

## A SOHO eredményei és problémái

A tudományos folyóiratok Nappal foglalkozó cikkeinek nagy részét jelenleg a SOHO űrszonda megfigyeléseire alapozott közlemények teszik ki. A szintén nagyon sikeres YOHKOH mellett (amely főleg a napkoronáról készít képeket a röntgen-hullámhosszakon) rengeteg új információt kapnak a kutatók a Napról a SOHO műszereinek segítségével. Néhány újdonságot az alábbiakban mutatunk be.

A két tonnás SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) helyzete is különleges. A Nap és a Föld között, a Földtől nagyjából 1,5 millió kilométerre a Nap felé található az  $L_1$  *librációs pont*. Ez a Lagrange által meghatározott 5 pont egyike, ahol a Nap és a Föld gravitációs vonzása úgy tevődik össze, hogy az oda juttatott kistömegű testek (űrszondák) a Földdel együtt keringenek a Nap körül, azaz a Naphoz és a Földhöz rögzített, forgó koordinátarendszerben nyugalomban maradnak. Közvetlenül az  $L_1$  pontba, a Föld–Nap összekötő egyenesre nem célszerű telepíteni az űreszközt, mert a rádióösszeköttetést zavarná a mögötte lévő Nap rádiósugárzása. Ezért a SOHO-t is egy ún. *halo*-pályára állították. Ez a Földdel együtt a Nap körül forgó koordinátarendszerben egy ellipszis, amelynek középpontjában van az  $L_1$  pont, fél nagytengelye merőleges a Nap–Föld vonalra az ekliptika síkjában, hossza kb. 650 ezer km, fél kistengelye 45 fokot zár be az ekliptikával, hossza kb. 200 ezer km. A Földről nézve tehát a SOHO körbejárja a Napot 6 hónap alatt. Ennek a pályának nagy előnye, hogy állandó megfigyelést tesz lehetővé, nem úgy, mint a Föld körül keringő YOHKOH esetében, amely keringése során időnként a Föld árnyékába kerül, időnként pedig a Föld sugárzási övezetének Dél-Atlanti Anomáliája zavarja méréseit. Az 1995. dec. 2-án felbocsátott SOHO 1996. febr. 24-én érte el őrhelyét, akkor állt rá az  $L_1$  pont körüli halo pályára.

Az űrszonda három tengely körül stabilizált, azaz a térben fix helyzetben tartja irányító rendszere, úgy, hogy a hossz tengelye mentén elhelyezett műszerek a Napra irányuljanak. A térbeli helyzetet 3 pörgettyű, egy Nap-érzékelő és egy csillagszenzor érzékeli, az elfordulásokat 4 lendkerék forgatásával akadályozzák meg. A felgyülemlett forgatónyomaték miatt egyre gyorsabban forgó lendkerekeket 6–8 havonta lefékezik, ekkor rakétafúvókákkal stabilizálják ismét a SOHO-t, ilyenkor korrigálják pályáját is. Az  $L_1$  pont ugyanis instabil, ha bármilyen zavaró hatás kimozdítja onnan az űrszondát, pályája egyre jobban eltávolodik az  $L_1$  pont körzetéből, időnként gondoskodni kell tehát, hogy helyben maradjon. Egy ilyen pálya- és forgáskorrekció során történt 1998. jún. 25-én az az eseménysorozat, amely majdnem a SOHO elvesztéséhez vezetett (l. később).

A SOHO az ESA és a NASA közös vállalkozása, 12 műszert tartalmaz. Az ESA építette magát az űrszondát és 9 műszert, a NASA 3 műszerrel, a hordozórakétával, valamint a felbocsátás és a földi irányítás biztosításával járult hozzá a sikerhez. A műszerek felsorolása és rövid leírása megtalálható a *Meteor csillagászati évkönyv 1998* 127. oldalán. A leglátványosabb képeket két műszer adja: az EIT (Extreme Ultraviolet Telescope), amely 4 ibolyántúli színeképvonalban alkot képet a kromoszféráról és a koronáról, valamint a LASCO (Large Angle and Spectrometric COronograph), amely 3 távcsövet, pontosabban koronográfot (C1, C2, C3) egyesít, hogy egészen 30 látszó Nap-sugárig megfigyelje a napkoronát fehér fényben. Tanulságos képeket közvetít még a SOI/MDI (Solar Oscillation Imager/Michelson Doppler Imager) is, amely elsősorban a napfelszín látósugar irányú elmozdulásainak sebességét méri, de

ezenkívül fehér fényben képeket készít a napfoltokról, valamint meghatározza a fotoszférában lévő mágneses tereket is.

