



# 科学技術と文化総合講義 (宇宙と地球の科学)

片岡龍峰

第6回: 2012年5月28日

「宇宙天気予報」

# 授業内容

- 1. 授業ガイダンス(オーロラ上映あり) 4月16日
- 2. 太陽地球環境1(大地から太陽系の果てまで)
- 3. 太陽地球環境2(生命を守る3つの盾「太陽風・地磁気・大気」) 4月23日
- 4. 太陽地球環境3(生命を脅かす3つの槍「宇宙線、宇宙塵、太陽紫外線」) 4月30日
- 5. 宇宙災害1(磁気嵐と大停電) 5月7日
- 6. 宇宙災害2(放射線帯と人工衛星障害) 5月21日(休講) 5月14日
- 7. 宇宙災害3(銀河宇宙線と太陽放射線被ばく) 5月28日
- 8. 宇宙天気予報1(世界の宇宙天気モニター) 6月4日
- 9. 宇宙天気予報2(宇宙天気の数値予報) 6月18日(休講) 6月11日  
6月25日(休講)
- 10. 太陽気候関係1(マウンダー極小期と魔女狩り)
- 11. 太陽気候関係2(宇宙線雲仮説) 7月2日
- 12. 宇宙史と地球史1(暗い若い太陽のパラドックス) 7月9日
- 13. 宇宙史と地球史2(超新星と大絶滅) 7月16日
- 14. 宇宙史と地球史3(暗黒星雲と雪玉地球) 7月23日
- 15. まとめ

\* 授業の内容は進み具合や最新の話題に合わせて適宜調整します。

# はじめに

- 「磁気嵐と大停電」、「放射線嵐と被ばく」の授業で、要点は既にお伝えしました。
- 今回は特に、私が体験した宇宙天気予報の研究活動を中心に話題を選んで紹介します。
  - 説明し忘れていた太陽などは少しだけ詳しく。
  - 後で「宇宙天気50のなぜ」も参照して下さい。
    - <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/stelab/www1/naze/spaceweather/spaceweather.pdf>



2012年5月、時代が変わった！宇宙天気予報は今後も重要性を増していくでしょう。

## 米民間宇宙船、ISSとのドッキングに成功

- ISSの乗組員は26日、ドラゴンのハッチを開け、食料、衣類、コンピュータ機器、科学実験用具などの搭載物資の搬入を開始する。ドラゴンは2週間宇宙に滞在した後、科学実験の成果やハードウェアなどを積んで再び大気圏に突入し、米カリフォルニア沖の太平洋に着水予定だという。
- 現在、NASAは宇宙に到達するための独自の手段を持たず、米国人宇宙飛行士の輸送をロシアの宇宙機関に依存している。それだけに今回のドラゴン打ち上げはNASAにとっても重要な意味を持つ。
- スペースXはさらに11回、ISSに宇宙船を飛ばす計画だ。



# 宇宙天気予報

## 太陽の活動が地球に及ぼす影響を予報する

大きな太陽フレアや磁気嵐が発生すると、ハイテク化が進んだ私たちの生活にも影響が出ることがあります。そんな宇宙災害の可能性を事前に知って未然に防ぐための“宇宙天気予報”について紹介します。

### 宇宙と私たちの生活

宇宙に敏感な動物といえど何でしょうか。「ハト」と答えた方は正解です。皆さんが公園などで見かけるハトが宇宙に敏感だなんて信じられるでしょうか。何度ハトを見ても不思議な気持ちになってしまいますが、実はハトは地球の磁場を利用して飛んでいるからこそ、とても長い距離を正確に飛べらるのです。地球の磁場が乱れる「磁気嵐」が起こっていると、ハトには迷子になりやすいということ、磁気嵐の時のハトレー



文・著者  
片岡 龍峰 かつおか りゅうほう

東京工業大学大学院理工学研究科  
理学研究次動機特任助教  
2004年東京大学大学院理学研究科博士課程修了（工学）  
（理学）、理化学研究所基礎科学特別研究員を経て  
2009年より現職。オーロラと宇宙天気予報の研究に  
従っている。

スは禁止されているそうです。

人間のつくり出したハイテク社会もまた、磁気嵐や太陽フレアといった宇宙の嵐に敏感になってきました。たとえば、活発な磁気嵐と関連してカナダにある発電所の変圧器が故障してしまい、大停電が発生したことがあります。フレアの時

には、短波を使った通信ができなくなることはよく知られていますが、宇宙の放射線が強くなった影響で人工衛星が故障して、衛星放送が中断したこともあります。また、宇宙の放射線が非常に強いときには、宇宙飛行士たちの健康に深刻な影響を及ぼすかもしれないといわれています。これからの時代は宇宙利用がどんどん進んでいきますから、あまり深刻な被害や事故が出ないように、宇宙の嵐を知ってダメージを減らすために予報しよう、というのが宇宙天気予報です。

### 黒点の活動と地球への影響

宇宙の嵐は太陽の黒点が大きくなって形が複雑になることから始まります。やがて太陽フレアという、黒点の周りで起こる爆発現象と、1回で

図1 太陽から来る強力な風が地球の磁気シールド（磁気嵐）を揺さぶり、(上) 極地方にカラフルなオーロラを発生させる。  
(画像：アメリカ航空宇宙局（NASA））



# キラリ 研究開発

漫画・はやのん  
第51回・気になる天気教えます！  
最新・宇宙天気予報

理系漫画家はPのんWEBサイト <http://www.hayanon.jp>

晴れたり降ったりで  
天気予報が気になる  
この頃ですね！

今日は  
壮大な  
スケールの  
天気予報が  
ある！

とのウワサを聞いて  
東京都目黒区にある  
東京工業大学に  
やってきましたー！！

はい  
私たちが  
研究しているのは  
天気予報は  
天気予報でも  
宇宙の  
天気予報  
と呼ばれる  
ものなんです！

理学研究流動機構  
片岡龍峰 特任助教

地球のまわりの  
宇宙空間には  
エネルギーの高い電子や  
イオンなどの粒子が  
地球の磁場に  
つかまっっている  
放射線帯という  
領域があります！

そのあたりは  
スペースシャトルや  
人工衛星などが  
運用されている領域  
なんです！

時々  
エネルギーの高い粒子が  
急に増減することで  
人工衛星の動作に  
異常が出てしまう  
ことがあるんです！

身近な  
ところでは  
電離圏の電子密度が  
変わることで  
GPSの位置に  
大きな誤差が出る  
こともあります

ええーっ  
困ります！

太陽のフレアにより  
高エネルギー粒子が  
吹き出してくる  
こともあります！

その放射線で  
宇宙飛行士が  
被ばくしたり  
北極上空を航行する  
旅客機の乗客や乗員が  
がんになる確率が上がる  
可能性があります

そういう人たちに  
これから  
すごいのが  
来ますよー！！

というのを  
ちよつとでも早く  
知らせることが  
できれば  
思うわけです

そうしたら  
誤動作しないよう  
電源オフしたり  
避難したり  
できるでしょう

わわわ..  
教えてあげて  
くださいっ

放射線帯の電子の状態が  
なぜ変化するのかは  
まだわかっていません！  
でも  
過去10年以上の  
データの蓄積から  
経験的にどう  
変化していくかを  
予測することが  
できます！



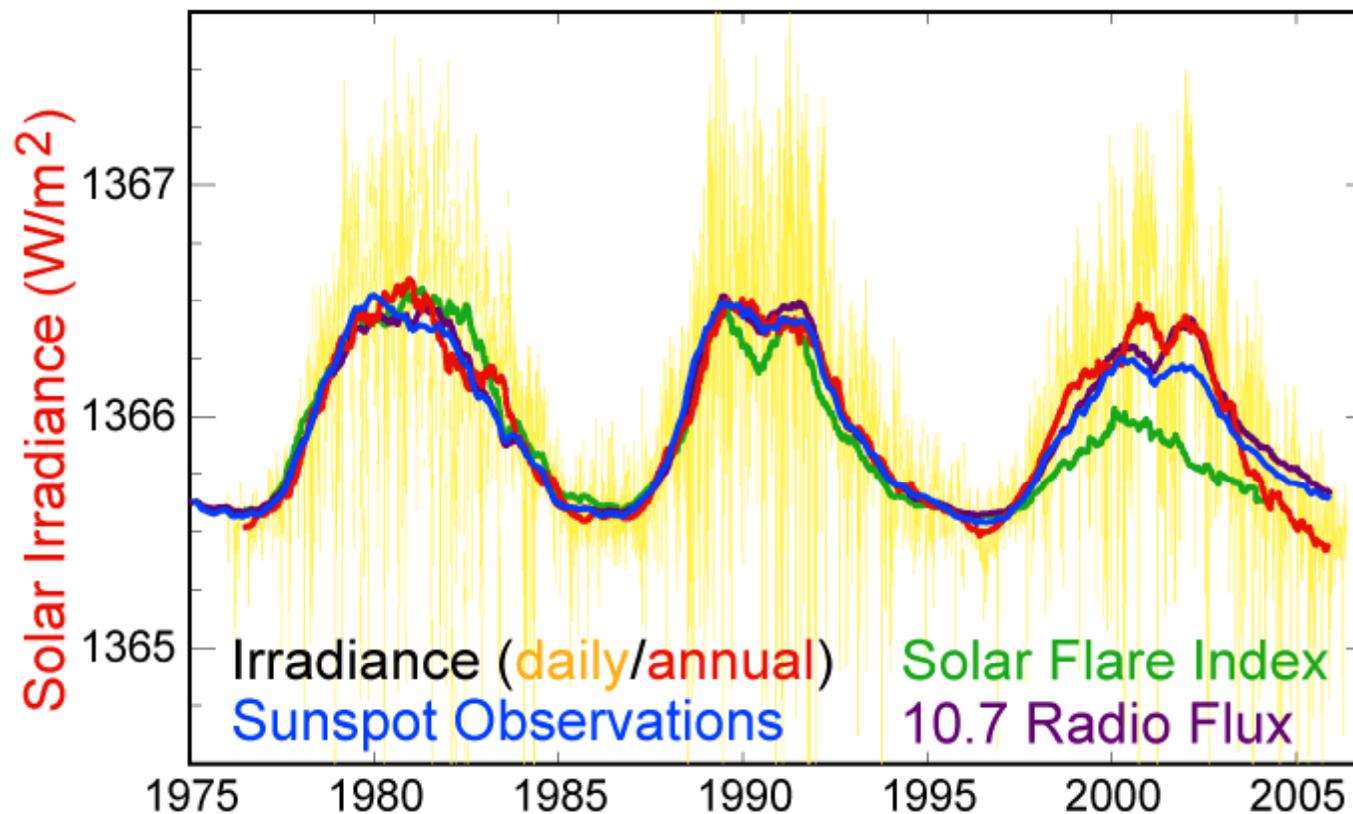
<http://hoksw1.stelab.nagoya-u.ac.jp>



(あるいは今まで説明を忘れていたので。)

