

A kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata

Kisvárdai Imre¹,
Forgács-Dajka Emese^{1,2},
Gálik Barbara¹,
Pádár Noémi¹,
Bebesi Zsófia³

Földünk légkörét nemcsak porszemcsék, esetenként nagyobb szikla méretű objektumok (azaz meteorok), valamint (fotonok formájában) a csillagok távoli sugárzása bombázza, hanem folyamatosan ki van téve nagyenergiájú töltött részecskék áramlatának is. Ezeket a részecskéket összefoglaló néven kozmikus sugárzásnak nevezzük. A kozmikus sugárzás vizsgálatának mind a tudomány, mind a gyakorlati élet szempontjából nagy jelentősége van. A világ számos pontján működik olyan detektor- és észlelőhálózat, ahol a kozmikus sugárzás által keltett másodlagos sugárzást vizsgálják. A tudósok többek között olyan kérdésekre keresik a választ, mint például honnan erednek a kozmikus sugárzás részecskéi, mi az összetételük, illetve hogy milyen fizikai mechanizmusok állnak az ilyen nagy energiával rendelkező részecskék gyorsítása mögött.

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Csillagászati Tanszék, Budapest
²HUN-REN-SZTE Sztelláris Asztrofizika Kutatócsoport, Baja
³HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Természetesen ezek magyarázatára mostanra már számos elmélet és modell született, azonban minden elméletnek vannak gyenge pontjai, illetve a technológia fejlődésével a sugárzás természetének újabb és újabb részletei tárulnak elénk, amelyek további kutatásokat tesznek szükségessé. Mint azt már megjegyeztük, a kozmikus sugárzás kutatása nemcsak az elméleti tudósok számára fontos, hanem a mindennapi életünkben is jelen van és hatással is lehet rá. A földi élővilágot folyamatosan érő háttérsugárzás több mint tíz százaléka a kozmikus részecskék által kiváltott másodlagos sugárzásból származik, amelyek részecskéi – a kozmikus részecskékhez hasonlóan – töltéssel is rendelkezhetnek. Ezek a töltött részecskék akár a mindennapokban használt elektronikai eszközeinkben is okozhatnak problémát, de a magasan keringő műholdak fedélzeti számítógépeit is veszélyeztethetik. Ezen ismertebb hatások mellett a kozmikus sugárzás ionizáló hatása károsíthatja a sejtek DNS-ét, mutációkat előidézve bennük. Ezért a magasabban keringő űrállomásokon dolgozó asztronauták esetében, akik jobban ki vannak téve ennek a sugárzásnak, további védelmet kell biztosítani.

Szintén érdekes, bár jóval hosszabb távon érvényesülhet a kozmikus sugárzás földi klímára gyakorolt hatása, hiszen a töltött részecskék befolyásolhatják a légkör elektromos tulajdonságait. Ezek összefüggésben állnak a felhőképződéssel, így befolyásolva a légkör mélyebb rétegeibe és a földfelszínre jutó napsugárzás teljesítményét. Végül érdekességként megemlítjük, hogy a kozmikus sugárzás elősegíthet olyan kémiai reakciókat, amelyek új molekulákat, akár az élet számára fontos aminosavakat vagy nukleotidokat hozhatnak létre, így a sugárzás akár szerepet is játszhatott a földi élet kialakulá-

sában. A fentiek alapján láthatjuk, hogy a kozmikus sugárzás, illetve annak változásai hosszú távon hatással lehetnek az életre, a biodiverzításra, vagy akár az evolúcióra is.

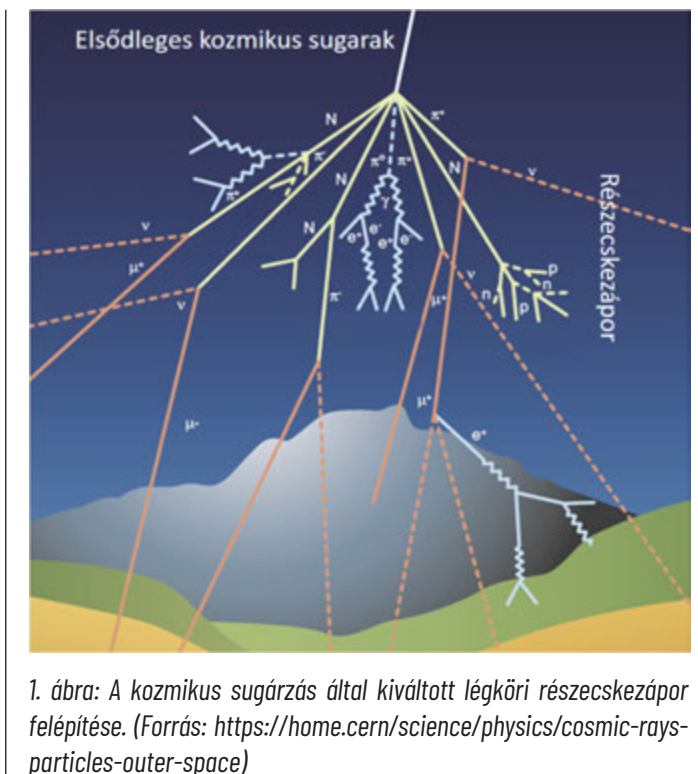
Hazánkban jelenleg nincsenek a kozmikus sugárzásra irányuló közvetlen mérések, de több kutatóhelyen is foglalkoznak a témához kapcsolódó vizsgálatokkal. Az ELTE Csillagászati Tanszékén a napaktivitással és a hozzá kapcsolódó jelenségekkel, mint például a napkitörésekkel és a koronaanyag-kidobódásokkal foglalkoznak. Ezek számottevően járulhatnak hozzá a kozmikus sugárzás részecskéinek gyorsítási és terjedési mechanizmusához. Emellett már régóta ismert a kozmikus sugárzás és a napaktivitás kapcsolata, amelyről több tanulmányban is olvashatunk [1–3]. Egy másik kutatóhely hazánkban a Wigner Fizikai Kutatóközpont, ahol különböző űrküldetések részecskedetektorainak fejlesztésében vesznek részt, illetve az adataik elemzésével járulnak hozzá a Nap körüli térrész mágneses tulajdonságainak megismeréséhez, és az ott lévő plazmakörnyezet feltérképezéséhez.

