

Napkutató az űrszondák mérés tükrében

Gálik Barbara¹,
Forgács-Dajka Emese^{1,2},
Pádár Noémi¹,
Bebesi Zsófia³

Több mint négy évszázad telt el azóta, hogy Galileo Galilei távcsövét a Napra irányította, és elkészítette az első rajzokat a Napon látható sötét foltokról. Az azóta eltelt idő alatt a napmegfigyelés hatalmasat fejlődött mind a technológia, mind az időbeliség szempontjából, hiszen azóta már digitálisan rögzítjük Napunk képét, rendszeresen és szisztematikusan jegyezzük le megfigyeléseinket. A felhalmozódott rengeteg észlelési adatnak köszönhetően felfedeztük a napaktivitás ciklikusságát, összefüggést találtunk az erős napkitörések és a Földön megfigyelhető sarki fény között, de előremozdította fizikai világképünk fejlődését is, hiszen olyan tudományágak, mint például a plazmafizika is merített a megfigyelések adta bőségből. A következő nagy lépést az űrtechnológia és a hozzájuk kapcsolódó vívmányok jelentették.

¹Eötvös Loránd
Tudományegyetem,
Budapest
²HUN-REN-SZTE
Sztelláris Asztrofizika
Kutatócsoport, Baja
³HUN-REN
Wigner Fizikai
Kutatóközpont,
Budapest

Természetesen több hipotézis is napvilágot látott, amelyek igyekeztek összekapcsolni a bolygóközi teret és a Nap felszínén megfigyelhető jelenségeket, de az elképzelések helyességének igazolására várni kellett az első űrszondák megjelenéséig. Már az 1930-as években elfogadták azt az elképzelést, hogy a Napon megfigyelhető kitörések, vagy flerek nagy sebességgel terjedő ionizált gázfelhő, vagyis plazmát lövellnek ki. Hatásuk akár a Föld környezetéig is terjedhet [1,2]. Ennek helyességét csak azután lehetett bizonyítani, hogy Eugene Parker 1958-ban megjósolta a napszél létezését [3]. A napszél nem más, mint a Nap felszínét elhagyó töltött részecskék plazmaárama, amely magával ragadja a Nap mágneses terét is, így a teljes bolygóközi teret átjárja, sőt még azon túl is kifejti hatását. Az elméletet végül négy évvel később a bolygóközi térbe kijutó űrszondák, a Luna-1 és a Mariner-2 mérésekkel is megerősítették [4–6]. Ezek és az őket követő szondák így több mint hat évtizede vizsgálják a bolygóközi tér tulajdonságait, a Nap-Föld-kapcsolatot. Az évek, évtizedek alatt ezek az ember által alkotott eszközök már más bolygókhoz is eljutottak és méréseik segítségével már más égitestek magnetoszférájának Naphoz kötődő vonatkozásait is tanulmányozhatjuk. Az utóbbi évtizedben pedig megtettük azt a „még nagyobb lépést”, melynek nyomán nemcsak a bolygóközi térbe, hanem a csillagok közé érkeztünk. Űrszondáink, a Voyager-1 és a Voyager-2 átlépték a Nap által uralt tartomány, a helioszféra határát, és valóban kijutottak a csillagközi térbe, ahonnan folyamatosan küldik még most is a felbecsülhetetlen értékű adatokat.

A fentiekből kitűnik, hogy a Napnak és környezetének megfigyelése tudományos szempontból rendkívüli jelentőséggel bír, de ha hétköznapiabb dolgoknál szeretnénk maradni, és megérteni, hogy nemcsak az elméletek szempontjából érdekesek a kapott adatok, akkor egy igen híres példával szeretnénk ezt megmutatni. Ez pedig az 1859-es úgynevezett Carrington-esemény, amely talán az írott történelem eddigi legintenzívebb geomágneses vihara volt [7]. A korabeli írások alapján olyan szemképráztató fényjelenségeket figyeltek meg szerte a világon, amelyek túlmutattak a megszokott sarki fényeken. A feljegyzések alapján az északi fényt (*aurora borealis*) egészen délen Kubáig és a hawaii Honoluluig, míg

a déli fényeket (*aurora australis*) egészen északon a chilei Santiagóig látták. Sok ember számára ez volt az első alkalom, hogy szemtanúja volt az égbolt ilyen felfénylésének. Egyesek azt hitték, elérkezett a világ vége, míg mások, meghallva az ébredező madarak csiripelését, azt hitték, napfelkeltét látnak. De nemcsak ezekről a színpompás fényjátékokról olvashatunk, hanem arról is, hogy a korabeli technológiákban milyen pusztítást végzett a vihar, ugyanis a kezdetleges elektromos hálózatok túltöltődtek, a távíróhálózat elhallgatott, sőt a távírógépekből szikrák záporoztak, több kezelő áramütést kapott, és a kipattanó szikrák tüzet is okoztak. Az eset Richard Christopher Carrington angol csillagászról kapta a nevét, aki kollégájával, Richard Hodgsonnal ezzel egy időben a napkitörést és napfoltok megjelenését dokumentálta [7]. A Carrington-esemény gyakran szolgál figyelmeztetesként arra, hogy mi történhet, ha egy hasonlóan erős napkitörés újra bekövetkezne. Ez óriási pusztítást okozhatna az emberi civilizációban, amely ma már nagymértékben függ az elektromos technikától, a számítógépektől, a digitális kommunikációtól és a műholdaktól. Az ilyen eseményekre való felkészülés egyik fontos iránya az űridőjárás előrejelzése, amihez nélkülözhetetlen ismernünk a jelenségek mögött húzódó fizikai folyamatokat. Ehhez elengedhetetlen a Napon lejátszódó aktivitási jelenségek minél szélesebb spektrumon történő megfigyelése, modelljeink komplex megközelítése. Fontos hangsúlyoznunk, hogy lehetetlen elválasztani az űrküldetések segítségével elért eredményeket a földi megfigyelésektől, illetve az elméleti és a numerikus modellezés során születettektől. De mivel ez a tanulmány az űrszondák, űrobszervatóriumok eredményeit szeretné bemutatni, ezért most ezekre helyezzük majd a hangsúlyt.

Telepítsünk az űrbe!? – Előnyök és hátrányok

Mielőtt rátérnénk a különböző küldetések ismertetésére, röviden nézzük meg, milyen előnyei vannak, ha a megfigyelőeszközeinket a földfelszín helyett az űrbe helyezzük el:

- 1. A megfigyelésre alkalmas hullámhossztartomány kiterjesztése.** A földi légkör gyakorlatilag átlátszatlan az ibolyántúli (UV), az extrém ultraibolya sugárzás (EUV) és a lágy röntgensugárzás számára, emellett az infravörös (IR) tartomány esetében is csak néhány keskeny sávon történik átengedés. Így az elektromágneses spektrum nagy része nem éri el a földfelszínt, és a magas hegyvonulatokra telepített obszervatóriumok, vagy a léggömbök segítségével a földi légkör magasabb tartományába felbocsátott eszközök csak marginálisnak tekinthető kiterjesztést tesznek lehetővé.
- 2. Nagy felbontású és/vagy folyamatos lefedettség.** A Napon lejátszódó különböző jelenségek tanulmányozásához gyakran többórás, -napos vagy -hetes folyamatos megfigyelés szükséges. Bizonyos esetekben a földi telepítésű megfigyelési hálózatok, amelyek a világ több pontjáról végeznek megfigyeléseket, biztosíthatják ezt a folyamatosságot, de abban az esetben ez lehetetlen, ha a megfigyeléseket olyan hullámhosszakon kell végezni, melyek nem hatolnak át a földi légkörön, vagy meteorológiai események – mint például felhőképződés – akadályozzák a Napból érkező sugárzás felszínre jutását.
- 3. Megbízható megfigyelési feltételek.** A földi megfigyelések esetében, még ha nagyon előnyös helyre is – például magas hegyre, száraz környezetbe stb. – van telepítve a távcső, számolnunk

kell, angol szakkifejezéssel élve, az úgynevezett „seeing”-gel. Ez tulajdonképpen a földi légkör turbulens voltából eredő torzításokat takarja, azaz, hogy a távcsőben látott kép mennyire „nyugodt”. Ennek kiküszöbölésére több technikai megoldás is született, amelyek közül talán a legismertebb az adaptív optika, amelyet földi naptávcsövek esetében is alkalmaznak. Viszont ha eljuttatjuk a megfigyelésre használt eszközünket a földi légkörön túlra, akkor a „seeing”-gel, mint tényezővel már nem kell számolnunk, és ez nagyon jó minőségű képalkotást tesz lehetővé.

Az itt felsorolt, igen jelentősnek mondható előnyökkel szemben számos probléma is felmerül, amikor a Nap megfigyelésére szánt berendezéseinket az űrbe szeretnénk telepíteni:

- 1. Korlátozások a tömegre, méretre, teljesítményre és a telemetriai sebességre vonatkozóan:** mivel eszközeink űrbe juttatásakor le kell küzdenünk a földi gravitációt, alaposan mérlegelnünk kell a hasznos tömeg mértékét a rá fordítandó üzemanyag függvényében, melynek költségei a felbocsátandó tömeggel igen gyorsan gyarapodnak. Ha végül sikerrel ki is juttattuk eszközünket az űrbe, akkor ott a működéshez szükséges energiával kell ellátnunk, illetve a kapott mérési adatokat vissza is kell juttatni a Földre, ahol ezután indulhat csak el érdemben a tudományos munka. Ezek megvalósítása mind költséges, és gyakran a költségvetési korlátok erősen határt szabnak a műszernek is.
- 2. Mérnöki és tervezési követelmények:** igen magas szintű, komplex mérnöki szakértelemre van szükség a műszerek megtervezéséhez, amelyeknek túl kell élnie a felbocsátást és az űrbéli környezetnek való kitettséget.
- 3. A műszerek módosítása és/vagy fejlesztése:** általában nehéz vagy inkább lehetetlen elérni a felbocsátás után egy szondát és a rajta elhelyezett műszereket, így a további fejlesztések vagy akár a meghibásodások javítása leggyőzhetetlen korlátokba ütközik.

Láthatjuk, hogy a Nap megfigyelése űreszközök segítségével igen nehéz, kockázatos és költséges. Ez azt jelenti tehát, hogy műszert csak akkor helyezünk az űrbe, ha a kitűzött tudományos célt nem lehet megvalósítani földfelszíni műszerek segítségével. Ezzel kapcsolatosan a második világháborút követő időben, amikor az űrverseny is kiéleződött, valamint nagy áttörések voltak az elméleti napfizikai kutatások terén, az amerikai űrügynökség, a NASA egy műhelybizottsága az 1960-as években a következő megállapítást tette: „Egyértelmű, hogy a Napon megfigyelhető jelenségek 1/10 ívmásodperc szögfelbontású fényképezésére vagy más módon történő rögzítésére már most szükség van, és nagy előrelépést jelentene a napfizikai kutatásokban. Ezt a kívánalmat sem a földi telepítésű, sem a jelenleg tervezett napfizikai űrszondákkal nem lehet megvalósítani. Nincs oka annak, hogy miért ne lehetne az OAO (*Orbiting Astronomical Observatory*) számára fejlesztett irányítási és stabilizáló technikákat egy napobszervatórium számára is adaptálni. Egy ilyen űreszköz kifejlesztése a Nappal foglalkozó csillagászok számára a következő fontos feladat, amelyet a NASA aktívan támogat.”

