

Sokkoló fizika, avagy mit tudunk a lökéshullámról?

**Kis Árpád, Lemperger István, Barta Veronika, Berényi Kitti,
Szalai Sándor, Novák Attila, Kuslits Lukács,
Wesztergom Viktor**

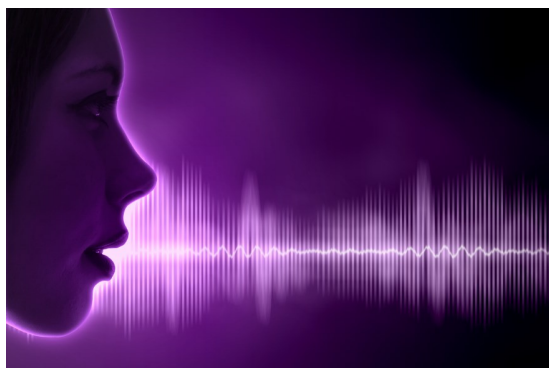
MTA CSFK Geodéziai és Geofizikiai Intézet, Sopron

A földi mágneses tér határán lejátszódó fizikai folyamatok között ott találjuk az Univerzum egyik leghatékonyabb részecskegyorsító „szerkezetét”, az űrplazmában kialakuló lökéshullámot. Írásunkban röviden bemutatjuk ennek a különleges jelenségnek a tulajdonságait és a vele kapcsolatos kutatás jelenlegi állását.

A közönséges hullám és tulajdonságai

A hullámokról kialakult elképzelésünk egyrészt hétköznapi tapasztalataink, másrészt középiskolai ismereteink alapján alakult ki. Mindenki jól ismeri a víz felszínén terjedő hullámokat, miután gyermekkorunkban sokszor dobáltunk tóba vagy éppen pocsolyába kavicsokat. Továbbá azt is jól tudjuk, hogy a hanghullámok a levegőben terjednek, és emiatt vagyunk képesek élvezni például a zenét vagy tudunk beszélgetni egymással.

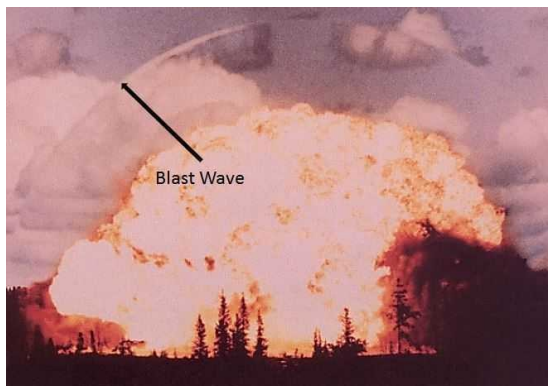
Az említett hullámokban egy dolog közös: a hullám áthaladása után a közegben minden ugyanolyan lesz, mint a hullám áthaladása előtt, vagyis a hullám nem változtatja meg a közeg állapotát (nem lesz sűrűbb, nem lesz melegebb). Ezt a típusú állapotváltozást, amit a hullám áthaladása okoz, reverzibilis – vagyis visszafordítható – folyamatnak hívjuk, aminek jellemzője, hogy gyakorlatilag energiadiSSIPÁCIÓ nem történik, vagyis a hullám közegben való áthaladása nyomán energiát nem ad át a közegnek.



1. ábra: Illusztráció a hanghullám terjedésére. (Forrás: Kozzi – sound wave illustration)

