



aerospațial

EXPLORĂRI SPAȚIALE



Procese Fizice în Plasma Spațială: Sistemul Vânt Solar-Magnetosferă-Ionosferă (PROSPERO)

O. Marghita, A. Blăgău, M. Echim, H. Comișel, O.D. Constantinescu, C. Bunesu, G. Voitcu, O. Postăvaru, M. Ciobanu

Institutul Național pentru Fizica Laserilor Plasmei și Radiației – Institutul de Științe Spațiale



COD PROIECT: 31033

1. Obiective

- Investigarea proceselor fizice care au loc în sistemul cuplat vânt solar - magnetosferă - ionosferă. Testarea modelelor propuse cu ajutorul datelor experimentale achiziționate de misiunile spațiale CLUSTER (ESA), FAST (NASA), și INTERBALL (IKI+CNES).
- Dezvoltarea capacității de a procesa, integra și interpreta științific un volum substanțial de date experimentale transmise de sateliți; dezvoltarea de metode și modele pentru valorificarea acestor date.
- Intensificarea cercetărilor desfășurate în parteneriat cu institute de prestigiu din străinătate. Pregătirea pentru participarea la programul PECS al ESA.

2. Etape

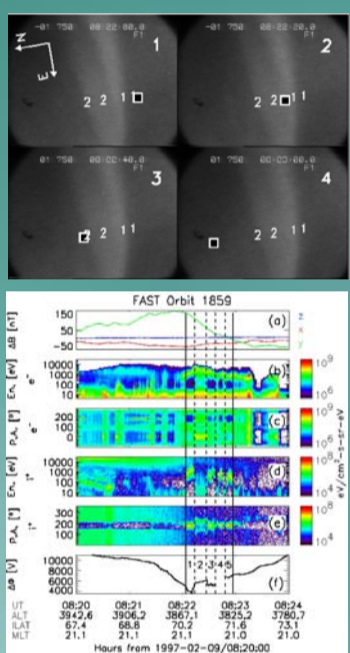
- Parametrizarea câmpului electric ionosferic în vecinătatea unui arc auroral infinit lung
- Fenomene de reconexiune deasupra cuspului magnetic
- Geometria structurilor de tip oglindă magnetică din măsurători multisatelit
- Integrarea ecuației Vlasov prin metoda caracteristicilor folosind particule test
- Geometria și dinamica zonei de reconexiune la latitudine magnetică mare
- Parametrizarea cuplajului dintre curentul aliniat și electrojet în vecinătatea unui arc auroral

3. Realizare

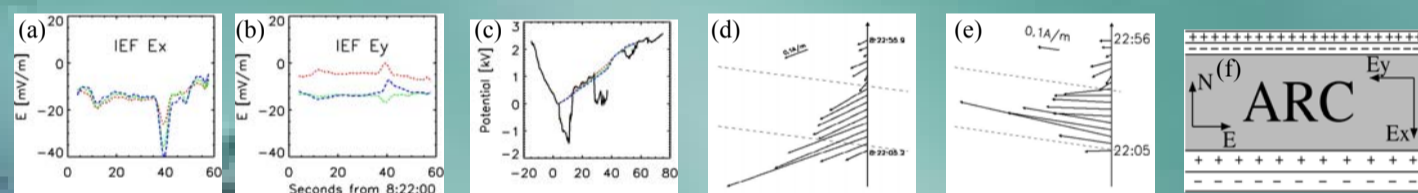
Electrodinamica arcului auroral

În studiile dedicate arcului auroral a fost prezentată o nouă metodă de investigare, ALADYN, bazată pe ecuația de conservare a curentului la nivelul ionosferic și pe un model parametric al arcului. Metoda a fost ilustrată cu date experimentale măsurate de FAST deasupra unui arc stabil și lat din sectorul "seară", asistate de imagini video luate la sol (figurile din dreapta). Rolul termenilor care descriu: (a) polarizarea ionosferică; (b) contribuția curentului Hall la închiderea meridională a curentului aliniat cu câmpul magnetic și (c) cuplajul curentului aliniat cu electrojetul, a fost examinat prin fitarea datelor experimentale cu variante simplificale ale modelului. Rezultate consistente s-au obținut doar atunci când toți termenii enumerați au fost luați în considerare.

