

Návrh studentského projektu

Název projektu: Studium polohy a pohybu rázové vlny

Vedoucí projektu: doc. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.

Charakter projektu: zpracování družicových dat

Termín ukončení projektu: 30. září 1998

Řešitel: Matouš Borák, 3. ročník

Popis projektu:

Současný stav problematiky

Hlavním zdrojem částic ve sluneční soustavě je Slunce, které nepřetržitým pohybem vnější vrstvy korony vyvrhuje do okolního prostoru $10^8 - 10^9$ kg/s hmoty. Další zdroje částic, tj. komety, planety nebo jejich atmosféry, apod. hrají z našeho hlediska zanedbatelnou roli. Složení hmoty Slunce, a tedy i sluneční soustavy, tvoří z 95% vodík, 4% helium a 1% zbytku pak představují atomy těžších prvků. Díky vysoké teplotě sluneční korony je všechna hmota ve sluneční soustavě v plně ionizovaném stavu. Toto ionizované plazma se pohybuje od Slunce všemi směry a vytváří proud plazmatu zvaný *sluneční vítr*. Unášivá rychlost částic slunečního větru se pohybuje od 200 – 900 km/s, jejich koncentrace je 1 – 10 částic v cm^3 . Střední volná dráha, tj. dráha mezi dvěma srážkami, je veliká (~ 1 AU - astronomická jednotka, což je $\sim 1.5 \times 10^{11}$ m), můžeme proto toto plazma označit za *bezesrážkové*, což v důsledku znamená, že originální Maxwellovské rozdělení rychlostí v plazmatu (vzniklé naopak četnými srážkami ve sluneční koruně) se zachovává i ve slunečním větru. Poměrně malá koncentrace částic v meziplanetárním prostoru způsobuje, že nemohou vznikat zvukové vlny, ale protože sluneční vítr unáší s sebou i zamrzlé magnetické pole (díky své vysoké elektrické vodivosti) o průměrné hodnotě ~ 5 nT (ale může dosahovat i hodnot mnohem vyšších, až do 20 nT), mohou se generovat na různých nehomogenitách v prostředí magneto-zvukové nebo Alfvénovské vlny. Fázová rychlost těchto vln je v řádu desítek km/s (do 50 km/s), proto můžeme rychlost slunečního větru označit za *nadzvukovou*. Pokud takovému toku částic postavíme do cesty překážku, vznikne *bezesrážková rázová vlna*, jejíž existenci v meziplanetárním prostoru předpověděl ve svých teoretických pracích **Sagdeev, 1966** na základě podobnosti s hydrodynamickou teorií. Místo srážkových mechanismů, které se vyskytují v klasické hydrodynamice, je však potřeba nalézt jiný mechanismus přeměny energie uspořádaného toku částic na tepelný pohyb. Tímto mechanismem je v případě bezesrážkových vln kolektivní chování částic, tedy interakce částic s vlnami.

Rázové vlny ve sluneční soustavě se dělí v zásadě na dvě skupiny - *meziplanetární vlny a rázové vlny vznikající při obtékání těles*. *Meziplanetární rázové vlny* jsou generovány na povrchu Slunce po sluneční erupci, během níž je ohromné množství hmoty vyvrhováno do prostoru s rychlostí značně přesahující rychlost slunečního větru. Meziplanetární rázová vlna vzniká pak na hranici mezi tímto proudem částic a neporušeným slunečním větrem. Rychlost jejího pohybu je 100 – 1000 km/s směrem od Slunce.

Rázová vlna vznikající při obtékání těles (bow shock) se vytváří v těch případech, kdy proud plazmatu se pohybuje nadzvukovou rychlostí. Z toho vyplývá, že ve sluneční soustavě vzniká rázová vlna na čele všech planet, komet a jiných překážek (pokud jsou samozřejmě dostatečně velké), i když způsob interakce slunečního větru s překážkou se liší. Faktickou překážkou může být vlastní vnitřní magnetické pole tělesa (Země, nebo např. Merkur [Ness et al., 1974]), atmosféra planety (Venuše, [Russell et al., 1980]) nebo plyn vypařovaný z tělesa (kometry, [Biermann, 1974]). Je pochopitelné, že parametry slunečního větru se mění s heliocentrickou vzdáleností, proto při porovnávání rázových vln vytvořených u různých planet nalezneme velké rozdíly ve struktuře, intenzitě a jiných projevech rázové vlny.

V případě Země jsou *tvar a poloha rázové vlny* výsledkem interakce mezi slunečním větrem (unášejícím zamrzlé interplanetární magnetické pole) a přibližně dipólovým magnetickým polem Země. Dynamický tlak slunečního větru se ve vzdálenosti $\approx 10R_E$ (kde R_E je zemský poloměr) vyrovnává s tlakem zemského magnetického pole. Tato hranice se nazývá *magnetopauza* a tvoří skutečnou překážku pro sluneční vítr. Na čele magnetopauzy je přechodová oblast, ve které je proud slunečního větru odkloněn od původního směru pohybu, zabrzděn a ohříván. Hranici mezi touto porušenou oblastí a oblastí neporušeného slunečního větru tvoří *rázová vlna*. Její tloušťka je velmi malá (≈ 100 km) a je definovaná náhlým a výrazným snížením rychlosti z nadzvukové a rychlou změnou i ostatních parametrů slunečního větru (tlak, teplota a koncentrace částic). Změna rychlostí je provázána i zvýšením intenzity magnetického pole (až o 1 řád).

