunu do oblastí primordiálního disku byly dráhy planetesimál, které se v něm nacházely, při blízkých přiblíženích k těmto planetám dynamicky excitovány. Několik procent těchto planetesimál se dostalo do vzdáleností řádově 10^4 až 10^5 au od Slunce, kde posléze působením galaktických slapů planetesimály „zakotvily“ na nových drahách a vytvořily Oortův oblak komet. Většina planetesimál se po interakci se Saturnem, Uranem a Neptunem dostala na eliptické dráhy zasahující do blízkosti Jupiteru. Při těsném setkání s Jupiterem se planetesimály dostaly na hyperbolické dráhy a opustily Sluneční soustavu. Jupiter byl tímto způsobem nucen migrovat do vnitřních částí Sluneční soustavy, zatímco planety Saturn, Uran a Neptun migrovaly směrem ven.
2. Na planety, které se migrací dostaly až do disku planetesimál, působilo díky gravitačním interakcím slapové tření, které účinně tlumilo jejich excentricity a sklony.
3. Rozptýlení disku planetesimál (o celkové hmotnosti asi 50 Zemí) migrujícími planetami vyvolalo intenzivní bombardování různých částí Sluneční soustavy.

Model z Nice, který na základě těchto poznatků vznikl, předpokládal, že po vypuzení primordiálního plynu se ve Sluneční soustavě nacházela kompaktní konfigurace čtyř velkých planet na téměř kruhových drahách v blízkosti jediné roviny.

Jejich velké poloosy se pohybovaly od 5,5 do 17 au, přičemž oběžné doby Jupiteru a Saturnu byly v poměru menším než 2:1. Do vzdálenosti přibližně 20 au za poslední planetou se rozprostíral disk planetesimál, které byly dynamicky stabilní. Gravitační interakce planet s tímto diskem vedla k jejich pomalé migraci, po které prošly pla-

nety Jupiter a Saturn vzájemnou rezonancí 2:1, což zvýšilo jejich excentricity natolik, že se celý systém stal nestabilní. Tím došlo k destabilizaci drah ledových obrů Uranu a Neptunu, kteří se vlivem gravitačních poruch posunuli od Saturnu do disku planetesimál. Tím byla většina planetesimál rozptýlena po celé Sluneční soustavě, včetně vnitřních oblastí.

Dráhy ledových obrů se působením dynamického tření s okolím stabilizovaly v takových heliocentrických vzdálenostech, ve kterých je dnes pozorujeme.

Rozptýlené planetesimály způsobily masivní bombardování vnějších částí Sluneční soustavy. V době svého vzniku model z Nice předpokládal, že toto bombardování zasáhlo i její vnitřní části. Tato tělesa však nebyla jedinými, která mohla bombardování vytvořit. Radiální migrace Jupiteru a Saturnu vyvolala posun sekulárních rezonancí (tj. rezonance mezi periodami precese planetek a velkých planet), které zasáhly oblasti původního hlavního pásu planetek. Tím se část planetek dostala na dráhy s vysokými excentricitami, které začaly křížit dráhy planet a vyvolaly bombardování vnitřních částí Sluneční soustavy. Takto mohla být snížena celková hmotnost těles hlavního pásu planetek na dnes pozorovanou hodnotu, která může být jen 5 až 10 % té původní.

Prvotní varianta modelu z Nice sice dokázala vysvětlit některé důležité vlastnosti Sluneční soustavy, přesto měla řadu slabých míst. Například v nejjednodušším případě bychom si mohli představit, že planety jsou po svém vzniku rozmístěny náhodně. K tomu, aby dokázal popsat výše uvedené vlastnosti Sluneční soustavy, však model z Nice předpokládá konkrétní konfiguraci planet, ve které se Saturn a Jupiter nacházejí v blízkosti vzájemné rezonance 1:2. Pokud by byly od této rezonance dále, nemusely by jí při pomalé migraci, způsobené interakcí s planetesimálami, vůbec projít. Pokud by se naopak nacházely blízko, došlo by k rezonanci a následné destabilizaci vnějších částí Sluneční soustavy dříve, a vyvolané bombardování by časově neodpovídalo pozdnímu těžkému bombardování, jehož stopy ve Sluneční soustavě nalézáme.

Původní model z Nice popisoval vývoj Sluneční soustavy až od doby, kdy byl z disku již vypuzen primordiální plyn – později byl model rozšířen tak, aby zahrnoval i rané vývojové fáze Sluneční soustavy, kdy velké planety ještě obíhaly v plynném disku.

Planeta o hmotnosti srovnatelné s Jupiterem migruje v plynném disku směrem dovnitř. Tímto způsobem migrovaly v plynném disku Jupiter i Saturn. Saturn však díky své menší hmotnosti migroval rychleji. Tím klesal rozdíl velikých poloos Jupiteru a Saturnu a následně mohlo dojít k zachycení těchto planet ve vzájemné rezonanci 2:3. Na planety zachycené v rezonanci působil díky společné mezeře v disku, kterou planety vytvořily, výsledný moment síly, vyvolávající migraci obou „spřažených“ planet směrem ven.

Poté, co byl plynný disk rozptýlen, zůstal Jupiter ve vzdálenosti přibližně 5,4 au od Slunce. Pomalá migrace způsobená interakcí s diskem planetesimál a následné rezonance Saturnu s vnějšími planetami způsobily změny drah Jupiteru a Saturnu, které vyústily v další průchody rezonancemi 3:5 a 2:1.

Výhodou rozšířeného modelu je, že zachycení Jupiteru a Saturnu v rezonanci 2:3 při migraci v plynném disku je událost, která je v simulacích orbitálního vývoje planet v plynném disku pravděpodobnější a nezávisí podstatně na volbě počátečních podmínek.

Alternativní teorie vzniku planet

Popsaná akreční teorie dobře vysvětluje současnou podobu Sluneční soustavy, ovšem pokusy o její aplikaci na nově objevené extrasolární systémy často selhávají. Důvodem je skutečnost, že tyto systémy jsou často tvořeny velmi hmotným tělesem o hmotnosti až desetinásobku Jupiteru, které obíhá centrální hvězdu ve vzdálenostech i několikrát menších než planeta Merkur. Tento jev může mít dvě hlavní příčiny: buď dochází vlivem dynamického tření či jiných nestabilit k migraci velkých planet, jež se následně mohou spirálovitě zřítit na centrální hvězdu (a v našem systému nejsme schopni zjistit, zda k něčemu takovému v minulosti také nedošlo), nebo není akreční teorie tou jedinou, která vznik planetárního systému popisuje.

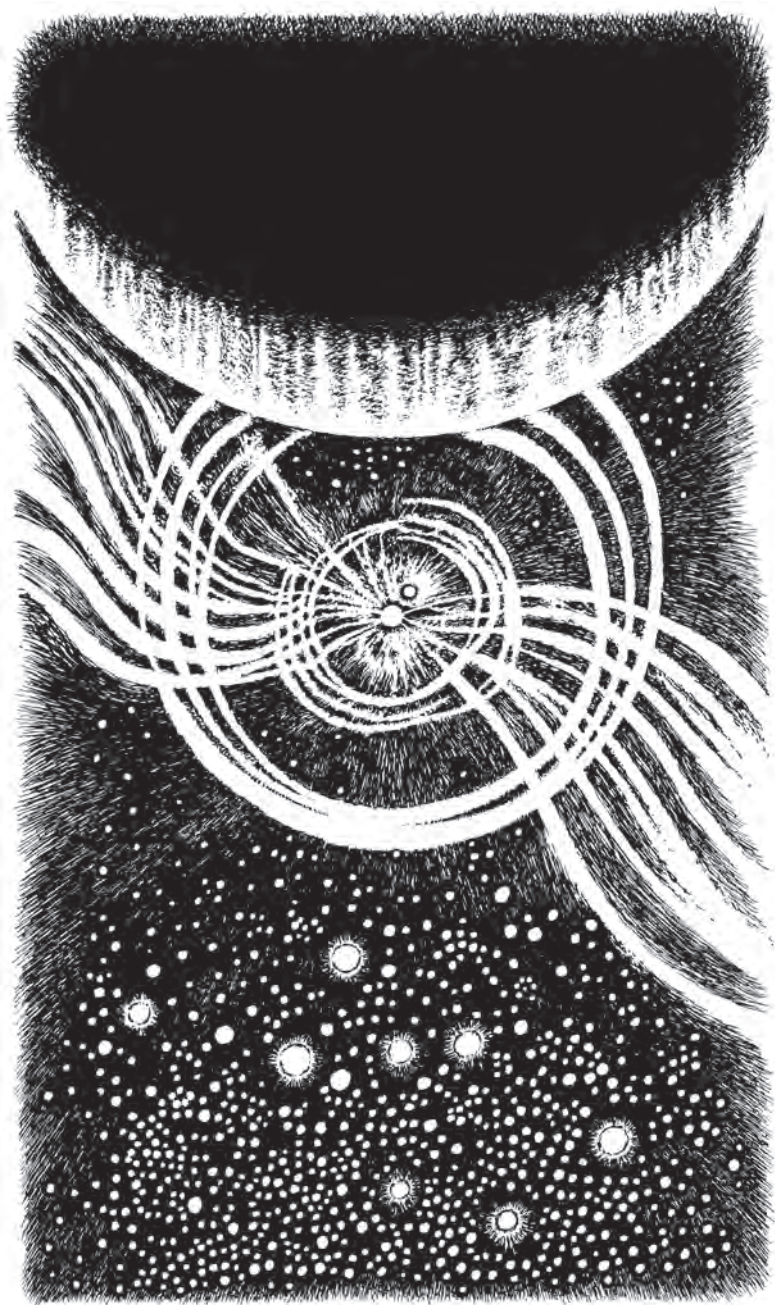
Jistou alternativou je teorie fragmentace zárodečného oblaku, ve kterém by mohly hmotné planety vznikat, podobně jako hvězdy, přímo zhroucením jednotlivých částí oblaku. Důležitou roli by v tom případě mohlo hrát magnetické pole, neboť gravitační hroucení takto málo hmotných objektů by bylo krajně neúčinné. Přítomnost globálních magnetických polí v difúzních mlhovinách byla jednoznačně prokázána a je otázkou, jakým způsobem ovlivňují vznik nestabilit a hroucení jednotlivých částí oblaku. Přítomnost magnetického pole významně napomáhá k přenesení rotačního momentu z hvězdy na planety a rovněž brání materiálu v obálce okolo hvězdy v jeho gravitačním zhroucení. Ve velkém měřítku naopak způsobuje zahuštění materiálu mlhovin do typických vláknitých struktur a napomáhá tak prvotní fragmentaci molekulárního mračna. Teorie vzniku planet přímou fragmentací z molekulárního mračna bez nutnosti vzniku protoplanetárního disku významně podporuje objev dosud nejstarší známé planety ve vesmíru.

Nejstarší planeta ve vesmíru

Milisekundový rádiový pulzar PSR B1620-26 se nachází v blízkosti centra kulové hvězdokupy M4 v souhvězdí Štíra, ve vzdálenosti přibližně 7 200 světelných roků od Země. Je součástí systému tří gravitačně vázaných těles. Vnitřní část systému tvoří neutronová hvězda s hmotností asi 1,4 Slunce a bílý trpaslík o hmotnosti 0,35 Slunce obíhající okolo společného těžiště s periodou 191 dní. Kolem těžiště této soustavy však obíhá ve vzdálenosti 50 au ještě další těleso s hmotností přibližně trojnásobku hmotnosti Jupiteru.

Samotný objev planety obíhající okolo neutronové hvězdy nebyl pro astronomy ničím novým. Roku 1994 byly u pulzaru PSR B1257+12 objeveny tři planety s hmotností srovnatelnou se Zemí, obíhající po kruhových drahách do vzdálenosti 1 au od centrální neutronové hvězdy.

Objev planety u pulzaru PSR B1620-26 však přinesl řadu překvapivých skutečností. V první řadě je to samotné odhalení původu vzniku této exotické soustavy. Jeden z možných scénářů vývoje



systému začíná u staré neutronové hvězdy vázané v binárním systému. Tato soustava se měkce střetla se soustavou hvězda-planeta a doprovodná složka neutronové hvězdy byla gravitací vymrštěna ze soustavy. Planeta poté zaujala místo na oběžné dráze okolo nově vzniklé soustavy neutronové hvězdy a hvězdy hlavní posloupnosti. Z té se postupem času stal červený obr, jehož hmota vyplnila celý Rocheův lalok a začala proudit přes akreční disk na neutronovou hvězdu. Tím došlo k jejímu rychlému roztočení a vznikl z ní milisekundový pulzar. Portrét soustavy je na protější straně.

Počáteční podmínky tohoto scénáře byly podrobeny řadě numerických simulací a ukázalo se, že v 15 % případů dojde k vytvoření podobné soustavy jako u pulzaru PSR B1620-26. Ve většině takových případů byla výsledná dráha planety desetkrát až stokrát větší než počáteční vzdálenost složek binárního systému.

Tato teorie má však dva velké nedostatky. Prvním problémem je fakt, že stáří milisekundového pulzaru by muselo být alespoň přibližně srovnatelné se stářím trojitého systému. Výpočty ukazují, že planeta obíhá v centru hvězdokupy po dráze s velkou poloosou asi 50 au, takže její dráha je vzhledem k velké hustotě hvězd v centru hvězdokupy dosti nestabilní. Odhadovaná životnost objevené soustavy je 3×10^7 let, tedy podstatně méně než odhadované stáří pulzaru (10^9 let). Doba životnosti soustavy se však významně prodlužuje v závislosti na vzdálenosti od centra hvězdokupy, kde klesá hustota hvězd. V polovině vzdálenosti mezi středem a okrajem je již životnost systému na úrovni 10^9 let. Je však možné, že se soustava do blízkosti centra hvězdokupy jen promítá, ale ve skutečnosti je na vzdálené oběžné dráze, jež sahá daleko od jádra hvězdokupy a dovoluje soustavě trávit většinu času mimo husté středové partie.

Druhý problém se týká excentricity dráhy centrální dvojhvězdy. Uvedený model vzniku soustavy ukazuje, že zároveň s přechodem planety na vnější oběžnou dráhu dojde kvůli působení slapových sil k cirkularizaci drah vnitřního systému. To je však v rozporu s nově naměřenými daty, takže vyšší excentricita vnitřní dráhy zůstává nevysvětlena. Bylo by možné ji vysvětlit druhotnou kolizí s další hvězdou, která by však zároveň nejspíše způsobila nestabilitu na

vnější oběžné dráze. Výpočty ukazují, že k podobným druhotným setkáním skutečně docházet může, dokonce jsou vzhledem k hustotě hvězd v centru hvězdokupy velmi častá. Od doby svého vzniku by tento systém prošel nejméně deseti takovými setkáními, což snižuje pravděpodobnost udržení planety na vnější oběžné dráze pod 1 %.

Jiný model proto předpokládá existenci milisekundového pulzaru již v době před kolizí se soustavou hvězda-planeta, ovšem numerické simulace ukazují, že v tomto případě je pravděpodobnost zachycení planety oproti pravděpodobnosti zachycení hvězdy zhruba pětikrát menší.

Bez ohledu na výše uvedené problémy však nejnovější data naměřená s pomocí Hubblova vesmírného dalekohledu přikládají větší váhu prvnímu modelu. Například se ukázalo, že bílý trpaslík – sekundární složka trojčlenného systému – vznikl až po vytvoření tohoto systému. Pravděpodobná platnost prvního modelu však přináší obrovský zvrat do našich představ o vzniku planet a planetárních systémů.

I když pomineme samotný fakt, že kulové hvězdokupy jsou vzhledem k častým gravitačním kolizím hvězd a vzhledem k malému zastoupení těžších prvků zcela nevhodnými místy pro tvorbu planet, ukazuje se, že pro splnění všech podmínek platnosti prvního modelu musíme předpokládat, že planeta se zformovala na okraji kulové hvězdokupy M4 před více než 12,5 miliardami let!

Standardní teorie vzniku planetárních systémů akrecí z protoplanetárního disku však předpokládá, že obří plynné planety vznikaly až druhotně, nabalením plynů na pevná jádra o velikosti Země. Takový způsob vzniku je však vzhledem ke stáří planety téměř vyloučen – v době jejího zformování ještě neexistovalo dostatečné množství těžších prvků potřebných k vytvoření pevného jádra. Ke slovu proto přichází alternativní teorie rychlého vzniku planet gravitačními nestabilitami přímo ze zárodečných disků. Je-li tato teorie pravdivá, pak musíme konstatovat, že planet se ve vesmíru nachází ještě mnohem více, než jsme se dosud domnívali – a to je další závažný důsledek modelu vzniku této bizarní trojčlenné soustavy.

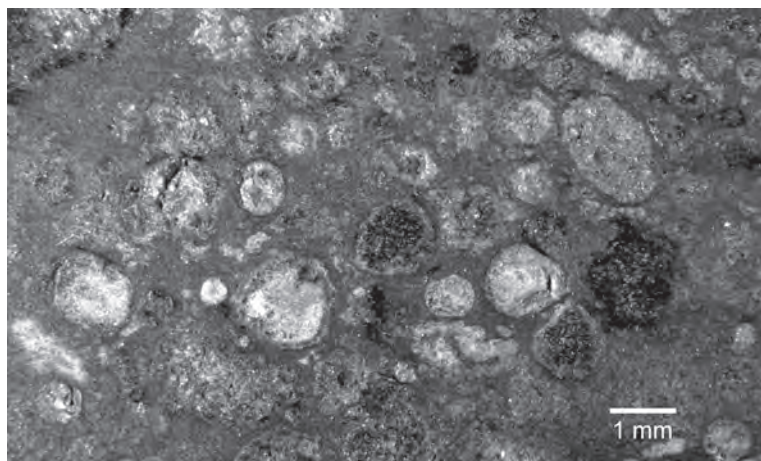
Pozůstatky raných fází

Chondrity. Pátrání ve Sluneční soustavě nám přináší cenná svědectví o její dávné minulosti. Mezi nejstarší památky na počáteční fáze vzniku Sluneční soustavy patří meteority ze skupiny tzv. chondritů³. Jde o nejstarší materiál, který máme ve Sluneční soustavě k dispozici. Chondrity můžeme považovat za jistou kosmickou analogii pozemských sedimentů – obsahují materiál kondenzátů, které při ochlazování vznikaly z protoplanetárního disku. Součástí chondritů jsou tzv. chondrule (chondry), kulovitá zrnka obsahující například olivíny a pyroxeny. Původ chondrulí nebyl dosud zcela objasněn, má se ale za to, že prošly velmi rychlou tepelnou přeměnou, během které je zakulatilo povrchové napětí taveniny. Mezi možné příčiny roztavení řadíme i rozsáhlé sluneční erupce či mohutné blesky, vyvolané blízkými zdroji záření gama nebo magnetary. O globálním charakteru procesu tvorby chondrulí svědčí fakt, že mají všechny jednotnou velikost kolem 1 mm. Mezi nejprimitivnější (tzn. nejméně přetvořené) chondrity řadíme uhlíkaté chondrity, které kromě zrn uhlíku v čistém i vázaném stavu obsahují i bílé vápenohlinité inkluze – první krystalickou formu látky, která ve Sluneční soustavě zkondenzovala. Mezi nejznámější uhlíkaté chondrity se řadí meteorit Allende, který dopadl na Zemi roku 1969 poblíž stejnojmenné vesnice v Mexiku. Důkladná analýza spolu s datováním radioizotopovými metodami prokázaly, že zárodečný oblak byl během svého smršťování nejméně třikrát obohacen materiálem pocházejícím z výbuchu blízkých supernov.

Trojané Jupiteru a Neptunu. U Jupiteru nacházíme populaci Trojanů, malých těles v rezonanci 1:1, která obíhají kolem Slunce v okolí Lagrangeových bodů L4 a L5⁴ se stejnou periodou jako planeta. Tato populace je velmi početná, v současné době bylo objeveno

3 **Chondrit** – druh kamenného meteoritu. Je složený z primitivní hmoty, která se svým obsahem blíží složení materiálu, ze kterého vznikala Sluneční soustava.

4 **Lagrangeovy librační body L4 a L5** – místa na oběžné dráze planety (zde Jupiteru a Neptunu), která spolu se středem Slunce a středem planety tvoří rovnostranný trojúhelník („obíhají“ Slunce synchronně s planetou, L4 je 60° před planetou a L5 je 60° za planetou). V těchto místech je vyrovnán účinek všech gravitačních a odstředivých sil. Tělesa nacházející se v těchto místech se nazývají Trojané.



Typické chondrule v jednom z úlomků meteoritu Allende.

Zdroj: Goethe Universität, Dominik Spahr.

přes 6000 takovýchto těles. U Neptunu je dnes sice známo jen několik těles v rezonanci 1:1, ale při uvážení observačního limitu lze odhadnout, že populace Trojanů Neptunu bude minimálně stejně početná jako populace Trojanů Jupiteru.

Při pátrání po původu Trojanů lze dynamickými studiemi dospět k tomu, že okolí libračních bodů Jupiteru je dnes velmi stabilní a je prakticky vyloučeno, aby se do ní dostalo z vnějších oblastí těleso, které by se posléze stalo Trojanem. V úvahu tedy přicházely dvě varianty původu stabilní populace Trojanů:

1. První varianta předpokládala uzavření těles v rezonančních oblastech při rychlém nárůstu hmotnosti Jupiteru v závěrečných fázích jeho vzniku. Tento scénář však nedokáže vysvětlit některé pozorované vlastnosti Trojanů, zejména široké rozmezí jejich sklonů, které přesahují i 40° .
2. Druhá varianta předpokládá, že v období, kdy se planety Jupiter a Saturn nacházely v blízkosti rezonance 1:2, uplatňovaly se také sekundární rezonance. Během těchto sekundárních rezonancí jsou oblasti libračních bodů destabilizovány, což znamená, že malá tělesa jimi mohou volně „proplouvat“. Po

odeznění sekundární rezonance se však tyto oblasti staly náhle opět stabilní a planetesimály, které se v nich v daný okamžik nacházely, zde zůstaly vázány.

Právě druhá varianta dokáže vysvětlit pozorované vlastnosti Trojanů Jupiteru, což může být považováno za další úspěch modelu z Nice.

Nepravidelné měsíce velkých planet. Nepravidelné měsíce velkých planet jsou tělesa patrně podobná jádrům neaktivních komet, která obíhají kolem velkých planet v progradním nebo retrogradním smyslu ve velkých vzdálenostech od centrálního tělesa, kde je jeho gravitační působení jen o málo větší než gravitační působení Slunce. Důležitou vlastností systému nepravidelných měsíců je fakt, že pokud srovnáme jejich velkou poloosu s Hillovou sférou gravitačního vlivu planety, dostaneme u všech těles velmi podobné výsledky počtu měsíců v závislosti na vzdálenosti. Tato skutečnost oslabuje předchozí hypotézy o jejich vzniku zachycením při náhlém nárůstu hmotnosti centrální planety nebo třením o původní rozsáhlou atmosféru planety. K zachycení těles na pozorovaných drahách mohlo dojít v období nestability velkých planet, kdy docházelo k jejich blízkým přiblížením. Kometární jádra rozptýlená z destabilizovaného primordiálního disku planetesimál, která se nacházela v blízkosti těchto dvou přibližujících se planet, mohla být zachycena na drahách, které dnes pozorujeme.

Struktura Kuiperova pásu. Dynamika těles Kuiperova pásu⁵ v sobě nese stopy událostí, jež provázely rané fáze vývoje Sluneční soustavy. Z tohoto hlediska jsou důležité zejména tři následující vlastnosti Kuiperova pásu:

1. Současná hmotnost všech těles Kuiperova pásu je odhadována na 0,1 hmoty Země. Tato hodnota není v souladu s akrečními modely, které předpovídají hmotnost větší než 10 Zemí.

⁵ **Kuiperův pás** – oblast malých těles za drahou Neptunu. Vnitřní okraj pásu se nachází ve vzdálenosti asi 30 au a vnější asi ve vzdálenosti 50 au od Slunce. Je „položen“; do roviny ekliptiky. Průměry těles nepřesahují (až na ojedinělé výjimky) 300 km. Celková hmotnost všech těles se odhaduje na 0,1 hmotnosti Země. Nejznámějším tělesem Kuiperova pásu je Pluto.

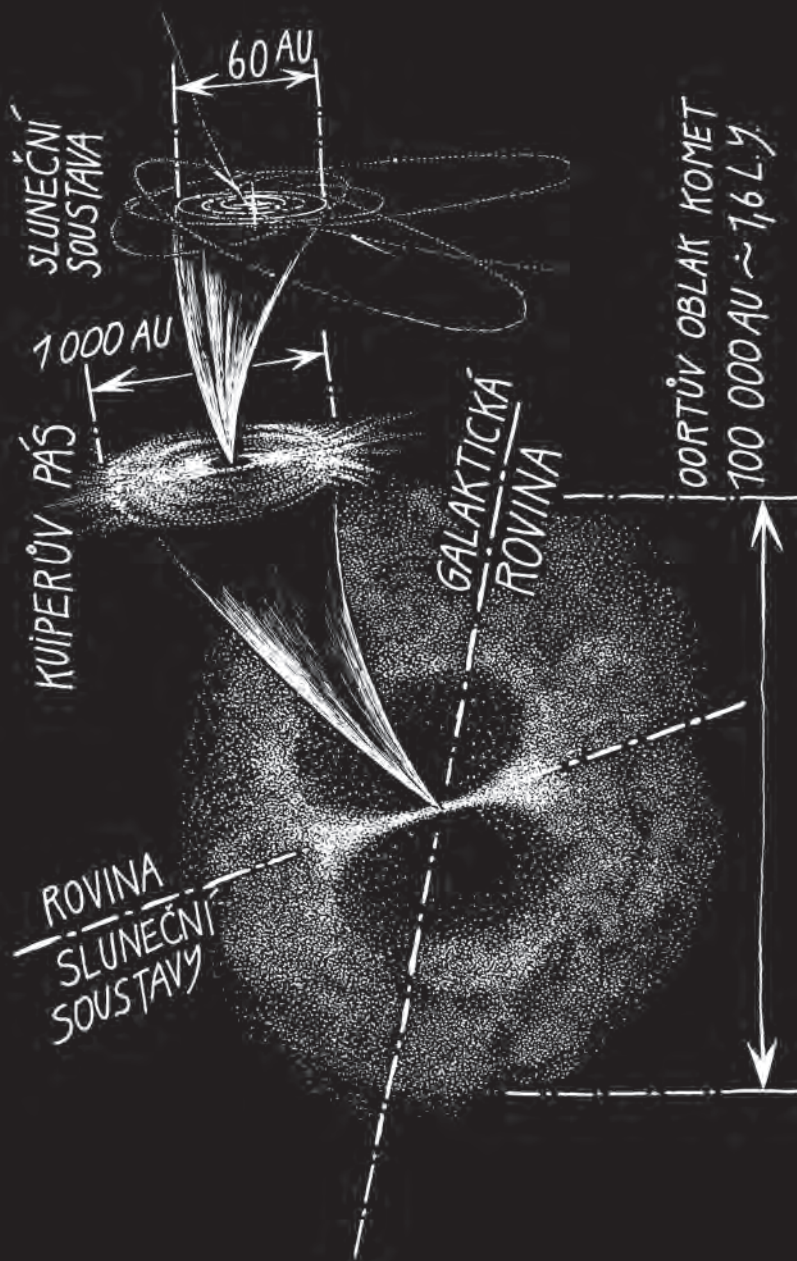
2. Kuiperův pás je dynamicky excitován, tzn. nacházíme v něm tělesa s vysokými sklony oběžných drah a s vysokými excentricitami. Tato skutečnost je opět v rozporu s akrečními modely, jež ukazují, že relativní rychlosti mezi blízkými objekty musí být dostatečně malé, aby se z nich v budoucnu vytvořila tělesa současných rozměrů.
3. Kuiperův pás podle současných poznatků končí na hranici přibližně 50 astronomických jednotek.

Současná pozice Neptunu a hmotnostní deficit Kuiperova pásu implikují, že protoplanetární disk původně končil na hranici 30 au. Studium migrace v takovém disku ukazuje, že planeta se nutně nemusí zastavit přesně na okraji disku. Ve skutečnosti, z důvodu nutnosti zachování momentu hybnosti během procesu migrace, závisí konečná pozice planety více na momentu hybnosti disku než na poloze jeho okraje. Disk s okrajem sahajícím přibližně do vzdálenosti 30 au (přesná hodnota závisí na hmotnosti disku) může vysvětlit současnou dráhu Neptunu.

Původ pozdního velkého bombardování. Pozdní těžké bombardování (anglicky *Late Heavy Bombardment*, LHB) je označení pro období, při kterém na povrchu Měsíce vznikly rozsáhlé a relativně mladé impaktní pánve o průměru větším než 300 km, jako například *Mare Imbrium*. Na původ a rozsah tohoto bombardování, jež muselo zasáhnout i jiná tělesa Sluneční soustavy, existovaly od doby jeho objevu dva odlišné názory.

První předpokládal, že prakticky všechny impaktní pánve byly na Měsíci vytvořeny dopadem planetesimál, které neakreovaly na terestrické planety. Alternativní teorie předpokládala, že většina moří byla vytvořena během náhlého nárůstu impaktní činnosti v období před přibližně 3,9 miliardami let.

Model z Nice přirozeným způsobem vysvětluje vznik pozdního těžkého bombardování náhlým tokem planetek nebo komet z vnějších do vnitřních oblastí Sluneční soustavy. Podle tohoto modelu bylo bombardování spuštěno pozdními orbitálními nestabilitami



velkých planet, způsobenými interakcí těchto planet s transneptunickým diskem planetesimál o hmotnosti 20 až 60 Zemí. V tomto scénáři vytvořily bombardování celkem tři skupiny projektilů: komety z původního transneptunického disku, planetky z vnějších oblastí hlavního pásu a planetky pocházející z dnes prázdné oblasti mezi vnitřním okrajem hlavního pásu a Marsem. Poslední jmenovaný zdroj mohl být hlavním zdrojem pozdního těžkého bombardování, které vytvořilo většinu kráterů na povrchu Měsíce, v menší míře k němu přispěly planetky ze současných vnějších okrajů hlavního pásu. Planetky dopadaly v průběhu pozdního těžkého bombardování na všechny terestrické planety a jsou hlavním zdrojem vody na Zemi. Dříve byly za hlavní zdroj vody na naší planetě považovány komety. Ukázalo se ale, že mají jiné zastoupení lehkého a těžkého vodíku, a proto být dominantním zdrojem vody na Zemi nemohou.

Je zřejmé, že vznik Sluneční soustavy byl poměrně komplexní proces, který však byl, přes množství dílčích dějů a jevů, jež jej ovlivňovaly, logickým důsledkem událostí doprovázejících vznik našeho Slunce. Přestože máme problémy s přesným odhadem počátečních podmínek, vykazují počítačové simulace dobrou shodu s pozorovaným stavem. Tvorba planet ve Sluneční soustavě započala záhy po vzniku (nebo současně se vznikem) Slunce a probíhala v časovém měřítku maximálně desítek milionů let, což je z astronomického hlediska doba nesmírně krátká.

Přestože teorie akrece planet z protoplanetárního disku nemusí popisovat obecný způsob vzniku planetárních soustav, hrála akrece při utváření Sluneční soustavy rozhodující roli. Naopak teorie fragmentace molekulárního mračka magnetickými a gravitačními nestabilitami může zřejmě osvětlit vznik osamocených planet ve velkých vzdálenostech od hvězdy či v obřích mlhovinách s nedostatkem těžších prvků.

