

ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁS A KOZMOSZBÓL

Szabados László

az MTA doktora, tud. tanácsadó, MTA Csillagászati Kutatóintézet
szabados@konkoly.hu

Az elektromágneses sugárzás emberre gyakorolt hatásának áttekintésekor nem feledkezhetünk meg a kozmikus térség felől érkező sugárzásról sem. Ennek csak egy része jut le a földfelszínre. Az élő szervezetekre nézve kedvező, hogy éppen legnagyobb energiájú komponensei nem érik el a felszínt. Az Univerzum megismerése szempontjából azonban ez nem kevés nehézséget okoz, mert az elektromágneses sugárzás 20 nagyságrendet átfogó tartományának felét csak a légkör fölé küldött műszerekkel vizsgálhatjuk. Az összeállítás többi tanulmányától eltérően ez az írás nemcsak az elektromágneses sugárzás humán hatásaival foglalkozik, hanem arra is kitérünk, hogy az emberi tevékenység a civilizáció jelenlegi fokán mennyire nehezíti meg a csillagászati megismerést az egyes hullámhosszakon.

A látható fény tartománya

A földi légkör az elektromágneses színeképből a látható fényt, a rádiósugárzást és az infravörös hullámok egy részét engedi át, de még e sugárzások is kissé gyengítve érik el a földfelszíni műszereket. A rövidebb hullámhosszú, vagyis nagy energiájú ibolyántúli, röntgen- és gamma-sugarakat a légkör elnyeli. Ez egyben azt is jelenti, hogy az atmoszféra, mint védőréteg fölé emelkedő asztronauták az űrállomáson kívüli tevékenységük során ki vannak téve e

sugárzások káros hatásainak. Az űrhajósok védőöltözetét úgy kell kialakítani, hogy a szkafander az oxigénellátás mellett szűrje ki az élő szervezetre káros sugárzásokat is. A kozmikus térségben tartózkodó embert veszélyezteti a nagy sebességgel szálguldo kisebb-nagyobb testekkel való ütközés is. Már az egészen apró meteoroidok becsapódása is jövátehetetlen kárt okozhat az űrhajók burkolatában vagy az űrhajón kívül tartózkodó ember szkafanderében, de ennek tárgyalása kívül esik cikkünk keretein.

Kezdjük az áttekintést az elektromágneses sugárzás szemmel is érzékelhető tartományával, az optikai hullámokkal! A korunkra jellemző energiapazarlást jól szemléltetik azok a képek, amelyek odafentről, a mesterséges holdak irányából mutatják a földi éjszakát. A *fényterképet* szinte csak a színezés hiánya különbözteti meg a gazdasági földrajzi térképektől: minden város jól kivehető, a területének megfelelő nagyságú fényfoltként jelenik meg. Az iparvidékeket egybefüggő fénytenger jelzi. Mindez azért, mert a fényforrások egy része – szűkségtelenül – fölfelé (is) világít, illetve a jól beállított, csak lefelé világító lámpák fényének egy része szóródik a levegőben levő porszemcséken és egyéb szennyeződéseken. A fényterkép tehát nemcsak a fényszennyezést mutatja, hanem azt is jelzi, hogy egyébként is mennyire szennyezett a nagyobb települések levegője.

Az *optikai csillagászat* obszervatóriumainak közvetlen közelében a csillagászok hozzájárulása nélkül általában nem lehet új fényforrást, új épületet létesíteni. A városok terjeszkedése miatt a korábban épült, egykor még a városon kívül vagy azok szélén levő obszervatóriumok (bel)városi csillagvizsgálókká váltak, amelyekben ma már többnyire lehetetlen tudományos értékű asztronómiai megfigyeléseket végezni. Ezen a közelükre korlátozódó fényvédelem sem segít, hiszen a légkörben lebegő aeroszolon és porszemcséken szóródó fénytől az egész égbolt határfényessége megnő, amihez nemcsak a közeli, hanem a távolabbi fényforrások is hozzájárulnak. A városlakók többsége nem látta még a Tejutat, és az állatövi fényt is legfeljebb hírből ismeri. Vagy még onnan sem, és az állatövről csak a horoszkópra asszociál, ám a saját jegyéhez tartozó csillagképet nem ismeri fel az égbolton, ez utóbbit azzal magyarázva, hogy a csillagok túlságosan halványak. A földi fényekhez szokott szemlélettel egyébként is nehéz felfogni az égitestekről érkező sugárzási fluxus gyengeségét. A keveset mondó számértékeknél jobban jellemzi a helyzetet egy több mint fél évszázados anekdota. A legnagyobb távcsövekkel akkoriban már elsősorban spektroszkópiai megfigyeléseket végeztek, és a halvány égitestekről csak többórás expozícióval lehetett használható színeképet készíteni. A történet szerint a csillagász azt kérte az obszervatóriumba látogató dohányos vendégeitől, hogy távozásuk után egy darabig ne gyújtsanak rá, mert a felvillanó gyufa fénye zavaró színekpvonalakot kelt a gyenge égi forrásról készítendő spektrumban.

Napjaink legkorszerűbb optikai csillagászati berendezései több nagyságrenddel érzékenyebbek a néhány évtizeddel korábbiaknál – a legnagyobb távcsövek főtükreinek átmérője már a tíz métert is eléri, a jelek

regisztrálásában pedig a fényképezést az elektronikus rögzítés váltotta fel –, az órákig tartó expozíció mégsem ment ki a divatból, mert az egykor észlelt halvány objektumoknál sokkalta halványabbak is akadnak.