Prozatím nebylo nalezeno analytické vyjádření polohy rázové vlny. Z tohoto důvodu provedl **Formisano, 1979** systematickou studii pozorovaných přesečení rázové vlny a na základě předpokladu, že její vzdálenost od Země je funkcí pouze dynamického tlaku slunečního větru, provedl normování zmíněných pozorování na hodnotu tohoto tlaku a normovanými body proložil plochu druhého řádu.

Pozorovaná přesečení rázové vlny však vykazují značný rozptyl oproti modelové ploše, a proto **Nemecek et al., 1988** sledovali polohu rázové vlny v závislosti na dalších parametrech (směr a velikost meziplanetárního magnetického pole). V práci **Nemecek et al., 1991** pak navrhli autoři korekci normalizačního vztahu na velikost magnetického pole.

Dalším, dosud ne zcela uspokojivě vyřešeným problémem je reakce rázové vlny na změny parametrů slunečního větru – *pohyb rázové vlny*. Rychlost pohybu rázové vlny je možno určit z předpokladu kontinuity toku plazmatu na dvou stranách hranice. To ovšem vyžaduje přesné určení rychlosti a koncentrace plazmatu, což je vzhledem k silně nemaxwellovské distribuční funkci v okolí rázové vlny (**Safrankova et al., 1994**) velmi obtížné a výsledky není možno považovat za spolehlivé. Autoři článku **Nemecek et al., 1988** použili data

z projektu INTERSHOCK a druhou družici se pokusili nahradit modelovou pozicí rázové vlny. Z jejich výsledků vyplývá *lineární závislost mezi změnou dynamického tlaku a rychlostí pohybu rázové vlny*.

Cíl projektu

Cílem navrhovaného projektu je na základě dat z projektů INTERBALL a WIND (případně IMP 8):

1. Vyhledat v měřeních družic INTERBALL-1 a MAGION-4 registrovaná přesečení rázové vlny a stanovit jejich souřadnice.
2. Na základě dvoubodových měření určit rychlost pohybu rázové vlny.
3. Přiřadit jednotlivým přesečením podle bodu 1. příslušné parametry slunečního větru (N_{SW} , v_{SW}) a meziplanetárního magnetického pole pomocí dat družice WIND.
4. Porovnat pozorovaná přesečení s výše uvedenými modely rázové vlny.
5. Odchylky pozorování od modelů klasifikovat podle:
 - dynamického tlaku slunečního větru,
 - směru magnetického pole,
 - rychlosti pohybu rázové vlny,
 - souřadnic.
6. V seznamu přesečení rázové vlny (podle bodu 1.) vyhledat vícenásobná přesečení a statistickými metodami hledat závislost na parametrech slunečního větru, magnetickém poli a souřadnicích.

Na základě tohoto postupu formulovat doporučení pro upřesnění modelů rázové vlny.

Časový harmonogram projektu

V souladu s konkrétními cíli řešení projektu navrhujeme tento časový harmonogram řešení:

- do **15.1.1998**
 - vyhledání studovaných událostí
 - vytvoření přehledové tabulky změřených parametrů sledovaných událostí

- do **30.6.1998**
 - vývoj programu pro výpočet polohy rázové vlny z výše uvedených modelů
 - klasifikace jednotlivých událostí podle odchylek skutečné polohy rázové vlny od polohy modelové
- do **30.9.1998**
 - pokus o fyzikální interpretaci odchylek polohy rázové vlny od modelové na základě předchozí klasifikace naměřených dat

Výsledek projektu

Předpokládáme, že úspěšné řešení projektu bude završeno přípravou referátu na mezinárodní konferenci COSPAR (červenec 1998) a přípravou následné publikace v časopise.

Literatura

- Sagdeev R. Z.**, Cooperative phenomena and shock waves in collisionless plasmas, in: *Rev. Plasma Physics*, New York, 1966, 23.
- Ness N. F.**, Behannon K. W., Lepping R. P., Whangk Y. C., Schatten K. H., Magnetic field observations near Mercury: Preliminary results from Mariner 10, *Science*, **185**, 1974, 1151.
- Russell C. T.**, Elphic R. C., Luhmann J. G., Slavin J. A., On the search for an intrinsic magnetic field at Venus, *Proceed. of 11 th Lunar Planet Sci. Conf.*, 1980, 1897.
- Biermann L.**, Interaction of a comet with the solar wind, in: *Solar Wind Three*, ed. by C. T. Russell, Los Angeles, 1974, 396.
- Formisano V.**, Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions, *Planet. Space Sci.*, **27**, 1979, 1151.
- Němeček Z.**, Šafránková J., Zastenker G. N., Dynamics of the Earth's bow shock position, *Adv. Space Res.*, **8**, 1988, (9)167.
- Němeček Z.**, Šafránková J., The Earth's bow shock and magnetopause position as a result of the solar wind - magnetosphere interaction, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **53**, Vol 11/12, 1991, 1049.
- Šafránková J.**, Němeček Z., and Santolík O., Ion distribution function in the magnetosheath: Fine structure, *Adv. Space Res.*, **14**, 1994, (7)31.