



# aerospațial

## EXPLORĂRI SPAȚIALE



### Dinamica Satelitară și Fizica Magnetosferei cu Date in-Situ (DIAFAN)

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

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



#### 1. Obiective

- Testare modele numerice de integrare a ecuațiilor cinematice și dinamice de mișcare și realizarea unui estimator numeric al orientării unui satelit stabilizat prin rotație. Baza de date camp magnetic și orientare pentru satelitul MAGION 5.
- Elaborarea unei metode de evaluare a densității de energie din datele CLUSTER în condiții de limită a determinărilor experimentale de camp electric și densitate de curent. Identificarea în datele CLUSTER a zonelor cu semnatura de generator și comparația cu datele FAST.
- Identificarea asimetriilor în direcția perpendiculară câmpului magnetic și vitezei de masă a densității de particule și compararea cu modelele existente. Utilizarea măsurărilor multipunct ale sateliților CLUSTER.

#### 2. Etape

- Optimizarea algoritmilor pentru calcule de orientare care folosesc metode de dinamica satelitară
- Determinarea parametrilor de stare de atitudine din evaluări dinamice
- Investigarea bilanțului energetic în magnetosfera aurorală folosind date CLUSTER și FAST
- Asimetrii induse de propagarea plasmei în regiunea magnetopauzei

#### 3. Realizare

### Optimizarea algoritmilor pentru calcule de orientare care folosesc metode de dinamica satelitară. Determinarea parametrilor de stare din evaluări dinamice

Metoda dezvoltată pentru calcule de orientare în cazul unui sistem redus de parametri de stare (de exemplu date provenite de la un singur magnetometru triaxial) presupune utilizarea unui algoritm de minimizare multiparametrică și a unor proceduri numerice ODE pentru integrarea ecuațiilor de mișcare. Soluțiile inițiale de mișcare la o epocă dată se stabilesc din măsurătorile magnetometrice și din estimări ale vitezelor unghiulare în funcție de una dintre proiecții. O valoare de start apropiată de cea reală este critică pentru convergența filtrului numeric al estimatorului de stare precum și pentru integrarea numerică a ecuațiilor diferențiale Euler. Timpul de calcul intervine cu o pondere semnificativă în soluționarea problemei de orientare satelitară. În această lucrare s-a realizat o optimizare a procedurilor numerice de prelucrare, determinare și vizualizare a vectorilor de stare ce definesc orientarea triaxială a unui satelit, în particular câmpul magnetic și direcția către soare. S-a urmarit o administrare eficientă a sistemelor de calcul, prin punerea în comun a resurselor acestora, precum și accesarea unitară a datelor experimentale.

Ecuațiile dinamice de mișcare sunt scrise în termenii vitezelor unghiulare  $\Omega$ , ale momentelor de inerție  $I$  și ale cuplurilor de forțe de control  $M_{ctrl}$  sau de perturbare  $M_{env}$ .

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\Omega}_1 &= -(I_1 - I_2) \Omega_2 \Omega_3 + M_{ctrl1} + M_{env1} \\ I_2 \dot{\Omega}_2 &= -(I_1 - I_2) \Omega_1 \Omega_3 + M_{ctrl2} + M_{env2} \\ I_3 \dot{\Omega}_3 &= -(I_2 - I_1) \Omega_1 \Omega_2 + M_{ctrl3} + M_{env3} \end{aligned}$$

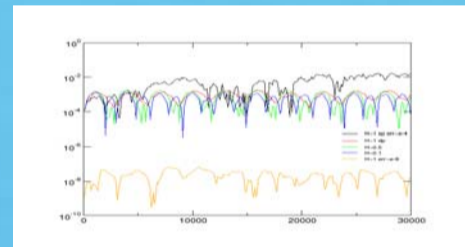
În timp ce ecuațiile cinematice de mișcare sunt considerate într-o parametrizare a quaternionilor  $q$ , unde  $\omega$  este viteza unghiulară a satelitului într-un sistem de referință local iar  $O_1, O_2, O_3$  sunt matrici de rotație asociate pozițiilor sau vitezelor unghiulare.

