

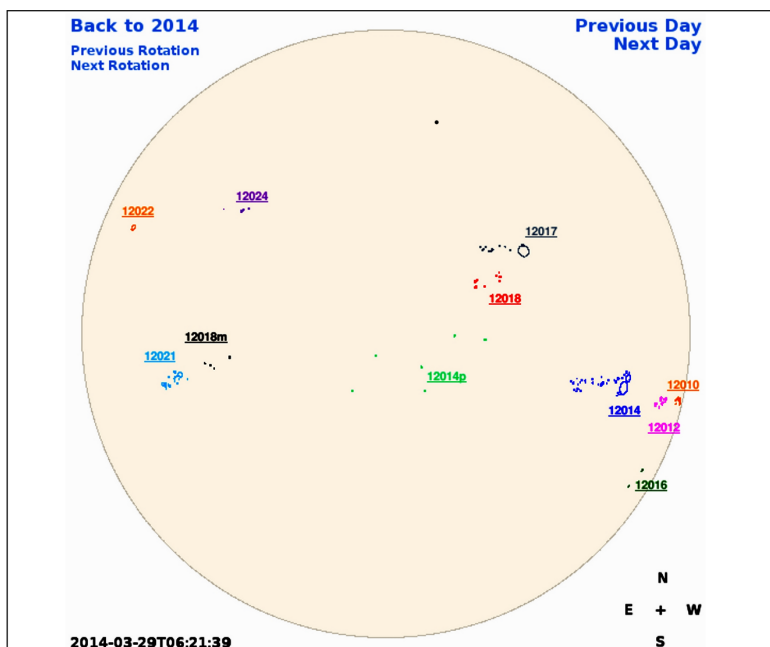
BARANYI TÜNDE

A napkitörések

Első rész

A Nap felszínét évszázadok óta vizsgálják a csillagászok látható (fehér) fényben rajzot vagy (1845, az első ilyen felvétel óta) fényképet készítve róla. Ezen észlelések alapján már nagyon sok fontos felfedezés született, és születik ma is a Napról, de ezzel a módszerrel a rajta lévő alakzatoknak csak egy része vizsgálható. A *naptevékenység jellemzői* közül így csak a *felszínnél sötétebb napfoltok*, a *fényesebb napfáklyák*, és igen ritka esetben egy-egy *napkitörés hatására létrejövő felszíni felfénylés* észlelhető.

Új típusú vizsgálati lehetőséggel bővült a csillagászok eszköztára 1814-ben, amikor *Joseph Fraunhofer* meghatározta a Nap spektrumában általa talált 350 vonal hullámhosszát. A spektrumvonalak vizsgálata információt nyújt az adott térszékben uralkodó hőmérsékletről, az ott található anyag sebességéről és a mágneses tér erősségéről. Azóta a különböző spektroszkópai eszközök és optikai szűrők a Nap teljesen új arcait teszik megfigyelhetővé, mivel a napspektrum különböző hullámhosszain (az egyes színképvonalak fényében) a naplégkör különböző magasságú és eltérő hőmérsékletű tartományai észlelhetők. Az utóbbi évtizedekben a Nap űrszondák fedélzetéről történő megfigyelésével lehetővé vált olyan hullámhosszakon is az észlelés, amelyeken a földi légkör elnyelő hatása miatt a földfelszínen nem lehetséges adatok gyűjtése. Alapvetően fontos, hogy minél több eszköz álljon rendelkezésre a vizsgálatokhoz, mert a kutatások szerint számos olyan jelenség van a Napon, amelynek a megértése és átfogó leírása megkívánja több, különböző hullámhosszon végzett, egyidejű észlelés feldolgozását. Különösen érvényes ez egy olyan rendkívül összetett eseménysor elemzésénél, mint a *napkitörés*, amely igen gyorsan zajlik, és nagy, inhomogén tartományra terjed ki. A Napon és a Napból kiáramló anyagban zajló komplex folyamatok vizsgálatára nagy időbeli, térbeli és spektrális felbontással csak akkor lehetséges, ha egy sor különféle műszer egyszerre irányítanak a jelenségre. Ilyen komplex vizsgálat megvalósíthatóságát mutatjuk be egy látványos esemény példáján, amelyen keresztül a



