

Swarm-missionen og Jordens magnetfelt

Af Eigil Friis-Christensen, forhenværende direktør, DTU Space og Nils Olsen, DTU Space

For to år siden, den 22. november 2013, sendte Det europæiske Rumfartsagentur, ESA, tre satellitter i kredsløb i forskellige baner omkring Jorden. Målet med missionen er at opnå de hidtil bedste målinger af Jordens magnetfelt med henblik på at opnå ny viden om de fysiske processer i Jordens indre og i Jordens omgivelser til gavn for videnskaben og de mange anvendelser, som er knyttet til præcis viden om Jordens magnetfelt. Missionen, der har navnet "Swarm", er foreslået og udviklet af et internationalt konsortium med dansk videnskabelig ledelse.

Baggrund

Den førende danske position inden for dette forskningsområde er ikke tilfældig, men bygger på samarbejdet i og erfaringerne fra den første danske videnskabelige satellit, Ørsted, som blev sendt op i 1999, og som leverede videnskabelige data næsten frem til opsendelsen af Swarm. Ørsted-satellittens hovedinstrument, som måler den magnetiske feltvektor i rummet, bygger på en helt ny teknologi udviklet på Danmarks Tekniske Universitet, DTU. Ørsted-satellitten var banebrydende ikke alene inden for geomagnetisk forskning, men også fordi det var den første minisatellit (ca. 60 kg), som ikke blot var en teknologidemonstration, men som gav helt nye videnskabelige resultater, der er sammenlignelige med eller bedre end resultater fra langt dyrere satellitter. Ørsted-satellitten vakte fra første færd stor interesse i internationale forskningskredse. Denne interesse blandt forskere kunne udnyttes til at etablere et frugtbart samarbejde med NASA, som betalte for opsendelsen, og som tillige havde midler til amerikanske forskeres anvendelse af Ørsted-satellittens målinger. Så snart den danske bevilling til Ørsted-satellitten forelå, seks år før opsendelsen, blev der i projektet etableret et internationalt "science team", som blev inddraget aktivt i forberedelsen af missionen. En styrke i dette rumfartssamarbejde var, at det som noget nyt omfattede forskere inden for discipliner vedrørende både den faste jords fysik og ionosfære- og magnetosfæreforskningen.

Dette samarbejde betød, at da muligheden forelå, kunne gruppen udarbejde og til ESA fremsende et videnskabeligt og teknologisk gennemarbejdet projektforslag, Swarm, som i hård konkurrence blandt flere end 25 forslag inden for mange forskellige forskningsfelter, i 2004 blev udvalgt til at være den femte mission i ESA's Explorer-serie inden for dets "Earth Observation Programme".

Det geomagnetiske felt

Det magnetiske felt udgør kilden til en af de stærkeste kræfter, som påvirker partikler overalt i universet. Også på vores planet er magnetfeltet en dominerende kraft, som er styrende for forholdene i Jordens magnetosfære, hvilket er området beliggende fra den øverste ioniserede del af atmosfæren (i omkring 100 km højde) ud til det område, hvor Solens magnetfelt dominerer, hvilket i retning mod Solen er mellem 10 og 15 jordradier. Ikke desto mindre er vores forståelse af oprindelsen af det geomagnetiske felt og dets dynamik – for ikke at tale

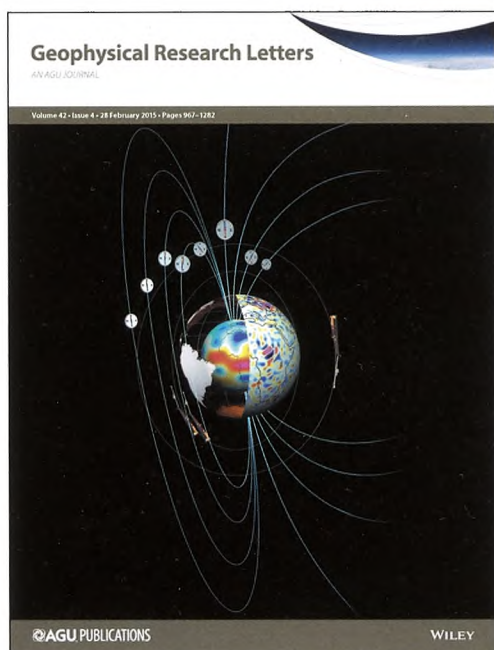
om vores mulighed for at forudsige udviklingen heri – meget lille.