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} O_1(\omega) & -O_2^T(q) O_3^T(q) \end{pmatrix} q$$

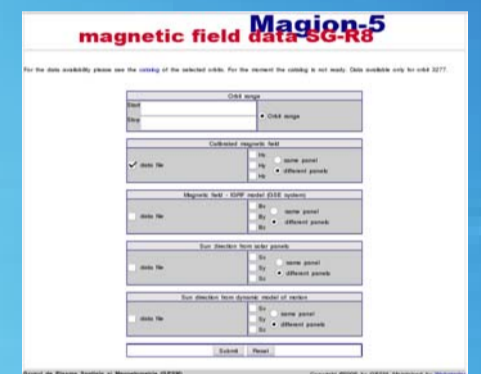
$$O_1(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & \omega_1 & -\omega_2 & \omega_3 \\ -\omega_1 & 0 & \omega_1 & \omega_2 \\ \omega_1 & -\omega_1 & 0 & \omega_3 \\ -\omega_1 & -\omega_2 & \omega_3 & 0 \end{pmatrix}, O_2(q) = \begin{pmatrix} -q_4 & q_3 & -q_2 & q_1 \\ -q_1 & -q_4 & q_1 & q_2 \\ q_2 & -q_1 & -q_4 & q_3 \\ q_1 & -q_2 & -q_3 & -q_4 \end{pmatrix}$$

Rezultate:

- minicluster de calculatoare GPSM
- filtru numeric dinamic satelitar cu metode ODE: Runge Kutta, Runge Kutta cu pas variabil, Bulirsh Stoer.
- evaluări stabilizate și propagarea erorilor de trunchere
- baza de date de camp magnetic măsurat, de model, direcție soare
- interfața grafică de apelare și vizualizare, acces internet



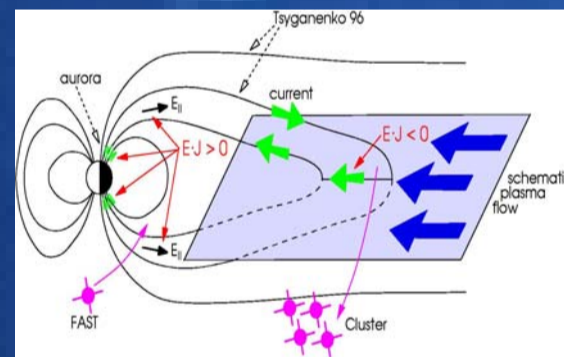
Estimarea și propagarea erorilor de trunchere prin integrarea cu metoda Runge Kutta de ordinul 5 cu pași adaptivi a ecuațiilor de mișcare pentru diferite valori de plecare (orbita 3245).



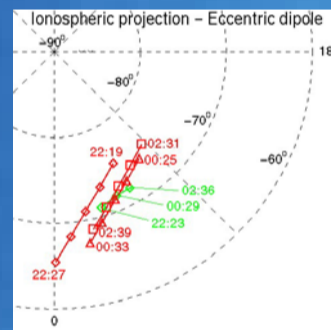
Interfața grafică cu acces web (iss30.nipne.ro) pentru vizualizarea sau descărcarea vectorilor de stare care descriu orientarea triaxială a minisatelitului MAGION 5. Baza de date poate fi interogată pentru accesări ale câmpului magnetic măsurat și calibrat, ale câmpului magnetic de model IGRF asociat, precum și ale direcției versorului soare. S-au realizat calcule de recalibrare la fiecare 60 de zile de evoluție pe orbită.

