Zpráva o řešení 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

Průběh řešení projektu

V průběhu uplynulého roku byly v první fázi řešení projektu, která zahrnovala přípravu dat, provedeny tyto konkrétní kroky:

1) Vyhledání přesečení rázových vln během aktivní doby života české družice MAGION–4, tj. od srpna 1995 do srpna 1997. Na základě měření Faradayových válců (přístroj VDP–S) a spektrometrů MPS bylo stanoveno $\sim$ 900 těchto přesečení, které se staly základem tabulky pro další fyzikální studium.

2) Ke každé události byly vyhledány jak parametry dráhy družice MAGION–4, tj. souřadnice přesečení rázové vlny v soustavě GSE, tak i parametry slunečního větru (koncentrace slunečního větru, jeho rychlost a orientace a velikost interplanetárního magnetického pole), které byly stanoveny na základě měření americké družice WIND, která obvykle sloužila jako monitor podmínek ve slunečním větru. Všechny tyto údaje byly doplněny do základní tabulky.

3) Byl připraven program (v IDL), do kterého byly implementovány 3 modely - *Formisano, 1979 (dále F79), Němeček a Šafránková, 1991 (SN91)* a doplněn nejnovější model *Peredo et al., 1995 (P95)* tak, aby bylo možno porovnat souřadnice reálného přesečení se zmíněnými modely.

Završením první fáze řešení byla tedy rozsáhlá tabulka, která je díky spolupráci s Goddard Space Flight Center (Greenbelt, USA) umístěna na jejich serveru společně s obdobnými daty z projektu GEOTAIL a kde je možno interaktivním způsobem získat základní údaje a přehledy o jednotlivých událostech (adresa: **http://nssdc.gsfc.nasa.gov/spdf/bowshock/plot-bsxing.html**).

Další fáze řešení projektu se soustředila na studium literatury o statistických modelech určujících polohu rázové vlny, na porovnání těchto modelů se souborem nových dat z družice MAGION–4 a na vlastní fyzikální interpretaci.

Dosažené výsledky studentského projektu

Soubor dat z družice MAGION–4 pokrývá nízké a střední geomagnetické šířky (tj. $|Z_{GSE}| \leq 11\ R_E$) a to od subsolárního bodu do blízkého chvostu magnetosféry ($X_{GSE} > -10\ R_E$). V době našich měření dosahoval dynamický tlak slunečního větru hodnot od 1 do 6 nPa a Alfvénovo Machovo číslo se pohybovalo v širokém rozmezí (4 - 50). Shrneme–li výsledky porovnávání tří zmíněných modelů, můžeme konstatovat tyto závěry:

- Přesnost předpovědi polohy rázové vlny na základě parametrů slunečního větru je $\sim \pm 15\%$ pro modely F79 a NS91, pokud bereme v úvahu aberaci. Model P95 pokládá systematicky polohu rázové vlny (s přesností $\sim 20\%$) dále od Země než je reálně pozorována, z čehož vyplývá pak chyba určení od -5% do $+35\%$.
- Pro všechny tři modely je lépe predikovaná poloha rázové vlny na ranní straně, na noční straně jsou výraznější rozdíly a to u všech studovaných modelů.
- Modely F79 a NS91 předpovídají shodně polohu rázové vlny v subsolární oblasti (tj. pro $X_{GSE} < 5$) o $\sim 10\%$ blíže k Zemi, model P95 popisuje tuto oblast s mnohem větší přesností.
- Model NS91 popisuje polohu rázové vlny pro rozdílné hodnoty magnetického pole a různá Machova čísla lépe než model F79, což se dalo očekávat.
- Použití modelu P95, který využívá pro určení polohy rázové vlny složitou kompenzaci jak na hodnoty meziplanetárního magnetického pole, tak i na různá Machova čísla a navíc pracuje s aberací, nepřineslo žádoucí podstatnější změnu v zpřesnění odhadu polohy rázové vlny v závislosti na vnějších podmínkách.

Využití výsledků a nástin dalšího směru výzkumu

Při pohledu na výsledky porovnávání tří modelů pro určení polohy rázové vlny se naskýtá otázka, jestli je možné jejich další zpřesnění, vzhledem k tomu, že byly vytvořeny na základě fitování rozsáhlých souborů experimentálních dat.