Engang vurderede Einstein oprindelsen af Jordens magnetiske felt til at være blandt de tre mest vigtige og uløste problemer i fysikken. På Einsteins tid gik nogle fysikere endog så vidt at postulere nye naturlove for at forklare geomagnetismen. I dag ved vi, at magnetfeltet skabes af en dynamo i Jordens flydende ydre kerne, hvor smeltet jern og nikkel bevæger sig med op til 30 km/år for derved at danne et elektrisk strømsystem. Men endnu ved vi ikke i detaljer, hvordan dynamoen virker, og hvorfor dipolfeltet er blevet 10 % mindre gennem de seneste 150 år. Vil dette fortsætte og føre til en polvending inden for de næste hundrede eller tusind år? Dette er sket mange gange før, sidste gang for 780.000 år siden. Men vi er nu omsider tæt på at have globale data med den nødvendige rumlige og tidslige opløsning samt tilstrækkelig computerkraft til at kunne efterprøve mange af de fremsatte teorier og modeller for oprindelsen af Jordens magnetfelt og dets tidslige variationer.

Det geomagnetiske felt er ikke alene relevant for forståelsen af dannelsen og udviklingen af vores egen planet. Jordens magnetfelt vekselvirker med solvinden, som er en varierende plasma bestående af ioniserede partikler og tilhørende magnetfelt, som til stadighed udsendes fra Solen. Jordens magnetosfære tilpasser sig hele tiden solvindens tryk og magnetfelt. Det sker gennem fysiske processer, som vi kalder rumvejret. Vi kan observere rumvejret, både gennem in situ målinger på satellitter i kredsløb og gennem dets virkninger på Jorden, for eksempel i form af magnetiske storme, som giver kraftige elektriske strømme i den øverste del af atmosfæren ledsaget af nordlys. Men de globale fysiske processer, som er anledning hertil, er endnu ikke tilstrækkeligt forstået, til at vi kan forudsige virkningen på Jorden af variationer i Solens output. Flere internationale forsknings- og satellitprojekter er iværksat for at øge vores viden på dette område. Med Swarm-missionen har ESA tilvejebragt de hidtil mest nøjagtige observationer af Jordens magnetfelt og dets tidslige variationer.

Kilderne til magnetfeltet

De mest nøjagtige observationer af Jordens magnetfelt er midlet, men ikke målet med missionen. Det videnskabelige mål er at anvende målingerne til at opnå den bedste viden om og forståelse af kilderne til magnetfeltet.