### Investigarea bilanțului energetic în magnetosfera aurorală folosind date CLUSTER și FAST

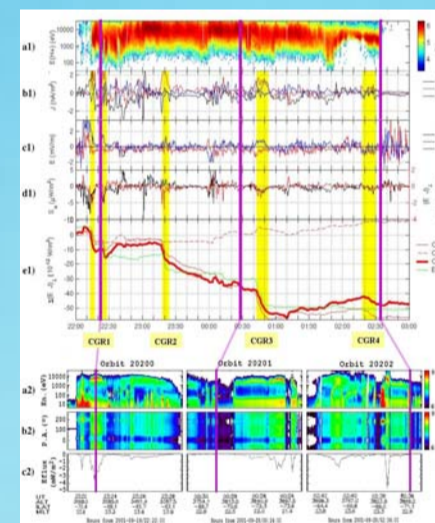
Investigarea bilanțului energetic în magnetosfera aurorală a presupus determinarea densității de energie în magnetosferă și a fluxului energetic în ionosferă. S-au prezentat dovezi experimentale in-situ pentru traversarea mai multor regiuni de tip generator, bazate pe date conjugate Cluster-Fast. Metoda dezvoltată aici a permis obținerea de estimări ale densității de putere, în condițiile atingerii limitelor de măsurare ale instrumentelor. În trei cazuri semnificative din datele Cluster au putut fi asociate cu activitate aurorală conjugată, observată de FAST. Observarea conjugată a regiunilor de tip generator și a precipitației de electroni energetici sugerează ca cel puțin o parte din energia generată alimentează auroara.



Schema a circuitului curentului auroral, investigat cu ajutorul sateliților Cluster și FAST. În regiunile de tip generator din magnetosferă ( $E \cdot J < 0$ ) energia mecanică a mișcării plasmei este convertită în energie electromagnetică. O parte din această energie este disipată în regiunile de accelerare aurorală și ionosferă, care au un caracter de sarcină ( $E \cdot J > 0$ ). Datele Cluster sunt colectate în stratul de frontieră al foii de plasmă, la o altitudine de  $\sim 18 R_E$ . Datele FAST conjugate sunt măsurate deasupra ovalului auroral, la  $\sim 0.6 R_E$ . După Fig. 1 din Hamrin et al. (2006).



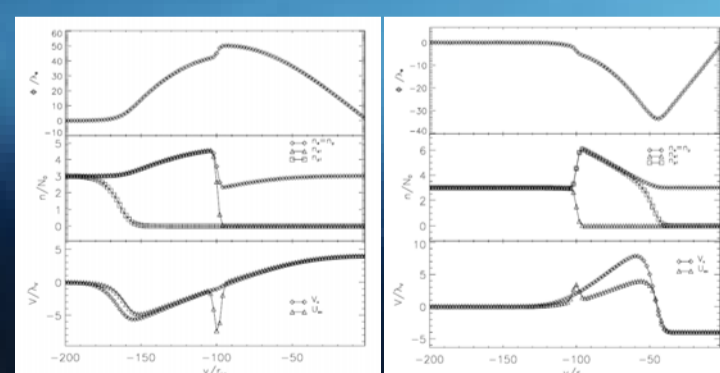
Proiecția ionosferică (la 110 km altitudine) a traiectoriilor Cluster (verde) și FAST (roșu), cu ajutorul modelului de camp magnetic T96. Pentru fiecare conjuncție sunt figurate 8 min din traiectoria FAST. Amprenta Cluster acoperă 5 h.



