

Konec sluneční odyssey

Kateřina Andréeeová, Michal Švanda

Že meziplanetární prostor není od centrálního tělesa – Slunce – zcela izolovaný, napadlo již v září 1859 astronoma Richarda Carringtona. Tento velmi úspěšný sluneční pozorovatel zakresloval 1. září 1859 skupinu slunečních skvrn, když se mezi skvrnami rozsvítila dvě světlá vlákna. Ta byla pozorovatelná asi pět minut a pak pohasla. Zvědavý čtenář snadno nahlédne, že Carrington pozoroval tzv. bílou erupci, tedy projev skokové přestavby struktury magnetického pole, při níž se uvolnily tak mohutné svazky rychlých částic, že se rozšířily až do fotosféry. O den později zasáhla Zemí mohutná geomagnetická bouře. Polární záře zaplavily oblohu, indukované elektrické proudy napáchaly obrovské škody na telegrafickém vedení. Carrington tušil, že zde bude nějaká souvislost. Už o rok později několik pozorovatelů sledujících úplné sluneční zatmění zaznamenalo podivný útvar, který se tvarem zcela lišil od běžných koronálních paprsků. Soudí se, že tehdy byl pozorován první koronální výron hmoty, jev, který doprovází silnější sluneční erupce.

Úvahy o větru od Slunce

Na počátku 20. století se Nor Kristian Birkeland zabýval pozorováním polárních září. Jeho měření geomagnetické aktivity ukázala, že aurorální aktivita probíhá téměř neustále, avšak s proměnnou intenzitou. Z toho usoudil, že Země je neustále bombardována částicemi od Slunce. Birkeland též ukázal, že nemůže jít o neutrální částice, ale ani částice výhradně jednoho náboje. V „částicových paprscích“ musí být zastoupeny jak kladné (tedy ionty), tak záporné (tedy elektrony) náboje.

Kolem roku 1930 se objevily první úvahy o vysoké teplotě koróny, vycházející z vizuálních pozorování úplných slunečních zatmění. Odhadovalo se, že koróna musí být velmi horká, až několik milionů stupňů, tedy mnohem teplejší než pod ní ležící fotosféra, viditelný sluneční povrch. Model takové horké koróny, která byla statická, vypočetl na počátku 50. let 20. století Sydney Chapman. Chapmanova koróna se rozpínala daleko za dráhu Země a odváděla

teplo od Slunce svou vysokou tepelnou vodivostí.

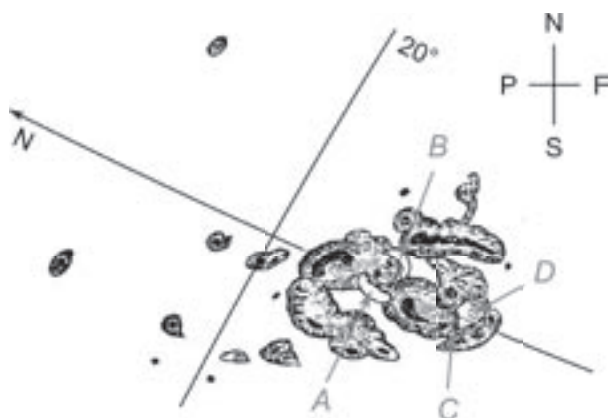
Ve stejné době zaujaly Němce Ludwiga Biermanna ohony komet. Všiml si, že plazmové kometární ohon míří vždy směrem od Slunce. Postuloval tedy, že zde musí existovat stálý proud částic od Slunce, který kometární ohony směřuje. To však bylo v rozporu s Chapmanovým modelem.

Teprve třicetiletý Eugene Parker, pracující na univerzitě v Chicagu, si uvědomil, že tok tepla v Chapmanově statické koróně a částicové záření ohýbající ohony komet musí být důsledek téhož jevu, a navrhl model rozpínající se koróny. Částicové záření, které bylo logickým důsledkem jeho výpočtů, nazval *slunečním větrem*. Přestože byly počátky Parkerovy teorie pro soudobou astrofyziku až příliš kontroverzní a neakceptovatelné, jeho předpovědi se potvrdily už o necelý rok později. V lednu 1959 změřila parametry slunečního větru sovětská sonda Luna 1.