Každopádně vidíme, že proces tvorby planet není ve vesmíru ničím výjimečným; máme plné právo se domnívat, že Sluneční soustava je jen jednou z mnoha miliard planetárních soustav v Galaxii. V následující kapitole se budeme věnovat pokusům o jejich odhalení.

Víte, že?

■ Víte, že některé sondy umísťujeme do Lagrangeových bodů soustavy Slunce-Země? V těchto místech se vyrovnají gravitační síly od Slunce a Země s odstředivou silou působící na sondu obíhající kolem Slunce. V bodě L1 (1,5 milionu kilometrů od Země směrem ke Slunci) se umísťují sondy pro pozorování Slunce, v bodě L2 (1,5 milionu kilometrů od Země ve směru od Slunce) se umísťují sondy pro pozorování vzdáleného vesmíru.

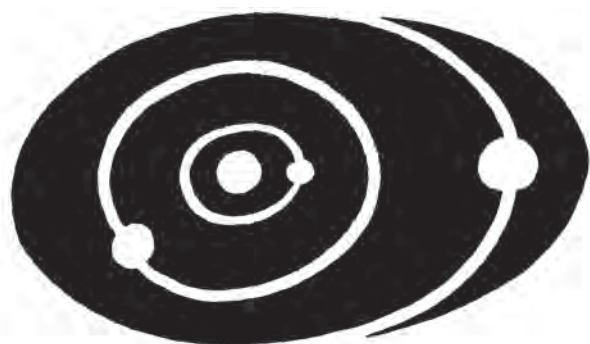
■ Víte, že model z Nice vznikl v roce 2005 ve francouzské Observatoři na azurovém pobřeží (Observatoire de la Côte d'Azur)? Tato observatoř se nachází ve francouzském městě Nice a vznikla v roce 1988 spojením Observatoře v Nice a Vědeckého centra pro geodynamiku a astrometrii (CERGA).

■ Víte, že asteroid a planetka je jedno a to samé? Tyto malé objekty vypadají na obloze na první pohled jako malé svítící body připomínající hvězdičky, proto název *asteroid* z latinského slova *aster*. Ve skutečnosti jde o malá tělesa bez vlastního zdroje světla, pojmenování *planetka* je proto výstižnější.

■ Víte, že hlavní pás planetek leží mezi Marsem a Jupiterem? Největším tělesem je trpasličí planeta Ceres. Objevena byla v roce 1801 Giuseppem Piazzim. Průměr má 974 kilometrů. Slunce oběhne jednou za 4,6 roku. Pojmenována je po římské bohyni úrody. První polovinu 19. století byla považována za planetu, ale stihl ji stejný osud jako Pluto ve století dvacátém.

Poučení na závěr: Pátrání po vzniku čehokoli může vést ke značné pluralitě názorů. Chcete-li se přiblížit pravdě, musíte s tím počítat. Chcete-li mít klid, raději po ničem nepátrejte.





10. Hledání cizích světů

„V pusté jsme nebeské končině,
Slunce i se planetami,
jinde je světů jen naseto,
my jsme tak světově sami!“

Jan Neruda, Písně kosmické

Epikúros ze Samu (341–270 př. n. l.), významný řecký filosof, přívrženec Demokritův, tvrdil, že „*Existuje nekonečně mnoho světů, podobných tomu našemu, i naprosto odlišných*“. Naproti tomu jeho současník Aristotelés ze Stageiry (384–322 př. n. l.) byl skálopevně přesvědčen, že „*Nemůže být více světů než jeden*“. Bohužel, díky Aristotelově autoritě nebyly názory na existenci jiných planet brány příliš vážně. Ještě v 16. století vedly představy Giordana Bruna (1548–1600) o vesmíru složeného z „nesčetných světů“ k jeho nařčení z kacířství a upálení.

Teprve teorie popisující vývoj našeho planetárního systému ukázala, že vznik planet Sluneční soustavy je přirozeným důsledkem vzniku Slunce, a tehdy bylo namístě se začít ptát, zdali má náš planetární systém ve vesmíru své paralely.

První pokusy o odhalení extrasolárních planet selhaly, stejně jako selhávaly na počátku pokusy o změření paralaxy¹ hvězd – naše přístroje k tomu prostě nestačily. Velkým povzbuzením pro astronomy byl proto objev protoplanetárních disků, který naznačoval, že pátrání po exoplanetách nebude marné.

1 **Paralaxa** – úhlový rozměr velké poloosy elipsy, kterou hvězda zdánlivě opisuje na obloze vzhledem ke vzdálenějším objektům. Tento zdánlivý pohyb blízkých hvězd je způsoben pohybem Země kolem Slunce (na hvězdu se díváme odjinud v létě a odjinud v zimě). Čím je hvězda blíže, tím je její paralaxa větší. Největší je u Proximy Centauri, kde činí 0,76".



Protoplanetární disky

Rozvoj astronomických pozorování v infračerveném oboru spektra přinesl nové možnosti detekce objektů, které ve viditelném oboru prakticky nezáří, nebo září jen velmi málo v porovnání s blízkou hvězdou či jiným objektem. Velkým přínosem se pro toto odvětví astronomie stala družice IRAS (*InfraRed Astronomy Satellite*), která byla na oběžnou dráhu vypuštěna v lednu 1983 a ještě během téhož roku zmapovala na 95 % oblohy v infračerveném pásmu 12 až 100 μm . Pomocí heliem chlazeného beryliového zrcadla o průměru 57 cm objevila sonda prachoplynné disky u hvězd Vega, Betelgeuse, Fomalhaut a Beta Pictoris. Právě poslední jmenovaná hvězda a její protoplanetární prstence byly cílem průzkumu mnoha projektů včetně pozorování největšími a nejvýkonnějšími dalekohledy jako jsou HST, VLT či Keckovy dalekohledy.

Obrázek 32 v barevné příloze zobrazuje několik portrétů prachoplynného disku kolem hvězdy Beta Pictoris (druhé nejjasnější hvězdy v souhvězdí Malíře). Horní snímek z širokoúhlé kamery Hubbleova dalekohledu ukazuje celý disk, který sahá od centrální hvězdy až do vzdálenosti 750 au. Neobvyklé zjasnění v pravé horní části disku napovídá, že prach zde byl vytlačen nad hustou centrální rovinu, což mohlo způsobit hmotné těleso obíhající okolo hvězdy. Další obrázek ze spektrometru STIS Hubbleova dalekohledu detailně zachycuje část disku do vzdálenosti asi 200 au od hvězdy. Zvlnění a nerovnoměrnosti v jeho uspořádání naznačují možnou přítomnost několika oběžnic. Prostřední snímek byl pořízen v mikrovlnném oboru pozemním dalekohledem ESO ADONIS o průměru 3,6 metru Evropské jižní observatoře (ESO). Světlo z centrální oblasti o průměru asi 40 au je výrazně zeslabeno koronální maskou. Na posledním snímku jsou dobře patrné změny uspořádání protoplanetárního disku v krátkém období pouhých patnácti let.

Na obrázku 33 v barevné příloze je další snímek rodících se planetárních soustav. Jde o snímek okolí hvězdy AU Microscopii z let 2007 až 2017. Hubbleův vesmírný dalekohled zde nepřímo pozoroval ledové částice přibližně desetkrát větší, než jsou rozměry

běžných prachových zrn v mlhovinách. Hvězda je vzdálena 32 světelných roků a její stáří odhadujeme na pouhých 12 milionů let. V horní části obrázku je patrné světlo odražené od zbytku prachu v disku kolem hvězdy. Na disk se díváme z boku, strukturou se podobná Saturnovým prstencům. Samotná hvězda je zakryta koronální maskou, takže neruší při pozorování.

Hnědí trpaslíci

V souvislosti s extrasolárními planetami se musíme nutně zmínit o tzv. *hnědých trpaslících*, objektech, jejichž hmotnost leží mezi hmotností planet a hmotností hvězd. Proč je však neřadíme právě k planetám nebo k hvězdám? A ke kterému z těchto dvou typů těles mají hnědí trpaslíci blíže?

Samotná existence hnědého trpaslíka byla předpovězena dlouho před tím, než byl první takový objekt v roce 1995 objeven. Bylo totiž rozumné předpokládat, že křivka rozložení hmotností těles ve vesmíru je spojitá a že tedy musí existovat objekty, které by svou hmotností tvořily přechodové stadium mezi planetou a hvězdou.

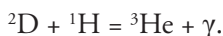
Přes určitou podobnost s oběma kategoriemi se jeví užitečné pokládat jej za samostatnou třídu těles. Přestože hnědý trpaslík rozhodně nelze považovat za hvězdu, mají k nim velice blízko, mnohem blíže než k planetám. Nejde přitom jen o jejich hmotnost, ale především o způsob vzniku. Počítačové simulace ukazují, že tak hmotná tělesa, jakými hnědí trpaslíci jsou, vznikají nejčastěji zároveň se svými hvězdnými sourozenci fragmentací původní pramlhoviny, jen zřídka z akrečního disku centrální hvězdy.

Osud hnědého trpaslíka je, ostatně jako osud jakéhokoli jiného objektu, určen jeho počáteční hmotností; ta je u těchto objektů menší než asi 0,08 hmotnosti Slunce. Zásadní rozdíl mezi hvězdou a hnědým trpaslíkem spočívá v tom, že teplota v nitru hnědého trpaslíka, vznikajícího kolapsem prachoplynného mračna, nikdy nedosáhne přibližně 10 milionů kelvinů, při kterých jsou termojaderné reakce s to krýt energetické ztráty způsobené vyzařováním povrchu.

Objekt se proto nadále gravitačně hroutí do doby, než dojde k elektronové degeneraci vnitřních vrstev. Tlak v elektronově degenerovaném plynu² prakticky vůbec nezávisí na teplotě, kontrakce objektu jako celku se proto zastaví. Svrchní vrstvy, kterých se elektronová degenerace zatím nedotkla, nadále gravitačně kontrahují, ale poloměr hnědého trpaslíka se s časem mění již jen zcela nepatrně. Poté, co zdegenerují i svrchní vrstvy, se kontrakce zcela zastaví.

Protože povrchová teplota hnědého trpaslíka je nenulová, dochází k další ztrátě energie vyzařováním. Děje se tak výhradně na úkor vnitřní energie, potenciální energie se nemění. Objekt postupně chladne na povrchu i uvnitř, jeho zářivý výkon klesá. Hnědý trpaslík se pozvolna stává nezářícím černým trpaslíkem, chladným tělesem tvořeným degenerovaným plynem, převážně vodíkem.

Při teplotách nad milion kelvinů však mohou v hnědém trpaslíku začít probíhat prvotní deuteriové reakce podle schématu:



Pro hnědého trpaslíka s hmotností 15 Jupiterů vydrží spalování deuteria jako přídatný zdroj zářivé energie asi na dobu sto milionů let. Ačkoliv povrchové teploty těchto těles jsou vesměs nižší než 2 000 K, jejich vyzařování v blízké infračervené oblasti zřetelně převyšuje očekávání pro absolutně černá tělesa, a to usnadňuje jejich přímou detekci, zejména pokud jde o tělesa v raných stádiích vývoje. Během prvních tří miliard let totiž klesne svítivost hnědých trpaslíků o plně čtyři řády, tj. o 10 magnitud³.

Pro objekty s hmotností nižší než 13 Jupiterů lze příspěvek dílčích termojaderných reakcí do celkového zářivého výkonu již naprosto zanedbat. Tím je též prakticky definováno rozhraní mezi hnědými trpaslíky a obřími extrasolárními planetami. V roce 1998 byla známá

2 **Degenerovaný plyn** – plyn stlačený natolik, že jeho chování určují především kvantové vlastnosti, a stavová rovnice se proto odlišuje od běžných plynů. Tlak degenerovaného plynu nezávisí na teplotě, ale pouze na hustotě.

3 **Magnituda** – logaritmická míra jasnosti objektu zvolená tak, aby hvězdy s rozdílem pěti magnitud měly podíl vzájemných jasností 1:100.

spektrální posloupnost⁴ W – O – B – A – F – G – K – M rozšířena o další spektrální typy L a T (viz strana 60). V tomto spektru jsou díky malé povrchové teplotě výrazné molekulové pásy oxidů, zejména titanu, a hydridů železa a chrómu. U typu T je typický výskyt absorpčních čar těžších prvků, metanu a vody.

Nutno ještě podotknout, že hnědí trpaslíci nejsou ve skutečnosti hnědí, ale červení – pojem červený trpaslík jsme však již dříve zavedli pro málo hmotné hvězdy hlavní posloupnosti spektrálních typů K a M. Hlavní rozdíly mezi hnědými trpaslíky a obřími planetami ukazuje tabulka na protistraně.

Hledáme-li hnědé trpaslíky jako průvodce větších hvězd, můžeme aplikovat prakticky všechny metody, které používáme k hledání extrasolárních planet (viz dále). Podstatně snadněji je přitom můžeme detekovat i přímo. Mladé hnědé trpaslíky můžeme pomocí současných dalekohledů najít poměrně lehce, přestože jejich svítivost dosahuje hodnot jen kolem 10^{-4} až 10^{-5} svítivosti Slunce. Jak je ale rozlišíme od velice chladných červených trpaslíků? Používají se k tomu dva testy spektra, lithiový a metanový.

Nejpozději po zhruba 100 milionech let vyhoří v každé hvězdě její zásoby lithia, které se snadno slučuje s protonem podle schématu:



Najdeme-li proto v daném objektu spektrální čáry lithia a určíme-li stáří objektu na více než 100 milionů let, pak jde o hnědého trpaslíka, ve kterém kvůli malé hmotnosti nemohlo dojít k zapálení účinných termojaderných reakcí.

Další test je založen na skutečnosti, že při teplotách nad 2 500 K jsou molekuly metanu zcela disociovány. Každý objekt, v jehož spektru nacházíme výrazné absorpční molekulové pásy metanu, je příliš chladný na to, aby mohl být hvězdou hlavní posloupnosti.

⁴ **Spektrální třída** – rozdělení hvězd podle charakteristik jejich spekter do základních tříd W, O, B, A, F, G, K, M, L, T. Nejteplejší, modrofialové hvězdy mají spektrum označené W, nejchladnější hvězdy spektrálních tříd M, L a T jsou červené. Spektrální třída odpovídá zejména povrchové teplotě hvězdy.

	hnědý trpaslík	obří planeta
vznik	většinou kontrakcí z protostelární mlhoviny	většinou akrecí z protoplanetárního disku
záření	ve viditelném oboru po dobu několika miliard let	září jen v infračerveném a rádiovém oboru, nezáří vizuálně
hmotnost	13 až 80 Jupiterů	do 13 Jupiterů

Astronomové byli velmi překvapeni, když americká rentgenová družice Chandra (pojmenována po indickém fyzikovi Subrahmanyanu Chandrasekharovi) detekovala v prosinci 1999 rentgenový výtrysk z hnědého trpaslíka LP 944-20. Uvolněná energie byla srovnatelná s malou sluneční erupcí a byla milionkrát větší než rentgenové emise pozorovatelné na Jupiteru. Předpokládá se, že uvolněná energie má původ v turbulentním plazmatu pod povrchem hnědého trpaslíka. Mohutné proudy vybudí na povrchu erupci, která má za následek rentgenovou emisi. LP 944-20 je starý asi 500 milionů let a má hmotnost 60 Jupiterů, tedy cca 6 procent hmotnosti Slunce. Jeho průměr je vůči Slunci desetinový a jeho rotační perioda kratší než 5 hodin. Nachází se na jižní obloze v souhvězdí Pece a je jedním z nejlépe sledovatelných objektů svého druhu, protože je ve vzdálenosti pouhých 16 světelných roků od Země.

V barevné příloze na obrázku 35 naleznete mlhovinu S106 u hvězdy IRS 4 (*InfraRed Source 4*) v souhvězdí Labutě, která leží asi 2 000 světelných roků daleko. Detailní rozbor snímku v infračervené oblasti spektra odhalil stovky hnědých trpaslíků.

Po prvotním selhání astrometrických pozorování, způsobeném mezní citlivostí pozemských přístrojů kvůli turbulencím v atmosféře, byla vyvinuta celá řada technik, kterými umíme odhalit existenci neviditelného souputníka hvězdy nepřímou, pomocí detekce vlivů, jimiž působí obíhající planeta na své okolí.

Detekční metody

Poziční astrometrie. Touha astronomů najít nové planety je prastarého data. Již roku 1821 uveřejnil Alexis Bouvard (1767–1843) pozorování odchylek v pohybu Uranu, poslední tehdy známé planety. V létě 1846 uveřejnil Urbain Le Verrier (1811–1877) výpočty, v nichž ukázal, že pohyb Uranu je rušen další planetou, spočítal její hmotnost a předpověděl její polohu. A již 23. září 1846 byla planeta skutečně nalezena necelý stupeň od vypočtené polohy.

O dva roky dříve zaznamenal Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) nepatrný pohyb hvězd Sírius a Prokyon. U Síria činila odchylka od vlastního pohybu asi $3''$ a její perioda 49 let, u Prokyonu $1''$ s periodou 40 let. Bessel z pozorování usoudil, že hvězdy obíhají spolu s neviditelnými průvodci po eliptických drahách kolem společného těžiště. Oba tehdy ještě neznámí průvodci byli nalezeni o několik desetiletí později: Sírius B roku 1862, Prokyon B roku 1896.

Objevy neviditelných průvodců hvězd spolu s nalezením planety Neptun na základě naměřených odchylek pozic Uranu byly klíčovými událostmi, které ukázaly cestu hledání oběžnic vzdálených hvězd. Narodila se nová metoda zvaná poziční astrometrie.

Pozorovací technika se stále zlepšovala, a tak byla v letech 1927 až 1937 vystopována další hvězda s pravděpodobným neviditelným průvodcem – hvězda Ross 614. Existenci jejího průvodce se podařilo prokázat až roku 1955 pomocí pětimetrového reflektoru na Mount Palomaru. Průvodce, označený jako Ross 614 B, patří se svojí hmotností 0,08 Slunce k nejmenším známým hvězdám: je jen asi osmdesátkrát hmotnější než Jupiter a velká poloosa jeho dráhy je asi čtyřikrát větší než střední vzdálenost Země od Slunce. Nemohlo by se tedy jednat o planetu?

Nikoli. Měla-li by tato domnělá planeta pouze odrážet světlo od své hvězdy, bylo by její pozorování technickými prostředky té doby zdaleka nedosažitelné. Ross 614 B tedy svítí vlastním světlem, takže se zcela jistě jedná o hvězdu, i když velmi malou. Poziční astrometrie

se tehdy jako metoda odhalování extrasolárních planet kvůli ohromnému rozdílu mezi hmotností hvězdy a planety ještě neosvědčila. Teprve v současnosti jsme svědky jejího postupného návratu – přesnost, s jakou jsme dnes schopni měřit polohu hvězd, dosahuje díky rádiovým interferometrům úctyhodných miliontin úhlové vteřiny!

Další slibný objekt se v 60. letech minulého století vyklubal ze systému 61 Cygni v souhvězdí Labutě. Ve skutečnosti jde o soustavu dvou hvězd s hmotností 0,6 Slunce, které okolo sebe obíhají s periodou asi 720 let a jsou nyní od sebe vzdáleny přibližně 110 au. V letech 1942 a 1957 pozoroval tuto soustavu dánský astronom Kaj Aage Gunnar Strand (1907–2000), který na základě astrometrických dat usoudil, že kolem jedné ze složek možná po silně eliptické dráze obíhá s periodou asi 5 let neviditelný průvodce, jehož hmotnost byla spočtena na přibližně desetinasobek Jupiteru. Do dnešního dne se však nikomu nepodařilo existenci tohoto tělesa prokázat.

Podrobnému průzkumu se nevyhnula ani slavná Barnardova hvězda⁵. Roku 1960 ohlásil dánský astronom Piet Van de Kamp (1901–1995), že objevil jejího průvodce o hmotnosti 1,5násobku hmotnosti Jupiteru. Dnes je již jisté, že při pozorování došlo k nějaké systematické chybě – nikomu se totiž již nepodařilo variace v pohybu Barnardovy hvězdy znovu prokázat.

Velkou pozornost vzbudil také objekt, který byl objeven v prosinci roku 1984 analýzou 30 000 infrasnímků pořízených dvěma dalekohledy na Kitt Peak v Arizoně. Těleso mělo obíhat kolem hvězdy VB 8 v souhvězdí Hadonoše, která je od nás vzdálena 21 světelných roků. Další rozbor ukázal, že se jedná o objekt s průměrem 0,9 průměru Jupiteru, ale s teplotou 1 100 °C a hmotností 0,01 hmotnosti Slunce, obíhající ve vzdálenosti asi 6,5 au od hvězdy. Svým rozměrem se tedy podobá planetě, ale teplotou a hmotností má blíž ke hvězdě. Arizonský tým vytvořil pro toto těleso novou kategorii – tzv. hnědého trpaslíka. Bohužel, ani v tomto případě se nepodařilo existenci zmíněného tělesa později ověřit.

5 **Barnardova hvězda (šipka)** – hvězda s největším vlastním pohybem. Objevil ji americký astronom Edward Emmerson Barnard v roce 1916. Hvězda je ze souhvězdí Plachet, nachází se ve vzdálenosti 6 ly a její vlastní pohyb činí 10,3" za rok.

Vidíme, že pokusy o nalezení oběžnic jiných hvězd, ať už planet či hnědých trpaslíků, selhávaly téměř 80 let, přestože motivace k nalezení obou druhů těles byla obrovská. Potvrzení existence extrasolárních planet by mohlo dát odpovědi na řadu otázek týkajících se vzniku naší vlastní soustavy nebo dokonce její budoucnosti či jedinečnosti života na Zemi. Hnědí trpaslíci byli dlouho jen hypotetickými objekty. Snaha o jejich odhalení byla silně motivována také pátráním po temné hmotě, o jejíž existenci se vědělo již od 30. let 20. století; právě hnědí trpaslíci byli žhavými kandidáty.

Astrometrické metody dlouhou dobu v tomto ohledu selhávaly. První tělesa planetárních hmotností byla objevena metodou měření zpoždování záblesků pulzarů roku 1992. Roku 1995 byla objevena exoplaneta měřením Dopplerova posuvu a roku 1998 metodou mikročoček. Metoda pozorování přechodů planety před kotoučkem hvězdy slavila svůj první úspěch roku 1999. Období renesance astrometrie, coby metody pro detekci exoplanet, prožíváme právě nyní, první exoplaneta objevená astrometrickou metodou je exoplaneta HD 176051 b, která je oběžnicí těsné dvojhvězdy HD 176051. Objevena byla roku 2010 na Mount Palomaru.

Zpoždování záblesků pulzarů. První metoda, kterou se podařilo odhalit existenci neviditelných průvodců planetárních hmotností, je použitelná pouze u pulzarů, rychle rotujících neutronových hvězd, které září přednostně ve dvou úzkých kuželech, jimiž prochází magnetická osa hvězdy. Pokud se pozorovatel nachází ve správném směru, vidí díky rychlé rotaci hvězdy periodické záblesky, podobně jako pozorujeme záblesky majáku. Tyto záblesky jsou velice pravidelné, opakují se s přesností v řádu miliontin sekundy. V době jejich objevu v roce 1967 byly na Zemi jen několikery atomové hodiny, které byly schopny takové přesnosti docílit. A právě této přesnosti využívá princip detekce oběžnic pulzaru.

Planeta a pulzar obíhají kolem společného těžiště, takže se pulzar vzhledem k pozorovateli střídavě nepatrně přibližuje a vzdaluje. Vzdálenost, kterou musí urazit světelný paprsek, než dopadne do oka pozorovatele na Zemi, se tedy mění – a různé jsou i časy, které

pozorujeme mezi jednotlivými záblesky. Jednoduše řečeno, záblesky se oproti průměrné periodě střídavě předcházejí nebo opoždují.

Objev planety na oběžné dráze okolo pulzaru byl pro astronomy velkým překvapením, protože hvězda, která se stane pulzarem, žije velmi krátkou dobu, řádově jen miliony let. Pokud by planety měly vzniknout před zničujícím výbuchem supernovy, který vytvoření pulzaru bezprostředně předchází, musel být vznik planet významně rychlejším procesem, než se v té době předpokládalo. Vznik planet u extrémně hmotných hvězd, které v budoucnu vybuchnou jako supernovy, musí být navíc velmi dynamickým procesem – materiál protoplanetárního disku musí být totiž neustále promícháván intenzivním hvězdným větrem, který odfoukává nezkondenzované částice do okolního prostoru, zároveň ale doplňuje do disku nový materiál z povrchových vrstev hvězdy. Jako pravděpodobnější se ukazují teorie, které předpokládají vznik planet klasickou akrecí z protoplanetárního disku, vytvořeného až po výbuchu supernovy.

V roce 1992 se podařilo objevit první tělesa planetárních rozměrů mimo Sluneční soustavu. Okolo pulzaru B1257+12 byla zjištěna existence tří planet na drahách bližších centrální hvězdě, než je dráha Merkuru kolem Slunce. Navíc byly nalezeny náznaky, že v planetárním systému pulzaru existuje jistá analogie pásu planetek.

Popsanou metodou byla také odhalena existence třetího tělesa u pulzaru PSR B1620-26 v kulové hvězdokupě M4 v souhvězdí Štíra, vzdálené od nás asi 7 200 světelných roků. Pulzar má za průvodce bílého trpaslíka a hnědého trpaslíka nebo exoplanetu o hmotnosti asi tří Jupiterů. O této planetě, která má neoficiální přezdívku „Metuzalém“, protože je možná jednou z nejstarších planet ve vesmíru, jsme psali v předchozí kapitole.

Přes úchvatnou citlivost popsané metody a přes atraktivitu dějů, které následují po výbuchu supernov, však stojí extrasolární planety u pulzarů dosud na pokraji zájmu. Přiznejme totiž, že hnacím motorem úsilí je odhalení Zemi podobné planety a potvrzení (nebo vyvrácení) domněnky, že nejen na Zemi, ale i na jiných planetách ve

vesmíru může existovat život. A planety u pulzarů zářících v rentgenovém oboru spektra jsou pro hostování života (alespoň takového, který si dokážeme představit) naprosto beznadějnými kandidáty.

Měření radiálních rychlostí. Skutečnost, že se prodlužuje vlnová délka světla vysílaného objektem, který se od nás vzdaluje, je všeobecně známá jako tzv. červený posuv. A právě tohoto efektu je hojně využíváno k detekci extrasolárních planet. Hvězda a planeta obíhají kolem společného těžiště, což znamená, že pokud se k nám právě planeta přibližuje, hvězda se vzdaluje a její spektrální čáry vykazují posuv k červenému konci spektra. Naopak pokud se od nás planeta vzdaluje, hvězda se přibližuje a absorpční čáry ve spektru jsou posunuty k jeho modrému konci.

Pokud vyneseme velikost posunu těchto čar na časovou osu, získáme periodickou křivku, z níž můžeme odhadnout hmotnost planety, její oběžnou dobu a velkou poloosu dráhy. Přestože se tato metoda již dlouhou dobu používá k měření radiálních rychlostí blízkých hvězd i vzdálených galaxií, k detekci extrasolárních planet mohla být využita teprve nedávno, úspěšně až roku 1995. Abychom zaregistrovali i velmi malé planety, jako je naše Země, musí být změna radiální rychlosti změřena s přesností asi 9 cm/s, což je zatím těžko dosažitelné. Spektrograf s největším rozlišením na světě (březen 2021) má rozlišení asi 10 cm/s, jedná se o přístroj ESPRESSO na dalekohledu VLT. Ač se svou citlivostí blíží detekčnímu limitu pro terestrickou planetu, musíme si uvědomit, že takto malou amplitudu musíme detekovat s periodou jednoho roku. Abychom měli jistotu, že se skutečně jedná o planetu, je zapotřebí prakticky každodenní měření po dobu alespoň tří let! Pozorování naráží i na další úskalí, týkající se šumu. Dopplerovský pohyb spektrálních čar totiž vzniká i při vlastní rotaci hvězdy nebo také jako výsledek konvektivního proudění rozsáhlých oblastí plynu pod povrchem hvězdy.

Nevýhodou metody radiálních rychlostí je fakt, že nám dovolu-
je určit pouze dolní mez hmotnosti planety, tedy součin $M_p \cdot \sin(i)$,
kde i je sklon oběžné dráhy planety (inklinace). Bez znalosti sklonu
dráhy nemůžeme skutečnou hmotnost planety určit.

Vlastní měření může probíhat dvěma způsoby: buď celý svazek světla shromážděného dalekohledem projde ještě před rozložení na spektrum skleněnou nádobkou s velmi zředěným plynem (používá se kupříkladu jód či xenon), nebo se světlo z dalekohledu mísí s referenčním svazkem vhodného světelného zdroje, třeba thorio-argonové lampy. Referenční zdroj měřené spektrum ocejchuje a posuv absorpčních čar vzniklých v atmosféře hvězdy je měřen vůči absorpčním čarám referenčního zdroje.

Metodou měření radiálních rychlostí byla na konci roku 1995 odhalena první extrasolární planeta, a to u hvězdy 51 Pegasi. Objev této planety s hmotností poloviny Jupiteru, ale s extrémně malou vzdáleností 0,05 au od hvězdy, vzbudil řadu pochybností o správnosti interpretace naměřených dat a vyvolal dohady, zdali nelze periodické změny radiální rychlosti objasnit neradiálními pulzacemi samotné hvězdy. Z pozorované neměnnosti tvaru spektrálních čar hvězdy 51 Pegasi v závislosti na oběžné době exoplanety však plyne, že možnost neradiálních pulzací hvězdy je nepatrná mimo jiné i proto, že hvězda má stálou jasnost s přesností $\pm 0,0007$ magnitudy. Další přesná měření z let 1995 až 1996 potvrdila všechny parametry exoplanety tak, jak je ve své průkopnické práci odvodili Michel Mayor a Didier Queloz. Za svůj objev získali v roce 2019 jednu polovinu Nobelovy ceny za fyziku. Druhou polovinu získal Jim Peebles za teoretický přínos ke kosmologii.

Vzdálenost hvězdy byla určena na 50,4 světelného roku; hvězda o hmotnosti 1,12 Slunce je stará asi 4 miliardy let a do vzdálenosti dvou astronomických jednotek od ní neobíhá žádná další exoplaneta s hmotností Jupiteru či větší.

Metoda měření radiálních posuvů vedla až do roku 2017 k největšímu počtu objevů exoplanet. Fakt, že vypočítanou hmotnost planety je nutno brát pouze jako dolní mez její skutečné hodnoty, neboť neznáme sklon oběžné dráhy planety vůči nám, dělá z této metody ideální doplněk jiného postupu – metody tranzitní fotometrie, která naopak dokáže zjistit sklon dráhy planety, ale zase nezjistí nic o její hmotnosti.

Tranzitní fotometrie. Prvním úspěchem metody tranzitní fotometrie byla detekce planety u hvězdy HD 209458 roku 1999. Její princip spočívá v tom, že pokud při vhodném natočení cizí planetární soustavy vůči Zemi dojde k přechodu vzdálené planety přes kotouček hvězdy, mohla by její jasnost poklesnout v rozmezí několika tisícín až setin magnitudy, což je dnešními prostředky zaznamatelné. Například zákryt Slunce Jupiterem, pozorovaný ze vzdálenosti 30 ly, způsobí pokles jasnosti o asi 0,02 magnitudy. Ze znalosti oběžné doby a předpokládané hmotnosti hvězdy (získané opět rozбором spektra) můžeme z Keplerova zákona vypočítat velkou poloosu dráhy, z doby trvání zákrytu pak i sklon oběžné roviny.

