

2008年7月17日(木), 宇宙プラズマ物理学, 東京大学

宇宙天気予報と磁気流体力学

片岡龍峰
理化学研究所



目次

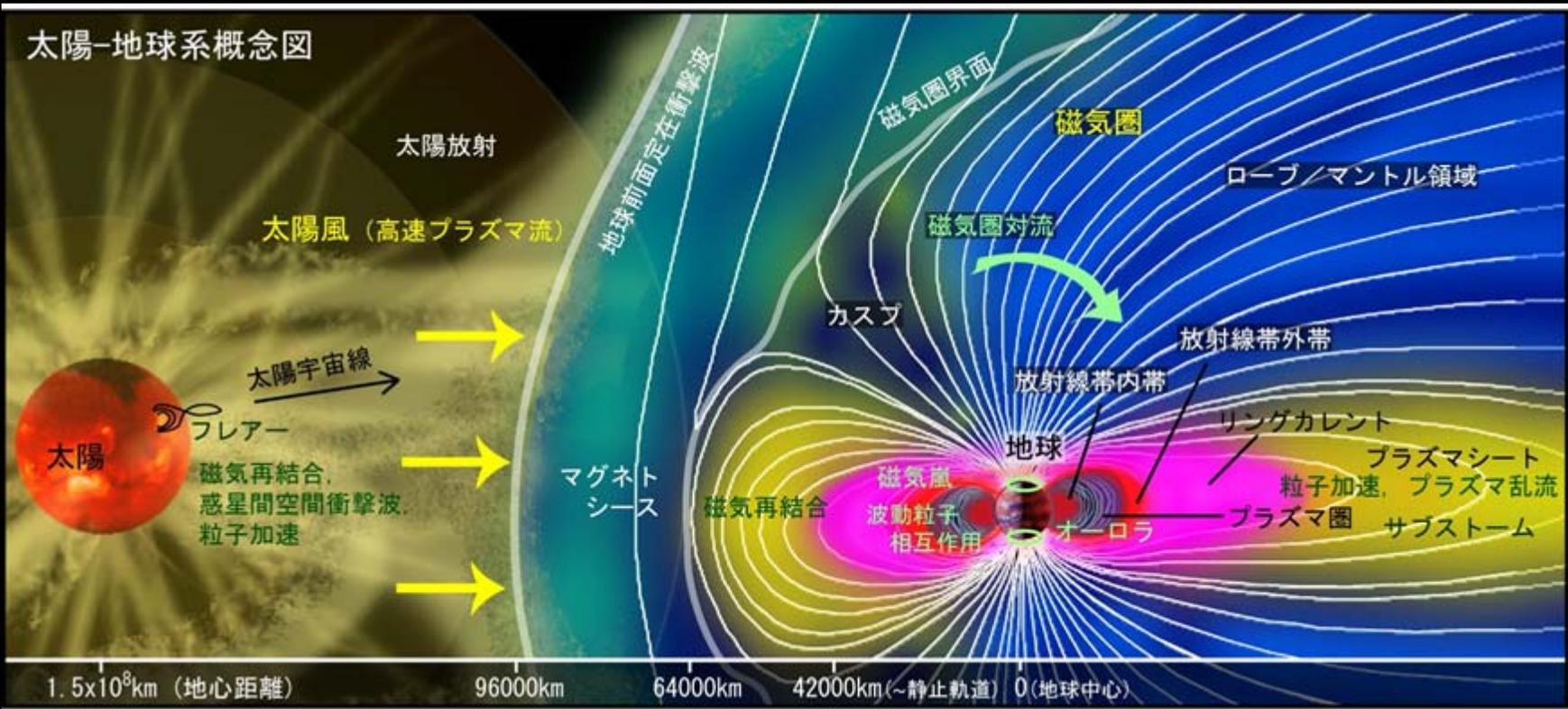
- 宇宙嵐
 - フレア放射線、オーロラ嵐、バンアレン帯
- 磁気流体力学
 - Frozen-in, 保存形式, RH関係式
 - 有限体積法による数値解法
- 数値宇宙天気予報
 - 太陽風・バンアレン帯のモデリング研究
 - 確率予報、数値予報、宇宙天気図

1. 宇宙嵐

- 代表的な宇宙嵐について解説する。
- フレア放射線
 - 急激な電離による通信途絶、GPS精度低下
 - 高高度での人体被曝
- オーロラ嵐
 - 誘導電流による送電障害
- バンアレン帯
 - 衛星帯電による動作異常



太陽-地球系概念図

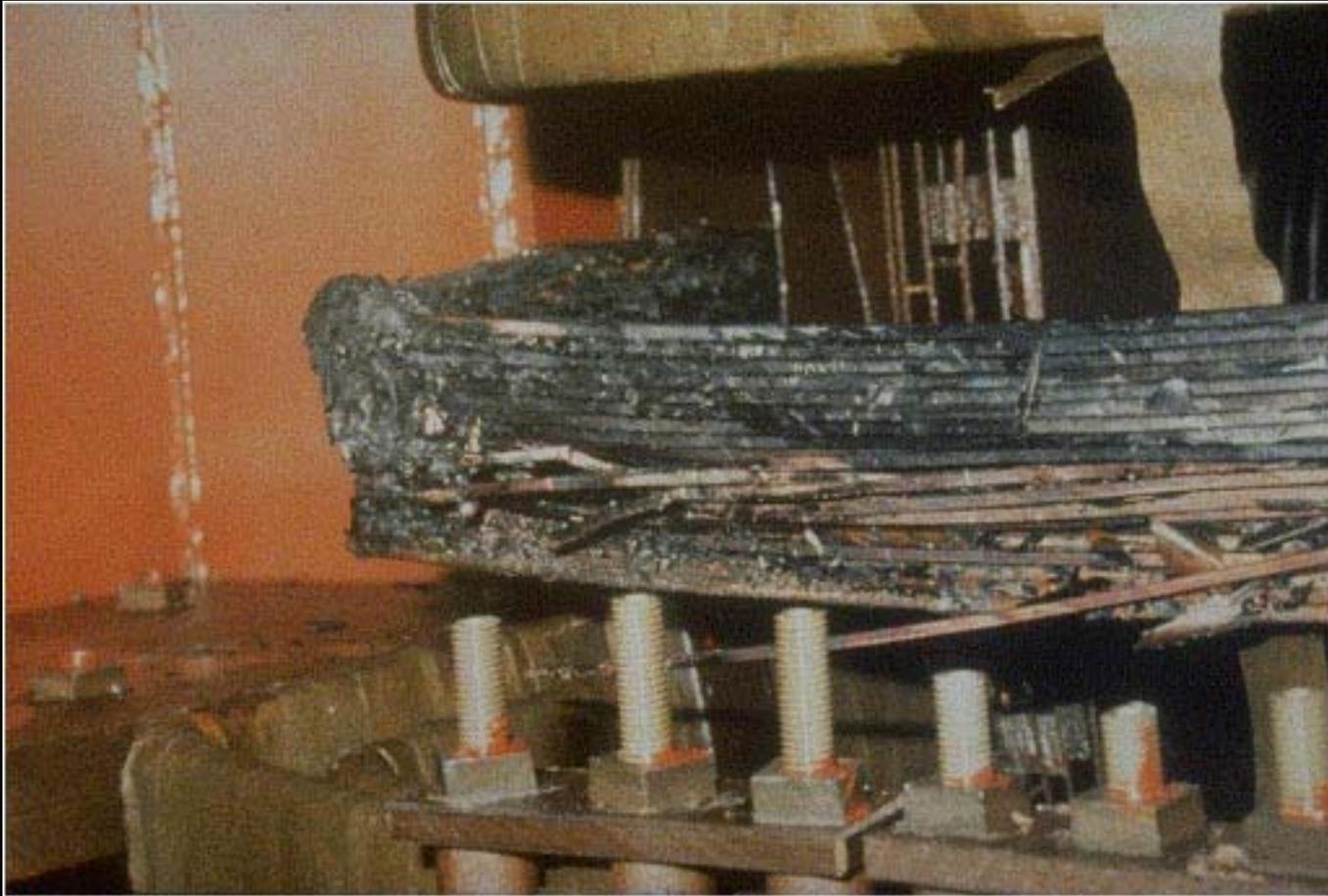


Aurora Substorm



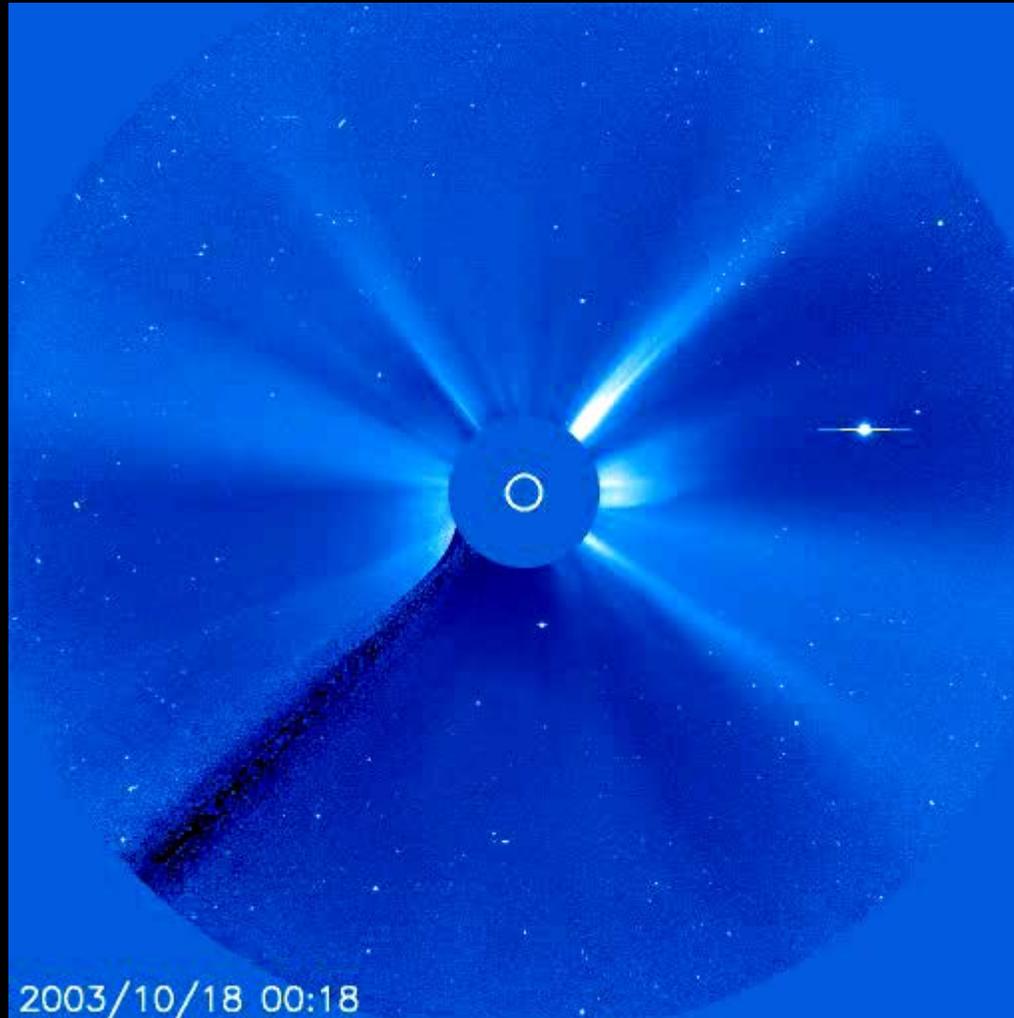
IMAGE-FUY-2000/07/15-14:00:39.U1

Geomagnetically Induced Current (GIC)

