

A Cassini űrszonda a tervek szerint 2008-ig kering majd a Szaturnusz körül, addig is folyamatosan értékes ismeretekkel gazdagítja tudástárunkat Naprendszerünk második legnagyobb bolygójáról és annak egyedülálló, dinamikus környezetéről.

#### Irodalom

1. *Passage to a Ringed World, The Cassini-Huygens Mission to Saturn and Titan* – szerkesztette L.J. Spilker, NASA SP-533 (1997)
2. D.T. YOUNG ET AL.: *Composition and Dynamics of Plasma in Saturn's Magnetosphere* – Science 307(2005) 1262
3. M.K. DOUGHERTY ET AL.: *Cassini Magnetometer Observations During Saturn Orbit Insertion* – Science 307(2005) 1266
4. T.I. GOMBOSI, K.C. HANSEN: *Saturn's Variable Magnetosphere* – Science 307(2005) 1224
5. J.-P. LEBRETON ET AL.: *An overview of the descent and landing of the Huygens probe on Titan* – Nature 438(2005) 758
6. A Cassini-Huygens hivatalos weboldala az ESA-nál: [www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens](http://www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens)
7. A Cassini-Huygens hivatalos weboldala a NASA-nál: [saturn.jpl.nasa.gov](http://saturn.jpl.nasa.gov)
8. G. ISRAËL ET AL.: *Complex organic matter in Titan's atmospheric aerosols from in situ pyrolysis and analysis* – Nature 438(2005) 796
9. H.B. NIEMANN ET AL.: *The abundances of constituents of Titan's atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe* – Nature 438(2005) 779
10. M. FULCHIGNONI ET AL.: *In situ measurements of the physical characteristics of Titan's environment* – Nature 438(2005) 785
11. C.C. PORCO ET AL.: *Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites* – Science 307(2005) 1226

## GEOMÁGNESES PULZÁCIÓK: HULLÁMOK A BOLYGÓKÖZI TÉRBŐL ÉS A MAGNETOSZFÉRÁBÓL

Verő József

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron

A *geomágneses pulzációkat*<sup>1</sup> Lamont francia-skót-bajor csillagász fedezte fel az 1840-es években. Azt vette észre, hogy kis mágnesei néha nem saját periódusukkal lengenek, hanem 20 s körüli periódussal. Később ugyanő a *földi áramokban*<sup>2</sup> is talált hasonló periódusú változásokat. A felfedezésnek nem volt visszhangja, csak akkor nőtt a jelenség iránti érdeklődés, amikor a 20. század elején a holland *van Bemmelen* Batáviában (ma Dzsakarta) és a Peking melletti Zi-ka-weiben, *Angenheister* pedig az akkor német Nyugat-Szamoá szigetén, Apiában és a német Fürstenfeldbruck állomáson egyszerre észlelte őket. Ezzel bebizonyosodott, hogy a pulzációk nem elektromosan töltött levegő mozgásából, hanem egészen más, nagyméretű forrásból származnak.

Amikor jórészt a Franciaországban élő magyar származású *Kunetz Géza* kezdeményezésére a pulzációkat alkalmazni kezdték a negyvenes években, nagy mennyiségű mérési anyag gyűlt össze. Ezek nyomán kiderült, hogy a nappali, a mai nomenklatúra szerint Pc3-nak nevezett pulzációk periódusa változik a földrajzi szélességgel, pontosabban az *L*-értékkel, ami a mérési helyen áthaladó geomágneses erővonal és az Egyenlítő síkjának metszéspontjáig terjedő távolság a Föld középpontjától számítva, földugárban mérve. Nálunk az *L* értéke 2 körül van. Itt a periódus 20–25 s, Stockholm környékén, *L* = 3,3-nál 50–65 s, L'Aquilában, Rómától keletre 14 s körüli (*L* itt 1,5). A változás tehát jelentős.

