

理系大学生のための
太陽研究最前線体験ツアー
2018年3月23日

宇宙天気と宇宙気候 太陽活動を予測する

名古屋大学宇宙地球環境研究所
名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻
太陽宇宙環境物理学(SST)研究室

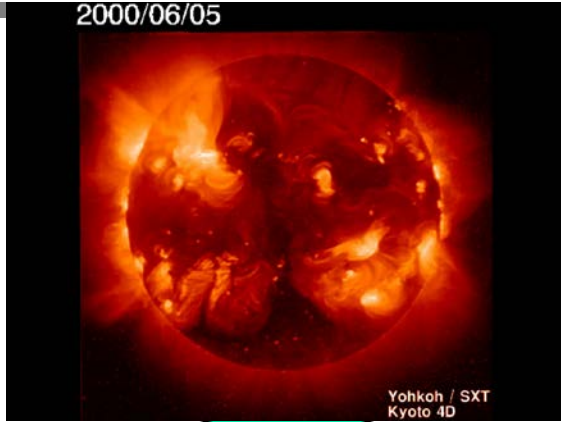
草野完也



包括的な太陽圏システムの変動

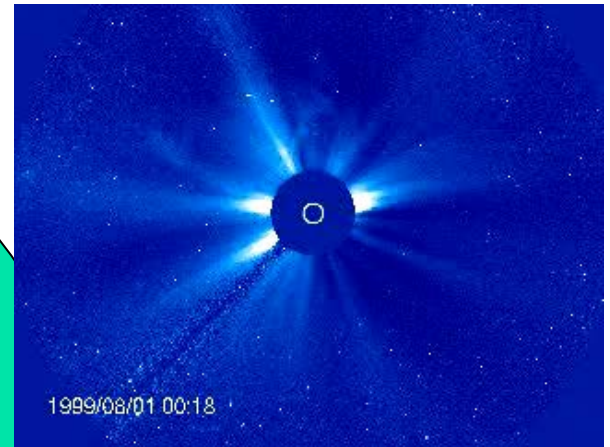
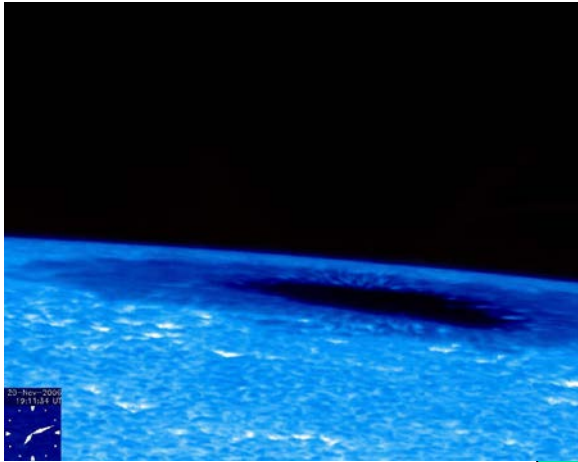
①宇宙天気研究
短期的な宇宙環境変動
数分～数十日

2000/06/05

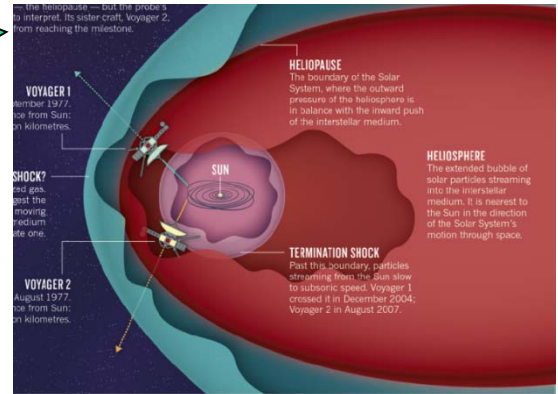
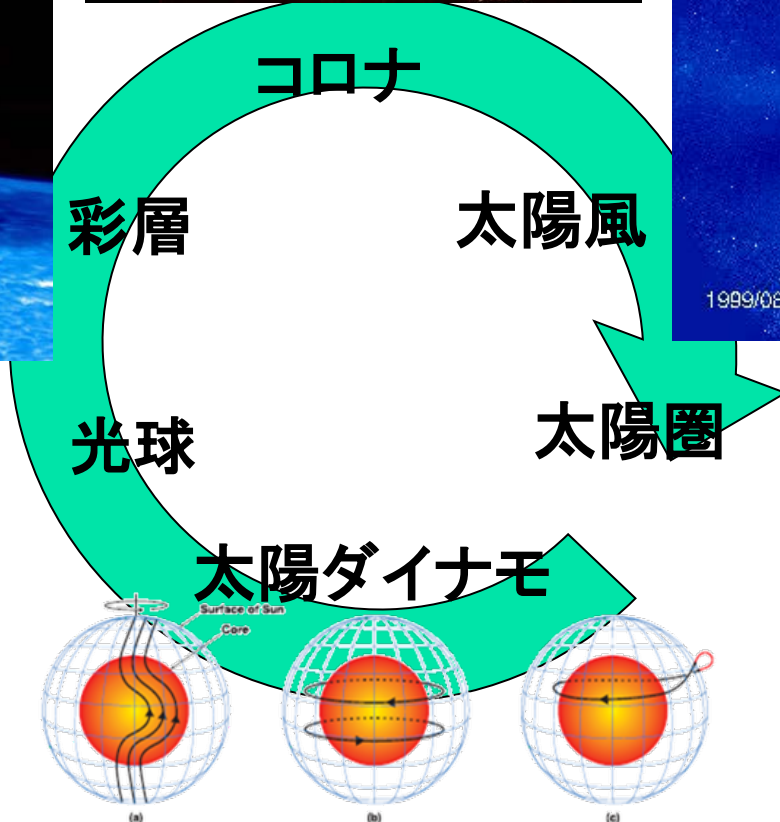


Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

②宇宙気候研究
長期的な宇宙環境変動
数か月～数十億年



1999/08/01 00:18



宇宙天気と宇宙気候

■ 宇宙天気 (Space Weather)

- 短期的な太陽活動(特に、フレア及びコロナ質量放出)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動
- オーロラ嵐、磁気嵐、デリンジャー現象、プロトンイベントなど

■ 宇宙気候 (Space Climate)

- 長期的な太陽活動の変化(黒点周期やその変動)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動
- 気候変動、大気成分変化、大気散逸など