Jellemző, hogy az optikai csillagászat megfigyelőhelyei a lehető legmesszebbre kerültek a lakott területektől. Ilyen obszervatóriumokat ugyanis oda érdemes telepíteni, ahol az ipari és fényszennyezés még nem tette tönkre a légkört, és a lehető legnagyobb a felhőmentes éjszakák száma. E követelményeknek a száraz klímájú magashegységek felelnek meg a legjobban. A legjelentősebb földi obszervatóriumokat a Hawaii-szigetek és a Kanári-szigetek néptelen csúcsaira, valamint az Andok chilei fennsíkjaira telepítették. Ebben a tengerszint feletti magasságban a tartós munkavégzés szigorú egészségügyi követelményeket támaszt az oda utazókkal szemben. Újabban az Antarktis is az optikai csillagászat megfigyelőbázisai közé került. Az ottani levegő tisztasága mellett a hideg helyszín előnye még az alacsony páratartalom és a folyamatos megfigyelési lehetőség, hiszen az ottani télen hónapokig nem kel fel a nap. A megszakítás nélküli hosszú adatsorok a többszörösen periódusos jelenségek vizsgálatában fontosak, mert az elemzést nem nehezítik a szakaszos mintavételezés következtében fellépő hamis frekvenciák.

A legjobban kihasználható optikai távcső azonban nem a Földön van, hanem a légkör legnagyobb része fölött kering a Föld körül. Mivel állandó helyszíni személyzete nincs, az 1990 óta működő Hubble-űrtávcső minden feladatát automatikusan, illetve földi irányítással végzi. A zavartalan működés érdekében azonban néha szükség van az ember helyszíni beavatkozására. A Hubble-űrtávcsövet eleve kis magasságú pályára helyezték, hogy az űrrepülőgépen utazó asztronauták eljuthassanak hozzá.

Egy-egy karbantartás során az űrtávcsövet a robotkarral beemelik az űrrepülőgép rakterébe, és nemcsak kicserélik az elromlott vagy elavult detektorokat, segédberendezéseket, hanem minden szerviz alkalmával az űrrepülőgép kicsit távolabb is viszi az űrtávcsövet, mert 600 km-rel a felszín fölött még nem teljesen elhanyagolható a légkör fékező hatása. Az ebben a magasságban keringő űreszköz 2-3 év alatt jócskán fékeződik a közegellenállástól, emiatt alacsonyabbra kerül, ahol még sűrűbb a légkör és nagyobb a fékező hatása.

Az optikai tartományt vizsgáló űrtávcső semmiképp nem teszi szükségtelessé a földfelszíni optikai csillagászatot. Ami az alig két és fél méter átmérőjű Hubble-űrtávcsővel már nem vizsgálható, arról a földi óriástávcsövekkel még éppen elég foton gyűjthető össze. A költséges üzemeltetés miatt a csillagászok érdeke, hogy figyelembe vegyék, milyen kutatást melyik műszerrel érdemes végezni.

Rádiócsillagászat

A 20. század közepén kialakult *rádiócsillagászat* eszközei szintén földfelszíni teleszkópok. Mivel a kozmikus rádiósugárzás vizsgálatához hatalmas berendezésekre van szükség, a rádiócsillagászok nem menekülhetnek túlságosan távol a civilizáció által érintett területektől. A nagy átmérőjű teleszkópokat nemcsak a detektálandó jel kis intenzitása teszi szükségessé, hanem az is, hogy elegendően nagy felbontású képet sikerüljön alkotni, illetve, hogy meg lehessen különböztetni két, egymástól kis szögtávolságra levő pontszerű rádióforrást. Egy távcső felbontóképesége ugyanis az elektromágneses sugárzás hullámhosszával egyenesen, a sugárzást gyűjtő teleszkóp átmérőjével pedig fordítottan arányos. Mivel a rádiósugárzás hullámhossza a milimétertől a kilométerig terjedő tartományba esik (ebből a földi légkör a 8 mm–15 m

közötti tartományba eső hullámokat engedti át), az optikai távcsövekével azonos felbontás eléréséhez ezerszer-egymilliárdszor nagyobb átmérőjű rádióteleszkópokra volna szükség, mint a látható fény vizsgálatahoz. Ekkora műszerek készítésének technikai és pénzügyi akadályai is vannak.

A tetszőleges égi irányba mozgatható legnagyobb rádióteleszkópok átmérője 100 m körüli, de még azokkal sem érhető el az optikai hullámhosszakon megszokott szögfelbontás. A felbontást interferometriával lehet fokozni, amelynek során két vagy több, egymástól tetszőleges távolságban elhelyezett rádióteleszkóp jeleit egyesítik, ügyelve az egyes teleszkópok által felfogott sugárzás eredeti fázisviszonyainak megőrzésére.

Az interferometriával elérhető szögfelbontást a hullámhossz mellett az szabja meg, hogy mekkora a legnagyobb távolság a rendszerbe kapcsolt rádióteleszkópok között. Már az interkontinentális rádiócsillagászati interferometriának is több évtizedre visszanyúló története van, és az ezredforduló előtt olyan hosszú bázisvonalú interferometriát is sikerült megvalósítani, amelynél az egyik antenna (rádiótávcső) a Föld körül kering. Akkor a rádiócsillagászati szögfelbontás átmenetileg meg is előzte az optikai csillagászatét.

A rádióteleszkópok nem feltétlenül parabolaantennák, téglalap alakú gyűjtőfelület ugyanúgy előfordul, mint kerek. Az óriási antennák sugárzásvisszaverő felülete viszont nem tömör, ellentétben az optikai távcsövek tükrével. A vizsgálandó rádiósugárzás hullámhosszától függően ritka vagy sűrű szövésű drótháló is alkalmas a sugárzás visszaverésére, ez mind a rádióteleszkópok mozgó részének össztömege, mind széllel szembeni viselkedése szempontjából kedvező.