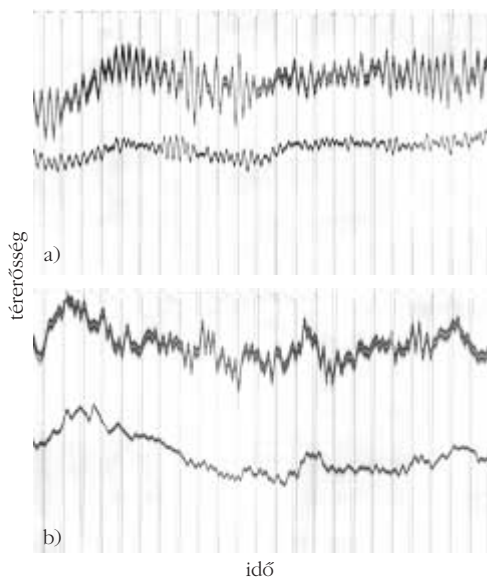
Még alig volt ismert ez a szélességgel való periódusváltozás, amikor az angol *Dungey*, aki egyebek között a bolygóközi mágnes tér erővonalainak összekapcsolódása, átkötődése elméletével megadta a napszél energiájának a magnetoszférába való bejutására vonatkozó, ma is érvényes modelljét, elméletet alkotott e szélességfüggés magyarázatára. Eszerint az erővonalak mentén *magnetohidrodinamikai* (*Alfvén*-) hullámok<sup>3</sup> terjednek az erővonal két, az ionoszférában lévő végpontja között. A két végpont közötti futási idő kétszerese az erővonal menti rezonancia (FLR, field line resonance) periódusa. (Az erővonalak a nagyobb részecskesűrűség miatt elvesztik a hozzájuk kötött részecskéket az ionoszférában, a hullámok és részecskék pedig az erővonalak összetartása miatt visszafordulnak, tükröződnek az erővonalak „vége” felé haladva.) Ez a futási idő függ az erővonal hosszától – innen az *L*-értéktől való függés –, valamint a részecskesűrűségtől, elsősorban az egyenlítői sík környezetében. Mivel az Alfvén-sebesség fordítva arányos a részecskesűrűség négyzetgyökével, az FLR-periódus nagyobb részecskesűrűség esetén hosszabb, kisebb részecskesűrűség esetében rövidebb. Emiatt egy mérőhelyen is változhat az FLR-periódus. A sebesség képletében szintén szereplő mágneses térerősség időben állandónak tekinthető.

Az aktív űrkutatás megindulásával egyre változatosabb és részletesebb adatok váltak ismertté a bolygóközi térről. Ezek felhasználásával kezdték keresni az FLR gerjesztésének energiaforrását, hiszen erről *Dungey* modellje semmit sem mondott. Hamarosan kiderült,

<sup>1</sup> *geomágneses pulzációk*: A geomágneses térben fellépő, 1–600 s periódusú sokféle jel gyűjtőneve. A tanulmányban a 15–45 s periódusú szabályosan szinuszos nappali Pc3 nevű pulzációkról esik szó.

<sup>2</sup> *földi áramok*: A geomágneses tér változásai által földkéregben indukált áramok.

<sup>3</sup> *magnetohidrodinamikai* (*Alfvén*-) *hullámok*: Plazmában terjedő hullámok, amelyek sebessége a mágneses tér erősségétől és részecskesűrűségtől függ. Több típusuk létezik.



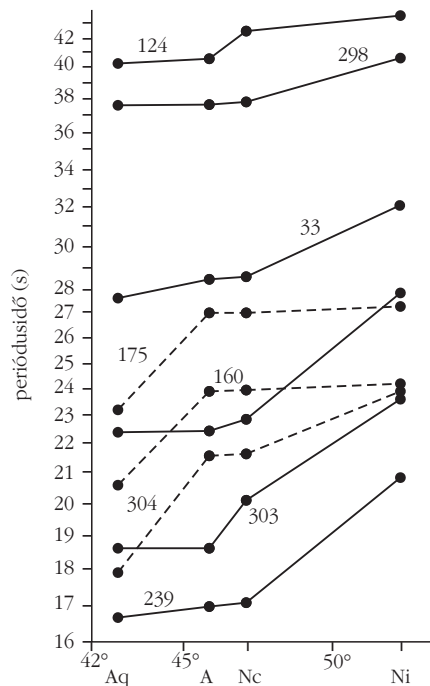
1. ábra. Jellegzetes FLR (a) és UW (b) típusú pulzációk a nagyecenki földi áram regisztrátumokon. Perces időjelek, az egyvonalas jel az É-D-i, a kétvonalas a K-Ny-i komponens. A jelek nagysága néhány mV/km. 1973 júliusi regisztrátumok.

