

理系大学生のための
太陽研究最前線体験ツアー



太陽物理学入門

今田 晋亮

名古屋大学太陽地球環境研究所

太陽物理学の三大課題

- 太陽の磁場はどうやって作られるか？

太陽ダイナモ → 草野先生

- 数100万度の太陽コロナはどうやって作られるか？

太陽コロナ加熱 → 鈴木先生

- 太陽大気中での爆発現象はどうやって起っているか？

太陽フレア → 草野先生

昔の太陽

巨大衝突と月の形成

45億年前

生命の誕生

in "some warm little pond".

35億年前

生命の誕生
に適さない時代

後期重爆撃期
38~40億年前

35億年前の太陽の放射量は 現在の約75%

グリーン
ハウス効果

地球表面の温度

マイナス40°C

40億年前

生命の誕生

氷点

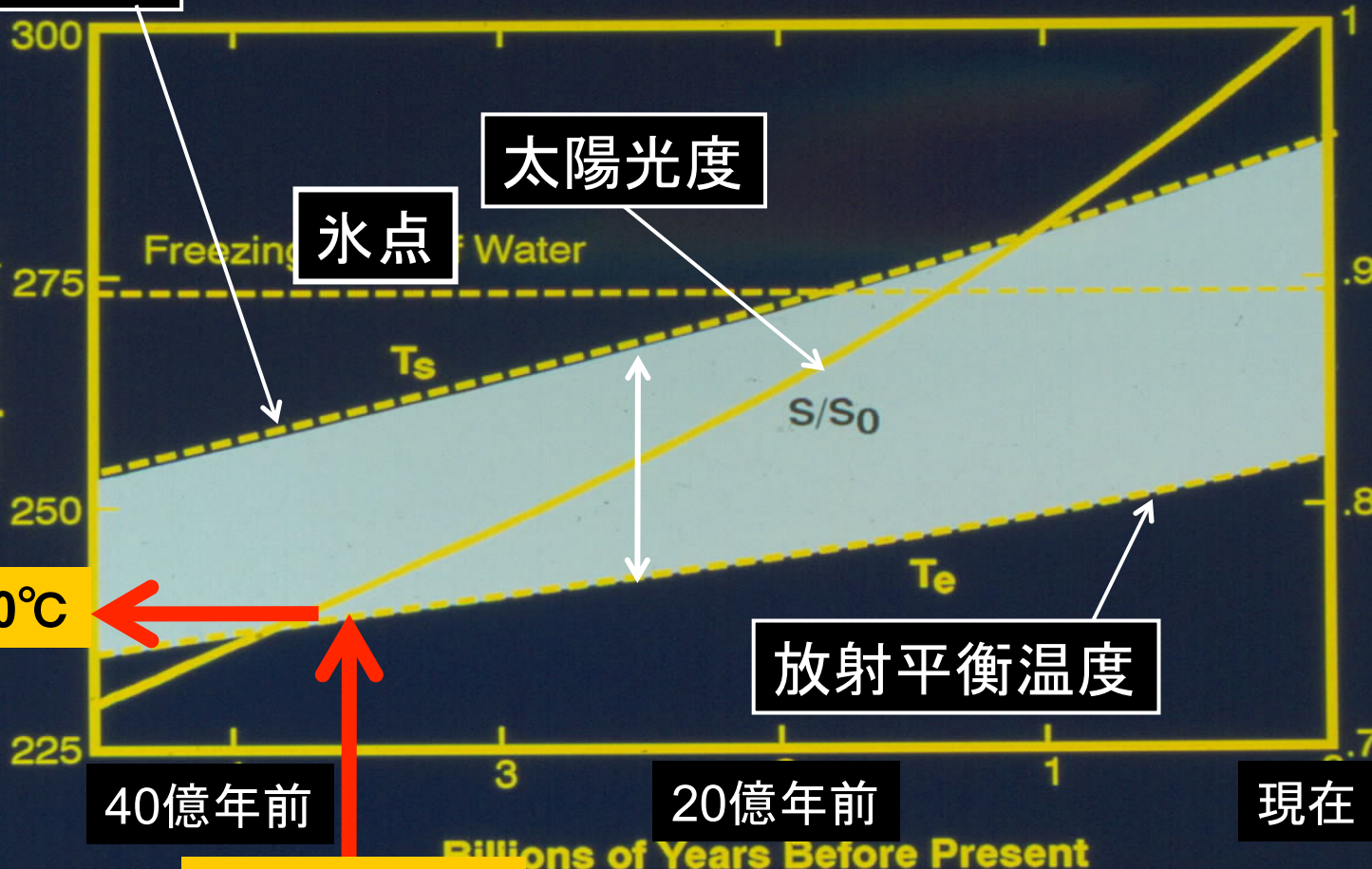
太陽光度

放射平衡温度

20億年前

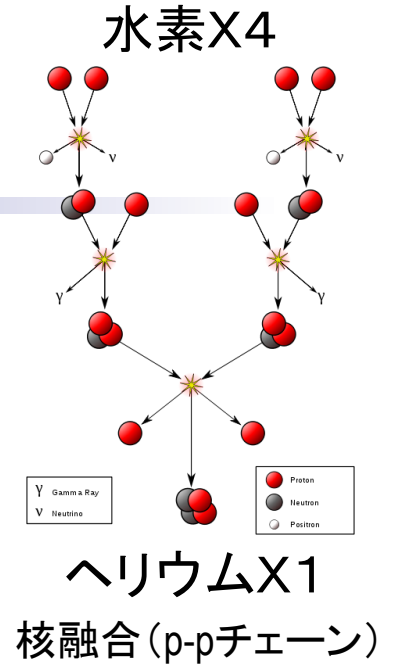
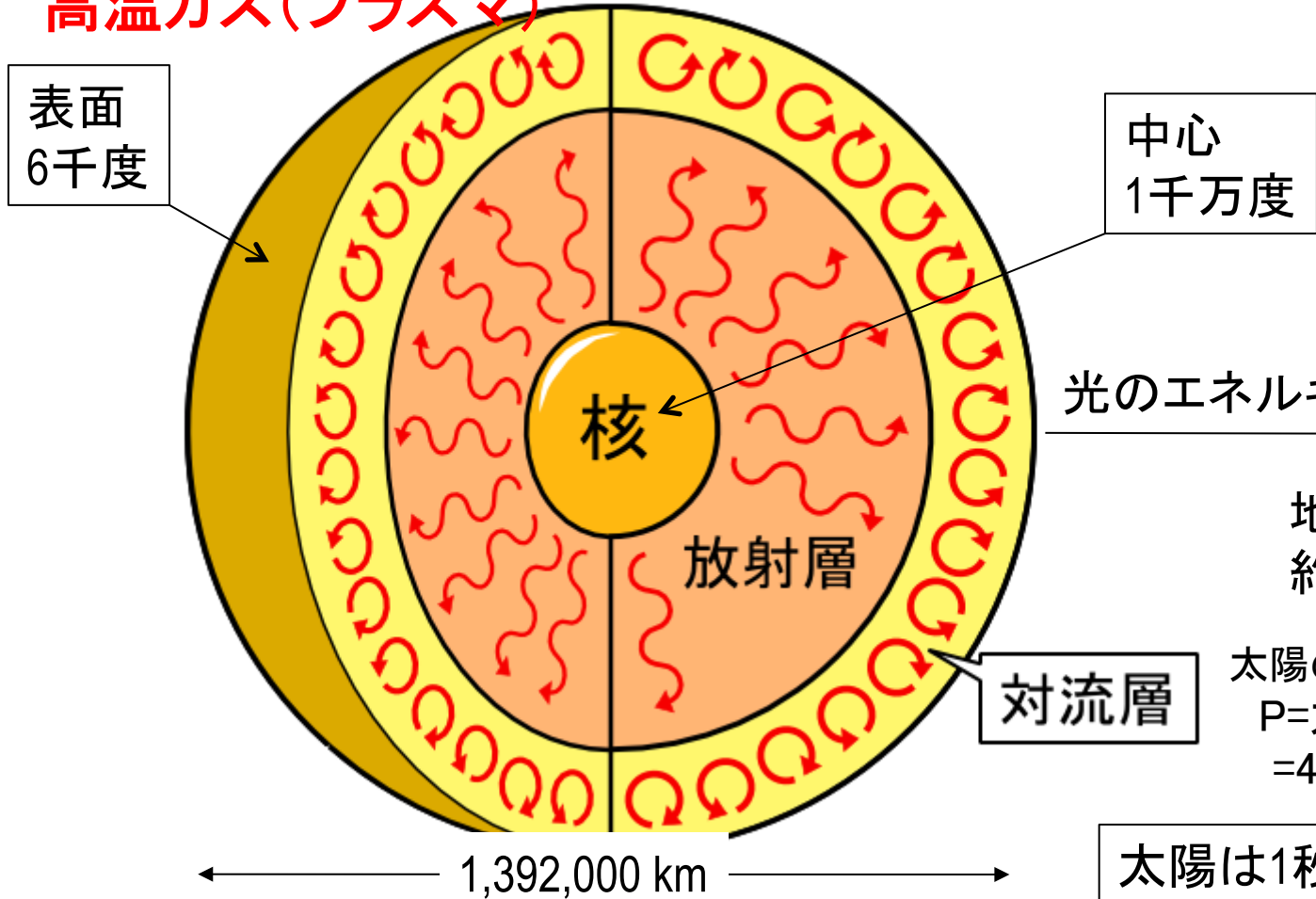
現在

現在を1としたときの太陽光度



太陽の構造とエネルギー

水素(70%)、ヘリウム(30%)と僅かの重元素からなる
高温ガス(プラズマ)



地球軌道上の放射
約1366W/m²

太陽の全出力
 $P = \text{太陽定数} \times 4\pi (1\text{AU})^2$
 $= 4 \times 10^{26} \text{ W}$

太陽は1秒間に全人類が1年間に消費するエネルギーの100万倍を出力

Mass-Luminosity relation

$$\bar{\kappa} \propto \rho_c^n T_c^{-s} \longrightarrow L \propto \mu_c^{s+4} M^{s-n+3} R^{3n-s}$$

- Krammers' opacity: $n = 1, s = 3.5 \longrightarrow L \propto \mu_c^{7.5} M^{5.5} R^{-0.5}$
- Thomson opacity: $n = 0, s = 0 \longrightarrow L \propto \mu_c^4 M^3$

The young sun is faint or bright?

- ▶ Nuclear reaction (p-p chain) change molecular weight in the core

$$\mu_c = \left[\frac{5}{4} X_c + \frac{3}{4} \right]^{-1} \quad \text{where } X_c \equiv M_H/M \text{ at the core}$$

$$\begin{aligned} \text{Young sun: } \mu_{0,c} &= \left[\frac{5}{4} X_{0,c} + \frac{3}{4} \right]^{-1} \quad \text{where } X_{0,c} = 0.75 & \longrightarrow \frac{L_0}{L_\odot} &\approx \left(\frac{\mu_{0,c}}{\mu_{\odot,c}} \right)^{7.5} = 0.75 \\ \text{Present sun: } \mu_{\odot,c} &= \left[\frac{5}{4} X_{\odot,c} + \frac{3}{4} \right]^{-1} \quad \text{where } X_{\odot,c} = 0.70 \end{aligned}$$

- ▶ The solar wind may change the total mass of the sun:

$$\text{If } M_0 = 1.05 M_\odot \quad \longrightarrow \frac{L_0}{L_\odot} \approx \left(\frac{\mu_{0,c}}{\mu_{\odot,c}} \right)^{7.5} \left(\frac{M_0}{M_\odot} \right)^{5.5} = 0.99$$

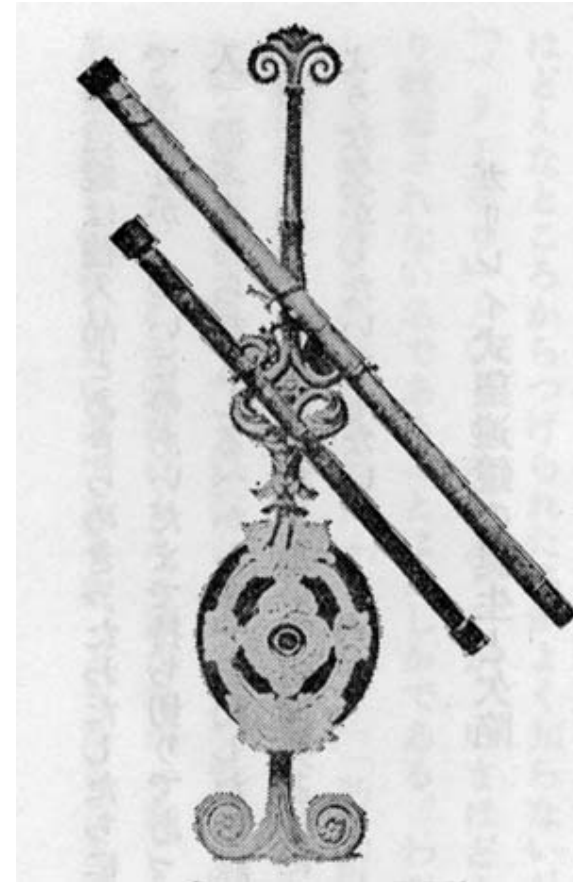
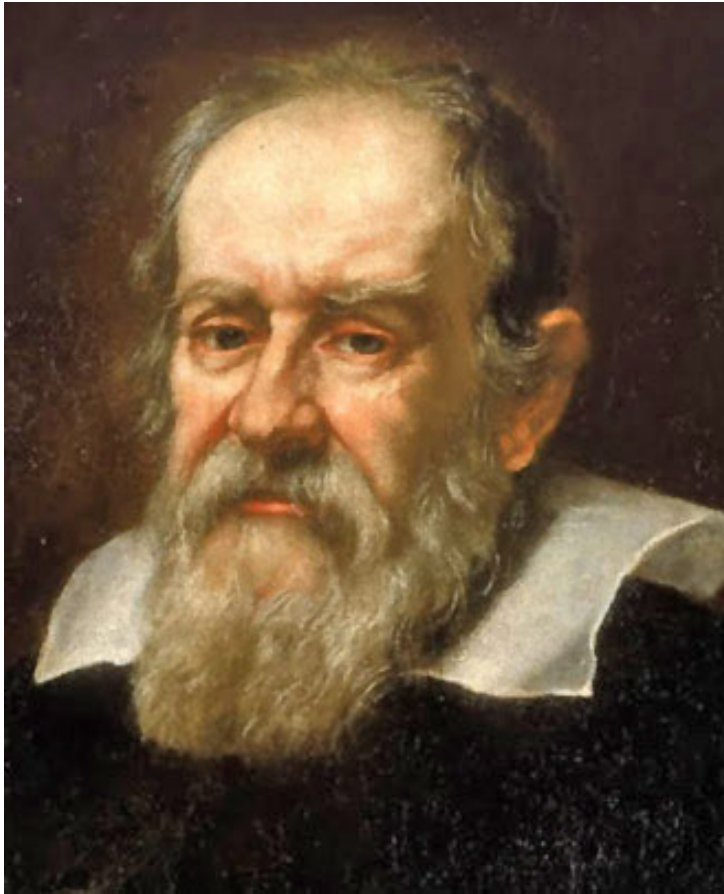
H(4個)がHeになった事で数が減少
→ 圧力上昇 → 核融合活発

暗い若い太陽のパラドックス解決には

- 生物学的: 凍りついた地球で生命誕生
- 古大気学: 多量のグリーンハウスガス
- 地質学的: 地熱
- 基礎物理学: 重力定数の変化!?
- 天体物理学: 太陽は今と同じ明るさ!
→ 太陽は今より重い(5%位)!
昔の太陽の重さをしるため
太陽の質量損失率を知りたい!