Tato metoda má ale dvě základní úskalí. Zaprvé, pravděpodobnost, že určitou hvězdu budeme pozorovat právě ve chvíli, kdy přes její disk přejde planeta, je velmi malá. Nasazení metody tranzitní fotometrie bylo proto možné uskutečnit až ve chvíli, kdy byl k dispozici dostatečný výpočetní výkon pro automatizované zpracování přehlídek čítajících série stovek tisíců snímků řádově milionů nebo desítek milionů hvězd.

Zadruhé, zdaleka ne všechny hvězdy svítí se stálou intenzitou. U některých se intenzita mění z jiných důvodů, než je přechod planety před hvězdou. Mezi děje, které neperiodicky ovlivňují jasnost hvězdy, můžeme zařadit různé koronální jevy, výtrysky hmoty apod. Tranzitní fotometrie je proto silným nástrojem především na vytipování vhodných objektů, které je následně třeba sledovat ostatními nezávislými metodami. Síla této metody navíc spočívá v tom, že k jejímu cílenému používání není zapotřebí žádných velkých dalekohledů. Primárním faktorem, na kterém závisí úspěšnost odhalení nových planet, je systematický průzkum a důkladné zpracování naměřených dat. Ve světě, včetně České republiky, proto již existují stovky projektů, které se zabývají tímto způsobem detekce. Do dubna 2021 bylo pomocí přechodů před kotoučkem hvězdy objeveno celkem 3414 exoplanet a hnědých trpaslíků a ve frontě čeká na ověření dalších 2400 kandidátů. Pro srovnání: v roce 2007, v době prvního vydání této knihy, byl počet potvrzených exoplanet detekovaných metodou tranzitů 21...

Princip tranzitní fotometrie využívaly i dva kosmické projekty hledání extrasolárních planet: evropský CoRoT a zejména americký Kepler, který detekoval většinu exoplanet objevených pomocí tranzitů. Aparatury ve vesmíru nejsou omezovány chvěním zemské atmosféry, a tak je citlivost jejich přístrojů asi stokrát větší, než jaké jsme schopni docílit pozemními dalekohledy.

Družice CoRoT byla na oběžnou dráhu vynesena na konci roku 2006 a na polární oběžné dráze operovala do roku 2012, kdy došlo k poruše palubního počítače. Hlavním přístrojem byl 27centimetrový dalekohled, jehož obraz je analyzován čtveřicí velmi citlivých CCD kamer. Družice objevila celkem 33 exoplanet, poznamenejme však, že jejich hledání nebylo hlavním úkolem tohoto kosmického dalekohledu. Tím byl komplexní výzkum kmitů hvězd a šíření akustických vln v nich neboli astroseismologie.

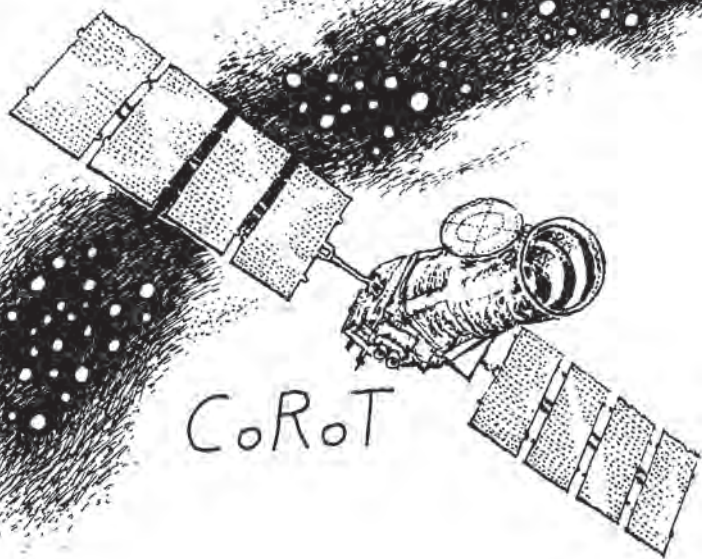
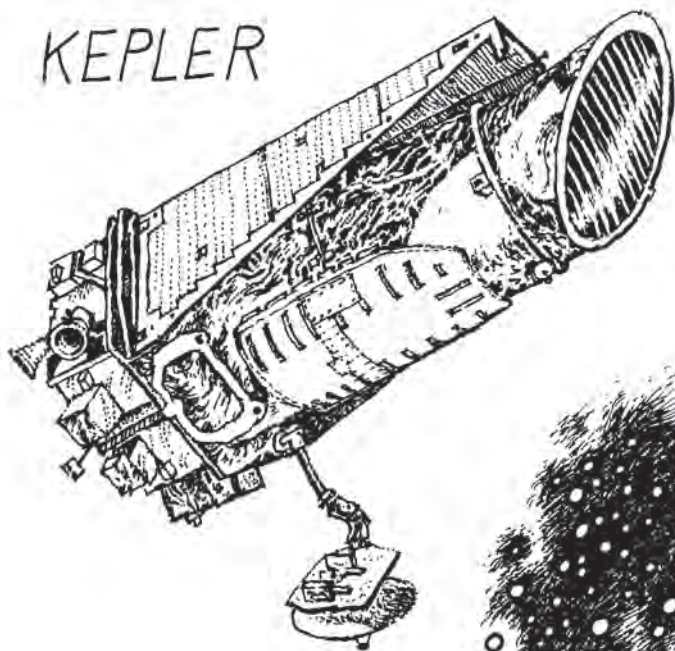
Americký kosmický dalekohled Kepler byl vybaven zrcadlem o průměru 1,4 metru s 95cm vstupním korektorem. Na vlastní heliocentrické dráze pracoval od roku 2009 až do roku 2018, kdy došlo palivo. Družice byla vybavena 42 CCD čipy o celkovém rozlišení 95 megapixelů, dalekohled sledoval část oblohy o rozloze 115 čtverečních stupňů na pomezí souhvězdí Labutě a Lyry.

Během své mise objevil Kepler více než 5 000 kandidátů exoplanet, z nichž přes 2500 bylo následně pomocí nezávislých metod potvrzeno. Nevýhodou je, že pole sledované družicí obsahuje velké množství velmi slabých hvězd, které nejsou v dosahu většiny pozemských teleskopů k ověření metodou radiálních rychlostí.

Počátkem 21. století se podařilo metodu tranzitů rozšířit o možnost změřit rozměry planety, detekovat její případný měsíc a především pak získat spektrum její atmosféry.

Odhad složení atmosféry můžeme získat tak, že přechod planety pozorujeme v diskrétních vlnových délkách. Částečně průhledná atmosféra některé vlnové délky záření hvězdy pohltí více, jiné méně, některé více nebo méně rozptýlí. Pokud pořídíme spektrum hvězdy při tranzitu a od tohoto spektra odečteme spektrum samotné

KEPLER



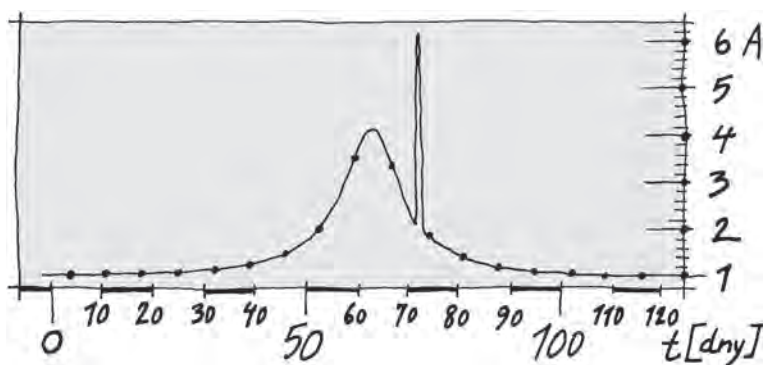
CoRoT

hvězdy, pořízené v okamžiku, kdy je planeta za hvězdou, získáme spektrum samotné planety. Tato metoda byla poprvé vyzkoušena při pozorování přechodu Venuše přes Slunce v roce 2004, první spektrum atmosféry extrasolární planety (respektive její absorpční profil na třech vlnových délkách) byl získán roku 2008 u planety HD 189733 b. Později se podařilo tento profil zpřesnit a získat tak informaci o tom, že v atmosféře planety se vyskytují vodní páry a metan.

Mikročocky. Další fotometrický způsob je založen na principu gravitačních mikročockek. Je dobře známo, že v okolí velmi hmotných těles je dráha světelných paprsků znatelně zakřivená. Pokud před nějakou velmi vzdálenou hvězdou prochází slabě zářící, ale velmi hmotné těleso, můžeme zaznamenat postupný nárůst a následný pokles její jasnosti, neboť procházející těleso soustředí do našeho oka i ty světelné paprsky, které by nás bez jeho přítomnosti minuly. Z tohoto úhlu pohledu se tedy procházející objekt chová obdobně jako například lupa.

Pokud okolo procházejícího tělesa obíhá navíc ještě planeta, může se i ona na křivce jasnosti projevit jako krátkodobé zjasnění. Na obrázku (str. 268) je křivka, jejíž první maximum náleží maximálnímu úhlovému přiblížení zdroje k čočce. Jestliže čočku tvoří dva objekty, v našem případě hvězda a planeta, závisí tvar křivky na poměru jejich hmotností a na úhlové vzdálenosti hvězda-planeta.

Po většinu času bude křivka stejná jako v případě jednoduché čočky, pouze na několik hodin (přechod primárního zdroje má za následek zjasnění trvající typicky několik desítek dnů) se projeví další zjasnění. Doba, po kterou lze sekundární (z hlediska doby trvání, nikoli jasnosti) maximum pozorovat, závisí na hmotnosti čočkující planety. Z toho vyplývá první úskalí této metody – čočkující hvězdu je třeba neustále sledovat i několik měsíců, abychom tuto poměrně krátkodobou událost zachytili. Navíc sama pravděpodobnost pozorování přechodu hmotného tělesa před hvězdou je velmi malá. Tento nepříjemný fakt je navíc umocněn skutečností, že průběh zjasnění u jedné hvězdy lze naměřit pouze jednou a měření je tedy neopakovatelné.



Světelná křivka hvězdy s planetou zobrazená gravitačním mikročočkováním

Výše popsaný mechanismus je principem tzv. *fotometrické mikročocky*, neboť měříme změny jasnosti systému. Postupný přechod objektu přes vzdálenou hvězdu však způsobuje i změny její polohy, a to v řádu miliontin úhlové vteřiny. Záznamem změny polohy vzdálené hvězdy s časem získáme křivku, která může být opět poněkud deformovaná přítomností planety – v tomto případě hovoříme o *astrometrické mikročocke*.

Přes vyjmenovaná úskalí zaznamenala metoda mikročockek roku 1998 první úspěch: v rámci projektu MACHO jí byla objevena planeta s hmotností v rozmezí 1 až 20 hmotností Země u hvězdy o hmotnosti asi 0,3 Slunce. Do dubna 2021 bylo touto metodou objeveno celkem 145 exoplanet ve 130 planetárních systémech.

Další možné způsoby detekce. Vznikající planetární soustava se může prozradit během poslední fáze svého vzniku, kdy dochází ke srážkám těles s hmotností 10^{22} až 10^{23} kg. Pro srovnání: terestrické planety Sluneční soustavy mají hmotnosti řádově 10^{24} kg, plynní obři 10^{27} kg. Při srážkách těchto těles dojde k jejich roztavení, které se prozradí zvýšenou emisí v infračerveném oboru spektra. K tomuto jevu ovšem dojde pouze v případě malé rychlosti srážky – kolem 10 km/s. Předpokládá se, že teplota povrchu tělesa se po srážce udrží na hodnotě 2 000 K po dobu několika tisíc let (impakty na větší tělesa budou svítivější, ale krátkodobější).

V minulosti byly u hvězd spektrálních typů F až G několikrát pozorovány supererupce o energiích 10^2 až 10^7 krát větších než největší erupce pozorované na Slunci. Jednou z možných příčin těchto erupcí, trvajících hodiny až dny, je rekonekce magnetických polí centrální hvězdy a velmi blízko obíhající planety typu Jupiter. Nicméně souvislost mezi supererupcemi a přítomností krátkoperiodických obřích planet nebyla dosud prokázána.

Zatím jsme se nezmínili o tom, jak je možné zobrazit extrasolární planety přímo. Tento způsob detekce zažívá zejména v posledních několika letech obrovský boom, a proto si zaslouží, aby mu byla věnována celá následující podkapitola.

Přímé zobrazení extrasolárních planet

Historicky první snímek hnědého trpaslíka byl pořízen roku 1994. Objekt Gl 229B byl vyfotografován Hubblovým vesmírným dalekohledem a záběr odhaluje hnědého trpaslíka obíhajícího okolo hvězdy Gl 229A. Tu řadíme k tzv. červeným trpaslíkům spektrálního typu M1V, což jsou jedny z vůbec nejméně svítivých hvězd. Soustava je od nás vzdálena 22 světelných roků ve směru souhvězdí Žajíce. Malý objekt Gl 229B, který se nachází ve vzdálenosti 7 úhlových vteřin od hvězdy (40 au), je hnědý trpaslík o hmotnosti 20 až 50 hmotností Jupiteru. Ponechme nyní stranou jedinečnost tohoto objevu a představme si na místě zmíněného systému naši Sluneční soustavu. Slunce by na tomto snímku bylo asi stokrát jasnější než centrální hvězda, Země by zářila tisíckrát méně než hnědý trpaslík a nacházela by se čtyřicetkrát blíže ke hvězdě. Problém přímé detekce extrasolárních planet je tedy zřejmý – v pořízení kvalitního snímku nám brání výrazný přebytek světla od centrální hvězdy. Například poměr svítivosti pro Slunce a Jupiter (v maximální elongaci) je asi 10^{-9} . Ze vzdálenosti 16 světelných roků by úhlová vzdálenost Jupiteru od Slunce byla 1". Vzhledem k tomu, že pozemský seeing⁶ se

⁶ **Seeing** – z anglického *seeing conditions* (podmínky viditelnosti). Turbulence atmosféry v okolí dalekohledu mění strukturu obrazu objektu a způsobují jeho pohyb v zorném poli. Tyto projevy nazýváme seeing. Seeing vyjadřujeme v obloukových vteřinách. Údaj určuje limitní rozlišovací schopnost dalekohledů způsobenou projevem atmosféry.

projevuje ve stejném řádu, je přímé pozorování planety pozemním dalekohledem bez využití systému adaptivní optiky⁷ nemyslitelné.

Vidíme, že první snímek terestrické planety obíhající okolo cizí hvězdy podobné Slunci poblíž její obyvatelné zóny (tj. oblasti, kde teplota na planetě umožňuje existenci kapalné vody), je zatím hudbou (doufejme nepříliš vzdálené) budoucnosti.

Přesto již technika přímého zobrazení udělala za posledních 10 až 15 let ohromný pokrok. Cílem zdokonalení přímých zobrazovacích metod je především pokus o potlačení vlivu atmosférické turbulence (adaptivní optika, pozorování z vesmíru), dále snížení vlivu rozptýleného světla hvězdy (koronální masky, interferometrie) a v neposlední řadě zvýšení poměru svítivosti planety a hvězdy pozorováním na delších vlnových délkách (tj. v infračerveném oboru).

Metoda korunální masky. Metoda nese název podle koronografu, přístroje pro pozorování nejrozsáhlejší ale zároveň nejslabší části sluneční atmosféry – koróny. Uvnitř dalekohledu je umístěn terč (koronální maska), který odstiňuje jasné světlo povrchu Slunce a dovoluje sledovat jeho okolí. Jas koróny je v porovnání s jasnem fotosféry asi stotisíckrát slabší – podobný poměr svítivosti (ovšem v infračerveném oboru) mají i malé hvězdy a jejich oběžnice. Řešení ovšem není úplně ideální. Terčík, zakrývající hvězdu, má oproti klasickému koronografu mikroskopické rozměry, takže v jeho okolí dochází vlivem ohybu k rozmazání obrazu kolem stínítka. Planety obíhající hvězdu v malé vzdálenosti jen několika au tak zůstanou skryty v šumu. Přesto již máme několik snímků exoplanet pořízených metodou korunální masky.

Metoda nulovací interferometrie. Problém přebytečného světla je možné vyřešit ještě jiným způsobem, než prostým překrytím kotoučkem hvězdy korunální maskou. Velmi důmyslná metoda, ve

7 **Adaptivní optika** – korekce vysokofrekvenčních změn obrazu způsobených zejména turbulentní atmosférou. Korekce se provádí počítačem řízenými posuny a deformacemi pomocných zrcátek. K vyhodnocení aktuálního tvaru vlnoplochy slouží „umělá hvězda“ vytvářená laserovým paprskem fokusovaným do výšky přibližně 90 km, kde zpětným rozptylem vzniká skvrna zářících sodíkových atomů.

kteře podle všeho leží budoucnost zobrazování a hledání malých extrasolárních planet, je založena na principu interference, tedy skládání dvou světelných paprsků. Světlo hvězdy je snímáno dvěma dalekohledy, přičemž mezi jeden dalekohled a detektor je vložena soustava zrcadel, tzv. zpožďovací linka. Vhodným nastavením zpoždění dojde k tomu, že na detektoru se světelné vlny z obou dalekohledů setkávají s opačnými fázemi (neboli jeden světelný paprsek je posunut právě o polovinu své vlnové délky vůči druhému). Výsledkem je destruktivní interference: signál mizí a místo zářící hvězdy pozorujeme jen prázdné místo. Fázový posun nastavený zpožďovací linkou však bude obecně různý pro objekty, které vůči středu hvězdy pozorujeme pod určitým nenulovým úhlem. Vhodným nastavením interferometru pak může dojít k tomu, že zatímco světlo hvězdy interferuje destruktivně, světelné vlny vyslané planetou se potkávají se stejnou fází a její obraz je pak ve výsledku zesílen. Touto metodou se například podařilo (při současném použití systému adaptivní optiky) zobrazit prachoplynný disk obklopující hvězdu Betelgeuse. Pro lepší a přesnější výsledky bude však v budoucnu nutné celou interferenční aparaturu umístit na oběžnou dráhu Země. S technikou nulovací interferometrie měly v budoucnu pracovat nejméně dvě vesmírné mise: TPF (*Terrestrial Planet Finder*, NASA) a Darwin (ESA). Obě mise však byly pro nedostatek finančních prostředků zrušeny, nebo alespoň odloženy.

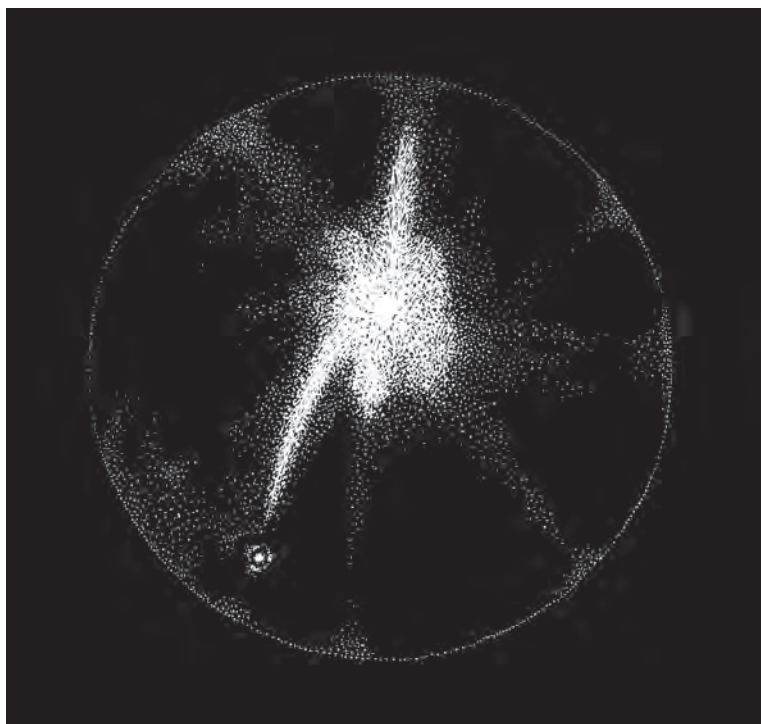
První snímky exoplanet

Jedním z problémů přímého zobrazení je, že podaří-li se nám zachytit těleso v blízkosti nějaké hvězdy, máme velmi omezenou škálu prostředků, jak objev ověřit. Z principu nejsnáze objevíme těleso, které obíhá hvězdu v dostatečně velké vzdálenosti – takové ovšem bude mít i velkou periodu oběhu, takže křivku radiálních rychlostí hvězdy budeme muset sledovat velmi dlouho, stejně dlouho budeme muset čekat i na případný tranzit, ke kterému však vůbec nemusí dojít – ostatně v případě, že sklon soustavy bude velký, nenaměříme nic ani na dopplerovské křivce. Pak budeme muset použít metodu astrometrickou, ale opět budeme spoléhat na data z alespoň dvou

nebo tří předpokládaných oběhů. Částečnou možností je pořízení spektra podezřelého tělesa – z něj můžeme například odhadnout povrchovou teplotu a vyloučit tak třeba hnědé trpaslíky či možnost, že objevené těleso je jen náhodným těsným průmětem jiné, velmi vzdálené hvězdy.

Evropská jižní observatoř (ESO) vydala v roce 2005 zprávu o pořízení prvního snímku extrasolární planety. Bohužel, planeta 2M1207b o hmotnosti čtyřikrát větší než Jupiter neobíhá okolo normální hvězdy, ale okolo hnědého trpaslíka. „První“ snímek extrasolární planety byl také pořízen roku 2002 pomocí osmimetrového dalekohledu na observatoři Gemini; jde však ve skutečnosti o velmi hmotného hnědého trpaslíka o hmotnosti 50 až 80 hmotností Jupiteru, který obíhá okolo hvězdy 15 Sgr. Do třetice: i Hubbleův vesmírný dalekohled pořídil roku 2002 „první“ snímek extrasolární planety. Ta má hmotnost pětinasobku hmotnosti Jupiteru a pro změnu obíhá okolo bílého trpaslíka, hasnoucí hvězdy, která již prošla závěrečnou fází svého vývoje a nyní pomalu chladne.

Na jaře roku 1998 způsobil velký rozruch snímek z Hubbleova dalekohledu, který zachytil velice mladou (několik set tisíc let) dvojhvězdu v souhvězdí Býka, nesoucí označení TMR-1A+B. Od ní se táhne asi 1 200 au dlouhý světlý výběžek, na jehož konci se nachází slabý objekt TMR-1C. Při vzdálenosti binární soustavy cca 450 světelných roků se podle jasnosti objektu C (18 mag) odhadovala jeho hmotnost asi na trojnásobek hmotnosti Jupiteru. Předpokládalo se, že tento vážný kandidát na první přímo detekovanou extrasolární planetu byl dvojicí okolo sebe obíhajících hvězd doslova „vystřelen“ z dosahu jejich gravitačního působení a při průletu prachoplyným oblakem vytvořil jakýsi tunel, jehož stěny pozorujeme díky větší hustotě látky. Následná pozorování však ve spektru objektu TMR-1C neodhalila žádné stopy po absorpčních páscech vody, metanu ani po čáře neutrálního lithia, které jsou typické zejména pro hnědé trpaslíky. Proto je pravděpodobné, že zmíněný objekt má povrchovou teplotu asi 2 600 K a jde o extrémně malou a chladnou hvězdu, která může souviset s výběžkem, nebo se na dané místo jen náhodně promítá.



Objekt TMR 1-C byl jedním z vážných kandidátů na první snímek extrasolární planety. Ve skutečnosti jde o extrémně malou a chladnou hvězdu.

Jedním z prvních snímků, který by mohl zachycovat exoplanetu, byl snímek hvězdy GQ Lupi, mladé hvězdy typu T-Tauri o svítivosti asi čtvrtiny Slunce. Dalekohledem VLT se roku 2005 podařilo odhalit doprovodnou složku, označenou GQ Lup b, která obíhá ve vzdálenosti přibližně 100 au. Obrovská nejistota však panuje ohledně její hmotnosti, která může být v rozmezí 1 až 40 Jupiterů. Není tedy vůbec zřejmé, zda se jedná o planetu nebo hnědého trpaslíka.

Řadu let se zdálo, že prvenství bude náležet snímku planety Fomalhaut b, jejíž pohyb byl přímo sledován Hubbleovým dalekohledem v letech 2004 a 2006. V roce 2008 se objekt zachytit nepodařilo, ovšem o dva roky později, v roce 2010, již ano. Podle snímků z let 2013 a 2014 se zdá, že objekt se zvětšuje a slábne – to by mohlo

naznačovat, že se ovšem nejedná o planetu, nýbrž že se Hubblovu vesmírnému dalekohledu podařilo pozorovat zcela mimořádný okamžik – srážku dvou planet či planetárních embryí, která vytvořila obrovský oblak rozžhavených úlomků a plynu.

Z hlediska prvního snímku exoplanety byl zřejmě přelomový rok 2008, na jehož konci byly oznámeny dva důležité objevy. V polovině října oznámil tým astronomů, že se jim pomocí dvojice dalekohledů Keck a dalekohledu Geminii na Havajských ostrovech podařilo odhalit u hvězdy HR 8799 tři průvodce – planetu b s hmotností 5 až 11 Jupiterů, obíhající ve vzdálenosti 68 au od hvězdy, planetu c o hmotnosti 7 až 9 Jupiterů s velkou poloosou 43 au a planetu d s hmotností 7 až 9 Jupiterů, obíhající ve vzdálenosti 27 au. Některé z planet se podařilo zpětně dohledat na snímcích z roku 2004, později se planetu b podařilo najít i na snímku, který pořídil Hubblův dalekohled v roce 1998.

O pouhý týden později se astronomové z VLT přihlásili s objevem planety Beta Pictoris b, kterou našli pomocí nové metody redukce obrazu, již aplikovali na snímek z roku 2003. Je jistě fascinující, že tato planeta tedy byla i na snímku protoplanetárního disku hvězdy Beta Pic, který byl již součástí této knihy v roce 2007. Jen se o ní ještě nevědělo. Planeta by měla mít hmotnost mezi 8 až 13 Jupitery (není tedy vyloučeno, že se nakonec nebude jednat o hnědého trpaslíka) a obíhá ve vzdálenosti pouhých 9 au od centrální hvězdy.

V hledání extrasolárních planet metodou přímého zobrazení je velmi úspěšný projekt GPI (*Gemini Planet Imager*), který probíhá na observatoři Gemini South v Chile. Projekt běží od roku 2014 a v letech 2015 a 2016 se zde podařilo najít přímým zobrazením oběžnice hvězd 51 Eridani a HR 2562.

Přes značné potíže na počátcích pokusů o přímé zobrazení exoplanet se dnes (duben 2021) můžeme chlubit celkem 146 oběžnicemi hvězd, které byly zachyceny přímým zobrazením. Zhruba dvě třetiny z nich jsou hnědí trpaslíci, zbývající třetina připadá na tělesa s hmotností menší než 13 Jupiterů.

Projekty kosmických interferometrů

Projekt TPF (*Terrestrial Planet Finder*) byla plánovaná mise dvou komplementárních zařízení, která měla při hledání terestrických extrasolárních planet kombinovat oba popsané typy stínění jasu centrální hvězdy. Část TPF-C (*Coronagraph*) měla být schopna detekovat záření planet až o poloviční velikosti, než má naše Země, které obíhají okolo hvězd hlavní posloupnosti spektrálních typů F, G a K, tedy vesměs hvězd podobných našemu Slunci. Jádrem přístroje mělo být eliptické zrcadlo o velikosti 8×3 m, vybroušené tak, aby jeho obrazová ohnisková rovina ležela mimo celý systém – tím by bylo odstraněno nejen centrální zastínění zrcadla, ale zejména by došlo k potlačení nežádoucích ohybových jevů na držácích sekundárních zrcadel či detektorů.

Druhá část, TPF-I (*Interferometer*), měla být tvořena čtveřicí dalekohledů o průměru 4 m, které měly pracovat jako jediný interferometr o základně až 150 m. Systém měl být schopen nejen zobrazit planety velikosti Marsu, ale také provést základní spektrální analýzu záření přicházejícího z planety. Celá soustava dalekohledů měla být zakotvena v Lagrangeově bodě L2 soustavy Země-Slunce; oběh po geocentrické dráze není vhodný, neboť kosmické interferometry budou pracovat v infračerveném oboru spektra, kde by mohlo rušit vlastní záření naší Země.

Projekt *Darwin* připravovaný Evropskou kosmickou agenturou ESA měl původně velmi ambiciózní cíle: mělo jít o soustavu šesti dalekohledů s průměry zrcadel 2 m, které by obíhaly na vlastní heliocentrické dráze mezi drahami Marsu a Jupiteru, aby byl minimalizován vliv rozptylu slunečního záření na disku tzv. zodiakálního prachu. Předpokládaná základna interferometru mohla dosahovat až tisícovek kilometrů, díky čemuž by měla být aparatura schopna zobrazit i případné hlavní terénní rysy na povrchu neznámých planet.

Bohužel, kvůli nedostatku financí byl projekt ještě před definitivním zrušením redukován na soustavu tří dalekohledů o průměru maximálně 3,5 m, zakotvených v Lagrangeově bodě L2 a pracujících

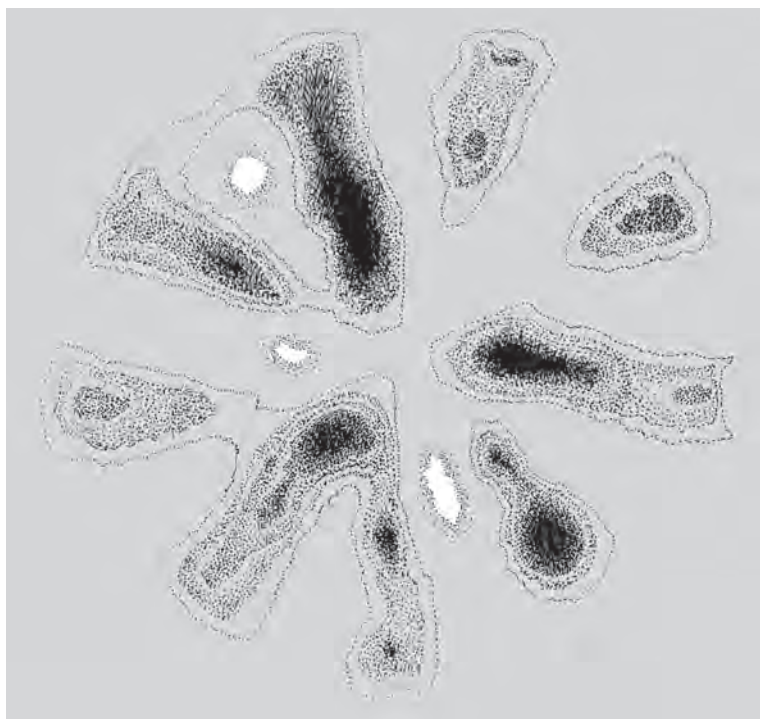
v infračervené oblasti spektra, a to konkrétně v rozmezí vlnových délek 8 až 20 mikrometrů. Právě na těchto vlnových délkách se v infračervené oblasti nacházejí dosti výrazné spektrální čáry oxidu uhličitého, vody a ozónu. Tyto tři sloučeniny lze považovat za základní látky, jejichž přítomnost může nepřímo ukázat na přítomnost živých organizmů. Dodejme, že na proměření celého spektrálního oboru na přítomnost uvedených spektrálních čar by bylo zapotřebí expozic délky až stovek hodin na jedno spektrum. Proto byl projekt rozdělen do několika fází.