太陽面爆発

太陽系最大級の爆発現象～ 10^{25} J

■ 太陽フレア

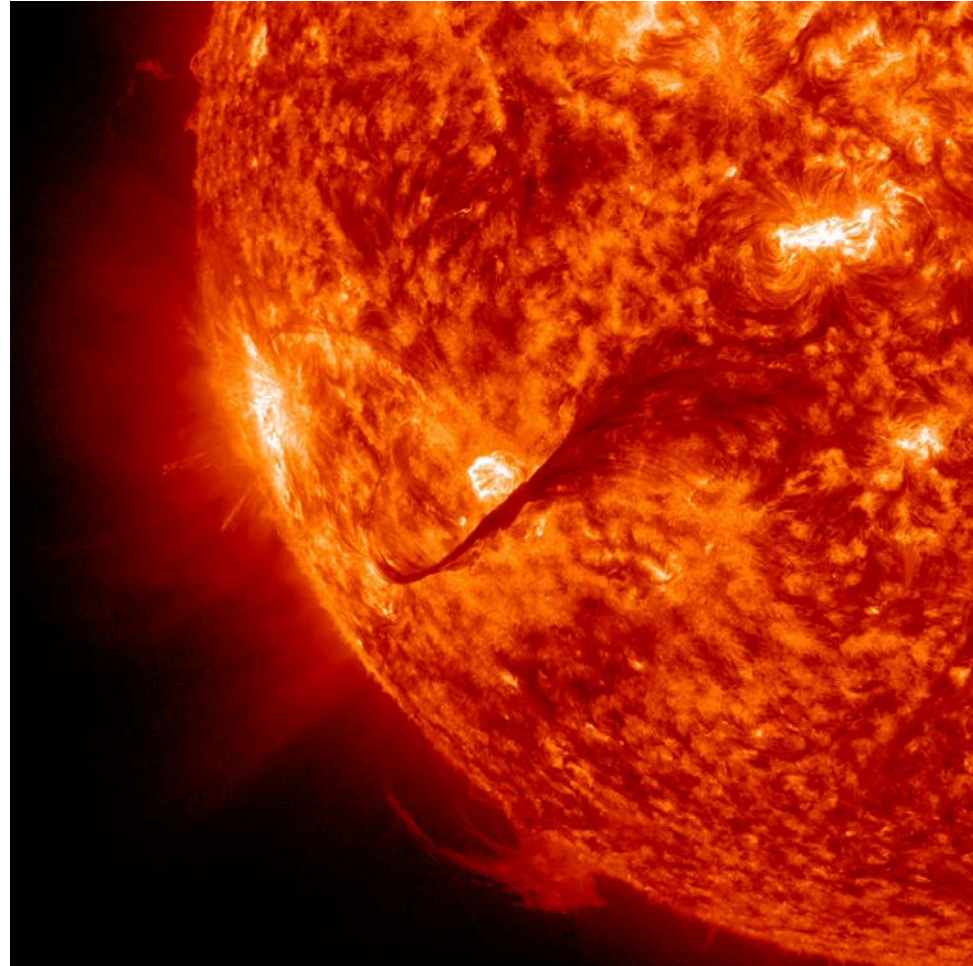
- 突発的で強力な電磁波放射(電波～ γ 線)
- 高エネルギー粒子

■ フィラメント噴出

- フィラメント(プロミネンス)の突発的噴出

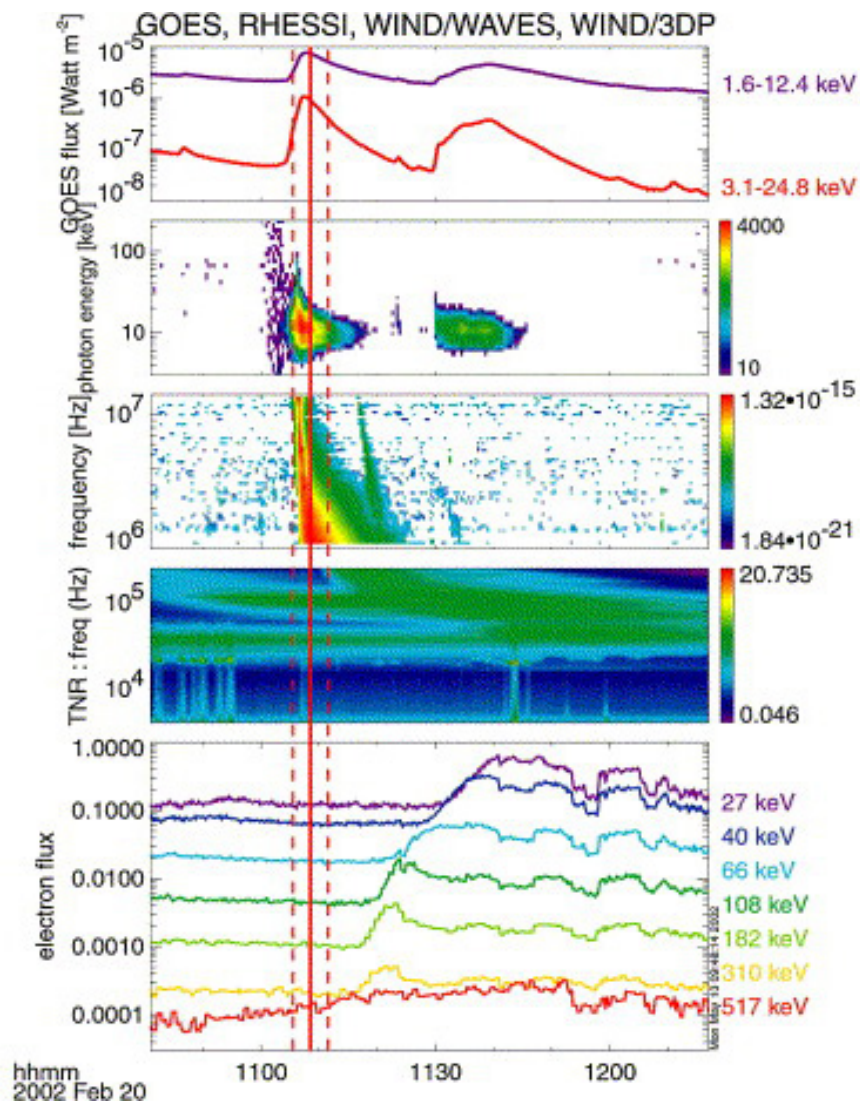
■ コロナ質量放出:CME

- コロナプラズマの突発的放出

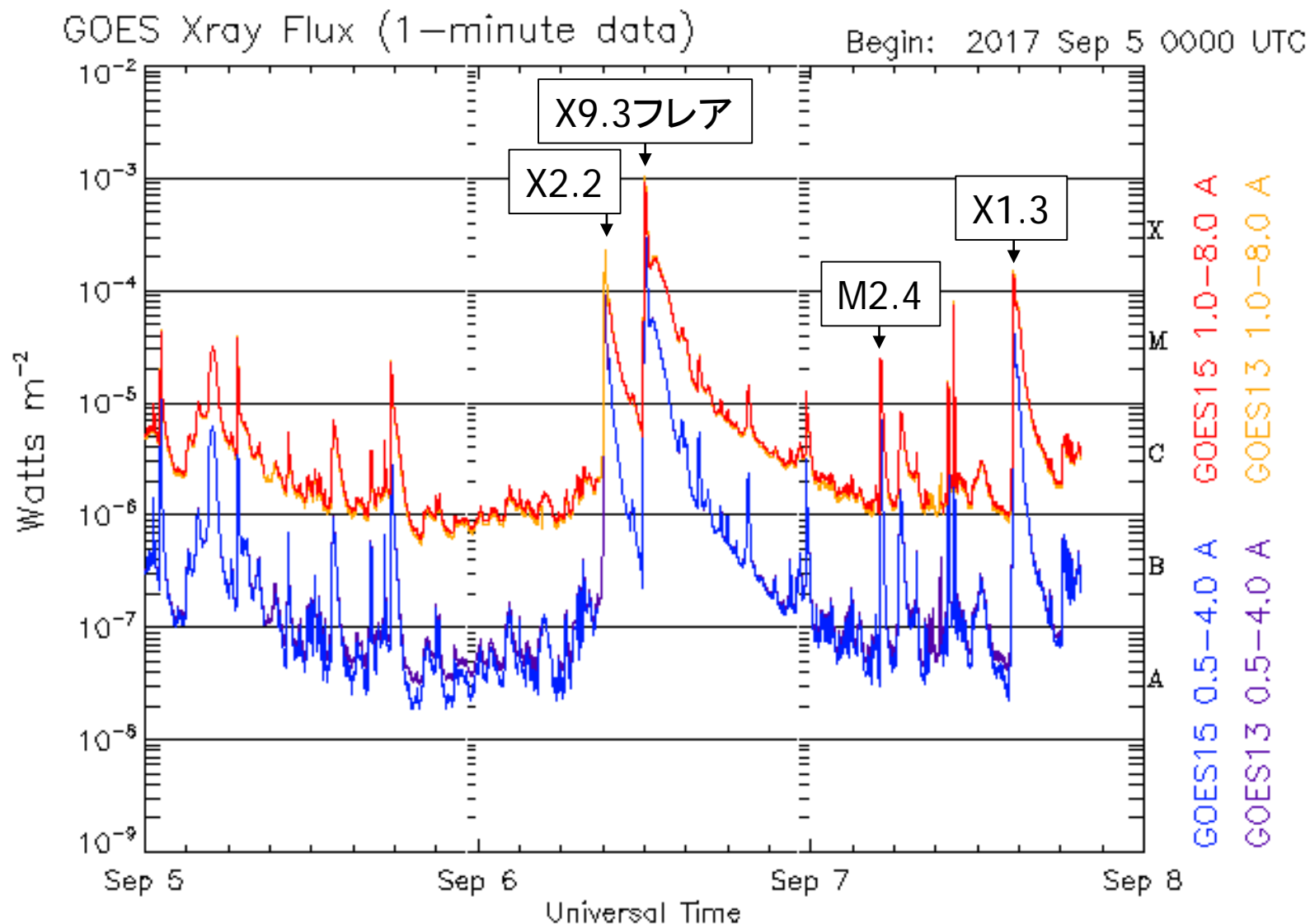


SDO衛星が観測したフィラメント噴出とフレアリボン

フレアに伴うX線、電波、電子流束



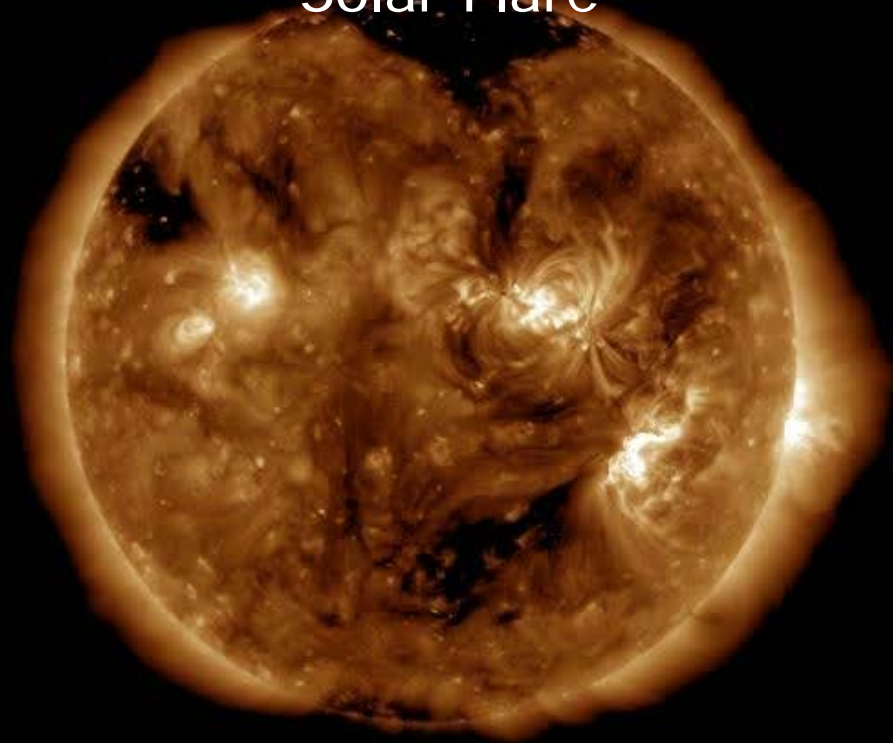
GOES衛星が観測したX線フラックス



太陽フレアとCME

- 2017年9月6日に発生した今太陽サイクル最大の大型フレアとCME

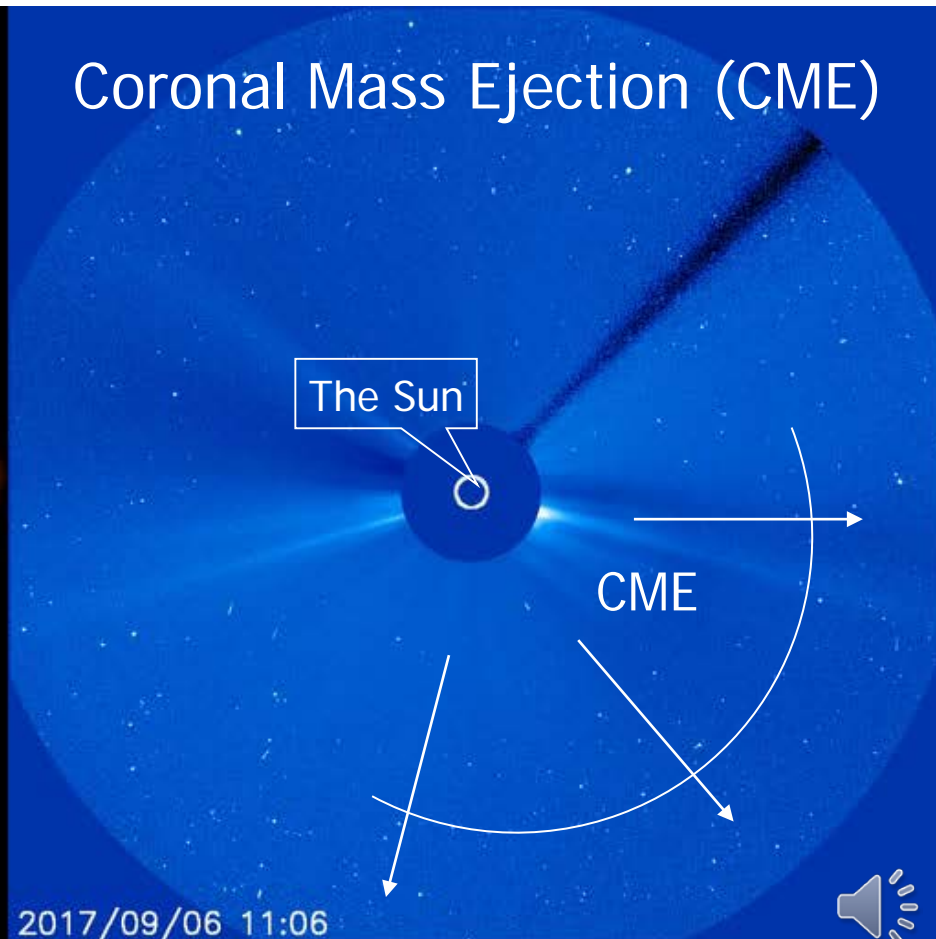
Solar Flare



SDO/AIA 193: 2017/09/06 11:00:17

EUV観測

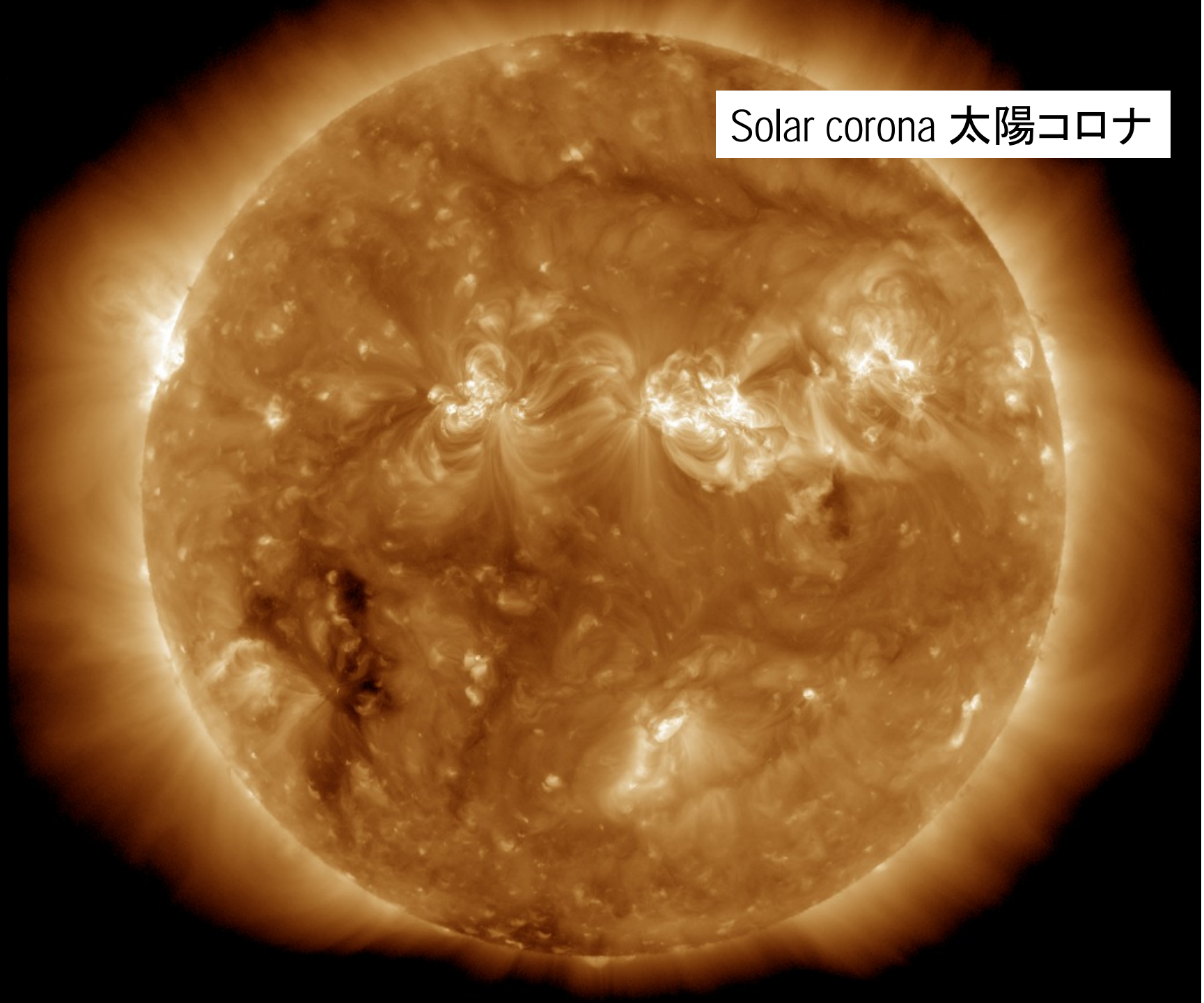
Coronal Mass Ejection (CME)



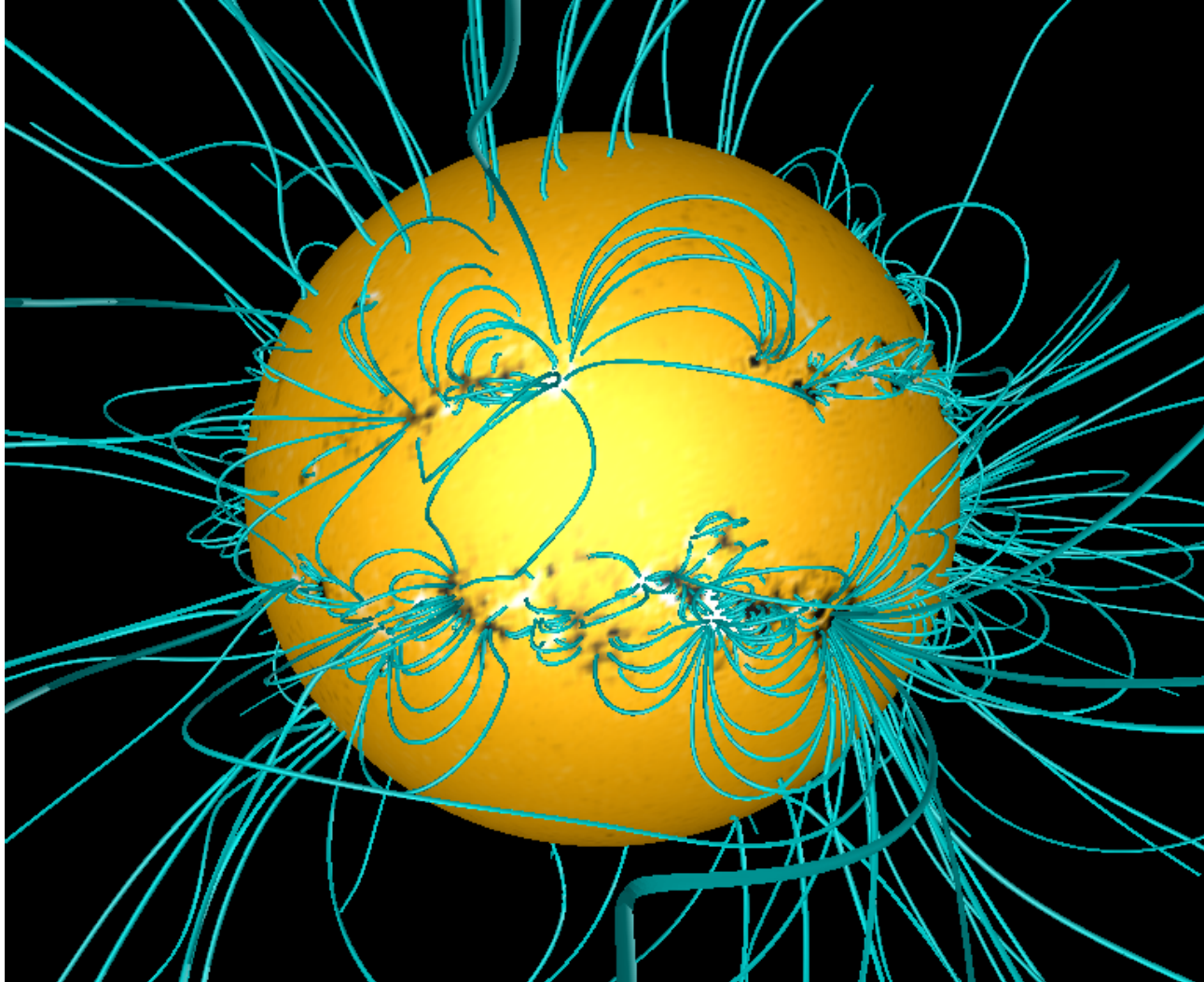
2017/09/06 11:06



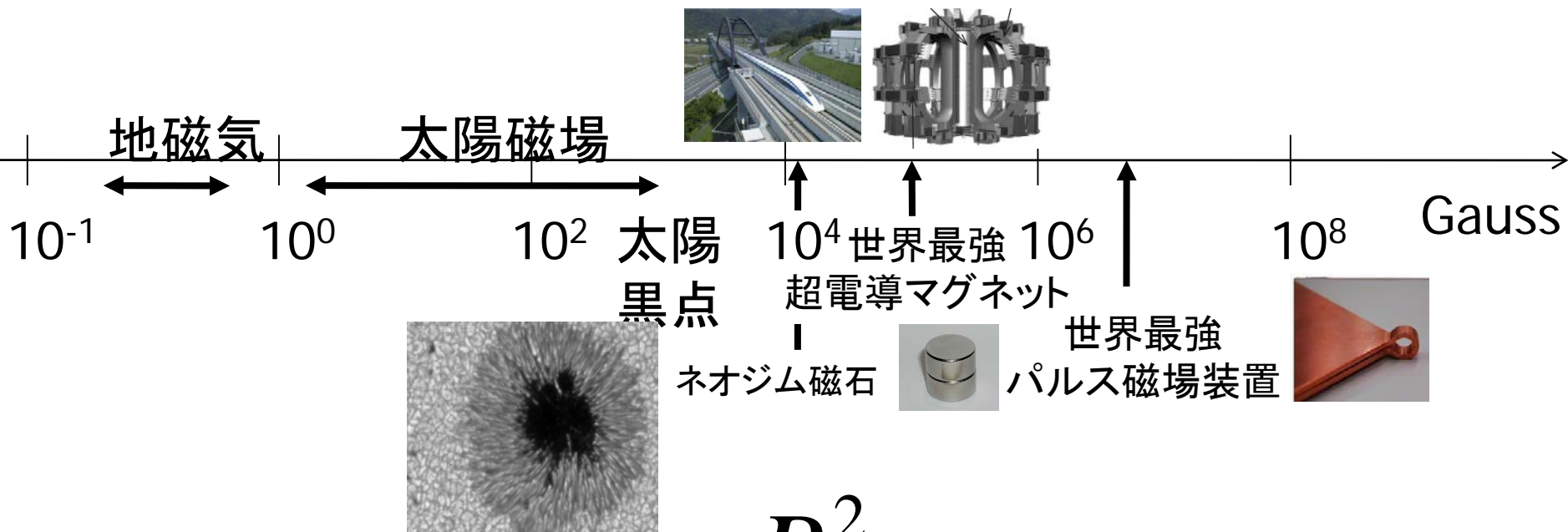
Solar corona 太陽コロナ



太陽コロナ磁場



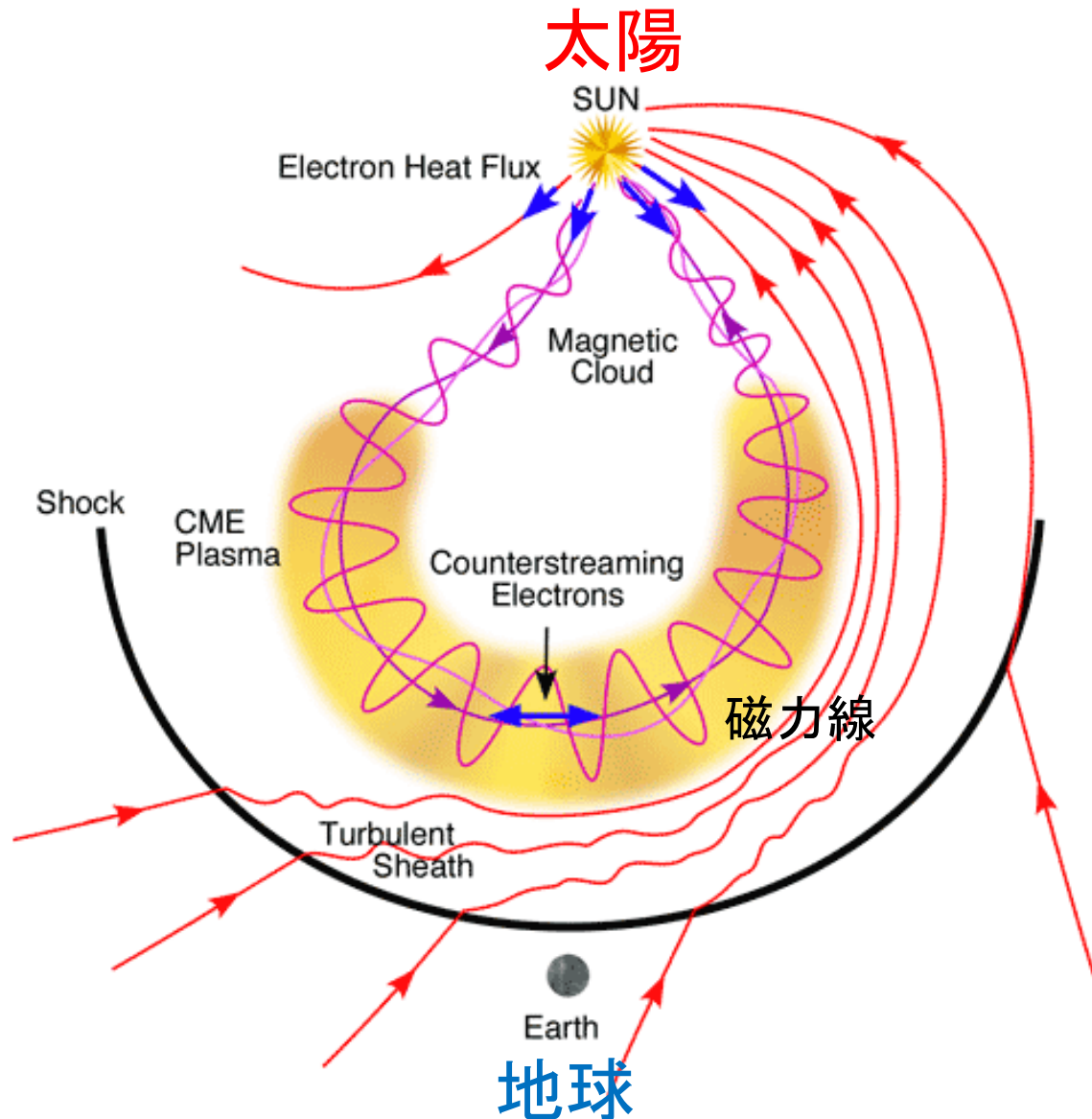
磁場の強度とエネルギー



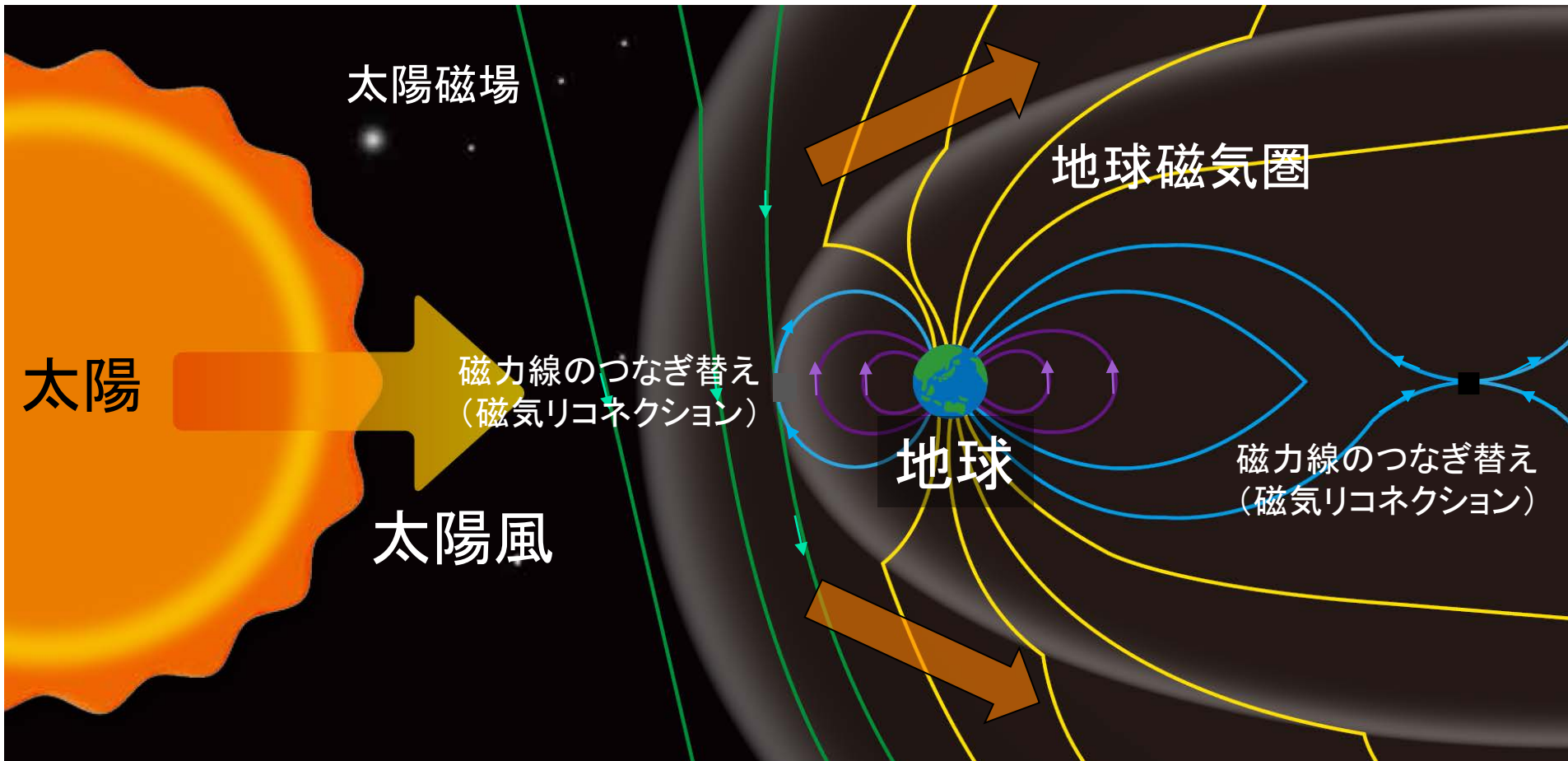
$$E = \frac{B^2}{2\mu_0} L^3$$

黒点磁場のエネルギー～10^{25~26}J

Interplanetary CME



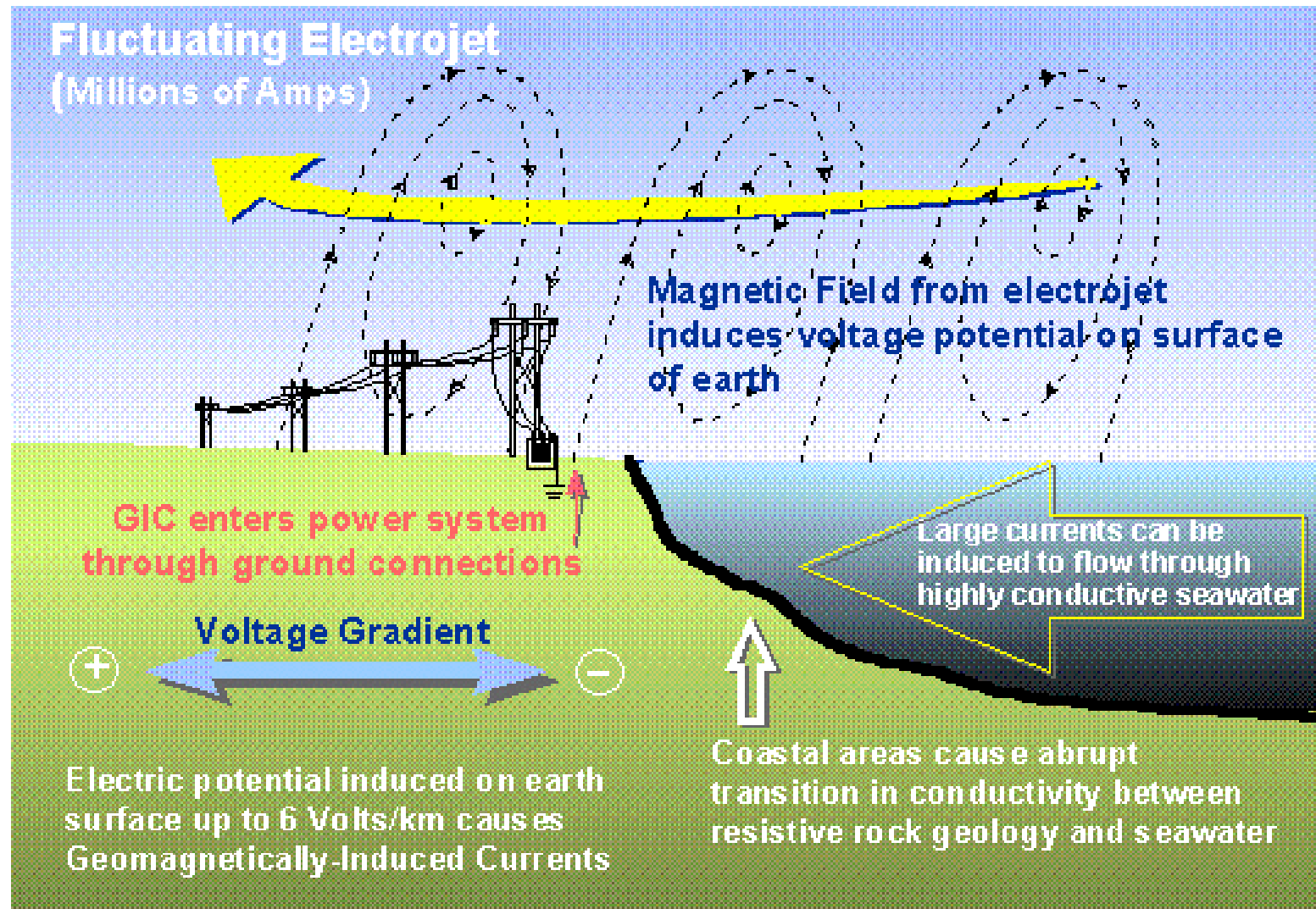
太陽風と地球磁気圏の相互作用



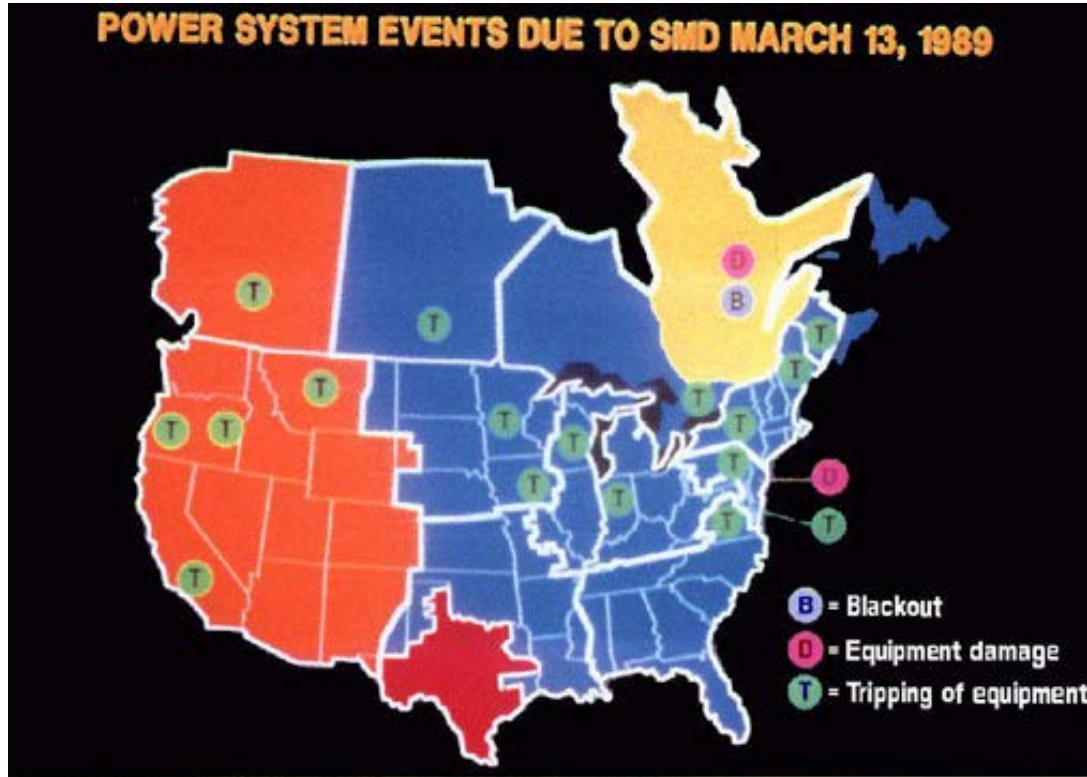


http://en.wikipedia.org/wiki/File:Polarlicht_2.jpg

地磁氣誘導電流 (GIC)