1. ábra. A Napon látható foltcsoportok sematikus rajza 2014. március 29-én az MTA CSFK CSI debreceni Napfizikai Observatóriumában mért adatok alapján. A vizsgált napkitörés a 12017-es számú foltcsoportban történt (Forrás: DHO)

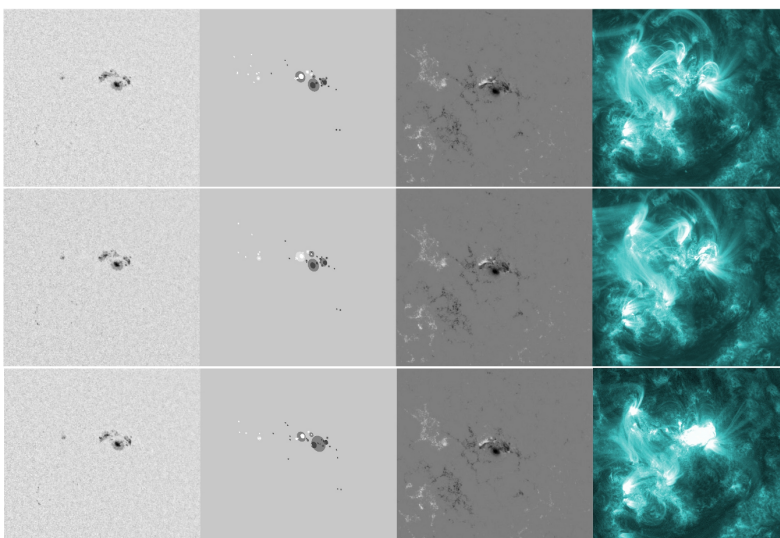
teljesség igénye nélkül ismertetjük a napfizikai folyamatok jobb megértését segítő űrszondákat és észlelési típusokat. Erre a célra azt a nagyon nagy erejű (X típusú) napkitörést (flert) választottam, amely 2014. március 29-én történt, és ez idáig ezt tartják a legtöbb mérőeszköz által észlelt ilyen eseménynek.

Az elmúlt években a napkutató űrszondák új generációját bocsátották fel, valamint új típusú földi berendezéseket telepítettek, amelyek a korábbiaknál is jobb vagy újabb fajta észleléseket tesznek lehetővé. Az eszközök egy része rendszeres időközönként fényképezi az egész napkorongot, míg mások egy kisebb, előre kijelölt részéről készítenek különösen nagy felbontású képeket. Ezért némi szerencse is szükséges ahhoz, hogy a lehető legtöbb műszer végezzen méréseket a Napnak éppen azon a részén, ahol a kitörés váratlanul bekövetkezik. A cikkben

az űrszondák fedélzetéről készített összes színes képet a részletek kiemelését szolgáló, tetszőlegesen választott hamis színnel utólag színezték ki. A bemutatott esetek többségében a vizsgált hullámhossz nem is esik a látható tartományba, így nincsen a szokásos értelemben vett színe. Ha a látható tartományban történik egy észlelés, általában akkor sem szoktak a kutatáshoz színes képeket készíteni, mert a tudományos információt elsősorban a detektorra eső fény intenzitásának mértéke hordozza. A színes detektorokban szokásos három alapszínre bontás pedig elkerülhetetlenül torzítja az intenzitásinformációt, és rontja a térbeli felbontást. A színek tulajdonképpen az elektromágneses sugárzás spektrumának egy-egy szűkebb hullámhossztartományát jelentik, amelyek kiválasztását a távcsőre szerelt, megfelelő optikai szűrők vagy spektroszkópai eszközök alkalmazásával

lehet a legjobban megoldani. A beérkező sugárzás nagyságát pedig a szürke skálán hozzárendelhető árnyalat jellemzi az eredeti észleléseken.

