

dc_356_11

Kecskeméty Károly

Nagyenergiájú ionpopulációk a Helioszférában

Az MTA doktora cím megszerzéséért készített

értekezés tézisei

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Budapest, 2012

dc_356_11

A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

A naptevékenység átlagosan 11 éves ciklusa nem annyira két szélső állapot közötti váltakozásban nyilvánul meg, inkább egy egyenletes energiatermelésre szuperponálódnak rövid idejű jelenségek, amelyek az aktivitás maximumában sokkal gyakoribbak. A plazma mozgása által keltett erős mágneses terek visszahatnak a töltött részecskék mozgására, ez a kölcsönhatás látványos és hatalmas energiákat felszabadító jelenségeket eredményez. A Nap aktivitása erősen fluktuáló folyamatokból áll nagy csúcsokkal és mély minimumokkal. Ezekben a folyamatokban a töltött részecskék a napszél termikus egyensúlyban levő plazmájáénál sokkal nagyobb energiára képesek felgyorsulni. A szoláris eredetű, illetve a bolygóközi térben végbemenő további gyorsítási folyamatok során energiát nyerő helioszférikus töltött részecskék fluxusai igen nagy fluktuációkat mutatnak. Ezek a fluktuációk az energiaspektrum 1–10 MeV/n körüli minimuma körül a legnagyobbak, a fluxus nagy részecskeesemények során akár 8 nagyságrenddel is megemelkedhet a nyugodt időszakokhoz képest.

A belső Helioszférában a töltött részecskék igen alacsony és igen nagy fluxusai is fontos információt hordoznak. Az igen gyorsan végbemenő, nagy fluxusnövekedésekből, amelyek flerekhez, koronakitörésekhez, vagy a bolygóközi térben terjedő lökeshullámokhoz kapcsolódnak – jó mágneses összeköttetés esetén – optikai megfigyelésekkel egyeztetve következtetni lehet a forrásokra. A Nap sohasem teljesen nyugodt, de elkülöníthetők nyugodt időszakok, amikor a Napon nem, vagy alig észlelhetők aktív jelenségek és nagyenergiájú töltött részecske kibocsátás sem a mai eszközökkel. Ezeknek az időszakoknak a jelentőségét a mérési nehézségek miatt még nem ismerjük részleteiben, de fontos szerepük lehet a naptevékenység megértésében, és a nagy események előrejelzésében, ami a földi hatások – úridőjárás – révén egyre nagyobb jelentőséget nyer.

Szükség van a nyugodt időszakoknak az eddiginél pontosabb definíciójára. A korábban használt „nyugodt napi időszakok” koncepciója egyes publikációkban alacsony fluxusszintet és alacsony fluktuációs szintet, vagy alig változó szoláris és helioszférikus paramétereket jelentett. Egy elfogadott általános feltétel szerint a nyugodt időszakokban a flerekből, koronakitörésekből, együttforgó kölcsönhatási tartományokból, interplanetáris lökeshullámokból és bolygók fejhullámából származó részecskék nem figyelhetők meg. Alacsonyabb energiáján azonban ezeket nem mindig lehet megkövetelni, ezért a fluxusokra pontosabb kritériumokat kell kiszabni. Egyik célom ennek a definíciónak a továbbfejlesztése volt, hogy a Helioszféra minél több pontjában végzett mérésekre alkalmazva sikerüljön az eddigieknél sokkal pontosabban megállapítani az ionok energiaspektrumát, elemi összetételét és ennek térbeli eloszlását a Helioszférában. Bizonyítani kívántam egy állandó, nyugodt Nap idején is meglévő energiaspektrum létét és ennek segítségével azonosítani az egyes ionpopulációkat, amely végső soron eredetükre, gyorsulási és terjedési mechanizmusaikra vet fényt.

Vizsgálati módszerek

Az űrszondák fedélzetén energikus töltött részecskék detektálására szolgáló berendezések mérete igen kicsiny, érzékeny felületük legfeljebb néhány cm^2 nagyságú. Nagy szoláris részecskeeseményeknél, ahol a fluxusok 5–8 nagyságrenddel is megemelkednek, ez még előnyös is, mivel ha minden egyes bejövő részecskét analizálnak, a berendezésnek nagy információmennyiséget kell feldolgoznia és továbbítani a Földre. A fluxusok hatalmas dinamikája miatt nagy fluxusoknál nem mindegyik részecske összes adatát tárolják, hanem csak a beütésszámokat meghatározott energiaintervallumokban. A detektorok kis mérete miatt azonban naptevékenységi minimumban a statisztika igen szegény, a néhány napnál rövidebb időbeli változások kimutatása reménytelen, csak sokkal nagyobb méretű detektorokkal válna lehetségessé.

