



INSTITUTUL DE ȘTIINȚE SPAȚIALE

Filială a Institutului Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației

Program STAR

Contract Nr. 20 / 2012

**Electrodinamică aurorală cu Swarm**

**ALEOS**

## **II. RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC**

**ETAPA 2**

**Optimizarea fluxului de prelucrare a datelor**

**GRUPUL DE PLASMĂ SPAȚIALĂ ȘI MAGNETOMETRIE**

Decembrie 2013

# RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

## 1. Titlu proiect

Electrodinamică aurorală cu Swarm

(în Propunerea de Proiect: Auroral electroynamics with Swarm – ALEOS)

## 2. Obiective generale/specifice proiect

Conform Secțiunii 1.1, *Concept and Objectives*, a Propunerii de Proiect:

Proiectul ALEOS se va concentra pe electrodinamica ionosferei, cu accent pe regiunea aurorală – unde liniile de câmp magnetic asigură o legătură directă între ionosfera–termosfera colisională și magnetosfera necolisională. Măsurătorile Swarm în trei puncte, conjugate în anumite momente cu date la sol, vor face posibilă o examinare sistematică a închiderii ionosferice a curenților asociate cu aurora. Datele de câmp magnetic, câmp electric și vânt neutru furnizate de Swarm, împreună cu valorile conductanței Pedersen și Hall obținute direct, din observații radar conjugate (e.g. EISCAT), sau indirect din datele Swarm, vor permite explorare fără precedent a curenților ionosferici și conexiunii acestora cu curenți aliniați, atât pe scala arcului cât și pe scala ovalului auroral – pentru diverse zone de timp local, niveluri de activitate magnetică și faze în ciclul subfurtunilor. (...)

Obiectivele specifice ale proiectului ALEOS sunt:

- (a) Observarea gradientilor în lungul arcului auroral (în câmp electric, curenți aliniați, etc) și ajustarea modelelor prezente de arc, predominant 1D.
- (b) Examinarea electrodinamicii 2D a aurorei, cu ajutorul datelor de la toți cei trei sateliți Swarm.
- (c) Considerarea influenței vântului neutru asupra electrodinamicii aurorale.
- (d) Investigarea rolului ionosferei–termosferei în sistemul cuplat magnetosferă–ionosferă–termosferă, folosind atât date Swarm cât și observații de la altitudini mai înalte, în particular de la misiunile Cluster și THEMIS.

## 3. Nr. etapa / Denumire etapa

Etapa II. Optimizarea fluxului de prelucrare a datelor (conform *Plan de Realizare*)

## 4. Obiective Etapa

Conform *Work Package 1 și 2* din Propunerea de Proiect (obiective și activități relevante pentru a doua etapă):

Optimizare și testare software folosind date sintetice și date Swarm.

Selecție inițială evenimente Swarm și prelucrarea preliminară a datelor.

## 5. Rezultate planificate Etapa

Dezvoltarea de tehnici de analiză a datelor în configurații specifice Swarm.

Examinarea sistemului magnetosferă–ionosferă cu date conjugate.

## 6. RST - raport stiintific si tehnic in extenso – maxim 20 pagini pentru etapa intermediara

Raportul stiintific si tehnic trebuie sa cuprinda urmatoarele aspecte:

- Rezumatul etapei
- Descrierea stiintifica si tehnica, cu punerea in evidenta a rezultatelor etapei si a gradului de realizare a obiectivelor - se vor indica rezultatele si modul de diseminare a rezultatelor;

## 6.1. Rezumatul etapei

Misiunea multi-satelit Swarm are ca principal obiectiv investigarea câmpului magnetic terestru, prin cuantificarea atât a surselor interne ale câmpului cât și a contribuțiilor externe – datorate curenților electrici din ionosferă și magnetosferă. Proiectul ALEOS își propune aprofundarea investigațiilor referitoare la electrodinamica ionosferei aurorale și la cuplajul acesteia cu magnetosfera, în particular prin intermediul curenților aliniați cu câmpul magnetic (*field-aligned currents, FAC*). Tehnici dezvoltate pentru analiza datelor furnizate de misiunile FAST și Cluster, inclusiv date multi-punct, vor fi aplicate datelor Swarm.

În propunerea de proiect, a doua Etapă urma să se concentreze pe pregătirea utilizării acestor tehnici folosind date sintetice, apoi pe teste și prelucrări preliminare ale datelor Swarm. La momentul redactării propunerii, lansarea Swarm urma să aibă loc în Noiembrie 2012 iar datele urmau să devină disponibile pentru exploatare științifică 6 luni mai târziu, în Mai 2013. Datorită problemelor tehnice ale rachetei purtătoare, lansarea Swarm a avut loc un an mai târziu, pe 22 Noiembrie 2013. Conform site-ului Swarm, <http://www.esa.int/swarm>, misiunea a absolvit cu succes primele teste iar la momentul actual experimentele montate la bord sunt în curs de pregătire pentru a intra în regim nominal. Ulterior, în urma unui proces de evaluare preliminară și validare, datele Swarm vor deveni disponibile pentru exploatare științifică la 6 luni după lansare.

În contextul amânării cu un an a lansării Swarm, activitatea desfășurată în Etapa a doua a proiectului ALEOS a urmărit, pe de-o parte, optimizarea tehnicilor de analiză dezvoltate pentru misiunile Cluster și FAST, în particular referitor la datele de câmp magnetic, iar pe de altă parte investigarea unui eveniment conjugat Cluster / THEMIS, asistat de date la sol, într-o configurație relevantă pentru misiunea Swarm. Chiar dacă optimizarea completă a fluxului de prelucrare a datelor nu a fost posibilă, în lipsa datelor Swarm, activitățile desfășurate răspund obiectivelor asumate și contribuie la continuarea cu succes a proiectului.

ALEOS beneficiază de parteneriatele internaționale ale Grupului de Plasmă Spațială și Magnetometrie (GPSM) din ISS, în particular de participarea la proiectul *Plasma coupling in the auroral magnetosphere–ionosphere system (POLARIS)*, <http://gpsm.space-science.ro/polaris>, desfășurat la International Space Science Institute (ISSI), Berna, Elveția, și de interacția cu experți de la Jacobs University Bremen (JUB), German Research Centre for Geosciences (GFZ) Potsdam, University of Calgary (UC), Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Finnish Meteorological Institute (FMI) Helsinki, Institute for Space Physics (IRF) Kiruna – implicați în propunerea ALEOS, acceptată de ESA în Februarie 2012 (v. Secțiunea 7).

Proiectul ALEOS interacționează de asemenea cu proiectele PN2 derulate în cadrul GPSM, în principal: *Magnetosphere–ionosphere coupling in the auroral region (M-ICAR)*, program Idei, director de proiect Dr. Octav Marghиту), *VALidation of Swarm L-1b data using multi-point gradient estimation techniques (VALS)*, program STAR, director de proiect Dr. Adrian Blăgău), *Excitation, propagation and dissipation of ULF waves in the magnetosphere (ERODIUM)*, program Resurse Umane, director de proiect Dr. Dragoș Constantinescu). Complementaritatea ALEOS și M-ICAR a permis depășirea dificultăților legate de reducerea cu 55% a finanțării proiectelor Idei în anul 2013 și obținerea de rezultate relevante pentru ambele proiecte.

Raportul de față este structurat astfel:

- Secțiunea 6.2.1: Tehnici de analiză a datelor de câmp magnetic, utilizate pentru caracterizarea structurilor de curent aliniat. În raport prezentăm o metodă pentru determinarea mișcării și orientăției structurilor de curent aliniat, ilustrată cu rezultate bazate pe date sintetice.
- Secțiunea 6.2.2: Efecte multi-scală ale jeturilor de plasmă în magnetosferă, investigate pentru un eveniment conjugat Cluster / THEMIS / sol. Acest eveniment ilustrează procese fizice în sistemul magnetosferă–ionosferă a căror explorare va beneficia în viitor și de datele Swarm.
- Secțiunea 6.2.3: Rezultate obținute în cadrul proiectului – comunicări la conferințe internaționale și articole trimise spre publicare sau în curs de pregătire.