科学としての太陽観測

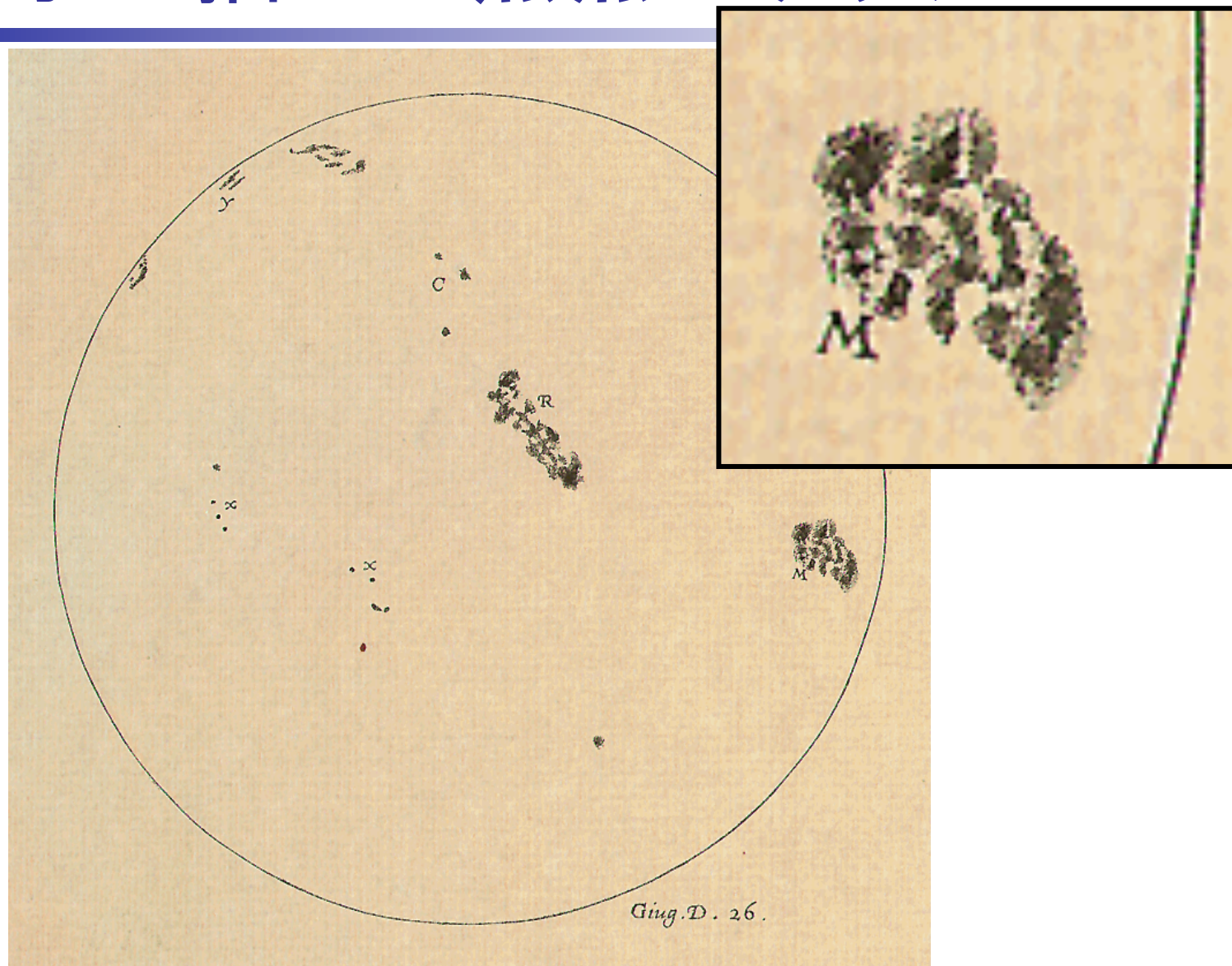
- ガリレオ・ガリレイ 1564~1642



1610年 「星界の報告」

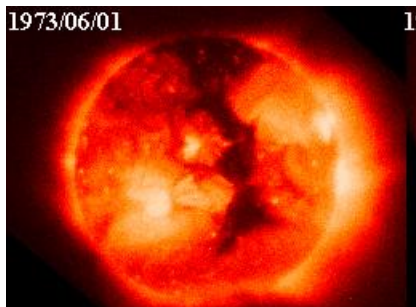
1611年 「木星の4衛星の観測記録」

ガリレオが描いた黒点スケッチ

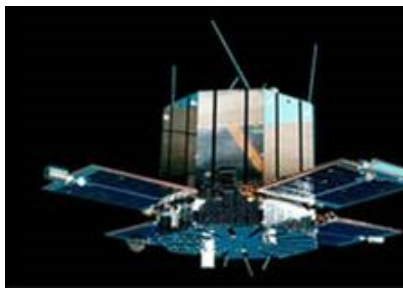


1613年6月～7月

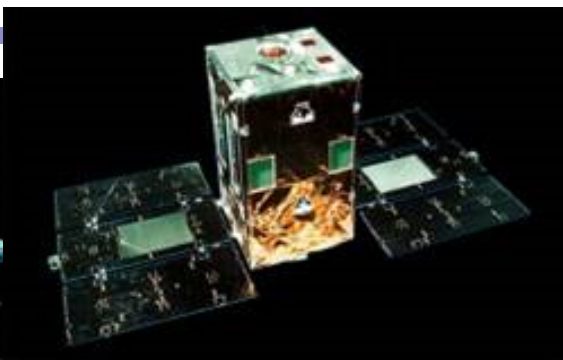
現代の太陽観測衛星



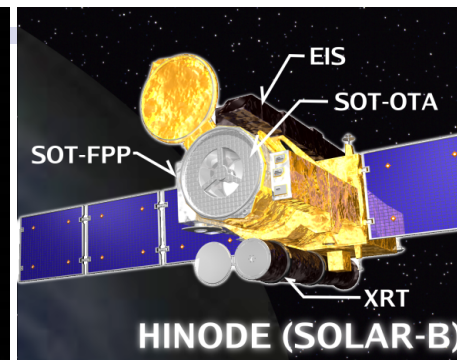
スカイラブ 米 1973~1979



ひのと 日 1981~1991



ようこう 日 1991~2004



ひので 日 2006~



SMM(Solar Maximum Mission) 米 1980~1989



SOHO 米欧 1995~



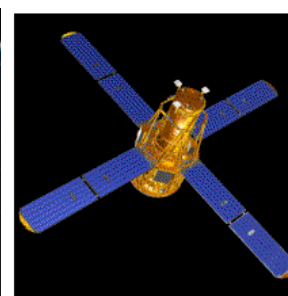
SDO 米 2010~

衛星観測のメリット

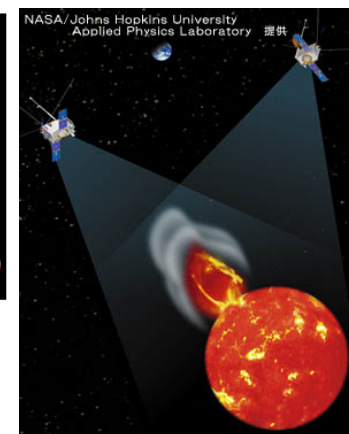
- 可視光以外(X線、紫外線など)による観測
- 地球に制約されない観測
- 大気の揺らぎの無い観測



TRACE 米 1998~

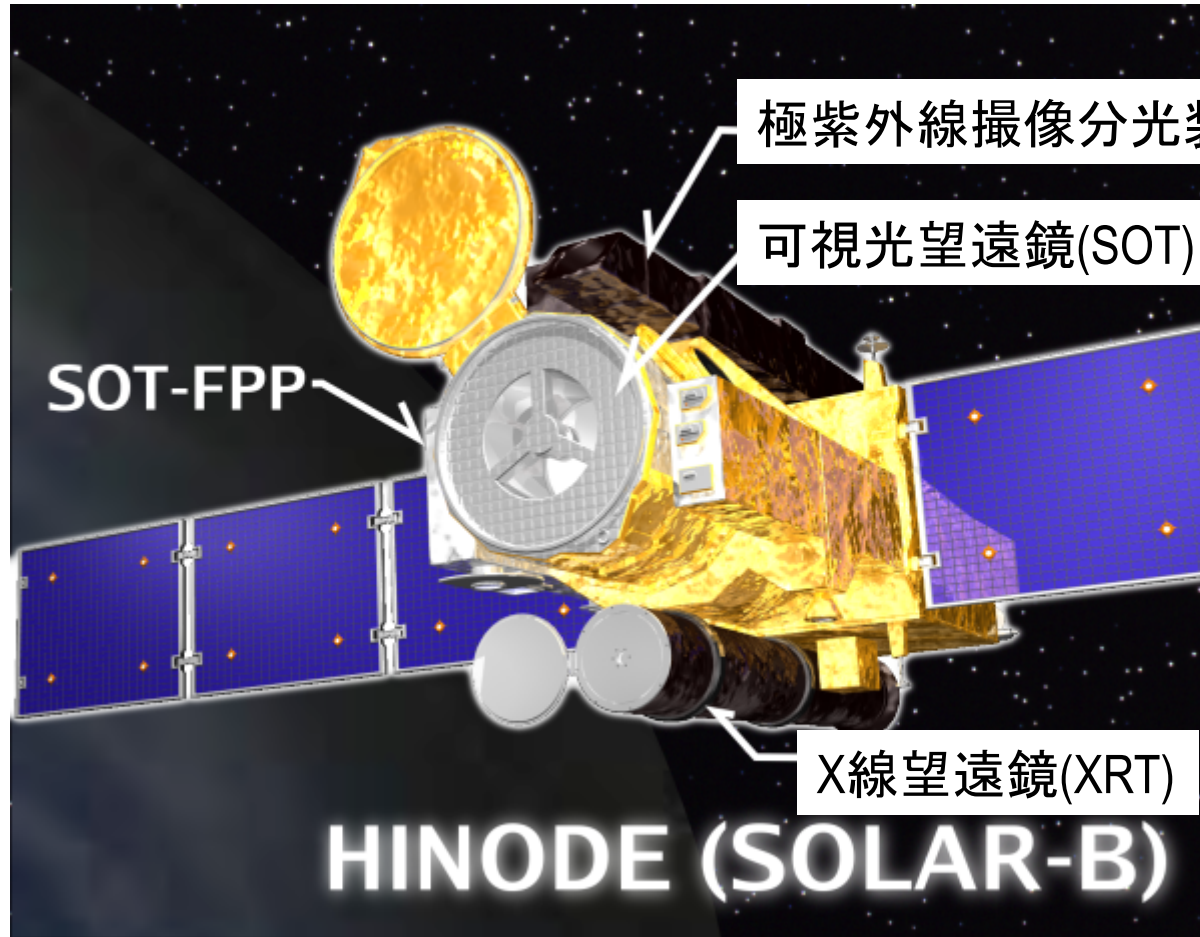
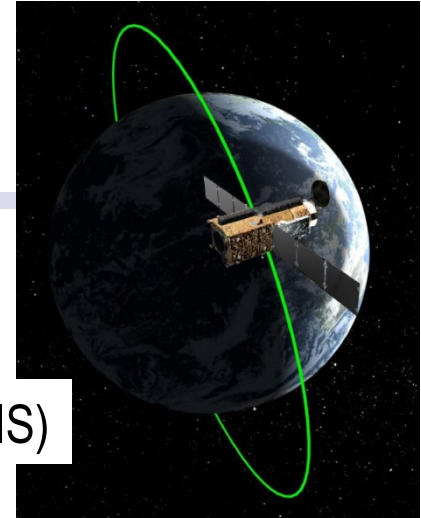


RHESSI 米 2002~



STEREO 米 2006~

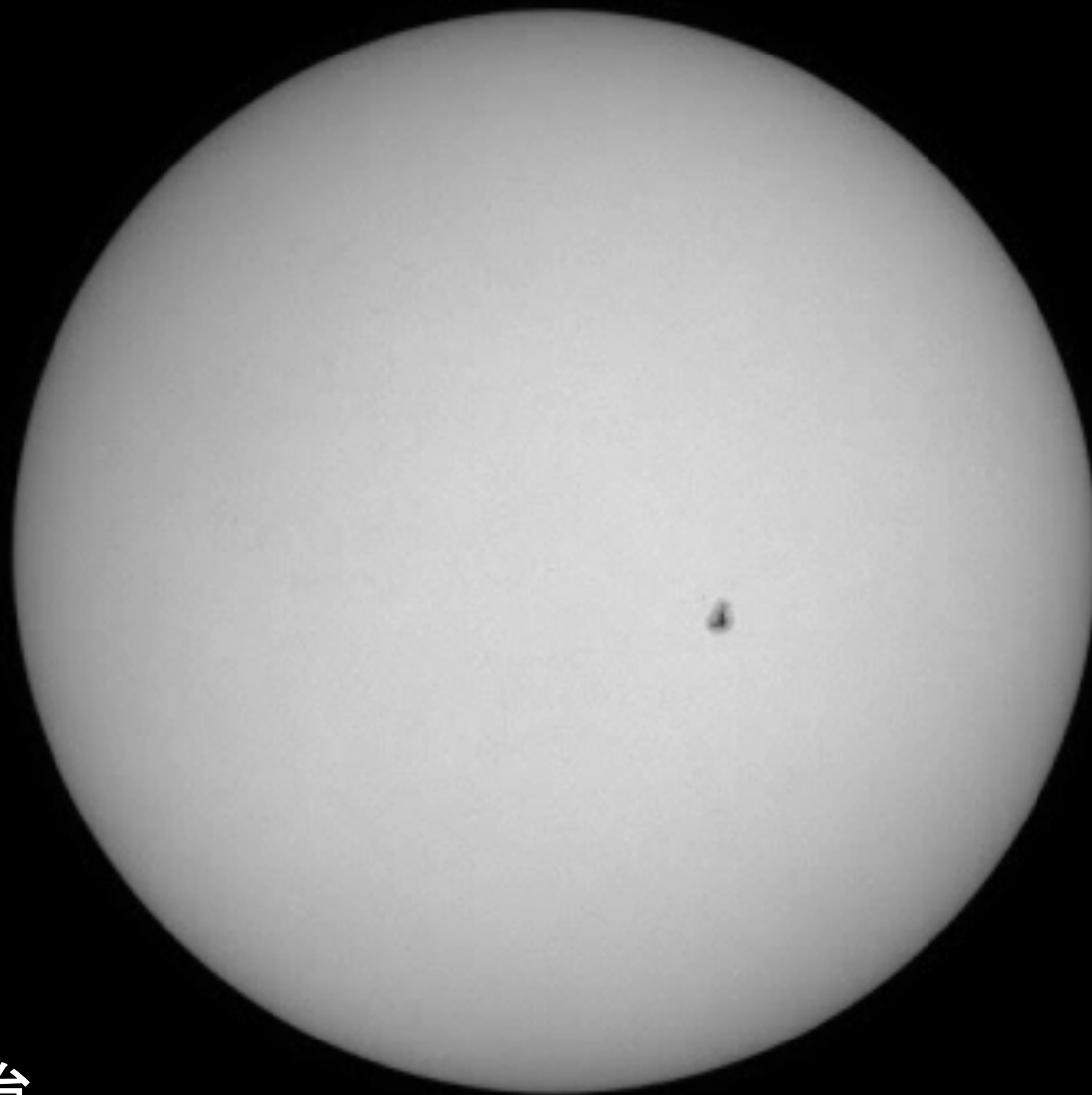
太陽観測衛星「ひので」



ひので科学センター(国立天文台)