Céлом elsősorban a Helioszférában terjedő nagyenergiájú töltött részecskék – főleg 10 keV és 100 MeV között energiájú ionok – forrásainak felderítése, gyorsítási és terjedési mechanizmusainak megértése volt a naptevékenység nyugodt időszakaiban. Ebből a célból az ionok energiaspektrumát, a Helioszférában történt észlelés helyétől (a Naptól és az ekliptikától mért távolságtól) való függését, alacsony energián a tömeg szerinti összetételt vizsgáltam. A téma a kutatások fősodrától kissé távol esik azért, mert az aktív folyamatok során történő részecskekibocsátás, -terjedés a nagy fluxusok révén pontosabban mérhető, a forrásai könnyebben azonosíthatók. Ezzel szemben a nyugodt időszakok alacsony fluxusainál problematikus az instrumentális és más fizikai eredetű háttér leválasztása a „valódi” részecskékről, a kis eseményszám pedig statisztikai nehézségeket okoz még a protonoknál is, a ritkább elemekről, ill. azok izotópjairól nem is beszélve. Ez a lehetőségeket erősen behatárolja, de a nyugodt időszakok megértésének fontossága indokolta, hogy minél több információt próbáljak szerezni a meglévő mérési adatok minél teljesebb feldolgozásával.

Az eddigi, az 1960-as évek második fele óta a Föld körül és a bolygóközi térben űrszondák segítségével folyó, energikus töltött részecske mérések során igen nagy adathalmaz gyűlt fel. Ezek döntő része olyan detektorok méréseiből származik, amelyek kis méretűek, és instrumentális háttérük jelentős. Ezeknek eddig csak kis részét dolgozták fel, esetleges módon, rövidebb időszakokra, nem egységes kritériumok alapján. Az alacsony fluxusok megbízható meghatározására a háttér leválasztását a valódi fluxusokról egységes módon kezeltem, a nyers adatokat újra kiértékeltem. Meglepő, de sajnos még a leküldött adatokhoz való hozzáférés sem triviális. A 20–30 évvel ezelőtti, vagy annál régebbi adatok egy része elveszett, vagy csak a nyers adatokat lehet megtalálni, a feldolgozási algoritmusokat nem. A még fellelhető adatokat kaptam meg így az egyes műszerekért felelős kutatóktól a Helios, az Ulysses és a Voyager űrszondák egyes műszereiről a feldolgozási eljárásokkal együtt. Az energiaspektrumok időbeli változásának, és a napszél tulajdonságaival való összefüggésnek a felderítéséhez nagyszámú időszakot választottam ki és ezeket statisztikai módszerrel értékeltem ki.

A részecskeesemények lebomló fázisának vizsgálatát annak bizonyítása motiválta, hogy nemcsak a Napon, hanem a bolygóközi térben is létezik egyfajta, esetenként hosszú időn keresztül fennmaradó nyugodt állapot, ezt az eseményekben kiáramló ionok mint próbarészecskék viselkedése mutatja. Az intenzitás-idő profilokból a lebomlási időt itt is nagyszámú eseményre paraméter-illesztéssel határoztam meg.

Új tudományos eredmények

1. Új eljárás két detektorból álló részecsketeleszkópok háttérének meghatározására

A két detektoros részecsketeleszkópok háttérének leválasztására és az alacsony valódi fluxus meghatározására az impulzusmagasságok mérésén alapuló új, iterációs módszert dolgoztam ki [1, 2]. Ez az algoritmus az eddigieknél megbízhatóbb és általában szignifikánsan alacsonyabb fluxusértékeket ad. A módszert a SOHO szondán működő COSTEP EPHIN és ERNE berendezések adatfeldolgozására fejlesztettem és próbáltam ki, majd a Helios-1 és -2, az Ulysses és a Voyager szondák hasonló méréseire is alkalmaztam. Az egységes módszer alkalmazásával nagyban sikerült javítanom az eredmények megbízhatóságát a különböző eszközökből eredő instrumentális eltérések csökkentésével. Egy csaknem azonos időszakban EPHIN méréseket feldolgozó korábbi munkával való összehasonlítás azt mutatta, hogy az általam kidolgozott módszer hatékonyabban küszöböli ki a 10 MeV alatti háttérrel.

