



# コンピュータで探る太陽と地球環境 —名古屋大学での太陽研究の紹介—

名古屋大学太陽地球環境研究所

総合解析部門 (SSt研)

草野完也

(kusano@nagoya-u.jp)

# 自己紹介

# Who I am

## ■ 草野完也 (Kanya Kusano)

### ■ 経歴

- 北大物理、広大物性・物理科学・先端物質科学
- 海洋研究開発機構/JAMSTEC
  - 地球シミュレータセンター、地球内部ダイナミクス領域
- 名古屋大学太陽地球環境研究所 (2009.7-)



### ■ 専門

- 太陽・宇宙・核融合プラズマ物理学 (plasma physics)
- 非線形電磁流体力学、ダイナモ理論 (MHD, dynamo)
- シミュレーション科学 (simulation sciences)
- 宇宙天気・宇宙気候 (space weather, space climate)
- 雲物理 (cloud physics)

### ■ 所属学会

- 日本天文学会、日本物理学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、プラズマ・核融合学会、JpGU, AGU, AAS, APS, IAU



# なぜ太陽は面白いのか？

## ■ 非線形・天体・プラズマ現象の宝庫

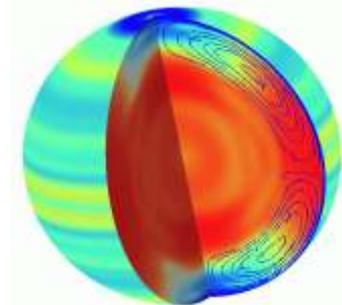
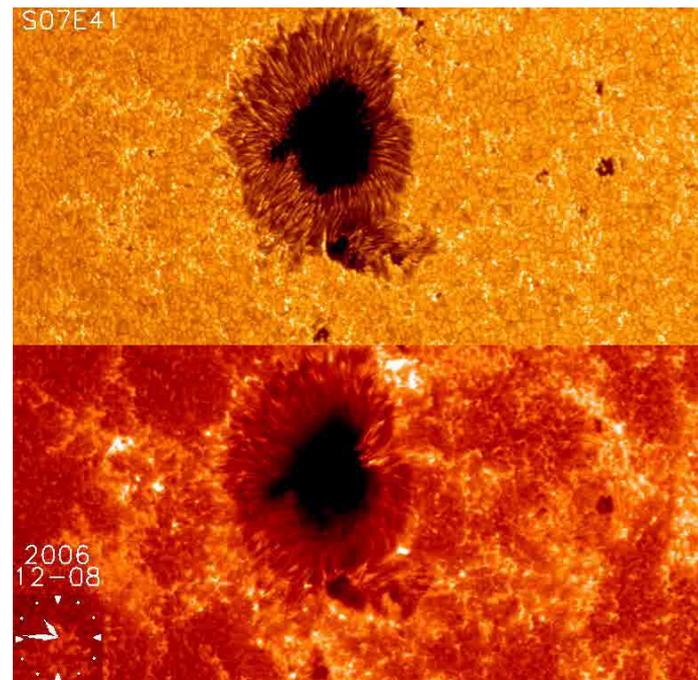
- 電磁流体→銀河、宇宙円盤、星形成
- ダイナモ→地球磁場、惑星
- 乱流→大気・海洋、工学流体
- 衝撃波・粒子加速→超新星爆発
- プラズマ加熱→核融合プラズマ

## ■ 太陽地球システム現象の源

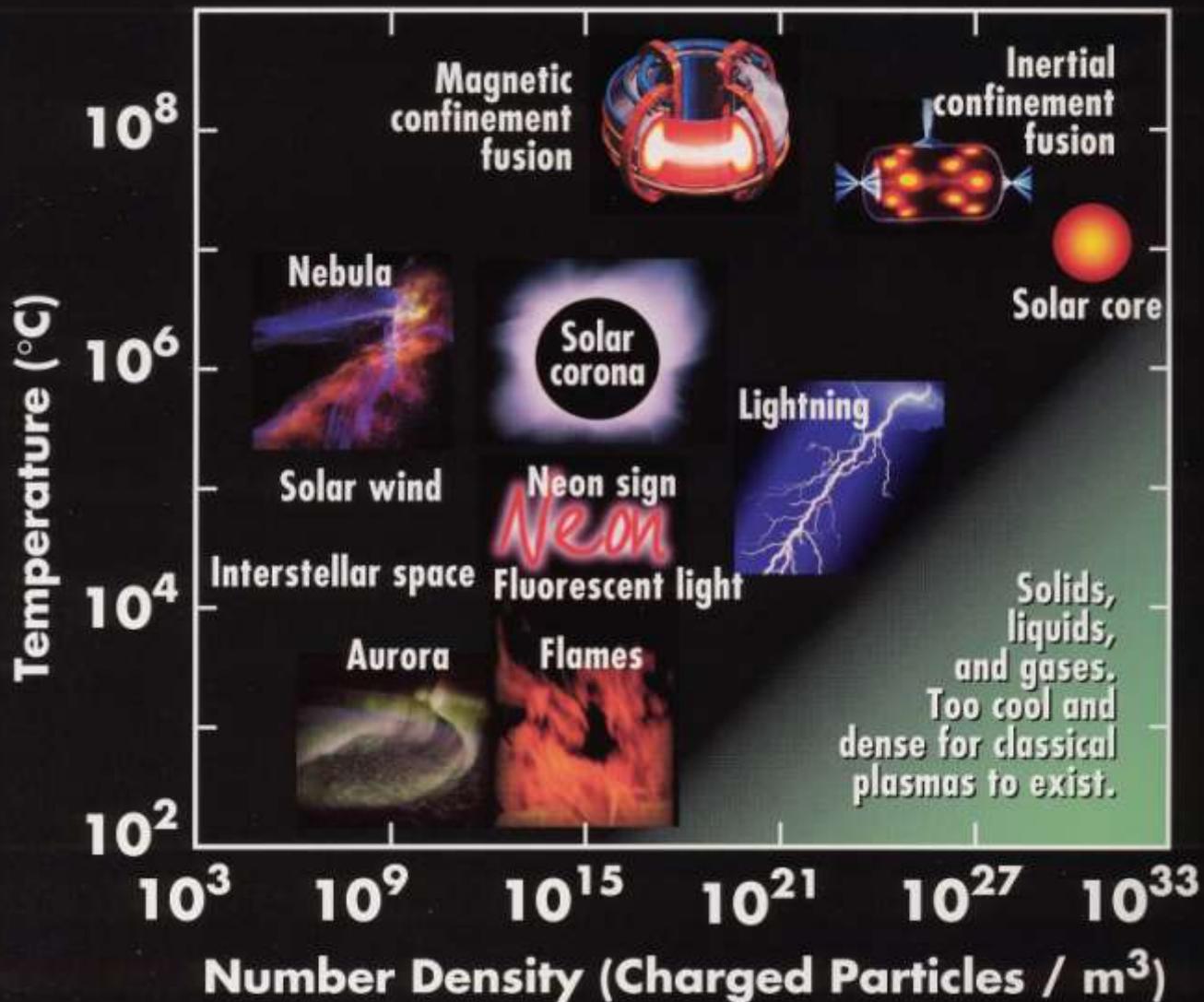
- フレア爆発、太陽嵐と宇宙嵐

## ■ 地球環境・人間活動への影響

- 太陽黒点と気候変動(宇宙気候)



# PLASMAS – THE 4<sup>th</sup> STATE OF MATTER



# 太陽と地球気候は 関係あるの？

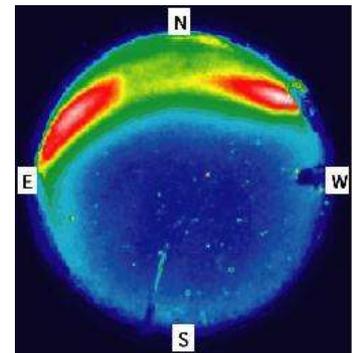
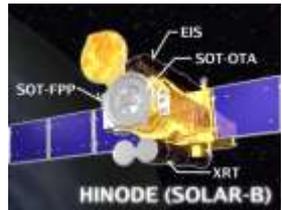
はやのん 作



<p>これまでは 太陽-地球気候という 長期変動を お話ししてきましたが もっと短期的にみると</p>	<p>太陽の爆発によって生じる 高エネルギー粒子で 人工衛星の機器 宇宙飛行士 極地方を飛行する 航空機の乗客の健康に 害が出る場合があります</p> 
<p>大気の高いところや 宇宙空間では 太陽の影響を 地上より強く 受けることとなります</p>	<p>太陽活動によって 大気密度が変わると 低高度の地球周回軌道をもつ 人工衛星の軌道が 変わってしまうことも！</p> 
	<p>太陽活動によって 電離圏の電子密度が変わり 無線航行や通信が 乱れることもあります</p> 
<p>地上でも 大変なことが 起こります！</p>	<p>地磁気嵐によって 誘導電流が起こり 地上の送電線や パイプラインに電流が流れて 電線が焼き切れたり 停電を引き起こしたり することもあります</p> 
<p>そういうことが 起こらないように 研究して 対策をとるとい うことだな！</p>	<p>太陽-地球システムを 理解することは 私たちの生活舞台を 理解すること！</p> <p>だから これからも研究が 必要なんですよ！</p> <p>なるほど ね~</p> <p>太陽と地球の 大きなつながりを感じた もるちゃんとミルボでした</p> 

# 名古屋大学太陽地球環境研究所

## ■ Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL, STE研、太陽研)

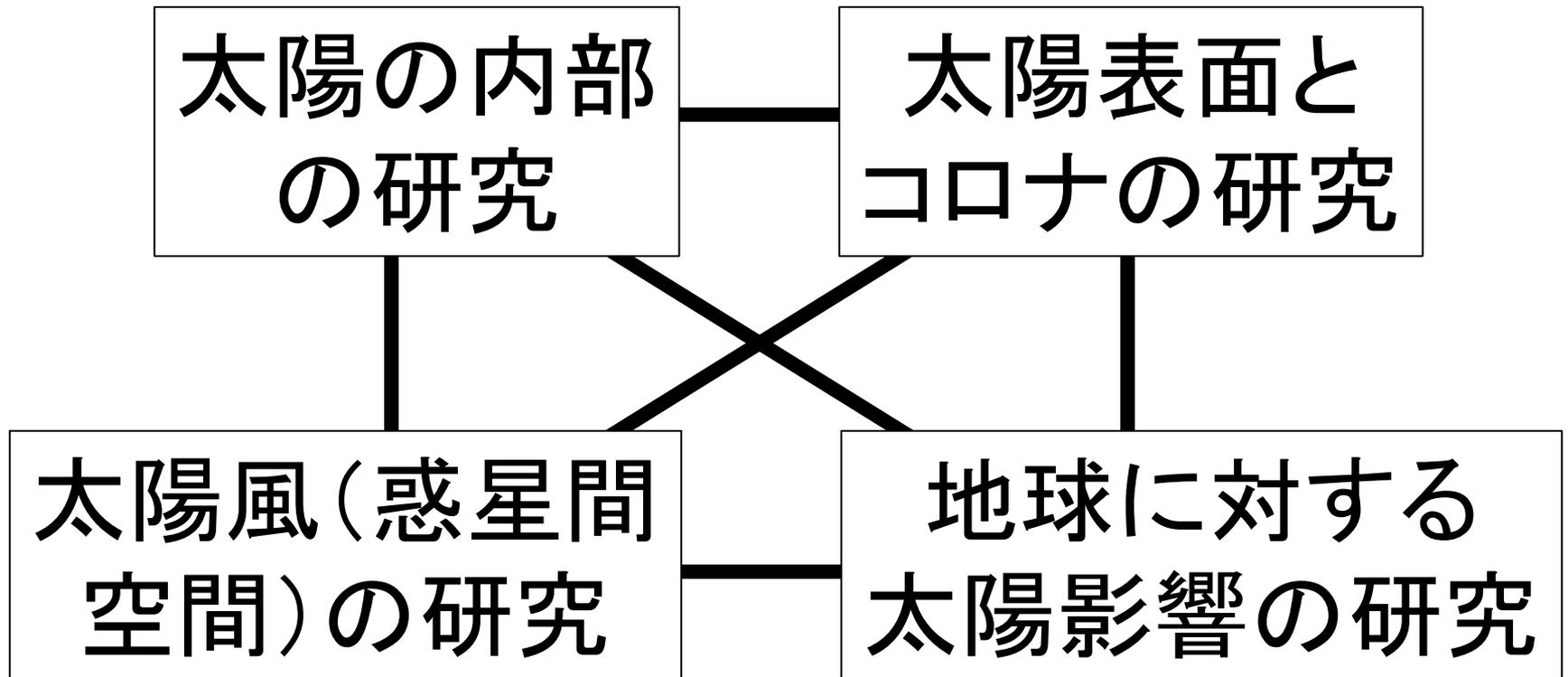


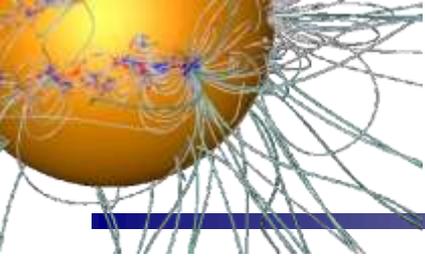
2009/11/21

太陽地球惑星システム

# 総合的な太陽研究

---





# STE研でできる太陽研究

## ■ 歴史的課題への挑戦

太陽黒点  
の謎

太陽黒点はなぜ生まれる？  
11年周期とは何か？

太陽フレア  
の謎

太陽系最大の爆発「太陽  
フレア」の発生メカニズム？

太陽コロナ  
の謎

太陽コロナはなぜ太陽より  
はるかに高温か？

## ■ 太陽・太陽圏・地球圏を一体のシステムとした 総合研究

宇宙天気研究

太陽面爆発現象の発生予測  
太陽面爆発現象の影響予測

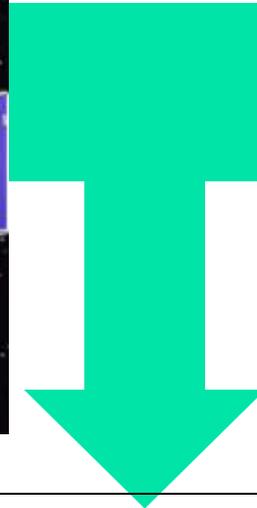
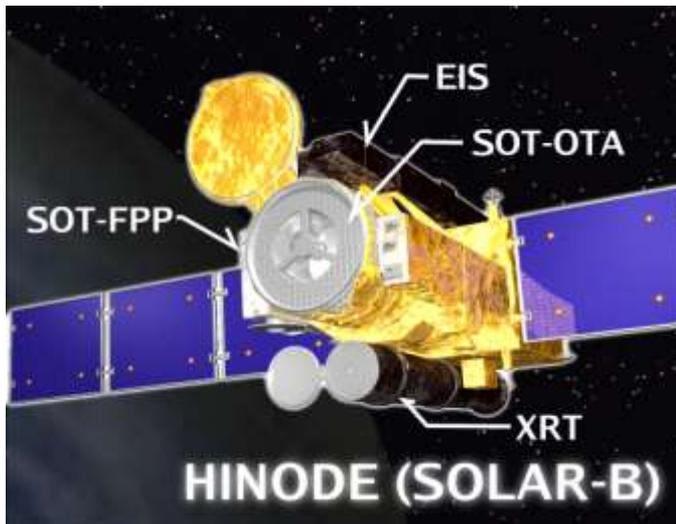
宇宙気候研究

