

1. ábra. A Magyar Honvédség PzH 2000 önjáró lövegéről készült felvétele közvetlenül a lövés után, amikor a kiáramló gáz nagy sebességgel hagyja el a csövet (Fotó: HM Zrínyi Nkft. / Kertész László)



Kis Árpád*

A lökéshullám jelensége és jelentősége

Lökéshullám, vagy ismertebb elnevezéssel hangrobbanás (angolul: shock wave vagy blast wave) akkor keletkezik, amikor egy tárgy vagy egy hatás gyorsabban halad az adott közegben, mint amekkora a hullám terjedésének sebessége ugyanabban a közegben. Ilyen eset lehet például nagy energiájú robbanás, hangsebesség feletti lövedék vagy hangsebesség felett haladó repülőgép.

A lökéshullámmal kapcsolatos tudományos érdeklődés a XX. század első felében alakult ki, a nagy energiájú robbanások megjelenésével és elterjedésével kapcsolatban. Kiderült ugyanis, hogy a nagy erejű robbanások esetén nem (csak) a robbanás maga rombol, hanem valójában a robbanás előtt haladó hullám, amelyre jellemző, hogy nagy nyomást és összesűrűsödött levegőt hordoz, és annak hatása a romboló. Ezen a ponton érdemes megemlítenünk Zemplén Győző¹ nevét, aki az elméleti fizika egyik első magyarországi művelője, és a lökéshullámok elméletének kidolgozója volt.

A lökéshullám számos tulajdonságában különbözik a közönséges hanghullámtól. A hanghullám áthaladása a közegen alapvetően nem változtatja meg maradandó módon a közeg – a hanghullám esetében a levegő – paramétereit, mint pl. a hőmérsékletét, sűrűségét és nyomását. A hanghullám közegen történő áthaladása egy reverzibilis folyamat, vagyis az áthaladás után minden érték visszaáll az áthaladás előtti állapotba. (Ha valaki például kiabál egy szobában, attól nem lesz sem melegebb, sem sűrűbb a levegő). A lökéshullám ezzel ellentétben egy irreverzibilis folyamat, mert alapvetően változtatja meg a közeg jellemzőit: összenyomja azt, ezáltal sűrűbb lesz a közeg, és megnövekszik a hőmérséklete és nyomása. Vagyis ezáltal energia disszipálódik, tehát energiaátadás történik. Ez jól látható a 2. ábrán, amely egy hangsebesség feletti lövedék ún. árnykép-technológiával készült felvételét mutatja. Jól megfigyelhető a lökéshullám, amelyet ívelt alakja miatt fejhullámnak (bow shock) is nevezünk, amely elválasztja a

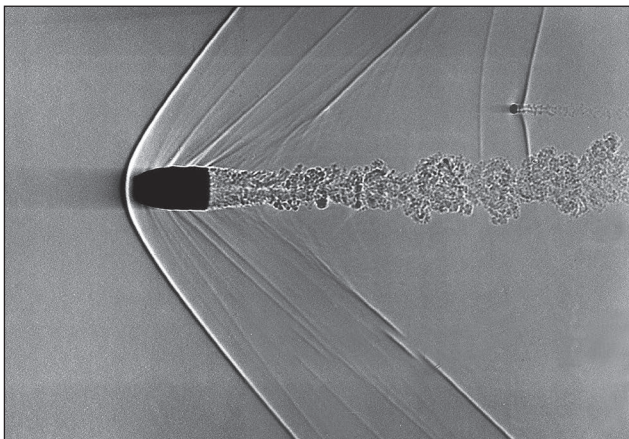
ÖSSZEFOGLALÁS: A tanulmány a lökéshullám jelenségével foglalkozik, bemutatva jellegzetes fizikai tulajdonságait a légkörben, és az űrplazmában létrejövő lökéshullám esetében egyaránt. Tárgyalja az űrplazmában kialakuló lökéshullám részecskegyorsító képességét, részletesen leírva a gyorsításhoz kapcsolódó feltételeket, kitérve a már ismert, és a még kutatásra váró kérdésekre. Végül áttekinti az űrplazma lökéshullámmal kapcsolatos laboratóriumi kutatását és a gyakorlati alkalmazás lehetőségét.

KULCSSZAVAK: űrplazma, lökéshullám, fejhullám, elsőrendű Fermi-gyorsítás

ABSTRACT: The study deals with the shock wave phenomenon, presenting its characteristic physical properties both in the case of shock waves created in the atmosphere and in space plasma. It discusses the particle acceleration ability of the shock wave formed in space plasmas, by describing in detail the conditions related to the acceleration, covering the already known facts and the questions that still need to be researched. Finally, it reviews space plasma shock wave laboratory research and its potential for practical application.

KEY WORDS: space plasma, shock wave, bow shock, first-order Fermi acceleration

* ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Űrkutatás-Űrtechnológia Szervezeti Egység vezető, űrkutatás fejlesztéséért felelős igazgatóhelyettes. ORCID: 0000-0003-1841-7202



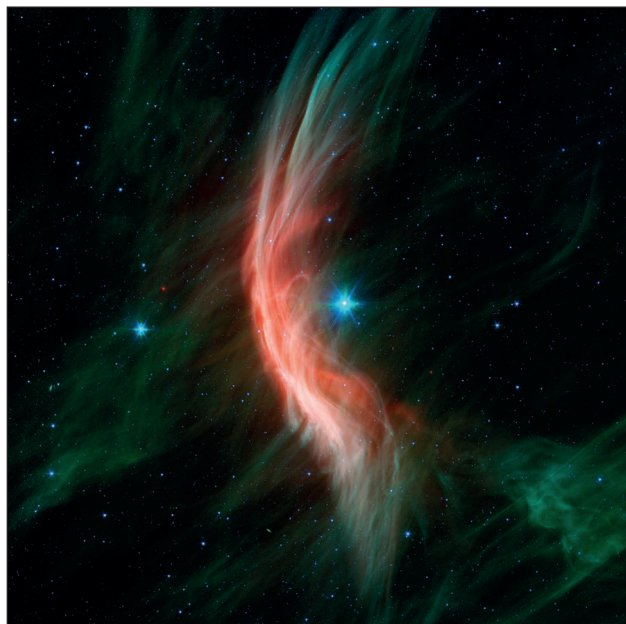
2. ábra. Egy hangsebesség feletti lövedék körül kialakuló ívelt alakú lökeshullám vagy fejhullám, és környezetének úgynevezett árnyékképe. Balról a háborítatlan közeg, jobb oldalon a „sokkolt”, összenyomott, turbulenssé vált közeg látható. A kettőt elválasztja a lökeshullám íve (Forrás: NASA, [1])

