

## A TRITEL-SURE űrdozimetriai kísérlet első mérési eredményei

**Dr. Hirn Attila<sup>1</sup>, Apáthy István<sup>1</sup>, Bodnár László<sup>1,2</sup>, Csőke Antal<sup>1</sup>, Dr. Deme Sándor<sup>1</sup>,  
Dr. Pázmándi Tamás<sup>1</sup>, Szántó Péter<sup>1</sup>, Zábori Balázs<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

<sup>2</sup> BL-Electronics Kft., Budapest

*Az emberes űrrepülések során kiemelt fontosságú a sugárzási tér dozimetriai célú vizsgálata. 2012 novemberétől újabb magyar műszer, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és a BL-Electronics Kft. együttműködésében kifejlesztett TRITEL háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp végez dozimetriai célú méréseket a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén. A cikkben az első három nap méréseinek előzetes eredményeiből is szemezgetünk.*

### 1. Bevezetés

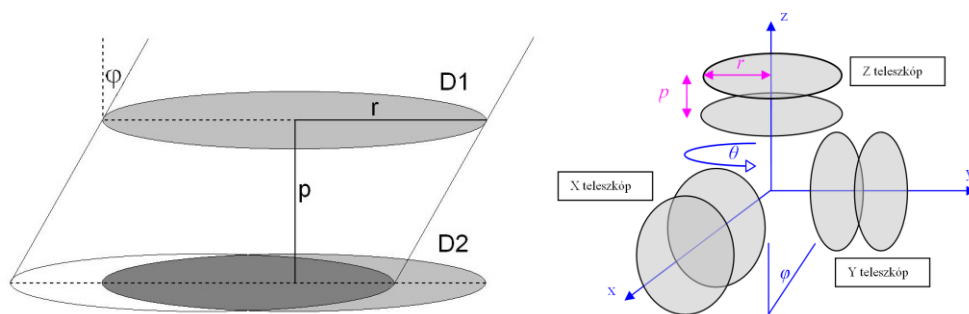
Az űrhajósoknak munkájuk során számtalan jelentős egészségügyi kockázati tényezővel kell számolniuk, melyek közül a hosszú idejű űrrepülések esetében az egyik legfontosabb az őket érő, a Föld felszínén mérhető háttérsugárzásnál legalább két nagyságrenddel nagyobb fluxusú kozmikus sugárzás. A kozmikus sugárzási tér jellemzői számos tényező – többek között a naptevékenység, az űreszköz pálya menti mozgása, valamint a szerkezeti elemek árnyékoló és konverziós hatása – miatt helyről helyre és időről időre jelentős mértékben változhatnak. Az űrhajósokat érő sugárzás dózisának meghatározása szempontjából ezért fontos a kozmikus sugárzás jellemzőinek fedélzeti, folyamatos, valós idejű nyomon követése. Az űrállomásokon és egyéb emberes űreszközökön folyó sugárvédelmi célú mérések egyrészt a dózistérkép elkészítését – azaz a dózisteljesítmény űreszközhöz belüli helyfüggésének meghatározását – és a dózisteljesítmény időbeli változásának nyomon követését szolgálják, másrészt biztosítják az űrhajósok személyi dózisának meghatározását.

### 2. Dózismérő rendszerek

A sugárzás fluxusának, valamint a leadott energiának a mérésére az elmúlt évszázadban számos módszert fejlesztettek ki, melyek között passzív, illetve aktív detektoros módszereket különböztethetünk meg. A passzív detektorokra (például termo- vagy optolumineszcens detektorok, nyomdetektorok, valamint filmdoziméterek) jellemző, hogy anyagukban a sugárzás hatására különféle fizikai vagy kémiai változások mennek végbe. A változás mértékéből – detektorfajtától függően – az elnyelt dózisa, a sugárzás fluensére vagy a részecskék által leadott energia spektrumára lehet következtetni. Tápellátást – passzív detektorok esetében – a detektálás nem, legfeljebb a kiolvasás igényel. Hátrány ugyanakkor, hogy legtöbbjük esetében kiolvasásra kizárólag utólagosan, a Földön nyílik lehetőség, így csak a küldetés időtartamára vonatkozó dózismennyiségek határozhatók meg (ez alól kivételt jelent például a magyar fejlesztésű Pille termolumineszcens dózismérő rendszer [1]). A passzív detektoroktól eltérően az aktív detektoros űrdozimetriai rendszerek (félvezető detektoros rendszerek, testszövet-ekvivalens proporcionális számlálók, Geiger–Müller-számlálók, szcintillációs detektorok stb.) fontos jellemzője, hogy folyamatos tápellátást igényelnek, ugyanakkor segítségével a passzív detektorokénál jobb időfelbontás érhető el.

### 3. A TRITEL űrdozimetriai rendszer

Részecsketeleszkóp – a későbbiekben teleszkóp – alatt olyan, legalább két detektorból álló detektorrendszert értünk, amelyben egy töltött részecskén koincidencia- és/vagy anti-koincidencia-kapcsolás segítségével többfajta mérést is el lehet végezni. Űrdozimetriai célú teleszkópokkal általában a detektor(ok) érzékeny térfogatában leadott energia mérhető, valamint meghatározható, hogy az adott részecske a teleszkóp geometriája által meghatározott térszögből érkezett-e. Félvezető detektoros rendszerek esetében leggyakrabban a két azonos aktív sugarú és vastagságú, átmenő típusú szilícium detektorból álló teleszkóp elrendezést használják, mint például a Kieli Egyetemen fejlesztett DOSTEL esetében (1. ábra) [2]. Ezen típus egyik hátránya a rendszer jelentősen irányfüggő érzékenysége. Ennek kiküszöbölésére az elmúlt években egy – a kozmikus sugárzás LET (lineáris energialeadási tényező<sup>1</sup>)-eloszlásának időbeli és térbeli meghatározására alkalmas, a  $4\pi$  térszögben közel egyenletes érzékenységű – háromtengelyű teleszkóp (TRITEL) fejlesztése történt a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) KFKI Atomenergia Kutatóintézet (jelenleg MTA Energiatudományi Kutatóközpont) Űrdozimetriai Kutatócsoportjában. Az eszköz három ortogonális tengelyének teleszkópjait két-két, egymással párhuzamosan elhelyezkedő,  $300\ \mu\text{m}$  vastagságú és  $222\ \text{mm}^2$  aktív felületű szilícium detektor alkotja (1. ábra). A teleszkóp két-két detektorát a mérések során „ÉS” kapuként – koincidenciába kötve – használjuk, így a mindkét detektorban jelet adó részecskéket külön tudjuk mérni, vagyis az ún. kapuzott (koincidencia) és a kapuzatlan (teljes) leadottenergia-spektrum egyaránt meghatározható.