2. Alacsony protonfluxusok mérése Föld közeli űrszondákon

Meghatároztam a Föld és a Nap között keringő SOHO űrszonda EPHIN és ERNE műszerének az 1996-97-es naptevékenységi minimuma során mért igen alacsony protonfluxusait a 4,3–22, ill. az 1,5–12 MeV közötti energiasávokban [1, 2]. A kapott valódi (instrumentális háttértől mentes) fluxusok a korábbi, Föld körüli méréseknél (IMP-8) alacsonyabb értékekre vezettek, az energiaspektrum alakja hasonló. Az EPHIN esetében összehasonlítottam a teljes teleszkópokra és a gyengébb statisztikájú, de kisebb háttérű párhuzamos detektorszegmensekre kapott fluxusokat is, ezek a statisztikus hibahatáron belül megegyeztek, de a spektrum a széles-szögű elrendezésnél valamivel laposabb. Az EPHIN és ERNE eredmények közötti eltérést az ERNE teleszkóp nem tökéletes antikoincidencia védelme okozza. Az EPHIN két, egymást követő minimumban (1996-97-ban és 2006-2009-ben) mért legalacsonyabb spektrumait összehasonlítva a legutóbbi, negatív mágneses polaritás idején mért spektrumok 2-3-szor alacsonyabbnak bizonyultak. Az ugyancsak a Föld körül keringő IMP-8 CPME detektora esetében impulzusmagasság adatok híján egy általam kidolgozott módszerrel, a 100 MeV fölötti energiájú protonokkal kapott korreláció alapján sikerült becslést adnom az áthatoló sugárzás által keltett szekunder részecskék járulékára és ezzel igen alacsony szoláris-helioszférikus eredetű fluxusokat kapnom. Ily módon sikerült összehasonlítanom két, egymást követő naptevékenységi minimumot, az 1985–87-es negatív Nap polaritás során észlelt fluxusok alacsonyabbnak bizonyultak, mint az előző, pozitív ciklus fluxusai.

3. Nyugodt időszaki energiaspektrumok a belső Helioszférában

Első alkalommal végeztem el az 1974-ben és 1976-ban felbocsátott Helios űrszondák alacsony protonfluxusainak szisztematikus kiértékelését első alkalommal végeztem el a 4–27 MeV energiatartományban [3]. A Heliosok első alkalommal végeztek hosszú idejű méréseket a bolygóközi térben a Naphoz 1 Cs.E.-nél közelebb, a Vénusz pályáján belül pedig gyakorlatilag azóta sem történt ilyen mérés. Az energikus részecskéket detektáló műszer is igen stabil volt, az általa szolgáltatott adatsorozat unikális. Korábban csak rövid időszakra határozták meg a fluxusokat, de egyszerűbb módszerrel, ami nem tette lehetővé a teljes háttér levonását. A feldolgozást a Heliosok

teljes, az 1975–77-es minimum során gyűjtött méréseire elvégeztem. A két Helios egy időben különböző térbeli pontokban kapott energiaspektrumai jól egyeznek, a Naphoz közelebb 10 MeV fölött kilaposodnak, a távolság növekedésével egyre meredekebbek, de 15 MeV körül minimummal rendelkeznek. Meghatároztam az egyes energiasávokban mért fluxusoknak a naptávolságtól való függését. Ez unikális információ, amelynek feltárására eddig nem történt próbálkozás és az ellenőrzésére a Solar Orbiter 2018-ban várt felbocsátása előtt nem is lesz lehetőség. A kapott radiális profilok szerint a fluxusok a Naphoz legközelebbi szakaszon, 0,3 és 0,4 Cs.E. között a legmagasabbak, kifelé haladva mintegy 0,6 Cs.E.-ig csökkennek, majd újra emelkednek. A talált szignifikáns változás a Naptól mért radiális távolsággal arra utal, hogy a legnyugodtabb időszakokban megfigyelt legalacsonyabb fluxusok szoláris eredetűek, a Nap a MeV feletti energiájú protonok állandó forrása még észlelhető aktivitás hiánya esetén is. A napközeli negatív gradiens sejteti egy olyan populáció létezését, amelynek sűrűsége csökken a Naptól való távolsággal, valamint egy másik interplanetáris eredetűét, amelyet az együttforgó kölcsönhatási tartományok által gyorsított, a külső Helioszférából befelé áramló részecskék alkotnak.