磁気嵐が原因で発生した1989年3月13日のカナダ・ケベック州の大停電(600万人が9時間停電の被害を受ける)



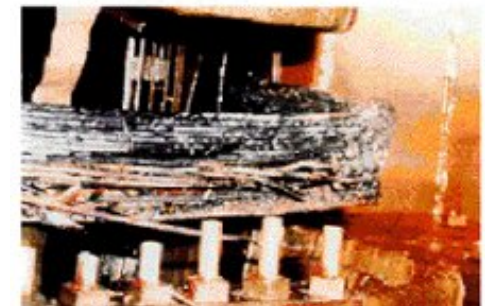
このときの太陽フレアは数年に1度の大フレア、
磁気嵐の強さ～540 nT、被害総額は数100億円以上

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/pub/ste-nl/Newsletter28.pdf>



PJM Public Service
Step Up Transformer

Severe internal damage caused by
the space storm of 13 March, 1989



ニュージャージー州の変圧器故障

太陽

フレア

高エネルギー粒子

地球到達時間

30分～2日

X線放射 8分

CME

太陽風擾乱

2～3日

宇宙放射線

熱圏擾乱

通信障害

衛星障害

電離圏擾乱

被ばく影響

電力障害

オーロラ活動

地磁気擾乱

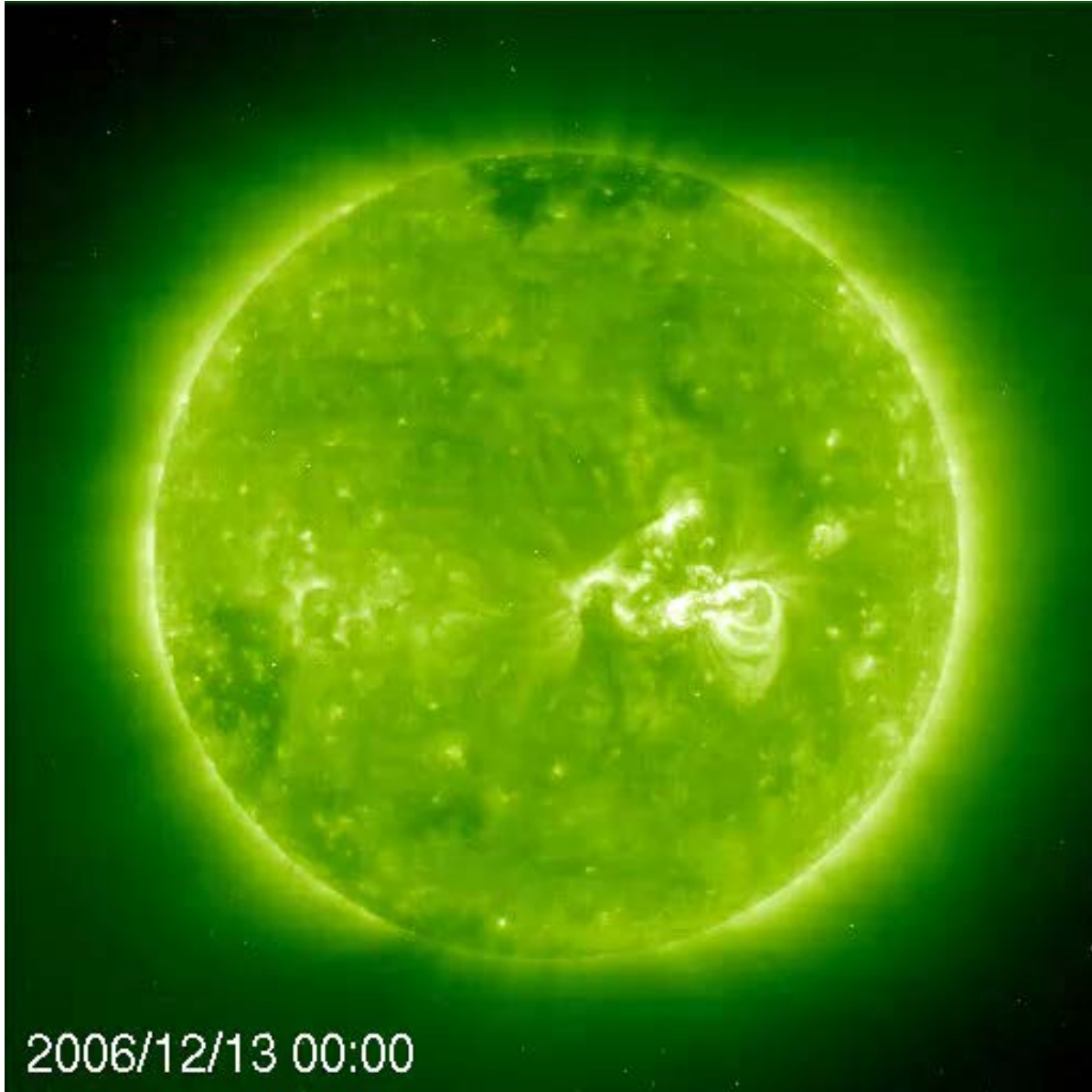
磁気圏



地球

宇宙天気現象の発生と障害

太陽高エネルギー粒子(放射線)



2018/4/12

2006/12/13 00:00

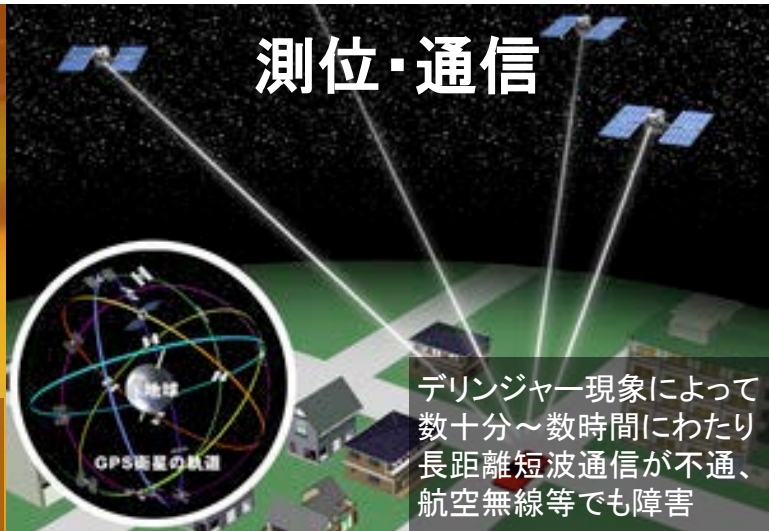
太陽面爆発に起因する社会影響

大フレア時に約100 mSvの被曝可能性

宇宙放射線

大フレア時に約4 mSvの被曝可能性

測位・通信



2014年1月宇宙放射線増加によりISSへの補給機打上延期

2012年1月アメリカ連邦航空局が極航路の変更を勧告

デリンジャー現象によって数十分～数時間にわたり長距離短波通信が不通、航空無線等でも障害

宇宙放射線による宇宙飛行士・航空機乗員の被曝 電離圏擾乱による測位・通信障害

電力

1989年3月の巨大磁気嵐によりケベック州で大停電が発生し、北アメリカ全体に影響が広がった。

ケベック大停電の際に焼けたトランス

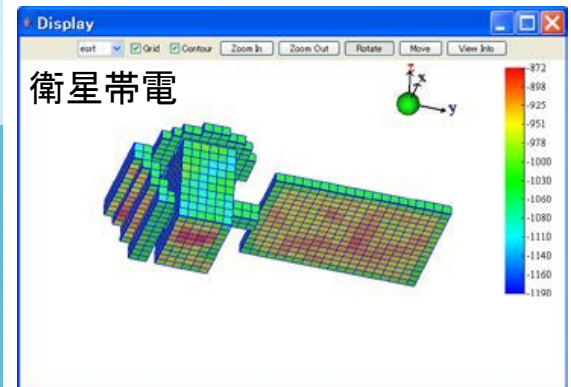
地磁気誘導電流による電力網障害と停電

衛星

X線天文衛星あすか：2000年7月の巨大太陽フレアの影響で姿勢制御不能となり、大気圏に突入した。



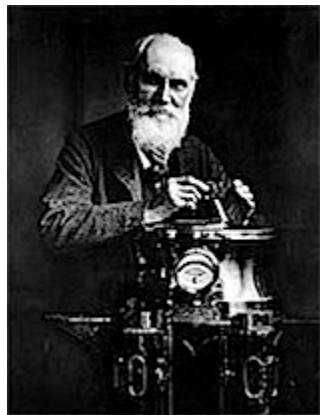
衛星障害・軌道影響



キャリントン・フレア (1859年9月1日)

■ Richard C. Carrington

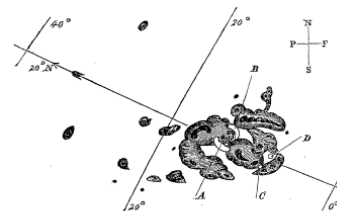
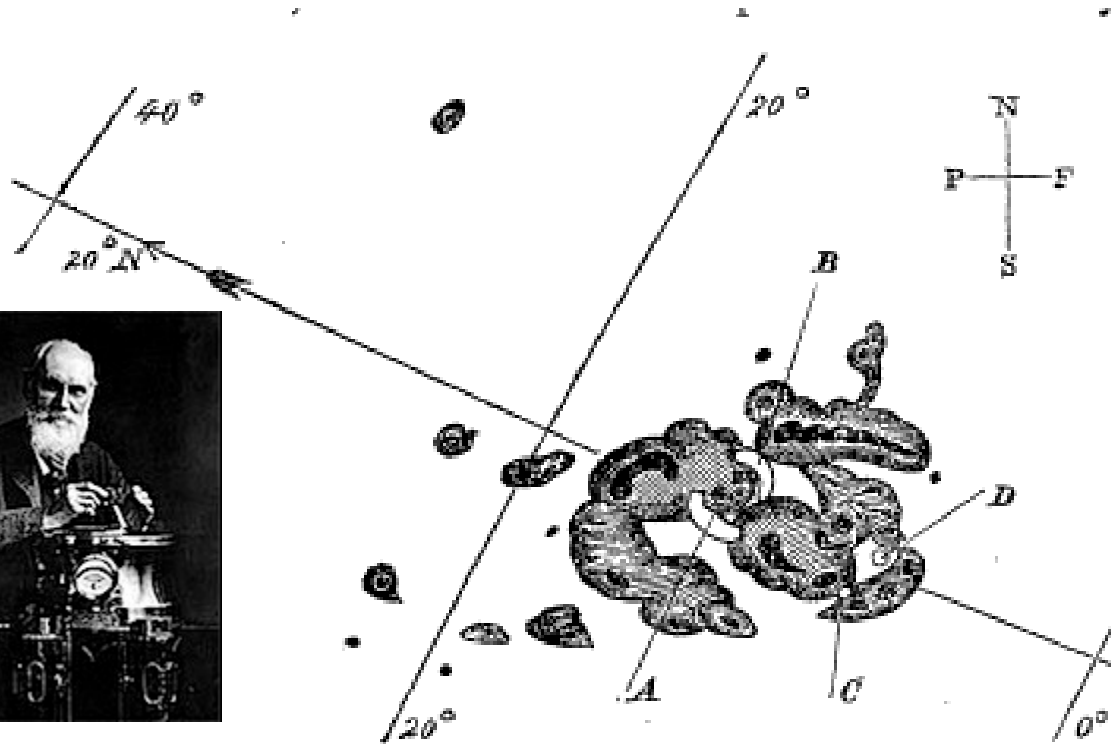
■ 太陽フレアの発見



first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by

Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. By R. C. Carrington, Esq.

While engaged in the forenoon of Thursday, Sept. 1, in taking my customary observation of the forms and positions of the solar spots, an appearance was witnessed which I believe to be exceedingly rare. The image of the sun's disk was, as usual with me, projected on to a plate of glass coated with distemper of a pale straw colour, and at a distance and under a power which presented a picture of about 11 inches diameter. I had secured diagrams of all the groups and detached spots, and was engaged at the time in counting on a chronometer and recording the contacts of the spots with the cross-wires used in the observation, when within the area of the great north group (the size of which had previously excited general remark), two patches of intensely bright and white light broke out, in the positions indicated in the appended diagram by the letters A and B, and of the forms of the spaces left white. My



first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by

which the general image is thrown into shade, for the brilliancy was fully equal to that of direct sun-light; but, by at once interrupting the current observation, and causing the image to move by turning the R.A. handle, I saw I was an unprepared witness of a very different affair. I thereupon noted down the time by the chronometer, and seeing the outburst to be very rapidly on the increase, and being somewhat flurried by the surprise, I hastily ran to call some one to witness the exhibition with me, and on returning within 60 seconds, was mortified to find that it was already much changed and enfeebled. Very shortly afterwards the last trace was gone, and although I maintained a strict watch for nearly an hour, no recurrence took place. The last traces were at C and D, the patches having travelled considerably from their first position and vanishing as two rapidly fading dots of white light. The instant of the first outburst was not 15 seconds different from 11^h 18^m Greenwich mean time, and 11^h 25^m was taken for the time of disappearance. In this lapse of 5 minutes, the two patches of light traversed a space of about 35,000 miles, as may be seen by the diagram, which is given exactly on a scale of 12 inches to the sun's diameter. On this scale the section of the earth will be very nearly equal in area to that of the detached spot situated most to the north in the diagram, and the section of *Jupiter* would about cover the area of the larger group, without including the outlying portions. It was impossible, on first witnessing an appearance so similar to a sudden conflagration, not to expect a considerable result in the way of alteration of the details of the group in which it occurred; and I was certainly surprised, on referring to the sketch which I had carefully and satisfactorily (and I may add fortunately) finished before the occurrence, at finding myself unable to recognise any change whatever as having taken place. The impression left upon me is, that the phenomenon took place at an elevation considerably above the general surface of the sun, and accordingly, altogether above and over the great group in which it was seen projected. Both in figure and position the patches of light seemed entirely independent of the configuration of the great spot, and of its parts, whether nucleus or umbra. The customary observation was, resumed, and the diagram engraved, as well as the larger drawing exhibited at the Meeting on Nov. 11, was deduced from an exact reduction of the recorded times.

It has been very gratifying to me to learn that our friend Mr. Hodgson chanced to be observing the sun at his house at Highgate on the same day, and to hear that he was a witness of what he also considered a very remarkable phenomenon. I have carefully avoided exchanging any information with that gentleman, that any value which the accounts may possess may be increased by their entire independence.

キャリントン・イベント

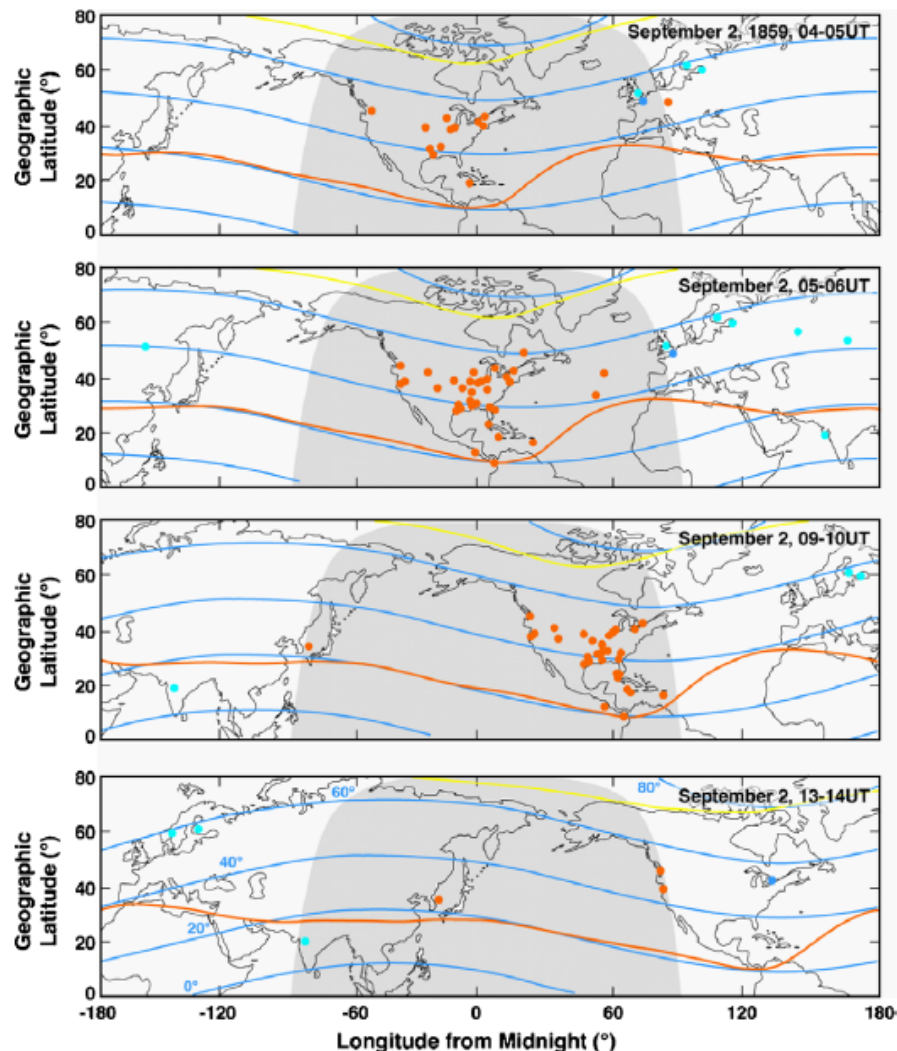
- 1859年(安政6年)
9月1~2日にオーロラが観測された場所



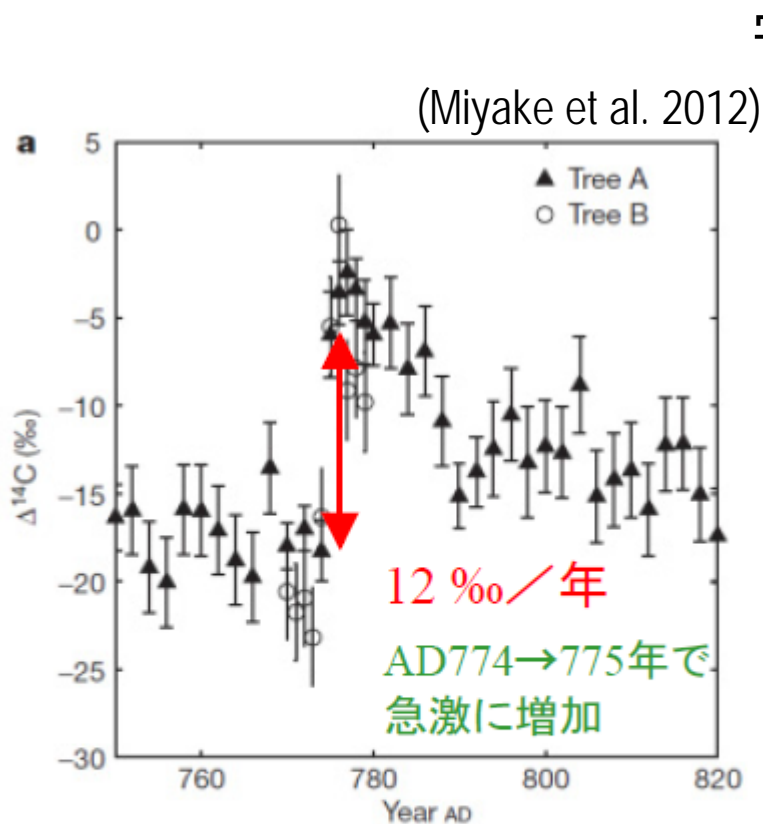
磁気嵐の推定値

~1600nT

(ケベック州イベント
の約3倍)



