

Slnko – nový pohľad z kozmu

A. Kučera, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, akucera @astro.sk*

Abstrakt:

V príspevku uvádzame prehľad posledných desaťročí pozorovania Slnka z vesmíru a vybrané príklady úspechov a nových poznatkov v slnečnej fyzike, získaných vďaka pozorovaniam z vesmírnych družíc. Súčasťou prezentácie je aj príklad príspevku k vesmírnej slnečnej fyzike z Astronomického ústavu Slovenskej akadémie vied. V príspevku sú uvedené aj niektoré budúce vesmírne misie na výskum Slnka z vesmíru na riešenie otvorených otázok.

1. ÚVOD

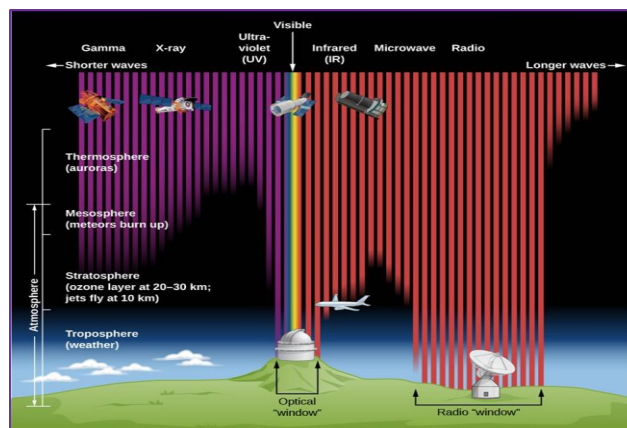
Po vypustení prvých družíc v 50-tych rokoch minulého storočia, sa pre astrofyziku otvorili nové možnosti pozorovania objektov, v predtým nedostupných „oknách“ elektromagnetického spektra (EMS) a aj na registráciu prichádzajúcich častíc „in situ“, t.j priamo na mieste, na detektoroch družíc. Slneční fyzici využili tieto možnosti v desiatkach družíc a sond postavených špeciálne pre výskum Slnka a aj na ďalších, kde bolo pozorovanie Slnka ako vedľajší vedecký cieľ. Najvýznamnejšie príspevky k slnečnej fyzike z týchto výskumov prináša tento príspevok.

2. PRVÉ POZOROVANIE – OBJAV SLNEČNÉHO VETRA

Jeden z najvýznamnejších objavov slnečnej fyziky vôbec, objav slnečného vetra, bol urobený hneď v začiatkoch kozmickej éry, keď sonda Luna 1 (nazvaná Mečta, slovensky Sen), vypustená v januári 1959 zaznamenala zvýšený tok iónov zo Slnka. Zámerom pozorovania pochopiteľne nebol slnečný vietor, ale meranie celkového elektrického náboja prichádzajúcich iónov. Konstantin Iosifovič Gringauz ale zistil pri vyhodnocovaní experimentu, že náboj sa výrazne zvýšil vždy keď detektor smeroval k Slnku. Tak bola potvrdená fenomenálna teoretická predpoveď existencie slnečného vetra americkým vedcom Eugenom Newmannom Parkerom, urobená rok predtým. Myšlienka existencie slnečného vetra mala mnoho odporcov a nebola všeobecne prijímaná až do tohto experimentálneho potvrdenia. Práve v roku 2018 si pripomíname výročie tejto predpovede a NASA na znak uznania práce E. Parkera nazvala jeho menom sondu Proba vypustenú k Slnku v tomto roku. Je to po prvý krát keď NASA nazvala vesmírnu misiu menom žijúceho vedca!

3. PREČO POZOROVANIA SLNKA Z KOZMU?

Existujú štyri významné dôvody, prečo sú pozorovania Slnka z kozmu nenahraditeľné: a) vysoko energetické a vysoko teplotné javy na Slnku vyžarujú fotóny v krátkovlnnej oblasti EMS, ktoré sú blokované zemskou atmosférou, b) kozmické pozorovania nie sú rušené turbulenciou zemskej atmosféry – seingom, c) pozorovanie z kozmu umožňuje dlhodobé neprerušované série pozorovaní, často na báze až mesiacov a rokov, čo je kľúčové pre heliosiezmológiu, relatívne nový vedný obor slnečnej fyziky, d) na sondách a družiciach môžeme registrovať tok častíc a variácie elektromagnetického poľa „in situ“.

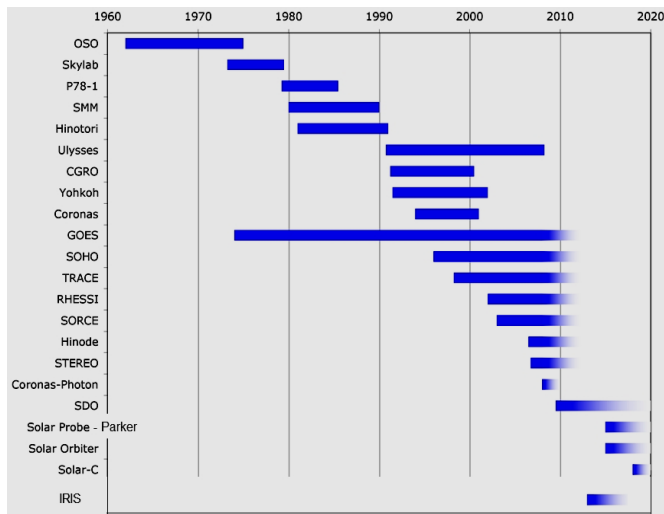


Obr. č. 1. Schematické znázornenie priepustnosti slnečného žiarenia zemskou atmosférou

3. KOZMICKÁ SLNEČNÁ FLOTILA

Do r. 2018 bolo vypustených viac ako 87 družíc a kozmických sond kde sa úplne alebo čiastočne uskutočňoval výskum Slnka. Z nich jednoznačne najvýznamnejšia bola sonda SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), ktorá bola plánovaná ako dvojročná misia a v skutočnosti fungovala a prinášala cenné vedecké výsledky neuveriteľných viac ako 23 rokov. Významné boli aj družice registrujúce vysokoenerge-

tické fotóny (EUV, gama a röntgenové žiarenie), ktoré priniesli nové poznatky vo výskume slnečných erupcií, erupčných protuberancií a výronov koronálnej hmoty.



Obr. č. 2. Prehľad najvýznamnejších sond a družíc pre výskum Slnka a ich trvanie.

4. PREHĽAD VÝSLEDKOV VÝZNAMNÝCH SLNEČNÝCH MISÍÍ

V tejto kapitole sa budeme venovať popisu vybavenia, pozorovaniam a získaným výsledkom, niektorých slnečných sond a družíc, ktoré priniesli významné a nové poznatky o Slnku.

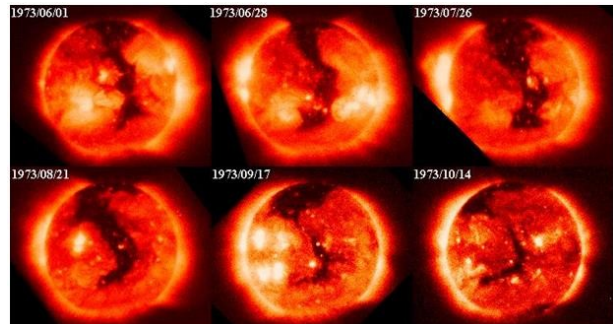
a) Skončené misie

SKYLAB, 1973 - 1979

SKYLAB bola prvá americká vesmírna stanica, ktorá okrem iného mala v programe aj pozorovanie vysokoenergetickej slnečnej aktivity Slnka v krátkovlnnom žiarení. Na SKYLABe bol umiestnený röntgenový teleskop (experiment S-054) s priestorovým rozlíšením 2", ktorý mal šesť široko-pásmových filtrov v rozsahu 2-60 Å. Záznamy sa robili na film a snímky boli z vesmírnej stanice znášane dole do laboratória na spracovanie. Najvýznamnejším výsledkom bol objav slnečných koronálnych dier ako zdroja vysoko rýchlostných zložiek slnečného vetra. (Air Force Handbook, Jursa, 1985). V oblasti EUV bola zaznamenaná jedna z najväčších protuberancií.