4. Energiaspektrumok térbeli eloszlása nyugodt időszakban a külső Helioszférában

Az 1990 és 2009 között működött Ulysses szonda egy másik unikális mérésorozatának felhasználásával sikerült az energiaspektrumnak nemcsak radiális, de szélességfüggését is kimutatnom [4]. Az Ulysses a belső Helioszféra 1,4 és 5,4 Cs.E. közötti magasabb szélességű tartományait derítette fel. A 20 éves élettartam alatt két napaktivitási minimumban is sikerült elvégezni az alacsony energiájú alacsony fluxusok analízisét, ilyen módszeres vizsgálat korábban nem történt. A talált nyugodt időszakok 1994–97-ben a pálya $\frac{3}{4}$ -ét, 2006–07-ben is több, mint a felét lefedik, szélességben pedig a teljes (-80°, +80°)-os intervallumot, így sikerült az energiaspektrumnak nemcsak a radiális, de szélességfüggését is kimutatnom. A radiális profilban minimumot találtam 2 és 4,5 Cs.E. között, de a 2 Cs.E. körüli rendkívül alacsony fluxusokat részben a szélességi effektus okozza. Ha csak az ekliptika-közeli tartományt vettem figyelembe, akkor a radiális profil minimuma sokkal kevésbé látszik.

Ennél is fontosabb a szélességfüggésben az általam felfedezett profil: -45 fok déli és 30 fok északi (az Ekliptikára vonatkoztatott) szélesség között a fluxusokban egy kb. egy nagyságrenddel magasabb „talapzat” mutatkozik. Ez nagyjából megfelel a lassú napszél övnek, de a helioszférikus áramlepelnek is. A talált, mintegy 7–8 foknyi eltolódás a déli félgömb felé mindkettőben kimutatható, és jóval nagyobb, mint amit az áramlepelnél a mágneses térből látható. A lassú napszél öv mindig a pozitív polaritású félgömb irányában tolódik el, míg az alacsony fluxusok mindkét polaritásnál déli irány felé. A szélességi effektus arra utal, hogy a lassú napszél övben az állandóan jelenlevő együttforgó kölcsönhatási tartományok a fő forrásai a megfigyelt ionoknak, magasabb szélességeken ezek eltűnnek. A pólusok közelében a fennmaradó, rendkívül alacsony fluxusokban radiális gradienst nem lehet kimutatni.

A Naptól a legmesszebb eljutott két Voyager szondánál is elsőként elemeztem az alacsony aktivitáshoz kapcsolódó ionfluxusokat [4]. Megmutattam, hogy az energiaspektrumok kifelé haladva 2 és 80 Cs.E. között egyenletesen változnak, a 2 és 10 MeV közötti szakaszuk kb. 50 Cs.E.-től ellaposodik, sőt, 2 MeV fölött emelkedővé válik. Azt találtam, hogy egyesítve az Ulyssesnek alacsony szélességeken mért