西暦774-775年における 宇宙線増加の痕跡

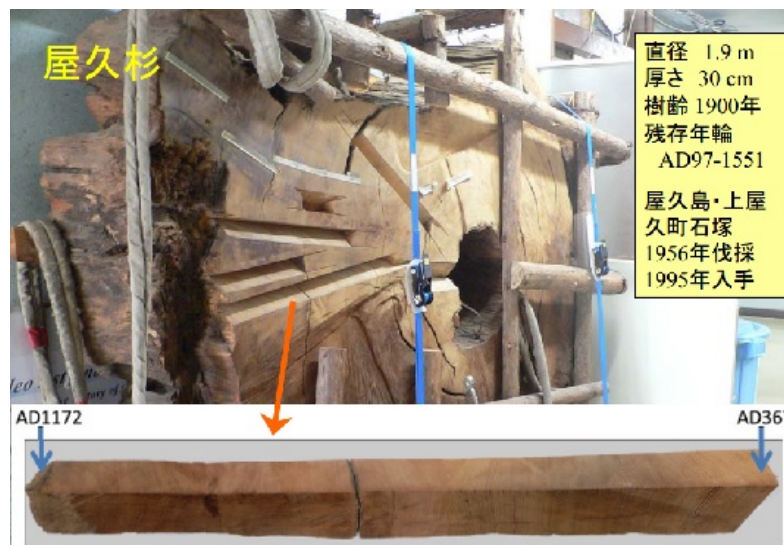


宇宙線

窒素

^{14}C

炭素同位体
(アイソトープ)



a) ^{14}C 濃度の変化
(1-2年値)

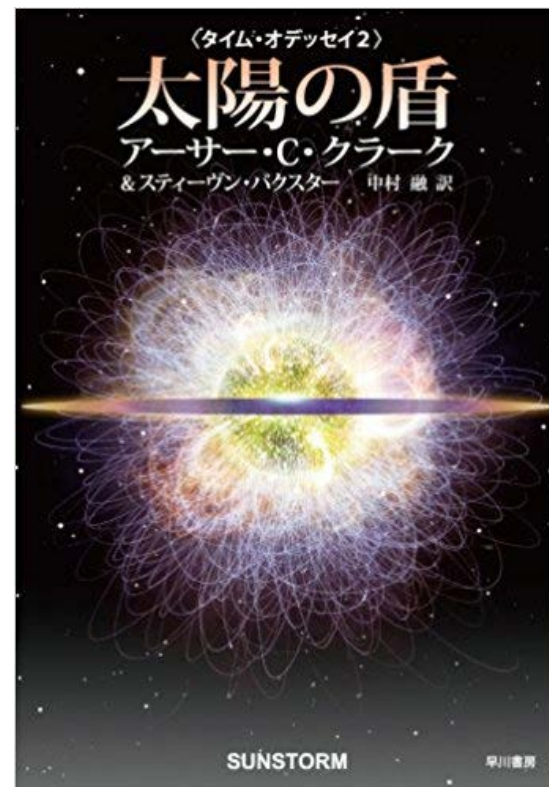
巨大太陽フレアを題材にしたSF小説



赤いオーロラの街で
伊藤 瑞彦
第5回(2017年)ハヤカワSF
コンテスト最終候補

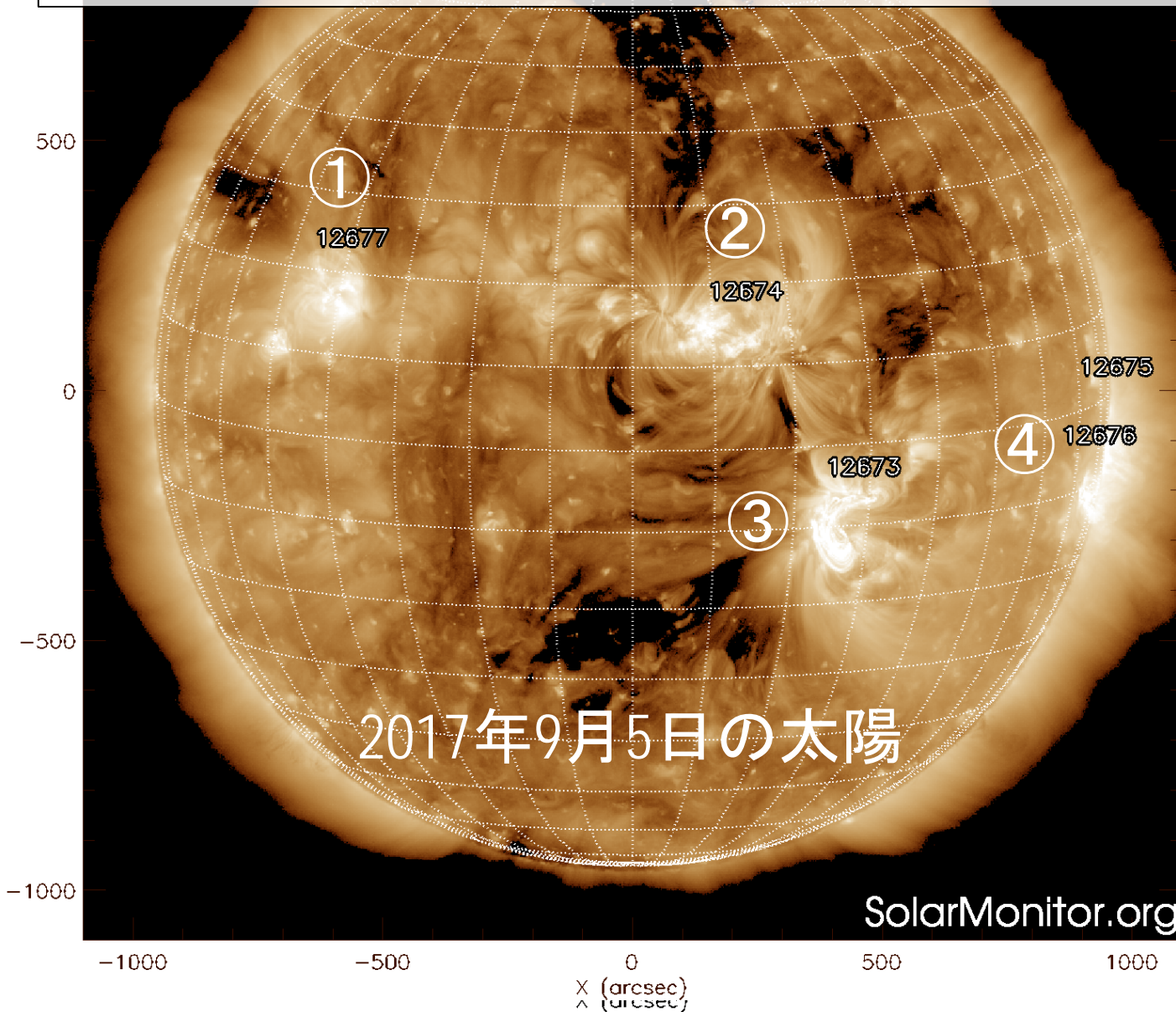


最後にして最初のアイドル
草野原々
第48回星雲賞受賞
(2017年日本短編作品部門)
第4回(2016年)ハヤカワSF
コンテスト特別賞受賞



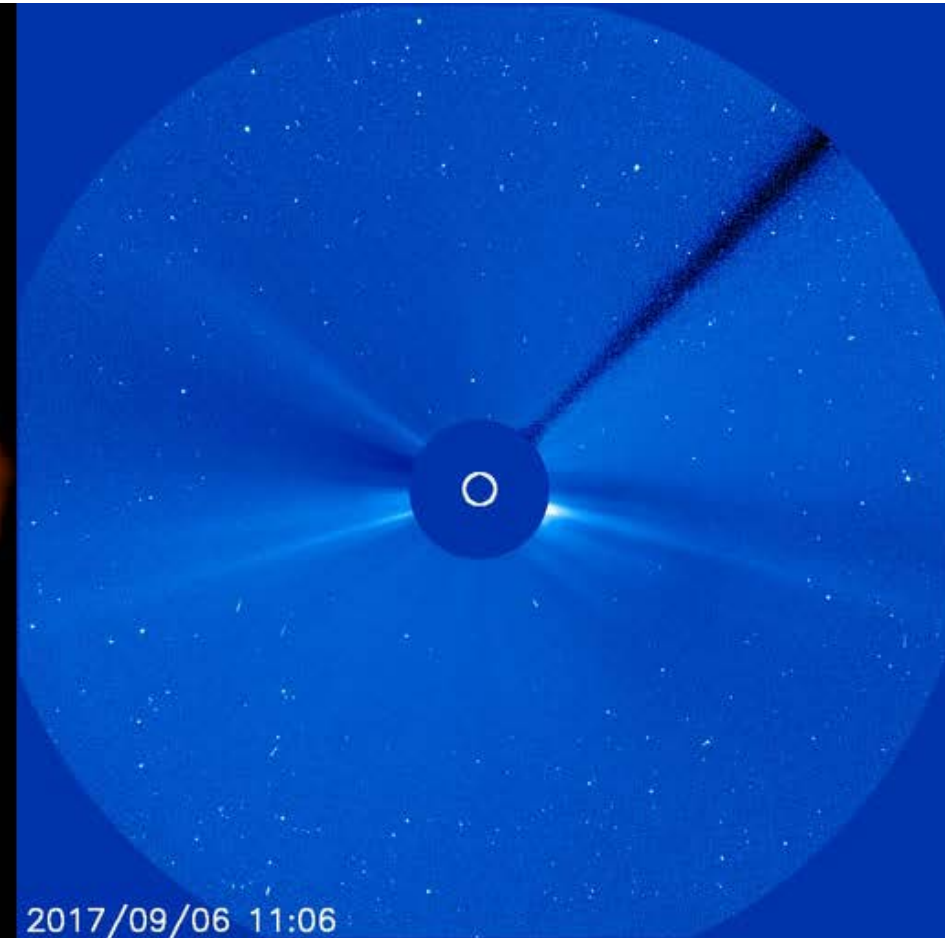
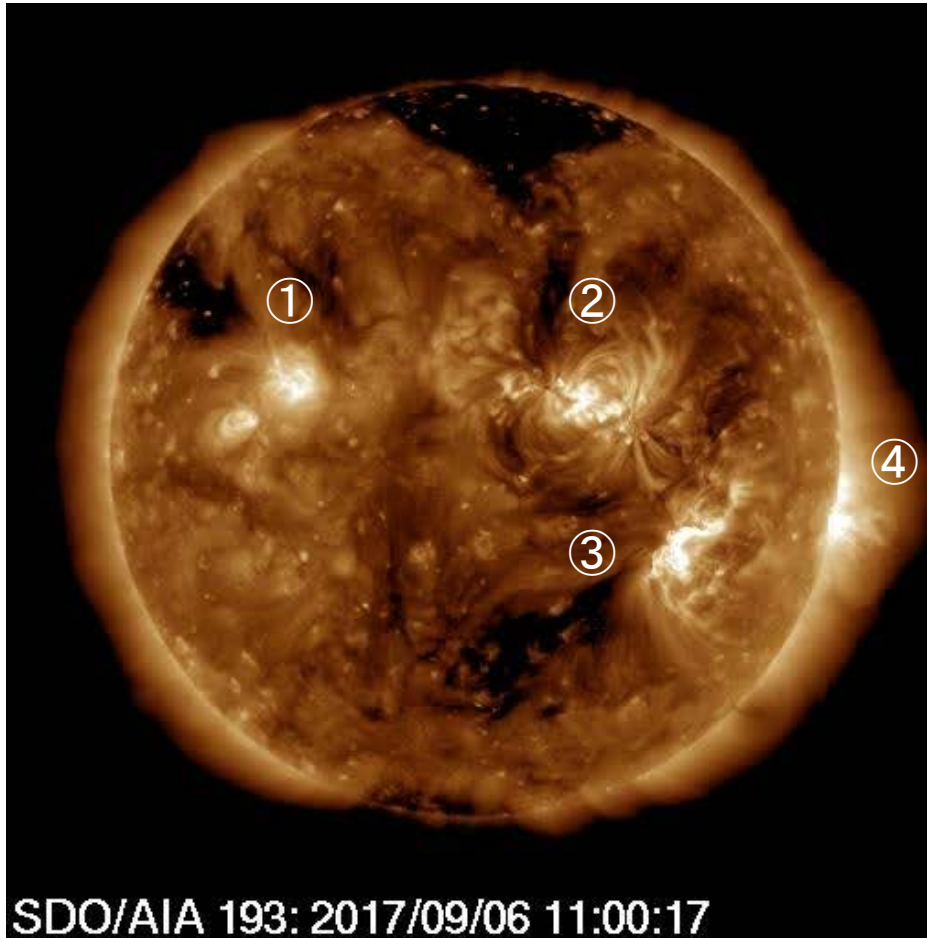
太陽の盾
アーサー・C・クラーク
スティーヴン・バクスター

問題: 2017年9月6日の巨大フレア爆発はどの黒点(活動領域)で発生したでしょう?

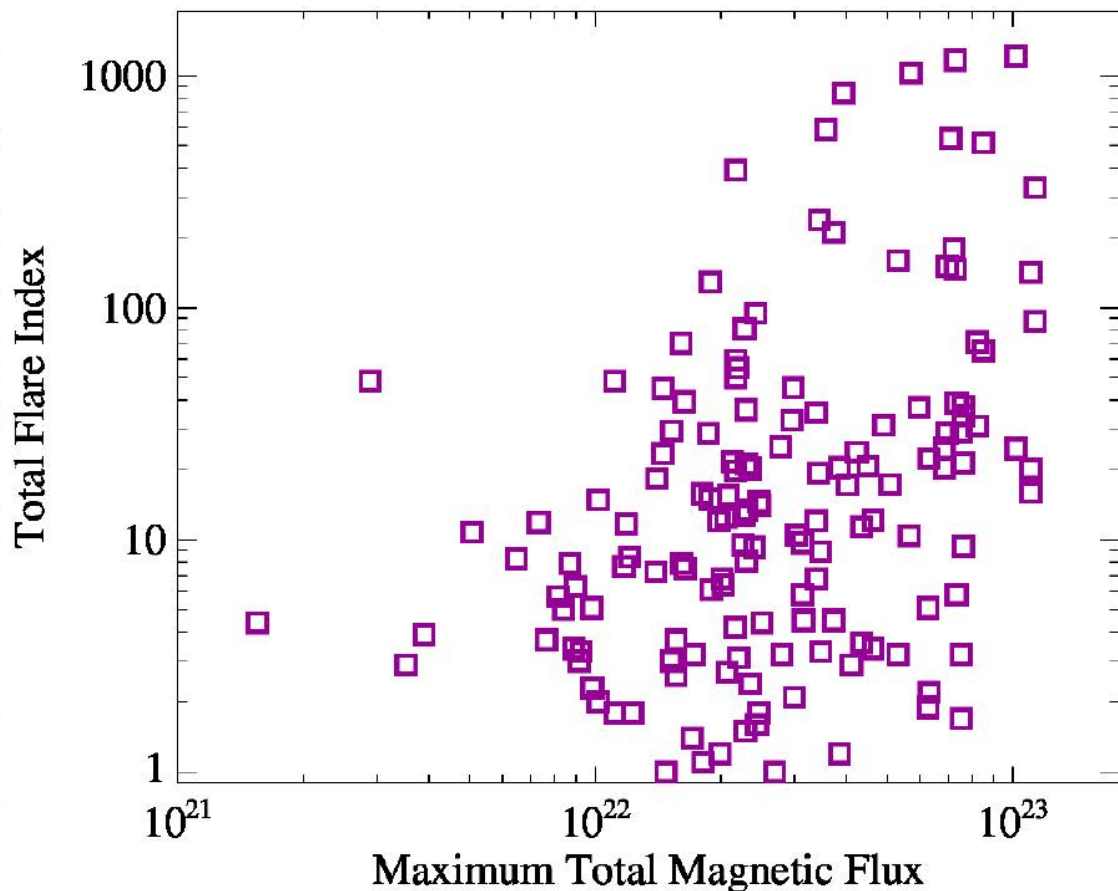


9月6日のX9.3フレアとCME

- 9月6日20:53(JST)にX9.3フレアが発生(11年ぶりの大爆発)



黒点磁束とフレア



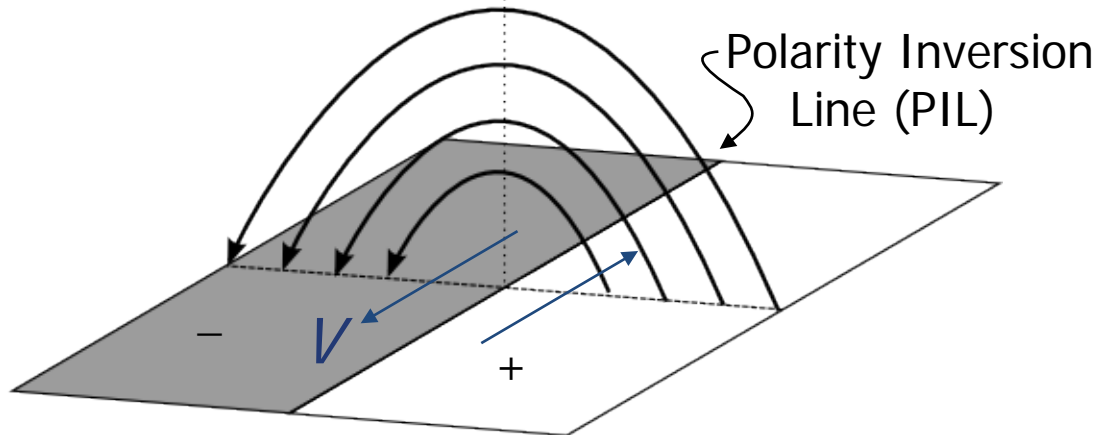
太陽フレアの大きさ

太陽黒点の磁場の量(磁束)

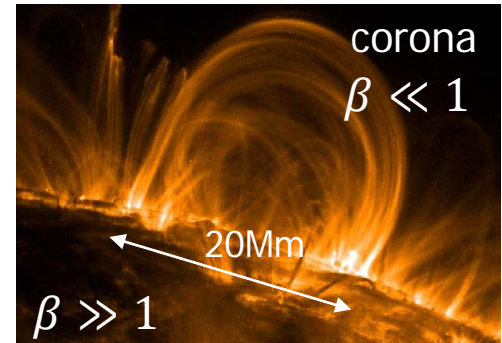
Force-Free Field Model

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = 0$$

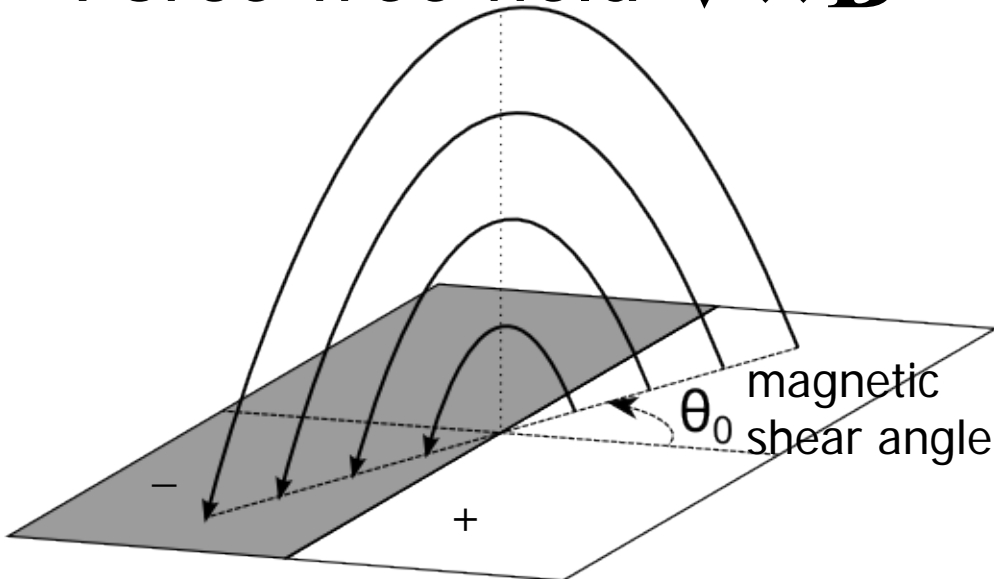
- Potential field $\nabla \times \mathbf{B} = 0$