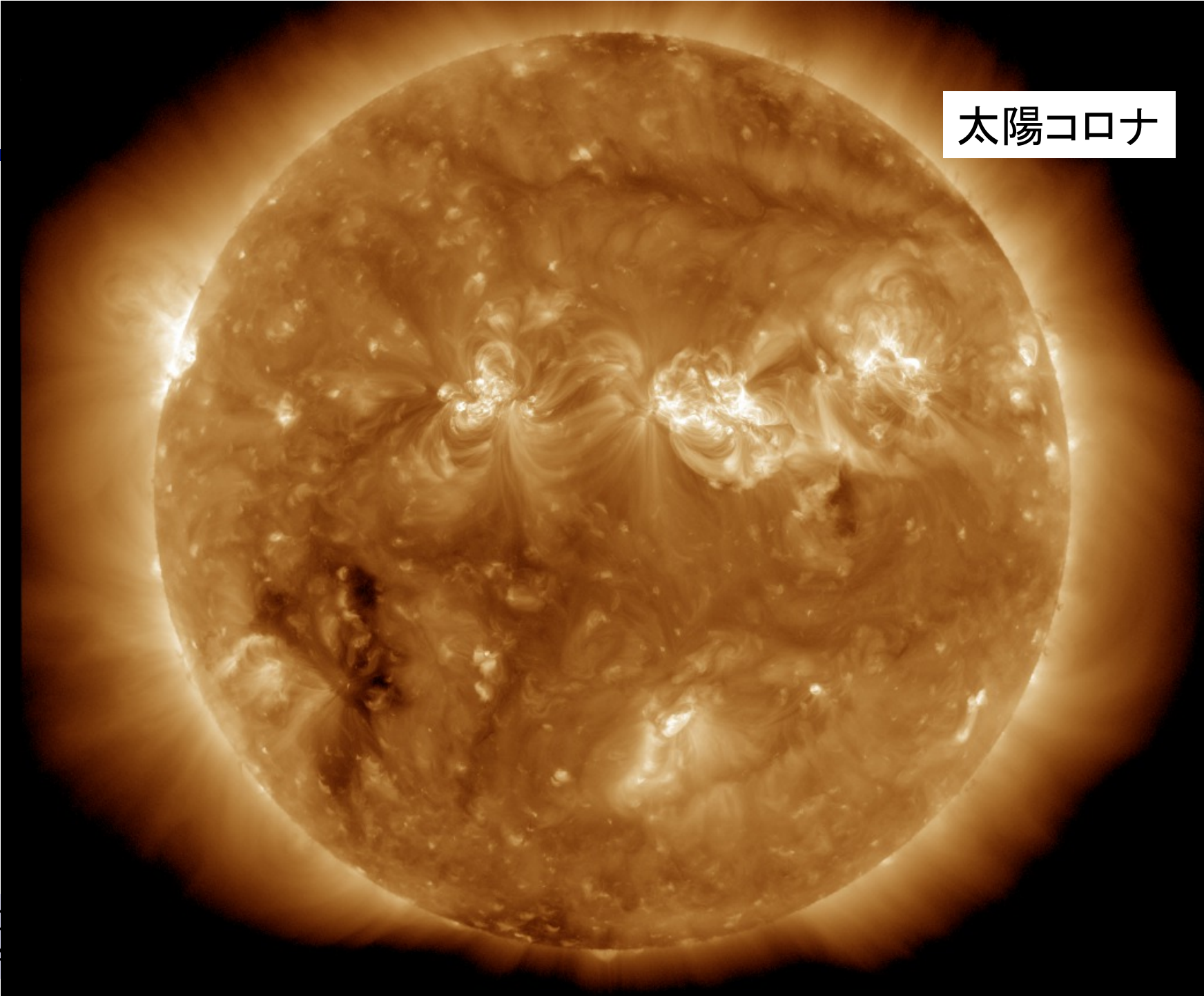
ひので科学センター@名古屋 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

最新の太陽観測 ひので衛星



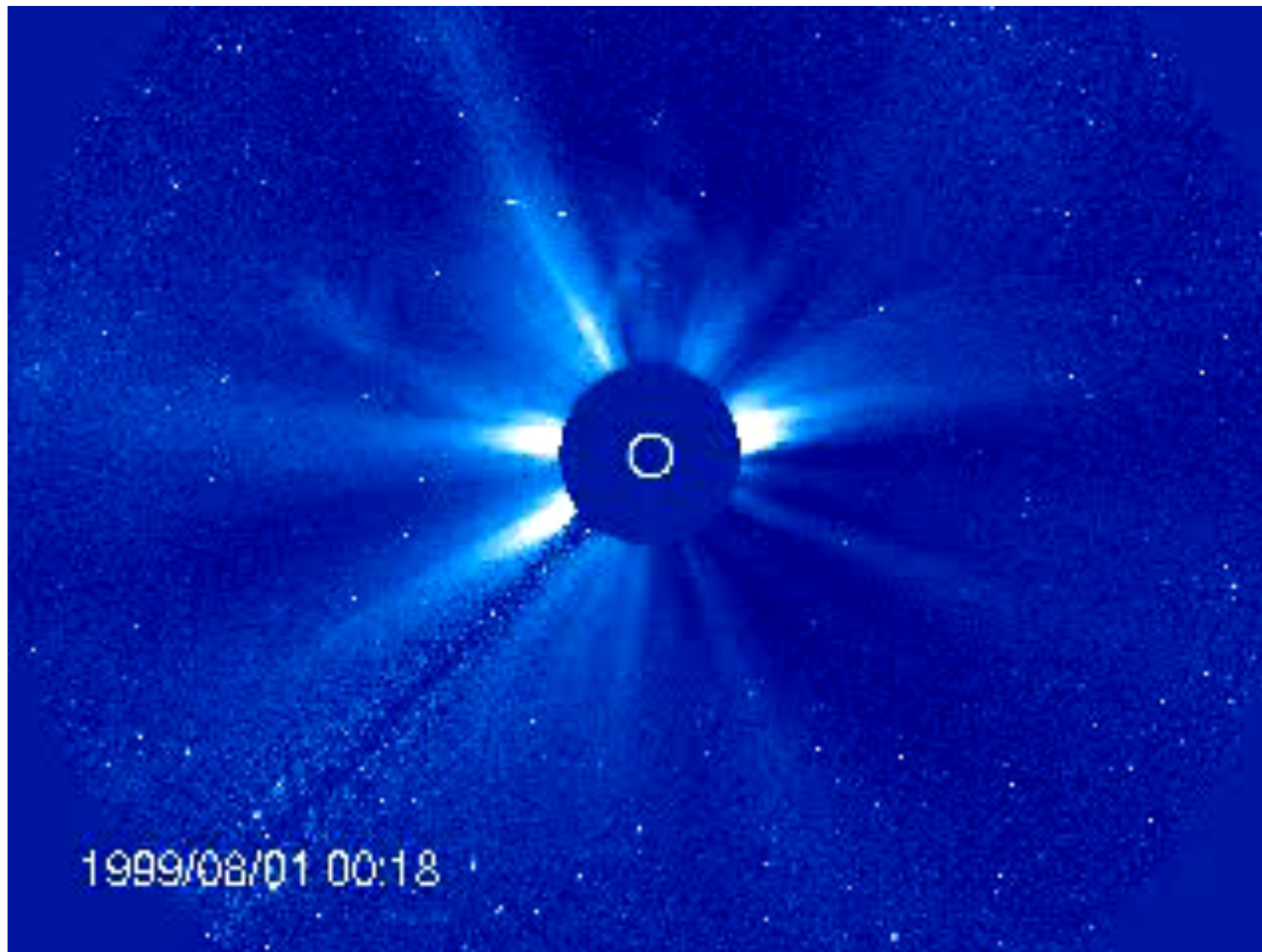
国立天文台
岡本文典氏提供

太陽コロナ



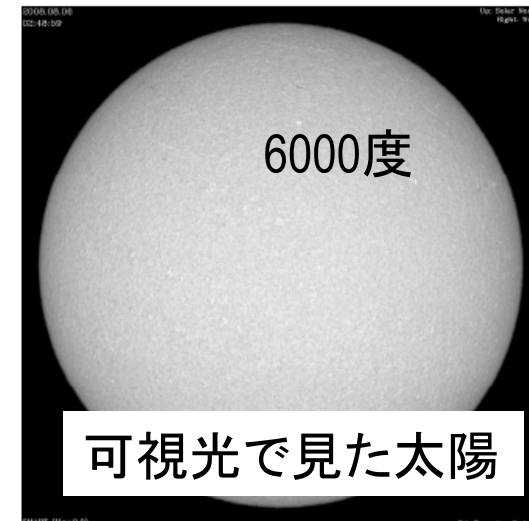
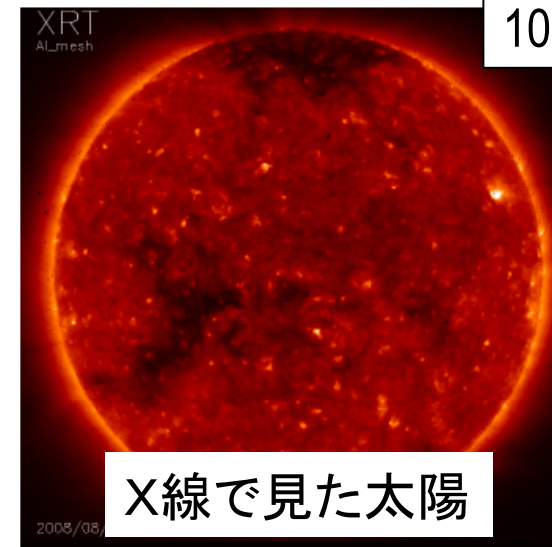
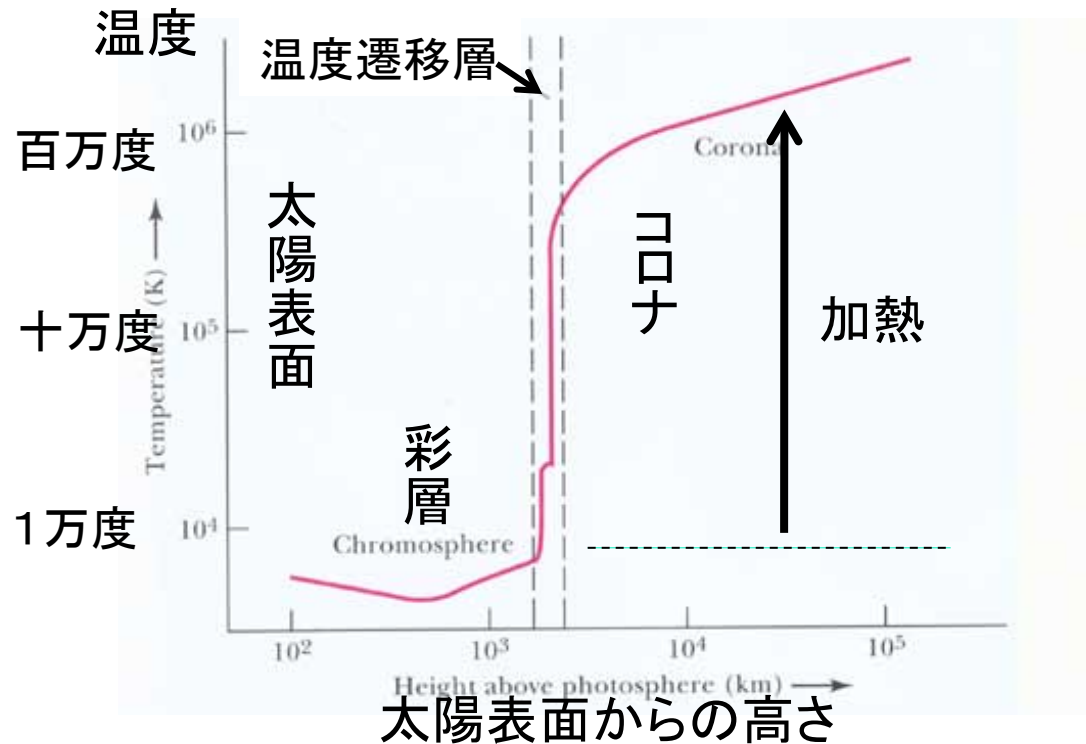
SDO
2011

太陽から吹き出す太陽風



太陽コロナの謎

■ 100万度のプラズマ

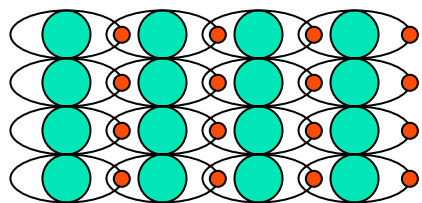


プラズマとは何か？

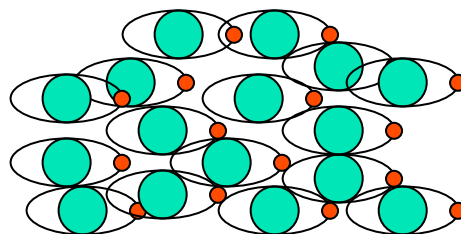
■ Three phases

相転移 (phase transition)