adataival, a protonfluxusok a radiális távolsággal 1 és 5 Cs.E. között kissé csökkennek, ezt ~20–30 Cs.E.-ig egy nagyobb negatív gradiens követi. Ezután kifelé haladva mintegy 60 Cs.E.-ig egy lapos szakasz ismerhető fel, majd a Voyager–1 spektruma – valószínűleg az anomális protonok megjelenése miatt – kissé emelkedik, de ezt a Voyager–2 fluxusaiban nagy fluktuációk miatt nem lehet látni. Összehasonlításként egy másik műszer adataiból is meghatároztam az alacsonyabb, 0,5–2 MeV-es energiájú protonok fluxusaiból a radiális gradiens értékét, a két adatsor jól összefér [5]. A Helios, IMP-8, SOHO, Ulysses és a Voyager szondák együttes adatai alapján első ízben sikerült meghatároznom az alacsony fluxusok 0,3 és 85 Cs.E. közötti radiális profilját. Ennek alapján a három populáció jelenlétét valószínűsítettem. A belső Helioszférában, 1,5, esetleg 5 Cs.E. távolságon belül a kismértékű negatív gradiens egy szoláris komponens létezésére utal, amely eredhet mikrofler eseményekből. A 20 Cs.E.-nél kívül kimutatott egyenletes intenzitás feltehetően az együttforgó tartományok miatt alakul ki, amelyek a külső Helioszférában összetorlódva globális összeolvadt kölcsönhatási tartományokat hoznak létre. Ezek állandóan kölcsönhatnak a korábbi szoláris események és adiabatikusan lelassult galaktikus részecskék populációival és gyorsítják őket. A harmadik populáció a ~50 Cs.E.-en túl feltehetően a már 10 MeV fölött korábban kimutatott anomális protonokat jelenti.

5. A kozmikus sugárzás energiaspektrumának alakja 1 és 30 MeV között, közelítés 3 paraméterrel

Az IMP–8 rendkívül hosszú, 1973 és 2001 közötti homogén mérési sorozatát felhasználva sikerült bizonyítanom, hogy a naptevékenység nyugodt időszakaiban a protonok energiaspektruma ~1 és 100 MeV között jól leírható 3 paraméteres közelítéssel: $J(E) = AE^{-\gamma} + CE$, egy szoláris-helioszférikus és egy galaktikus komponens összegeként [6, 7, 8]. Korrelációt találtam a 100 MeV feletti energiájú protonfluxus és az alacsony energiájú protonok fluxusainak alsó burkológörbéje között, ez azt valószínűsíti, hogy a 10 MeV körüli fluxus valódi része kisebb, mint az instrumentális háttér [8]. Meghatároztam az A , γ és C paraméter mellett az energiaspektrum minimumhelyének változását a naptevékenységi ciklusok folyamán. Az IMP-8 mindhárom, általam analizált adatsorozata egybehangzóan azt mutatta, hogy az 1985–87-es minimumban a protonok fluxusai széles energiasávban 2–3-szor alacsonyabbak voltak, mint az előző minimumban. Az alacsony fluxusoknak az MgII indexszel való korrelációja és a p/He arány egyidejűleg észlelt alacsony értékéből arra következtettem, hogy ezek a fluxusok forrásai valószínűleg mikroszkopikus impulzív SEP események lehetnek [9].

Az IMP–8, a Helios és a Voyager űrszondák adatainak felhasználásával megállapítottam, hogy az energikus részecskék fluxusaiban nemcsak az együttforgó kölcsönhatási tartományok (CIR) nagyobb fluxusai, hanem az alacsony fluxusok is hosszú élettartamú, árkoknak nevezett struktúrákba rendeződnek [10]. A főként gyenge naptevékenységnél felismerhető visszatérő árkoknak az ekliptika síkjában mért szélessége elérheti a 60–90 fokot, egészen 10 Cs.E.-ig követhetők. Az árkok létét azzal magyaráztam, hogy CIR-ek által gyorsított részecskék egy igen alacsony, stacionárius háttérre szuperponálódnak [10, 11].

6. A galaktikus energiaspektrum meredeksége alacsony energiánál

Az 5. pontban említett 3 paraméteres felbontást kiterjesztve egy negyedik paraméterrel közelítettem a magasabb energiájú, galaktikus eredetű protonok energiaspektrumának alsó részét. A modulációval foglalkozó publikációkban szokásos feltevés, amely szerint a 10 MeV alatt ($E \rightarrow 0$ adiabatikus határesetben) a függés lineáris, a modulációs egyenletek egyszerű feltevések mellett érvényes erőtér megoldásán alapul. Az IMP-8 1974 és 2001 közötti mérései alapján 138 spektrumot értékeltem ki iterációs eljárással és megállapítottam, hogy a spektrumokhoz legjobban illeszkedő függvény szerint a kitevő ennél szignifikánsan nagyobb: $v = 1,31 \pm 0,13$ [12, 13]. Kimutattam a kitevő időben történő, a naptevékenységgel összefüggő változását. A v spektrális index becsült értékeinek eloszlásában a naptevékenységi maximum és minimum időszak között erős eltérést találtam: amíg a napciklusok maximuma közelében az eloszlás $\sim 1,2$ -nél tetőzik, a minimális aktivitású időszakokban ez az érték $v \approx 1,35$. Megmutattam, hogy a külső Helioszférában jellemző $v > 1$ spektrális kitevő 1 Cs.E. környékén is létrejöhet, ha az ionok radiális diffúziós együtthatója elég kicsi [13]. Ezt korábban nem fizikainak tekintették, de csak befelé irányuló konvekciót jelent, amelyet a nagyobb energiájú ionok kifelé áramlása kompenzál.