## 6.2. Descrierea științifică și tehnică

### 6.2.1. Tehnici de analiză a datelor de câmp magnetic

Caracterul multi-punct al misiunii Swarm permite preluarea tehnicilor de analiză a datelor dezvoltate pentru misiunea Cluster și adaptarea lor la condițiile specifice Swarm. În particular, întrucât obiectivul cheie al misiunii Swarm este investigarea câmpului magnetic, prezentăm aici două tehnici de caracterizare a mișcării și orientăției structurilor de curent aliniat (FAC) – structuri evidențiate prin măsuratori de câmp magnetic. Descrierea și aplicarea acestor tehnici unui eveniment conjugat Cluster / FAST face obiectul unui articol în pregătire (Bunescu et al., v. 6.2.3).

Structurile FAC reprezintă superpoziții de curenți aliniați cu diferite scale spațiale și temporale, a căror caracterizare adecvată necesită o explorare continuă și multi-scală a intervalelor de timp de interes. În cele ce urmează, prezentăm tehnici care permit determinarea (a) decalajului (*time lag*),  $\tau_0$ , între momentele traversării unei structuri FAC de doi sateliți și (b) orientăției locale a structurii FAC,  $\theta_0$ , ambii parametri fiind necesari pentru estimarea vitezei structurii. În cazul particular al unei structuri planare, des întâlnit la curenții aliniați, cei doi parametri determină viteza relativă a structurii în raport cu sateliții (presupunând că vitezele sateliților sunt aproximativ egale),

$$\mathbf{v}_{rel} = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}}{\tau} \mathbf{n} = \frac{l \cos(\theta - \alpha)}{\tau} \mathbf{n} \quad (1)$$

unde  $\mathbf{n}$  este versorul normal la foaia de curent iar  $\mathbf{l}$  este poziți relativă a celor doi sateliți. Într-un sistem de referință independent de sateliți, de exemplu sistemul câmpului magnetic mediu (*mean field aligned*, MFA), viteza foii de curent este dată de:

$$\mathbf{v}_{sheet} = \mathbf{v}_{rel} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_C) \mathbf{n} = \left( \frac{l \cos(\theta - \alpha)}{\tau} + v_C \cos(\theta - \theta_{v_C}) \right) \mathbf{n} \quad (2)$$

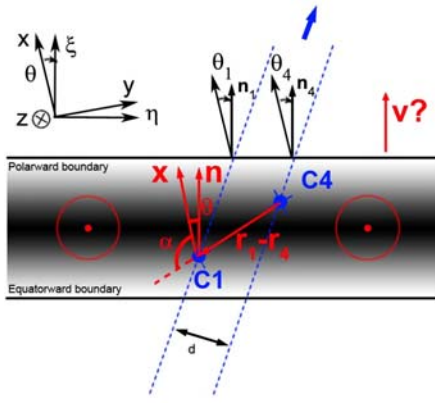
cu  $\mathbf{v}_C$  proiecția vitezei sateliților (Cluster în cazul nostrum) pe planul MFA (x, y), iar  $\theta$ ,  $\alpha$  și  $\theta_{v_C}$  unghiurile făcute de  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{l}$  și  $\mathbf{v}_C$  cu axa x MFA. Geometria traversării foii de curent de către cei doi sateliți este prezentată în Figura 1.

Chiar dacă procedurile specifice de estimare a parametrilor  $\tau_0$  și  $\theta_0$  sunt diferite, caracterul continuu și multi-scală este obținut în mod similar, prin utilizarea unui set de ferestre alunecătoare ale căror lățimi acoperă intervalul de scale relevant, urmată de construcția histogramei rezultatelor peste setul de scale. Procedurile specifice sunt detaliate mai jos.

#### 6.2.1.1. Determinarea decalajului $\tau_0$

Dacă doi sateliți traversează aceeași structură FAC, localizată și staționară, decalajul între cele două traversări poate fi determinat relativ ușor, prin examinarea corelației între parametric specifici măsurăți de cei doi sateliți. De exemplu, decalajul la traversarea magnetopauzei de către doi sateliți „vecini” poate fi găsit prin calculul corelației între seriile temporale ale câmpului magnetic, funcție de  $\tau$ . În acest caz, magnetopauza este prepusă staționară pe scala temporală a traversării sateliților iar câmpul magnetic este, într-adevăr, localizat. Corelația se poate măsura, de exemplu, prin coeficientul de corelație liniară, care își atinge maximul atunci când cele două serii temporale sunt decalate cu valoarea  $\tau_0$  adecvată.

Când structura de interes este extinsă și, posibil, ne-staționară, determinarea decalajului devine mai dificilă, în esență din două motive. În primul rând, decalajul nu mai este un număr unic, ci își poate schimba valoarea de-a lungul traversării, devenind și el o serie temporală. În al doilea rând, dacă structura investigată este rezultatul superpoziției mai multor entități, fiecare entitate poate fi asociată cu un decalaj distinct. O situație de acest tip se întâlnește deasupra ovalului auroral, unde curenți aliniați cu scale spațiale și temporale diverse contribuie la perturbația câmpului magnetic (față de câmpul magnetic mediu, generat de surse interne Pământului). Pentru a investiga astfel de observații, este necesară o analiză de corelație continuă și multi-scală.

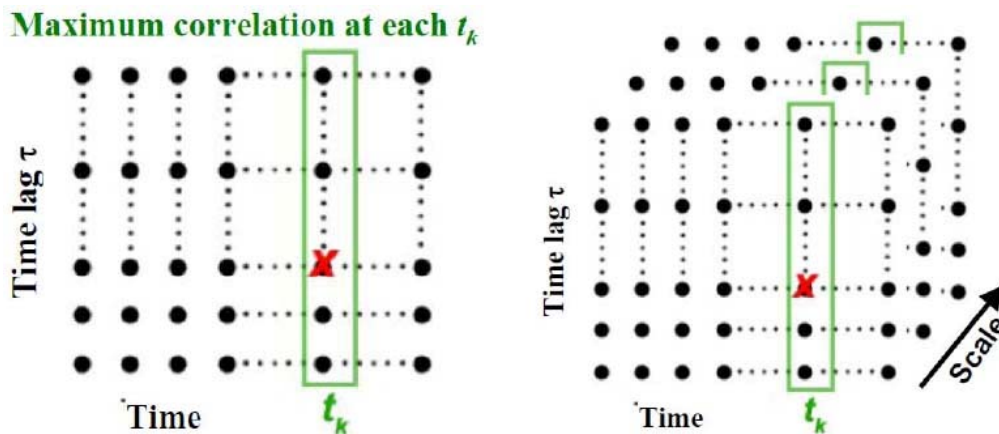


**Figura 1.** Foaie de curent aliniat planară, traversată de doi sateliți “vecini”, C1 și C4 (pot fi sateliți Cluster sau sateliți Swarm). Densitatea de curent este indicată prin nuanța de gri. Sistemul de referință al foii de curent,  $(\xi, \eta)$ , este înclinat față de sistemul MFA,  $(x, y)$ , cu unghiul  $\theta$ . Normalele locale estimate din datele C1 și C4 sunt înclinate cu unghiurile  $\theta_1$  și  $\theta_4$ . Vectorul poziției relative a satelitului C1 față de C4,  $l=r_1-r_4$ , face unghiul  $\alpha$  cu axa  $x$ . Distanța dintre traiectoriile C1 și C4, proiectată pe planul  $(x, y)$ , este  $d$ .