hogy elég szoros kapcsolat van a napszél sebessége és a pulzációk amplitúdója között, ami nem is volt meglepő. Viszont annál váratlanabb kapcsolat mutatkozott a bolygóközi mágnes térerőssége és a pulzációk periódusa között a  $T(s) = 170/B(nT)$  képlet szerint, ahol  $T$  a periódus,  $B$  a bolygóközi mágnes térerőssége, valamint a Nap–Föld irány és a bolygóközi mágnes tér közötti úgynevezett kúpszög és a pulzációk amplitúdója között. Ezeknek a kapcsolatoknak más magyarázata nem lehet, mint az, hogy a pulzációk a bolygóközi térben, a magnetoszfera határától, a magnetopauzától a Nap felé keletkeznek (upstream waves, UW). Az UW- és az FLR-típusra mutat egy-egy példát az 1. ábra.

Az űrkutatás egyre alaposabb mérésekkel in situ, a magnetoszfera előtt meg is találta az UW-t. Ezek a magnetopauzáról visszaforduló részecskék és a szembe áramló napszél közötti kölcsönhatás eredményeként jönnek létre, ion-ciklotron instabilitás révén. A folyamat elég bonyolult, a részecskék nem egyszerűen visszaverődnek, hanem energiát is nyernek. A Föld felé haladó, *anomális Doppler-eltolódott*<sup>4</sup> hullám periódusa valóban a mágnes térerősségétől függ. Van olyan feltevés is, hogy a periódus képletében szerepel az áramlás, a napszél sebessége is. A megfigyeléseket az így kapott képlet jobban közelíti, mint az egyszerűbb fordított arányosság a periódus és a térerősség között. A magnetoszféránál megjelenő UW 3–4 perc alatt ér el a Föld felszínére.

Így az a furcsa helyzet alakult ki, hogy a pulzációk periódusát két tényezőtől is eredeztették: az  $L$ -értéktől és az IMF térerősségétől. Két tábor alakult ki a kutatók között: az egyik az első, a másik a második tényezőt fogadta el döntőnek.

<sup>4</sup> *anomális Doppler-eltolódás*: Olyan Doppler-jelenség, amelynél az észlelő, a jelen esetben a napszél, sebessége nagyobb, mint a vele egy irányban terjedő hullámoké.



2. ábra. A pulzációk periódusának változása L'Aquila ( $L(1,5)$ ) és Niemeck ( $L(2,3)$ ) között néhány eltérő jellegű esetben.

Amikor ez a vita megkezdődött, az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetnek nagyecenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriuma már 20 éves, két 11 éves naptevékenységi ciklust felölelő múltra tekintett vissza, és adatairól részletes katalógus állt rendelkezésre. Így nagy adatmennyiségen tudtuk kimutatni, hogy a  $T = 170/B$  összefüggés valóban érvényes. Ezt végleges bizonyítéknak fogadták el nemzetközileg is.

Az  $L$ -értéktől való függést nem lehet egyetlen állomáson tanulmányozni, csak állomásláncok adatai alkalmasak erre. Több ilyen észak–déli láncolatot szerveztünk. Ezek eredményeiből mutat be (az egyes típusok gyakoriságát nem tükröző) válogatást a 2. ábra. Az esetek jelentős részében, különösen a nagyecenki FLR-periódus közelében (20–30 s körül) a szélességfüggés mértéke mintegy 10% periódusváltozás egy szélességi fokra. Viszont vannak olyan esetek is, amikor nincs szélességfüggés.