7. Szupratermális ionok összetétele, eredete

A szupratermális (40 keV/n és 1 MeV/n közötti energiájú) szén-, oxigén- és vas ionok relatív fluxusából kimutattam, hogy ezek a naptevékenységtől függően flerekből, a koronából, illetve a napszélből erednek [14]. A nagyobb, ill. kisebb első ionizációs potenciállal rendelkező ionok aránya (pl. Fe/O) a forrás helye szerint erősen különbözik. A nyugodt időszakok fogalmát az alacsonyabb energiájú ionokra adaptálva három földközeli űrszonda méréseiből meghatároztam a Fe/O és C/O arányokat. A szén és oxigén aránya nem mutatott szisztematikus változást, a Fe/O erősen változott a napciklus folyamán és eloszlásukban sikerült három jól elkülönülő populációt kimutatnom, míg a C/O értékek Gauss-eloszlásúak. A 3 csoport rendre megfelel a napszélben, a napkoronában, ill. a flerekben észlelt Fe/O arányoknak. Erős napaktivitásnál mind a koronában, mind a fler-eredetű impulzív SEP eseményekben észlelt értékek előfordulnak, a napszélre jellemzők nem, minimális aktivitásnál viszont csak a napszélnek megfelelőek jelennek meg. Eszerint minimumban a szupratermális ionok magpopulációja a napszél, erős tevékenységnél a korona, ill. flerek. Az utóbbi csoportnál esetében a fotoszférában mért értékhez képest mért feldúsulás aránya azt mutatja, hogy a szoláris felső atmoszférából erednek. Meghatároztam a vas, a szén- és az oxigénionok spektrumát 1 MeV/n-ig, a 3 csoport a spektrum alakja szerint is szétválak, megerősítve azt, hogy a 3 populáció kialakulását különböző részecskegyorsítási mechanizmusok okozzák.

8. Szoláris részecskeesemények lebomlási fázisa

A szoláris energikus részecskeeseményekben (SEP események) a protonokat próbarészecskéknek tekintve a fluxusok időbeli profiljai az események lebomló fázisában magát az interplanetáris közeget jellemzik, ezek stabilitása a napszél stacionárius állapotát mutatja. Két eseményben az időprofilokat a Reid-modell szerinti injekciós profilt és diffúziós bolygóközi terjedést feltételezve meghatároztam a terjedési szabad úthossz értékét és a naptávolságtól való függését [15]. Az IMP-8 27 éves homogén mérési sorozatában 641 olyan SEP eseményt azonosítottam,

amelyekben a protonok fluxusában a csökkenő fázist jól tudtam exponenciális függvénnyel közelíteni legalább 1 napon keresztül [16, 17, 18]. Meghatároztam a τ lebomlási időállandót 3-6 különböző energiasávban 1 és 48 MeV között. Megmutattam, hogy a τ időállandó lognormális eloszlást követ [18]. Összehasonlítottam a csak konvekciót és adiabatikus lassulást feltételező egyszerű modell által adott $\tau = 3r / 2V(2+2\gamma)$ összefüggéssel az esetek több, mint felében $\pm 25\%$ -on belüli egyezést találtam. Ezekből kiválogatva a stacionárius napszélsebességű eseményeket, ugyanaz lett az eredmény, és az elektronokra is hasonló adódott [19, 20]. Eszerint a sima lebomlási szakaszban a napszélnek a bomlási időt meghatározó paraméterei stacionáriusak. Megállapítottam, hogy az eloszlás maximuma 20 óra körül van, kevéssé függ az energiától. Az időkonstans függ a napszélsebességtől, a napszélsebességnek a bomlási időintervallum alatti változásától azonban kevéssé, akárcsak a heliografikus hosszúságtól [21]. A formulából nem következő, de észlelhető energiafüggés, τ többnyire kissé növekszik az energiával [18]. A Helios és az Ulysses mérések alapján az időállandó növekszik a Naptól mért távolsággal, de gyengébben, mint a jószolt lineáris függés. Kimutattam, hogy az exponenciális bomlási fázist elsősorban a konvekció és adiabatikus lassulás alakítja ki, de a diffúzió sem elhanyagolható.

