

2013年度 京都産業大学
集中講義特論IA
太陽物理学

磯部洋明

京都大学学際融合教育研究推進センター
宇宙総合学研究ユニット

質問等あれば

isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp

短いのなら

twitter @isobehiroaki

2013年7月31日-8月1日

シラバスより

- 第1回 太陽とはどんな星か1: 多波長で見られる様々な現象の紹介
- 第2回 太陽とはどんな星か2: 内部構造と大気
- 第3回 プラズマと電磁流体力学の基礎
- 第4回 太陽物理学の様々な課題: コロナ加熱、フレア、ダイナモ
- 第5回 最新の太陽研究
- 第6回 太陽と地球環境: 宇宙天気と宇宙気候

- 恐らく「プラズマと電磁流体力学の基礎」に2コマかけます

目標

- 太陽についての基本的な知識を得る
- 最新の太陽研究の一端に触れる
- 太陽活動とその地球環境及び人類活動への影響を知る
- 物理学を使って現象を大雑把に理解する、という訓練

- ナビエ・ストークス方程式
- 静水圧平衡
- ラーモア半径
- スペクトル線

太陽

諸元

表面温度(有効温度) $\approx 5780\text{K}$

質量 $\approx 10^{30}\text{kg}$

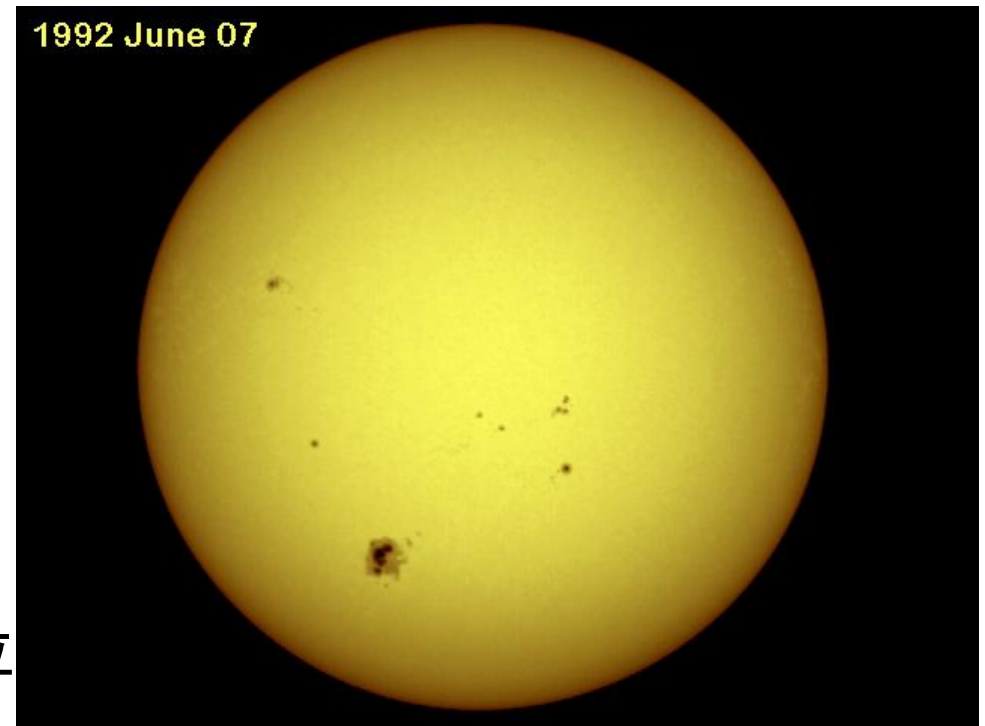