Meglepő volt, hogy a szélességfüggés gyakran csak szakaszosan jelentkezik, egyes állomások között a periódus a szélességkülönbség ellenére sem változik. Ilyen esetek is láthatók a 2. ábrán. Ennek lehetséges magyarázata az, hogy egész, egyforma  $L$ -értékkel bíró véges vastagságú *erővonalhék*<sup>5</sup> vannak rezonanciában. A hagyományokhoz hasonló héjak vastagsága a felszínre vetítve 100–150 km. Ez a szerkezet megmagyarázza azt is, mért vannak interferenciára utaló struktúrák a pulzációkban. Lükettő amplitúdójú „csomagok” alakulnak ki, a megadott adatokból következően átlagosan 10 hullám alkot egy-egy ilyen csomagot. A csomagok közötti minimumban 360 fokos fázisugrás van, ami ugyancsak interferenciára utaló jel – két, esetleg több szomszédos héj rezonanciafolyamatát látjuk egyszerre.

<sup>5</sup> *erővonalhék*: Azonos  $L$ -értékű erővonalak által alkotott héj, amely a hagyományokhoz hasonlóan helyezkedik el.

Amikor már jobb lehetőségek voltak digitális regisztrátumok felhasználására, illetve számítógépes adatfeldolgozásra, újabb állomásláncolatokat szerveztünk. Bár ezek nem voltak pontosan É–D-i irányúak, ki tudtuk mutatni, hogy gyakran egyetlen adatsorban is kétféle spektrumcsúcs található, az egyik az UW várható periódusánál, a másik pedig az FLR-periódus  $L$ -től való függésének megfelelően változik (3. ábra). Egy nehézség megmaradt: a regisztrátumokon nem tudtuk felismerni, egyértelműen elkülöníteni a kétféle jelet, annak ellenére, hogy az FLR-típus számos, az előzőekben már említett ismérvét már felhasználhattuk. Az elkülönítéshez nagyon pontos fázisadat kell, ehhez pedig pontos időjelek, ami még hiányzott.

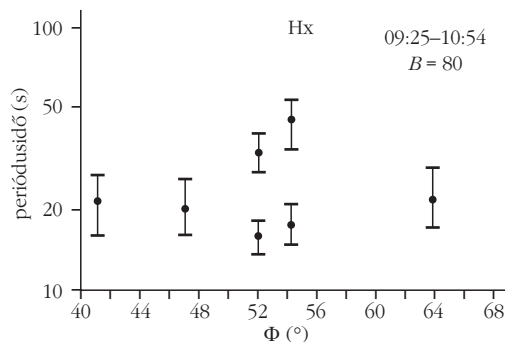
A már teljesen digitális adatokra alapozva végzett láncolatmenti méréseinket dinamikus spektrumokká átalakítva használtuk. Német, olasz és cseh partnereinkkel kiválasztottunk egy olyan jellegzetes esetet, amikor a dinamikus spektrum alapján látszott, hogy azonosíthatók gyors ütemben változó FLR- és UW-jellegű szakaszok. Bár az esemény kiválasztásához bolygóközi adatokat nem használtunk fel, utólag megvizsgálva ezeket az derült ki, hogy az IMF változékonysága éppen ebben az időben volt a legnagyobb.

Ezzel nyilvánvalóvá vált a megoldás: sorra kiderült, hogy az FLR–UW átmenetek a bolygóközi mágnes tér változásaihoz kapcsolódnak, egy-egy ilyen IMF-változás után 3–4 perccel (a felszínig való terjedés ideje) az FLR-jellegű pulzációs tevékenység megszűnik, csak UW észlelhető. Az FLR-típusú tevékenységet tehát szintén a magnetosféra előtti ion-ciklotron instabilitásból származó hullámok keltik, ha azok viszonylag szélesebb spektrumában a megfelelő periódus kellőképpen szerepel. Ha ez a spektrum változik, az FLR-mechanizmus összeomlik.