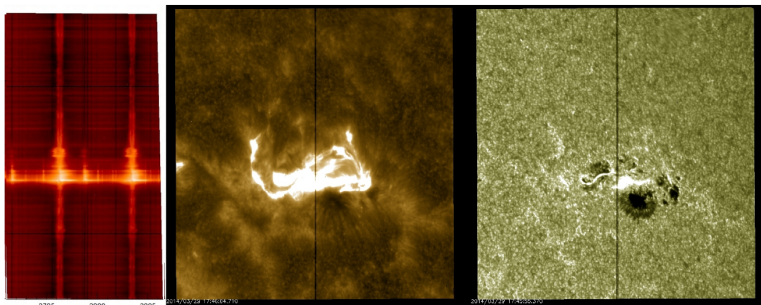
A Nap felszínének tekinthető, kb. 6000 kelvin hőmérsékletű fotoszférában (a Napnak azon részén, amelyiket hegesztőszeművegen keresztül is láthatunk) rendszerint foltok láthatók, amelyek foltcsoportokba rendeződnek. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézetének debreceni Napfizikai Observatóriumában (angol nevének rövidítésével DHO) rendszeresen méri a foltok pozícióját és területét, amelyekkel a foltcsoportok fejlődése követhető. Az Observatórium honlapjáról vett 1. ábra mutatja az adott napon földi észlelésen (Kanzelhöhe, Ausztria) mért foltok adatai alapján készített napkorong-rajzot az eltérő színekkel jelzett foltcsoportok sorszámaival. A fler a 12017-es sorszámu foltcsoportban történt 2014. március 29-én világidőben (UT) 17 óra 35 perc



2. ábra. A 12017-es sorszámu foltcsoport fejlődése a flerig tartó három órán belül a 2014. márc. 29-én a 16:00, 17:00 és 18:00 órákor (UT) készült észlelések alapján a fotoszférában (balról jobbra HMI kontinuum, HMIID sematikus rajz, HMI magnetogram) és a koronában (AIA) (Forrás: NASA/SDO/HMI&AIA és DHO)

és 54 perc között. Lágyröntgen tartományban (1-8 Å és 0,5-4,0 Å közötti két sávban) a NOAA GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) műholdak röntgenérzékelőinek mérése szerint a fler 17 óra 48 perckor érte el az csúcscsúszintjét. Ez alapján az esemény szokásos jelzése SOL2014-03-29T17:48.

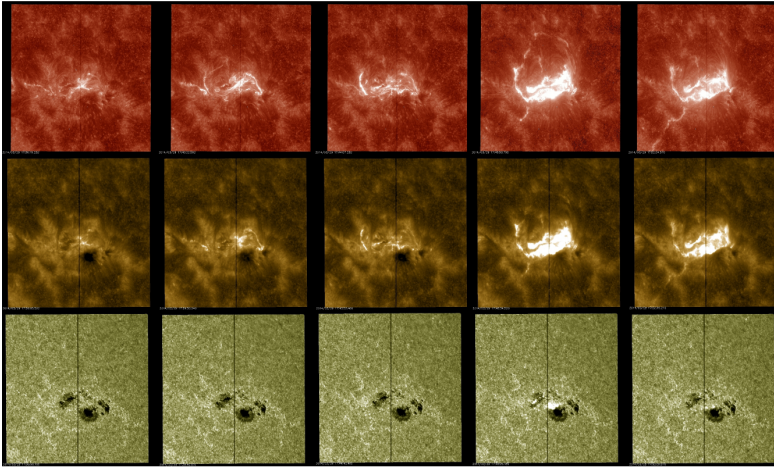
A 2. ábrán négyféle kinagyított kép látható ennek a foltcsoportnak fejlődéséről a fler körüli órákban a NASA által 2010 óta működtetett Solar Dynamics



3. ábra. Balra: IRIS spektrum az ionizált magnézium (Mg II) h és k vonala körül 20 Å-ös sávban 17:46:13.98 UT időpontban a fler maximuma előtt. Középen: IRIS réskép a Mg II k vonal közepe (2796 Å) körül 17:46:04 UT-kor. Jobbra: IRIS réskép a Mg II h vonal 2832 Å körüli szárnyában 17:45:55 UT-kor (Forrás: NASA/IRIS)