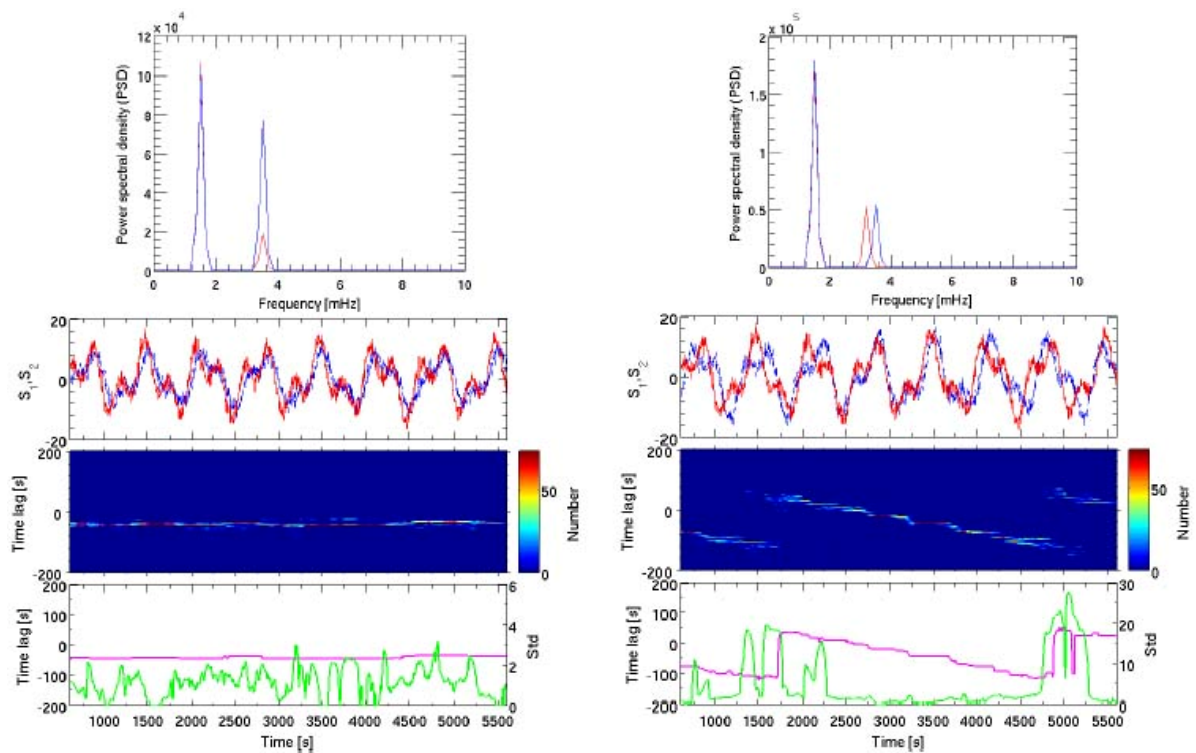
Caracterul continuu se poate obține prin glisarea unei ferestre alunecătoare de lărgime dată,  $w$ , de-a lungul intervalului de timp investigat,  $[t_{initial}, t_{final}]$ , și prin evaluarea corelației pentru fiecare poziție a ferestrei. Figura 2a ilustrează acest proces: Corelația este calculată pentru o serie de timpi  $t_k$  (poziții ale ferestrei), cu rezoluție  $dt$ , și un set de decalaje,  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ , cu rezoluție  $d\tau$ . La fiecare moment (pentru fiecare poziție a ferestrei) corelația devine maximă pentru o anumită valoare a decalajului,  $\tau_0(t)$ , furnizând astfel profilul decalajului peste întreg intervalul de timp,  $[t_{initial}, t_{final}]$ .

Caracterul multi-scală poate fi obținut prin repetarea procedurii de mai sus pentru mai multe lărgimi ale ferestrei alunecătoare, adăugând astfel o dimensiune suplimentară matricii de corelație, dependentă acum de  $(t, \tau, w)$ , în timp ce decalajul depinde de timp și lărgimea ferestrei,  $\tau_0(t, w)$ . Așa cum se arată în Figura 2b, la fiecare moment histograma decalajelor peste setul de scale,  $N(t, \tau)$ , atinge un maxim pentru  $\tau=\tau_0$ , care poate fi privit ca decalaj reprezentativ la momentul respectiv. Într-un mod în esență similar, Soucek et al. (2004) au folosit histogramme peste familii de funcții *wavelet* în scopul identificării de traversări ale magnetopauzei, cu informația de scală codată în funcția *wavelet*.

Un maxim îngust indică faptul că setul de scale ales definește, într-adevăr, o structură iar decalajul reprezentativ găsit este relevant. Un maxim larg și zgomotos arată, pe de altă parte, că metoda nu furnizează un rezultat valid, iar domeniul de scale acoperă de fapt mai multe structuri, a căror evoluție nu poate fi caracterizată printr-un singur decalaj reprezentativ. Tabelul  $\tau_0(t, w)$  poate furniza și o histogramă peste timp,  $N(w, \tau)$ , care indică dependența decalajului de scală. Această opțiune poate fi utilă când ipoteza unei structuri unice este invalidată, i. e. atunci când histograma  $N(t, \tau)$  nu are un maxim îngust.



**Figura 2.** *Stânga:* Reprezentare schematică a matricii de corelație funcție de  $t$  și  $\tau$ , pentru o lărgime dată a ferestrei alunecătoare,  $w$ . La fiecare moment decalajul este asociat cu valoarea maximă a corelației. *Dreapta:* Atunci când scala, i. e. lărgimea ferestrei alunecătoare, este și ea variabilă, valoarea reprezentativă a decalajului la fiecare moment / scală este asociată cu maximumul respectiv în histograma decalajelor peste scale / momente de timp.



**Figura 3.** Superpoziția a două semnale nestaționare, quasi-monocromatice, observate de doi sateliți virtuali cu un decalaj de 40 s. În paneele de sus, densitatea spectrală de putere (*power spectral density*, PSD) măsurată de primul / al doilea satelit este figurată cu linie albastră / roșie. Componenta de frecvență mai joasă, centrată la 1.5 mHz, nu se schimbă, astfel că linia albastră acoperă linia roșie. Pentru componenta de frecvență mai înaltă, măsurată de primul satelit la 3.5 mHz, în stânga amplitudinea scade cu un factor de 2 (i. e. un factor de 4 în PSD), în timp ce în dreapta frecvența scade cu cca. 10%, la 3.2 mHz. Paneele de jos arată cele două semnale în domeniul timp, histograma decalajului peste scalele asociate cu domeniul de frecvențe [1.2, 3.8] mHz, poziția maximului (magenta, axa y stânga) și deviația standard (verde, axa y dreapta) a setului de decalaje din histogramă.

Așa cum am menționat deja, cea mai simplă modalitate de evaluare a corelației este calculul coeficientului de corelație liniară. Totuși, în general, gradul de similaritate între două serii temporale este redat mai bine de abaterea medie pătratică (*root mean square error*, RMSE) a celor două serii, care își atinge minimumul atunci când corelația este maximă. O tehnică alternativă este bazată pe corelația locală a funcțiilor *wavelet* (*local wavelet correlation*, LWC, Soucek et al., 2004), care folosește transformate *wavelet* continue ale celor două serii temporale.