太陽の気候影響の機構解明  
太陽黒点活動の予測



# 新世代の太陽研究

最新の観測研究と大規模シミュレーションの融合



地球シミュレータ

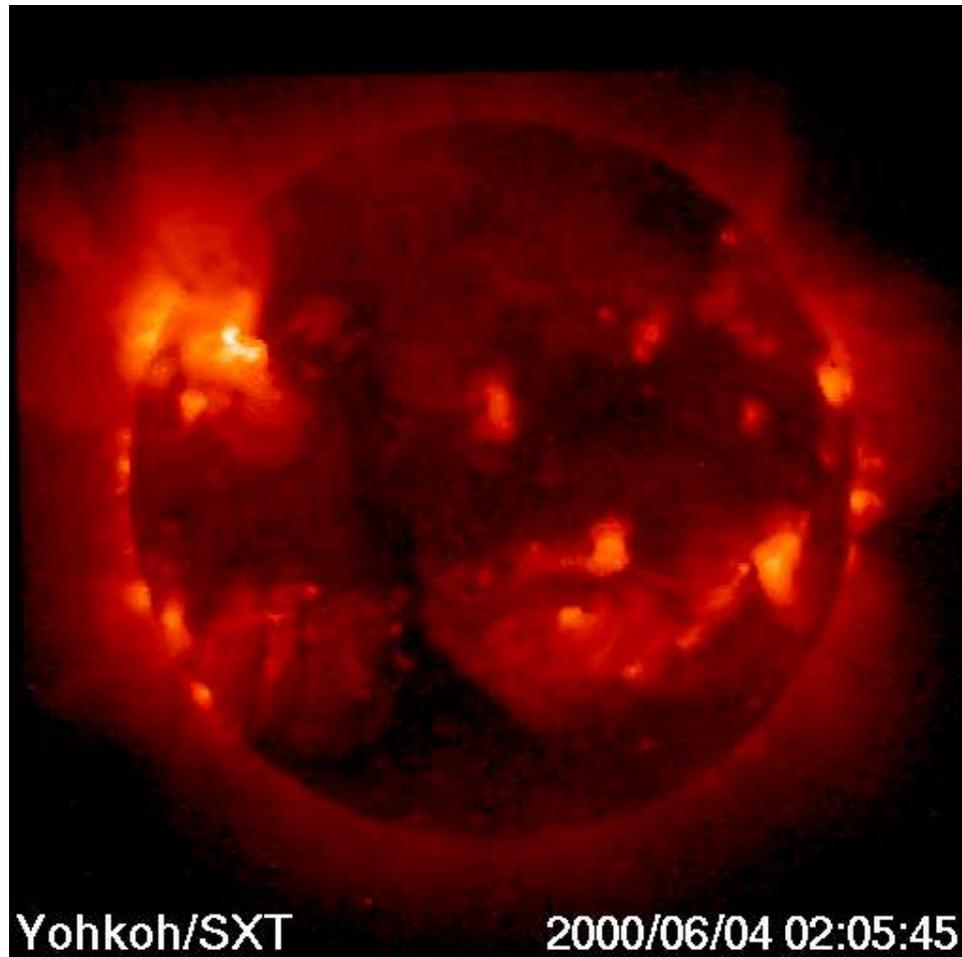
太陽と地球のコンピュータ  
シミュレーションモデル

太陽フレア発生、太陽黒点活動、  
コロナの加熱と太陽風の加速、太陽の地球環境影響

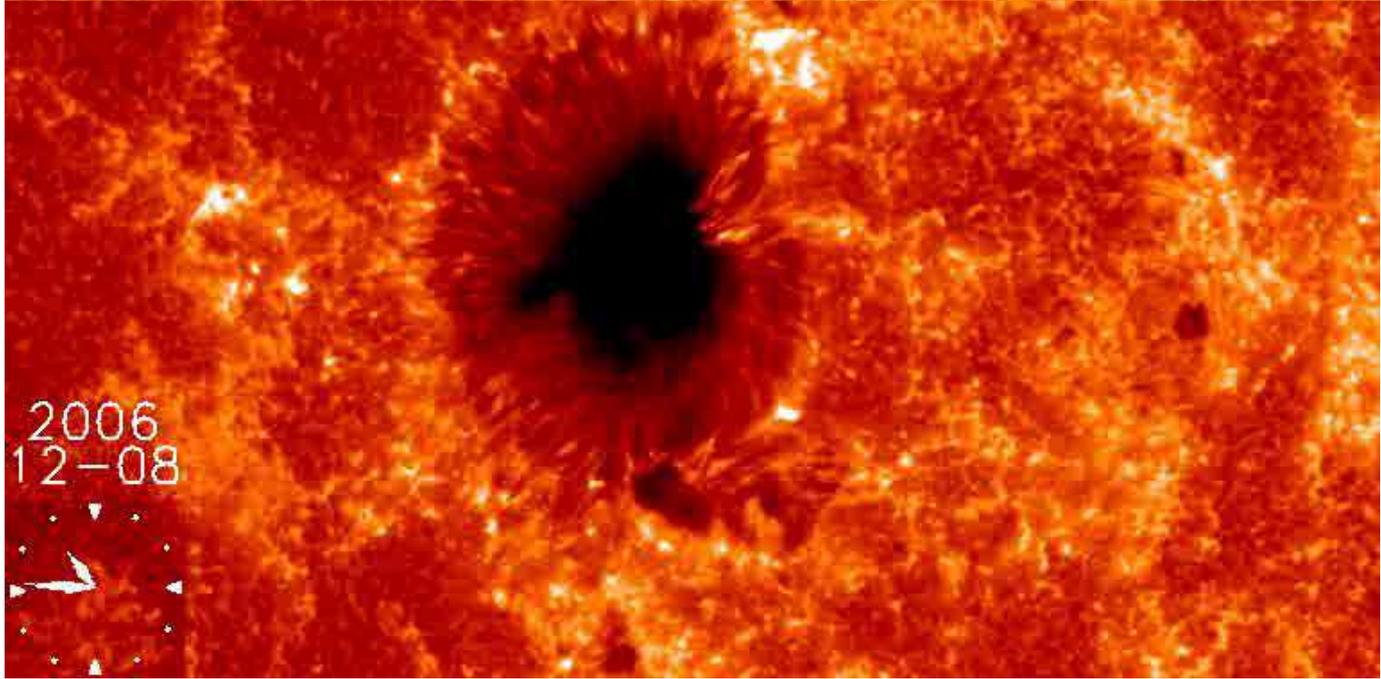
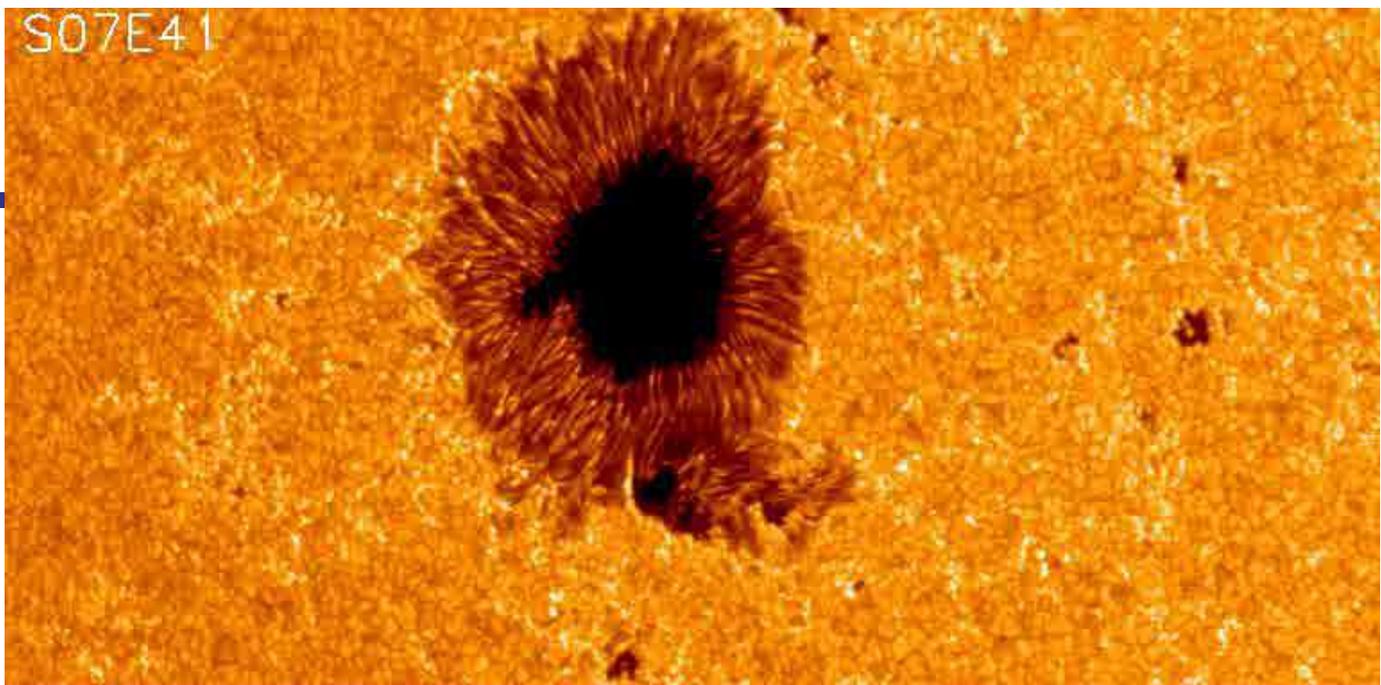
# 1. 太陽表面とコロナの研究

---

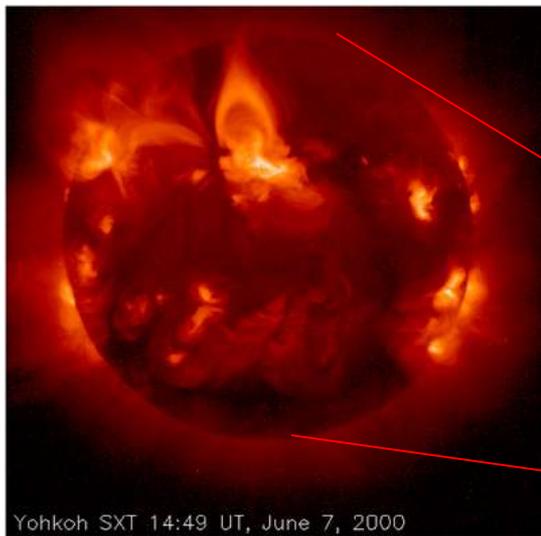
## 太陽フレア



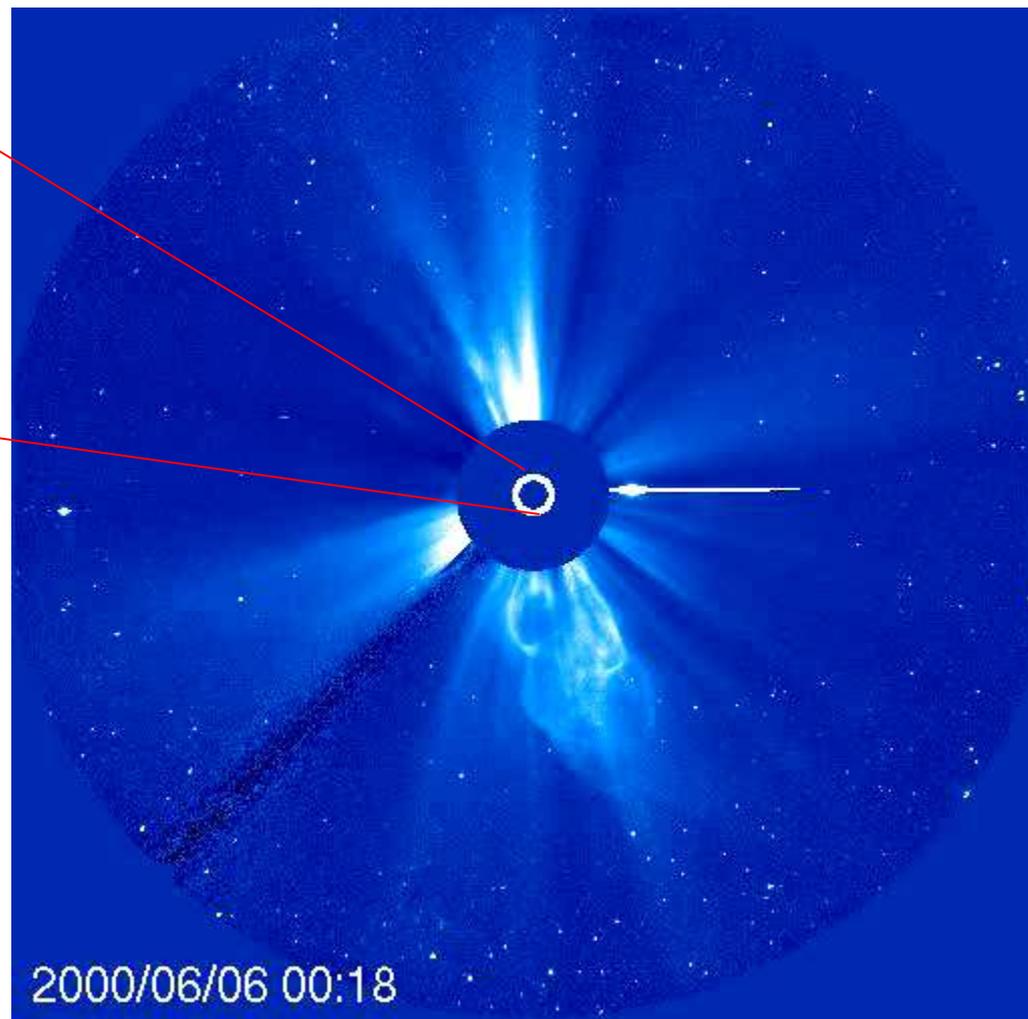
S07E41



# 太陽フレアとコロナ質量放出 (CME)



太陽フレア

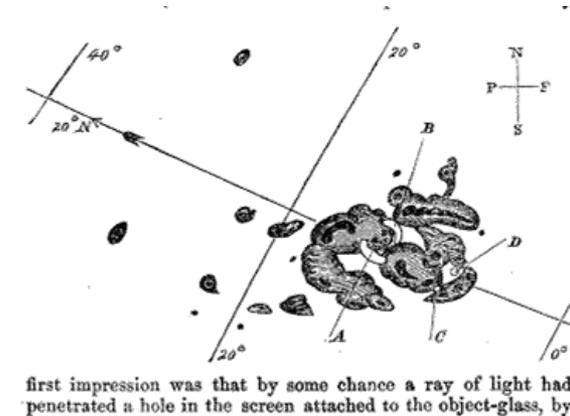


コロナ質量放出  
(CME)

# 太陽嵐と地球

## ■ 太陽フレア

- 太陽コロナ磁場のエネルギーが突発的に熱と運動に変換される爆発現象。 $(\sim 10^{25}\text{J})$
- 黒点群の中で発生する。
- 1959年にキャリントンが発見。