A rádióhullámok detektálásakor ugyanakkor kedvezőtlen, hogy a tulajdonkép-

peni vevőantennaként szolgáló rádióteleszkóp nem egyetlen irányból gyűjti a jeleket, hanem – kisebb mértékben ugyan, de – érzékeny az oldalról érkező sugárzásra is. Ameddig nem sikerül elérni, hogy a rádióteleszkópok iránykarakterisztikája tülhegyes legyen (a gyűjtőfelület optikai tengelyének irányában), addig a földi civilizáció a rádiócsillagászat ellenfele marad. Az ember által használt technikai eszközök ugyanis erősen zavarják a kozmikus rádiójelek vételét. Nem a műsorszóró adók rádiósugárzása a zavarforrás, mert azok frekvenciája kívül esik a csillagászat szempontjából érdekes frekvenciatartományokon. A rádiókészülékek rövid-, közép- és hosszúhullámú sávjain azért lehet nagyon távoli országokból sugárzott adásokat fogni, mert az ionoszféra visszaveri a 15 m-nél nagyobb hullámhosszú rádiósugárzást. Ugyanez történik a kozmoszból érkező, ilyen hullámhosszú sugárzással is, tehát a 15 m-nél nagyobb hullámhosszú rádiósugárzás a földi rádiócsillagászat számára érdektelen. Az URH-jelekkel már nem ez a helyzet, azok csak ott foghatók, ahol a vevőkészülék közvetlenül „látja” az adót, illetve valamelyik átjátszó rádió- vagy tévéantennát. Ezért olyan kicsi az URH-adások vételkörzete.

A műsorszóró és távközlési műholdak által ma már tetszőleges hullámhosszon interkontinentális kapcsolat teremthető, s ez tovább nehezíti a rádiócsillagászat helyzetét. Korábban ugyanis elegendőnek bizonyult, hogy a rádiócsillagászati műszereket dombokkal-heggyekkel körülvárt völgyekbe telepítették, de most már felülről is érkezik földi eredetű sugárzás a rádióteleszkópokba. Az érthető, hogy az optikai csillagászat műszereit miért telepítik magas hegyekre, de mi elől kell a völgyekbe menekülniük a rádiócsillagászoknak? A civilizáció okozta rádiózaj nagy része elől. A háztartási gépek és az ipari elektromos ké-

szülékek eredeti funkciójuk mellett rádiózajforrások is. Mindenki tapasztalhatta már, hogy a tévékészüléke serceg és csíkos a képe, ha a közelben hegesztőkészülék, rosszul árnyékolt mikrosütő vagy öreg porszívó, mixer stb. működik. Pedig ezek névleges működési frekvenciája nem is közös a tévéadásokéval. Az elektromágneses zaj sokszor egészen széles frekvenciatartományban jelentkezik, és ugyancsak fénysebességgel terjed, csak éppen a fény (pl. szikrázó kapcsoló) kivételével közvetlenül nem észlelhető.

A rádiótávcsövekbe érkező kozmikus jelek intenzitása annyira csekély, hogy a vevőelektronikával – nem mindennapi mértékben – olykor billiószorosára kell erősíteni a jelet, hogy az kiértékelhető legyen. Az erősítő azonban a zajt is ugyanilyen mértékben fokozza. Hiába van messze az a készülék, amelynek motorjában a kopott szénkefe minden fordultnál szikrát kelt, a rádiótávcső e gyenge földi jelet így is nagyságrendekkel erősebbnek érzékeli a kozmikus jelforrásnál.

A tudományos kutatás fontosságára tekintettel a rádiócsillagászoknak bizonyos frekvenciákat sikerült védetté nyilvánítaniuk. E sávokat a Nemzetközi Távközlési Unió (ITU) egyéb célra nem ítélti oda. A legfontosabb frekvencia ezek közül az 1421 MHz, vagyis a 21 cm-es hullámhossz, amelyen a csillagközi térben levő hidrogénatomok sugároznak (két spinállapotuk közötti hiperfinom átmenetkor). A Tejútrendszer spirálkarjait is ezen a frekvencián sikerült feltérképezni. A kozmikus rádióvéttel céljaira a csillagászok további két tucat frekvenciasávot próbálnak védeni a 13 MHz és 275 GHz közötti sávban, de az egyre növekvő igény miatt a távközlési és műsorszórási frekvenciák kiosztásakor minden alkalommal meg kell küzdeni a tudományos kutatás érdekének figyelembevételért.

A kozmikus infravörös sugárzás

A látható fény és a rádiósugárzás közé esik az *infravörös* (hullámhosszuk 1-300 mikrométer) és a *szubmilliméteres* (0,3-1 mm) sugarak tartománya. Az ilyen hullámhosszakon a légkör már nem teljesen átlátszó, ezért a csillagászok csak bizonyos „ablakokon” át látnak ki az Univerzumba. Ilyen ablakok vannak az 1-5 mikrométeres tartományban és 10 mikrométer körül. A többi infravörös sugarat a légkörben levő vízmolekulák és szén-dioxid nyeli el, de maguk az ablakok sem teljesen tiszták, mert az adott hullámhosszú sugárzás erőssége a légkör aljára érve alaposan csökken az atmoszféra felső rétegében mérhető intenzitásához képest. A levegő páratartalma viszont a felszíntől felfelé emelkedve gyorsan csökken, ezért az infravörösben észlelő földi távcsöveket is magas hegyekre érdemes telepíteni.

Az infravörös csillagászat nagy földi műszereit többnyire már meglévő obszervatóriumokban állították fel, ezzel megszabadulva az infrastruktúra kiépítésének gondjától. Az óriás optikai távcsövek szomszédságában Chilében, Hawaii-n és a Kanári-szigeteken is működnek az infravörös és szubmilliméteres tartományt vizsgáló teleszkópok.

A hétköznapi életben számos példát találunk arra, hogy az infravörös tartományban a szobahőmérsékletű testek sugárzása dominál. Az éjszakai felderítés és az épületek vagyonvédelme érdekében felszerelt mozgásérzékelő alapja egyaránt az ilyen hullámhosszakra érzékeny kamera. Hasonlóképpen, a házak homlokzatának infravörös sugárzása alapján készített hőképből állapítják meg, hogy a rossz szigetelés következtében hol szökik a meleg.

