

超小型衛星による 精密磁場観測衛星の検討

篠原 育

JAXA宇宙科学研究所

宇宙プラズマ科学の手法

- 衛星・探査機などの飛翔体観測によって
 - 目には見えない物理量（プラズマ，電場，磁場）を現象が起きている「その場」で観測し，
 - 現象に隠された物理プロセスを解明することで，
 - 直接訪れることのできない場所（遠い天体現象など）でおこる宇宙プラズマ現象を理解する．
 - 恒星－惑星系システムをプラズマ現象を通して理解する．

宇宙プラズマ観測のこれまでの方向性

- 1 衛星における観測項目の充実（観測エネルギー・周波数帯の広域化, 高時間分解能）
→ 観測機器の性能向上
- より詳細なデータの地上への伝送（プラズマ波動の波形, 1 カウント毎の粒子情報, など）
→ 大容量データレコーダの搭載, テレメトリ回線の増大
- 編隊観測から現象の時・空間変動の分離
→ 4以上の多衛星化
- 撮像機器(オーロラ観測やENA観測)の搭載, 地上観測ネットワークとの連携, など…

大規模計画化（e.g. NASA MMSは高機能の4衛星編隊からなるbillion \$ 計画）し, 将来計画が不透明化

宇宙プラズマ観測の新しい方向性

- **そもそも知りたかったこと…**

- マルチ・スケールな現象を「その場」観測することで、スケール間カップリングを理解したい。
- 部分的な「その場」観測を現象の大局的な文脈の中に位置づけることで、ブレークスルーを得たい。



- **撮像衛星と「その場」観測の組み合わせ**

- 撮像観測によって大局的な変動を把握しながら、「その場」観測データを解釈できる。
- 「ひさき」+JUNO の木星観測への期待
- X線磁気圏撮像+「その場」、火星大気散逸観測計画, など

- **観測項目を絞った超小型衛星によるコンステレーション観測**

コンステレーション観測

- そもそも, 「その場」観測のみで空間構造を把握したい.
… コンステレーション観測
- 少ない観測項目数でも多点ネットワーク観測 (数十~数百) を行うことから, ブレークスルーが得られるはず!
- 搭載観測項目は絞り込む
 - 「同じ衛星に機器を搭載」という制約を放棄
 - 異なる観測項目の多点ネットワーク観測でカバー
 - 1つの衛星の喪失に対しても, ロバストに観測を継続可能
- 大量生産によるコスト削減への期待
 - たかだか数機程度の生産では, コスト削減効果は見込めず, むしろオーバーヘッドで高額化
- 本格的な科学観測が可能な超小型衛星の必要性
 - Cubesat以上, 「れいめい」, SDSクラスの規模以下

磁場観測に絞った観測計画を検討中

超小型衛星による精密磁場観測(*)

- 21世紀にはいつてから国際標準磁場モデル(IGRF)の作成には、衛星観測による精密磁場データが必要不可欠.
- 精密磁場観測の多衛星観測で何ができるようになるのか？
 - コア表面流の高次マッピング
 - 海洋ダイナモ現象の検出
 - 短周期大気重力波の全球分布
 - 沿磁力線電流分布のマッピングなど

超高層大気から固体地球までの広い研究分野をカバー

(*)10000 nTの背景磁場の中で0.1 nTの精度で計測.

ベクトルで保証する為には、数arcsecの姿勢決定精度が必要.

これまでの精密磁場計測衛星

- 地球内部起源の磁場を精密に測定によって全球的な磁場のマッピングが主目的

高精度の磁場観測を行った ~1nT以下の精度

- MAGSAT (米国) 1979-1980 350x550 km
- Ørsted (デンマーク) 1999- 500x850 km
- CHAMP (ドイツ) 2000-2010 470 km