Egy különleges hullám: a lökeshullám

A lökeshullám kutatása a múlt század 50-es éveiben kapott lendületet a nagy erejű (többek között a nukleáris és a termónukleáris) robbantások kapcsán, ugyanis kiderült, hogy sok esetben nem maga a robbanás közvetlen ereje az, ami rombol, hanem a robbanás előtt összesűrűsödik a levegő, és mint egy acélfal, gyorsan távolodik a robbanás helyéről körkörös irányban. Ha ez az összesűrűsödött, nagyon kemény és gyorsan mozgó „fal” bármivel találkozik, arra erős romboló hatást fejt ki. Korabeli filmfelvételeken jól megfigyelhető, hogy egy erős lökeshullám hatására az épületek a másodperc töredéke alatt kártyavárként omlanak össze, és az épület széthulló darabjai – a tonnás tömegű falak is – úgy sodródnak el, mint szalmaszálak a viharos szélben. Nyilván ez csak úgy lehetséges, hogy a lökeshullám átadja az energiáját a tárgyaknak és a közegnek, amivel találkozik, tehát energiadiSSIPáció, vagyis energiaátadás lép fel. Jellegzetes tulajdonsága a lökeshullámnak, hogy haladási sebessége meghaladja a hanghullámét, vagyis jóval gyorsabb, mint a hang, szuperszonikus sebességű. Továbbá a lökeshullám nagymértékben összenyomja, összesűríti a levegőt, ezáltal az fel is melegszik. Ha a közeg – példánkban a levegő – sűrűbb lesz, akkor megváltozik az optikai törésmutatója, vagyis másként töri meg a rajta áthaladó fényt. Ezáltal a megváltozott törésmutatójú levegőrész, ami nem más, mint a lökeshullám frontja, szabad szemmel is megfigyelhetővé válik. Erre a jelenségre látunk szép példát a 2. ábrán. A képen jól megfigyelhető a nagyméretű robbanás, a gomolygó tűzfelhő a fák között. Ami jelen esetben a számunkra érdekes, az a gomolygó tűzfelhőt körülvé, szinte tökéletes körívet kirajzoló lökeshullám felülete, amely – látszólag – mint egy üvegbura zárja magába a robbanást. A jelenség az előbb elmondottak alapján már érthető: a robbanás nyomán gyorsan terjedő lökeshullám összesűríti a levegőt, ezáltal megváltozik annak törésmutatója, és emi-

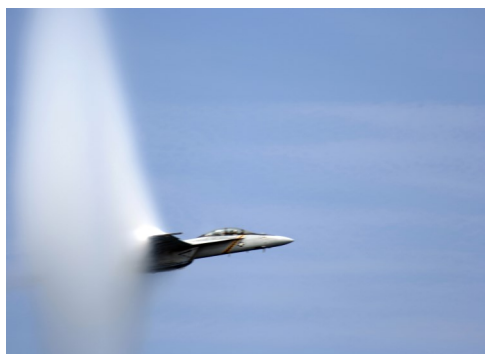


2. ábra: Nagy erejű robbanás nyomán kialakuló, jól megfigyelhető lökeshullám-felület. (Forrás: „Explosion-blast wave” by D.R. Richmond / United States Army – Licensed under public domain via Wikimedia Commons)

hullám felülete, amely – látszólag – mint egy üvegbura zárja magába a robbanást. A jelenség az előbb elmondottak alapján már érthető: a robbanás nyomán gyorsan terjedő lökeshullám összesűríti a levegőt, ezáltal megváltozik annak törésmutatója, és emi-

att látjuk a lökeshullám frontját úgy, mint egy üvegburát. Hasonló lökeshullám alakul ki akkor is, ha egy tárgy a közeghez képest mozog hangsebességet meghaladó sebességgel, vagy ha egy tárgy áll a hangsebességet meghaladó sebességgel áramló közeg útjában.

A lökeshullám – ahogy megismertük – megváltoztatja a közeg sűrűségét és hőmérsékletét azzal, hogy összenyomja azt. Ismeretes, hogy a kondenzáció (vagyis a gáz állapotú vízpára kicsapódása, mint amilyen például a köd megjelenése) jelentősen függ a közeg sűrűségétől, nyomásától és hőmérsékletétől. A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a hanghullámot átlépő harci repülőgép – és emiatt a körülötte kialakuló lökeshullám – vízpára-kicsapódást idéz elő.



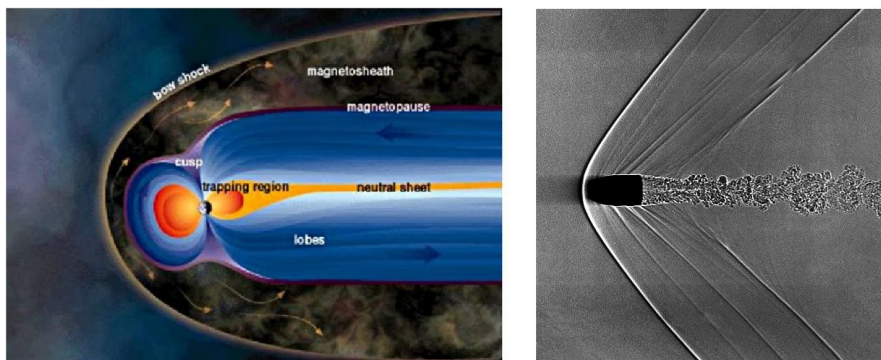
3. ábra: A hangsebességet átlépő repülőgép körül kialakuló lökeshullám látványos vízpára-kicsapódást (kondenzációt) hoz létre. (Forrás: navy.mil, szerző: Mass Communication Specialist 2nd Class Jesse L. Dick)