A SOHO tudományos programja teljesen nyílt. Az előkészítésben és a mérések kiértékelésében széleskörű volt a nemzetközi együttműködés. Megfelelő tudományos programmal bárki közreműködhet a feldolgozásban, ekkor hozzáférhet a teljes megfigyelési anyaghoz, de a képek bizonyos hányada gyakorlatilag azonnal (néhány órán, legfeljebb néhány napon belül azonnal hozzáférhető az Interneten (<http://sohowww.nascom.nasa.gov>). A *Meteor csillagászati évkönyv* tavalyi és idei kötetében a tudományos eredmények közül már ismertetésre kerültek a fontosabbak, itt most a SOHO adatbázis anyagából válogattunk néhány látványos képet. A megfigyelések bemutatására egy teljesen átlagos napon, 1999. május 21-én készült sorozat lett kiválasztva (amikor e sorok írója éppen ügyeletes megfigyelő volt a debreceni Napfizikai Observatóriumban, ezen látható, hogy hogyan egészítik ki egymást a különböző műszerek segítségével kapott képek).

Először ismerkedjünk meg a Nap felépítésével. A látható napfelszín, a *fotoszféra* egy kb. 500 km vastagságú réteg a Nap légkörében. Felső határának a hőmérsékleti minimumot tekintik (4560 K), e fölött található a kb. 10000 km vastag, 10000 K hőmérsékletű, nagyon egyenetlen *kromoszféra*, amelyet a néhány száz km vastag *átmeneti réteg* választ el a millió fokos *koronától*. A kromoszféra, és különösen a korona anyaga nagyon ritka, ezért egyrészt átlátszó, másrészt a fotoszférában gyökerező mágneses tér erősen befolyásolja, amint ez a képeken látszik. A magas hőmérsékletű, ezért erősen ionizált, jó elektromos vezető plazma számára nem lehetséges a mágneses erővonalakat metsző mozgás. A mágneses erővonalak így falként viselkedve összetartják a sűrűbb, ezért fényesebb anyagot. A magas hőmérséklet miatt a napkorona hőmérsékleti sugárzása a röntgentartományba esik (ezt figyeli a YOHKOH), másrészt az erősen ionizált atomok fényes színképvonalai figyelhetők meg. Az ionizált atomok jelölésére a vegyjel és egy római szám szolgál, amely eggyel nagyobb, mint az ionizációs fok: Fe I a semleges vasatom, Fe II az egyszerűen, ... , Fe XI a tízszeresen ionizált és így tovább.

Vegyünk most sorra a naplégkör rétegeit a SOHO segítségével. A fotoszférát figyeli a SOI/MDI. Nagyon bonyolult optikai rendszerével egy kiválasztott színképvonal (Ni I, 676,8 nm) eltolódását és polarizációját mérve határozza meg a mozgások látósugár irányú sebességét, vagy az egész Napra 4 ívmásodperc felbontással, vagy a napkorong közepén egy 10,5x10,5 ívperces területen 1,2 ívmásodperc felbontással. A sebességmérések eredményeit természetesen meg kell tisztítani a technikai hibáktól és a szisztematikus hatásoktól, mint pl. a Nap forgásából származó  $\pm 2$  km/s nagyságú jel. A feldolgozás során különválaszthatók a konvekciós mozgások és a Nap belsejében terjedő hanghullámok, amelyeket a turbulencia kelt (1. kép). Hosszabb időre terjedő megfigyelések bonyolult matematikai feldolgozásával a hanghullámok segítségével képet lehet alkotni a fotoszféra alatti *konvektív zóna* szerkezetéről, a Nap forgási sebességének változásáról a mélység és a heliografikus („naprajzi”) szélesség függvényében, a napfoltcsoportok felszín alatti szerkezetéről. A sebességképeken sikerült megfigyelni egy közepes nagyságú fler keltette hullámokat a fotoszféra felszínén (2. kép). Az MDI méréseiből „melléktermékként” a fotoszféra fényképe is elkészül, a napfoltokkal (3. kép), valamint a fotoszférában mérhető mágneses tér látósugár irányú összetevője is meghatározható (4. kép). Összehasonlításként a Big Bear Observatóriumban készült H-alfa képet is bemutatjuk az Internet archívumokból (5. kép). Itt kezdődik május 21-i áttekintésünk a Nap légköréről.