Observatory (SDO) műhold észleléseire alapozva. Egy-egy sor azonos időponthoz tartozó képet tartalmaz ugyanazt a területet kivágva az egész-korong-észlelésből, a legfelső sor 16 órákor, a középső 17 órákor, az utolsó 18 órákor (nem sokkal a fler után) készült. Az első képet a sor-

szín irányába befelé mutató erővonalakat jelentenek, míg a világos árnyalatok és a fehér szín a pozitív polarítású területeket mutatják a Nap felszínén, amelyek a napfelszín irányából kifelé mutató erővonalakat jelölnek. Minél nagyobb az eltérés a háttér szürke árnyalatától, annál erősebb a mágneses tér. Az ilyen típusú képek a magnetogramok, amelyek vizsgálata információkat nyújt a foltokban és a környező fotoszférikus területeken lévő mágneses térben bekövetkező változásokról. A második kép a napfoltok pozíció-, terület- és mágneses polaritás-adatainak felhasználásával készült sematikus rajz, ami a Napfizikai Observatóriumában publikált adatok (SDO/HMI-Debrecen Data, HMIID) áttekinthetőségét segíti. Ezeknek az adatoknak alapján vizsgálható, hogy flerhez vezető fejlődési folyamatoknak milyen jelei vannak a fotoszférában. A negyedik oszlopban az SDO Atmospheric Imaging Assembly (AIA) nevű műszerével készült képek látszanak, ezek az extrém ultraviolet hullámhossztartományba eső, a földről nem észlelhető 171 Å körüli szűk sávban (1 Å = 0,1 nm) készültek. Ezen a hullámhosszon jól látszik a nap légkörnek a napfelszín fölötti, 2000–3000 km-nél magasabban elhelyezkedő rétege, a korona. A napkorona anyaga legnagyobb részben különféle egyszerűen vagy többszörösen ionizált gázok és elektronok keveréke (plazma). A korona plazmaanyaga a lentebb rétegekéhez képest igen ritka, ezért fény a fotoszféráé mellett elenyésző, így csak olyan hullámhosszakon van esély megfigyelésére, amelyeken a fotoszféra sugárzása a koronához képest elhanyagolható. A 171 Å hullámhosszú sugárzás például ilyen, mert a nyolcszorosan ionizált vas (Fe IX) egyik atomi átmenetéhez tartozik, amelynek a létrejöttéhez kb. 1 millió K ionizációs hőmérséklet szükséges, és ez a koronára jellemző hőmérsékleti tartományba esik. Ezen a képen az ellentétes polarítású foltokat összekötő mágneses fluxuscsöveket lát-



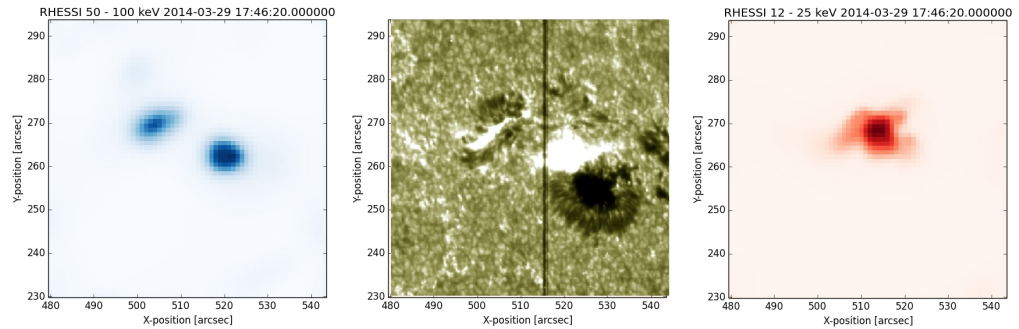
4. ábra. IRIS résképek a fler idején 17 óra 36, 40, 44, 48 és 52 perc körüli észleléssel. A felső sor közepes hullámhossza 1400 Å (65000 K hőmérséklet), a középső 2796 Å (15000 K), az alsó 2832 Å (6000 K) (Forrás: NASA/IRIS)

hatóvá teszi az erővonalak mentén mozgó, a környező koronánál sűrűbb plazma. Az egymás alatt lévő képeket összehasonlítva látható, hogy a koronában sokkal látványosabb, dinamikusabb a változás, mint a fotoszférában. Maga a fler úgy jön létre, hogy a mágneses fluxuscsovek struktúrájának folyamatosan zajló változása során olyan instabil állapot alakul ki, amelyben a mágneses erővonalak átkötődhetnek a koronában. Az átkötődés (rekonnekció) során rövid idő alatt igen nagy mágneses energia szabadul fel, ami az adott térrészben lévő részecskék mozgási energiájává alakul át. A részecskék egy része lefelé záporozik, és felfúti az alsóbb rétegeket (elsősorban a korona alatti kromoszférát, de esetenként a fotoszférát is), másik része pedig nagy sebességgel kifelé áramlik.