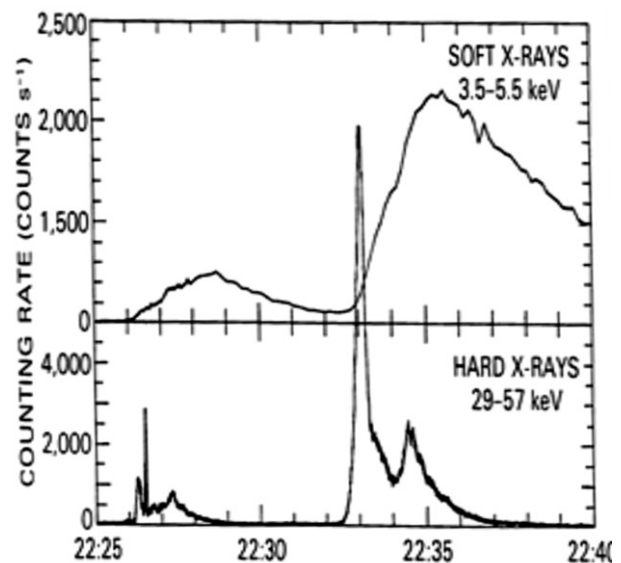
SMM - Solar Maximum Mission, 1980, 1984 - 1989

SMM bola vypustená vo februári 1980 a fungovala iba do 22. Novembra 1980. Našťastie sa ju podarilo opraviť v r. 1984 pri misii Shuttle. SMM zaznamenala viac ako 12 500 erupcií, z toho 7000 v tvrdom röntgenovom žiarení. Na družici bol umiestnený aj koronograf, ktorý zaznamenal viac ako 240 000 snímok a 1200 výronov



Obr. č. 3. Záznam vývoja koronálnej diery z pozorovaní na SKYLABe.

koronálnej hmoty. Medzi hlavné výsledky patrí katalóg vysoko energetických erupcií, nové poznatky o impulzívnych fázach erupcií a objav tzv. "Neupertovho efektu", t.j. faktu že maximum vysokoenergetického žiarenia v slnečnej erupcii, sa časovo zhoduje s fázou nárastu nízkoenergetického žiarenia. Vysvetlenie tohto javu je také, že zrýchlené netermálne elektróny produkujú tvrdé röntgenové žiarenie, uvoľňujú energiu v chromosfére, ktorá sa následne zahrieva a začína produkovať mäkké röntgenové žiarenie.

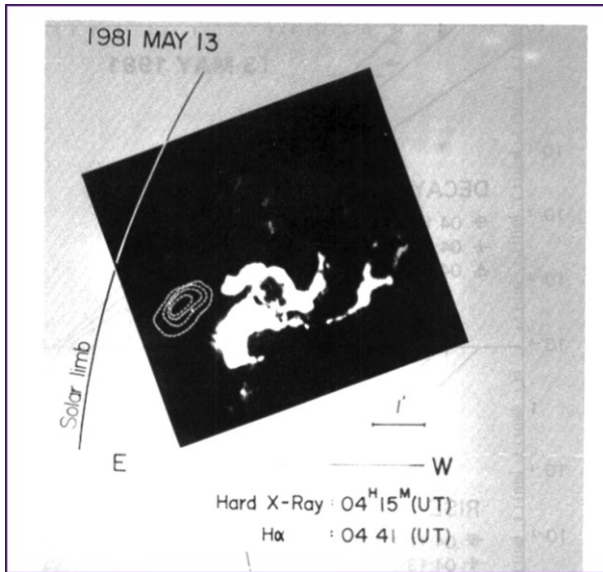


Obr. č. 4. Neupertov efekt, maximum toku tvrdého röntgenového žiarenia sa zhoduje v čase so začiatkom nárastu mäkkého röntgenového žiarenia

HINOTORI, 1981 - 1991

HINOTORI bol japonský satelit vypustený 21 februára 1981. Bol to v podstate rival k SMM, určený tiež na pozorovanie erupcií počas maxima slnečnej činnosti. Jednalo sa o „hi-tech“ satelit, vysoko moderný a inovatívny. Po prvý krát sa tu použili modulačné röntgenové kolimátory na získavanie röntgenových obrázkov slnečných erupcií s použitím techniky Fourierovej transformácie. Röntgenové dáta boli získavané až do energií 25 keV a po prvý krát sa

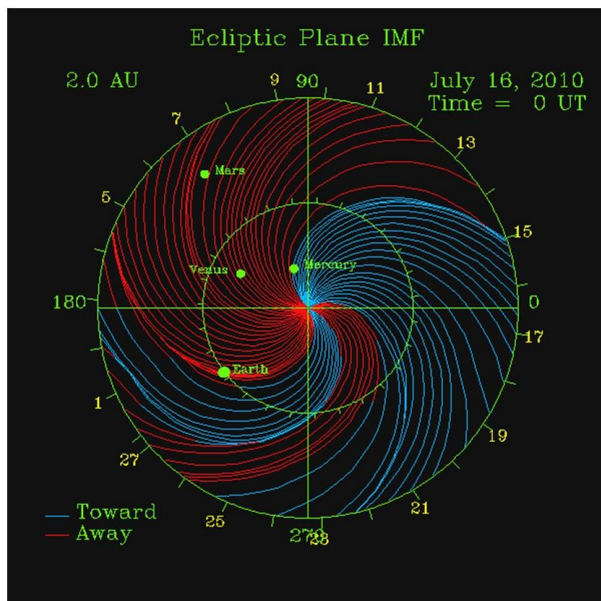
zaznamenali teploty plazmy v erupciách až do 50 miliónov K. Pomocou snímokovania vysokoenergetických erupcií, boli získané dôkazy o zjasnení základne slučiek „foot points“ v tvrdom röntgenovom žiarení počas impulzívnej fázy erupcií.



Obr. č. 5. Zjasnená základňa slučiek v röntgenovom žiarení (kontúry) počas H-alfa erupcie.

ULYSSES, 1990 - 2009

ULYSSES bola spoločná sonda ESA a NASA, ktorá sa ako prvá pohybovala mimo ekliptiky a každých 6,2 roka prelietavala nad slnečnými pólmi, čo prinieslo fundamentálne nový pohľad na charakter slnečného vetra. Sonda zmerala rýchlosti dvoch zložiek slnečného vetra, pomalú s rýchlosťami 400 km/s a rýchlu do 800 km/s

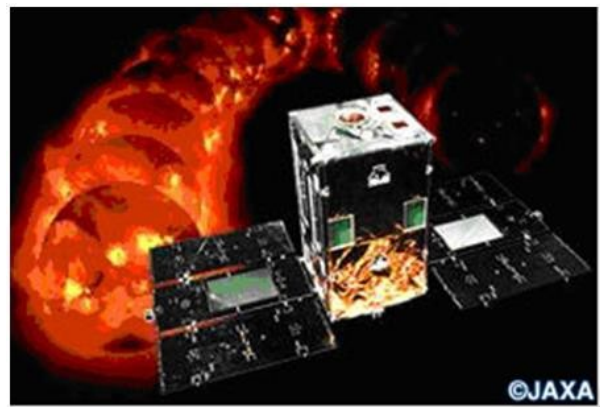


Obr. č. 6. Tvar a smerovanie medziplanetárneho magnetického poľa zmerané sondou ULYSSES.

a priniesla nové poznatky o polarite a tvare medziplanetárneho magnetického poľa.