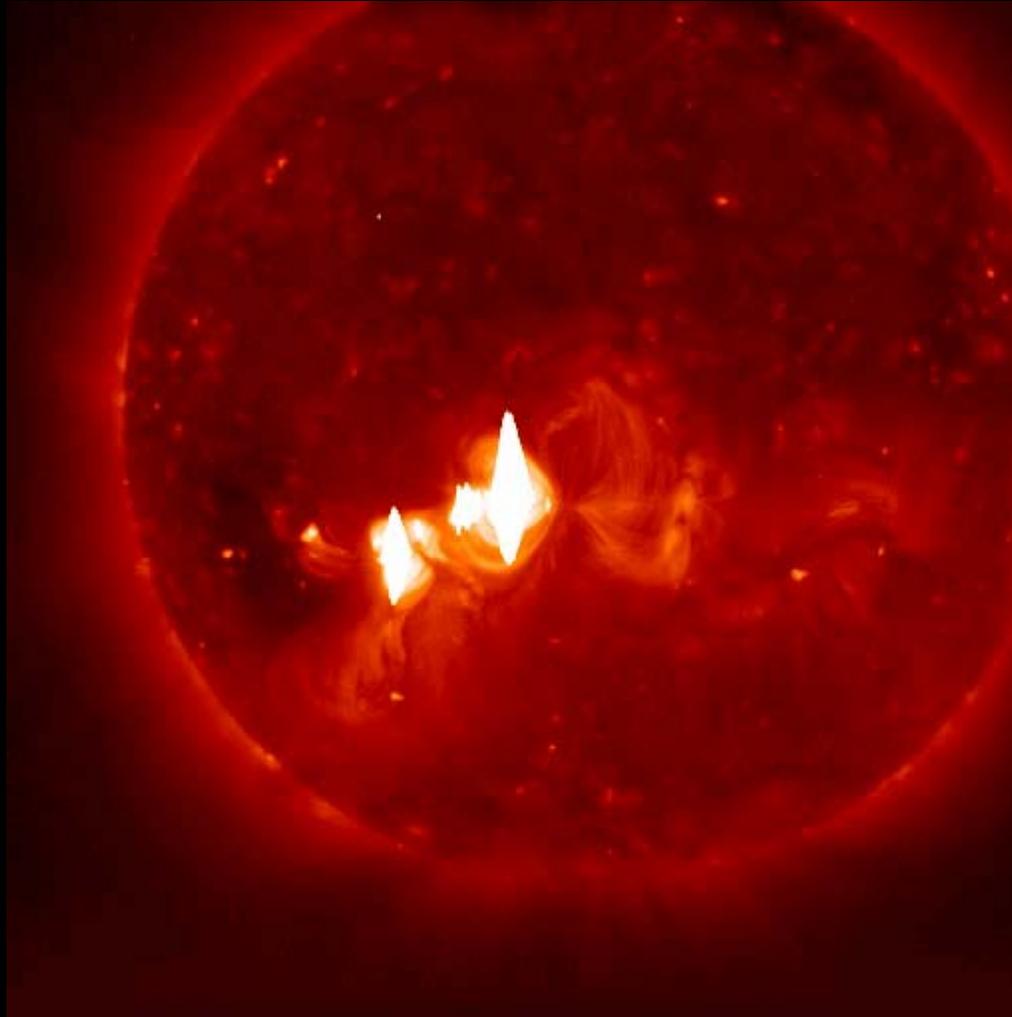


オーロラ嵐の誘導電流で焼き切れた変圧器

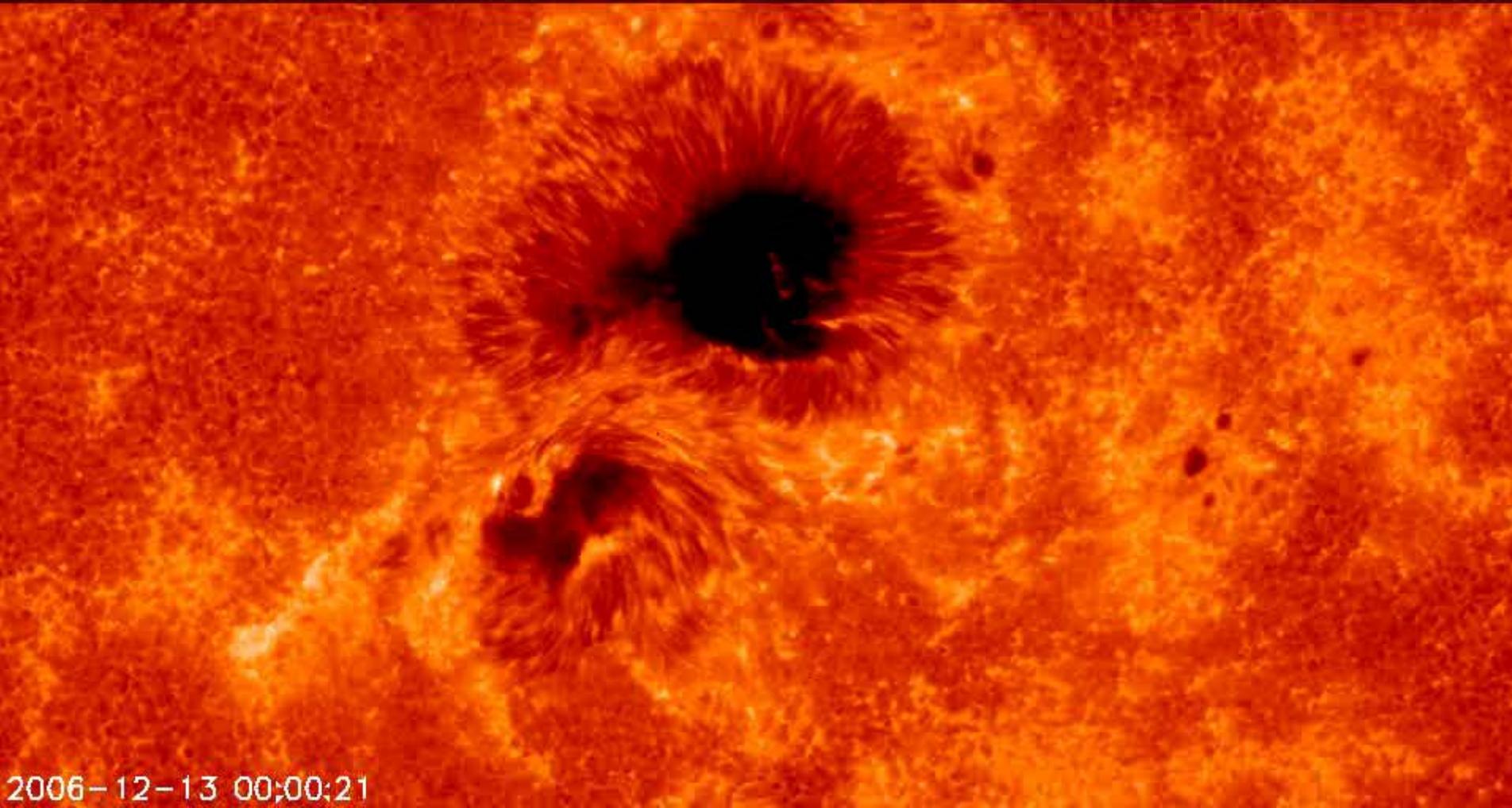
Coronal Mass Ejection (CME)



Coronal Hole & Active Regions



Flare



2. Magnetohydrodynamics (MHD)

- 磁気流体力学の基礎を解説する。
- 宇宙を渦巻くプラズマと一体となって運ばれる大規模磁場の支配方程式
 - 宇宙にプラズマと磁場のない場所は殆どない
 - 惑星磁気圏、恒星(風)、銀河(風)...
- 磁気流体力学
 - プラズマ密度を定義するに十分な粒子数(HD)
 - プラズマに乗った系で電場が解消するほど十分な自由電子・イオン

磁場の誘導方程式

速度 v で動く系における電場 E' はガリレイ変換より

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

速度 v で動くプラズマで電場 E' が解消する場合

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

ファラデーの法則

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

磁場の誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Frozen-in

プラズマと磁場が一緒に運動する性質

- 磁場の誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- 閉曲線を貫く磁束 $\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$ は流れに沿って保存される。

$$\frac{D\Phi}{Dt} = \int_S \left\{ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \right\} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

Kelvinの循環定理

- バロトロピック $p = p(\rho)$ の場合の渦度 $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$ の変化は

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega})$$

- 循環 $\Gamma = \oint_C \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n} dS$ は流れに沿って保存される。

$$\frac{D\Gamma}{Dt} = \int_S \left\{ \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}) \right\} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

磁気流体方程式

質量保存 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$

運動方程式 $\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}$ 変位電流を無視

内部エネルギー $\frac{\partial U}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla U = -(\gamma - 1)U \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad U = \frac{P}{(\gamma - 1)\rho}$ 理想気体

誘導方程式 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

* SI単位系にするには $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B} / \sqrt{\mu_0}, \quad \mathbf{j} \rightarrow \sqrt{\mu_0} \mathbf{j}$

磁気流体方程式 (保存形式)

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{v} \\ e \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + P_t \mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B} \\ (e + P_t) \mathbf{v} - \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}) \\ \mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

質量保存
 運動量保存
 エネルギー保存
 誘導方程式

$$P_t = P + \frac{B^2}{2}$$

全圧 = ガス圧 + 磁気圧

$$e = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{B^2}{2}$$

全エネルギー = 運動エネルギー
 + 内部エネルギー + 磁気エネルギー

保存形の導出に挑戦するためのヒント。

ベクトル・テンソル公式

$$\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z), \quad \mathbf{b} = (b_x, b_y, b_z), \quad \mathbf{ab} = \begin{pmatrix} a_x b_x & a_x b_y & a_x b_z \\ a_y b_x & a_y b_y & a_y b_z \\ a_z b_x & a_z b_y & a_z b_z \end{pmatrix}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{ab}) = \mathbf{a} \cdot \nabla \mathbf{b} + \mathbf{b} \nabla \cdot \mathbf{a}$$

$$\mathbf{a} \times (\nabla \times \mathbf{b}) = (\nabla \mathbf{b}) \cdot \mathbf{a} - \nabla \cdot (\mathbf{ab}) - \mathbf{b} \nabla \cdot \mathbf{a}$$

$$\nabla \times (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \nabla \cdot (\mathbf{ba} - \mathbf{ab})$$

$$\nabla (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) = (\nabla \mathbf{a}) \cdot \mathbf{b} + (\nabla \mathbf{b}) \cdot \mathbf{a}$$

$$-\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \left(\frac{1}{2} B^2 \right) - \nabla \cdot (\mathbf{BB})$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \nabla \cdot (\mathbf{vB} - \mathbf{Bv})$$

磁気流体方程式 (保存形式・1次元)

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = 0$$

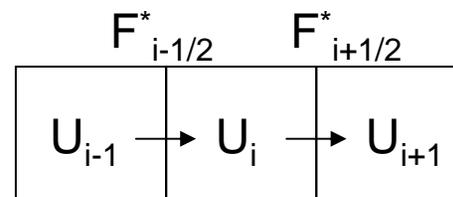
$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ B_y \\ B_z \\ e \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p + B^2/2 - B_x^2 \\ \rho uv - B_x B_y \\ \rho uw - B_x B_z \\ B_y u - B_x v \\ B_z u - B_x w \\ (e + p + B^2/2)u - B_x (\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u} = (u, v, w), \quad \mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$$

有限体積法:

離散化レベルで保存則を満たす。
不連続のジャンプを正確に評価。

$$\frac{dU_i}{dt} + \frac{F_{i+1/2}^* - F_{i-1/2}^*}{\Delta x} = 0$$



近似Riemann解法:

セル境界で接する異なる2状態を初期条件とするRiemann問題の厳密解から数値流速 F^* を評価。

* 3方向に同時に適応することで3次元で計算する。

磁気流体方程式 (移流形式・1次元)

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + A \frac{\mathbf{U}}{\partial x} = 0, \quad A(\mathbf{U}) \equiv \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}}$$

ヤコビアンAの7つの固有値 (特性速度)

Alfven波

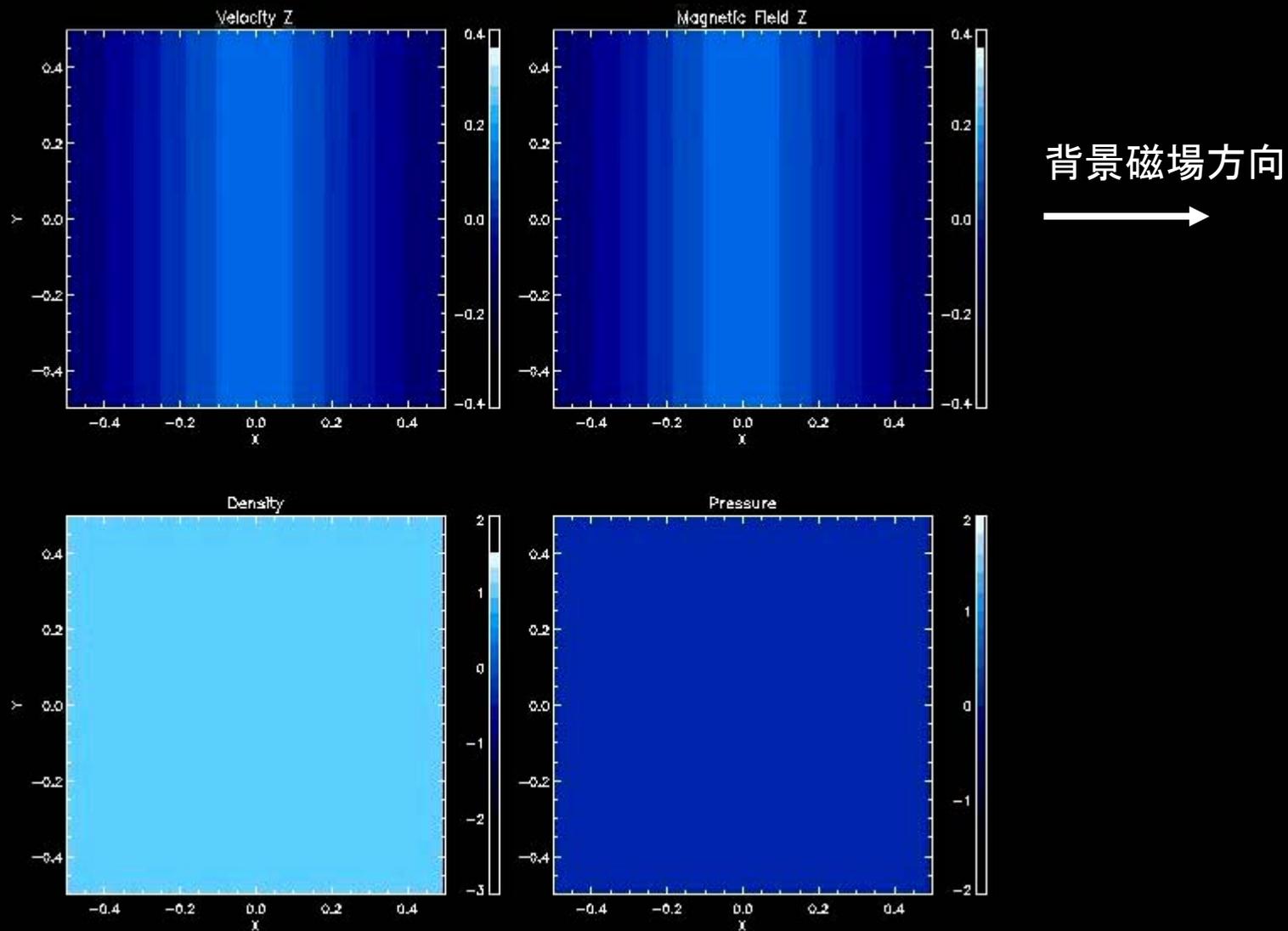
磁気音波 (fast, slow)