Kvůli vysoké teplotě v koróně má velké množství částic rychlost větší než je úni-

ková rychlost z gravitačního vlivu Slunce, která je přibližně 620 km/s. Typická rychlost pro částice koróny je při teplotě 2 milionů stupňů 145 km/s, což je sice menší než úniková rychlost, avšak rozdělení rychlostí dává dostatek částic rychlejších než přibližně 400 km/s, které mohou po dalším urychlení z vlivu Slunce uniknout.

Vlastnosti slunečního větru v okolí Země jsou neustále měřeny několika družicovými observatořemi, jmenujme např. ACE nebo WIND. Průměrná hustota v okolí Země činí pouhých několik částic v krychli o hraně 1 cm s charakteristickou rychlostí 450 km/s. Z měření v rovině ekliptiky současně vycházelo, že sluneční vítr má dvě složky: rychlou (dosahující rychlosti kolem 700 km/s) a pomalou (s charakteristickou rychlostí 300 až 400 km/s). Zatímco v minimu sluneční aktivity je v oblasti ekliptiky nejvíce zastoupena pomalá složka, v období zvýšené aktivity se zvětšuje zastoupení složky rychlé. Až do začátku 90. let 20. století se vědci domnívali, že pomalý sluneční vítr je hlavní složkou, zatímco rychlý sluneční vítr byl považován za vzácnost.



Reprodukce kresby Richarda Carringtona, ukazující polohu bílé erupce, kterou pozoroval během zakreslování skupiny slunečních skvrn v září 1869. Zprávu o tomto pozorování podal v roce 1860 v časopise Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Písmeny jsou označena jednotlivá místa zjasnění, velmi dobře patrná jsou dvě vlákna A a B.

Mgr. Kateřina Andréeeová, Ph. D. (*1979) vystudovala astrofyziku na MFF UK a tamtéž získala Ph.D. studiem slunečního větru v okolí Země. Od roku 2008 pracuje ve Finském meteorologickém institutu v Helsinkách.
Email: katerina.andreeeva@fmi.fi

Mgr. Michal Švanda, Ph. D. (*1980) vystudoval astrofyziku na MFF UK se zaměřením na dynamické dění ve sluneční atmosféře. V současnosti působí v rámci postdoktorandského pobytu v Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung v Katlenburg-Lindau v Německu.
Email: michal@astronomie.cz



Eugene Parker (*1927) je i ve svém věku neuvěřitelně vitálním a stále činným vědcem. Nositel mnohých vyznamenání, zakladatel nauky o slunečním větru a dalších disciplín sluneční fyziky.

Následující roky ukázaly, jak moc se vědci mylili a jak je důležité nenechat se zmást měřeními provedeným ve velmi úzké oblasti prostoru.

Ulysses startuje

Studium slunečního větru v oblastech dále od ekliptiky zajímalo vědce již nějakou dobu. Vypuštění sondy, která by se měla pohybovat mimo rovinu oběžné dráhy Země je však velmi náročné a je spojeno s velkou spotřebou paliva. Nosná raketa, která by zvládla vynést na tuto misi rozumné množství nákladu, aby družice přinesla očekávaný vědecký přínos, nebyla k dispozici.

Na přelomu 70. a 80. let tak bylo rozhodnuto, že jedinou možností je využít „gravitačního praku“, tedy těsného průletu kolem některé planety, který by změnil další trajektorii na prakticky kolmou k ekliptice. Zkušenosti z jiných misí (např. Mariner 10 nebo Pioneer 11) ukazovaly, že tato cesta je možná. Ve spolupráci NASA a ESA vznikla mise Ulysses. Slovo Ulysses je

Nepříliš kvalitní fotografie zachycující Ulysses s raketovým tahačem krátce po vyložení z nákladového prostoru raketoplánu Discovery



anglickým překladem jména Odysseus, ithackého krále, který po skončení trójské války strávil deset let putováním dosud neprobádanými končinami do rodné Ithaky za milovanou Penelopou. Jméno Ulysses je pro sondu velice příhodné. Nikdy předtím se operátoři nepokusili o gravitační manévry, při němž by sonda byla katapultována mimo rovinu ekliptiky, do naprosto neznámých prostor. Cesta sondy Ulysses k cíli byla stejně nepřímá a neprobádaná jako Odysseovo putování.

