

VIHAROK A VILÁGŪRBEN

Gombosi Tamás – University of Michigan, USA

Kecskeméty Károly – MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

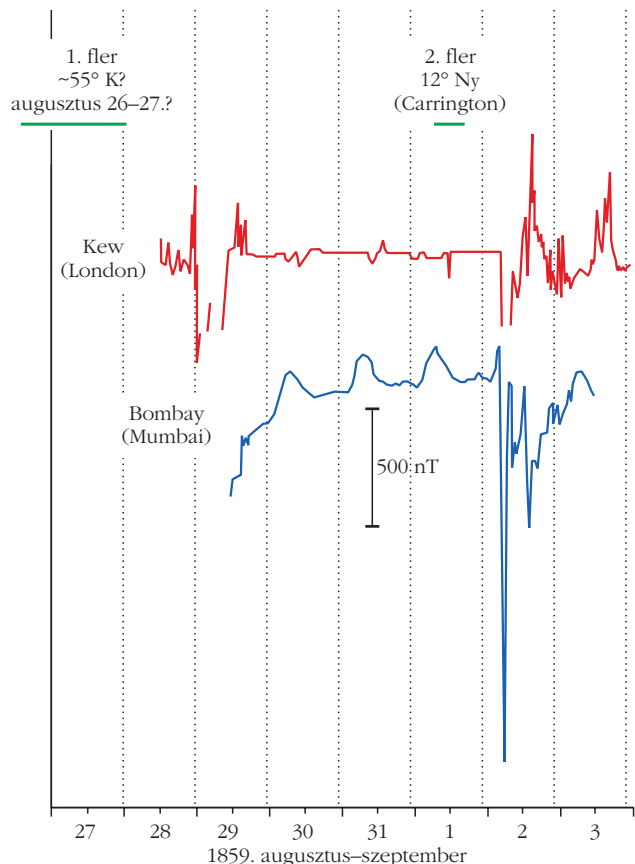
Hogyan jöhetnek létre viharok a világűrben, hiszen a bolygóközi tér a hétköznapi elképzelés szerint üres? Az űrkorszak kezdete előtt még a legtöbb fizikus és csillagász sem gondolta másképp. De a természet mindig okosabb és ötletesebb, mint mi: mindig kitalál valamit, ami – a kutatókat megszegeyénítve – minden elméletet megcáfol.

A bolygóközi tér valójában nem üres, igaz, anyaga 25 nagyságrenddel ritkább, mint például a földi levegő, sőt még annál is 11 nagyságrenddel ritkább, mint az a vákuum, amit a Földön – a CERN LHC gyorsítójában – jelenleg egyáltalán képesek vagyunk előállítani. Az űrt kitöltő gáz teljesen ionizált, plazma halmazállapotú. A Föld tulajdonképpen a Nap légkörében kering, amely nem stabil, mivel külső tartományából, a napfogyatkozások idején előtűnő napkoronából folyamatosan elszökik az anyag. A híg, nagy sebességgel kifelé áramló mágnesezett forró plazma, a napszél betölti a Naprendszer belső tartományait, a helioszférát. A Nap az állandó elektromágneses sugárzáson és a napszálon kívül időnként sűrűbb plazmafelhőket is kibocsát, amelyek akár 1 nap alatt is elérhetik a Földet. A Nap aktivitásának más megjelenési formáit a látható fényben észlelhető napfoltok és az ezek környékén – elsősorban ultraibolya- és röntgentartományban – felvillanó flerek képviselik. Ezzel minden adott a földi időjárással való analógiához, amelynek alapján a Nap–Föld-kapcsolatok jelenségköre az űridőjárás nevet kapta. A mai definíció szerint az űridőjárás olyan körülményeket jelent a Napon, a napszél-

ben, a magnetoszférában, az ionoszférában, amelyek befolyásolhatják a technológiai rendszereket és veszélyeztethetik az emberi életet és egészséget.

Az űridőjárás első gyakorlati megnyilvánulását 1859-ben élte át civilizációnk. Két angol amatőr csillagász, *Richard Carrington* és *Richard Hodgson* szeptember 1-jén egymástól függetlenül ugyanazt a nagy napfoltcsoportot figyelte meg, amikor a foltcsoporton belül erős kifényesedésre figyeltek fel. Carrington később szerzett tudomást arról, hogy az angliai Kew Observatórium földmágneses észleléseiben szeptember 2-án *Balfour Stewart* a mágneses térerősség hirtelen lecsökkenését és irányváltozását észlelte (az *1. ábra* a földi mágneses tér változását mutatja Londonban és Bombayben két, egymást követő napkitörés során). A mágneses vihar jelensége már korábban ismert volt: *Alexander von Humboldt* 1806. december 21-én észrevette, hogy egy látványos sarki fény idején iránytűje zavart mutatott a mágneses térben. 1859. szeptember 2-án reggelre a zavarok a sarki fénnel együtt eltűntek. Később kiderült, hogy a mágneses viharral egyidejűleg nemcsak rendkívül erős sarki

1. ábra. A földmágneses térerősség változása a Carrington-esemény során.