A kozmikus sugárzás eredete és mérése neutronmonitorokkal

A földi légkörbe érkező nagysebességű részecskék, vagyis a kozmikus sugárzás elsődleges forrása központi csillagunk, a Nap. Azonban ahogy egyre nagyobb energiájú részecskéket detektáltunk, fel kellett ismernünk, hogy ezen részecskéket már sokkal extrémebb folyamatok kell, hogy gyorsítsák, és valószínű forrásaik is egyre távolabbi objektumok lehetnek. Ha csoportosítani szeretnénk a kozmikus sugárzást, akkor a három fő típust alapvetően az őket létrehozó asztrofizikai folyamatok alapján különíthetjük el:

- **Szoláris kozmikus sugárzás:** a Naptól származó, főleg protonokból és elektronokból álló sugárzás, amelynek intenzitását és összetételét a Nap aktivitása határozza meg. Az ilyen típusú részecskék jellemzően a 100–500 MeV energiatartományba esnek.
- **Galaktikus kozmikus sugárzás:** a Naprendszeren kívülről érkező, főleg protonokból, héliumatommagokból és nehezebb atommagokból álló sugárzás, amelynek terjedését és spektrumát a galaxis mágneses mezeje befolyásolja. Energiaszintjük általában a 0,5–100 GeV közötti tartományban van.
- **Ultrahagy energiájú kozmikus sugárzás:** ezek az Univerzum legnagyobb energiájú részecskéi, amelyek energiája akár a 10^{20} eV-ot is elérheti. Eredetük még nem tisztázott, de valószínűleg extragalaktikus forrásokból származnak, például aktív galaxismagokból, kvazárokból vagy gamma-kitörésekből.

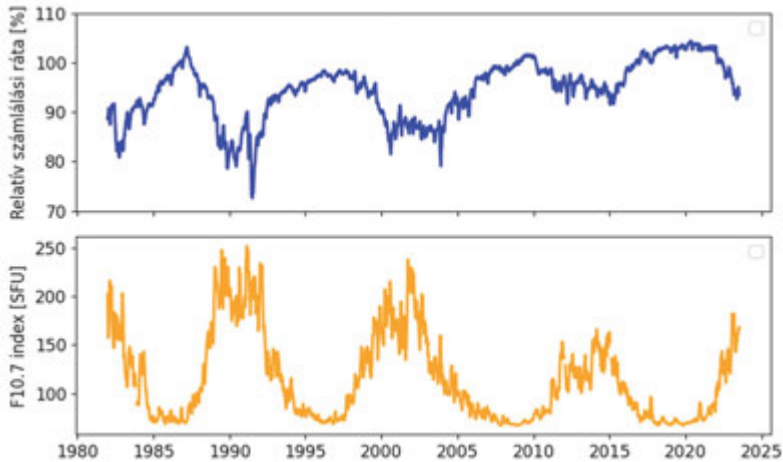
A kozmikus sugárzás tehát a világűrben érkező nagyenergiájú részecskék áramlata. Amikor ezek a részecskék belépnek a Föld légkörébe, akkor az azt alkotó atomokkal és molekulákkal ütköznek, másodlagos részecskéket hozva létre. Ezek a másodlagos részecskék alkotják az ún. kozmikus eredetű részecskezápороkat, amelyek végül eljutnak a földfelszínig (1. ábra). Ezen másodlagos részecskék között vannak neutronok is, amelyek semlegesek (nincs töltésük), ezért a Föld mágneses mezeje nem téríti el őket. Ezeket a neutronokat különböző neutronmonitorokkal tudjuk detektálni, ahol az észlelt neutronok száma és energiája természetesen függ az elsődleges kozmikus sugárzás intenzitásától és összetételétől, de befolyásolja a földi légkör állapota és összetétele is. Bolygónk számos pontján



található olyan mérőeszköz, amely a kozmikus sugárzás másodlagos részecskezápörében kialakuló neutronokat detektálja. A különböző változások bemutatásához mi a Lomnici-csúcson található neutronmonitor adatait használjuk fel, illetve olyan különleges jelenségeket is kiválasztunk az idősorból, amelyek elsősorban szoláris eseményekhez köthetőek. A Lomnici-csúcson (Szlovákiában, 49,40° északi szélességnél és 20,22° keleti hosszúságnál, 2634 m tengerszint feletti magasságban) található neutronmonitor (LMKS) folyamatos, 42 éves adatsora lehetővé teszi a kozmikus sugárzás fluxusában mutatkozó hosszú távú trendek vizsgálatát a kb. 4 GeV feletti energiatartományban. Emellett az 1981 óta elérhető órás, valamint a 2001 óta rendelkezésre álló perces időbeli felbontás lehetővé teszi a neutronmonitor mérési eredményeit befolyásoló, rövid időintervallumon lejátszódó események vizsgálatát is.

A neutronadatok idősora a napaktivitás tükrében

A Nap aktivitásában bekövetkező változásokat hagyományosan a Nap felszínén megjelenő napfoltok, vagy más névvel aktív területek számával jellemezzük. A napfoltok a napbelső mélyebb rétegeiből fel-törő mágneses erővonal kötegek, amelyek a felszint mintegy átdöfve hozzák létre a foltokat. A napfoltok megjelenésének helye attól függ, hogy a mélyben fekvő mágneses fluxuscsövek hol haladnak meg