$$\mathbf{J} = \mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{B}$$



- Force-free field $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$



$$V \sim 0.1 \text{ km/s}$$

$$B \sim 0.1 \text{ T}$$

$$L \sim 20 \text{ Mm}$$

$$\tau \sim 10 \text{ h} \sim 100 \text{ h}$$

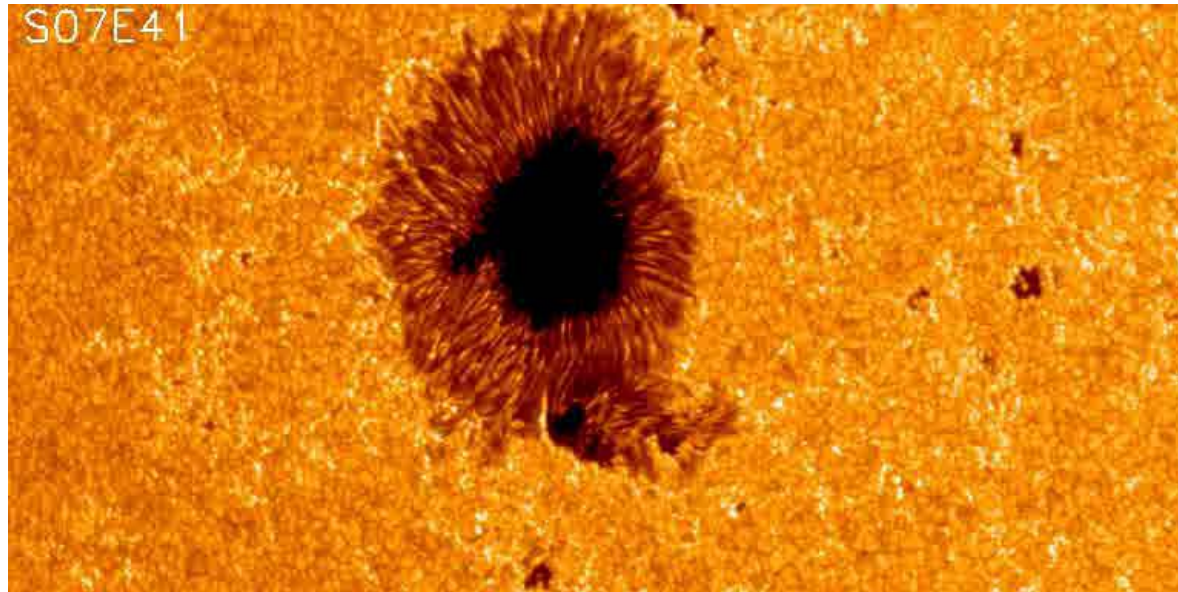
Poynting vector

$$S \sim |E \times B| / \mu_0$$

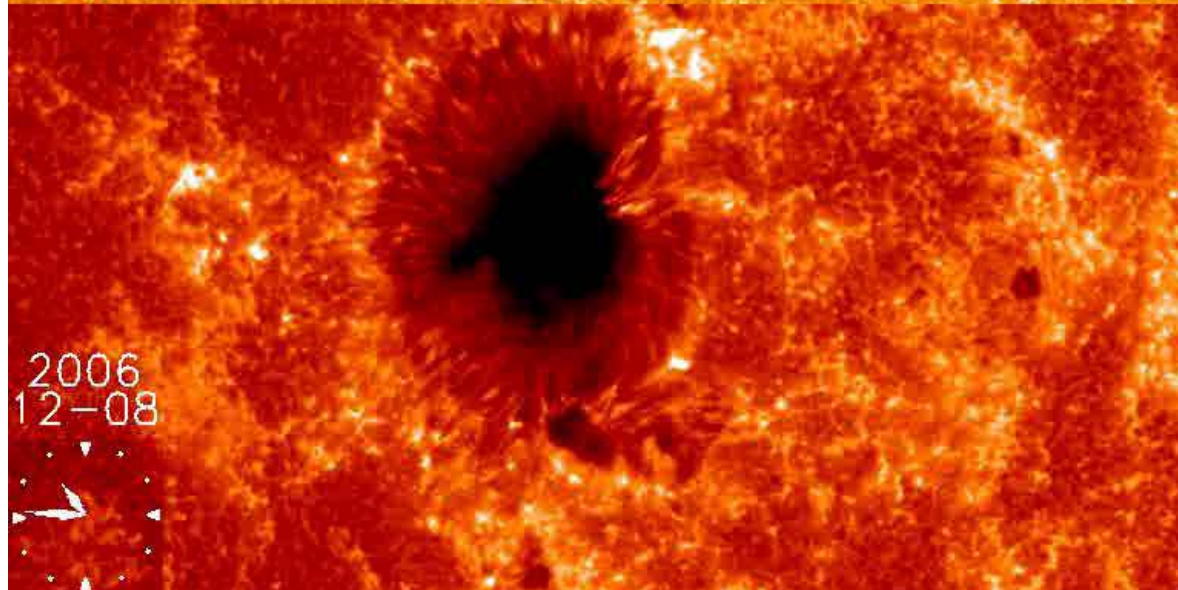
Energy Injection

$$U \sim SL^2\tau \sim 10^{25} \text{ J}$$

太陽フレアはいつ発生するか？



光球面

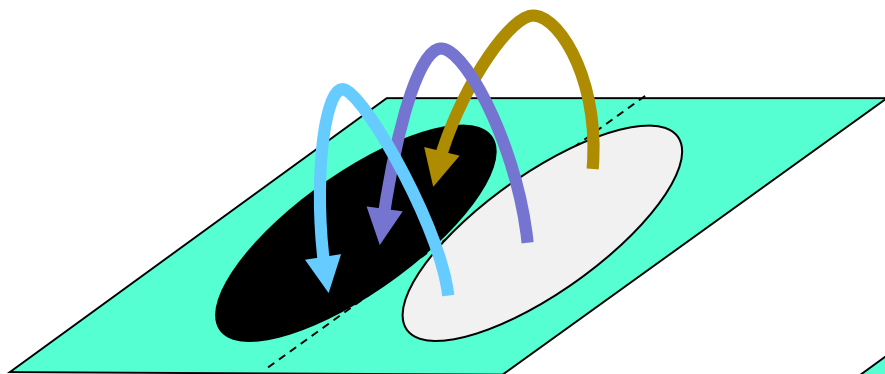


彩層

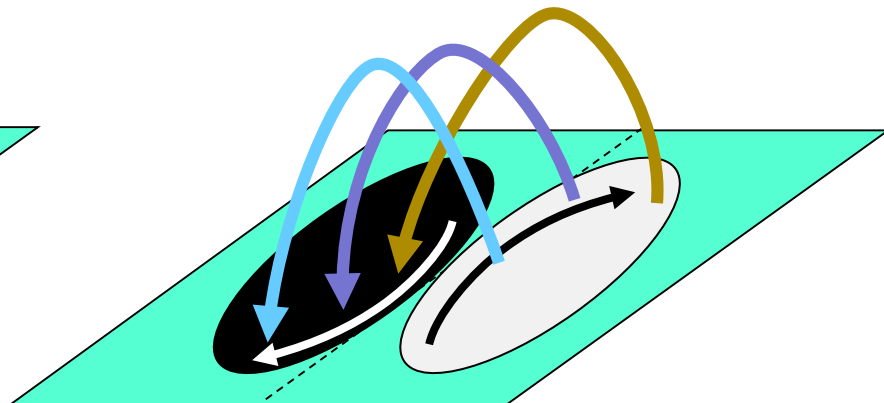
ひので可視光
望遠鏡の観測

太陽フレアの発生機構

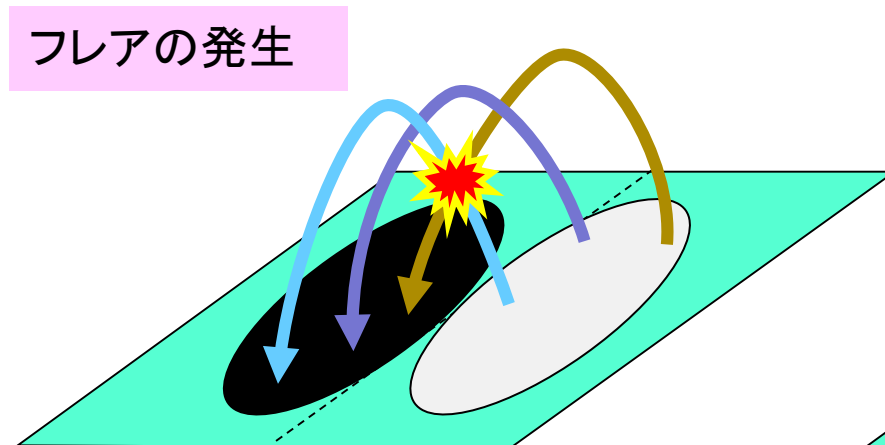
①黒点(活動領域)の形成



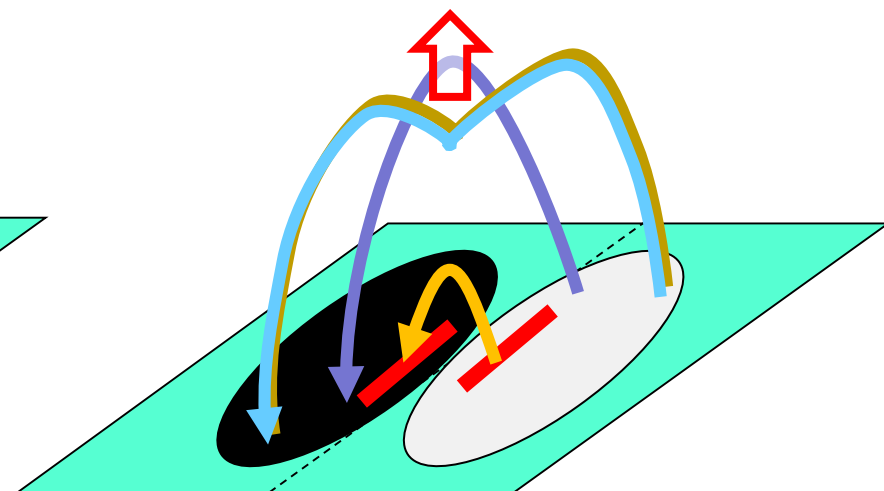
②磁力線の捻じれ(黒点の回転等による)



③磁力線のつながぎ替え(リコネクション)



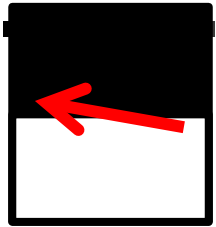
④プラズマと磁場の噴出



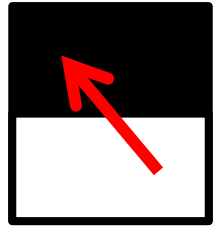
■ 何がフレア発生のトリガとなるか？

太陽フレアの計算機シミュレーション

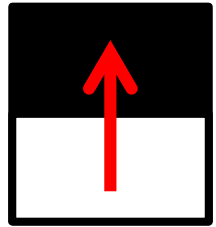
K. Kusano et al., MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS, ApJ, 760:31, 2012 November 20.



強いねじれ

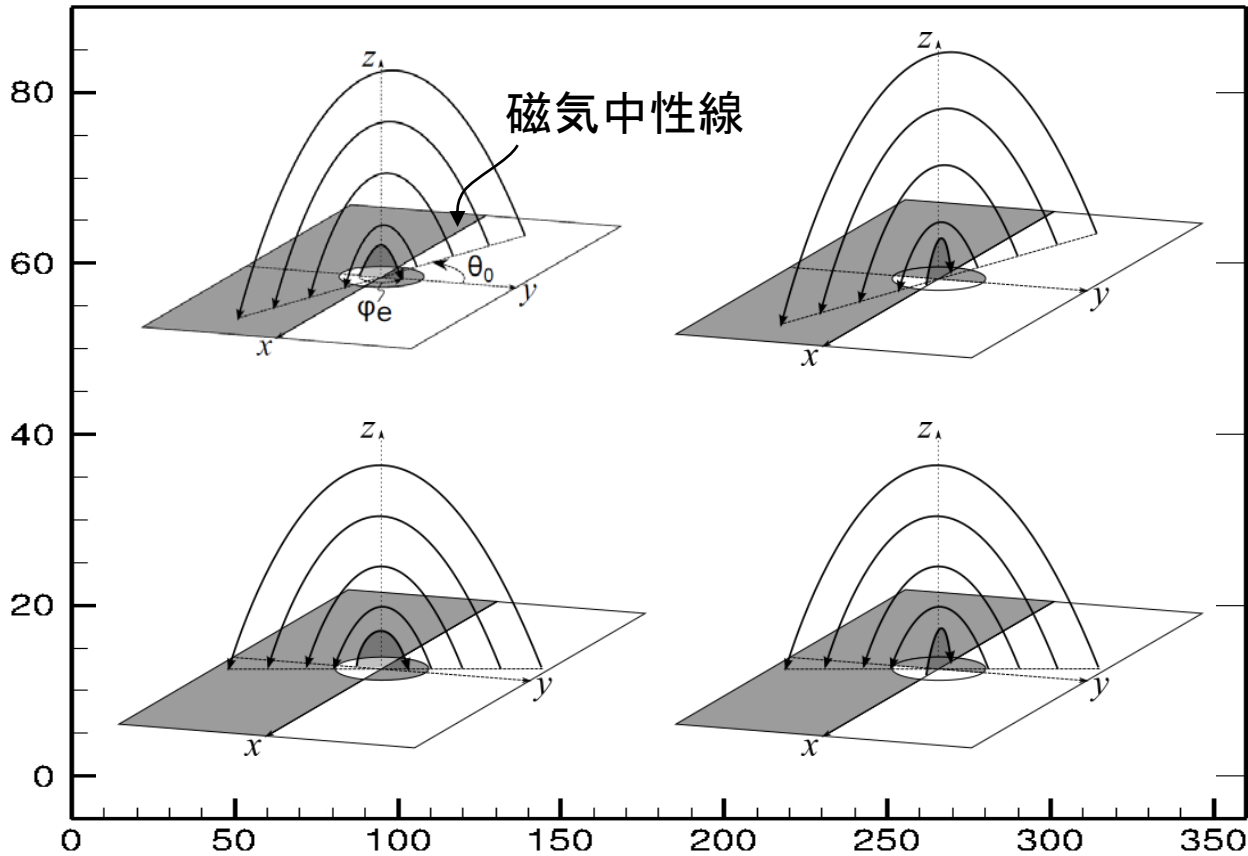


弱いねじれ



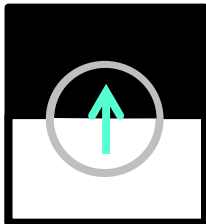
ねじれ無し

大きな磁場のねじれ角度

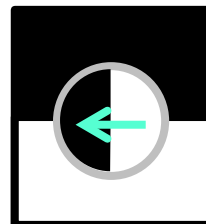


小さな磁場の方向

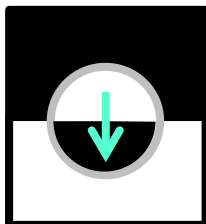
正極性 (RP)



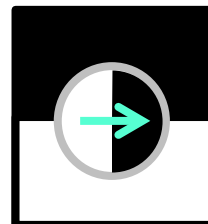
順シア (NS)



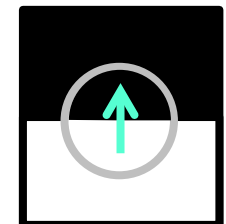
反極性 (OP)



逆シア (RS)

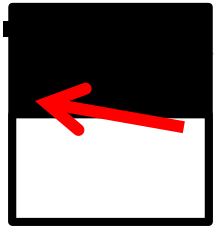


正極性 (RP)

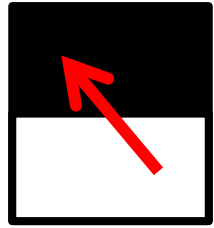


太陽フレアの計算機シミュレーション

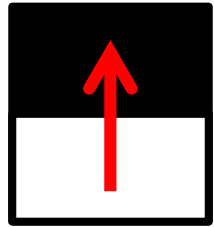
K. Kusano et al., MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS, ApJ, 760:31, 2012 November 20.



強いねじれ

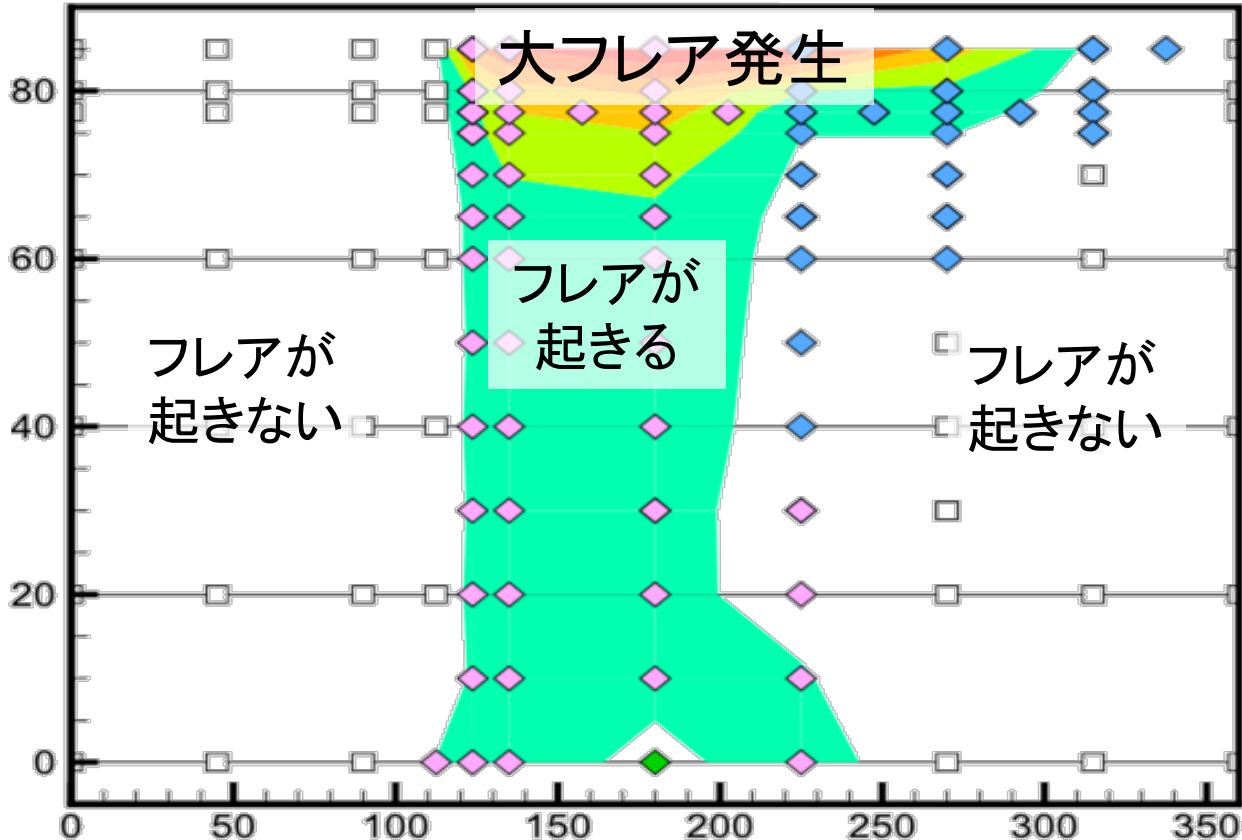


弱いねじれ



ねじれ無し

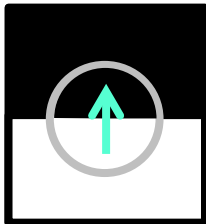
大きな磁場のねじれ角度



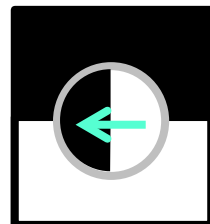
小さな磁場の方向



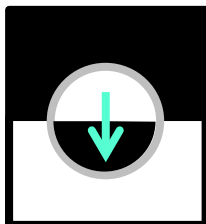
正極性 (RP)



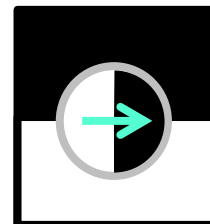
順シア (NS)



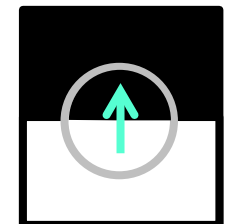
反極性 (OP)



逆シア (RS)



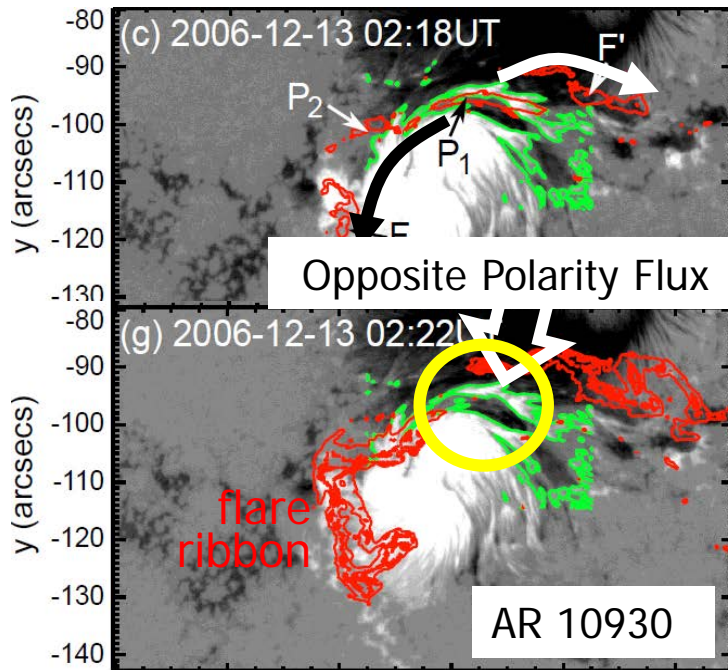
正極性 (RP)



Small magnetic disturbance emerging on the sheared PIL could trigger big flares

Hinode/SOT

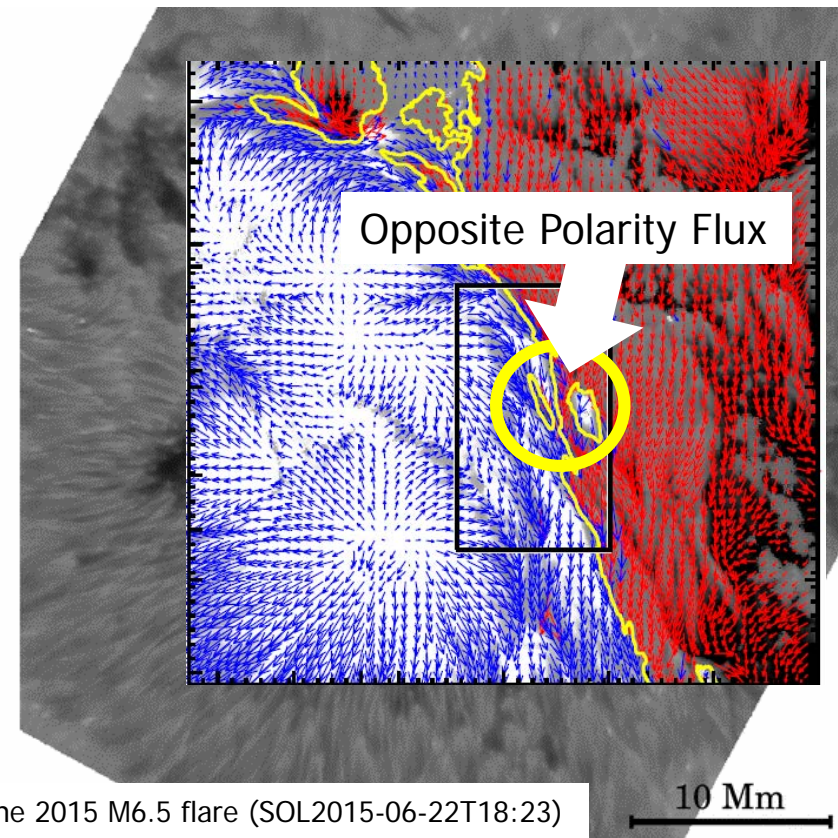
(Bamba et al. 2013, ApJ)



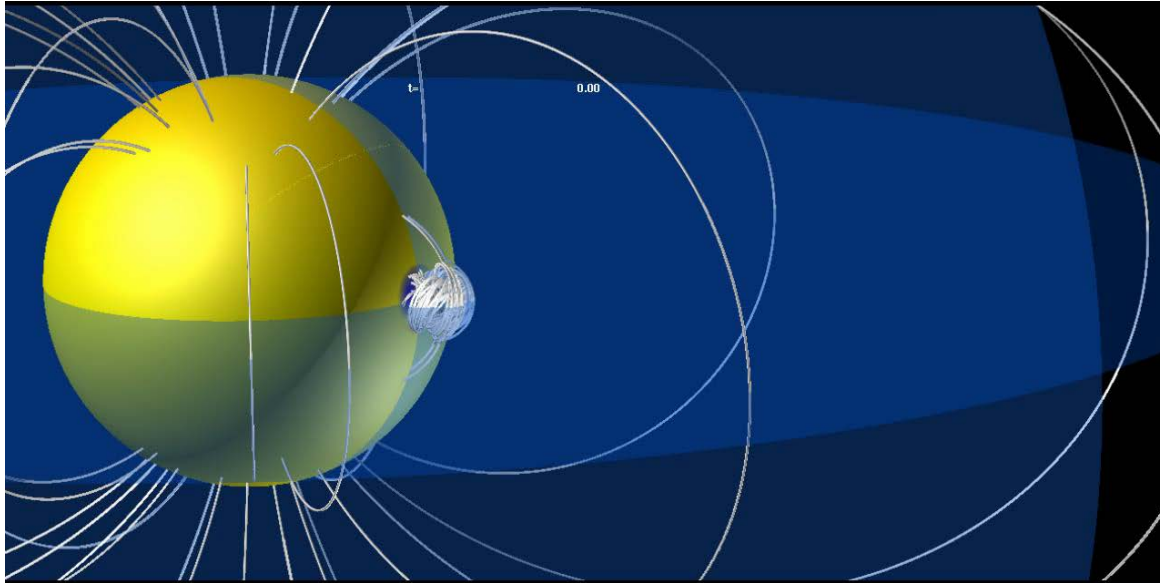
Bamba et al. 2013, 2017a, 2017b, Toriumi et al. 2013, Woods et al. 2017

New Solar Telescope (1.6m)

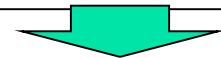
(Wang et al. 2017, Nature Ast.)