1. ábra A két azonos sugarú detektorból álló teleszkóp, illetve a TRITEL háromtengelyű teleszkóp geometria felépítése;  $r$  a detektor aktív felületéhez tartozó sugár,  $p$  a detektorok közötti távolság [3]

A kapuzott spektrumból a beérkezett részecskék LET-spektrumát – azaz az egységnyi LET-re jutó részecskeszámot – állíthatjuk elő, a detektorokban elnyelt teljes energiamennyiség pedig a detektor anyagának dóziséval arányos. A teleszkópokat alkotó detektorok szerepe kitüntetett; az egyik a mérő-, a másik az úgynevezett kapuzódetektor szerepét tölti be. A rendszer a  $0,2\text{--}120\ \text{keV}/\mu\text{m}$   $\text{LET}_{\text{viz}}$  értékű részecskék mérésére alkalmas, ami a detektorban leadott  $60\ \text{keV}\text{--}80\ \text{MeV}$  energiának felel meg. A műszer segítségével mind az elnyelt, mind a kozmikus sugárzás biológiai károsító hatására jellemző egyenérték dózis becsülhető.

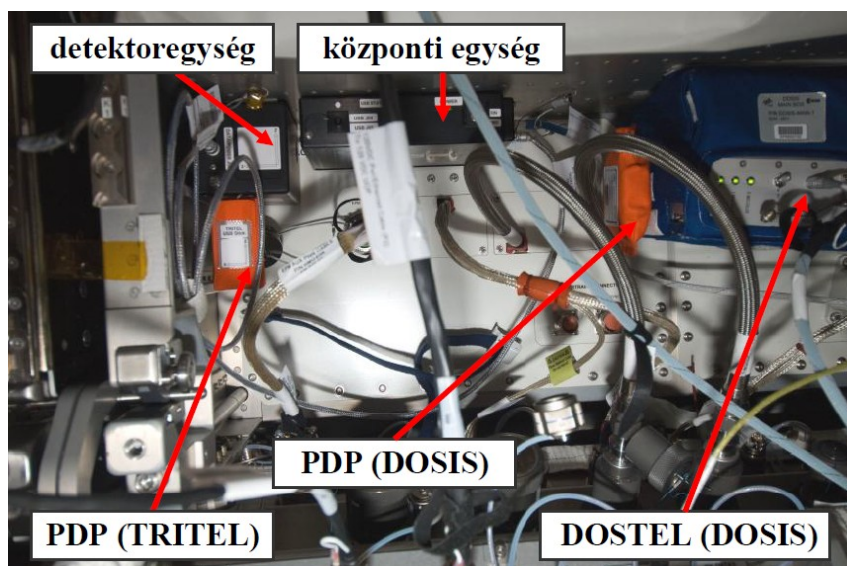
<sup>1</sup> A LET a  $dl$  úton lokálisan elnyelt energia és a  $dl$  hányadosa, azaz  $\text{LET} = dE_{\text{abs}}/dl$

### 3. TRITEL-SURE a Columbus modul fedélzetén

A BL-Electronics Kft-vel együttműködésben fejlesztett TRITEL-SURE kísérleti berendezést három fő egység alkotja: a háromtengelyű teleszkópot tartalmazó detektoregység, a detektoregység vezérlésére, a mérési adatok tárolására, valamint az adatok letöltésére szolgáló központi egység, valamint egy passzív dózismérőket (termolumineszcens és nyomdetektorokat) tartalmazó összeállítás (*Passive Detector Package*, PDP, ld. 2. ábra). A teleszkópok, valamint a passzív detektorok tengelyei egymással párhuzamosak. A tengelyek iránya (az űrállomás repülőgépszerű irányítottsága esetén) a zenit, az űrállomás sebességvektora, valamint az előbbi két irányra merőleges irány.

A TRITEL-SURE kísérlet aktív dózismérő berendezését 2012. október 31-én küldték fel a Nemzetközi Űrállomásra a Progressz M-17M teherszállító űrhajóval. A berendezés telepítésére és bekapcsolására november 6-án, az első adatletöltésre pedig három nappal később, november 9-én került sor. Az aktív berendezést 2012. december 19-én a passzív detektorok (PDP) követték a Nemzetközi Űrállomásra a Szojuz TMA-07M fedélzetén.

A TRITEL részegységei közvetlenül a – hasonló fizikai elven működő, de csak két irányban érzékeny, egy-egy félvezető teleszkópot tartalmazó – DOSIS kísérlet mellett foglalnak helyet, így összemérésre is lehetőségünk nyílik. A kiel Christian Albrechts Egyetemen fejlesztett DOSIS/DOSTEL kísérletnek – a TRITEL kísérlethez hasonlóan – része egy szilárdtest nyomdetektorokat tartalmazó csomag is (2. ábra).

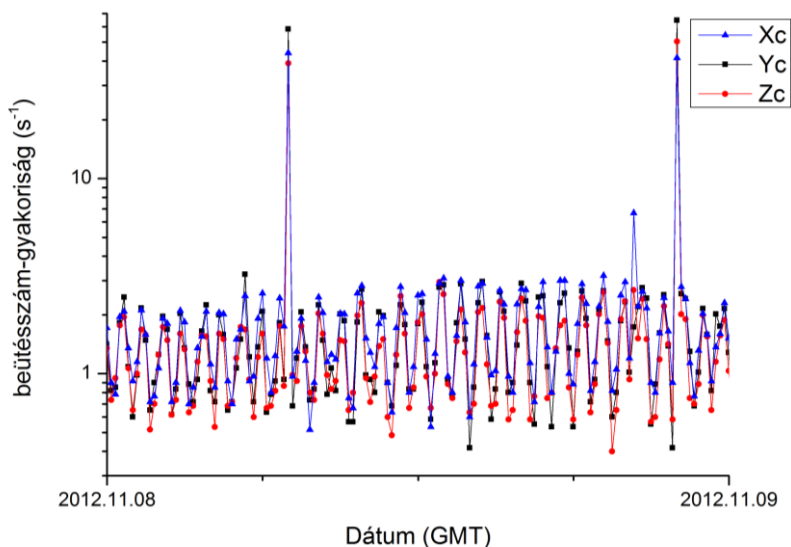


2. ábra A TRITEL-SURE és a DOSTEL kísérlet a Nemzetközi Űrállomás Columbus laboratóriumának Európai Fiziológiai Moduljában (fotó: NASA/ESA)

### 4. Az előzetes eredmények (2013. november 6–9.)

Az előzetes terveknek megfelelően Kevin Ford űrhajós november 9-én adatletöltést hajtott végre a TRITEL műszeren. A letöltött adatokat ezt követően ellenőrzés és tudományos kiértékelés céljából a Földre továbbították. A műszer belső műszaki állapotát leíró (idegen szóval *housekeeping* vagy HK) adatok alapján az eszköz megfelelően működik. Együttal a mérési adatok részletes kiértékelése is megkezdődött.