A cikk *Gombosi Tamásnak* az MTA külső tagjaként 2017. április 26-án elhangzott székfoglaló előadására alapján készült.



Gombosi Tamás az MTA külső tagja, 1970 és 1985 között az MTA KFKI tudományos munkatársa, illetve tanácsadója, 1987 óta a Michigan Egyetem űrfizika-professzora. Kutatásait az űridőjárás témakörében végzi, megalapította az egyetem Űrkörnyezetmodellező Központját. Munkatársával együtt kifejlesztették az első globális űrkörnyezetmodellt, amelyet a NASA és az Egyesült Államok űridőjárás-előrejelző szolgálata is használ.



Kecskeméty Károly 1974-ben végzett az ELTE-n fizikusként, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatási területe az űridőjárás, szoláris kozmikus sugárzás, az üstökösök plazmakörnyezete. Társkutató többek között a SOHO, STEREO, CLUSTER és a BepiColombo űrmissziókban.

fény jelent meg szokatlanul alacsony földrajzi szélességeken (például a Karib-szigeteken és Kolumbiában), hanem a földi távirók is „megőrültek”. A híradások szerint szikrák csaptak ki a gépekből, amelyek meggyújtották a távirópapírt és megégették a gépeket. A gépek még akkor is órákon át működtek, miután őket lekapcsolták az áramforrásról. Az elektromágneses indukció jelenségét akkor még nem értették, és a korabeli sajtó arról írt, hogy a távirók „menyői erőforrást” használtak. Carrington arra következtetett, hogy a három jelenség összefügg, és a Napon észlelt jelenségnek közvetlen hatása lehet a Földre, ezzel felfedezte az űridőjárást.

A földmágneses viharok jelenségére *Chapman* és *Ferraro* 1931-ben adta meg a helyes magyarázatot. Feltételezésük szerint, amikor a Napon egy fler jelenik meg, akkor a Nap az elektromágneses sugárzással egyidejűleg egy plazmafelhőt is kibocsát (ezt nevezzük ma koronakitörésnek), amely a Földet szelintük 113 nap alatt éri el. A magyarázat ma is megállja a helyét, a plazmafelhő azonban sokkal gyorsabban mozog a feltételezetténél, csak 1-5 napra van szüksége, hogy elérje a Föld pályáját. Azonban még mindig nem volt nyilvánvaló, hogy létezik-e közeg a Nap és a Föld között, amelyben ez a plazmafelhő terjed. *Kristian Birkeland* norvég kutató már 1913-ban feltételezte, hogy az űrt „elektronok és mindenféle elektromos ionok töltik be”. *Eugene Parker* ismerte fel, hogy miután a napkorona nem lehet hidrosztatikus egyensúlyban a Naptól távol, és hogy Chapman napkorona hővezetés-számításai, illetve *Biermann* üstökösöcsőva-megfigyelései a Napból származó állandó plazmaárammal magyarázhatók, amelyet napszélnek nevezett el. Parker az 1950-es évek közepén dolgozta ki a szuperszonikus napszél elméletét, és mutatta meg, hogy a Nap kifelé gyengülő gravitációs tere a szubszonikus kiáramló plazmára úgy hat, mint a rakéták Laval-fűvókája: szuperszonikusra gyorsítja az áramlást. Azt is megmutatta, hogy a napszél mágneses terének arkhimédészi spirál¹ alakúnak kell lennie. Az elméleti jóslatok helyességét a napszél 1959-ben történt első kísérleti megfigyelése (*Konstantin Gringauz* a Luna-1 űrszonda mérései alapján) bizonyította be.

Az égi jelenségek több ízben, jelentősen befolyásolták a történelem alakulását. Ha hihetünk Hérodotosznak, a Thalész által megjósolt, i. e. 585-ben a mai Törökország területének keleti részén megfigyelt napfogyatkozás például a médek és a lüdök között 6 éve tartó háborúnak vetett véget. Nemrégén került csak

nyilvánosságra [1] az a tény, hogy még 1967-ben, a hidegháború idején egy űridőjárási esemény miatt kis híján kitört a harmadik világháború. Május 23-án ugyanis az amerikai Ballistic Missile Early Warning System radarrendszer Északi-sark környékén működő, a szovjet rakéták észlelésére szolgáló radarjait ismeretlen zavaró források használhatatlanná tették. Annak ellenére, hogy a Szovjetunió nem lőtt ki egyetlen rakétát sem, a hidegháború idején az előrejelző radarok szándékos használhatatlanná tétele háborús cselekménynek számított. Szerencsére a meteorológiával, vízügygel, geodéziával kapcsolatos tevékenységeket felügyelő amerikai Environmental Science Services Administration (a NOAA – Légkör és Óceán Ügynökség elődje) már napok óta követte a szokatlan napfolttevékenységet, és időben riasztotta a légierőt a radarokat zavaró napkitörésre.