# 宇宙天気予報と言えば太陽！

## Solar Cycle Variations



“定数”ではなかった太陽定数！



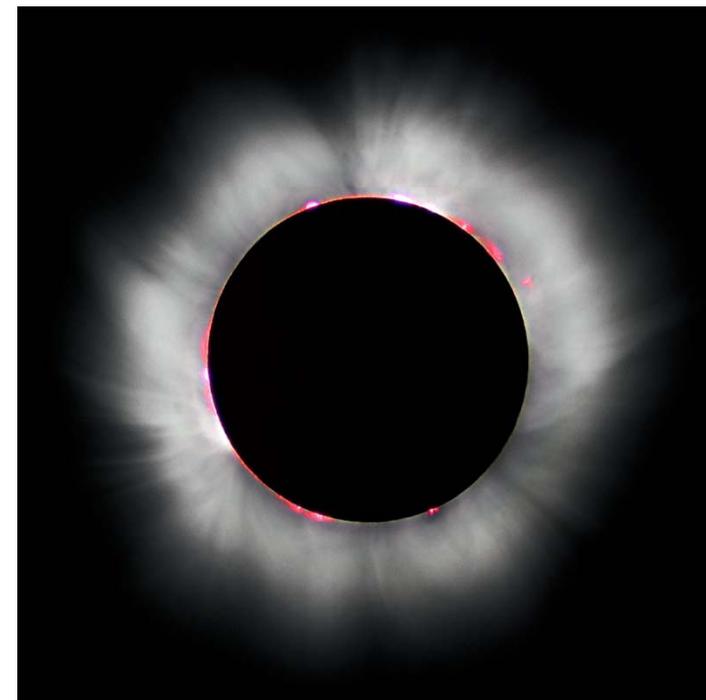
2012.5.21 ©Hiroko Miyahara



[http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Solar\\_eclips\\_1999\\_4.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Solar_eclips_1999_4.jpg)

# 太陽コロナの不思議

- corona = ラテン語でcrown
  - 模様は磁力線
- 100万度を超える太陽大気
  - 光球は5800度なのになぜ？
  - 光球の100万分の1の明るさ
- 太陽半径の5倍付近で「太陽風」に接続する。
  - 超音速の風が吹き出すのはなぜ？
  - Parker, E.N. (1958) ApJ, vol. 128, pp.664-67



自由電子が太陽光をトムソン散乱

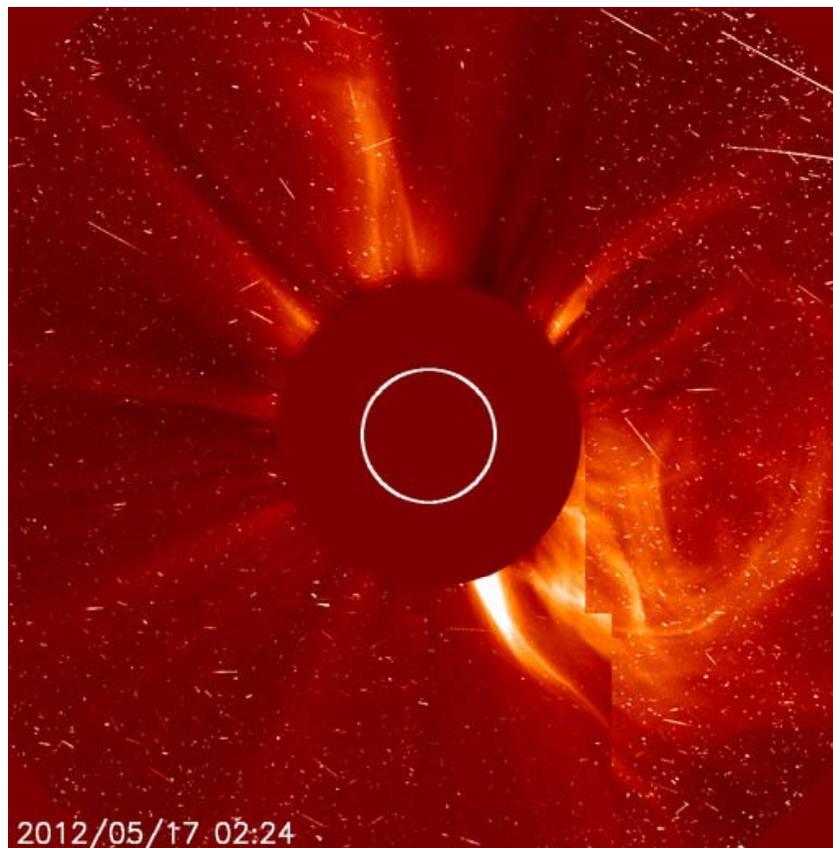
絶版ですが文系にも理系にもオススメの本: 齊藤尚生『有翼日輪の謎』(中公新書)  
人間の太陽信仰(エジプト文明とか)と、太陽活動の謎に迫る唯一無二の作品。

CMEs = Coronal Mass Ejections

皆既日食でCMEを、この目で見たい！

# コロナ質量放出

- 太陽フレアと関連してコロナが放出する現象。



太陽放射線も映っている

2012年5月17日に発生した  
コロナ質量放出(CME)の画像

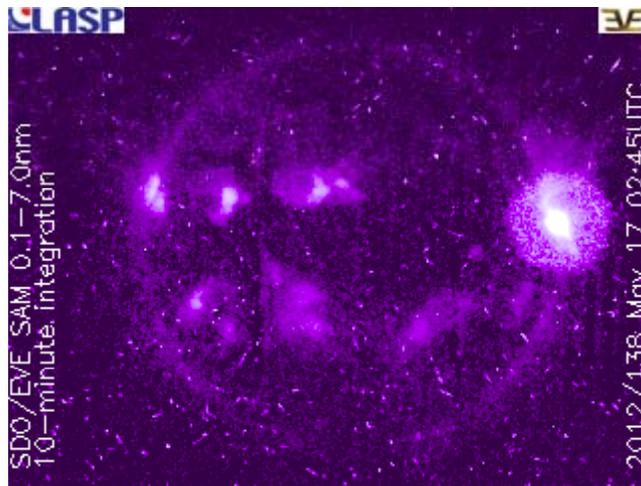
このCMEは地球に直撃しなかったため、  
磁気嵐にはならなかった。

2006年12月以来となるGLEが発生！  
高緯度地域を飛んでいた旅客機は、  
通常より多く被ばくした可能性が高い。  
(現在、調査中・・・)

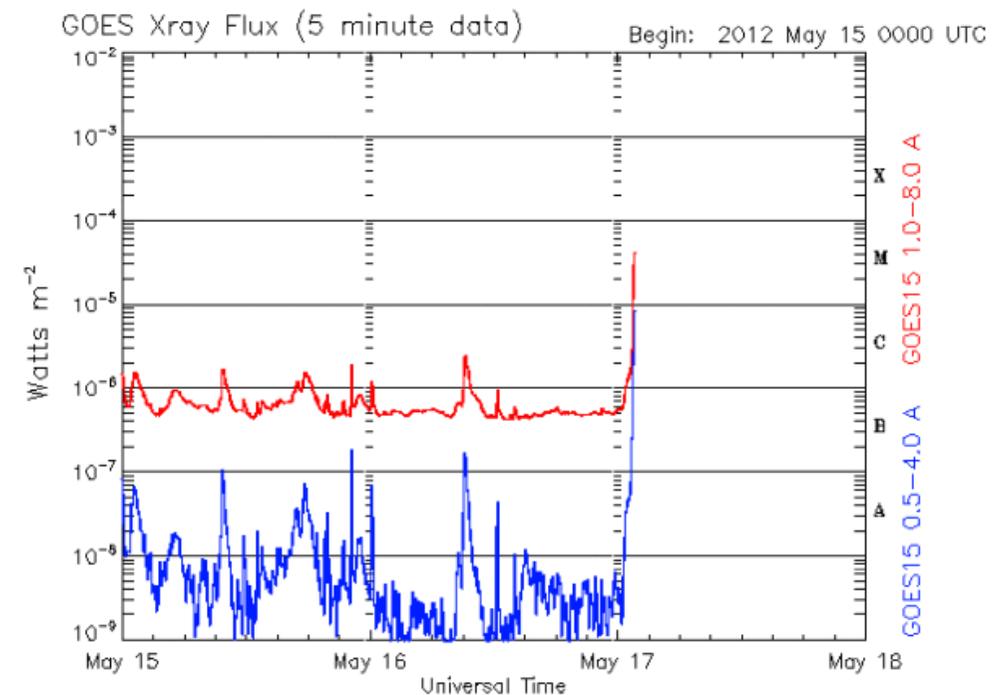
浮き上がってきた黒点の磁場とコロナの磁場の相互作用で急激なエネルギー解放が起こる。