Fontos hangsúlyozni, hogy a második világháborút követő időkben, az 1960-as évek elejére már több mint száz szuborbitális rakétarepülés volt, amelyek a Nap UV, extrém UV (EUV), röntgen- és gamma-spektrumát készítették el, de ezeknek a repüléseknek nem a Nap volt az egyetlen célpontja. A korai rakéták közül sokat a Föld felső légkörében és magnetoszférájában lévő elektromágneses me-

zők és az ott jelen lévő részecskék mérésére szántak, de például a Pioneer és Mariner szondák átrepültek a bolygóközi téren is, méréseket készítve a helioszférában, miközben a Hold és más bolygók felé tartottak. Nagyszerű spektrumok készültek a Napról a 300 Å feletti hullámhosszokon és a 2–60 Å közötti röntgentartományban. A visszatérő egységek fedélzetén a Nap Lyman- α és Lyman- β spektrroheliogramjai filmekben megörökítve kerültek a tudósok kezébe. Ezen űrfigyeléseket kombinálva a földi obszervatóriumokban készített Ca II K (az egyszerűen ionizált kalcium egy jellegzetes vonala) spektroheliogramokkal sikerült egy újabb aspektusát feltárni a Nap csendes és aktív régiói közötti különbségeknek. Az UV, EUV és röntgenspektrumok az atomfizikusok számára is aranybányák voltak, és olyan újabb laboratóriumi technológiák kidolgozását tették szükségessé, amelyek alkalmasak a Napon felfedezett magasan ionizált állapotok közötti átmenetek vizsgálatára.

A James A. Van Allen csoportja által fejlesztett, a kozmikus sugárzást mérő eszközök, az Explorer űrszondák a Föld magaslégréjében felfedezték a sugárzási öveket, amelyek új érdeklődést váltottak ki a Földhöz közeli jelenségek fizikája és a Nappal való esetleges kapcsolata iránt [8]. Érdekességként említjük, hogy Van Allen erősen szorgalmazta a világháború során fejlesztett német V2-es rakéták tudományos céllal történő felhasználását is [9]. Az itt felvillantott eredmények esetében a rakéták és műholdak megfigyelési fókuszában olyan hullámhossztartományok álltak, amelyeket csak a földi légkörön kívül lehetett tanulmányozni. Ellenben a fenti, 1960-as években tett megállapítás vetette el annak a magját, hogy a világűrben végzett megfigyelések ne korlátozódjanak csak az ilyen jellegű megfigyelésekre, hanem a teljes spektrumra terjedjenek ki. Sajnos több mint 40 évet kellett várni arra, hogy egy nem túl nagy, közel félméteres apertúrával rendelkező optikai naptávcső megfigyeléseket végezzen az űrben. Ez volt a Solar Optical Telescope (SOT), amely a Hinode műholdon kapott helyet, indítására pedig Ucsinourából (Uchinoura) került sor, a JAXA/ISAS japán űrügynökség háromfokozatú, szilárd hajtóanyagú M-5 rakétájával, 2006. szeptember 22-én. Mindezek ellenére űreszközaink segítségével a Napról szerzett ismereteink folyamatosan bővültek, sőt váratlan felfedezések is születtek. A következőkben röviden, időrendben, küldetésről küldetésre haladva mutatjuk be a Napra irányuló űrbeli kutatási programokat. Mivel azonban ezen küldetések száma már több mint száz felett jár – és ezekbe nem számoljuk bele azokat, amelyek fő feladatuk mellett mintegy járulékosan végeztek napmegfigyeléseket –, kiragadunk pár, fontosabb küldetést. Mielőtt rátérnénk a különböző napmegfigyelő műszerek részletezésére, néhány megkerülhetetlen, úttörő űreszközzel is ejtenénk pár szót.

A műholdas napmegfigyelések első két évtizede – az 1960-as és 70-es évek

Mint azt már említettük, az 1960-as évekre már számos olyan küldetés volt, melynek eredményeképpen a Napról addig soha nem látott felvételek születtek. De az első, célzottan a Nap megfigyelésére felbocsátott eszköz az Orbiting Solar Observatory-1 (OSO-1) [10], amelyet a későbbiekben még hét követett. Az 1962. március 7-én elindított műholdat egy nagyjából kör alakú pályára állították, kb. 575 km magasságban, ahol 1038 alkalommal kerülte meg Földünket, miközben folyamatosan gyűjtötte és továbbította az adatokat. Sajnos a fedélzeti adatrögzítők meghibásodását követően csak az állomások fölötti áthaladások során érkeztek valós időben a Földre adatok. Az OSO-1 küldetés elsődleges céljai a

következők voltak: (1) a Nap elektromágneses sugárzásának vizsgálata a spektrum ultraibolya és röntgentartományában, illetve (2) a fedélzeten elhelyezett napmegfigyelő műszer iránytartásának meghatározása, azaz mennyire pontosan lehet – például a képalkotás során – a távcsövet a kijelölt pozícióban tartani. A másodlagos tervek a továbbiak voltak: (1) a napsugárzás mérése keskeny sávú szűrőkkel, hogy a spektrum meghatározott régióit tanulmányozhassák; (2) gamma-sugárzás mérése a 0,1 és 500 MeV közötti energiatartományban; (3) neutronmérések a Földről és a Naptól származó neutronáram meghatározására; (4) a Naptól származó UV, röntgen- és gamma-sugárzás időbeli változásainak tanulmányozása; (5) az űreszköz hőmérsékletének szabályozására szolgáló, a felszínt borító anyagok vizsgálata, valamint (6) a becsapódó bolygóközi porszemcsék impulzusának és kinetikus energiájának mérése. Említettük, hogy az OSO-1-et még hét műhold követte. Az Orbiting Solar Observatory tehát egy amerikai űrteleszkópprogram volt, amelynek elsődleges célja a Nap tanulmányozása volt, de a rajta elhelyezett műszereknek köszönhetően nemcsak a napfizikus társadalom örülhetett, segítségével felvirágzott ugyanis a röntgen- és gamma-tartományú csillagászat is [11,12]. Az OSO segítségével készült felvételek megmutatták az aktív régiók és a szupergranulák határainak lenyomatát a 300 és 2000 Å közötti spektrumvonalak sorozatában, ami lehetőséget adott a különböző hőmérsékleti tartományok vizsgálatára is. Mivel a képeket digitálisan rögzítették, így azok a későbbiekben is összehasonlíthatók voltak. Addig ismeretlen részleteit tárták fel a napléggkör rétegeinek, a fotoszférától kezdve a kromoszféra felsőbb részéig. Az OSO sorozat összes szondája tartalmazott egy „kerékhez” hasonló alkatrészt, amely akár 15 fordulat/perc sebességgel is foroghatott, biztosítva az iránystabilitást, és



1. ábra: Az OSO-3 űrszonda szerelés alatt. (Forrás: Ball Aerospace)

egy stabilizált, pörgésmentes platformot, amely a Napra irányított képkészítő műszereket hordozta. Ez az elrendezés a ma használatos háromtengelyes stabilizációs technikák korszaka előtt lehetővé tette a kiváló, ívperc körüli pontosságot és stabilitást, ami igen részletes, jó felbontású képeket eredményezett. Ilyenekre korábban nem volt példa. Az OSO-2 vitte az első koronográfit a világűrbe [13], míg az OSO-3 (1. ábra) által gyűjtött adatok segítségével állapították meg a napkitörések, az azokat kísérő röntgen- és III. típusú rádiókitörések, valamint a földi ionoszférában hirtelen bekövetkező változások közötti kapcsolatot. Emellett, mint említettük, nemcsak a napmegfigyelések terén hozott újdonságot, de az OSO-3 észlelt először röntgenkitörést a Scorpius X-1 forrás felől [14].

A korai OSO küldetések egyike sem volt képes tanulmányozni a 100 és 300 Å közé eső színek tartományt, mivel a műholdakhoz használt anyagok fényvisszaverő tulajdonságai erősen korlátozták az ebben a tartományban történő észleléseket, holott ez a tartomány kritikus fontossággal bír a kromoszféra és korona közötti kapcsolat megértéséhez. Ez a NASA első emberes űrállomásprogramjával, a Skylabbal gyorsan megváltozott [15]. Az 1973. május 14-én indított Skylab három fő részből épült fel: (1) a legnagyobb egység az *Orbital Workshop* (OWS) volt, az élet színtere, ahol a legénység aludhatott, dolgozhatott és a különböző kísérletek is itt folytak; (2) ehhez illesztették az *Airlock Module*-t (AM), amely magába foglalta az életfenntartó, távközlési és egyéb fontos rendszereket, illetve a tervezett űrséták kiinduló helyeül szolgált; (3) végül a dokkoló egység egy állványzatára szerelték az űrállomás egyik legfontosabb műszerét, a Napot megfigyelő űrobszervatóriumot, az *Apollo Telescope Mount*ot (ATM).

Sajnos indításkor levált az űrállomás külső borításának egy darabja, így elveszett a hőpajzs, emellett a levált rész magával ragadott egy napelemtáblát is, így a sérülten pályára állt űrállomás válságos állapotba került. Mindössze hét nap alatt sikerült a NASA mérnökeinek kidolgozni egy eljárást, amelynek segítségével a Skylab megmenekülhetett. Ennek keretében az első legénységnek egy aranyozott napvédő fóliát kellett kifeszítenie a sérült rész fölé (2. ábra), illetve a meghibásodott maradék napelemtáblákat rendbe kellett hozniuk, hogy a megfelelő energiaellátást is biztosítani lehessen. Végül sikeresnek bizonyult a javítás, és a Skylab még hat éven át adott otthont sikeres emberes küldetéseknek, kísérleteknek és a Nap folyamatos, nagy felbontású megfigyelésének.