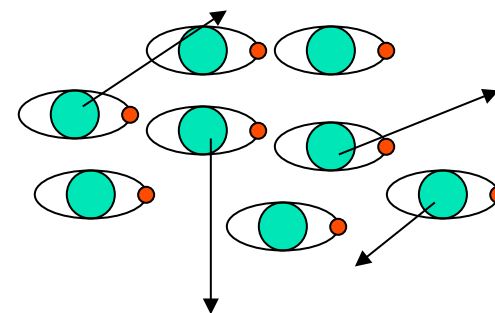
固体(solid)



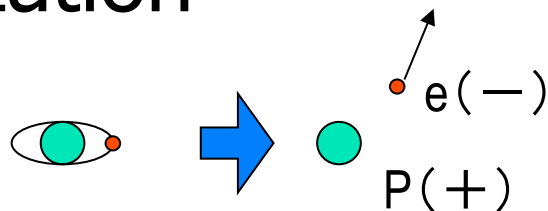
液体(liquid)



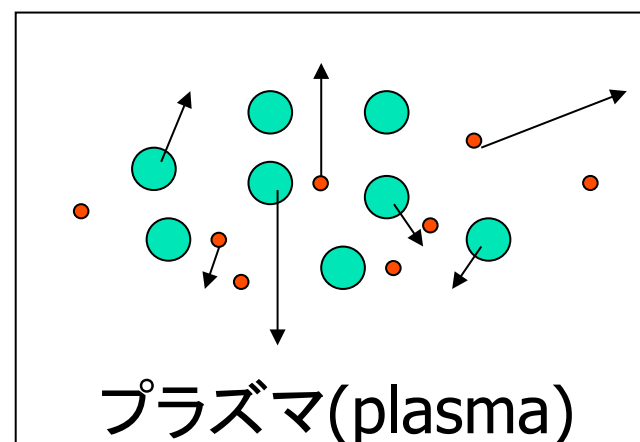
気体(gas)



■ ionization



$$m_p = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$



プラズマ(plasma)

solid

liquid

gas

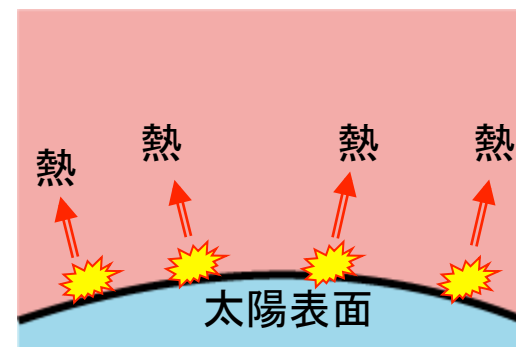
plasma

10⁴K 温度

コロナ加熱・太陽風加速問題の解明

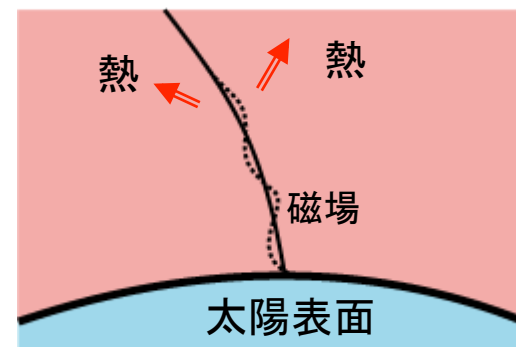
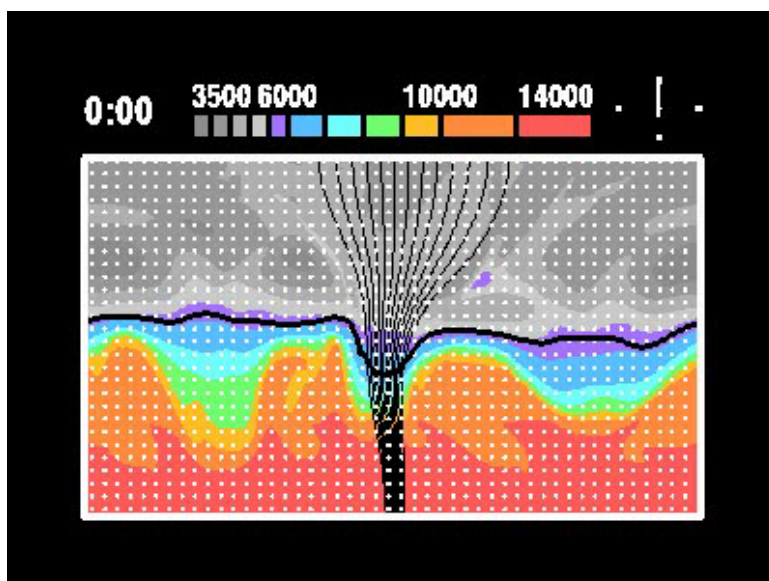
■ ナノフレア加熱

- 見えなくらい小さな爆発がたくさんある
- どれくらい小さい？

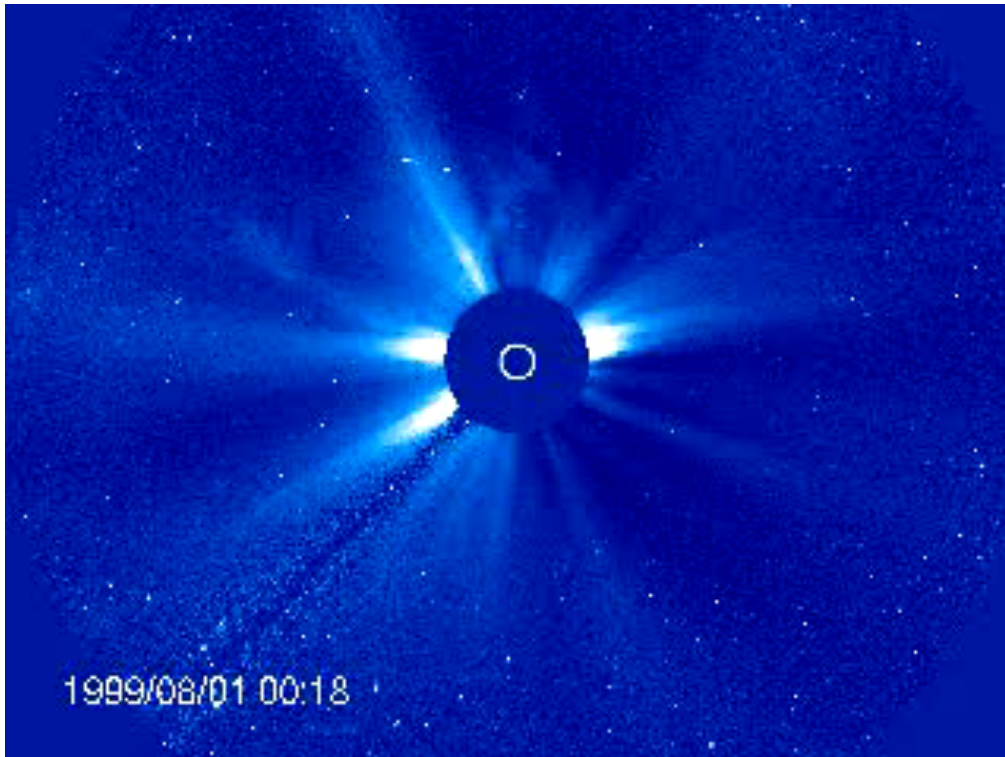


■ 波動加熱

- 磁場を揺すって、熱に換える



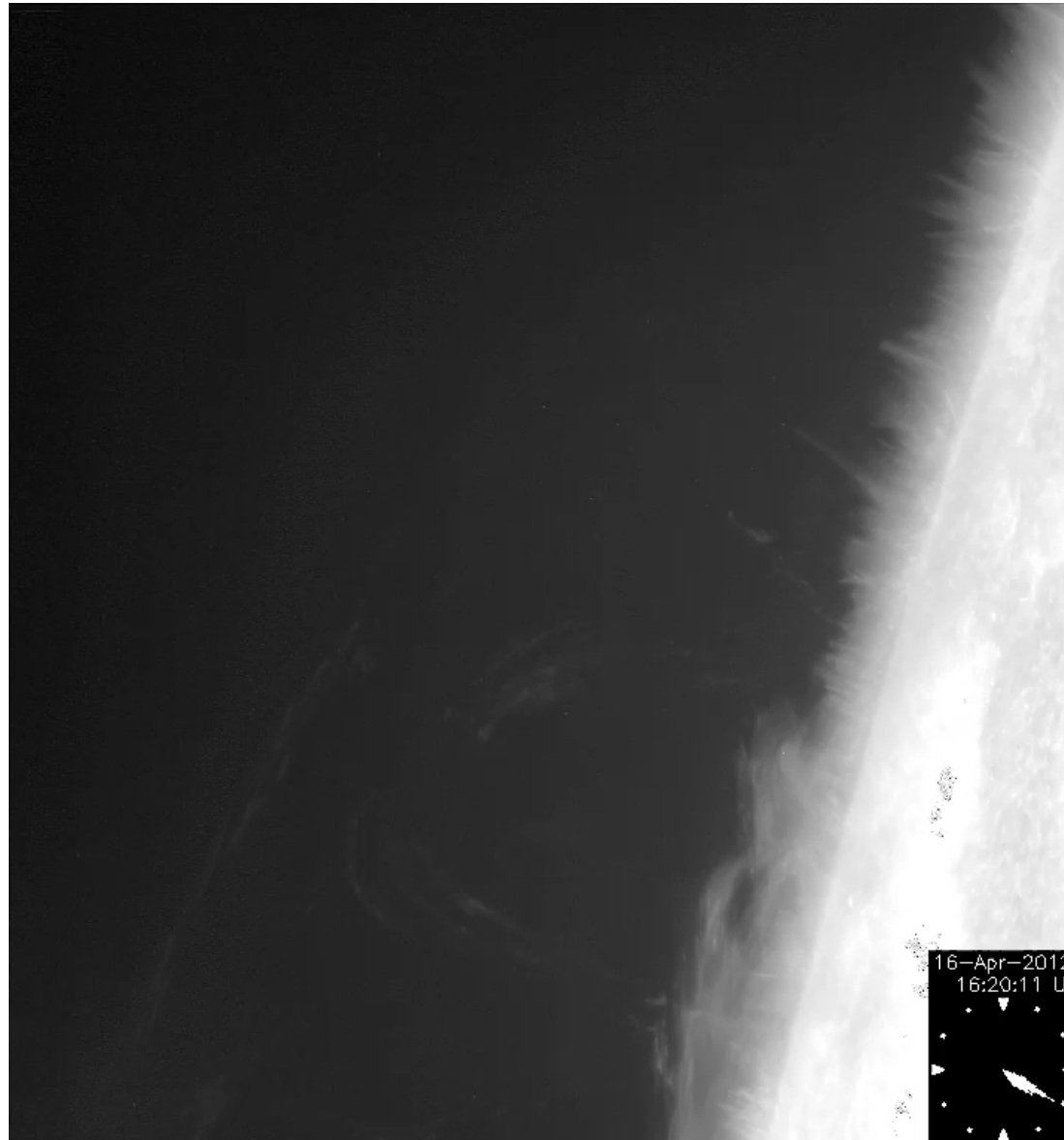
太陽風の質量損失は？



The Advanced Composition Explorer: ACE
惑星間空間で人工衛星が計っている

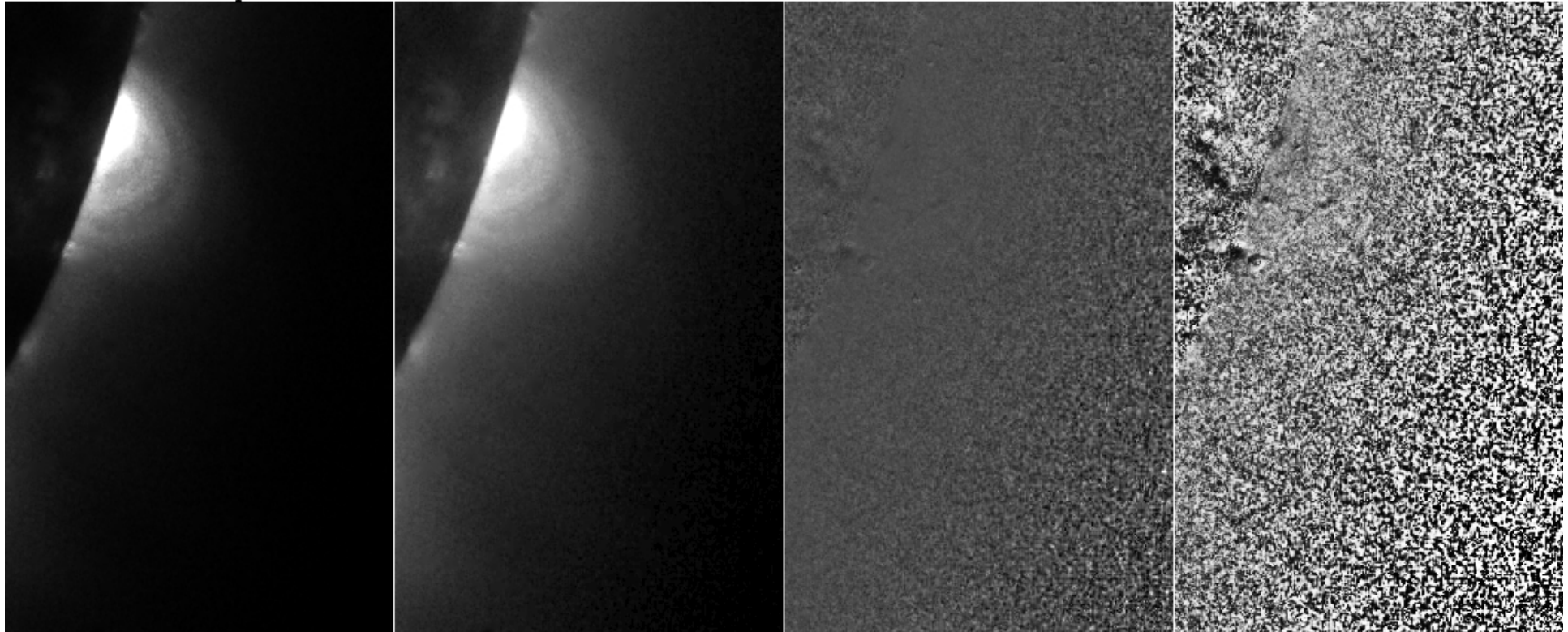
$2 \times 10^{-14} \times$ 太陽質量/年
45億年で0.01%の質量を失っている？