## ■ コロナ質量放出(CME)

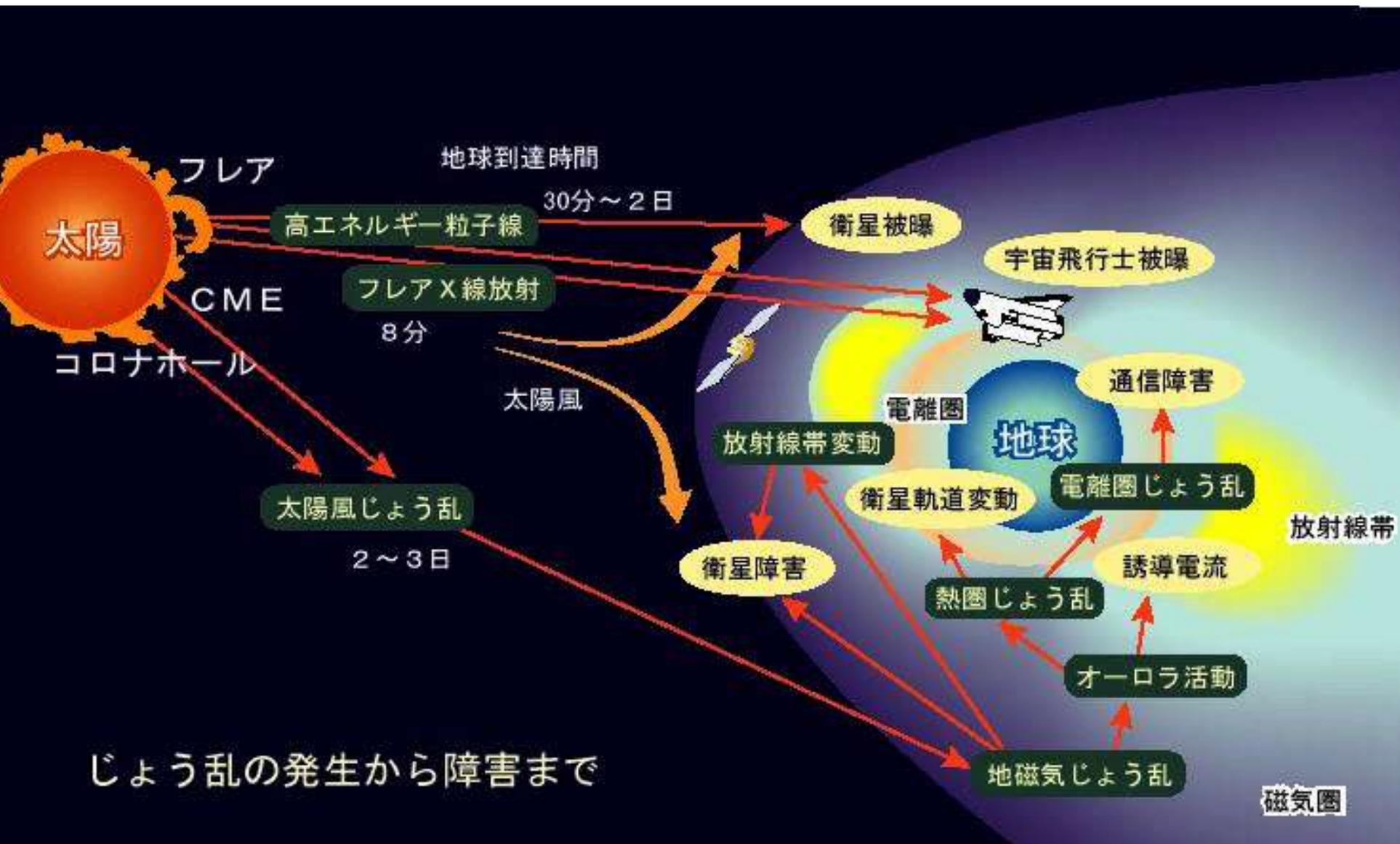
- 大規模なコロナプラズマの放出現象
- 質量: 10億トン、速度: 100~2000 km/sec

## ■ 地球磁気圏・電離圏への影響

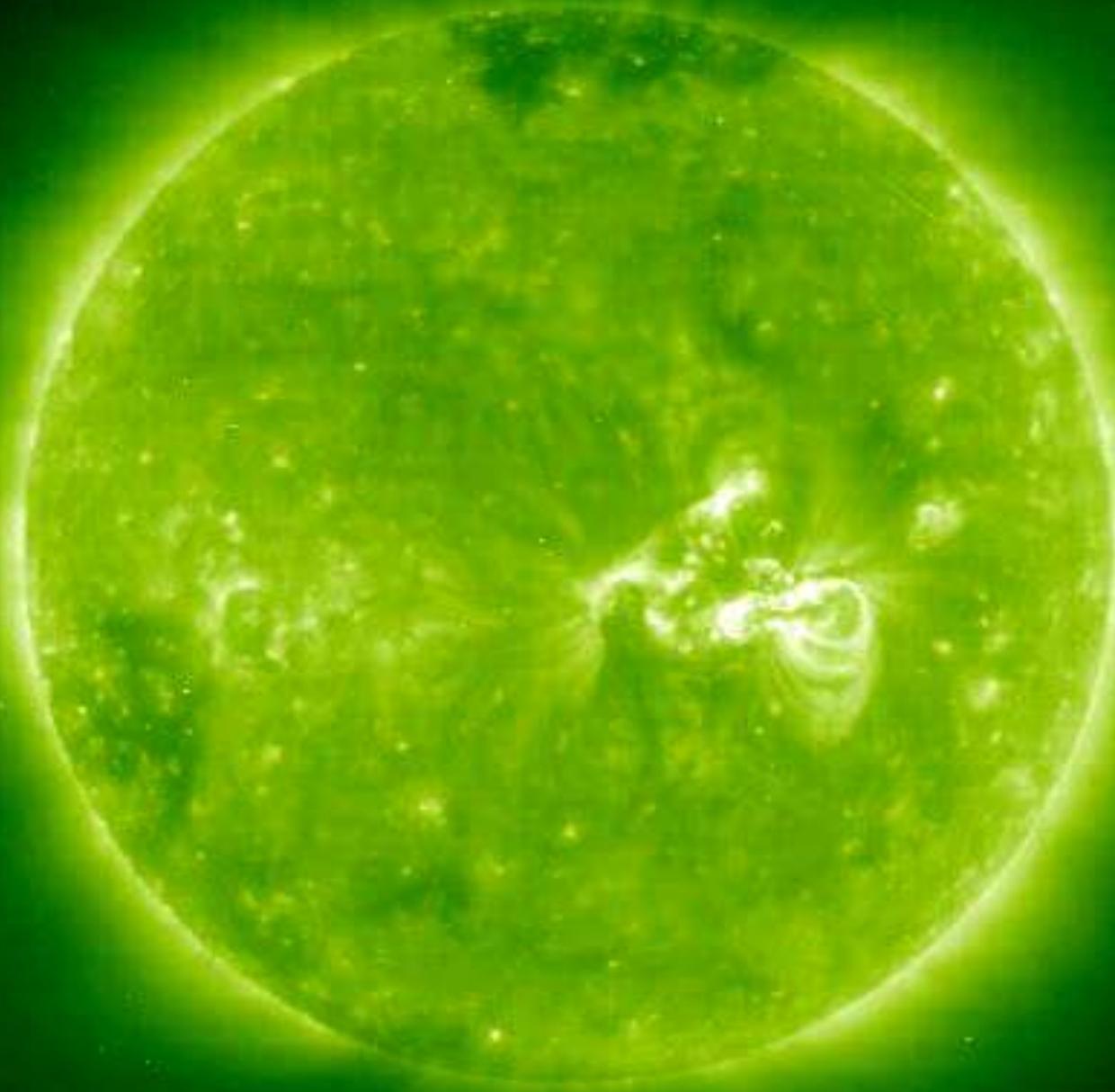
- 磁気嵐、太陽高エネルギー粒子、オーロラ



# 太陽面爆発と宇宙天気

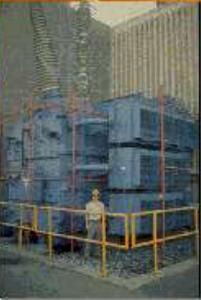


じょう乱の発生から障害まで



200 2006/12/13 00:00

# 磁気嵐による停電

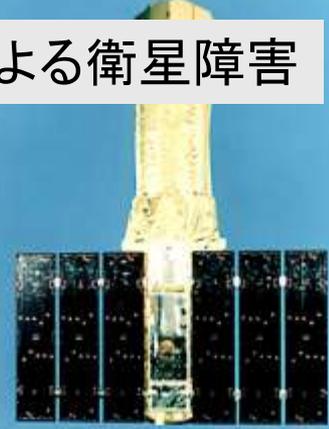


Geomagnetic Storm Induced Transformer Damage  
1989/03/13 カナダのケベックで送電施設の  
障害による停電(9時間600万人に影響)

読売新聞2001年9月26日朝刊

◆BSデジタル一時中断 BSデジ  
タル放送のテレビ、ラジオ、データ放  
送の全チャンネルが、25日午後4時17  
分ごろから、最大1時間にわたって受  
信不能となった。同放送に使用されて  
いる衛星「BSAT-2a」を運用して  
いる放送衛星システムによると、衛  
星の向きがずれたのが原因。同社は予  
備機に順次切り替えて放送を再開させ  
た。昨年12月のBSデジタル放送開始  
以来、衛星の事故による放送中断は初  
めて。

# フレアによる衛星障害



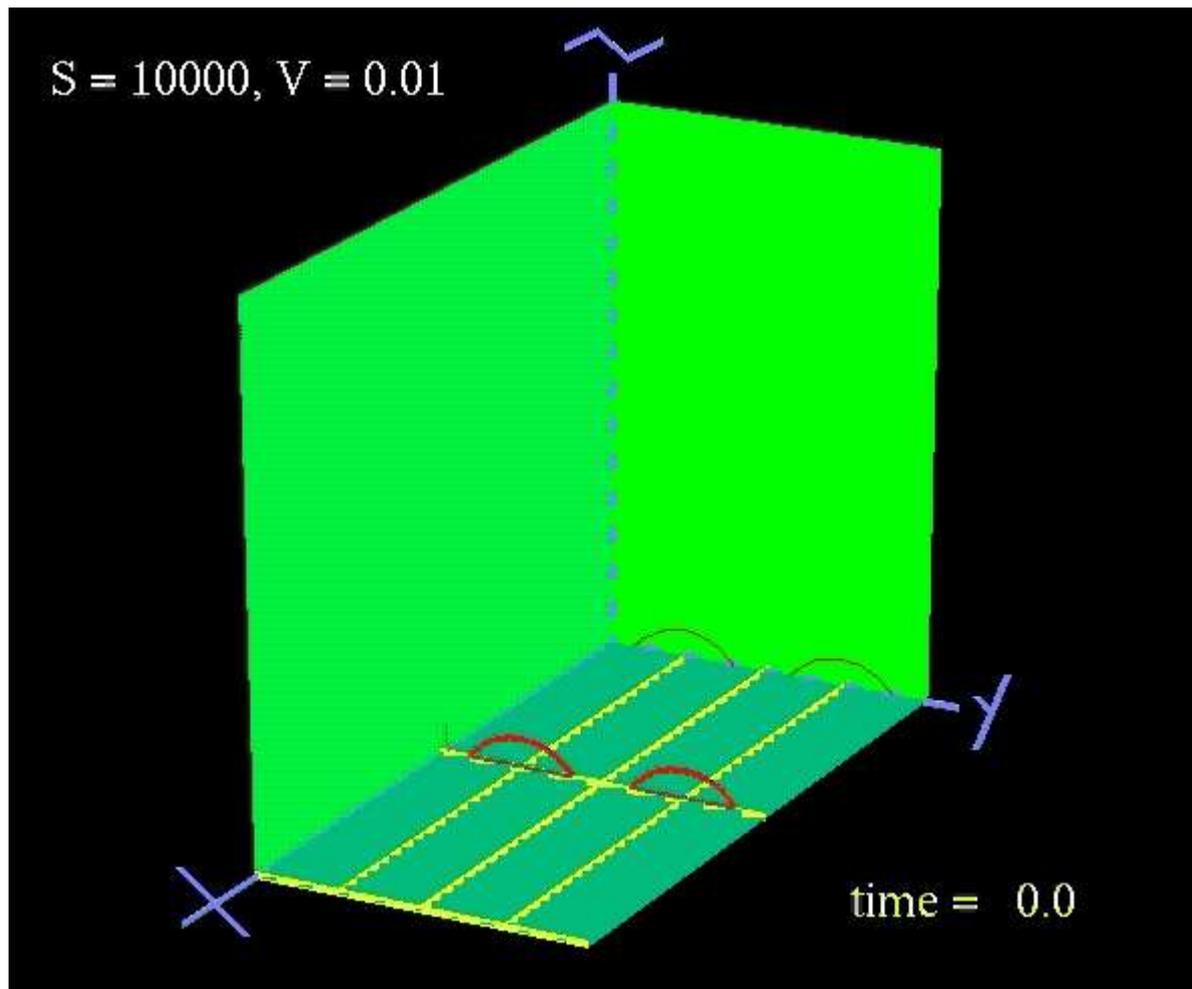
「あすか」結局落下へ  
太陽活動の影響で昨年夏  
から観測不能になっていた  
文部科学省宇宙科学研究所  
(宇宙研)のX線天文衛星  
「あすか」が回復せず、二  
月末から三月初めの間に落  
下することが、二十六日明  
らかにされた。次世代の衛  
星を積んだM5ロケットの



読売新聞05.11.19(33)  
大規模フレア発生  
観測衛星など不調  
太陽表面の爆発(フレア)  
との関連が疑われる人工衛  
星の不具合が各地で発生し

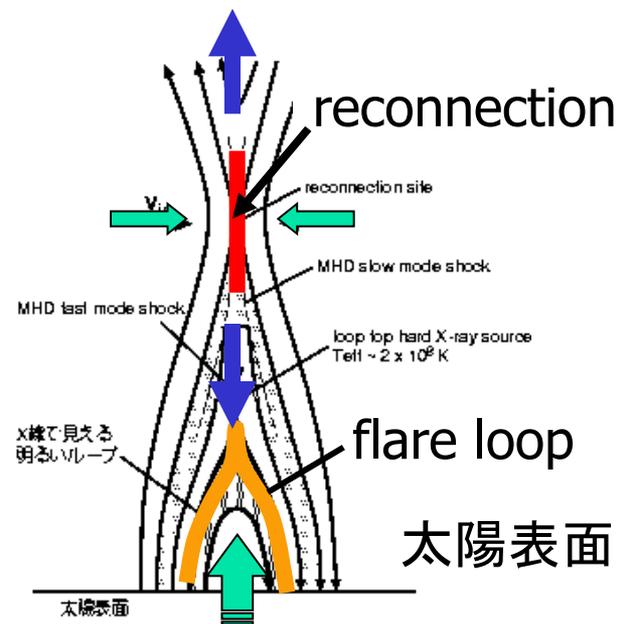
ている。情報通信研究機構  
によると十七日午後六時五  
十二分、大規模フレアが発  
生。米国の気象衛星ゴーズ  
12号や科学衛星エースの一  
部の観測機器が使用できな  
い状態になった。  
一方、日本の民間衛星通  
信会社JSTATが所有する  
静止衛星「JCSAT-1  
B」は衛星の姿勢を制御す  
る小型ジェット十二基のう  
ち二基に異常が発生、十七  
日夜から衛星を監視するた  
めの信号が受信できない状  
態。衛星を利用する約五十  
社の通信サービスなどが停  
止している。同社では十九  
日午前三時ごろまでに復旧  
させる予定。