Pentru arcul investigat s-a găsit un câmp electric de polarizare concentrat în straturi duble la marginea arcului, fără contribuție semnificativă la câmpul electric ionosferic (CEI) în interiorul arcului. Configurația CEI și curentului asociat cu arcul prezintă elemente de nouitate în raport cu modelele standard – de exemplu închiderea curentului aliniat în lungul arcului, în locul închiderii tipice, perpendiculară pe arc. Câmpul electric, potențialul, curentul ionosferic și o schiță a arcului sunt prezentate mai jos.



Sus: Selecție de imagini conjugate cu traversarea FAST. În fiecare imagine proiecția ionosferică a satelitelui este indicată cu un pătrat iar marginea primelor două fascicule ionice cu '11' și '22'.
Jos: Date de câmp și particule măsurate de FAST deasupra ovalului auroral. Linile verticale continue indică intervalul folosit pentru ilustrarea metodei ALADYN. Linile verticale întrerupte delimitează sub-intervale aproximativ egale, în care FAST detectează fascicule de ioni și/sau conice, folosite pentru testarea consistenței ALADYN. În figură sunt prezentate: (a) perturbația câmpului magnetic; (b-e) spectrograme energetice și ale unghiului de pantă (pitch-angle) pentru electroni și ioni; (f) căderea de potențial în lungul traiectoriei satelitelui.

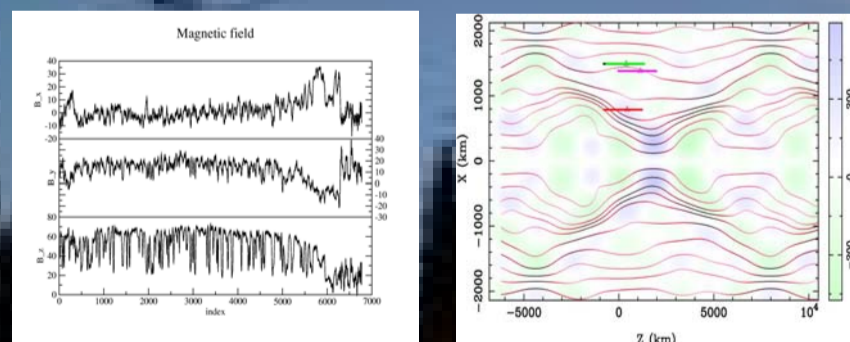


Câmpul electric (a, b) și potențialul ionosferic (c) obținute cu două modele de arc, YPYHX (roșu) și YPYHXL (verde și albastru). Ambele modele țin cont de polarizarea ionosferică, de câmpul electric longitudinal, care induce un curent Hall transversal, și de cuplajul dintre curentul aliniat (perpendicular pe ionosferă) și electrojet. În ambele cazuri potențialul ionosferic este consistent cu potențialul măsurat de FAST la cea. 4000km altitudine (indicat cu negru în c). Curentul ionosferic de-a lungul proiecției traiectoriei lui FAST pentru modelele YPYHX (d) și YPYHXL (e), împreună cu o schiță a arcului (f). Se observă unghiul mare de inclinare a electrojetului față de arc pentru modelul YPYHX, posibil datorită faptului că modelul nu ține cont de variația câmpului electric în lungul arcului. Intuitiv, modelul YPYHXL, în care electrojetul curge paralel cu arcul, produce rezultate mai consistente. Schița arcului indică la frontiere două straturi duble, care concentrează câmpul electric de polarizare.

Structuri de tip oglindă magnetică

Folosirea de instrumente identice pe cei patru sateliți Cluster permite, pentru prima oară, obținerea unei imagini tridimensionale a fenomenelor din diferite regiuni ale magnetosferei terestre. În particular, măsurători simultane ale câmpului magnetic în puncte diferite fac posibil studiul structurilor magnetice quasistatice prezente în magnetosferă. În cadrul proiectului au fost analizate diverse metode ce ar putea fi folosite pentru identificarea oglinzilor magnetice și determinarea geometriei acestora pe baza măsurătorilor de câmp magnetic. Evaluarea acestor metode a fost un număr de criterii, cum ar fi timpul de calcul, stabilitatea metodei numerice și gradul de încredere oferit. Strategia care s-a dovedit a fi cea mai satisfăcătoare a fost fitul simultan al datelor multi-satelit pe un model analitic în scopul determinării parametrilor modelului. Modelul teoretic este folosit apoi pentru calculul câmpului magnetic în orice punct al structurii.