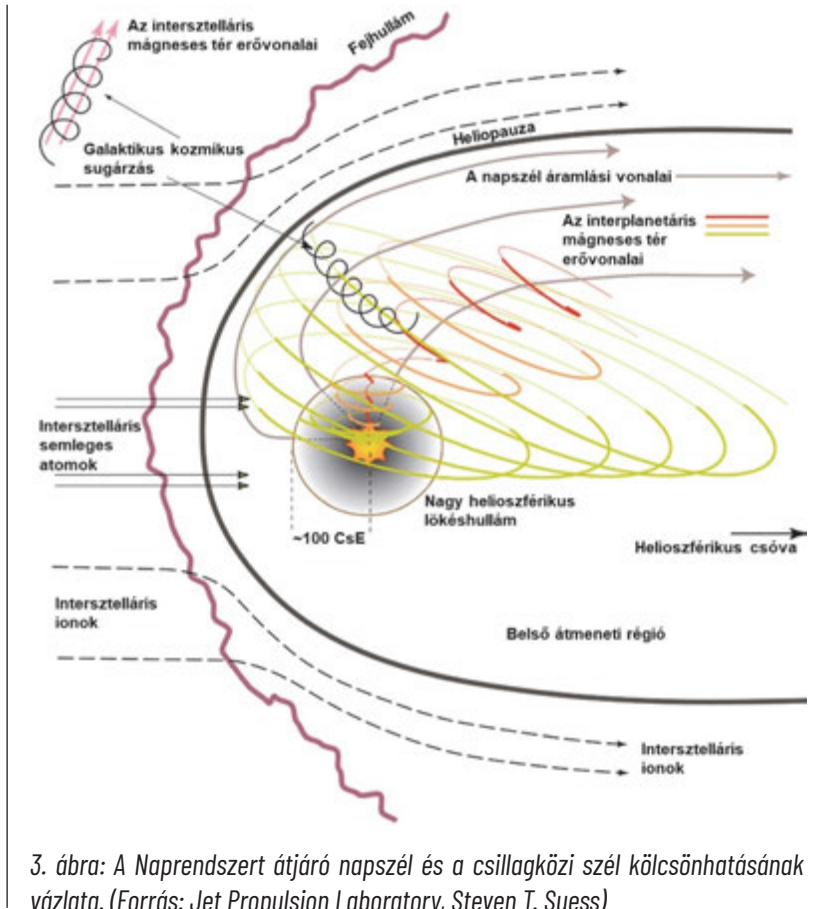


2. ábra: A kozmikus sugárzás Lomnici-csúcson mért fluxusa (felső panel) és a Nap rádiósugárzásának fluxusa (alsó panel) az 1981-2023 közötti mérési időszakon ábrázolva, 30 napos futóátlagokkal. 1 SFU (Solar Flux Unit) = $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

egy kritikus térerősség értéket. Emiatt a napfoltok száma kevésbé tükrözi a Nap globális mágneses terében bekövetkező egyéb változásokat, illetve akár az aktív területek környezetében zajló további jelenségeket, mint például napkitöréseket. A fentiek miatt gyakran a napfolt-relativszám helyett egy globálisabbnak tekinthető aktivitási mérőszámot használnak, a Nap 10,7 cm-es rádiófluxusát, amelyet F10.7 indexnek is neveznek. Az F10.7 index a napkorongon jelen lévő összes lehetséges forrás 10,7 cm hullámhosszon (2800 MHz frekvencián) kibocsátott sugárzásának egy óra alatt mért értéke. Ez a mennyiség így valójában egy fluxussűrűség, de mégis a köznyelvben fluxusként emlegetik. Érdekeséggé még megemlíthjük, hogy a 10,7 cm-es hullámhossz kiválasztása véletlenszerűnek tekinthető, és a második világháború alatti radarfejlesztés történetében gyökerezik. Mindenesetre a korai mérések megerősítették, hogy a 10 cm körüli hullámhosszak a legalkalmasabbak a naptevékenység szintjének nyomon követésére, mivel ezeken a hullámhosszokon a sugárzás nagyon érzékeny a naplégkör különböző rétegeiben – azaz a felső kromoszférában és a napkorona alján – uralkodó fizikai viszonyokra. Ha ábrázoljuk az F10.7 index értékét és ugyanazon időszakban a lomnici neutronmonitor méréseit, már szemmel is jól látható a két adatsor közötti antikorreláció (2. ábra).

Természetesen a kapott eredményeket különböző statisztikai módszerek is megerősítik, ezzel a szerzők is foglalkoztak, például egy tudományos diákköri munka keretében. Az antikorreláció ebben az esetben tehát azt jelenti, hogy amikor Napunk aktivitási maximuma közelében jár, a Naprendszerbe kívülről érkező kozmikus sugárzás intenzitása csökken, míg az aktivitási minimum időszakában az átlaghoz képest növekedni fog. Ha az okokat keressük, akkor kicsit mélyebbre kell ásunk ahhoz, hogy megértsük, központi csillagunk hogyan befolyásolja a kozmikus sugárzás intenzitását. Ehhez kozmikus környezetünket nem korlátozhatjuk a nagybolygók által bejárt tartományra, hanem helyette a helioszférát

kell alapul vennünk, amelyet a Napból kiáramló plazma vagy más néven napszél ural (3. ábra). Ennek a tartománynak a határa messzire nyúlik, több mint százszorosa a Nap-Föld-távolságnak.

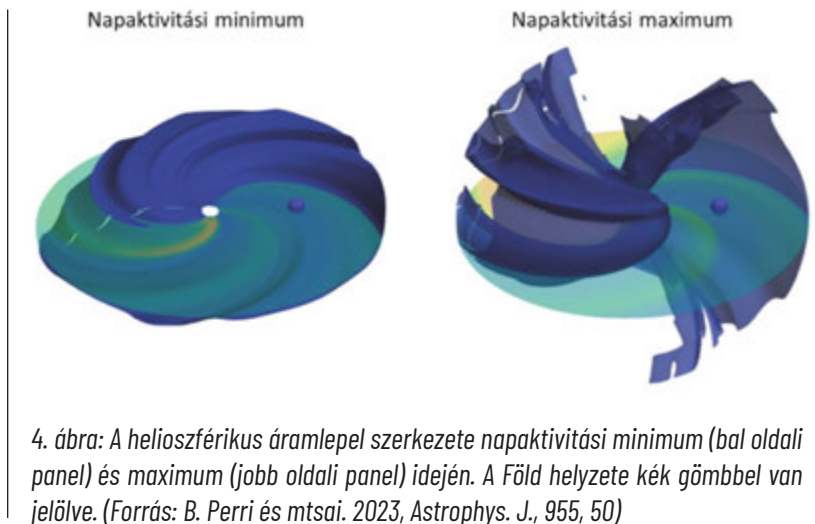


Ezt a szférát veszi körbe a más csillagokból, távoli objektumokból származó, részben ionizált csillagközi gáz, amelytől a heliopauza választja el. Ezt a területet veszi körül a külső plazmahüvely (angolul *outer heliosheath*), vagyis a Nappal együtt mozgó helioszférát körüláramló, eredeti mozgásirányától eltérített csillagközi ionizált gáz, míg a semleges összetevők nagyrészt behatolnak a helioszférába. Azt a területet, ahol a napszél lelassul és kölcsönhatásba lép a csillagközi gázzal, átmeneti régióknak vagy belső plazmahüvelynek (angolul *inner heliosheath*) nevezzük. Mivel Napunk is mozog a csillagközi térben és így az áramló csillagközi gázhoz képest is, valamint sebessége nagyobb a csillagközi gázban érvényes Alfvén-sebességnél¹, ezért a külső plazmahüvelyt a zavartalan csillagközi gáztól is egy többé-kevésbé éles határfelület, az úgynevezett fejhullám (angolul *bow shock*) vagy külső lökeshullám