YOHKOH, 1991 - 2001

YOHKOH bola druhá japonská družica v spolupráci s USA a Veľkou Britániou. Vypustená bola 30. Augusta 1991 a všetky prístroje fungovali bez poruchy až do 14. Decembra 2001. Družica bola vybavená Braggovým kryštálovým spektrometrom a širokopásmovým spektrometrom, ktorými sa získalo za 10 rokov neuveriteľných 6 miliónov SXT snímok (teleskop pre mäkké röntgenové žiarenie) a viac ako 2800 erupcií sa pozorovalo v HXT (teleskop pre tvrdé röntgenové žiarenie). Top výsledkom misie bola detekcia zdroja HXT v koróne ako miesta magnetickej rekonexie a urýchľovania častíc (známa „Masuda flare“). Vzhľadom na desaťročnú prevádzku, priniesla družica aj unikátne homogénne dáta o celom slnečnom cykle s mnohými objavmi.



Obr. č. 7. YOHKOH, nové poznatky o slnečnom cykle.

TRACE, 1998 - 2010

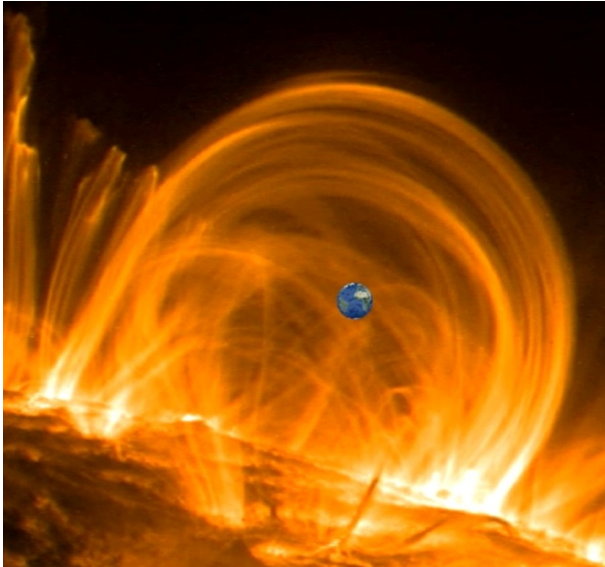
Transition Region And Coronal Explorer (TRACE) bol navrhnutý s takou dráhou aby mohlo byť Slnko pozorované bez prerušenia. Hlavným cieľom bol výskum prepojenia medzi jemnými magnetickými poľami a k nim príslušných plazmových štruktúr v slnečnej atmosfére a dynamika slnečnej koróny. Mapované boli rôzne teploty od 4000 K až do 4 miliónov K, čo predstavovalo skúmanie rôznych vrstiev slnečnej atmosféry simultánne. Priestorové rozlíšenie na Slnku bolo približne 725 km.

b) Prebiehajúce misie

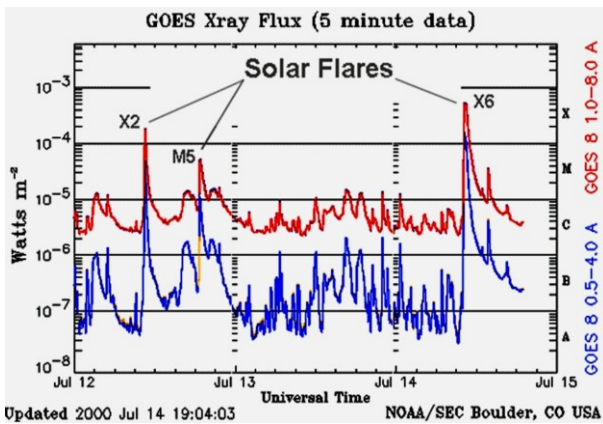
GOES 1975 -

Geosynchronous Operational Environmental Satellite (GOES) je unikátna séria environmentálnych satelitov. GOES oficiálne začal v roku 1975 vypustením prvého satelitu GOES-A, premenovaného na GOES-1, keď dosiahol obežnú dráhu. Séria satelitov pokračuje a v súčasnosti už máme 17 satelit v poradí GOES-R. Pre slnečnú fyziku dodáva GOES grandiózne dáta, röntge-

nové toky z celého Slnka v pásme vlnových dĺžok 0,5 až 4,0 Å a 1,0 až 8 Å. Tieto dáta sa už stali nepostrádateľné pre výskum slnečných erupcií pri zisťovaní ich štartu a časového vývoja. Soft X-ray Imager (SXI) zároveň poskytuje kontinuálne sekvencie röntgenových snímok celého Slnka v 1-minútovej kadencii.



Obr. č. 8. Charakteristický snímok magnetických polí na Slnku z TRACE v UV žiarení s porovnaním veľkosti Zeme.

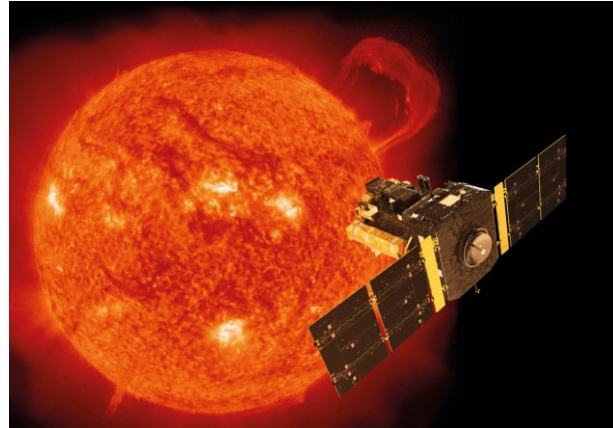


Obr. č. 9. Záznam pozorovania z GOES s vyznačením dvoch X a jednej M erupcie.

SOHO 1995 –

Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) je medzinárodná misia vedená ESA a NASA. SOHO bolo vypustené 2. decembra 1995 a navedené do Lagrangeovho bodu L1 medzi Zem a Slnko. Obieha tak spolu so Zemou okolo Slnka, čo mu umožňuje nepretržité pozorovania. Pôvodne plánovaná ako dvojročná misia pokračuje SOHO v prevádzke po viac ako 21 rokoch, pričom v novembri 2016 bolo schválené predĺženie misie až do decembra 2018! SOHO malo tri základné ciele: a) štúdium vnútornej štruktúry Slnka, b) štúdium

rozsiahlej vonkajšej atmosféry a c) výskum pôvodu slnečného vetra. Misia všetky ciele splnila a priniesla ďaleko viac ako sa plánovalo a očakávalo. Dá sa povedať, že táto misia dramaticky zmenila náš pohľad na našu najbližšiu hviezdu.