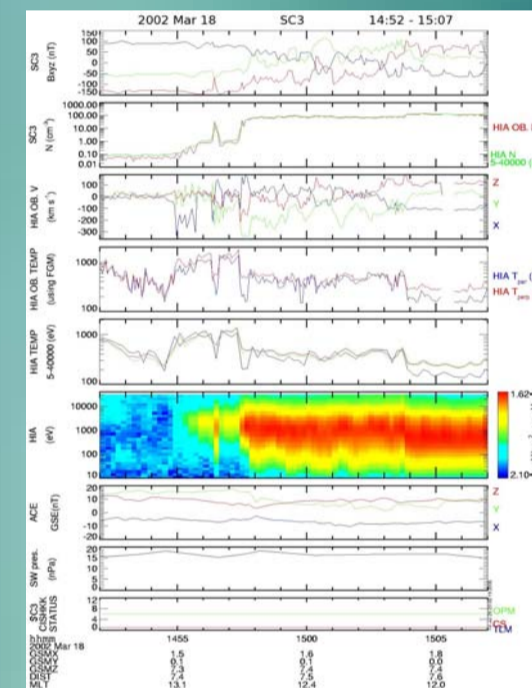
Tehnică astfel elaborată a fost aplicată datelor de câmp magnetic provenite de la instrumentele FGM care zboară la bordul sateliților Cluster. Într-un studiu de caz am demonstrat posibilitatea reconstruirii întregului câmp magnetic al structurii străbătute de sateliți, precum și a altor parametri caracteristici, cum ar fi presiunea plasmei și densitatea curentului electric. În partea de sus a Figurii 4 sunt prezentate, pentru exemplificare, datele de câmp magnetic măsurate de satelitul Cluster 1 în intervalul ales pentru studiul de caz. Parametrii modelului se determină prin fitarea simultană a datelor măsurate de mai mulți sateliți (de exemplu doi). Compararea datelor măsurate de ceilalți (doi) sateliți cu valorile preliminate pe baza modelului oferă o metodă de verificare a rezultatelor. Structura OM determinată astfel este prezentată în partea de jos a Figurii 4. Intensitatea câmpului magnetic este reprezentată prin culoarea liniei, crescând de la roșu la negru. Densitatea curentului electric asociat este indicată în fundal.



Stanga: Câmpul magnetic în coordonate GSE măsurat de satelitul Cluster 1 pe 10 Noiembrie 2000 între 08:20 și 08:25 UT.
Dreapta: Reconstrucția structurii liniilor de câmp magnetic al OM pe baza modelului. Linile drepte sunt proiecțiile traiectoriilor sateliților în planul (x-z). Triunghiurile indică intersecția traiectoriilor cu planul. Densitatea curentului electric este reprezentată în fundal.

Fenomene de reconexiune magnetică

În studiul fenomenelor de reconexiune deasupra cuspului magnetic s-a abordat problematica transferului masei, impulsului și energiei în straturile de frontieră adiacente magnetopauzei. Într-o primă etapă s-au prezentat conceptele teoretice de bază ale teoriei reconexiunii magnetice și s-au evaluat metodele de predicție și identificare a acestui fenomen. În vederea punerii în evidență în datele sateliților Cluster a unor cazuri cu amprente ale reconexiunii la latitudine magnetică mare s-a realizat o bază de date multi-instrumentală. Aceasta cuprinde măsurători de la instrumentele CIS/HIA (Cluster Ion Spectrometer / Hot Ion Analyzer), CIS/CODIF (Composition and Distribution Function sensor) și FGM (Flux Gate Magnetometer), de la bordul sateliților Cluster, precum și măsurători ale condițiilor din vântul solar – câmp magnetic și parametri ai plasmei – efectuate de satelitul NASA ACE (Advanced Composition Explorer). În continuare s-a descris strategia folosită pentru identificarea în această bază de date a câtorva evenimente de interes, precum și teoria metodelor de prelucrare a datelor folosite în analiza detaliată a unuia din aceste evenimente.