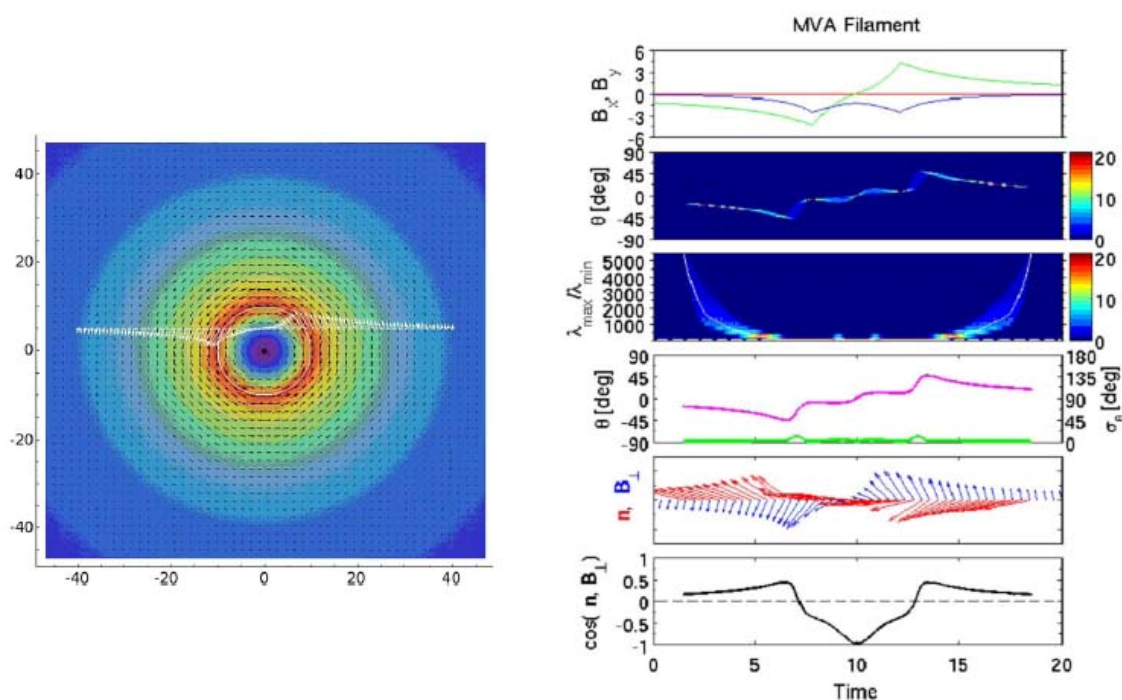
Figura 3 oferă un exemplu simplu de eveniment nestaționar și multi-scală, obținut prin superpoziția a două oscilații quasi-monocromatice, observate mai mult de 1 h. Decalajul între cei doi sateliți este 40 s iar spectrele măsurate sunt prezentate în partea de sus a figurii. În timp ce componenta de frecvență mai joasă nu se schimbă, componenta de frecvență mai înaltă variază în amplitudine (stânga) sau în frecvență (dreapta). Valorile numerice au fost alese în concordanță, grosso-modo, cu observațiile Cluster. Când nestaționaritatea este asociată doar cu modificări în amplitudine, decalajul de 40 s este reprodus cu acuratețe. Pe de altă parte, nestaționaritatea asociată cu modificări în frecvență conduce la un decalaj variabil, cu o perioadă de ~3300 s. Această perioadă corespunde bătăii frecvențelor de 3.2 mHz și 3.5 mHz, a căror diferență,  $\Delta\nu=0.3$  mHz, este echivalentă cu o perioadă de ~3300 s. Decalajul observat diferă de cele 40 s codate în faza semnalelor, similar cu modul în care viteza de grup este diferită de viteza de fază.

### 6.2.1.2. Orientația locală a structurilor FAC, $\theta_0$

Orientația locală a structurilor de current aliniat poate fi determinată folosind date de la un singur satelit prin metoda varianței minime (*minimum variance analysis*, MVA). Similar cu determinarea decalajului  $\tau_0$ , un profil continuu al orientăției,  $\theta(t, w)$ , poate fi obținut prin aplicarea MVA peste o fereastră alunecătoare a cărei lărgime,  $w$ , acoperă un domeniu dat de scale. Estimatul continuu și multi-scală pentru unghiul  $\theta_0$  este furnizat de valoarea  $\theta$  unde histograma  $N(t, \theta)$  peste scale își atinge maximum. La fel ca în cazul  $\tau_0$ , probabilitatea ca acest estimat să fie valid este mare atunci când maximum histogramei este îngust. Dacă seturile  $t$  și  $w$  sunt identice cu cele folosite pentru determinarea decalajului,  $\tau_0$  și  $\theta_0$  pot fi combinate e. g. pentru determinarea vitezei structurilor FAC planare, conform Ec. (1) și (2).

Întrucât sateliții Cluster traversează, de regulă, liniile de camp aurorale unul după altul (în așa numita configurație “șirag de perle” – *string of pearls*), modificarea profilului orientăției între primul și ultimul satelit poate oferi indicii suplimentare asupra dinamicii structurilor FAC. În mod similar, analiza de orientăție va putea fi aplicată sistematic celor doi sateliți Swarm cu orbite paralele, care vor traversa regiunea aurorală separați de cca. 10 s. Spre deosebire de analiza de corelație descrisă mai sus, care necesită doi sateliți, orientăția poate fi examinată via MVA pentru fiecare satelit.

Figura 4 ilustrează aplicarea continuă și multi-scală a tehnicii MVA cu un satelit virtual care traversează un filament omogen de current, de rază  $R$ , la o distanță de  $0.5 R$  față de centru (stânga). Filamentul de current este presupus paralel cu câmpul magnetic mediu iar perturbația magnetică datorată filamentului,  $\Delta\mathbf{B}_\perp$ , este perpendiculară pe acest câmp. Rezultatele (dreapta) sunt obținute pentru un set de scale cu lărgimi în intervalul  $w = [0.5R, 2R]$ .



**Figura 4.** *Stânga:* Câmpul magnetic produs de un curent filamentar de rază  $R$ , cu densitate uniformă (unități arbitrare). Linia albă indică traiectoria unui satelit virtual, care se apropie până la  $0.5 R$  de centrul filamentului. Vectorul câmp magnetic observat de satelit este arătat cu săgeți albe. *Dreapta:* Rezultate ale analizei MVA. a) Câmpul magnetic datorat filamentului de current,  $\Delta B_x$  și  $\Delta B_y$ . b) Histograma unghiurilor obținute prin analiză MVA, aplicată peste un set de ferestre alunecătoare cu  $w=[0.5 R, 2 R]$ ,  $dw=0.05 R$ . c) Histograma raportului valorilor proprii,  $\lambda_{max}/\lambda_{min}$ . d) Unghiul corespunzător maximum histogramei (magenta, axa y stânga) și deviația standard a unghiurilor din histogramă (verde, axa y dreapta). e) Vectorii  $\Delta\mathbf{B}_\perp$  (albastru) și  $\mathbf{n}$  (roșu) de-a lungul traiectoriei. Vectorii  $\mathbf{n}$  sunt roțiți cu  $180^\circ$  pentru a evita suprapunerea săgeților. f)  $\cos \angle (\mathbf{n}, \Delta\mathbf{B}_\perp)$ .

La distanță suficient de mare de centrul filamentului, unde raza de curbură devine mai mare decât scalele utilizate (în cazul nostru  $\geq 2R$ ), profilul  $\Delta\mathbf{B}_\perp$  este asemănător celui produs de o structură plană iar MVA furnizează o normală locală,  $\mathbf{n}$ , perpendiculară pe  $\Delta\mathbf{B}_\perp$  și  $\cos \angle (\mathbf{n}, \Delta\mathbf{B}_\perp) \cong 0$ . În apropierea filamentului,  $\Delta\mathbf{B}_\perp$  are un caracter rotațional iar  $\cos \angle (\mathbf{n}, \Delta\mathbf{B}_\perp)$  diferă semnificativ de 0. Consistent cu caracterul planar / rotațional al perturbației magnetice, raportul valorilor proprii ale matricii de varianță ia valori mari departe de filament și valori mici aproape sau în interiorul filamentului. În lumea reală, ne putem aștepta la o varietate largă de semnături, în funcție de scala structurii FAC, traiectoria satelitelui relativ la structură și intensitatea curentului.

### 6.2.2. Efecte multi-scală ale jeturilor de plasmă în magnetosferă

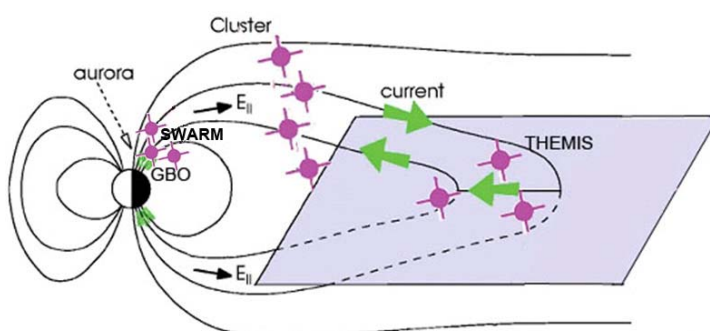
Pentru a putea investiga sistemul M–I–T în toată complexitatea sa, sunt necesare platforme de observație multi-punct în zonele cheie ale sistemului. Măsurători multi-punct furnizate de misiunile Cluster (*Escoubet et al., 2001*) și THEMIS (*Angelopoulos, 2008*) au făcut posibile investigații 3D ale fizicii M–I (e. g. *Keiling et al., 2009; Frey et al., 2010*) iar recent, măsurători Cluster realizate în regiunea de accelerare aurorală (*auroral acceleration region, AAR*) au permis pentru prima dată investigarea configurației spațiale și evoluției temporale a potențialului electric asociat AAR (*Marklund et al., 2011*).