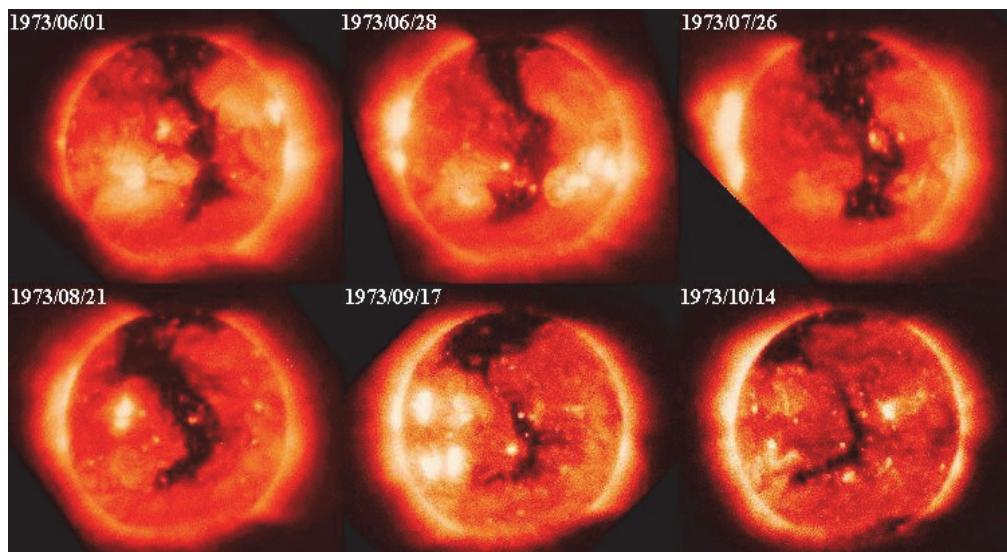
Az ATM iránystabilitása 2 ívmásodperc volt, szemben az OSO műholdak néhány ívpercnyi pontosságával. Az ATM nyolc, egymással összehangolt műszert szállított, melyek tudományos adatait nagyrészt filmre rögzítették. A filmre történő rögzítés olyan nagy térbeli, spektrális és időbeli felbontású megfigyeléseket tett lehetővé, amelyek a korábbi küldetéseken a telemetria korlátai miatt nem voltak lehetségesek. Film nélkül nem lehetett volna olyan nagy felbontású adatokat szerezni, mint amilyeneket az ATM műszerei produkáltak. Az ATM-nek volt egy pán céltérme, amelyben a filmeket helyezték el, és ebben a teremben lévő kazettákat cserélték a Skylab űrhajósai a küldetések során, illetve hozták vissza a Földre. Néhány műszer olyan nagy felbontású videót is rögzített, amelyet a legénység vezérlőpultján jelenítettek meg. A műszerek által készített videók és képek, valamint a napkitörésekre figyelmeztető jelzések lehetővé tették a legénység számára, hogy az ATM-et a kiválasztott területre irányítsák és ott a különböző hullámhossztartományokban mérési sorozatot készítsenek. Ez a „képesség”, hogy valós időben reagálhassanak a napkitörésekre, jelentősen megnövelte a küldetés tudományos teljesítményét. A



2. ábra: A Skylab űrállomás. Jól látszik a javítás utáni sérült rész fölé feszített aranyozott fólia, amely a hőpajzs szerepét töltötte be. (Forrás: NASA)

Skylab koronográfja segítségével a koronaanyag-kidobódásokról, azaz a CME-kről (*coronal mass ejection*) készült felvételek lehetőséget adtak a kilökődő plazma sebességének meghatározására, illetve kapcsolatot lehetett felállítani a rádiókitörések és a CME-k sebessége között. A CME-k időbeli követése lehetőséget adott arra, hogy a bolygóközi térben azonosítsák a lökeshullámokat. A sebességadatok azt is megmutatták, hogy egyes CME-k a Naptól távolodva felgyorsulnak, ami azt sugallta, hogy más mozgatóerők is jelen vannak, nemcsak a felszínen megfigyelhető napkitörések. A sorozatfelvételek felvették azt a kérdést is, hogy a flarek okozzák-e a CME-ket, vagy mindkét jelenség egy közös esemény szülötte. A teljes napkorongról a 150–600 Å közötti színtartományban egyidőben készült felvételek lehetővé tették a kutatók számára, hogy lássák, hogyan változik a Nap légköre rétegről rétegre, a felső

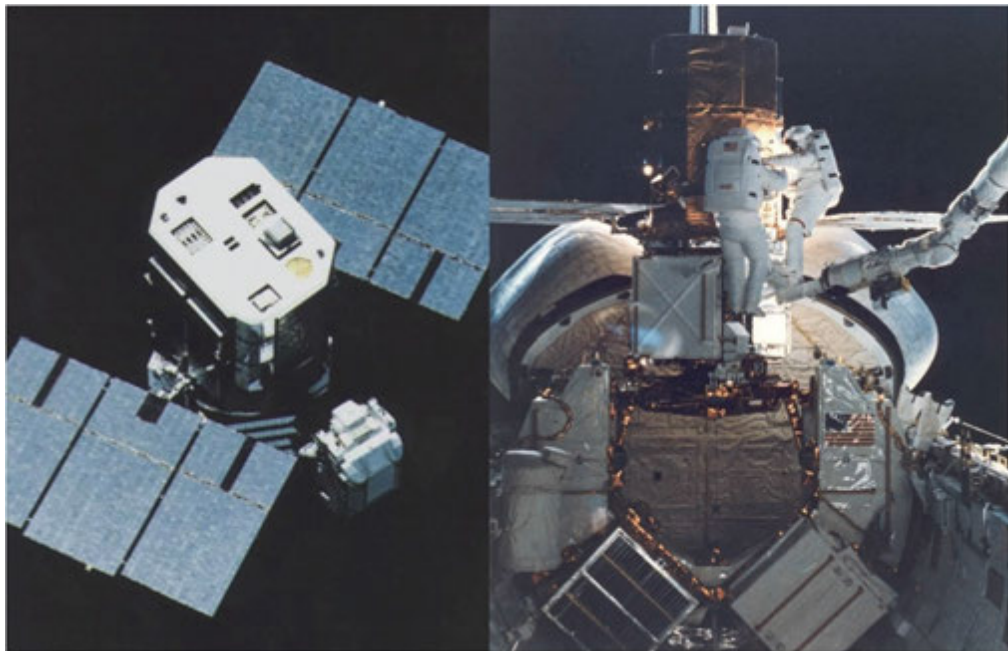
fotoszférától egészen a koronáig. Nagyon sok részletre fény derült, de mégis nyitott kérdés maradt a kromoszférát és koronát fűtő fizikai folyamat. Akkoriban az egyik legérdekesebb megfigyelés a kromoszféra és korona közötti átmeneti régióba vagy egészen a koronába felnyúló hurkok felfedezése volt. A hurkok időnként különböző aktív területeket kapcsoltak össze, sőt előfordult olyan is, amikor az egyenlítő két ellentétes oldalán lévő aktív régiókat kötötték össze.



3. ábra: A Skylab műszerével készített felvétel a napkoronáról. A sötét területek az úgynevezett koronalyukak. (Forrás: NASA)

A röntgenfelvételek segítségével a Nap felső légkörében új struktúrákat fedeztek fel, a koronalyukakat és a röntgenfényes pontokat (3. ábra). A koronalyukakban, amelyek a felvételeken sötét területeknek látszanak, a korona anyaga ritkább és hűvösebb, mint a környező koronában. A röntgenfényes pontok ezzel szemben kicsi, kompakt, rövid ideig tartó felfénylések, amelyeket legkönnyebben a koronalyukakban azonosíthatunk. A visszahozott filmfelvételek alapján egy másik érdekes megfigyelés volt, hogy a koronalyukak meglehetősen mereven forognak és a napfelszín forgási sebességének változása ellenére akár több, átlagosan 27 napig tartó körforguláson keresztül is megőrzik alakjukat. Nem tudunk minden felfedezést részletezni, de biztosan állíthatjuk, hogy a Skylab vízválasztó volt a napmegfigyelések terén. Megmutatta egy olyan műszeregyüttes koncepcióját, amelyet úgy terveztek meg, hogy rendszerként működjön együtt, előre megtervezett tudományos programokat hajtson végre. Bár nem minden működött tökéletesen – mégha az előző mondatok ezt is sugallták –, mégis alapot adott a jövőbeni napfizikai űrobszervatóriumok számára. A másik nagyon fontos lépés inkább tudománypolitikai volt. Mivel a nyolc műszer több különböző intézmény égisze alatt született, ezért a maximális tudományos eredmény elérése érdekében a különböző műszerek adatait meg kellett osztani. Ugyan ez az adatmegosztás még belső volt, azaz csak a résztvevő intézetek között történt meg, mégis ez volt az első lépés a nyílt adatpolitika felé [15].

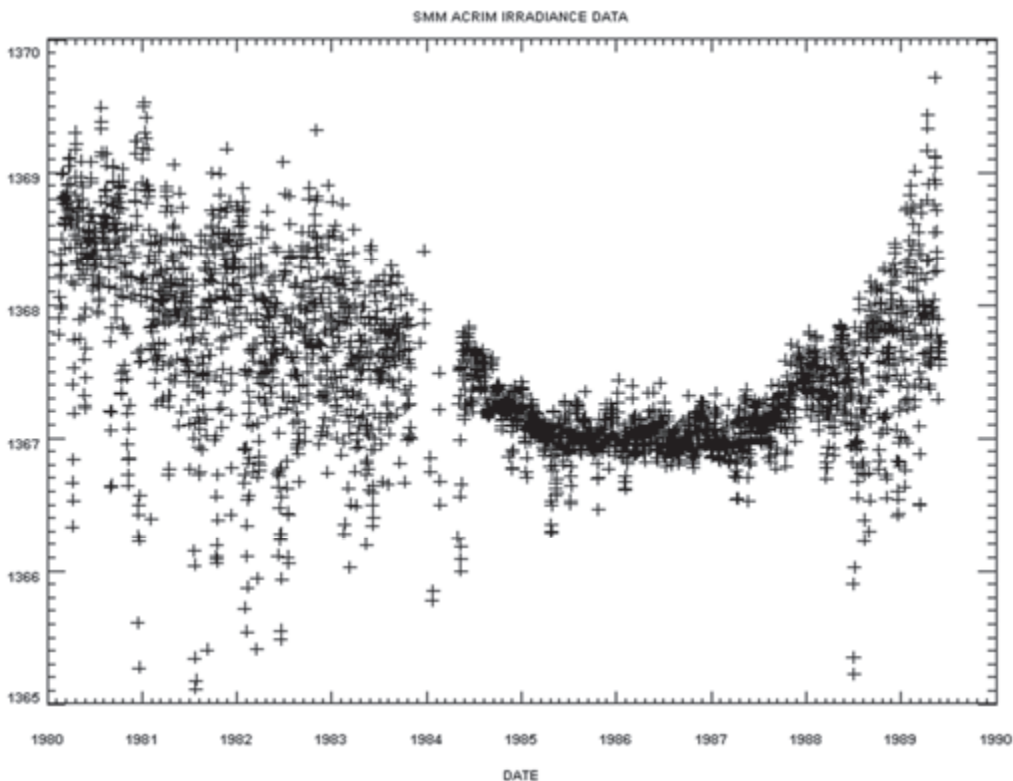
A nagyfelbontású képalkotás korszaka – az 1980-as évektől napjainkig



4. ábra: Az SMM műhold (bal oldali kép) és javítása 1984 áprilisában (jobb oldali kép). Ez történelmi esemény volt, ugyanis ez volt az első alkalom az űrrepülés történetében, hogy egy műholdat a pályáján javítottak meg. (Forrás: NASA)

Még az igazán nagy felbontású képalkotást végző műszereket megelőzte az 1980. február 14-én útnak indított Solar Maximum Mission (SMM) űreszköz (4. ábra), melynek elsődleges célja a napkitörések tanulmányozása volt [16]. A korábbi OSO műholdakkal ellentétben az SMM háromtengelyes stabilizálást használt, így az összes műszer ívmásodperces pontossággal és stabilitással figyelte a Napot, ezért már előszobának tekinthetjük az igazán részletgazdag képeket készítő műszerekhez. Mint ahogy a küldetés neve is tükrözi, a napaktivitási maximum idején volt hivatott méréseket végezni, ugyanis ebben az időszakban megnő a napkitörések gyakorisága, vizsgálatának legfőbb célpontja. Úgy gondolták, a korábbi küldetések során felmerült kérdést, amely a napkitörések és a koronaanyag-kidobódások kapcsolatára irányult, talán sikeresen megválaszolhatja. Ebből a célból az SMM képalkotást és spektroszkópiát végzett UV, EUV és röntgenhullámhosszakon, illetve a Skylabhez hasonlóan egy koronográfot is vitt magával. A napkitörések során a szupratermális energiára gyorsult elektronokat, illetve az általuk előidézett fékezési sugárzásból származó röntgensugárzást is észlelték. Az SMM-en volt az első olyan detektor, amely a röntgensugárakat 30 keV energiáig képes volt detektálni, ami jóval meghaladja az addig ismert legforróbb plazmák által termelt energiákat. A protonokat és a nehezebb ionokat, amelyek szintén nagy energiákra tettek szert a napkitörések során, a nukleáris gamma-su-

gáráz révén észlelték, amely a naplégkör alkotóelemeivel való kölcsönhatás során keletkezik. A napkitörésekkel és a CME-kkel kapcsolatos vitákat ugyan nem oldotta meg, de kibővítette a rendelkezésre álló adatok halmazát, ami részletesebb és pontosabb kérdésfelvetést tett szükségessé a tudományos közösségen belül. A napkitörésekhez kapcsolódó elképzelések kezdtek átalakulni, egyre jobban egybeolvastva, mintegy közös gyökeret keresve a „hagyományos fler”, a CME és a részecskeáram mögött húzódó folyamatoknak.