宇宙プラズマ嵐の予測への挑戦

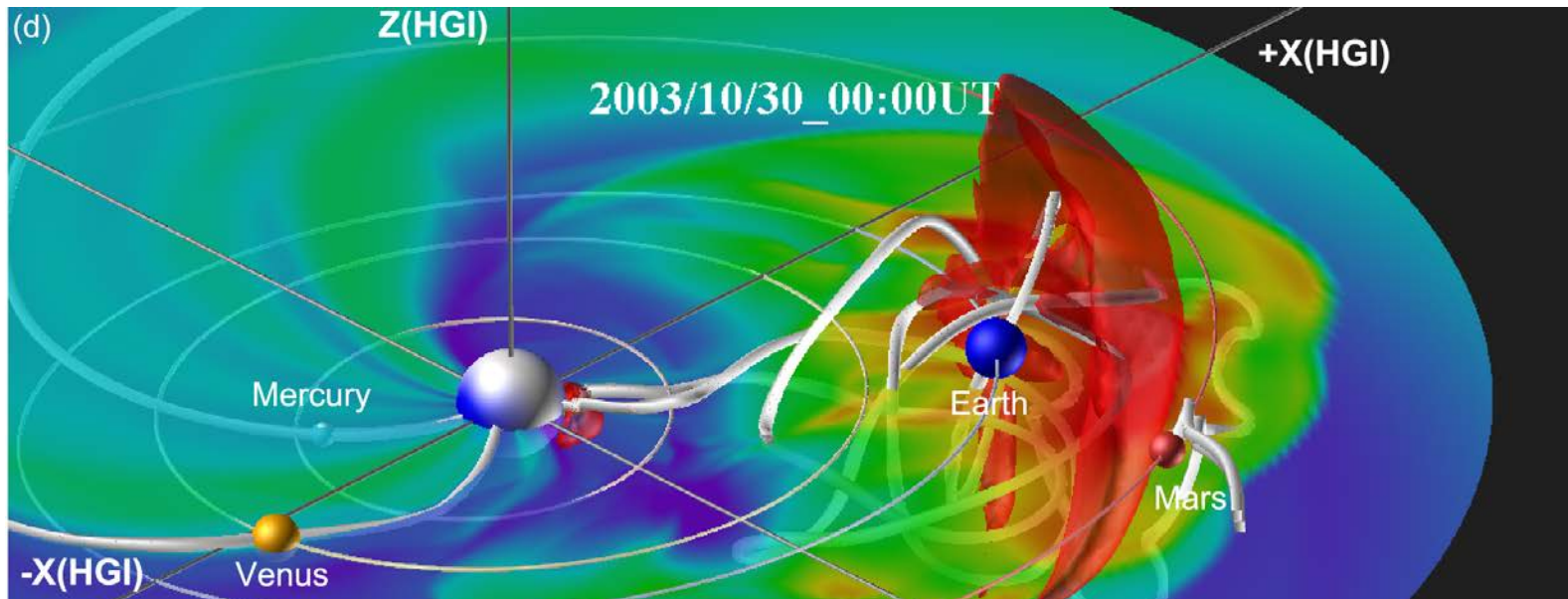


「ひので」衛星
精密な磁場観測



宇宙天気影響
予測シミュレーション

コロナ質量放出(CME)の
形成伝播シミュレーション





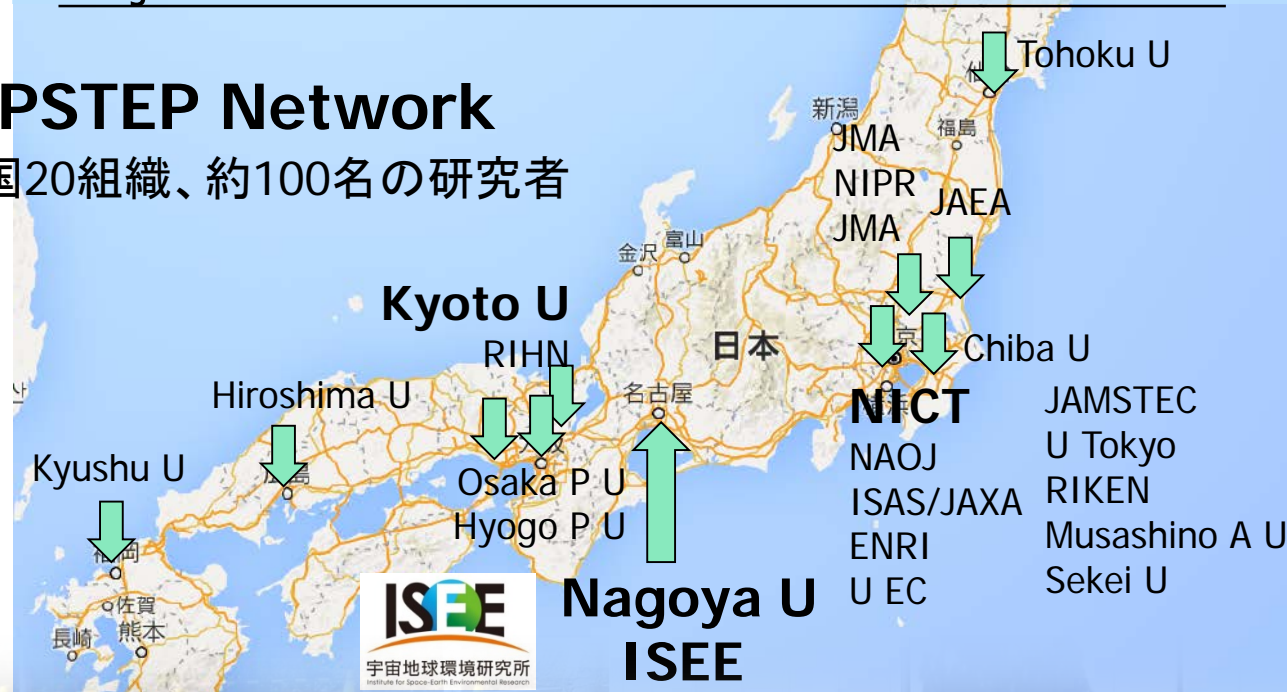
文部科学省 新学術領域研究(2015-2019)

太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成

Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction

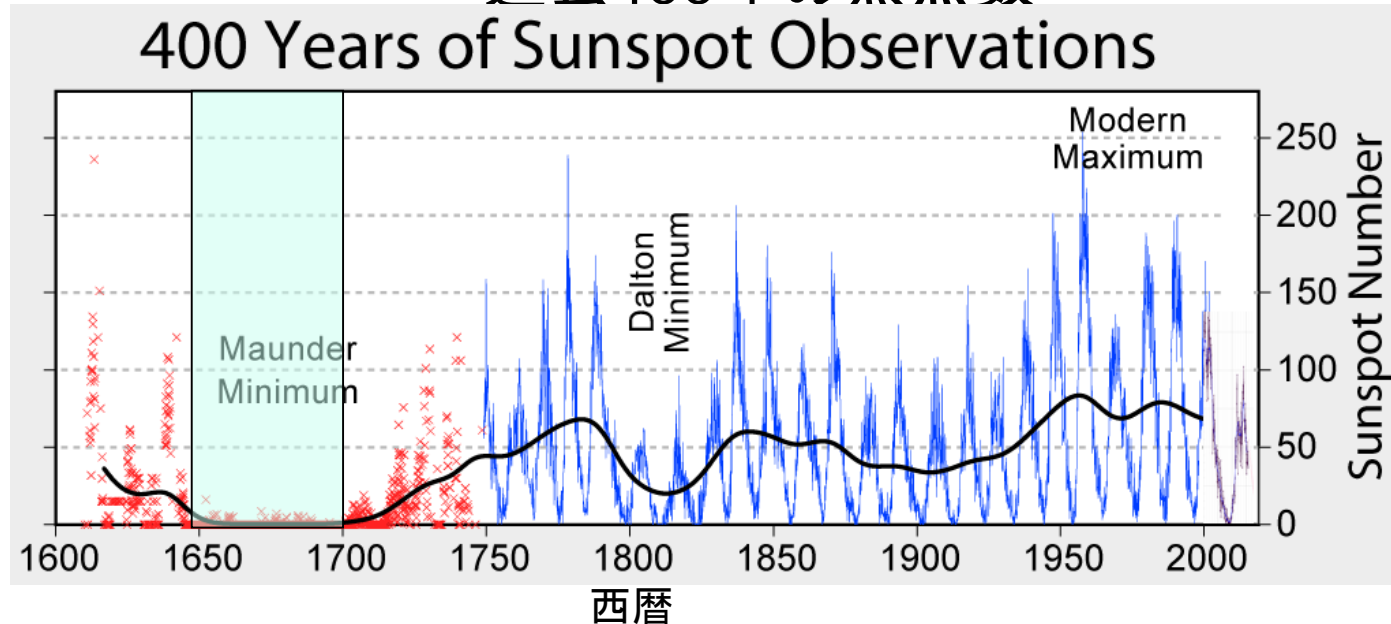
PSTEP Network

全国20組織、約100名の研究者



黒点周期活動の謎

過去400年の黒点数

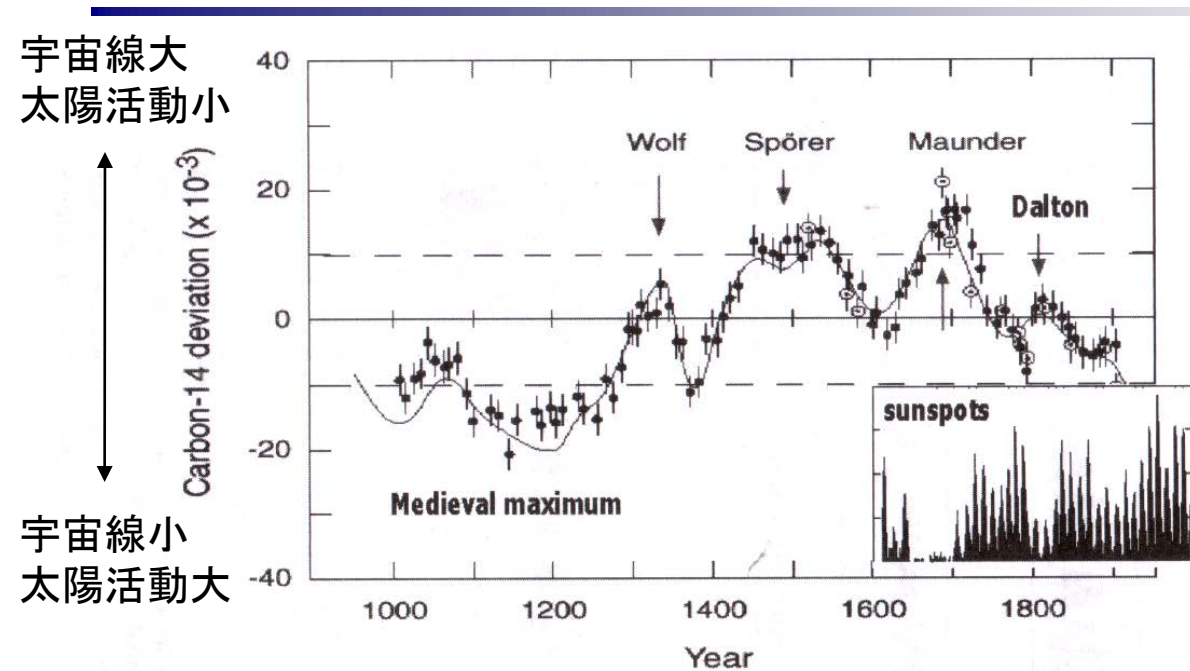


「凍るテムズ川 (1677)」

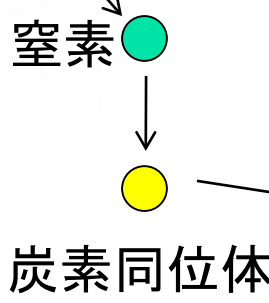
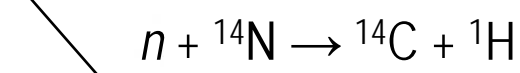
http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Frozen_Thames_1677.jpg



太陽黒点と宇宙線量の変化

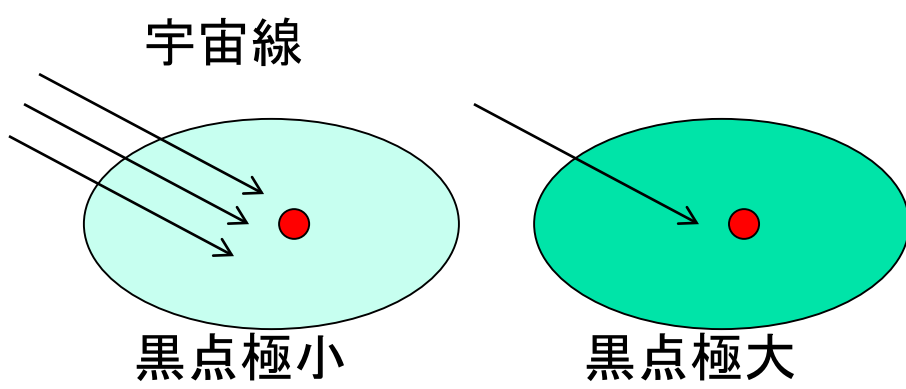


宇宙線



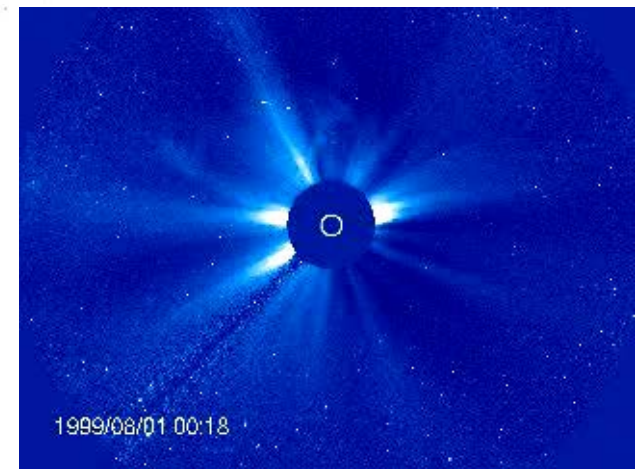
縄文杉

Figure 6. Variation of the ^{14}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}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}C record.



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

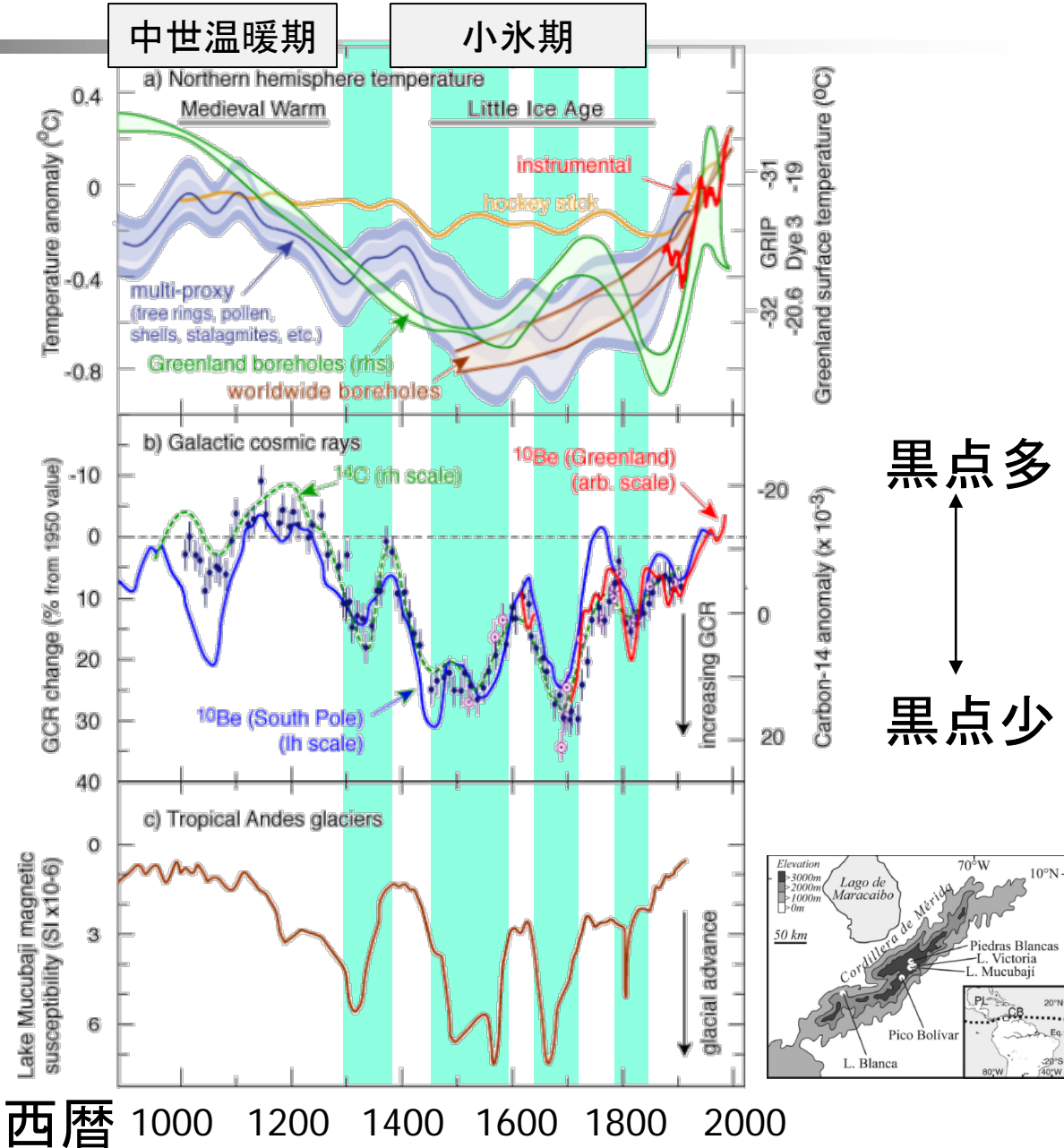
宇宙線生成核種

$\Delta^{14}\text{C}$ (太陽活動指標)