Odată cu lansarea Swarm, date multi-punct vor deveni disponibile și la capătul I–T al sistemului, complementare celor obținute de Cluster în zona superioară a AAR și de THEMIS în zona interioară a foii de plasmă (Figura 5). În acest fel, datele multi-punct vor acoperi toate zonele cheie ale circuitului de curent auroral: generatorul magnetosferic (THEMIS), AAR (Cluster) și ionosfera–termosfera rezistivă (Swarm). O rețea densă de observatoare la sol, incluzând camere de luat vederi, radare și magnetometre, furnizează în plus informații contextuale ample, care contribuie la interpretarea datelor *in-situ*.

Investigarea unui eveniment de cuplaj M–I, observat pe 25 Februarie 2008 și identificat în cadrul proiectului POLARIS, ilustrează posibilitățile de analiză oferite de platformele satelitare amintite, împreună cu observatoare terestre. În acest caz, jeturi de plasmă observate de trei sateliți THEMIS (TH-A, TH-D și TH-E) în magnetosferă sunt asociate cu efecte de scală mare, medie și mică:

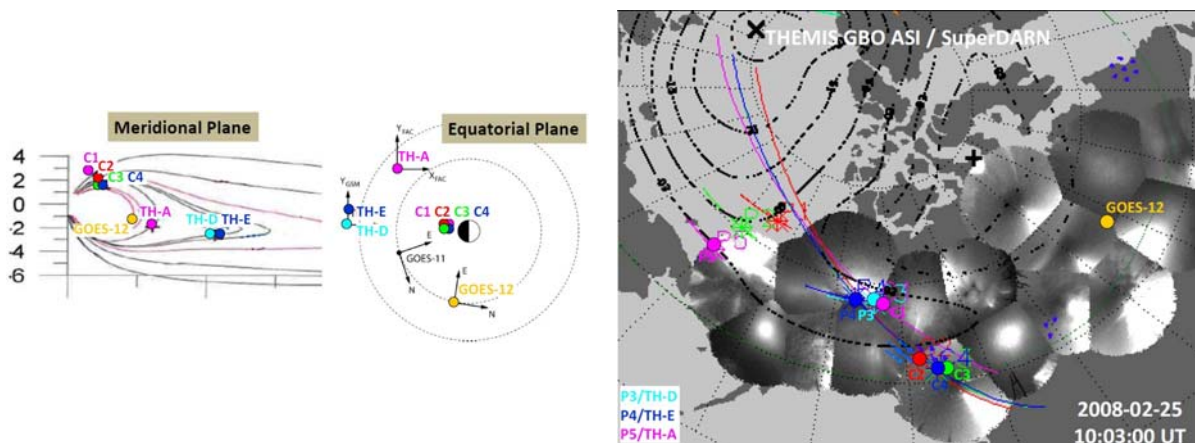
- Pulsații Pi2 de scală mare sunt înregistrate de stații magnetice la sol și de satelitul GOES-12, care acoperă un domeniu larg de latitudini și longitudini, din zona polară până spre ecuator, pe întreaga lățime a Americii de Nord.
- Pe scală medie, mișcarea de convecție a plasmei prezintă o semnătură de tip rotațional, evidențiată atât în datele THEMIS cât și la nivel ionosferic, cu ajutorul hărților de curenți ionosferici echivalenți (*equivalent ionospheric current, EIC*).
- Pe scală mică, episoadele de intensificare a jeturilor de plasmă în magnetosferă sunt correlate cu pachete de electroni de energie joasă, accelerați de unde Alfvén dispersive și observați de satelitul Cluster 1 (C1) la o altitudine de aproximativ 2 raze terestre.

În continuare prezentăm succint cele trei efecte menționate. O descriere detaliată face obiectul unui articol în pregătire (*Marghitu et al., v. 6.2.3*) iar aspecte specifice referitoare la pulsațiile Pi2, respectiv la relația dintre jeturile de plasmă și accelerarea electronilor, sunt tratate în două articole trimise spre publicare (*Keiling et al., 2013, Nakamura et al., 2013, v. 6.2.3*).



**Figure 5.** Schiță a sateliților Swarm, Cluster, și THEMIS, localizați imediat deasupra ionosferei, în zona superioară a regiunii de accelerare aurorală (indicată prin  $E_{||}$ ) și în zona interioară a foii de plasmă. După *Marghitu (2012)*.





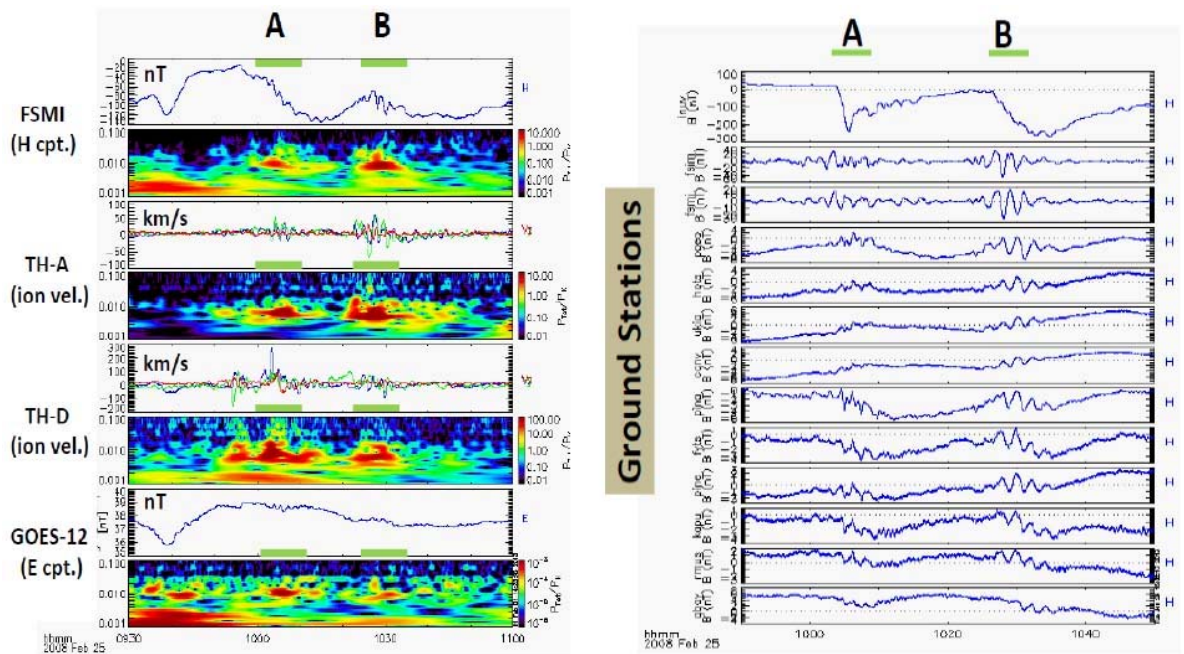
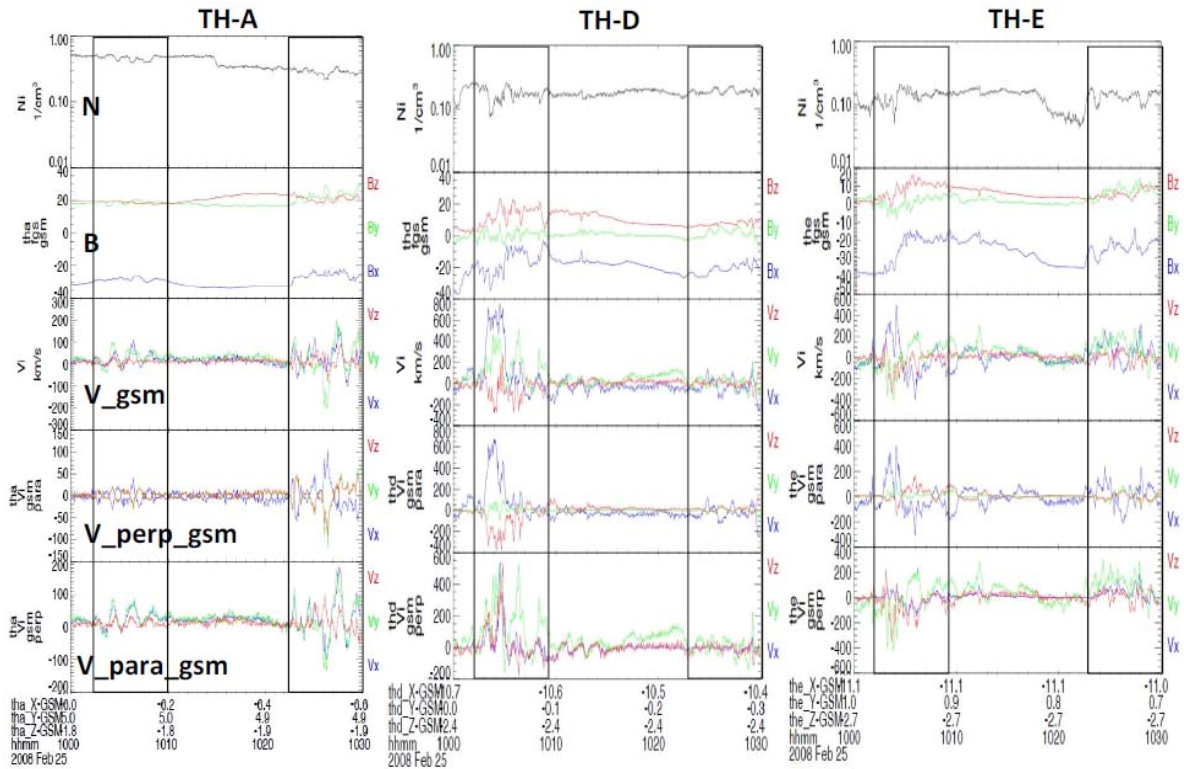
**Figura 6.** Stânga: Proiecțiile sateliților THEMIS, Cluster și GOES-12 pentru evenimentul din 25 Februarie 2008, în planul meridional și ecuatorial al magnetosferei. După Keiling *et al.* (2013). Dreapta: Proiecțiile sateliților la nivel ionosferic, în lungul liniilor de câmp magnetic, la 10:03:00 UT. Proiecțiile sunt suprapuse peste o imagine „mozaic”, obținută cu ajutorul camerelor de luat vederi ASI (All sky imagers) din rețeaua THEMIS GBO (Ground based observatories), și peste contururi echipotențiale asociate convecției ionosferice, bazate pe măsurătorile radarelor SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network). Figură realizată de Harald Frey.