Az űridőjárást alakító fő tényezők

Napszél

Csillagunk légkörében felfelé haladva a hőmérséklet rohamosan emelkedik, a fotoszféra 5800 K értékétől a napkoronában néhány ezer km-en belül 2 millió kelvint ér el. A napkorona nem stabil, a gravitáció és az intersztelláris közeg nyomása nem képes az ionizált légkört a Naphoz kötni, belőle folyamatosan, hatalmas sebességgel áramlik ki a napszélnek nevezett forró plazma, és tölti be a helioszférát. A plazma néhány millió km-en belül eléri vége sebességét, a Nap egyenlítője körüli övben lassúbb és változókényebb (250–750 km/s), a sarkok közelében gyorsabb (~800 km/s) és egyenletesebb. A gyors napszél a koronában megfigyelhető sötétebb koronalyukakból ered. Az áramlás a lokális hanghullámoknál és Alfven-hullámoknál is gyorsabb. A plazmában levő ionok (döntő többségben protonok) sűrűsége a Föld pályájánál átlagosan 3-6 részecske/cm³. A napszélplazma termikus egyensúlyban van, a lassú napszélben a protonok hőmérséklete átlagosan 100 000 K körüli, az elektronoké ennél körülbelül 50%-kal magasabb. A kis sűrűség miatt a részecskék Coulomb-szóródása elhanyagolhatóan ritka, az ütközési szabad úthossz a földpályánál eléri a 10⁸ km-t, így a plazma gyakorlatilag ütközésmentes. A napszél mintegy buborékot fúj a még ritkább csillagközi plazmába, mintegy 100 Nap-Föld-távolságig szuperszonikusán áramlik, ott lelassul és lökéshullám alakul ki.

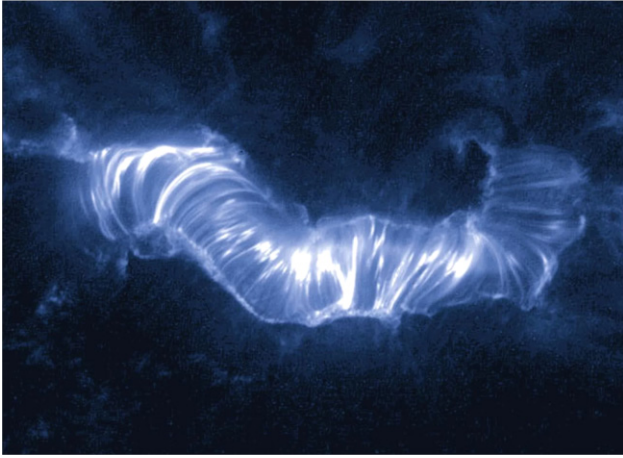
A Nap mágneses tere

Csillagunk globálisan dipólus jellegű mágneses terét a benne működő mágneses dinamó hozza létre. A dinamó alapja az, hogy a globális tér egy, a szélességi körökkel párhuzamos és egy meridionális irányú komponensre bontható. A két összetevő a Nap aktivitási ciklusa folyamán egymásba alakul át, amelyben a különböző szélességeken eltérő forgási sebessége (differenciális rotáció) fontos szerepet játszik. Az északi és déli féltekén a mágneses polaritás ellentétes,

¹ Az arkhimédészi spirál olyan spirális síkgörbe, amely azon pontok mértani helye, amelyeket mozgása során egy rögzített ponttól állandó sebességgel mozgó és ugyanazon rögzített pont körül egyenletes szögsebességgel forgó pont pillanatnyilag elfoglal. Ezt az $(r; \phi)$ polárkoordinátákkal a következő egyenlet is leírja:

$$r = a + b\phi,$$

ahol a és b valós számok. Az a paraméter megváltoztatása elfordítja a pólus körül a görbét, a b paramétertől pedig a sorban következő fordulatok közötti távolság függ. (Wikipedia)



2. ábra. Mágneses hurkokból álló árkád a 2000. július 14-i fler felvételén a TRACE műhold felvételén (NASA).

a globális tér átlagosan 11 évenként megfordul. A napszél nagy elektromos vezetőképessége révén magával ragadja a mágneses teret, és a Nap forgása folytán egy arkhimédészi spirál formájú mágneses teret alakít ki a helioszférában. Az északi és déli polaritású térrészt elválasztó felület hullámos áramlepel, amelynek hullámossága a napaktivitással növekszik.

Naptevékenység

Az aktív tartományokban, amelyeket a Nap felszínén napfoltokként látunk, a globális mágneses térnél sokkal erősebb lokális mágneses terek alakulnak ki. A napfoltokat kétféle mágneses polaritás jellemzi, az ellentétes polaritású napfoltokat összekötő mágneses fluxuscsovek között pedig időnként átkötődés jön létre, amelynek révén hatalmas mágneses energia szabadul fel, több millió fokra hevítve a plazmát. A köznyelvben napkitörésnek nevezett jelenség egymással nem szigorúan összefüggő megnyilvánulásai a flerek, az eruptív protuberanciák, a koronakitörések és a nagy energiájú töltött részecskék kibocsátása.