Az égitestek világában az optikaival szomszédos közeli infravörös hullámhosszakon még a csillagok hőmérsékleti sugár-

zása dominál, de növekvő hullámhosszak felé már az egyre hidegebb tartományok a fő sugárforrások. 100 mikrométeren például a néhány K hőmérsékletű csillagközi por. Ha az optikai tartományban valamerre nem lehet messzire látni a csillagközi fényelnyelés miatt, a színekép infravörös részében az elnyelés hullámhosszfüggése szabad kilátást tesz lehetővé abban az irányban is. Ezeken a hullámhosszakon sikerült a legtöbb információt szerezni a csillagok keletkezéséről, hiszen ez a folyamat a hideg csillagközi anyagban, molekulafelhőkben zajlik.

A csillagászoknak úgy kell vizsgálniuk az égi források infravörös sugárzását, hogy közben maga a távcső és minden, ami vagy aki annak környezetében van, infravörös sugárzást bocsát ki, hiszen átlagos körülmények között ebbe a tartományba esik hőmérsékleti sugárzásuk maximuma. Az egyik legfontosabb teendő, hogy a detektort és környezetét az abszolút nulla fok közelébe kell hűteni. A Föld körül keringő infravörös-obszervatóriumok működési idejét is az szabja meg, hogy mennyi ideig tart ki a hűtőanyag. Bár az eddigiek (közülük a két legfontosabb az IRAS és ISO) hasznos élettartama csak egy-két év volt, nem kétséges, hogy szükség van ilyen űrszondákra, mivel a légkörön kívülről a teljes infravörös tartomány vizsgálható.

A földi mérésekre visszatérve meg kell említeni, hogy a hűtéssel csak a háttérzaj egy része csökkenthető. Böven marad eltávolíthatatlan zajkomponens, például a légkör hőmérsékleti sugárzása. A levegő a benne kialakuló hőmérséklet-különbségek hatására állandóan mozgásban van, ezért a látóirányba eső levegőoszlop hőmérsékleti rétegződése pillanatonként változik, vagyis a mérendő kozmikus jelhez nem állandó értékű háttér adódik. Talán indokoltabb lenne meg is cserélni, hogy mi mihez adódik, mert a háttér erőssége meghaladja

a csillagászati forrástól származó jelét, és a háttér ingadozásának mértéke szabja meg, hogy meddig van értelme a mérésnek. A földi infravörös-méréseknél még a távcső mellett dolgozó csillagász teste is zajforrás. Arra még lehet ügyelni, hogy ő maga keveset mozogjon a mérés közben, sőt, az automatizálás vagy távirányítás megoldásával a személyes jelenlétre sincs szükség, de a levegőben repülő rovarok, bogarak, madarak akkor is mindvégig mozognak. Az ilyen mérésekre ezért is megfelelő hely a magas hegy, néhány ezer méterrel a tengerszint fölött már a madár sem jár...

Nagy energiájú fotonok

A látható fényénél rövidebb hullámhosszú elektromágneses sugárzásnál egészen más jellegű az ember és a kozmikus térség viszonya. Az élet szempontjából szerencsés, hogy e nagyobb frekvenciájú hullámok nem jutnak el a földfelszínig, mert – különböző módon, de – károsak a biológiai szövetekre.

A Földre kívülről érkező **ibolyántúli sugárzás** nagy részét (a legrövidebb hullámhosszú UV-sugarak kivételével) a felszín fölött 25–50 km magasságban levő légköri ózon nyeli el, amit ezért ózonpajzsként is szoktak említeni. Ez túlzás, tekintettel arra, hogy abban a rétegben csak 2–3 ózonmolekula (tehát háromatomos oxigén) akad minden egymillió oxigénmolekula között, de még ez a kis gyakoriság is elég az ibolyántúli sugárzás hatásos kiszűréséhez. A kis ózonkoncentráció ugyanakkor magában hordozza annak veszélyét, hogy a korábban kiterjedten használt gáz, a mesterségesen előállított freon a magaslégtérbe kerülve nagyobb területek fölött is elbontja az ózont. Az Antarktisz fölött már megritkult az ózon, amit szemléletesen ózonlyukként emlegetnek. Az emberiség közös érdeke, hogy az ózonlyuk ne terjeszkedjen tovább.

Ismert tény a túlzásba vitt napozás és a bőrrák kialakulása közötti összefüggés. A napfény ultraibolya komponense nemcsak barnítja a bőrt, hanem árt is neki. A nap-sugárzással még így is csak a legkevésbé káros ibolyántúli sugarak jutnak le a felszínre.

Még rövidebb hullámhosszak felé egyre nagyobb az elektromágneses fotonok energiája, ezért ionizálni tudják az útjukba eső atomokat. Az extrém ultraibolya tartományba eső fotonok a légköri nitrogént és oxigént ionizálva nyelődnek el, a 91,2 nm-nél rövidebb hullámhosszú ibolyántúli fotonok pedig már a semleges hidrogént is képesek ionizálni. A forró csillagokból származó ilyen fotonok már a csillagközi térben elnyelődnek, mert a hidrogénatomok mindenütt megtalálhatók.

A 10 és 0,01 nm közötti hullámhosszú sugárzás az elektromágneses színekép röntgentartománya. A **röntgensugarak** roncsoló hatása ugyancsak közismert. A bioszféra szerencsére szintén védve van e káros sugárzástól, mert a kozmikus források által kibocsátott röntgenfotonok a földi légkör valamelyik atomját ionizálva elnyelődnek. Ez már a magaslégtérben bekövetkezik, így a felszín fölött nagyjából 10 km utazómagasságban haladó repülőgépeken tartózkodók sincsenek kitéve e nagy energiájú sugárzásnak.