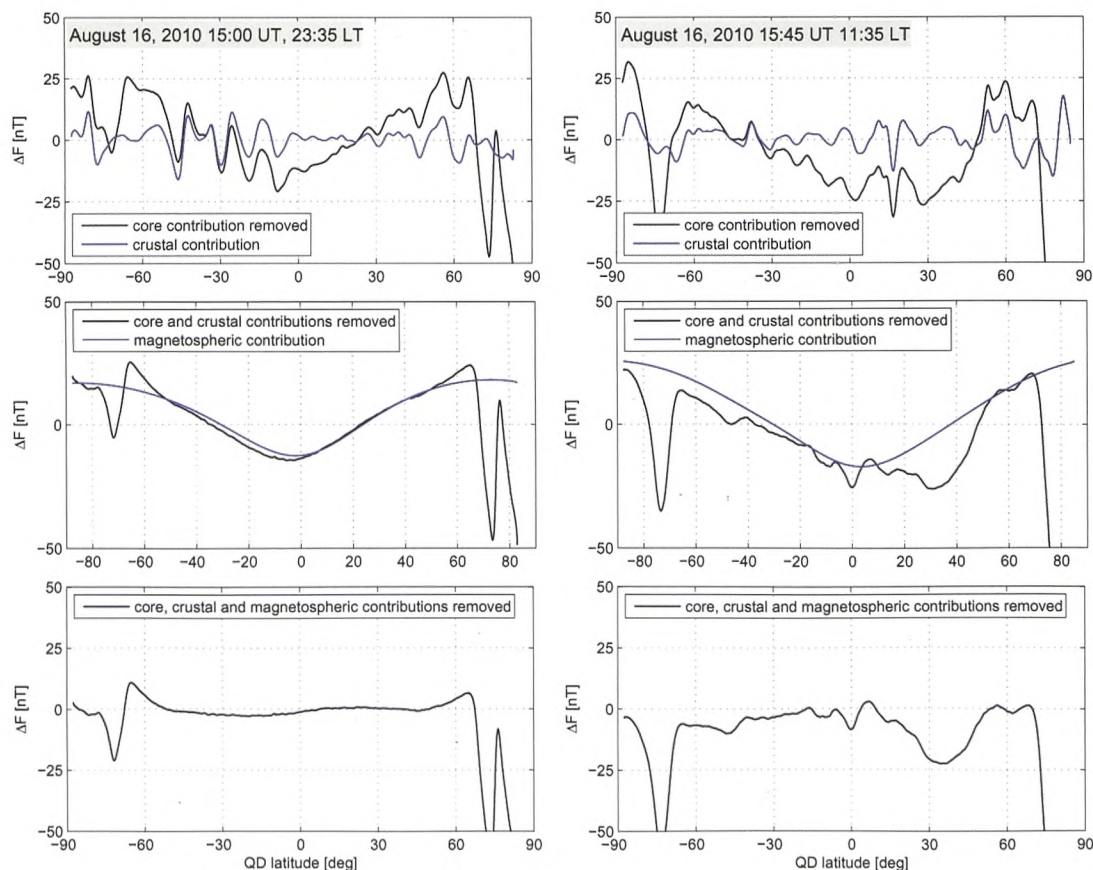
Figur 1. Figuren viser en tredimensionel præsentation af resultaterne af analysen af det første års data vedr. feltet fra Jordens kerne i 3000 km dybde samt fra feltet i Jordens skorpe.

Kilderne til Jordens magnetfelt er illustreret i figur 1 taget fra forsiden af tidsskriftet Geophysical Research Letters. Figuren viser nogle af resultaterne af analysen af det første års data. Kilderne til magnetfeltet kan opdeles i to kategorier: Elektriske strømme og magnetiseret materiale. Elektriske strømme findes overalt i Jorden og dens omgivelser. Det mest betydende af disse

strømsystemer findes i Jordens flydende, metalliske kerne i en dybde på mere end 3000 km. Udbredte strømsystemer med langt svagere strømme findes i magnetosfæren og i ionosfæren og faktisk også i oceanerne, idet saltvand er elektrisk ledende. Magnetiseret materiale findes især i Jordens skorpe (de øverste 5 til 30 km) i form af bjergarter. Det målte felt herfra er illustreret i figur 1 sammen med det geomagnetiske felt ved grænsen mellem kappen og Jordens flydende kerne i 3000 km dybde.

I Jordens kappe (dvs mellem 30 og 3000 km dybde) er temperaturen for høj, til at der kan eksistere en permanent magnetisering, men da kappen er elektrisk ledende, findes også her elektriske strømme. Disse strømme er induceret gennem ændringer i det magnetiske felt fra de elektriske strømme i ionosfæren og i magnetosfæren. I sagens natur er de inducerede strømme endnu svagere end de primære strømme, men simuleringsforsøg har vist, at når satellitterne i løbet af nogle år har nået deres optimale baner, kan vi med Swarm-missionens nøjagtige målinger forvente de første resultater nogensinde om strukturen af kappens ledningsevne i tre dimensioner, dvs. som funktion af både beliggenhed og dybde.