エントロピー波

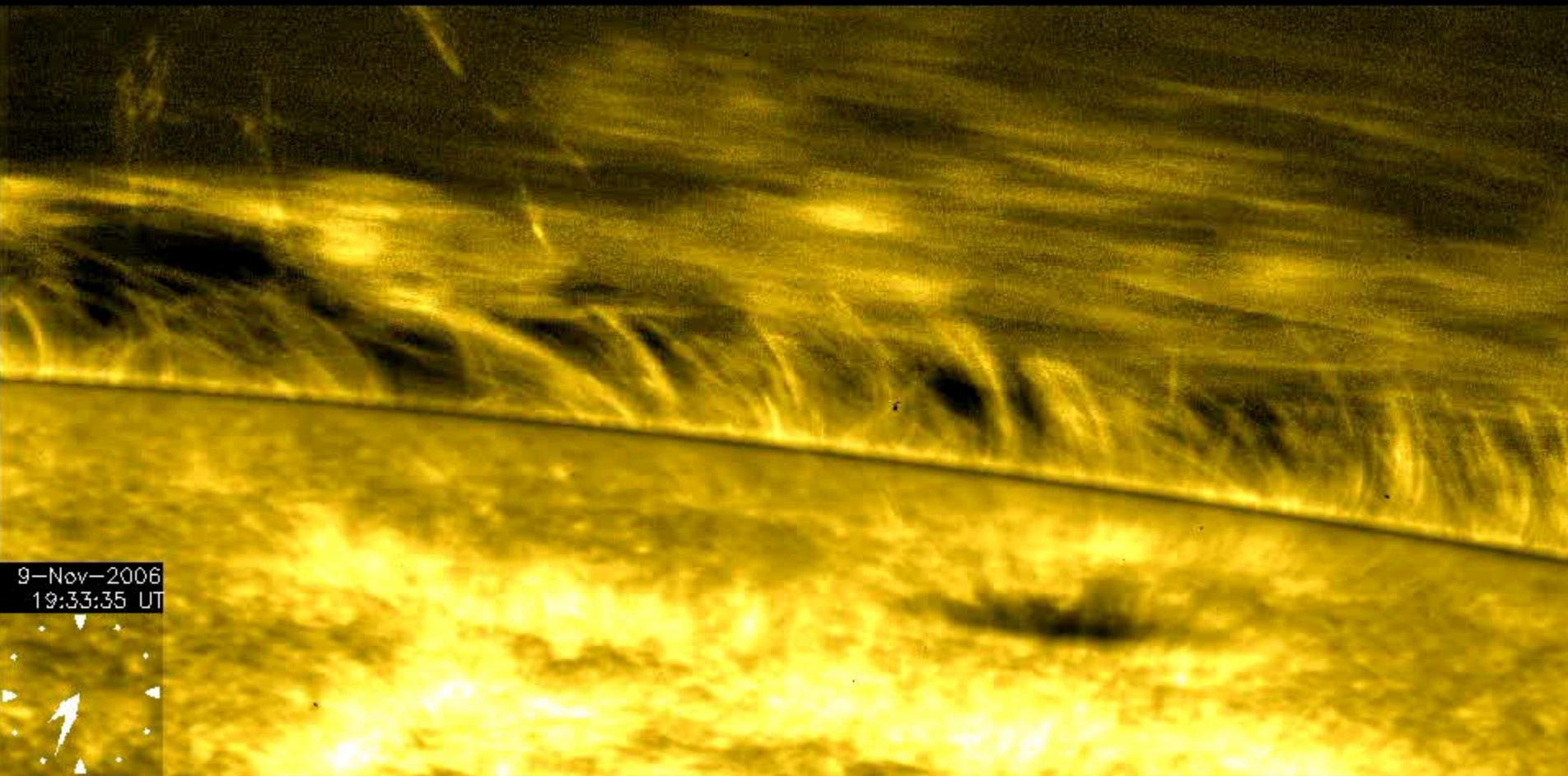
$$\lambda_{2,6} = u \mp c_a, \quad \lambda_{1,7} = u \mp c_f, \quad \lambda_{3,5} = u \mp c_s, \quad \lambda_4 = u$$

$$c_a = \frac{|B_x|}{\sqrt{\rho}}, \quad c_{f,s} = \left\{ \frac{\gamma p + |\mathbf{B}^2| \pm \sqrt{(\gamma p + |\mathbf{B}^2|)^2 - 4\gamma p B_x^2}}{2\rho} \right\}$$

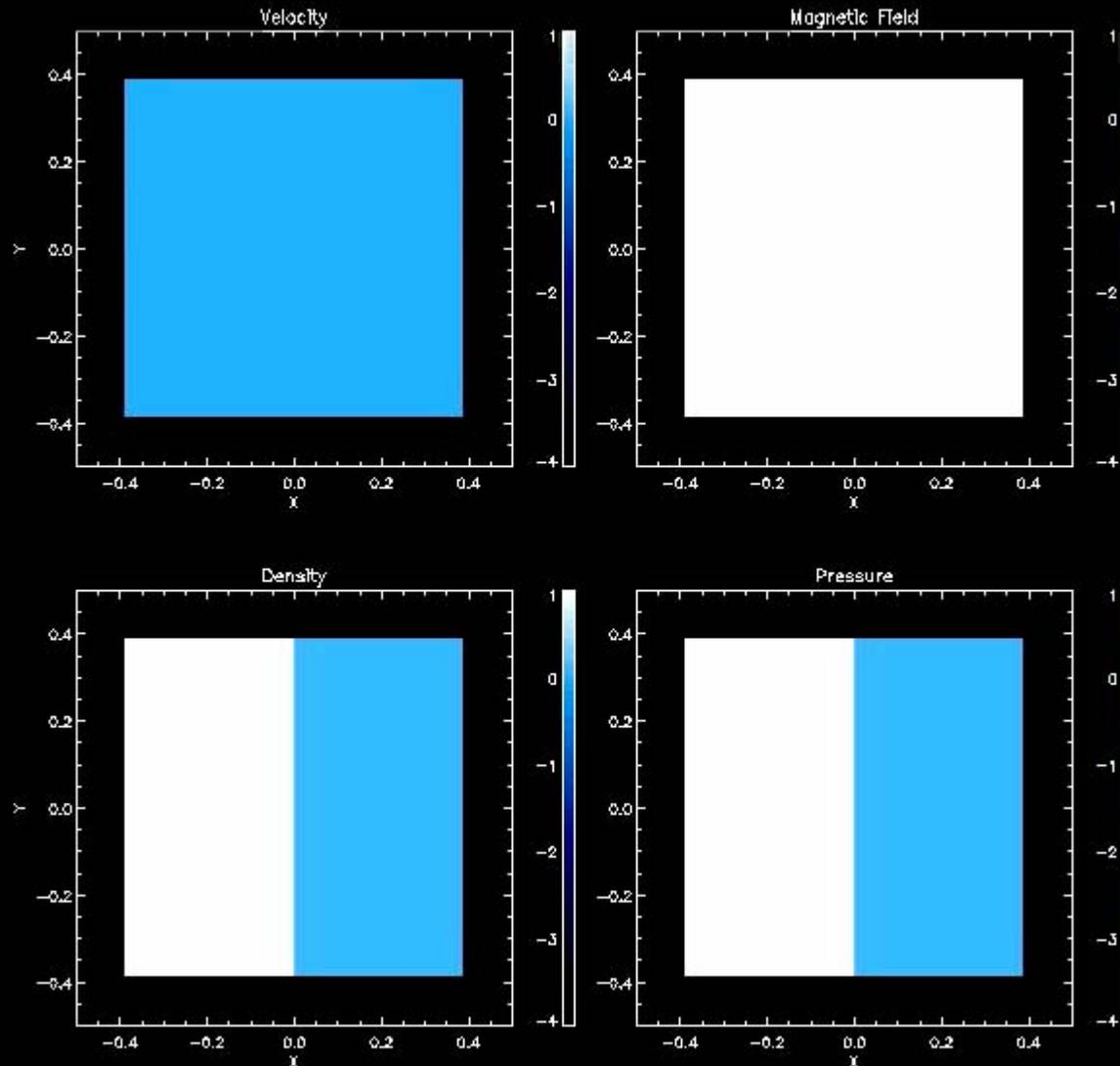
Alfven wave (Alfven, 1942 Nature)



Alfven wave?

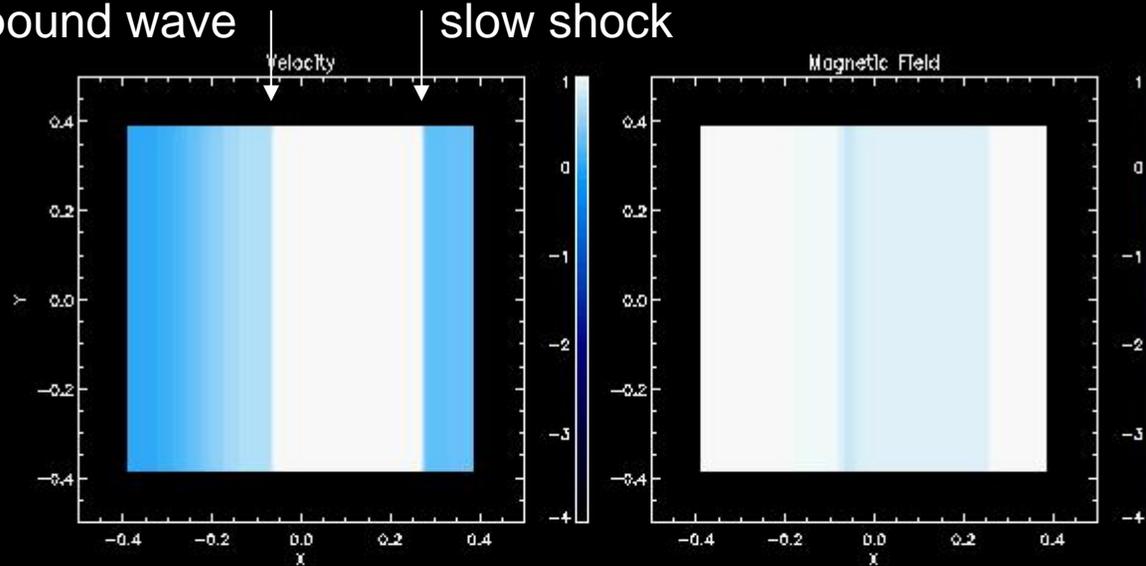


Shock tube test

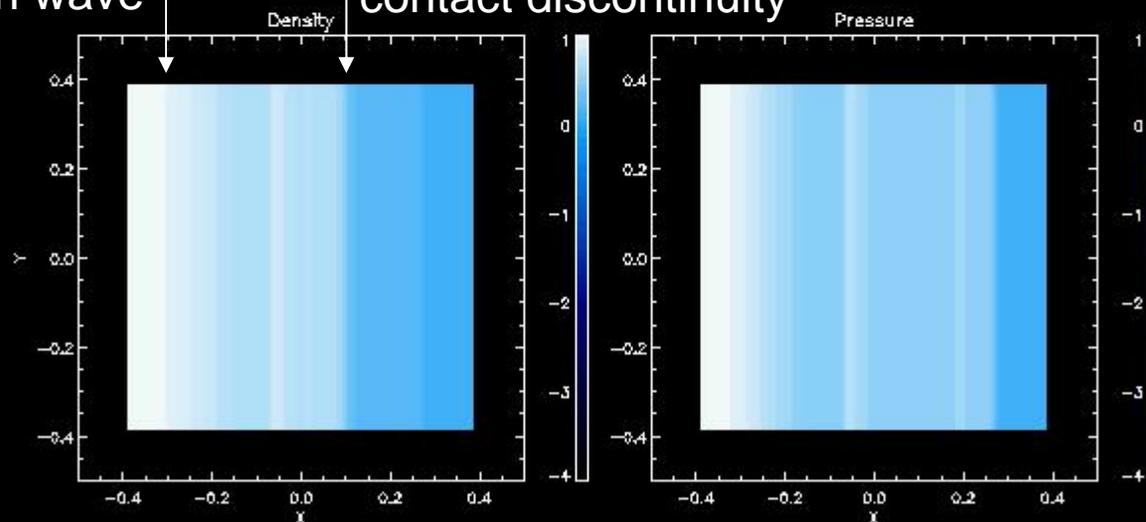


Shock tube test

slow compound wave slow shock



fast rarefaction wave contact discontinuity



Rankine-Hugoniot (RH)関係式

$$S[U] = [F]$$

$[\]$: 物理量のジャンプ
 S : 不連続の動くスピード

不連続を横切る流れあり $u_1, u_2 \neq S, B_x \neq 0$

圧縮 $\rho_1 < \rho_2, u_1 > u_2$ $B_1 < B_2$ \longrightarrow 衝撃波(fast mode)

$B_1 > B_2$ \longrightarrow 衝撃波(slow mode)

非圧縮 $\rho_1 = \rho_2, u_1 = u_2$ $S = \lambda_2$ or λ_6 \longrightarrow 回転不連続

$$[\rho] = [p] = [B_y^2 + B_z^2] = 0, \quad \pm \sqrt{\rho}[v] = [B_y], \quad \pm \sqrt{\rho}[w] = [B_z]$$