A fizikában és a csillagászatban a röntgensugarakat már nem is a frekvenciájukkal vagy a hullámhosszukkal, hanem a fotonok energiájával jellemzik, mert sok szempontból úgy viselkednek, mint a nagy energiájú részecskék. A röntgensugarak eszerint a 0,1–100 keV energiatartományba esnek.

A röntgensugarak fókuszálásakor az optikából ismert, és a rádióhullámoktól kezdve az ibolyántúli sugárzásig bevált módszer nem vezet eredményre, ami a röntgenfotonok részecsketermészetét pél-

dázza. Ha ugyanis a röntgensugárzás reflektáló felülettel találkozik, akkor visszaverődés helyett a foton egyszerűen behatol a „tükör” anyagába. Az ennyire nagy energiájú sugarak mégis visszaverődésre kényszeríthetők, ha a reflektáló felülettel kis szöget bezárva (ún. súroló beeséssel) érkeznek a tükörhöz. E módszerrel sikerült megoldani a röntgensillagászati képalkotást. Jelenleg két nagy röntgentávcső működik a Föld körül keringő űrszondákon.

A gyógyászatban vagy egészségügyi szűrővizsgálaton, valamint a más, kevésbé közismert felhasználási területen (pl. az anyagvizsgálatban) alkalmazott röntgensugarakat mesterségesen állítják elő. A röntgensillagászat létéből következik, hogy az égitestek világában természetes úton is kialakul röntgensugárzás. Közönséges és egzotikus égitestek egyaránt bocsátanak ki ebbe a hullámhossztartományba eső fotonokat.

Az alacsony felszíni hőmérsékletű törpecsillagok körül korona alakul ki, amely a napkoronához hasonlóan millió K hőmérsékletű. Az ilyen forró plazma hőmérsékleti sugárzásának maximuma a röntgentartományba esik. Ugyancsak millió fokos gáz tölti ki a galaxishalmazokban az intergalaktikus teret. Ezt a plazmát éppen röntgensugárzása alapján fedezték fel. Erős röntgenforrásokká válnak a kölcsönható kettőscsillagok is, amikor egyik komponensük a csillagfejlődés végén tömegétől függően fehér törpévé, neutroncsillaggá vagy fekete lyukká zsugorodik. A degenerált anyagú csillag magába szippantja a társáról eltávozott anyagot, és a tömegcsere során a bezuhanó anyag becsapódásának környezete a leadott mozgási energiától annyira felforrósodik, hogy a forró folt a röntgentartományban (is) sugároz. A kettőscsillagok nagy gyakorisága következtében a kb. százezer ismert röntgenforrás nagyobbik hányadának röntgensugárzása

erre a folyamatra vezethető vissza. Erős röntgensugárzás érkezik továbbá az aktív galaxismagokból, pl. kvazárokból. Néhány éve pedig az üstökösökből származó röntgensugárzást is felfedezték. Közelsége miatt azonban a Nap a legfontosabb röntgenforrás – miként más hullámhosszakon is. A Nap sugárzásának földi hatásait ezért külön tárgyaljuk.

Az elektromágneses hullámok közül a **gammásugárzás** a legkeményebb, vagyis a legnagyobb energiájú. A gammasugarak hullámhossza 0,01 nm-nél rövidebb, ezért egy gammafoton energiája meghaladja a 100 keV-ot, a legnagyobb frekvenciájúaké a 100 GeV értéket is elérheti. A kozmikus eredetű gammasugarak nagy része is elnyelődik a Föld légkörében (a Compton-effektus, ill. párkeltés során), az atmoszférán csak a legnagyobb energiájú gamma-kvantumok képesek érintetlenül átjutni. Ezek száma viszont olyan alacsony, hogy a mindennapi élet szempontjából nincs jelentőségük.

A gammasugarak az Univerzum legmagasabb hőmérsékletű tartományaiiban, a leghevesebb folyamatok során keletkeznek. A csillagok energiáját termelő magfúziók is gammasugárzás felszabadulásával járnak, de mire a csillag magjából az energia eljut a felszínig, a fotonok már többször elnyelődnek, és az így gerjesztett állapotba került atomok az elnyelt energiát több lépésben kisugározva, azaz kisebb energiájú fotonok kibocsátásával adják le. A kozmikus térben fénysebességgel száguldó gammafotonok más eredetűek: nagy energiájú tranziens események (pl. szupernóva-robbanás) során és extrém magas (kb. százmillió K) hőmérsékleten keletkeznek. Az ezredfordulón a gammacsillagászat legfontosabb feladata az egyre nagyobb számban felfedezett és most már bizonyítottan kozmológiai távolságban bekövetkező gammakitörések természetének megfigyelése.

Egy kis kitérő

Az égitestekre és kozmikus jelenségekre vonatkozóan a csillagászok a legtöbb információhoz az elektromágneses hullámok elemzéséből jutottak, de létezik más információforrás is, mert a Földet nemcsak elektromágneses sugárzás éri. Összefoglaló néven *kozmosz sugárzásnak* nevezik a térben közel fénysebességgel száguldó semleges és elektromosan töltött részecskéket (elektron, proton, pozitron stb.), amelyek közül a héliumatommag a legnehezebb. Megjegyzendő, hogy ebben az esetben a sugárzás elnevezés megtévesztő, hiszen itt részecskék mozgásáról, azaz áramlásról van szó. Az ilyen részecskék közé tartozik a *neutrínó* is. Az elektromos töltés nélküli és legfeljebb egészen kis (de még pontosan nem ismert) nyugalmi tömegű elemi részecske, a neutrínó csak gyenge kölcsönhatásra képes. A Földet bombázó neutrínók legnagyobb része elnyelődés nélkül hatol át magán a Földön is. Az emberi testen is minden pillanatban keresztül-kasul száguldanak a neutrínók, anélkül, hogy azt bármilyen módon is észrevennénk. Sokkal kisebb sebességű, de földi hatásai miatt fontosabb a Naptól érkező részecskeáram, a *napszél* (l. később).