5. ábra: A napsugárzás időbeli változása az SMM ACRIM műszerével mérve. (Forrás: NASA)

Az SMM műszerei között találjuk az *Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor* (ACRIM) sugárzásmérőt is, amely nagy pontossággal rögzítette a Nap teljes energiakibocsátását (5. ábra). Ezt gyakran napállandónak is nevezik. Ezek a megfigyelések megmutatták, hogy amikor a napfoltok a látómezőbe fordulnak, akkor a Nap sugárzása gyengül, és fontos információkat szolgáltatnak a tompítás mértékéről. Viszont a mérések egy elsőre sokkal meglepőbb eredményt is mutattak, mégpedig azt, hogy a Nap valójában fényesebb a napfoltciklus maximumában, amikor több napfolt figyelhető meg a Nap felszínén. Ezen ellentmondás feloldása abban keresendő, hogy bár a napfoltok sötéteek és csökkentik a sugárzást, de körülöttük fényes fáklyamezők találhatóak, amelyek átlagosan bőven ellensúlyozzák a napfoltok miatti teljesítménygyengülést.

Ezen eredmények mellett a Nap intenzitásában észlelte a Nap 5 perces oszcillációját, így ezen globális oszcillációk jelenlétének kimutatása a Nap fényességében előrevetítette a Kepler-küldetés eredményeit. Mint említettük, az SMM-et 1980 februárjának elején indították, a naptevékenységi ciklus felszálló ágában. Sikeresen működött is 1980 novemberéig, amikor a stabilizáló rendszer meghibásodott, és nem tudta már a műszereket a Nap felé irányítani. A nem képalkotó műszerek tovább működtek, miközben az űreszköz lassan megpördült. 1984 áprilisában a Challenger űrrepülőgép küldetése keretében sikeresen megjavították (4. ábra), így az SMM további öt évig folytatta a munkáját, míg 1989 decemberében be nem lépett a Föld légkörébe, ahol megsemmisült [16].

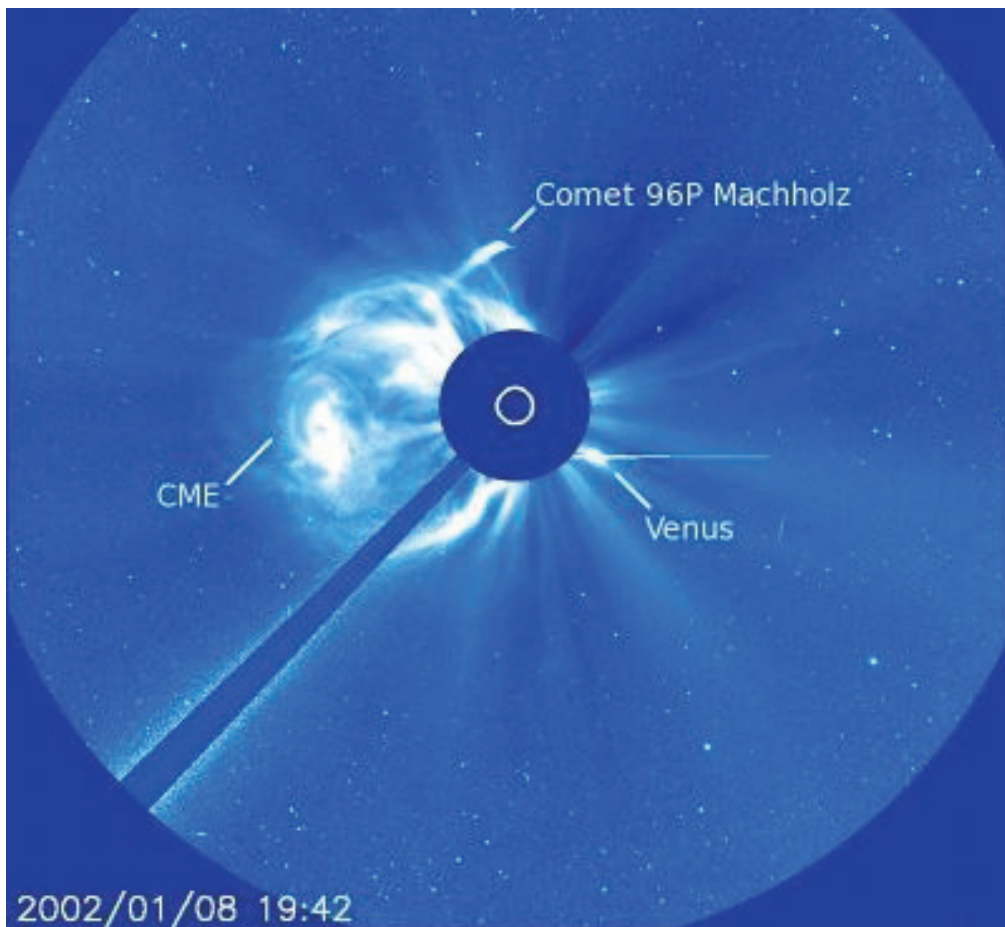
Nagyot ugrunk az időben, ami persze nem azt jelenti, hogy ne lett volna napmegfigyelésre szolgáló űreszköz ezen időszak alatt, de mint azt már többször is írtuk, nehéz bemutatni mindet. Következő időpontunk 1995. december 2., amikor útjára indult a Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) nevű űreszköz [17]. A SOHO egy ESA/NASA küldetés, és az Európai Űrügynökség (ESA) Horizon 2000 tervének egyik sarokköve. Szép karácsonyi ajándéknak is volt tekinthető a napfizikával és/vagy Nap-Föld-kapcsolattal foglalkozó tudományos közösség számára. A SOHO által vitt műszerek legtöbbjét az ESA fejlesztette és integrálta, ezek kiegészültek a NASA által biztosított műszerekkel. A NASA Atlas-II rakétájával juttatták el a Nap-Föld-rendszer ún. L_1 pontjába, amely a Nap-Föld-egyenesen helyezkedő, a Nap felé eső egyik Lagrange-féle egyensúlyi pont. Helyét a Nap és a Föld gravitációs potenciálja határozza meg. Kitüntetett szerepe van az űrszondás megfigyelésekben, ugyanis innen folyamatosan megfigyelhető a Napunk. Emellett a Lagrange-pontok egyfajta parkoló pályát jelentenek az űrben, ahol a közelben lévő nagyobb égitesteknek az űreszközökre ható gravitációs ereje viszonylag kiegyensúlyozott keringési pályán tudja tartani a műszert. Mivel azonban az L_1 pont kb. 1,5 millió km-re van, ezért a SOHO-val történő kommunikáció biztosításához a Föld különböző helyein kell elhelyezni nagy antennákat. Ezt a NASA Deep Space Network rádióantenna-hálózata biztosítja.

A SOHO fedélzetén tizenkét műszer kapott helyet, így joggal érdemelte ki az obszervatórium megnevezést. A SOHO működését eredetileg 1998-ig tervezték, de annyira sikeres küldetés volt, hogy az ESA és a NASA többször is meghosszabbította, és számos küldetésbővítést hagyott jóvá [18]. 2020-ban ünnepelte indításának 25. évfordulóját, de még a mai napig is folyamatosan pásztázza a Napot és továbbítja a megfigyelésekről az adatokat. Három évvel a küldetés kezdete után, 1998 júniusában megszakadt vele a kapcsolat, miután egy sor helytelen parancsot adtak ki egy rutinmanőver során, és biztonsági üzemmódba kapcsolt. Az űrobszervatóriummal való minden kapcsolatfelvételi kísérlet kudarcot vallott, és négy hétig senki sem tudta, hogy hol van. Úgy tűnt, hogy ez a páratlan obszervatórium örökre elveszett. Egy hónappal később egy a Földről indított erős radarjellel sikerült megtalálni az űreszközt, és kiderült, hogy még mindig a megfelelő pozícióban tartózkodik, és olyan szögben helyezkedik el, hogy a napfény a következő hónapokban újra a napelemtáblákra fog esni. Így végül az ESA és NASA mérnökeinek szeptember végére sikerült újra visszaállítania a SOHO normál működését, a műszerek pedig október végétől a megszokott módon továbbították az adatokat [19]. Ha ez nem lett volna elég, a SOHO iránytartásáért felelős három giroszkóp 1998 decemberére elromlott, így a mérnököknek egy új irányítást kellett kidolgozniuk, hogy az obszervatórium giroszkópok nélkül is képes legyen tartani a pozícióját. A feladatot 1999 elejére sikeresen megoldották. Ezzel a SOHO az első olyan űreszköz,

melynek háromtengelyes stabilitásáért nem giroszkópok felelnek [20]. A SOHO az ezt követő évtizedeket nagyobb problémák nélkül átvészelte, és máig minden műszere rendben működik. Az Európai Űrügynökség most már abban reménykedik, hogy ha ez így megy tovább, megérheti a harmincadik születésnapját is.