még érintetlen (bal oldalon), illetve a már zavart, turbulens és termalizált közeget, amely a lökeshullám mögött látható (a kép jobb oldalán). Az árnykép-technológiát éppen az teszi megvalósíthatóvá, hogy az átalakult sűrűségű közegnek más lesz az optikai törésmutatója, ezáltal válik láthatóvá és lefényképezhetővé a megváltozott tulajdonságú közeg. A lökeshullámok stabilnak mondható képződmények, amelyek hosszú ideig fennmaradhatnak. Keletkezésük helyétől nagy távolságokra is észlelhetők, ahogy azt a 2022 januárjában kitört tongai² vulkán esete is mutatja. A kitöréskor keletkezett lökeshullámot még Magyarországon is lehetett észlelni, ahol a soproni Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet légnyomásmérő műszere két alkalommal is mérte a változást [2], ugyanis a lökeshullám két irányból érkezett az országba, miután mindkét oldalról megkerülte a Földet.

LÖKESHULLÁMOK AZ UNIVERZUMBAN: SZUPERNOVA, TERMINATION SHOCK, FEJHULLÁM

A lökeshullám létezése nem korlátozódik csupán a légkörre; ugyanis a lökeshullám jelensége az egyik legelterjedtebb jelenség, amely tulajdonképpen a világegyetem bármely pontján megfigyelhető. A világegyetem (és ezen belül a Naprendszer) ugyanis nem üres, hanem kitölti egy ritka anyag, az úgynevezett űrplazma. Az űrplazma jelentős részét szabadon álló protonok és elektronok alkotják, amelyek azért nem rekombinálódnak, mert olyan ritka a plazma, hogy az alkotórészecskéi ütközés nélkül „elmennek” egymás mellett. Emiatt ezt a materiát ütközésmentes plazmának is nevezzük. A napszélplazmában például a sűrűség olyan kicsi, hogy köbcéntiméterenként mindössze néhány részecske található benne a Föld környezetében. Jellegzetessége az űrplazmának, hogy kívülről (elektromos szempontból) semleges, amely azt jelenti, hogy ugyanannyi proton és kis mértékben más pozitív töltésű részecske, mint elektron található benne. További tulajdonsága az űrplazmának, hogy mágnesezett (a plazmába ágyazódott mágneses teret visz magával). Mindezek miatt az űrplazmát, amelynek jeles képviselője a napszél is, ütközésmentes, mágnesezett űrplazmának is nevezik.

Ívelt lökeshullám, vagyis fejhullám keletkezik például csillagok körül is, amikor a csillagból kiáramló plazma anyaga



3. ábra. A gyorsan mozgó Dzéta Ophiuchi csillagból kiáramló csillagszél és a környező porfelhők találkozására ívelt lökeshullámot/fejhullámot hoz létre, ami jól látható a NASA Spitzer űrtávcsövének³ infravörös tartományban készített felvételén [3]

találkozik az adott esetben nagy sebességű csillagközi anyaggal, a „csillagközi szél” plazmájával. (3. ábra)

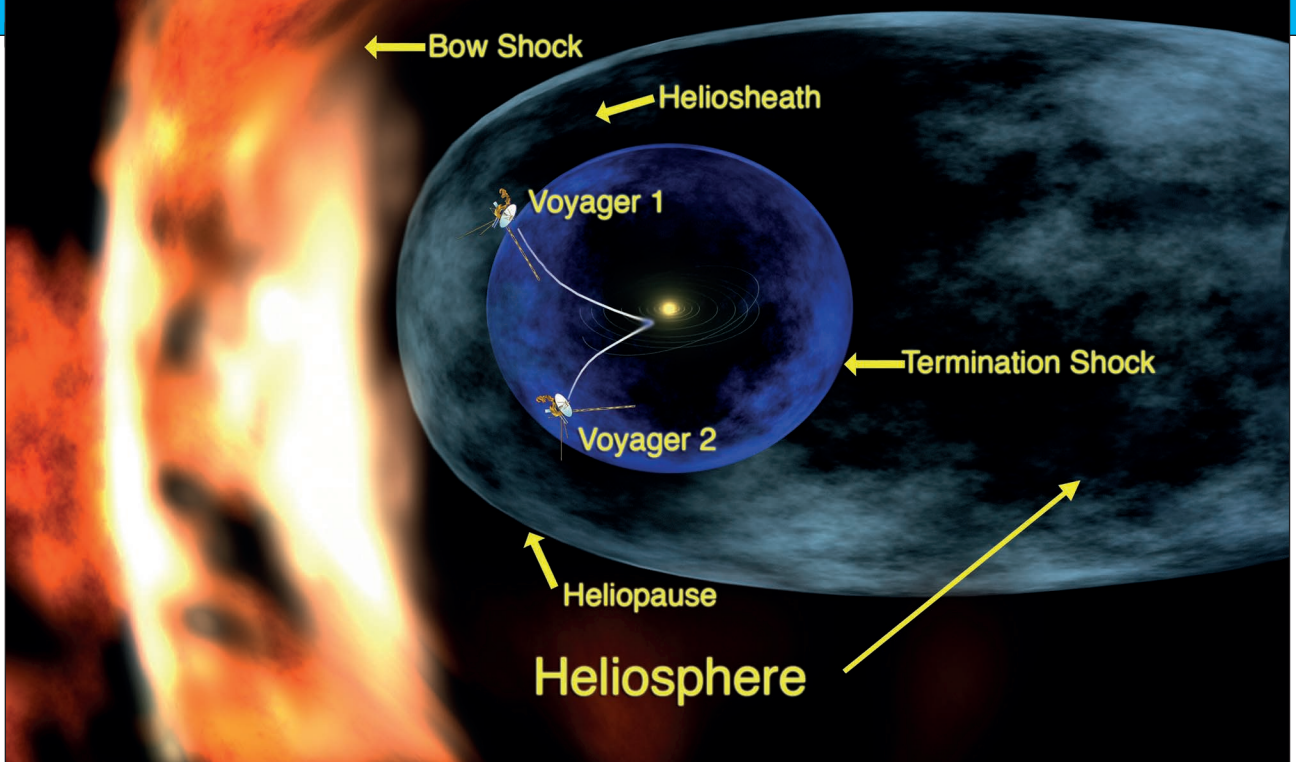
Lökeshullámmal találkozunk a Naprendszer külső határánál is: amikor a Napból kiáramló anyag, a napszél plazmája annyira lelassul, hogy sebessége szubszonikusá válik (a plazma tulajdonságai szerint), és kialakul a lökeshullám, ami a Naprendszer „buborékának” a szélét jelzi, és amit a szakirodalom „Termination Shock” néven ismer. (4. ábra). Ennek a határvonalnak a létezését egészen 2004-ig csak feltételezték, amikor is a Voyager-1 űrszonda⁴ bizonyíthatóan áthaladt rajta, és amit követett a Voyager-2 áthaladása 2007-ben. Később, 2012-ben a Voyager-1 áthaladt a heliopauzán is⁵. A helioszféra külső határára, a heliopauza környékén ismét egy lökeshullámmal, pontosabban fejhullámmal találkozhatunk, amely a csillagközi anyag áramlása és a helioszféra anyagának kölcsönhatása miatt jön létre. A helioszféra ugyanis egy interstelláris felhő belső szélénél helyezkedik el, és sebességük egymáshoz viszonyítva becslések szerint eléri a 80 000 km/h-t.