Az egymást követő SEP eseményekben hosszú, egymáshoz nagyon hasonló, gyakorlatilag invariáns lebomlási idővel rendelkező eseménysorozatokat azonosítottam [22]. A leghosszabb sorozatban 9 esemény történt 3 és fél hónap alatt. Ebből arra következtettem, hogy a napszélplazmában hosszú időn át igen széles, egy teljes naprotációra is kiterjedő homogén szektorok maradnak fenn. Ez azt jelzi, hogy a belső Helioszférában a mágneses tér fluktuációi hosszú időn át kvázistacionárius jellegűek lehetnek [23], a részecskekibocsátások után az interplanetáris közeg valamilyen értelemben vett „alapállapotába” áll vissza.

Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése

A nyugodt Nap időszakában mért töltött részecskék energiaspektrumának és elemi összetételének pontos meghatározása fontos szerepet játszik a részecskék eredetének és ezzel a Nap működésének jobb megértésében. Ehhez aktualitást adott a 2006–2009 közötti, váratlanul hosszú és mély naptevékenységi minimum. Kizárólag Föld körüli mérések alapján az egészen kisméretű, nyugodt időszakban is megjelenő mikroeseményeket nem tudjuk elkülöníteni, ebben a Naphoz még a Heliosoknál is közelebb jutó Solar Orbiter 2018-tól várható mérései jelenthetnek előrelépést. Az igen alacsony fluxusok miatt a ritkább ionok energiaspektrumának, izotóp- és töltés szerinti összetételének pontos meghatározásához csak nagyobb méretű detektorok ürbe juttatásával van remény. A nagy fluxusokkal járó és az űridőjárás alakításában döntően fontos részecskeesemények és a naptevékenység előrejelzéséhez a nyugodt idejű naptevékenység megértése alapvetően fontos.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- 1) Valtonen E., K. Kecskeméty, H. Kunow, P. Király, R. Müller-Mellin, A. Posner, and J. Torsti: A method for background reduction of solid state detectors during low-flux periods, *Proc. of 26th Int. Cosmic Ray Conf.*, Salt Lake City 1999, **6**, 220-223 (1999)
- 2) Valtonen, E., Kecskeméty, K., Kunow, H., Király, P., Müller-Mellin, P., and Torsti, J.: Background reduction for quiet time particle fluxes aboard the Solar and Heliospheric Observatory, *J. Geophys. Res.* **106**, 10705 (2001)
- 3) Kecskeméty, K., R. Müller-Mellin, and H. Kunow: Radial variation of the energy spectra of low-flux MeV protons aboard Helios in 1975-77, *Proc. of 27th Int. Cosmic Ray Conf.*, Hamburg 2001, **8**, 3108-3111 (2001)
- 4) Kecskeméty, K., Zeldovich, M.A. Logachev, Yu.I., Heber, B., Király, P., Mewaldt, R.A., Posner, A., and Rodriguez-Pacheco, J., Quiet time fluxes and radial gradients of low-energy protons in the inner and outer heliosphere, *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.*, Pune 2005, **2**, 57-60 (2005)
- 5) Zeldovich, M.A. Logachev, Yu.I., Veselovskii, I.S., Kecskeméty, K., Radial gradients of the low-energy protons in the outer Heliosphere, *Int. J. Modern Phys. A* **20**, 6727-6730 (2005)
- 6) Kecskeméty K., Logachev, Yu.I., and Zeldovich, M.A., Variation of quiet-time and quasi-stationary proton energy spectra between 1984 and 1991, *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf.*, **6**, 159-162 (1999)
- 7) Zeldovich, M.A., Kecskeméty, K., Logachev, Y.I., Surova, G.M., Dynamics of the 0.3-100 MeV proton energy spectra in the inner heliosphere in quiet periods of 1974-1991, *Cosmic Res.* **39**, 1-9 (2001)
- 8) Logachev, Yu.I., Zeldovich, M.A. and Kecskeméty, K., Energy spectra of low-flux protons in the inner heliosphere under quiet solar conditions, *Solar Phys.*, **208**, 141-166 (2002)
- 9) Zeldovich, M.A., Logachev, Yu.I., Kecskeméty, K., Surova, G.M., Fluxes of low-energy particles in quiet periods of solar activity and the MgII index, *Cosmic Res.*, **47**, 378 (2009)
- 10) Logachev, Yu.I., Zeldovich, M.A., and Kecskeméty, K., Low-flux spatial structures of MeV protons at 1-10 AU during quiet-time periods, *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.*, 2001, **8**, 3202 (2001)
- 11) Zeldovich, M.A., Logachev, Yu.I., Surova, G.M., Kecskeméty, K., Time variations of low-energy protons and helium nuclei (0.3-10 MeV/nucleon) during the quiescent time of solar activity in the inner Heliosphere, *Cosmic Research*, **41**, 235-244 (2003)
- 12) Kecskeméty, K., Yu.I. Logachev, M.A. Zeldovich and J. Kóta: The slope of the energy spectra of 10-100 MeV protons, *Proc. of 27th Int. Cosmic Ray Conf.*, Hamburg 2001, **10**, 3988-3991 (2001b)
- 13) Kecskeméty, K., Logachev, Yu.I., Zeldovich, M.A. and Kóta, J., Modulation of the galactic low-energy proton spectrum in the inner heliosphere, *Astrophys. J.*, **738**, art. id. 173, doi: 10.1088/0004-637X/738/2/173 (2011)
- 14) Ishkov, V.N., Zeldovich, M.A., Kecskeméty, K., Logachev, Yu.I., Relative ion Fe, C and O abundances in quiet time particle fluxes in the 23 SC, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2011.06.034 (in press, 2012)
- 15) Wibberenz G., Kecskeméty, K., Kunow, H., Somogyi, A., Iwers, B., Logachev, Yu.I., Stolpovskii, V.G., Coronal and interplanetary transport of solar energetic protons and electrons, *Solar Phys.* **124**, 353-392 (1989)