不連続を横切る流れなし $u_1 = u_2 = S = \lambda_4$

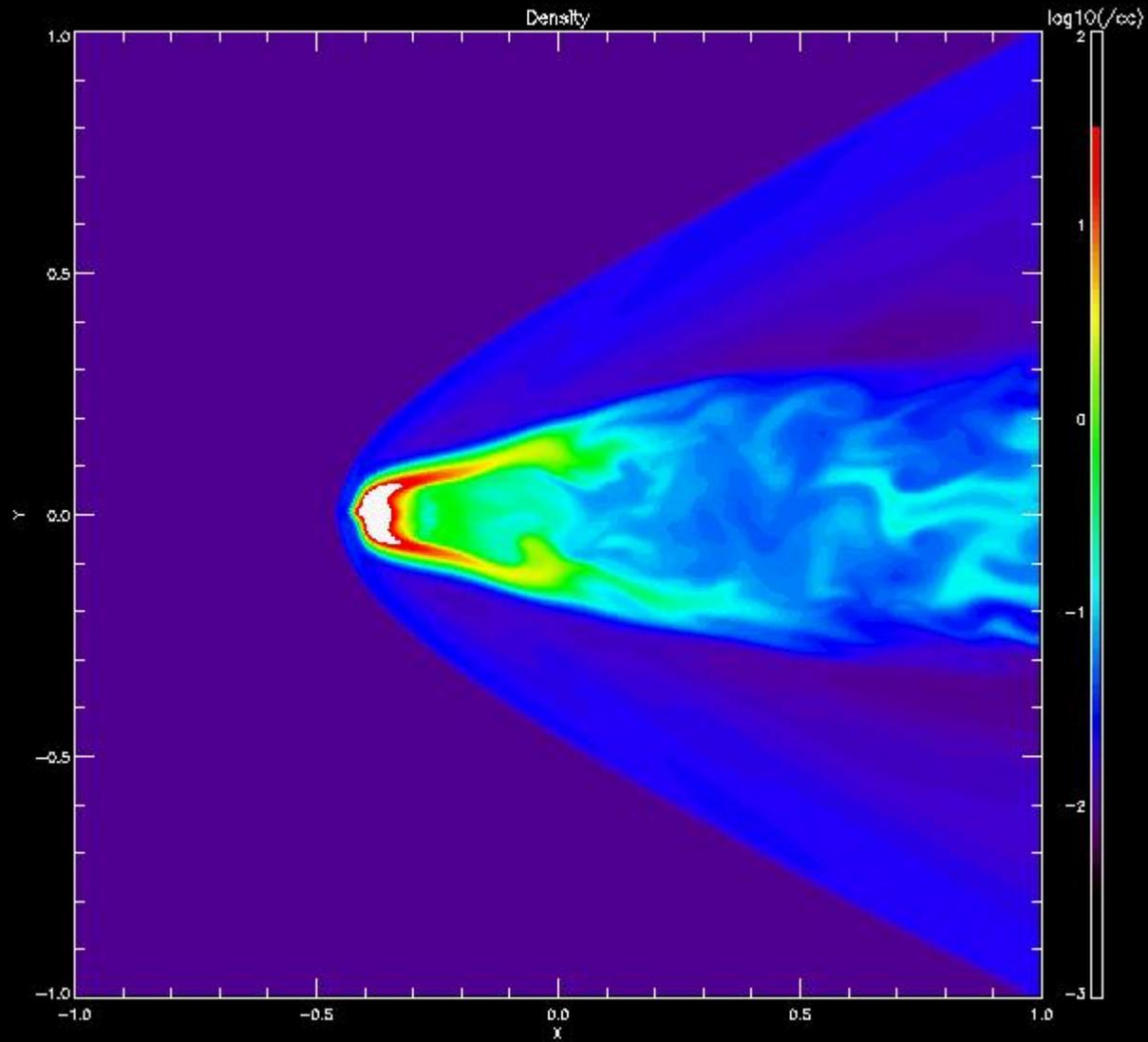
横切る磁場あり $B_x \neq 0$

$[B_y] = [B_z] = [v] = [w] = [p] = 0$ \longrightarrow 接触不連続

横切る磁場なし $B_x = 0$

$[p + (B_y^2 + B_z^2)/2] = 0$ \longrightarrow 接線不連続

Bow shock



3次元乱流の謎

- なぜ乱流状態になり、なぜ対称性が崩れたのか？
 - そもそも乱流とは何か？
- 2008年現在のパソコンでは256x256x256が格子数の許容範囲。
 - 倍精度(8byte)で1配列約130MB。
 - スナップショット(8配列)保存に約1GB。
 - 単純に64CPU並列で1024x1024x1024も可能。
- 興味のある人は・・・
 - 物理: MHD波動とMHD不安定など理論から追求する。
 - 計算法: 適合細分化格子(AMR)でコスト節約を追及する。
 - 計算機: 次世代ペタコン計画でパワーで解決する。

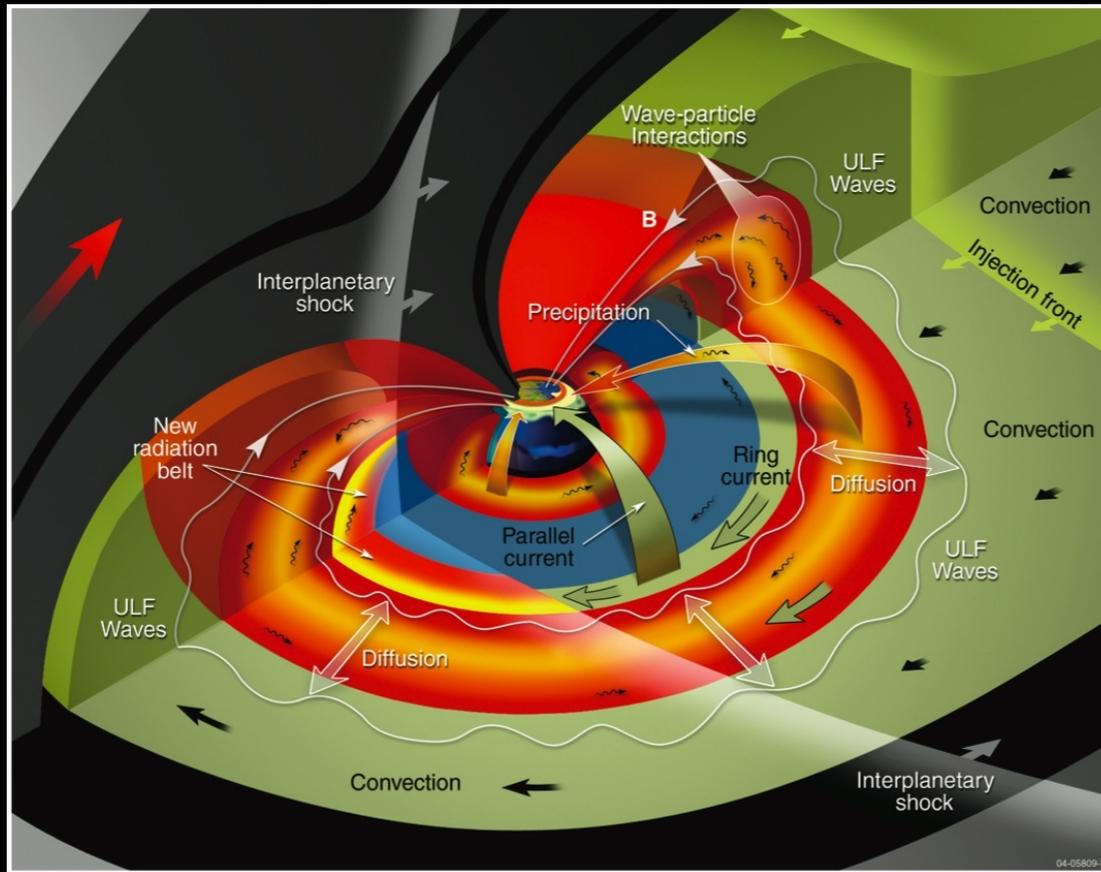
難問はMHDの果てに

- リコネクション
 - フレア、CME、サブストーム
- ダイナモ
 - 黒点周期、地磁気反転
- 弱電離プラズマとの結合
 - オーロラ爆発、磁気嵐
- 中性流体との結合
 - 太陽圏構造

3. 数値宇宙天気予報

- 宇宙天気予報研究の現場を紹介する。
- 太陽風・放射線帯のモデリング研究
 - 放射線帯の変動原理
 - 太陽風構造、磁場、密度依存性の発見
 - 物理は省略(論文参照&三好さんの講義)
 - 確率予報から数値予報へ
 - 宇宙天気図の提案

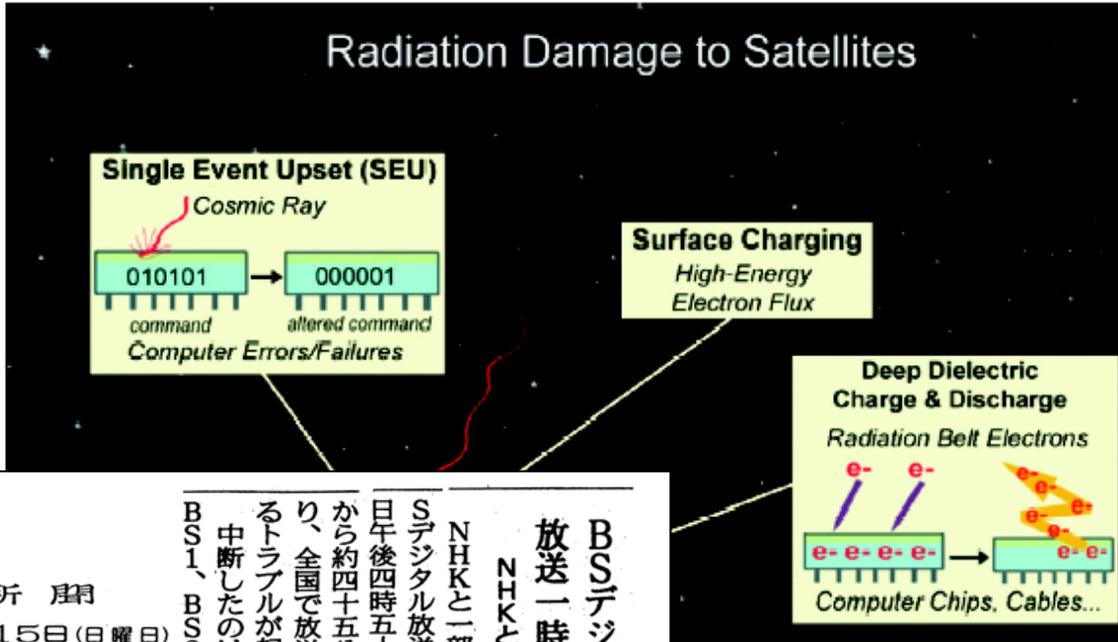
バンアレン帯(放射線帯)





宇宙放射線被害

- ・天気予報 (気象衛星)
- ・カーナビ (GPS衛星)
- ・BS放送 (放送衛星)



一時間で回復

日本経済新聞
2004年(平成16年)2月15日(日曜日)

BSデジタル放送一時中断
NHKと一部民放
NHKと一部民放のBSデジタル放送で、十四日午後四時五十分ごろから約四十五分間にわたり、全国で放送が中断するトラブルが起きた。中断したのはNHKのBS1、BS2、BSハ

イビジョン、民放の映画専門局「スター・チャンネルBS」、音声放送「ミュージックバード」、データ放送など。民放キー局のBSデジタル放送には影響はなかった。NHKによると、放送が映らなかつたり、画面が固まったまま動かなくなるなどして、視聴者から問い合わせが相次いだ。
NHKと民放などが出資する衛星運用会社の放送衛星システム(東京)で、放送衛星(BS)を予備の衛星に切り替え復旧した。トラブルのあった放送は、衛星の中継器を共有しており、この中継器の故障が原因とみて調査している。当時、NHKのBS1とBSハイビジョンでは大相撲の韓国公演を生中継していた。

ひまわり「不具合」6号で姿勢異常 気象観測不能に

十七日未明、気象観測衛星「ひまわり6号」の姿勢制御装置がトラブルで停止し、観測ができなくなった。気象庁によると、観測再開までには十日から一日程度かかる見通し。同じく観測再開まで、衛星の姿勢が崩れて回り始める可能性がある。緊急用電波を使って衛星と通信し、午前五時前に衛星の姿勢は安定した。回復したものの、観測用カメラなどはクーラーによる冷却が必要で、機能の完全回復に半日から一日程度の時間がかかる見込みという。