V první fázi projektu měli být hledáni vhodní kandidáti, tj. takové extrasolární planety, jež se nacházejí v tzv. obyvatelné zóně. Tato oblast je definována jako ta část planetární soustavy, v jejíž vzdálenosti teplota na povrchu planety umožňuje přítomnost tekuté vody. Teprve u vybraných planet měl být proveden test na přítomnost oxidu uhličitého, který má v daném spektrálním oboru nejvýraznější absorpční čáru, a v případě úspěchu proběhne i pokus o rozpoznání spektrálních pásů vody a ozónu. Mise měla být funkční kolem roku 2025.

Kolik jich je?

Ke konci března 2021 bylo známo celkem 4 700 extrasolárních planet (4 450 bez hnědých trpaslíků), obíhajících ve 3 483 planetárních systémech. Na ověření nezávislým měřením přitom čeká dalších 2 500 kandidátů, objevených zejména vynikající kosmickou observatoří Kepler.

Množství objevených exoplanet dovoluje dělat první statistiky, ovšem jejich interpretace musí být obezřetná. Na první pohled se zdá, že naše planetární soustava je spíše výjimkou. Přes 80 % objevených exoplanet obíhá mateřskou hvězdu ve vzdálenosti do 0,33 au, tedy v oblasti, kde ve Sluneční soustavě žádná planeta neobíhá. Téměř polovina exoplanet má excentricitu větší než 0,1 (ve Sluneční soustavě je to pouze Merkur), 15 % objevených exoplanet je hmotnějších než Jupiter a 35 % je hmotnějších než Neptun. Zde však stále velkou roli hraje fakt, že nejsnáze se objevují planety



Numerická simulace ukazující, jak by vypadala po šedesátihodinové expozici naše Sluneční soustava ze vzdálenosti 30 ly soustavou šesti vesmírných metrových dalekohledů o průměru 1,5 m se základnou 50 metrů (jedna z variant projektu Darwin). Tři bílé skvrnky na obrázku jsou Venuše, Země a Mars. Merkur zanikl v šumu. Centrální hvězdu se podařilo interferometricky „vynulovat“.

s vysokou hmotností a s malou periodou. Na doplnění statistik a učinění globálních závěrů si tak budeme muset počkat do doby, kdy budeme znát i dostatečné množství planet s hmotností srovnatelnou se Zemí a s periodami alespoň několika let.

Dosavadní (velmi nepřesné) odhady odvozené ze statistik pozorování říkají, že nejméně u 20 procent hvězd se vyskytují planety velkých hmotností, počet hvězd s planetami hmotností srovnatelnou s naší Zemí bude zřejmě daleko vyšší, nejméně dvojnásobný. To je údaj, který posouvá počet oběžnic hvězd v naší Galaxii do řádu stovek miliard.

Víte, že?

■ Víte, že termín mikročočka poprvé použil polský astronom Bohdan Paczyński? Paczyński byl duchovním otcem prvního projektu pro vyhledávání mikročoček OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*). Od roku 1992 detekuje 500 mikročočkujících událostí ročně, jen šest z nich mělo ale sekundární pík způsobený existencí exoplanety.

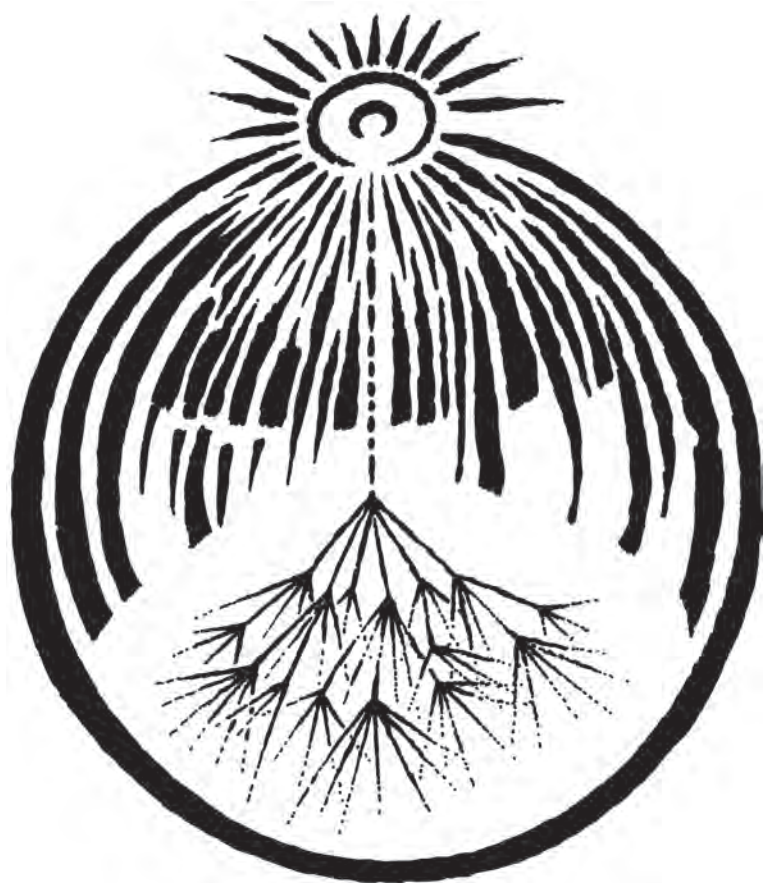
■ Víte, že Evropská jižní observatoř (ESO) není jednou konkrétní observatoří na jižní polokouli? Jde o společnou organizaci sedmnácti evropských států, která provozuje celou řadu observatoří v Chile. Evropská jižní observatoř byla založena v roce 1962, Česká republika je členem od roku 2007.

■ Víte, že Dopplerův jev, který je základem metody radiálních rychlostí, objevil Hans Christian Doppler v Praze? Poprvé ho popsal v roce 1842, kdy působil na Královském českém stavovském učilišti technickém v Praze, což je předchůdce dnešního Českého vysokého učení technického. Dopplerovo jméno je umístěno pod okny Národního muzea v Praze.

■ Víte, že adaptivní optika, která kompenzuje turbulence atmosféry, byla poprvé navržena americkým astronomem Horace Babcockem už v roce 1953? Adaptivní optika byla nejprve testována americkou armádou. Pro astronomické účely byla poprvé použita v roce 1989 na francouzské observatoři Haute-Provence u dalekohledu s průměrem zrcadla 1,5 metru.

Poučení na závěr: S rostoucím počtem objevených exoplanet roste i naděje na to, že ve vesmíru nejsme sami. Možná už nadešel čas, abychom se začali před okolím pečlivě schovávat.





11. Kosmické záření

„Ve vesmíru jsou věci, které jsou známy, a věci,
které nejsou známy, a mezi nimi jsou dveře.“

William Blake, anglický básník

Knaší Zemi dolétá z blízkého i vzdáleného vesmíru množství částic s velkými energiemi. Jejich původ může být jak v naší Galaxii, tak ve větších vzdálenostech. První linii ochrany před těmito částicemi tvoří magnetosféra Slunce, která jich většinu odkloní tak, že se nedostanou do vnitřních prostor Sluneční soustavy. Kvalita tohoto prvního filtru závisí na aktuální sluneční aktivitě. Prošlé částice bombardují všechna tělesa Sluneční soustavy. U Země se setkávají s druhou linií ochrany – se zemskou magnetosférou. Ty částice, které přesto dvojúrovňovou ochranou projdou, atakují horní vrstvy atmosféry, kde se srážejí s atomy a molekulami. Při těchto srážkách vznikají obrovská množství sekundárních částic, tzv. *spršek*, které pak dopadají na zemský povrch. Příliv energetických částic z vesmíru ovlivňuje procesy na Zemi. Příkladem může být bouřková aktivita, jejíž intenzita je na aktuálním množství těchto částic silně závislá.

Částice přilétající z oblastí mimo Sluneční soustavu se nazývají *kosmické záření*. Jde o poněkud nešťastný pojem z období počátku výzkumu tohoto fenoménu, lepší by byl název kosmické částice, vesmírný vítr či nějaká obdobná alternativa. Na druhou stranu lze skutečně nepřetržitý proud částic vnímat jako jakousi formu záření a navíc každá částice má i vlnovou povahu, takže tento vžitý historický název je nakonec akceptovatelný.

Ke kosmickému záření se v okolí Slunce ještě přidává sluneční vítr, jehož částice mají ale energii podstatně nižší. Oba typy částic se u Země hromadí ve Van Allenových radiačních pásech, se kterými jsme se seznámili ve čtvrté kapitole věnované slunečnímu větru.

Už víme, že množství částic prošlých k Zemi z vesmíru ovlivňuje magnetické pole Slunce, jehož intenzita závisí na sluneční aktivitě. V průběhu milionů let se aktivita Slunce mění a řada prací ukazuje, že měnící se tok kosmického záření, který s tím souvisí, ovlivňuje klimatické podmínky na Zemi. Je neoddiskutovatelné, že pozemské klima ovlivňuje také člověk. Jaká část klimatických změn jde na vrub lidské činnosti a jaká je způsobena měnící se aktivitou Slunce, musí být předmětem seriózního výzkumu. Skutečnost nezmění ani zistné výroky politiků, ani osobní ambice vůdců ekoteroristických spolků. Cíl musí být jediný: záchrana planety, nikoli pozic individuí, která nemají pojem o logice, matematice a ani o zákonitostech mezi příčinami a následky.

Objev kosmického záření

Objev přirozené radioaktivity odstartoval na konci 19. století celou řadu experimentů, které měly za cíl ukázat, jak radioaktivní horniny ovlivňují okolí. Bylo jasné, že dochází k ionizaci vzduchu, na níž se podílí zejména pronikavé gama záření. Ionizace vzduchu se na počátku dvacátého století měřila výhradně elektroskopy. V původní verzi šlo o dva tenké zlaté lístky, jejichž jeden konec byl volný. Po nabití se lístky začaly elektrostaticky odpuzovat a z jejich rozvření se určoval elektrický náboj, který na nich ulpěl. Původní elektroskop upravil německý fyzik a jezuitský kněz Theodor Wulf (1868–1946) do podoby přesného přístroje pro měření intenzity záření gama. Původní dva zlaté lístky nahradil dvěma křemennými vlákny, která byla potažená platinou a upevněná na obou stranách. Pomocí optického přístroje měřil vzdálenost mezi středy obou vláken. Zdroj gama záření ionizoval okolní vzduch a obsluha pozorovala, jak rychle se nabitý elektroskop vybíjí.

Záhy se ukázalo, že zdrojem ionizace vzduchu by nemusela být jen přirozená radioaktivita hornin. Jako první tuto hypotézu navrhl už v roce 1901 skotský fyzik Charles Thomas Rees Wilson (1865–1959). Předpokládal, že zdroj ionizujícího záření může být i mimozemského původu. Jeho odvážná hypotéza se stala terčem posměšných útoků a sám od ní ustoupil, když naměřil stejnou ionizaci vzduchu

jak v tunelu, tak mimo něj. V letech 1900 až 1903 konal vědecká pozorování v balónech německý meteorolog a geolog Franz Linke (1878–1944). Uskutečnil 12 letů a při šesti z nich měřil ionizaci vzduchu elektroskopem. Zjistil, že ionizace vzduchu do jednoho kilometru klesá, poté stagnuje a od tří kilometrů výšky začíná opět stoupat. V roce 1908 uskutečnil devítihodinový let balónem německý fyzik Karl Bergwitz (1875–1958). Wulfovým elektrometrem zjistil, že ve výšce 1300 metrů nad mořem klesla ionizace na 25 % hodnoty povrchové hodnoty. To bylo podivné, protože ze známého dosahu gama záření by v takové výšce už neměla být ionizace vůbec měřitelná. Jeho přístroj ve dvou kilometrech bohužel selhal, takže ve větších výškách měření neprovedl. A do třetice. V roce 1908 uskutečnil německý fyzik Albert Gockel (1860–1927) expedici do Alp. Pohyboval se v nadmořské výšce od 650 metrů do 3 000 metrů. Ve velké nadmořské výšce detekoval nárůst ionizace. Předpokládal, že zdroj ionizace je ve vesmíru a jako první použil termín kosmické záření (*kosmische Strahlung*), a to 17 let před tím, než tento pojem oficiálně zavedl Robert Millikan (11. listopadu 1925). Albert Gockel proto v letech 1909 až 1911 uskutečnil tři balónové lety, při nichž získal obdobné výsledky.

Theodor Wulf, konstruktér Wulfova elektrometru, provedl v roce 1910 měření na 300 metrů vysoké Eiffelově věži v Paříži. Jím měřená ionizace poklesla na vrcholu věže jen na polovinu hodnoty u země, což byla mnohem vyšší hodnota radiace, než se očekávalo. Na základě tohoto měření začal pochybovat o spolehlivosti svého zařízení. Tehdy nemohl vědět, že za nečekanou hodnotu je zodpovědná zbytková radioaktivita železné konstrukce věže.

Klíčovou postavou pro objasnění všech těchto neočekávaných výsledků se stal Victor Francis Hess (1883–1964). Narodil se u Turnova na hradě Valdštejn. Studoval ve Štýrském Hradci (Graz v dnešním Rakousku). Poté začal pracovat na Vídeňské univerzitě ve skupině Franze Exnera, který kolem sebe soustředil mladé a nadějně fyziky. V roce 1910 byl založen Radiologický ústav, jehož ředitelem se Exner stal a celá skupina zde začala provádět výzkum ionizace způsobené radioaktivitou. Hessovi byly známy výsledky balónových

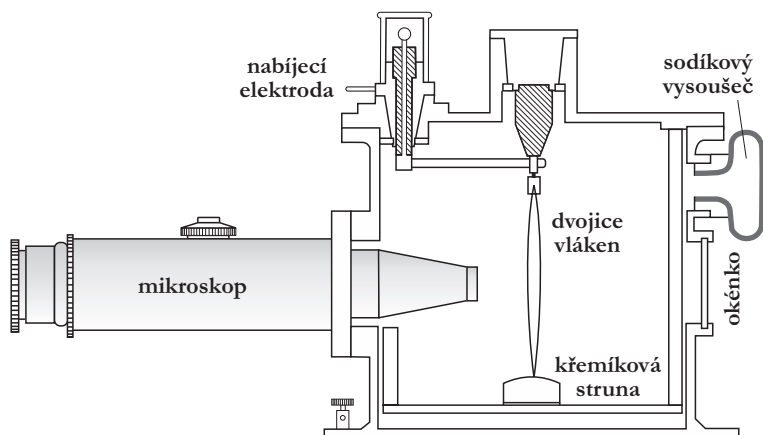
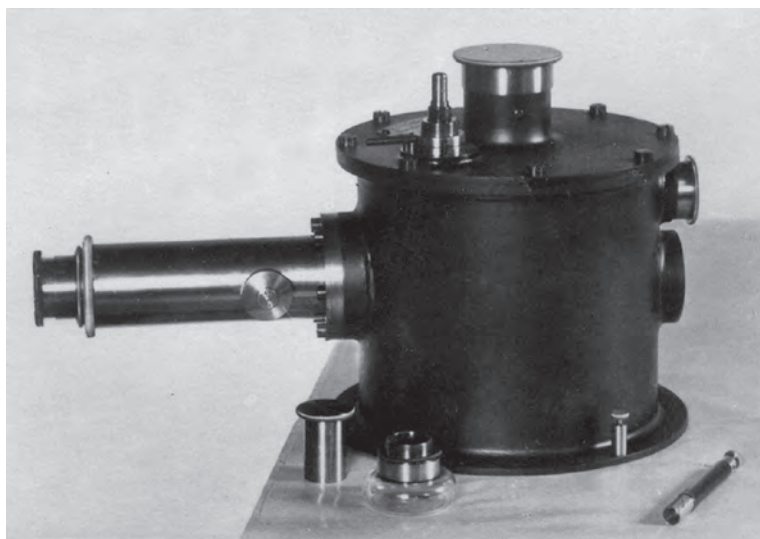


Schéma Wulfova elektrometru, který díky vysoušení vnitřní části zajistil stabilní prostředí pro měření radioaktivity při balónových experimentech.

experimentů Bergnitze a Gockela i slavné Wulfovo měření na Eiffelově věži. Uvažoval o dvou možnostech. Buď je ionizace atmosféry způsobena dalším neznámým zdrojem, nebo má gama záření větší dosah, než se dosud předpokládalo. Aby vyloučil druhou možnost, použil jako zdroj gama záření 1,5 kilogramu radia a měřil ionizaci vzduchu až do vzdálenosti 90 metrů od vzorku. Jeho měření potvrdila předchozí představy o pronikavosti gama záření. Ve výšce 500 metrů nad povrchem Země by měla být ionizace způsobená povrchovými horninami už na hranici měřitelnosti. Hess považoval všechna dosavadní měření za málo průkazná, často docházelo k poruchám elektroskopů a elektrometrů a vliv na ně měly jak tlakové změny, tak fluktuace teploty.

V letech 1911 až 1913 proto uskutečnil deset balónových letů s Wulfovým elektrometrem speciálně upraveným pro účely balónových letů. Aby vyloučil chyby, používal současně při každém letu dva nebo někdy i tři elektrometry. Pět letů probíhalo ve dne a pět v noci. Nenalezl žádné rozdíly mezi denním a nočním měření, čímž vyloučil, že by zdrojem dodatečné ionizace bylo Slunce. Let v dubnu 1912 dokonce záměrně probíhal při prstencovém zatmění Slunce.



Wulfvův elektrometr, který podle Hessova návrhu zkonstruovali ve společnosti Günther & Tegetmeyer sídlící v Braunschweigu.

Při prvních šesti startech, které probíhaly z Vídně, Hess skutečně naměřil zvýšení ionizace ve výškách nad dva kilometry. Ne vždy se ale do takové výšky balónem dostal.

Hledal možnost, jak se dostat do mnohem větší výšky. Takový let by mu umožnil balón plněný nikoli horkým vzduchem, ale vodíkem. Klíčovým se stal sedmý Hessův start. Německý vzduchoplavecký spolek se sídlem v teplickém Šanově mu zapůjčil vodíkem plněný balón Böhmen. Balón byl naplněn 1680 m³ vodíku v areálu Rakouského spolku pro chemickou a hutní výrobu v Ústí nad Labem (dnešní Spolchemie). Dvoutunový balón odstartoval s tříčlennou posádkou dne 7. srpna 1912 v 6:12 ráno přímo z areálu ústecké chemičky. V 6:45 proletěl nad blízkými Chabařovicemi a v 9:15 vystoupal do výšky čtyř kilometrů. Posádka od této výšky používala k dýchání kyslík. Maximální výšku, 5 350 metrů, balón dosáhl v 10:45. Ve 12:15 přistál 30 kilometrů od Berlína. Hess naměřil ve výšce 4 700 metrů dvojnásobnou ionizaci vzduchu než na povrchu.



Start balónu Böhmen s Victorem Hessem na palubě z ústecké chemičky.
Zdroj: Muzeum města Ústí nad Labem.

Zhruba pět kilometrů vzdušných mas představuje pro pozemskou radiaci neproniknutelné stínění. Už ve výšce 1 000 metrů je ionizace způsobená povrchovou radiací téměř nulová, v pěti kilometrech je pozemský původ zcela vyloučen. O rok později, v roce 1913, potvrdil nezávisle Hessova měření další německý fyzik Werner Kolhörster (1887–1946), který je zopakoval při třech balónových letech uskutečněných z Vídně.

Hessova slibná kariéra byla přerušena první světovou válkou. V letech 1915 až 1917 byl vedoucím rentgenového oddělení Švédské vojenské nemocnice ve Vídni. Tři roky hledal místo kosmického záření polohy kulek ve tkáních postřelených vojáků. V roce 1920 Hess po deseti letech opustil Radiologický ústav a vrátil se do Štýrského Hradce, kde studoval. Od roku 1921 do roku 1923 čerpal nové síly ve Spojených státech. V roce 1923 se vrátil na domovskou univerzitu a působil zde jako profesor. Za objev kosmického záření získal Nobelovu cenu v roce 1936. Dělí se o ni s americkým fyzikem Carlem Andersonem (1905–1991), který ji získal za objev pozitronu v kosmickém záření. V roce 1938 musela Hessova židovská rodina prchnout před Adolfem Hitlerem do Spojených států, kde Hess strávil zbytek života. Do Evropy se už nevrátil. Jeho objev kosmického záření otevřel zcela nové okno do vesmíru. Až do Hessova přelomového objevu bylo jediným zdrojem informací o vesmíru elektromagnetické záření.

Sekundární spršky

Téměř souběžně s objevem kosmického záření se začala objevovat technika pro přímé zobrazování částic přilétajících z vesmíru. V roce 1911 zkonstruoval skotský fyzik a meteorolog Charles Thomas Rees Wilson (1869–1959) první mlžnou komoru. V přesycené vodní či alkoholové páře za sebou nabitě částice zanechávaly charakteristické mlžné stopy. Pro zobrazování stop kosmického záření použil mlžnou komoru poprvé sovětský vědec Dmitrij Skobelcyn (1892–1990) v roce 1927. Do mlžné komory přidal zdroj magnetického pole, které charakteristicky zakřivovalo dráhy nabitých částic. Americkému fyzikovi Carlu Andersonovi (1905–1991) umožnila takto upravená mlžná komora objevit v roce 1932 v kosmickém záření pozitron, antičástici k elektronu, a v roce 1936 mion, těžký elektron. V roce 1947 byly v kosmickém záření za pomoci mlžné komory objeveny kaony, částice obsahující podivný kvark. V padesátých letech 20. století začala být mlžná komora vytlačována bublinkovou komorou, kterou zkonstruoval v roce 1952 americký fyzik Donald Glasser (1926–2013). Princip je obdobný, částice v tomto detektoru zanechávají stopy v podobě bublinek v přehřáté kapalině.

Některé letící částice vytvářejí stopy i v klasické fotografické emulzi, její objem je ale malý, proto se tato technika využívá jen k zobrazení krátce žijících částic, jejichž stopy nejsou dlouhé. Miony (těžké elektrony) zanechávají stopy i v dnešních CCD čipech.

Zcela novou zobrazovací techniku objevil v roce 1934 sovětský fyzik Paul Čerenkov. Všiml si, že z láhve vody ozařované radioaktivním zdrojem uniká namodralé světlo. Později se ukázalo, že šlo o záření extrémně rychlých elektronů – tak rychlých, že se ve vodě pohybují rychleji než světlo. Při nadsvětelném pohybu vzniká za nabitou částicí charakteristický kužel záření, kterému se dnes říká Čerenkovovo záření. Pokud se do cesty rychlé nabitě částici kosmického záření dá nádoba s vodou, může být emitované světlo zachyceno fotonásobiči umístěnými na periferii nádoby. To je základním principem dnešních hojně používaných Čerenkovových detektorů.

Částice kosmického záření zanechávají stopy svého letu i v atmosféře. Excitují (a někdy i ionizují) atmosférický dusík. Ten potom vydává charakteristické fluorescenční záření v ultrafialovém oboru. Speciální dalekohledy konstruované pro sledování ultrafialového záření jsou schopné tyto stopy částic kosmického záření monitorovat do výšky patnácti až dvaceti kilometrů. K první interakci kosmického záření s atmosférou dochází ve výšce kolem 30 kilometrů. Technika sledování kosmického záření zaznamenala od prvních balónových experimentů značný pokrok.

V roce 1934 objevil vynikající italský experimentátor Bruno Rossi (1905–1993) spršky kosmického záření (viz obr. na protistraně, UK NNL). U několika detektorů pozoroval, že částice do nich přilétají ve stejném čase. Primární částice kosmického záření interaguje s atmosférou a dá vzniknout kaskádě sekundárních částic. Tyto spršky podrobně zkoumal o čtyři roky později francouzský fyzik Pierre Auger (1899–1993) vysoko v Alpách. Opět detekoval přílet celé kaskády částic do dvou vzdálených detektorů. Prvenství objevu spršek kosmického záření je často nesprávně připisováno Augerovi, dokonce se hovoří o Augerových sprškách. Auger dopočetl, že primární částice musely mít energie až 10^{15} eV, což byla deset milionkrát vyšší energie, než byla dosud u částic pozorována. V roce 1946



se začala stavět první pole korelovaných detektorů, jejichž cílem bylo zjištění struktury sekundárních spršek kosmického záření. Ve Spojených státech postavila takové pole skupina vedená objevitelem spršek Brunem Rossim, v Sovětském svazu byl ústřední postavou nových detektorů sovětský astrofyzik Georgij Zacepin (1917–2010). Až do nástupu urychlovací techniky v padesátých letech dvacátého století byly částice kosmického záření jedinou možností, jak zkoumat svět elementárních částic za vysokých energií.

Složení, energie a původ částic

Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra helia (alfa částice neboli alfa záření), 1 % jsou elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. V sekundárních sprškách vzniká obrovská škála částic včetně párů částice a antičástice. Nejčastěji jsou zastoupeny miony, těch dopadá přibližně deset tisíc na každý čtvereční metr za minutu. Kosmické záření je majoritním zdrojem antihmoty na naší planetě.

Kosmické záření má naprosto nejširší spektrum energií ze všech dodnes známých jevů. Částice malých energií k nám přilétají neustále. Čím energetičtější částice, tím je vzácnější. Nejenergetičtější částice kosmického záření, které se dosud podařilo detekovat, mají energie něco málo přes 10^{20} eV. Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za několik let. Sprška z ní zasáhne na zemském povrchu mnoho desítek kilometrů čtverečních a čítá miliony až miliardy částic. Mnohé vzácné a neznámé částice, které hledáme na největších urychlovačích světa, mohou přilétat s kosmickým zářením. Problém je ten, že na urychlovačích jsou experimenty opakovatelné a lze je uskutečnit kdykoli (pokud máme k dispozici potřebou energii). U kosmického záření jde vždy o čekání na náhodnou událost a navíc musí být nějaký detektor v pravý čas na pravém místě. Dosud nejenergetičtější zachycená částice z vesmíru byla polapena v roce 1991 detektorem Muší oko¹

1 **Muší oko** – detektor kosmického záření, který provozovala Univerzita v Utahu od roku 1981 do roku 1993. Detektor sledoval ultrafialovou fluorescenci atmosférického dusíku, k níž dochází při průletu částic s extrémně vysokou energií. Po roce 1993 bylo původní pole detektorů nahrazeno jiným, které fungovalo od roku 1997 do roku 2006.

v Utahu. Šlo o částici kosmického záření s energií $3,2 \times 10^{20}$ eV, která dostala název „*Oh My God Particle*“ (částice „Ó můj bože“). Není známo, o jakou částici šlo, protože v detektoru byla zachycena jen sekundární sprška. Na druhém místě je částice s energií 2×10^{20} eV zachycená v roce 1993 japonským detektorem AGASA².

Podle dosavadních znalostí by od hodnoty energie 5×10^{19} GeV (tzv. GZK mez) měl počet částic kosmického záření razantně klesat a částice s vyšší energií by měly být extrémně vzácné. Na vině je rozptyl energetických protonů na fotonech reliktního záření³. Reliktní záření je všudypřítomný elektromagnetický šum pocházející z období konce velkého třesku, kterým se protony kosmického záření prodírají na cestě k nám. Pokud nevznikají někde za humny, ale urazí alespoň 150 milionů světelných roků, poklesne jejich energie pod hodnotu GZK meze. Tato mez je pojmenována podle počátečních písmen příjmení vědců, kteří ji v roce 1966 jako první spočetli – na západní straně uměle rozděleného světa to byl americký fyzik Kenneth Ingvar Greisen (1918–2007) a na východě sovětský astrofyzik Georgij Timofjevič Zacepin (1917–2010) spolu se sovětským teoretikem Vadimem Alexejevičem Kuzminem (1937–2015). Částice s vyšší energií, než je GZK mez, by měly mít původ někde ve vzdálenosti menší než 150 milionů světelných roků.

Původ částic kosmického záření je dosud neznámý. S největší pravděpodobností nebudou pocházet z jednoho jediného typu zdroje. Původcem by mohly být exploze supernov, pulzary, aktivní galaktická jádra, srážející se galaxie atd. Extrémní energie některých částic kosmického záření je ale obtížně vysvětlitelná. V roce 1949 předložil nadějný mechanismus italský fyzik Enrico Fermi (1901–1954). Nabité protony se mohou na své cestě vesmírem odrážet od

-
- 2 **AGASA** – *Akeno Giant Air Shower Array*, japonský detektor kosmického záření s vysokými energiemi. Rozkládá se na ploše 100 km² a skládá se ze 111 pozemních detektorů a 27 mionových detektorů krytých absorbérem. Detektor je v provozu od roku 1991.
 - 3 **Reliktní záření** – záření, které se od látky oddělilo přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru, v době, kdy se vytvářely atomární obaly prvků a končilo plazmatické období vesmíru. Počáteční horkou (plazmatickou) fázi existence vesmíru nazýváme velký třesk a reliktní záření tedy pochází z období konce velkého třesku. Dnes má teplotu 2,73 K a vlnovou délku v milimetrové oblasti. Je jedním ze základních zdrojů informací pro naše poznání raného vesmíru.

magnetických oblaků – oblastí zvýšeného magnetického pole, které se chovají jako magnetická zrcadla. Pokud se takový oblak pohybuje proti nalétávající částici, bude mít částice po odrazu vyšší energii než před ním. Naopak, pohybuje-li se oblak ve směru pohybu částice, energii při odrazu ztratí. Určitá velmi malá část protonů statisticky projde větším množstvím příznivých odrazů a získá extrémní energii. Tento Fermim navržený vesmírný „urychlovač“ může určitému procentu nabitých částic dodat značné energie. V současnosti se domníváme, že alespoň některé částice s velkými energiemi pocházejí z konkrétních astrofyzikálních zdrojů. Jejich odhalení je ale nesmírně obtížné, protože mezigalaktická magnetická pole nabitě částice odklánějí z původního směru. Pokud se nám z charakteristik sekundární spršky podaří určit směr letu částice, která ji vytvořila, vůbec nejde o směr ke zdroji této částice. Jediné částice, které letí přímočaře i na extrémní vzdálenosti jsou neutrina. Dne 22. září 2017 bylo v detektoru IceCube detekováno neutrino s energií $2,90 \times 10^{14}$ eV, tj. s čtyřicetkrát vyšší energií, než mají protony ve Velkém kolideru v CERNu. Při této události se podařilo určit směr, ze kterého neutrino přilétlo. Šlo o oblast ze souhvězdí Orionu, v níž se nachází ve vzdálenosti 7 miliard světelných roků blazar⁴ TXS 0506+05. Pokud jde skutečně o zdroj neutrina (je to pravděpodobné, ale jistotu nemáme), je to poprvé, co byl přímo detekován zdroj původu částice, která přilétla s extrémní energií ze vzdáleného vesmíru.