Fler

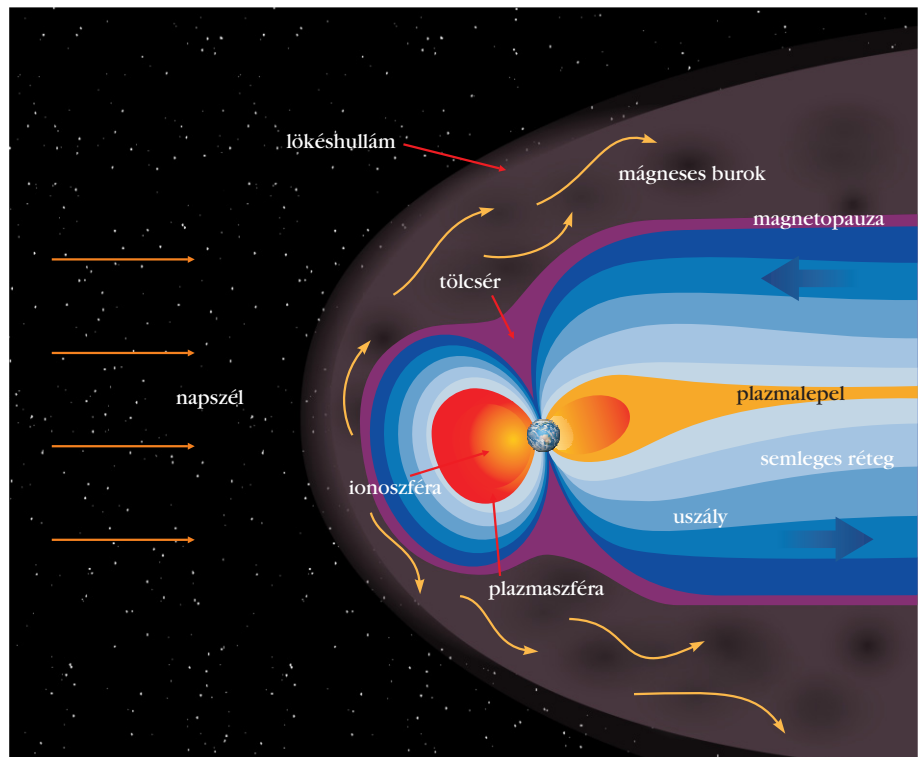
A plazmában létrejövő instabilitás erős, koncentrált ki-fényesedést hoz létre a fotoszférában igen széles elektromágneses spektrumban, a rádióhullámoktól kezdve egészen a röntgen- és gammasugárzásig (2. ábra). A jelenség többnyire 10 perc és 1 óra közti idő alatt zajlik le. A legnagyobb flerek összenergiája meghaladja a 10^{25} J értéket. A flerekben felszabaduló mágneses energia jelentős része

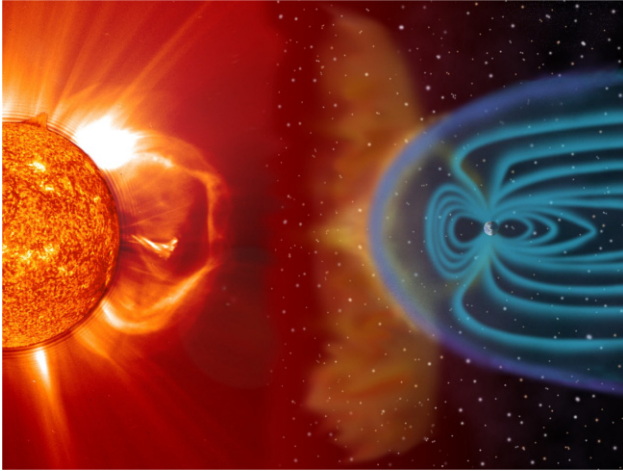
ionok és elektronok felgyorsítására fordítódik, az ionok igen nagy, 10 GeV energiát is elérhetnek. A részecskék fluxusának akár 3-5 napig tartó sok nagyságrendű megnövekedését *szoláris energikus részecskeeseménynek* (solar energetic particle – SEP – event) nevezzük. A *protuberanciák* (prominence) az aktív területek felett lebegő, a környezetüknél sűrűbb és hidegebb felhők egy része eruptív: gyorsulva felemelkedik és elhagyja a Napot. A fentiekkel gyakran együtt, de nem teljesen korreláltnak mennek végbe a *koronakitörések* (coronal mass ejection, CME). Ezek során egy-egy nagy plazmacsomag növekvő sebességgel mozog felfelé, amit az tesz lehetővé, hogy az aktív tartomány fölött elhelyezkedő mágneses fluxuscsovek elszakadnak az alattuk levőktől. A plazmafelhő végül elhagyja a Napot, és nagy, esetenként a napszélnél jóval nagyobb (akár 2500 km/s) sebességet elérve jut ki a bolygóközi térbe (lásd a *címlapot*). A felfűvődő plazmacsomag hurokszerű mágneses fluxuscsoveket hoz létre, amelyek talppontjai a koronában vannak. A Nap aktivitása közel periodikusan változik, két minimum közötti ciklusa átlagosan 11 év hosszúságú. A maximum idején történik meg a polaritásváltás, így a teljes ciklus 22 éves. A jelenlegi, 24. napciklus 2013-ban érte el maximumát, azóta a naptevékenység csökken a 2020 környékére várható minimumig.