A mért időspektrumokon (3. ábra) jól láthatók a dél-atlanti anomálián való áthaladások okozta intenzitás-növekedések, valamint felfedezhetők a 90 perces és 1 napos periódusú, a Föld megdőlt mágneses tengelyének köszönhető változások.



3. ábra A koincidencia események időspektruma, TRITEL-SURE

## 5. Kitekintés

A TRITEL-SURE kísérlettel a tervek szerint 2013 májusáig végeznek méréseket a Columbus modulban. Ezt követően – reményeink szerint – a 2013 márciusában az űrállomás orosz szegmensére felkerülő TRITEL rendszert egészíti majd ki.

## Köszönetnyilvánítás

A TRITEL-SURE kísérlet az Európai Unió 6. Keretprogramjának terhére meghirdetett SURE program keretében (RITA-CT-2006-026069), a műszer fejlesztése és megépítése pedig a 98057-es számú ESA PECS együttműködésnek köszönhetően valósult meg. Köszönet illeti továbbá a kísérlet két külföldi társkutatóját, Sönke Burmeistert (CAU, Kiel) és Günther Reitzet (DLR) a fejlesztés és a kiértékelés során nyújtott segítségükért és együttműködésükért.

## Hivatkozások:

- [1] Fehér I., Deme S., Szabó B., Vágvolgyi J., Szabó P. P., Csőke A., Ránky M., Akatov Yu. A. (1981): A new Thermoluminescent Dosimeter System for Space Research. *Advances in Space Research*, Vol. 1, pp. 61–66
- [2] Beaujean R., Kopp J., Reitz G. (1999): Active Dosimetry on Recent Space Flights. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 85, pp. 223–226
- [3] Pázmándi T., Deme S., Láng E. (2006): Space dosimetry with the application of a 3D silicon detector telescope: response function and inverse algorithm. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 120, pp. 401–404

## A Föld plazmakörnyezetének kutatásában alkalmazott módszerek és műszerek

**Dr. Bencze Pál**

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet,  
Sopron

*A Föld plazmakörnyezetének vizsgálatáról szóló beszámolók általában csak röviden, vagy egyáltalán nem foglalkoznak az alkalmazott mérés technikával. Ezért hasznos lehet ezeknek a módszereknek és az alkalmazásukat szolgáló műszereknek az összefoglaló ismertetése. A módszerek és műszerek jobb áttekinthetősége érdekében célszerű ezeket csoportosítani elsősorban annak alapján, hogy azok a Föld felszínéről, vagy űreszközökön elhelyezve teszik lehetővé a méréseket.*

### A plazmakörnyezetnek a Föld felszínéről történő vizsgálatát lehető tevő módszerek

*Természetes források felhasználásával alkalmazható módszerek:*

- geomágneses pulzációk
- whistlerek
- neutronmonitorok felhasználása

*Mesterséges források felhasználásán alapuló módszerek:*

- rádióhullámok ionoszférikus abszorpciója (A1, A2, A3 módszer)
- relatív fázismérés
- driftmérés három vevőkészülék alkalmazásával
- meteorradar módszer
- ionoszféra-szondázás
- rádióhullámok inkohere ns szóródásán alapuló módszer

### Űreszközök (rakéta, mesterséges hold) fedélzetén alkalmazott módszerek

- Langmuir-szonda és alkalmazása
- fékező potenciál analízátor és alkalmazása
- elektrosztatikus analízátor és alkalmazása
- tömegspektrométer és alkalmazása
- elektromos tér mérése és alkalmazása
- mágneses tér mérése és alkalmazása

### A plazmakörnyezetnek a Föld felszínéről történő vizsgálatát lehetővé tevő módszerek

*Természetes források felhasználásával alkalmazható módszerek*

**Geomágneses pulzációk** a plazmaszférában a plazmasűrűség mágneses erővonal menti eloszlásának a meghatározására alkalmazhatók. A geomágneses pulzációknak a Pc 3–4 típusú, 10–35 s periódusú csoportja használható erre, amelyek a napszél és a lökéshullámról visszaverődött protonok közötti kölcsönhatás eredményeként keletkeznek. Ezeknek a pulzációknak a spektrumában a mágneses erővonalak önfrekvenciájával megegyező része alkotja az erővonal rezonancia (FLR, *field line resonance*) típusú pulzációkat. Az FLR pulzációk periódusa a geomágneses szélesség növekedésével a mágneses erővonal hosszabbodá-

sa következtében növekszik. A periódus nemcsak az erővonal hosszúságától, hanem a plazmasűrűségtől is függ, mindkettővel egyenesen arányos. Ez a rezgő rendszer egy elektromos rezgőkörhöz hasonlítható. Az FLR típusú pulzációk segítségével adott geomágneses szélességen – a geomágneses teret egy a Föld középpontjában elhelyezett dipólus mágneses terével közelítve – a plazmasűrűség erővonal menti eloszlása is meghatározható. A lökeshullám előtt keletkezett pulzációk mágneses erővonalakkal rezonáns kölcsönhatásba nem lépett részének (UW, *upstream waves*) a periódusa a geomágneses szélességgel nem változik.

A **whistlerek** a villámok elektromágneses sugárzásának az a része, amely a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjedő résztől (szferikusz) eltérően a mágneses erővonalak mentén terjed az egyik félgömbről a másik félgömbre. A jel spektruma (0–10 kHz) a hangfrekvenciás tartományra terjed ki, tehát a whistler hallható. A közeg, amelyben a whistlerjel terjed diszperzív, aminek következtében a terjedési sebesség a frekvencia függvénye. Így a jel nagyobb frekvenciájú komponensei előbb érnek a vétel helyére, mint a kisebb frekvenciájúak. Ez a diszperzióval fejezhető ki, ami csak akkor érvényes, ha a frekvencia sokkal kisebb, mint az elektronok girofrekvenciája. A plazmaszféra kutatásában az elektronok girofrekvenciájához közelebbi frekvencia komponenseket használunk, ezért a diszperzió kifejezésében a frekvenciát a girofrekvencia negyede, valamint a terjedés iránya és a mágneses tér közötti szög koszinuszának a szorzatával kell helyettesíteni. Ebben az esetben az így kapott terjedési idő frekvenciával történő változásában mutatkozó inflexió koordinátáit használják az elektron-sűrűség magassággal történő változásának a meghatározására.