# 太陽フレア

- 太陽系最大の爆発現象。
  - X線など電磁波の急増で感知できる。
  - 巨大で複雑な黒点のまわりで爆発する。



2012年5月17日に発生した  
M5クラスフレア

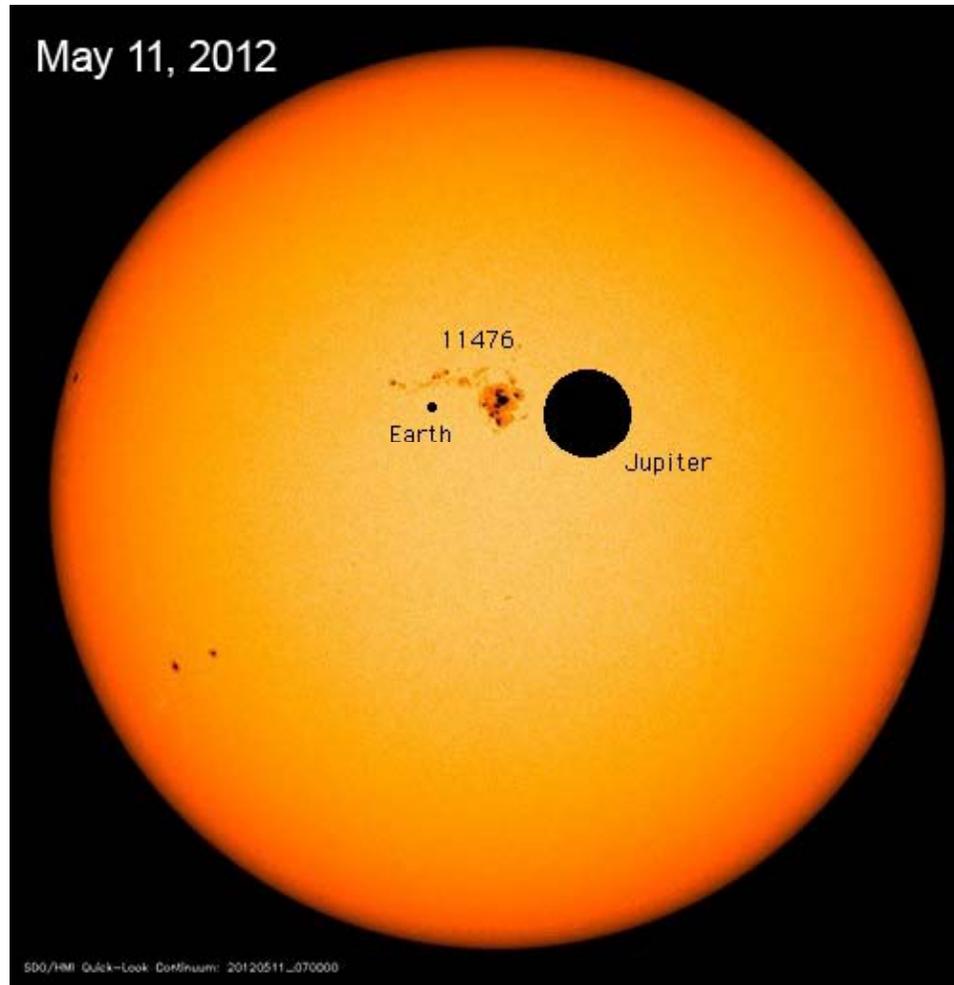


Updated 2012 May 17 02:45:12 UTC

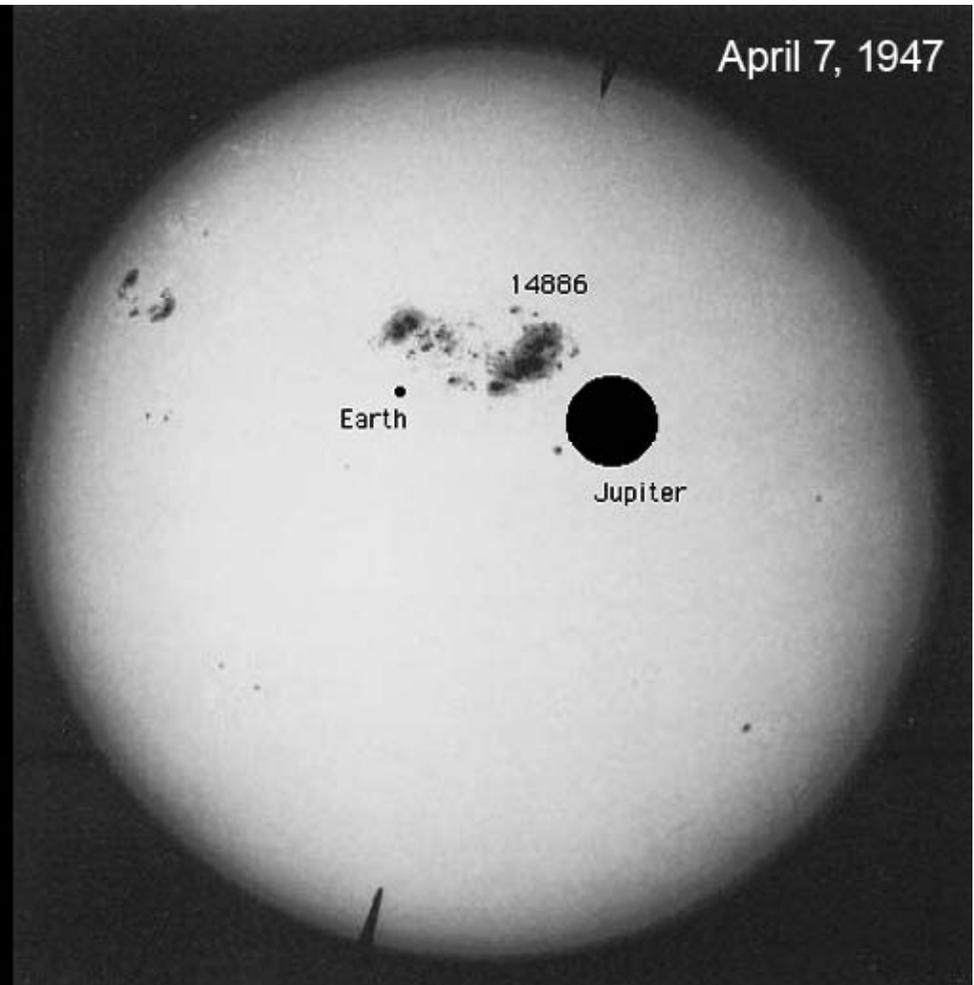
NOAA/SWPC Boulder, CO USA

強い磁場が浮き上がってきた場所が周辺より温度が低いために黒く見える現象

# 太陽黒点



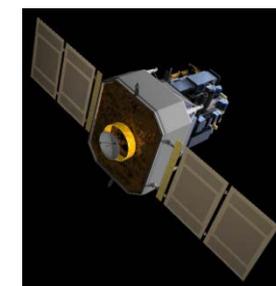
今回のフレアを起こした黒点



観測史上最大の黒点

# 世界の宇宙天気モニター・歴代

- GOES(1976-)
  - 静止軌道でフレアをモニター
  - [http://www.swpc.noaa.gov/rt\\_plots/](http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/)
- ACE(1998-)
  - ラグランジュ点L1で太陽風をモニター
  - <http://www.swpc.noaa.gov/ace/>
- SOHO(1996-)
  - ラグランジュ点L1でコロナ質量放出をモニター
  - <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>



地球上の同じ場所を24時間365日、宇宙からモニターできるのはなぜ？（気象衛星とか）

# 静止軌道

遠心力と重力の釣り合い

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}$$

24時間で一周するスピード

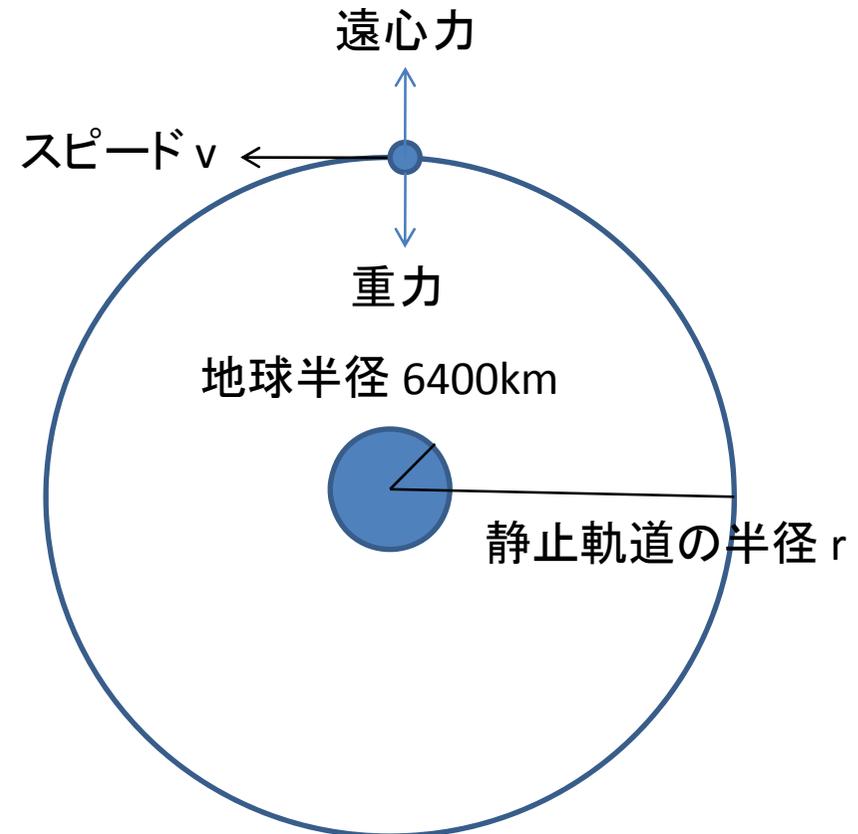
$$v = \frac{2\pi r}{24 \times 3600 \text{ s}}$$

$$r^3 = \left( \frac{24 \times 3600 \text{ s}}{2\pi} \right)^2 GM$$

$$r = 4.23 \times 10^4 \text{ km}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11}$$

$$M = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$



何にも遮られずに、太陽を24時間365日モニターできるのはなぜ？(SOHOとか)