突発的な爆発による質量損失

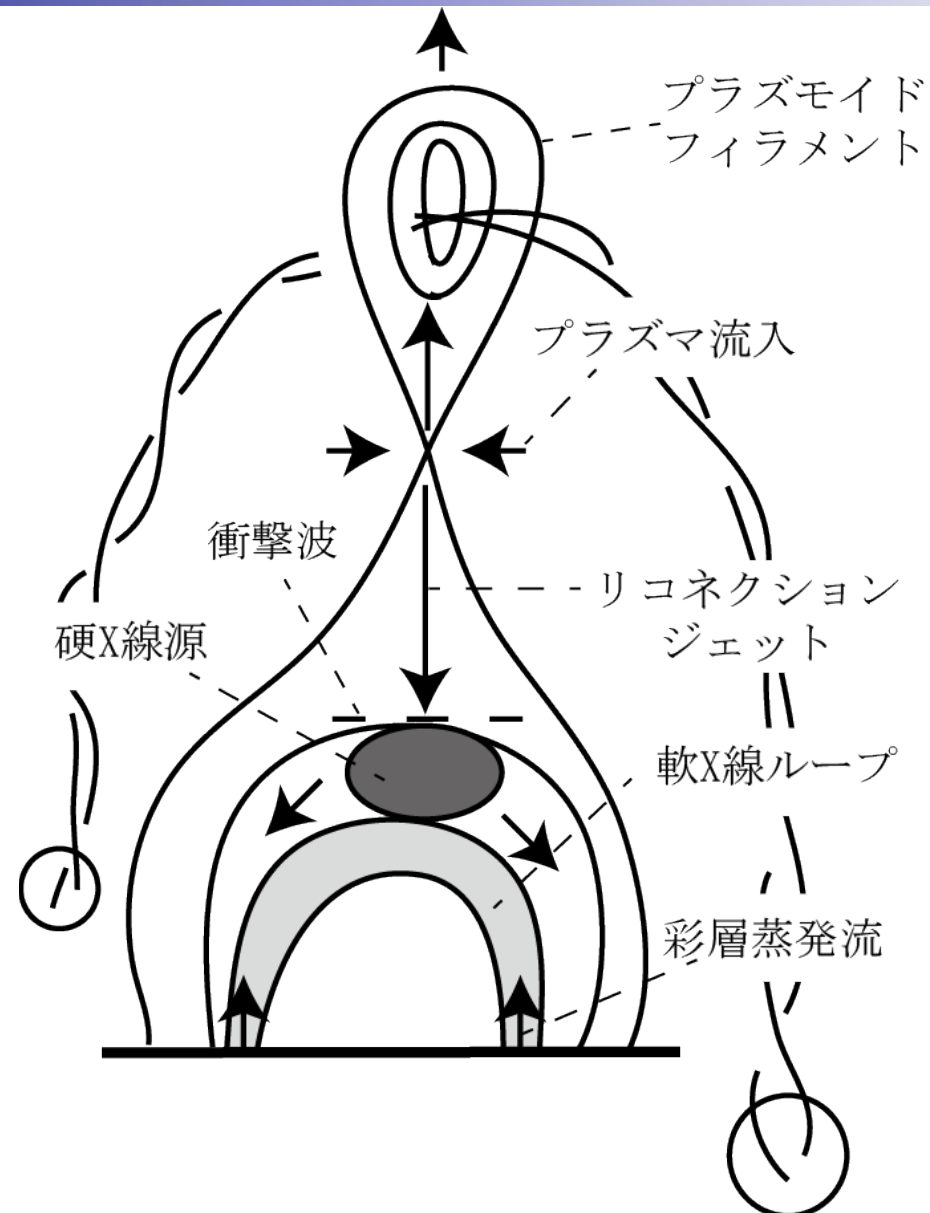


CMEによるmass loss

0 XRT 080409 9-Apr-2008 08:01:24.226

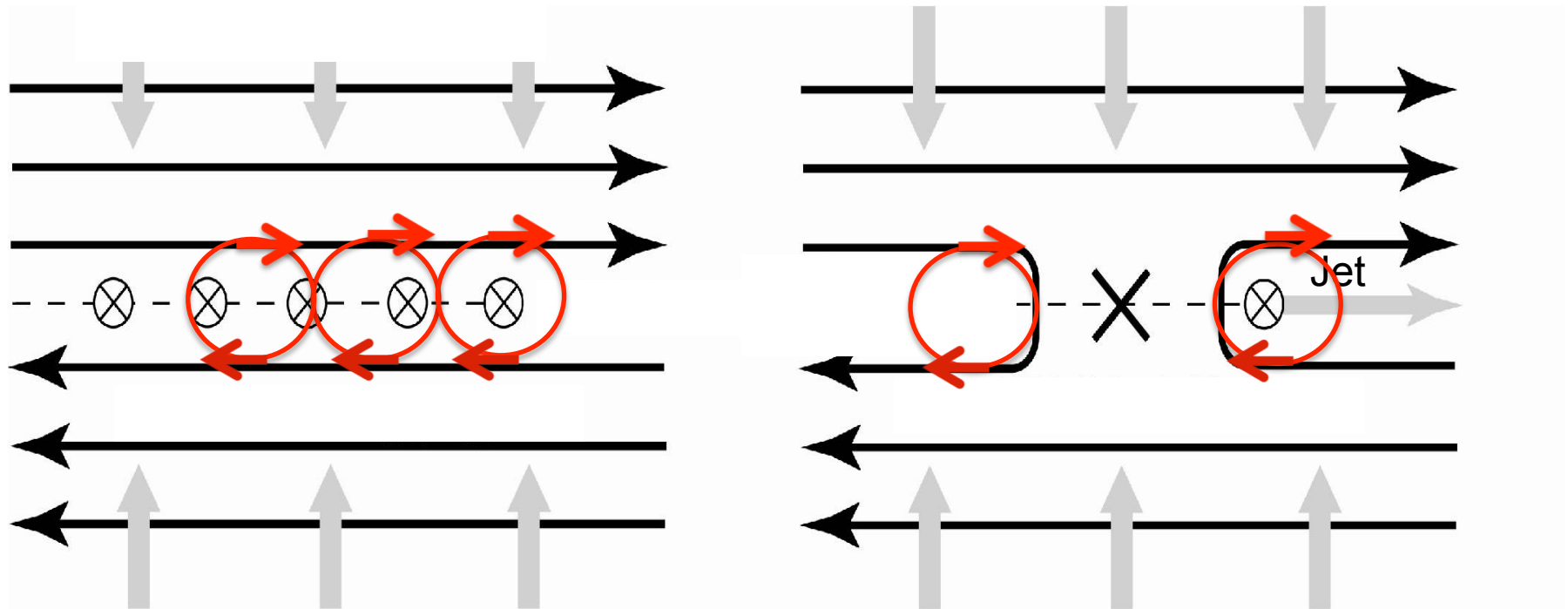


太陽フレア標準モデル



Shibata et al. 1995

Magnetic Reconnection



アンペールの法則
電流が流れにくくなったとすると？

現在のコロナ質量放出

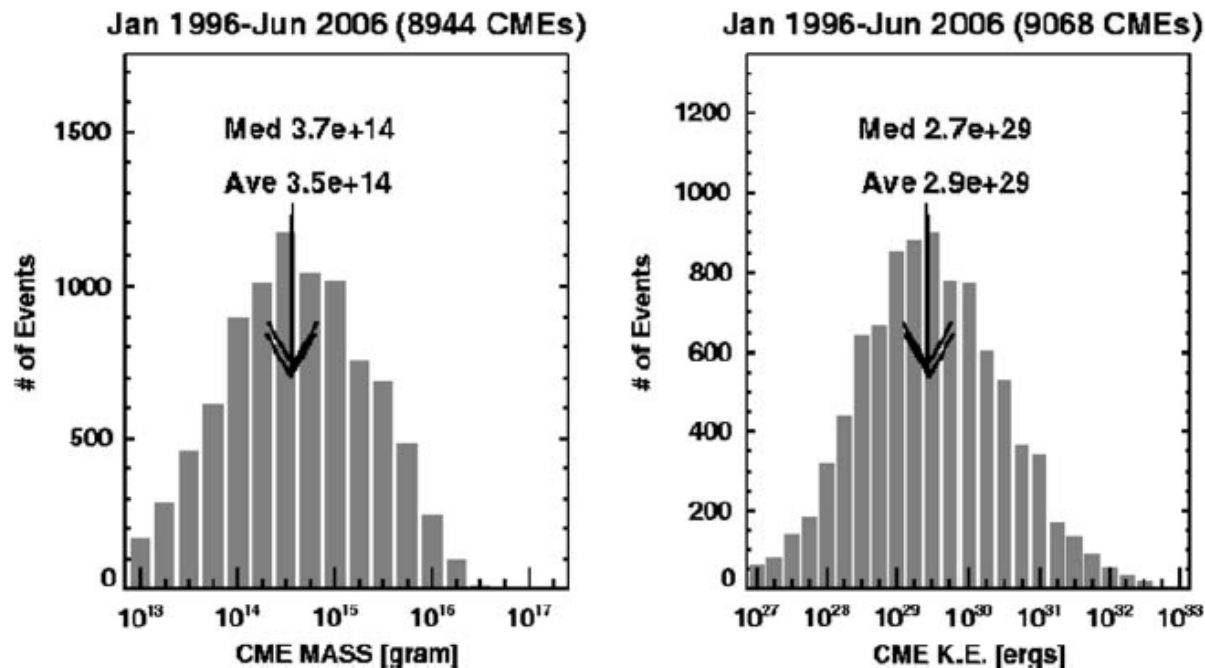


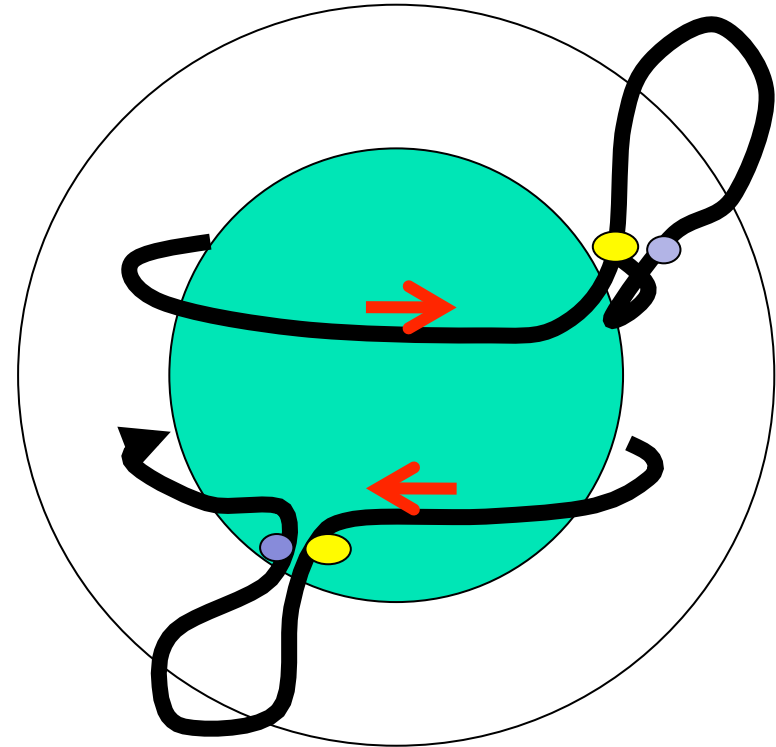
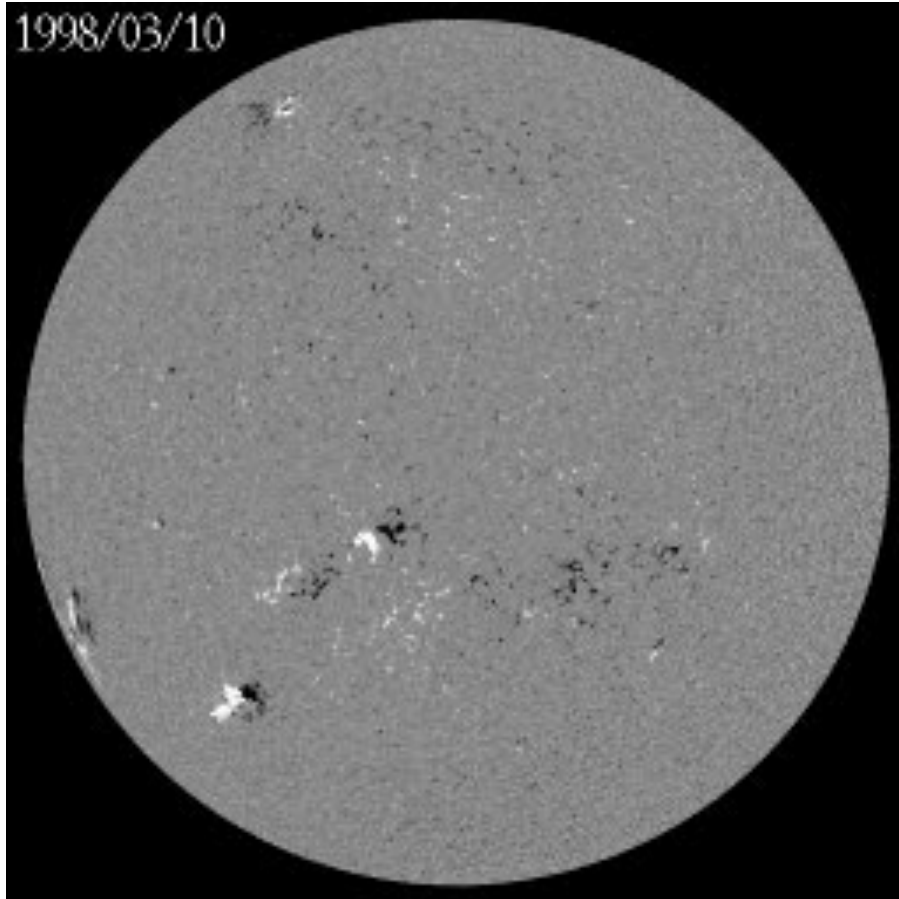
Fig. 11 Distributions of CME mass and kinetic energy of all CMEs for which mass and speed measurements were possible. The average (Ave) and median (Med) values of the distributions are shown on the plots

Gopalswamy+ 2009

$10^{-15} M_{\odot}/\text{yr}$ (定常太陽風の1割)程度で、
 $10^{-11} M_{\odot}/\text{yr}$ に達するには、4桁足りない。