Visszakanyarodva a tudomány vizeire, tekintsük át, hogy milyen céllal indították útjára a SOHO-t. Egyik fő tudományos küldetése csillagunk, a Nap belső szerkezetének feltérképezése és a benne zajló változások megértése az észleléseken keresztül. Ehhez a Nap rezgéseit vizsgálja három műszerének segítségével, melyek a következők: GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*), MDI (*Michelson Doppler Imager*) és VIRGO (*Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations*). A második cél a naplégkör megfigyelése, különös tekintettel a kromoszférára, az átmeneti rétegre és a koronára. Az erre használt eszközök a következők: CDS (*Coronal Diagnostic Spectrometer*), EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*), LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*), SUMER (*Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation*), SWAN (*Solar Wind Anisotropies*) és UVCS (*Ultraviolet Coronagraph Spectrometer*). A harmadik pedig a napszél és a hozzá kapcsolódó jelenségek helyi (*in situ*) mérése a Nap és Föld között elhelyezkedő L_1 pontban, melyhez a CELIAS (*Charge, Element, and Isotope Analysis System*) és COSTEP (*Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyser*) műszereit használja [17]. A SOHO által gyűjtött adatok alapján eddig közel 6 ezer tudományos publikáció született, amelyek közelebb vittek bizonyos kérdéseknek a megválaszolásához, vagy hozzájárultak ahhoz, hogy az új generációs napmegfigyelő űreszközök még pontosabban vizsgálhassák őket. Így felsorolni is nehéz – ha nem lehetetlen –, hogy milyen eredmények születtek, ezért a legfontosabbak közül kiemelünk néhányat. A SOHO segítségével bepillantást nyertünk a felszín alá, feltérképeztük csillagunk belsejének sűrűség- és hőmérséklet-eloszlását, kirajzolódott a felszín alatti rétegekben lévő plazma áramlása, a rétegek forgása. Megtudtuk, hogy a felszínen megfigyelhető differenciális rotáció – azaz, hogy az egyenlítői vidékek gyorsabban forognak, mint a pólusok környéke – nem korlátozódik csak oda, hanem a mélyebben fekvő rétegekre, a teljes konvektív zónára is ez a kép jellemző. Viszont a konvektív zóna alatt lévő rétegek, a sugárzási zóna és a mag is merev testként forog. A két forgási jellemzővel rendelkező régiót elválasztó réteg pedig a varakozások ellenére nem kiterjedt, hanem nagyon vékony (ez az úgynevezett tachoklína) [21]. A Nap lokális rezgéseinek vizsgálatával lehetőségünk adódott egy napfolt felszín alatti „részeiről” is képet alkotni [22]. Új, dinamikusan változó jelenségeket fedezett fel, mint például a koronahullámok és a naptornádók [23,24]. A napszél esetében megmérte a lassú és a gyors napszélkomponens gyorsulását, illetve azonosította a gyors napszél forrásterületeit, valamint a mögöttes gyorsítási mechanizmust. A gyors napszél forrásterületei a koronalyukak voltak, ahol a Nap mágneses erővonalai olyan messze záródnak a felszíntől, hogy ezen régiók mágnesesen „nyitott” tartományoknak tekinthetők [25]. Forradalmasította az űridőjárással kapcsolatos ismereteinket, és lehetővé tette a különböző űridőjárási események előrejelzését azáltal, hogy majdnem három nappal a Földre érkezés előtt észlelte azokat az aktív jelenségeket, amelyek geomágneses zavarokat okozhatnak. Ilyenek a Földre irányuló CME-k, amelyek több tonnányi töltött részecskét képesek a bolygóközi térbe juttatni, vagy a napkoronában és a napszélben megjelenő egyéb anomális változások. A koronaanyag-kidobódások vizsgálatára a SOHO LASCO koronográf műszere a legalkalmasabb, amellyel így 24–72 órával

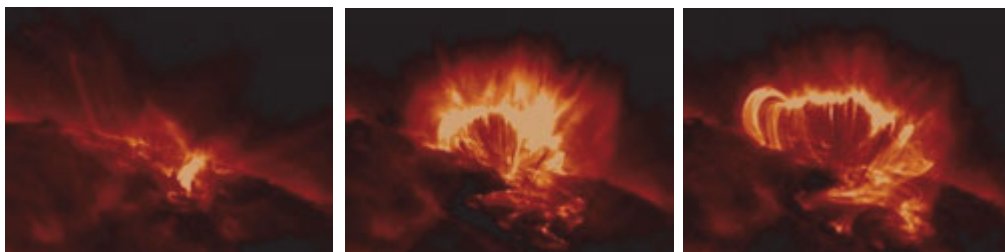
azelőtt jelezhető a napkitörés, hogy az elérné bolygónkat [26]. A LASCO amellett, hogy a Nap koronájában lejátszódó jelenségeket vizsgálja, egy nem várt területen is óriási sikert aratott. Mivel a LASCO kitakarja a napkorong fényét, egyfajta mesterséges napfogyatkozást létrehozva, a képeket elemző szakemberek eddig több mint négyezer üstököst fedeztek fel a segítségével (6. ábra). Így nemcsak a Nap kutatásban vannak elévülhetetlen érdemei, de a Naprendszer kutatásához is hozzájárult. A SOHO esetében fontosnak érezzük azt is kiemelni, hogy a küldetés első két éve után az obszervatóriummal gyűjtött adatok mind nyilvánosak és jelenleg is elérhetőek a SOHO honlapjáról.



6. ábra: A SOHO által felfedezett egyik üstökös, a 96P Machholz. Átlagosan hat évente kerüli meg a Napot, így a SOHO eddig háromszor figyelte meg a LASCO műszer segítségével. A képen emellett láthatjuk a Vénuszt, illetve egy koronaanyag-kidobódást, azaz CME-t is. (Forrás: NASA / ESA / SOHO)

Mint említettük, a SOHO-t eredetileg 1998-ig tervezték működtetni, így az 1998. április 2-án indított Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) [27] űreszközt az utódjának is tekinthetnénk. Viszont

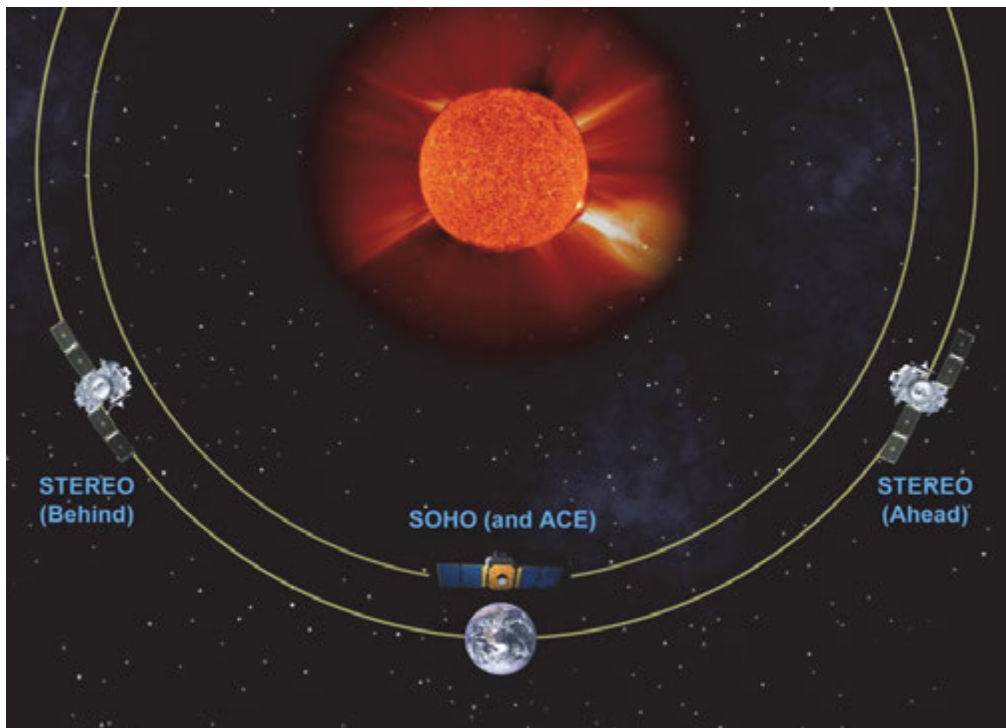
mivel a SOHO küldetését meghosszabbították, ezért a TRACE-t tulajdonképpen egy „kiterjesztett” SOHO műszerként üzemeltették, és a SOHO-val számos közös megfigyelési programban szerepelt. A TRACE a NASA/GSFC küldetése volt a Small Explorer (SMEX) programon belül. Tudományos célja a Nap felszínén megjelenő mágneses struktúrák, az úgynevezett „mágneses szőnyeg” hatásának vizsgálata a felső naplégkör – az átmeneti régió és a korona – geometriájára és dinamikájára. A TRACE egy 30 cm-es EUV képalkotó teleszkóppal rendelkezett, amely megduplázta a SOHO EIT teleszkópjának spektrális sávját. Térbeli felbontása 1 ívmásodperc, látómezeje $8,5 \times 8,5$ négyzetívmperc, míg időbeli felbontása 25 másodperc, de akár 10 másodpercenként is készíthetett képeket. A TRACE-t úgy tervezték, hogy kamatoztatva a Yohkoh és a SOHO által gyűjtött teljes napkorongos felvételeket, maximálisan kihasználja a kisebb látómezőt, de nagyobb térbeli felbontást, illetve a TRACE belső képstabilitása néhány század ívmásodperc, így hihetetlen részletgazdag és éles képeket tudott készíteni a naplégkör egyes régióiról. Mivel pályája 600 km magasan, a terminátor vonala mentén húzódott, így a SOHO-hoz hasonlóan 24 órában folyamatos napmegfigyelést tudott végezni, viszont csak az év 7 hónapjában. Földhöz közeli pályája miatt 2,5 Mbit/s sebességgel tudott adatokat továbbítani a norvégiai és az alaszakai állomásokra, viszont a tényleges adatátviteli sebesség ennél jóval kisebb volt (200 kbit/s), ugyanis az állomásokkal a 90 perces keringési periódus alatt 8 percig tudott kommunikálni.



7. ábra: A TRACE űrszonda 2002. április 21-én rögzítette egy röntgenkitörés (X-fler) különböző fázisait az AR9906 aktív régió felett. (Forrás: NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio)

Mivel a SOHO teljes napkorongról készült EUV felvételei és MDI magnetogramjai mindig rendelkezésre álltak, így a TRACE-t a tudományos szempontból érdekesebb régiókra lehetett irányítani (7. ábra). A nagy időbeli és térbeli felbontásnak köszönhetően a TRACE felfedte a folyamatosan fejlődő és változó kromoszféra, átmeneti réteg és korona struktúráit. Az aktív régiókhoz kapcsolódó koronahurkok, amelyek a kisebb felbontású SOHO felvételeken lassan változó struktúráknak tűntek, percek, vagy akár másodpercek (a TRACE időfelbontása szabott csak határt a megfigyeléseknek) alatt folyamatosan változnak, fejlődnek. Láthatóvá vált, hogy a hurkokba folyamatosan áramlik a plazma, amely így fűti is az alsóbb légrétegeket. Nem győzzük hangsúlyozni, hogy a nagy térbeli és időbeli felbontás feltárta a flerek, protuberanciák és filamentumok kisléptékű, de annál bámulatosabb dinamikáját [28]. Ezek a megfigyelések megerősítették azt a felismerést, hogy a kitörések egy komplex fizikai folyamat részei, amelyek nem minden esetben kapcsolódnak aktív régiókhoz. Az adatok egy mélyebb megértésre serkentették a kutatókat azzal kapcsolatban is, hogy hogyan halmozódhat fel a mágneses energia a koronában,

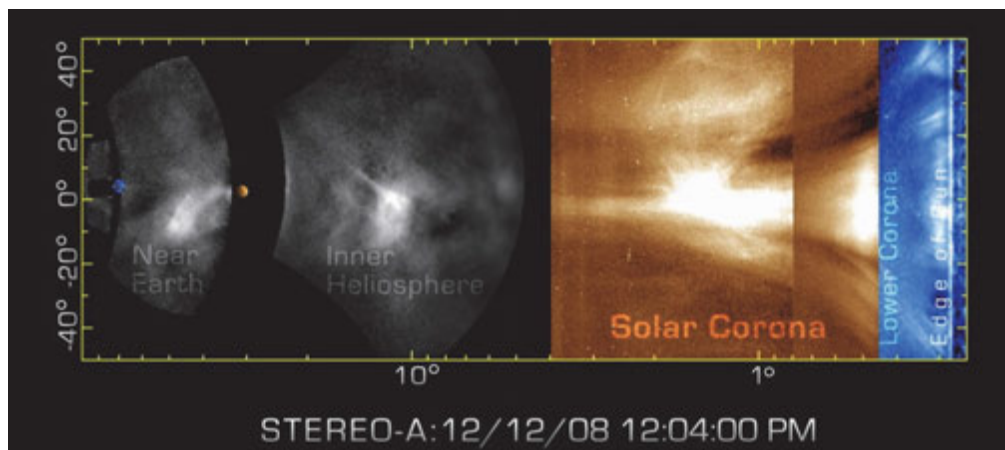
hogyan történik az energiefelszabadulás, és hogyan befolyásolja a felszabaduló energia a megfigyelt dinamikát. Újra felkeltette az érdeklődést a vektoros magnetogramok iránt, amelyek a mágneses topológiát mutatták meg, és az ezekkel kapcsolatos magnetohidrodinamikai (MHD) modellezések új szintre léptek. A TRACE megmutatta a napfizikai kutatótársadalomnak, hogy a nagy időbeli és térbeli felbontás kombinálása elengedhetetlen mind a nyugodt, mind az aktív Nap megértéséhez [28].