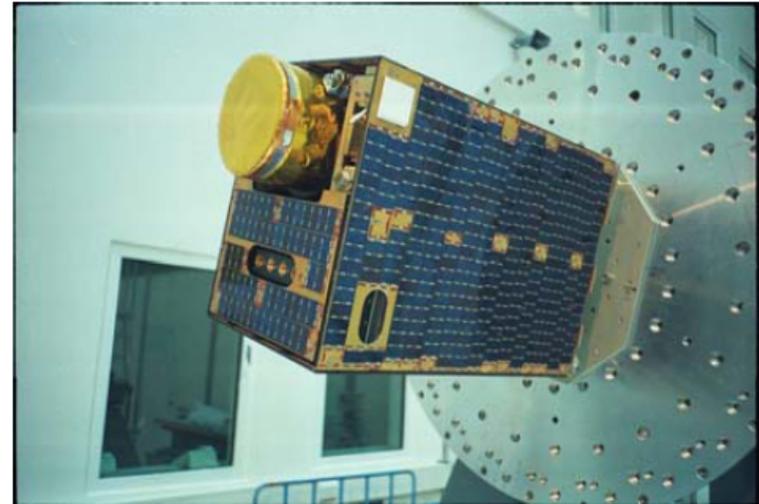
- 多点による磁場観測

- DMSP series 840 km
- Space Technology 5 2006 3衛星編隊 300x4500 km
- Swarm (ESA) 2013打ち上げ 3衛星編隊
- Swarm衛星以降の計画がない … 長期変動をモニターしたい

磁場観測衛星 (Ørsted, ST5) は超小型衛星<100 kgで実現

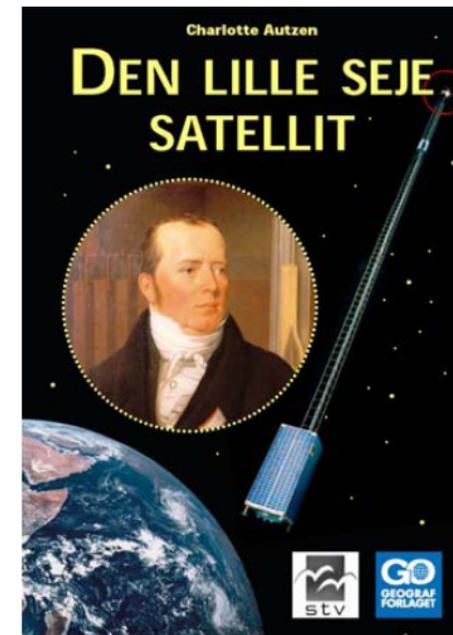
Ørsted衛星

Satellite mass	60.7 kg
Body dimensions	72x45x34 cm
Foldable mast	6+2 m
Average power	37 W
Data storage cap.	12 hrs
Telemetry	S-band 2.2 GHz
Apogee height	865 km
Perigee height	649 km
Inclination	96.48 deg.
Orbital period	100 min