昔の太陽のCME(磁気活動)は？

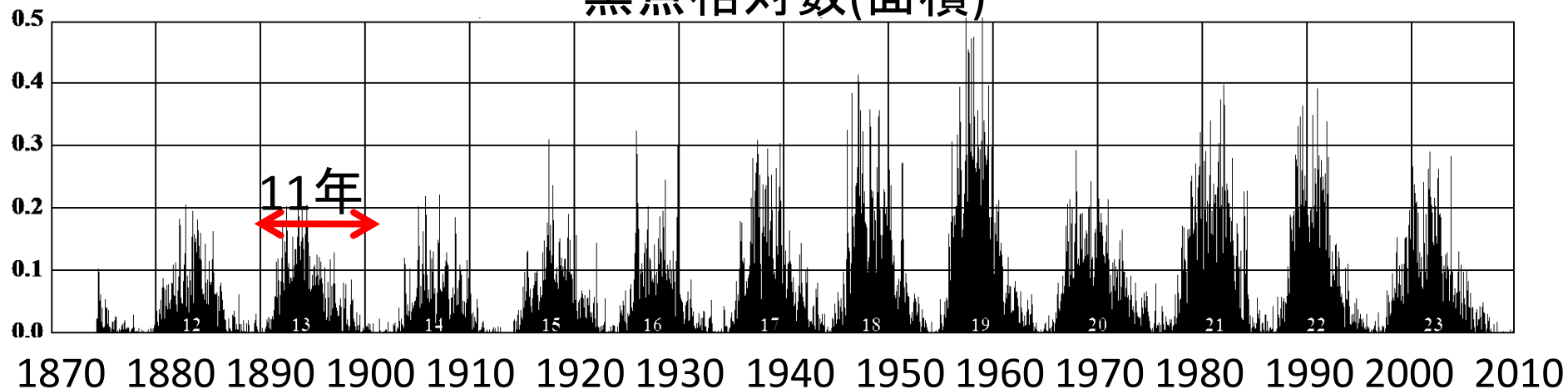
太陽黒点の形成



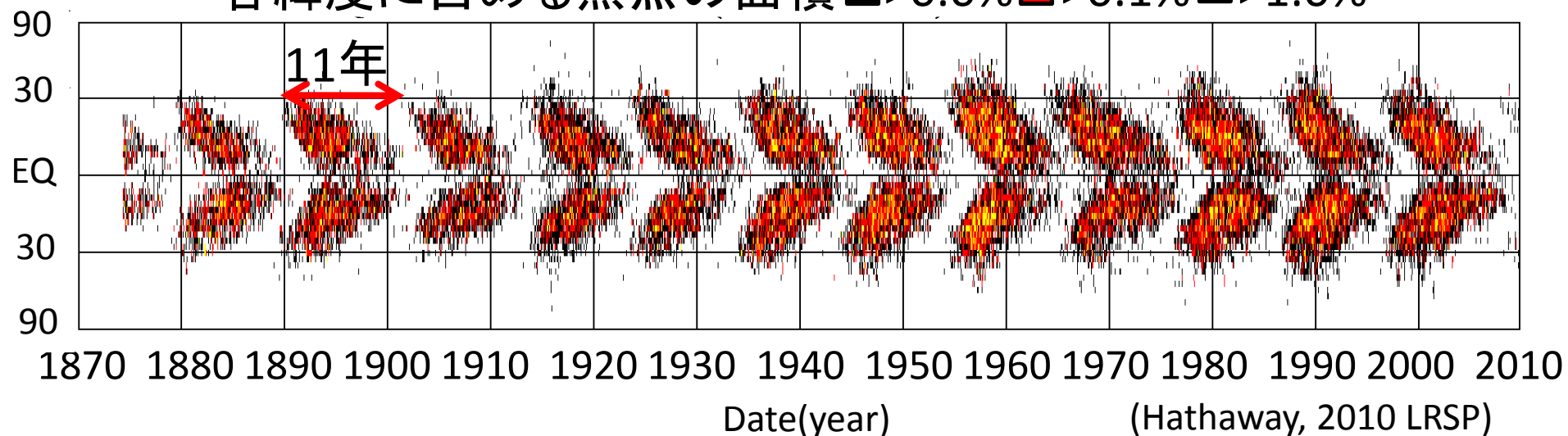
太陽黒点は太陽内部で生成された磁束管が表面に上昇してできる。

太陽の黒点数(面積)・磁場は11年の周期を持って変動している

黒点相対数(面積)

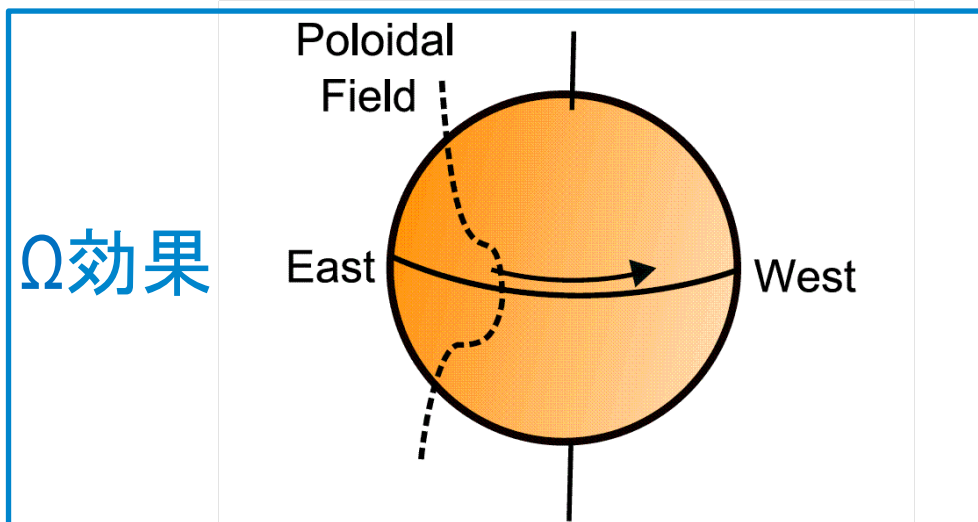


各緯度に占める黒点の面積 ■ >0.0% ■ >0.1% ■ >1.0%

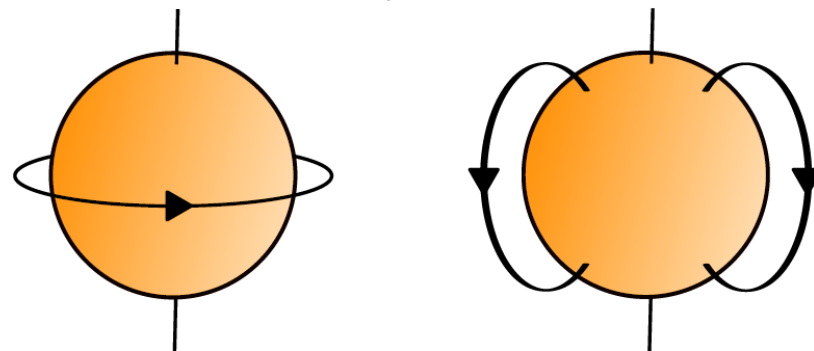


太陽ダイナモ

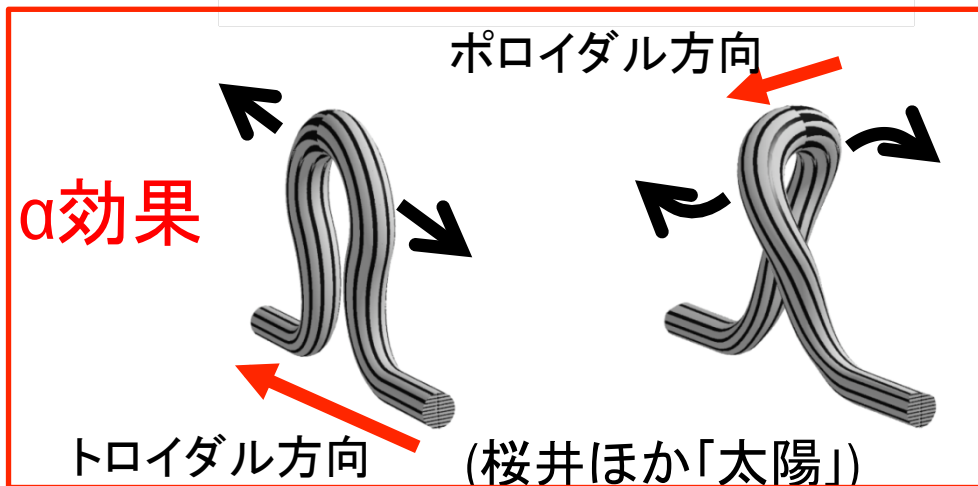
太陽の磁場活動を駆動していると考えられているのが**太陽ダイナモ**



トロイダル磁場(B_ϕ)ポロイダル磁場(B_r, B_θ)



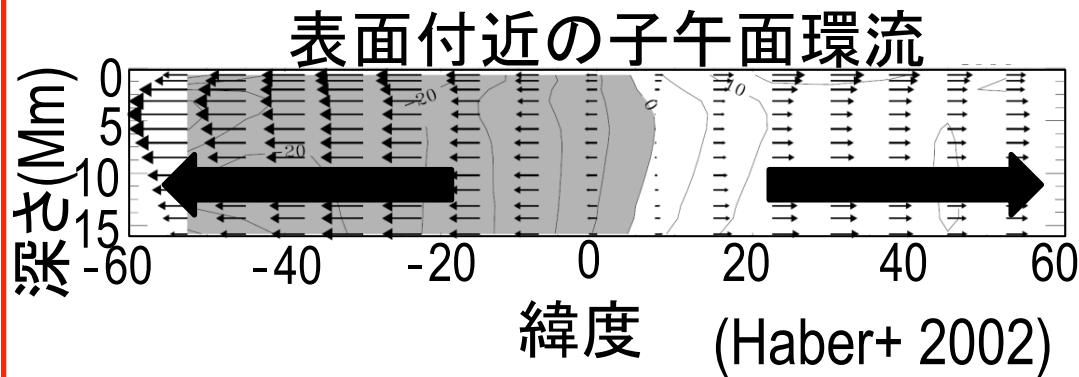
Ω 効果: 差動回転により磁場を引き延ばす。ポロイダル磁場からトロイダル磁場



α 効果: いつどこで、効果が効いているのか諸説あるが、コリオリ力によって、磁場の方向を変える。トロイダル磁場からポロイダル磁場

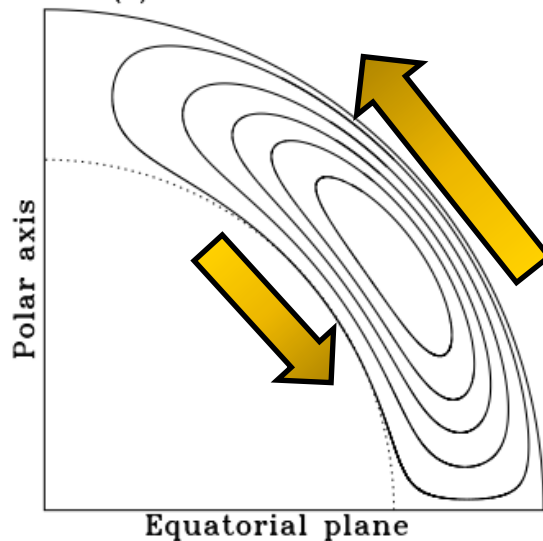
太陽ダイナモに関する観測事実

表面付近で極へ向かう子午面環流
が見つかった。**磁束の輸送に重要**

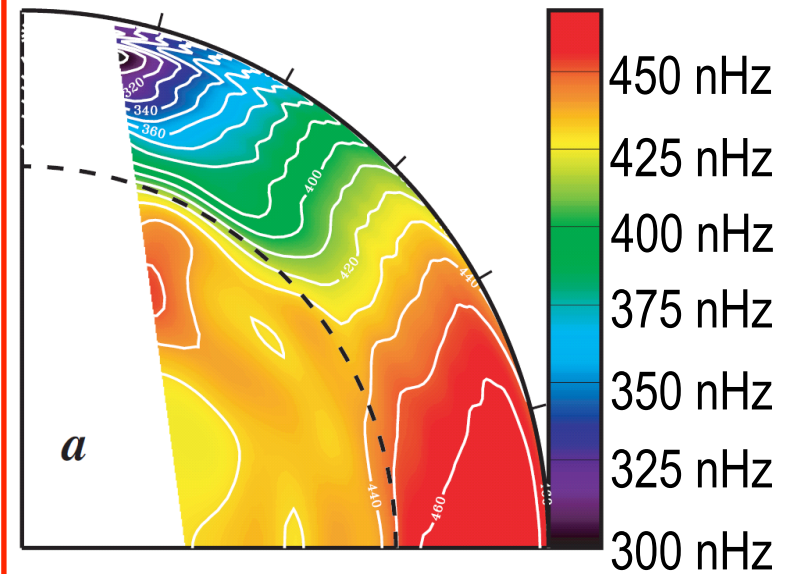


**考えられている
子午面環流**

質量保存を考えて
対流層の底では
赤道へ向かう流れ
(Charbonneau 2005)



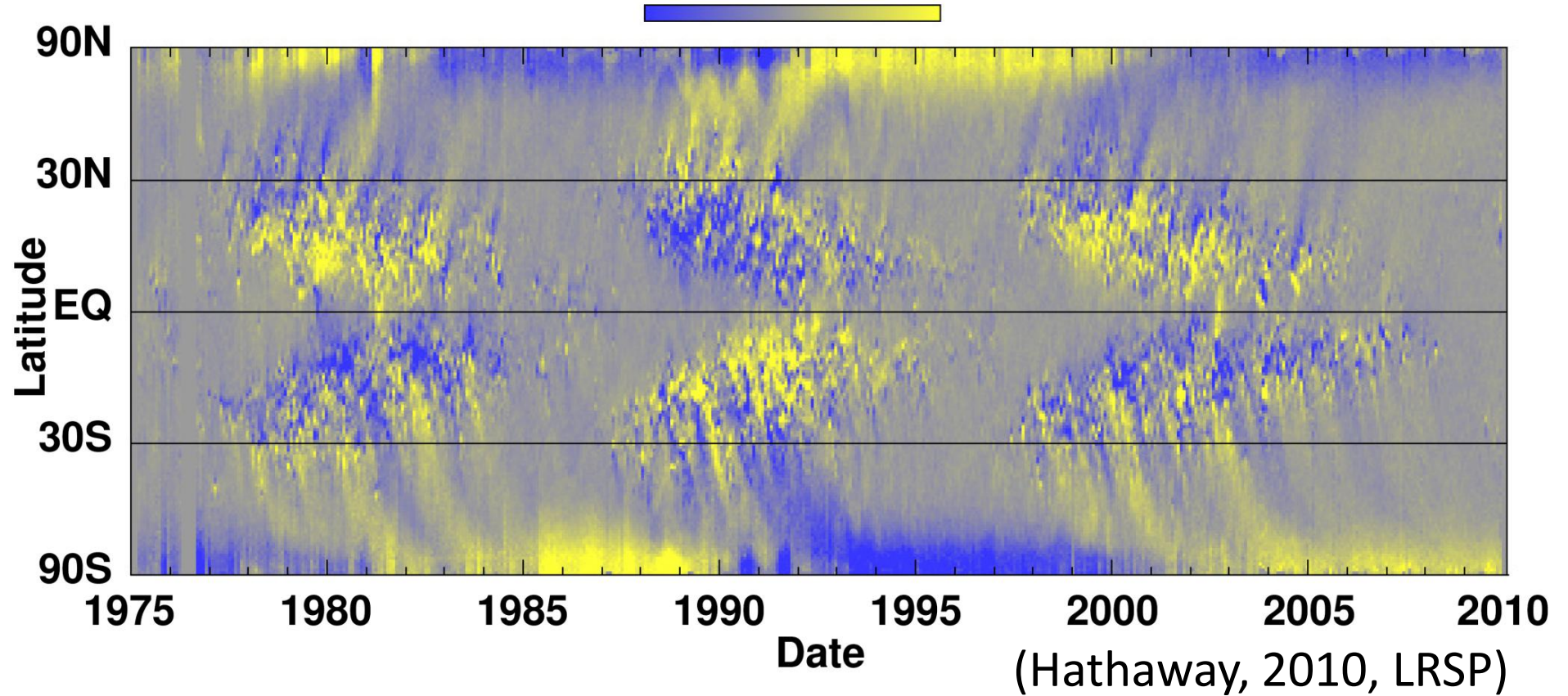
日震学が明らかにした
太陽内部の角速度分布。
対流層の底にtachocline
と呼ばれる。角速度勾配層
がある **Ω 効果に重要**