¹ Az Alfvén-sebesség a plazmafizikában használt sebesség, amely megadja, hogy milyen gyorsan terjedhetnek a mágneses perturbációk a plazmában, és függ a plazma sűrűségétől, illetve a mágneses térerősség értékétől.

választja el, ahol tulajdonképpen a csillagközi gáz ionizált komponense lassul szubszonikussá. A heliopauzán belül egy másik lökéshullámfront is kialakul, az úgynevezett nagy helioszférikus lökéshullám (angolul *termination shock*), ahol a napszél plazma mozgási energiája nagyrészt hőenergiává alakul, és a napszél szubszonikussá lassul. A heliopauza helyzetét tehát alapvetően a napszél és a csillagközi gáz ionizált komponensének nyomásegyensúlya határozza meg.

A napszél a Nap legkülső légköri rétegéből, a koronából származik, ahol a plazma, vagyis az ionizált gáz mozgását a bonyolult szerkezetű és időben változó szoláris eredetű mágneses tér határozza meg. A Nap felszínéhez közeli régiókban a legtöbb erővonal hurkot formál, így mindkét talppontja a felszínhez kapcsolódik, viszont ahogy egyre távolodunk, a napszél mozgási energiája egyre dominánsabb lesz, így a napszél mintegy magával ragadja és „kifújja” az erővonalakat, amelyek így a napszéllel együtt nagyjából sugárirányban sodródnak kifelé. Viszont a Nap forgása miatt az erővonalak – amelyek talppontjai továbbra is a Naphoz kötődnek – feltekerednek, kialakítva egy arkhimédészi spirált, ahol a spirál emelkedését a Nap forgási sebessége és a napszél sebessége együttesen alakítja. Emellett a Nap mágneses tere 11 évente polaritást vált, amit a különböző aktivitási mutatókban, mint például a napfoltszámban és az F10.7 rádiófluxusban is megfigyelhetünk. A kétféle polaritást elválasztó felület, az úgynevezett áramlepel az aktivitási minimum környékén a heliografikus egyenlítő síkjának közelében helyezkedik el. Azonban az aktivitás maximumához közeledve az áramlepel és az ekliptika síkja egyre nagyobb szöget zár be egymással, míg végül a maximum tetőpontján a pólusváltással egyidejűleg az áramlepel darabokra szakad (4. ábra).



4. ábra: A helioszférikus áramlepel szerkezete napaktivitási minimum (bal oldali panel) és maximum (jobb oldali panel) idején. A Föld helyzete kék gömbbel van jelölve. (Forrás: B. Perri és mtsai. 2023, *Astrophys. J.*, 955, 50)

Tovább bonyolítja a képet, hogy a napszél sebessége is változik attól függően, hogy milyen heliografikus szélességeken lép ki a napkoronából. Az egyenlítői tartományokban a napszél sebessége nagyságrendileg 400 km/s, míg magasabb szélességeken, az úgynevezett koronalyukak esetében ez az érték már a duplájára nő, akár a 800 km/s-ot is eléri. Ezen régiók alatt a napkorona alacsonyabb hőmérsék-

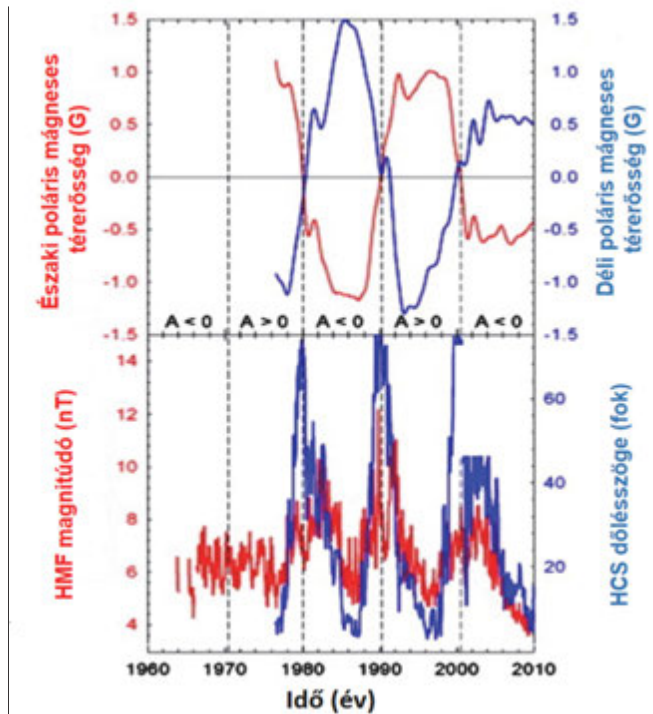
letű és gyengébb röntgenintenzitású területeit értjük, ahol a mágneses erővonalak részben felnyílnak, így ezen tartományokból „könnyebben”, azaz nagyobb sebességgel tud kiáramlani a napszél. Ugyan a koronalyukak általában csak magasabb heliografikus szélességeken, a pólusok körül jelennek meg, de a napaktivitás csökkenésével lejjebb húzódhatnak, kiterjedhetnek, vagy akár önálló struktúrává válhatnak, így az egyenlítő közelébe is kerülhetnek. A kétféle sebességű napszélnyaláb azimutálisan is változik. Emellett ahol a gyors napszél utoléri a lassú komponenst, kompresszió alakul ki.

Abban az esetben, ha a nyomásgradiens kellően erős és a sebességkülönbség meghaladja a lokális Alfvén-sebességet, akkor a kezdeti nyomáskülönbség lökésfreonttá alakulhat. Ez jellemzően körülbelül másfél csillagászati egység távolságban következik be. Ha az eltérő sebességű napszél-tartományok forrása nem változik a Nap több forgási periódusa alatt sem, akkor a kialakult kompressziós csúcsok vagy lökeshullámok is együtt forognak a Nappal. Ezen lökésfreont-tartományokat az angol elnevezésük alapján CIR-eknek (*Corotating Interaction Region*) vagy együttforgó kölcsönhatási tartományoknak hívjuk, és fontos szerepük van a helioszférán belüli részecskék gyorsításában.