GPSによる軌道決定
姿勢制御は magnetorquer

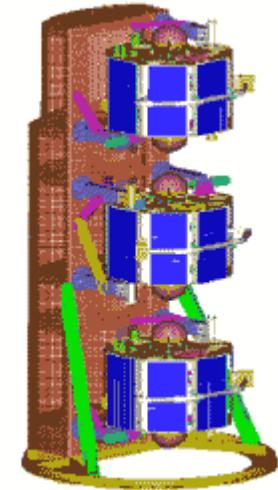
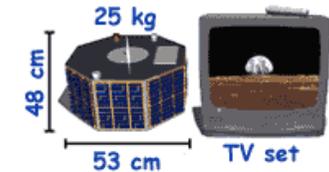
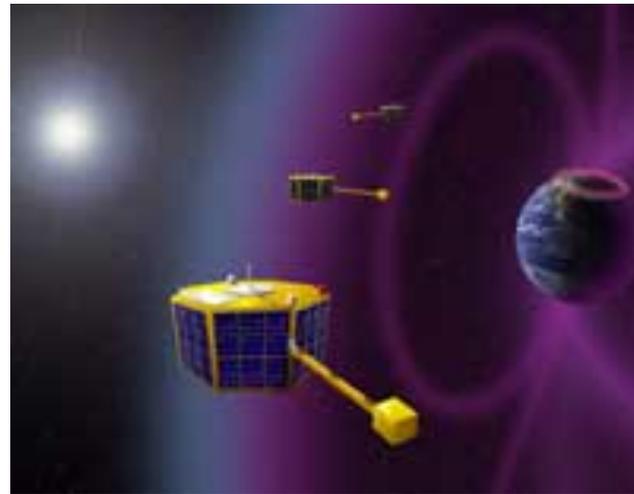
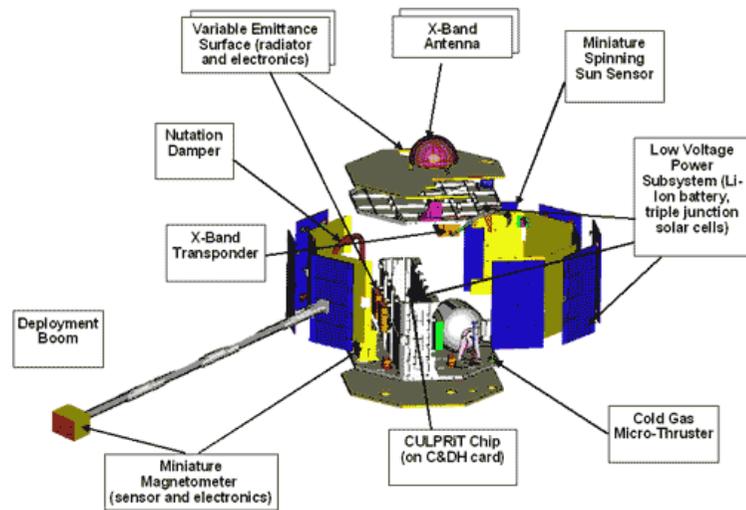
Delta-IIロケットでARGOS衛星 (2.7t)
と共に打ち上げ