8. ábra: A STEREO űrszondák helyzete a napmegfigyelés során. (Forrás: NASA)

A felbontás növelésén túl a következő nagy lépést a tényleges háromdimenziós képalkotás, a sztereoszkópikus megjelenítés jelentette. A NASA 2006. október 26-án útjára indított küldetését, a STEREO-t így tervezték [29, 30]. Neve egyrészt egy mozaikszóból áll össze (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), de emellett tükrözi azt is, hogy két szögből készíthet felvételeket a Napról (8. ábra). Ezért a küldetésre a NASA két ikerszondát küldött az űrbe, amelyek a Földhöz képesti űrbéli helyzetük alapján kapták nevüket: a STEREO-A, az angol *ahead* (elől) kifejezésből, míg a STEREO-B az előzőhöz hasonlóan az angol *behind* (hátról) szóból. A két űrszonda a Földet megelőzve, illetve a bolygónkat követve kering a Nap körül, és ez az elrendezés teszi lehetővé a háromdimenziós képalkotást, amire korábban még soha nem volt példa. Mindkét szonda hasznos terhe két műszercsoportot tartalmaz: az egyik a *Sun-Earth Connection Coronal and Heliospheric Imager* (SECCHI), amely a Napról és környezetéről készít felvételeket, míg a másik az *In-Situ Measurements of Particles and CME Transients* (IMPACT), amely

az úgynevezett szoláris energetikus részecskék, azaz SEP-ek (*Solar Energetic Particles*) és a napszél elektronjainak háromdimenziós eloszlását vizsgálja, illetve a bolygóközi mágneses tér mérésére alkalmas műszer is egyben. A SECCHI öt kamerával rendelkezik, egy EUV képalkotóval, két fehér fényben felvételeket készítő koronográfval, illetve két további teleszkóppal, melyek a Nap és a Föld közötti térről készítenek felvételeket. A SECCHI legfontosabb tudományos célja a koronaanyag-kidobódások háromdimenziós evolúciójának tanulmányozása a Nap felszínétől a koronán és a bolygóközi téren keresztül egészen a Föld pályájáig (9. ábra). A két űrszondát egyszerre indították útnak, majd később, a Hold gravitációját kihasználva választották szét őket és így jutottak el a két különböző Nap körüli pályára.



9. ábra: A STEREO-nak és az új adatfeldolgozási technikáknak köszönhetően sikerült nyomon követni a 2008 végén bekövetkező űridőjárási eseményeket a Nap ultraforró koronájától egészen a Föld pályájáig. Az adatok begyűjtésének idején a STEREO-A közel 45 fokkal a Föld előtt volt a pályáján, így nagyon tiszta képet nyújtott a Föld-Nap vonalról. (Forrás: NASA / STEREO)

Fokozatosan távolodtak el egymástól, majd 2011 elején érték el az egymáshoz képesti 180 fokok szög-távolságot. Ez történelmi pillanatnak bizonyult, ugyanis elkészítették az első felvételeket 3D-ben Napunkról. Ráadásul az elmúlt 150 év legintenzívebb napkitörése – amely 2012. július 23-án következett be – már nem tudott elbújni az ikerszondák szeme elől [31,32]. Szerencsére a Napból kidobott plazma nem a Földet, hanem az éppen ilyen jeleségek mérésére szolgáló STEREO-A űrszondát találta el, ennek köszönhetően viszont rendkívül részletes elemzéseket lehetett végezni. A rendkívül nagy sebességgel száguldó plazmafelhők a 0,96 csillagászati egység távolságot mintegy 19 óra alatt tették meg, vagyis óránként csaknem 10 millió kilométert haladtak (ez a fénysebesség közel 1%-a). Az adatok kiértékelése szerint 2012. július 23-án 10–15 perc időkülönbséggel két koronaanyag-kidobódás elhagyta a Nap felszínét. Ráadásul a két CME egy olyan plazmacsatornában haladt az interplanetáris térben, amelyet négy nappal korábban egy másik CME tisztára söpört, így a későbbi CME-k plazmafelhői kevésbé lassultak kozmikus utazásuk közben.

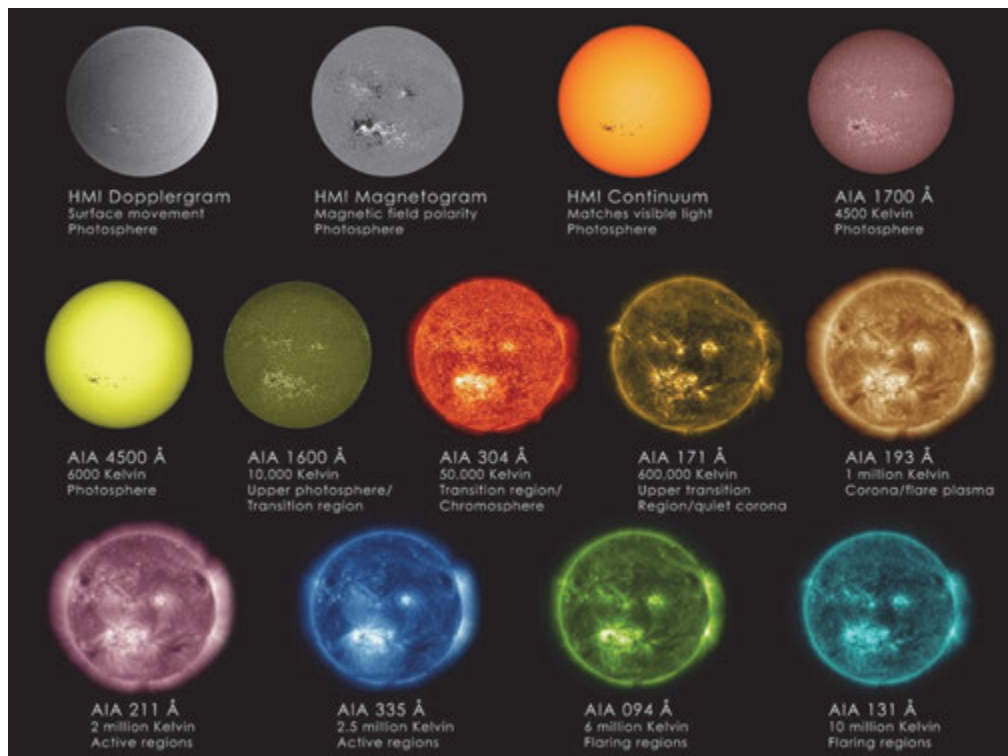
2014 júniusában mindkét űreszköz antennája esetében váratlanul magas hőmérsékletet érzekelt, ami jelentősen csökkentette az adatkommunikáció sebességét. Ez a tudományos programok megvalósíthatóságának csökkentésével is járt, így 2014 augusztusában egy visszafogottabb tudományos programot dolgoztak ki a tudósok. Egy 2014. szeptember 3-án bekövetkező hatalmas protonvihar – amelyet a Nap túlsó oldalán bekövetkezett napkitörés okozott – tovább csökkentette a program megvalósíthatóságának esélyeit. Az energetizált részecskék fluxusa olyan nagy volt, hogy mindkét STEREO szondán alaphelyzetbe állt a navigációhoz szükséges csillagkövetés. Később, október 1-jén, a STEREO-B-vel megszakadt a kommunikáció, közvetlenül az űrszonda tervezett újraindítása után. Sajnos a kitartó próbálkozások ellenére sem sikerült újra kapcsolatba lépni vele – ennek lehetséges okaként a napelemek Naptól való elfordulását jelölték meg, hasonlóan a korábbi űreszközhöz, a SOHO-hoz. A SOHO a szerencsének is köszönhetően – a napelemtáblák újra a Nap felé fordultak – folytatta méréseit, ezért a STEREO-B esetében is csak várni és reménykedni tudtak. A kezdeti sűrűbb próbálkozásokat idővel felváltotta a havi egy kísérlet a STEREO-B-vel való kapcsolat visszaállítására, ami végül 2016 augusztusában sikerre vezetett. Viszont sajnos korai volt az öröm, ugyanis az űrszonda irányíthatatlannal forgott a fő tehetetlenségi tengelye körül, és csak ezen forgás következtében jutott néha csekély mennyiségű napenergiához. Ez végül nem bizonyult elégnek a javítás megvalósítására. Így a hosszan tartó próbálkozások ellenére is a mérnököknek be kellett látniuk, hogy a STEREO-B nem használható a továbbiakban tudományos célokra. Ráadásul 2015 márciusában a STEREO-A is néhány hónapig biztonsági üzemmódba kapcsol, ugyanis a Föld átteljes oldalára került, így a napelemek nem kaptak elég fényt a szükséges energia előállításához.

Az évek során fellépő nehézségek ellenére a STEREO küldetés mindenképp az űrtörténelem fontos és megemlítenő példái közé tartozik, amit az általa szolgáltatott eredmények is alátámasztanak. Segítségével kaptunk bizonyosságot a CME-k topológiájára vonatkozóan. Eszerint ezek a képződmények megfelelnek a felszíntől elszakadó mágneses fluxuskötegeknek, amelyek a modellszámítások alapján várt alakot mutatják, és csak a különböző rálátási szögek eredményezhetnek más-más struktúrát [33]. Az oldalnézetből való mérés nagy előrelépést jelentett a CME érkezési idejének pontosabb számolásában, illetve az egyedi elrendezésüknek köszönhetően a CME terjedési irányát is könnyebb meghatározni. Az in situ mérések lehetővé tették a SEP-ek különböző tulajdonságainak – mint például az energiájuk, az összetételük és az eloszlásuk – egyedi vizsgálatát, ami alapján további megállapításokat tehetünk a SEP-ek gyorsulása mögött álló fizikai folyamatokról és az interplanetáris térben való terjedésükről. Megannyi korábbi eredményt felsorakoztatva, és annak ellenére, hogy már csak az egyik űrszonda működőképes, a jövőben is bizakodva várjuk az újabb mérföldköveket a STEREO-A-tól [34].