Lökeshullám bolygónk körül: a földi fejhullám

A huszadik század 60-es éveiben elkezdődött a Föld körüli térség szisztematikus kutatása és feltárása in-situ műholdas mérések alkalmazásával [1]. Az egyik legnagyobb meglepetést az okozta, hogy felfedezték: a bolygóközi űr egyáltalán nem üres tér, hanem kitölti egy olyan ritka, mágnesezett, disszociált töltésekből álló plazma halmazállapotú anyag, amelynek forrása a Nap. Ez a közeg nagy sebességgel (sebessége 300–600 km/s között váltakozik átlagosan) áramlik szét sugárirányban a Naptól, ezért ezt az anyagot, amely valójában kitölti az egész Naprendszer, találóan napszélnek nevezték el. A napszél állandóan „fúj”. Amikor a napszél beleütközik a számára áthatolhatatlan földi mágneses térbe, lelassul, összenyomódik és megnő a hőmérséklete, miközben egy lökeshullám alakul ki a napszél és a földi magnetoszféra határánál.

A magnetoszféra alakját erősen befolyásolja a napszél hatása, ezért a Nap felőli oldalon összenyomódik, míg az éjszakai oldalon csóvaszerűen elnyúlik, hasonlóan az üstökösök csóvájához. A lökeshullám (és a mögötte található magnetoszféra) helyzetét, alakját és a Földtől való távolságát egy érzékeny dinami-

kus egyensúly határozza meg [2], amely a magnetoszféra ereje, energiája és a napszél nyomása között áll fenn. Emiatt a Föld körüli fejhullám a bolygónkról nézve egy „álló” lökeshullám, amelynek ugyanakkor állandóan változik az alakja és a helyzete a bolygóközi plazma paramétereinek megfelelően.

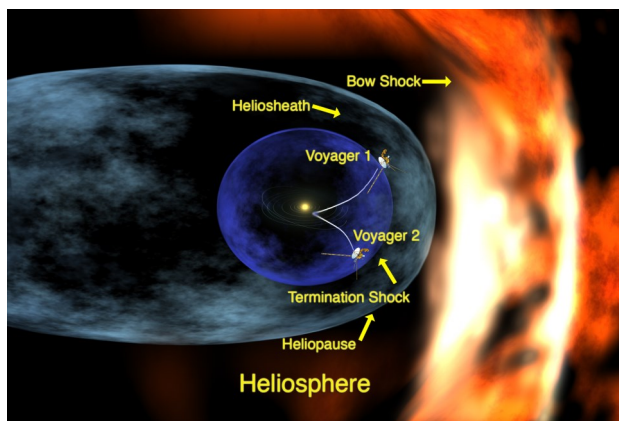


4. ábra: Balra a földi magnetoszféra struktúrája, és a körülötte kialakuló fejhullám (angolul: bow shock), jobbra egy hangsebesség feletti lövedék körül keletkező lökeshullám árnyképe. Jól látható a két lökeshullám közötti hasonlóság. Ugyancsak jól megfigyelhető, hogy a Nap felőli (bal) oldalon a magnetoszféra erősen összenyomódott, míg a másik (jobb) oldalon csóvaszerűen hosszasan elnyúlik. (Forrás: bal oldali kép: ESA, jobb oldali kép: NASA, Andrew Davidhazy / Rochester Institute of Technology)

Miért érdekes számunkra a lökeshullám?