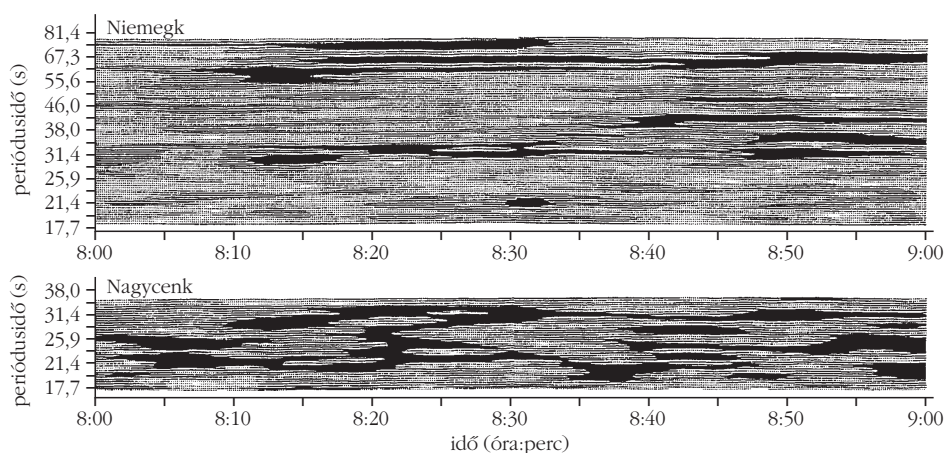
Az ellenkező irányú váltás, az UW–FLR átmenet is elég gyorsan, szinte pillanatok alatt játszódik le, a használt szűrő nem is tudja pontosan kimutatni az időpontot. A dinamikus spektrumban ezek az átmenetek úgy jelennek meg, mint egy-egy időben állandó periódusú, tehát vízszintes vonalakkal álló sorozat (több rezonáló héj) hirtelen megszakadása, és egy másik, egy vonalból álló kép megjelenése az UW-nek megfelelően (4. ábra).

A magnetoszférabeli héjszerkezetre vonatkozóan újabb adalékot szolgáltatott egy olyan mérési sorozat, amelyben három pulzációs állomás mellett a *whistlereket*<sup>6</sup> is mértük. A whistlerek olyan elektromágneses hullámok, amelyek villámok révén keletkeznek, és kedvező körülmények esetén be tudnak lépni egy, a villámlás

<sup>6</sup> *whistler*: A déli féltekén keletkező villámokból induló és a geomágneses tér erővonalai mentén terjedő elektromágneses hullámok hozzánk beérkezve a rádióhullámokban jellegzetesen mélyülő füttyként jelentkeznek.



3. ábra. Egy időszakaszban együttesen megjelenő FLR- és UW-típusú pulzációk periódusa a szélesség függvényében. A függőleges vonalak az amplitúdócsúcsok helyzetét jelölik. Az UW-periódus 18–20 s, az FLR-ág 45 fokos szélességnél indul és 53 fokos szélességig követhető. Ott a periódus 45 s.



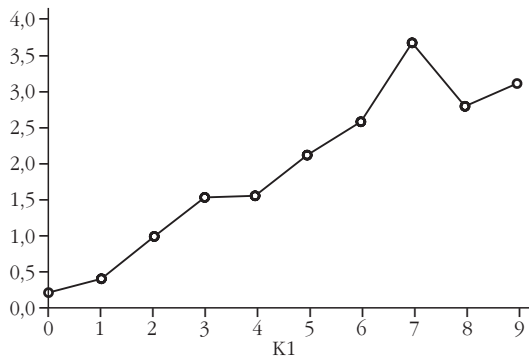
4. ábra. FLR–UW váltakozás dinamikus spektrumon 1991. június 18-án. Felül Niemegek, alul Nagycenk. Különösen jól látható a 8:20-kor fellépő átmenet.

helye fölötti erővonal-csatornába. Az ilyen csatornában a részecskesűrűség némileg eltér a környezetében levőtől, és ezért hullámvezetőként működik. A hullámvezetőben a jel *diszperzió*<sup>7</sup> esik át, ennek nagyságából a csatorna  $L$ -értéke és a benne lévő egyenlítői részecskesűrűség meghatározható. Sajnos, folyamatos whistlermérés nagyon kevés helyen folyik, de az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet tihanyi obszervatóriumában sikerült koordinált méréseket végezni.

Előzőleg a csehországi Panska Ves állomás whistlerszámlálási adataiból tudtuk, hogy a whistlerek száma nő a pulzációs tevékenység növekedése esetén (5. ábra). A whistlerekből kapott paraméterek alapján ezt azzal lehetett kiegészíteni, hogy olyan  $L$ -értékű héjon nagy a pulzációs (FLR) tevékenység, ahol whistlerek terjednek. Úgy képzelhetjük ezt el, hogy az azonos  $L$ -héjon egymás mellett elhelyezkedő whistlerscsatornák alakítják ki magát a héjat.