Ebben a tanulmányban utolsóként a SOHO utódjaként is emlegetett, 2010. február 11-én indított Solar Dynamics Observatory (SDO) napmegfigyelő műholdról szeretnénk még említést tenni. Az SDO a NASA LWS (*Living With a Star*) programjának első küldetése, amely egy űridőjárás- és alkalmazásorientált kutatási program. Az LWS célja, hogy megértse a Napot, mintha egy mágneses változócsillag lenne, és mérje a földi életre és társadalomra gyakorolt hatását. Tanulmányozza a Földet és az emberiséget érintő naptevékenység és változékonyság mozgatórugóit. Az SDO küldetése a napselső dinamikájának

megfigyelése, a Nap mágneses terének feltérképezése, a Napból a bolygóközi térbe történő tömeg- és energiafelszabadulás jellemzése, valamint a napsugárzás változásainak nyomon követése. A végső cél a Nap dinamikus állapotának – változékonyságának – megértése különböző időbeli és térbeli skálákon: ezen változások hogyan befolyásolják a földi életet és technológiát, hogy végül lehetővé váljon az űridőjárás-előrejelzés operatív képességének kifejlesztése.

Az SDO egy ferde geoszinkron pályán kering, amely a Nap szinte folyamatos megfigyelését teszi lehetővé. Ez utóbbit más pályákról, például alacsony Föld körüli pályáról (*low-Earth orbit*, LEO) is el lehetne végezni, viszont ez esetben nagy mennyiségű adat tárolását kellene biztosítani, amíg a műhold egy vevőállomás felett el nem halad. Az, hogy az SDO esetében nagy adatátviteli sebességre van szükség, illetve a nagy fedélzeti adattároló rendszer kezelésének nehézségei a folyamatos kapcsolat követelményét eredményezték. Az SDO pályájának hátrányai közé tartozik a magasabb indítási és pályára állási költség, valamint hogy évente kétszer földárnyékba kerül a műhold. Ezekben a 2-3 hetes „napfogyatkozási” időszakokban az SDO nem tudja észlelni a Napot. Végül az SDO folyamatosan 130 Mbit/s adatátviteli sebességgel továbbítja a jeleket az új-mexikói White Sands-ben található két földi állomásnak. A műhold adatátviteli sebessége több mint két nagyságrenddel na-



10. ábra: Az SDO HMI és AIA műszereivel készített felvételek a Napról. Jól látható, hogy milyen hullámhosszokon készültek a felvételek, illetve hogy azok milyen hőmérsékleti tartománynak felelnek meg. (Forrás: NASA / SDO)

gyobb, mint bármely korábbi napmegfigyelő űreszközé. Egy nap alatt annyi adatot szolgáltat, mint a TRACE öt év alatt.

Az SDO három fő tudományos műszerrel rendelkezik: az *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA), a *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) és az *Extreme Ultraviolet Variability Experiment* (EVE). Ezek együttesen működve készítenek – akár a teljes napfelszínről – 6000 K-tól egészen 20 MK-es hőmérsékleti tartományig felvételeket (10. ábra), nagyfelbontású dopplerogramokat, látóirányú és vektor magnetogramokat, valamint mérik a szoláris sugárzásban bekövetkező változásokat az EUV és röntgentartományokban [35]. Hasonlóan a korábbi nagy elődhöz, a SOHO-hoz, az SDO esetében is több ezernél tart már a tudományos publikációk száma, így itt is csak kiragadunk párat az eredmények közül. Az SDO számtalan napkitörést rögzített döbbenetes részletességgel. Az első másfél évben a műhold közel 200 flert észlelt, ami lehetővé tette a kutatók számára egy új mintázat felismerését. Nevezetesen, hogy a flerek körülbelül 15%-ánál van egy „késői fázisú fellángolás”, amely percekkel vagy akár órákkal később követi az első kitörést [36]. 2012 februárjában az SDO olyan felvételeket készített a napfelszínről, amelyeken hatalmas plazmatornádók voltak láthatóak. A későbbi megfigyelések alapján ezek a naptornádók – amelyeket a plazmát forgató mágneses mezők hoznak létre – akár 300000 km/h sebességgel is foroghatnak (a földi tornádók csak 450 km/h-t érnek el) [37]. A napfelszínen kavargó „plazmatenger” olyan óriási hullámokat hoz létre, amelyek akár közel 5 millió km/h sebességgel járkák körbe a Napot. Az SDO 2010-ben készített méréseket ezekről a hullámokról, amelyeket EIT-hullámoknak neveztek el az SDO azonos nevű műszere után, amelynek a felfedezése is köszönhető volt. A tudósok azt gyanítják, hogy ezeket a hullámokat a koronaanyag-kibőbödés okozhatja. A helioszeizmikus mérések óta tudjuk, hogy Napunk belsejében a nagyléptékű áramlás milyen jellegű (lásd korábban a SOHO eredményeinek leírásakor), viszont a gyengébb áramlások esetében eddig a napfoltok mozgásának vizsgálatából csak a felszínen tudtuk kimérni az úgynevezett meridionális cirkulációt (sebességének nagysága a felszínen kb. 20 m/s). Ez az áramlás az egyenlítőre merőleges síkban jön létre, és a felszínen az egyenlítőtől a pólus felé áramlik a plazma, amely a mélyben valahol vissza kell forduljon. Az SDO megfigyelései feltárták, hogy ez a cirkuláció sokkal összetettebb, mint azt korábban gondolták, és mivel kulcsszerepet játszik a napdinamó működésében és a vele szorosan összefüggő napfoltok kialakulásában, ezért fontos ismernünk jellegzetességeit.

A már több mint egy évtizedes működése során az SDO megfigyelései lassan lefednek egy teljes napciklust. A 24. napciklus kezdete óta figyeli a Napot, látta, ahogy az aktivitás eléri csúcspontját, majd lassan csökken, hogy újra emelkedni kezdjen. Ezek a több éves megfigyelések segítenek felfedezni és megérteni azokat a jeleket, melyek az egyik napciklus hanyatlását és a következő kezdetét jelzik. Ehhez járult hozzá az is, hogy az SDO által megfigyelt koronalyukak segítségével a kutatók meghatározták, hogy mikor fordul át a Nap mágneses tere, ami az egyik legfontosabb mutatója a napaktivitás maximumának. 2019 decemberében az SDO megfigyelések lehetővé tették egy új típusú mágneses „robbanás” felfedezését. Ez a speciális típus, amelyet spontán mágneses rekonnexiónak – szemben a korábban megfigyelt általánosabb mágneses rekonnexióval – neveznek, segíthet megerősíteni egy több évtizedes elméletet, hozzájárulva a felsőbb légköri rétegek, a korona több millió fokal hőmérsékletét kialakító folyamatok megértéséhez.

Honnan hová jutottunk és merre tartunk?



11. ábra: A napkutatásokat támogató űreszközök. (Forrás: NASA)

Az előzőekben láthattuk, hogy mekkora sikereket értünk el a napfizikai kutatások területén az űr megfigyeléseknek köszönhetően. Nem győzzük hangsúlyozni, hogy itt csak kiragadott példákat mutattunk be. Számos nagyszerű műszer volt még, amelyek alapjaiban járultak hozzá a Napról alkotott fizikai modellünk kiteljesedéséhez, vagy a Nap bolygóközi térre gyakorolt hatásának vizsgálatához (11. ábra). Hogy még jobban megértsük és lássuk ezen műszerek fontosságát, érdemes megnéznünk, hogyan változtak a kérdések és a fókuszok a napfizika területén. Először egy a 19. század végén megjelent könyvből, C.A. Young *The Sun* címen 1892-ben írt monográfiájából indulunk ki, ahol bepillantást nyerhetünk abba, hogy mit gondoltak fontosnak a múltban. Így némi perspektívát kaphatunk az akkor kritikus kérdésekről: először is kielégítő magyarázatot kerestek a Nap felszínén megfigyelt sajátos forgási törvényre, a differenciális rotációra; másodsor meg akarták ismerni a foltok eloszlásának és periódicitásának az okát; harmadszor szerették volna meghatározni a napsugárzás mennyiségének időbeli változását; végül negyedszer kapcsolatot kerestek a fotoszféra felett megfigyelt gázok és anyagok (korona, protuberanciák), valamint a felszín megfigyelt sajátosságai között. Ezek a kritikus kérdések a 20. század közepén, az akkor ugyan még gyerekcipőben járó, de annál érdekesebb felfedezéseket tevő űreszközöknek köszönhetően kicsit megváltoztak, a prioritások áthelyeződtek. A NASA felkérte a Nemzeti Tudományos Akadémia Űrkutatási Testületét (*Space Studies Board of the National Academy of Sciences*), hogy rendezzenek egy workshopot, ahol megfogalmazzák azokat a legfontosabb feladatokat és kérdéseket, amelyekre az űrben végzett újabb megfigyelések során választ szeretnénk kapni (National Research Council, 1966). Az ott megfogalmazott kérdések nagyon röviden a következők voltak:

- **Evolúció és belső szerkezet:** hogyan alakult/alakultak ki a Nap és a hozzá hasonló csillagok, és milyen fejlődési állapotokon mennek keresztül? Milyen folyamatok során szállítódik a Nap magjában termelt energia a külsőbb tartományok felé? Milyen a Nap pontos kémiai összetétele és fizikai állapota, milyen eloszlásokat követnek az állapotjelzők? Mi az eredete a Nap mágneses mezejének és a napciklusnak?
- **Fotoszféra:** milyen fizikai feltételek uralkodnak a fotoszférában? Mi az eredete az ott megfigyelt turbulencia spektrumának?
- **Kromoszféra és korona:** milyen a felső naplégkör szerkezete? Hogyan lehet és kell figyelembe venni a magassággal együtt járó hőmérséklet-emelkedést, amely egészen a koronáig folytatódik? Milyen a külső korona formája? Hogyan kapcsolódik a bolygóközi térhez?
- **Naptevékenység:** honnan származik és milyen energiák hajtják a napfelszínen megjelenő különböző alakzatokat, látványos jelenségeket, mint például napfoltok, flarek, rádiókitörések stb.?

Mint említettük és nyilvánvaló is, hogy a 19. század végén és a 20. század közepén kritikusnak tekintett kérdések között markáns hasonlóság van, de vannak jelentős különbségek is. A csillagfejlődés, az elemek keletkezéséért felelős nukleáris folyamatok és reakciók a kísérleti és elméleti magfizika miatt is fontossá váltak. Emellett a kémiai elemek keletkezéséhez szükséges feltételek megértése és összekapcsolása a csillagok fejlődésével felkeltette a reményt, hogy a Nap a magfizikával párosulva Rosetta-kő lehet a csillagok természetével és eredetével kapcsolatos jövőbeli felfedezések számára. A 19. század második felében a napfelszínről készült felvételek olyan mintát mutattak, amely a sejtekéhez volt hasonló. Azonban a Nap magas hőmérséklete és alacsony viszkozitása a konvekció jelenlétét összeegyeztethetlenné tette a hagyományos hidrodinamikai elméletekkel. Az elméleti szakemberek közül sokan azt állították, hogy a megjelenő sejtes szerkezet a földi légkör zavaró hatásának eredménye.