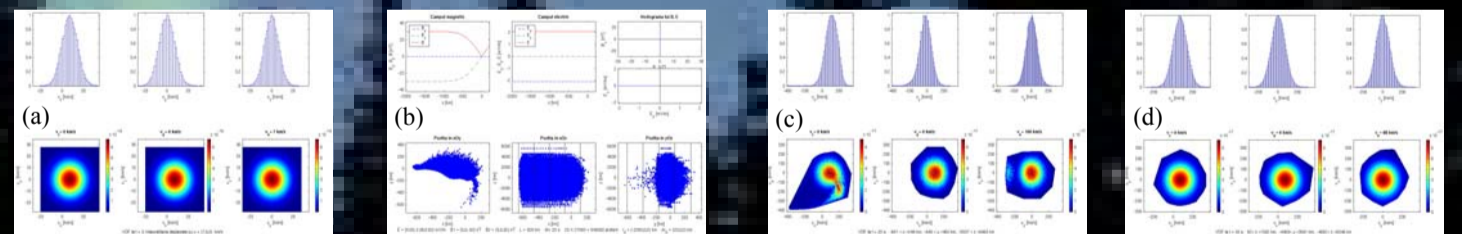
Pentru cazul selecționat, ilustrat aici, au fost prezentate dovezi care susțin ipoteza unui fenomen de reconexiune deasupra cuspului magnetic. Au fost determinate caracteristicile geometrice (orientație, grosime) și viteza de deplasare a magnetopauzei. Rezultatele obținute prin diferite metode au fost comentate și comparate din punct de vedere al consistenței.

Date corespunzătoare evenimentului din 18 martie 2002, ales ca exemplu de reconexiune deasupra cuspului magnetic. De sus în jos: câmpul magnetic (GSE) la bordul Cluster, densitatea plasmei (roșu – HIA onboard, verde – HIA ground), viteza plasmei HIA onboard, temperaturile HIA onboard și ground Tperp și Tpar (perpendicular și paralel față de câmpul magnetic), spectrograma energetică HIA, câmpul magnetic (GSE) măsurat de ACE și presiunea dinamică evaluată din datele ACE. Observăm tranziția rapidă din zona lobului magnetic nordic în teacă magnetică și corelația dintre schimbările de direcție în câmpul magnetic și în viteza plasmei. Teste specifice atestă prezența în acest loc a unei discontinuități rotaționale, consecință a fenomenului de reconexiune magnetică.

Integrarea ecuației Vlasov

Metoda numerică dezvoltată pentru rezolvarea ecuației Vlasov se bazează pe un pachet de programe asamblat anterior pentru studiul traiectoriilor de particule test în configurații prescrise de câmp electric și magnetic. Pachetul a fost adaptat astfel încât să permită integrarea simultană a ecuațiilor de mișcare pentru un număr mare de protoni. Inițializarea vitezelor particulelor incidente s-a efectuat după un algoritm care introduce în sistem un colectiv statistic de particule, consistent cu o funcție de distribuție după viteze (FDV) de tip Maxwelliană deplasată în direcția Ox (Figura 5). Orbitele tuturor particulelor au fost calculate prin integrare numerică, obținându-se astfel curbele caracteristice ale ecuației Vlasov. FDV inițială este propagată în lungul acestor curbe și reconstruită în orice punct din domeniul de simulare și/sau la orice moment de timp ulterior momentului inițial. Contribuția self-consistentă a particulelor este neglijată, câmpul electromagnetice fiind prescris pe parcursul întregii integrări numerice a orbitei. Metoda numerică a fost testată pentru cazul unui câmp magnetic uniform și a reprodus corect rezultatele teoretice.

Metoda a fost aplicată la studiul FDV în câmpul magnetic al unei discontinuități tangențiale. Acestui câmp i-a fost suprapus o distribuție de câmp electric: (a) uniform, respectiv (b) neuniform dar a cărui intensitate și orientare conservă viteza de drift electric. Rezultatele obținute în cazul (a) pun în evidență procesul de frânare adiabatică în cazul unei bariere magnetice. De asemenea, s-a pus în evidență un proces eficient de accelerare electrostatică pentru o distribuție antiparalelă a câmpului magnetic, precum și un interesant izomorfism între traiectoria globală a jetului injectat și spațiul fazelor corespunzător, rezultate ilustrate Figurile 6a și 6b. În cazul (b) norul protonic simulat penetrează discontinuitatea, iar viteza de masă în timpul simulării este egală cu viteza inițială, după cum se observă în Figura 6c. Rezultatele obținute ilustrează domeniul de aplicabilitate a metodei de rezolvare a ecuației Vlasov, precum și posibilele aplicații în studiul propagării plasmelor necolizionale.