A Föld magnetoszférája

Ez a Föld körül kialakuló plazmatartomány (3. ábra). A Föld dipólus mágneses tere a napszéllel való kölcsönhatás következtében módosul: a nappali oldalon összenyomódik, az éjszakai oldalon csóva alakul ki.

3. ábra. A földi magnetoszféra tartományai.





4. ábra. Koronakitörés lökéshulláma eléri a magnetoszférát (NASA).

Mi történik, amikor a Föld űrviharba kerül?

A napszélben terjedő tranziens struktúrák, koronakitörések, nagy sebességű nyalábok, lökéshullámok, szakadási felületek megzavarják a bolygóközi mágneses teret, és kölcsönhatásba lépnek a magnetoszférával. A zavartság mértékét többféle indexszel lehet jellemezni. A Dst index a földmágneses tér vízszintes összetevője globális átlagának változását mutatja a mágneses egyenlítőnél: -50 nT alá történő csökkenés *földmágneses vihart*, -250 nT érték szupervihart jelent, a Carrington-eseménynél² Dst értéke -1760 nT lehetett. A mágneses vihar során a napszélben terjedő lökéshullám megnövekedett nyomása összenyomja a magnetoszférát (4. ábra), benne és az ionoszférában megnőnek az elektromos áramok. Amikor a napszél mágneses tere déli polaritású, akkor a nappali oldalon erővonal-összekapcsolódás (reconnection) történik, mágneses energiát és gyorsított ionokat juttatva a magnetoszférába. Az ionoszférára jelentősen módosul, és a mágneses pólusok közelében sarki fény jelenhet meg.

Földi hatások

A flerből származó elektromágneses sugárzás (röntgen, EUV, rádióhullám) 8 perc alatt éri el a Földet, a kommunikációt interferencia miatt megszakíthatja, illetve rövidhullámon rádiózavart okoz.



² Az 1859-ben történtekről szimuláció tekinthető meg a QR-kód által mutatott www.youtube.com/watch?v=dVS4Q4VgDxk linken.

Az SEP esemény nagyenergiájú (MeV–GeV) ionjai 15 perc – 1 óra alatt érkeznek meg, áthatolva az űrszonda burkolatán, és dielektromos feltöltődés miatt bithibákat okozva. Ez irányítási zavart és hamis szenzorleolvasásokat okozhat. Repülőgépeken megnövekszik az utasok sugárterhelése, főként a mágneses pólusok fölötti repüléseknél. A földmágneses viharokért felelős koronakitörések alacsonyabb (<100 keV) energiájú ionjai és elektronjai a műholdak felületi elektrosztatikus feltöltődését és károsítását hoznak létre.

Ionoszférazavarok

A rádióhullámok szóródnak, elnyelődnek, a telekommunikáció megszakad, a GPS helymeghatározása pontatlanná válik. Az űrhajósok fokozott sugárterhelésnek vannak kitéve (elsősorban űrséta során), az ionizáló sugárzás károsítja a sejtek DNS-ét.