Létezik még egy hullámfajta a kozmikus térben, a nem elektromágneses eredetű *gravitációs hullám*. Az általános relativitáselmélet szerint a gravitációs mező változása hullámok kibocsátásával jár. Ez a téridő rezgéseként felfogható hullám fénysebességgel terjed. Az ilyen hullámok hatására itt a Földön a gravitációs mező vibrálása az eredeti térerősségnél legalább 20 nagyságrenddel kisebb. A gravitációs hullámok kimutatása kellően érzékeny detektor híján még nem sikerült, de létezésüket közvetett bizonyítékok már alátámasztják. Gravitációs hullámok kibocsátására a korábban említett kettőscsillagok közül

azoknál lehet számítani, amelyeknél két kicsi és szupersűrű test, pl. neutroncsillag kering szorosan egymás körül. Ilyen csillagpár a PSR 1913+16 pulzár, amelynek mindkét komponense neutroncsillag. A néhány kilométer átmérőjű, de a Napnál nagyobb tömegű két csillag alig 8 óra alatt kerül ki a rendszer közös tömegközéppontját. A nagy tömegek ilyen gyors mozgása pedig a gravitációs mező szerkezetét is modulálja. Hogy a rendszer emiatt gravitációs hullámokat bocsát ki, arra a keringés folyamatos lassulásából következtetnek, ugyanis a gravitációs hullámokkal a rendszer energiájának egy része is távozik. A Földre jutó gravitációs hullámok fluxusa mindenesetre annyira kicsi, hogy élettani hatásukra nem lehet számítani, bár ennek kísérleti alátámasztására bizonyára még sokat kell várni.

Röviden a Nap földi hatásairól

Köztudott, hogy a Nap, illetve annak sugárzása nélkül nem létezhetne élet a Földön. A Napról az a felületes benyomásunk, hogy sugárzása egyenletes, pedig életadó csillagunk meglehetősen változékony: a belsejében és a felszínén egyaránt mozgalmasságok zajlanak. Ezek következtében a Nap nem egyszerűen úgy sugároz, mint egy 5785 K hőmérsékletű feketetest, bár a kisugárzott energia hullámhossz szerinti eloszlása megközelíti azt. Sugárzása az optikai tartományban, azon belül a sárga fény hullámhosszán a legerősebb – ezért látjuk sárgának a Napot, és ezért alakult úgy a biológiai fejlődés során, hogy a szem éppen erre a hullámhossztartományra érzékeny (vö. az éjszakai életre berendezkedett denevérek repülés közben ultrahanggal működő radarjukkal tájékozódznak). A Nap hőmérsékleti sugárzása mind az infravörös, mind az ibolyántúli hullámhosszak felé egyre csökkenő intenzitással, amiből arra következtethetnénk, hogy a Naprendszer

központi csillaga felől érkező rádió- és röntgensugárzás egészen jelentéktelen. A valóság viszont egészen más.

A Nap látható felszíne – a fotoszféra – fölött kiterjedt burok veszi körbe csillagunkat. Ez a ritka, de a Nap átmérőjének többszöröséig kiterjedő napkorona nagyon forró: a benne levő részecskék mozgásából és ionizációs állapotából meghatározott hőmérséklete meghaladja az 1 millió kelvint, s ennek következtében a napkorona erős röntgenforrás. A korona léte a Nap mágneses terével függ össze.

A Nap belsejében zajló mozgások és a dinamómechanizmussal felerősödött mágneses tér bonyolult kölcsönhatásai különféle időskálájú változásokat, instabilitásokat idéznek elő a Napon. A csillagra jellemző egyenletes sugárzási teljesítményhez a naptevékenység miatt járulékos sugárzások adódnak, amelyek időskálája igen változatos, néhány másodperctől több évtizedig tartó aktivitási jelenségek, hatások egyaránt fellépnek.

A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a Nap nemcsak sugárzással veszít energiájából, hanem részecskék is repülnek ki belőle. A Napot elhagyó töltött részecskék árama a napszél, amely a nyugodt Napra is jellemző. A naptevékenység heves megnyilvánulásai, pl. napkitörés (fler) vagy koronakitörés alkalmával a nyugodt napszélhez viszonyítva sokkal nagyobb sebességű részecskefelhő repül ki a Napból másodpercek-percek alatt. S ha éppen a Föld irányába dobódott ki az akár egymilliárd tonnányi tömeg, annak hatása a felhő sebességétől függően órák vagy napok múlva bolygónkon is érzékelhető. A tömeg kidobásának idején felszabaduló elektromágneses sugárzás természetesen fénysebességgel terjed, így a naptevékenység heves eseményeiről már 8 perccel azok bekövetkezése után tudomást szerezhetünk. A Nap viselkedésének és földi hatásainak részle-

tezése meghaladja e cikk kereteit, ezért csak néhány figyelemreméltó tény ismertetésére szorítkozunk.