Sonda měla být vypuštěna v roce 1983, ale obtíže při vývoji zpozdily start o tři roky. V lednu 1986 ale havaroval raketoplán Challenger, což odložilo start o další čtyři roky. Samotný start byl též neobvyklý. K družici byl připevněn dvoustupňový raketový tahač a celý komplex byl na zemskou orbitu vynesen na palubě raketoplánu Discovery v říjnu 1990. Po odpoutání od raketoplánu 6. října 1990 v 17.48 světového času byla Ulysses urychlena tahačem na rychlost 41 km/s vůči Slunci na tzv. Hohmannovu přechodovou trajektorii. Tato rychlost byla překonána až v roce 2006 při vypuštění družice New Horizons k Plutu. Ulysses dorazila 7. února 1992 k Jupiteru, využila jeho pohybové energie a katapultovala se na heliocentrickou vysoce excentrickou trajektorii se sklonem 80,2 stupně k slunečnímu rovníku s periodou 6,2 roku,

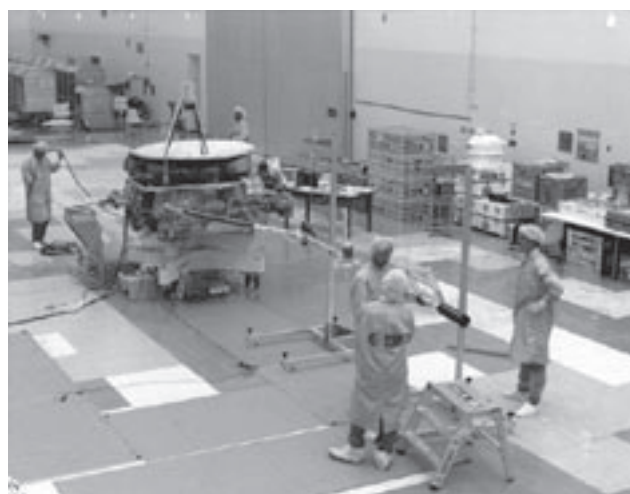
která umožňuje přelety nad oběma slunečními póly. Jedna z nejvýznamnějších slunečních družic započala svoji jedinečnou misi.

Dnes můžeme říci, že předpokládaná životnost sondy Ulysses byla překročena čtyřikrát. Až v loňském roce poklesl výkon radioizotopového generátoru pod úroveň, která dostačovala k ohřívání hydrazinu, jenž se používá k pohonu manévrovacích motorů pro směrování antény na Zemi. Mise byla oficiálně ukončena 1. července 2008, přestože sonda stále pracuje a posílá omezené množství dat. Naprostý konec se ale nevyhnutelně blíží, neboť bez ohřevu hydrazin v kosmickém chladu zamrzne. Až to nastane, během několika dnů se Země dostane mimo směrový kužel vysílací antény a sonda se definitivně odmlčí.

Ulysses studuje sluneční vítr

Ulysses se startovní hmotností 367 kg má své palubě má 11 vědeckých přístrojů k výzkumu heliosférického magnetického pole, rádiových a plazmových vln, a především vlastností a složení slunečního větru. Součástí této jedinečné mise byly i přístroje pro výzkum kosmického prachu a plynu, vysokoenergetických částic galaktického původu a rentgenového záření, které může pocházet jak od Slunce, tak od kosmických zdrojů. I pouhé rádiové spojení s družicí bylo využito k výzkumu daleké sluneční koróny a k hledání průchodu gravitačních vln (důžno podotknout, že tímto způsobem nebyla žádná gravitační vlna detekována).

Hlavními elementy družice jsou: tělo ve tvaru krabice, na kterou je namonto-



Poslední laboratorní testy v hangáru AO před převezněním do Kennedyho kosmického střediska a uložení do nákladového prostoru raketoplánu. Rameno je nyní roztaženo v letové konfiguraci.

vaná 1,65m komunikační anténa směřující k Zemi a radioizotopový generátor dodávající energii. Rameno dlouhé 5,6 m nesoucí dohromady tři přístroje (detektor záření gama, magnetometr a magnetickou indukční sondu) je umístěno tak, aby bylo zabráněno interferenci s družicí. Družice dále obsahuje dvojici lan dlouhých 72 metrů, sloužících jako anténa k detekci plazmových vln. Každé lano směřuje na protilehlou stranu těla družice.

Sluneční vítr po Ulysses

Družice Ulysses dokončila během své mise téměř tři oběhy kolem Slunce, přičemž pozorovala více než jeden sluneční cyklus. Výsledky této jedinečné mise jsou více než zajímavé.