# ラグランジュ点L1

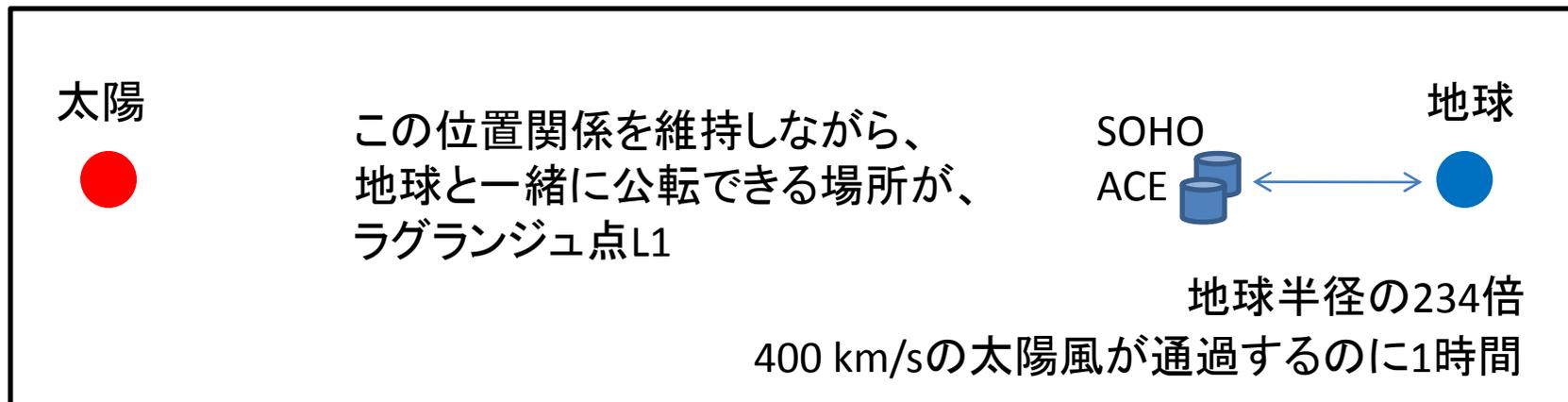
Hill sphere: 重い天体のまわりを公転する天体の重力が及ぶ範囲L

$$L = \left( \frac{M_{\text{Earth}}}{3M_{\text{Sun}}} \right)^{1/3} \text{ AU} = 1.5 \times 10^6 \text{ km}$$

AU 天文単位  $1.5 \times 10^8 \text{ km}$

$$M_{\text{earth}} = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$



小金井にある宇宙天気予報センターではACEからの今のデータを受信しています。  
(撮影:2012年3月8日午後2時半)



# 週間宇宙天気ニュース(2010年2月-)



情報通信研究機構から配信されている宇宙天気ニュース(第31問:情報通信研究機構提供)。

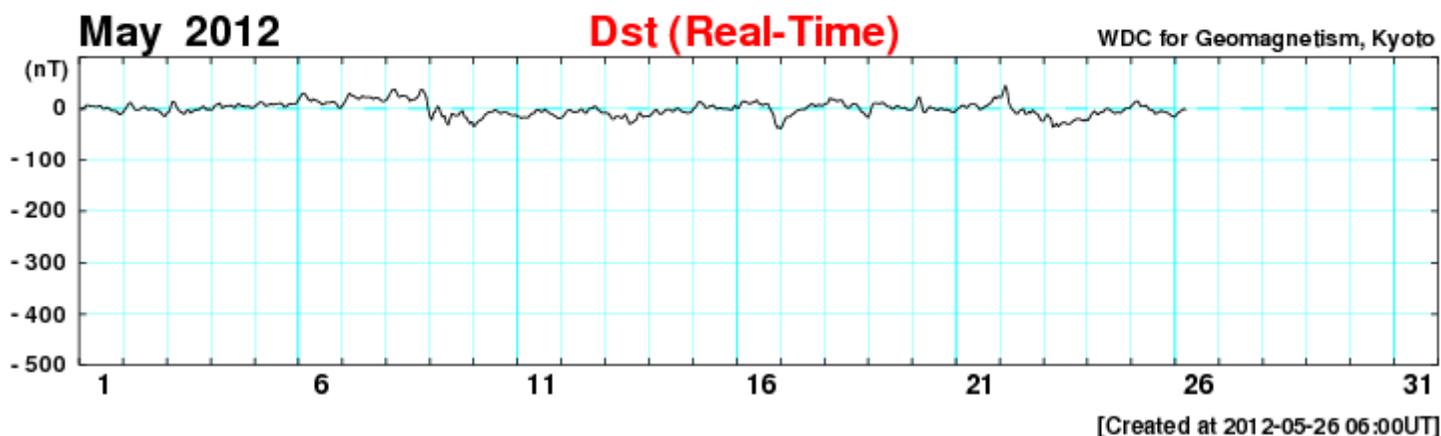
# 宇宙天気予報で重宝しているサイト

- オーロラアラート
  - わかりやすい公式宇宙天気情報サイト(になる予定で進化中)
  - <http://aurora-alert.nict.go.jp/>
- Spaceweather.com
  - 毎日更新される宇宙天気情報サイト(英語)
- STEREO(太陽の裏側のデータ)
  - <http://stereo.gsfc.nasa.gov/browse/>
- SDO(静止軌道からの太陽画像データ)
  - <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

# 世界が見る日本の宇宙天気予報

- 京大地磁気センターのDst指数
  - － 磁気嵐がどこまで発達しているか？

- [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_realtime/presentmonth/](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/presentmonth/)