コンステレーション観測

- 観測項目を絞って, 超小型衛星で多点観測

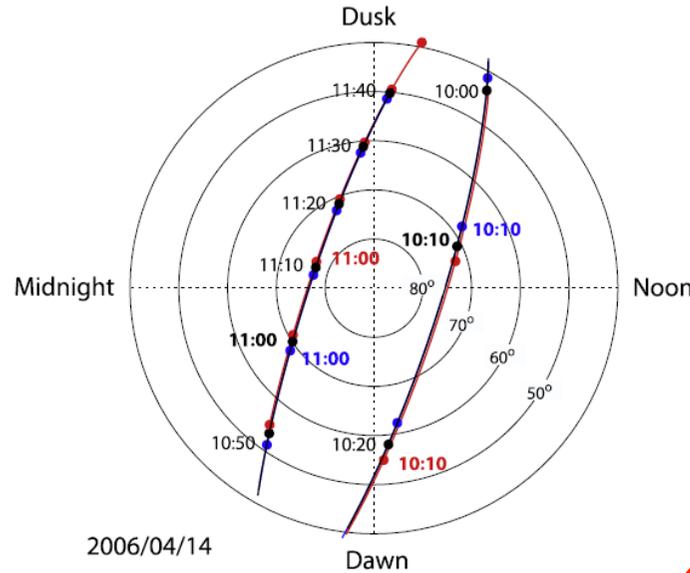
NASA ST-5 New Millennium Project



Space Technology 5 satellites stacked for launch from a Pegasus XL rocket

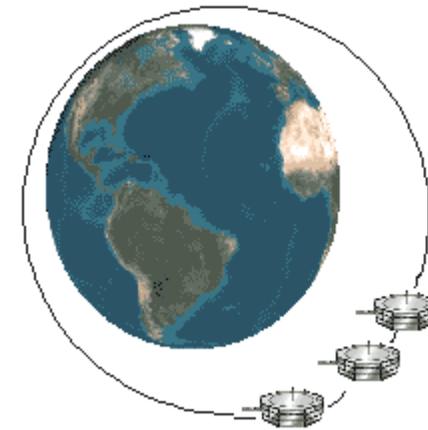
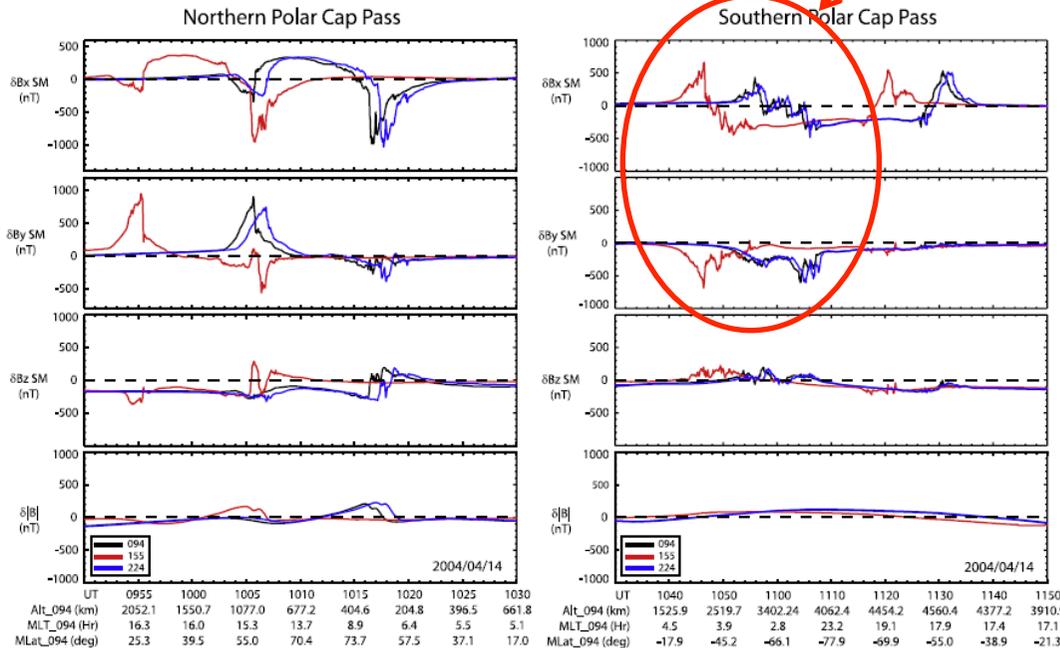
ST5編隊による沿磁力線電流観測