Figura 6 arată proiecțiile sateliților relevanți în planul meridional și ecuatorial al magnetosferei (stânga), respectiv proiecțiile la nivel ionosferic (dreapta), suprapuse peste o imagine „mozaic” THEMIS GBO și peste contururi echipotențiale bazate pe măsurători SuperDARN. Proiecțiile ionosferice sunt realizate pentru momentul 10:03:00 UT, la începutul primei serii de jeturi de plasmă observate în magnetosferă. În cele cca. 7 minute cât durează această serie, sateliții TH-D și TH-E sunt în conjuncție cu C1 (pe linii de câmp magnetic foarte apropiate) iar datele optice indică traversarea concomitentă a unui arc auroral cu mici variații ale intensității luminoase (v. mai jos).

La nivel magnetosferic, sateliții TH-A, TH-D și TH-E observă două serii de jeturi de plasmă, în intervalele 10:03–10:10 UT, respectiv 10:23–10:30 UT, TH-D și TH-E în apropiere de meridianul miezului nopții, respectiv TH-A cca. 2.5 h mai devreme în timp magnetic local. Observațiile celor trei sateliți THEMIS, prezentate în partea de sus a Figurii 7, corespund unui interval de timp relativ liniștit la scala globală a magnetosferei, favorabil studiului efectelor multi-scală. Prima serie de jeturi este mai intensă în datele TH-D și TH-E, cu viteze de până la 800 km/s, în timp ce pentru a doua serie vitezele mai mici, până la 200 km/s, sunt comparabile și în datele TH-A. Vitezele diferite observate de un satelit sau altul este probabil să aibă legătură cu poziția satelitului față de zona centrală a jetului de plasmă, cu TH-D și TH-E aflați în proximitatea acestei zone pentru prima serie de jeturi.

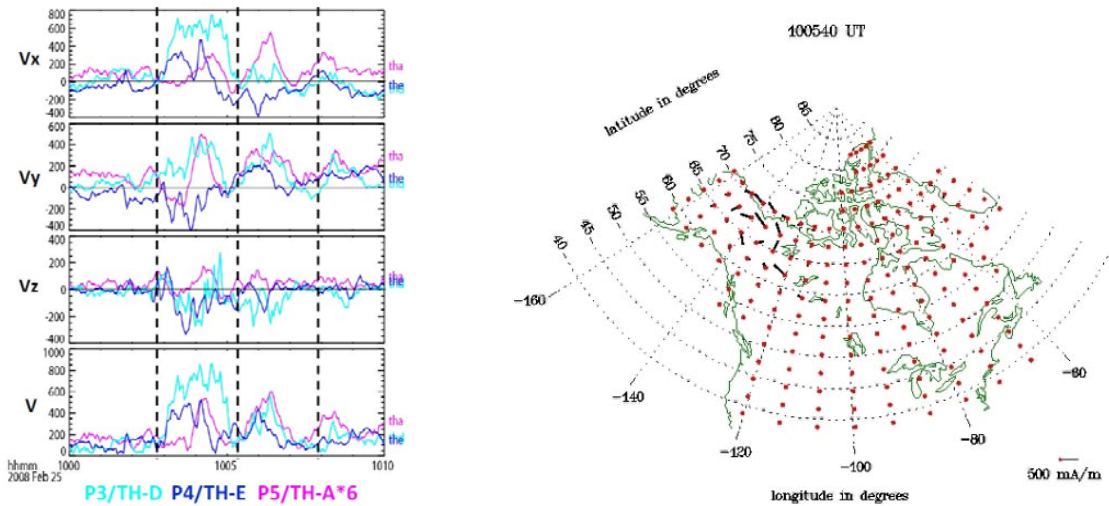
Ambele serii de jeturi sunt asociate cu pulsații Pi2 de scală mare, vizibile atât în oscilațiile vitezei plasmei observate de sateliții THEMIS, cât și în oscilațiile câmpului magnetic, observate de satelitul geostaționar GOES-12 și de stații magnetice la sol. În partea de jos a Figurii 7 sunt prezentate serii temporale și spectrograme wavelet corespunzătoare de la TH-A, Fort Smith (FSMI), TH-D și GOES-12, separate în longitudine, respectiv serii temporale de la stațiile magnetice la sol, separate și în latitudine. Asocierea între cele două serii de jeturi de plasmă și episoadele de pulsații Pi2 este evidentă.

O examinare atentă a componentelor vitezei plasmei, prezentate în Figura 8 (stânga) pentru prima serie de jeturi, indică o mișcare rotațională, consistentă cu simulările numerice (Birn *et al.*, 2004) și observațiile anterioare (e. g. Keiling *et al.*, 2009). În același timp, hărțile EIC bazate pe date magnetice observate la sol, arată o mișcare rotațională și la nivelul ionosferei. Figura 8 (dreapta) ilustrează această mișcare la 10:05:40 UT, când „vârtejul” de scală medie al curentului ionosferic echivalent este vizibil deasupra zonei de nord-vest a Canadei.



**Figura 7.** *Sus*: Densitatea plasmei, câmpul magnetic și viteza plasmei observate de sateliții TH-A, TH-D și TH-E în magnetosferă. Benzile verticale indică două serii de jeturi de plasmă, vizibile în principal în viteză. Concomitent, se observă oscilații în densitatea / viteza plasmei și în câmpul magnetic.