Problém polohy a tvaru rázové vlny byl vyřešen metodami klasické dynamiky plynů pro případ obtékání pevného tělesa (*Spreiter et al., 1966*). V našem případě je ovšem překážka tvořena magnetickým polem Země a navíc sluneční vítr je možno aproximovat tokem neutrálních částic jen v prvním přiblížení. Magnetohydrodynamické výpočty, které by zohlednily přítomnost magnetického pole, se pro přílišnou náročnost na strojový čas prozatím nepodařilo provést, a proto zůstává experimentální studium jediným nástrojem.

Domníváme se, že dalšího pokroku v predikci polohy rázové vlny může být dosaženo jedině pokud bude vzat v úvahu charakter překážky (*tj. magnetopausy*) a závislost její polohy a tvaru na vnějších podmínkách, jak také naznačují ve své práci *Farris and Russell, 1994*.

Další zpřesnění vyžaduje i hlubší pochopení procesů probíhajících v přechodové oblasti, která rázovou vlnu od magnetopausy odděluje.

Presentace výsledků projektu

První výsledky byly předneseny na jarním zasedání Americké geofyzikální unie v Bostonu (květen 1998) [**1**], pokračování pak na mezinárodním pracovním setkání "NATO Advanced Research Workshop (Coordinated Studies of the Solar Wind - Magnetosphere - Ionosphere Interaction): INTERBALL Observations", které se konalo v Košicích (září 1998) [**2**]. Tento příspěvek je také připravován pro sborník, který z této konference vyjde. Zároveň budou nejnovější výsledky publikovány v Czechoslovak Journal of Physics [**3**] (recenzní řízení proběhlo). Předpokládáme, že následující studie by mohla být rozšířena i o obdobně zpracované soubory dat z japonské družice GEOTAIL.

Referáty a publikace, na kterých se M. Borák podílí

[1] J. Šafránková, Z. Němeček, and **M. Borák**, Bow shock position: Comparison of the MAGION–4 observation with models, *AGU meeting*, Boston, May 26-29, 1998, S300.

[2] J. Šafránková, Z. Němeček, and **M. Borák**, MAGION-4 observations of the bow shock crossings, *NATO Advanced Research Workshop, Coordinated Studies of the Solar Wind - Magnetosphere - Ionosphere Interactions: INTERBALL Observations*, Kosice, September 7-11, 1998, 25.

[3] J. Šafránková, Z. Němeček, and **M. Borák**, Bow shock shape and position: MAGION–4 observations, of the bow shock crossings, *Czech J. Phys.*, 1999, **in print**.

[4] J. Šafránková, Z. Němeček, and **M. Borák**, Bow shock position: Observations and models, *Proceed. of NATO Advanced Research Workshop*, 1999, **in print**.

[5] J. Šafránková, Z. Němeček, and **M. Borák**, Statistical Bow shock models: Comparison with new observations, *9th Scientific Assembly of IAGA*, Birmingham, July 15-30, 1999.

Literatura

Farris M. H., and C. T. Russell, Determining the standoff distance of the bow shock: Mach number dependence and use of models, *J. Geophys. Res.*, 99, 17681 1994.

Formisano V., Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions, *Planet. Space Sci.*, **27**, 1979, 1151.

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.

Peredo, M., J. A. Slavin, E. Mazur, and S. A. Curtis, Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvénic, sonic and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation, *J. Geophys. Res.*, 100, 7907, 1995.

Spreiter, J. R., A. L. Summers, and A. Y. Alksne, Hydromagnetic Flow Around the Magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, 14, 223, 1966.

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 dvěmi 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 koroně) 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 $\sim$5 nT (ale může dosahovat i hodnot mnohem vyšších, až do 20 nT), mohou se generovat na různých nehomogenitách v prostředí magnetozvukové 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 pracech **Sagdeev, 1966** na základě podobnosti s hydrodynamickou teorií. Místo srážkových mechanizmů, které se vyskytují v klasické hydrodynamice, je však potřeba nalézt jiný mechanizmus přeměny energie uspořádaného toku částic na tepelný pohyb. Tímto mechanizmem 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