A földi klíma szempontjából lényeges kérdés, hogy megszokott (napos, éves ciklusú) periodikus ingadozásoktól eltekintve mennyire marad állandó a Nap sugárzása évtizedes vagy azt meghaladó időskálán. Ezt a légkör alján szinte lehetetlen pontosan megmérni. Mostanra viszont már a légkör fölé juttatott műszerekkel végzett mérések is három évtizedet fognak át, és az eredmények szerint a Nap sugárzásának ingadozása a sugarakra merőleges felület egységen két ezreléknél kisebb. A becslések szerint a Nap sugárzásnak 1 %-os növekedése egy fokkal emelné a földfelszín átlaghőmérsékletét. A Nap jelenlegi viselkedése tehát nem okoz globális felmelegedést a Földön. Mivel bolygónk ellipszispályán kering a Nap körül, napközben 8%-kal erősebb a besugárzás, mint a pálya naptávoli pontjában. Az északi féltekén lakók (legalábbis közülük azok, akik nem szeretik a hideget) szerencséjére a Föld januárban van napközben, így nálunk nem annyira alacsony a téli átlaghőmérséklet, mint az Egyenlítőtől délre, hasonló földrajzi szélességen. Ami a nappalok és éjszakák váltakozása miatt bekövetkező hőmérséklet-változást illeti, a felszínen és a légkör alján tapasztalható mérsékelt ingadozást a légkör 100 km feletti rétegében – a **termoszférában** – hatalmas változás váltja fel, olyan magasságban nappal 400 fokkal szökik feljebb a hőmérséklet a napsugárzás hatására. A hőmérséklet emelkedése miatt a nyomás is megnő ott, ami a nappali oldalról az éjszakai félgömb felé mozgó, több száz m/s sebességű szelet gerjeszt. Mindez a nyugodt Nap sugárzásának mindennapos következménye.

Ehhez járul még a naptevékenység hatása. A napaktivitás ugyancsak a Föld légkörének, illetve bolygónk környezetének

állapotát megváltoztatva befolyásolja a Földet és a rajta levő élőlényeket. A semleges alsó légkör fölött kb. a termoszféra alsó határának magasságában kezdődik az *ionoszféra*, amely elektromosan töltött részecskéket tartalmaz. Ez a réteg azért alakul ki, mert a kozmikus térből, de főleg a Naptól érkező nagy energiájú sugárzás ionizálja a légköri atomokat. A nappali és az éjszakai oldalon eltérő magasságú az ionoszféra alsó határa, és az ionsűrűség is napszakonként változik. Mivel a földi rádiózás részben azon alapul, hogy a rádiófrekvenciás sugárzás visszaverődik az ionoszféráról, az ionizált réteg állapota a vételi viszonyokat is befolyásolja. Ez gyenge naptevékenység idején is igaz, de napkitörések hatására egészen alacsonyra lehúzódhat az ionoszféra, s olyankor az is előfordul, hogy megbolondul a rádióvétel: egészen közeli rövidhullámú adót nem lehet fogni, de a világ másik végéről tisztán kivethető némelyik adás.

A Földet mágneses tere miatt magnetoszféra övezi. A magnetoszféra állapota igen érzékeny a Naptól származó hatásokra, főleg a töltött részecskék befolyásolják. A Naptól érkező töltött részecskéket a földi mágneses tér befogja, és az erővonalak menti mozgásra kényszeríti. A Föld mágneses terének dipólus jellege miatt az erővonalak a pólusoknál kerülnek közel a földfelszínhez, ezért a sebesen száguldó elektronok a sarkok környezetében érkeznek a sűrűbb légrétegekbe, ahol az oxigén és a nitrogén molekuláival találkozva gerjesztik azokat. Ennek hatására jön létre a sarki fény, amely erős naptevékenység idején gyakoribb, és az olyankor kialakuló mágneses viharok alkalmával a pólusoktól távolabb, közepes földrajzi szélességekről (pl. Magyarországról) is megfigyelhető a sejtelmes fénylés. Mivel a mágneses viharok töltött részecskék mozgásával járnak, az ionoszférában hatalmas (millió amper erősségű) áram folyik, ettől lokálisan meg-

változik a mágneses tér szerkezete is, és tranziens áram generálódik a föld alatt, az óceánokban, de még az elektromos vezetőekben is. Előfordul, hogy a transzformátorállomások nem képesek elviselni ekkora terhelést. A legemlékezetesebb példa erre az 1989 márciusában bekövetkezett földmágneses vihar, amikor Kanada Quebec tartományában 9 órán át szünetelt az áramszolgáltatás a transzformátorok túlhevülése által okozott üzemzavar miatt. Az eset hatására keletkezett gazdasági veszteséget ötmilliárd dollárra becsülték. Kissé elkalandoztunk az elektromágneses sugárzás hatásaitól, de mentségünkre szolgál, hogy a napaktivitás során a töltött részecskék azért repülnek ki, mert valahol a Napon rengeteg energia szabadul fel, ami hatalmas mennyiségű elektromágneses sugárzás kibocsátásával is jár.

Feltétlenül meg kell említeni a napkitörések élettani hatásait, bár hatásmechanizmusuk még korántsem tisztázott. A napkitöréseket vagy koronakitöréseket követő földmágneses vihar az emberek egy részét, pl. a szívbetegeket jobban megviseli, mint egy időjárási front. A szívkorházak ezért egyre inkább figyelembe veszik a napfizikusok jelzéseit, hiszen a kitörések elektromágneses sugárzása órákkal hamarabb ideér, mint a mágneses vihart kiváltó részecskefelhő. Egy új tudományág van születőben, amelyet nem véletlenül neveznek *űrmeteorológiának*. Az űridőjárást a Földön végzett megfigyeléseken kívül űrobszervatóriumokban elhelyezett műszerekkel követik nyomon. Ezek az űrobszervatóriumok olyan pályán haladnak a Föld környezetében, hogy mindig a Föld és a Nap között helyezkednek el, így műszerei hamarabb észlelik, hogy milyen elektromágneses sugárzásnak és részecskeáramnak van kitéve a Föld a Nap irányából.