A fentiek alapján láthatjuk, hogy egy igen bonyolult, komplex rendszerként írható csak le a Nap kozmikus környezete, ahol különböző fizikai mechanizmusok és kölcsönhatások befolyásolják az ebbe a térrészbe kerülő részecskék mozgását. Ezért összefoglaló elnevezéssel helioszférikus modulációnak szoktak nevezni a kozmikus sugárzás intenzitását befolyásoló minden olyan hatást, amelyet központi csillagunk, a Nap okoz. Ha a napszél hatását vizsgáljuk „csak” a helioszférában és környezetében, akkor a legegyszerűbben egy taszító potenciáltérrel tudjuk közelíteni. Ebben az esetben feltételezzük, hogy a helioszférába érkező részecske a helytől és időtől függően, a részecske töltésével arányos energiát veszít; minél közelebb van a Naphoz a részecske, annál többet. Ha egy protont veszünk példának, akkor ez az energiavesztés 100 MeV nagyságrendű, és Napunk aktivitásának fokozódásával tovább nő. Ez az egyszerű leírás sok helyzetben jól alkalmazható, de számos hatást figyelmen kívül hagy, mint például a helioszféra gömbszimmetriktól eltérő szerkezetét, időbeli változásait, különböző részecskegyorsítási effektusokat, töltésfüggő modulációkat.

Mint azt már említettük, a lomnici neutronmonitor a 4 GeV feletti energiatartományban érzékeny, így elsősorban a galaktikus eredetű kozmikus sugárzásból származó másodlagos részecskéket tudja detektálni. Ez azt jelenti, hogy a részecskezáport kiváltó elsődleges részecskének a földpálya közelében ennél nagyobb energiával kell rendelkeznie, a néhány száz MeV alatti galaktikus kozmikus sugárzásból származó protonok általában be sem jutnak a földpálya közelébe. A fentiek tükrében a 2. ábrán megfigyelhető moduláció a kozmikus sugárzás által keltett másodlagos neutronintenzitásban már könnyebben értelmezhető. Az ábrán megfigyelhetjük azt is, hogy a napaktivitás növekedésével a kozmikus sugárzásban végbemenő csökkenés bizonyos késleltetéssel következik be. Ennek oka abban keresendő, hogy a napszélnek közel egy évre van szüksége arra, hogy a helioszféra határáig eljusson. Így a naptevékenység növekedésekor elég hosszú idő telik el, amíg a perturbált mágneses terek a külső helioszférában is akadályozzák a részecskék bejutását. Az időeltolódás mellett egy másik érdekes jelenség, hogy a napciklust ellentétes fázisban, de mégis jól követő változás időbeli lefolyása is más, vannak hegyesebb és laposabb maximumok. E mögött a Nap 11 éves mágneses pólusváltása húzódik

meg, amely ciklust a helioszférikus mágneses mező² is követ, irányát szintén 11 évente változtatva, ami egy 22 éves mágneses ciklust eredményez. A szokásosan $A > 0$ -val jelzett pozitív polaritású korszakok olyan időszakok, amikor a mágneses térerősség vektor az északi féltekéjén kifelé mutat, míg a déli féltekén befelé (5. ábra). Ezt úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a Nap északi féltekén mért poláris térerősség értéke $A > 0$ esetén pozitív, míg $A < 0$ esetében negatív értéket vesz fel, miközben a déli vidéken ennek pont az ellenkezőjét tapasztaljuk.



5. ábra: A Naphoz kapcsolódó mágneses paraméterek változása az időben. A felső panelen az északi és a déli poláris mágneses térerősség látható, míg az alsó panelen a helioszférikus mágneses tér (HMF) magnitúdója és az áramlepel (HCS) dőlésszöge a Föld környezetében. (Forrás: M.S. Potgieter és mtsai. 2013, J. Adv. Res, 4, 259)

Mint ahogy azt már írtuk, a két ellentétes polaritást elválasztó felület az áramlepel, amely a naptevékenység fokozódásával egyre hullámosabbá válik. Ezt a hullámosságot egyrészt az okozza, hogy a Nap mágneses tengelye szöget zár be a forgástengelyhez képest. Ez megegyezik azzal a szöggel, amely-

² A magyar szakirodalomban inkább az interplanetáris mágneses tér (angolul *interplanetary magnetic field*, IMF) kifejezés terjedt el, de mivel itt a teljes helioszférán belül uralkodó mágneses viszonyok a lényegesek, amelyek túlmutatnak a bolygóközi mágneses téren, ezért most ezt a kifejezést használjuk.

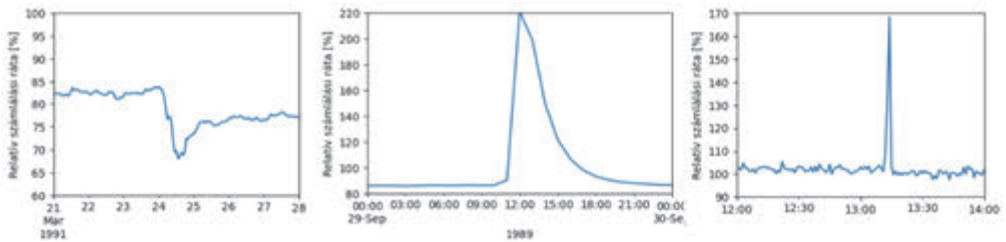
lyel az áramlepel megdől. Emellett tovább bonyolítja a képet, hogy a Nap mágneses terének egy ferde dipól térrel való közelítése nem minden helyzetben helytálló, bár sok szempontból az interplanetáris tér szerkezetének tárgyalásakor jó közelítést ad. A kozmikus sugárzással foglalkozó kutatók gyakran használják ezt a dőlésszöget a napaktivitás indikátoraként: α alapján a naptevékenység minimum közelében van, ha $5^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$, az aktivitás közepes erősségű, ha $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$, és maximális vagy ahhoz közeli, ha $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. Mivel a napszél magával ragadja a mágneses erővonalakat, ezért az α értékét és változásait az egész helioszférába továbbítja.