A Föld plazmakörnyezetében a mintegy 70 km alatti magasságtartományban az ionizációt nagyrészt a galaktikus kozmikus sugárzás idézi elő. A neutronok a primér galaktikus sugárzás és a légkör közötti kölcsönhatás következtében jutnak szerephez, mint a primér galaktikus kozmikus sugárzás indikátorai. A neutronokat **neutronmonitorok** segítségével észlelhetjük. A neutronmonitor négy részből áll. Ezek a reflektor, amely parafin- vagy polietilén-réteg, alatta ólomréteg, majd ezt a neutronok lassítására szolgáló, protonokban gazdag anyagból álló réteg követi. A berendezés alján a neutronszámlálásra proporcionális számlálók vannak.

### *Mesterséges források felhasználásán alapuló módszerek*

**Rádióhullámok ionoszférikus abszorpciója.** Az A1 módszer az ionoszférába függőlegesen beeső rádióhullámok amplitúdó-változásának, a visszaverődött hullámok amplitúdójának a kisugárzott hullámok amplitúdójához viszonyított nagyságának a meghatározásán alapul. Ezt a módszert általában ionoszféraszondázó berendezéseknél alkalmazzák úgy, hogy a szondázásnál a frekvenciát nem változtatják és mérik a kisugárzott és a visszaverődött hullámok amplitúdóját.

Az A2 módszer a rádióhullámok teljes ionoszféra által létrehozott abszorpciójának a meghatározására alkalmas, és elsősorban nagy geomágneses szélességeken alkalmazzák. Ugyanis itt a nagymértékű ionizáció miatt az A1 és A3 módszer nem alkalmazható. Az A2 módszer a kozmikus rádió zaj felhasználásán alapul, és annak a teljes ionoszféra által előidézett abszorpciója meghatározásának útján valósul meg. Ehhez riométereket (*relativ ionospheric opacity meter*) alkalmaznak, amelyek 30 MHz-nél nagyobb frekvencián mérik a kozmikus rádió zaj intenzitását.

Az A3 módszer az ionoszférába ferdén beeső rádióhullámok amplitúdó-változásának meghatározásán alapul. A rádióhullámok forrása lehet egy a megfelelő hullámhossztartományban működő műsorszóró adó, vagy saját adó. A hullámhossztartomány attól függ, hogy az ionoszféra melyik rétegét, milyen magasságú részét akarjuk tanulmányozni. Minél nagyobb magasságról van szó, annál nagyobb frekvenciát kell választani. A módszer alkalmazásának a feltételei: az adó olyan távolságban legyen a vételi helytől, hogy egyszeri visszaverődés legyen feltételezhető, másrészt az adó teljesítménye ne változzon.

A rádióhullámoknak három paramétere van, amelyek mind felhasználhatók az ionoszféra vizsgálatára. Ezek az amplitúdó, a frekvencia és a fázis. A **relatív fázismérést** az teszi lehetővé, hogy a rádióhullámok egyrészt a talaj felszíne mentén (felületi hullám), részben az ionoszférából visszaverődve (térhullám, visszavert hullám) terjednek. A vétel helyén észlelt rádióhullám a kettő eredőjének felel meg. Ha feltételezzük, hogy az adó–vevő távolság nem változik, akkor a felületi hullám fázisa sem változik, és az észlelt térerősség fázisváltozását csak a térhullám fázisváltozása határozza meg. Ez a fázisváltozás viszont a térhullám által megtett út hosszúságának a változásától, vagyis a visszaverődési magasság változásától függ. A fázis meghatározása a felületi hullám fázisához viszonyítva történik, ezért beszélünk relatív fázismérésről. Ha a fázismérés akkora távolságban lévő adó segítségével történik, amelyben a felületi hullámok teljesen elnyelődnek (pl. MF, HF), a vétel helyén csak a térhullámokat észlelhetjük, a fázisváltozás a tényleges fázisváltozásnak felel meg, nem a felületi hullám fázisához viszonyított.

A **driftmérés** a plazmamozgás sebességének és irányának a meghatározására szolgál. A driftmérés egyik legelterjedtebb módszere a három vevő segítségével történő driftmérés (*three receiver method*). A módszer alapját az a tény képezi, hogy az ionoszféra ionizáltsága nem homogén, benne a környezetüktől eltérő sűrűségű „felhők” fordulnak elő. Ezek a plazma mozgásával együtt mozognak. Ha az adó által kisugárzott rádióhullámok egy ilyen „felhőről” verődnek vissza, a visszavert jel amplitúdója megnő a törésmutató-változás következtében. Megfelelően nagy időbeli felbontást alkalmazva a plazmafelhőkkel összefüggő amplitúdó-változásokat regisztrálhatjuk. A módszer egy derékszögű háromszög csúcspontjaiban elhelyezett három vevőkészüléket alkalmaz. A háromszög befogóinak hossza az alkalmazott frekvenciának megfelelő hullámhosszúság fele. A frekvenciát az A3 módszer ismertetésénél említett megfontolások alapján választjuk ki. A három vevőkészülék regisztrátumait összehasonlítva az amplitúdó-változások egymáshoz viszonyított eltolódásából a plazmafelhő, illetve ezzel a drift sebességét és irányát meghatározhatjuk.

A légkörbe becsapódó meteoritok a sűrűlés következtében felizzanak, felületükről molekulák párolognak el, amelyeket a Nap elektromágneses sugárzása ionizál. Így egy a meteorit útját jelző plazmacsik keletkezik, amelyet a különböző magasságokban uralkodó eltérő nagyságú és irányú szél eltorzít. A 90 és 150 km közötti magasságtartományban ugyanis a semleges közeg, a semleges részecskék és az ionok közötti gyakori ütközések következtében mintegy magával vonszolja a plazmát. A plazmacsikról a rádióhullámok visszaverődnek. Ezért ha a plazmacsikot három megfelelően elhelyezett radarberendezéssel figyeljük meg, a plazma mozgásának a sebességét és irányát is megállapíthatjuk. Ez a **meteorradar módszer**.