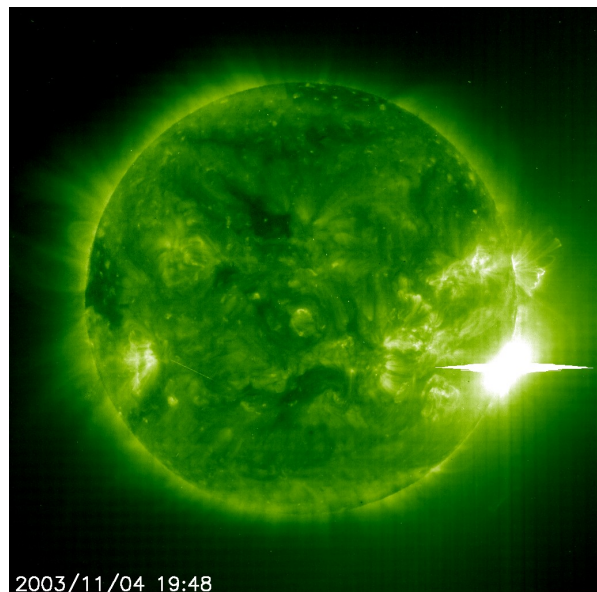


Obr. č. 10. SOHO - univerzálne laboratórium viac ako 20 rokov skúma Slnko.

Na SOHO sa nachádza celkovo 16 prístrojov (experimentov), pokrývajúcich celú výškovú škálu vrstiev slnečnej atmosféry s presahom až do medziplanetárneho priestoru, pozorujúcich vo veľkom rozsahu vlnových dĺžok elektromagnetického žiarenia a má aj špeciálne prístroje na výskum pod povrchových oblastí Slnka.

Prehľad jednotlivých prístrojov SOHO:

Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) – prístroj na poskytovanie snímok celého Slnka v štyroch vybraných vlnových oblastiach v EUV časti spektra, pre účely mapovania plazmy v dolnej koróne a prechodovej oblasti v rozsahu teplôt 80 000 až 2 500 000 K.



Obr. č. 11. EIT snímka veľkej erupcie

Michelson Doppler Imager/Solar Oscillations Investigation (MDI/SOI) zaznamenáva každú minútu vertikálne pohyby slnečného povrchu - oscilácie v milióne rôznych bodov. Merajú sa tým akustické vlny vo vnútri Slnka ktoré modulujú vertikálne pohyby fotosféry. To poskytuje možnosť študovať štruktúru a dynamiku slnečného vnútra. MDI meria aj longitudinálnu zložku slnečného magnetického poľa.



Obr. č. 12. Dopplergram celého slnečného disku. Zjavná je rýchlosť rotácie Slnka približne 2 km/s.

Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS) – detekcia emisných spektrálnych čiar z atómov a iónov v slnečnej koróne a v prechodovej vrstve, pre účely diagnostiky plazmy v teplotnom rozsahu od 10 000 do viac ako 1 milión 1 K.

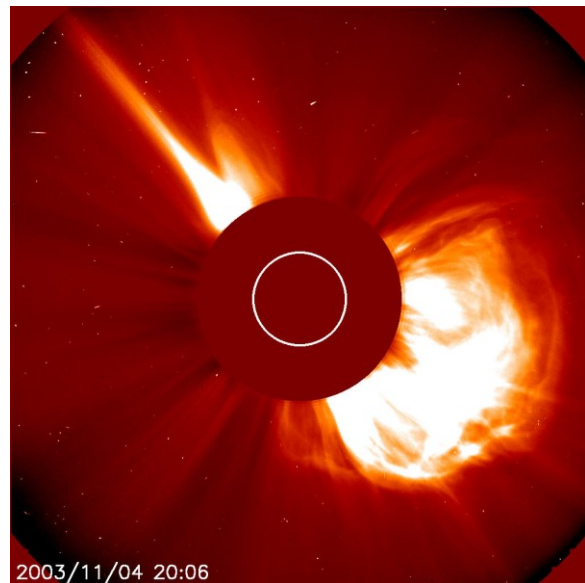
Charge, Element, and Isotope Analysis System (CELIAS) – systém kontinuálne zaznamenáva slnečný vietor, a energetické ióny slnečného, medziplanetárneho a medzihviezdného pôvodu. Analyzuje hustotu a zastúpenie častíc v slnečnom vetre a slúži aj na varovanie pred prichádzajúcimi slnečnými búrkami, ktoré môžu poškodiť satelity na obežnej dráhe okolo Zeme.

Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer (COSTEP) – zaznamenáva a klasifikuje skupiny veľmi energetických častíc slnečného, medziplanetárneho a galaktického pôvodu. Je to komplementárny prístroj k ERNE.

Energetic and Relativistic Nuclei and Electron experiment (ERNE) – zaznamenáva vysokoenergetické častice zo Slnka a našej Galaxie. Je to komplementárny prístroj ku COSTEP.

Global Oscillations at Low Frequencies (GOLF) – prístroj na štúdium vnútorných častí Slnka metódou helioseizmológie. Meria rýchlostné oscilácie na celom slnečnom disku.

Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) – Systém koronagrafov pre pozorovanie vonkajšej koróny až do vzdialenosti 21 miliónov kilometrov. Pôvodne boli tri koronografy, ale C1 prestal fungovať krátko po stabilizácii SOHO v L1. Napriek tomu, zostávajúce dva koronografy C2, C3 pozorujúce „zatmenie Slnka“ 24 hodín a 7 dní v týždni počas všetkých rokov (s výnimkou krátkej straty orientácie celého SOHO) priniesli nové poznatky o výronoch koronálnej hmoty a o slnečnom vetre. LASCO sa stal aj historickým rekordérom v objavovaní komét.



Obr. č. 13. Výron koronálnej hmoty pozorovaný prístrojom LASCO C2. Biely kruh je veľkosť Slnka prekrytého clonou koronografu.

Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation (SUMER) – prístroj na detailnú spektroskopickú diagnostiku plazmy (prúdenia, teploty, hustoty, dynamiky) slnečnej atmosféry. Pokrýva oblasti chromosféry, prechodovej vrstvy a spodnej koróny v rozsahu teplotnej diagnostiky od 10 000 po viac ako 2 000 000 K.

Solar Wind Anisotropies (SWAN) – jediný prístroj na SOHO, ktorý nie je namierený na Slnko. Je určený na meranie vodíka, ktorý „prúdi“ do Slnečnej sústavy z medzihviezdného prostredia. Umožňuje študovať vzájomnú interakciu tohto plynu so slnečným vetrom a určiť tak rozloženie slnečného vetra.

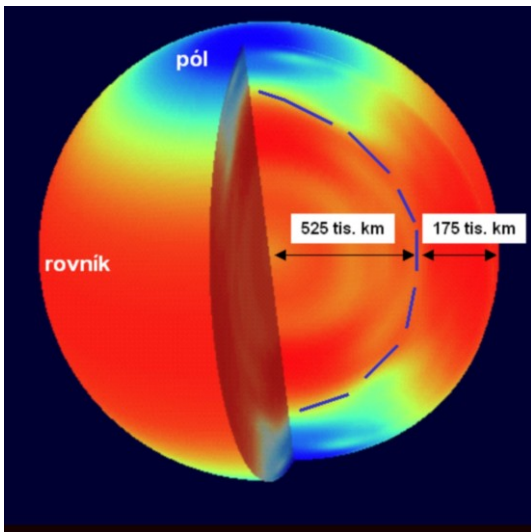
UltraViolet Coronagraph Spectrometer (UVCS) – prístroj na spektroskopické meranie UV žiarenia slnečnej koróny vo vzdialenosti 1.3 až 12 slnečných polomerov. Je to koronograf podobne ako LASCO, ale uskutočňuje spektroskopické pozorovania. UVCS dáva informáciu o mikroskopickom a makroskopickom chovaní vysoko ionizovanej plazmy.

Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations (VIRGO) - prístroj merajúci zmeny v intenzite slnečného žiarenia, meria celkové žiarenie Slnka (slnečnú konštantu). Variácie v žiarení meria v perióde niekoľkých dní, cez dlhšie časové úseky až po celkovú dĺžku trvania misie.

Napriek tomu, že niektoré prístroje ukončili svoju činnosť ešte pred koncom misie predĺženom do r. 2018, všetky priniesli veľké množstvo nových poznatkov. Niektoré z najvýznamnejších výsledkov:

- Základný reprezentatívny atlas spektra UV a EUV žiarenia Slnka. (SUMER)

- Prvý pohľad pod slnečný povrch, zmeranie teplotných profilov, rotácie a plyných prúdov vo vnútri Slnka. Odhalenie rotačného profilu jadra Slnka rotujúceho ako tuhé teleso na rozdiel od diferenciálnej rotácie povrchových vrstiev. (SOI/MDI)



Obr. č. 14. Vnútrotná a vonkajšia rotácia Slnka. Červená farba znamená rýchlejšiu rotáciu, modrá, pomalšiu. Diferenciálna rotácia končí v hĺbke približne 175 000 km.

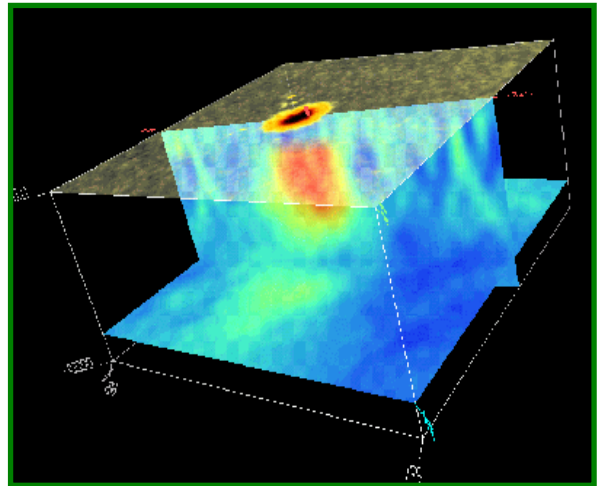
- Meranie zrýchlenia a dynamiky pomalej a rýchlej zložky slnečného vetra a výskum mechanizmov jeho zrýchlenia. (UVCS)

- Objav nových dynamických javov, ako napríklad, koronálnych vln, chromosférických vln, a tornád. (EIT, CDS, SUMMER)



Obr. č. 15 Príklad slnečného tornáda.

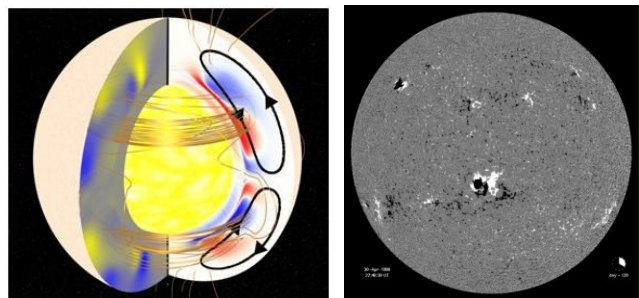
- Preskúmanie podpovrchových vlastností, slnečných škvŕn (SOI/MDI)



Obr. č. 16. Teplotná štruktúra pod slnečnou škvŕnou. Horúcim oblastiam odpovedá červená farba

- Monitorovanie cekového žiarenia Slnka. (VIRGO).

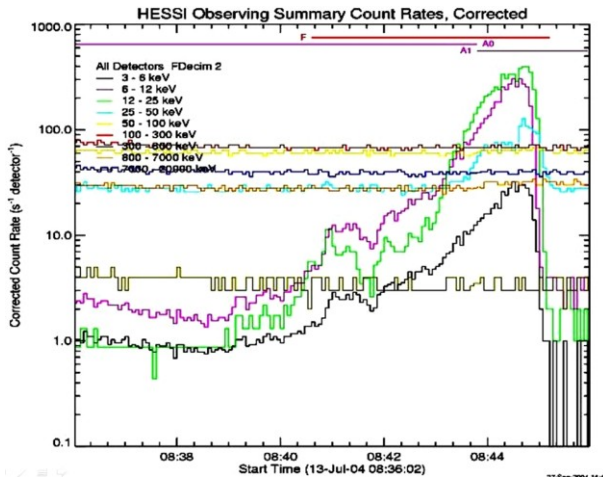
- Fundamentálny prínos pre dlhodobé meranie vývoja magnetického poľa Slnka a pre teóriu slnečného dynamu. (SOI/MDI)



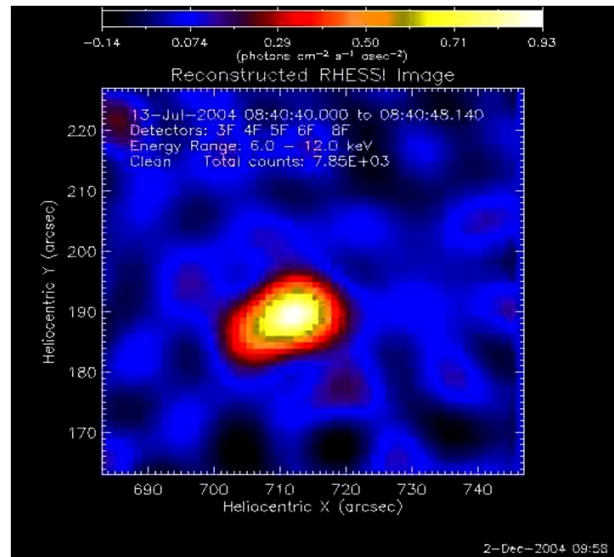
Obr. č. 17. Model slnečného dynamu a MDI magnetogram celého Slnka.

RHESSI 2002 –

Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) patrí do NASA Small Explorer (SMEX) série a bol vypustený 5 februára 2002. Je určený k štúdiu fyziky urýchľovania častíc a explozívneho uvoľňovania energie v slnečných erupciách. Pozoruje v oblasti röntgenového a gama žiarenia. RHESSI používa nový koncept kombinácie obrázkov v HXR a gama žiarení so spektroskopiou s vysokým rozlíšením, takže v každom bode obrazu sa získava detailné energetické spektrum žiarenia. Často sa používa v koordinovaných pozorovaniach sinými satelitmi aj s pozemskými slnečnými ďalekohľadmi pre získanie celkového obrazu o energetických procesoch na Slnku.