Dst指数が-250 nTを下回ると北海道でオーロラが見られる可能性が高い。

# オーロラと日本のつながりを調べる北海道・陸別レーダー（名古屋大学・太陽地球環境研究所）



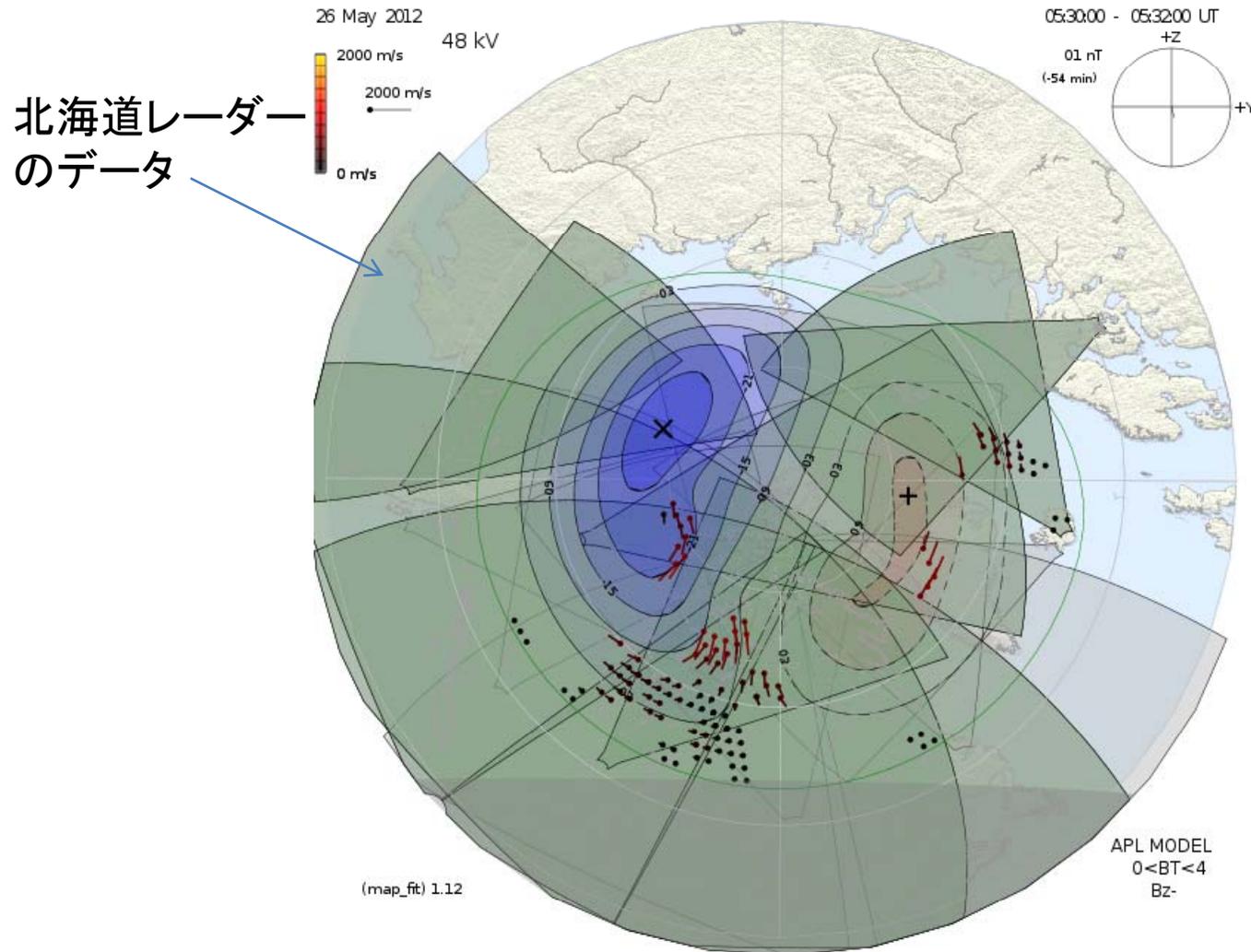
責任者の西谷さん

2006年夏、どしゃぶりの中、組み立てを終えた開放感！



オーロラの電流で変化する電離圏(ISS高度)プラズマの風のパターン

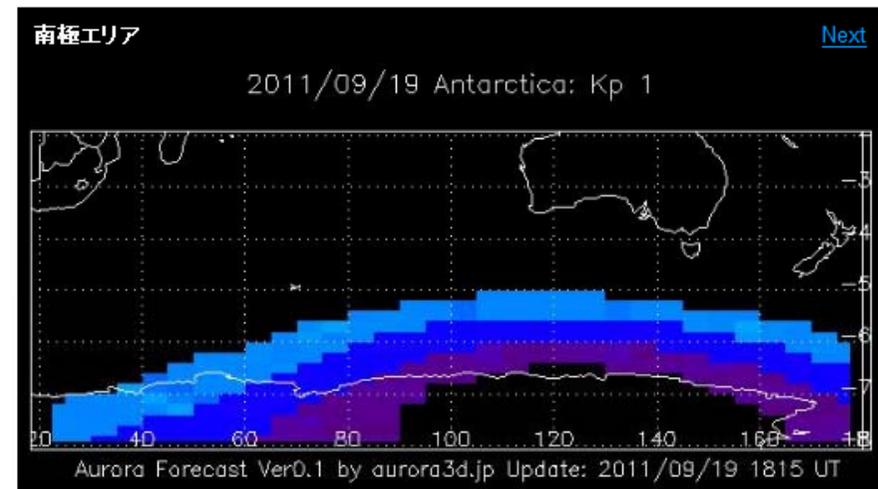
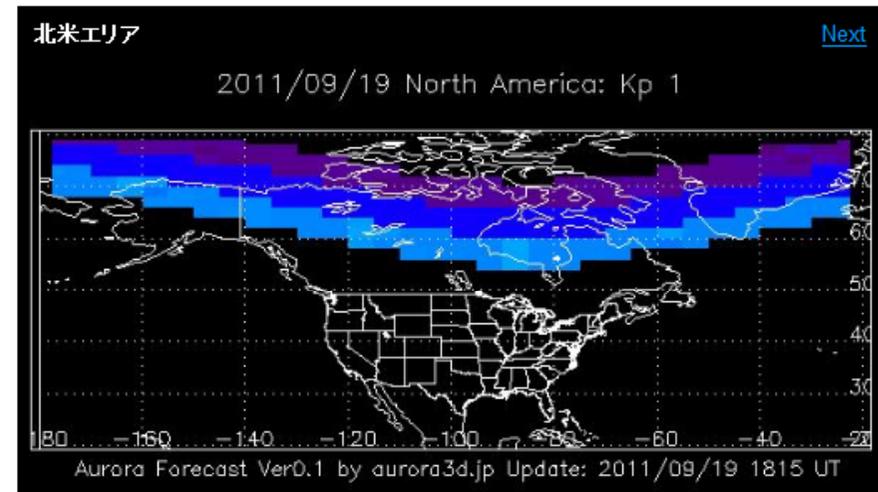
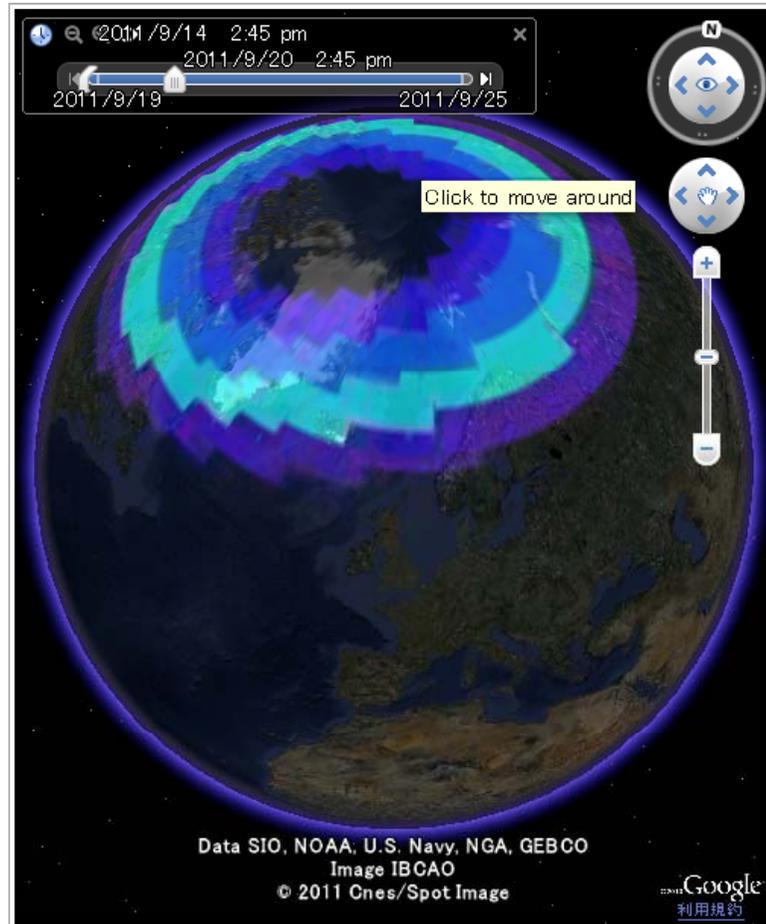
# 地球の天気図？



2011年5月公開

# オーロラ予報マップ

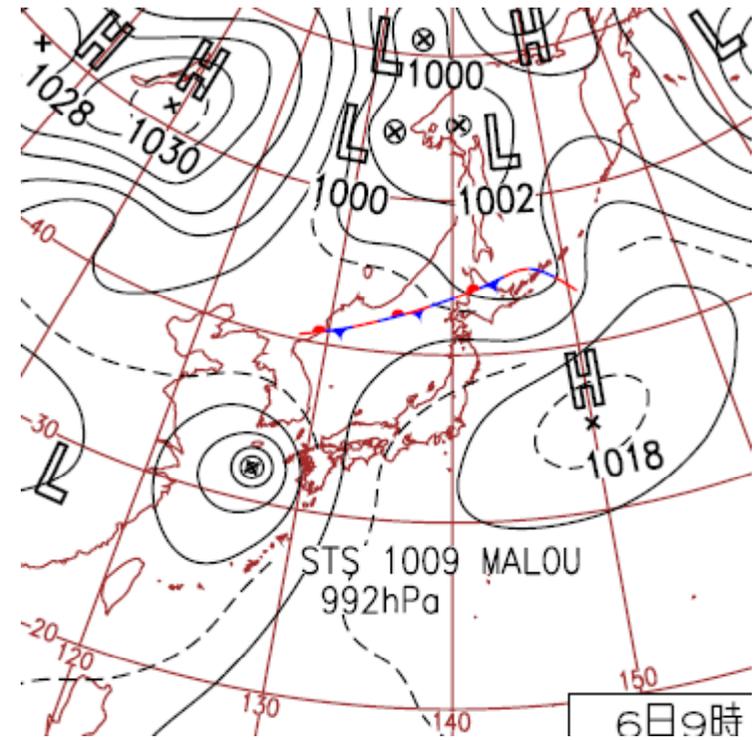
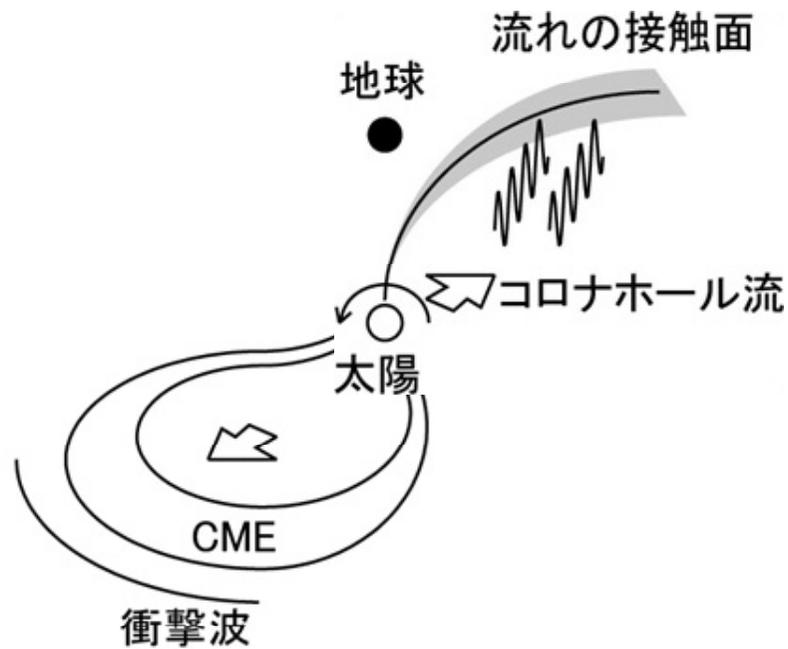
オーロラ予報マップ