Již před vypuštěním sondy *Ulysses* se vědělo, že existují dva typy slunečního větru: rychlý, který byl považován za zvláštnost, a pak pomalý, jenž měl reprezentovat typický tok částic od Slunce. Nikdo však netušil, jak se charakter slunečního větru mění s heliografickou šířkou, neboť pozorování přicházela pouze z oblasti blízké ekliptice a jen z velmi omezené oblasti kolem slunečního rovníku. *Ulysses* byl vypuštěn na polární dráhu, což přineslo velmi zajímavé výsledky o celkové struktuře slunečního větru. Ukázalo

se, že rychlý vítr není až takovou zvláštností, jak se do té doby myslelo. Rychlý vítr byl přítomen v měření neustále, oslaben byl pouze v období slunečního maxima. V minimu (vlevo) vane rychlý vítr do tří čtvrtin heliosféry průměrnou rychlostí 750 km/s, tedy výrazně rychleji, než vítr vznikající v okolí slunečního rovníku, odkud pochází částice cestující průměrně 350 km/s. V období maxima je vítr více turbulentní a nepravidelný, což je důsledek existence lokálních magnetických polí, modulujících strukturu magnetického pole ve sluneční koróně.

Ukázaly, jak se mění rozložení slunečního větru během slunečního maxima i minima zejména v závislosti na heliografické šířce. Z měření vyplývá, že oproti původním předpokladům je naopak pomalá složka slunečního větru vzácností, že obvyklou složkou je sluneční vítr rychlý. Podrobné studium prokázalo, že rychlá složka slunečního větru vzniká v oblastech s otevřeným magnetickým polem, tedy typicky v koronálních dírách, zatímco složka pomalá přichází z aktivních oblastí s uzavřeným magnetickým polem. V období minima tedy rychlá složka dominuje ve všech heliografických šířkách vyjma těsného okolí slunečního rovníku a meziplanetární magnetické pole má výrazně dipólový charakter. V maximu činnosti zastoupení rychlé složky klesá na úkor složky pomalé a orientace meziplanetárního magnetického pole nabývá složitě multipólové struktury.

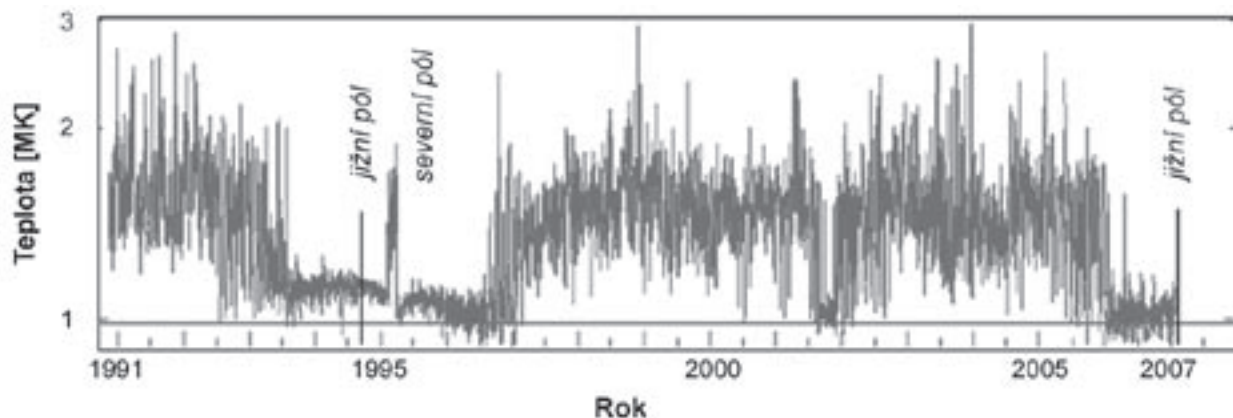
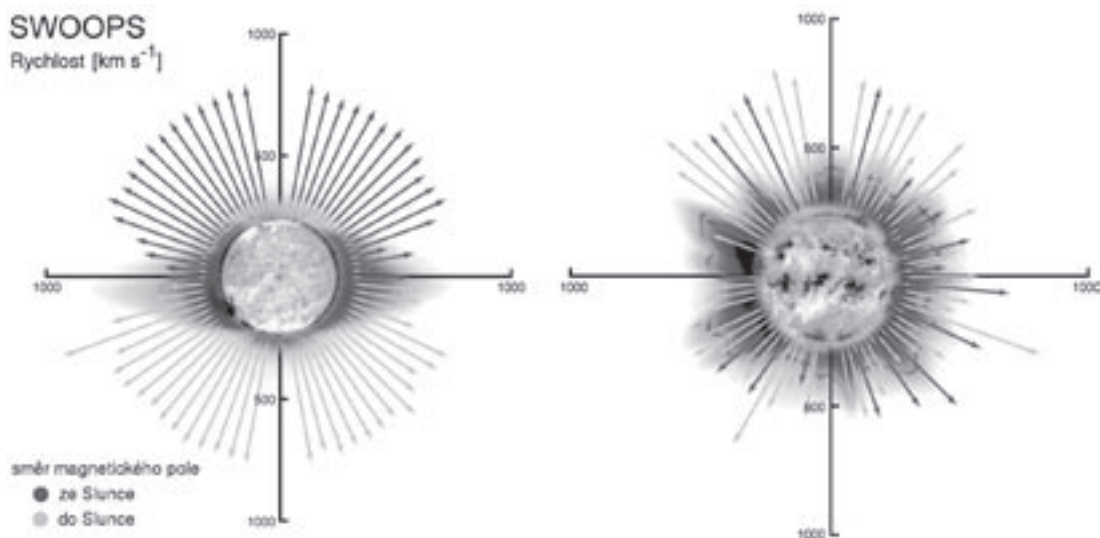
Mnohé studie ukazují, že sluneční vítr pozorovaný při třetím obletu družice *Ulysses* je přibližně o pětadvacet procent slabší než sluneční vítr během prvního obletu, přičemž oba oblety odpovídaly minimu sluneční aktivity. Rychlost slunečního větru byla téměř shodná v obou případech, ale hustota a tlak větru během třetího obletu byly významně nižší.