A naptevékenység és az űrtevékenység között másfajta kapcsolat is létezik. Az

elmúlt évtizedekben nagyjából ötezer űreszköz került Föld körüli pályára. Ezek nagy része már használaton kívüli (elromlott, kikapcsolták stb.), vagyis űrszemét. Az űrben keringő mesterséges objektumok száma ennél jóval nagyobb, ugyanis űtközés, meteoroidbeccsapódás vagy robbanás hatására számos űreszköz darabjaira esett. A Föld körül keringő testek közül kb. tízezer nagyobb egy méternél, az ennél kisebb méretű törmelékek száma pedig milliós nagyságrendű. Bár a földi légkör sűrűsége a magassággal rohamosan csökken, a sűrűség még 1500 km-rel a felszín fölött sem hanyagolható el. A felsőlégrékben mozgó űreszközök és törmelékek a közegellenállás hatására fokozatosan fékeződnek, pályájuk földközelpontja egyre alacsonyabbra kerül, ahol az atmoszféra még sűrűbb, így végül elkerülhetetlenül lezuhannak. A kisebb darabok még a levegőben elégséges megsemmisülnek zuhanás közben, a nagyobbak pályáját pedig – ha szükséges és lehetséges –, úgy módosítják, hogy a világóceánba csapódjanak be. Amikor a 11 éves naptevékenységi ciklus során a napaktivitás a legerősebb, a természet nagytakarítást végez a felsőlégrékben. Ilyenkor ugyanis sokkal nagyobb a felső légkör sűrűsége, mint a naptevékenység minimuma idején, ezért a magasban keringő testek erősebben fékeződnek. Az 1989–1990-ben bekövetkezett napaktivitási maximum idején 500 tonnánál több anyag hullott vissza a Földre az egykori mesterséges holdak maradványaiból.

A csillagászat nagy számokkal dolgozik. A hétköznapi skálákhoz szokott embernek a hatalmas távolságok és időtartamok egyaránt felfoghatatlanok. Tudomásul kell venni, hogy a Nap mint csillag fejlődése milliárd éves időskálán fejezhető ki. Lehet, hogy a ma emberének mindegy, hogy négymilliárd éve milyen volt a Nap sugárzása és milyen lesz ugyanennyi idő

múlva, de a földi élet kialakulása és további fejlődése szempontjából ez a kérdés nagyon is lényeges.

Más csillagok megfigyeléséből és megbízható számításokból ismert, hogy kialakulását követően a Nap csak jelenlegi teljesítményének 70 %-ával sugárzott, és ameddig fősorozati (sárga törpe) csillag marad, addig lassan tovább nő a teljesítménye. E rendkívül hosszú időskálájú változásra a Nap tulajdonságai és viselkedése miatt más változások rakódnak, amelyek a földi klímát is befolyásolják. A történelmi idők klimatikus eseményeit az emberiség már a saját bőrén is érezte. A számos példa közül itt csupán egyre utalunk, a 17. század második felétől a 18. sz. elejéig tartó kis jégkorszakra. Akkoriban a Föld felszínén az átlaghőmérséklet 1 fokkal alacsonyabb volt a megszokott értéknél. A jelenséget a Nap életében bekövetkezett érdekes csillagfejlődési epizód váltotta ki. Számos jel mutat arra, hogy 1645 és 1715 között szünetelt a Nap aktivitása. Azokban az évtizedekben szinte alig láttak foltot a Napon, pedig akkor már távcsővel figyelték, nincsenek feljegyzések sarki fényekről, továbbá az öreg fák abban az időben keletkezett évgűrűiben a szénizotópok aránya arra utal, hogy a Naprendszerbe kívülről érkezett kozmikus sugárzás szabadon eljutott a Földre (a Napból távozó anyag és sugárzás egyébként nem engedi ilyen mélyen a Naprendszer belsejébe a csillagközi térből érkező részecskéket). A naptevékenység akkori hiányát csak utólag, a 19–20. sz. fordulóján fedezte fel **E. W. Maunder**. A Maunder-minimumnak nevezett időszakban tehát a Nap kisebb teljesítménnyel sugárzott.

A hőmérsékletüket, tömegüket, korukat tekintve a Naphoz hasonló csillagok szintén mutatnak aktivitásra utaló jegyeket (aktivitásuk főleg az elektromágneses színkép ibolyántúli és röntgenhullámhosszain követhető nyomon). Az ilyen csillagok

megfigyeléséből az is kiderült, hogy nagyjából az idő egyharmad részében szünetel az aktivitásuk. Ebből arra lehet következtetni, hogy a Maunder-minimum nem egyedi jelenség, a jövőben is lesznek olyan időszakok, amikor a Nap belsejében kialakult mágneses dinamó kikapcsol, és átmenetileg csökken a Nap teljesítménye. Hogy ez mikor következik be legközelebb, azt nem lehet megjósolni, és a jelenség kiváltó oka is tisztázásra vár.

A Napnak tehát igencsak ki vagyunk szolgáltatva. De más égitestekhez és jelenségekhez is hasonló a viszonyunk – végtére is az ember kozmikus lény. Már a következő jégkorszak ígérete is kissé hátborzongató, de csillagászati időskálán még keletlenebb hatása is lehet: a Földet érő elektromágneses sugárzás. Egy közeli szupernóva-robbanás következményének tartják a nagy testű hullók hirtelen kipusz-

tulását. Megnyugtató, hogy a Naprendszer környezetében nincs olyan csillag, amely szupernóvává válva veszélyt jelentene. Viszont a Tejútrendszer közepén van egy hatalmas tömegű fekete lyuk, amelynek viselkedése és jövője nem pontosan ismert. A mi galaxisunkhoz hasonló extragalaxisok vizsgálata során kiderült, hogy némelyikük centruma szokatlan aktivitást mutat (Seyfert-galaxisok). Ezek leginkább a kvázárok kis teljesítménnyel sugárzó rokonai. Lehet, hogy a közönséges spirálgalaxisok magjában megbúvó fekete lyuk néha aktivizálódik, és a környezetében felszabaduló hatalmas energia (sugárzás és anyagkilövellés) alaposan megváltoztatja az egész galaxis addig nyugodt (?) életét.

Kulcsszavak: *elektromágneses színekép, elektromágneses szennyezés, csillagászat, asztrofizika, naptevékenység*