Felmerülhet a kérdés: vajon érdemes-e pénzt és energiát fordítani egy olyan jelenség vizsgálatára, amelynek látszólag nincs is közvetlen hatása mindennapi életünkre, hiszen jelentős (kb. 10–15 földszögnyi) távolságra van a Földtől és valójában nem zavar senkit, továbbá alig pár évtizede tudjuk egyáltalán azt, hogy létezik. A válasz pedig az, hogy nagyon is érdemes, több szempontból is. Elsősorban tudományos szempontból érdekes, mert a lökeshullám egy olyan környezetben alakul ki, amely ütközésmentes plazmából áll, vagyis gyakorlatilag nincs közvetlen ütközés a részecskék között, mint például a levegőben a hanghullám terjedése esetén. Felmerül a kérdés: ilyen nem mindennapi környezetben hogyan lehetséges egyáltalán az energia átadása, illetve a disszipációja? A kutatás létjogosultságát az is jellemzi, hogy mivel ismereteink szerint a Világegyetem 99%-át plazma halmazállapotú anyag tölti ki, a kutatásával megismerhetjük az egyik leggyakrabban lejátszódó jelenséget a Világegyetemben. A harmadik, és talán a legfontosabb ok az, hogy az ütközésmentes plazmában kialakuló lökeshullám egy nagyon hatékony természetes részecskegyorsító szerkezet, amely egy-két

nagyságrenddel (vagyis tízszeresére vagy akár százszorosára) képes megnövelni a részecskék energiáját [3]. Az űrkutatás témái között az egyik legfontosabb helyet a nagy energiájú részecskék vizsgálata foglalja el: hogyan keletkeznek és hogyan jutnak el adott esetben a Földre? Azt is tudjuk, hogy a Naprendszer többi bolygója körül is hasonló tulajdonságú lökéshullámok jelennek meg, de a Naprendszer határán megfigyelhető lökéshullám (angolul: termination shock) is hasonló fizikai jelenségek színtere.

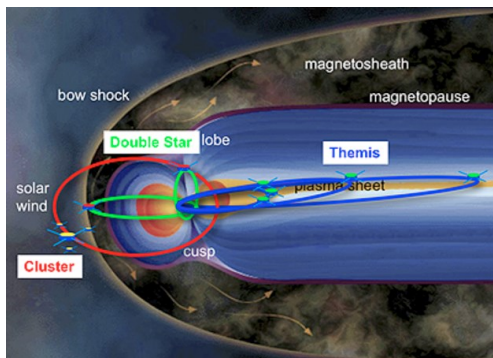


5. ábra: A Naprendszer külső határán észlelhető lökéshullám (angolul: termination shock) csak egy elképzelés volt addig, amíg a Voyager űrszondák el nem érték és így bizonyítást nem nyert a létezése. A helioszféra ugyanakkor szintén egy áthatolhatatlan akadály a csillagközi tér plazmájának áramlása útjában, ezért elméleti megfontolások alapján itt is egy lökéshullám létezése várható (a jobb oldalon, fényesen megjelenő ív a feltételezett helioszféra fejhullám). Ha belegondolunk, hogy a Naprendszer bolygói körül is kialakulnak lökéshullámok, az ábra jól szemlélteti azt, hogy csak a Nap közvetlen környezetében mennyire elterjedt jelenség a lökéshullám. (Forrás: NASA)

Sőt, a távoli szupernóva-robbanások alkalmával is megfigyelhető a lökéshullám, illetve annak gyorsító hatása. Egy 2006-ban megjelent Science cikk eredményei szerint először sikerült közvetett becslést adni egy szupernóva-robbanás nyomán keletkező lökéshullámnál megfigyelhető gyorsítási folyamat konkrét paramétereire [4]. A lökéshullám elterjedtségének ellenére a földi lökéshullám/fejhullám az egyetlen olyan természetes űrplazma laboratórium, amelyet közvetlenül megfigyelhetünk és részletesen tanulmányozhatunk helyben végzett műholdas, vagyis in-situ mérésekkel. A földi lökéshullámnál megszerzett ismeretek jól alkalmazhatóak olyan helyszínek és jelenségek esetén is, ahova – egyelőre – nem tudunk űreszközöket küldeni.