Az EIT speciális távcsöve 4 ibolyántúli színképvonal fényében készít napképeket, amelyek úgy lettek kiválasztva, hogy az átmeneti rétegtől a koronáig minden megfigyelhető legyen. A képek tulajdonképpen monokromatikusak, azaz fekete-fehérek, a könnyebb megkülönböztetés miatt szokták őket színezni. A legalacsonyabban, az átmeneti rétegben, 80000 fokon világít a He II 30,4 nm-es színképvonala (6. kép, narancssárga). Ez megfelel a hidrogén Lyman-alfa vonalának, csak a hélium atommag kétszeres pozitív töltése miatt hullámhossza annak egynegyede. A felvételen jól látható a kromoszféra szerkezete és a protuberanciák is, amelyek anyaga a kromoszférával nagyjából azonos állapotban van. Egyre magasabb hőmérsékleteknek felelnek meg az egyre jobban ionizált vasatomok színképvonalaiban készült képek: Fe X 17,1 nm, 1,3 millió K (6. kép, kék), Fe XII 19,5 nm, 1,6 millió K (8. kép, zöld) és Fe XV 28,4 nm, 2 millió K (8. kép, sárga). Ezek mindegyike korona-hőmérséklet, tehát a protuberanciák sötétek, a korona szerkezete egyre durvább, elmosódottabb a hőmérséklet növekedésével. Az ibolyántúli képeket összehasonlíthatjuk a YOJKOH lágy röntgen (1 nm körüli) tartományban készült képével (10. kép). Ez a napkorona anyagának hőmérsékleti sugárzását érzékeli, szélesebb hőmérséklettartományra érzékeny (1,5–25 millió K), és nagyobb a kontrasztja, jól kirajzolja a napkorona szerkezetét. Mivel inkább a magasabb hőmérsékletű helyeket mutatja, a Fe XV képhez (9. kép) hasonlít leginkább. A napkoronában található különböző hőmérsékletekre jó példát mutat a 13. kép, amelyen egyszerre látható a Fe XII színképvonalban sötét protuberancia és világos koronahurkok. Miután végigjártuk a Nap légköre teljes keresztmetszetét a fotoszférától a belső koronáig, láthatjuk, hogy alapvetően a fotoszférikus mágneses terek határozzák meg a légkör szerkezetét, mivel a kromoszféra és a korona ritka anyaga nem tudja befolyásolni a mágneses teret.

Tovább haladva kifelé, a LASCO képein a külső napkoronában lezajló változásokat lehet tanulmányozni. Mivel a SOHO messze van a földi légkörtől, szórt fény nincs, így valóban elég csak letakarni a fényes fotoszférát, és látható lesz a korona. A három koronográf közül a C1 a belső (1,1–3 Nap-sugár), a C2 a közepes (1,5–6) végül a C3 a külső (3,7–30 Nap-sugár) napkorona-tartományokat képezi le fehér fényben. Már a Skylab 1973-as megfigyelései óta ismert, hogy a napkorona nem olyan nyugodt hely, mint azt addig a szórványos napfogyatkozás-megfigyelések alapján gondolták. Ez különösen jól látszik a LASCO óránkénti megfigyeléseiből összeállított filmekben. Az állandó kifelé áramlásra kisebb-nagyobb *koronakitörések* (Coronal Mass Ejection, CME) rakódnak. Ezeket gyakran flerek okozzák, de elindíthat kitörést aktivizálódó protuberancia is, vagy a korona mágneses szerkezetének átrendeződése. A 12. kép egy fler által kiváltott CME-t mutat, amely a napkorong nyugati szélén zajlott (okozója az idei *Meteor csillagászati évkönyv* 140. oldalán bemutatott napfoltcsoportban lezajlott második nagy fler). A kép zajosságát a fler által kibocsátott protonok becsapódása okozta a fényérzékelő CCD-re. Nagyon fontosak az ún. *halo-CME-k*, amelyeknél a kitörés közvetlenül a Föld felé irányul, ezért a képeken mint a napkorong körül egyre táguló glória, *halo* látszik (15. kép). Ez biztos előjele a földi mágneses viharoknak, ilyen megfigyelések alapján többször sikerült egy-másfél nappal előrejelezni a zavarokat, amire eddig nem volt lehetőség. A naptevékenység növekedésével napjainkban egyre gyakrabban fordulnak elő koronakitörések, az egyik legutóbbi nagy CME június 1-jén zajlott (14. kép), ez éppen a Földdel átellenes irányba terjedt, ezért ránk nem volt hatással. A LASCO-val eddig több, mint 50 üstökösöt is felfedeztek. A 11. kép az 1996 karácsonyán a Napba zuhant üstökösöt mutatja, a 17. pedig az 1997 júniusi üstökös-ikreket megsemmisülésük előtt.