LÖKESHULLÁM, VAGY FEJHULLÁM A FÖLDNÉL: INTERAKCIÓ A FÖLDI MÁGNESES TÉR ÉS AZ INTERPLANETÁRIS TÉR KÖZÖTT

Találunk lökeshullámot, pontosabban fejhullámot közelebb is, nem kell a Naprendszer vagy a galaxisunk széléig elutaznunk. A Napból folyamatosan kiáramló anyag, a napszél a Föld környezetében 300–600 km/s sebességgel mozog. A földi mágneses tér, a magnetoszféra a töltött részecskékből álló napszél számára áthatolhatatlan akadályt jelent, ezért a napszélnek le kell lassulnia, és körbe kell folynia a magnetoszféra körül. A kölcsönhatás következménye a kialakuló fejhullám (5. ábra).

Ha összehasonlítjuk a Föld körüli fejhullámot a hangsebességnél gyorsabban mozgó lövedék esetében keletkező fejhullámmal, akkor jól látható a hasonlóság. Ez nem meglepő, hiszen a napszél áramlásában a Föld is tulajdonkép-





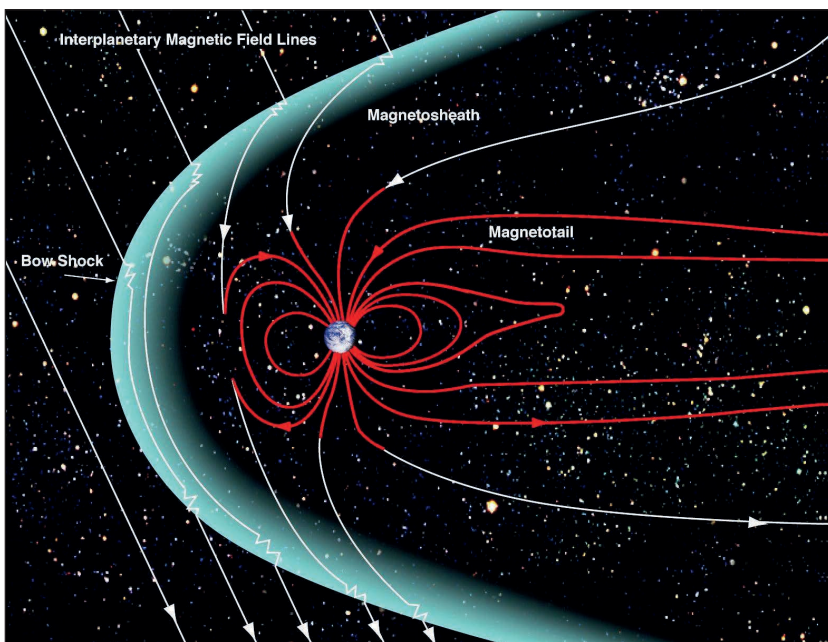
4. ábra. A Naprendszer és környezetének grafikus ábrázolása. A Naprendszer „buborékának” a határát a Termination Shock jelzi, ahol a szuperszonikus napszél szubszonikus sebességűvé válik. A helioszféra külső részét is (a heliopauzáig) kitölti a Napból kiáradó anyag. A heliopauzán kívül ismét egy lökéshullámmal, vagy fejhullámmal találkozunk, amelyet a helioszféra és a csillagközi felhő találkozása hoz létre. Az ábra jelöli a Voyager-1 és -2 pályáját is. A Voyager-1 2012-ben bizonyíthatóan áthaladt a heliopauzán [4]

pen egy hangsebességnél gyorsabban mozgó lövedéknek felel meg; mindössze annyi a különbség, hogy a „lövedéknek utazva” nekünk, a Földön tartózkodóknak a fejhullám egy állóhullámként jelentkezik.

Keletkezése könnyen megérthető annak ismeretében, hogy a napszél sebessége a Föld környezetében „szuperszonikus”, ami a napszél plazmájának esetében úgy érten-

dő, hogy az ebben a közegben keletkező hullámok terjedési sebességének jellemzően a többszöröse. Ezt nevezzük a lökéshullám/fejhullám Mach-számának. A földi fejhullám felfedezése komoly meglepetés volt 1964-ben, amikor első alkalommal sikerült űreszköz⁶ fedézetére helyezett műszerekkel kimutatni a létezését, és rögzíteni a lökéshullám adatait⁷. [6].