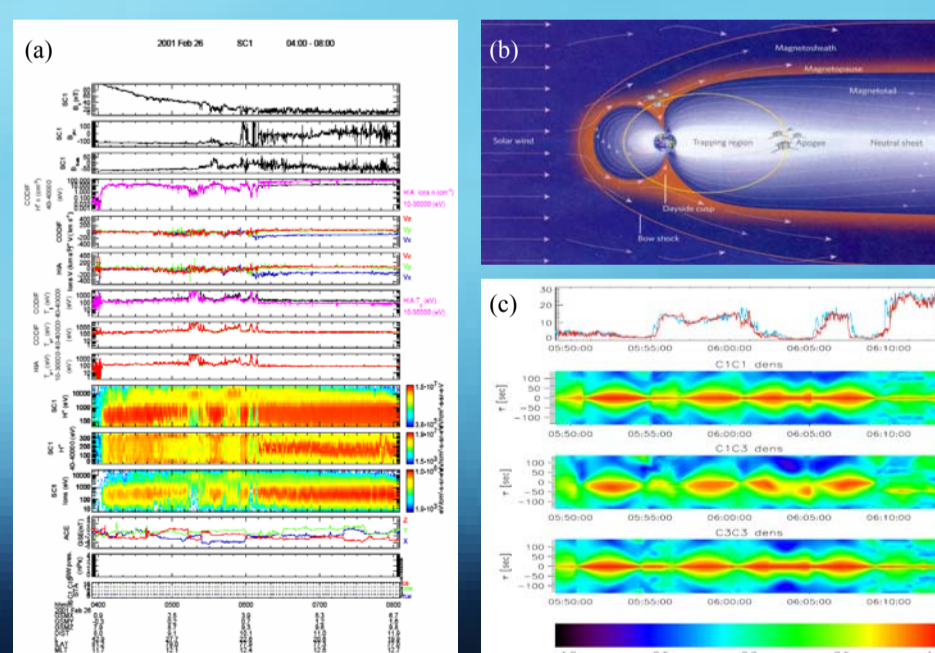
Sus: Date Cluster din 19–20 Septembrie 2001. (a1) Spectrograma energetică protoni Cluster 1. (b1) Componentele densității de curent într-un sistem de referință aliniat cu câmpul magnetic ( $\alpha||B$ ) și apropiat de GSE ( $\alpha \approx x, \beta \approx y, \gamma \approx z$ ) (c1) Componentele câmpului electric mediate peste satelitul, obținute din date CIS/CODIF. (d1) Densitatea de putere (roșu) și fluxul Poynting (negru) mediate peste satelitul. (e1) Suma cumulativă a densității de putere, calculată cu date CIS/CODIF (roșu), respectiv EFW (verde). Linile roșii subțiri arată contribuțiile componentelor perpendiculare în sistemul MAG,  $E_{p||}$  (linie continuă) și  $E_{p\perp}$  (linie întreruptă). Regiunile de tip generator, CGR1–CGR4 (CGR = Concentrated Generator Region) sunt indicate cu benzi galbene. Linile magenta verticale arată conjuncțiile cu FAST. Jos: Date FAST electronice pentru trei conjuncții cu Cluster, la 22:23, 00:29 și 02:36 UT. (a2, b2) Spectrograme energie–timp și unghi–de-panta–timp. (c2) Fluxul energetic la nivelul satelitelor.

### Asimetrii induse de propagarea plasmei în regiunea magnetopauzei

Asimetriile induse de propagarea plasmei în regiunea magnetopauzei au constituit un alt subiect abordat în proiect. S-au identificat, folosind măsurători ale instrumentelor puse la dispoziție de bazele de date ESA dedicate misiunii CLUSTER, trecerile de magnetopauză și secțiunile de timp local în care acestea s-au realizat. Folosind teoria cinetică a plasmei s-a formulat pentru cazul staționar o soluție pentru electrodinamica unui element de plasmă necolizională în mișcare în prezența unui câmp magnetic extern. S-au pus în evidență asimetriile induse de propagare și dependența acestora de direcția și amplitudinea vitezei de masă. S-au dezvoltat și folosit metode de analiză a datelor multipunctuale pentru a investiga în ce măsură există asimetrii în structurile de plasmă detectate în proximitatea magnetopauzei. De asemenea s-a dezvoltat o metodă de analiză ce se bazează pe calculul coeficienților de auto și cross corelație. Rezultatele obținute prin calculul acestor coeficienți pentru densitatea măsurată de CLUSTER confirmă ca fluctuațiile observate sunt consistente cu existența unor elemente de plasmă coerente a căror dimensiune este egală sau mai mare decât distanța de separare între sateliti.