Spacecraft Footprints in Magnetic Coordinates



数分の時間差での沿磁力線電流分布の変動がとらえられている

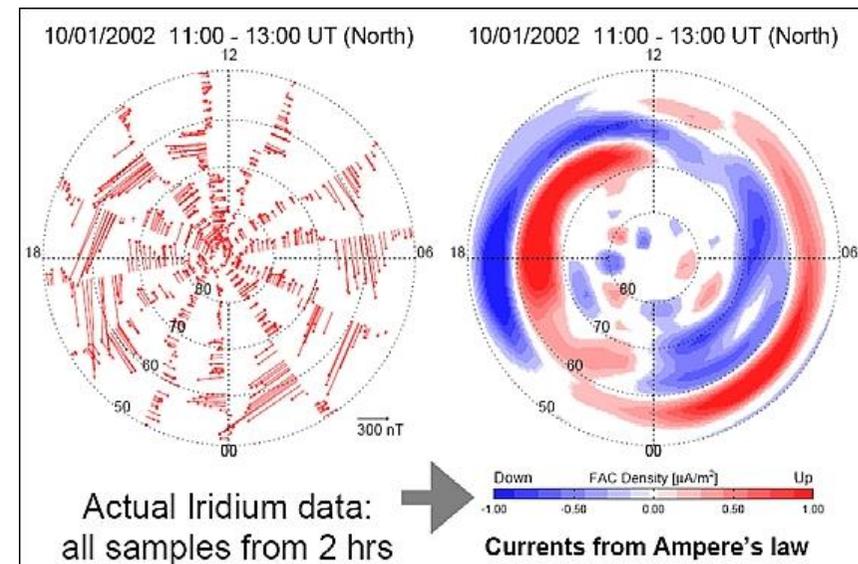
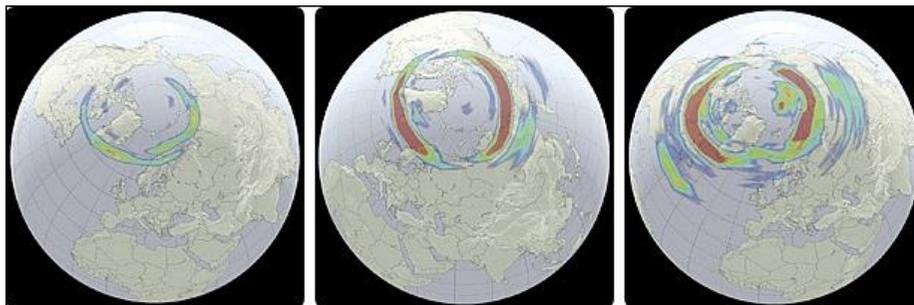
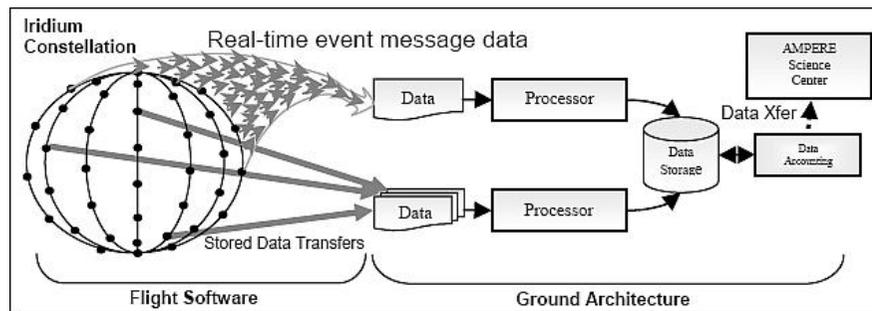
FAC Magnetic Field in SM Coordinate System



Le et al. JGR 2009

商用衛星網を使った沿磁力線電流分布の観測

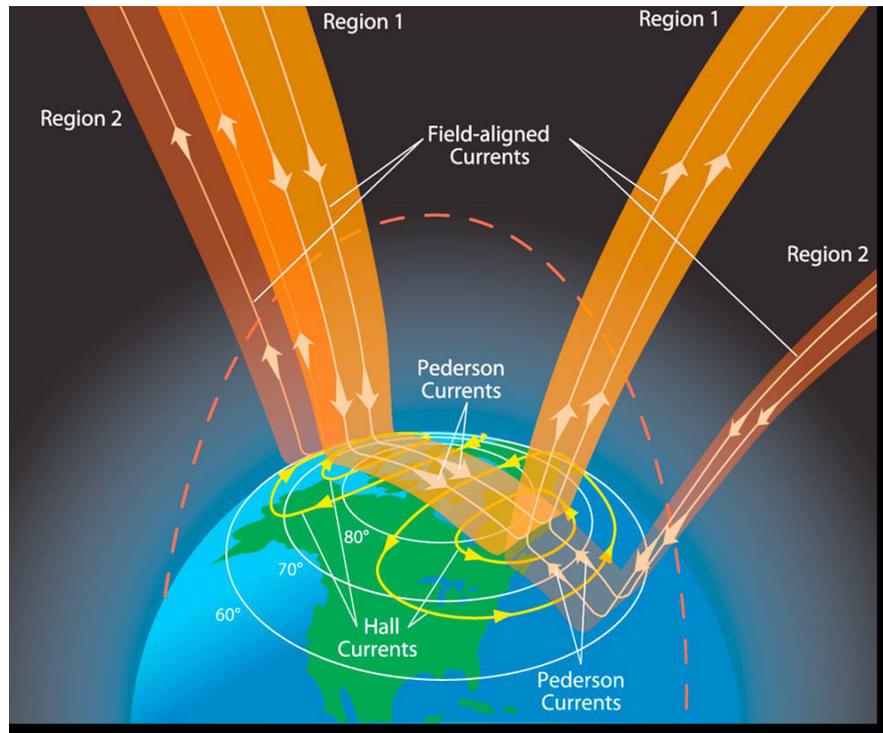
- 約70機のIridium衛星を使ってグローバルなFAC観測が成功している
- 磁場分解能が $\sim 32\text{nT}$ で大規模なFAC構造しかモニターできない
- 同じことを高精度磁場観測で行ったら？