(Thompson+ 2003, ARAA)

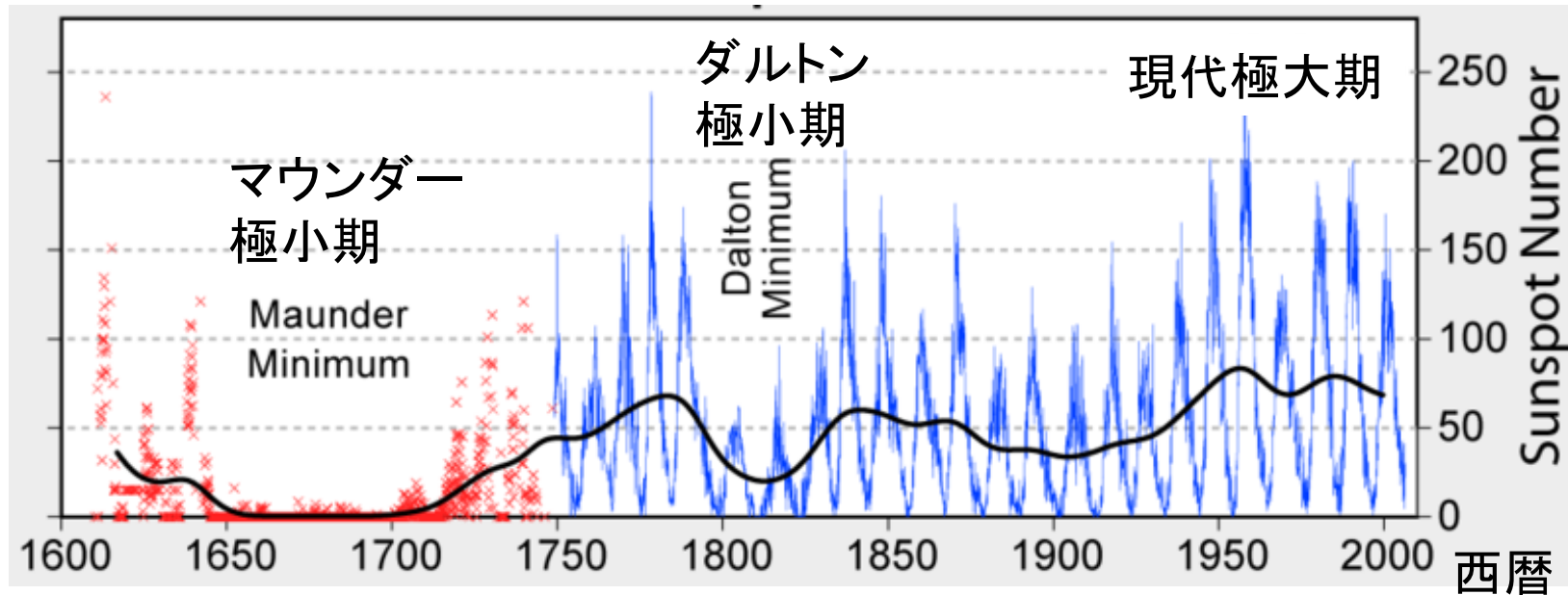
磁場の22年周期

-10G -5G 0G +5G +10G

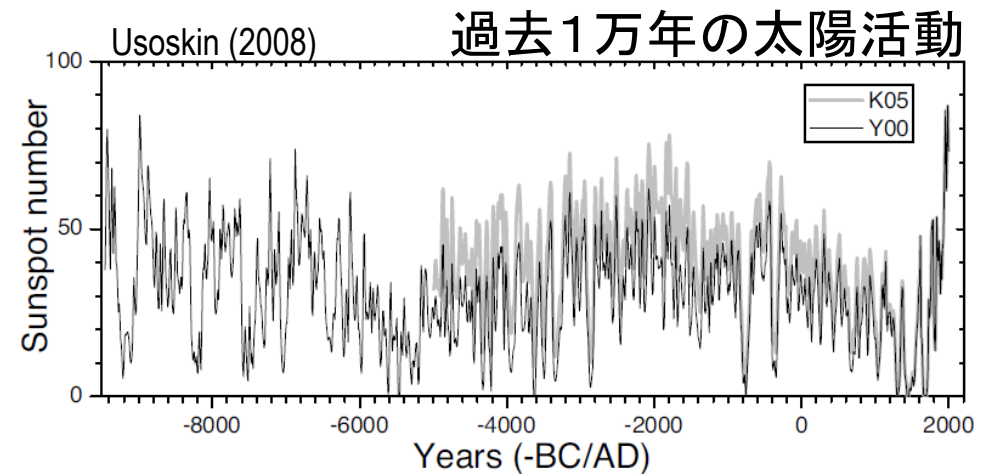


黒点周期活動の謎

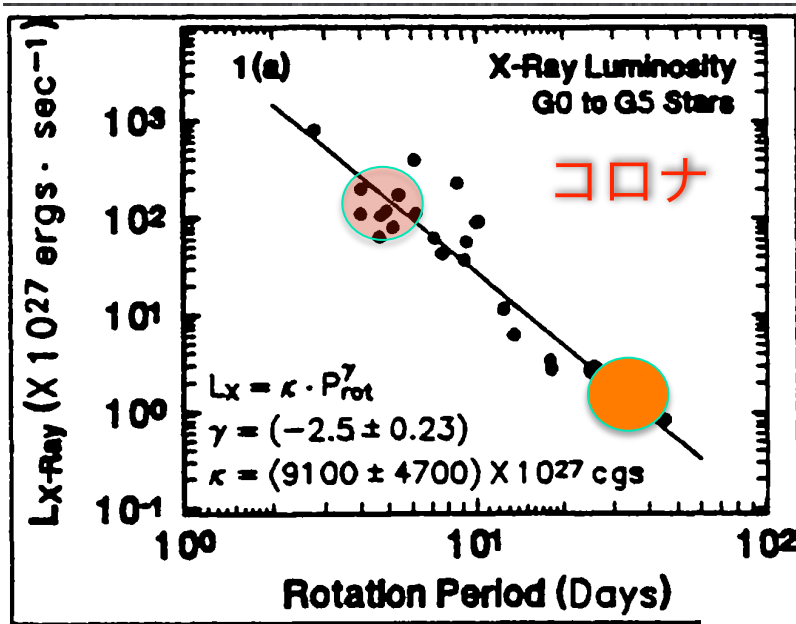
過去400年の黒点数



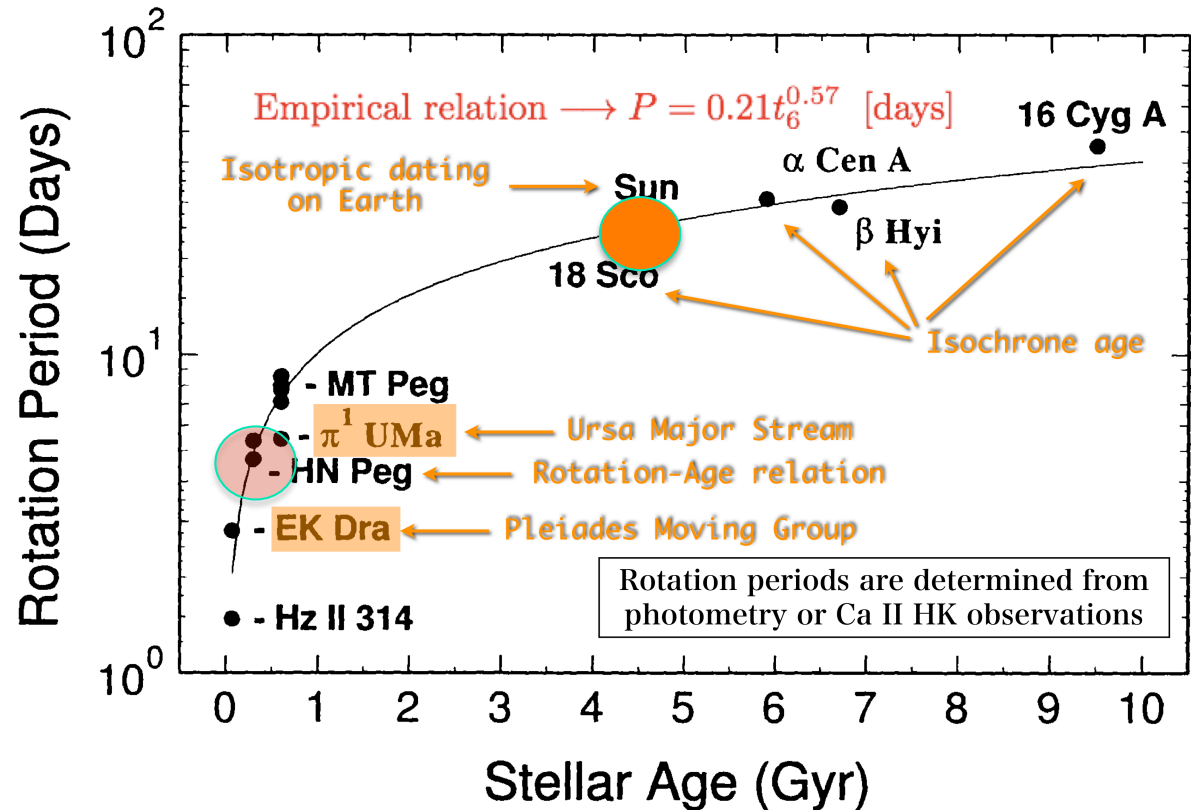
小氷期



星の年齢とX線強度



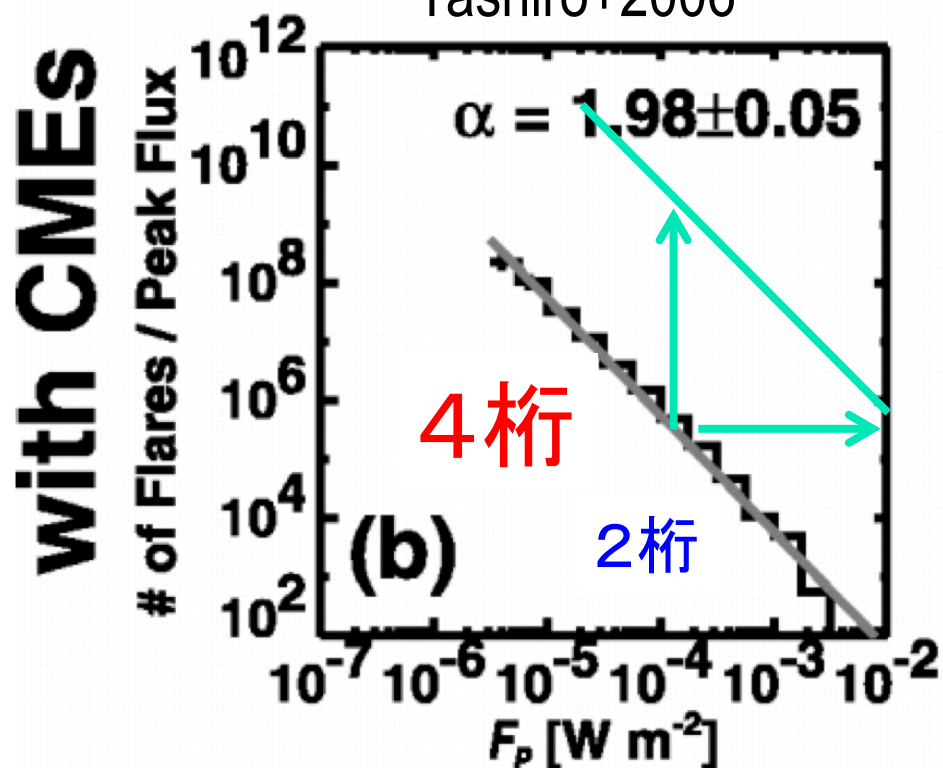
初期太陽は回転が早く、
2～3桁X線強度が高い



現在のCMEとX線強度

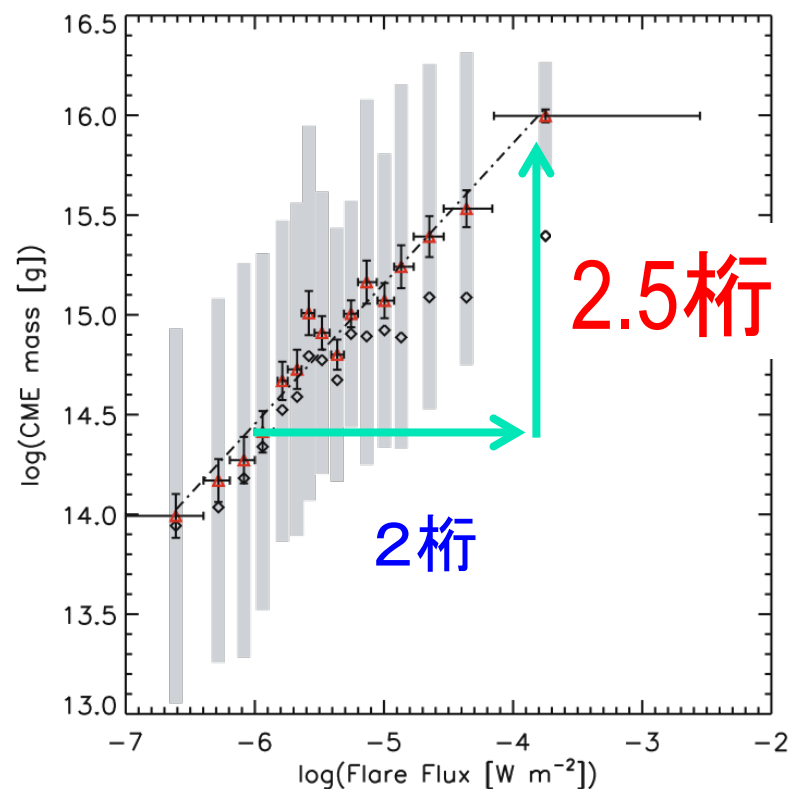
頻度とX線

Yashiro+2006



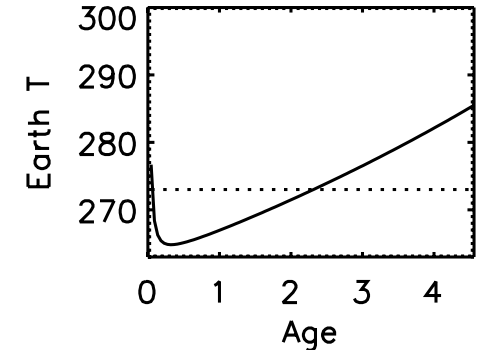
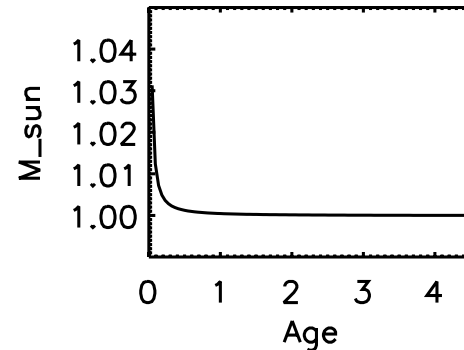
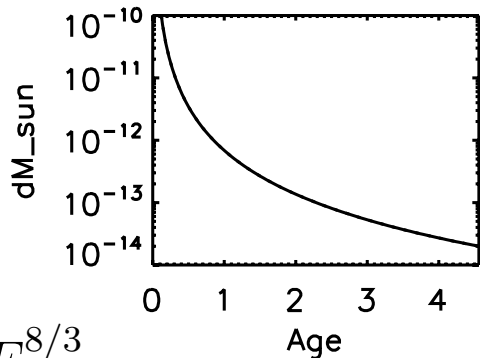
1回当たりの質量とX線

Aarnio+2011



CME mass loss効果を加える

現在



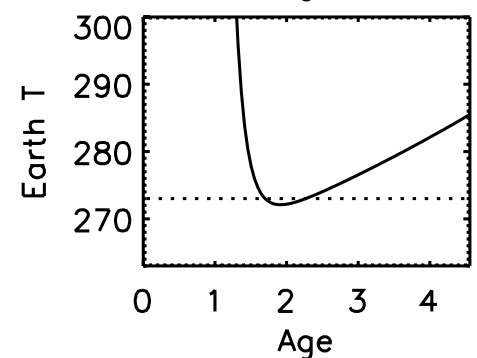
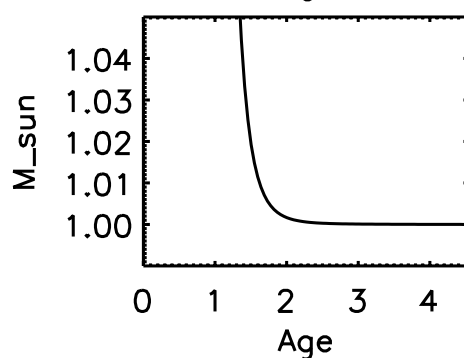
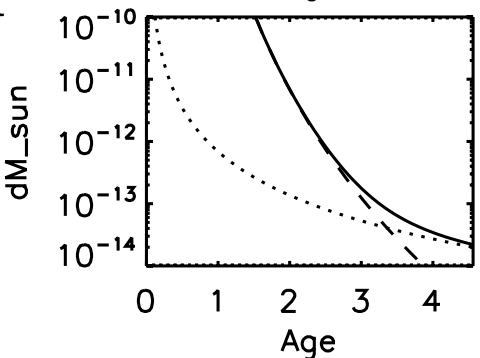
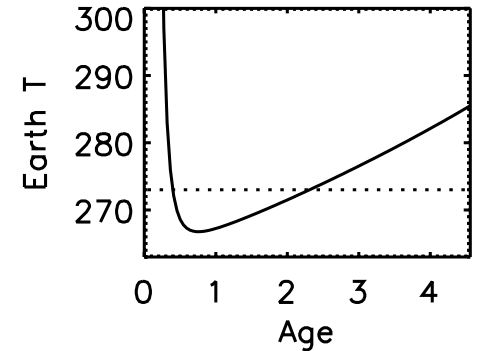
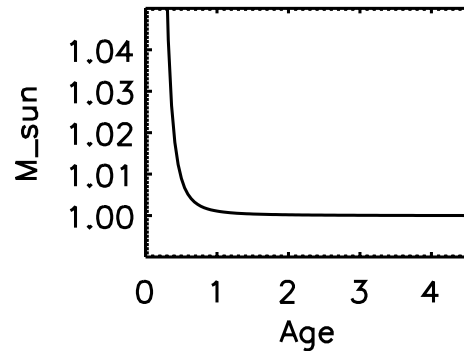
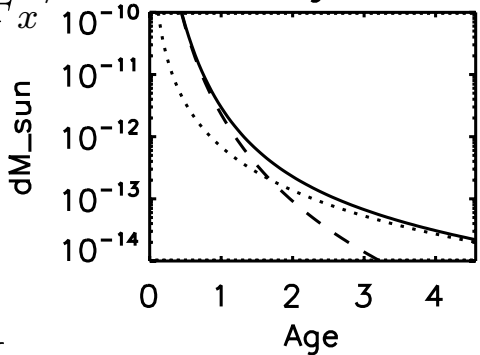