Vi kan få en fornemmelse af sammenhængen mellem de forskellige bidrag til det målte magnetfelt i satellithøjde ved at se på figur 2. Venstre side af figur 2 viser den del af satellittens bane, som ligger på natsiden, medens højre side beskriver feltet på dagsiden. Målingerne er fra den tyske CHAMP-satellit, som havde en lavere bane end Ørsted og derfor var særlig velegnet til at måle detaljerne i feltet fra skorpen og ionosfæren.



Figur 2. Målinger af magnetfeltet gennem et omløb af den tyske CHAMP-satellit. Figuren viser bidragene fra de forskellige kilder på hhv. nat- og dagsiden. Se teksten for yderligere detaljer.

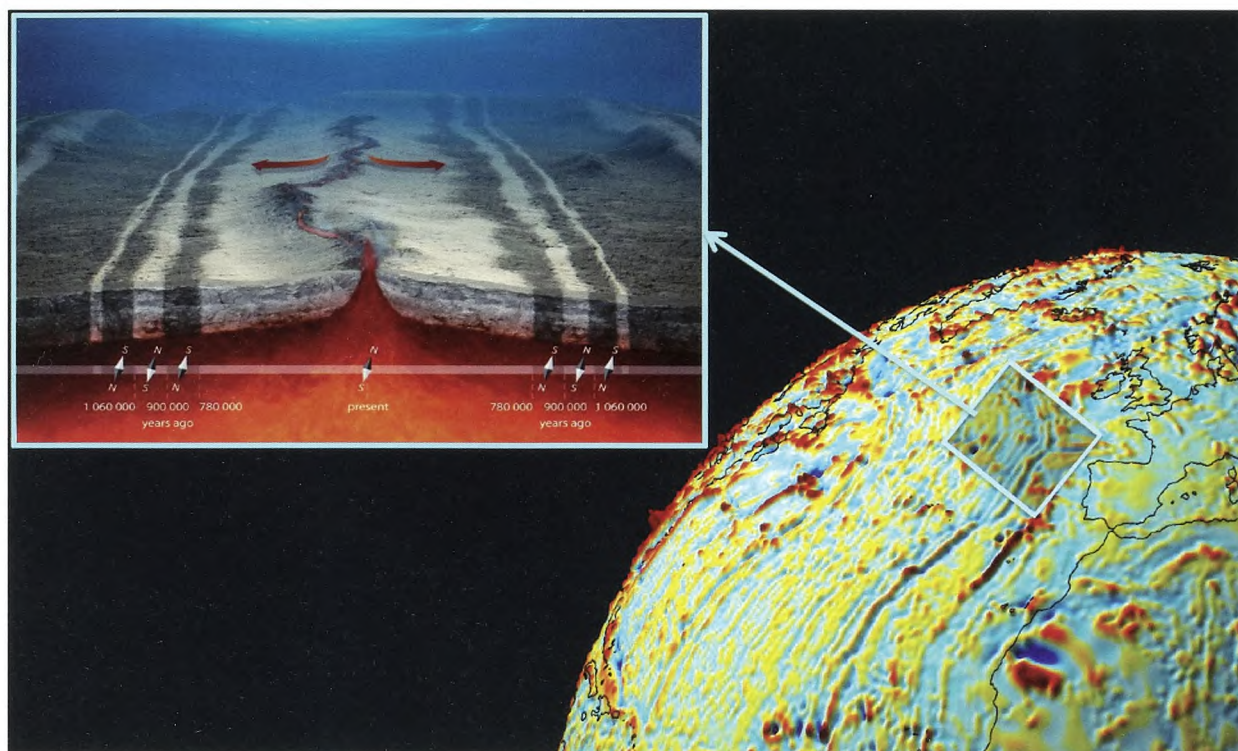
Selv på de mest magnetisk rolige dage ses variationer i magnetfeltet, som skyldes de elektriske strømme i magnetosfæren og i ionosfæren. Disse strømme er stærkest på Jordens dagside, hvor Solens ultraviolette stråling giver anledning til en kraftig forøgelse af ledningsevnen i ionosfæren i ca. 100 km højde over Jorden. Da magnetfeltet fra de stærke strømme i Jordens flydende kerne er meget stort i forhold til de andre bidrag, er en numerisk model af dette felt trukket fra observationerne. Resultatet heraf er gengivet ved den sorte kurve i figur 2 (øverste panel). Den blå kurve viser en model af skorpefeltet, som i figur 2 (midterste panel) er trukket fra observationerne, illustreret ved den sorte kurve. Det, der er tilbage af observationerne, stammer fortrinsvis fra kilder uden for Jorden, dvs. fra magnetosfæren og ionosfæren. Strømmene i magnetosfæren er beliggende flere tusind kilometer fra satellitterne og giver derfor en storskala-variation, som tydeligt ses, og som relativt let kan modelleres i form af den blå kurve. Såfremt også denne model trækkes fra observationerne, resterer der et bidrag fra strømmene i ionosfæren, i en afstand på kun få hundrede km. Dette bidrag er vist i figur 2 (nederste panel). Forskellen på ionosfærestrømmene på nat- og dagside er her meget tydelig, idet ledningsevnen skyldes den ioniserende UV-stråling fra Solen. Men i polområderne omkring 20 grader fra de geomagnetiske poler, den såkaldte nordlyszone, eksisterer elektriske strømme både på natsiden og på dagsiden, fordi ledningsevnen her er kraftigt forøget på grund af elektrisk ladede partikler, især elektroner, som er blevet accelereret langs de magnetiske feltlinjer fra magnetosfæren ned til ionosfæren, hvor de medvirker