半径 $\approx 70\text{万km}$

年齢 \approx 約45億歳

総放射量 $\approx 3.85 \times 10^{26}\text{W}$

太陽と地球との距離 = 1天文単位

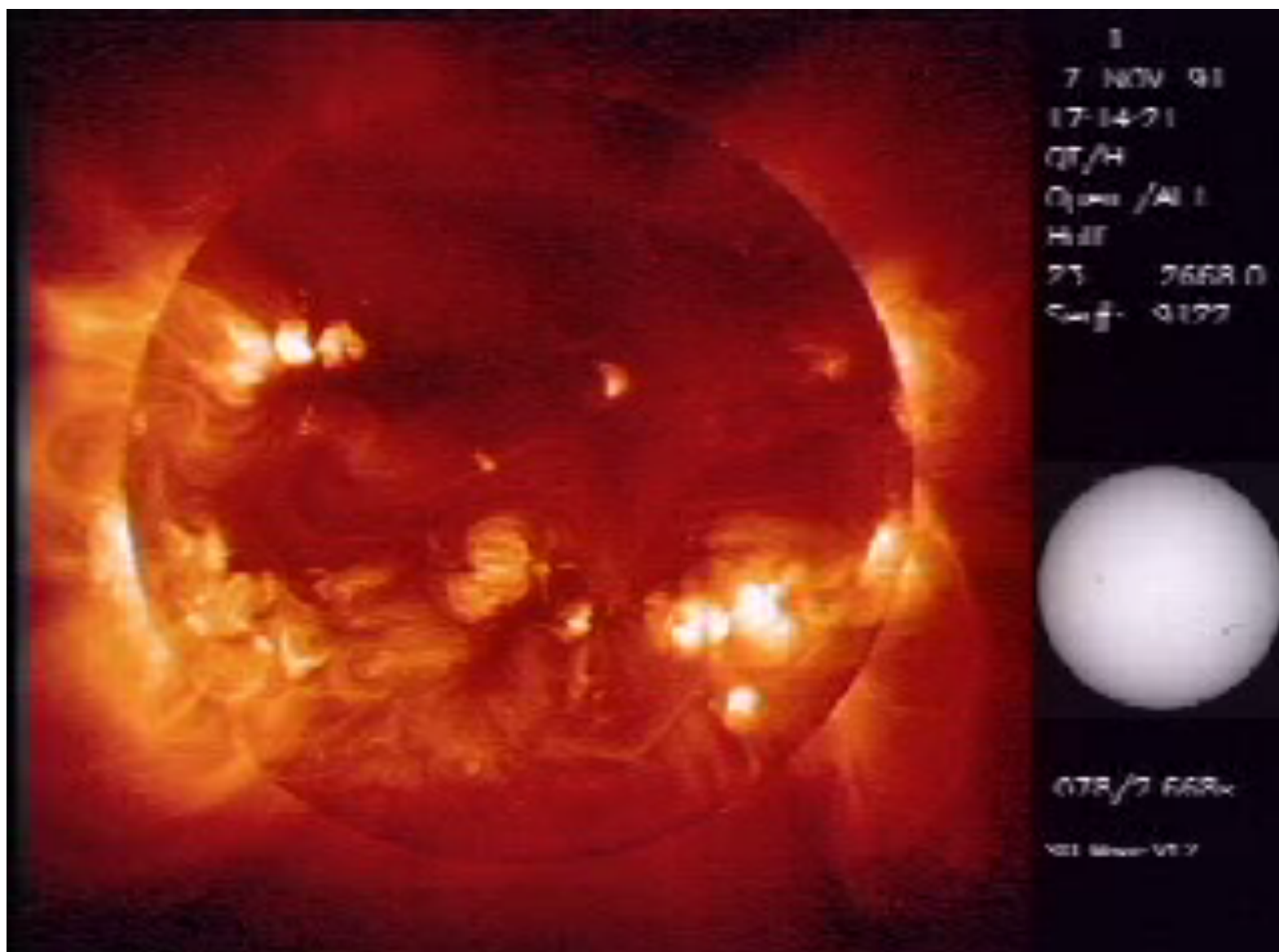
$= 1.5 \times 10^{11}\text{m}$



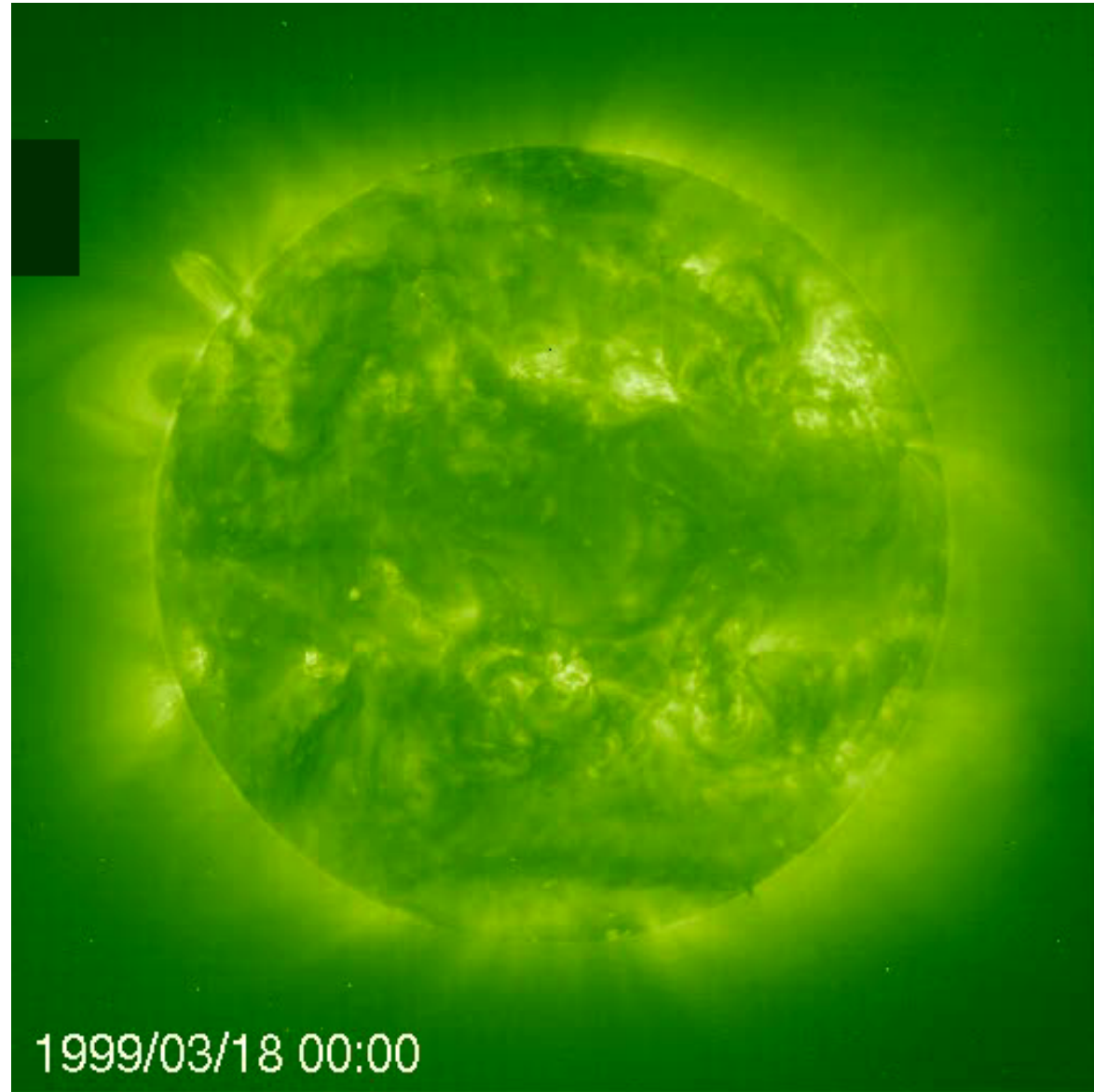
ほとんど水素。
10%くらいヘリウム
微量の重元素

問題:地球上で 1m^2 あたり1秒間に降り注ぐ
太陽エネルギーはどれくらいか。
(地球大気の吸収は無視)