E pár példa alapján is látjuk, hogy az elméletek és a megfigyelési módszerek fejlődése hogyan vezetett a kérdések újabb és újabb csoportjához. A 20. század közepén megfogalmazott, kihívást jelentő feladatok valójában a kérdések fészkeinek tekinthetők. Az „Evolúció és belső szerkezet” feladatköre nagy előrelépést ért el, köszönhetően annak, hogy sikerült a magreakciókat és a lejátszódásukhoz szükséges feltételeket megismerni, valamint a kémiai elemek előállításához szükséges környezetet létrehozó csillagászati eseményeket felderíteni. Az asztroszeizmológia, a Kepler- és a Gaia küldetés, valamint az asztrofizika fejlődése révén körvonalazódott a Naphoz hasonló hűvös csillagok keletkezése és fejlődése. A helioszeizmológia a numerikus szimulációkkal párosulva megmutatta, hogy a pólus és az egyenlítő közötti kis hőmérséklet-különbség is elegendő a napbelsőben és a felszínen megfigyelhető áramlás kialakításához és fenntartásához. A fotoszféra turbulens áramlásai a megfigyelések és a modellezések ötvözésének köszönhetően már különböző méretskálákon is igazolást nyertek. A felszín feletti rétegekről készült megfigyelések egy összetett képet mutattak meg a kromoszféráról és az átmeneti régióról, valamint feltárták az őket alkotó struktúrákat. A nagyfelbontású spektrumok és a numerikus modellek együttesen segítettek részleteket feltárni a kromoszféra egyes struktúráinak fűtési mechanizmusáról, illetve arról, milyen folyamatokon keresztül történik a korona alsóbb légrétegekből történő fűtése. A napkorona alakját és mágneses

terét olyan modellekkel próbálják leírni, amelyek szerint a korona mágneses tere egy potenciális térrel közelíthető, peremfeltételként a teljes Nap látóirányú mágneses terének méréseit használják, és feltételezik, hogy a mágneses tér a Naptól 2,5 napsugár távolságban már radiális irányú. Ezek a számítások azonban nem ragadják meg a korona dinamikáját a felszínen kialakuló aktív régiók felett, sem a kitöréseket, sem a filamentumok gerjesztődését, sem a CME-kben megfigyelhető változásokat. Sajnos minden mágneses-ter-extrapoláció a teljes napfelszínre kiterjedő mágneses mező ismeretétől függ, amelyet nem lehet egyetlen nézőpontból megszerezni.

Emellett szükség van még a mélyebb rétegekben lejátszódó dinamóhatás ismeretére is, amelynek pontos mechanizmusa a mai napig a napfizika nagy megoldatlan problémái közé tartozik. A dinamó- és MHD modellek sok, a naptevékenység időszakában megfigyelhető jellemzőt képesek már reprodukálni, de egyelőre nem tudják a mért mágneses tér és a felszíni áramlások megfigyelései alapján megbízhatóan megjósolni ezeket a változásokat, előre jelezni a kitöréseket. Lenyűgöző szimulációk vannak a napfoltokat létrehozó mágneses fluxuscsővek időbeli fejlődéséről, azonban még ma is kérdés, hogy pontosan honnan és hogyan kerülnek a felszíni rétegek alá.

A megválaszolandó kérdések és megoldandó feladatok listájában szerencsére vannak kipipálható tételek, de sok feladat esetében, amikor egyre mélyebbre ásunk a megértés bizonyosságát keresve, újabb és újabb kérdéseket találunk. Ahogy műszereink egyre nagyobb felbontásban, egyre részletesebb képet alkotnak, ugyanazt a jelenséget különböző aspektusból megőrkítve, olyan alkotóelemekre találhatunk – legyenek azok a fizikai valóságban vagy jelenjenek meg a modelljeinkben –, amilyenekre korábban nem számítottunk. Jelenleg is több űreszköz van, amelyek folyamatosan figyelik a Napot, mérik a Nap környezetében bekövetkező változásokat. Ezekről már a terjedelem miatt nem írunk részletesen, hiszen az egyes szondák tudományos céljai és a már most elért eredmények is külön-külön tanulmányt érdemelnének. Ilyen például a NASA 2018. augusztus 12-én útnak indított Parker Solar Probe (PSP) küldetése, amelynek célja a *touch the Sun* (érintsd meg a Napot) volt. Ez volt az első űrszonda, amely 2021-ben átrepült a korona külső régióin, példátlan megfigyeléseket szolgáltatva. A hét évig tartó küldetése alatt huszonnégyszer kerüli meg a Napot, és annak köszönhetően, hogy műszereit egy 11,5 cm-es szén-kompozit pajzs védi a Naptól, amely közel 1400 fokig képes ellenállni az extrém hőmérsékleti viszonyoknak, képes közvetlenül tanulmányozni a napkoronát. Szintén nagy reményeket fűzünk az ESA/NASA együttműködés keretében 2020. február 10-én indított Solar Orbiter küldetéshez is. Tudományos tevékenysége 2021 novemberében kezdődött, legfontosabb eleme pedig, hogy a Nap poláris régióit tanulmányozza.

Záró gondolatként talán az a legjobb, ha felsoroljuk azokat a tudományos kérdéseket, amelyek a 21. század elején a Nappal és környezetével foglalkozó tudósokat a leginkább foglalkoztatják:

- Milyen mechanizmusok irányítják a naptevékenység kváziperiodikus, 11 éves ciklusát?
- Hogyan szintetizálódik, koncentrálódik és oszlik el az aktív régiók mágneses fluxusa a napfelszínen?
- Hogyan alakítja át a kis léptékű mágneses rekonnexió a nagy léptékű tértopológiát és az áramrendszereket, és mennyire van jelentősége a korona fűtésében és a napszél felgyorsításában?

- Hol és hogyan keletkeznek a Nap EUV spektrumában megfigyelt változások, és hogyan kapcsolódnak ezek a mágneses aktivitási ciklusokhoz?
- Milyen mágneses térkonfigurációk vezetnek a koronaanyag-kidobódásokhoz, az eruptív protuberanciákhoz és a flerekhez, amelyek során energetizált részecskék, SEP-ek és sugárzás is keletkezik?
- Mi hajtja a napszelet és hogyan lehet rekonstruálni a korona mágneses térszerkezetét?
- Hogyan függ a napaktivitástól a bolygóközi mágneses tér változékonysága?
- Lehetséges-e pontos és megbízható előrejelzéseket készíteni az űridőjárásról? (12. ábra)



12. ábra: Művészi illusztráció az űridőjárásról és lehetséges hatásairól. (Forrás: Johns Hopkins Applied Physics Laboratory)

Irodalomjegyzék

- [1] Hale G.E. (1931): *The Spectroheliograph and its Work. Part III. Solar Eruptions and Their Apparent Terrestrial Effects.* *Astrophysical Journal*, 73, 379
- [2] Newton H.W. (1936): *Eruptive dark flocculi and their possible relation to magnetic disturbances.* *The Observatory*, 59, 51
- [3] Parker E.N. (1958): *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields.* *Astrophysical Journal*, 128, 664

- [4] Harvey B. (2007): *Russian Planetary Exploration: History, Development, Legacy, Prospects*. Springer, Praxis (Chichester, UK)
- [5] Neugebauer M., Snyder C.W. (1966): *Mariner 2 Observations of the Solar Wind, 1. Average Properties*. *Journal of Geophysical Research*, 71, 4469
- [6] Neugebauer M., Snyder C.W. (1966): *Mariner 2 Observations of the Solar Wind, 2. Relation of Plasma Properties to the Magnetic Field*. *Journal of Geophysical Research*, 72, 1823
- [7] Muller C. (2014): *The Carrington solar flares of 1859: consequences on life. Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 44, 185
- [8] NASA's Explorer Program Satellites. NASA GSFC, <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/multi/explorer.html>
- [9] Corliss W.R. (1971): *NASA Sounding Rockets, 1958-1968: A Historical Summary*. NASA Historical Report Series, SP-4401 (Washington, D.C., USA)
- [10] Orbiting Solar Observatory: OSO I. (1965), NASA SP-57 (Washington, D.C., USA)
- [11] Kraushaar W.L. et al. (1972): *High-Energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite*. *Astrophysical Journal*, 177, 341
- [12] Hudson H.S. et al. (1969): *The Hard Solar X-Ray Spectrum Observed from the Third Orbiting Solar Observatory*. *Astrophysical Journal*, 157, 389
- [13] Koutchmy S. (1988): *Space-borne coronagraphy*. *Space Science Reviews*, 47, 95
- [14] Pelling M.R. (1973): *Long-Term X-Ray Observations of Scorpius X-1 by OSO-III*. *Astrophysical Journal*, 185, 327
- [15] Compton W.D., Benson C.D. (1983): *Living and working in space. A history of Skylab*, NASA History Series, SP-4208 (Washington, D.C., USA)
- [16] Gurman J.B. (1987): *NASA's Solar Maximum Mission: a look at a new Sun*. NASA-TM-89539, NASA GSFC (Greenbelt, MD, USA)
- [17] Domingo V., Fleck B., Poland A.I. (1995): *The SOHO Mission: an Overview*. *Solar Physics*, 162, 1
- [18] Olive J.-P., Chaloupy M., Schweitzer H. (2002): *The SOHO spacecraft: a solar cycle mission*. SOLMAG 2002, Proc. Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference, ESA SP-505 (Noordwijk, Hollandia), 41
- [19] Vandenbussche F.C. (1999): *SOHO's recovery – An Unprecedented Success Story*. *ESA Bulletin*, 97, 39
- [20] Hellemans A. (1999): *SOHO Learns the Cruder Arts of Navigation*. *Science*, 283, 917
- [21] Kosovichev A.G. et al. (1997): *Structure and Rotation of the Solar Interior: Initial Results from the MDI Medium-L Program*. *Solar Physics*, 170, 43
- [22] Zhao J., Kosovichev A.G., Duvall T.L. (2001): *Investigation of Mass Flows beneath a Sunspot by Time-Distance Helioseismology*. *Astrophysical Journal*, 557, 384
- [23] Moses D. et al. (1997): *EIT Observations of the Extreme Ultraviolet Sun*. *Solar Physics*, 175, 571
- [24] Pike C., Mason H. (1998): *Rotating Transition Region Features Observed with the SOHO Coronal Diagnostic Spectrometer*. *Solar Physics*, 182, 333
- [25] Baldwin E., Fleck B., Müller D. (2015): *Two decades of observing the Sun*. *ESA Bulletin* 163, 16
- [26] Fleck B. et al. (2006): *10 years of SOHO*, *ESA Bulletin*, 126, 25
- [27] Handy B.N. et al. (1999): *The transition region and coronal explorer*. *Solar Physics*, 187, 229
- [28] Hudson H.S. et al. (2006): *White-Light Flares: A TRACE/RHESSI Overview*. *Solar Physics*, 234, 79

- [29] Driesman A., Hynes S., Cancro G. (2007): *The STEREO Observatory*. *Space Science Reviews*, 136, 17
- [30] Kaiser M.L. et al. (2007): *The STEREO Mission: An Introduction*. *Space Science Reviews*, 136, 5
- [31] Dryer M. et al. (2012): *Extreme Fast Coronal Mass Ejection on 23 July 2012*. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2012*, abstract SH44B-04
- [32] Freed A.J. et al. (2013): *The Solar Event of July 23, 2012: Historical Context, Unusual Behavior, Streaming Limit and Wave Particle Instabilities*. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2013*, abstract SH31B-2023
- [33] Newmark J.S. et al. (2007): *The SECCHI experiment on STEREO*. *Solar Physics and Space Weather Instrumentation II*, szerk. Fineschi S., Viereck R.A. *Proceedings of the SPIE*, 6689, 668902
- [34] Ossing D.A. et al. (2018): *Journey , Round the Sun: STEREO Science and Spacecraft Performance Results*. *IEEE Aerospace Conference*, 20190001502
- [35] Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. (2012): *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Solar Physics*, 275, 3
- [36] Woods T.N. et al. (2012): *Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments*. *Solar Physics*, 275, 115
- [37] *Solar TORNADOS as Seen by SDO*. NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/3919>