A Nap még távolabbi környezetét, a napszelet tanulmányozza a SWAN (Solar Wind ANisotropies), amelynek két érzékelője a SOHO két oldalán van elhelyezve, és a teljes égboltot leképezi, a Nap közvetlen környezete kivételével. A bolygóközi semleges hidrogén Lyman-alfa színképvonalát érzékeli. Ez a csillagközi térből származik, és semleges lévén, nem hat rá a napszél mágneses tere. Ugyanakkor ütközések révén kölcsönhatásba lép a napszél protonjaival, valamint a semleges H atomok szórják a Nap Lyman-alfa sugárzását. Így egyrészt meg lehet állapítani a napszél egyenletlenségeit, másrészt meg lehet határozni a csillagközi hidrogénáramlás (csillagközi szél) irányát és sebességét a színképvonal eltolódásából (18. kép). Mellékesen, a SWAN képeket készített a Hale-Bopp-üstököst körülvevő óriási hidrogénburokról is (16. kép).

Több részecskeedetektort is hordoz a SOHO a napszél és a galaktikus kozmikus sugárzás mérésére, ezek közül az ERNE egyik grafikonján mutatjuk be a galaktikus kozmikus sugárzás izotópposztételét és energiaeloszlását (19. kép).

A rendkívül sikeres SOHO egy fatális emberi hiba miatt komoly veszélybe került tavaly nyáron. A szokásos helyzet- és pályakorrekció során, 1998. jún. 25-én, elfelejtették beindítani az egyik, kímélés céljából kikapcsolt pörgettyűt, a működő másiknak az érzékenysége viszont tévedésből túl nagy értéken maradt. Az operátor, látva a szokatlanul nagy eltéréseket, hibásnak hitte, és kikapcsolta a működő pörgettyűt. A SOHO fedélzeti számítógépe ezután az álló pörgettyűhöz viszonyítva próbálta stabilizálni az űrszondát, ezáltal szabályozatlan forgásba hozva. Eközben a napelemtáblák éllel fordultak a Nap felé, az energiaellátás, és így a rádiókapcsolat is megszakadt. Az azonnal riasztott szakértők a telemetriai adatokból három hét alatt pontosan rekonstruálták az eseményeket, valamint azt is, hogy — mivel a forgástengely megőrzi térbeli helyzetét — kb. szeptemberre a SOHO olyan helyzetbe kerül, hogy a napelemek legalább részlegesen megvilágítást kapnak a Naptól, tehát van remény az újraélesztésre. Augusztus első napjaiban az arecibói 300 méteres rádiótávcsővel küldött radarjelekkel sikerült igazolni az addig csak feltételezett forgási irányt és sebességet, néhány nap múlva pedig felvenni a kapcsolatot a fedélzeti számítógéppel. Ezután egy hónap szünet következett, aminek során a napelemekből származó kevés energiát a fedélzeti telepek feltöltésére és a kormányfűvőkák üzemanyagául szolgáló megfagyott hidrazin felolvasztására használták. Szeptember 16-án az irányítóközpont ismét a Nap felé fordította a SOHO-t, szept. 25-re sikerült teljesen stabilizálni. Ezután megkezdődött a műszerek lassú, óvatos újraélesztése. Várakozáson felül, ezek túléltek a  $-120$ – $+100$  °C közt ingadozó hőmérsékleteket, mindegyik jól működött (az EIT még jobban is, mert a Fe XV csatornán elpárologott a tükörről egy, a képet zavaró szennyeződés). A három pörgettyűből egy maradt üzemképes. December 21-én ez is felmondta a szolgálatot, de a SOHO szakemberei már rutinosan oldották meg a feladatot. A fedélzeti számítógép átprogramozásával 1999. febr. 1-től már pörgettyűk nélkül tartja fenn stabilizált helyzetét a SOHO, és közvetíti kiváló felvételeit a napfizikusok és nem-napfizikus érdeklődők számára, reméljük, a 2000 közepére várt maximumban is.

KÁLMÁN BÉLA