Ezek után térjünk vissza arra, hogy miért figyelünk meg a kozmikus sugárzás időbeli lefolyásában különbségeket az egymást követő aktivitási ciklusokban. A megfigyelések azt mutatják, hogy az $A < 0$ időszakokban a neutronmonitor eseményeinek intenzitása csúcsos és keskeny, míg az $A > 0$ ciklusokban a profilok sokkal kevésbé csúcsosak, inkább laposabbak. Tulajdonképpen a kozmikus sugárzás részecskéi reagálnak a helioszférikus mágneses tér görbületére és gradiensére, valamint az áramlepel változásaira. Az $A < 0$ polaritási ciklusban az éles csúcsok megfelelnek azoknak az időpontoknak, amikor a Föld áthalad az áramleplen és a helioszférikus mágneses tér előjelet vált. Az áramlepel gátként hat a kozmikus részecskék számára, különösen a pozitív töltésűekre, ezért intenzitásuk alacsonyabb a lepel egyik oldalán, mint a másikon. Amikor a Föld áthalad az áramleplen, akkor a sugárzás intenzitása hirtelen megváltozik, csúcsot képezve a profilban. Amikor $A > 0$, akkor az áramlepel kevésbé hatékony akadályt képez a részecskék számára, különösen igaz ez a negatív töltésű részecskékre. Így a kozmikus sugárzás intenzitása fokozatosabban változik, ahogy a Föld keresztülhalad a helioszférikus mágneses tér szektorain. A szektorok $A > 0$ esetén a Nap egyenlítőjéhez igazodnak, így a Föld kevesebb szektorhatáron halad át, mint $A < 0$ esetén, amikor a szektorok a Nap egyenlítőjéhez képest ferdek. Fontos megjegyezni, hogy az itt bemutatott jelenségek és a hozzájuk kapcsolódó intenzitásra gyakorolt hatás a kozmikus sugárzás energiáinak növekedésével egyre csökken, a 30 GeV energianál nagyobb részecskék esetében már igen csekélynek mondható. Szintén lényeges megemlíteni, hogy a moduláció tényleges időbeli lefolyását erős napaktivitás esetén az úgynevezett koronaanyag-kidobódások vagy angol rövidítéssel élve CME-k (*Coronal Mass Ejection*) is befolyásolják. Ezek a legtöbb esetben nagyobb napkitörésekhez köthetőek, amelyek során szintén nagyobb mennyiségű napanyag lökődik ki a bolygóközi térbe, lépcsőszerű szerkezetet adva az intenzitáscsökkenésnek.

A neutronok adatsorában megfigyelhető különleges események

Az előzőekben bemutatott helioszférikus moduláció mellett a kozmikus sugárzás által keltett neutroneseményekben jóval rövidebb idő alatt lejátszódó, az átlagtól eltérő eseményeket is találhatunk. Először áttekintjük, milyen jelenségeket azonosíthatunk (6. ábra), utána rátérünk a mögöttük húzódó fizikai folyamatokra is.

Forbush-csökkenés (FD – *Forbush decrease*): az esemény során a kozmikus sugárzás intenzitásában pár napos átmeneti csökkenés figyelhető meg, ahol a csökkenés egy rövid, pár óráig tartó időszak alatt következik be, és amplitúdója legtöbbször néhány százalék, de időnként akár több tíz százaléknyi

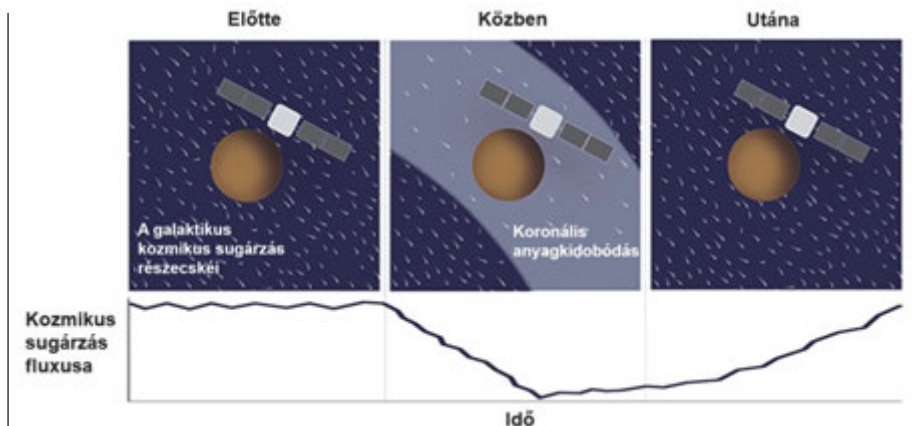


6. ábra: A neutronmonitor idősorában azonosítható különleges események. Bal oldali panel: Forbush-csökkenés (FD); középső panel: talajszintközeli sugárzástöbblet (GLE), jobb oldali panel: viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE)

is lehet. A Forbush-csökkenés egy fontos jellemzője, hogy globálisan megfigyelhető, azaz a Földön elhelyezett más neutrondetektorok is rögzítik [4,5].

Talajszintközeli sugárzástöbblet (GLE – ground level enhancements): a jelenség során a kozmikus sugárzás intenzitásában egy hirtelen bekövetkező és igen intenzív növekedést észlelünk. A kozmikus sugárzásban megfigyelhető fluktuációktól, ingadozásoktól eltérően a GLE-k rövid és éles csúcsokat mutatnak, néhány százaléktól pár tíz százalékig terjedő amplitúdóval. A hirtelen fluxusnövekedés igen rövid időskálán, 10 perctől egy-két óráig tart, míg a lecsengési fázis ennél hosszabb [6-10].