Az ionoszféra függőlegesen beeső rádióhullámokkal történő **szondázása** a legelterjedtebb módszere az ionoszféra-kutatásnak. A függőleges irányban kisugárzott, általában 1 és 20 MHz közötti frekvenciájú rádióhullámok lehetővé teszik az elektronsűrűség magassággal történő változásának a meghatározását. Abban a magasságban, ahonnan az adott frekvenciájú impulzus visszaverődik, az elektronsűrűség az ezzel arányos plazmafrequenciával arányos. A visszaverődés magasságát a berendezés az impulzus kibocsátása és visszaverődést követő vétele között eltelt idő alapján határozza meg, feltételezve, hogy a rádióhullámok a fény terjedési sebességével terjednek. Mivel a terjedési sebesség a plazmában, az ionoszférába belépve a fény terjedési sebességénél kisebb, az előbbieket szerint meghatározott magasság a tényleges magasságnál nagyobb, és ezért látszólagos magasságnak nevezzük. Az ionoszféra-szondázás eredményeként egy ionogramot kapunk, amely a látszólagos visszaverődési magasságot a szondázási frekvencia függvényében ábrázolja. A tényleges visszaverődési magasságot a törésmutató segítségével számíthatjuk ki és határozhatjuk meg az elektronsűrűségnek a magassággal történő változását, az elektronsűrűség-profil.

A rádióhullámok visszaverődése a frekvencia növekedésével elér egy olyan frekvenciát (pl. ionoszféra-szondázás esetén), amelynél nagyobb frekvenciájú (> 30 MHz) rádió-

hullámok már nem verődnek vissza az ionoszférából, csekély energiaveszteséggel kiléphetnek a bolygóközi térbe. Az ilyen VHF rádióhullámok energiavesztesége az **inkoherens szóródástól** származik. Az inkoherens szóródás jelensége arra vezethető vissza, hogy az ionoszférát alkotó elektronok hőmérsékleti mozgást végeznek. Ahhoz, hogy a szóródás észlelhető legyen, az alkalmazott rádióhullámoknál nagy (MW nagyságrendű) teljesítményre van szükség. Az inkoherens szóródás módszere a szóródás spektrumának a meghatározásán alapszik. A spektrum szélessége az elektronhőmérséklettel és a közepes iontömeggel, a spektrumban jelentkező minimum mélysége az elektron- és az ionhőmérséklet hányadosával, a kisugárzott frekvencia és a szórt energia maximumához tartozó frekvencia közötti különbség a Doppler-eltolódással arányos.

### Űreszközök fedélzetén alkalmazott módszerek

Az ionoszférában a légkörön belüli energia-eloszlásnak megfelelően három különböző hőmérsékletet különböztetünk meg: a semleges, az ion- és az elektronhőmérsékletet. Az ionhőmérséklet átmenetet képez a legnagyobb hőmérséklet, az elektronhőmérséklet, és a legalacsonyabb hőmérséklet, a semleges hőmérséklet között, közvetítve az elektrongáztól átvett energiát a levegő semleges komponense felé.

Az elektronhőmérséklet és elektronsűrűség meghatározására a plazmadiagnosztika legegyszerűbb és széles körben alkalmazott eszköze a **Langmuir-szonda** (*Langmuir probe*). A Langmuir-szonda egy gömb, henger vagy sík felületből álló plazmadetektor. Ha a detektor pozitív potenciálú és azt növeljük, a szonda egyre nagyobb mértékben taszítja az ionokat. Így a szonda körül egy ionoktól mentes réteg alakul ki, amelyben az elektronok gyorsulnak. Ha a detektor negatív potenciálú és azt növeljük, a szonda az elektronokat taszítja, az ionokat egyre nagyobb mértékben vonzza. Azt a potenciált, amelynél a teljes áram (elektronáram + ionáram) zérussá válik, „lebegő” potenciálnak nevezzük. Ez az a pont, ahol a maradék elektronáram egyenlő az ionárammal. A lebegő potenciálnál pozitívabb potenciáloknál az elektronáram mindaddig növekszik, amíg a szondát valamennyi elektron el nem éri, az elektronáram telítésbe nem jut. A lebegő potenciálnál nagyobb negatív feszültséget tovább növelve az ionáram a telítési értékhez közeledik. Ebben az esetben az összes ion eljut a szondára, és elektronoktól mentes réteg alakul ki. Az elektronsűrűség a telítési elektronáram és az ionmentes réteg felületének hányadosával arányos. Az áramnak a telítési szakaszok közötti lineáris növekedési szakaszán az áram logaritmikus deriváltjának a feszültség függvényében történő változása az elektronhőmérséklet meghatározását teszi lehetővé.

Az ionhőmérséklet meghatározására az űreszközökön alkalmazott mérési módszerek közül a **fékező potenciál analízátor** (RPA, *retarding potential analyzer*) alkalmas. Az RPA működését tekintve egy elektroncsőhöz hasonlítható, tulajdonképpen ioncsapda (*ion trap*). A gömb, henger vagy sík felülettel rendelkező, az ionok bejutását biztosító ablak mögött egy negatív potenciálú rács helyezkedik el, amelynek az elektronok bejutásának a megakadályozása a feladata. Az RPA belseje felé ezt a „vezérlő” rács követi, amely a bejutott ionok tömeg szerinti szétválasztását végzi a rácsra adott fűrészfogfeszültség segítségével. A fűrészfogfeszültség a maximális pozitív értékektől a zérus feszültségig változik és a térbeli felbontásnak megfelelő mértékben periodikusan ismétlődik. A vezérlő rácson átjutott ionokat a kollektor gyűjti össze. Ennek eredményeként jön létre az RPA volt–ámpér karakterisztikája, amely az ionáramot ábrázolja a fűrészfogfeszültség függvényében. A volt–ámpér karakterisztikához legjobban illeszkedő görbe paraméterei teszik lehetővé az ionösszetétel és az ionhőmérséklet meghatározását. A kollektor felett még egy negatív potenciálú rács gondoskodik a kollektorból az UV sugárzás hatására kilépő elektronok visszatartásáról.

Az **elektrosztatikus analízátort** szintén az ionösszetétel meghatározására használják. Az elektrosztatikus analízátor segítségével azonban az ionösszetétel közvetlenül mérhető, nem közvetve görbeillesztés útján tudjuk csak megállapítani. Az analízátor általában egy fél-



gömbreteg alakú elektródarendszer. A félgömb alakra azért van szükség, hogy az ionok mozgásának az irány szerinti eloszlását is meghatározhassuk. A gömbretegen belül félkör alakú csatornákat alakítanak ki, amelyeknek a határfelületei közé pozitív feszültséget kapcsolnak. Az ionokra ható elektrosztatikus tér, illetve az ennek megfelelő energia kiegyenlíti az ionok centrifugális erőből származó energiáját. Ily módon csak meghatározott energiájú (tömegű) ionok mozoghatnak körpályán és juthatnak az elektronsokszorozóba (*electron multiplier* vagy *channeltron*, CEM). A CEM működése hasonlít a fotoelektron-sokszorozó-éra (*photomultiplier*). Esetünkben a belépő ionfluxus a CEM-ben a belső és külső fal között többször visszaverődve a falba ütközéskor elektronokat vált ki. Ily módon egy belépő részecske hatására a kilépő szekunder elektronok száma megsokszorozódik. Az egyes CEM-ek lemez alakban sorba rendeződött változata a *channel plate*.