X線で見た太陽

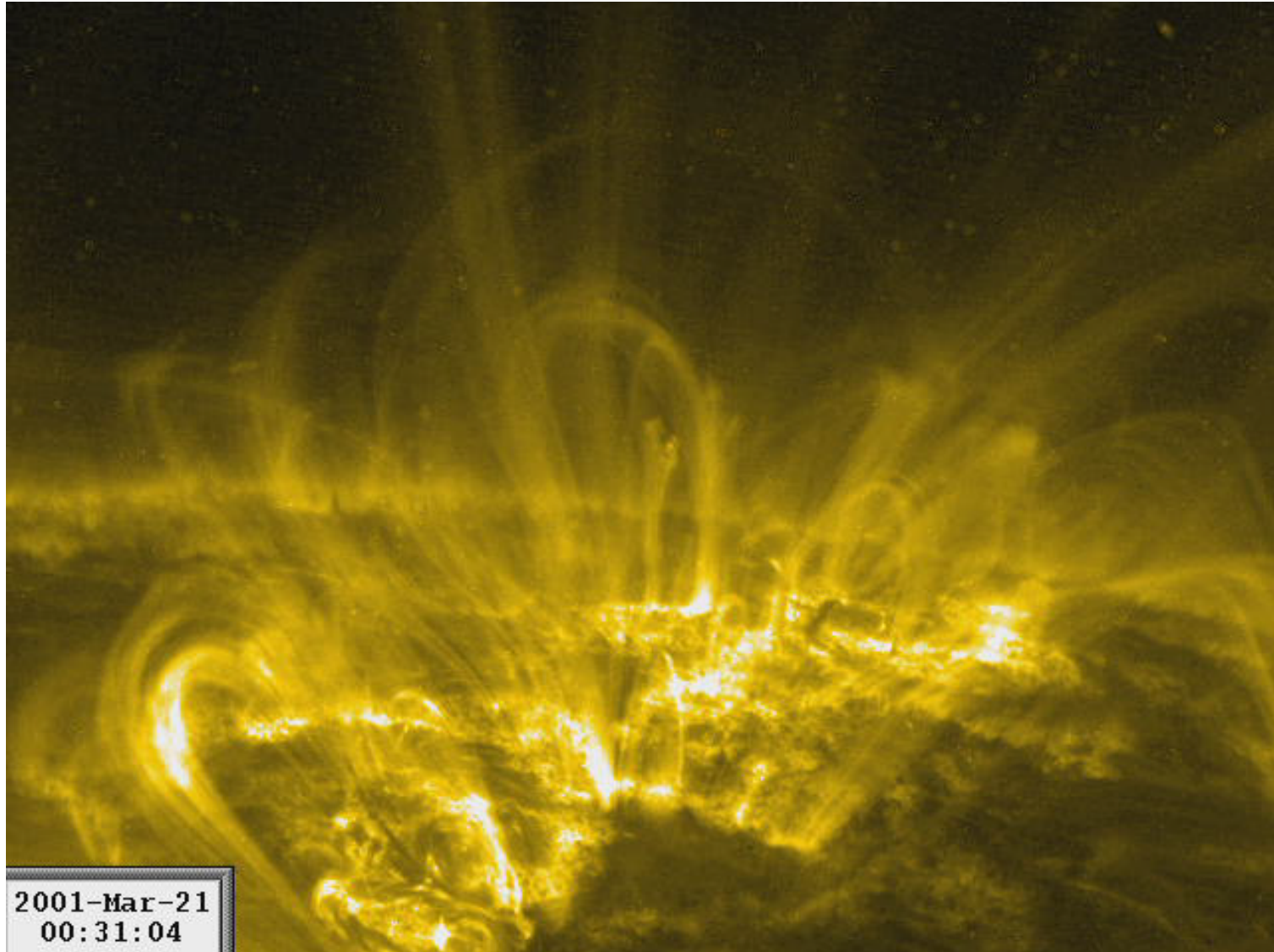


紫外線で見た太陽



SOHO衛星/EIT