5. ábra. A földi mágneses tér és a körülötte kialakuló fejhullám, ahol a szuperszonikus sebességű napszél plazmája összenyomódik, sűrűsége megnő és szubszonikussá lassul. Az ábrában szereplő kifejezések: interplanetary magnetic field – bolygóközi mágneses tér; magnetosheath – mágneses burok; bow shock – fejhullám; magnetotail – mágneses csóva [5]



Felmerülhet a kérdés: hogyan alakulhat ki lökéshullám egy olyan ritka közegben, ahol – amint az előbb említettük – a részecskék nem találkoznak, nem ütköznek, így ezen a módon energiát sem tudnak átadni egymásnak. A levegő esetében könnyen megérthető a folyamat, hiszen a levegőt alkotó részecskék ütköznek, energiát adnak át egymásnak, így tud disszipálni az energia. De hogyan történik ez az űrplazmában kialakuló lökéshullámok esetén? Mi az a fizikai folyamat, amely képes az energia disszipálására egy ütközésmentes, mágnesezett plazma esetében? Ez a kérdés a tudományos alap kutatás szempontjából is fontos, hiszen egy olyan új fizikai jelenséget érthetünk meg, amely gyakran előfordul az Univerzum számos pontján, akár olyan távoli szegleteiben is, ahová – érthető okokból – nem tudunk műszereket küldeni. Ebből a szempontból a földi fejhullám egy kiváló természetes űrplazma-laboratóriumnak fogható fel, ahol a lökéshullám és tulajdonságai részletesen tanulmányozhatóak in-situ, vagyis közvetlen mérések alkalmazásával. A kutatás által kapott eredmények természetesen felhasználhatók olyan

távoli objektumok jelenségeinek a megmagyarázására is, ahol – az előbb említettek alapján – nem tudunk közvetlen módon méréseket végezni. Ilyenek lehetnek a szupernóva robbanások is, amelyek körül szintén lökéshullám keletkezik.

Az energia disszipációjának kérdésén túl, a lökéshullám még egy igen fontos tulajdonsággal rendelkezik az űrplazmában: nevezetesen – a jelek szerint – igen hatékony részecskegyorsító „szerkezetként” működik!

RÉSZECSEGYORSÍTÁS A FÖLDI FEJHULLÁMNÁL

Ahogy azt korábban említettük, a napszél lelassul a földi magnetoszférával való találkozáskor, és így alakul ki a lökéshullám, vagyis a fejhullám a Föld körül, amely a földről nézve tulajdonképpen egy állóhullám, vagyis mindig jelen van. A fejhullám tehát két olyan áramlási zónát választ ketté, amelyeknél az egyik jelentősen nagyobb áramlási sebességgel rendelkezik, mint a másik. A nagy sebességű zóna a napszél, a másik, a hullám túlsó oldalán levő zónában a lelassított, összenyomott, megnövekedett sűrűségű és termalizált, vagyis turbulenssé vált (korábbi) napszélplazma található.

Fontos tudnivaló, hogy a két zónában egészen különböző az áramlási sebesség. Ezt úgy is mondhatjuk, hogy két konvergens áramlási zónával van dolgunk.

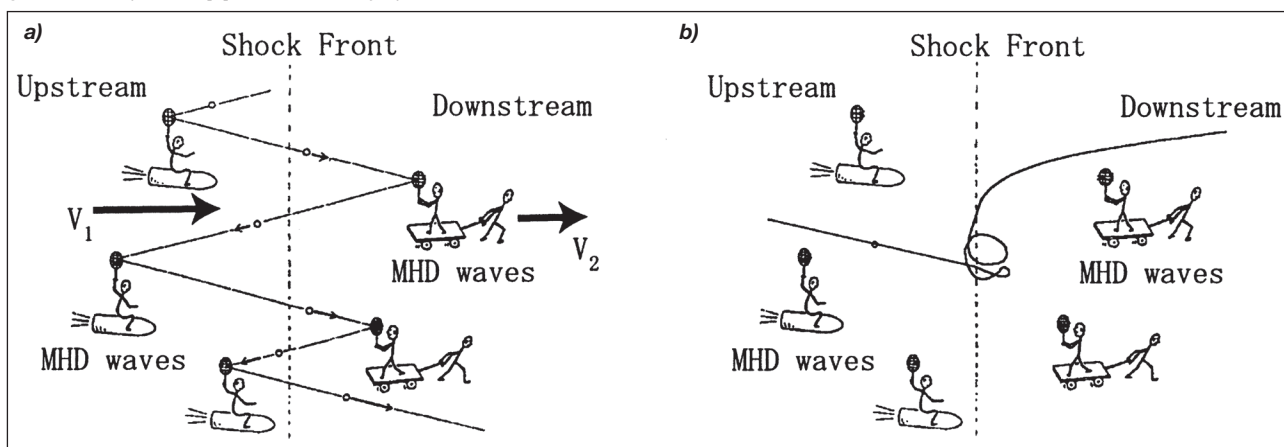
Enrico Fermi Nobel-díjas fizikus, aki együtt dolgozott Teller Edével, Szilárd Leóval és Neumann Jánossal a Manhattan-terven⁸, először javasolt egy olyan részecskegyorsítási mechanizmust, amely két konvergens áramlási zóna határán következik be. Ezt nevezzük manapság elsőrendű Fermi-gyorsítási mechanizmusnak. Fermi elmélete szerint, ha egy részecske (pl. egy proton vagy egy elektron) a két zóna között ide-oda verődik úgy, hogy közben áthalad a lökéshullám frontján, akkor képes arra, hogy számottevő energiát nyerjen, vagyis megnövekedjen a mozgásának a sebessége. Minél többször történik meg ez a „ping-pong” a két oldal között, annál nagyobb energiára tud szert tenni az adott részecske.