A semleges léggörzt gázkeverék alkotja, amelynek összetétele fontos szerepet játszik a léggör folyamataiban, szem előtt tartva azt a tényt is, hogy a léggör egyetlen egészet alkot. A semleges felső léggör összetételének a meghatározására a **tömegspektrométereket** használják. Ezek közül az egyik leggyakrabban alkalmazott a kvadrupól tömegspektrométer. Ez a készülék négy, egymással párhuzamos, hiperbolikus keresztmetszetű rúdból áll. Az egymással szemben lévő rudak össze vannak kötve. Az egyik rúdpárra rádiófrekvenciás feszültséget (RF), a másik rúdpárra egyenfeszültséget kapcsolnak. A RF tér erőssége és frekvenciája határozza meg, hogy mekkora tömegű, pontosabban milyen  $m/e$  arányú ionok juthatnak át az analízátoron és kerülhetnek a csatlakoztatott detektorba. Az ettől eltérő tömegű ionok a rudakba ütköznek. Semleges gázkeverék (levegő) esetén a gázkeveréket előbb ionizálják, és csak ezután jutnak az így keletkezett ionok a tömegspektrométerbe.

A Föld plazmakörnyezetében fontos szerepet játszanak az **elektromos terek**. Ezek a terek az időben „állandó” tértől a MHz frekvenciájú jelekig terjednek. Forrásaik ennek megfelelően nagyon különbözőek. A leggyakrabban alkalmazott módszer az elektromos tér mérésére a kettős szonda (*double probe*) módszer. A berendezés a tartó szerepét betöltő fémrúdból áll, amelynek két végén egy-egy szondát helyeznek el. Ez az antenna csak a pályára állást követően nyílik ki és a mesterséges hold forgástengelyére merőleges. Az érzékenység növelése az antenna hosszának (10 m nagyságrendű) növelésével érhető el. A szondák Langmuir-szondák, az elektromos térerősség a potenciálok különbségeként adódik.

A **mágneses tér** mérése a Föld körüli térségben egyrészt a permanens, belső eredetű mágneses tér, másrészt az áramrendszerek mágneses terének indikálásával ezeknek az áramrendszereknek a kimutatására szolgál. Űreszközökön a mágneses tér mérésére a leggyakrabban a fluxgate magnetométereket használják. A fluxgate magnetométer legegyszerűbb esetben egy toroid alakú, ferromágneses, nagy permeabilitású anyagból készült mágnes. A mágneset körülvevő primér tekercsbe szinuszos alakú áramot vezetünk, amely folyamatosan a hiszterézis görbének megfelelő felmágnesezést idéz elő. Az egyik irányban a mag telítéséhez szükséges áramot a másik irányban ehhez szükséges árammal összehasonlítva, a különbség a külső mágneses tér intenzitásával arányos. A mágnesezésnek nem kell elérnie a telítést. A mágnesezés a hiszterézis görbe nemlineáris szakaszán a mágneset és a primér tekercset körülvevő szekunder tekercsben indukált feszültségnek az alakját torzítva felharmonikusokat hoz létre. Ezeknek az amplitúdója a mágnes telítődésének a növekedésével növekszik.

## Szemelvények a felsőlégköri elektro-optikai emissziókkal kapcsolatos kutatások utóbbi eredményeiből

Dr. Bór József, Barta Veronika, Dr. Sántori Gabriella

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet,  
Sopron

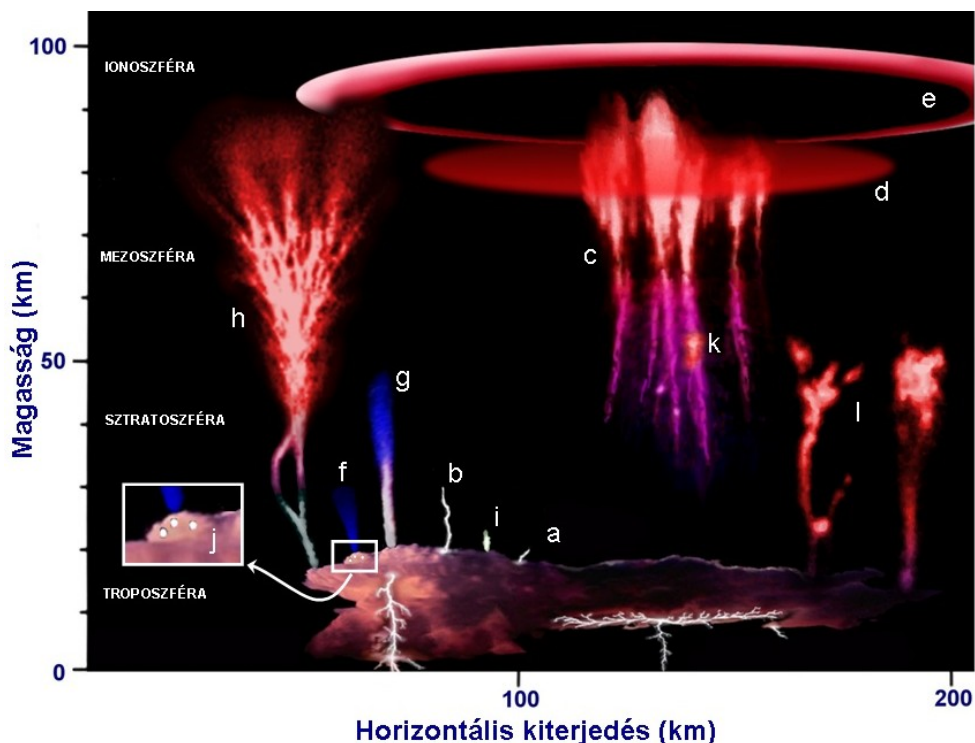
*Az előadás a felsőlégköri elektro-optikai emissziókkal (FEOEM-ek) kapcsolatos kutatások néhány, a legutóbbi szeminárium (2010) óta eltelt időben publikált eredményét ismertette, amelyek többségének elérésében intézetünk munkatársai is aktívan közreműködtek. A főbb érintett témák a vörös lidérccek polaritás paradoxona, alaktani sajátosságai és optikai élettartamuk, a nyalábjelenségek, különös tekintettel az óriás nyalábokra, valamint a másodlagos FEOEM-ek.*

### 1. A vörös lidérccek polaritás paradoxona

A vörös lidérc (*red sprite*) (1. ábra) a mezoszférában bekövetkező elektromos kisüléseket kísérő, legfeljebb néhány századmásodpercig tartó fényjelenség [6]. A felsőlégköri kisüléshez szükséges elektromos tér legtöbbször felhő–föld villámok után épül fel a zivatarfelhőben maradó töltéscentrum és az éjszakai ionoszféra kb. 90 km-es magasságban húzódó alsó határrétege között. E tér erősségét a felhőben maradó többlettöltés mennyisége és a töltéscentrum magassága együttesen határozza meg, így a térerősség a két mennyiség szorzatával jellemezhető. Ez a szorzat jól közelíthető a másik töltéscentrumot kisütő villám vertikális töltésmomentum-változásával (TMV), ami a kisülési csatorna magasságának és a benne átáramlott töltésmennyiségnek a szorzata, és amely a villámkisülés extrém alacsony frekvenciás (ELF, 3–3000 Hz) elektromágneses sugárzása alapján távoli észlelések feldolgozása után becsülhető [4, 3, 7].