Az ultraibolya tartományban az IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) műhold nagy (0,33-0,4 ívmásodperc) térbeli, ugyancsak nagy (~ 20 s) időbeli és spektrális felbontással is éppen ezt a területet vizsgálta a fler idején. Az IRIS látómezőjébe csak körülbelül egy foltcsoportnyi terület fér bele, de szerencsére a fler idején éppen akkor erre a foltcsoportra volt irányítva a műszer, így ez volt az első nagy fler, amelyet észlelt a 2013-as indítása óta. Az IRIS a távoli-ultraibolyában tud adatokat gyűjteni a 1332-1358 Å és 1389-1407 Å között, va-

lamint a közeli-ultraibolyában 2783-2835 Å között. A távcső a szűrőkön keresztül beérkező fényt egy olyan felületre képezi le, amelyen egy optikai rés van. E rés után található a spektrográf, ami a fényt hullámhossz szerint felbontja, és az így keletkezett spektrum minden hullámhosszon a résre eső napterület monokromatikus képét adja a detektoron. Az észlelt spektrumtartományban több olyan fontos színekponton található, amelyek vizsgálata kulcsfontosságú a Napon zajló folyamatok megértésében, és elsősorban a kromoszféráról valamint a kromoszféra

net. A különböző spektrumvonalakat létrehozó atomi átmenetek más-más hőmérsékleti tartományban alakulnak ki, ezért a jól megválasztott spektrumvonalak tanulmányozása feltárja a Nap adott hőmérsékletű rétegeinek jellemzőit. 1334 Å és 1336 Å körül a Ca II-nak (egyszeresen ionizált kalciumnak) van két erős emissziós (kibocsátási) vonala, amelyek a felső kromoszférában és az átmeneti réteg alján alakulnak ki 30000 K hőmérséklet körül. 1350 Å-nél hosszabb hullámhosszaknál találjuk a Cl I, O I, C I ionizálatlan atomok vonalait, amelyek az alsó és középső kromoszférában keletkeznek. Az ionizált magnézium (Mg II k és h jelzésű) két erős vonala 2796 Å-nél és 2803 Å-nél észlelhető, amelyek a felső fotoszférától a felső kromoszféráig tartó térrészben alakulnak ki. E vonalakhoz közeli hullámhossztartományban találunk fotoszferikus eredetű vonalakat is. A Si IV két erős emissziós vonala 1394 Å és 1403 Å körül található, amelyek az átmeneti réteg kb. 65000 K hőmérsékletű részében keletkeznek. Az 1403 Å körüli tartományban viszont olyan gyenge O IV vonalak is észlelhetők, amelyek kb. 150000 K hőmérsékleten alakulhatnak ki, és alkalmassak az átmeneti réteg sűrűségének meghatározására. Ez a három jól kiválasztott UV hullámhossztartomány alkalmas arra, hogy a felső fotoszférától az átmeneti rétegig különböző magasságokban egyidejű információt szerezzünk a Napon zajló folyamatokról. A műszer arra is alkalmas, hogy a rés helyzetét a foltcsoporton belül



5. ábra. Balra: A RHESSI észlelése a keményröntgen tartományban a fler maximumához közeli időpontban a kromoszférában látszó forró talppontokról. Középen: Az IRIS 2832 Å-ös, közel egyidejű méretarányos résképe. Jobbra: A RHESSI észlelése a talppontokhoz tartozó mágneses hurok tetejénél kialakult forró területekről (Forrás: NASA/RHESSI és NASA/IRIS)

és a korona közötti vékony átmeneti rétegről (transition region, TR) adnak információt. A TR azért jelentős, mert itt nagyon sok fizikai jellemző értéke ugrásszerűen megváltozik. Például ebben a rétegben történik a kromoszféra kb. 20000 kelvines hőmérséklete és a korona kb. 1 millió fokos hőmérséklete közötti átme-

gyors egymásutánban változtatása, és ezzel az észlelt területet szkennelje, és így vizsgálatot egy résnyinél nagyobb térrészre is kiterjessze. A 3. ábrán az első kép azt a spektrumot mutatja, amelyen a Mg II k és h fényes emissziós vonala látszik a 20 Å-nyi környezetével a fler maximuma előtt két perccel. Ez a két vonal