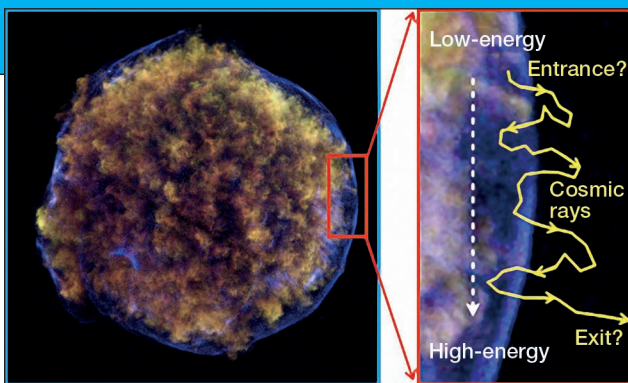
A 6. ábra segíthet jobban megérteni ezt a folyamatot, amely egy kozmikus plazmában zajló teniszmeccset ábrázol. A terület két zónára osztott, amit a lökéshullám (vagy fejhullám) frontja választ középen ketté. Bal oldalt (upstream) található a nagy sebességű közege, a napszél, míg jobb oldalt (downstream) a jóval kisebb sebességű, összenyomott plazma található. A sebességek illusztrálá-

saként a bal oldalon rakétán ülő teniszjátékosok látszanak, amint a „háló” felé száguldanak, míg a másik oldalon olyan játékosok helyezkednek el, akiket egy targoncán elhúz a háló irányából egy segéd. Nyilvánvalóan ezek után a jobb oldalon levő játékosoknak a sebessége sokkal kisebb, mint a bal oldalon levők sebessége. A gyorsításban részt vevő részecske játssza a labda szerepét. Tegyük fel továbbá, hogy a „labda” visszaütésekor tökéletesen rugalmas ütközés történik, tehát a labda semmit sem veszít a sebességéből amikor visszaütik, csak megfordul a mozgásiránya, illetve így lenne akkor, ha a játékosok nem mozognának. A játékosok azonban mozognak, ennek következtében a bal oldali, rakétán ülő játékos esetében, amikor az megüti a labdát, akkor a labda eredeti sebességéhez hozzáadódik a játékos sebessége is, tehát a labda sebessége megnövekszik. A jobb oldalon azonban, amikor az ottani játékos visszaüti a labdát, akkor a labda sebességéből kivonódik a játékos mozgási sebessége, hiszen őt a segéd elvontatja a „hálótól”. De itt jön a csavar: miután a bal oldali, háló felé száguldo játékos sebessége jóval nagyobb, mint a jobb oldali játékosé, aki viszont távolodik a hálótól, emiatt összességében a labdának, illetve a folyamatban részt vevő részecskének a sebessége nettó értékben megnőtt, mégpedig pontosan annyival, amennyi a két játékos mozgási sebességének a különbsége. Természetesen, ha a részecskének ez az ide-oda ütégetése többször megtörténik, akkor minden egyes lépés után egyre jobban növekszik a részecske sebessége.

A lökéshullám fizikájának a tanulmányozása gyakorlatilag a felfedezése óta az űrkutatás egyik fontos témája, amelyik töretlenül érdeklődésre tart számot. Azt mondhatjuk, hogy az elmúlt évtizedekben végzett kutatások eredményei nyomán elég pontosan ismerjük a gyorsítási mechanizmust, mikor, hogyan alakul ki, melyek a jellemzői stb., ugyanakkor még számos olyan kérdés akad amely megválaszolásra vár. Ezek közé tartoznak például a Fermi-gyorsításhoz szükséges alapfeltételek és azok jelenléte a különféle esetekben. Három alapfeltétel létezik. Ahhoz, hogy beindulhasson a folyamat – első feltételként –, a gyorsításban részt vevő részecskének egy kicsivel nagyobb energiával kell rendelkeznie, mint a többi, a napszelet alkotó részecskének. Ezt hívjuk az „injekció” kérdésének: vagyis, hogy a részecskét bele kell a jelek szerint injektálni a folyamatba. Ugyanis, ha ez nem történik meg, akkor a részecske nem tud áthaladni a lökéshullám felületén vissza, a napszél tartományba. Ennek értelmében valahol,

6. ábra. Az elsőrendű Fermi-féle gyorsítási folyamat sematikus magyarázata. a) eset: a részecske részt vesz a gyorsítási folyamatban. b) eset: a részecske mozgásának ábrázolása a lökéshullámmal történő találkozásnál; ez a részecske nem kerül gyorsításra (Forrás: [7], M. Scholer rajza)





7. ábra. Balra a Tycho szupernóva-maradvány, ahogy azt a Chandra műhold érzékelte röntgensugár-tartományban. A robbanás nyomán egy kifelé táguló lökéshullám keletkezik. A kék szín megfelel a szinkrotron sugárzásnak, amelyet közel fénysebességre gyorsított elektronok hoznak létre a lökéshullámmal való kölcsönhatás nyomán. Jobbra láthatjuk a gyorsítási folyamat elvi ábrázolását, ahogy a lökéshullám frontján többször áthaladó részecske energiáját nyer [10]

valamikor a részecskének részesülnie kell egy előgyorsításban, mielőtt még részt venne a további gyorsítási folyamatban. [8]

A második feltétel, hogy a részecskét vissza kell fordítani a lökéshullám irányába mindkét oldalon, ezt jelzi szemléletesen a teniszjátékosok jelenléte. Igen, ám – ahogy korábban említettük –, ebben a ritka plazmában nincs ütközés. Akkor meg hogyan, mitől fordul vissza a részecske a lökéshullám felé? A megoldást a hullám-részecske kölcsönhatás jelenti: mindkét oldalon intenzív hullámképződésnek kell történnie ahhoz, hogy működjön a gyorsítási folyamat. A hullámképződés vagy -képzés azonban igen érdekes kérdés, ugyanis kiderült, hogy ezeket a hullámokat maguk a gyorsított részecskék generálják. Ennek értelmében az egész folyamat egy igen bonyolult, visszacsatolt rendszerként működik, amelynek még nem ismerjük minden részletét. [9]