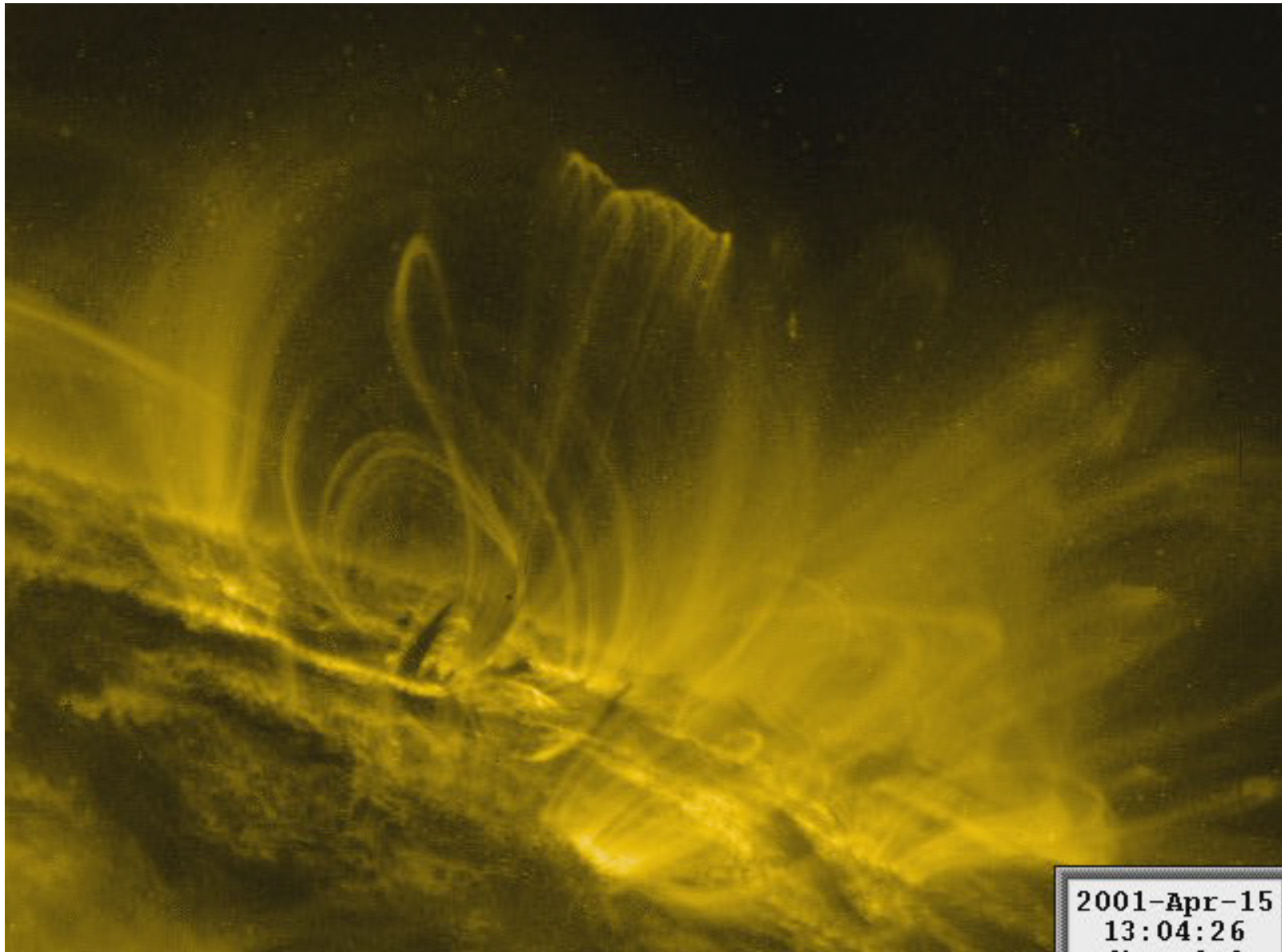
紫外線で見たコロナ



TRACE衛星

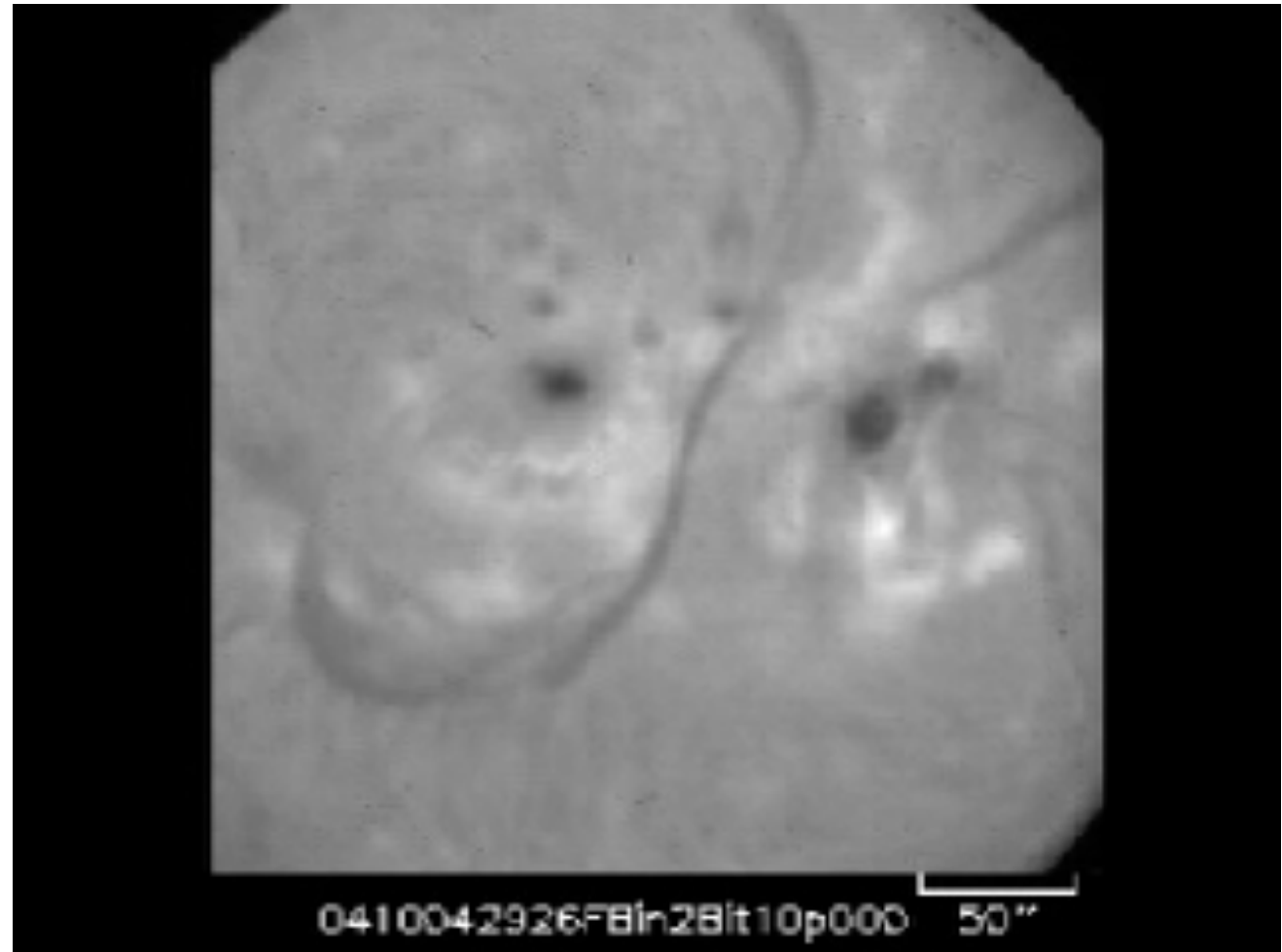
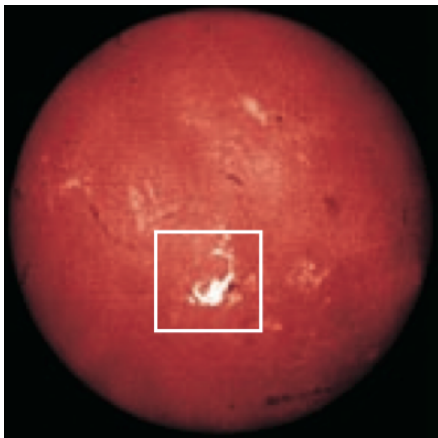
2001-Mar-21
00:31:04