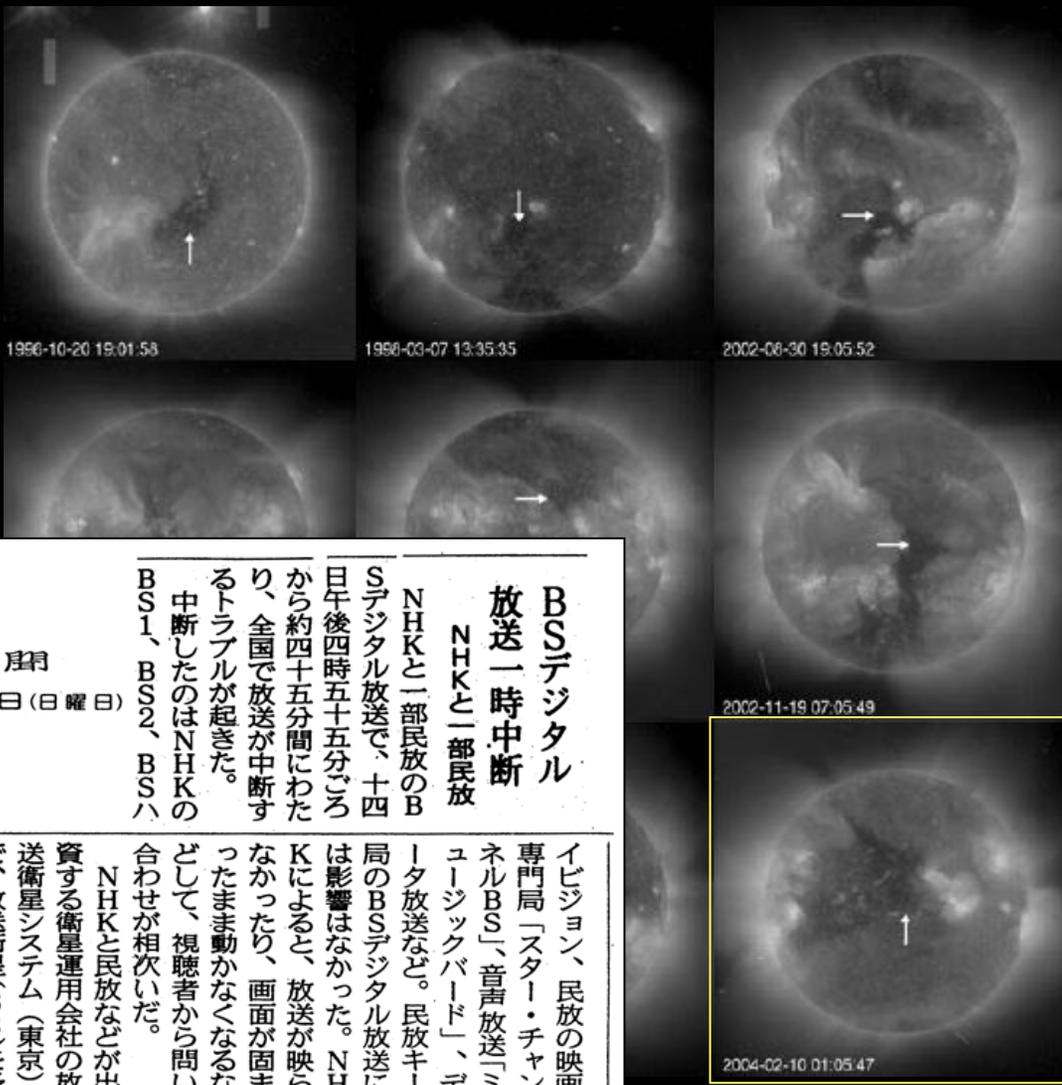
カメラなどはクーラーによる冷却が必要で、機能の完全回復に半日から一日程度の時間がかかる見込みという。

Solar Panel Degradation

Solar Energetic Particles, Micro-meteoroids

一日で回復

Coronal Holes

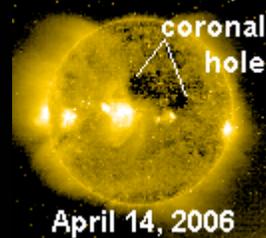


ひまわり「不具合」6号で姿勢異常 気象観測不能に

十七日未明、気象観測衛星「ひまわり6号」の姿勢制御装置がトラブルのため、天気予報などに影響を及ぼす恐れがある。衛星は、姿勢制御装置がトラブルのため、一度の観測になる上を向かなくなった。このため同日午時過ぎ、観測機能が完全にストップ。気象庁は、緊急用電波を使って衛星と通信し、午前五時前に衛星の姿勢が安定した。観測用カメラなどはクーラーによる冷却が必要で、機能の完全回復に半日から一日程度の時間がかかる見込みという。

今回のトラブルで、国内の気象観測のほかに、ひまわり6号の画像を受信していた天気予報などに役立つクランプソフトを起動させているアジア太平洋諸国にも影響が広がっている。

ひまわり6号は昨年六月から本格運用を始め、ラプルド一時観測不能に陥った。昨年七月と九月にも、



日本経済新聞
2004年(平成16年)2月15日(日曜日)

BSデジタル 放送一時中断

NHKと一部民放
NHKと一部民放のBSデジタル放送で、十四日午後四時五十分ごろから約四十五分間にわたり、全国で放送が中断するトラブルが起きた。中断したのはNHKのBS1、BS2、BSハ

イビジョン、民放の映画専門局「スター・チャンネルBS」、音声放送「ミュージックバード」、データ放送など。民放キー局のBSデジタル放送には影響はなかった。NHKによると、放送が映らなかつたり、画面が固まったまま動かなくなるなどして、視聴者から問い合わせが相次いだ。

NHKと民放などが出資する衛星運用会社の放送衛星システム(東京)で、放送衛星(BS)を予備の衛星に切り替え復旧した。トラブルのあった放送は、衛星の中継器を共有しており、この中継器の故障が原因とみて調査している。当時、NHKのBS1とBSハイビジョンでは大相撲の韓国公演を生中継していた。

人工衛星故障の原因 キラ電子を ネットで予報

世界初、理研など

あすの宇宙の天気は？
。気象衛星「ひまわり」などが周回している

高度約三万五千八百キロの静止軌道で、人工衛星の故障の原因となる電子の発生確率を予測する「宇宙天気予報」を、理化学研究所の片岡龍峰研究員らが世界で初めて開発した。インターネットでも公開しており、五日後までの宇宙の「天気」を知ることができる。

人工衛星の故障を引き起こす原因となるのは、キラ電子と呼ばれる放射線粒子。軌道の周辺でキラ電子の嵐が増える

と、人工衛星の異常動作や故障が起こりやすくなる。片岡研究員らは電子の発生に影響を与える太陽風のデータなどから、キラ電子の嵐が警戒レベルに達する確率を数日先まで予測できる計算方法を独自に開発した。

地上の天気予報の降水確率と同じ要領で、一日のうちで警戒レベルを超える可能性が10～30%の場合が晴れ、40～60%は曇り、70～90%は雨と表

現。ホームページ（HP）上では「天気」をUFOに雲や雷が掛かったマークなどで表示している。これまでもキラ電子の異常増加で、衛星放送が中断したり、気象衛星が長時間にわたって機能停止したりするなどの被害が出ている。

片岡研究員は「警戒レベルに達する確率を予測できれば、人工衛星の運用や宇宙飛行士の船外活動などの活用が期待で

きんこう 電話 011-836-5111
HP http://hbks.wl.sci.nagoya-u.ac.jp/index.html

http://www.aprsaf.org/

Asia-Pacific Regional Space Agency Forum

APRSAF

Sitemap Japanese

Home About APRSAF Participants Meetings & Events Working Groups Event Calendar Contact Us

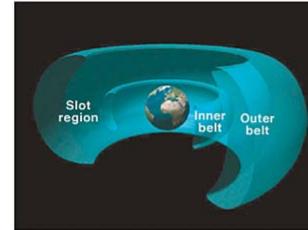
Feature Stories

Probabilistic Forecast of Killer Electron Alert in Geosynchronous Orbit

Dr Yoshizumi Miyoshi (Nagoya University) and Dr Ryuho Kataoka (RIKEN) have developed a forecasting system to predict the daily probability of a killer electron alert in geosynchronous orbits up to a week in advance.

Dr Ryuho Kataoka, a special postdoctoral researcher at RIKEN, said "This forecasting system originated from a very similar concept to the weather forecast of precipitation probability. We will continuously investigate the characteristics of the solar wind and radiation belts in detail and hope to contribute to satellite operations."

Illustration of spatial structure of radiation-belt electrons



Courtesy of Windows to the Universe, <http://www.windows.ucar.edu>

AKEBONO / RDM > 2500 keV

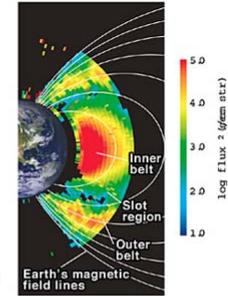


Figure 1. Illustration of radiation-belt electrons (left). The spatial distribution of electrons above 2500 keV observed by AKEBONO (right) with particles' flux expressed in color.

<http://www.isas.jaxa.jp/e/toront/2006/miyoshi/index.shtml>

10/07(Sun) 01:00 UT updated

| Today | Tomorrow | 2days | 3days | 4days | 5days |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | |
| 80% | 80% | 50% | 40% | 30% | 20% |

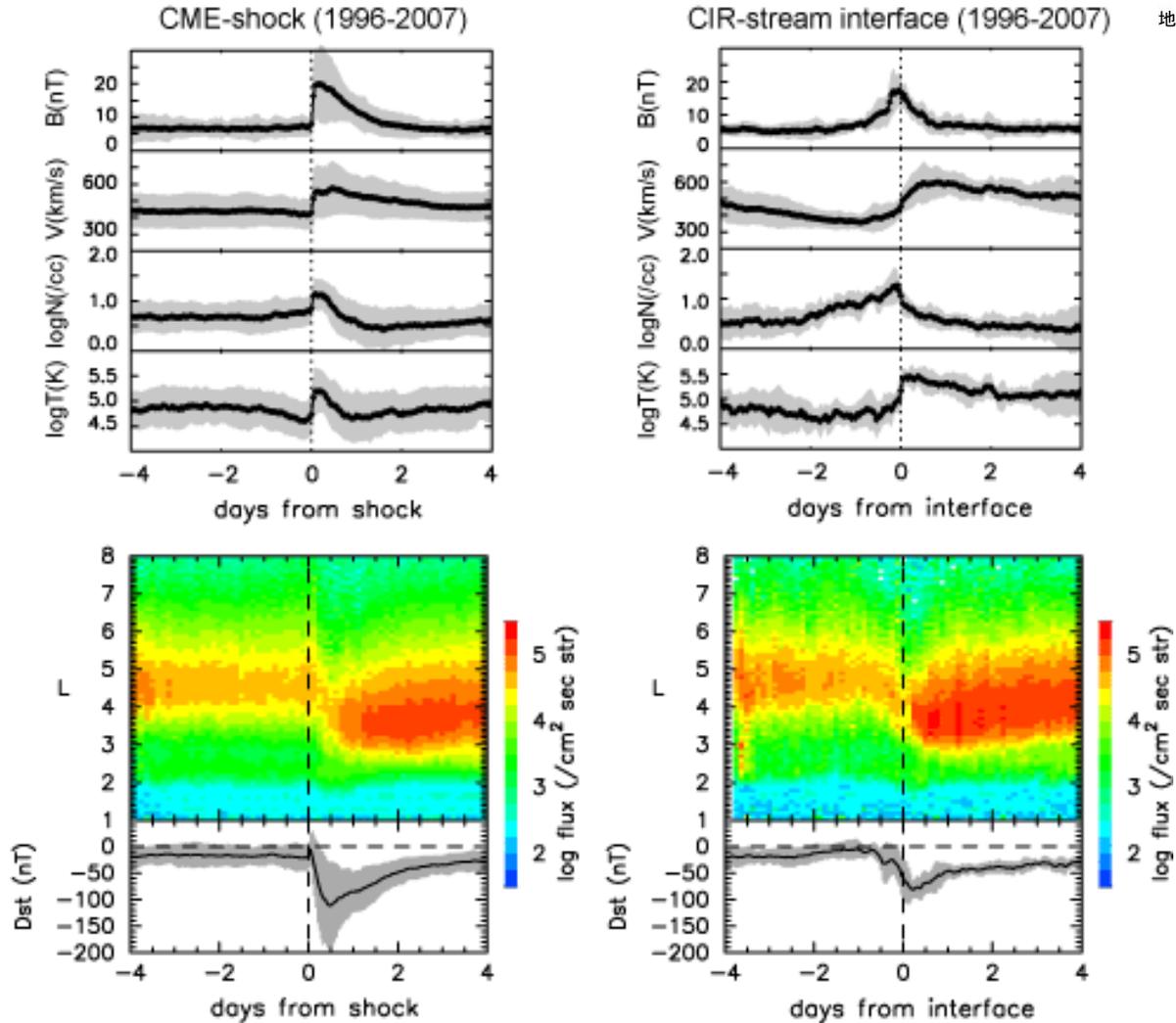
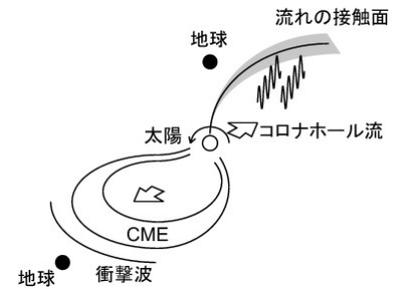
Figure 2. This table shows the probability that the 24-hour maximum value of 2MeV electrons in a geosynchronous orbit will exceed the NOAA/SEC alert level of 1,000 PFU. The forecast is updated every day by scientists between midnight and noon UT. "Today" means from midnight to the following midnight, UT.