# 太陽フレアの基本過程



太陽コロナ磁場の単純モデル

## 磁気エネルギーの解放



## 磁気エネルギーの蓄積

しかし、蓄積から解放への遷移過程は未解明

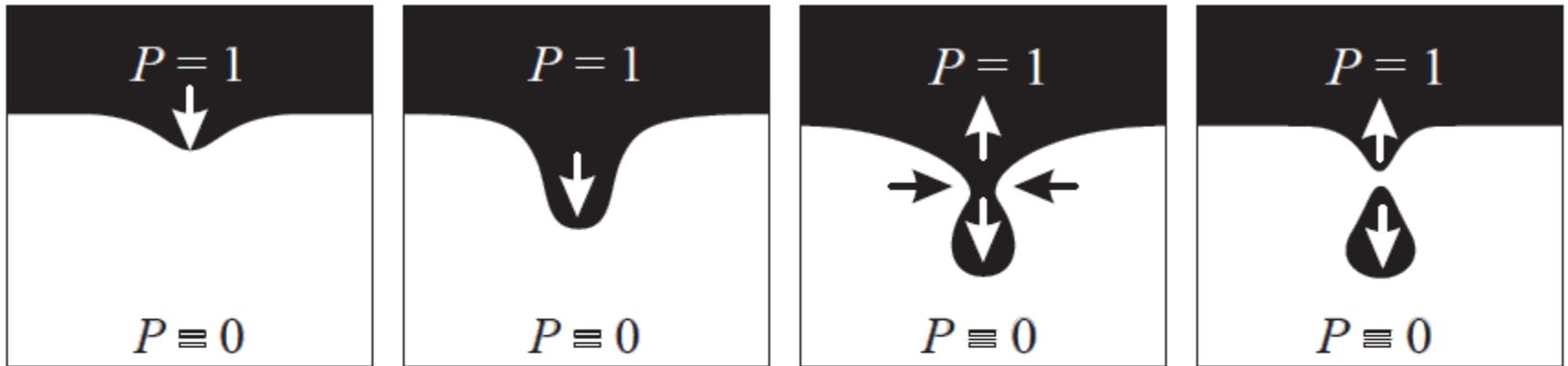
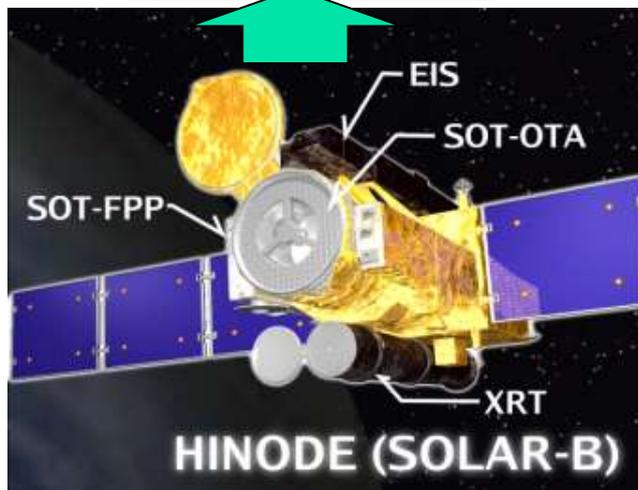
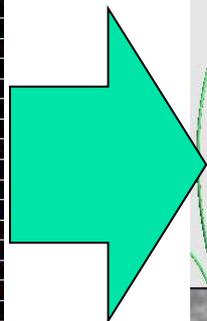
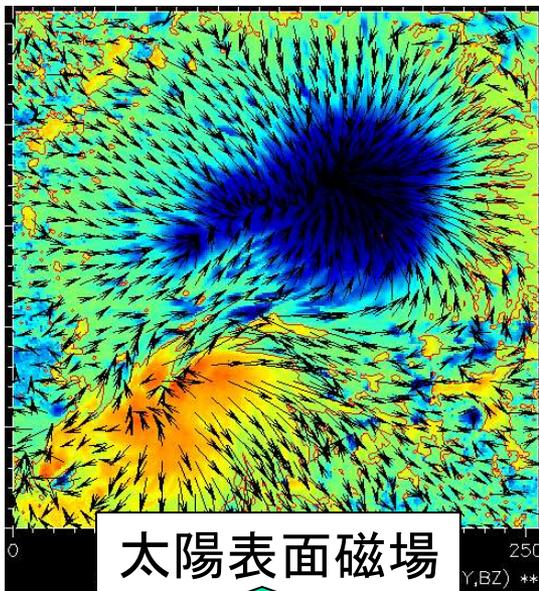


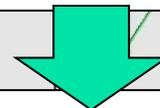
Fig. 2.9. The detachment of a drop as an example of reconnection of a scalar quantity.

# データ駆動型シミュレーション



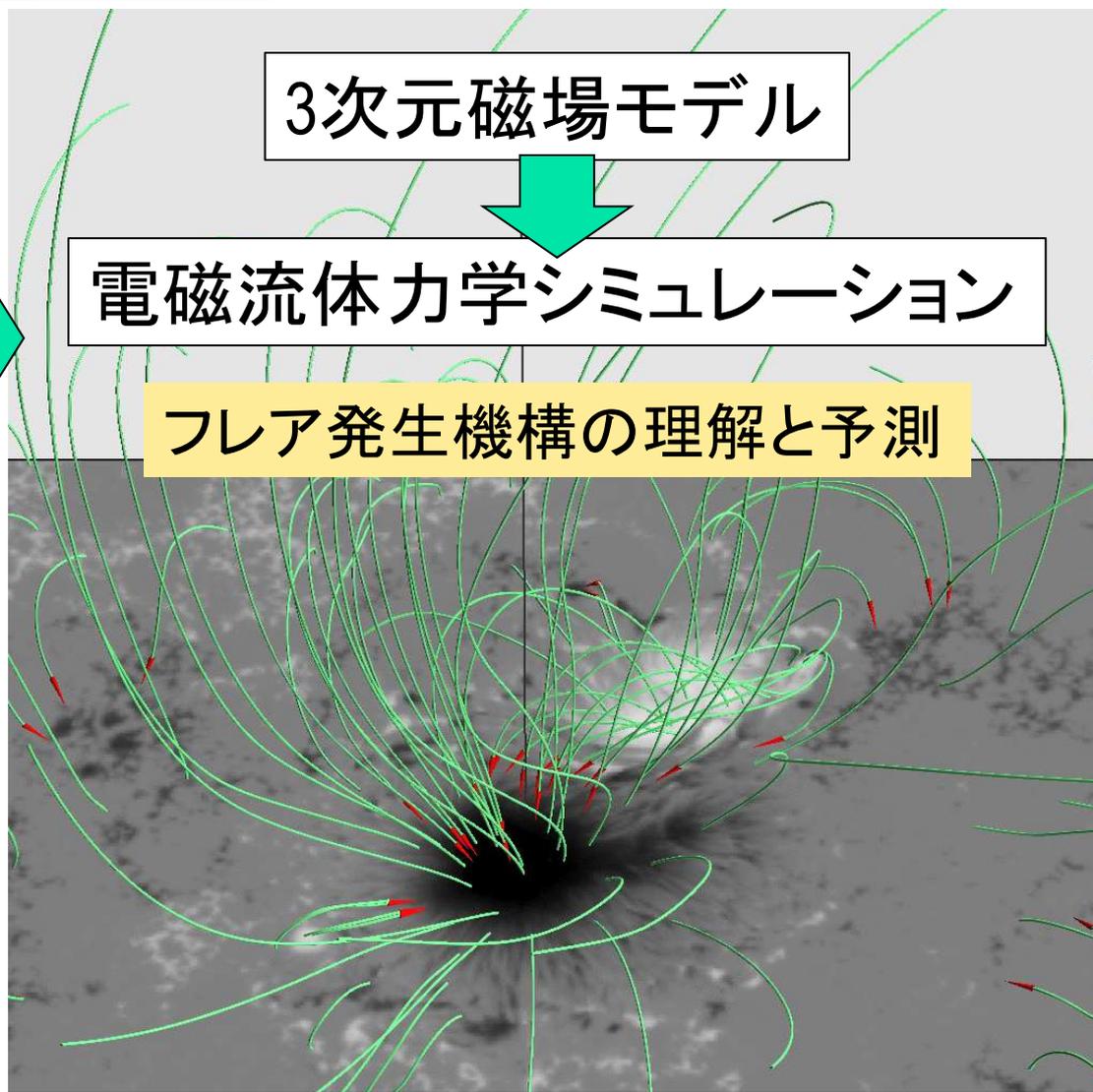
太陽観測衛星

3次元磁場モデル



電磁流体力学シミュレーション

フレア発生機構の理解と予測



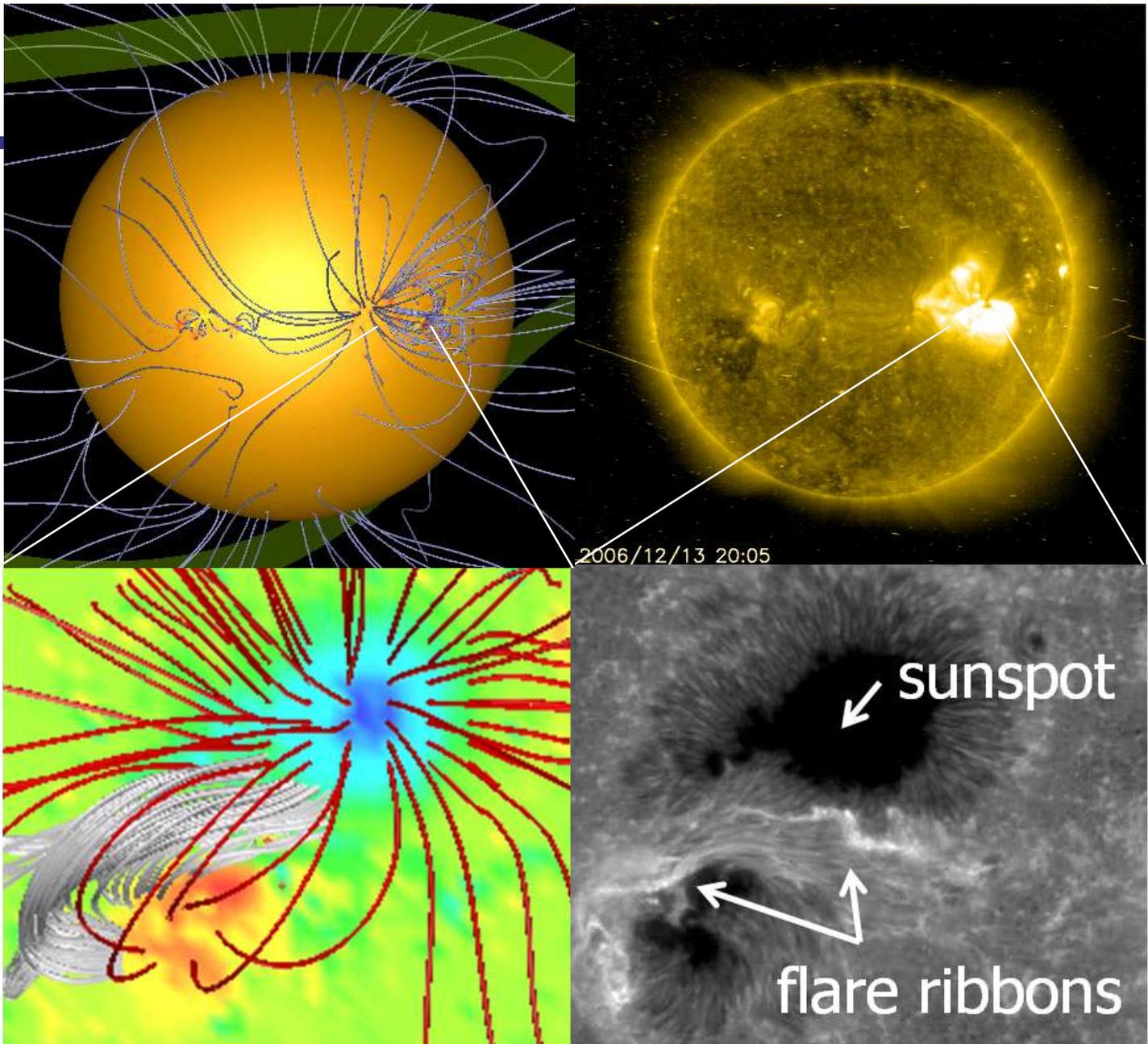
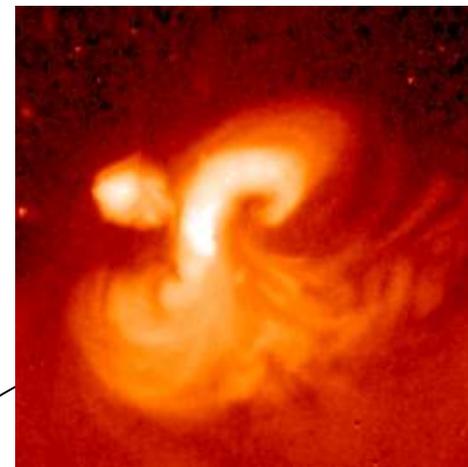
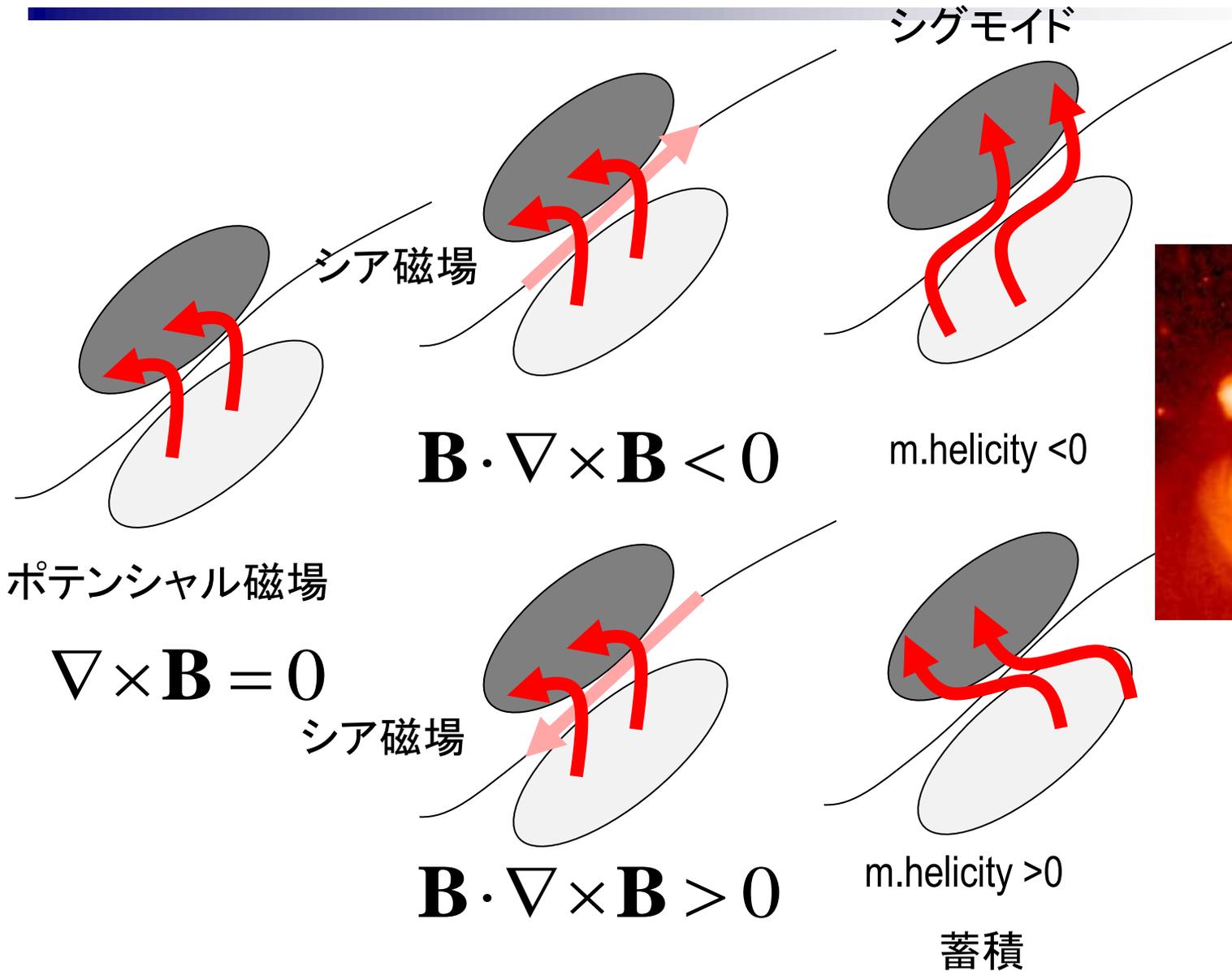