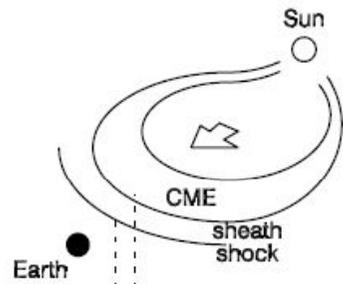


<http://aurora3d.jp/spaceweather/>

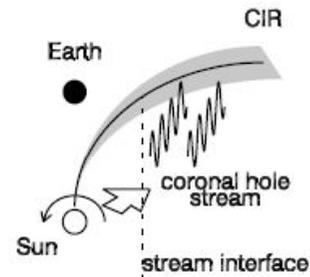
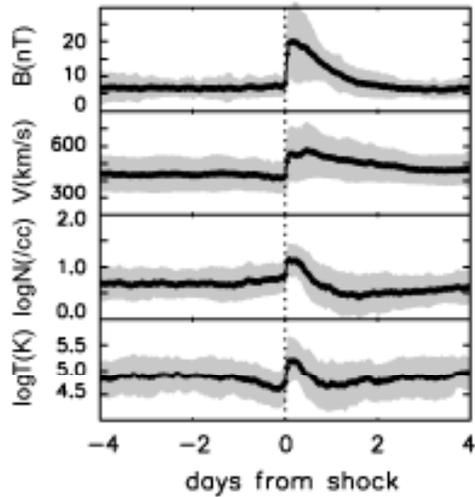
宇宙の「台風」と「寒冷前線」

# 宇宙の天気図？

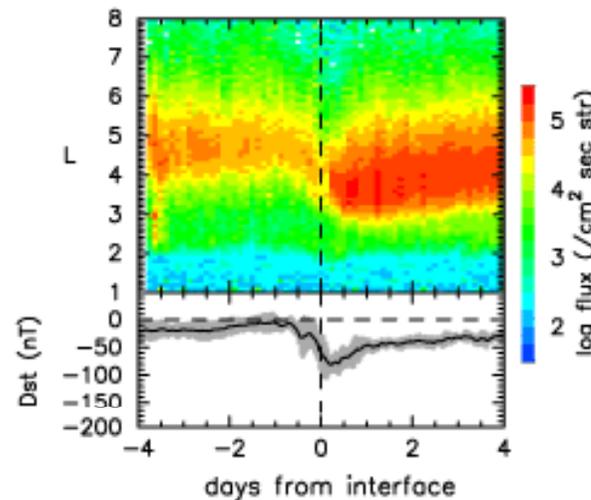
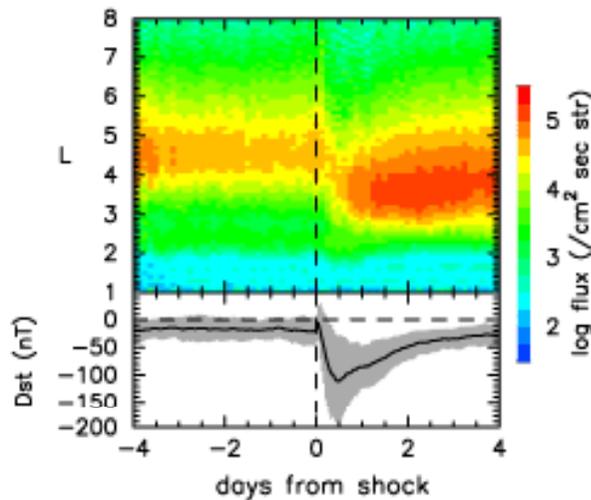
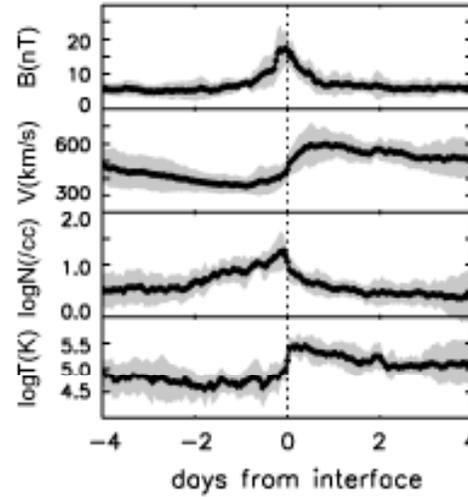




CME-shock (1996-2007)



CIR-stream interface (1996-2007)



太陽嵐  
→ ACEでチェック

放射線帯  
→ GOESでチェック

磁気嵐  
→ 京大磁気センター

## 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量が増える

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、キラ電子の量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（URL）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での活用が期待で

きると話している。  
HPは <http://hbks.wl.stab.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."

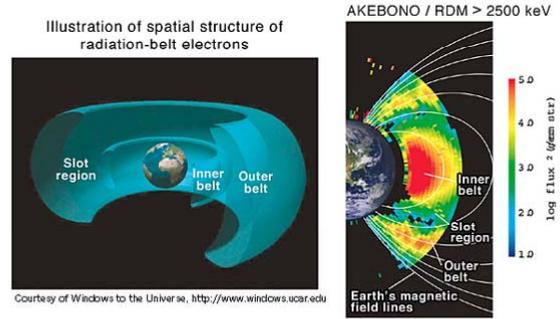


Figure 1. Illustration of radiation-belt electrons (left). The spatial distribution of electrons above 2500 keV observed by AKEBONO (right) with particles' flux expressed in color. (<http://www.isas.jaxa.jp/e/forefront/2006/miyoshi/index.shtml>)

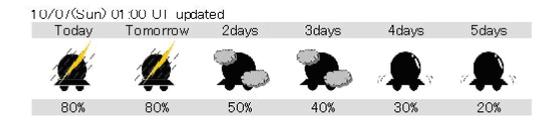
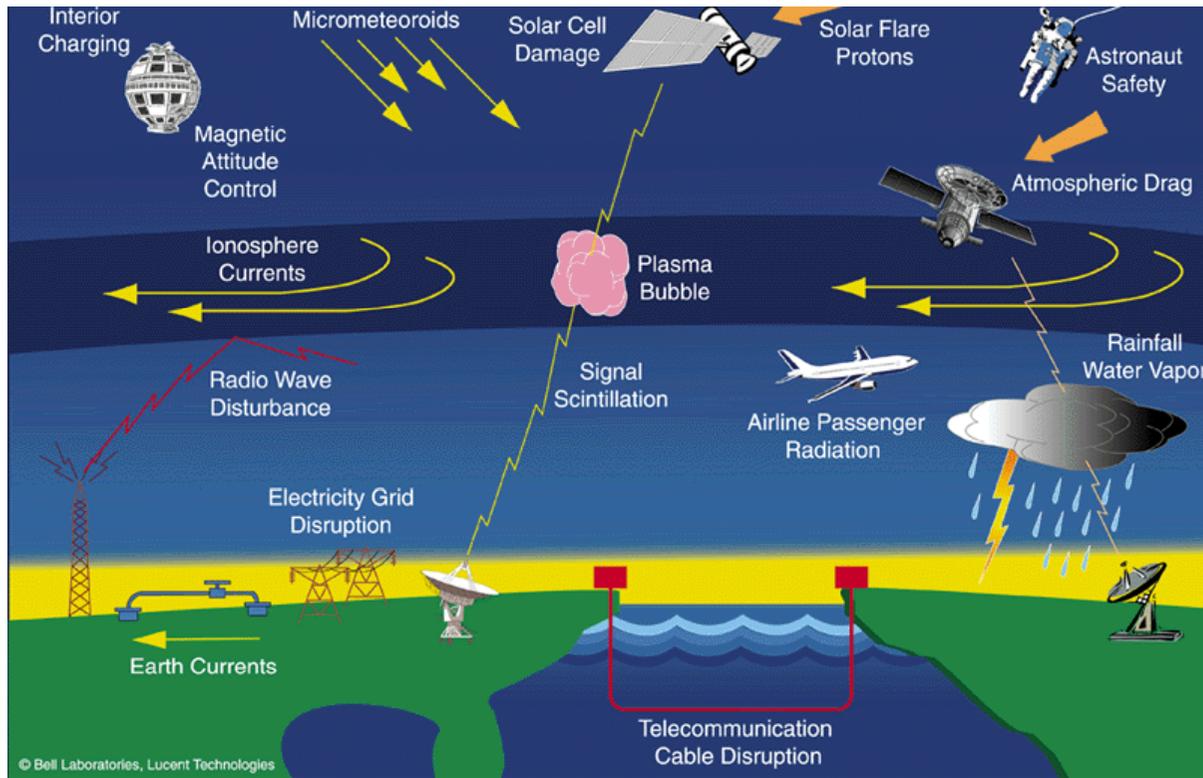


Figure 2. This table shows the probability that the 24-hour maximum value of 2MeV electrons in a geosynchronous orbit will exceed the NOAA/SEC alert level of 1,000 PFU. The forecast is updated every day by scientists between midnight and noon UT. "Today" means from midnight to the following midnight,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

# 放射線帯の国際会議の様子 2011年7月ニューファンドランド



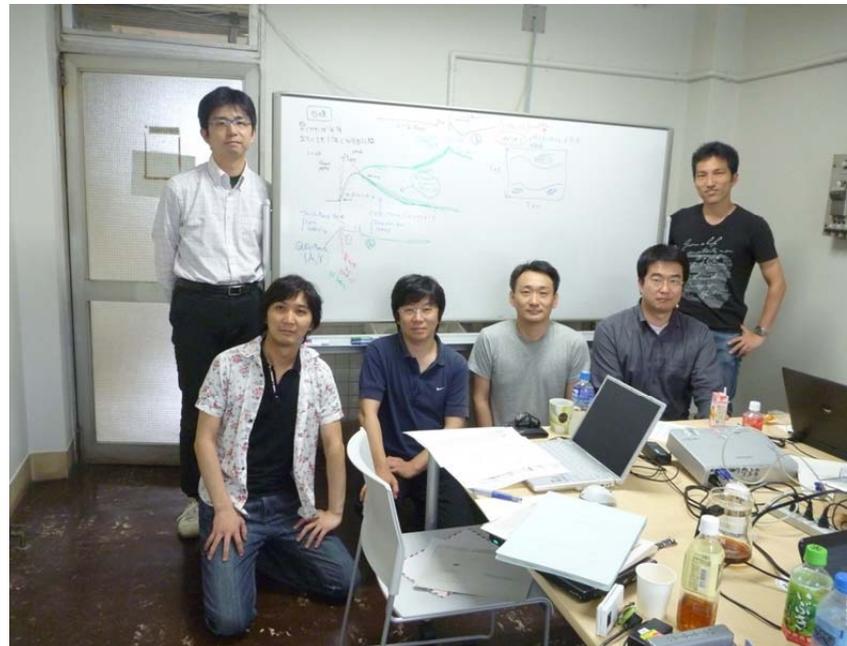
**The effects of magnetic storms - what scientists call space weather - extend from the ground to geostationary orbit and beyond.**