Velké observatoře

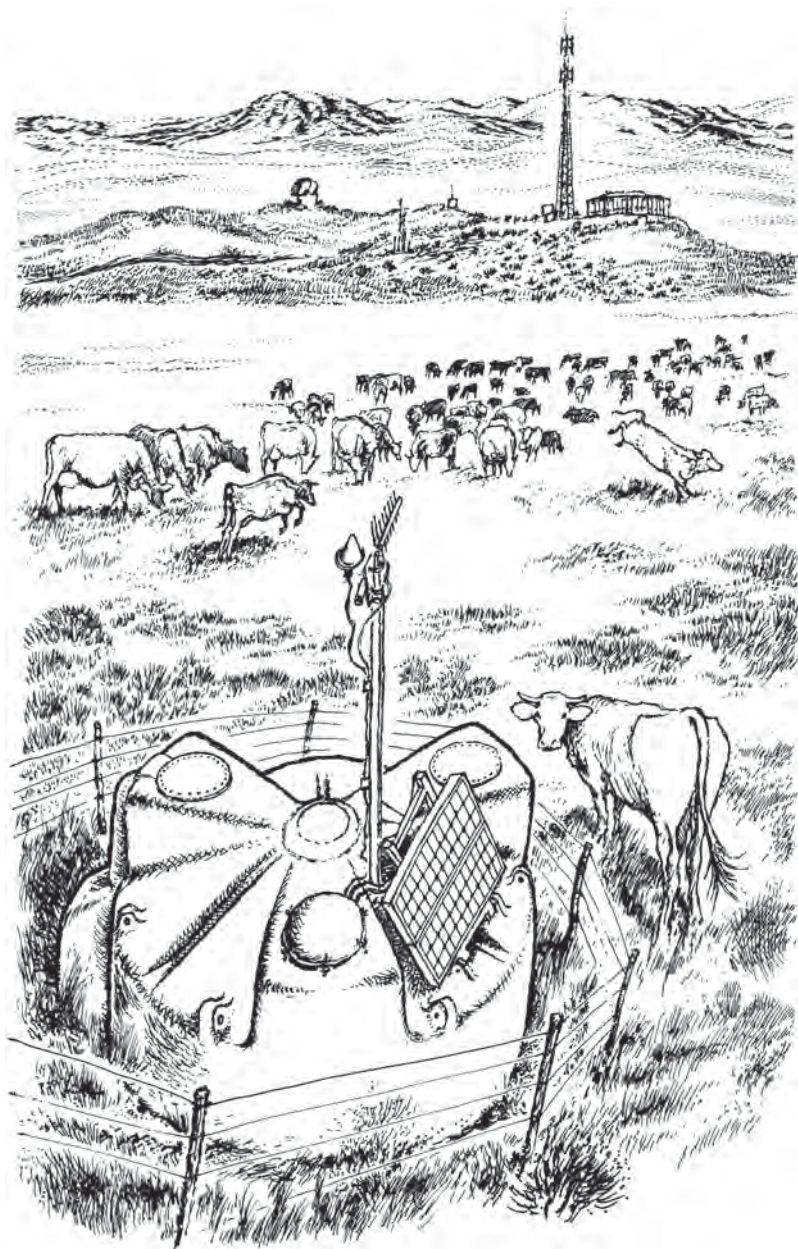
V současnosti existuje velké množství detektorů schopných nějakým způsobem získávat informace o kosmické záření, některé jsou dokonce ve vesmíru. Příkladem může být detektor AMS 2 na rameni Mezinárodní kosmické stanice nebo první vesmírný detektor kosmického záření PAMELA, který pracoval na oběžné dráze od roku 2006 do roku 2016. U pozemních detektorů jsou v podstatě tři možnosti. První z nich je přímo zachytávat částice sekundárních

4 **Blazar** – nejenergetičtější skupina galaxií s kompaktním aktivním jádrem. Výtrysk z centrální galaktické černé díry míří přímo k nám. Typickými blazary jsou například proměnné galaxie typu BL Lacertae.

spršek detektory umístěnými na povrchu Země. Výhodou je trvalé pozorování ve dne i v noci, nevýhodou je zachycení pouhého čela dopadající spršky. Druhou možností jsou fluorescenční detektory, které zpracovávají ultrafialový signál vydávaný atmosférickým dusíkem, jenž excitovaly prolétávající částice kosmického záření. Třetí možností je sledovat namodralé Čerenkovovo záření, které v atmosféře vytvářejí nabitě částice sekundární spršky (jen ty které se pohybují nadsvětelně). Výhodou obou typů atmosférických pozorování je možnost sledování celé spršky, nevýhodou je nutnost pozorovat pouze za bezměsíčných a jasných nocí. Mnoho detektorů kombinuje pozemní i atmosférické detektory (tzv. hybridní detektory). Ideální jsou celá detektorová pole, která umožňují sledovat strukturu spršky. Popis všech významných detektorů by byl námětem na celou knihu, proto se omezíme jen na některé z nich.

Za zmínku určitě stojí detektor H.E.S.S., který je postaven v Namíbií. Jde o pěťici dalekohledů rozmístěných 120 metrů od sebe. Krajní dalekohledy jsou ve formaci čtverce a mají průměr 12 metrů. Uprostřed je pátý dalekohled s průměrem 28 metrů. Dalekohledy sledují Čerenkovovo záření, které vytváří sprška při průletu atmosférou. Název H.E.S.S. má připomenout objevitele kosmického záření Victora Hesse, současně je ale zkratkou z anglického „*High Energy Stereoscopic System*“. Detektorové pole funguje od roku 2003 a je orientováno zejména na spršky vzniklé po příletu gama fotonů s extrémními energiemi. Gama astronomie, jak se novému odvětví začalo říkat, má velké úspěchy. V roce 2016 se podařilo detekovat gama fotony přilétající z centrální černé díry v naší Galaxii, v roce 2020 gama fotony z rádiové galaxie Centaurus A.

Dalším klíčovým detektorem je japonské pole AGASA (*Akeno Giant Air Shower Array*). Na ploše 100 km² je rozmístěno 111 detektorů, jejichž základem je plastový scintilátor. Záblesk způsobený dopadlou částicí je detekován fotonásobičem. U 27 detektorů je ještě stíněný mionový detektor. Jak jsme se již zmínili, v roce 1993 byla tímto detektorem zachycena sekundární sprška z částice o energii 2×10^{20} eV, která měla jen o něco menší energii než slavná částice „*Ó můj Bože*“ zachycená o dva roky dříve Mušim okem v Utahu.



Observatoř Pierra Augera. V popředí je jeden ze „sudů“ – Čerenkovových detektor. Na horizontu je stanice fluorescenčních teleskopů Los Leones (nízká budova napravo) u městečka Malargüe. Vedle ní je anténa zajišťující komunikaci se stanicemi.

Největším současným detektorovým polem je *Observatoř Pierra Augera* pojmenovaná podle jednoho z objevitelů spršek kosmického záření. Observatoř tvoří celkem 24 fluorescenčních detektorů soustředěných po šesticích ve čtyřech rozích zastavěné oblasti a 1 660 Čerenkovových detekčních stanic („sudů“) pokrývajících území o rozloze 3 000 km². Jako vhodné místo byla zvolena Argentina, oblast Pampa Amarilla, což je polovyprahlá planina v blízkosti města Malaragüe. Do projektu, jehož realizace započala v roce 2005, je zapojena i Česká republika – podíleli jsme se na výrobě a testování zrcadel některých dalekohledů a systematicky monitorujeme stav atmosféry v oblasti. Observatoř je v plném provozu od roku 2007. V původním projektu se uvažovalo i o observatoři na severní polokouli, ta se ale z finančních důvodů nerealizovala.

Každá z Čerenkovových detekčních stanic je vlastně sud naplněný dvanácti tunami čisté vody. Ve vodě se nabitě částice sekundárních spršek (elektrony a miony) pohybují nadsvětelnou rychlostí a vytvářejí za sebou kužel Čerenkovova záření. To je zachytáváno třemi fotonásobiči v horní části detektoru. Součástí každé stanice je vyhodnocovací elektronika, vysílací anténa, GPS anténa pro synchronizaci času příchodu spršky s ostatními stanicemi a nezbytný panel slunečních baterií, který zajišťuje energii pro provoz stanice. Stanice jsou od sebe rozmístěny ve vzdálenosti 1,5 kilometru. Od roku 2015 se do těchto stanic postupně přidávají scintilační detektory, které by měly odlišit miony od elektronů.

Fluorescenční dalekohledy mají průměry zrcadel 3,5 metru. Zrcadla jsou nepohyblivá a v ultrafialovém oboru sledují prostor nad detekčními stanicemi. Záření dusíku excitovaného prolétávající částicí vyhodnocuje 440 fotonásobičů.

Observatoř Pierra Augera je orientována na částice s extrémní energií. Je schopná zachytit několik událostí s energií nad 5×10^{19} elektronvoltů měsíčně. Na obřím projektu se podílí 500 vědců ze sta institucí celého světa. V roce 2017 byl po deseti letech pozorování oznámen objev anizotropie kosmického záření v oblasti energií nad 8×10^{18} elektronvoltů.

V současné době je ve výstavbě další významný detektor, na jehož přípravě se velkou měrou podílela Česká republika – jde o Čerenkovovo pole teleskopů CTA (*Cherenkov Telescope Array*), které bude sledovat Čerenkovovo záření sekundárních spršek přímo v atmosféře (obdobně funguje detektor H.E.S.S.). Primárně bude pole CTA zaměřeno na gama astronomii. Pole CTA bude mít dvě části – jižní v Chile a severní na ostrově La Palma. Celkem bude v obou lokalitách pracovat přes sto dalekohledů třech velikostí; projekt CTA se stane největší gama observatoří na světě. Stavba byla zahájena v roce 2021. Česká republika je jednou z jedenácti zemí, které se na stavbě tohoto gigantu budou podílet. Již v předchozích etapách se u nás testovala zrcadla a čeští odborníci monitorovali atmosféru ve všech lokalitách, které pro stavbu přicházely v úvahu.

Poznávání kosmického záření přispělo k rozvoji gama astronomie, neutrinové astronomie a k vývoji zcela nové detektorové techniky. Při výzkumu kosmického záření se doslova stýká makrosvět představovaný zdroji kosmického záření ve vesmíru s mikrosvětlem elementárních částic, který byl dosud doménou částicových laboratoří.

Víte, že?

■ Víte, že podle sovětského fyzika Alexandra Gureviče je pro vznik blesku přítomnost kosmického záření nezbytná? Alexandr Gurevič (*1930) v roce 1992 ukázal, že v bouřkovém oblaku není dostatečně vysoké napětí ke vzniku blesku a jako první předpokládal, že přítomnost elektronů extrémních energií z kosmického záření průrazné napětí výrazně sníží.

■ Víte, že pozorování sekundárních spršek kosmického záření probíhá i v České republice? V rámci projektu CZELTA (*CZEch Large-area Time coincidence Array*) rozmisťuje od roku 2008 Ústav teoretické fyziky ČVUT v Praze pozorovací stanice na střechy vybraných středních škol. Každá stanice obsahuje plastový scintilátor, jehož záblesky jsou zaznamenány citlivým fotonásobičem.

■ Víte, že první vědecká měření při letu balónem prováděli americký lékař John Jeffries a francouzský aeronaut Jean Pierre Blanchard? V balóně, v němž v lednu 1783 přeletěli Lamanšský průliv, měli barometr, teploměr, vlhkoměr a elektroskop. Blanchard je považován za prvního profesionálního balónového letce (aeronaute).

■ Víte, že se Pierre Auger, jeden z objevitelů sekundárních spršek kosmického záření, podílel na založení částicového komplexu CERN a že byl prvním ředitelem Evropské rady kosmického výzkumu, z níž později vznikla Evropská kosmická agentura?

Poučení na závěr: Až příště poletíte balónem, nezapomeňte si přibalit jednoduchý elektroskop. Od kilometru výše můžete sledovat částice přilétající z velkých vesmírných dálav.





12. Magnetická pole ve vesmíru

„Fyzika je věda o fascinujících neviditelnostech: magnetizmu, elektřině, gravitaci, světle, zvuku či kosmickém záření.

*Fyzika je věda o tajemstvích vesmíru.
Jak si někdo může myslet, že je nudná?“*

Dick Francis, britský spisovatel

V knížce, k jejímuž závěru se blížíme, jsme vám nabídli poněkud netradiční pohled na Sluneční soustavu. V předchozích dvou kapitolách jsme ji opustili a nahlédli do vzdálenějšího světa exoplanet a kosmického záření. Jak vlastně vypadá magnetické pole naší Galaxie a galaxií ostatních? Nachází se magnetické pole i v mezigalaktickém prostoru? Kde všude ho můžeme nalézt a jaká jsou nejsilnější pole ve vesmíru? A jak ve vesmíru magnetické pole vzniká? Jak ho můžeme změřit? To jsou otázky, na které se pokusíme odpovědět v posledních dvou kapitolách.

Jak pole vznikají

Rámcové představy máme o tom, jak vznikají magnetická pole v planetách a ve hvězdách. Základním zdrojem polí jsou proudy vodivé tekutiny v nitru objektu. Diferenciální rotace pak vede ke vzniku tekutinového dynama a přelévání vzniklého magnetického pole mezi dipólovou a azimutální složkou, do které jsou siločáry strhávány rotací objektu. Fluktuace rychlostního pole způsobí opačnou změnu: azimutálního pole na pole dipólové.

Jiná situace je s magnetickými poli v galaxiích, kupách galaxií a případně na ještě větších škálách. Stejný mechanismus uplatnit nelze, protože tyto objekty od doby svého vzniku mohly dokončit jen

několik otoček, a to k zesílení pole efektem tekutinového dynama nestačí. Zde nemáme ani rámcové představy o vzniku těchto polí, existuje pouze řada nepotvrzených hypotéz. Jednou z nejnádějnějších je vznik prvotních polí ze zárodečných fluktuací v období před tvorbou atomárních obalů. K té došlo na konci velkého třesku, přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru. Většina elektronů byla tehdy zachycena do atomárních obalů a úbytek volných elektronů znamenal výrazné snížení interakce elektromagnetického záření s látkou. Záření se oddělilo od látky a postupně chladlo. Dnes mu říkáme *kosmické záření pozadí* nebo *reliktní záření*. Teplotu má pouhých 2,73 K a nese v sobě dávný otisk stavu látky v tehdejší vesmíru. Nepatrně různá teplota reliktního záření v různých směrech je svědectvím o tom, že v době jeho oddělení od látky se ve vesmíru nacházely výrazné fluktuace hustoty tehdejší látky.

Podle některých výpočtů by tyto fluktuace ionizované látky mohly vytvořit zárodky prvotních magnetických polí v galaxiích a dokonce výrazně ovlivnit vznik prvních hvězd. Až do tvorby atomárních obalů existovaly ve vesmíru jen volné elektrony a protony, tj. volné nosiče elektrického náboje. Tlak elektromagnetického záření na protony a elektrony v zárodečných fluktuacích byl různý a to mohlo vést ke vzniku cirkulujících elektrických proudů, které byly zdrojem magnetického pole. Toto zárodečné pole mělo milionkrát slabší intenzitu než současná pole v galaxiích.

Popsaný mechanismus vzniku pole z fosilních fluktuací se zdá být nejpřirozenější. V zájmu úplnosti ale poznamenejme, že existuje celá řada jiných teorií o vzniku prvotních vesmírných magnetických polí. Zárodečná pole mohla například vznikat v discích látky rotující kolem černých děr. Někteří teoretici zavádějí k vysvětlení prvotních polí nové fyzikální mechanismy, například interakci elektromagnetického pole s tehdy přítomnými exotickými částicemi nebo s gravitačním polem v okamžicích těsně po vzniku vesmíru. Magnetická pole by také mohla vznikat již deset mikrosekund po vzniku vesmíru při tzv. hadronizaci¹ látky, kdy se z kvarkového-gluonového

1 **Hadronizace** – proces, při kterém se samovolně spojují kvarky do větších celků. Částicím složeným z kvarků říkáme hadrony.

plazmatu² vytvářely protony a neutrony a další částice složené z kvarků. Další teorie předpokládají, že by magnetická pole mohla vznikat ještě dříve, a to při oddělení slabé a elektromagnetické interakce. K tomu došlo v čase 10^{-10} sekund po vzniku vesmíru, kdy průměrné energie částic byly 100 GeV. Jsou ale ještě další možnosti: magnetická pole by mohla vznikat třeba v průběhu inflační fáze (prudké expanze) nebo za pomoci kosmických strun – jednorozměrných topologických defektů, jakýchsi atypických lineárních gravitačních objektů.

Přestože přesně nevíme, jak prvotní pole vznikala, jedno je jisté: jakmile se jakýmkoli způsobem objevila, byla už nezničitelná. Magnetická pole jsou vázána na ionizovanou látku, kamkoli se taková látka pohne, budou ji magnetická pole sledovat. Hovoříme o jevu zamrzlého pole v plazmatu.

Objekty v galaxiích

Máme nějaké přímé důkazy existence magnetických polí za hranicemi Sluneční soustavy? Ano, máme. V podstatě známe tři možnosti přímé detekce polí. Jedna je založena na nalezení polarizovaného synchrotronního záření, které vzniká při pohybu relativistických elektronů kolem magnetických siločar. Druhou možností je Zeemánův jev, charakteristické rozštěpení spektrálních čar, ke kterému dochází v přítomnosti magnetického pole. Čím dále jsou ve spektru satelitní čáry, tím silnější bylo magnetické pole, které způsobilo rozštěpení. Jev byl pojmenován podle holandského fyzika Pietera Zeemana (1865–1943). Poslední přímou metodou je využití jevu Faradayovy rotace. Polarizované světlo šířící se podél magnetického pole stáčí svou rovinu polarizace. Úhel stočení je úměrný indukci magnetického pole a vzdálenosti, na které bylo světlo magnetickému poli vystaveno. Jev byl pojmenován podle anglického knihaře a později fyzika Michaela Faradaye (1791–1867). Magnetické pole lze detekovat i nepřímou, na základě struktur, které jsou pro

2 **Kvarkové gluonové plazma** – stav látky, v němž se kvarky a gluony chovají jako volné částice. Ve vesmíru šlo o období do deseti mikrosekund. Tuto formu látky umíme uměle připravit na urychlovačích.

přítomnost magnetického pole typické. Může jít například o plazmová vlákna stočená do šroubovic. Podrobněji si možnosti detekce magnetických polí probereme v poslední kapitole.

Hvězdy. Ve hvězdách vzniká magnetické pole stejným mechanismem jako u našeho Slunce. Hvězdy tvoří vodivé plazma a při jeho (předpokládané) diferenciální rotaci vznikají efektem tekutinového dynama magnetická pole. V závěrečných fázích vývoje se mění velikost hvězd. Přitom se uplatňuje zákon zachování magnetického indukčního toku: součin magnetického pole a plochy povrchu hvězdy je přibližně konstantní. Magnetické pole bílých trpaslíků a neutronových hvězd, které patří k závěrečným vývojovým stádiím, je proto velmi silné. Extrémní pole byla nalezena kolem neutronových hvězd a zejména tzv. *magnetarů*³, o kterých pojednáme dále.

Poměrně silná pole (převyšující jednu teslu⁴) byla naměřena pomocí Zeemanova jevu u tzv. Ap hvězd, chemicky atypických hvězd se silným dipólovým globálním polem. U některých bílých trpaslíků byla naměřena pole 100 až 1 000 T. Pole neutronových hvězd mohou mít hodnotu až 10^9 T, u magnetarů dokonce 10^{12} T.

Černé díry. Velmi hmotné hvězdy mohou skončit jako černé díry – objekty, ze kterých kvůli extrémní gravitaci nemůže uniknout ani světlo. Kromě černých děr hvězdných hmotností známe i obří černé díry v galaktických jádrech. Paradoxně je okolí černých děr zdrojem přibližně čtvrtiny záření emitovaného za celou historii vesmíru. Kolem většiny černých děr se tvoří akreční disky, ze kterých postupně látka padá do černé díry. Padající látka intenzivně září ve všech spektrálních oborech. Nadbytečný moment hybnosti odnáší vítr částic proudící z disku do okolního prostoru. A právě mechanismus, jakým látka disku ztrácí energii, aby mohla dopadnout na černou díru, není dosud zcela znám. Existuje několik vzájemně se vylučujících teorií, zdá se ale, že výsledky výzkumů ukazují přede-

3 **Magnetar** – neutronová hvězda, u níž bylo těsně po vzniku magnetické pole zmnohonásobeno efektem tekutinového dynama.

4 **Tesla** – jednotka indukce magnetického pole pojmenovaná podle srbsko-amerického vynálezce Nicola Tesly. Nejsilnější přirozená pole na Zemi mají hodnotu jednotek tesel. V laboratoři bylo vytvořeno pulzní pole převyšující tisíc tesel poprvé v roce 2018.

vším na jednu z nich. V roce 2006 se u blízké černé díry GRO J1655-40 prokázalo, že za ztrátu energie látky a její následný pád do černé díry mohou turbulence magnetického pole v disku. Jádrem důkazu je změření rentgenového spektra záření družicí Chandra. Spektrum přesně odpovídá numerickým simulacím, ve kterých látka disku ztrácí energii kvůli turbulencím magnetického pole. Simulace využívající alternativní mechanismy poskytly spektrum zcela odlišné, je tedy možné, že i u ostatních černých děr je magnetické pole zodpovědné za genezi intenzivního elektromagnetického záření černé díry.

Magnetické pole vytváří ve směru osy rotace černé díry typickou magnetickou trubici, kterou unikají některé částice akrečního disku do okolí černé díry v podobě dvou výtrysků. Ve výtryscích jsou částice urychlovány magnetickým polem na rychlosti blízké rychlosti světla. Jde o obdobný mechanismus, jako když ráno stisknete v koupelně tubu zubní pasty a její obsah vystříkne do umyvadla. U černé díry způsobí ono stisknutí tlak pole magnetické trubice.

Mlhoviny. Magnetická pole v mlhovinách se většinou detekují prostřednictvím polarizace synchrotronního záření. V některých mlhovinách nalezneme plazmová vlákna, typické struktury vyvíjející se v přítomnosti magnetického pole. Pokud mají tato vlákna helikální (přibližně šroubovicovou) strukturu, není o přítomnosti magnetického pole v mlhovině pochyb. Zajímavé jsou planetární mlhoviny; říká se jim tak proto, že ty první objevené v malých dalekohledech vypadaly jako kotoučky podobné planetám.

Planetární mlhoviny mají nejroztodivnější tvary a barvy a jsou ozdobou každé astronomické publikace. Jsou to odhozené obálky dožívajících hvězdných obrů, v jejichž nitru se termojadernou syntézou přeměňuje helium na těžší prvky, zejména uhlík, dusík a kyslík. V závěrečných fázích života těchto hvězd dochází k nestabilitám, které vedou k jednorázovému nebo i opakovanému odhazování obálek. Ty mají v některých případech sférickou strukturu (často viditelnou jako prstenec kolem hvězdy), v mnoha jiných případech mají ale tyto mlhoviny bipolární (motýlovitý) tvar s vystupujícími vlákny látky, jejichž vznik se po dlouhá léta nedařilo objasnit.



Mlhovina Mravenec (Ant, Menzel 3, Mz3), typická bipolární mlhovina se dvěma laloky a radiálně vystupujícími vlákny. Za strukturu je odpovědné silné magnetické pole. Mravenec se nachází v souhvězdí Pravítka ve vzdálenosti 8 000 světelných roků od Země. Mlhovina má na délku přibližně dva světelné roky. Expanduje rychlostí 50 km/s. Kresba podle HST/WFPC2, 2001.

Jedno z možných vysvětlení počítalo s tím, že hvězda je součástí dvojhvězdné soustavy a druhá složka není vidět. Mohlo by jít o hnědého trpaslíka, bílého trpaslíka nebo neutronovou hvězdu. Druhá složka by mohla způsobit často fotografované n esf érick é tvary obálek s typickými dvěma laloky.

Druhým možným vysvětlením je přítomnost magnetického pole v mlhovině. Ionizovaný materiál mlhoviny se pohybuje podél magnetických siločar a vytváří pozorované struktury. Překvapivá byla měření z roku 2003, která provedli Wouter Vlemmings (Jodrell Bank Observatory), Philip Diamond (University of Manchester) a Huib Jan van Langevelde (Joint Institute for VLBI). Magnetická pole měřili v planetárních mlhovinách v okolí tří červených veleobrů (konkrétně šlo o hvězdy S Persei, VY Canis Majoris a NML Cygni a měření se prováděla pomocí soustavy radioantén VLBA⁵). V obálkách hvězd veleobrů je přítomen prach, plyn a vodní pára. Ta působí jako přirozený vodní maser (analogie laseru v mikrovlnné oblasti), který zesiluje elektromagnetické vlnění o vlnové délce 1,3 cm, odpovídající přechodu mezi dvěma rotačními stavy molekul vody. Tato spektrální čára se v přítomnosti magnetického pole štěpí Zeemanovým jevem na více čar. Ze vzdálenosti jednotlivých čar je možné určit indukci magnetického pole. Naměřené hodnoty byly překvapivé: 0,05 až 0,1 mT. Uvědomíme-li si, že pole je generováno centrální hvězdou, musí být jeho hodnota na povrchu hvězdy zhruba 5 až 100 mT, což je pole o jeden až dva řády vyšší než na povrchu Slunce. Takto silná pole u umírajících obrů nikdo neočekával. Snad jsou generována rychle rotujícími povrchovými vrstvami nebo diferenciální rotací jádra. Ať už je ale jeho původ jakýkoli, je natolik silné, že je zcela jistě odpovědné za pozorované struktury ve zkoumaných planetárních mlhovinách.

Velkou neznámou je vliv magnetických polí na vznik hvězd v zárodečných mlhovinách. V dnešní době se zdá, že tato pole mohla mít

5 **VLBA** – Very Large Baseline Array, síť deseti radioteleskopů rozmístěná od Havajských po Panenské ostrovy s délkou základny 8 600 km. Průměr každé antény je 25 m, provozovatelem je National Science Foundation se sídlem v Novém Mexiku. Síť funguje od roku 1993.

rozhodující význam při vzniku zárodečných globulí, ze kterých později vznikaly hvězdy. Magnetická pole mohou způsobit i separaci chemických prvků v okolí rodící se hvězdy. Bez magnetických polí by pravděpodobně nebyl možný rychlý vznik první generace obřích hvězd v období stovek milionů let po velkém třesku. Právě tyto hvězdy obohatily vesmír o těžké prvky vzniklé termojadernou syntézou v jejich nitrech.

Galaxie a jejich kupy

Naše Galaxie. Naše Galaxie (zvaná též Mléčná dráha) je obří hvězdný ostrov, ve kterém se nachází přibližně 200 miliard hvězd a světlo z jednoho konce na druhý dolétne za více než 100 000 roků. Magnetická pole jsou samozřejmou součástí života všech hvězd a většiny mlhovin. V Galaxii se nachází rozsáhlé oblasti neutrálního vodíku, tzv. H I oblasti. Jejich ionizace je velmi nízká: odhaduje se, že stupeň ionizace je 10^{-4} , tj. na 10 000 neutrálních atomů je jeden ionizovaný. Díky svým velkým rozměrům se ale i tyto oblasti chovají jako plazma a reagují na magnetická pole; proto se v nich vytvářejí vláknité struktury typické pro přítomnost magnetických polí. H I oblasti se většinou zkoumají na vlnové délce 21 cm, což je vlnová délka přechodu mezi stavem vodíkem se souhlasně orientovanými spiny protonu a elektronu a stavem s nesouhlasně orientovanými spiny.

V centru Galaxie pozorujeme několik plazmových vláken o délce asi 250 světelných roků, která připomínají pokroucená lana a mají tedy šroubovicovou strukturu. Vlákna jsou nepřímým svědectvím existence magnetického pole v této oblasti. Jeho velikost se v současné době dá dobře odhadnout z polarizace signálu vysílaného prachovými zrnky a vychází řádově 10^{-7} T.

Nezávisle je magnetické pole v Galaxii zjišťováno z polarizace světla hvězd do vzdálenosti 4 000 světelných roků a z Faradayovy rotace polarizovaných zdrojů. Ukazuje se, že siločáry pole jsou orientovány v galaktické rovině a sledují spirální ramena Galaxie. Toto globální pole Galaxie má v blízkosti galaktického jádra hodnotu 10^{-8} T,

v rovině Galaxie 10^{-9} T a v galaktickém halo⁶ 10^{-10} T. Obdobné pole očekáváme i v ostatních spirálních galaxiích.

Podrobné mapování magnetického pole naší Galaxie umožnil až prach soustředěný v galaktickém disku. Mikrometrová zrnka v sobě obsahují atomy železa a chovají se jako malé magnety, které precedují (točí se jako káča) kolem magnetických siločar. Při tomto pohybu vzniká milimetrový elektromagnetický signál s charakteristickou polarizací. Sonda Planck (2009–2013), jejímž hlavním cílem bylo sledování reliktního záření, měřila polarizaci elektromagnetického signálu z oblohy právě v okolí jednoho milimetru. V roce 2018 byly uvolněny podrobné mapy průběhu siločar magnetického pole Galaxie dopočítané z dat naměřených sondou. Můžete si je prohlédnout na obr. 40 a 41 barevné přílohy. Na obr. 42 je průběh siločar v těsném okolí naší galaktické černé díry určený z polarizace prachu, která byla měřena Velkým kanárským teleskopem GTC.

Jiné galaxie. Z nepřímých měření je známo magnetické pole v aktivních jádrech radiogalaxií, kde dosahuje hodnot o dva řády vyšších než v galaxiích spirálních, tj. 10^{-6} T. Magnetické pole uvnitř cizích galaxií bylo poprvé přímo pozorováno na počátku roku 2007, a to v mimořádně svítících infračervených galaxiích. Tyto objekty astronomové nazývají ULIRG (*Ultra Luminous InfraRed Galaxy*). Jde o velmi jasné galaxie zářící převážně v infračervené části spektra. Galaxie ULIRG byly poprvé popsány v roce 1972 a později soustavně objevovány družicí IRAS během roku 1983. Další vlnu sledování umožnil infračervený Spitzerův vesmírný dalekohled (SST, *Spitzer Space Telescope*). Zdá se, že galaxie ULIRG jsou ve vesmíru stejně četné jako kvazary. Nejbližší je Arp 220 (vzdálenost 250 milionů světelných roků) v souhvězdí Hada. Je stokrát svítivější než naše Galaxie, maximum má ale v infračerveném oboru. Vzdálenější obří galaxie ULIRG by mohly být předchůdci galaktických kup.

6 **Galaktické halo** – oblast obklopující nejnápadnější část galaxie. U spirálních galaxií jde o prostor kulového tvaru opsaný galaktickému disku. Halo je tvořeno řídkou mezihvězdnou látkou a nachází se v něm kulové hvězdokupy vázané gravitačně na mateřskou galaxii. Koncentrace látky v halo se snižuje s rostoucí vzdáleností od roviny galaxie a od jejího jádra.

Plyn s hydroxylovými molekulami (OH) v okolí rodících se hvězd funguje jako aktivní prostředí, v němž dochází k laserování v mikrovlnném oboru. Takový zdroj světla nazýváme maser a je celkem běžný v okolí hvězdných porodnic i v naší Galaxii. V galaxiích ULIRG jde ale o megamasery, jejichž svit je tisíckrát větší než svit našeho Slunce. Megamasery v galaxiích ULIRG byly zkoumány radioteleskopem Arecibo na ostrově Portoriko; měl průměr 305 m a šlo o největší nepohyblivý dalekohled na světě (ohnisková kabina se zřítíla v roce 2020 a teleskop zničila). V šesti galaxiích ULIRG bylo nalezeno celkem 16 megamaserů. Ze Zeemanova rozštěpení signálu byla zjištěna přítomnost magnetického pole ve čtyřech ze šesti sledovaných galaxií, včetně nejbližší ULIRG galaxie Arp 220. Tento významný objev ohlásili Timothy Robishaw, Carl Heiles a Eliot Quataert z Kalifornské univerzity v Berkeley v lednu 2007.