何故，沿磁力線電流観測か？

- 磁気圏で駆動された電流によって極域電離層電流（オーロラジェット電流など）がドライブされる。

（磁気圏－電離圏結合）



電離層にFACを通して
電場が投影される

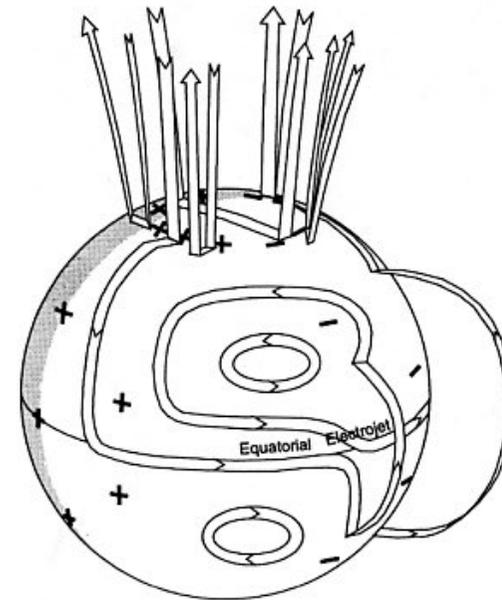
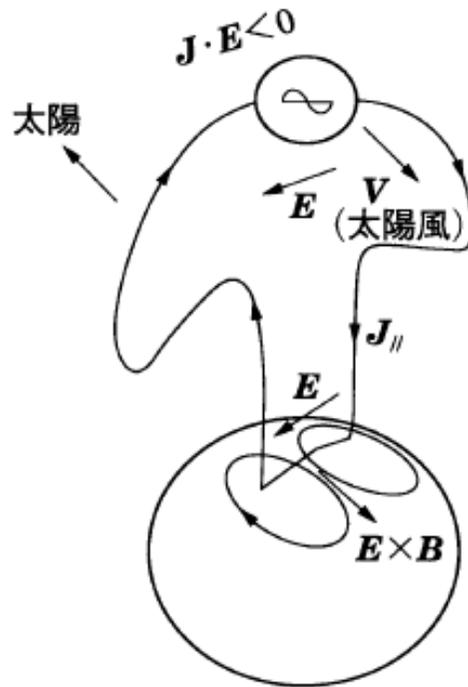
電場方向に流れる
Curl free の Pederson電流

電場と磁場に垂直に流れる
Div free の Hall電流

沿磁力線電流分布をモニターすることは、
電離層現象の直接のドライバを知ることである。

沿磁力線電流を駆動するダイナモ

- 磁気圏境界面で太陽風によるダイナモ
 - 高緯度でRegion 1電流として流れ込む
- 電離層中の中性大気風によるダイナモ
 - 低緯度で南北両半球をつなぐ電流
- 両者は電離層電流系でつながっている？
結合の強さは？