Az erővonal menti szerkezetekhez köthető jelenségek sorát még tovább sikerült szaporítani, elsősorban az ugyancsak az erővonalak mentén ide-oda pattogó hullá-

<sup>7</sup> *diszperzió*: A whistlerek különböző frekvenciájú hullámai közül a legnagyobb frekvenciájúak terjednek a leggyorsabban. E diszperzió miatt hallunk egyre mélyülő hangot. A diszperzió egyebek között a részecskesűrűségtől függ.



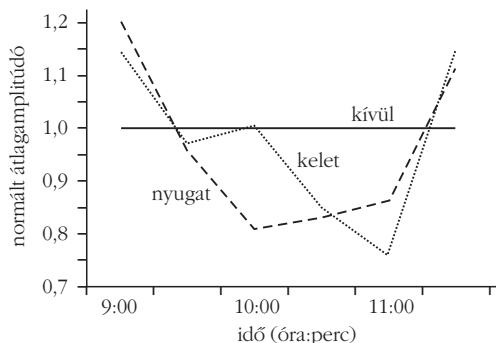
5. ábra. Kapcsolat a pulzációs tevékenység (nagycenki napi index) és a Panska Vesben észlelt whistlerek gyakorisága között.

mok keltette Pc1 (gyöngy) pulzációkkal, amelyek a két féltekén felváltva észlelhető 1 s körüli periódusú hullámcsomagokból állnak.

Ezek szerint a Pc3 pulzációk két típusának, az UW- és az FLR-típusnak közös forrása a magnetoszféra határa előtt keletkező ion-ciklotron instabilitásból eredő hullámok. Ezek vagy különösebb módosulás nélkül jutnak el a felszínig (UW-típus), vagy a geomágneses tér erővonalai mentén lejátszódó rezonancia jelentősen átalakítja őket (FLR-típus). A rezonáló rendszer nagyon érzékeny a forrás változásaira, rövid időn belül összeomolhat, illetve újra kialakulhat. A rezonancia erővonalhékakon játszódik le, és ezek a héjak más jelenségek létrejöttében is szerepet kapnak.

A geomágneses tér változásai némileg hasonló jellegűek, mint az időjáráséi. Vannak napról napra alig eltérően ismétlődő változások a magaslégkör töltött részecskéket is tartalmazó rétegeinek árapálymozgása miatt, vannak a napszéltől kapott energia által táplált rendszertelen folyamatok, de a nappalok és éjszakák szabályos váltakozása, amely mindkét említett folyamatot befolyásolja, csak nagyon ritkán szakad meg. Az egyetlen ilyen esemény a napfogyatkozás, amikor kimarad a Nap ultraióblya és röntgensugárzásának ionizáló hatása is, és a „rövid éjszaka” különleges körülményeket hoz létre. A legérdekesebb az az eset, amikor a napfogyatkozás olyan vidéken jelenik meg, ahol viszonylag sok a geomágneses obszervatórium és könnyen létesíthetők ideiglenes állomások is. Ilyen eset volt 1999. augusztus 11-én, amikor a teljes napfogyatkozás Anglia déli részén érte Európát, végigsöpört Közép-Európán, beleértve hazánkat, majd a Fekete-tenger irányában elhagyta

7. ábra. Az FLR-típusú pulzációk amplitúdója a napfogyatkozás nyugati és keleti szakaszán a távolabbi állomások adataira vonatkoztatva. Az egyes csoportok elkülönítése nem tökéletes, így a Ny-i és K-i csoportban a hatás a ténylegesnél kisebbnek látszik.



6. ábra. Az FLR-típus helyi periódusánál észlelt pulzációk amplitúdóaránya (Budkov/Nagycekn) a napfogyatkozás időpontja körül. Az időlépték a meghatározás módszere miatt nem egyenletes.

kontinensünket. Erre az alkalomra a Kyushu Egyetem (Japán) azonos műszerekkel öt állomást létesített Dél-Angliában, Nagycenken, L'Aquilában, Közép-Afrikában és ott, ahol a legközelebb lehet kerülni a tőlünk induló geomágneses erővonal másik végpontjához, Dél-Afrikában. A németek, a potsdami GeoForschungsZentrum ehhez több tucat német és osztrák területen lévő ideiglenes állomást adtak hozzá, magyar-amerikai együttműködésben az ELGI is létesített állomásokat, Nagycenken kívül pedig a teljes napfogyatkozás peremén, 98%-os árnyékban a cseh Budkov is csatlakozott.