til øget ionisering. På grund af satellittens relativt lille afstand til strømmene i ionosfæren er observationerne af disse relativt kortbølgede, og vanskelighederne ved at modellere disse strømme er yderligere øget, ved at disse strømme, især i nordlyszonen, også varierer meget hurtigt.

De videnskabelige spørgsmål

Med opsendelsen af den danske Ørsted-satellit i 1999 og den tyske CHAMP-satellit i 2000 begyndte en æra med kontinuerligt forbedrede modeller af Jordens magnetfelt, både som grundlag for grundforskningen og til gavn for teknologiske anvendelser. Swarm-missionen med dens forbedrede instrumentering og den omhyggeligt designede konstellation af tre satellitter giver os ikke blot den hidtil bedste beskrivelse af det magnetiske felt, men vil også give os de hidtil bedste målinger af ændringerne i magnetfeltet fra Jordens indre. Disse ændringer er udtryk for strømminger af materiale i Jordens flydende kerne, som vi nu har mulighed for at observere med hidtil uset rumlig og tidslig opløsning.

Magnetfeltet fra Jordens skorpe beskrives ved de såkaldte magnetiske anomalier, områder hvor det målte magnetfelt er lidt større eller lidt mindre end bidraget fra Jordens kerne, se figur 3. Kortlægningen af anomalierne bliver i udstrakt grad, sammen med andre geologiske målinger, anvendt til geologisk kortlægning, især i forbindelse med eftersøgning af olie- og mineralforekomster. Derfor er der stor interesse for at anvende satellitdata til at øge detaljerne i de globale kort, således at de bedst muligt kan understøtte de lokale detaljerede målinger med fly eller skibe.