Obr. č. 18. Príklad časového priebehu nárastu počtu častíc v slnečnej erupcii v rôznych energetických hladinách pozorovaných s RHESSI

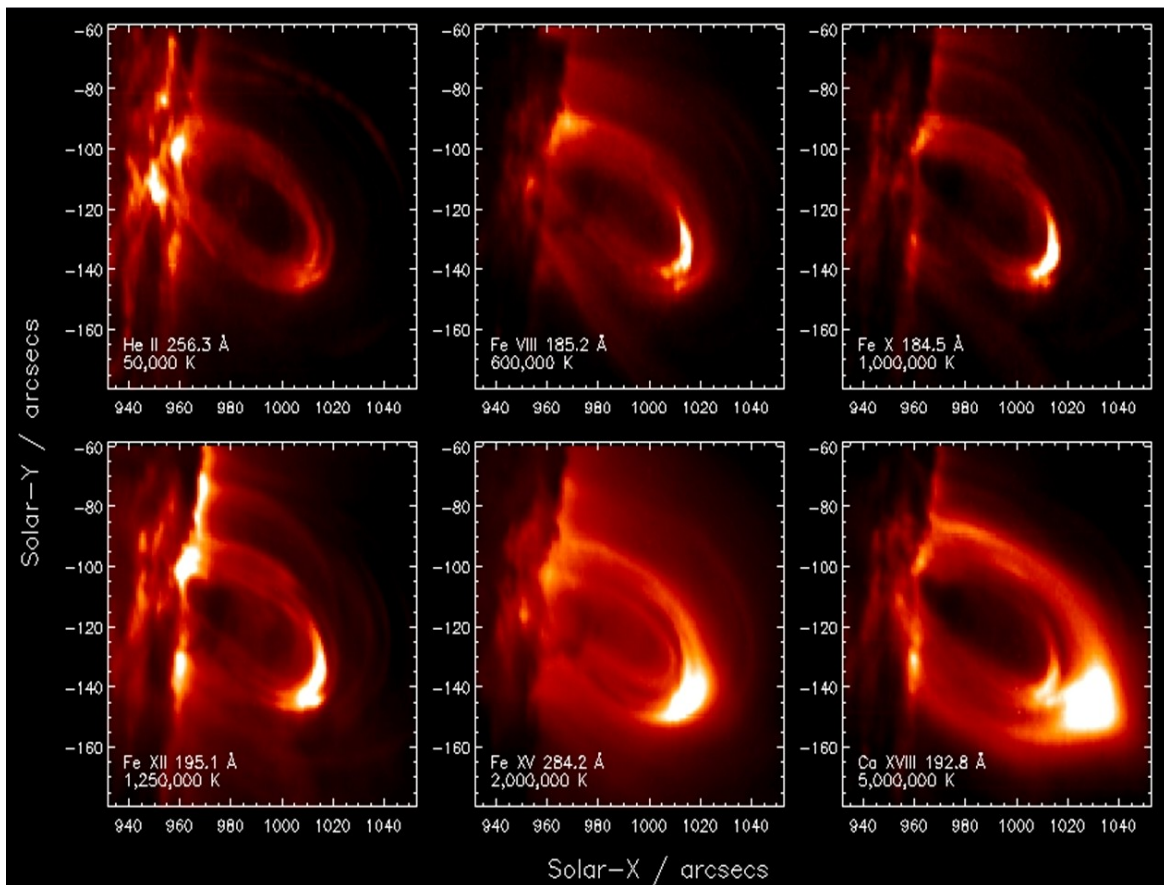


Obr. č. 19. Príklad obrazu jadra erupcie z RHESSI v energetickom rozsahu 6-12 keV.

HINODE Solar-B 2006 –

HINODE je spoločná misia Japonska USA a Veľkej Británie pod vedením „Japanese Aerospace Exploration Agency“ (JAXA). Na družici je kombinácia troch prístrojov EUV Imaging Spectrometer (EIS), Solar Optical Telescope (SOT) a X-ray Telescope (XRT)

Jedná sa o optimálnu kombináciu prístrojov na výskum magnetických polí v slnečnej koróne a výskum mechanizmov vedúcich k slnečným erupciám. SOT dáva detailný obraz o situácii, EUV poskytuje spektrá a XRT dopĺňa pozorovania v röntgenovom žiarení. XRT Mapuje rozsah teplôt od 50 000 do 5 000 000 K.



Obr. č. 20. Koronálne slučky erupcie pozorované s XRT HINODE v rôznych spektrálnych čiarach, odpovedajúcich rôznym teplotám.

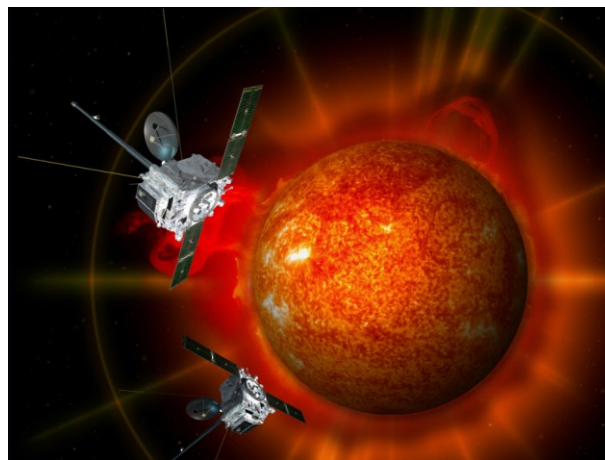
S HINODE boli objavené transverzálne vlny šíriace sa pozdĺž magnetických trubíc v koronálnych slučkách. Hinode prinieslo aj nový pohľad na fyziku a štatistiku slnečných spikúl, ktoré expandujú milióny ton materiálu do slnečnej chromosféry a koróny. Boli zistené odlišné charakteristiky v početnosti a výške spikúl v oblastiach pokojného slnka a v koronálnych dierach.

Ide o úplne prvý stereoskopický výskum trojrozmerných štruktúr slnečnej koróny, zameraný hlavne na výrony koronálnej hmoty a ich evolúcie v medziplanetárnom prostredí a na protuberancie.