Az rögtön kiderült, hogy a napfogyatkozás idején a Pc3 pulzációk amplitúdója Nagycenken jelentősen csökkent. Ez azonban még nem jelenti azt, hogy a csökkenés a napfogyatkozás hatására történt. Azt kellett bizonyítani, hogy egyrészt a bolygóközi mágnes térben nem történt olyasmi, ami a csökkenést kiválthatta, másrészt azt is ki kellett mutatnunk, hogy a hatás a teljes árnyék sávjának környékére korlátozódott, és a hatás együtt mozgott az árnyékkal.

A vizsgálatokban a német, japán és cseh kollégákon kívül intézetünkben *Bencze Pál*, *Zieger Bertalan* és *Szendrői Judit* vett részt, az ELGI-ből pedig *Heilig Balázs*, aki az IMF adatait is vizsgálta, és arra a megállapításra jutott, hogy bár az ottani paraméterek kedvezőtlenek voltak az UW keltésére, de nyoma sem volt olyan változásoknak, ami a pulzációk kikapcsolódását indokolta volna, és az észlelt periódus is megfelelt a módosított képlet alapján vártnak.

Az amplitúdócsökkenés kiterjedését a teljesség sávjára merőleges irányban először a budkovi obszervatórium mérései alapján vizsgáltuk. Itt 98%-os volt a fogyatkozás, és korábban már sokszor hasonlítottuk össze a két állomás, Budkov és Nagycenk adatait, így jól ismertük az ottani viszonyokat. Az összehasonlítás eredményét mutatja a 6. ábra, amelyen az FLR-periódusok amplitúdójának változása szerepel az idő függvényében. Mivel a némileg eltérő periódusú FLR-jelekre akartuk az arány változását kimutatni, egyes hullámcsomagok átlagamplitúdóit vetettük össze. A napfogyatkozás időpontjában az arány (BDK/NCK) 0,77-ről 1,45-re változott, ami messze felülmúlja az egyes arányok hibáját.

A teljes napfogyatkozás sávja mentén úgy kerestük a hatás kiterjedését és mozgását, hogy minden egyes állomáson (mintegy 30 helyen) meghatároztuk az FLR-periódust. Az állomásokat három csoportra osztottuk, egy nyugati, egy keleti és egy távoli csoportra. Az utóbbi csoport észlelt FLR átlagamplitúdójára vonatkoztatott átlagamplitúdókat a nyugati és a keleti csoportban mutatja a 7. ábra. A

hatás, az amplitúdóminimum a két csoportban eltérő időben jelenik meg, mégpedig úgy, hogy a hatás valóban a Hold árnyékával együtt mozgott. A mintegy 40%-os csökkenés a hatás mértékének alsó határa, mert egyik csoport sem felelt meg teljesen a kritériumoknak: a nyugati és keleti csoportban nem volt mindenütt teljes a fogyatkozás, a távoli csoport pedig többnyire részleges fogyatkozást élt át, emellett a keleti és nyugati csoport állomásai is szét-szórta voltak a fogyatkozás sávja mentén.

Végeredményben arra jutottunk, hogy a napfogyatkozás hatására az FLR-típusú tevékenység megszűnt, kikapcsolódott, emiatt nem volt meg az FLR-mechanizmus okozta mintegy háromszoros erősítés sem, az amplitúdók tehát csökkentek. A kikapcsolódás közvetlen oka az, hogy az ionoszférából felfelé való részecskeáramlás erősen megcsappant, mert ott kevesebb lett a töltött részecske az ultraibolya és röntgensugárzás kimaradása miatt. Így a rezonáló rendszer elhangolódott, a sajátperiódusa mintegy 30%-kal változott, és ezt már nem tudta az elsőd-

leges forrás gerjeszteni. A részecskesűrűség csökkenése és az elhangolódás kísérletileg is kimutatható volt.