- 16) Daibog, E., V. Stolpovskii, G. Erdős, S. Kahler, K. Kecskeméty, and H. Kunow, Study of decay phases in gradual and impulsive solar energetic particle events, *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.*, Hamburg, 2001, 3631–3634 (2001)
- 17) Daibog, E.I., Logachev, Y.I., Kahler, S., Kecskeméty, K. Statistical properties of SEP event flux declines, *Adv. Space Res.*, **32**, 2655–2660 (2003a)
- 18) Kecskeméty, K., Daibog, E. I., Logachev, Y. I., Kóta, J., The decay phase of solar energetic particle events, *J. Geophys. Res.*, **114**, CiteID A06102 (2009)
- 19) Daibog, E.I., K. Kecskeméty, and Yu.I. Logachev: Decay phase of energetic electrons and protons in solar cosmic ray events, *Bull. Russian Acad. of Sci.: Physics* 73, 3, 319-321 (2009)
- 20) Daibog, E.I., Kecskeméty, K., Logachev, Yu.I., Surova, G.M., The rigidity dependence of characteristic decay time and mean free path in SCR events, *Cosmic Res.* **48**, 501-508 (2010)
- 21) Daibog E.I., S. Kahler, K. Kecskeméty, and Yu.I. Logachev: Relation of SEP event decline characteristics to solar wind parameters, *Adv. Space Res.* **35** (10) 1882-1886 (2005)
- 22) Daibog, E.I., Logachev, Yu.I., Kahler, S.W., Kecskeméty, K., and McKenna-Lawlor, S., Periods of quasi-stationary conditions in interplanetary space according to sequences of SEP events, *Adv. Space Res.* **32**, 2661-2666 (2003)
- 23) Daibog, E.I., Logachev, Yu.I., Kahler, S.W., Kecskeméty, K., Sequences of solar events with identical decays as a tool for isolating quasistationary states in the interplanetary space, *Cosmic Res.* **42**, 4, 362-369 (2004)