Cluster küldetés: a három dimenziós „mérőeszköz”

A Cluster az első olyan űrprogram, amelyik négy darab azonos műszerezettségű műholdból áll, ezek tetraéder alakzatban keringenek poláris, állócsillagokhoz rögzített Föld körüli pályán [5]. A műholdak száma és elhelyezkedése révén először vált lehetővé a plazma folyamatok időbeli változásának különválasztása a térbeli változásoktól, ami egy olyan rendkívül dinamikus környezetben, mint a lökeshullám és környezete, létfontosságú a fizikai folyamatok megértése szempontjából. A műholdak – amelyek neve találóan Samba, Rumba, Salsa és Tango – közötti távolság 600 és 20.000 km között változtatható, így tulajdonképpen tetszés szerinti kiterjedésekben vizsgálhatók a plazma folyamatok. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézet (továbbiakban: MTA CSFK GGI) kutatói közel 12 éve vizsgálják és dolgozzák fel a Cluster műholdakról származó adatokat. A cél elsősorban a földi fejhullám gyorsítási mechanizmusának mélyebb megértése. A tér különböző pontjain egy időben történő mérések lehetővé teszik az egyedi esetek részletes vizsgálatát is, ami korábban nem volt lehetséges [6]. A Cluster műholdak jellemzően a téli időszakban vannak olyan helyzetben, hogy átlépve a fejhullámon, kilépnek a bolygóközi térbe, és jelentős időt töltenek a földi fejhullám előtt. Ez a térség a legfontosabb a gyorsítási folyamatok kutatása és megértése szempontjából. A Cluster küldetés közel másfél évtizedes sikeres működése nyomán olyan mennyiségű adat gyűlt össze a Föld plazmakörnyezetéből, ami egyedülálló az űrkutatás történetében, és még sok évre ad feladatot a kutatóknak.



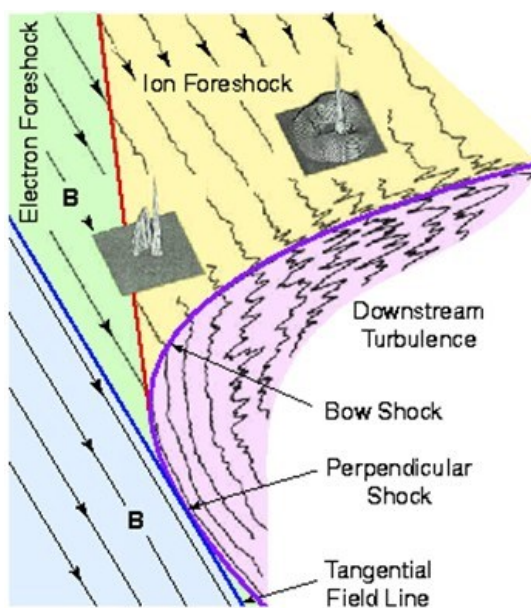
6. ábra: A Föld körüli térségben „hadrendbe állított flotta”, amelynek segítségével minden korábbinál részletesebben vagyunk képesek vizsgálni a bolygókörnyezetében lejátszódó plazma folyamatokat. Megfigyelhető, hogy a Cluster műholdak pályájuk során áthaladnak a fejhullámon és kilépnek a bolygóközi térbe. (Forrás: ESA)

A földi fejhullám előtti térségben található gyorsított ionok

A lökeshullám részecskegyorsító képessége abból fakad, hogy két különböző sebességű közeg áramlásának határán helyezkedik el: egyik oldalon a szuperszonikus sebességű hábori-

tatlan napszél található, a másik oldalon a „sokkolt” közeg, vagyis az összenyomott, besűrűsödött és jóval alacsonyabb sebességű közeg foglal helyet. Ha egy részecske – áthatolva minden alkalommal a lökeshullám felületén – ide-oda verődik a két közeg között, akkor a kétféle közeg sebességkülönbségének függvényében energiára tehet szert. Ez a gyorsítási mechanizmust „konvergáló közegek közötti gyorsításként” emlegetjük, vagy pontosabban elsőrendű Fermi-gyorsításnak nevezzük, Enrico Fermi fizikus emlékére, aki a folyamat elméleti alapjait dolgozta ki. A gyorsítási fizikai folyamata nagy vonalakban ismert, a részletek azonban még nem teljesen tisztázottak [7]. Az MTA CSFK GGI kutatói először dolgoztak ki olyan módszert, amellyel – négy műhold egyidejű mérésének felhasználásával – pontosan megállapítható a gyorsított ionok sűrűségének térbeli profilja a fejhullámtól való távolság függvényében. A profil alakjából meghatározható a gyorsítási folyamatot jellemző egyik legfontosabb paraméter, az ún. diffúziós együttható, ami tulajdonképpen a gyorsítás hatékonyságára ad egy pontos mérőszámot.