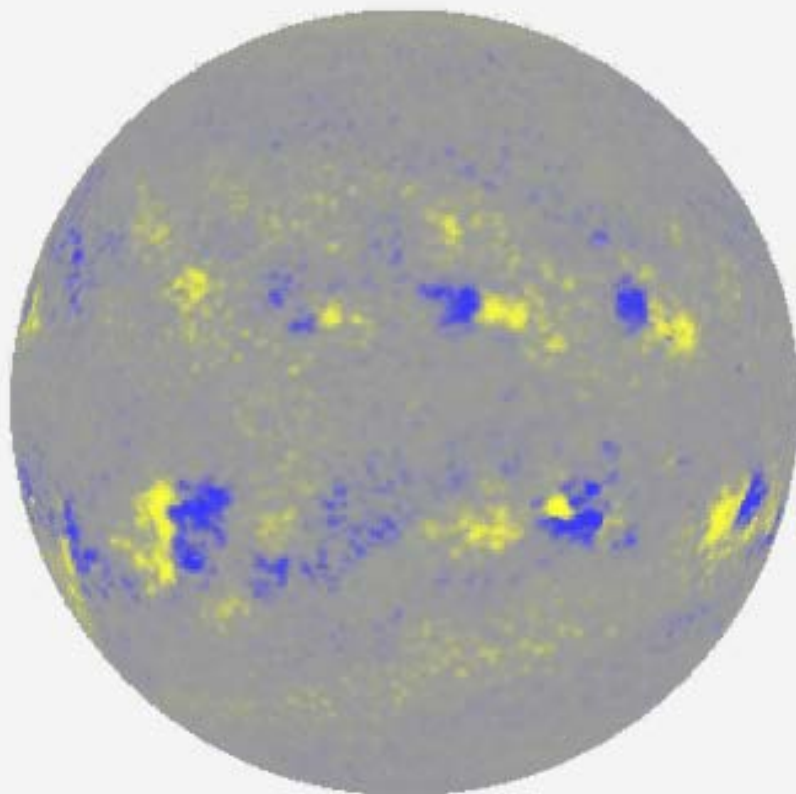
Stuiver and Quay 1980
 Klein et al. 1980
 Raisbeck et al. 1990
 Usoskin et al. 2002

熱帯アンデス氷河

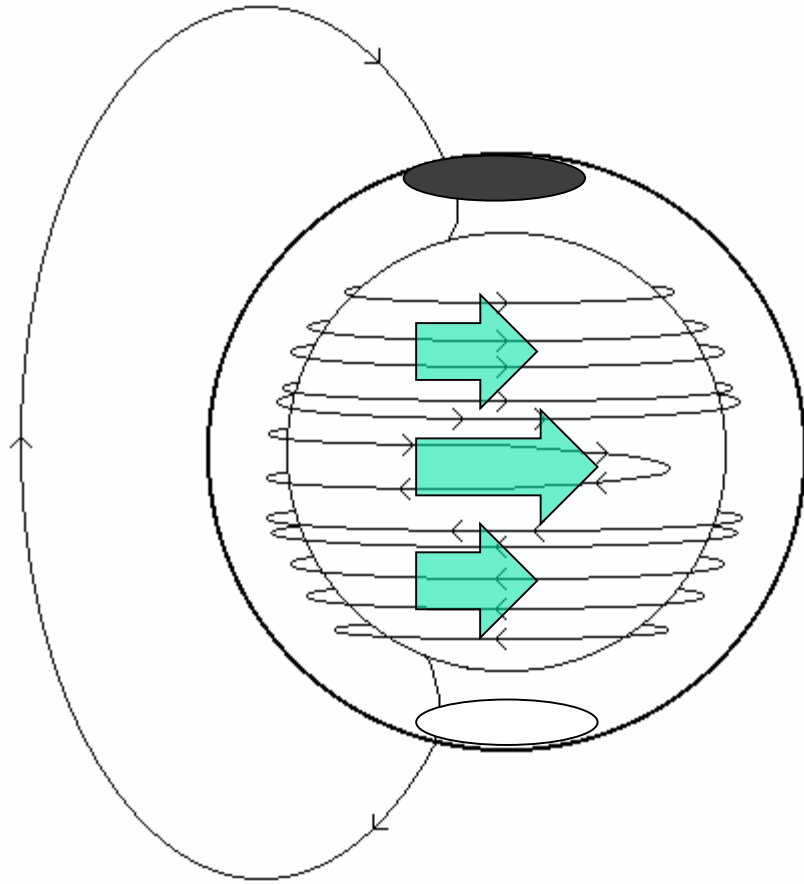
Polissar et al. 2006



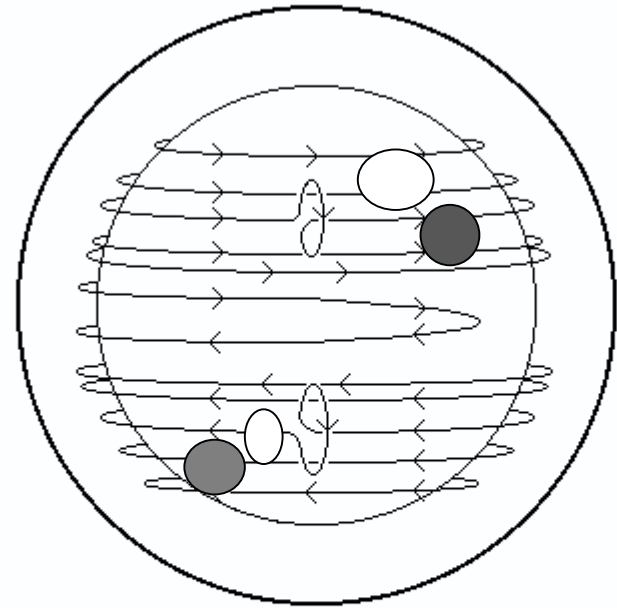
過去30年の太陽磁場活動



太陽ダイナモのモデル

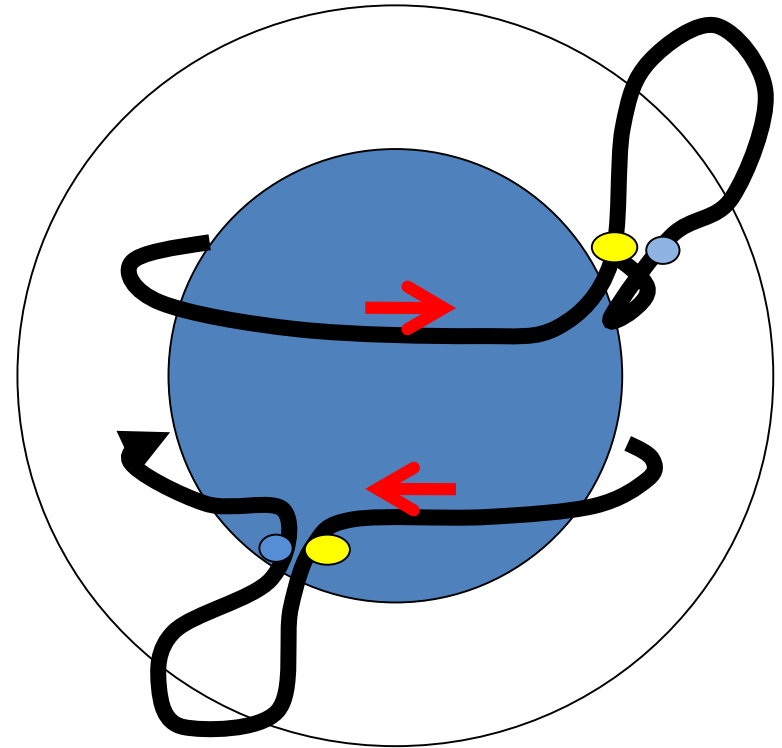
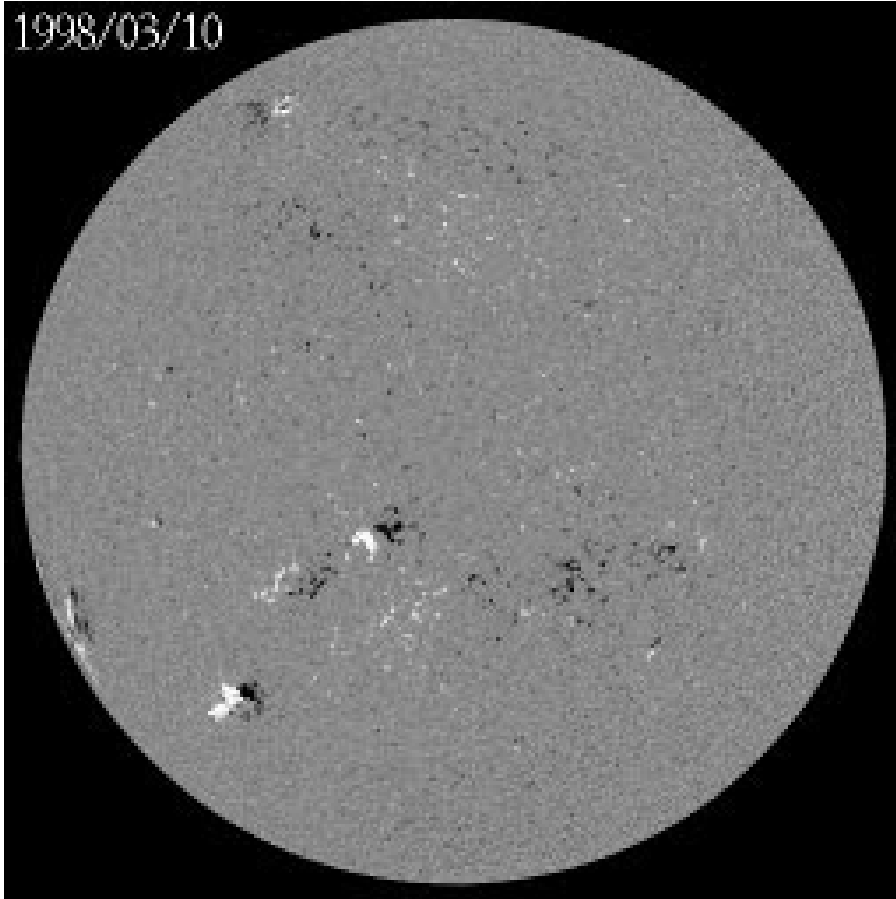


The ω -effect



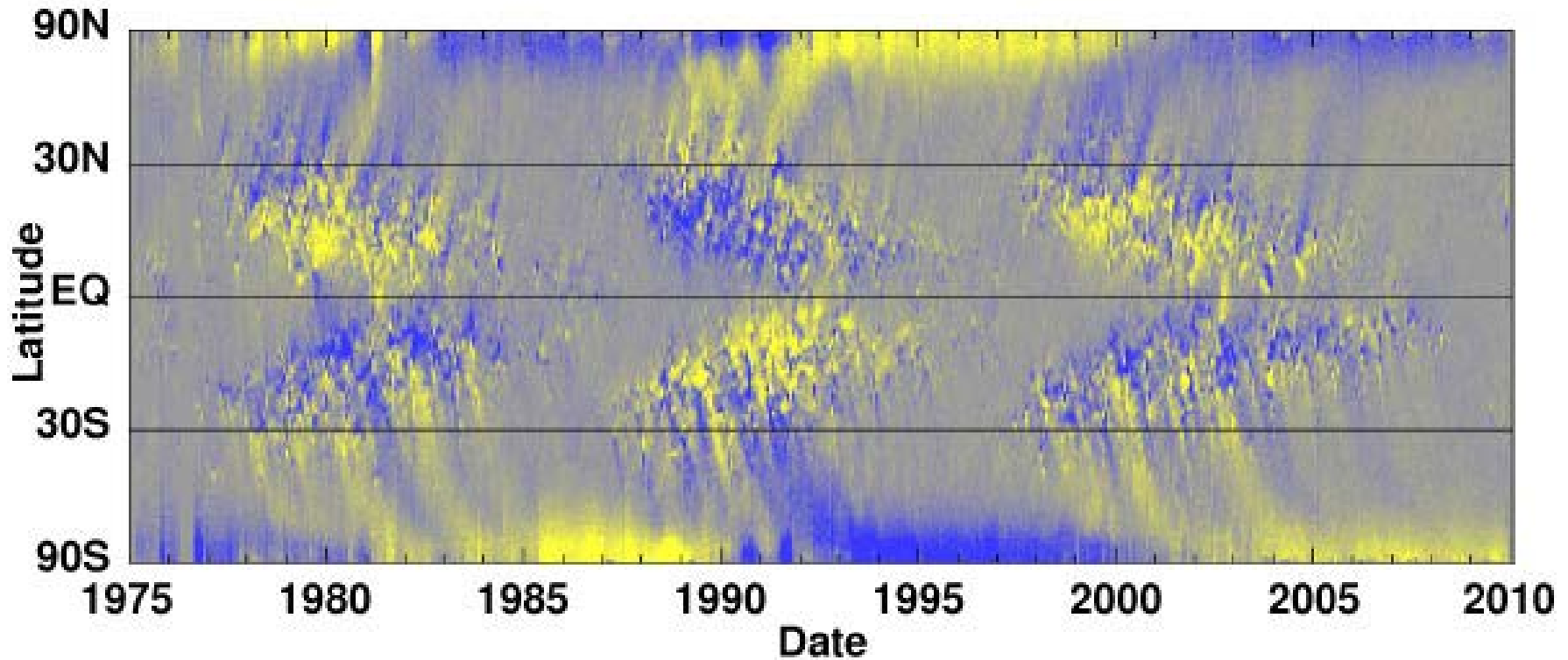
The α -effect

太陽黒点の形成



太陽黒点は太陽内部で生成された磁束管が表面に上昇してできる。

太陽磁場の構造と変化



西暦

← 第21周期

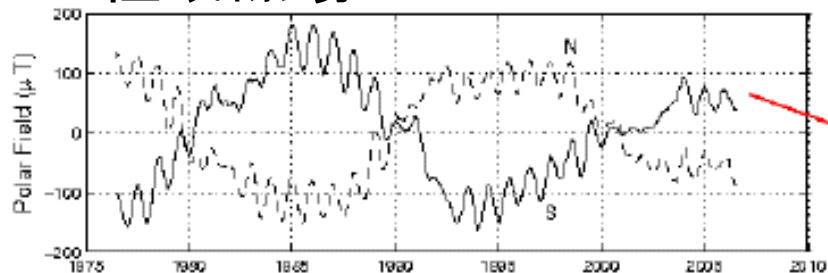
← 第22周期

← 第23周期

太陽磁場のバタフライ図

太陽極域磁場と黒点

極域磁場

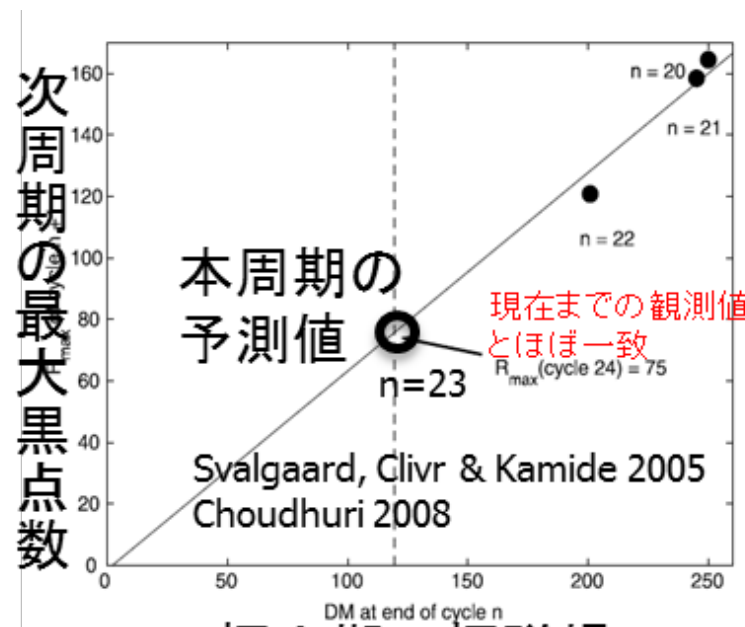
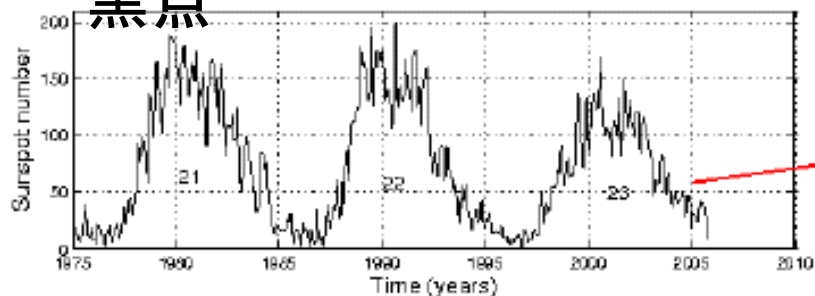


Poloidal Field



Toroidal Field

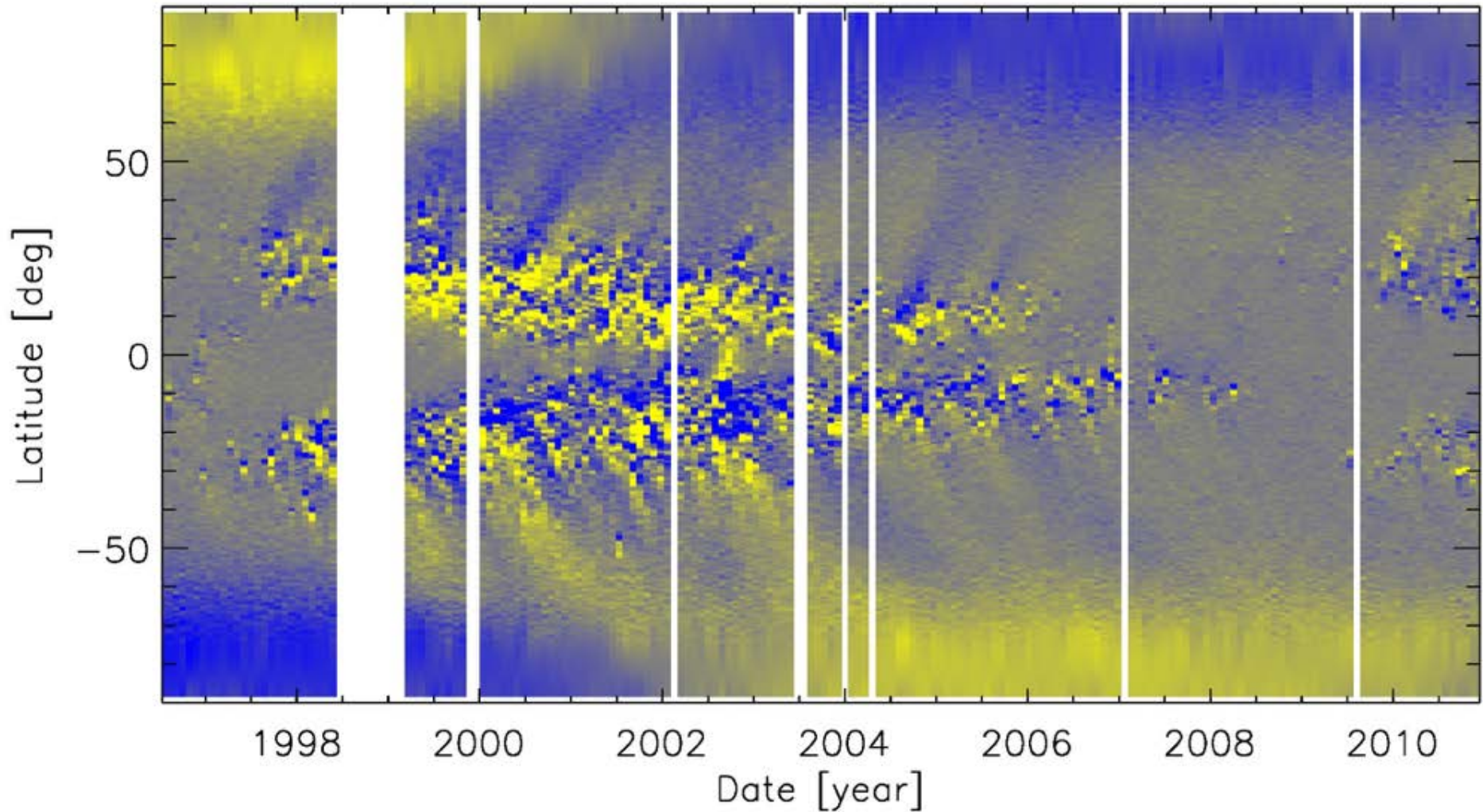
黒点



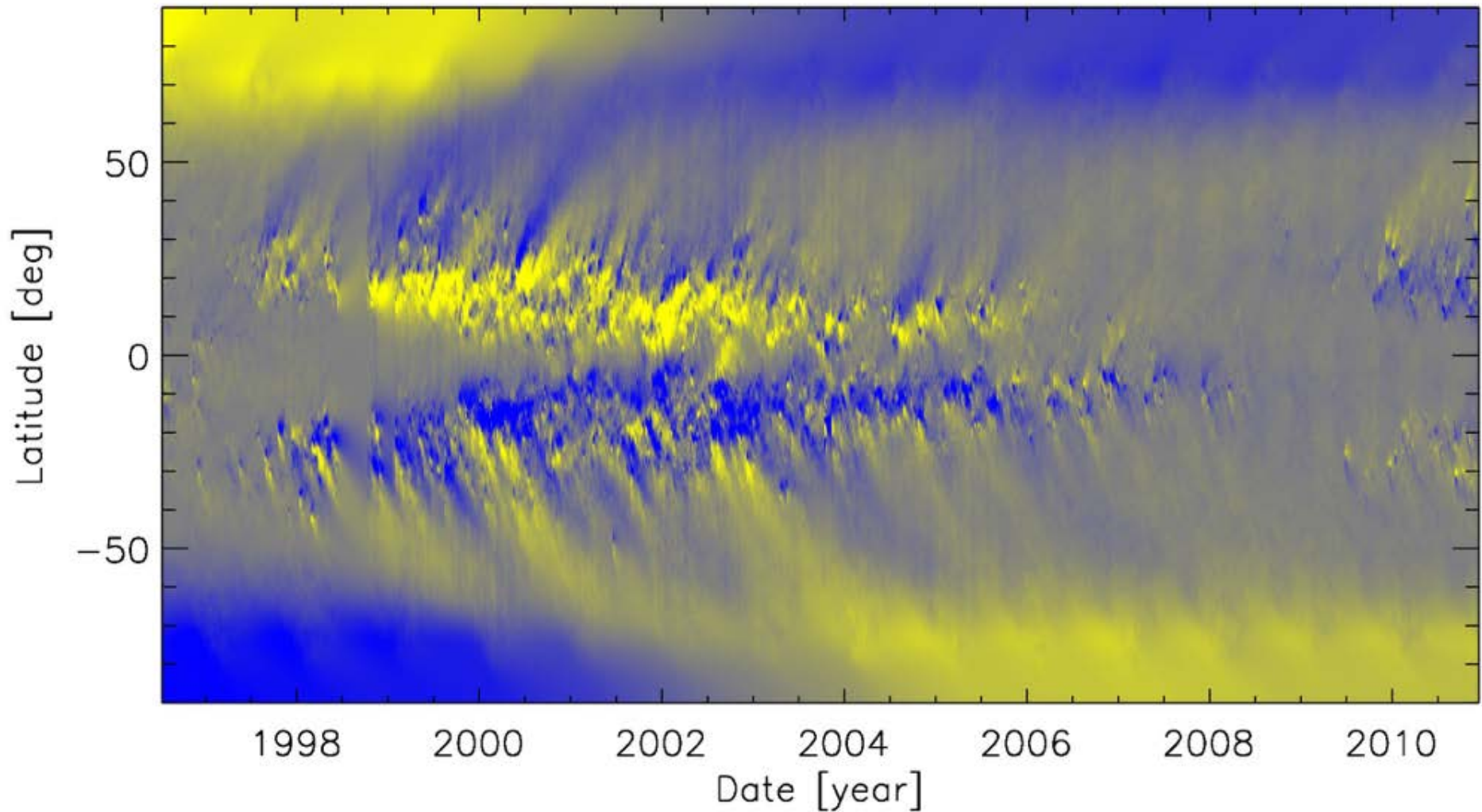
極小期の極磁場
(双極子モーメント)