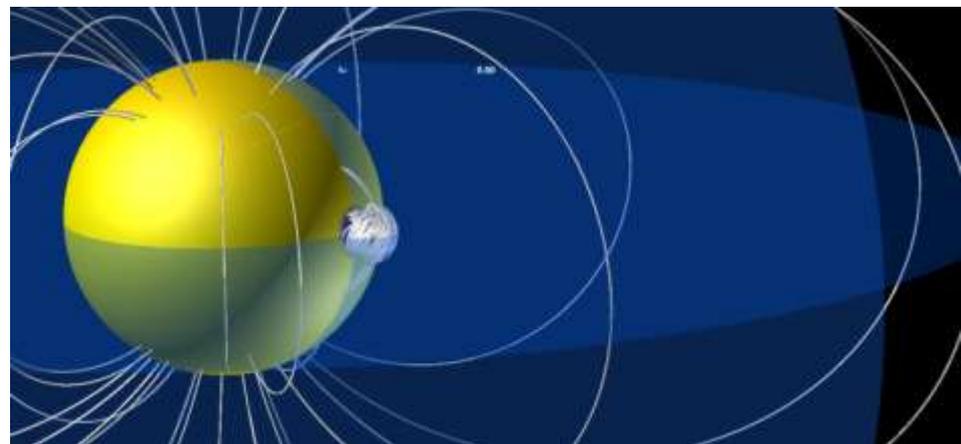
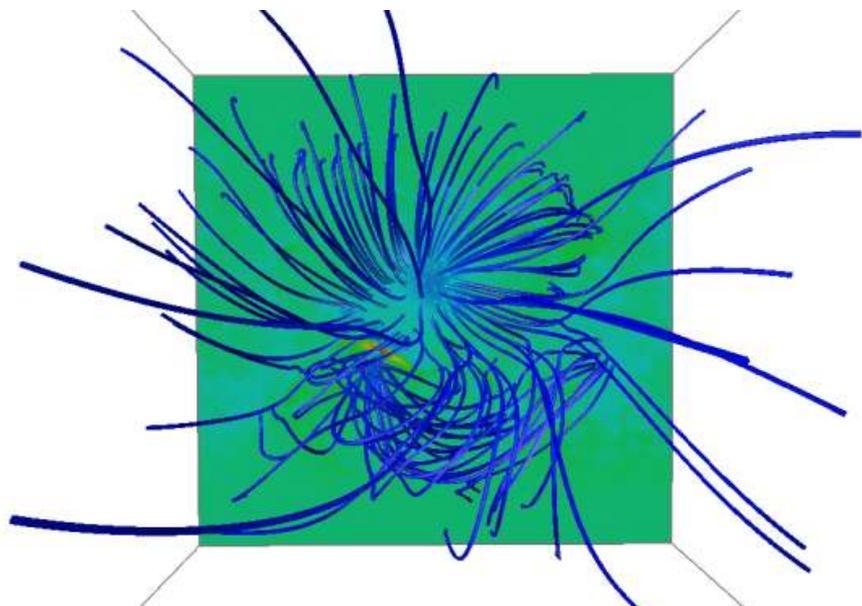
図1: 2006年12月に発生した太陽フレアと黒点の衛星観測データ(右)及びこのデータを用いた実証モデルで初めて得られた磁力線の3次元構造(左)。

# 磁気シアと自由エネルギー

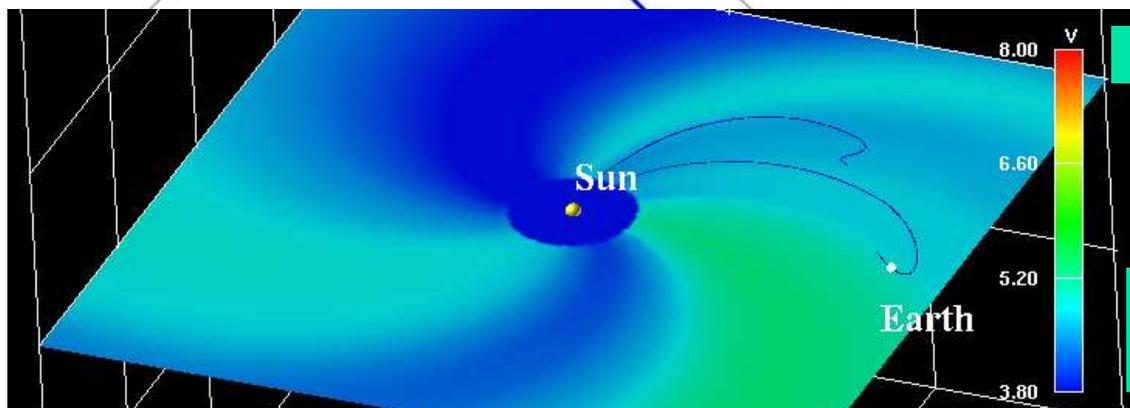


# 世界初の太陽嵐シミュレーション

最新の観測研究と大規模シミュレーションの融合

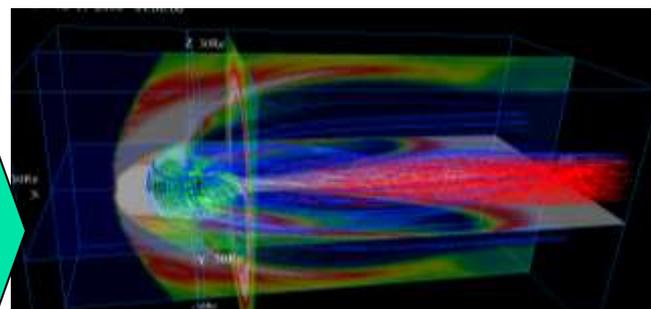


太陽フレア・CME再現実験



太陽圏コロナ質量放出シミュレーション

高エネルギー粒子の加速



地球磁気圏シミュレーション

# フレア研究の課題

## ■ トリガ機構の解明

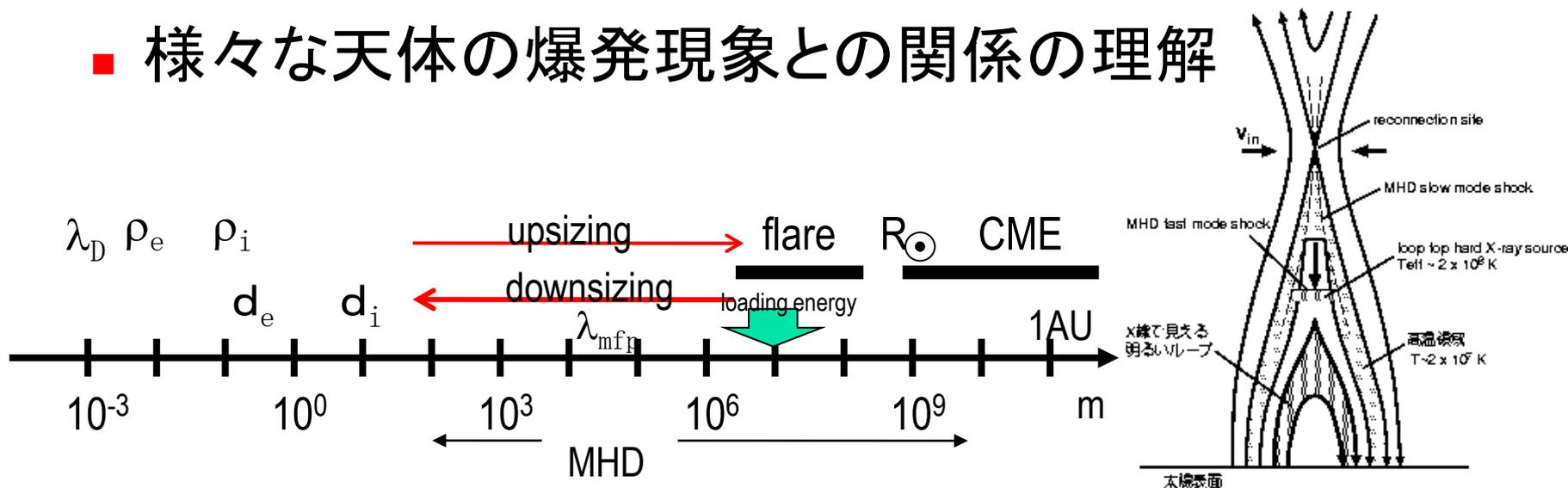
- いつ、どこで、どのようなフレアが発生するか？

## ■ ミクروسケールとマクروسケールの関係の理解

- プラズマ物理学との連携

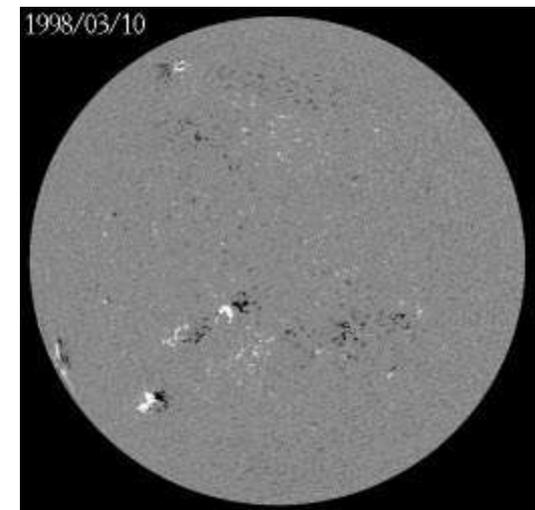
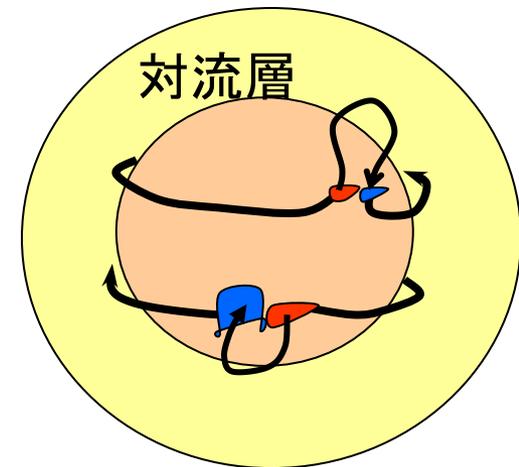
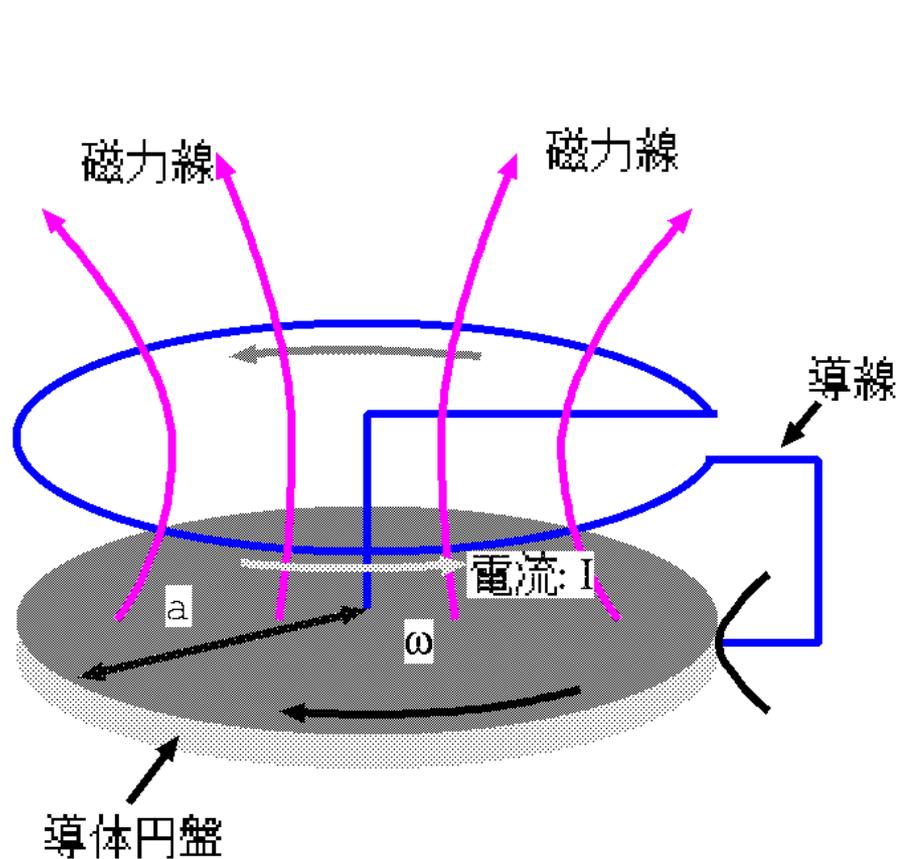
## ■ 天体フレアの理解

- 様々な天体の爆発現象との関係の理解



## 2. 太陽の内部の研究

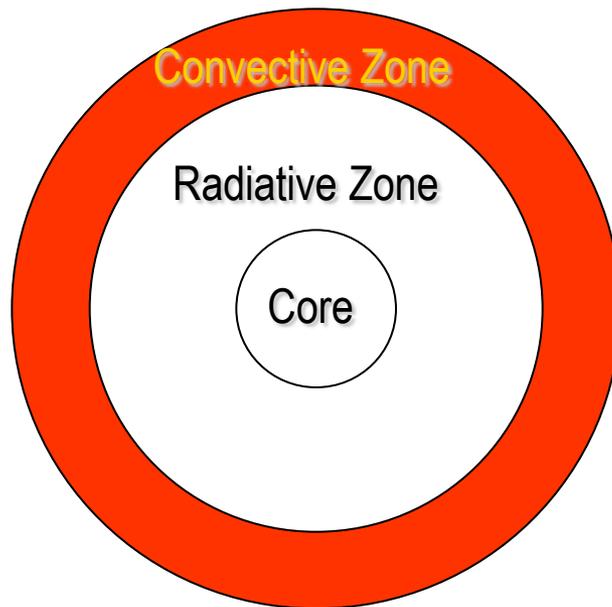
### ■ 天体の磁場の生成機構(ダイナモ)