Az elsőrendű Fermi-gyorsítási folyamat által energiát nyert ionokat diffúz ionoknak is nevezik, ugyanis a folyamat nagyon hasonlít a diffúziós szóródási folyamathoz, amennyiben az ionok szóródást szenvednek olyan elektromágneses hullámokon, amelyek a fejhullám előtt találhatóak (lásd 7. ábra). A folyamat érdekessége az, hogy a hullámokat – amelyeken a diffúz ionok szóródnak – maguk a diffúz ionok keltyik [8], vagyis a gyorsítási folyamat egy olyan zárt-nak tekinthető, visszacsatolt rendszer, amelyben a részecskék és a hullámok kölcsönösen és folyamatosan befolyásolják egymást. Az MTA CSFK GGI kutatói – együttműködve



7. ábra: Gyorsított ionok a földi lökeshullám előtt: a vörös színnel jelzett ionnyaláb olyan napszél ionokból áll, amelyek visszaverődtek a fejhullámról. A jobbra fent látható gyűrű (vagy fánk) alakú ioneloszlás jelzi az ún. diffúz ionok jelenlétét, ami az elsőrendű Fermi-gyorsítás eredménye.

(Forrás: A. Balogh, Manfred Scholer)

a japán Kyushu Egyetem kutatóival – kimutatták, hogy bizonyos feltételek teljesülése esetén olyan nagy intenzitású mágneses hullámok juthatnak a fejhullám előtti térségbe, amelyeket nem a diffúz ionok keltenek, és alapvetően befolyásolják a szóródási folyamatot. Ezáltal egyrészt a rendszer nem tekinthető többé zártnak, másrészt a gyorsítási folyamat határfoka is sokkal jobb lesz. Az kutatás eredményeit cikksorozatként publikáltuk a nagy presztízsű *Astrophysical Journal* szakfolyóiratban [9]. Az eredmények alapvetően hozzájárulnak a természet egyik leghatékonyabb részecskegyorsítási folyamatának a megértéséhez. A kutatás alapkutatás, így az eredményektől nem várható az, hogy közvetlen gazdasági vagy társadalmi hasznot hozzanak. Ugyanakkor az feltételezhető, hogy a jövőben megjelenő új fúziós és plazma alapú technológiák esetében az eredmények létfontosságúak lesznek.

Irodalomjegyzék:

- [1] Lin R.P., Meng C.-I., Anderson K.A. (1974): 30- to 100-keV protons upstream from the Earth's bow shock, *Journal of Geophysical Research*, 79, 489
- [2] Fairfield D.H. (1971): Average and unusual locations of the Earth's magnetopause and bow shock, *Journal of Geophysical Research*, 76, 6700
- [3] Axford W.I., Leer E., Skadron G. (1977): The acceleration of cosmic rays by shock waves, *International Cosmic Ray Conference*, 11, 132
- [4] Stage M.D., Allen G.E., Houck J.C., Davis J.E. (2006): Cosmic-ray diffusion near the Bohm limit in the Cassiopeia A supernova remnant. *Nature Physics*, 2, 614
- [5] Réme H. et al. (2001): First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment, *Annales Geophysicae*, 19, 1303
- [6] Kis A. et al. (2004): Multi-spacecraft observations of diffuse ions upstream of Earth's bow shock, *Geophysical Research Letters*, 31, L20801
- [7] Scholer M. (1985): Diffusive acceleration. *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 35, 287
- [8] Hoppe M.M., Russell C.T., Frank L.A., Eastman T.E., Greenstadt E.W. (1981): Upstream hydromagnetic waves and their association with backstreaming ion populations – ISEE 1 and 2 observations, *Journal of Geophysical Research* 86, 4471
- [9] Otsuka F., Matsukiyo S., Kis A., Nakanishi K., Hada T. (2018): Effect of Upstream ULF Waves on the Energetic Ion Diffusion at the Earth's Foreshock.