Magnetická pole spirálních galaxií je možné mapovat, podobně jako u naší Galaxie, z polarizace mikrovlnného signálu, kterou způsobují prachová zrnka. Rekonstrukci magnetických siločar ve spirální galaxii IC 342 ze souhvězdí Žirafy naleznete na obr. 43 barevné přílohy. Na obr. 44 je obdobná rekonstrukce pro Galaxii v Andromedě. Vrcholem této techniky je rekonstrukce zprohýbaných siločar v galaxii Centaurus A, kterou naleznete na astronomickém snímku dne z 21. dubna 2021 (<https://apod.nasa.gov/apod/ap210421.html>). Magnetická pole by měla propojovat i jednotlivé galaxie v kupách galaxií, představa magnetické struktury Kupy galaxií v Panně je na obr. 45 barevné přílohy.

Výtrysky. Rozsáhlé vláknité struktury jsou pozorovány ve výtryscích z aktivních jader galaxií, kvazarů nebo černých děr. Výtrysky obsahují rychle se pohybující nabitě částice reagující na přítomnost magnetických polí. V některých výtryscích byly pozorovány i šroubovicové struktury, za jejichž vznik je zodpovědné magnetické pole.

Magnetické bubliny. V roce 2000 byla v galaxii M82 objevena obří magnetická bublina s rozměry přes 3 000 světelných roků. Magnetická pole způsobují pravděpodobně toky energetických částic tvořené mezihvězdným plynem, který pochází z hvězd a supernov.

K pozorování M82 byl použit radioteleskop Jamese Clerka Maxwella o průměru 15 m, umístěný na hoře Mauna Kea na Havajských ostrovech. Radioteleskop je určen k pozorování záření o vlnové délce kolem 1 mm. Je vybaven kamerou SCUBA s detektory chlazenými na 0,1 K. Kamera detekuje pomocí polarimetru obě na sebe kolmé roviny polarizace, ze kterých je záření složeno. Polarimetr má velmi jemnou mřížku s roztečí 6 μm , která propouští jen jednu rovinu záření, a dvojlomný křemenný krystal, který otáčí rovinu polarizace. Výsledkem je obraz, který se každých 30 sekund mírně změní a lze z něho dopočítat směr magnetického pole.

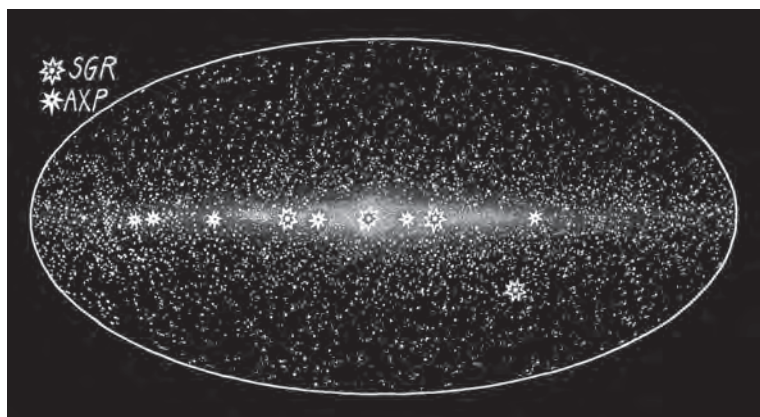
Obří bublina byla nalezena v kupě galaxií Abell 2597 tvořené stovkami galaxií. Kolem nich je oblak velmi horkého plynu s teplotou 10^7 až 10^8 K, který září rentgenově. Na RTG snímku z observatoře Chandra je vidět horký plyn v centrálních oblastech kupy a dvě velké dutiny s rozměry přibližně 60 000 světelných roků. Dutiny jsou pravděpodobně 100 miliónů let staré pozůstatky související s aktivitou velmi hmotné černé díry v jádře kupy. Dutiny jsou tvořeny magnetickým polem a horkým plynem energetických částic – jinak by se již dávno pod tlakem okolního plynu zhroutily. Magnetické bubliny mohou nepřímo přispět k tvorbě nových hvězd v galaktické kupě. Ochlazují hmotu padající do černé díry, která je zodpovědná za vznik bubliny. Plyn padající do černé díry září v rádiovém oboru a může spustit mechanismus tvorby nových hvězd. Obdobné procesy mohou probíhat i v ostatních kupách galaxií. Z toho se dá odhadnout, že magnetismus mohl mít rozhodující vliv při vytváření vesmírných struktur v minulosti, kdy vesmír byl menší a záření bylo mnohem intenzivnější.

Velkorozměrová struktura. Magnetická pole byla nalezena i na měřících větších, než jsou kupy galaxií. Příkladem může být objev slabé rádiové emise na frekvenci 326 MHz v oblasti mezi kupou galaxií ve Vlasech Bereniky a kupou Abell 1367. Zdá se, že záření je synchrotronní povahy. Pokud je tomu skutečně tak, znamená to existenci magnetického pole o velikosti indukce řádově 10^{-10} T v prostoru o rozměru 5 miliónů světelných roků. To by znamenalo existenci Birkelandových proudů s hodnotou 10^{19} A!

Nejsilnější pole ve vesmíru

Jedním z možných závěrečných vývojových stadií hvězd jsou neutronové hvězdy. Jde o kompaktní objekty malých rozměrů (desítky kilometrů), v jejichž nitru již neprobíhá termojaderná syntéza. Tlak degenerovaného neutronového plynu zabraňuje dalšímu gravitačnímu smršťování bývalé hvězdy. V některých případech se při smršťování vytvoří u neutronové hvězdy mimořádně silné magnetické pole – potom hovoříme o *magnetaru*. Pokud neutronová hvězda rotuje s frekvencí vyšší než 200 otáček za sekundu, vytvoří kombinace intenzivní rotace spolu s prouděním látky podmínky pro vznik tekutinového dynama. Vytvořená magnetická pole následně rotaci magnetaru přibrzdí, nicméně vzniklá pole mohou dosáhnout až hodnoty 10^{11} T, ve výjimečných případech i 10^{12} T – jde o vůbec nejsilnější známá pole. V takových podmínkách jsou atomy protažené ve směru pole do tyčinkovitého tvaru a jejich délka může být stonásobkem příčného rozměru. Vakuum vykazuje dvojloem způsobený tvorbou elektronových-pozitronových párů.

Povrch magnetaru tvoří až několik kilometrů tlustá kůra z elektronů, neutronů a iontů a magnetického pole, s vlastnostmi pevné látky. Právě zde občas dochází k typickým magnetotřesením, která jsou doprovázena rozptylem energie do magnetické koróny. V ní dochází k přesunům a proplétání magnetických siločar a k rozvoji nestabilit, které nakonec vedou k zprůtrhání a znovupřepojení magnetických siločar do nové, energeticky nižší konfigurace a k uvolnění energie ve formě vzplanutí v oboru měkkého gama záření. Objekty, u kterých probíhají nepravidelná opakovaná gama vzplanutí, byly nazvány SGR (*Soft Gamma Repeater*); první byl detekován v roce 1979. Obdobné objekty v rentgenovém oboru se nazývají AXP (*Anomalous X-Ray Pulsar*). V roce 1992 publikovali Robert C. Duncan (McDonaldova observatoř) a Christopher Thompson (Torontská univerzita) první ucelenou teorii magnetarů. O šest let později identifikovala první magnetar odpovídající teorii Chryssa Kouveliotou z Marshallova kosmického letového centra v NASA. Detailní vysvětlení vzplanutí pomocí katastrofického přepojení



Rozložení známých magnetarů v Galaxii

magnetických siločar podal Maxim Lyutikov z McGillovy univerzity v roce 2003. Z rozboru chování plazmatu ukázal, že časová konstanta nárůstu exploze je pro typický magnetar 10 milisekund.

Pro aktivní magnetary jsou typické série rentgenového nebo gama vzplanutí. Ve zcela výjimečných případech může dojít k tzv. *katastrofické rekonekci* (přepojení) magnetických siločar. Naráz se zcela změní uspořádání magnetického pole magnetaru a přitom se uvolní se energie tisíckrát větší, než je energie běžného vzplanutí. Veškerá uvolněná energie je odnášena elektromagnetickým zářením, neboť nabitě částice jsou drženy u magnetaru silným polem. Takové obří záblesky byly zatím pozorovány jen tři. První záblesk byl pozorován 5. března 1979 (SGR 0525-66) ve Velkém Magellanově mračnu. Jeho celková vyzářená energie byla vyšší než 6×10^{37} J. Další obdobný záblesk byl pozorován 27. srpna 1998 (SGR 1900+14), kdy celková vyzářená energie v tomto případě dosáhla hodnoty 2×10^{37} J. Posledním pozorovaným gigantickým zábleskem je událost z 27. prosince 2004 (SGR 1806-20). Záblesk v souhvězdí Střelce byl tentokrát ještě stokrát silnější než v obou předchozích případech a dosáhl mimořádné celkové energie 2×10^{39} J. Jde o stejnou energii, jakou by Slunce vyzářilo za 160 000 let.

Uvolněná exploze byla tak silná, že způsobila ionizaci horních vrstev atmosféry Země. Záblesk byl pozorován mnoha detektory rentgenového, gama i rádiového záření a samozřejmě i částicovými detektory; za všechny jmenujme pozorování z RTG observatoří SWIFT a INTEGRAL, z radioteleskopické sítě VLA a z částicového experimentu RHESSI. Magnetar je od nás vzdálen 50 000 světelných roků (průměr Galaxie je více než 100 000 světelných roků) a rotuje kolem osy s periodou 7,5 s. Pomalá rotace je způsobena brzděním objektu vlastním magnetickým polem.

Pokud by obdobný záblesk vznikl ve vzdálenosti do deseti světelných roků, poškodil by přirozenou ozónovou vrstvu a mohl by vážně zasáhnout do rovnováhy v biosféře Země. Naštěstí v takové blízkosti žádné magnetary nejsou a v celé naší Galaxii jich známe něco málo přes deset.

Víte, že?

■ Víte, že podle legendy objevil magnetizmus řecký pastýř Magnes v oblasti Magnesia, která dala magnetům jejich jméno? U hory Ida podle pověsti šlápl na neznámý kámen, ke kterému se přitáhly hřeby v jeho botě a okovaná hůl. Oblast je bohatá na magnetit, nerost s magnetickými vlastnostmi.

■ Víte, že první kompas, využívající magnetické pole k navigaci, objevili Číňané? První zmínka o kompasu pochází z období 200 až 300 let před naším letopočtem. Dynastie Han používala kus magnetovce plovoucí na podložce ve vodě.

■ Víte, že celá řada zvířat má receptory magnetického pole? Nejjednodušší varianta, *Lorenziniho ampule*, detekuje elektrické pole vzniklé ve vodivém prostředí v ampuli při pohybu magnetickým polem. Takový orgán mají žraloci a některé další paryby. Jiným receptorem jsou řetízky krystalů magnetitu v oblasti čichové sliznice u pstruhů.

■ Víte, že magnetary mají hodnotu pole nad kvantovou mezí? Za kvantovou mez je považováno pole 4×10^9 T. Nad touto mezí už nelze uvažovat klasickou trajektorii nabitě částice. Šroubovice, po níž se pohybuje, je kvantově „rozmazaná“ díky tomu, že v mikrosvětě není současně měřitelná rychlost a poloha částice.

Poučení na závěr: Život je křehký a zranitelný. Magnetická pole mohou život jak chránit, tak ničit. Nezpochybnitelnou ochrannou funkci má magnetosféra naší planety. Naopak, smrtící záblesky magnetarů dokážou zničit vše živé v širokém dalekém okolí.





13. Jak se měří magnetická pole?

„Chcete-li u černých děr udělat výtrysky, musíte nejprve stvořit magnetická pole.“

Carl Sagan, americký astronom

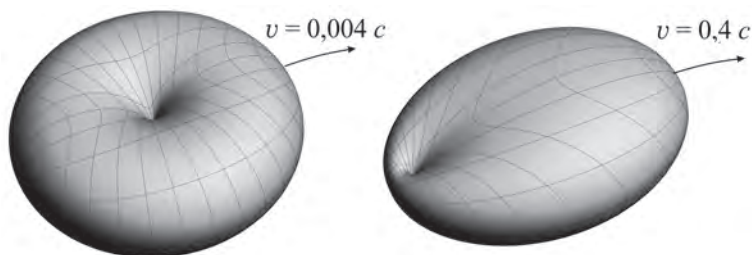
Magnetická pole jsou všudypřítomná. Nejjednodušší měření je kontaktní měření, tj. sledování přímého vlivu magnetického pole na nějakou součástku. Tou může být obyčejná smyčka ze stočeného vodiče, jak ukázal vynikající anglický experimentátor Michael Faraday (1791–1867). Faraday byl knihovníkem, který našel zálibu v elektřině. Její zákonitosti objevoval v nejrůznějších experimentech. Jeho koníček získal nový směr, když se stal sekretářem a později asistentem v laboratoři Humphry Davyho. Nejprve opakoval Ørstedovy experimenty, později vymýšlel vlastní. K jeho největším přínosům patří objev elektromagnetické indukce. Pokud vodivou smyčkou vhodně pohybujeme v magnetickém poli a mění se přitom směr a množství siločar procházejících smyčkou, objeví se v ní elektrické napětí, které vede ke vzniku měřitelného proudu. Jev je základem nejen většiny kontaktních magnetometrů, ale i dynamo vyrábějícího elektrický proud či elektrického motoru. Většina sond brázdících Sluneční soustavu má rameno trčící do prostoru, na jehož konci jsou malé cívky ze stočeného vodiče, v nichž průlet magnetickým polem generuje měřitelný elektrický proud. Ideální jsou tři různě orientované cívky, které jsou schopny měřit všechny tři složky magnetického pole a tedy i jeho směr. U vzdálených objektů, jimž se astronomové věnují převážně, kontaktní měření magnetického pole možné není. Naštěstí existuje řada postupů, jak magnetické pole určit i na dálku. S některými z nich se seznámíme v této kapitole.

Synchrotronní emise

Nabitá částice se v magnetickém poli pohybuje po šroubovici. Za tento pohyb je odpovědná Lorentzova síla, která působí kolmo na siločáry a způsobuje neustálou změnu směru pohybu částice. Pokud nabitá částice mění svou rychlost, nutně září. Mění-li velikost rychlosti, hovoříme o brzděném záření, mění-li směr rychlosti, jak je tomu při pohybu v magnetickém poli, hovoříme o cyklotronním nebo synchrotronním záření. Důvodem je to, že takové záření bylo typické v prvních urychlovačích nabitých částic (cyklotronech a synchrotronech). Oba typy záření se vlastně liší jen energií částice, která záření emituje. Pokud se částice pohybuje nerelativisticky, hovoříme o cyklotronním záření, pokud je její energie srovnatelná s klidovou energií (rychlost je blízká rychlosti světla), hovoříme o synchrotronním záření.

Nejsilněji zastoupená frekvence u cyklotronního záření odpovídá frekvenci oběhu nabitě částice kolem siločar, tzv. cyklotronní frekvenci. Ve spektru se objevují i celistvé násobky cyklotronní frekvence. Spektrum cyklotronních emisí je zcela jiné než tepelné spektrum objektů a dá se snadno odlišit. Cyklotronní frekvence je úměrná magnetickému poli a nepřímo úměrná hmotnosti částice. Většinu záření vydávají elektrony, jejichž hmotnost dobře známe. Po změření dominantní frekvence ve spektru lze proto snadno dopočítat magnetické pole. Zdrojem typických cyklotronních emisí jsou Van Allenovy pásy, případně radiační pásy planety Jupiter.

Při vysokých energiích se zastoupení jednotlivých násobků cyklotronní frekvence rozšiřuje i do okolních frekvencí a spektrum se stává spojitým, i když zcela jiným než u tepelného vyzařování. Při malých rychlostech září částice obíhající siločáry do všech stran. Je-li její energie extrémní, září především před sebe, a to do velmi malého prostorového úhlu. Záření je silně polarizované, tj. má preferovanou rovinu kmitů elektrického pole. Typické synchrotronní záření vydávají elektrony v okolí pulzarů nebo ve výtryscích černých děr. Z charakteristik synchrotronního záření lze snadno určit magnetické pole prostředí, v němž záření vzniklo.



Směrový diagram cyklotronního (vlevo) a synchrotronního (vpravo) záření elektronu. Elektron se nachází v „proláklině“ a pohybuje se po zakřivené trajektorii. Plocha kolem něho je úměrná intenzitě záření v daném směru. Diagram byl vytvořen softwarovým balíkem Wolfram Mathematica.

Zeemanův jev

V přítomnosti magnetického a elektrického pole se některé spektrální čáry štěpí na skupiny blízkých čar. U magnetického pole tento jev objevil v roce 1896 holandský fyzik Pieter Zeeman (1865–1943), u elektrického pole v roce 1919 německý fyzik Johannes Stark (1874–1957). Oba jevy, Zeemanův i Starkův, mohou sloužit k přesnému měření příslušných polí.

Spektrální čáry vznikají přeskokem elektronů v atomárních obalech mezi dvěma energetickými hladinami. Rozdíl energií se vyzáří v podobě fotonu – energetického kvanta s frekvencí přesně odpovídající rozdílu energetických hladin. Jenže v tom je ono kouzlo: každou energetickou hladinu lze složit více způsoby, neboť se daná energie skládá z potenciální, rotační a spinové části. Všechny přispívající energie jsou kvantovány. Na konkrétní energetické hladině může být i několik elektronů, které mají stejnou energii, a přesto se liší různými kvantovými čísly. U některého k výsledné energii více přispějí rotační části, u jiného potenciální energie, ale dohromady jde o stále stejnou hodnotu. V magnetickém (i elektrickém poli) je ale vše jinak. Elektron s nenulovým momentem hybnosti má v magnetickém poli jinou energii než bez něho. Magnetické pole tedy původně jednu energetickou hladinu rozštěpí na skupinu energií. Například elektrony lišící se pouhou projekcí momentu hybnosti do směru magnetického pole už nebudou mít stejnou

energii. V okolí původní čáry se ve spektru objeví satelitní čáry a jejich vzdálenost od původní čáry se silícím magnetickým polem poroste. Z polohy satelitních čar je možné určit magnetické pole v místě vzniku čáry. Snadno tak lze měřit magnetické pole Slunce, hvězd i některých mlhovin.

Objevitele jevu, Holanďana Pietera Zeemana, fyzika bavila od mládí. Na konci střední školy se i v Holandsku objevily polární záře. Talentovaný Zeeman je pečlivě zakreslil a pozorování podrobně popsal. Z mladické nerozváženosti zaslal v pouhých osmnácti letech svá pozorování do prestižního časopisu *Nature*. Zodpovědný editor zjevně netušil, o koho jde, neboť článek opublikoval s poznámkou, že jde o pečlivá pozorování profesora Zeemana z observatoře v Zonnemaire. Ve skutečnosti byla Zonnemaire vesnice s 300 obyvateli, v níž se Zeeman narodil a v jejíž blízkosti navštěvoval střední školu. Skutečným profesorem se stal až ve 35 letech.

Zeemanův vztah k fyzice už od studií ovlivňovaly dvě významné osobnosti: první byl Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) – školitel Zeemanovy diplomové práce. Tomuto vynikajícímu vědci se později podařilo zkapalnit helium a objevit supravodivost. Druhou stěžejní osobností byl Zeemanův učitel a pozdější spolupracovník Hendrik Lorentz (1853–1928), autor elektronové teorie světla¹ a objevitel Lorentzovy transformace času a prostoru. Právě Lorentzova teorie umožnila Zeemanův jev vysvětlit. Zeeman i Lorentz za své práce získali Nobelovu cenu za fyziku v roce 1902. Šlo o teprve druhou udělenou Nobelovu cenu (první získal Wilhelm Konrad Röntgen za objev rentgenového záření).

Zeeman popsal objev vlivu magnetického pole na spektrální čáry ve svém experimentálním deníku v záznamu ze dne 2. září 1896. Příslušná pasáž je nadepsána slovy „*Vliv magnetizace na plamen*“. Zeeman vložil kousek azbestu, který byl nasáklý kuchyňskou solí,

1 **Lorentzova teorie světla** – teorie, podle níž jsou zdrojem elektromagnetického záření kmitající nabitě částice. Hendrik Lorentz zcela změnil tehdejší představy o elektromagnetickém záření, když vznik světla založil na čerstvě vzniklé Maxwellově teorii elektromagnetického pole. V době, kdy vytvořil teorii vzniku světla oscilacemi nabitých částic, ještě nebyl elektron znám.

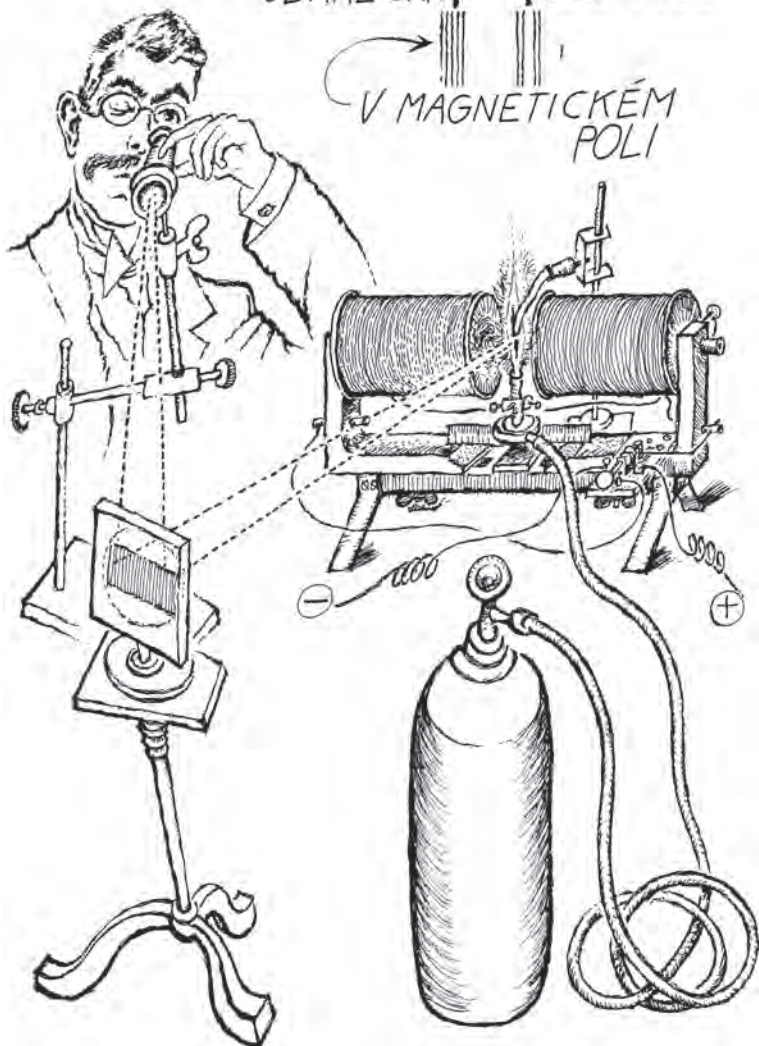
VIDITELNÉ
SPEKTRUM



400 500 D_1 D_2 700 nm

OBRAZ ČAR BEZ POLE

V MAGNETICKÉM
POLI



do plamene hořícího mezi dvěma póly elektromagnetu. Světlo plamene zkoumal za pomoci ohybové mřížky, která rozložila světlo do jednotlivých vlnových délek a umožnila pozorovat jeho spektrum. Pokud byl magnet vypnutý, typická žlutá sodíková čára byla zcela jasná a ostrá. V přítomnosti magnetického pole se rozšířila na dvoj až trojnásobek původní šířky. Teprve později Zeeman zjistil, že se původní spektrální čára ve skutečnosti rozštěpila na několik blízkých čar. Hendrik Lorentz se o Zeemanově pokusu dozvěděl až na konci října a byl nadšený, neboť experiment potvrzoval jeho teorii, že zdrojem světla jsou nabitě částice a přítomnost magnetického pole musí jejich pohyb ovlivňovat. Z prvních orientačních výpočtů, které provedl, plynulo, že zdrojem světla musí být částice mnohem lehčí, než je vodíkový atom. Lorentz tak předpověděl existenci elektronu ještě před jeho objevem (1897, Joseph John Thomson). Lorentzovi se podařilo z jeho teorie kmitajících nabitých částic zpětně odvodit celou sadu Maxwellových rovnic popisujících elektromagnetické pole. Šlo o nádhernou dobu, kdy fyzikové začali chápat podstatu elektromagnetického pole, a Zeeman s Lorentzem si jakožto významní reprezentanti tohoto období druhou Nobelovu cenu v historii plně zasloužili.

Faradayova rotace

Světlo je elektromagnetické vlnění, v němž se periodicky v čase a v prostoru mění elektrické a magnetické pole. Jde o příčné vlnění, elektrické i magnetické pole míří kolmo na směr šíření. Orientace vektorů v prostoru se posuzuje podle roviny kmitů elektrického pole, tato rovina se nazývá *rovinou polarizace* světla. Pokud je zdrojem světla rozžhavené těleso, je světlo složeno z mnoha úseků vzniklých při přeskocích elektronů z vyšších energetických hladin na nižší. Každý z úseků má jinak orientovanou rovinu kmitů elektrického pole. Světlo nemá žádnou preferovanou rovinu polarizace, říkáme, že je nepolarizované.

Existují zařízení, říká se jim polarizátory, které propouštějí jen určitou rovinu polarizace. Po průchodu takovým zařízením kmitá elektrický vektor jen v jedné rovině a takové světlo je pak polari-

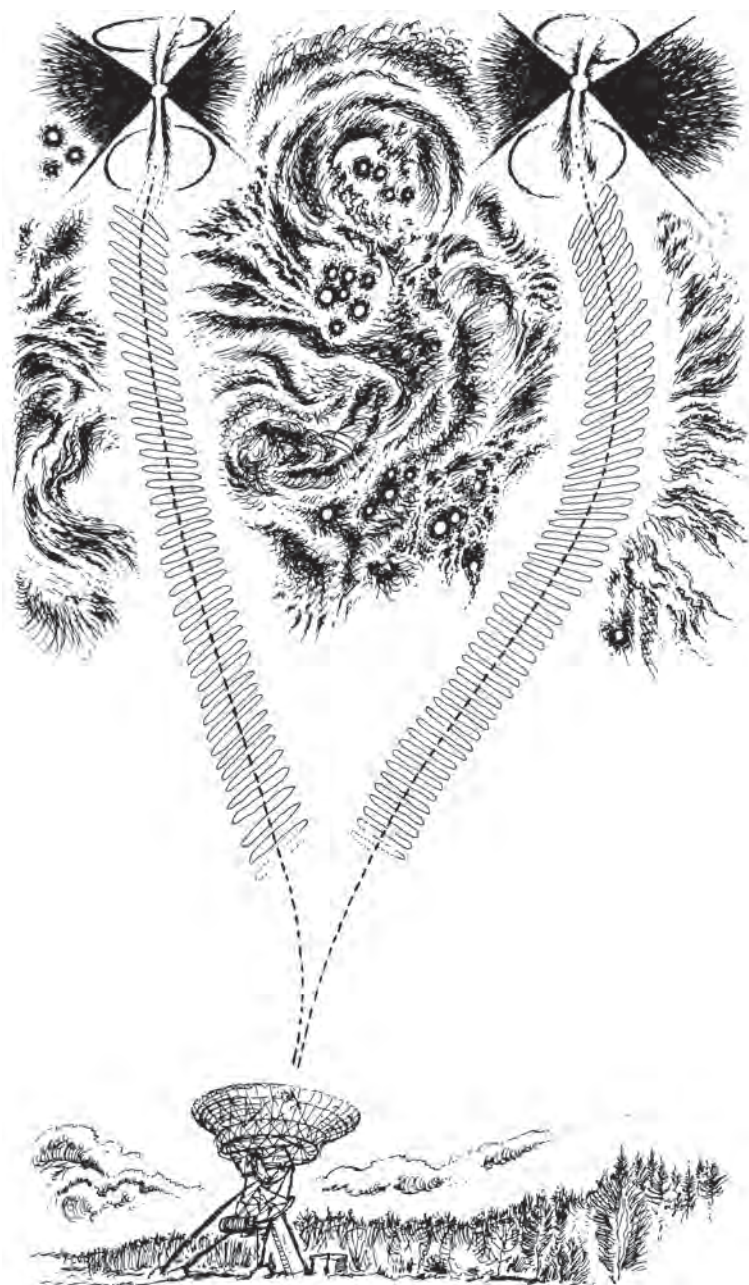
zované. Základem polarizátorů jsou většinou různé dvojlomné krystaly². V přírodě existují ale i přirozené zdroje polarizovaného světla. Příkladem může být odraz světla na vodní hladině. Po odrazu má světlo preferovanou orientaci elektrického vektoru a je částečně polarizované. Obdobně je částečně polarizované měsíční světlo, které vzniká odrazem slunečních paprsků od povrchu Měsíce. Ve vesmíru jsou zdrojem silně polarizovaného elektromagnetického záření výtrysky z pulzarů nebo z černých děr. Signál v nich nevzniká tepelně, není tedy složen z jednotlivých „útržků“, ale je generován při oběhu nabitých částic kolem siločar magnetického pole (jde o synchrotronní záření).

Vynikající anglický experimentátor Michael Faraday věřil, že světlo má elektromagnetickou povahu a správně předpokládal, že by na něj mělo mít vliv elektrické a magnetické pole. Aby tuto svou hypotézu potvrdil, konal řadu experimentů, v nichž se snažil prokázat vliv elektrického pole na šíření světla. Nebyl ale úspěšný, elektrooptické jevy objevil až o tři desítky let později v roce 1875 skotský fyzik John Kerr (1824–1907), který měl k dispozici citlivější přístroje než Faraday.

Faraday ale uspěl při zkoumání vlivu magnetického pole na šíření světla. V roce 1845 uskutečnil přelomový experiment. Polarizované světlo, které připravil pomocí polarizátoru, nechal procházet olovnatým sklem³. Zjistil, že pokud je sklo umístěno v podélném magnetickém poli, stočí se při průchodu světla rovina jeho polarizace. Otevřel tak cestu k magnetooptickým jevům o půlstoletí dříve, než Zeeman objevil vliv magnetického pole na spektrální čáry. Faraday v experimentech pokračoval a podařilo se mu prokázat, že se rovina polarizace světla stočí také v dalších pevných látkách, kapalinách a dokonce i v některých plynech.

2 **Dvojlomný krystal** – krystal, který má současně dva indexy lomu a světlo se v něm rozdělí na dva paprsky s různými polarizacemi.

3 **Olovnaté sklo** – sklo s příměsí oxidu olovnatého PbO (Faradayovo sklo obsahovalo navíc ještě kyselinu boritou). Takové sklo má zeleno-modro-žlutý nádech, je průhledné, houževnaté, má vysokou hustotu a velký index lomu, který určuje jeho nezvyklý lesk. Někdy se o olovnatém sklu hovoří jako o těžkém sklu, flintovém sklu nebo olovnatém křišťálu. Faraday ho měl z předchozích experimentů.



Pochopit, proč ke stáčení roviny polarizace dochází, není obtížné. Představte si hodiny, které mají dvě velké ručičky otáčející se opačnými směry. Každou z ručiček budeme chápat jako vektor. Jsou-li obě ručičky nahoře (na dvanáctce), je výsledný vektor součtem obou ručiček, míří nahoru a je dvakrát delší než ručičky. Když se ručičky budou otáčet stejně rychle, jedna doprava a druhá doleva, stav se začne měnit. Výsledný vektor se bude zmenšovat a nulovým se stane, když bude jedna z ručiček napravo (na trojce) a druhá nalevo (na devítce), tedy budou mířit opačným směrem. Po určité době se obě ručičky sejdou opět dole na šestce. Tentokrát bude výsledný vektor mířit dolů. Součet vektorů tvořených otáčejícími se ručičkami je vektor kmitající ve svislé rovině. Obdobně si lze světlo polarizované v určité rovině představit jako součet dvou kruhových polarizací, v nichž se vektory elektrického pole otáčejí opačnými směry (doprava a doleva). Bez magnetického pole taková konstrukce funguje bezchybně. V přítomnosti magnetického pole se v prostředí s nabitými částicemi pravotočivá polarizace šíří jinou rychlostí než levotočivá a výsledkem je pomalé stáčení roviny polarizace šířícího se paprsku.