Figur 3. Kort over magnetfeltanomalier i Jordens skorpe. De røde (blå) farver viser positive (negative) anomalier, dvs. områder, hvor magnetfeltet er lidt kraftigere (svagere) end magnetfeltbidraget fra Jordens kerne. Udsnittet illustrerer, hvorledes nogle af anomalierne i Atlanterhavet er dannet ved opstigning af magma i området mellem de tektoniske plader. Ved størkningen af magmaen fik bjergarterne et magnetfelt svarende til feltet fra Jordens kerne i den pågældende periode og de indeholder derved information om magnetfeltet tilbage i tiden – som en “geologisk båndoptager”.

Især dette aspekt har været bestemmende for konfigurationen af de to satellitter i de lave baner begyndende i ca. 460 km højde. De to satellitter skal flyve parallelt i en afstand på ca. 150 km ved ækvator for at være i stand til at måle anomalier i magnetfeltet, som har relativt lille udstrækning. Allerede efter et års data har Swarm været i stand til at kortlægge skorpen med samme nøjagtighed som CHAMP-satellitten har kunnet gøre ved anvendelse af 10 års observationer. Det betyder, at vi i løbet af de næste år, når Swarm-satellitterne er kommet tættere på jordskorpen og dermed vil måle et kraftigere signal, kan forvente en betydelig forbedring af den rumlige opløsning af skorpen magnetfelt.

Mineralsammensætningen og temperaturen i Jordens kappe er ikke kendt. Adskillige teorier er fremsat, men endelige svar afventer en metode til at verificere dem gennem målinger. Swarm-missionen er designet til at kunne give nogle svar på denne udfordring ved at måle kappens ledningsevne, som er en funktion af både mineralsammensætning og temperatur. Ledningsevnen bestemmes ved at måle det meget svage magnetfelt, som skabes af strømme, der induceres i kappen af ændringer i de elektriske strømme uden for Jorden. Til at gennemføre disse analyser kræves samtidige målinger fra satellitter langt fra hinanden, dvs. i baner, der ideelt set er vinkelrette på hinanden. En så stor forskel på banerne kan kun opnås ved enten en særskilt opsendelse eller ved at den tredje satellit bringes i en lidt højere bane, ca. 530 km, hvis baneplan langsomt ændres. Dette vil i løbet af nogle år bringe satellitten i passende afstand fra de to andre satellitters baner.

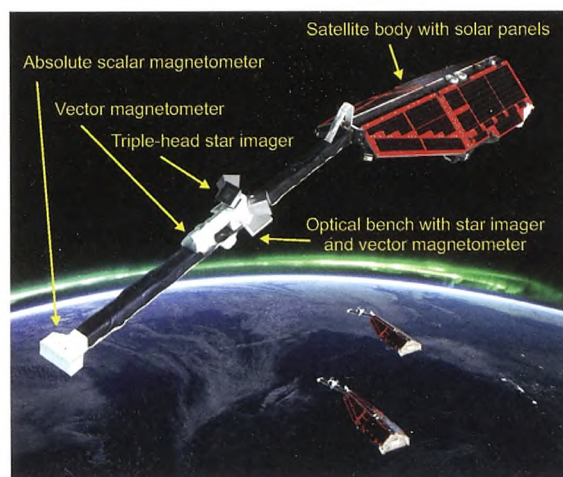
Udforskning af rumvejret er et af hovedformålene med missionen. Da magnetfeltet er den mest betydende kontrollerende faktor i de fysiske processer, der ledsager rumvejret, er præcise målinger af magnetfeltet og især samtidige målinger på flere steder en helt afgørende forudsætning for en øget forståelse af disse processer. Samtidige målinger af det elektriske felt giver en endnu bedre mulighed for at bestemme de elektriske strømme ud fra de magnetiske målinger. Disse undersøgelser vil i mange tilfælde være koordineret med jordbaserede kampagner, gennem hvilke man med radarmålinger af plasmadriften i ionosfæren, optiske målinger af nordlysenes beliggenhed og målinger af magnetfeltet på et stort antal målestationer på Jorden, kan supplere de rumbaserede observationer.