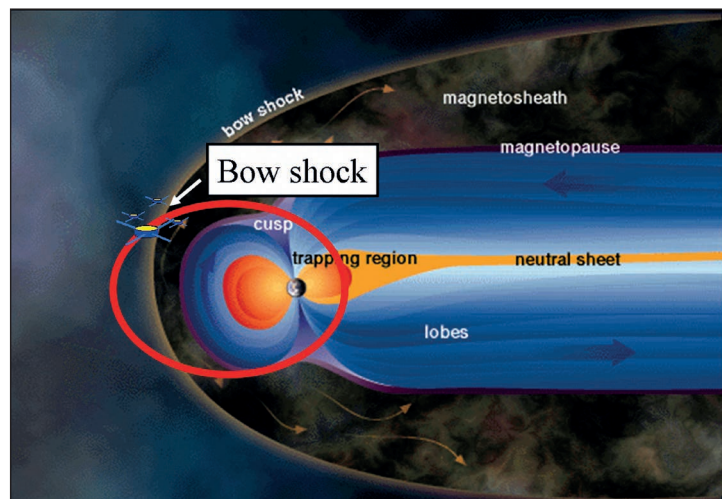
A harmadik feltételként a „szökési határfelület” kérdése jelentkezik, ugyanis, elvileg ez a „ kozmikus teniszjáték” akármilyen hosszú ideig tarthat, aminek következtében bármilyen nagyságú energiára szert tehet a folyamatban részt vevő részecske. Látjuk azonban azt is, hogy például a földi fejhullám esetében a gyorsított, nagy energiájú részecskék, amelyek itt lokálisan keletkeznek, jól behatárolható energiával rendelkeznek, pontosabban nem gyorsulnak akármilyen nagy sebességre. Ennek oka az elmélet szerint egy „szökési határfelület” megléte, ahol egy bizonyos energiát elért részecske kiszabadul a rendszerből és elhagyja azt, nem vesz részt a további energiacsúszásban. Mi dönti el azt, hogy milyen maximális energiára tehetnek szert a részecskék?

Egyértelmű az eddigiekből, hogy noha maga a folyamat egyszerű, a részletek lehetnek igen bonyolultak és jelenleg nem is teljesen ismertek.

További kérdés, hogy a bejövő napszélionoknak miért csak egy bizonyos százaléka vesz részt a gyorsításban? Hogyan, mi alapján választódnak ki azon részecskék, amelyek nagy energiákra tesznek szert? Az ugyanis kiderült eddig, hogy a bejövő, a napszélplazmát alkotó részecskéknek legfeljebb 10%-a vesz részt a gyorsítási folyamatban, de az esetek többségében ennél is kisebb ez az arány. A kérdésre még nem ismerjük a pontos választ.

A CLUSTER-MISSZIÓ: A LÖKÉSHULLÁM TANULMÁNYOZÁSA 3D-BEN

A lökéshullám iránti fokozott érdeklődést mutatja az a tény, hogy a tudományos közösség már sok olyan Föld körüli műholdas missziót tervezett és indított el, amelyekben kifejezetten szerepelt a földi fejhullám minél részletesebb megfigyelése és tanulmányozása. Az egyik ilyen űrmisszió az Európai Űrügynökség (European Space Agency – ESA)



8. ábra. A Cluster-műholdak pályája a téli időszakban. Megfigyelhető, hogy ebben az időszakban a pályavonal áthalad a lökéshullámon. Ezzel részletesen vizsgálhatóvá válnak a lökéshullám gyorsítási és energiadiSSIPációs folyamatai. Az ábrában szereplő kifejezések: magnetopause – magnetopauza; neutral sheet – neutrális sík; lobe(s) – (mágneses) csóva; cusp – sarki tölcser; trapping region – sugárzási övek [11]

egyik nagy vállalkozása, a Cluster-misszió, amely közel két évtizede szolgáltatja az adatokat a Föld körüli térségből. Az aktív működés igen figyelemreméltó, hiszen a küldetést eredetileg jóval rövidebb időre tervezték. A Cluster azonban annyira sikeres volt és olyan sok új eredménnyel szolgált, hogy ennek következtében több alkalommal is támogatták a misszió idejének meghosszabbítását.

A Cluster-misszió négy azonos műholdból áll, amelyek nagyjából tetraéder alakzatban, úgynevezett poláris pályán keringenek a Föld körül. A pálya alakja egy nyújtott ellipszis. (8. ábra) A pálya nagyságát úgy tervezték meg, hogy az nemcsak áthalad a magnetoszféra minden fontos részén, hanem ki is lép a bolygóközi térbe, tehát eközben áthalad a fejhullámon is. Ez a téli időszakban zajlik, ugyanis ebben az évszakban a pálya a nappali oldalon van a legtávolabb a Földtől, míg az éjszakai oldalon egészen közel halad a Földhöz. A nyári időszakban éppen a fordítottja történik, ugyanis akkor a nappali oldalon halad közel a Földhöz a pálya, és az éjszakai oldalon a Földtől távol haladnak el a műholdak. Ennek oka, hogy mivel a pálya síkja az állócsillagokhoz rögzített, ezért a földi magnetoszféra fordul körbe a pályához képest, ahogy a Föld egy év alatt megkerüli a Napot. Ezzel biztosítható, hogy a Föld körüli környezet minden pontját „végigsöpri” a műholdcsoport, és ezzel minden területről értékes adatokat szolgáltat. Azért van szükség négy darab műholdra, mert így lehet egyidejűleg méréseket végezni a térben, ami igen fontos egy olyan dinamikus és változó közegben, mint amilyen az űrplazma. Szemléletesen szólva a Cluster-misszió volt az első olyan küldetés, amelynél a térbeli változást külön lehetett választani az időbeli változástól. Ha csak egy műhold áll rendelkezésre, akkor nem lehet eldönteni, hogy a mért adatokban látható változás időbeli, vagy térbeli változás. A korábbi, egyműholdas missziók esetében emiatt egy adott területet csak statisztikai vizsgálatokkal lehetett mérni, mert sokszor át kellett haladnia a műholdnak a vizsgált területen, és az így nyert adatokat „átlagolva” lehetett az adott területet tanulmányozni. A statisztikai módszer jól működik, de hátránya, hogy csak az „átlagos” leírása adható meg egy adott területnek vagy jelenségnek, az egyedi