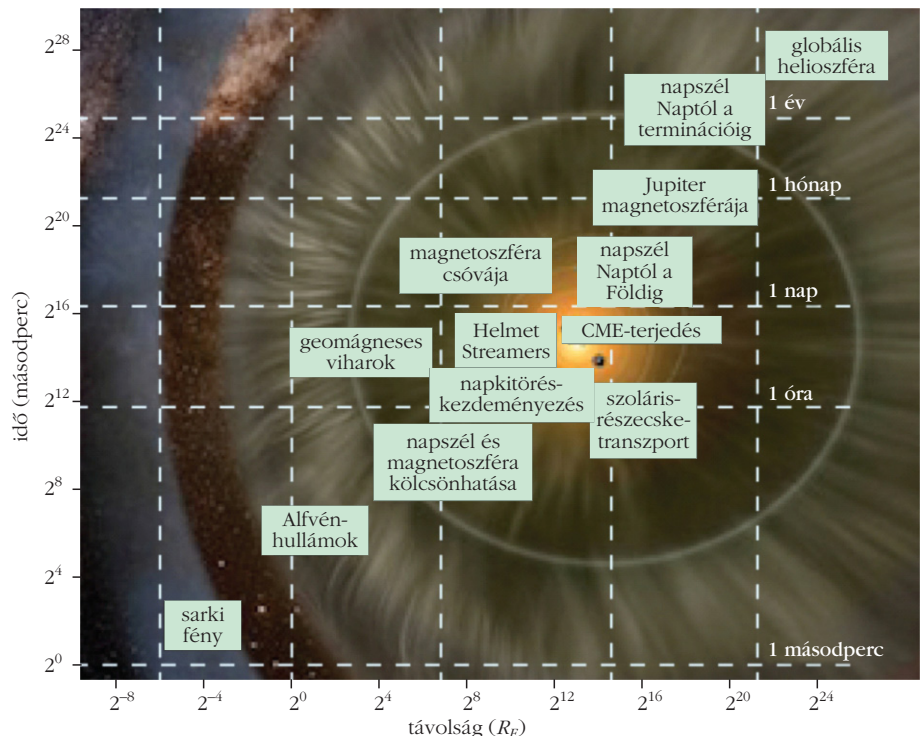
Elektromos terek

A mágneses vihar elektromos áramot gerjeszt az ionoszférában, az pedig másodlagos áramot indukál a földkéregben, amely a nagy elektromos hálózatokba, olajvezetékekbe bejutva túlterhelést okozhat: a létrejövő erős egyenáram felhevíti a transzformátorokat és leégethet áramköröket. A legismertebb ilyen eset az 1989. március 13-i mágneses vihart követően egy transzformátor leégése és 9 millió embert érintő áramkimaradás volt Kanadában.

Extrém események

Az eddig ismert legnagyobb, a 2×10^{10} proton/cm² (>30 MeV) fluxust elérő Carrington-esemény gyakorisága a becslések szerint 100-500 évenként 1.

5. ábra. Az idő- (másodpercben) és távolságskálán (földsugárban, $R_E = 6378$ km) egyaránt 2^{28} -szoros felbontás szükséges, a leírt fizikai folyamatok kinetikustól a globális skáláig változnak.



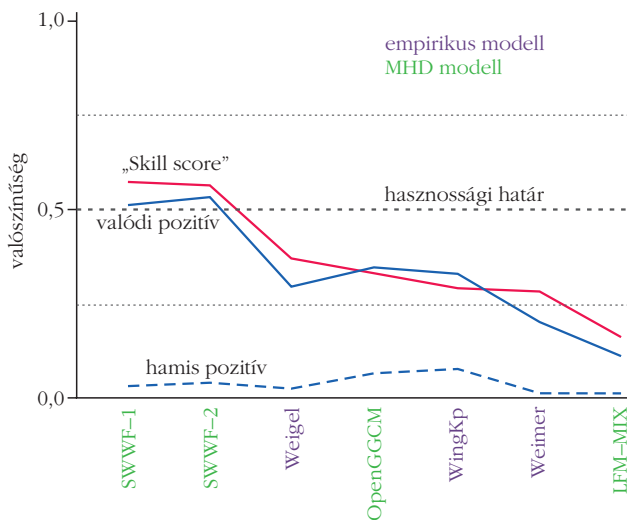
Előrejelzés

A CME-khez kapcsolódó események a CME megfigyelésével 1-2 nappal előre jelezhetők, a rövidebb, flerekhez kapcsolódó SEP eseményekben a protonoknál jóval kevésbé veszélyes és 1 órával előttük megjelenő relativisztikus elektronok figyelmeztetnek. A megfigyelt kezdeti paramétereiből az egyre fejlettebb számítógépes szimulációkkal kaphatunk előrejelzést.

Az űridőjárás modellezése

A plazma leírására több közelítés létezik. A magneto-hidrodinamika (MHD) a plazmát elektromos vezetőképes folyadékként kezeli, és a plazma elektromágneses erők hatására bekövetkezett mozgását írja le. Mikroszkopikus szinten a kinetikus szimulációk az egyedi ionok és elektronok mozgását írják le a saját maguk által keltett elektromágneses térben. A hibrid szimulációk közbülső közelítésként az elektronokat folyadéknak tekintik, az ionokat pedig részecskének. A kinetikus szimulációk az MHD-nál nagyságrendekkel több számítógépes erőforrást igényelnek, így nagyméretű rendszerek modellezésére hibrid vagy MHD közelítést kell alkalmazni.

Az űridőjárás igen sokféle fizikai folyamat kölcsönhatásának eredménye, amelyek mind időben, mind térben sok nagyságrendet fognak át. Emiatt a numerikus szimulációkban legalább 2^{28} -szoros ($\sim 3 \times 10^8$) felbontású rács szükséges. Az egyes fizikai folyamatokat a kinetikus skálától a globális, MHD skáláig kell követnünk úgy, hogy ezek közül némelyiket még nem értünk minden részletében (5. ábra).