Missionen

Hvad er så forskellen på Ørsted og Swarm bortset fra, at Ørsted kun er en enkelt satellit? Ørsted var designet til at opnå de ønskede observationer inden for en meget lille økonomisk ramme, ca. 10 % af omkostningerne ved tidligere geomagnetiske missioner. Men det stod også klart, at uanset kvaliteten er der nogle fundamentale og uoverstigelige begrænsninger ved anvendelsen af målinger fra en enkelt satellit. Dette er en konsekvens af, at nogle af kilderne til det målte magnetfelt er bundet til Jorden, mens andre er styret af Solens position. En separering af bidragene fra de forskellige kilder forudsætter data, der er hensigtsmæssigt fordelt i tid og rum. Derfor fremsatte gruppen bag Ørsted allerede før opsendelsen af Ørsted-satellitten et projektforslag til

ESA om et mere ambitiøst projekt baseret på foretagelse af samtidige observationer i forskellige kredsløb om Jorden. Efter udvælgelsen af Swarm blev en væsentlig del af forskernes forberedende arbejde specifikt viet til at finde og dokumentere den optimale konfiguration af de tre satellitter i forhold til de opstillede videnskabelige mål.

Kravet om optimal og kontrolleret anbringelse af de tre Swarm-satellitter i specifikke baner om Jorden forudsætter, at der ombord på satellitterne er mulighed for at styre satellittens bane. Dette opnås ved at medbringe en beholder med gas, som gennem dyser kan udledes i forskellige retninger og derved langsomt ændre satellittens bane. Dette er fuldstændig forskelligt fra Ørsted-satellitten, hvis bane ikke aktivt kunne ændres efter opsendelsen, og som derfor kunne laves meget kompakt med en totalvægt ca. 10 gange mindre end en af Swarm-satellitterne. Men dette betød også, at Ørsted måtte anbringes i en relativt høj bane for ikke at risikere, at den ville falde for hurtigt ned i Jordens atmosfære.



Figur 4. Figuren viser strukturen af Swarm-satellitterne og placeringen af de magnetiske instrumenter. På instrumentbommen er yderst anbragt instrumentet, der måler styrken af magnetfeltet (skalarfeltet) med meget stor nøjagtighed. Længere inde er anbragt vektormagnetometeret, der sammen med stjernekameraet giver den magnetiske magnetfeltvektor i et kendt referencesystem. Skalarfeltmålingerne anvendes til løbende kalibrering af vektormålinger.

Swarm-satellitterne (se figur 4) er forsynet med de samme instrumenter, som Ørsted er forsynet med. Dog er teknologien naturligvis yderligere udviklet. Hovedinstrumentet er vektormagnetometeret, der måler de tre komponenter af den magnetiske feltvektor med en nøjagtighed på 0,5 nanotesla (nT). Den absolutte nøjagtighed hviler på en meget nøjagtig bestemmelse af retningen, hvilket sker gennem stjernekameraet, som er blevet markant forbedret bl.a. gennem udvidelse med flere kameraer i forskellige retninger. Da Jordens magnetfelt er ca. 50000 nT skal retningen bestemmes med en nøjagtighed på 0,5/50000 eller 1/100000 radian svarende til ca. 2 buesekunder. Det betyder, at stjernekameraets målinger skal korrigeres for aberrationen, den tilsyneladende ændring af retningen til stjernerne, som pga. af Jordens hastighed i banen omkring Solen på 30 km/s i forhold til lyshastigheden er 1/10000 radian eller ca. 20 buesekunder.

Derudover er Swarm-satellitterne forsynet med nogle yderligere instrumenter til observering af parametre, der er af betydning for rumvejret, herunder det elektriske felt og elektrontætheden. Et instrument til måling af satellitternes acceleration giver mulighed for at beregne gnidningsmodstanden og dermed tætheden af atmosfæren i satellithøjde. Atmosfærens tæthed øges i takt med den opvarmning, som de energirige elektrisk ladede partikler giver anledning til, når de rammer atmosfæren.