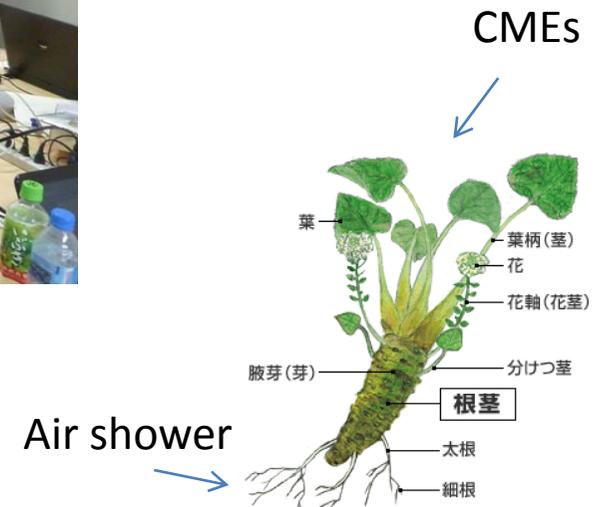
SEP Prediction Workshop, Tokyo Tech, 2010/06/29(Tue)

# 太陽放射線被ばく予報システムの開発

WArning System for AVIation Exposure to SEP

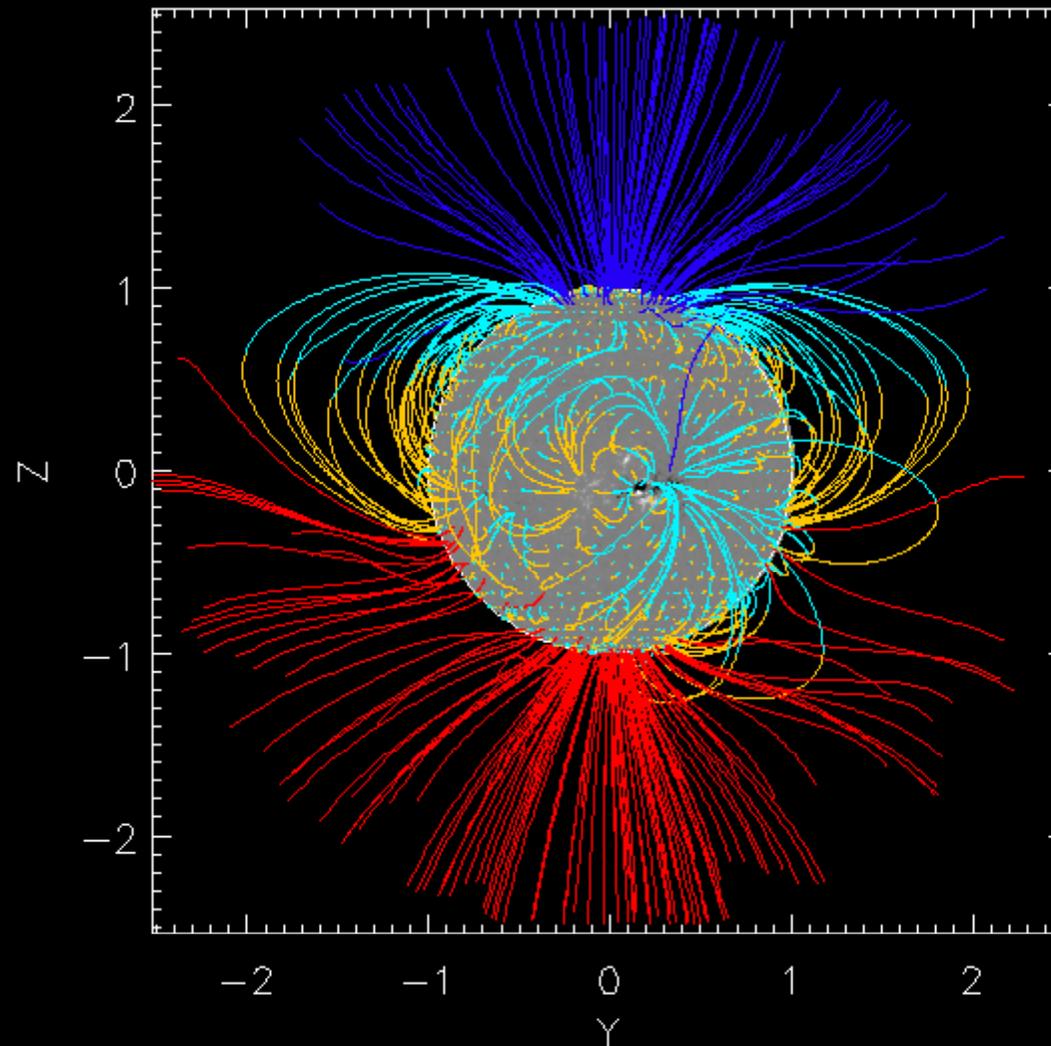


研究が完成する前に、右のような感じのロゴを作りたい。  
いつでも応援ロゴ募集中。(あと2年かけて完成する予定。)



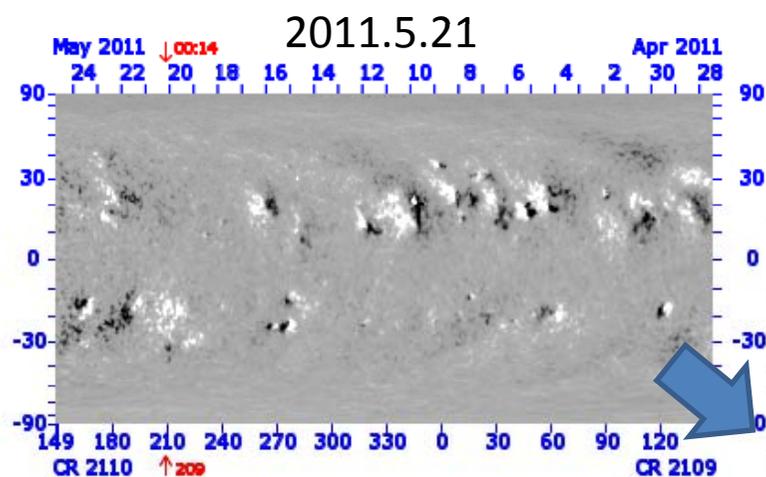
太陽磁場の開き具合を計算し、どれくらい速い太陽風がどこから吹くかを設定する。

# 2006.12.13 Potential Field

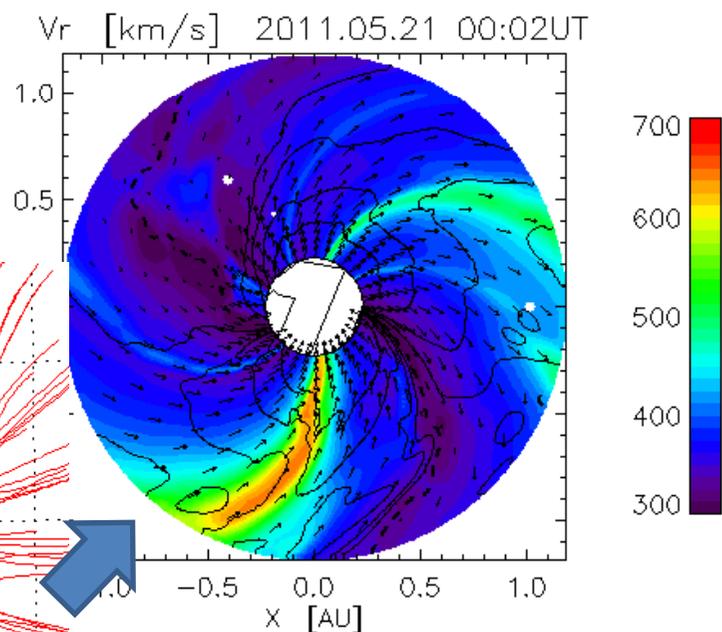
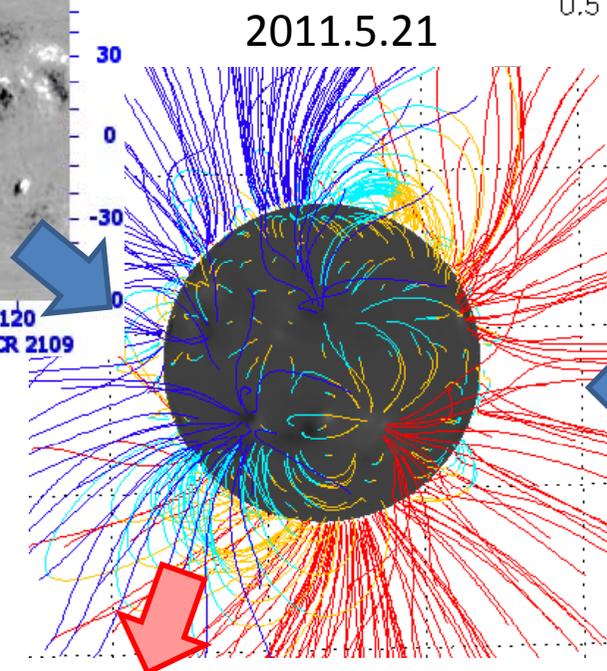