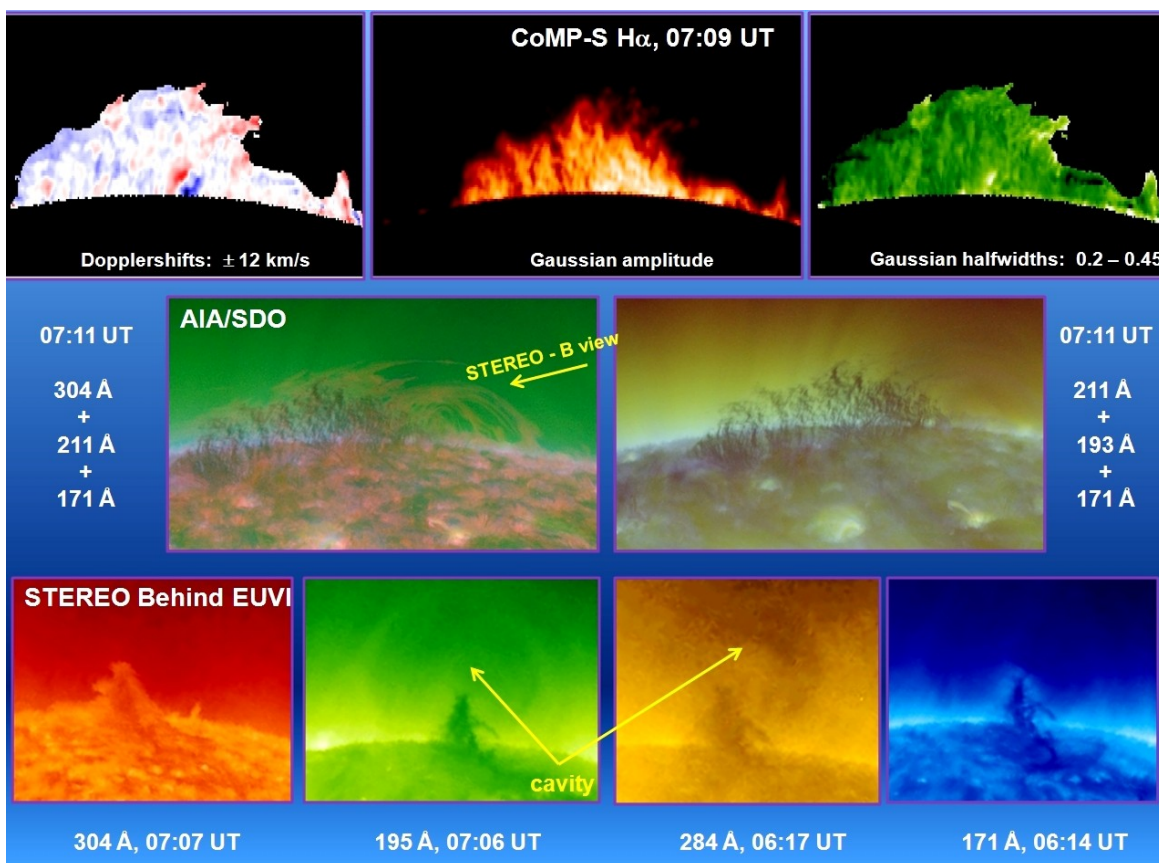
STEREO 2006 –

Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) je treťou misiou NASA v programe „Solar Terrestrial Probes program“ (STP). Vypustené bolo 26 októbra 2006 s plánovanou životnosťou 2 roky. V r. 2018 zatiaľ stále pracujú oba satelity, veríme že ho čaká rovnaká životnosť ako SOHO.

STEREO ako už z názvu vyplýva je misia zložená z dvoch identických observatórií sprevádzajúcich Zem pri jej pohybe okolo Slnka. Jedno sa pohybuje pred Zemou a jedno za ňou. Misia predstavuje jedinečnú kombináciu záznamu obrazov (na Zemi a na oboch satelitoch) a „in situ“ meraní v mieste, kde sa oba satelity práve nachádzajú.



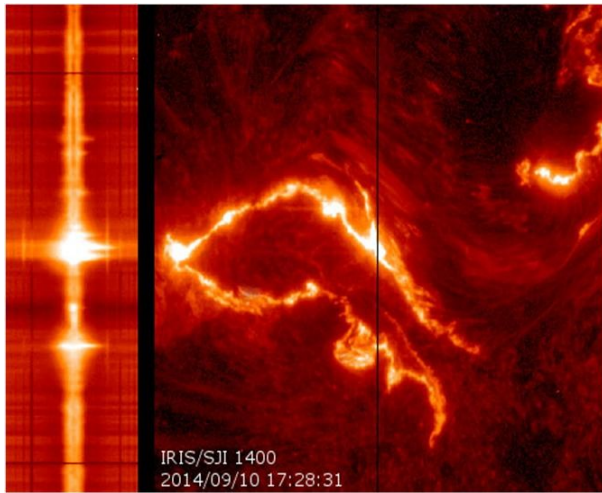
Obr. č. 21. STEREO A a STEREO B pre 3D pozorovanie Slnka.



Obr. č. 22. Príklad simultánneho pozorovania protuberancie zo satelitu STEREO B, zo satelitu SDO (Solar Dynamic Observatory) a z prístroja COMP-S na Observatóriu Lomnický štít. Štruktúry protuberancie a jej morfológia sú úplne iné z pozemskej (COMP-S) a blízkozemzkej (SDO) pozície, než z „bočného uhla“ STEREO B. Kombinácia takýchto pozorovaní umožňuje skúmať dynamiku a fyzikálne vlastnosti daných štruktúr v slnečnej koróne.

IRIS 2013 –

The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) je NASA satelit na pozorovanie Slnka zo série Small Explorer program. Vypustený bol 27. júna 2013. Všeobecne platí, že spektrá sú omnoho dôležitejšie v slnečnej fyzike ako monochromatické obrázky, pretože spektrá umožňujú určovať kvantitatívne charakteristiky skúmaného objektu. IRIS je v tomto smere excelentný prístroj pre výskum slnečnej chromosféry a aktívnych javov v nej. Poskytuje dáta s neprekonateľným priestorovým a časovým rozlíšením. Na IRISe pracuje "high-frame-rate ultraviolet imaging spectrometer", poskytujúci jeden spektrálny obraz každú sekundu s priestorovým rozlíšením $0.3''$ a nanometrovým spektrálnym rozlíšením. Prináša objavy v oblasti výskumu tzv. "Solar heat bombs", vysokorýchlostných plazmových výtryskov, nano-erupcií a mini-tornád, čo sú dôležité medzistupne k pochopeniu ohrevu koróny.



Obr. č. 23. IRIS spektrum slnečnej erupcie v čiare Si IV (1402,77 Å) spolu s polohou štrbiny v obraze nasnímanom s vysokým priestorovým rozlíšením.

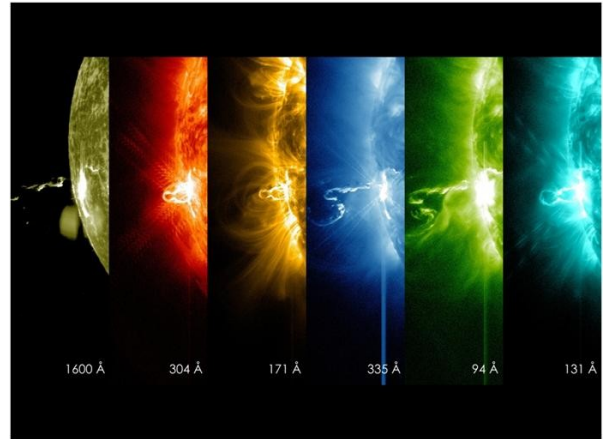
SDO – 2010

Solar Dynamics Observatory (SDO) je prvá misia v programe NASA "Living With a Star (LWS)". Hlavným cieľom misie je štúdium slnečnej atmosféry v malých priestorových škálach s veľkým časovým rozlíšením a v mnohých vlnových dĺžkach spektra naraz.

c) budúce misie

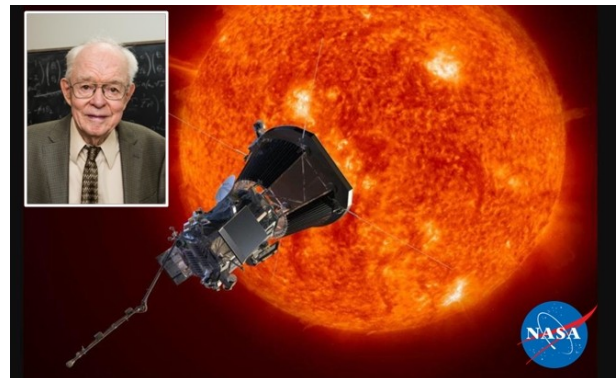
Parker Solar Probe 2018 -

Táto misia je označovaná ako "prvá návšteva najbližšej hviezdy ľudstvom". Jedná sa o NASA robotickú sondu vypustenú 12.8. 2018 a smerujúcu do vonkajšej koróny Slnka. Priblíži sa k Slnku na neveriteľných 8.5 slnečných polomerov (6.2 milióna km) od slnečného povrchu. S finálnou rýchlosťou 700 000 km/h sa sonda dostane k Slnku 19. decembra 2024 po viacnásobných zrýchleniach a modifikáciách dráhy pomocou Venuše. Misia by mala priniesť finálne odpovede na otázky staré 60 rokov: a) Prečo je koróna výrazne horúcejšia ako fo-



Obr. č. 24. Prvé momenty erupcie triedy X4.9 snímané s SDO simultánne v rôznych vlnových dĺžkach, t.j. v rozdielnych miestach koróny. S tohto dôvodu nie sú obrázky identické a ukazujú rôzne detaily. Credit: NASA/SDO

tosféra? b) Aké sú detailné fyzikálne procesy urýchľujúce slnečný vietor? c) Aké sú zdroje vysokoenergetických častíc? Parker Solar Probe bude vystavená veľkým teplotám (1377 C) a žiareniu. Preto bude chránená smerom k Slnku štítom z uhlíkového kompozitu s hrúbkou 11.43 cm.