Stanga: Secțiune prin stratul frontieră ionic: primul panel ilustrează distribuția potențialului electrostatic; cel de-al doilea panel ilustrează densitatea totală a plasmei (simbolul romb), respectiv densitatea parțială a populației descrise de Maxwelliana izotropă (triunghiuri pentru electroni, patrate pentru protoni); panelul de jos conține profilul vitezei de masă (simbolul romb) calculată din suma momentelor de ordin 1 ale electronilor și ionilor; este adăugat de asemenea graficul vitezei de drift electric (simbolul triunghi). Toate marimile sunt adimensionale, factorii de normare sunt indicați pentru fiecare variabilă. Dreapta: Secțiune prin stratul frontieră electronic. Paneele conțin aceleași marimi fizice ca și cele din stanga.



(a) Primele trei paneele prezintă componentele paralele, respectiv perpendiculare ale câmpului magnetic. Următoarele paneele conțin un sumar de date pentru spectrometrul de ioni CIS, ilustrând variația temperaturii ionilor de hidrogen de joasă energie, viteza populațiilor de joasă și înaltă energie, temperatura paralela și perpendiculară; spectrele energetice pentru hidrogen (energii joase și înalte), respectiv spectrul total ionic; ultimele două paneele conțin date de camp magnetic, respectiv presiune a vântului solar transmise de satelitul ACE. (b) Diagrama ilustrativă a principalelor regiuni magnetosferice investigate de satelitul CLUSTER (adaptare după Goldstein, 2005). (c) Coeficienții de autocorelație (C1C1, C3C3), respectiv cross-corelație (C1C3), pentru densitatea măsurată de WHISPER și defazaj [-120,+120 s]. Panelul de sus arată densitățile analizate (albastru C1, roșu C3).

#### 4. Rezultate

**Lucrări Științifice:**  
1. Echim M, J. Lemaire, M. Roth, "Kinetic treatment of collisionless plasma slab in motion across a magnetic field", *Physics of Plasma*, vol. 12, 072904, 2005.  
2. Marghita, O., M. Hamrin, B. Klecker, A. Vaivads, J. McFadden, S. Buchert, L.M. Kistler, I. Dandouras, M. André, and H. Rème, "Experimental investigation of the auroral generator with conjugated Cluster and FAST data", *Ann. Geophys.* 24, 619 - 635, 2006.  
3. Hamrin, M., O. Marghita, K. Rönmark, B. Klecker, M. André, S. Buchert, L.M. Kistler, J. McFadden, H. Rème, and A. Vaivads, "Observations of concentrated generator regions in the nightside magnetosphere by Cluster/FAST conjunctions", *Ann. Geophys.* 24, 637 - 649, 2006.  
**Comunicări la conferințe internaționale (selective):**  
1. Echim, M., "Advances in the kinetic treatment of the space plasma flows with sheared velocities", *General Assembly of the French and Belgian Physical Societies*, Lille, France, August 2005.  
2. Echim, M., "Asymmetric transport of a plasma slab across a magnetic field - a kinetic solution", *IAGA Meeting*, Toulouse, France, July, 2005.  
3. Marghita, O., M. Hamrin, B. Klecker, K. Rönmark, S. Buchert, L.M. Kistler, M. André, H. Rème, "Generator and load regions in the plasma sheet as detected by Cluster", *EGU General Assembly*, Viena, Aprilie 2006.  
4. Marghita, O., M. Hamrin, B. Klecker, K. Rönmark, S. Buchert, L.M. Kistler, M. André, H. Rème, "Energy conversion regions in the plasma sheet as observed by Cluster", *12th Cluster Workshop*, Saariselkä, Finlanda, Septembrie 2006.  
5. Bunescu, C., O. Marghita, "Triple conjunctions between Cluster, FAST, and ground based observatories - events identification", *Advanced School in Space Environment*, L'Aquila, Italia, Septembrie 2006.