Dnes se jev Faradayovy rotace rutinně využívá při měření koncentrace roztoků. Úhel stočení roviny polarizace je totiž úměrný délce vzorku (nádobky s roztokem), podélnému magnetickému poli a koncentraci roztoku. Rozměry nádoby s roztokem a velikost magnetického pole známe, takže lze z úhlu stočení roviny polarizace snadno dopočítat koncentraci roztoku.

V astronomii se postupuje obdobně. Jako zdroj polarizovaného světla může posloužit nějaký pulzar v naší Galaxii. Z orientace magnetické osy pulzaru lze určit rovinu polarizace paprsku, který míří od pulzaru k nám. Tato rovina se při průletu galaktickým prostředím pomalu stáčí. Výsledný úhel stočení je úměrný koncentraci elektronů mezi námi a pulzarem, dále projekci magnetického pole do zorného paprsku (směru od pulzaru k nám) a také vzdálenosti mezi zdrojem a námi. Vzdálenost zpravidla známe dostatečně přesně, koncentraci elektronů v galaktickém prostředí dokážeme odhadnout alespoň řádově, takže ze stočení polarizace můžeme

odhadnout průměrnou hodnotu podélné složky magnetického pole mezi námi a zdrojem polarizovaného světla. Přesnost není nijak zázračná, ale leckdy je i řádový odhad velmi cenný.

Magnetický prach

Zcela novou éru mapování magnetických polí odstartoval omyl, jakých se ve fyzice stávají desítky. Kolaborace vyhodnocující data z rádiové antény BICEP 2 umístěné na jižním pólu v březnu 2014 oznámila, že v reliktním záření detekovala typický obrazec polarizace, za který by mohly být odpovědné reliktní gravitační vlny generované při samotném vzniku vesmíru. Obrovské nadšení po několika letech vyprchalo, neboť z přesnějších dat ze sondy Planck se ukázalo, že za onu polarizaci mohou drobná zrnka galaktického prachu. Na jednu stranu smutek a zklamání, na druhou stranu možnost jak z polarizace mikrovlnného záření rekonstruovat průběh magnetických siločar, a to nejen v naší Galaxii.

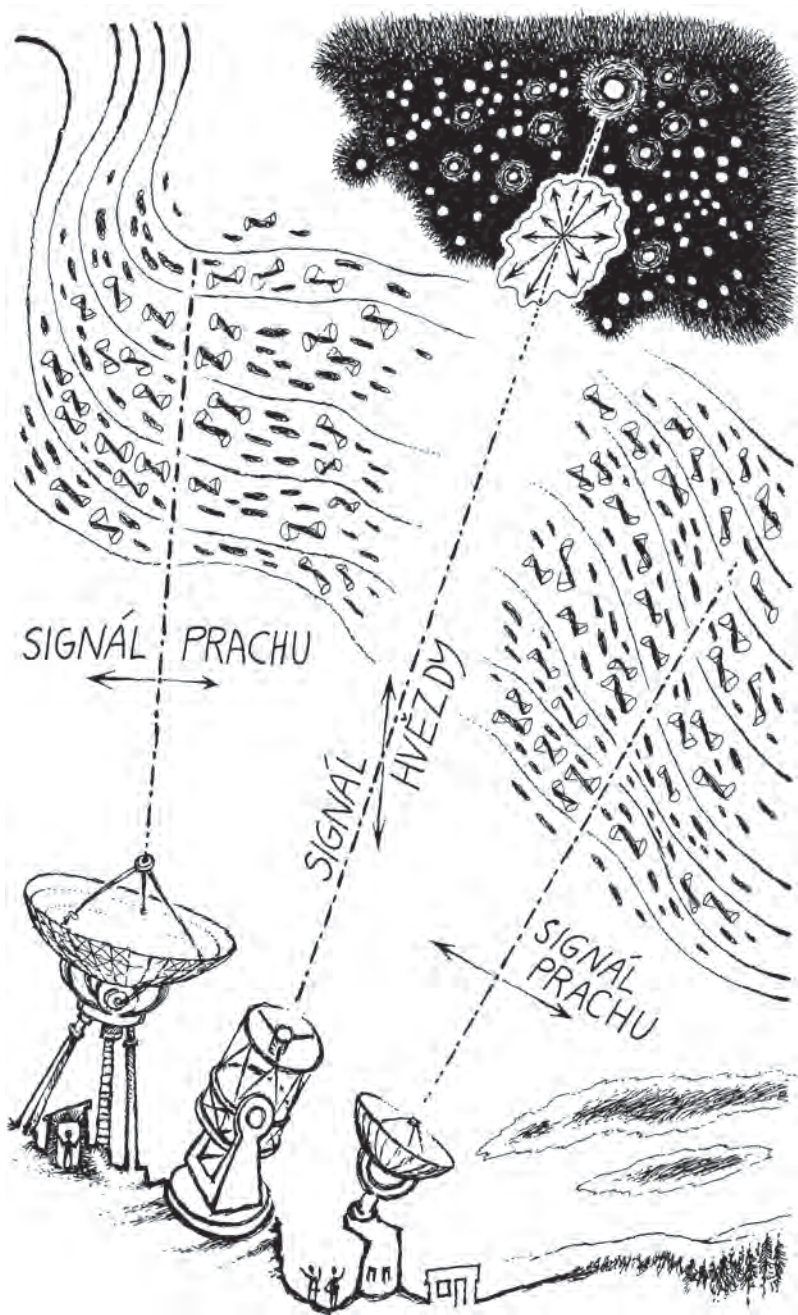
Počátek této metody sahá do mnohem vzdálenější historie. V roce 1948 zjistili američtí astronomové William Albert Hiltner (1914–1991) a John Scoville Hall (1908–1991), že nepolarizované světlo hvězd, které projde prachovou mlhovinou, získá nezanedbatelnou polarizaci. Od počátku bylo jasné, že za vznik dodatečné polarizace světla vzdálených hvězd je zodpovědný mezilehlý prach. Druhý z objevitelů, John Hall, zastával v letech 1958 až 1977 pozici ředitele slavné Lowellovy observatoře ve Flagstaffu. Na této observatoři Vesto Slipher objevil červené posuvy galaxií, které vedly George Lemaître a Edwina Hubbla k objevu expanze vesmíru. Na téže observatoři byl objeven Pluto, první Trojan Neptunu, prstence Uranu, kyslík na Jupiterově měsíci Ganymedu, voda v atmosféře exoplanety Osiris, oxid uhličitý na třech Uranových měsících atd.

Prachová zrnka mají mikrometrové rozměry (to odpovídá částicím cigaretového kouře) a málokdy mají sférický tvar. V prvním přiblížení jde o protáhlé objekty, které lze nahradit rotačním elipsoidem. Ve většině zrněk je několik atomů železa, takže se chovají jako malé dipólové magnety. Je-li v mlhovině přítomno magnetické pole,

zrnka precedují kolem jeho siločar. Jde o pohyb protáhlého zrnka po kuželové ploše. Zrnko postupně ztrácí rotační energii, mění ji na tepelné záření a jeho osa se stále více ztotožňuje se směrem siločáry. Proto je většina prachových zrněk srovnána do směru magnetických siločar. Prachová zrnka absorbují světelné záření, které mlhovinou prochází ze vzdálenějších hvězd. Zrnka ale neabsorbují veškeré záření, tlumí jen kmity elektrického pole, které jsou kolmé na magnetické pole. Prošlé světlo tak získá polarizaci ve směru magnetických siločar. To ale není vše. Pohlcenou energii procházejícího světla si prachová zrnka neponechají, ale tepelně ji vyzařují do okolí. Samotné záření prachu je polarizované kolmo na směr siločar, tedy v rovině, v níž prachová zrnka záření pohltila. Detailní situace průchodu a emise světla prachem je znázorněna na obrázku na následující straně.

Pozorovatel proto uvidí dva signály: zeslabený signál vzdálené hvězdy, jehož polarizace je rovnoběžná s magnetickými siločarami mezilehlé mlhoviny a milimetrové záření generované samotným prachem, které má polarizaci kolmou na magnetické siločáry. Zejména ze signálu samotného prachu lze poté rekonstruovat průběh siločar magnetického pole v mlhovině. Úloha probíhá ve dvou krocích: nejprve se udělá mapa polarizace vyzařovaného signálu a teprve z ní se pomocí počítačových algoritmů hledá průběh magnetických siločar.

Metoda analýzy polarizace signálu prachových zrněk zaznamenala velké úspěchy nejen při rekonstrukci polí v mlhovinách, ale v posledních letech zejména při rekonstrukci průběhů magnetického pole ve vzdálených galaxiích. V Evropě je naprostou špičkou radioteleskop Effelsberg, z jehož dat se zcela rutinně rekonstruují magnetická pole galaxií, viz například obr. 43 a 44 v barevné příloze. Bez šance ale nejsou ani optické dalekohledy s přesahem do infračerveného oboru, například Velký kanárský dalekohled GTC, který umožnil rekonstrukci siločar v okolí jádra naší Galaxie (viz obr. 42 barevné přílohy). Rekonstrukci podstatné části magnetického pole naší Galaxie se podařilo uskutečnit ze záření prachu v milimetrovém oboru na základě měření sondy Planck, viz obr. 40 a 41 v barevné příloze.



Nepřímá měření

Leckdy k detekci magnetického pole postačí i rutinní fotografie v optickém oboru. Vliv magnetického pole je totiž patrný na jednotlivých strukturách. Pro gravitační interakci jsou nejtýpější kulově symetrické objekty. Magnetické pole vytváří naopak vlákna, šroubovice a stěny. Vizuální pozorování jsou pouhým konstatováním možné přítomnosti magnetického pole. Po takovém podezření většinou následuje seriózní výzkum využívající Zeemanova jevu, Faradayovy rotace nebo polarizace signálu způsobené zrnky prachu precedujícími v magnetickém poli.

Víte, že?

- Víte, že Michael Faraday neobjevil jen elektromagnetickou indukci a Faradayovu rotaci, ale i velké množství dalších jevů? Jmenujme alespoň regelaci – spojování bloků ledu pod tlakem nebo zákony elektrolyzy (rozkladu molekul elektrickým proudem).

- Víte, že po Pieteru Zeemanovi i Michaelu Faradayovi jsou pojmenovány krátery na Měsíci? Kráter Zeeman se nachází se na odvrácené straně Měsíce v blízkosti jižního pólu a má průměr 184 kilometrů. Kráter Faraday má průměr „jen“ 70 kilometrů, zato ale leží na přivrácené straně Měsíce, v blízkosti Koperníkova kráteru.

- Víte, že oxid olovnatý, který je hlavní součástí olovnatého skla, má dvě podoby? Červená forma (tzv. *klejt* neboli *litargit*) krystalizuje ve čtverečné soustavě a žlutá forma (*masikot*) v kosočtverečné soustavě. Žlutá forma se při varu s vodou mění na červenou. Oxid olovnatý se připravuje vháněním vzduchu na hladinu roztaveného olova, které na povrchu oxiduje.

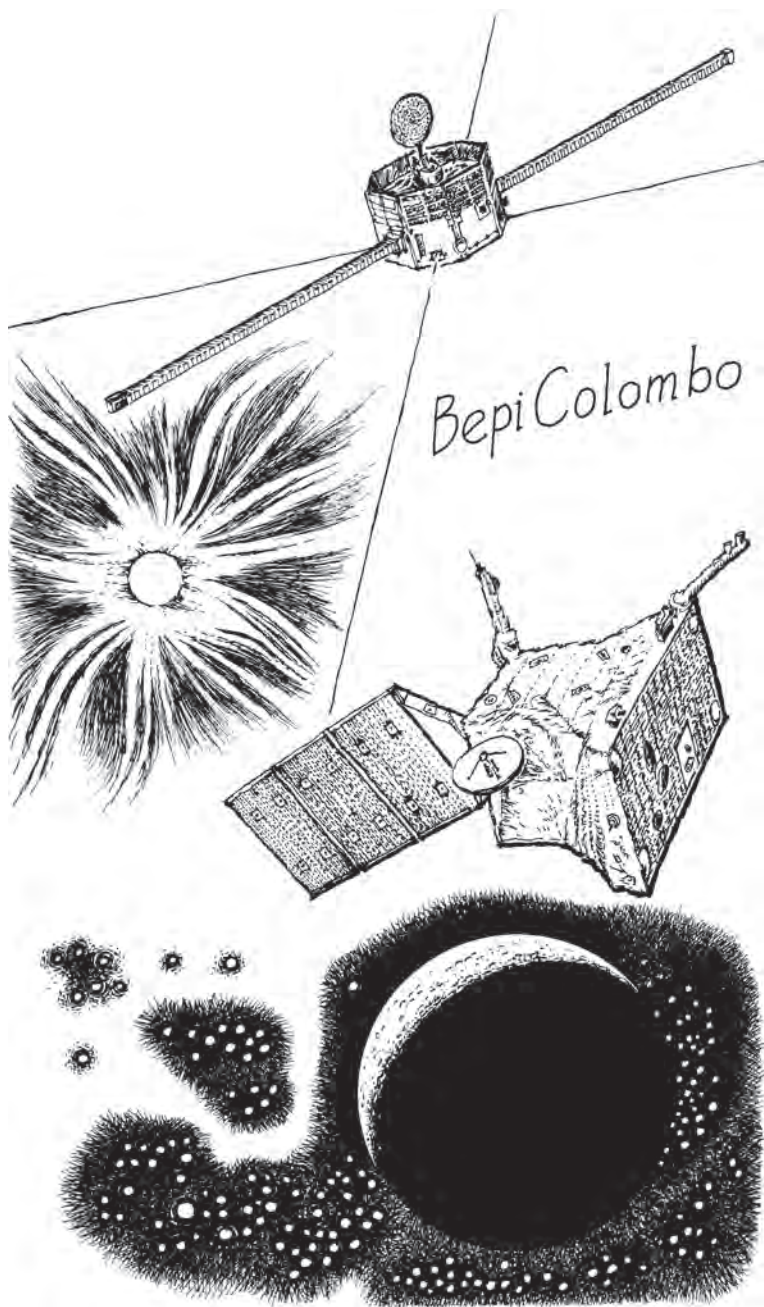
- Víte, že Lowellovu observatoř ve Flagstaffu vybudoval americký matematik, astronom a obchodník Percival Lowell? Založil ji v roce 1894 s hlavním cílem: potvrdit existenci života na Marsu. Marťany sice jeho observatoř neobjevila, ale i tak se zapsala zlatým písmem do historie astronomie.

Poučení na závěr: Nezaměňujte Zeemana a Zemana, i když výslovnost jejich jmen je podobná. Ten první byl vynikající fyzik a přišel na způsob, jak určit magnetické pole ze spektra záření. Ten druhý je známý sprosták, který použil slovní spojení „*kunda sem, kunda tam*“ v živém rozhlasovém vysílání.

* * *

Naše procházka magnetickým světem planet, hvězd, mlhovin a galaxií skončila. Všudypřítomná pavučinová síť magnetických polí není na první pohled viditelná, ale ovlivňuje svět kolem nás rovnocennou měrou jako gravitace. Pokusili jsme se vás, milí čtenáři, provést bohatstvím dějů v plazmatu, nejběžnějším skupenstvím atomární látky ve vesmíru. Prošli jsme Sluneční soustavou, nahlédli pod pokličku zrodu jiných soustav a seznámili se s tím, jak tyto planety u cizích sluncí hledáme. Tu a tam se náš pohled upřel i do vzdálenějšího vesmíru, kde jsou naše znalosti o vlivu magnetických polí zatím jen kusé. Doufáme, že jste v knížce našli nejen poučení, ale i radost z poznávání světa, který je leckdy jiný, než se na první pohled zdá.





Sondy

Každá kniha se šitou vazbou musí mít celkový počet stran dělitelný šestnácti. Jinak totiž nejde sešít. A tak tvůrce spolu s nakladatelstvím přemýšlí, co se stranami, na které text již nezbyl. Existuje celá řada řešení. V úvodu můžeme zopakovat titulní stránku a vznešeně ji nazvat patitulem. V závěru pak nechat zbylé stránky bílé a nadepsat je „Poznámky“. Nakladatel tak sice nutí čtenáře čmárat do právě zakoupené knihy, což by slušný člověk dělat neměl, na druhou stranu to u některých spisků už knize nemůže nikterak uškodit. Je pak na čtenáři, zda se alespoň jemu nepovede knize dodat nějakou nosnou myšlenku. Pokud zbývajících stran není mnoho, je možné je zaplácnout nějakými obrázky, které alespoň volně souvisí s textem. Nejpohodlnější je na nadbytečné stránky umístit reklamu. Čtenář natěšený na informace o chovu králíků se může například seznámit se stavem podprsenek na českém trhu a obohatit tak svůj niterní svět o další dimenzi. Nakladatel navíc získá z reklamy peníze a o ty především mnohdy jde. V naší knížce zbylo dvanáct stran. Co s nimi? Rozhodli jsme se je věnovat informacím o některých vybraných sondách, které přispěly k našim znalostem o magnetických polích ve Sluneční soustavě. Snad budou pro čtenáře užitečnější než smršť bizarních reklam.

Vesmírnou éru výzkumu odstartoval sovětský Sputnik, který se vydal na oběžnou dráhu Země v roce 1957. Tehdy ještě nežil ani jeden z autorů této knihy. Za více než půl století, které uplynulo od prvního startu, se odehrálo mnohé. Dnes do vesmíru dokážeme poslat mnohatunové kolosy se sofistikovanými zařízeními, která přispívají k poznání prostředí, v němž by člověk sotva přežil, a která mílovými kroky posouvají kupředu naše znalosti i technologie. A nemusí jít jen o zařízení, jejichž velikost je srovnatelná s autobusem, jak je tomu v případě Hubblova dalekohledu. Skvělou práci mnohdy odvedou i miniaturní sondy s centimetrovými nebo decimetrovými rozměry. Představme si ve zbývajícím prostoru některé z poslá vyslaných do vesmíru.

Některé vesmírné agentury

NASA, *National Aeronautics and Space Administration*, Americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku. Kosmická agentura byla založená v roce 1958 a je zodpovědná za kosmický výzkum Spojených států. K nejznámějším projektům patří program Apollo, který v roce 1969 vyvrcholil přistáním člověka na Měsíci, mise Pioneer, Voyager, Mars Global Surveyor a dlouhá řada dalších. Nosná raketa Saturn V s výškou 111 metrů a hmotností téměř 3 tisíce tun je dosud (2021) největší raketou vyrobenou člověkem.

Roscosmos, Ruská kosmická agentura, dříve Ruská letecká a vesmírná agentura, je vládní korporace zodpovědná za ruský vesmírný program a letecký výzkum. Ruský kosmický program byl založen v Sovětském svazu v druhé polovině padesátých let, zpočátku fungoval pod ministerstvem strojírenství. Sověti vyvinuli první balistickou raketu, první umělou družici Země, vyslali prvního kosmonauta na oběžnou dráhu, provedli jako první průzkum Měsíce, Venuše a Marsu. V současné době ruské lodě fungují jako zásobovací jednotky pro Mezinárodní kosmickou stanici.

ESA, *European Space Agency*, Evropská kosmická agentura. Agentura spojuje úsilí 22 evropských zemí na poli kosmického výzkumu. Centrální sídlo je v Paříži, pobočky v mnoha členských zemích. ESA byla založena v roce 1973 jako přímý následovník organizací ESRO a ELDO. Nejznámější nosnou raketou využívanou ESA je Ariane. K největším úspěchům patří přistání mise Rosetta na kometě Čurjumov-Gerasimenko v roce 2014. Česká republika je součástí od roku 2008.

JAXA, *Japan Aerospace eXploration Agency*, Japonská kosmická agentura. Vznikla v roce 2003 sloučením tří institucí: ISAS (*Institute of Space and Astronautical Science*), NAL (*National Aerospace Laboratory of Japan*) a NASDA (*National Space Development Agency of Japan*). Ke svým letům agentura využívá kosmodrom USC (*Uchinoura Space Center*). V současnosti používá JAXA nosnou raketu H-IIA s výškou 53 metrů.

SpaceX, *Space Exploration Technologies Corporation*, soukromá americká technologická společnost působící v aerokosmickém průmyslu. Byla založena Elonem Muskem v roce 2002, z peněz za prodej jeho podílu v systému PayPal. V současné době provozuje rakety Falcon 9 a Falcon Heavy. SpaceX také provozovala kosmickou loď Dragon, která dovážela zásoby k ISS. Nástupcem je Dragon 2. V současné době SpaceX vyvíjí nový nosič Starship.

Některé družice a sondy

ACE (*Advanced Composition Explorer*), americká sonda obíhající kolem Lagrangeova bodu L1 soustavy Země-Slunce. Hlavním cílem je výzkum sluneční koróny, zejména jejího izotopového složení. Sonda by měla přispět k pochopení vzniku koróny a mechanismů urychlení slunečního větru. Na sondě jsou i detektory kosmického záření. Sonda startovala v roce 1997, palivo pro korekce dráhy má do roku 2024. Sonda je součástí systému varování před slunečními bouřkami a koronálními výrony hmoty mířícími k Zemi.

BepiColombo, společná mise Evropské kosmické agentury (ESA) a Japonské kosmické agentury (JAXA) k Merkuru. Start proběhl v roce 2018. Mise by měla hledat původ magnetického pole Merkuru, mapovat jeho magnetosféru a provádět testy obecné teorie relativity. Mise bude využívat dvě sondy navedené na oběžnou dráhu kolem planety v prosinci 2025. Sonda je pojmenována po italském matematikovi a astrofyzikovi Giuseppe „Bepi“ Colombovi, který propočtl a navrhl dráhu Marineru 10 k Merkuru s využitím gravitační asistence planety Venuše.

Cluster, čtveřice družic Evropské kosmické agentury (ESA), která startovala po dvojicích v roce 2000 na palubě ruské lodi Sojuz. Jde o jeden z nejvýznamnějších projektů Evropské kosmické agentury současnosti. Družice letí ve formaci čtyřstěnu, na palubě mají identické přístroje a poprvé prostorově mapují magnetosféru Země. Zaznamenávají se informace o teplotě plazmatu, koncentraci částic a o magnetickém poli. Družice objevily víry na bocích magnetosféry a přímo detekovaly přepojování magnetických siločar.

Dynamics Explorer, první specializovaná americká mise pro výzkum magnetosféry a ionosféry Země. Dvě družice (DE-1, DE-2) byly vyneseny v roce 1981 na dráhy ve stejné rovině, takže mohly synchronně pozorovat horní i dolní atmosféru. Hned v roce 1981 vyfotografovala sonda DE-1 v ultrafialovém oboru celý aurorální ovál. Spotřeba energie sond byla pouhých 68 wattů. Díky selhání nosné rakety byla družice DE-2 na nižší dráze, než bylo plánováno, a proto shořela v atmosféře už v roce 1983. Družice DE-1, na níž bylo méně přístrojů, sbírala data deset let, tj. až do roku 1991.

Galileo, americká mise k Jupiteru, první sonda obíhající obří planetu. Sonda startovala v roce 1989, na orbitu Jupiteru byla navedena v roce 1995. Fungovala do roku 2003, kdy shořela v atmosféře. Sonda potvrdila existenci ledového oceánu pod povrchem měsíce Europa a z měření magnetického pole vyplynulo, že obdobné podpovrchové oceány mohou být i na měsících Ganymed a Callisto. Sonda našla vlastní magnetické pole Ganymedu, na Jupiteru detekovala bouřky tisíckrát intenzivnější než na Zemi a potvrdila mimořádně intenzivní vulkanickou činnost na měsíci Io.

GeoTail, japonsko-americká družice určená k výzkumu struktury a dynamiky magnetosféry Země, zejména jejího magnetického ohonu. Startovala v roce 1992 na palubě nosné rakety Delta II ze Spojených států. Porucha počítače z roku 1993 byla vyřešena netradičně: sonda byla navedena na dráhu do stínu Měsíce, kde se počítač bez přísunu energie odpojil a později sám restartoval. Družice podrobně studovala dynamiku toku slunečních částic polárními kasy a objevila kyslík, křemík, sodík a hliník v řídké měsíční atmosféře. Družice je stále aktivní (2021).

Hinode, japonská družice kosmické agentury JAXA z roku 2006 určená k výzkumu Slunce. Vznikla ve spolupráci s USA. Původní název byl SOLAR-B. Je na heliosynchronní dráze. Hlavním cílem je výzkum magnetického pole Slunce, jeho vznik a souvislost s generováním slunečního větru a výzkum ohřevu koróny. Detekovala Alfvénovy vlny unikající ze Slunce do koróny, které přispívají podstatnou měrou k jejímu ohřevu. Mise by mohla fungovat až do roku 2022.

IBEX (*Interstellar Boundary EXplorer*), americká družice pro výzkum magnetické hranice Sluneční soustavy. Startovala v roce 2008 z letounu Lockheed L-1011. Letoun opustila i s nosnou raketou Pegasus XL v nadmořské výšce 12 kilometrů. Byla navedena na silně excentrickou dráhu (apogeum 220 886 kilometrů), která umožňuje měření mimo magnetosféru Země. Data jsou porovnávána s daty ze sond Voyager 1 a 2, které se pohybují na hranici heliosféry. Družice zjistila rozdílné složení neutrálních částic v mezihvězdném prostředí a ve Sluneční soustavě. Detekovala úzký pás energetických neutrálních částic nejasného původu. Družice je funkční (2021).

Juno, americká sonda určená k průzkumu polárních oblastí planety Jupiter včetně magnetosféry. Odstartovala v roce 2011, na oběžnou dráhu Jupiteru byla navedena v roce 2016. Sonda Juno zkoumá atmosféru a hledá v ní molekuly vody. Zaměřuje se i na rozsáhlou magnetosféru Jupiteru a její vliv na planetu. Detailně sleduje turbulence v atmosféře. Juno představuje zatím nej kvalitnější soubor přístrojů, který k planetě Jupiter dorazil.

Kepler, americká sonda z roku 2009 určená pro vyhledávání exoplanet. Fungovala na heliocentrické dráze. Na palubě měla dalekohled o průměru 1,5 metru a fotometr složený z 42 CCD čipů. Pozorovala fixní výsek oblohy v souhvězdí Labutě o průměru 12°. V roce 2012 byla mise prodloužena do roku 2016. V roce 2013 nastala porucha na mechanické části, kvůli které byla činnost dalekohledu dočasně pozastavena. Oprava se ukázala nemožná, proto došlo k výrazné modifikaci pozorovacích programů a mise s jinými než původně plánovanými objekty pokračovala do listopadu 2018.

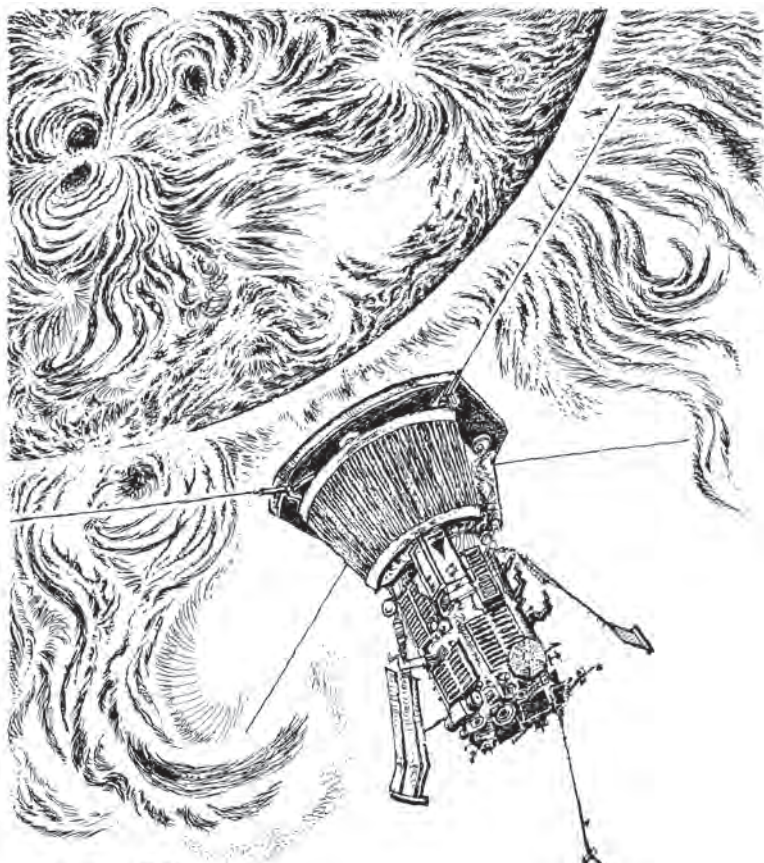
Magellan, americká sonda k Venuši z roku 1989. Na oběžné dráze kolem Venuše pracovala od roku 1990. Hlavním programem mise bylo detailní radarové mapování povrchu s rozlišením 100 metrů. Probíhalo ve třech cyklech s rozdílnými parametry oběžné dráhy, takže výsledkem bylo stereoskopické zobrazení povrchu. Od září 1992 probíhalo proměřování gravitačních povrchových nerovnoměrností planety. Mise byla ukončena v roce 1994 po ztrátě signálu. Výsledky umožnily podrobné zobrazení povrchových útvarů planety.

Mariner, americký kosmický program, jehož primárním cílem byl výzkum Marsu. První úspěšnou sondou byl Mariner 4 z roku 1964, který v roce 1965 poslal k Zemi 22 obrázků povrchu Marsu. Posledním byl Mariner 9 z roku 1971. Poté k Marsu následovaly mise Viking. Na řadu sond Mariner 1 až 9 k Marsu navázala sonda Mariner 10, která neletěla k Marsu, ale proletěla kolem Venuše a třikrát v letech 1974–1975 kolem planety Merkur. Z jejích dat byly poprvé získány údaje o magnetosféře Merkuru.

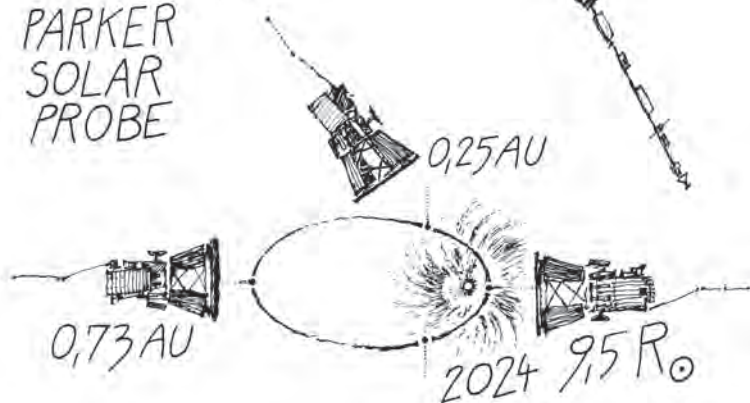
Mars Global Surveyor, americká sonda zkoumající Mars z oběžné dráhy. Vypuštěná byla v roce 1996. Od roku 1997 do roku 2006 prováděla systematický průzkum Marsu. Po sondách Viking ze 70. let zahájila novou éru výzkumu Marsu. Sonda mapovala z polární dráhy z výšky 378 kilometrů povrch Marsu. Detekovala remanentní magnetické pole v povrchových horninách, našla vrstevnatou strukturu kůry Marsu a na svazích objevila tmavé útvary připomínající půdu obnaženou sesuny lavin. Sonda také prováděla test strhávání časoprostoru rotujícím tělesem s nepřekážným výsledkem.

MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*), americká sonda studující stav a vývoj atmosféry Marsu. Na areocentrickou dráhu byla umístěna v roce 2014. Sonda pozoruje horní vrstvy atmosféry, ionosféru a její interakci se slunečním větrem, sleduje ztráty těžkých látek z marsové atmosféry, zjišťuje rychlost úniku neutrálních částic a iontů do prostoru a vyhodnocuje poměry stabilních izotopů v atmosféře. Sonda na Marsu objevila protonové polární záře, jejichž existence byla velkým překvapením.

MESSENGER (*MErcury, Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging*), sonda NASA, která zkoumala planetu Merkur. Startovala v srpnu 2004, v letech 2006 a 2007 prolétla dvakrát kolem Venuše. Kolem Merkuru poprvé prolétla v lednu 2008. Další průlety proběhly v říjnu 2008 a září 2009. V březnu 2011 byla navedena na oběžnou dráhu kolem Merkuru a od té doby prováděla komplexní měření, na jehož základě byla vytvořena podrobná mapa magnetosféry Merkuru. Sonda ukončila svou činnost 30. dubna 2015 řízeným pádem na povrch planety.



PARKER
SOLAR
PROBE



Odyseus (Ulysses), společná mise americké NASA a evropské ESA z roku 1990, určená pro výzkum Slunce. Sonda byla vynesena raketoplánem, v roce 1992 prolétla kolem Jupiteru, který ji vychýlil z roviny ekliptiky a umožnil tak poprvé zkoumání polárních oblastí Slunce. Sonda prozkoumala jižní pól Slunce v roce 1994, ke Slunci se opět vrátila v roce 1995, kdy se přiblížila k severnímu pólu. Do stejných oblastí se vrátila v letech 2000 a 2001 při svém druhém oběhu. V té době bylo Slunce v blízkosti maxima aktivity. Při posledním třetím návratu v letech 2007 až 2008 byla mise ukončena. Sonda detekovala rychlý a pomalý sluneční vítr.

Parker Solar Probe, americká sonda určená pro výzkum Slunce z těsné blízkosti. Startovala v srpnu 2018, mise je plánována do roku 2025. Sonda se na konci mise dostane až do vzdálenosti 6,2 milionu kilometrů od slunečního povrchu. Z dosavadních objevů jmenujme pozorování turbulencí slunečního větru, objev bezprašné zóny a objev záhybů tvaru písmene S ve slunečním větru. Sonda je pojmenována podle významného slunečního fyzika Eugena Parkera.

Pioneer Venus, americká sonda určená k průzkumu Venuše z oběžné dráhy. Po dvou sovětských sondách se stala třetí oběžnicí Venuše. Startovala v květnu 1978 a v prosinci téhož roku byla navedena na oběžnou dráhu, z níž poskytovala data až do roku 1992, kdy shořela v atmosféře. Sonda umožňovala radarové mapování povrchu a analýzu částic a magnetických polí. Součástí mise byla čtyři průzkumná pouzdra, která byla vyslána k povrchu. Jedno z nich přežilo přistání a hodinu vysílalo data. V roce 1986 pozorovala sonda z oběžné dráhy Venuše Halleyovu kometu.

Planck, mikrovlnná observatoř Evropské kosmické agentury z roku 2009. Byla určena k výzkumu fluktuací reliktního záření a monitorování vesmíru v mikrovlnné oblasti. Zrcadlo sondy mělo rozměry 1,9×1,5 m. Teplotu ohniska se podařilo po dobu dvou let udržet na 0,1 K. Činnost sondy byla ukončena v říjnu 2013. Sonda měřila polarizaci milimetrového záření způsobenou prachem v naší Galaxii a umožnila rekonstrukci magnetických polí v Galaxii. Poslední balíček zpracovaných dat byl vydán v roce 2018.

RHESSI (*Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager*), malá americká družice vypuštěná v roce 1992. Jejím hlavním cílem byl výzkum uvolňování energetických částic při náhlých slunečních vzplanutích. Pohybuje se na kruhové dráze kolem Země ve výšce 600 km. Pojmenována je podle Reuvena Ramatyho (1937–2001), který je průkopníkem sluneční fyziky, gama astronomie a výzkumu kosmického záření. Družice byla deaktivována v roce 2018, v atmosféře shořel v roce 2022.

SDO (*Solar Dynamics Observatory*), americká sluneční observatoř, která startovala v roce 2010. Dokáže pořídit snímek Slunce každých 12 sekund v rozlišení 4096×4096 pixelů. K základním přístrojům observatoře patří čtveřice dalekohledů o průměru 20 cm s deseti filtry pro různé vlnové délky, helioseismometr a magnetometr, detektor fluktuací extrémního ultrafialového záření a další špičkové přístroje. V současnosti (2021) jde o nejdokonalejší družici pro výzkum Slunce. Pohybuje se na geosynchronní dráze, z níž data přímo předává pozemské stanici v Novém Mexiku.

SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), společná sonda americké NASA a evropské ESA vypuštěná v roce 1995 s cílem zkoumat sluneční povrch, atmosféru, korónu a sluneční vítr. Obíhá Lagrangeův bod L1 soustavy Slunce-Země. Velikostí je srovnatelná s autobusem (délku má 4 metry a hmotnost téměř 2 tuny). Dodnes je plně funkční a poskytuje cenná data. K nejvýznamnějším přístrojům patří ultrafialový dalekohled a přístroj sledující na základě Dopplerova jevu pohyby povrchových oblastí, z nichž se na základě šíření zvukových vln zkoumá vnitřek Slunce (helioseismologie).

STEREO (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), dvě americké sondy z roku 2006 zkoumající vztahy Slunce a Země. Cílem je pořízení třírozměrného obrazu koróny a heliosféry Slunce. Na palubách jsou koronografy, zobrazovací jednotka v extrémním UV oboru, analyzátory nabitých částic, magnetometr a další přístroje. Kontakt se sondou STEREO-B byl ztracen v roce 2014. Sonda STEREO-A je stále funkční (2021). V roce 2012 zasáhl STEREO-A koronální výron hmoty srovnatelný s Carringtonovou událostí z roku 1859.

TRACE (*Transition Region and Coronal Explorer*), americká družice vypuštěná v roce 1998 a navazující na práci družice SOHO. Na palubě měla třiceticentimetrový dalekohled pro ultrafialový obor určený ke sledování třírozměrných struktur plazmatu na Slunci. V ohnisku bylo CCD s 1024×1024 pixely. Získané fotografie zaujímaly úhlový rozměr 8,5 obloukové minuty. Družice pořizovala z heliosynchronní dráhy vynikající snímky plazmatu rozprostřeného podél siločar magnetického pole. Deaktivována byla v červnu 2010.

Triad, série amerických družic ze 70. let 20. století, která byla součástí programu TIP (*Transit Improvement Program*). Každá z nich byla tvořena trojicí objektů spojených páskem, proto název Triad. První z nich, Triad 1, vážila pouhých 94 kilogramů a neměla panely slunečních baterií. Zdrojem energie byl radioizotopový termoelektrický generátor. Družice patřila americkému námořnictvu a hlavním cílem bylo zdokonalení navigace. Družice Triad 1 jako první naměřila vzestupné a sestupné ionosférické proudy, čímž potvrdila Birke-landovu představu z počátku století.

Van Allenovy sondy, dvě americké družice zkoumající Van Allenovy radiační pásy a magnetické bouře v zemské magnetosféře. Družice startovaly v roce 2012, fungovaly 7 let a v roce 2019 byla mise ukončena z důvodu nedostatku paliva pro další manévry. Očekává se, že obě družice shoří v atmosféře Země ve 30. letech 21. století. Van Allenovy sondy objevily třetí radiační pás, který se na několik týdnů objevil v roce 2013. Na rozdíl od ostatních družic nebyly Van Allenovy sondy vypínány ani v průběhu silných magnetických bouří.

Veněra, sovětský kosmický program z let 1961–1983, jehož hlavním cílem byl průzkum Venuše. Celkem startovalo 26 sond (ne všechny měly název Veněra), slabé nadpoloviční většině se podařilo svůj program splnit. Veněra 1 se stala první meziplanetární sondou vyslanou člověkem. Veněra 9 se stala první umělou družicí jiné planety. Její součástí byl přistávací modul, který jakožto první automat zkonstruovaný člověkem přistál na povrchu jiné planety. Data předával 53 minut, než se v nehostinných podmínkách odmlčel. Oběžná část měla hmotnost 3376 kg, přistávací modul „jen“ 1 560 kg.

Voyager 1 a 2, sondy NASA, které startovaly v roce 1977. V letech 1976–1981 obě sondy navštívily Saturn a Jupiter, Voyager 2 navíc doletěl k Uranu (1986) a Neptunu (1989). Obě sondy již prolétly terminační vlnou a pohybují se na hranici heliosféry. Jsou nejvzdálenějšími tělesy vyrobenými člověkem. Radioizotopové termoelektrické generátory by jim měly poskytnout energii pro základní komunikaci až do roku 2025. V knížce je jim věnována kapitola 6 s názvem „*Velká cesta*“.

Wind, americká sonda určená pro pozorování Slunce a slunečního větru. Startovala v roce 1994, v roce 2004 doletěla k Lagrangeovu bodu L1 soustavy Slunce-Země, kolem něhož obíhá. Sonda objevila dvě desítky nových jevů souvisících s interakcí slunečního plazmatu se zemskou magnetosférou. Sonda je dodnes funkční a jejím autorům byla udělena řada cen. Je součástí varovného systému před kosmickým počasím. V určitých obdobích prováděla společná měření s jinými sondami a družicemi, například s družicí Polar či dvojicí sond Stereo.



Rejstřík

- 51 Pegasi 263
ACE 46, 93, 333
adaptivní optika 270, 271, 278,
ADONIS 116, 253
AGASA 291, 293
Akacuki 177
Allende 243–244
akreční model 223
akreční teorie 224
albedové útvary 188
Amálka 192
AMS 2 – 292
Andromeda (galaxie) 126, 308
Apollo 251
Arecibo 920, 308
Ariel 213
astronomická jednotka (au) 23, 129
AU Microscopii 117, 253
aurora 40, 42, 106
aurorální ovál 40, 42, 45, 49, 53,
179, 188, 205
Bailyho perly 135, 143
Barnardova hvězda 259
BepiColombo 169, 333
Beta Pictoris 116, 253, 274
Betelgeuse 253, 271
bezsilová konfigurace 16
Birkelandovy proudy 16, 18–19, 44,
202, 309
bílá koróna 134
blesky 11, 18, 39, 173, 177,
243, 296
Böhmen 285–286
Bublina 118, 224
Callisto 205
Caltech 212
Cassini 93, 106–107, 151, 177,
205, 207, 210–212, 218
Centaurus A 293, 308
CERGA 249
CERN 6, 292, 297
CFHT 206, 210
Cluster 46, 96, 179, 180, 187, 333
CME 75–76, 94
CNO cyklus 64
coronium 139
CoRoT 265–266
CTA 296
Culann Patera 105
Curieova teplota 174
Curiosity 102, 103, 191
cyklolda 22
cyklotron 20, 316
cyklotronní frekvence 22, 316
CZELTA 296
Čerenkovovo záření 288, 293,
295, 296
Čerenkovův detektor 288, 294, 295
černá díra 125, 292, 293, 302–303,
307, 309
Daltonovo minimum 77
Darwin 271, 275, 277
degenerovaný plyn 35, 255, 310
Deimos 187
DESY 41
diferenciální rotace 65, 91, 92, 107,
299, 302, 305
Dione 208
dipól 167
dráha heliosynchronní 84
drift 15, 20–22, 232
Duše (mlhovina) 120, 224
dvojlomný krystal 321
dvojvrstva 23, 25, 48
Dynamics Explorer 45, 46, 334
efekt
 alfa 65–66
 omega 65–66

Eiffelova věž 283, 284
 elektromagnetický kolaps 35–36
 elektrometr 283–285
 elektronvolt (eV) 47, 129
 elektroskop 282–283, 297
 Enceladus 208, 218
 ESA 90, 210, 271, 275, 332
 ESPRESSO 262
 Europa 104, 203, 205
 Explorer 184
 extrasolární planety 251–278
 Faradayova rotace 126, 301, 306,
 320–324, 327
 FLASH 41
 Fomalhaut 253, 273
 fotosféra 61, 63, 270
 galaktické halo 307
 Galaxie (Mléčná dráha) 306
 Galileo 105, 177, 201, 203–205, 334
 gama záblesk 35, 90
 Ganymed 104, 201, 203–205, 324
 Gemini 272, 274
 Geotail 46, 334
 GMC 224, 226
 Golevka 90
 GPI 274
 GPS 32, 55, 295
 GTC 307, 325
 GQ Lupi 273
 Gusev 190
 gyrace 20–22
 GZK mez 291
 hadronizace látky 300
 Halleyova kometa 176
 heliopauza 68–70, 95, 163–164
 helioseismologie 67, 73
 heliosféra 69–70, 86, 95, 185
 Herbigovy-Harovy objekty 121, 229
 H.E.S.S. 293
 HET 33
 Hinode 84, 334
 Hitomi 185
 hnědí trpaslíci 254–257
 Hope 191
 hraniční vrstva magnetosféry 47, 69,
 170, 171
 Hubblův dalekohled 184, 274
 Huygens 107, 208, 210, 218
 hvězdný vítr 68, 227
 hvězdy hlavní posloupnosti 59, 61,
 64, 241, 256, 275
 hydrazin 156, 206
 chondrit 230, 243
 chromosféra 63, 134
 IBEX 95, 335
 IceCube 292
 IKAROS 89
 Ilumetsa 41
 Institut Maxe Plancka 198,
 201, 210
 INTEGRAL 312
 Io 18, 93, 104–105, 157, 200–203
 ionopauza 170, 174
 ionosféra 170
 IRAS 122, 253, 307
 ITER 64
 JAXA 84, 89, 332
 jedenáctiletý cyklus 46, 67, 71, 77
 jev
 elektromagnetické indukce
 315, 327
 Jarkovského 90
 Starkův 317
 Zeemanův 301, 305, 308,
 317–320, 327
 jihoatlantická anomálie 99,
 184–185, 192
 Joulův ohřev 63
 Juno 104, 199, 201, 205–206, 335
 Jupiter 199–206
 katastrofické přepojení siločar
 310–311
 Keckovy dalekohledy 214, 253, 274
 kelvin 129
 Kepler (dalekohled) 265–266, 335
 Kiruna 41
 komora
 bublinková 287

mlžná 287
 kontrakce délek 20
 konvektivní vrstva 61, 67, 73
 koronální výron hmoty 75, 76, 113
 koróna 138–139
 kosmické záření 281–297
 kovový vodík 196–199
 kryovulkanizmus 218
 Kuiperův pás 245–247
 kvadрупól 71, 167, 168, 183, 207,
 213, 215
 kvarkové-gluonové plazma 301
 Lagrangeovy body 45, 243,
 249, 275
 Larmorova rotace 20–21
 laschampská událost 183
 LBT 33
 LCD odražeč 90
 letící stíny 137
 LIGO 151
 LISA 90
 LL Orionis 23, 24
 LLNL 198
 Lofoty 41, 54, 57
 Lorenziniho ampule 312
 Lorentzova síla 20, 316
 Magellan 101, 173, 176, 335
 MAGION 179–180
 magnetar 302, 310–312
 magnetická
 bouře 28, 37, 45, 47, 75, 79, 81,
 83, 207
 pěna 68
 siločára 15
 magnetické
 bubliny 308
 zrcadlo 20–21, 184, 292
 magnetický ohon 170
 magnetický prach 324
 magnetometr 72, 81, 86, 96, 155,
 156, 176, 177, 315
 magnetopauza 170
 magnituda 255
 MACHO 268
 Machovo číslo 79, 80
 Mangalyaan 191
 Mariner 164, 169, 175, 189, 336
 Mars 187–192
 Mars (sonda) 189
 Mars Express 189, 190
 Mars Global Surveyor 102,
 187, 190, 336
 Mars Pathfinder 189
 Mars Science Laboratory 102, 191
 Maunderovo minimum 47
 MAVEN 189, 336
 Maxwellův radioteleskop 309
 MDI 67
 Meridiani Planum 190
 Merkur 168–171
 MESSENGER 100, 169, 192, 336
 metoda
 koronální masky 270
 nulovací interferometrie 270
 Mezinárodní kosmická stanice 46,
 987, 153, 184, 192, 292
 měření radiálních rychlostí 162–263
 migrace planet 235–238, 246
 Mimas 208, 218
 mikročočky 267–269
 astrometrické 268
 fotometrické 268
 mikrorekonekce 63, 87
 minizáblesky 87
 model
 akreční 223–226
 kolizního růstu 232
 z Nice 235–238, 249, 249
 monopól 167
 MPG 210
 Mravenec 304
 Muší oko 290
 NASA 90, 107, 134, 153, 159, 184,
 203, 210, 271, 310, 332
 nebulární teorie 222–224
 negravitační síla 79, 90, 91
 nejstarší planeta 239
 Neptun 215–217

Nereida 216
 nestabilita
 gravitační 226
 Kelvinova-Helmholtzova 187
 korálková 15
 orbitální 246
 smyčková 15
 neutrální vrstva 170, 179, 208
 New Horizons 163, 201, 205
 Nordkapp 40, 41, 56
 NOAA 40, 46
 Oberon 213
 Odysseus 84–86, 153, 338
 OGLE 278
 okupól 168
 olivíny 243
 olovnaté sklo 321, 327
 Oortův oblak 164, 236, 247
 Opportunity 103, 190–191
 Ó můj Bože 291, 293
 Palomar 258, 260
 PAMELA 292
 paralaxa 251
 Parker Solar Probe 83–85, 87, 338
 Parkerova
 plocha 72–73, 83
 rovnice 83
 spirála 72
 parsek 129
 pás
 totality 131, 142
 valenční 196
 vodivostní 195
 zakázaný 196
 penumbra 73, 110
 perihelium 85, 89
 Perseverance 103, 191
 Phobos 91, 187
 Pierre Auger (observatoř) 294–295
 Pioneer 91, 157, 159, 161, 184,
 205, 210–211
 Pioneer Venus 176, 338
 Pyhäsalmi 41
 pyroxeny 243

pinč
 helikální 16
 theta 16
 zet 16
 Planck (sonda) 37, 124, 203, 307,
 324, 325
 planetesimály 229, 231–238, 245,
 246, 248
 pláště heliosféry 68, 69
 plazma 13–37
 plazmoid 26, 28, 57, 75–76, 79, 81,
 93, 113
 plazmosféra 47, 170, 171, 178, 179,
 208–209
 plazmová frekvence 28, 29, 31
 plazmová stěna 13, 15–19, 36,
 45, 327
 plazmové vlákno 13, 15–19, 36, 327
 plazmový ohon 47
 plazmový torus 157, 187, 200–202
 polarizace prachem 124, 125, 307
 polarizace záření 19, 320
 polární kasp 91–9, 2, 170–171,
 179, 201, 212, 216
 pól
 magnetický 48–49, 181, 183
 geomagnetický 49, 181
 pozdní velké bombardování 246
 poziční astrometrie 258–260
 Prokyon 258
 proplyd 225
 protoplanetární disk – viz proplyd
 protono-protonový řetězec 64
 protoplanetární disk 116–117, 226,
 229–232, 234, 235, 239, 242,
 243, 246, 248, 251, 253, 257,
 261, 274
 proud
 Birkelandův 16, 18–19
 lávy 105, 172–173
 magnetopauzy 179
 neutrální vrstvy 208
 ohonu 179
 Pease-Braginského 36

prstencový 179, 208
 přepojení siločar 26–28, 48, 75, 81,
 93, 87, 179, 187, 310–311
 pseudomagnetosféra 92, 174, 175,
 177, 188, 191–192
 pyroxeny 243
 radiační pás 11, 32, 79, 99, 155,
 157, 159, 170, 175, 178, 184–
 285, 200–203, 208, 281, 316
 radioizotopový generátor 71, 91,
 155, 158, 163, 164
 rázová vlna 15, 23–25, 47, 69–70,
 91–93, 169–171, 175, 177–179,
 185, 188, 198, 201, 207, 211,
 213, 216, 229
 RBSP 185
 rekonekce – viz přepojení
 reliktní gravitační vlny 324
 reliktní záření 32, 37, 203, 291,
 300, 307, 324
 remanentní pole 102, 174
 rezonance 234–235, 237–238,
 243–245
 Rhea 208
 RHESSI 312, 339
 Rocheova mez 217
 Rocheův lalok 230, 241
 Ross 614 B 258
 rovníkový disk 202
 růst
 překotný 232–233
 uspořádaný 232
 rychlost
 Alfvénova 29
 driftová 22
 magnetozvukových vln 67
 nadzvuková 23, 70
 radiální 69
 slunečního větru 47, 86, 95,
 149, 164
 světla 316
 zvuku 69, 79
 S106 – 119, 257
 SALT 33

saros 133–134
 satelit 1963–38C – 16, 45
 Saturn 206–212
 SCUBA 309
 SDO 111, 339
 seeing 269
 sekundární spršky – viz spršky
 Shoemaker-Levy 9 – 206
 siločáry
 otevřené 26–27, 45, 61, 71,
 87, 167
 uzavřené 26–27
 Skuleskogen 41
 slapová síla 222
 Slunce
 globální pole 71
 lokální pole 61, 72,
 sluneční
 aktivita 71
 dynamo 65–67
 plachetnice 89–90
 skvrny 47, 61, 72, 73, 77
 vítr 79–96
 vzplanutí 72, 75
 SOHO 67, 75, 93, 112, 339
 Sojourner 103
 spektrální třída 60, 62, 75, 256
 Spirit 190–191
 spršky kosmického záření 287–290
 Sputnik 184
 srpečky 135
 Subaru 210
 světelný rok 129
 SWIFT 312
 switchbacks 87
 šestiúhelník (Saturn) 212
 tachoplocha 67, 73
 tekutinové dynamo 65–67, 201
 terminační vlna 68, 162
 terrella 43–44
 tesla 302
 Tethys 208
 Tchien-wen-1 –191
 Titan 92, 107, 208–210, 218

Titan IIIE Centaur 157–158
 Titania 213
 tlak
 degenerovaného plynu 35,
 255, 310
 magnetický 15, 170
 mediální 142
 slunečního větru 79, 80, 90–91,
 170, 174
 slunečního záření 89–90
 záření hvězd 226
 veřejnosti 159
 TMR 272–273
 TPF 271, 275
 TRACE 75, 340
 tranzitní fotometrie 263–265
 Triad 16, 45, 46, 340
 Triton 109, 216, 217
 trochoida 22
 Trojané 243–243, 324
 Tromsø 41, 44, 53, 55, 56
 TXS 0506+05 – 292
 ULIRG 307–308
 umbra 73, 110
 Umbriel 213
 Univerzita
 Johna Hopkinse 86
 Michiganská 87
 v Oslo 84
 v Oulu 40
 Uran 212–215
 Ústav fyziky atmosféry AV ČR 192
 velký třesk 291
 Van Allenovy sondy 99, 185, 340
 Van Allenovy pásy – viz radiální
 Vega 253
 Vega (raketa) 176
 velkorozměrová struktura 309
 Veněra 175–176, 340
 Venus Express 173, 177
 Venuše 171–177
 Viking 189
 VIM 154
 víry na bocích magnetosféry 185
 VLA 312
 VLBA 305
 vlny
 Alfvénovy 29, 84, 87
 kompresní 29
 magnetozyukové 15, 29, 63, 67,
 79, 84, 87, 95
 mimořádné 31
 řádné 31
 v plazmatu 28–31
 zvukové 15, 28, 211
 VLT 33, 93, 253, 262, 273, 274
 Voyager 70–71, 95, 107–109,
 153–164, 341
 plaketa 159
 vrstva v zářivé rovnováze 61
 Wind 45, 93, 341
 World Magnetic Model 192
 XFEL 41
 XMM-Newton 35
 zabíjäcké elektrony 184
 zákon(y)
 gravitační 91
 Haleův 67
 Keplerovy 264
 zachování energie 21
 zachování magnetického toku 302
 zamrzání siločar 65
 záře
 na Jupiteru 104, 205
 na Marsu 188–189
 na Saturnu 106
 na Zemi 39–57, 97–98
 na Uranu 108
 protonová 189
 záření
 alfa 290
 brzdné 31, 35, 316
 cyklotronní 22, 31, 316
 Čerenkovovo 288, 293, 295, 296
 fluorescenční 288
 gama 35, 75, 243, 282–284, 310
 infračervené 32, 33, 176,
 196, 218

ionizující 184, 282	rentgenové 35, 75, 318
kilometrové 32	sluneční 90, 170
kosmické 71, 79, 154, 155, 178, 183–185, 281–297, 299, 300	synchrotronní 19, 22, 31, 301, 303, 316, 321
mikrovlnné 32, 324	tepelné 325
milimetrové 325	ultrafialové 11, 37, 50, 92, 174, 202, 230, 288
rádiové 312	vizuální 325
rekombinační 31, 32	Země 177–187
reliktní 32, 37, 203, 291, 300, 307, 324	zpoždování záblesků pulzarů 260



Rejstřík osob

- Adams, John Couch 216
Alfvén, Hannes 44, 65
Allen, James Van 184
Anderson, Carl 287
Aristotelés ze Stageiry 251
Auger, Pierre 288, 194, 295–297
Babcock, Horace 278
Barnard, Emmerson 259
Beňo, Radek 53
Bergwitz, Karl 283
Bessel, Friedrich Wilhelm 258
Birkeland, Kristian 16, 42–45, 53, 83
Blake, William 281
Blanchard, Jean Pierre 296
Braginskij, Stanislav Josifovič 35–35
Brahe, Tycho 42
Bruno, Giordano 251
Burke, Bernard 203, 205
Carrington, Richard Christopher 72, 80–81, 83
Carter, Jimmy 161
Cassini, Giovanni Domenico 210
Celsius, Anders 42
Cicero, Marcus Tullius 221
Ciolkovskij, Konstantin 89
Clark, Arthur 89
Cook, James 42
Cowling, Thomas 77
Curie, Marie 44
Čerenkov, Paul 288
Demokritos 251
Dewar, James 197
Diamond, Philip 305
Dias, Ranga 197
Doppler, Christian Hans 278
Druckmüller, Miloslav 141
Duncan, Robert 310
Eddington, Arthur 83, 134
Einstein, Albert 134, 195
Epikuros ze Samu 251
Exner, Franz 283
Faraday, Michael 301, 315, 321, 327, 372
Fermi, Enrico 291, 292
Fisk, Lennard 87
FitzGerald, George 83
Flamsteed, John 213
Francis, Dick 299
Franklin Kenneth 205
Fraunhofer, Joseph 139
Galilei, Galileo 10, 205, 209, 213, 216, 221
Galle, Johann Gottfried 216
Gassendi, Pierre 42
Glasser, Donald 287
Gockel, Albert 283
Grady, Carol 117
Greisen, Kenneth Ingvard 291
Gurevič, Alexandr 296
Hall, John Scoville 324
Halley, Edmund 133
Heiles, Carl 308
Herschel, William 213, 218, 221
Hess, Victor Francis 283–287, 293
Hiltner, William Albert 324
Hiorter, Olof 42
Hitler, Adolf 287
Horrebow, Christian 66
Hubble, Edwin 324
Hugoniot, Pierre Henry 23, 25
Humphry, David 315
Huntington, Hillard 196
Huygens, Christian 209
Chandrasekhar, Subrahmanyan 257
Chapman, Sydney 44
Chinmoy, Sri 59

- Jarkovskij, Jurij 90
 Jeans, James 222
 Jeffries, John 296
 Jewitt, David 206
 Kamp, Piet Van de 258
 Kant, Immanuel 222
 Kerr, John 321
 Kolhörster, Werner 286
 Koperník, Mikoláš 10, 167, 221
 Kouveliotou, Chryssa 310
 Kuiper, Gerard 213, 216
 Kuzmin, Vadim Alexejevič 291
 Langmuir, Irving 13, 25, 37
 Laplace, Pierre Simon 222
 Larmor, Joseph 20
 Lassel, William 213, 216
 Langevelde, Huib Jan 305
 Le Verrier, Urbain 216, 258
 Lemaître, Georges 324
 Li, Cheng 212
 Linke, Franz 283
 Lorentz, Hendrik Antoon 20, 318–320
 Lowell, Percival 327
 Lyutikov, Maxim 311
 Magnes 312
 Macháček, Daniel 108
 Mairan, Jacques Dortou de 42
 Margot, Jean Luc 168
 Massey, Ed 153
 Maunder, Edward 47
 Maunderová, Annie 47
 Mayor, Michel 263
 Mihos Christ 127
 Millikan, Robert 283
 Mitchel, Arthur 197
 Neckář, Václav 96
 Nellis, William 198
 Neruda, Jan 251
 Olsen, Rolf 109
 Onnes, Heike Kamerlingh 318
 Ørsted, Hans Christian 315
 Paczyński, Bohdan 278
 Parker, Eugen 72, 83
 Pease, Rendel Sebastian 35, 36
 Piazzi, Giuseppe 249
 Quataert, Eliot 308
 Queloz, Didier 263
 Rankine, William John Macquorn 23, 25
 Robishaw, Timothy, 308
 Röntgen, Wilhelm Konrad 318
 Rømer, Ole Christensen 205
 Rossi, Bruno 288, 290
 Rydhenius 137
 Safronov, Viktor Sergejevič 223
 Sagan, Carl Edward 159, 315
 Seneca, Lucius Annaeus 79
 Schneider, Glenn 117
 Schwabe, Heinrich 66, 77
 Silvera, Dias 197
 Skobelcyn, Dmitrij 287
 Slipher, Vesto 324
 Stark, Johannes 317
 Stone, Edward 153
 Strand, Kaj Aage Gunnar 258
 Šmidt, Otto Juljevič 223
 Tesla, Nicola 302
 Thompson, Christopher 310
 Thomson, Joseph John 320
 Trávníček, Pavel 192
 Ulloa, Antonio de 42
 Vlemmings, Wouter 305
 Waldheim, Kurt 161
 Wargentin, Pehr Wilhelm 42
 Weir, Samuel 197
 Wigner, Eugen Paul 196
 Wicht, Johannes 201
 Wilson, Charles Thomas Rees 282
 Wisniewski, John 117
 Wulf, Theodor 282–283
 Zacepin, Georgij 290, 291
 Zeeman, Pieter 301, 317, 318–321, 327, 328
 Zeman, Miloš 328

PETR KULHÁNEK, JAKUB ROZEHNAL

HVĚZDY, PLANETY, MAGNETY

**ANEB TŘINÁCTERO PŘÍBĚHŮ
O MAGNETECH VE VESMÍRU**

Žádná část této publikace nesmí být publikována
a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného
svolení autorů a sdružení AGA.

Autoři: prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.

Mgr. Jakub Rozehnal

Grafika a obálka: Ing. arch. Ivan Havlíček

Sazba: Ing. Radek Beňo, Ph.D.

Jazyková korektura: Ing. Rudolf Mentzl

Layout: Ing. Martin Batelka

Formát: 13×20 cm, 352 stran

Obrázky: 91 černobílých, 47 barevných

Nakladatelství: AGA (Aldebaran Group for Astrophysics)

Vydání: druhé, Praha 2021

Tisk: TISK CENTRUM s. r. o.

www.aldebaran.cz

ISBN 978-80-906638-6-2