Fremtiden

Med de resultater, der allerede er opnået gennem det første års data, er der ingen tvivl om, at Swarm-missionen vil leve op til de mål, der blev opstillet ved valget af missionen. Det gælder fx bestemmelsen af de langsomme tidslige ændringer af strømmene i Jordens flydende kerne. Disse er udtryk for bevægelse af materiale og er nødvendige for at afprøve de fremsatte dynameteorier. Ovenfor er nævnt den forventede forøgelse af den rumlige opløsning af skorpefeltet samt muligheden for at bestemme ledningsevnen i Jordens kappe i tre dimensioner. Fælles for disse videnskabelige undersøgelser er, at de er baseret på statistiske undersøgelser af store mængder af data, hvilket vil sige, at resultaterne vil blive mere nøjagtige, jo længere tid missionen varer og instrumenterne holder. Den nominelle operationsperiode er fire et halvt år. Men ESA har allerede nu tilkendegivet, at hvis satellitterne holder længere – og meget tyder på, at de gør – vil der blive afsat midler til at forlænge missionen. Måske vil det også give mulighed for at foreslå en efterfølger for missionen, idet der er behov for en kontinuerlig monitorering af Jordens magnetfelt fra rummet. Specielt kan man forvente et behov for, at rumvejret i endnu mere udstrakt grad bliver overvåget og forsøgt forudsagt, idet det moderne teknologisk udviklede samfund er afhængig af en infrastruktur, som i højere og højere grad bygger på anvendelsen af satellitter. Men da alle anvendelser kræver præcis viden om hovedfeltet, som er det langsomt varierende magnetfelt fra strømme i Jordens kerne, vil det også være nødvendigt at måle dette med jævne mellemrum. Således er det nødvendigt hvert femte år at udarbejde en ny matematisk beskrivelse (model) af det geomagnetiske felt til forskellige teknologiske anvendelser, og fremtidige modeller uden fortsat adgang til satellitdata vil i løbet af få år slet ikke kunne leve op til de krav, som vi i dag stiller til nøjagtigheden af dem.

Litteratur

- [1] Friis-Christensen, E., H. Luehr, and G. Hulot (2006), Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field, *Earth, Planets and Space*, **58**, 351-358; <http://link.springer.com/article/10.1186/2F03351933>.
- [2] Friis-Christensen, E., H. Luehr, G. Hulot, R. Haagsmans, M. Purucker, (2009), Geomagnetic Research from Space, *Eos*, **90** (25), 213-214; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009EO250002/full>.
- [3] Olsen, N., & Stolle, C. (2012), Satellite Geomagnetism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **40**, 441-465; <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-042711-105540>.

- [4] Olsen, N. et al., (2015), The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field, *Geophys. Res. Lett.* **42**(4), 967-1282; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GL062659/full>. Denne artikel indgår i en speciel sektion med navnet: ESA's Swarm Mission, One Year in Space.
- [5] ESA: Swarm – Earth Explorers, http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Swarm/Overview2



Eigil Friis-Christensen, adjungeret forskningsprofessor, Catholic University of America, tilknyttet NASA Goddard Space Flight Center. Direktør for DTU Space 2007-2012. Videnskabelig leder af Ørsted-projektet 1993-1997, Swarm "Lead Investigator" og formand for "ESA's Swarm Mission Advisory Group" 2002-2015.



Nils Olsen, professor i geofysik ved DTU og adjungeret professor ved Københavns Universitet. Leder af Swarm ESL konsortiet der omfatter 13 europæiske og nordamerikanske institutter, som står for den videnskabelige dataanalyse af målingerne fra Swarm-satellitterne.

PFEIFFER VACUUM

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

TAKKER FOR I ÅR OG
ØNSKER ALLE VORE KUNDER

**Glædelig Jul
&
Godt nytår**

På gensyn i 2016

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com