予測するために重要なヒント

- 放射線帯電子は太陽風速度が速ければ増える。
 - 他の効果は「微妙」と長年信じられてきた。
- 近年、他の効果の役割が明らかになりつつある。
 - 太陽風構造依存性
 - Miyoshi and Kataoka (2005 GRL)
 - Kataoka and Miyoshi (2006 Space Weather)
 - 太陽風磁場効果
 - Miyoshi and Kataoka (2007 JGR)
 - 太陽風密度効果
 - Kataoka and Miyoshi (2008 GRL&AnGeo)

* 予報には未導入

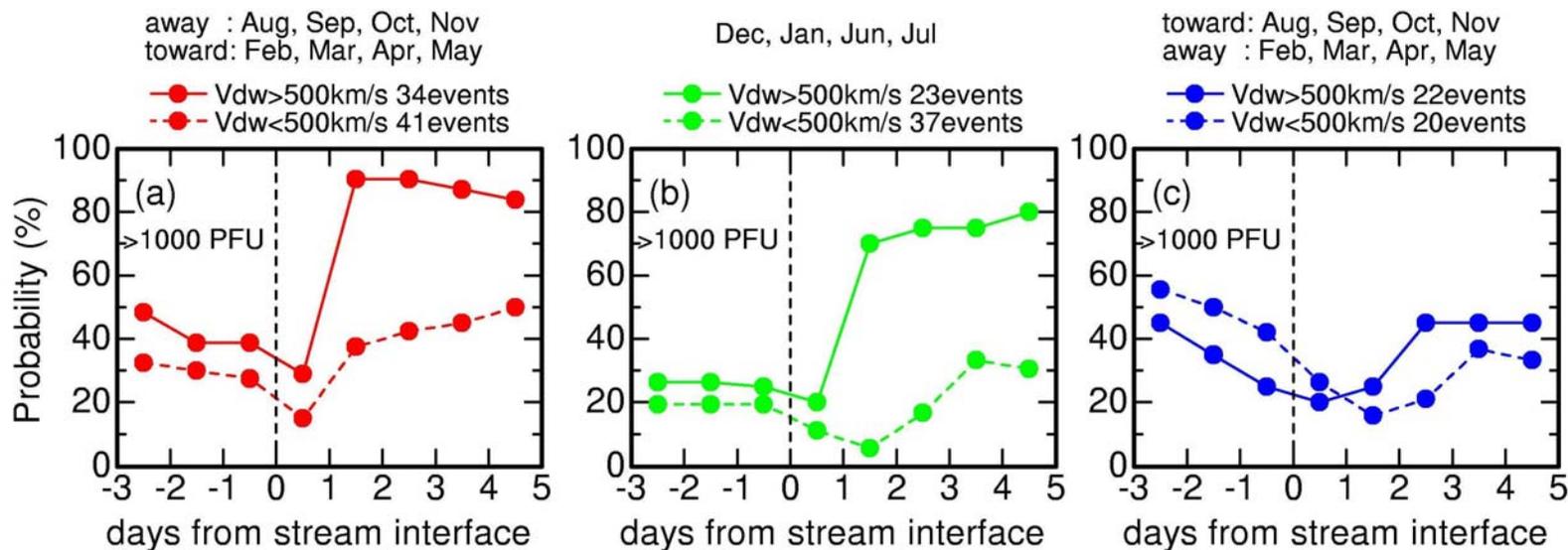
太陽風構造依存性



Kataoka and Miyoshi (2006), updated

放射線帯電子増加の確率予報

太陽風の速度のみならず、磁場と季節に依存して大きく変化する。
この性質を利用してNOAA基準を超える確率の正確な予報が可能。



Miyoshi and Kataoka (2007)

Contents

- [ENGLISH VERSION](#)
- [JAPANESE VERSION](#)

Link

Radiation Belt Models

- [NOAA/SEC](#)
- [NASA/GSFC](#)
- [UC/LASP](#)
- [JAXA/SEES](#)
- [NICT](#)

Space Weather Info

- [NOAA/SEC](#)
- [SpaceWeather.com](#)
- [SolarMonitor](#)

Space Wx Info Japan

- [NICT1](#)
- [NICT2](#)

Real Time Data

- [HINODE](#)
- [STEL/IPS](#)

[TOP](#) [DIFF](#) [LIST](#) [SOURCE](#) [SEARCH](#) [HELP](#) [PDF](#) [RSS](#) [LOGIN](#)

ENGLISH VERSION

HBF Space Weather Forecast

What's New

2007/09/20 English version open. Space Weathermeter Ver 0 installed.
2007/11/01 This webpage was introduced in Asia-Pacific Regional Space Agency Forum.
2008/02/25 Wiki version open.
2008/04/14 Reliability rank (A,B,C,and X) is indicated.

Weekly Forecast

2008/04/25(Fri) 05:30 UT updated

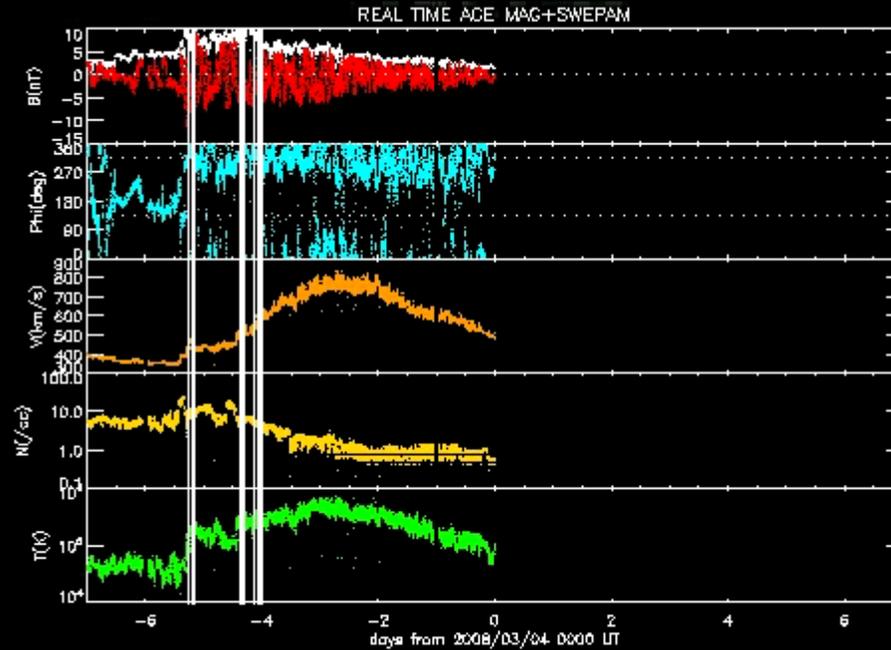
| Today | Tomorrow | 2days | 3days | 4days | 5days |
|--|--|---|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |
| 90% | 90% | 80% | 80% | 80% | 80% |
| / | B | B | A | A | A |

Stream interface arrival:2008/04/23(Thu) 2 days after the arrival.

Expected next stream interface arrival:

Note: (Forecaster: RK)

リアルタイム太陽風データの例



流れの接触面(接線不連続)の自動検出

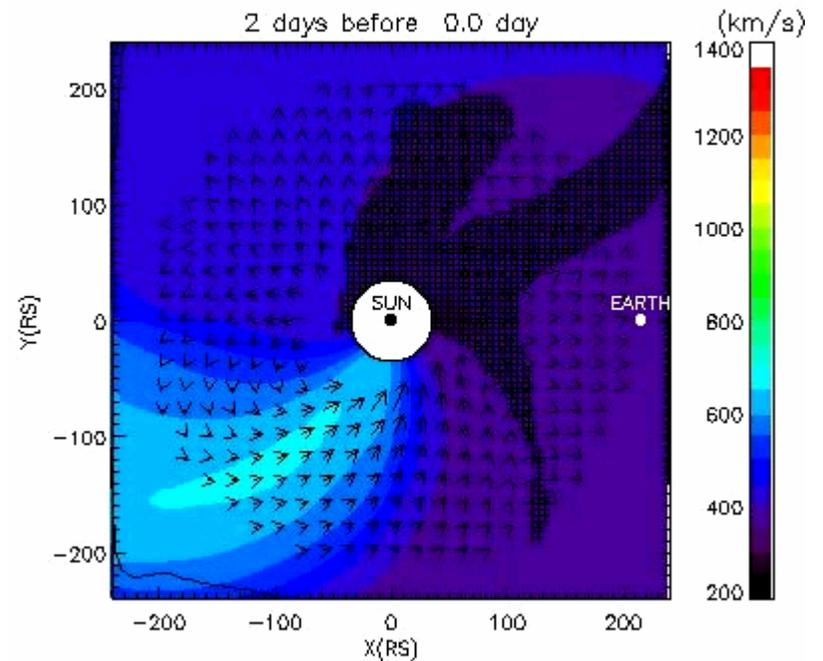
モデリング研究の動機、目的、目標

- 宇宙天気図を作りたい。
 - 今、どの太陽風構造の、どこら辺に地球があるのか。
 - 太陽風は単なる「数字」ではない。SBz=-5nTでは不十分。
- 太陽から地球まで見渡すリアルタイムシミュレーションを作る。
 - 確率予報から数値予報へ。
 - 基本原理(MHD)に基き、数值的に解く。
 - 毎日結果を評価しモデルを改善する。
 - リアルタイムはだましが利かない。
- 数値宇宙天気予報を運用する。
 - 1週間先まで、太陽風と放射線帯のあらゆる場所における数値を出せる宇宙天気図の実現へ。

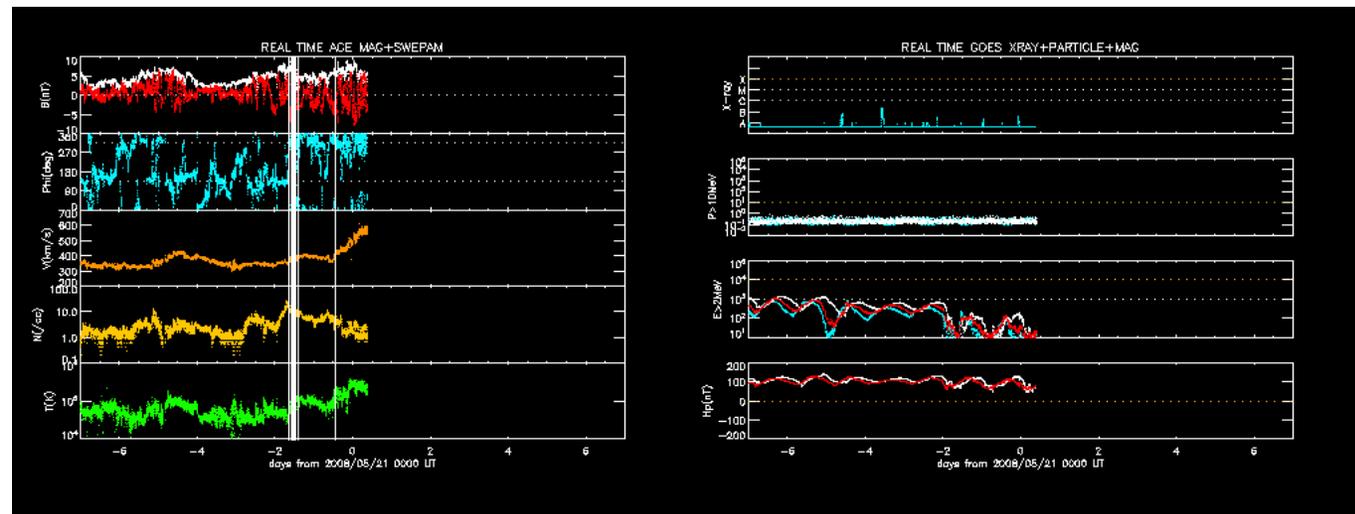
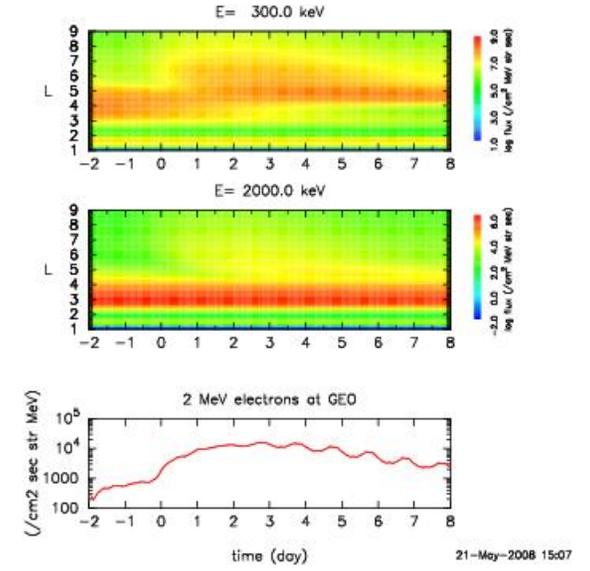
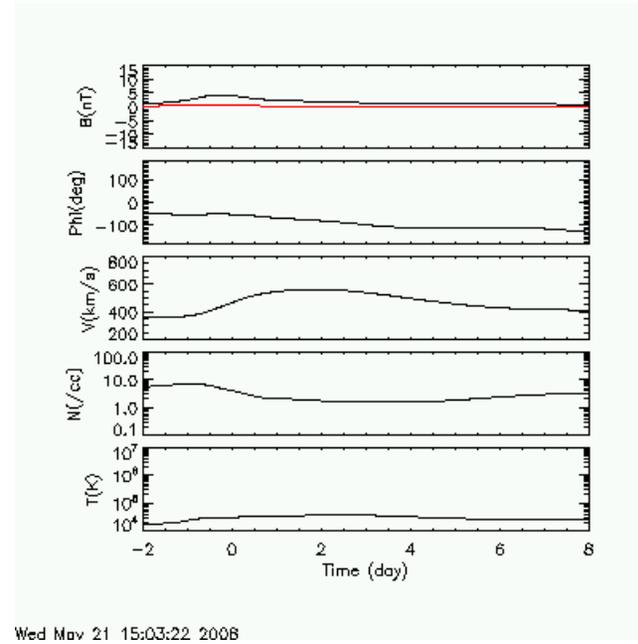
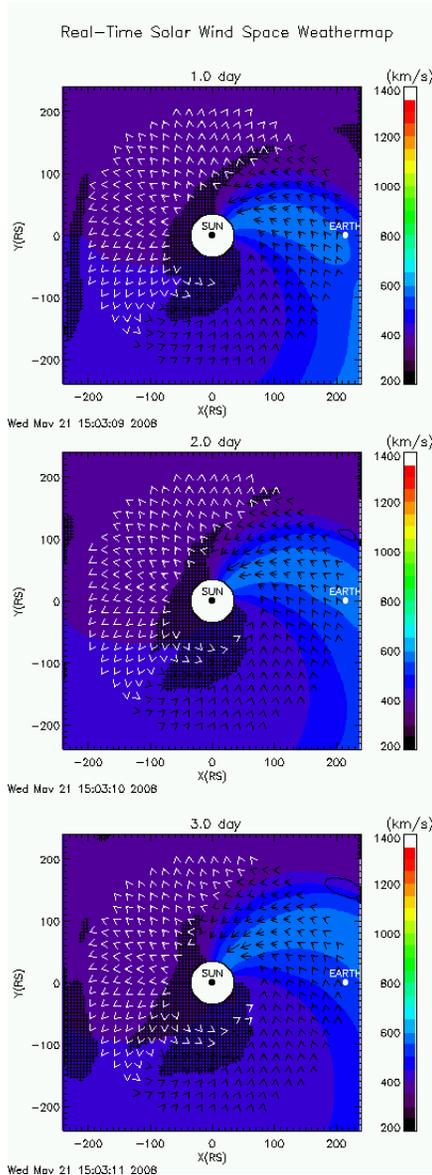
宇宙天気図(試作品)