Prof. Choudhuri提供

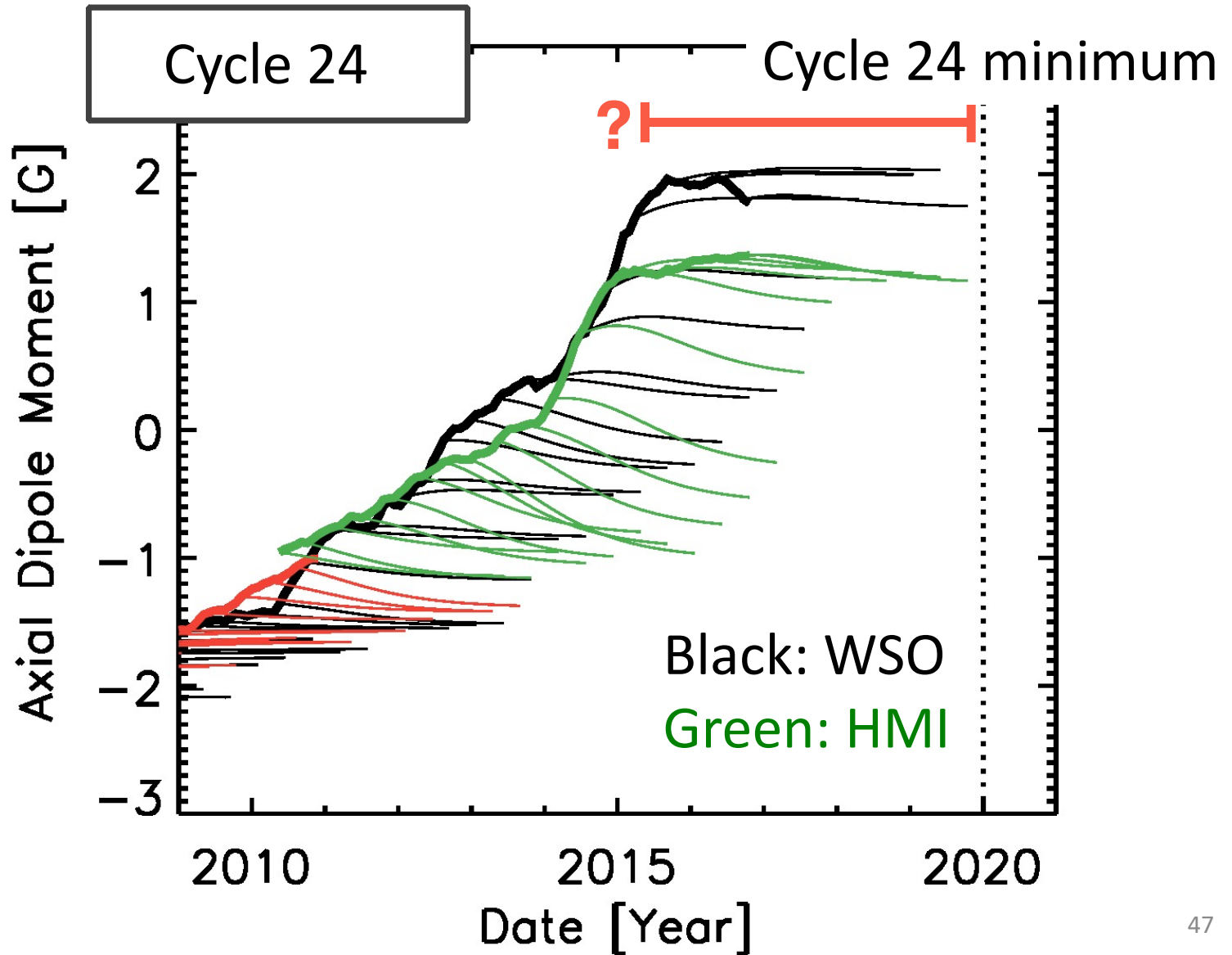
Data Assimilation (Observation)



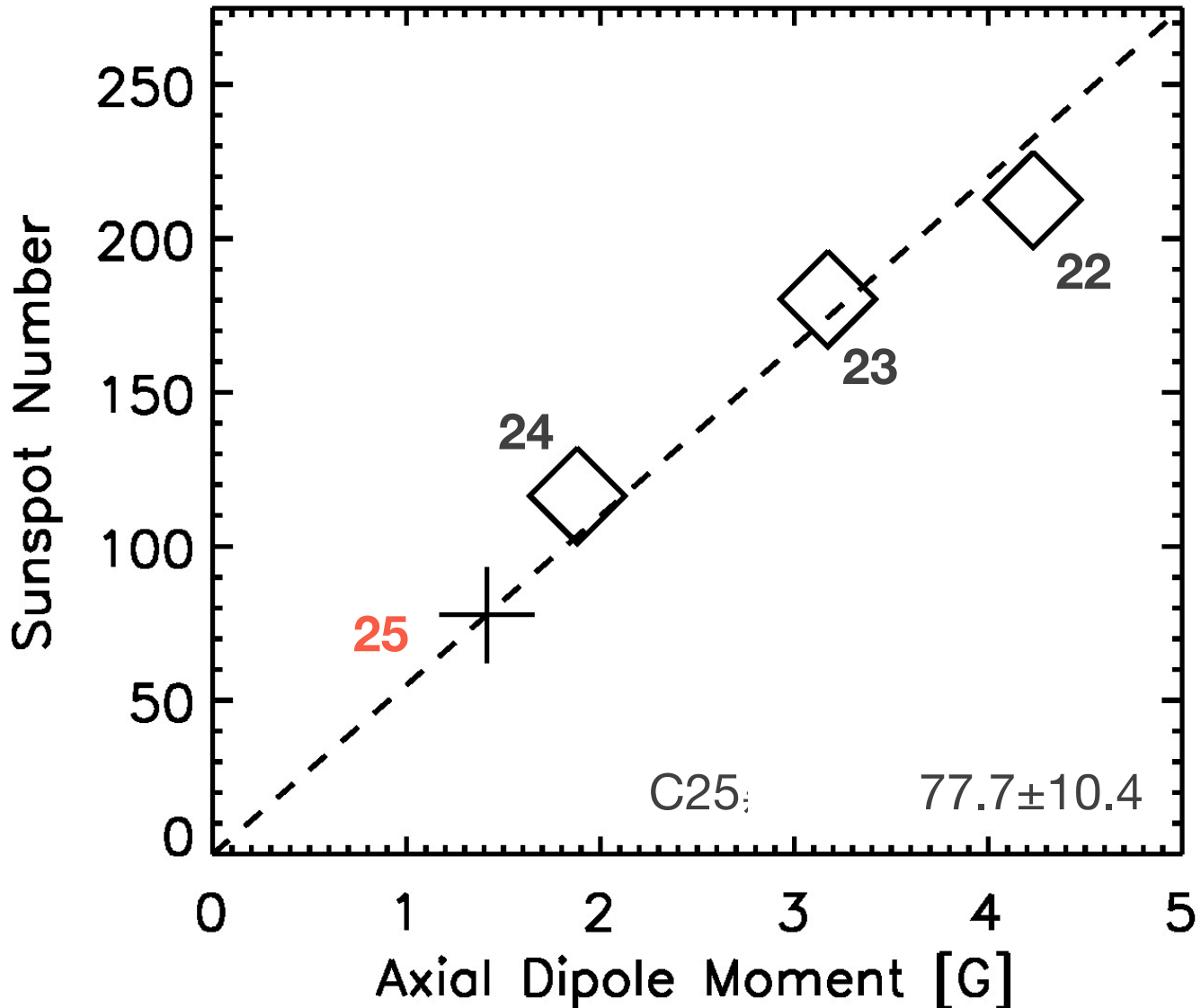
Data Assimilation (Simulation)



Solar minimum Polar magnetic field

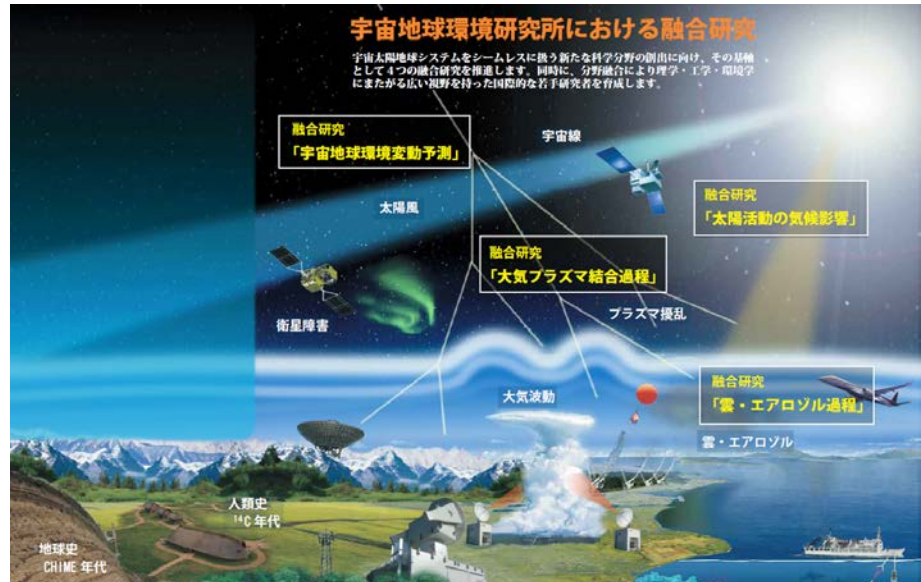


Next solar cycle prediction



名古屋大学
宇宙地球環境研究所

ひとつのシステムとしての地球・太陽・宇宙の理解を通して
地球環境問題の解決と宇宙にひろがる人類社会の発展に貢献する。



YouTubeでISEEの研究を紹介中!

<https://www.youtube.com/watch?v=nB3xFmQxYgIz>



ISEEってどんな研究所?

宇宙地球環境研究所 (ISEE) では、宇宙と地球を一体とした環境として捉え、地球・太陽・宇宙の理解を通して地球環境問題の解決と宇宙に広がる人類社会の発展に貢献するための研究を多角的に進めています。

こんな研究をやってるよ!

- 宇宙と地球のつながりを探れ! オーロラの不思議?
- 巨大太陽フレアと宇宙地球環境の変動を予測せよ!
- 過去の地球を岩石と樹木から探れ!
- 地球の気候と生態系の未来はどうなる?
- 台風と異常気象に挑む!
- 宇宙から降り注ぐ宇宙線を捉えろ!



関連研究室の位置づけ

名古屋大学
大学院

理学研究科

素粒子宇宙
物理学専攻

素粒子宇宙
物理学系

宇宙地球
物理学系

大学院 理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻
宇宙地球物理学

太陽地球系化学講座

大気圏環境変動
AM

太陽地球関連理学講座

宇宙空間物理学観測
SSe

太陽宇宙環境物理学
SSt

太陽地球系物理学講座

太陽圏プラズマ物理学
SW

太陽高エネルギー物理学
CR

太陽地球環境研究所

大気圏環境部門

電磁気圏環境部門
(2-1)

電磁気圏環境部門
(2-2(EISCATグループ))

総合解析部門

ジオスペース
研究センター

太陽圏環境部門
(太陽風)

太陽圏環境部門
(宇宙線)

大学院 工学研究科
電子情報システム専攻
電気工学分野
宇宙電磁環境工学
(協力講座)

宇宙電磁観測グループ

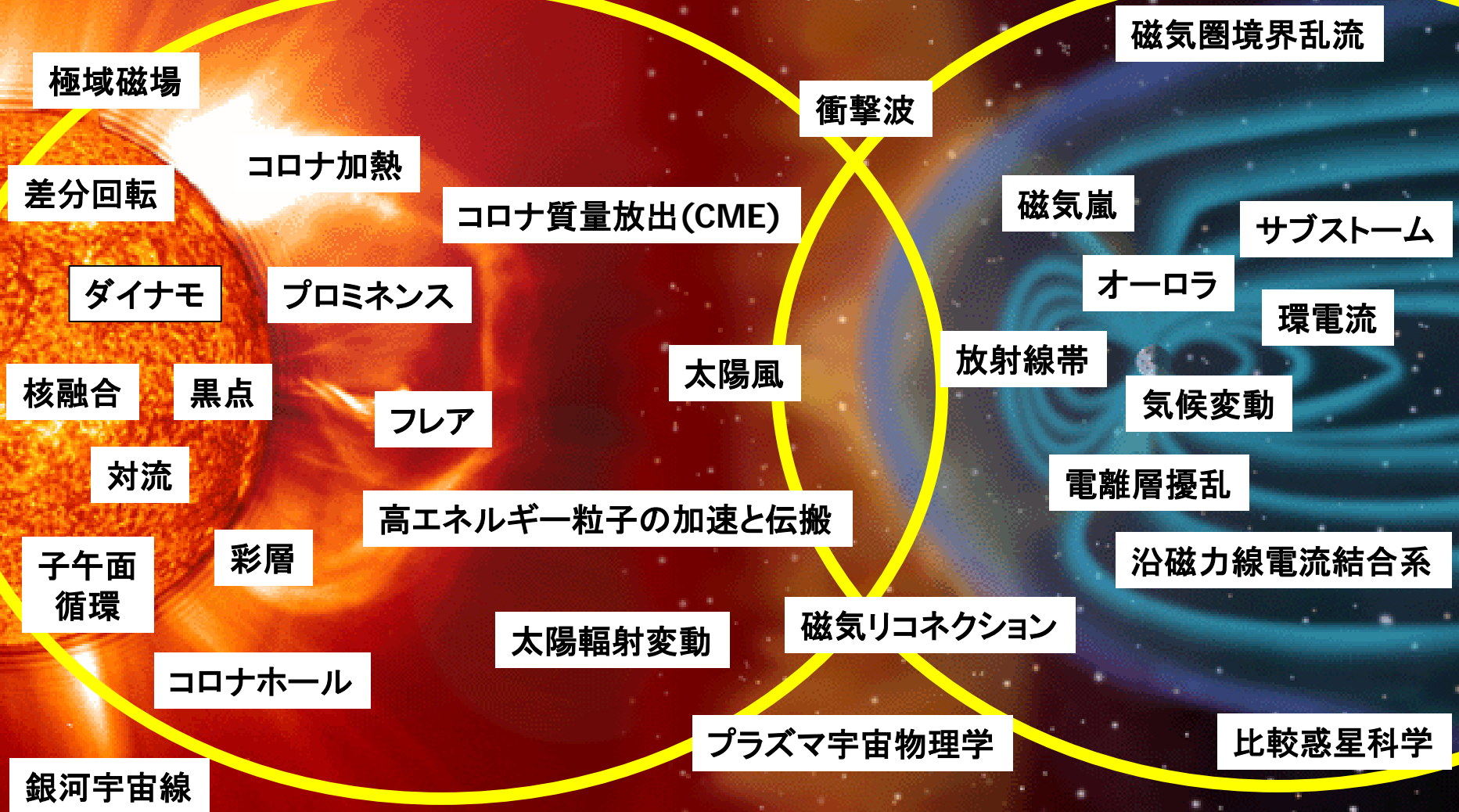
宇宙情報処理グループ

総合解析部門の構成

- 教授(2) 草野、町田
- 准教授(1) 三好、増田
- 講師(2) 今田、梅田
- 助教(1) 家田
- 外国人特任教授(2)、特任准教授(2)、特任助教(5)、研究員(8)
- 秘書(8)、技術職員(3)
- 大学院生:D (8)、M(13)、学部(3)



SST研究室の研究テーマ 太陽地球結合システム



太陽内部→彩層→コロナ→太陽風→磁気圏→電離圏→大気→地表

太陽宇宙環境物理学 (SST) 研究室

太陽・地球・惑星から成る広大なシステムで起こる多様な現象を
人工衛星・地上観測データの**総合解析**
スーパーコンピュータを駆使した**コンピュータシミュレーション**
の融合によって、総合的に探ることができる世界的にも例の無い
総合的研究室。

- 最先端科学研究としての太陽宇宙環境物理学
- 人間の生存環境を守るための太陽宇宙環境物理学
(宇宙天気・宇宙気候予測研究)



SST研究室の特徴

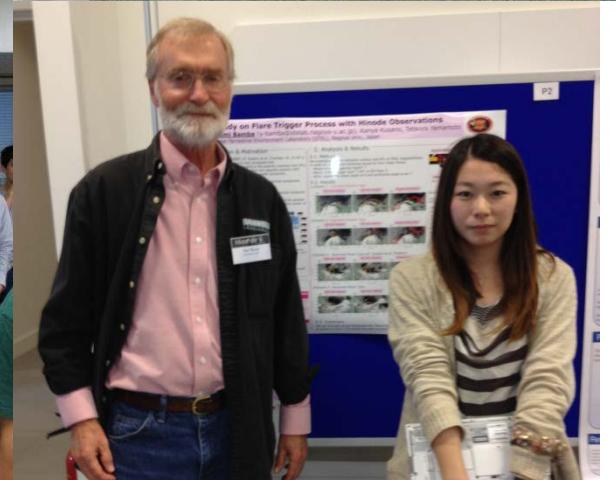
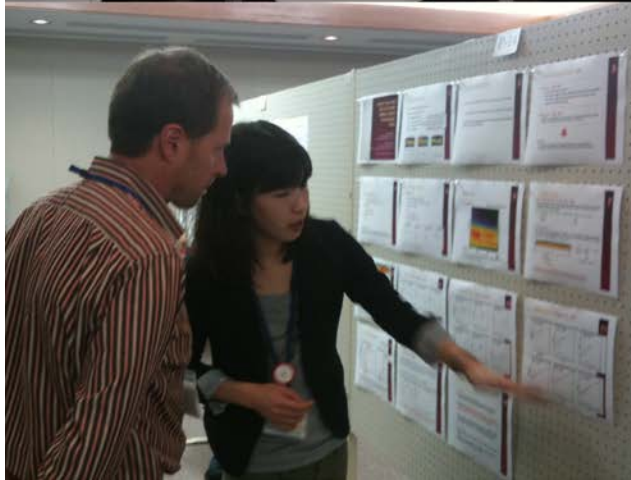
- **学際分野をカバーする豊富な教授陣**
 - 太陽物理学、地球電磁気学、プラズマ物理学、惑星科学、宇宙物理学、シミュレーション科学の広い分野から自由にテーマを選べる。
- **最先端の研究に直結**
 - 最新の衛星観測データ、世界最高速のスーパーコンピュータを使った研究の実践
- **国際的な活躍**
 - 修士学生から国際会議参加、国際共同研究を実施
- **多様な進路**
 - 様々な研究機関、企業への進路が可能

太陽宇宙環境物理学研究室(SS_T研)

- 太陽黒点周期活動とその変動のメカニズム
- 太陽フレアの発生機構の解明とその予測
- 太陽フレアにおける高エネルギー粒子加速
- コロナ質量放出の形成と伝搬
- 爆発的なオーロラ発生の機構
- 放射線帯の変動機構
- 地球、火星の大気散逸機構
- 地磁気の反転機構
- 太陽活動と雲の関係

宇宙天気・宇宙気候の理解と予測

学生生活の様子



世界各国との共同研究に参加し、修士課程の段階から国内外の学会等に
参加・成果発表をしています。スポーツも盛ん。フットサル優勝！

分野横断研究と広範なネットワーク

JAXA 宇宙航空
研究開発機構

NICT情報通信
研究機構

国立天文台

名古屋大学太陽地球環境研究所

国内研究
機関

海外研究
機関



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

卒業後の進路

修士課程卒業生：

- 宇宙航空研究開発機構(JAXA)
- 文溪堂
- 新潟大学医学部
- IT企業各社

博士課程卒業生：

- オーストリア科学アカデミー宇宙科学研究所研究員,
- 韓国チュンナム大学ポスドク研究員
- カリフォルニア大学バークレー校宇宙科学研究所研究員
- 宇宙航空研究開発機構(JAXA)プロジェクト研究員
- フランス国立科学研究センター(CNRS) LATMOSポスドク研究員
- 和歌山大学特任助教
- 日立製作所

名古屋大学理学研究科の入試

- 入試説明会
 - 6月2日(土)
- 自己推薦入試
 - 口述審査のみ
 - 試験日 7月14～15日
- 一般入試
 - 筆記試験＋面接
 - 試験日 8月22～25日
- 受験の際には事前に研究室へ連絡してください。
 - 草野教授 kusano@nagoya-u.jp