Viharok közelében kialakuló sugárzástöbblet (TGE – thunderstorm ground enhancements): ez a jelenség nagyon rövid időskálán lezajlik, általában pár percen keresztül figyelhető csak meg. A TGE során a neutronintenzitás növekedése jellemző, amelynek nagyságrendje általában nem haladja meg a tíz százalékot [11]. Ugyanakkor dokumentáltak már olyan eseteket is, amikor a változás során a háttér szint a többszörösére növekedett [12,13]. E jelenséggel kapcsolatosan fontos hangsúlyozni, hogy

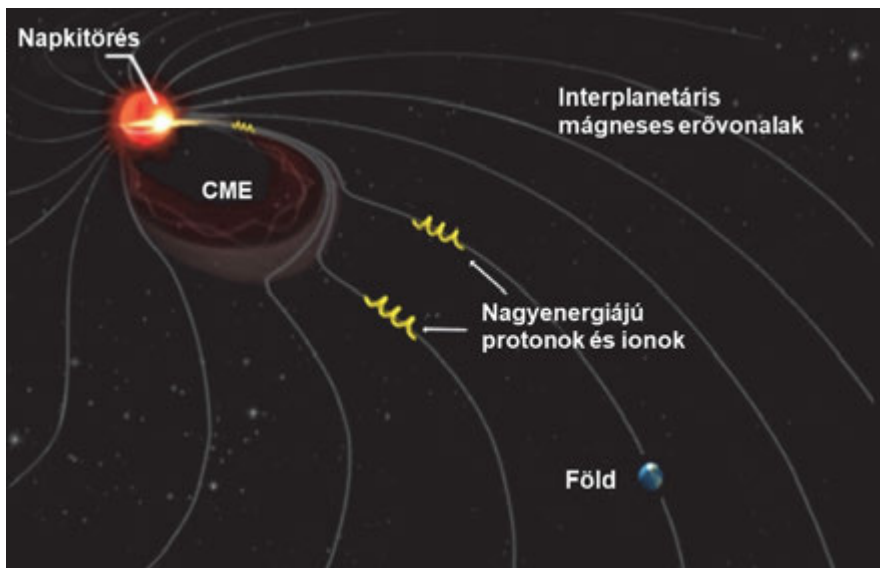


7. ábra: A Forbush-csökkenést előidéző koronaanyag-kidobódás (CME) hatásának sematikus ábrázolása. (Forrás: <https://sci.esa.int/web/solar-system/-/59397-cosmic-ray-drop>)

lokális jelenségről van szó, illetve elsősorban magas hegytetőkön, nagyobb magasságokon manifesztálódik, vagy akár téli viharok során a japán tengerpart mentén [14–16].

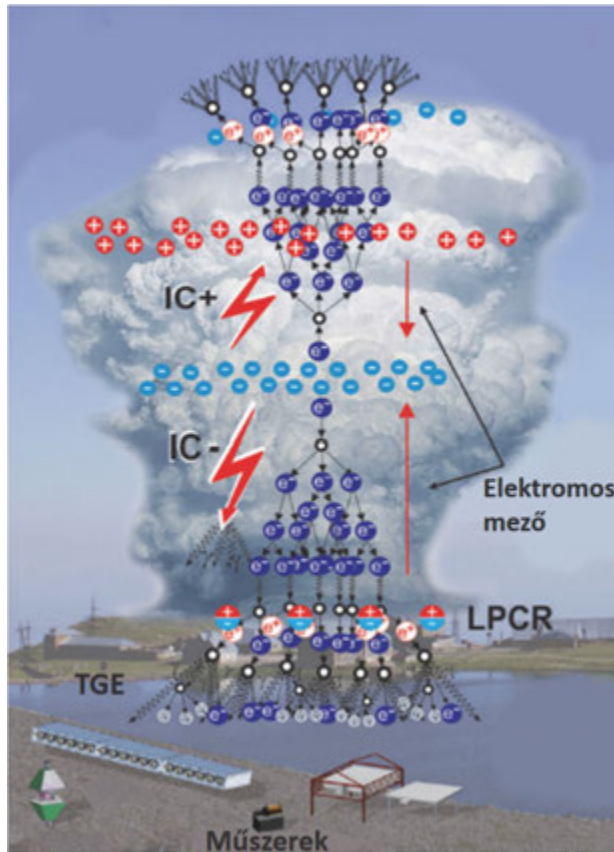
Az itt bemutatott különleges jelenségek közül az első kettő szoláris eseményekhez köthető, míg az utolsó lokális, meteorológiai változásokhoz. Az első jelenség, a Forbush-csökkenés hátterében Forbush munkái alapján [4,5] a geomágneses mező torzulásai állnak. Ezeket a zavarokat napkitörések, koronakidobódások (CME), nagy sebességű plazmaáramlások vagy más aktív folyamatok után a Napon vagy közvetlen környezetében kialakuló lökéshullámok terjedése kényszeríti ki, melyek a bolygóközi térben is továbbterjednek. A kiváltott mágneses zavarok visszaverik vagy szétszórják a helioszférán keresztülhaladó kozmikus részecskék egy részét, mintegy leárnyékolva a sugárzás egy kisebb hányadát (7. ábra). Fontos megjegyeznünk azonban, hogy néhány esetben a Forbush-csökkenéshez nagyon hasonló változások geomágneses viharok nélkül is megfigyelhetők, illetve a különböző geomágneses zavarok által kiváltott eltérő FD-k esetében sem teljesen tisztázott a pontos fizikai folyamat.

A következő, szintén szoláris eseményekhez köthető változás a talajszintközeli sugárzástöbblet, amikor a földi detektorok által rögzített kozmikus sugárzás intenzitása hirtelen megnövekszik. A jelenséget az eddigi vizsgálatok alapján a Napból származó több tíz GeV-os részecskék, az úgynevezett SEP-ek (angolul *Solar Energetic Particles*) okozzák, amelyek erős napkitörésekhez és/vagy koronanyag-kidobódásokhoz kapcsolódnak, azonban a gyorsítási mechanizmus, amely létrehozza ezeket a nagyenergiás részecskéket, pontosan nem ismert (8. ábra). Ami megkülönbözteti az átlagos SEP eseményt a GLE-t kiváltótól, az az, hogy ezek a részecskék már olyan nagy energiákkal rendelkeznek, hogy képesek elérni a Föld felszínét. Ezért a GLE-ekkel kapcsolatos SEP fluxusokat gyakran két



8. ábra: Szoláris eredetű nagyenergiás részecskék, azaz SEP-ek kialakulásának egy lehetséges modellje. (Forrás: <http://spaceweather.uma.es/solarstorms.html>)

különböző spektrális fázissal jellemzik: egy lágyabb fázissal, amelyet a MeV-os tartományba tartozó közepes energiájú részecskék dominálnak, és egy keményebb fázissal, amelyet a GeV-os tartományba tartozó nagyenergiájú részecskék uralnak. A lomnici neutronmonitor-adatok esetében csak a GLE-k kemény fázisát lehet észlelni a 4 GeV-os levágási ridegségnek köszönhetően. A hasonló keletkezési mechanizmusok ellenére nem minden esetben figyelhetők meg együtt a GLE-k és a Forbush-csökkenések, sőt az esetek többségében egyszerre csak az egyik látható a neutronmonitorok adataiban. Ennek és a két jelenség között fennálló pontos fizikai kapcsolatnak a magyarázata még nem tisztázott a szakirodalomban.