Real-Time Solar Wind Space Weathermap



数值宇宙天气予報(試作品)



MHD equations: GLM formulation

(Dedner et al., 2002)

divBを解消 \rightarrow

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{v} \\ \mathbf{B} \\ e \\ \psi \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p_t \mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B} \\ \mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v} + \psi \mathbf{I} \\ (e + p_t) \mathbf{v} - \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{v}) \\ c_h^2 \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{c_h^2}{c_p^2} \psi \end{pmatrix}$$

$$p_t = p + \frac{B^2}{2}, \quad e = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{B^2}{2}$$

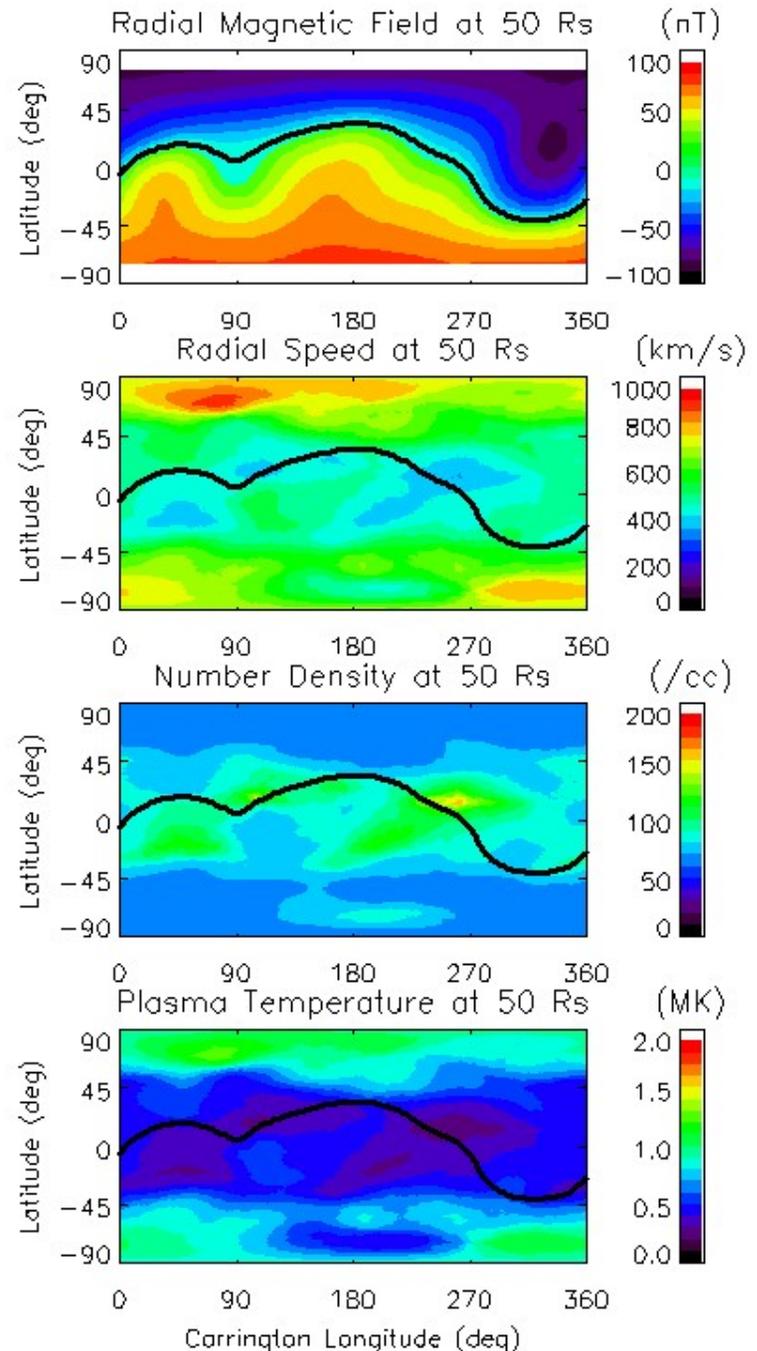
HLLD法(Miyoshi and Kusano, 2005)で数値的に解くことができる。

Inner Boundary for July 2004 event

- Magnetic field
 - Coronal field map (WSO)
- Velocity field
 - IPS average map (STEL)
- Density and temperature
 - Helios empirical model (Hayashi et al., 2003)

$$n(V) = 62.98 + 866.4 \left(\frac{V}{100} - 1.549 \right)^{-3.402}$$

$$T(V) = -0.455 + 0.1943 \frac{V}{100}$$

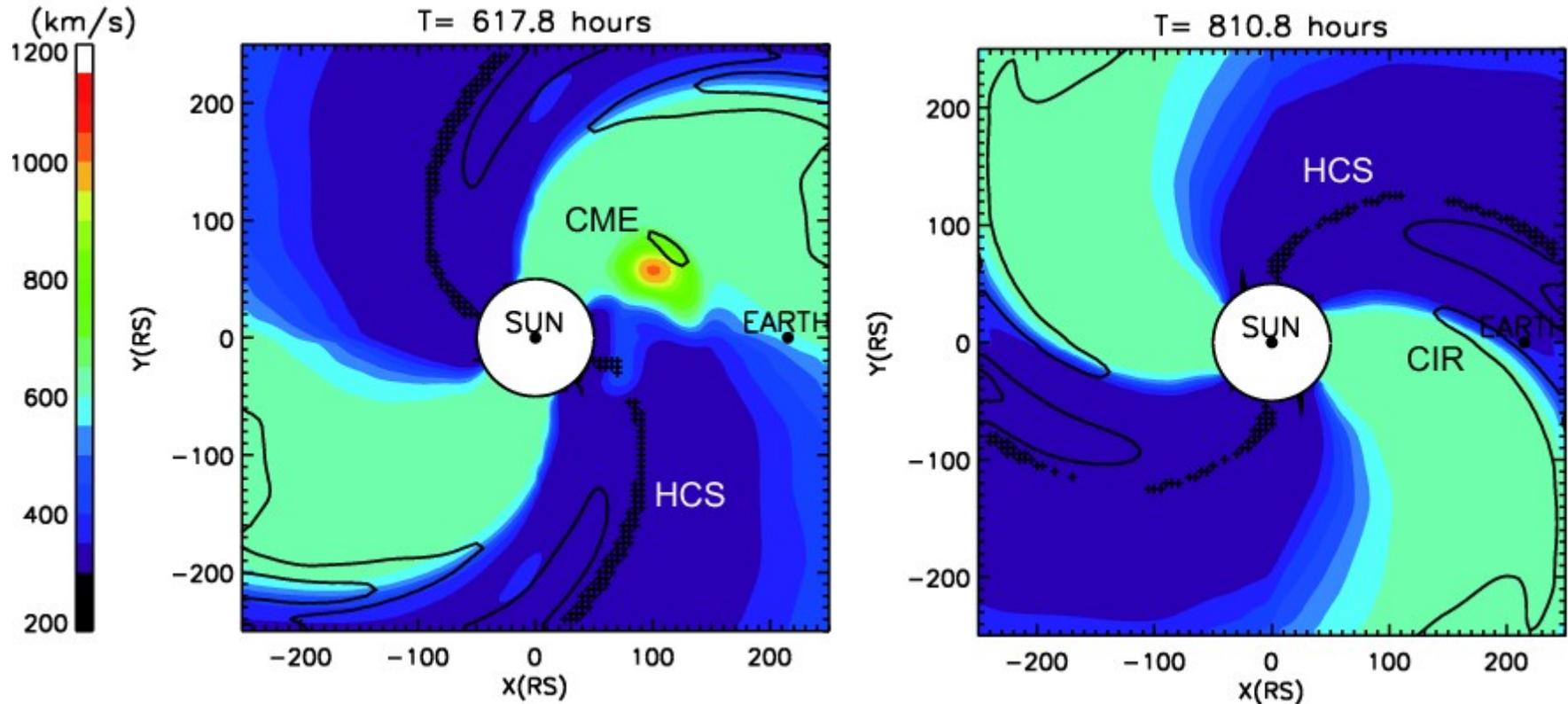


太陽風の基本構造は再現可能

Coronal Mass Ejection (CME)

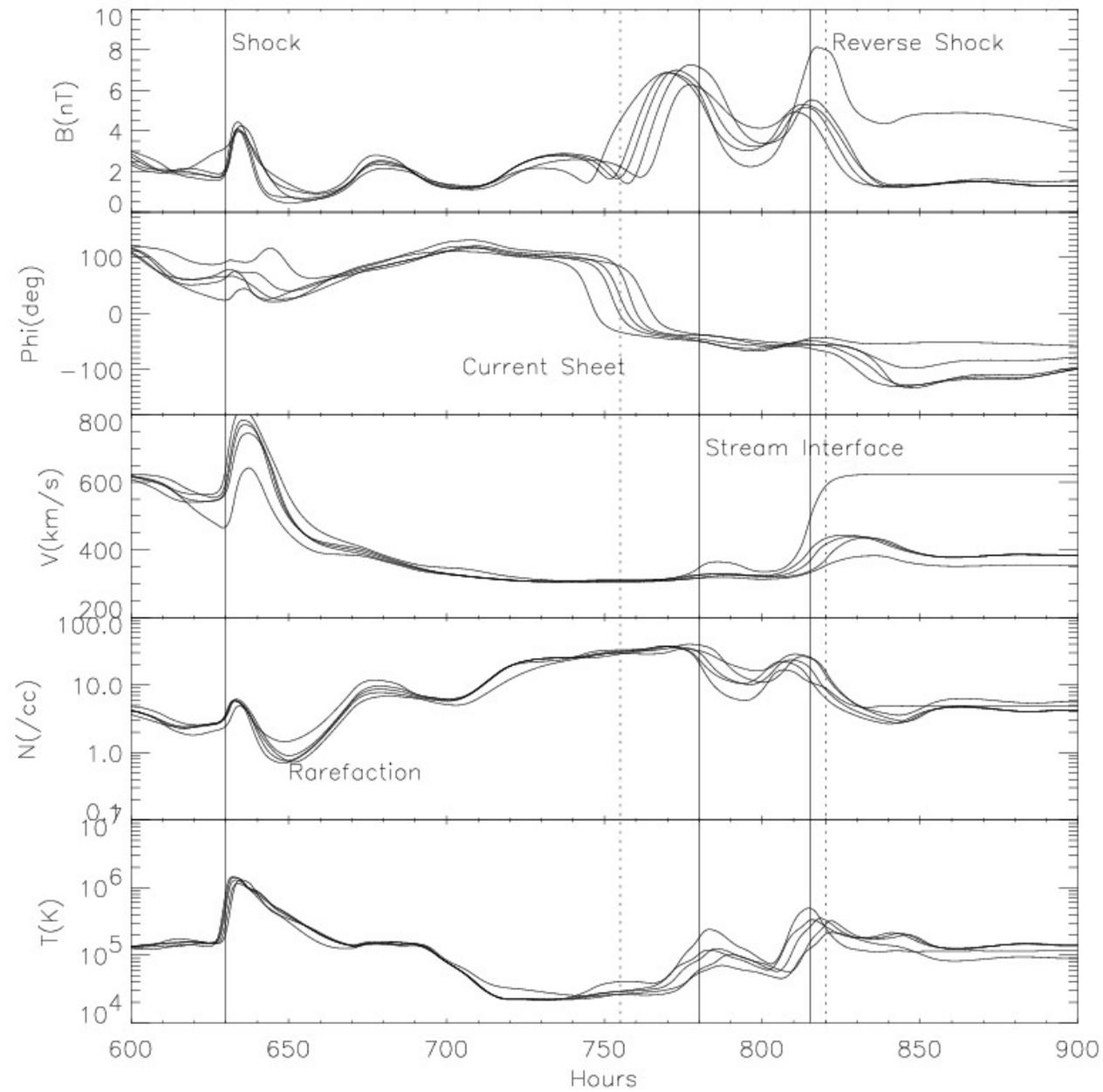
Corotating Interaction Region (CIR)

Heliospheric Current Sheet (HCS)