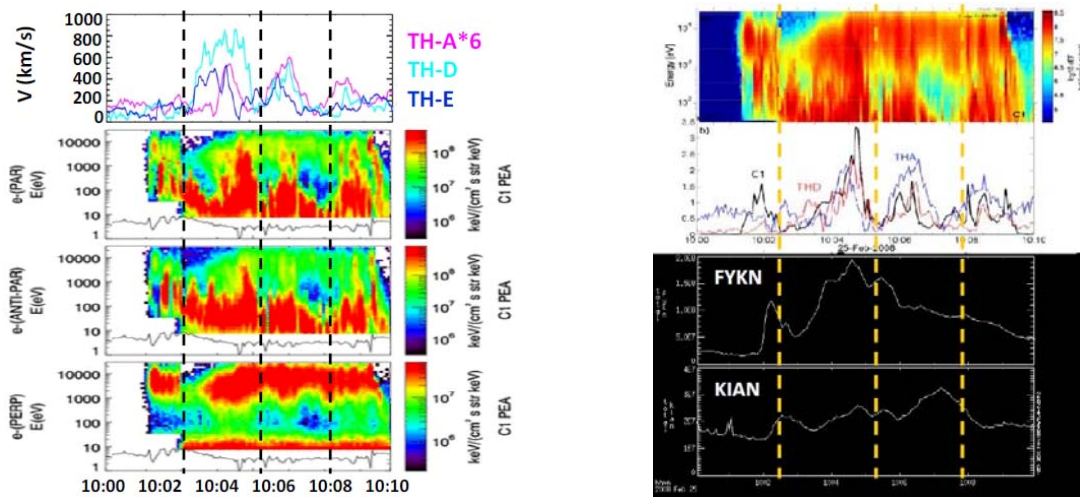
*Jos*: Componenta oscilatorie are caracter global (*Keiling et al., 2013*), fiind vizibilă atât în datele măsurate *in-situ* (TH-A, TH-D, GOES-12) cât și în datele magnetice de la sol. Segmentele verzi A și B indică episoadele de pulsații Pi2, asociate cu cele două serii de jeturi de plasmă.



**Figura 8.** *Stânga:* Componentele și valoarea absolută a vitezei plasmei observate de TH-A (magenta), TH-D (cyan), TH-E (albastru), în intervalul 10:00–10:10 UT, pentru prima serie de jeturi de plasmă. Sunt vizibile trei jeturi, indicate cu linii punctate verticale.

*Dreapta:* Curentul ionosferic echivalent, bazat pe date magnetice la sol, la 10:05:40 UT. Se observă o structură rotațională deasupra zonei de nord-vest a Canadei. Figură realizată de Olaf Amm.

Componenta oscilatorie a vitezei plasmei, cu perioada de  $\sim 100$  s, în domeniul de frecvențe Pi2, este consistentă cu frânarea jetului de plasmă în regim quasi-periodic – asemănător cu frânarea oscilației unui resort elastic. Examinarea teoretică a acestui proces (Wolf et al., 2012) arată că în procesul de frânare se emit unde Alfvén dispersive, care pot accelera electronii la altitudini de 1–2  $R_E$ , la nivelul AAR. În cazul nostru, satelitul C1, conjugat cu TH-D și TH-E în timpul primei serii de jeturi, observă într-adevăr trei pachete de electroni de energie  $< 0.5$  keV, accelerați de unde Alfvén dispersive. Așa cum arată Figura 9 (stânga), cele trei pachete de electroni sunt foarte bine corelate cu jeturile de plasmă. În același timp, datele optice din Figura 9 (dreapta) indică și ele o anumită corelație a intensității luminoase cu pachetele de electroni. Gradul de corelație este mai scăzut intrucât, pe de-o parte, intensitatea luminoasă este integrată peste tot câmpul vizual, iar pe de altă parte luminozitatea arcului auroral depinde în principal de precipitația electronică cu energie  $> 1$  keV.



**Figura 9.** *Stânga:* Viteza absolută a plasmei observată de TH-A, TH-D, TH-E și spectrograme energetice pentru electronii observați de C1 în direcție paralelă, anti-paralelă și perpendiculară față de câmpul magnetic (scala de culoare diferă de la un panel la altul). Fluxurile mari de electroni de energie joasă, în direcție paralelă și anti-paralelă, sunt accelerate de unde Alfvén dispersive.

*Dreapta:* Spectrograma energetică omni-direcțională C1 pentru electroni, fluxul energetic C1 al electronilor de energie joasă comparat cu viteza plasmei TH-A, TH-D, TH-E și intensitatea luminoasă integrată observată de camerele THEMIS GBO de la Fort Yukon și Kian.

### 6.2.3. Rezultate

#### 6.2.3.1. Articole în reviste ISI

##### 6.2.3.1.1. Articole trimise spre publicare

- Keiling, O. Marghitu, J. Vogt, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, M. Hamrin, T. Karlsson, R. Nakamura, H. Nilsson, J. Semeter, E. Sorbalo, *Magnetosphere-ionosphere coupling of global Pi2 pulsations*, J. Geophys. Res., submitted, 2013.
- R. Nakamura, M. Hamrin, T. Karlsson, H. Nilsson, O. Marghitu, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, A. Keiling, J. Semeter, E. Sorbalo, J. Vogt, M. Kubyskhina, *Low-altitude electron acceleration due to multiple flow-bursts in the magnetotail*, Geophys. Res. Lett., submitted, 2013.

##### 6.2.3.1.2. Articole în pregătire

- C. Bunescu, O. Marghitu, J. Vogt, A. Blagau, *Field-aligned current dynamics as observed by Cluster during a late substorm recovery Pc5 event*.
- O. Marghitu, J. Vogt, A. Keiling, O. Amm, H. Frey, R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, C. Bunescu, E. Sorbalo, V. Constantinescu, H. Nilsson, J. Semeter, *Multi-scale M-I coupling effects of magnetotail flow bursts*.

#### 6.2.3.2. Prezentări la conferințe internaționale

##### 6.2.3.2.1. Prezentări invitate

- C. Bunescu, O. Marghitu, J. Vogt, *Field-aligned current dynamics above the auroral oval: Method and Cluster event study*, International Workshop on Advances and perspectives in auroral plasma physics, Aussois, France, April 2013a.
- O. Marghitu, J. Vogt, A. Keiling, R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, O. Amm, H. Frey, C. Bunescu, E. Sorbalo, V. Constantinescu, H. Nilsson, J. Semeter, *Magnetosphere-ionosphere coupling associated with magnetotail flow bursts: A conjugate THEMIS/Cluster/ground event*, International Living With a Star Workshop, Irkutsk, Russia, June 2013a.
- O. Marghitu, *Prospects for exploring auroral electrodynamics with MIT*, Magnetosphere, Ionosphere and Thermosphere Forum at ISSI-BJ, Beijing, China, November 2013a.
- O. Marghitu, *Longitudinal gradients in auroral electrodynamics*, 3rd International Conference on Storms, Substorms, and Space Weather (ICSSSW), Shenzhen, China, November 2013b.

##### 6.2.3.2.2. Prezentări orale

- Bunescu, O. Marghitu, J. Vogt, A. Blagau, *Field-aligned current dynamics above the auroral oval: Method and Cluster events*, MPE-JUB Symposium on Auroral physics and plasma boundary analysis, Garching, Germany, July 2013b.
- O. Marghitu, J. Vogt, A. Keiling, R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, O. Amm, H. Frey, C. Bunescu, E. Sorbalo, V. Constantinescu, H. Nilsson, J. Semeter, *Magnetosphere-ionosphere coupling associated with magnetotail flow bursts: A conjugate THEMIS/Cluster/ground event*, MPE-JUB Symposium on Auroral physics and plasma boundary analysis, Garching, Germany, July 2013b.
- O. Marghitu, J. Vogt, A. Keiling, O. Amm, H. Frey, R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, C. Bunescu, E. Sorbalo, V. Constantinescu, H. Nilsson, J. Semeter, *Multi-scale M-I coupling effects of magnetotail flow bursts: Event study by Cluster, THEMIS, GOES, and ground stations*, 23rd Cluster Workshop, Tromsø, Norway, September 2013c.

- R. Nakamura, M. Hamrin, T. Karlsson, H. Nilsson, O. Marghitsu, J. Vogt, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, A. Keiling, J. Semeter, E. Sorbalo, M. Kubyshkina, *Cluster-THEMIS conjugate observations during multiple flow bursts in the magnetotail*, 23rd Cluster Workshop, Tromsø, Norway, September 2013c.
- Keiling, O. Marghitsu, J. Vogt, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, M. Hamrin, T. Karlsson, R. Nakamura, H. Nilsson, J. Semeter, E. Sorbalo, *Magnetosphere-ionosphere coupling of global Pi2 pulsations*, 23rd Cluster Workshop, Tromsø, Norway, September 2013b.