9. ábra. A Naprendszerben különféle méréseket és megfigyeléseket végző űreszközöket ábrázoló grafika. Sárga színnel a fejlesztés alatt levő űreszközök jelölése, zöld színnel a „primary operation”, vagyis a fő missziós fázisban lévő, már működő űreszközök láthatók, és kék szín mutatja a meghosszabbított missziós fázisban (extended operation) lévő, működő űreszközöket (Az ábra nem méretarányos!) [12]

esetek így nem vizsgálhatók. A Cluster négy műholdja emiatt számított forradalmi megoldásnak, mert a több ponton egyidejűleg végzett mérések által az egyedi jelenségek és területek is nagy pontossággal vizsgálhatóvá váltak, amely áttörést hozott a tudományos eredményekben és számottevően javította a Föld körüli környezet fizikai folyamatainak megértését. Az egyedi esetek pontos vizsgálata nélkül nehezen lenne elképzelhető az űridőjárás események feltérképezése és megértése. A Cluster-misszióval részletesen vizsgálhatóvá váltak a koronaanyag-kidobódások (coronal mass ejection – CME) és az általuk okozott utazó lökéshullámok, a mágneses vihart kiváltó jelenségek, továbbá a földi fejhullámnál történő részecskegyorsítási folyamatok is. A Cluster-misszió eredményességét tekintve nem meglepő, hogy az utána következő űrmissziók többségét – legalábbis amelyeknek célja egy nagyobb terület vizsgálata – már eleve több műhold egyidejű működésével tervezték. Példaként említhetjük a NASA THEMIS/ARTEMIS misszióját, illetve a Magnetospheric Multiscale (MMS) missziót.

A Cluster-misszió évei alatt többször módosították a műholdak közötti távolságot, így tanulmányozhatókká váltak a fizikai folyamatok kis és nagyobb léptékű (vagyis kisebb és nagyobb területekre kiterjedő) változásai is. A mérési adatok tanulmányozása nyomán született eredményeknek ma már könyvtáryai a szakirodalmá. Ezek közül számottevő mennyiségű cikk foglalkozik a lökéshullám és a lökéshullámnál lejátszódó részecskegyorsítás jelenségével. Állíthatjuk, hogy a fizikai folyamatok számos részlete tisztázódott, jobban értjük, hogy valójában mi is történik, ugyanakkor még sok a megválaszolatlan kérdés, amelyek tisztázásához további kutatások szükségesek. Szerencsére a Cluster, és a későbbi űrmissziók (9. ábra) által mért adatok a kutatók rendelkezésére állnak, és további kutatások tárgyát képezik.

A LÖKÉSHULLÁM ÉS A RÉSZECSEKGYORSÍTÁS GYAKORLATI JELENTŐSÉGE

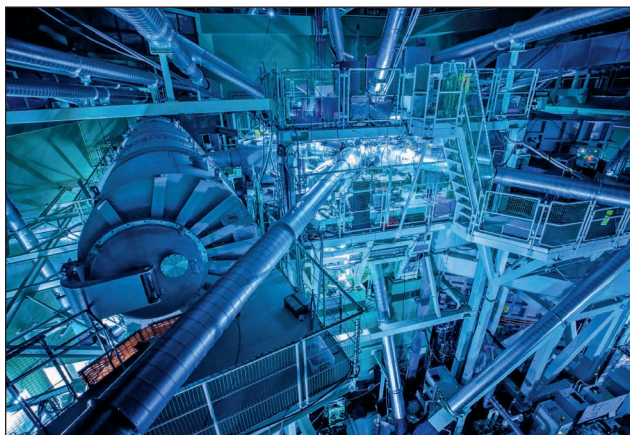
Bemutattuk a nagy erejű robbanásoknál keletkező lökéshullám tulajdonságait, majd ismertettük, hogy hasonló

(ugyanakkor teljesen más fizikai tulajdonságokkal rendelkező) lökéshullámok számos helyen előfordulnak a világ-egyetemben. Szóltunk arról, hogy az űrplazmában a lökéshullámhoz kapcsolódóan megfigyelhető egy hatékony részecskegyorsítási folyamat, amit a szakirodalom elsőrendű Fermi gyorsítási folyamatnak nevez. Vizsgáljuk meg, hogy mindennek mekkora a gyakorlati jelentősége. A nagy energiájú kozmikus sugárzás keletkezésének megértése tudományos szempontból igen fontos, hiszen ezáltal értjük meg jobban a Kozmosz törvényeit, jelenségeit. Mindemellett ezek a sugárzások Földünket is eléri, és mérhető változásokat hoznak létre környezetünkben. Ha csak ennyit veszünk figyelembe, máris azt mondhajuk, hogy szükséges ezzel a kérdéssel foglalkozni.

Am tudományos szempontból felmerülnek további lényeges szempontok is. A földi lökéshullám az ionokat két nagyságrenddel nagyobb energiára képes gyorsítani, vagyis nagyjából százszorosára növeli az energiájukat. Egy szupernóva esetén már relativisztikus sebességről beszélünk, vagyis az elektronok közel fénysebességre gyorsításáról.

Most képzeljünk el egy olyan technológiát, amely mindent képes egy laboratóriumban, földi körülmények között megvalósítani. Mit jelentene egy ilyen technológiának a megjelenése harcászati és ipari szempontból? Nem kétséges, hogy egy ilyen új technológia megjelenésének a jelentősége olyan forradalom lenne, ami a nukleáris technológia megjelenéséhez hasonlítható. Színtiszta science fiction, mondhatnánk, pedig már zajlanak a kutatások ebben az irányban. HEDLA elnevezéssel 2022-ben rendezték meg a 13. konferenciát ebben a témában (13th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics – nagy energiasűrűségű laboratóriumi asztrofizika). A célja nem volt más, mint, hogy itt a Földön, laboratóriumi körülmények között létrehozzanak olyan asztrofizikai jelenségeket, mint például a lökéshullám, és a lökéshullám általi gyorsítás. Nyilvánvalóan ez még egy fejlődése elején tartó kutatási terület, ugyanakkor már eddig is komoly erőfeszítések zajlottak ezen a téren. Ilyen például az a terv, hogy a 2 MJ-os National Ignition Facility (NIF) lézerberendezését, amely a Lawrence Livermore National Laboratory-ban ta-





10. ábra. A 12. HEDLA (2018) konferencián bemutatott GEKKO-LFEX laboratóriumi rendszer, amely az asztrofizikai folyamatokat a Földön, laboratóriumi körülmények között hivatott tanulmányozni [13]

lálható (California, USA), hogyan tudnák asztrofizikai jelenségek kutatására felhasználni, azaz mindazt a tudást, amit az űrkutatás területén szereztünk, hogyan lehetne egy új technológia formájában alkalmazni. Első hallásra ez egy megvalósíthatatlannak tűnő terv, ám már eddig is komoly eredményeket sikerült elérni. Hogy ez mekkora erőfeszítést igénylő vállalkozás, arról a 10. ábra tanúskodik, amelyen az Oszakai Egyetem lézertechnika tanszékén működő GEKKO-LFEX (Laser for Fast Ignition Experiment)⁹ berendezésének részlete látható. Ettől kezdve teljességgel megjósolhatatlan, hogy mivé fejlődhet ez az új technológia. Az azonban biztosan állítható, hogy az új technológia megjelenésével hirtelen számottevően kitágul a lehetőségek horizontja az emberiség előtt mind harcászati, mind pedig ipari alkalmazások terén.