A TMV statisztika szerint 1000 db, vörös lidérc megjelenését nagy valószínűséggel kiváltani képes villám közül kb. 100 db (10 %) negatív polarítású. Ezzel szemben a 2007-ig rendelkezésre álló megfigyelésekben 1000 vörös lidércből alig 1 megjelenését okozta igazoltan negatív polarítású forrásvillám [10]. Ez a vörös lidérccek polaritás paradoxona. (A villámkisülés polaritása a kisülő töltéscentrumok közül a magasabban elhelyezkedő töltésének az előjelével egyezik meg.)

A vizsgálatok szerint a nagy TMV értékű negatív polarítású villámok után nagyobb valószínűséggel jelenik meg egy másik FEOEM típus, az ún. lidércudvar (*sprite halo*) (1. ábra). A lidércudvar kialakulásához gyorsan felépülő, különösen erős elektromos térre van szükség. Ez a dinamika negatív polarítású villámokra jellemzőbb. A vörös lidérc típusú felsőlégköri kisülés létrejöttéhez fontosabb, hogy az elektromos tér fennálljon a kvázi önfenntartó kisülési frontok (*streamerek*) kialakulásához szükséges ideig. Ez a feltétel viszont túlnyomó részben csak nagyobb pozitív polarítású villámok esetén teljesül. A lidércudvarok észlelése a vörös lidérccekhez képest kisebb fényességük és rövidebb optikai élettartamuk (2–4 ms) miatt nehezebb, ami magyarázza a látszólagos ellentmondást a megfigyelések számát illetően [11].

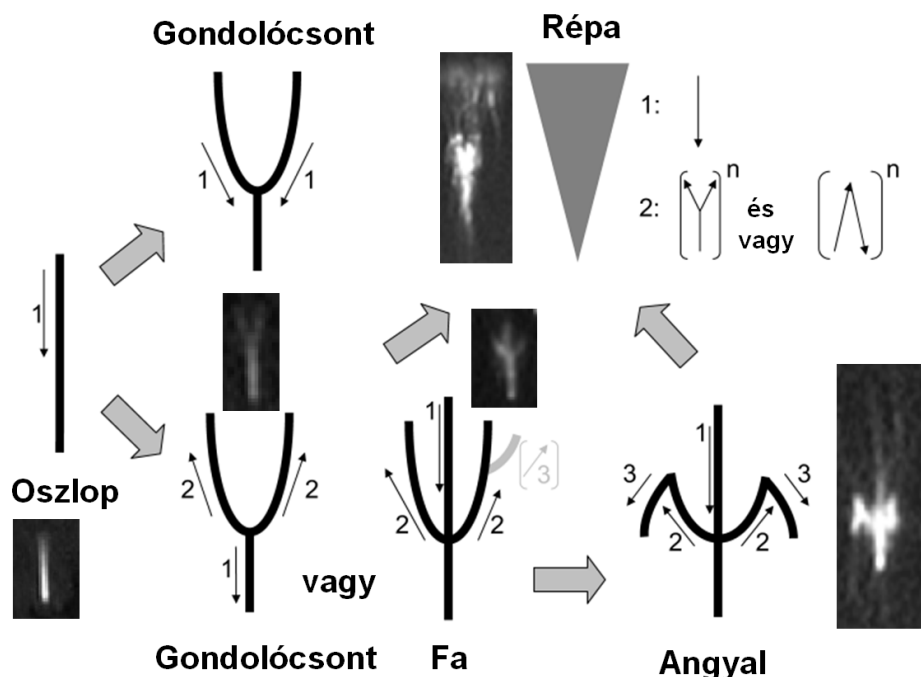


1. ábra A felsőlégköri elektro-optikai emissziók ismert típusai. **(a)** közönséges felfelé irányuló villámkisülés (upward flash); **(b)** felfelé irányuló óriás kisülés (upward superbolt); **(c)** vörös lidérc (sprite); **(d)** lidércudvar (sprite halo); **(e)** gyűrűlidérc (ELVES); **(f)** kis kék nyaláb (blue starter); **(g)** kék nyaláb (blue jet); **(h)** óriás nyaláb (gigantic jet); **(i)** törpe (gnome); **(j)** tündérekék (pixies); **(k)** TROLL; **(l)** pálma lidércek (palm trees).

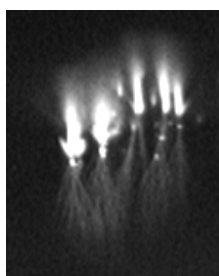
## 2. A vörös lidércek alaktani sajátosságai és optikai élettartamuk

Közép-Európában 2007 és 2009 között közel félezer vörös lidércet rögzített a Sopronban elhelyezett kamera. A nagyszámú észlelés a vörös lidércek közvetlenül megfigyelhető tulajdonságainak statisztikus elemzését tette lehetővé.

A vörös lidérceket a legfényesebb részeik formája szerint alaktani osztályokba lehetett sorolni. A leggyakoribb alakzatok az oszlop, gondolócsont (Y), fa, angyal és répa. Ezek az alakok a vörös lidércek időbeli fejlődésének a jellemző stádiumait is mutatják (2. ábra). A különböző alakoknál hasonló sajátosságok figyelhetők meg, amelyek viszont nem mindig jelennek meg: elágazó indák, kifényesedések az indák mentén és a testben (gyöngyök), ezekhez hasonló, fényes foltok közvetlenül a lidérc teste alatt, magasabban elhelyezkedő diffúz emissziók (puffok) és a lidérc testét körbevevő szintén diffúzabb fénylések (ragyogások).



2. ábra Vörös lidércek alaktani osztályai és fejlődése. A vékony nyilak és sorszámok a kisülési frontok terjedésének irányait és egymáshoz viszonyított időbeni sorrendjét jelölik.