#### 6.2.4. Bibliografie

- Angelopoulos, V., *The THEMIS Mission*, Space Sci. Rev., doi: 10.1007/s11214-008-9336-1 (2008).
- Birn, J., J. Räder, Y.L. Wang, R.A. Wolf, and M. Hesse, *On the propagation of bubbles in the geomagnetic tail*, Ann. Geophys., 22, 1773 – 1786 (2004).
- Escoubet, C. P., M. Fehringer, and M. Goldstein, *The Cluster mission*, Ann. Geophys., 19, 1197-1200 (2001).
- Frey, H. U., et al., *Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc*, J. Geophys. Res., 115, A10209, doi:10.1029/2010JA015537 (2010).
- Keiling, A., V. Angelopoulos, A. Runov, J. Weygand, S.V. Apatenkov, S. Mende, J. McFadden, D. Larson, O. Amm, K.-H. Glassmeier, and H.U. Auster, *Substorm current wedge driven by plasma flow vortices: THEMIS observations*, J. Geophys. Res., 114, A00C22, doi:10.1029/2009JA014114 (2009).
- Marklund, G.T., S. Sadeghi, T. Karlsson, P.-A. Lindqvist, H. Nilsson, C. Forsyth, A. Fazakerley, and J. Picket, *Altitude distribution of the auroral acceleration potential determined from Cluster satellite data at different heights*, Phys. Rev. Lett. 106, 055002 (2011).
- Marghitsu, O., *Auroral arc electrodynamics: Review and outlook*, in: Relationship between auroral phenomenology and magnetospheric processes: Earth and other planets, Eds. A. Keiling, E. Donovan, F. Bagenal, T. Karlsson, AGU Geophysical Monograph Series, 197, 143–158, doi:10.1029/2011GM001189, 2012.
- Soucek, J., T. Dudok de Wit, M. Dunlop, and P. Décréau, *Local wavelet correlation: application to timing analysis of multi-satellite CLUSTER data*, Ann. Geophys., 22, 4185-4196, doi:10.5194/angeo-22-4185-2004 (2004).
- Wolf, R.A., C.X. Chen, and F.R. Toffoletto, *Thin filament simulations for Earth's plasma sheet: Interchange oscillations*, J. Geophys. Res., 117, A02215, doi: 10.1029/2011JA016971 (2012).

## 7. Contextul și contribuția la programele ESA

Conform Secțiunii 1.3, *Aligning the project activities with ESA Programs*, din Propunerea de proiect:

Ulterior anunțului ESA referitor la *Swarm Science and Validation Opportunity (SSVO)*, August 2011, în cadrul Programului Earth Observation, un colectiv internațional coordonat de directorul proiectului ALEOS a transmis către ESA propunerea științifică *Auroral electrodynamics with Swarm (ALEOS). Implications for the magnetosphere-ionosphere-thermosphere system*. Propunerea a fost acceptată în Februarie 2012, ceea ce asigură proiectului ALEOS acces la datele Swarm relevante. În acord cu regulile ESA, resursele necesare pentru implementarea proiectului se asigură la nivel național.

Cu referire la obiectivele misiunii Swarm, ALEOS va contribui direct la *Investigation of electric currents flowing in the magnetosphere and ionosphere* și la *Quantification of the magnetic forcing of the upper atmosphere, including studies of thermosphere densities and winds*. Prin îmbunătățirea înțelegerii curenților ionosferici, ALEOS poate contribui de asemenea la separarea câmpului

magnetic intern de cel extern și prin aceasta la acuratețea determinării câmpului intern, relevant pentru obiectivele *Swarm Studies of core dynamics, geodynamo processes, and core-mantle interaction* și *Mapping of the lithospheric magnetisation and its geological interpretation*. Examinarea conjugată a câmpului electric, câmpului magnetic și vântului neutru folosind date de la cei doi sateliți Swarm pe orbite paralele sau de la toți cei trei sateliți poate ajuta și efortul de validare a datelor.

Dintr-o perspectivă mai largă, problematica științifică ALEOS este relevantă pentru Programul ESA Cosmic Vision 2015–2025, în particular pentru *Tema 2* a acestui Program, *How does the solar system work?* În acest context, proiectul ALEOS beneficiază de rezultate obținute în cadrul proiectului PECS *Energy conversion and transfer in the solar wind – magnetosphere – ionosphere system (ECSTRA)*, <http://gpsm.space-science.ro/ecstra>. Directorul de proiect ALEOS a fost Investigator Principal ECSTRA iar echipa implicată în realizarea ALEOS a participat de asemenea la Programul PECS.

Directorul de proiect ALEOS împreună cu Dr. Adrian Blăgău participă și la activități de validare a datelor Swarm în cadrul proiectului *Validation of Swarm L-1b products in the topic areas of geomagnetic field, ionosphere/thermosphere, and geodesy*, propus către ESA în urma SSVO și coordonat de Prof. Hermann Lüher, GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, Co-PI al misiunii Swarm. Proiectul se bucură de sprijinul Agenției Spațiale Germane (DLR) și al ESA. Participarea la activitățile Swarm de validare a datelor va permite accesul direct atât la date de calitate cât și la expertiză specifică. Contribuția la validarea datelor Swarm, coordonată de Dr. Adrian Blăgău, face obiectul proiectului VALS, acceptat la finanțare în cadrul Programului STAR.

## 8. Concluzii

Activitățile desfășurate pe parcursul celei de-a doua Etape a proiectului ALEOS pregătesc utilizarea datelor Swarm, răspunzând astfel obiectivelor planificate. Cu toate că lansarea Swarm a avut loc pe 22 Noiembrie 2013, cu un an mai târziu față de data prevăzută la momentul redactării propunerii de proiect, rezultatele obținute creează premise optime pentru derularea în continuare a proiectului și pentru atingerea țintelor propuse.

Director de proiect

Dr. Octav Marghitu



## ANEXA RST

## Indicatori de monitorizare/rezultat

Nr. crt.	Denumirea indicatorului	
1	sume atrase prin participarea la programele ESA (EURO)	
2	nr. de nișe CDI identificate	3
3	nr. de programe opționale ESA la care se participă <sup>1</sup>	1 (Earth Observation)
4	nr. de misiuni spațiale ESA la care participă entitățile implicate în realizarea proiectului <sup>2</sup>	2 (Swarm, Cluster)
5	nr. de experimente și sarcini utile îmbarcabile la bordul misiunilor ESA	
6	nr. de centre de profil nou înființate	
7	nr. de institute naționale de CDI / entități de CDI / universități participante la realizarea proiectului	1
8	nr. entități din industrie participante la realizarea proiectului	
9	nr. de companii naționale aflate în lanțul de furnizori pentru marii integratori de produse spațiale <sup>3</sup>	
10	ponderea participării diverselor entități în cadrul proiectului (industrie, institute naționale de CDI, entități de CDI, universități) (%) (se raportează bugetul total alocat entității pe etapa la bugetul total al proiectului)	INCD – 100 %
11	nr. de cursuri de instruire/perfecționare organizate	
12	nr. activități de diseminare organizate (workshopuri/seminarii/conferințe etc.)	9 prezentări la conferințe internaționale (v. 6.2.3.2)
13	nr. cereri brevete depuse national/international	
14	nr. brevete înregistrate national/international	
15	nr. articole publicate sau acceptate spre publicare <sup>4</sup>	2 articole trimise spre publicare (v. 6.2.3.1)
16	nr. cărți publicate sau acceptate spre publicare <sup>5</sup>	

<sup>1</sup>) se vor preciza denumirile programelor optionale ale ESA la care se participă

<sup>2</sup>) se vor preciza denimirile misiunilor spațiale ESA la care se participă

<sup>3</sup>) se va preciza denumirea integratorului(lor) de produse spațiale

<sup>4</sup>) se anexează lista articole

<sup>5</sup>) se anexează lista cărți