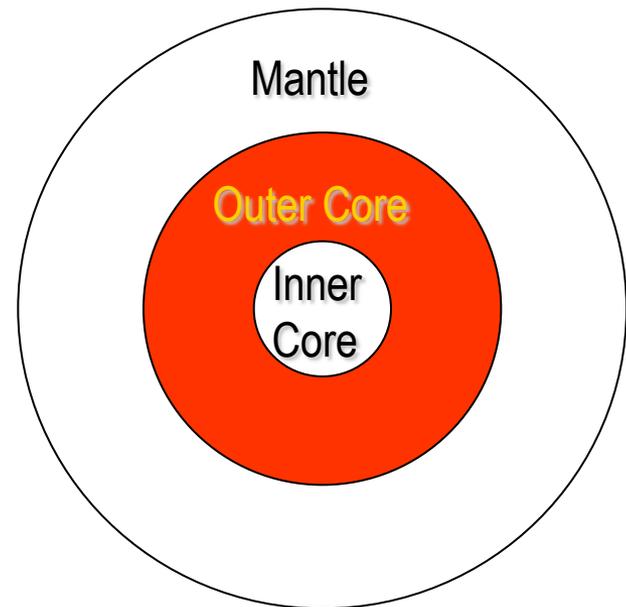
# 太陽と地球の内部

---

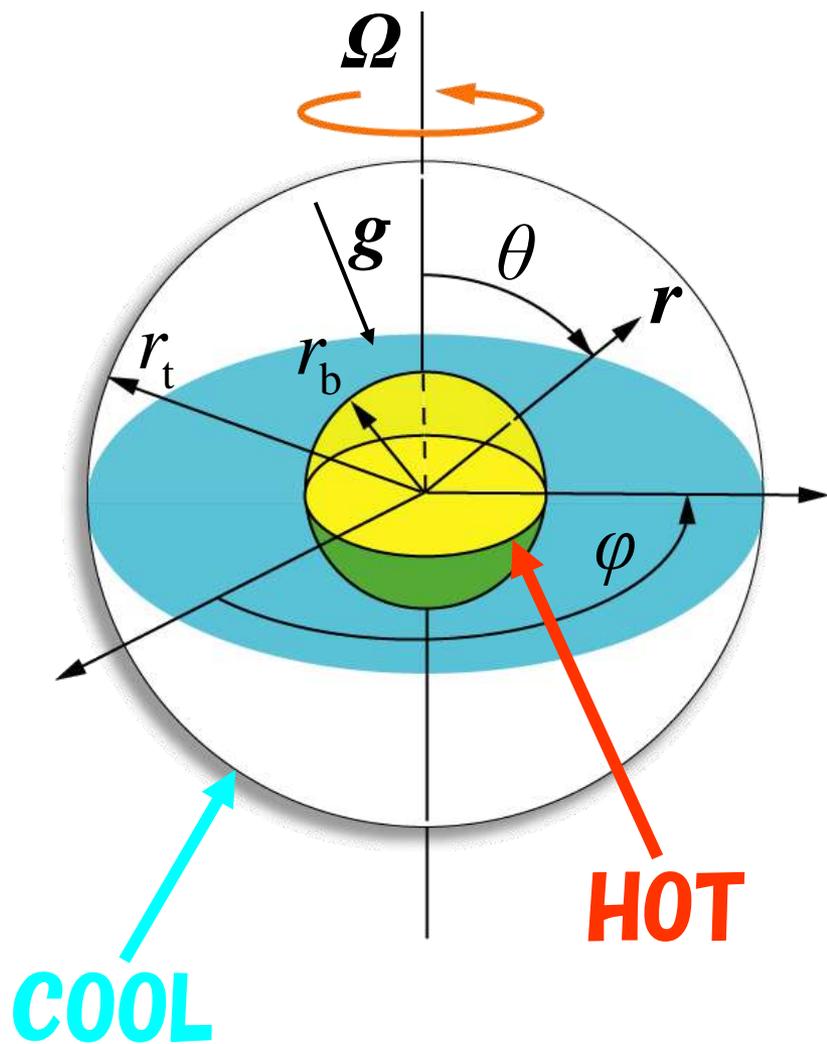
## Sun



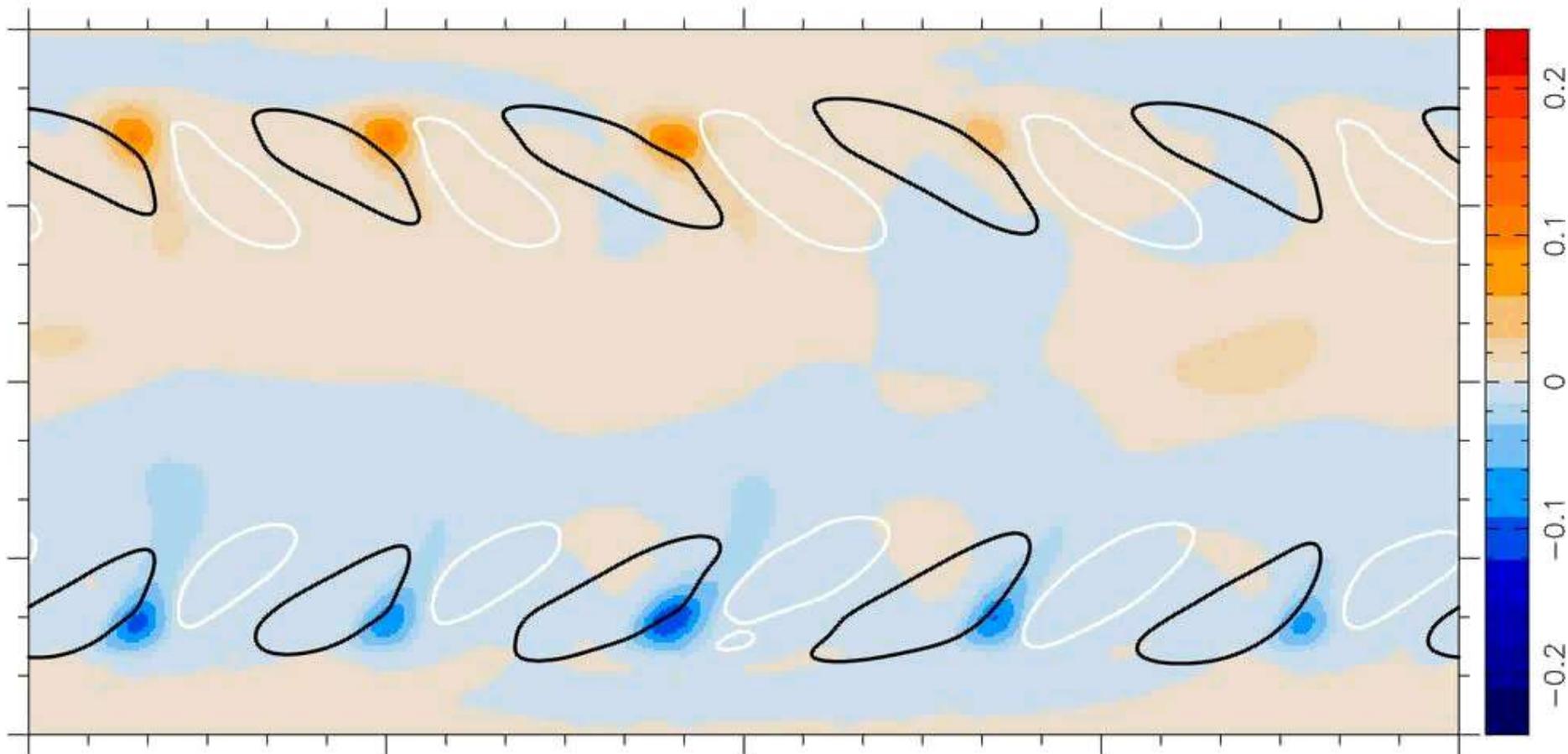
## Earth



# 天体内部の3次元対流シミュレーション

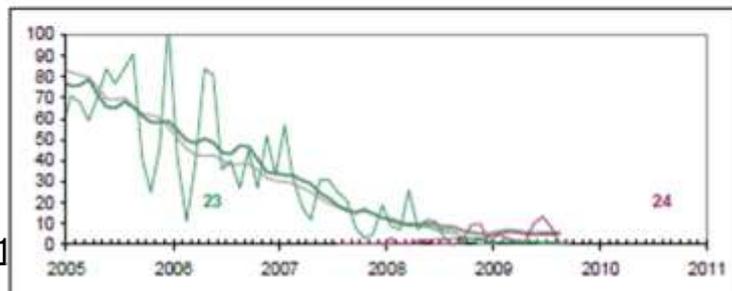
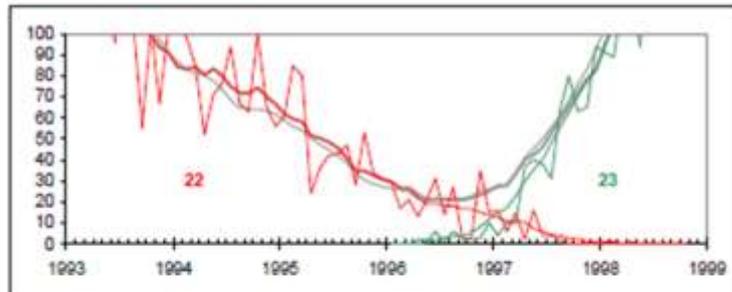
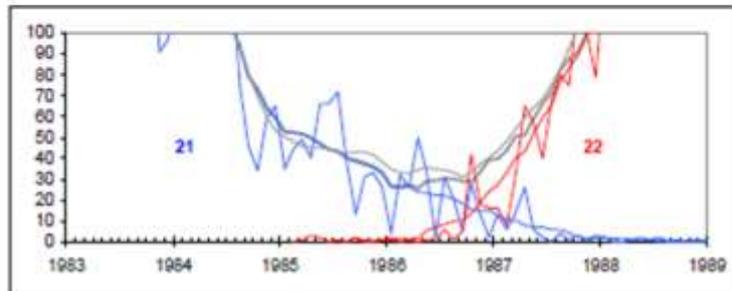
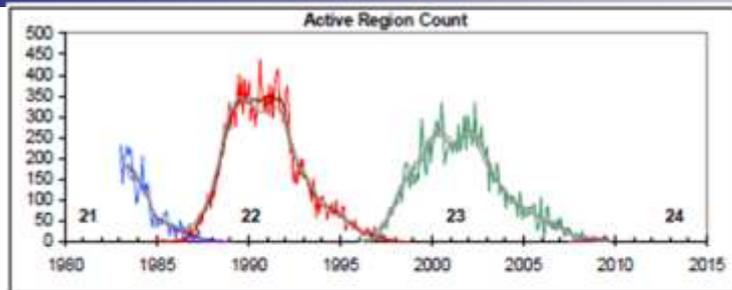


Time=43020



2009/11/21

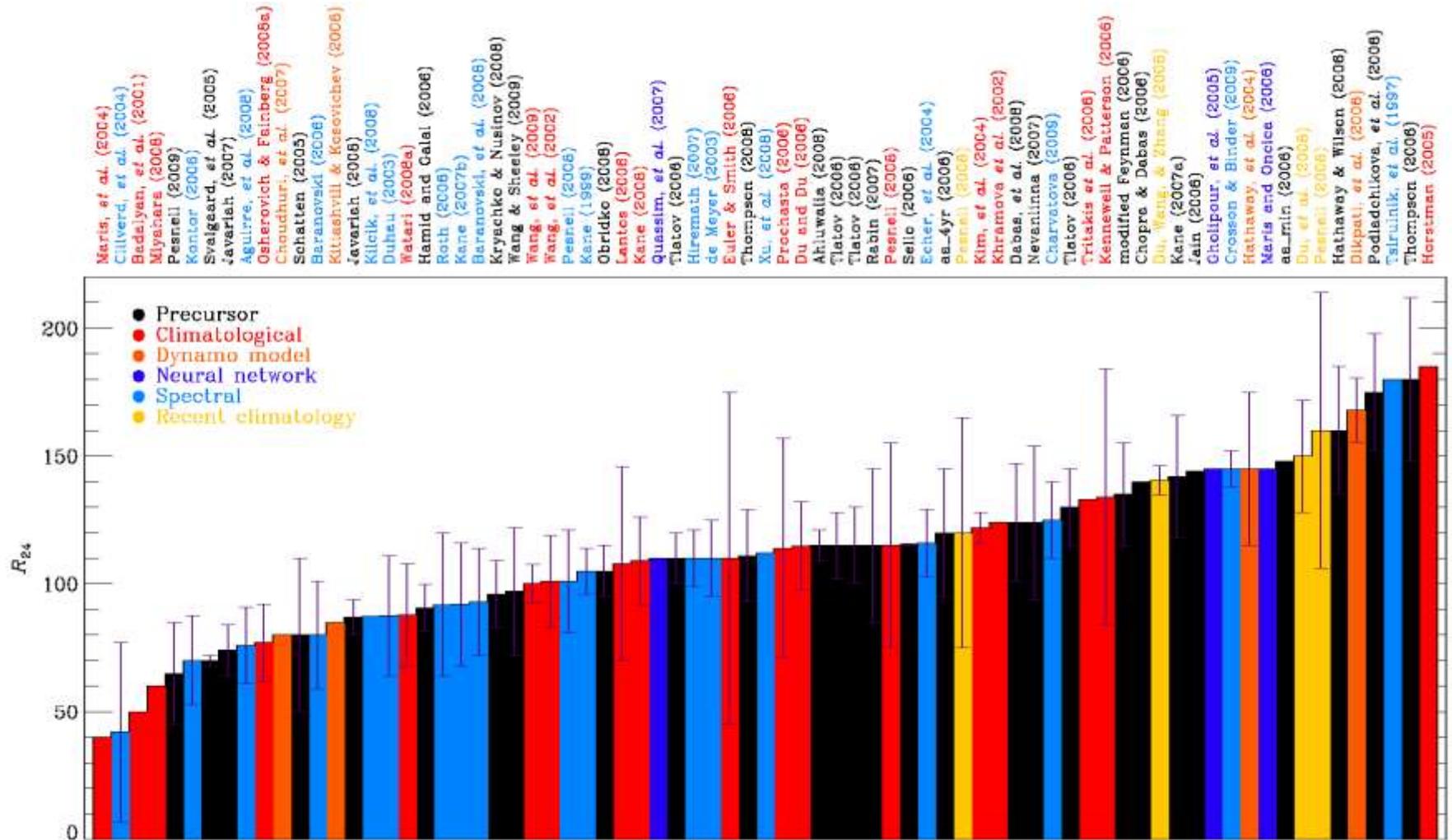
# 太陽活動は回復するか？



パリティ 2010 1月号  
「太陽活動は回復するか？」  
草野完也

# State of the Art: Predicting Cycle 24

What the Sun seems to be doing



黒点の予測はほとんどできていない。次世代(君ら)の課題だ！

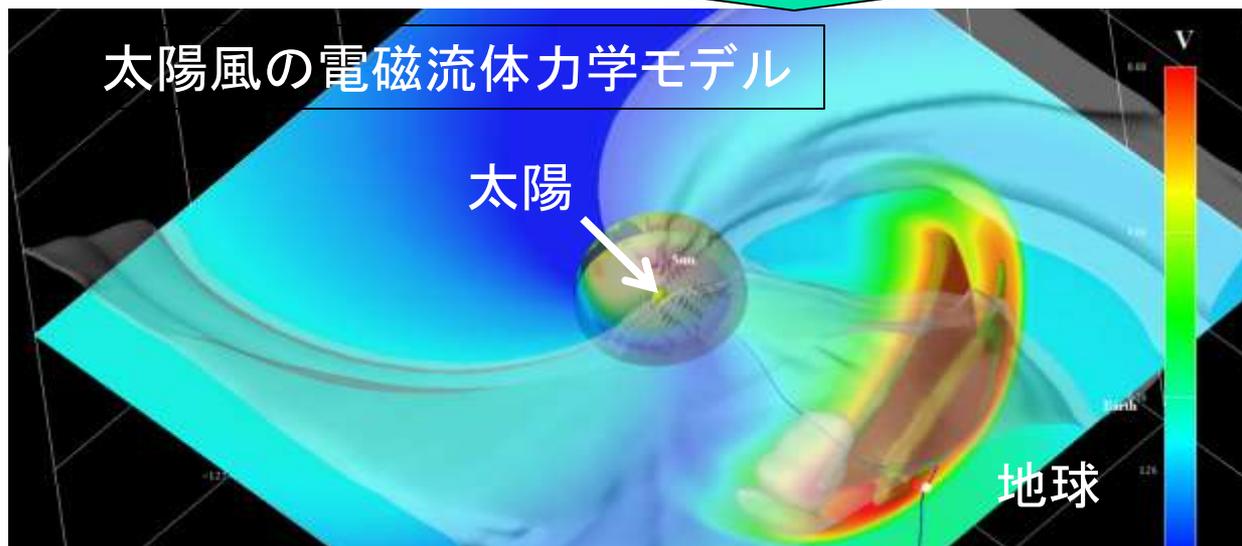
# 3. 太陽風(惑星間空間)の研究

UHF電波望遠鏡(富士観測所)