Kiderült, hogy a lidércek többsége (91%) csoportban jelenik meg és a csoportok nagyobb része (55%) többféle alakú elemet tartalmaz. Két különleges csoportot lehetett megkülönböztetni jellemző jegyek alapján. A medúzákra (3. ábra) a fényes, sűrű és mélyre nyúló indarendszer és a test körüli erőteljes ragyogás egyidejű megléte a jellemző. A táncoló lidércek esetében a csoport tagjai nem nagyjából egyszerre, hanem elkülönülten egymás után jelennek meg.

3. ábra Sopronból fényképezett medúza típusú vörös lidérccsoport

A jelenségek teljes optikai élettartamát tekintve 60–80 ms-os értékek voltak a legjellemzőbbek. A medúza típusú események ettől karakterisztikusan rövidebb (20–40 ms-nyi) életűek. Érdekes eredmény, hogy az egyfajta alakú lidércet szerepeltető emissziók között kevesebb a nagyon hosszú (>80 ms) élettartamú, ugyanakkor a vegyes csoportok között a nagyon rövid (<40 ms) élettartamúak ritkábbak [1]. Ezeknek a tapasztalatoknak az megmagyarázása a jövőbeli kutatások feladata.

### 3. Nyalábjelenségek (*blue starter*, *blue jet*), óriás nyalábok (*gigantic jet*)

A különböző nyalábok (1. ábra) kialakulását jelenleg két elmélet magyarázza. Az első szerint intenzív töltésszétválasztás esetén, a felhő tetején levő (általában pozitív) töltésgócból spontán is elindulhat felfelé egy kisülési front (*streamer*). A másik modellben egy felhőn belüli kisülés során az alsó negatív töltéscentrumból elektronok juthatnak ki a magasabban

levő töltések között és tovább haladhatnak az pozitív töltésű alsó ionoszféra felé. Óriás nyalábok esetén ezek a felfelé haladó töltések el is érhetik az ionoszféra alját.

Az óriás nyalábok két osztálya [2] megfeleltethető az egyes keletkezési modelleknek, egy harmadik osztályba tartozó események keletkezési mechanizmusa azonban még nem ismeretes. Az óriás nyalábok jellemző közös tulajdonsága a jellegzetes időbeni fejlődésük: egy vezető nyalábból (*leading jet*) fejlődik ki a teljes nyaláb (*fully developed jet*), amit egy második, lassabb kisülési szakasz követ (utó-nyaláb, *trailing jet*).

Elsősorban a második mechanizmus szerint keletkező óriás nyalábokra jellemző ELF sugárzást kibocsátása, amely globálisan is észlelhető. A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő ELF mérőrendszer rögzítette a 2010-ben Réunion sziget partjainál megfigyelt öt óriás nyaláb jeleit, amelyek segítségével sikerült megállapítani, hogy negatív töltést szállítottak az ionoszférába. A legintenzívebb óriás nyaláb esetében a szállított töltésmennyiség meghaladta a 100 C-ot [8].

Egy másik esetben Olaszországból figyeltek meg egy különleges óriás nyalábot 2009-ben Korzikától nyugatra. Ez a jelenség több szempontból is különleges volt: alacsony felhőzetű (6,5 km) zivatarban keletkezett, pozitív töltést szállított az alsó ionoszférába, ennek ellenére jól észlelhető alacsony frekvenciás hullámokat sugárzott. A nagycenki mérőrendszer olyan 2–3 Hz frekvenciájú jeleket rögzített, amelyek az ionoszféra magasabb rétegeiben gerjesztett ún. ionoszférikus Alfvén-rezonanciajelenségre utalnak [9].

#### 4. Másodlagos FEOEM-ek

Néhány felsőlégköri emisszió másodlagosnak nevezhető abban az értelemben, hogy önmagukban nem jelennek meg, csak más – ilyen értelemben elsődleges – felsőlégköri emissziók után. Ilyen például a felhőtetőből „kinövő” ún. pálmalidérc, vagy a korábbi nagyobb vörös lidérc indáin látszólagosan felfelé „kapaszkodó” troll (1. ábra). A troll lényegében egy másodlagos nyalábjelenség. Műholdas megfigyelések szerint előfordulhatnak másodlagos óriás nyalábok is. Ezeknek a jelenségeknek a létrejötte és jellemzői jól magyarázhatók azzal, hogy az elsődleges FEOEM (többnyire vörös lidérc) helyileg módosítja, gyakorlatilag lejjebb szállítja az ionoszféra alsó határát. A különböző másodlagos emissziók megjelenési formája így attól függ, hogy milyen a módosult alsó ionoszféra és a felhőbeli töltéscentrumok egymáshoz viszonyított konfigurációja [5].

#### Köszönetnyilvánítás

A FEOEM-ekkel kapcsolatos kutatómunkát az OTKA támogatta (K72474). A nemzetközi együttműködések megvalósulásában az ESF „*Thunderstorm effects on the atmosphere-ionosphere system*” (TEA-IS) című kutatási hálózat programja játszott szerepet. Ez a tanulmány a TÁMOP-4.2.2.C–11/1/KONV-2012-0015 számú (Föld-rendszer) projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Bór J. (2013): Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007–2009. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 92, pp. 151–177
- [2] Chou J.K., et al. (2010): Gigantic jets with negative and positive polarity streamers. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, A00E45

- [3] Cummer S.A., Inan U.S. (2000): Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations. *Radio Science*, Vol. 35, pp. 385–394
- [4] Huang E., et al. (1999): Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104 (D14), pp. 16943–16964
- [5] Lee L.-J., et al. (2012): Characteristics and generation of secondary jets and secondary gigantic jets. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, A06317
- [6] Pasko V.P., et al. (2011): Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: phenomenology, mechanisms and effects. *Space Science Reviews*, Vol. 168, pp. 475–516
- [7] Satori G., et al. (2013): An Overview of Thunderstorm-Related Research on the Atmospheric Electric Field, Schumann Resonances, Sprites, and the Ionosphere at Sopron, Hungary. *Surveys in Geophysics*, in press
- [8] Soula S., et al. (2011): Gigantic jets produced by an isolated tropical thunderstorm near Réunion Island. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, D19103
- [9] van der Velde O.A., et al. (2010): Multi-instrumental observations of a positive gigantic jet produced by a winter thunderstorm in Europe. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D24301
- [10] Williams E., et al. (2007): Polarity asymmetry of sprite-producing lightning: A paradox? *Radio Science*, Vol. 42, RS2S17
- [11] Williams E., et al. (2012): Resolution of the sprite polarity paradox: The role of halos. *Radio Science*, Vol. 47, RS2002