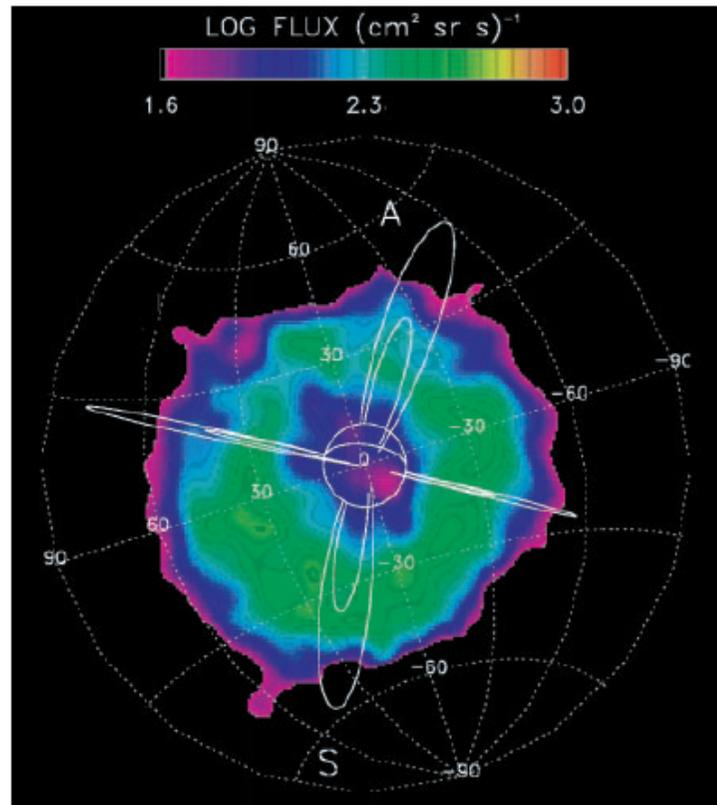


赤道域の電流は極域より一桁小さい

赤道環電流の非一様分布

- Region 2 電流と繋がると考えられている赤道環電流の非一様性が直接イメージング観測されている
(IMAGE衛星による高速中性粒子(ENA)による撮像)

Fig. 6. ENA emission as seen with the IMAGE/HENA instrument from 5.0 Earth radii above the north magnetic pole during the geomagnetic storm of 8 to 9 June 2000. The image shows the ring current at 21:18 UT on 9 June during the later stages of the storm, when the Dst had recovered to -26 nT from a main phase Dst of -87 nT at 20:00 UT on 8 June. In the image, the Earth's disk is inscribed, along with representative dipole magnetic field lines at $L = 4$ and 8 for the sunward (down), dawn (left), midnight (up), and dusk (right) meridians. The terminator (great circle separating day from night) is also drawn onto the Earth disk for reference. The ENA emission is integrated over an energy range from 27 to 60 keV. (The ENAs are assumed to be hydrogen, because the HENA instrument does not identify the ENA species in the mode for which these data were taken.)