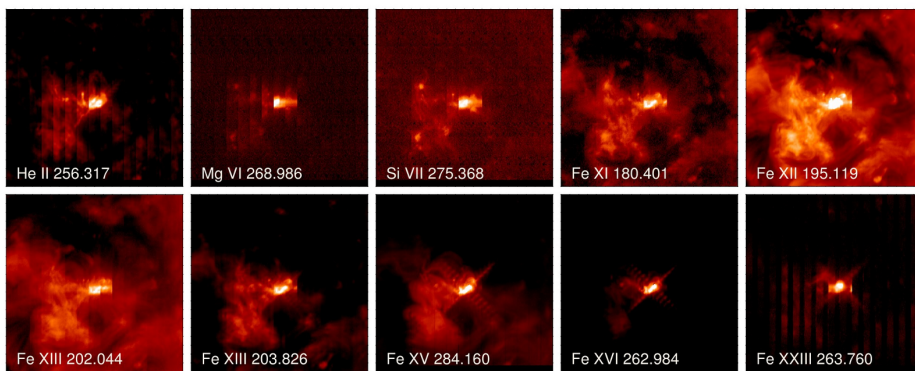
a függőleges rés mentén szinte mindenütt fényesebb a környezeténél, de középtájtól kicsit lejjebb egy vízszintes sor mentén a legfényesebb. Ez az a hely, ahol a fler intenzív felfénylést okoz a résen. Itt szinte mindegyik sáv szélességű szűrőn keresztül fényképezik a résre eső képet. Az Mg II k vonal közepe (2796 Å) körül valamint a h vonal 2832 Å körüli szárnyában 4 Å áteresztésű szűrővel készült képeken látjuk a Nap 15000 K valamint 6000 K

Annak érdekében, hogy láthassuk, pontosan milyen terület is esik a spektrográf részére, négy, viszonylag széles (több Å) sáv szélességű szűrőn keresztül fényképezik a résre eső képet. Az Mg II k vonal közepe (2796 Å) körül valamint a h vonal 2832 Å körüli szárnyában 4 Å áteresztésű szűrővel készült képeken látjuk a Nap 15000 K valamint 6000 K

melléjük helyezve térben és időben követhetjük a fler történetét. A 4. ábra mutatja a háromféle rés képen a fler lefolyását. A felső sortól az alsó sor felé csökken a hőmérséklet (65000 K, 15000 K és 6000 K) és a napfelszíntől mért magasság, egy soron belül pedig balról jobbra telik az idő. A soronkénti öt kép úgy lett kiválasztva, hogy jól lefedje a fler időtartamát 4 percenkénti mintavétellel 17 óra 36, 40, 44, 48 és 52 perc körüli észleléssel. A képeken való tájékozódást nagyban segíti, hogy minden hullámhosszon a réstől jobbra eső két nagyobb folt sötét umbra része viszonylag jól azonosítható. Látszik, hogy felső fotoszféra szintjére csak a maximum körüli néhány perces időszakban jut le a koronából lezaporozó részecskék által okozott fűtés hatása, és lényegesen kisebb területre is

külső röntgensugárzást és a forró talp-pontokból származó sugárzást egyaránt észleli. Az 5. ábrán az első kép mutatja a RHESSI azon észlelését a keményröntgen tartományban, amelyet a fler maximumához közeli időpontban készített a felgyorsított elektronok által felfűtött kromoszféráról. A harmadik kép a talp-pontokhoz tartozó mágneses hurok tetejénél kialakult forró területet mutatja magasan a koronában, ahol kb. 25 millió K a hőmérséklet. A középső kép összehasonlításra szolgál: az IRIS 2832 Å-ös, közel egyidejű rés képek azonos méretű részletét mutatja, mint amelyik területről a RHESSI-észlelések készültek. A három kép alapján felmérhető, hogy hol és hogyan helyezkedik el a fler által fűtött mágneses hurok.