9. ábra: Zivatarhoz kapcsolódó töltött struktúrák és részecske-áramlások, illetve részecskelavinák. A piros nyilak a légköri elektromos mezőket és a villámokat mutatják. (Forrás: A. Chilingarian 2014, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 107, 68)

Utolsóként említjük a TGE-ket, amelyek nem szoláris, hanem lokális jelenséghez köthetők, és az aktuális időjárási viszonyok segítik elő létrejöttüket. A viharok közelében kialakuló sugárzástöbbit (9. ábra) esetén a neutronfluxusban megfigyelhető emelkedés nagyon rövid időskálán játszódik le, és pár

percen keresztül figyelhető csak meg. A TGE-k előfordulásának korrelációja erős a magas elektromos térerősség értékekkel, ami arra utal, hogy potenciális eredetük a viharban keletkező relativisztikus elektronlavina (*relativistic avalanche of runaway electrons* – RREA) fékezési sugárzása lehet, ahogy azt Gurevich és munkatársai javasolták [17]. Egy másik lehetőség, hogy a villámkisülésben vagy annak környezetében történik a részecskekeltés és gyorsítás. Annak ellenére, hogy a villámkisüléseket jelenleg erős részecskegyorsítóként tartják számon, annak fizikai mechanizmusa, hogy a kisülés hogyan hoz létre nagyszámú relativisztikus részecskét, még mindig vita tárgyát képezi. Emellett vannak olyan vizsgálatok, amelyek alapján a közelben bekövetkező villámcsapásokkor a TGE-k megszűnnek [11,18], így az eredetükkel kapcsolatos képet ez tovább bonyolítja.

Zárszó

Kozmikus környezetünk feltérképezése és vizsgálata rengeteg kihívást tartalmaz, és még több erőfeszítésre van szükség ahhoz, hogy a felmerült kérdésekre megoldást találjunk. A kozmikus sugarak felfedezése óta jelentős lépéseket tettünk a sugárzás kialakulásához kapcsolódó, valamint a helioszférában lejátszódó fizikai folyamatok megértése terén. Változatos módon tudunk már mintát venni plazmakörnyezetünkből, hiszen nemcsak a földi mérések állnak rendelkezésünkre, hanem számos űrküldetés is segítségünkre van, amelyek adatait a földi mérésekkel kombinálva betekinthezünk ebbe az igen komplex világba. Folyamatosan vizsgáljuk a napszél globális tulajdonságait, méréseket végzünk és modelleket állítunk fel arra, hogy a csillagközi tér hogyan befolyásolja a helioszférát. Tanúi voltunk annak is, amikor a Voyager szondák átlépték a helioszféra határát. Ezek jelenleg már az intersztelláris plazma tulajdonságairól továbbítanak értékes adatokat. Ebben a tanulmányban elsősorban a földi mérések segítségével, neutronmonitor-adatok felhasználásával mutattuk be azt a kapcsolatot, amely a kozmikus sugárzás és központi csillagunk, a Nap között áll fenn, hiszen a több napciklust is felölelő időszakok egyelőre csak ilyen formában érhetőek el. De még sok a tennivaló, hiszen az emberiség a különböző űrküldetéseknek köszönhetően csak most kezdi felfedezni csillagkörnyezetét. Az egyre gyarapodó és változatos adatoknak köszönhetően – legyenek azok földi mérések vagy űreszközök adatai –, amelyeket egyre kifinomultabb numerikus modellekkel kombinálunk, kétségkívül új ismeretekkel és további izgalmas felfedezésekkel bővül majd tudásunk a kozmikus sugárzásról, a globális helioszféráról és a helioszférán belüli kölcsönhatásokról.

Irodalomjegyzék

- [1] Lockwood J.A. (1971): *Forbush decreases in the cosmic radiation*. *Space Science Reviews*, 12, 658
- [2] Barouch E., Burlaga L.F. (1975): *Causes of Forbush decreases and other cosmic ray variations*. *Journal of Geophysical Research*, 80, 449
- [3] Cane H.V. (2000): *Coronal mass ejections and Forbush decreases*. *Space Science Reviews*, 93, 55
- [4] Forbush S. (1937): *On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm*. *Physical Review*, 51, 1108

- [5] Forbush S. (1938): On cosmic-ray effects associated with magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 43, 203
- [6] Belov A. et al. (1996): Proton spectra of the four remarkable GLE in the 22nd solar cycle. *Radiation Measurements*, 26, 461
- [7] Bieber J. et al. (2004): Latitude survey observations of neutron monitor multiplicity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109, A12
- [8] Kudela K. et al. (2009): Cosmic ray measurements in High Tatra mountains: 1957–2007. *Advances in Space Research*, 44, 1166
- [9] Berrilli F. et al. (2014): The relativistic solar particle event of may 17th, 2012 observed on board the international space station. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A16
- [10] Battarbee M. et al. (2018): Multi-spacecraft observations and transport simulations of solar energetic particles for the may 17th 2012 event. *Astronomy & Astrophysics*, 612, A116
- [11] Chum J. et al. (2020): Significant enhancements of secondary cosmic rays and electric field at the high mountain peak of Lomnický Stit in High Tatras during thunderstorms. *Earth, Planets and Space*, 72, 1
- [12] Dwyer J. et al. (2014): The physics of lightning. *Physics Reports*, 534, 147
- [13] Chilingarian A. et al. (2010): Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. *Physical Review D*, 82, 043009
- [14] Chilingarian A. et al. (2011): Particle bursts from thunderclouds: Natural particle accelerators above our heads. *Physical Review D*, 83, 062001
- [15] Kuroda Y. et al. (2016): Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds. *Physics Letters B*, 758, 286
- [16] Slegl J. et al. (2022): Spectrometry of high-energy photons on high mountain observatory Lomnický Stit during thunderstorms. *Radiation Protection Dosimetry*, 198, 623
- [17] Gurevich A. et al. (1992): Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165, 463
- [18] Kudela K. et al. (2017): Correlations between secondary cosmic ray rates and strong electric fields at Lomnický Stit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10