Struktura magnetického pole v oblastech slunečních pólů byla před vypuštěním družice *Ulysses* ve stádiu pouhých dohadů. Jedním z úkolů sondy bylo vnést do této problematiky jasno. Sonda potvrdila, že polární magnetické pole nemá hladkou radiální strukturu, ale že se v něm vyskytuje měřitelná příčná složka, která v důsledku překáží kosmickým částicím, jež by jinak mohly téměř bez zábran kolmo na ekliptiku pronikat do sluneční soustavy z okolního prostoru. Přítomnost příčné složky se vysvětluje působením velkých kon-

vektivních buněk, tzv. supergranulí, jejichž náhodné pohyby smýkají původně radiálním polem a vytvářejí v něm velkorozměrové příčné fluktuace.

Je zcela přirozenou otázkou, zda je Slunce, v zásadě prakticky dokonalá koule, symetrické vůči rovníku. Pozorování magnetických polí a projevů aktivity ukázala, že v průměru jsou odchylky od symetrie malé, ale ne zcela zanedbatelné. Bohužel měření ve vyšších heliografických šířkách, pořízená z okolí Země, jsou zatížena projekčními efekty, jejichž úplné odstranění je velmi složité a mnohdy nemožné. Měření z prvního průletu sondy

Variace teploty (v milionech Kelvinů) v koróně podle měření přístroje SWICS. Koronální díry, zejména v okolí slunečních pólů, jsou oblastmi nižší teploty, avšak s výskytem rychlejší formy slunečního větru.



Ulysses v letech 1994 (jižní pól) až 1995 (severní pól) ukázala, že zatímco radiální složka magnetického pole je v období slunečního minima velmi symetrická, totéž rozhodně neplatí pro charakter částic, jež Slunce pouští. Sluneční vítr byl v oblasti severního pólu v průměru o 20 km/s rychlejší než v oblasti pólu jižního. V období maxima sluneční činnosti v letech 2000 až 2001 našla Ulysses heliosféru v mnohem symetričtějším stavu než šest let předtím. Struktura slunečního větru byla v zásadě stejná ve všech heliografických šířkách, v průměru byl vítr pomalejší, ale mnohem více proměnný.

Shodou okolností se v období druhého průletu přepólovalo globální magnetické pole. K tomuto jevu dochází jednou za jedenáct let a současné představy předpokládají, že k němu dochází působením globálního meridionálního proudění, které do polárních oblastí přináší magnetické pole opačné orientace, jež to původní vyruší a vytvoří novou polární magnetickou čepičku s novou orientací. Údaje pořízené sondou Ulysses dávají tušit, že přepólování je celým komplexem jevů a trvá několik měsíců.