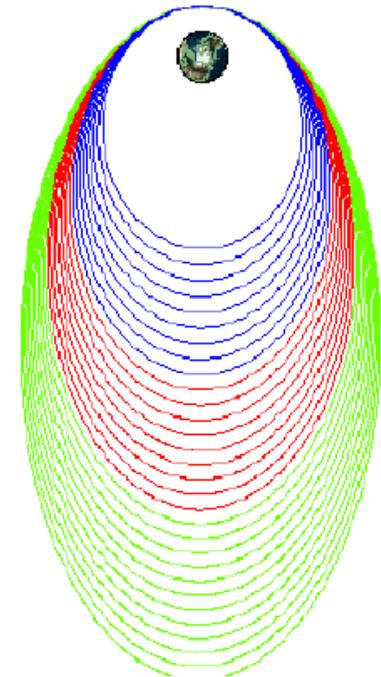
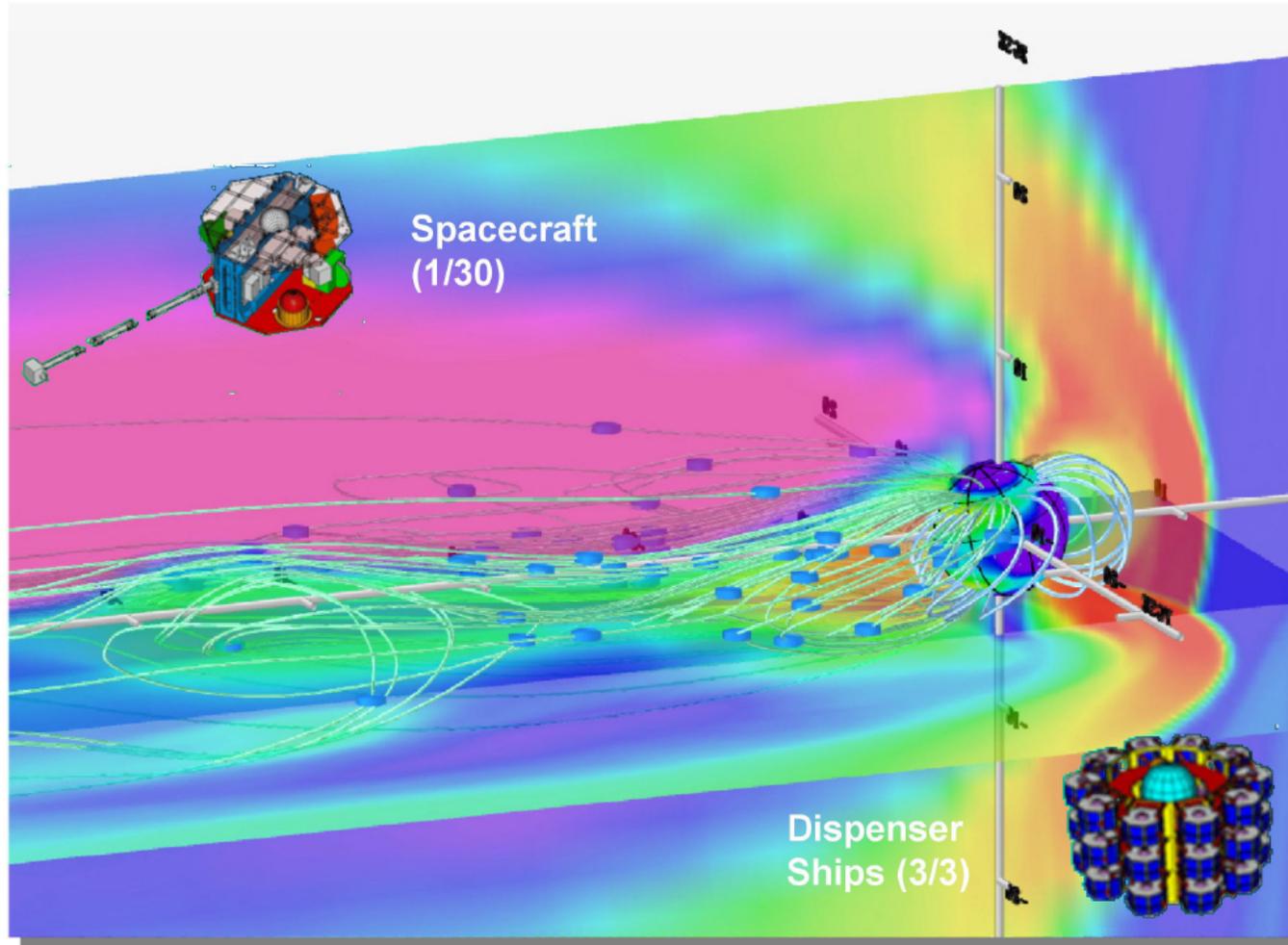
対応する沿磁力線電流
の分布を知りたい！

磁気圏と電離圏の結合状
況が完全に把握できる。

Burch et al. Science, 2001

Magnetospheric Constellation

磁気圏内に30個の超小型衛星を投入して多点観測を行う
ST5 は MC の技術実証的な意味があった



まとめ：超小型衛星による精密磁場観測

- 地球固有磁場と宇宙空間のインターフェースを理解するには低高度領域における精密な磁場観測の継続が必要.
- STP分野だけではなく、地球観測の観点では、大気重力波の検出可能性等、精密磁場観測により、超高層大気から固体地球までの広い研究分野をカバーできる.
- 電離層直上部の沿磁力線電流分布をコンステレーションによって3次元的に計測することで、磁気圏－電離圏の結合の仕方を精密に理解できる.
- 寿命が短くとも、安価であれば、繰り返し同じ衛星を打ち上げることで、長期的な地球磁場変動のモニターができる未来へ？
- 磁気圏内のコンステレーション衛星に繋げる.
- 惑星での精密磁場探査へ繋げる.
 - 地球周辺での衛星観測の行き詰まりの打開策は、将来の惑星探査の発展への解決策に繋がるはず…（究極的には惑星探査=>地球観測のリソースが必要.）