Obr. č. 25. Parker Solar Probe - prvá misia NASA nazvané menom žijúceho vedca.

Solar Orbiter - plán

2019. Sonda ESA ktorá sa priblíži k Slnku na vzdialenosť 0.28 AU (45 slnečných polomerov) čím dosiahne rekordné priestorové rozlíšenie (skôr ako Parker Solar Probe). Sonda dosiahne vďaka urýchleniam Venušou sklon dráhy k ekliptike až 30° . Prinesie údaje o polárnych častiach Slnka, ktoré nie sú viditeľné zo Zeme. Mala by priniesť odpovede na nasledovné otázky: a) Ako a kde vzniká slnečný vietor a magnetické pole v koróne? b) Ako výrony koronálnej hmoty modulujú variabilitu heliosféry? c) Ako produkujú slnečné erupcie žiarenie



energetických častíc, ktoré vyplňa heliosféru? d) Ako pracuje slnečné dynamo a ako je prepojené s heliosférou?

Aditia-L1 – plán 2020

Prvá indická Misia na štúdium Slnka s plánom umiestnenia do bodu L1 s hlavnými cieľmi: pozorovanie fotosféry vo viditeľnej a infračervenej oblasti spektra, chromosféry v UV žiarení a

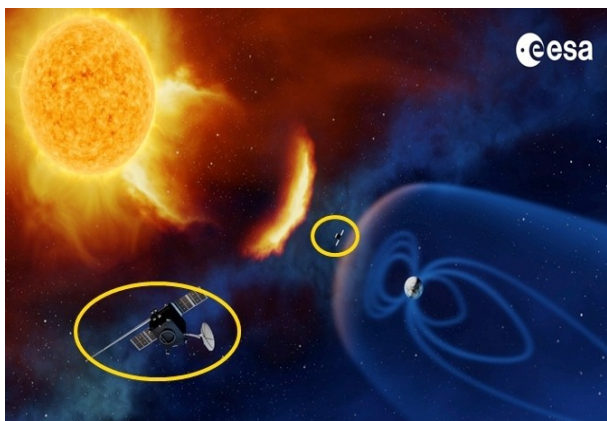


koróny v mäkkom a tvrdom röntgenovom žiarení a skúmanie variability indukcie magnetického poľa v priestore pohybu sondy.

LAGRANGE – plán 2020

LAGRANGE je projekt ESA ktorý plánuje vypustenie dvoch sond, jednu do bodu L1 (medzi Slnko a Zem) a druhú do bodu L5 (na dráhe za Zemou).

Jedná sa o silnú dvojicu sond, schopnú monitorovať a predpovedať nebezpečné slnečné erupcie. Sonda v L1 bude skúmať rýchlosť, hustotu, teplotu a dynamický tlak slnečného vetra a smer a indukciu magnetického poľa v medziplanetárnom priestore. Sonda v L5 bude monitorovať slnečný disk a korónu a merať charakteristiky medziplanetárneho prostredia.



Obr. č. 26. ESA projekt LAGRANGE.

5. ZÁVER

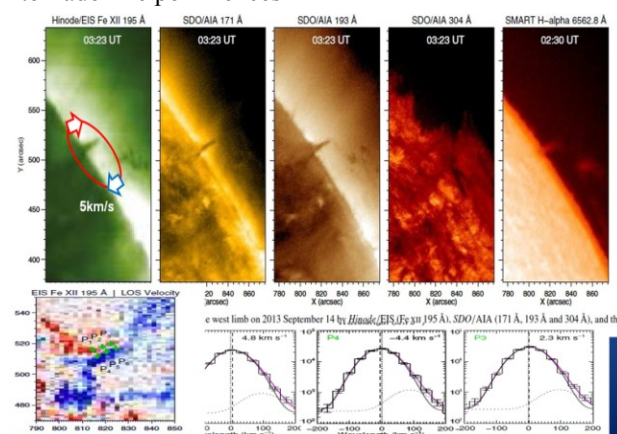
Za takmer 60-ročnú históriu výskumu Slnka z kozmu, boli dosiahnuté originálne a v pozemských podmienkach nedosiahnuteľné výsledky o "našej" hviezde. V súčasnosti najbližšia sonda k Slnku určená na jeho výskum je SDO a najvzdialenejšie sondy, skúmajúce heliosféru sú sondy Voyager nachádzajúce sa na hranici heliosféry. Je to dôkaz o veľkých schopnostiach

ľudstva, dozvedieť sa kľúčové informácie o našom veľmi tesnom aj veľmi vzdialenom okolí Slnka.

6. PRÍKLAD VÝSLEDKOV ASÚ VO VÝSKUME SLNKA Z KOZMU.

a) Prvotná evidencia rotačných pohybov tornádu podobnej protuberancie v EUV žiarení.

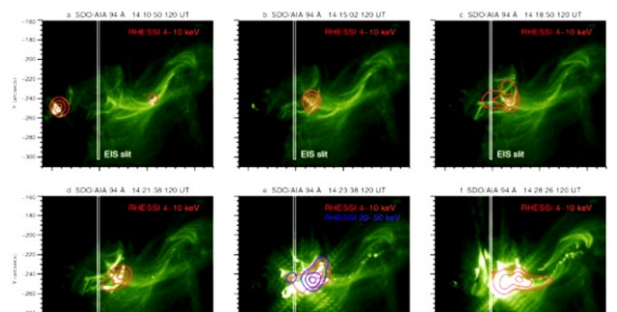
Na základe programu na HINODE/EIS boli pozorované dve koronálne čiary, kde sa podarilo dokázať, že opačné strany protuberancie vykazovali rotačné pohyby 5 km/s ako v chladnej tak aj v milión K horúcej plazme. Tieto zistenia by mohli vysvetliť formovanie a erupciu tzv. "tornado like prominences"



Obr. č. 27. Rotačné charakteristiky (5km/s) v protuberancii. Hore: pozorovanie s SDO v rôznych filtroch, vľavo dole: Dopplerovské rýchlosti okolo protuberancie (červená - smer od nás, modrá - smer k nám), vpravo dole: posun v spektrálnych čiarach dokumentujúci zmenu rýchlosti.

b) Plazmové prúdy a zmeny hustoty pri chromosférickom vyparovaní počas erupcie M1.6.

Pomocou spektroskopických pozorovaní erupcie triedy M1.6 prístrojom HINODE/EIS a satelitom RHESSI boli zistené prekvapivo významné pohyby horúcej plazmy (1 milión K) smerom zo slnečného povrchu s rýchlosťami 80-150 km/s. Erupcia bola sprevádzaná aj výbuchom filamentu s rýchlosťami 205-300 km/s.



Obr. č. 28. Pozorovanie erupcie M1.6 satelitom RHESSI (obrázky) a spektrometrom HINODE/EIS (zvislá štrbina) identifikovalo miesta s veľkými rýchlosťami plazmy.

PodĎakovanie:
Táto práca vznikla s podporou projektu VEGA 2/0004/16