A napfogyatkozás ilyen hatását a Pc3 pulzációkra, illetve az erővonal menti rezonancia belső eredetű leállását tudomásunk szerint először sikerült kimutatni. Mindaddig csak a hullámok polarizációjának változását tudták észlelni – ez egyébként a mi csoportunk adataiban is megjelent.

Az 1999-es napfogyatkozás geomágneses hatása – nem a pulzációk, hanem a napi változás módosulását értve itt – erősen vitatott kérdés, különböző csoportok azonos adatok alapján is eltérő eredményre jutottak. Vita folyt az itt ismertetett eredmény körül. Az értelmezésben a mérések valamennyi résztvevője egyetértett, s ez a szakterület mai vezető kutatóit, japánokat, németeket, cseheket és magyarokat jelenti. Az eredményeket meg erősíti az adatok más szempontból történt feldolgozása is, amelynek alapján ki tudtuk mutatni a földben indukált áramrendszer módosulását is.

## MILYEN A TEHERBÍRÓ, DE KÖNNYŰ CSÖVES CSONT SZERKEZETE?

A biomechanikai optimum vizsgálata állati és emberi végtagcsontokon

Horváth Gábor, Suhai Bence, Bernáth Balázs, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék  
 Gerics Balázs, Szent István Egyetem, Állatorvos-tudományi Kar, Anatómiai és Szövetani Tanszék  
 Csorba Gábor, Magyar Természettudományi Múzeum, Állattár  
 Gasparik Mihály, Magyar Természettudományi Múzeum, Föld- és Őslénytár  
 Évinger Sándor, Pap Ildikó, Magyar Természettudományi Múzeum, Embertani Tár

### Milyen a biomechanikailag optimális végtagcsont?

A gerincesek végtagjainak vázát belül üreges, központi üregében többnyire velőt tartalmazó, hosszú csöves csontok alkotják, amelyeknek bizonyos határokon belül például hajlítási és csavarási igénybevételeket is egyaránt ki kell bírniuk. E kívánalom a csontok robusztussága irányában hat. Ugyanakkor mozgáskor a végtagokat minden lépéskor periodikusan föl kell gyorsítani, majd le kell lassítani, s mindez annál nagyobb izommunkát követel, minél nagyobb a végtagok tömege. A minél kisebb izommunkával történő mozgás igénye a csontok könnyűsége irányában hat, amit jól példáz az is, hogy a mozgáskor nagyobb sebességű, vagyis a test hossz tengelyétől távolabb eső, hosszú végtagcsontok könnyebbek, vékonyabbak a kisebb sebességű, a hossz tengelyhez közelebb eső csontoknál. Az evolúció során e két ellentétes hatás határozta meg a csontok alakjának és tömegének optimumát. Az a csontszerkezet az optimális, amely a lehető legkisebb anyagfőhasználás mellett a lehető legnagyobb szilárdságot biztosítja a mechanikai igénybevételekkel szemben.

A csöves csontok egyik jellemző geometriai paramétere a belső és külső átmérőjük  $K$  hányadosa ( $0 \leq K < 1$ ) és az ebből származtatott  $V = 1 - K$  relatív falvastagság. Biomechanikai optimalizációval négy eltérő optimum származtatható  $K$ -ra [1–7]: Ha a minimális tömegű csontnak meghajlásokat kell elviselnie, akkor  $K$  optimális értéke

$$K_b = \sqrt{1 - \frac{\rho_v}{\rho_c}} \equiv \sqrt{1 - Q}, \quad Q = \frac{\rho_v}{\rho_c}, \quad (1)$$

ahol  $\rho_c$  a csont sűrűsége,  $\rho_v$  pedig a belsejében levő velőé. Ha a minimális tömegű csont éppen a felületi rétege elszakadásának vagy összeroppanásának határáig hajolhat meg, akkor  $K$  optimális értéke

$$K_{sz} = \sqrt{\frac{2 - \sqrt{1 - 3Q^2 + 6Q}}{1 - Q}}. \quad (2)$$

Ha a minimális tömegű csont nem törhet el, akkor  $K$  optimuma:

$$K_t = 1 - Q. \quad (3)$$