A JAXA japán űrügynökség és a NASA közös napfizikai műholdja, a 2006-ban felbocsátott Hinode (más néven Solar-B) fedélzetén is háromféle műszer észlelte a flert. Az EUV Imaging Spectrometer (EIS) nevű műszer az IRIS-hez hasonlóan a napkorong egy kiválasztott részét vizsgálja. Az egyik fontos különbség, hogy az EIS olyan hullámhosszavokban (170-210 Å és 250-290 Å) észlel, amelyek az extrém ultraióbolya tartományba esnek, és az itt található vonalakban készített monokromatikus képeket.



6. ábra. A fler és környékének képe különböző színkép vonalakra korlátozott hullámhosszavokban az extrém ultraióbolya tartományban. Az egymást követő képek emelkedő magasságban készített metszetképeknek tekinthetők a kromoszféráról a korona kb. 5000 km-es magasságig terjedő tartományáig (Forrás: JAXA/NASA/Hinode/EIS)

hőmérsékletű rétegeit. A 3. ábra középső képén látható az észlelt terület a k vonal közepére állított szűrőn keresztül, a harmadik képen pedig a h vonal szárnyában bejövő fényben a spektrum elkészítésének idejéhez nagyon közeli időpontban. Ezen a két képen látszik a rés helyzete (függőleges fekete vonal a kép közepén) a Nap kromoszférájában és fotoszférájában lévő alakzatokhoz viszonyítva. A fehéren fénylő területek a fler során betáplált energia miatt látszanak erős emisszióban. Abban a vízszintes sorban, ahol a rés a mindkét képen fehér területre esik, a bal oldali képen minden spektrumvonal emissziós. Ez azt jelenti, hogy abban a térrészben a teljes vizsgált magasságtartományban gerjesztett állapotba kerülnek az atomok a napkitörés miatt.

Hasonló résképek készülnek 1335 Å és 1400 Å körüli tartományokban is 40 Å sáv szélességű szűrővel a nap légkör 30000 K-es és a 65000 K-es alakzatainak vizsgálatára. A különböző hullámhosszakon készült résképeket egymás alá téve, majd az időben egymást követő képeket sorban

terjed ki, mint a Nap felsőbb atmoszferikus rétegeiben.

A fler által felgyorsított nagy energiájú elektronok először nekiütköznek az alattuk levő mágneses hurkoknak, majd azok mentén lezaporoznak az alsóbb nap légkörbe, felfűtve a talp-pontokat. Az alsó kromoszférában és felső fotoszférában látszó fényes területek azoknak a mágneses hurkoknak a talp-pontjai, amelyek fölött a koronában mágneses átkötődés történt a fler kezdetekor. Ezek a rendkívül forró területek olyan nagy energiájú sugárzást bocsátanak ki, amely már a röntgentartományba esik, rendszerint annak is a kemény (nagyobb energiájú) részébe. A felforrósodott kromoszférikus anyag felfelé áramlik, és megtölti a mágneses hurkot lágyröntgenben sugárzó anyaggal. A NASA 2002-ben felbocsátott RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) műholdja a lágy- és keményröntgen tartomány határvidékétől a gamma-sugárzás tartományáig tud mérni, így a hurok tetejénél kiala-

peket. Ezek a vonalak a 100000 K és a 15 millió K közötti hőmérséklet-tartományt fedik le a kromoszféráról a koronáig a 6. ábrán látható, emelkedő hőmérséklet szerinti sorrendben. Ezek a képek olyanok, mintha különböző magasságokban vékony metszeteket készítenénk a fler által érintett térrészről, így együtt lehetővé teszik, hogy a flerről háromdimenziós modellt készítsünk. A 6. ábra képeinek látómezeje a 2. ábrához hasonló, tehát a fler által gerjesztett terület sokkal kisebbnek látszik, mint a 4. ábrán. Ennek ellenére a legtöbb képen jól kivehető, hogy a fényes terület alakja fekvő S betűre hasonlít, ami a 4. ábrán a felső sor második képén látszik a legjobban. Ez az S (vagy fordított S) alak a mágneses hurkok megcsavarodott szerkezetéről árulkodik. A kutatási eredmények szerint a fler olyan területekről indul ki, ahol a mágneses helicitásnak nevezett csavarodás mértéke a térben nagyon gyorsan változik, és közel van az ellentétes irányban csavarodó fluxuskötegek térrészéhez.