(a) Histograma vitezelor (sus) și funcția de distribuție (jos) la momentul t=0. (b) Distribuția câmpului electromagnetic în domeniul de integrare și pozițiile tuturor particulelor la momentul t = 20 s; (c) Histograma vitezelor și funcția de distribuție pentru un câmp electric uniform, imediat după ce jetul pătrunde în regiunea de discontinuitate; (d) Histograma vitezelor și funcția de distribuție pentru un câmp electric neuniform.

4. Rezultate

Articole în reviste cu referenți:

- O. Marghita, B. Klecker, G. Haerendel, J. McFadden, ALADYN: A method to investigate auroral arc electrodynamic from satellite data, J. Geophys. Res., 109 (A11305), doi: 10.1029/2004JA010474, 2004.
- C. Hategan, H. Comisel, R.A. Ionescu, Quasiresonant Scattering, Proc. Rom. Acad., 5(2), 129-132, 2004.
- R.A. Treumann, C.H. Jamschek, O.D. Constantinescu, R. Nakamura, O.A. Pokhotelov, E. Georgescu, The strange physics of low frequency mirror mode turbulence in the high temperature plasma of the magnetosheath, Nonlin. Proc. Geophys., 11, 647 – 657, 2004.
- M. Bouhram, B. Klecker, G. Paschmann, H. Rème, A. Blăgău, L. Kistler, P. Puhl-Quinn, J.-A. Sauvaud, Multipoint analysis of the spatio-temporal coherence of dayside O+ outflows with Cluster, Ann. Geophys., 22, 2507-2514, 2004.
- M. Bouhram, B. Klecker, W. Miyake, H. Rème, J.-A. Sauvaud, M. Malingre, L. Kistler, A. Blăgău, On the altitude dependence of transversely heated O+ distributions in the cusp/cleft, Ann. Geophys., 22, 1787-1798, 2004.
- O. Marghita, B. Klecker, J. McFadden, The anisotropy of precipitating auroral electrons: A FAST case study, Adv. Space Res., 38, 1694-1701, 2006.

Comunicări la conferințe internaționale:

- O.D. Constantinescu, K.-H. Glassmeier, R. Treumann, Particle kinetics and distribution function inside magnetic mirrors, 1st EGU General Assembly, Nisa, Aprilie 2004.
- H. Comisel, M. Ciobanu, C. Bunesu, J. Shimunek, J. Chum, V. Thurlik, Attitude restitution for a near Earth satellite using magnetometer data only, 35th COSPAR Scientific Assembly, Iulie 2004.
- O. Marghita, B. Klecker, J.P. Mcfadden, The anisotropy of precipitating auroral electrons: A FAST case study, 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, Iulie 2004.
- M. Echim, 2-D kinetic solution describing a non-uniform streaming of a collisionless plasma across a magnetic field, EGU General Assembly, Viena, Aprilie 2005.
- G. Voitcu, C. Bunesu, M. Echim, Velocity distribution functions of a plasma convecting in the magnetic field of a tangential discontinuity, IAGA Sci. Assembly, Toulouse, Iulie 2005.
- O. Marghita, M. Hamrin, B. Klecker, J. McFadden, M. André, S. Buchert, H. Rème, Experimental investigation of the auroral generator with conjugated Cluster and FAST data, IAGA Scientific Assembly, Toulouse, Iulie 2005.
- O. Marghita, M. Hamrin, B. Klecker, K. Rönnmark, A. Vaivads, Concentrated generator regions observed by Cluster in the plasma sheet boundary layer: Theoretical considerations, STIMM Workshop, Sinaia, Septembrie 2005.
- M. Echim, Plasma boundary layer with sheared velocity and parallel electric field: a two-dimensional model, STIMM Workshop, Sinaia, Septembrie 2005.
- A. Blăgău, B. Klecker, G. Paschmann, S. Haaland, M. Scholer, O. Marghita, I. Dandouras, L.M. Kistler, E. Lucek, The day-side magnetopause as seen by Cluster: A case study and a statistical report, STIMM Workshop, Sinaia, Septembrie 2005.
- D. Constantinescu, K.-H. Glassmeier, U. Motschmann, K.-H. Fornaçon, Tracing wave source motion inside the magnetosheath using CLUSTER, STIMM Workshop, Sinaia, Septembrie 2005.