$$\dot{M}_{CME} \propto F_x^{8/3}$$



CME



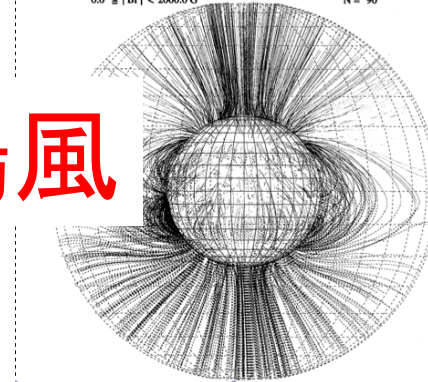
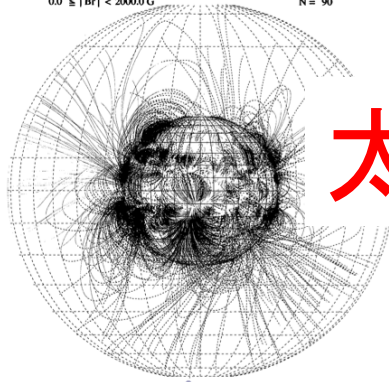
$$\dot{M}_{CME} \propto F_x^{17/3}$$



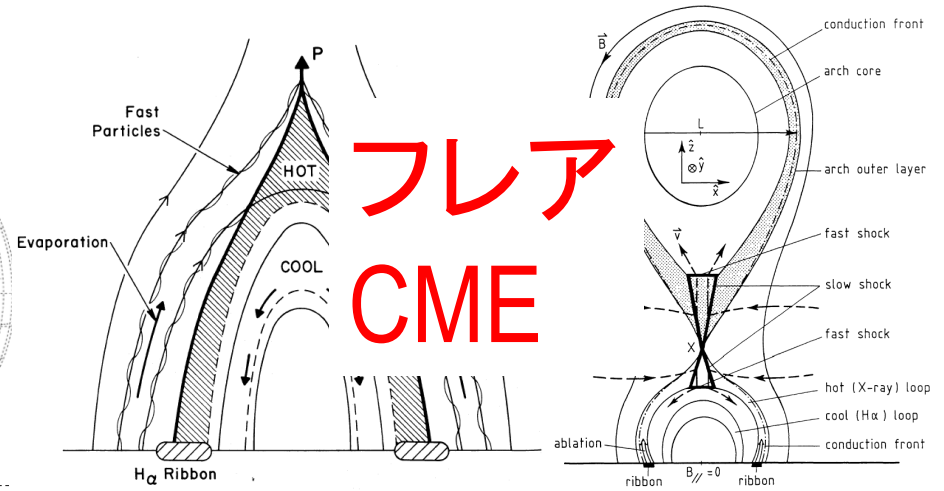
太陽物理学の基本課題

Solar Maximum:
 Carrington Rotation Number = 1830 (Cosine Theta)
 Longitude = 0.0 dgr Latitude = 0.0 dgr
 0.0 ≤ |B_r| < 2000.0 G N = 90

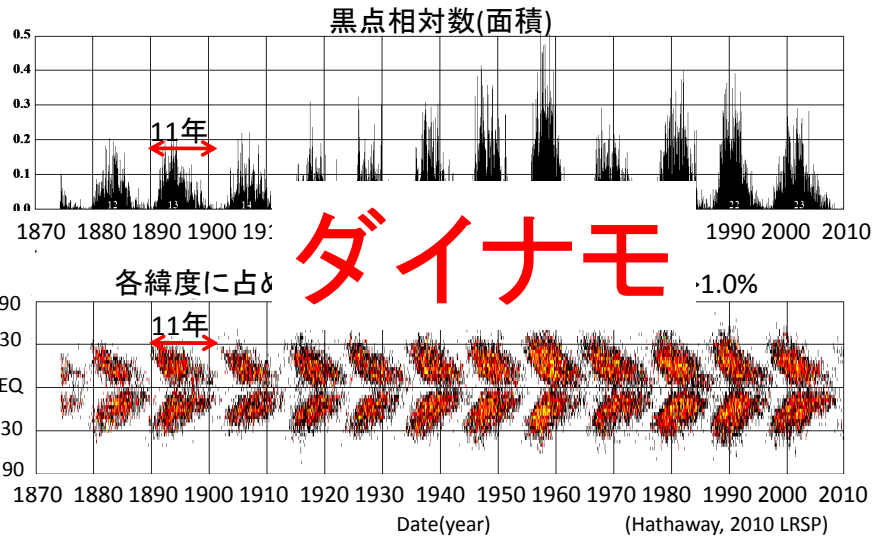
Solar Minimum:
 Carrington Rotation Number = 1909 (Cosine Theta)
 Longitude = 0.0 dgr Latitude = 0.0 dgr
 0.0 ≤ |B_r| < 2000.0 G N = 90



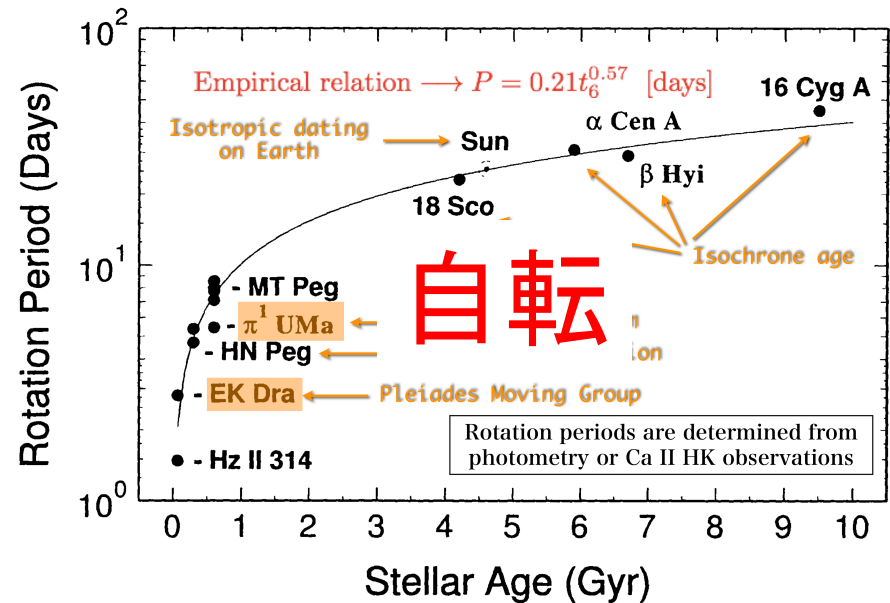
太陽風



フレア
CME



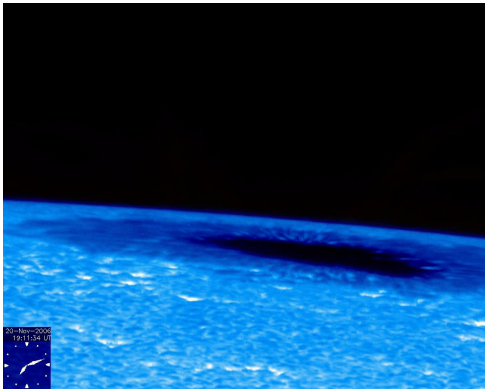
ダイナモ



なぜ、太陽研究は面白い！

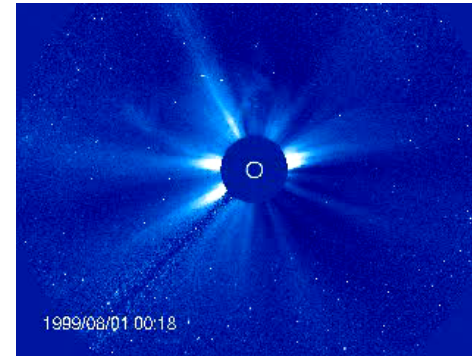
非線形プラズマ現象の宝庫

巨大なプラズマの実験室



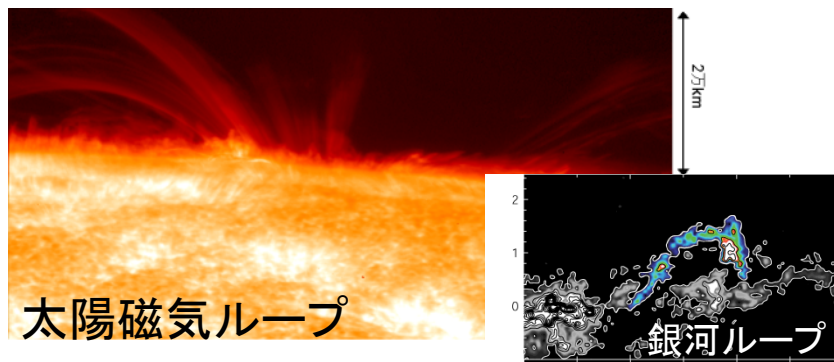
複合システムとしての太陽

太陽フレア・太陽風・ダイナモ



地球に最も近い恒星

様々な天体現象をひも解く鍵



宇宙天気・地球環境

への影響