További információk a témában:



HIVATKOZOTT IRODALOM

[1] https://www.nasa.gov/images/content/185590main_F-Bullet-Shock.jpg Image courtesy of Andrew Davidhazy/Rochester Institute of Technology;

[2] <https://epss.hu/a-tongai-vulkankitores-okozta-nyomasvaltozast-a-fi-muszerei-is-eszleltek/>;

[3] Forrás: <http://www.spitzer.caltech.edu/images/5517-sig12-014-Massive-Star-Makes-Waves> Author: Courtesy NASA/JPL-Caltech;

[4] Forrás: NASA/Walt Feimer, Public domain, via Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voyager_1_entering_heliosheath_region.jpg (Letöltve: 2023.7.10.);

[5] Forrás: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/multimedia/magnetosphere.html Credit: NASA/Goddard/Aaron Kaase;

[6] Ness, Norman F.; Scarce, Clell S.; Seek, Joseph B. Initial Results of the Imp 1 Magnetic Field Experiment. *Journal of Geophysical Research*, vol. 69, issue 17, pp. 3531-3569, 1964. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1964JGR....69.3531N/doi:10.1029/JZ069i017p03531;

[7] Masahiro Hoshino. Nonthermal Particle Acceleration in Shock Front Region: “Shock Surfing Accelerations”. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, Volume 143, May 2001, Pages 149–181, <https://doi.org/10.1143/PTPS.143.149>;

[8] Kis, Arpad. Agapitov, Oleksiy; Krasnoselskikh, Vladimir; Khotyaintsev, Yuri V.; Dandouras, Iannis; Lemperger, Istvan; Wertz, Viktor: Gyrosurfing Acceleration of Ions in Front of Earth’s Quasi-parallel Bow Shock. *The Astrophysical Journal*, Volume 771, Issue 1, article id. 4, 8 pp. (2013). https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2013ApJ...771....4K/doi:10.1088/0004-637X/771/1/4;

[9] Kis, Arpad Shuichi, Matsukiyo; Fumiko, Otsuka; Tohru, Hada; Istvan, Lemperger ;Iannis, Dandouras; Veronika, Barta; Gabor, Facsko: Effect of Upstream ULF Waves on the Energetic Ion Diffusion at the Earth’s Foreshock. II. Observations. *ASTROPHYSICAL JOURNAL* 863: 2 pp. 136-144., 9 p. (2018). <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aad08c>;

[10] <https://www.isas.jaxa.jp/e/forefront/2013/uchiyama/index.shtml> Forrás: JAXA, Institute of Space and Astronautical Science;

[11] Forrás: <https://sci.esa.int/web/cluster/-/34927-cluster-orbit-over-a-sketch-of-the-earth-s-magnetosphere>;

[12] Forrás: https://science.nasa.gov/science-pink/s3fs-public/atoms/files/Helio-Fleet-16_9-top-text%20REV%20MAR23-03.pdf;

[13] Forrás: <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/hedla2018/photo.html> (Letöltve: 2023.7.3.).

JEGYZETEK

- Zemplén Győző (1879–1916) fizikus, egyetemi tanár, az MTA levelező tagja, ütegparancsnok és tűzérőhadnagy.
- Tonga az óceániai Polinéziában, a Tonga-szigeteken fekvő állam, amely három kisebb szigetcsoporthoz foglal magában. Szigetei részben vulkáni eredetűek, részben korallképződmények.
- A Spitzer űrtávcső (angolul: Spitzer Space Telescope, korábbi név: Space Infrared Telescope Facility) egy infravörös tartományban működő csillagászati műhold, az amerikai Nagy Obszervatóriumok sorozat negyedik, egyben utolsó tagja. Az SST-t 2003. augusztus 25-én indították Cape Canaveralból Delta II rakétával. Működését 2020. január 30-án fejezte be. Indítás után kapta a Spitzer nevet Lyman Spitzerről, a 20. század egyik nagy tudósáról, aki először foglalkozott egy űrtávcső gondolattal.
- A Voyager–1 az amerikai Voyager-program első űrszondája. A Földtől legtávolabb lévő űreszköz. A Voyager–1-et 16 nappal a Voyager–2 után indították 1977. szeptember 5-én Cape Canaveralból. Meglátogatta a Jupitert és a Szaturnuszt, és ez az első űreszköz, amelyik részletesen fényképezte e két bolygó holdjait. A Voyager–2 küldetése során megközelítette mind a négy óriásbolygót. Az Uránusz és a Neptunusz vizsgálatát a kiterjesztett küldetés keretében végezte.
- A két határfelület, a „Termination Shock” és a heliopauza közötti 27 csillagászati egység távolságot a Voyager–1 közel 8 év alatt tette meg.
- Explorer–18 vagy más néven IMP–1 műhold.
- A lökéshullámok elterjedésével és további észleléseivel kapcsolatban bővebb információk találhatók többek között Gáspár András, Kereszturi Ákos, Kovács József és Pál Bernadett ismeretterjesztő cikkeiben (csillagaszat.hu).
- A Manhattan terv (Manhattan Project) a második világháborúban az atomfegyver kifejlesztésére szolgáló közös vállalkozás, amelyben az Amerikai Egyesült Államok, Nagy-Britannia és Kanada vett részt.
- További információ itt található: <https://www.ile.osaka-u.ac.jp/eng/facilities/lfex/index.html>