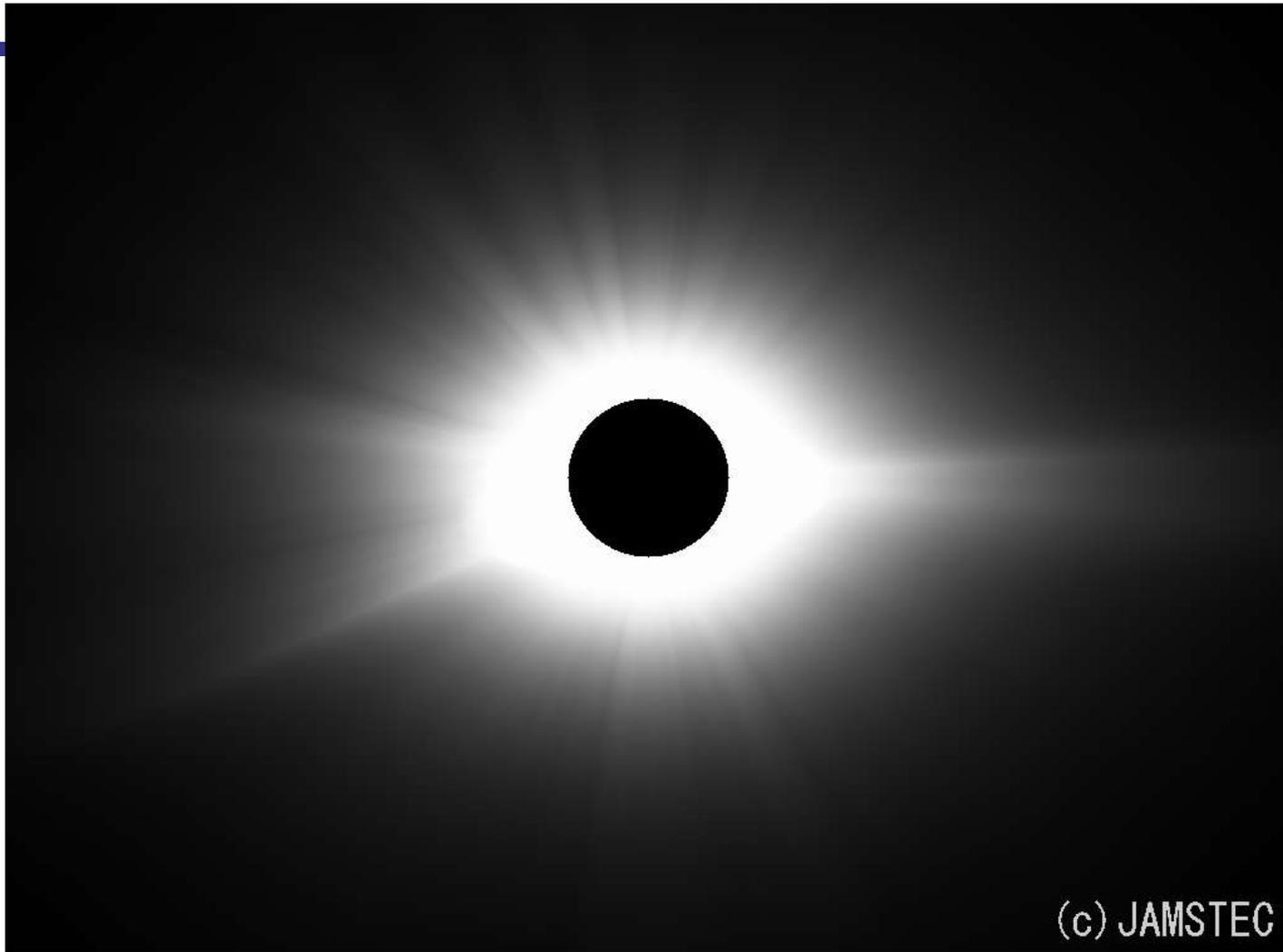
太陽風シンチレーション観測

太陽風の電磁流体力学モデル



- コロナの加熱・加速メカニズムの解明
- 宇宙天気予報モデル

# 2009年7月22日皆既日食の予測



独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)階層システム研究チーム(研究代表者:草野完也)の塩田大幸ポストドクトラル研究員らが作成した2009年7月22日皆既日食予測画像。研究協力:科学研究費補助金(学術創成研究費)「宇宙天気的基础研究(代表:柴田一成)」、大野暢亮(JAMSTEC)

参考資料:[http://www.jamstec.go.jp/ifree/space\\_earth/jswm/ja/2009/06/total-solar-eclipse.html](http://www.jamstec.go.jp/ifree/space_earth/jswm/ja/2009/06/total-solar-eclipse.html)

# 4. 地球に対する太陽影響の研究

## ■ 歴史的論争

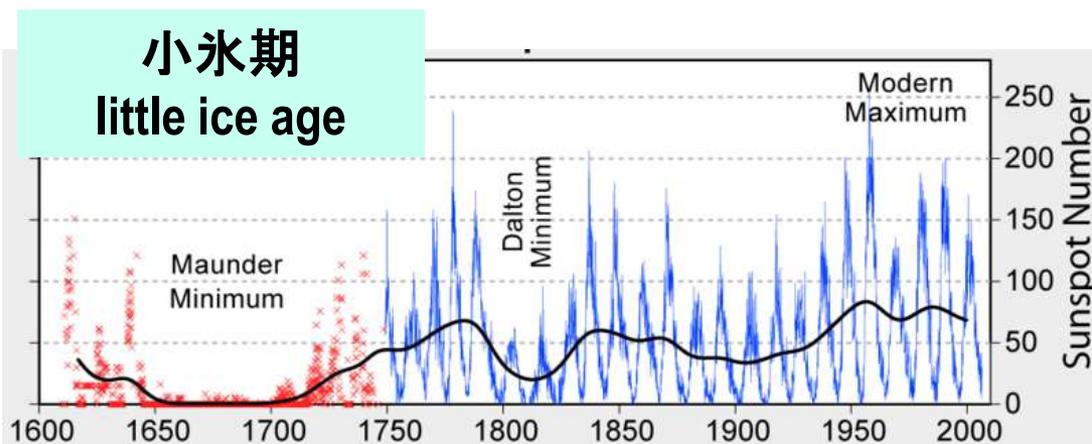
William Herschel (1732-1822) 太陽黒点とロンドンの穀物市場との関係に関する研究(1801)



William Herschel  
1738-1822

## ■ 小氷期 (little ice age)

Moberg et al.(2005): マウンダー極小期に対応した時代に20世紀後期に比べて0.7度程度寒冷化していた可能性がある。



[http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Sunspot\\_Numbers.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Sunspot_Numbers.png)



“Sports on a Frozen River”

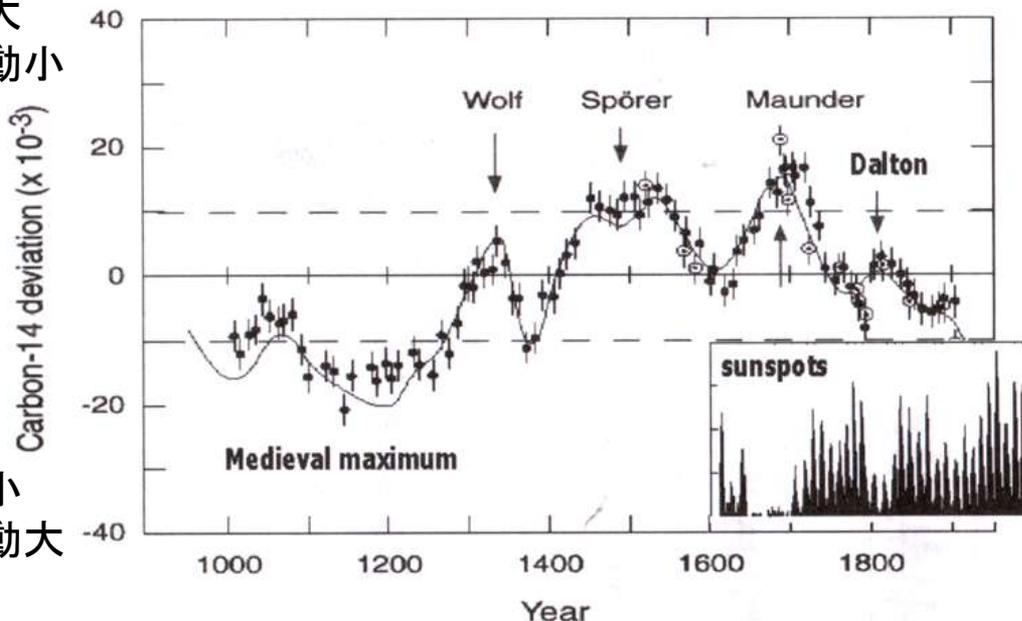
by Aert van der Neer

Courtesy: The Metropolitan Museum of Art

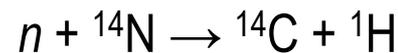
# 太陽黒点と宇宙線量の変化

宇宙線大  
太陽活動小

宇宙線小  
太陽活動大



宇宙線



窒素



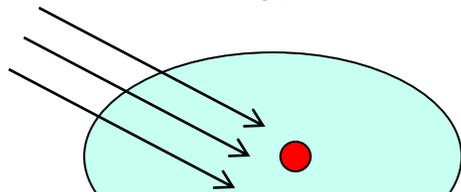
炭素同位体



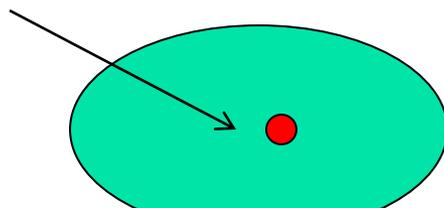
縄文杉

Figure 6. Variation of the  ${}^{14}\text{C}$  production rate in the terrestrial atmosphere as a proxy for the long-term variation of solar activity. Due to the long residence time of  ${}^{14}\text{C}$  of 30–40 years, the 11-year cycle is smoothed out. The Maunder and Dalton minima, as well as earlier grand minima, clearly appear as maxima in the  ${}^{14}\text{C}$  record.

宇宙線



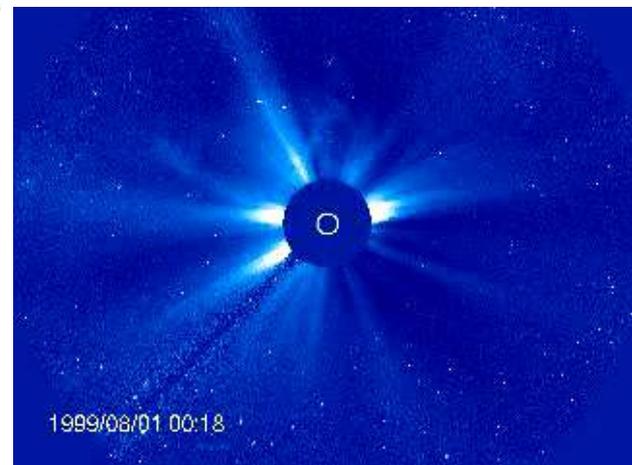
黒点極小



黒点極大

太陽風

太陽圏  
磁場



# 太陽活動と気候変動

Kirkby 2007

## 北半球平均気温

Mann et al. 1998, 1999  
 Moberg et al. 2005  
 Pollack & Smerdon 2004  
 Dahl-Jensen et al. 1998