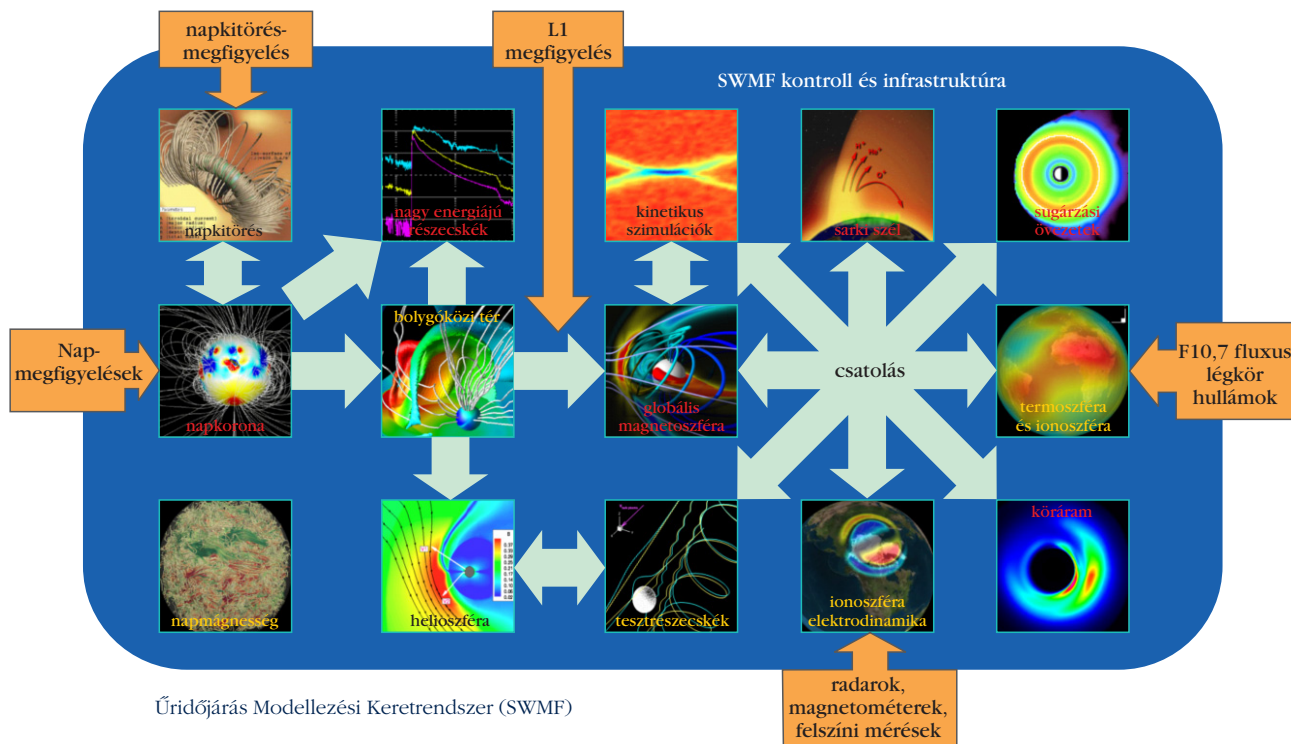


6. ábra. Egyes modellek eredményességének összehasonlítása.

Modellek versenye

Az űridőjárás számítógépes modellezésében hatalmas verseny folyik. Ennek célja az, hogy objektív rangsorolást érjen el az egyes űridőjárás modellek között, és segítsen kiválasztani azokat, amelyek érettek napi előrejelzés szolgáltatására. Az értékelés a mért és számított regionális, a földmágneses tér „háborgására” utaló Kp index és földfelszíni mágneses tér időbeli változásának összehasonlításával történik, mivel ezek a kulcsparaméterek az elektromos elosztóhálózat számára. A verseny zsűrijét a NASA/Goddard Űrközpont és NOAA/SWPC szakemberei al-

7. ábra. Az Űridőjárás Modellezési Keretrendszer moduljai.



Űridőjárás Modellezési Keretrendszer (SWMF)

kotják. Hosszas tesztelesek után a michigani modellt választották az űridőjárás előrejelzésére (6. ábra).

Ennek alapján jelenleg a Michigan Egyetem kutatócsoportja világelsőnek számít. Ezt a Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (NASA), a Nemzeti Tudományos Alap (NSF), az USA Védelmi Minisztériuma, az Energiaügyi Minisztérium és a NOAA negyed század alatti több mint ötvenmillió dollárnyi támogatása tette lehetővé. Együttesen több mint százötven emberév munkája, módszer- és szoftverfejlesztése fekszik benne.