# コロナ & 太陽風の自動計算

<http://aurora3d.jp>



GONG project  
<http://gong.nso.edu/data/magmap/>



Analytic shock (+ SEP acceleration model)

太陽風の数値シミュレーション  
(入力は太陽磁場データのみ)

全ての磁気流体パラメタを  
1週間先まで得るシステム。

- オーロラ予報
- 放射線帯予報
- 惑星予報も！

コロナ質量放出と太陽放射線  
を作っていくのが、これから。

Kp指数とは、地磁気擾乱の活動度を、0~9までの10段階で表した指数です。

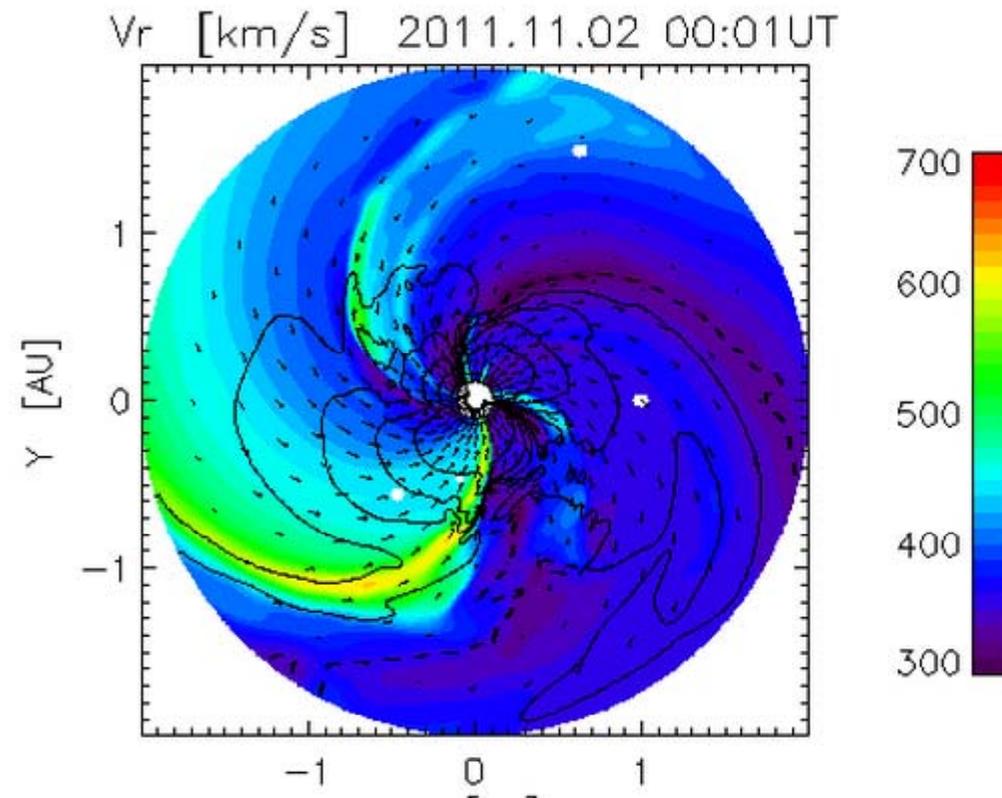
「太陽風予報マップ」に基づいたKp指数の週間予報値を表示しています。

括弧の中の値は、27日前の太陽風スピードに基づいた予報値です。

\*「太陽風予報マップ」は、テスト段階の自動シミュレーション結果です。

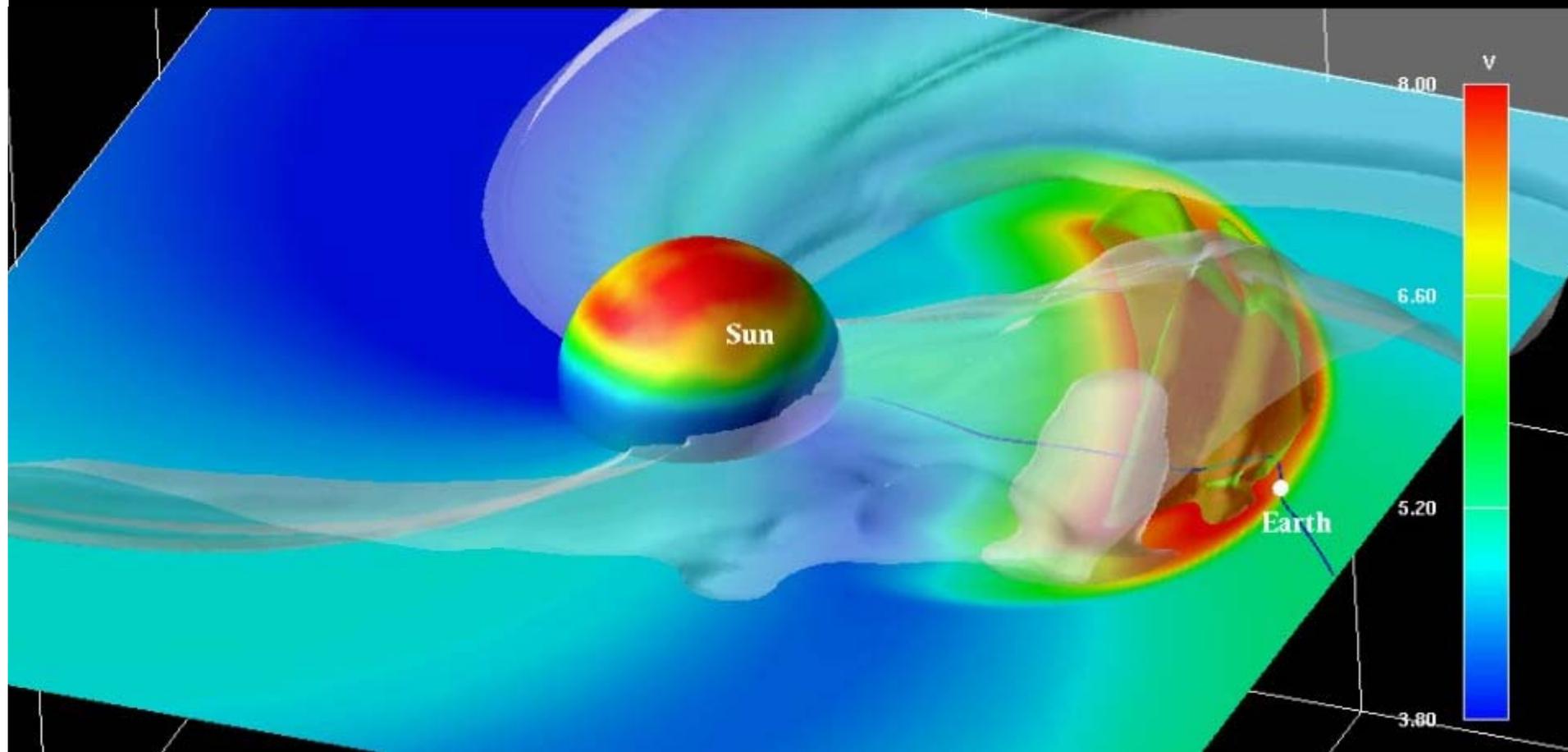
## 太陽風予報マップ

[Next](#)



最後に、一連の宇宙天気ムービーで最後に復習しましょう。

# 数値宇宙天気予報への挑戦



Kataoka et al. 2009

# 第2回小レポート課題

- 本日の出席のため仮タイトルは今提出。
  - 来週の授業開始時に提出して下さい。
- A4用紙に、まとめてください。
  - 疑問に思った調べたいことを探求してください。
    - 「宇宙と地球の科学」だということを忘れずに
  - 必ず、参考文献(本、論文、HP)を書くこと。
    - ウィキペディアなら英語のほうが詳しい
  - 授業資料は私のウェブサイトで公開しています。
    - <http://sites.google.com/site/ryuhokataoka/>

# Appendix

MHD equations

# Ideal MHD equations

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

Momentum  $\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}$  Ignore  
polarization  
current

Energy  $\frac{\partial U}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla U = -(\gamma - 1)U \nabla \cdot \mathbf{v}, \quad U = \frac{P}{(\gamma - 1)\rho}$  Ideal gas

Induction  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

For the SI unit, change  $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B} / \sqrt{\mu_0}, \quad \mathbf{j} \rightarrow \sqrt{\mu_0} \mathbf{j}$

# Ideal MHD equations (conservation form)

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

Mass conservation  
 Momentum conservation  
 Energy conservation  
 Induction equation

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

Total pressure = gas pressure + magnetic pressure

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

Total energy = kinetic energy +  
Internal energy + magnetic energy

# Spherical grid

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{pmatrix} + \text{div} \begin{pmatrix} \rho u \mathbf{v} - B_x \mathbf{B} + p_T \mathbf{e}_x \\ \rho v \mathbf{v} - B_y \mathbf{B} + p_T \mathbf{e}_y \\ \rho w \mathbf{v} - B_z \mathbf{B} + p_T \mathbf{e}_z \end{pmatrix} = \rho \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} + \text{div} \begin{pmatrix} B_x \mathbf{v} - u \mathbf{B} + \varphi \mathbf{e}_x \\ B_y \mathbf{v} - v \mathbf{B} + \varphi \mathbf{e}_y \\ B_z \mathbf{v} - w \mathbf{B} + \varphi \mathbf{e}_z \end{pmatrix} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi + c_h^2 \text{div} \mathbf{B} + c_p \varphi = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} e + \text{div}((e + p_T) \mathbf{v} + (\varphi - \mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \mathbf{B}) = 0$$

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

$$p_T = p + \frac{\mathbf{B}^2}{2}, \quad \psi = -\frac{GM}{r}, \quad \mathbf{g} = -\frac{GM}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