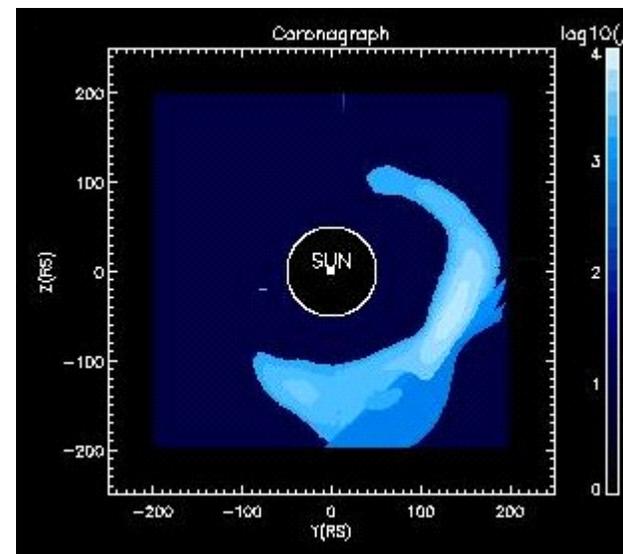
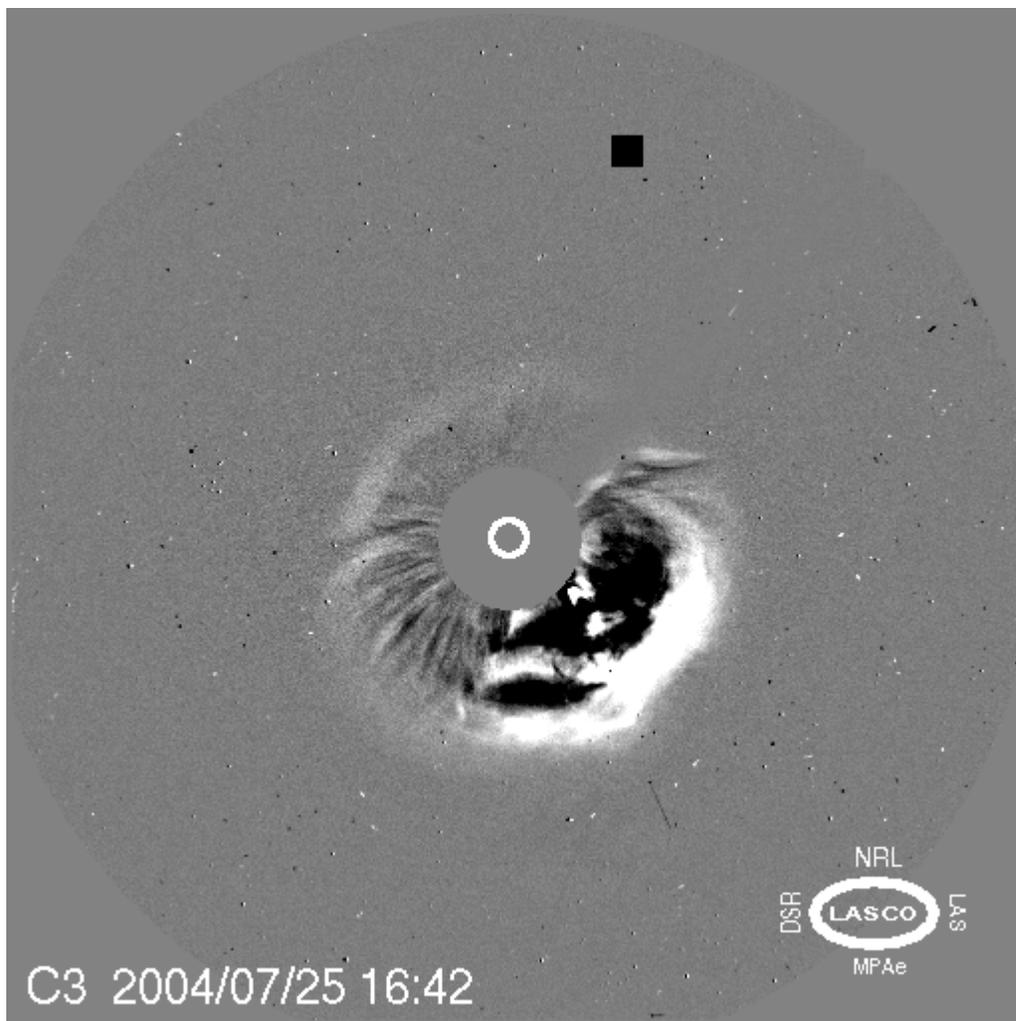


Simulated CME

Simulated CIR

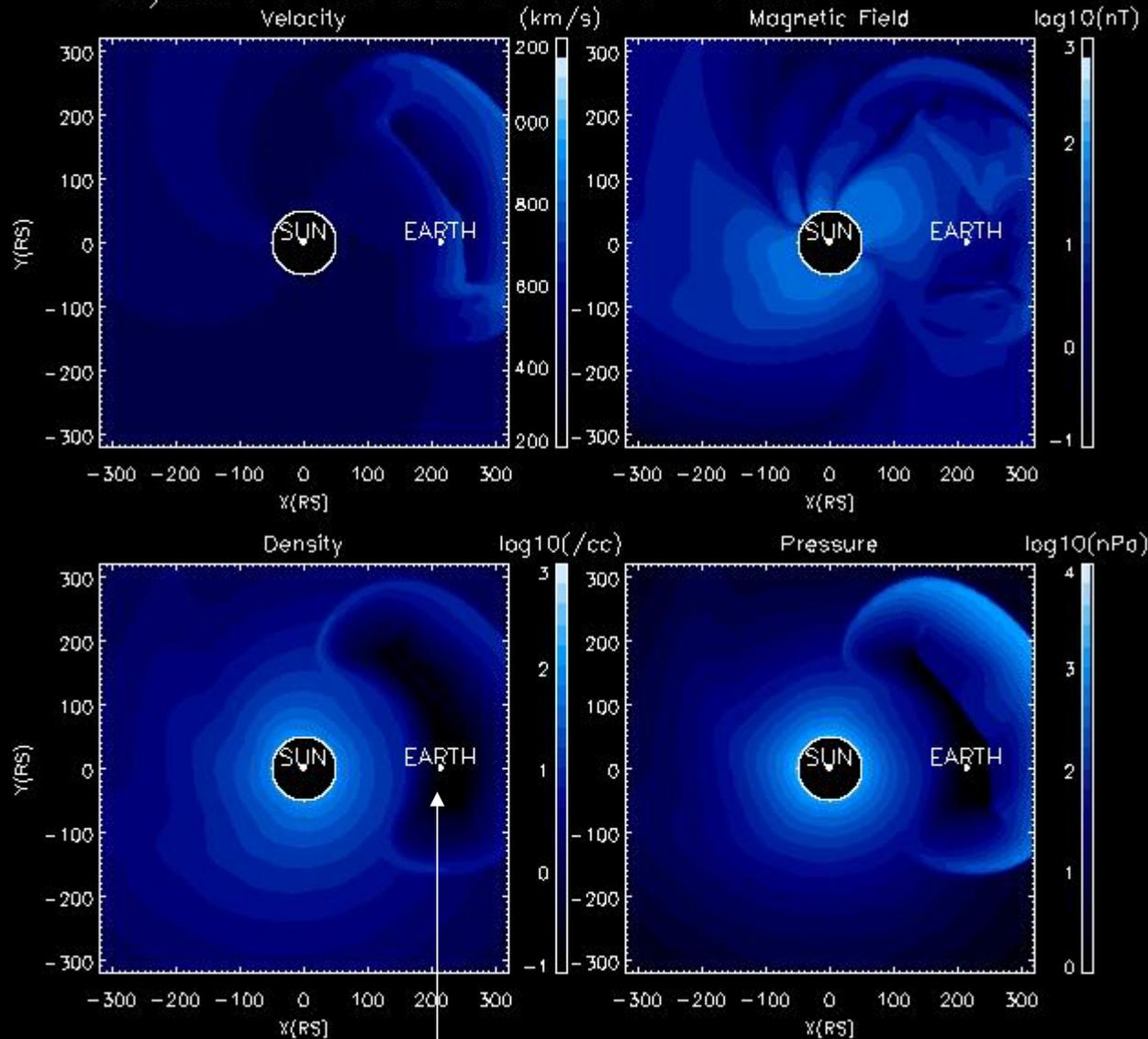


最大の課題：CME放出モデル



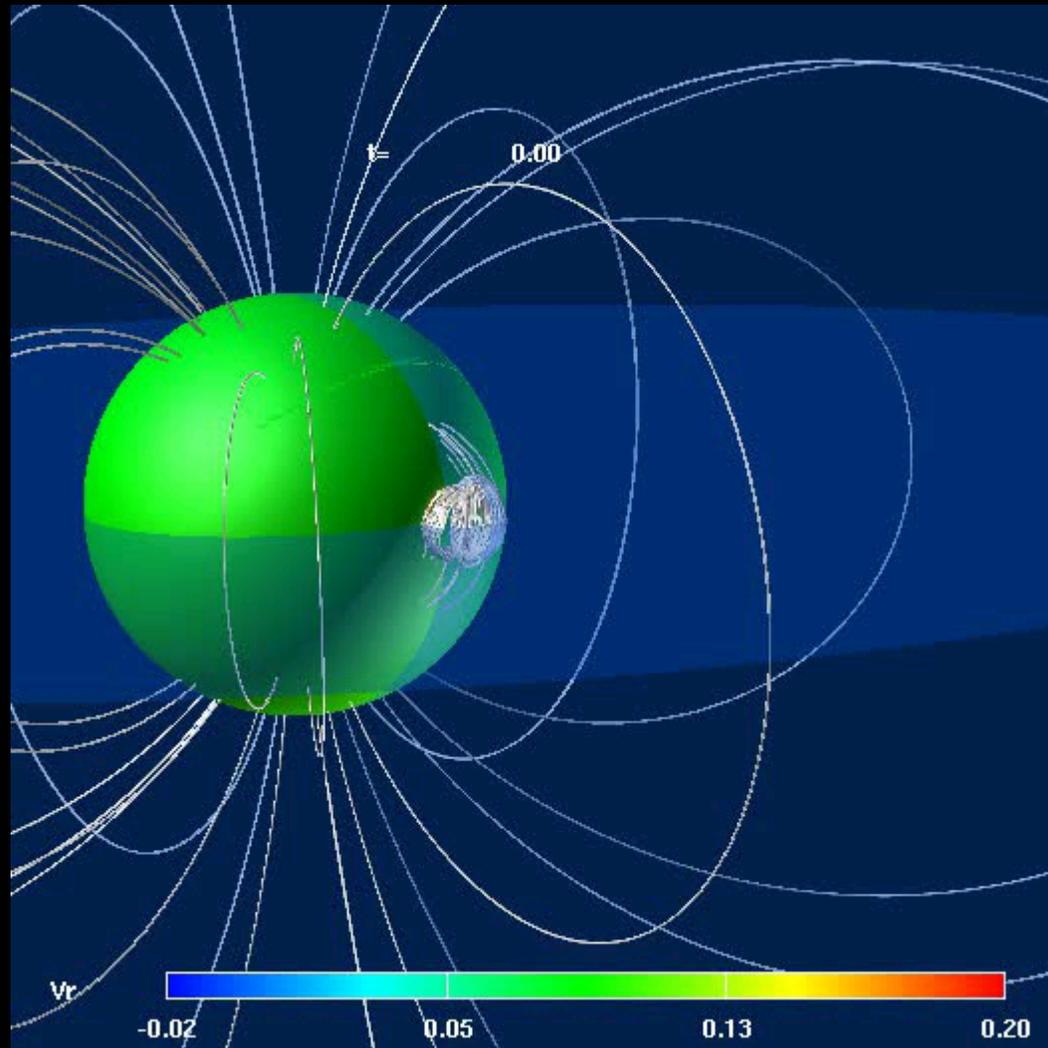
Virtual Coronagraph

July2004 Pulse 2 Z=0 Plane T= 772.1



地球がCME通過後の真空状態に包まれ、放射線帯が異常増加した例。

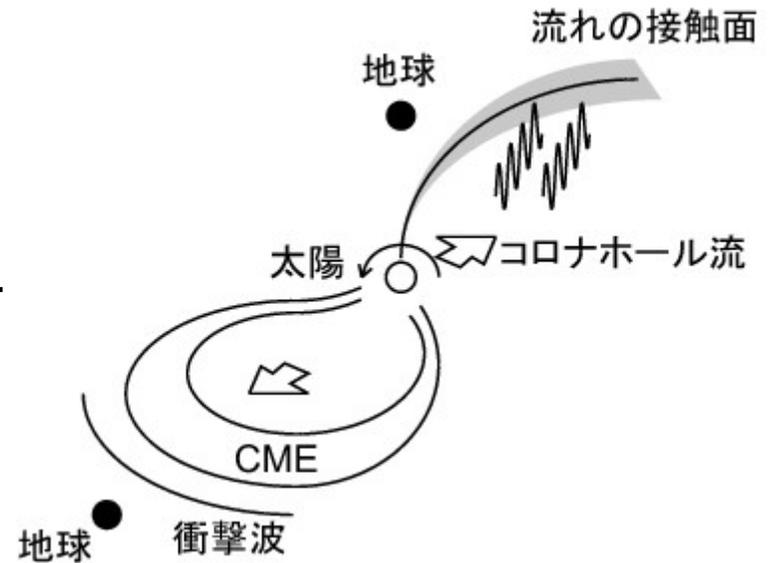
磁気嵐を引き起こす南向き磁場の予測は可能だろうか？



提供：塩田大幸(地球シミュレーター)

まとめ

- 代表的な宇宙嵐について解説した。
 - フレア放射線、オーロラ嵐、バンアレン帯
 - CME, coronal hole, active regions.
- 磁気流体力学の基礎を解説した。
 - Frozen-in, Alfvén wave, discontinuities.
 - MHDは保存則、数値解法が強力
- 宇宙天気予報研究の現場を紹介した。
 - 確率予報から数値予報へ
 - リアルタイム宇宙天気図
 - CME放出モデリング



1. 磁気流体力学の意味は理解したか？
2. 宇宙天気予報の要点は説明できるか？
3. 残された難問にはどんなものがあるか？

磁気流体力学の参考文献

- Parker (2007), “Conversations on electric and magnetic fields in the cosmos”
 - MHDとは何かを根本から考え直す最新の教科書。
- Miyoshi and Kusano (2005), J. Comput. Phys.
 - MHD近似Riemann解法の最高傑作。MHD専門家は必読。
- Dedner et al. (2002), J. Comput. Phys.
 - HLLDと相性の良いdivB問題の解決方法。マニアは必読。
- 坂下志郎, 池内了(1996), 「宇宙流体力学」
 - MHDの波動や不安定性の勉強に適した入門書。
- Alfvén (1942), Nature
 - Alfvén波の発見論文。いわずと知れたノーベル賞。