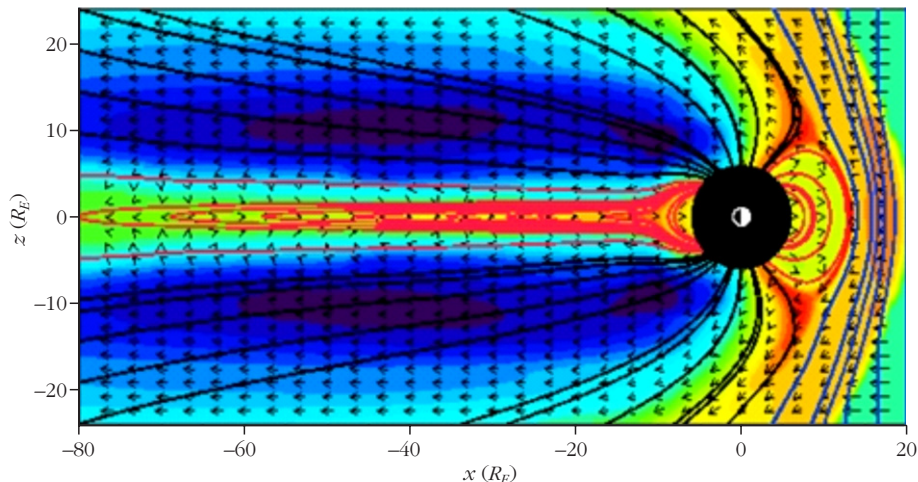
Jelenleg is nemzetközi csoport dolgozik rajta két-két magyar, orosz és amerikai, illetve egy holland résztvevővel, a csoport összetétele – természetesen – közben sokszor változott.

A michigani csoportnak elsőként sikerült a kinetikus és az MHD módszert kombinálnia az űrkörnyezet leírására. Az Űridőjárás Modellezési Keretrendszer (Space Weather Modeling Framework, SWMF) 14 modulból áll: ezeket a 7. ábra mutatja a Nap mint forrás felől kiindulva. A keretrendszer legfontosabb része a BATS-R-US klasszikus, félig relativisztikus, több folyadékot leíró MHD kód, amelyben az ionok nyomása anizotrop [2–4]. Az egyenletek megoldásához alkalmazkodó rácsot használ. A kód szabadon hozzáférhető a <http://csem.engin.umich.edu> honlapon. A 8. ábra egy szimuláció eredményét mutatja a Föld plazmakörnyezetében.

A jövő

Yogi Berra amerikai baseballjátékos elhíresült mondanisa szerint „jóslni nehéz, különösen a jövőt”. De milyen lesz az űridőjárás előrejelzése 10 év múlva? A legfontosabb előrelépés a várakozás szerint a flerek előrejelzésében várható. A „deep learning” segítségével egyrészt az eddigieknél sokkal nagyobb mennyiségű adat (például képek) használható fel inputként a tanulási algoritmusokhoz, másrészt ezek online használhatók, a folyamatosan érkező újabb adatokat is beépítve [5].

Elméleti téren a mágneses erővonalak összekapcsolódási mechanizmusának jobb megértése remélhető. A cél egyelőre elérni a földi időjárás-előrejelzés „pontosságát”.



8. ábra. A magnetosféra BATS-R-US szimulációja az ekliptikára merőleges síkban (a távolságok földszugár egységben).

Űridőjárás-kutatás Magyarországon

Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja űrkutató csoportja űrszondákon (SOHO, STEREO, CLUSTER, Ulysses, Cassini, Rosetta) mért adatok, illetve a jövőben várható (Solar Orbiter, JUICE, BepiColombo) plazmamérések feldolgozását és elméleti értelmezését végzi. Vizsgálják a mágneses bolygók (Föld, Szaturnusz), nem-mágneses bolygók és holdak (Vénusz, Merkúr, Titan), illetve üstökösök plazmakörnyezetét. Az MTA Energia-tudományi Kutatóközpontjában összetett sugárzás- és dózismérő rendszereket fejlesztenek űrdozimetriai és űridőjárás céljára. Az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszékén relativisztikus elektronok keletkezését és kicsapódását vizsgálják a plazmaszférában a modellezéshez az általuk létrehozott AWDANET globális mérőhálózat adatainak felhasználásával. A naptevékenység humánbiológiai hatásaival is foglalkoznak. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézetében a földi magnetoszférát, az ionoszférát és a mágneses pulzációkat tanulmányozzák.

Irodalom

1. D. J. Knipp et al.: The May 1967 Great Storm and Radio Disruption Event: Extreme Space Weather and Extraordinary Responses. *Space Weather* 14 (2016) 614–633.
2. Y. Chen, G. Tóth, T. I. Gombosi: A fifth-order finite difference scheme for hyperbolic equations on block-adaptive curvilinear grids. *J. Comp. Phys.* 305 (2016) 604–621.
3. L. K. S. Daldorff et al.: Two-way coupling of a global Hall magnetohydrodynamics model with a local implicit particle-in-cell model. *J. Comp. Phys.* 268 (2014) 236–254.
4. G. Tóth et al.: Extended magnetohydrodynamics with embedded particle-in-cell simulation of Ganymede's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 121 (2016) 1273–1293.
5. Y. Hada-Muranushi et al.: A deep-learning approach for operation of an automated realtime flare forecast. arXiv:1606.01587 (2016)

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítka, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

fizikai szemle



2018/3

nka