Přístroje na družici Ulysses přinesly důležité informace nejen o slunečním větru a meziplanetárním magnetickém poli, ale také o mezihvězdném prachu. Detektory prachových zrn zaznamenaly nárůst jejich počtu od minima do maxima sluneční aktivity. Předpokládá se, že je to výsledek interakce těchto zrn, které mohou nést elektrický náboj, a meziplanetárního magnetického

pole. Zatímco v minimu aktivity je toto pole vysoce organizované a způsobuje odklání prachových částic pronikajících k nám z meziplanetárního prostoru, v maximu toto pole obsahuje velké množství poruch, prachové částice tudíž mohou snáze pronikat do nitra sluneční soustavy. Ulysses detekovala v průměru třicetkrát více částic, než předpovídaly fundované odhady.

Jakkoli se to zdá podivné, Ulysses kromě určitého průlomu ve výzkumu Slunce přispěla i do jiných astronomických disciplín. Výprava do neprobádaných končin sluneční soustavy nedala spát kosmologům, kteří neustále potřebují získávat přesnější informace pro modely vzniku vesmíru a formování chemických prvků. Mezi nimi je významné zejména zastoupení helia ^3He , jehož koncentraci měřila družice Ulysses z meziplanetárního prachu. Předpokládá se, že tento specifický izotop helia vznikl převážně při velkém třesku a znalost jeho přesného zastoupení tedy přináší důležité informace o fyzikálních procesech ve velmi mladém vesmíru. V tomto směru nepřinesla měření z Ulysses žádná překvapení.

Detektory vysokoenergetických fotonů pak přispěly k doplnění vzorku záblesků gama a hrály zásadní roli při objevu objektů zvaných *soft gamma repeater* (SGR), tedy objektů emitujících v nepravidelných intervalech záblesky v tvrdých spektrálních oborech. V současnosti se předpokládá, že původcem SGR jsou neutronové hvězdy s velmi silným magnetickým polem – mag-

netary – v jejich vnějších vrstvách dochází k seismickým vibracím, jejichž energie se uvolňuje ve formě vysokoenergetického záblesku.

Kdy bude Ulysses nahrazen?

Zdá se, že Ulysses se neodvratitelně blíží konci svého života. Hlavní vysílač na sondě je zřejmě z důvodu nedostatku energie mimo provoz, omezená komunikace probíhá prostřednictvím pomocného vysílače. Ulysses má za sebou bezmála 9 miliard kilometrů na cestě pustinami sluneční soustavy. Kdo jej bude následovat?

Pokud všechno půjde podle plánu a nedojde ke škrtům v rozpočtu, v roce 2017 by měla ke Slunci odstartovat evropská sonda Solar Orbiter. Měla by být navedena na dráhu s rostoucím sklonem k slunečnímu rovníku s periheliem ve vzdálenosti 0,22 astronomické jednotky (což je pouhých 45 slunečních poloměrů). Družice by měla být vybavena detektory k *in-situ* studiu částic všeho druhu, magnetometrem pro měření magnetického pole a zejména optickým zobrazovacím systémem, schopným pořizovat měření v různých spektrálních čarách a také mapy magnetických polí a dopplerovské složky rychlosti pohybu plazmatu, a to vše s vysokým časovým rozlišením. Podle současných představ se ale Solar Orbiter nevyšplhá až nad sluneční póly, ale nejvýše do 30 stupňů heliografické šířky. I to je však podstatná změna oproti pozorování z roviny ekliptiky. ■

Ulysses prošla nečekaně 3. února 2007 ohonem komety C/2006 P1 McNaught ve vzdálenosti přibližně 260 milionů kilometrů od jejího jádra. Měření z nejrůznějších přístrojů ukázala komplexní chemii v této oblasti. Přístroj SWICS (Solar Wind Ion Composition Spectrometer) detekoval nečekané iontové složení v kometárním ohonu, což mělo dopad i na okolní oblast heliosféry vyplněnou slunečním větrem. Zejména byly detekovány ionty kyslíku O^{3+} , tedy atom kyslíku zbavený hned tří elektronů. Toto pozorování naznačuje, že ionty slunečního větru, které většinou postrádají většinu svých elektronů, si „nashbíraly“ některé volné elektrony při průchodu komou a ohonem komety.

Kromě toho SWICS detekoval i v takto velké vzdálenosti zpomalení slunečního větru působením plazmatu v ohonu komety na dobrou polovinu původní rychlosti.

Vpravo: Měření ze dvou přístrojů na sondě Ulysses ukazující obecný pokles energie (tedy rychlosti) detekovaných částic v době průchodu ohonem komety (horní panel) a také změnu v hmotnostním spektru značící změny v chemickém složení. Na pozadí snímek komety McNaught pořízený v Austrálii.