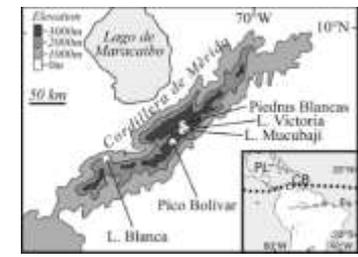
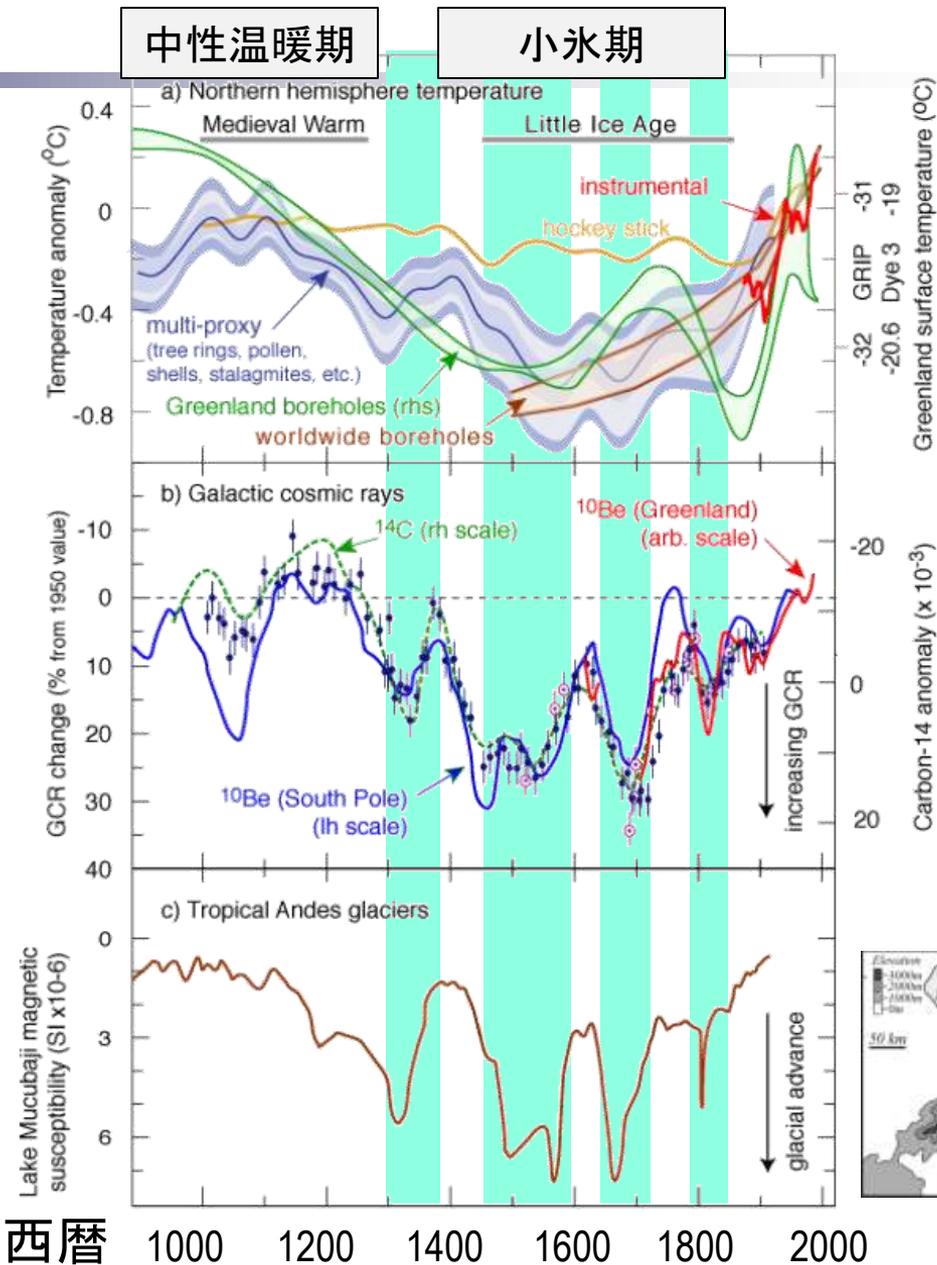
## 宇宙線生成核種

$\Delta^{14}\text{C}$  (太陽活動指標)

Stuiver and Quay 1980 Klein et al. 1980  
 Raisbeck et al. 1990  
 Usoskin et al. 2002

## 熱帯アンデス氷河

Polissar et al. 2006



# 地球に対する太陽影響の研究

太陽ダイナモ

黒点・磁場活動

放射強度 (TSI)  
放射スペクトル (SSI)

太陽風  
太陽圏磁場

太陽面爆発  
(フレア・CME)

高エネルギー粒子

銀河宇宙線  
太陽変調

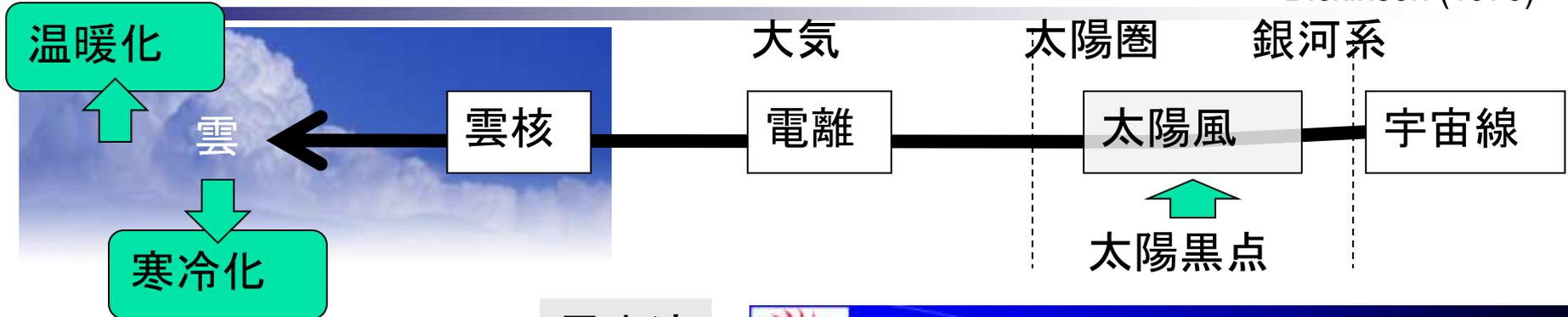
循環

オゾン

雲

# イオン誘起核生成仮説

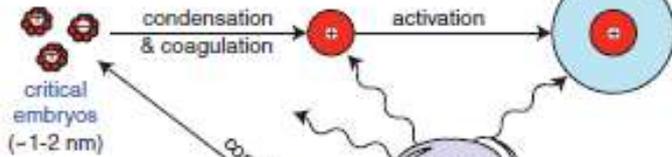
Dickinson (1975)



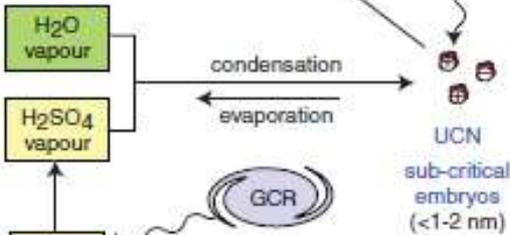
凝結核

雲凝結核

雲水滴



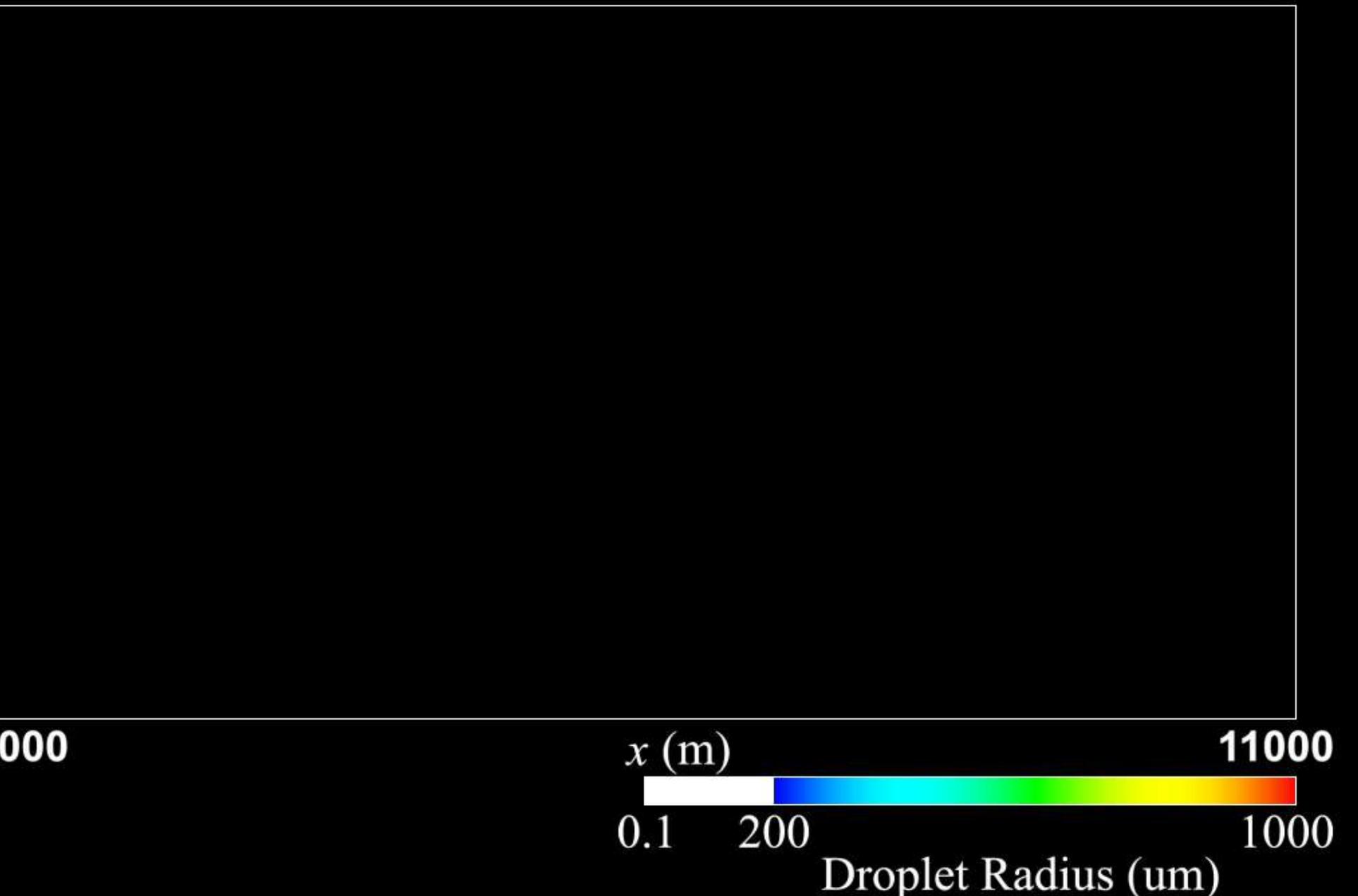
分子  
クラスター



STE研での雲核生成実験

# 世界初の雲の粒子シミュレーション

T = 12 [sec]





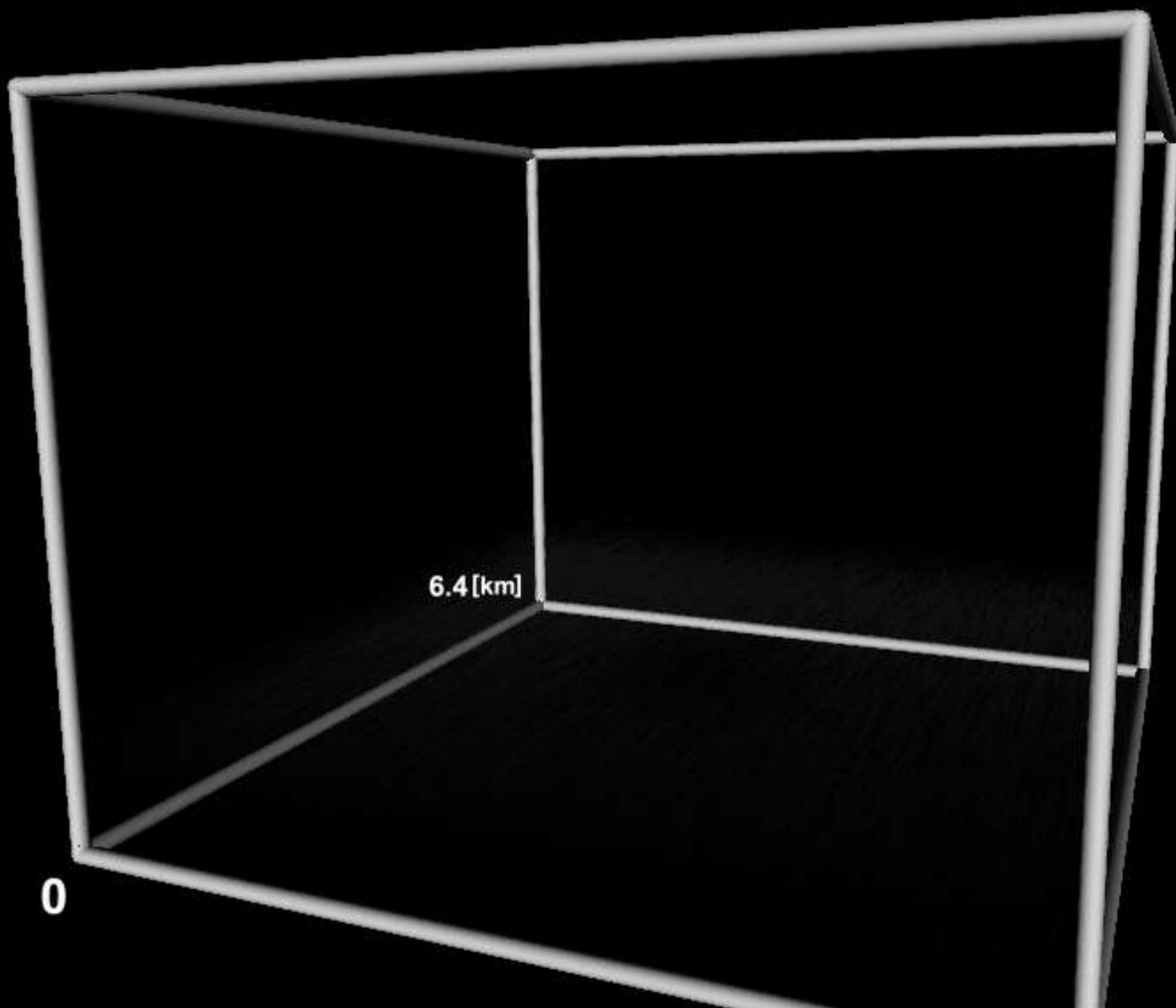
COR

$T = 60$  [se]

5.0 [km]

6.4 [km]

0



物理科学雑誌

parity

第24巻第1号  
2009年1月1日発行  
毎月1回1冊発行  
2009年1月7日発行  
ISSN 0911-4015

PHYSICS TODAY 提携

# パリテイ

2009  
01

物性: 鉄系超伝導体の発見 | 素粒子: 動き出したLHC実験

流体: 雲をめぐる気候変動問題 | 天体: 光エコーによる超新星研究

光量子ICの出現 | 「ひので」の太陽観測成果 | 人工細胞研究の進展

## 特集: 物理学, この1年



MARUZEN

物理の雑誌

# 分野横断研究と広範なネットワーク

国立天文台

JAXA 宇宙航空  
研究開発機構

NiCT情報通信  
研究機構

名古屋大学大学院理学研究科

国内研究  
機関



海外研究  
機関

名古屋大学太陽地球環境研究所

京都大学  
附属天文台

JAMSTEC 海洋  
研究開発機構

核融合科学  
研究所

# 太陽地球環境研究所の大学院

- 名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻(宇宙地球物理系) SSt研究室
- 受験案内: [http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/doc/about\\_edu\\_j.html](http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/doc/about_edu_j.html)

理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 (宇宙地球物理系)	太陽地球系物理学講座	太陽圏プラズマ物理学 (SW)
		太陽圏高エネルギー物 理学(CR)
	太陽地球系化学講座	太陽圏環境変動 (AM1、2)
	太陽地球相関理学講座	太陽地球相関理学 (SSe, SSt)

- 学部卒業研究については直接ご相談ください

# 名古屋大学大学院理学研究科大学院学生募集 (第2次学生募集)

- 大学院理学研究科 博士課程(前期課程)
- 素粒子宇宙物理学専攻  
(素粒子宇宙物理系ならびに宇宙地球物理系)
- 博士課程(前期課程)の学生の第2次募集を下記の通り行います。
- 願書受付期間:
  - 平成22年1月 8日(金) ~ 平成22年1月14日(木)  
(ただし、土・日は除く)
- 試験期日:
  - 平成22年1月23日(土)
- 募集人員 : 10名程度
- 試験科目 : 口述試験(詳細は募集要項参照)
- 募集を行う研究室
  - 素粒子宇宙物理系 : [E,H,Q], CG, P, AT, Ta,  $\Sigma$ T, F, N, AE, UIR, UX,  $\Omega$
  - 宇宙地球物理系 : AM, SSe, **SSt**, CR, SW