太陽フレア



H α で観測した太陽フレア

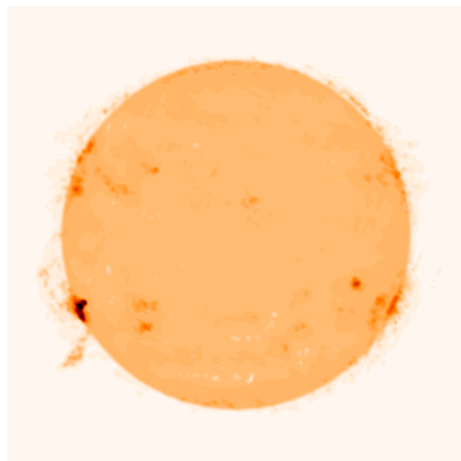
京都大学飛騨天文台
ドームレス太陽望遠鏡



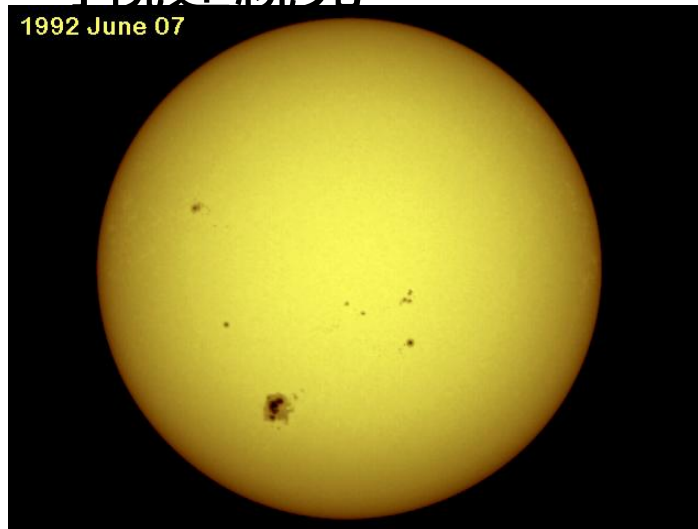
二つの黒点の間でフレアが起きる

様々な波長で見た太陽

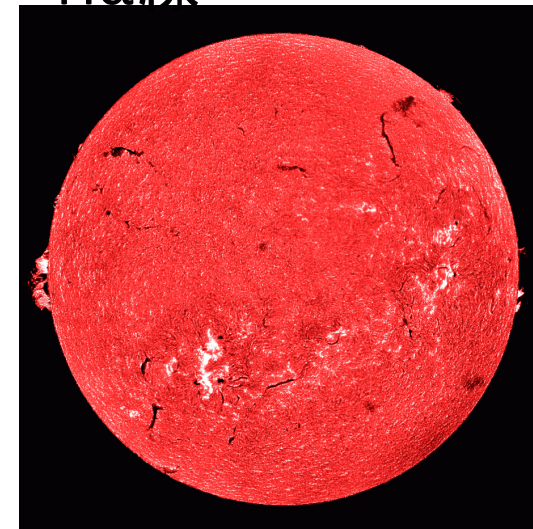
電波(17GHz)



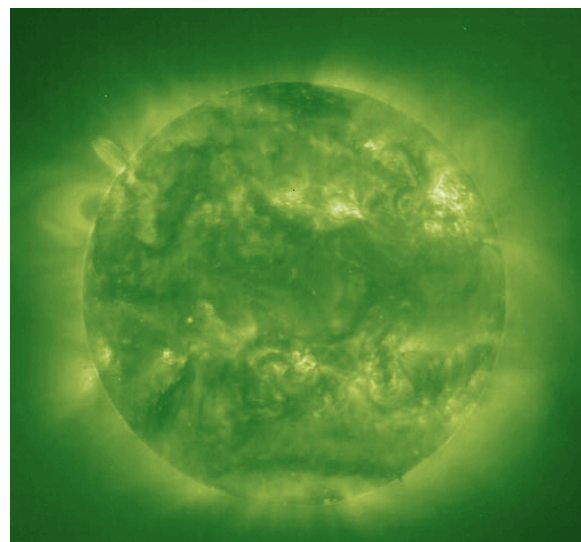
可視連続光



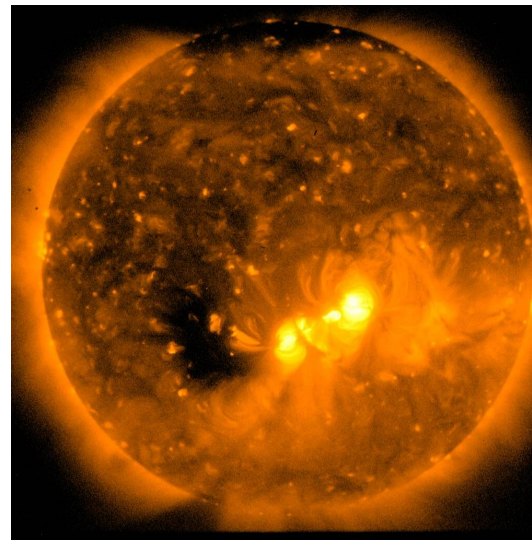
H α 線



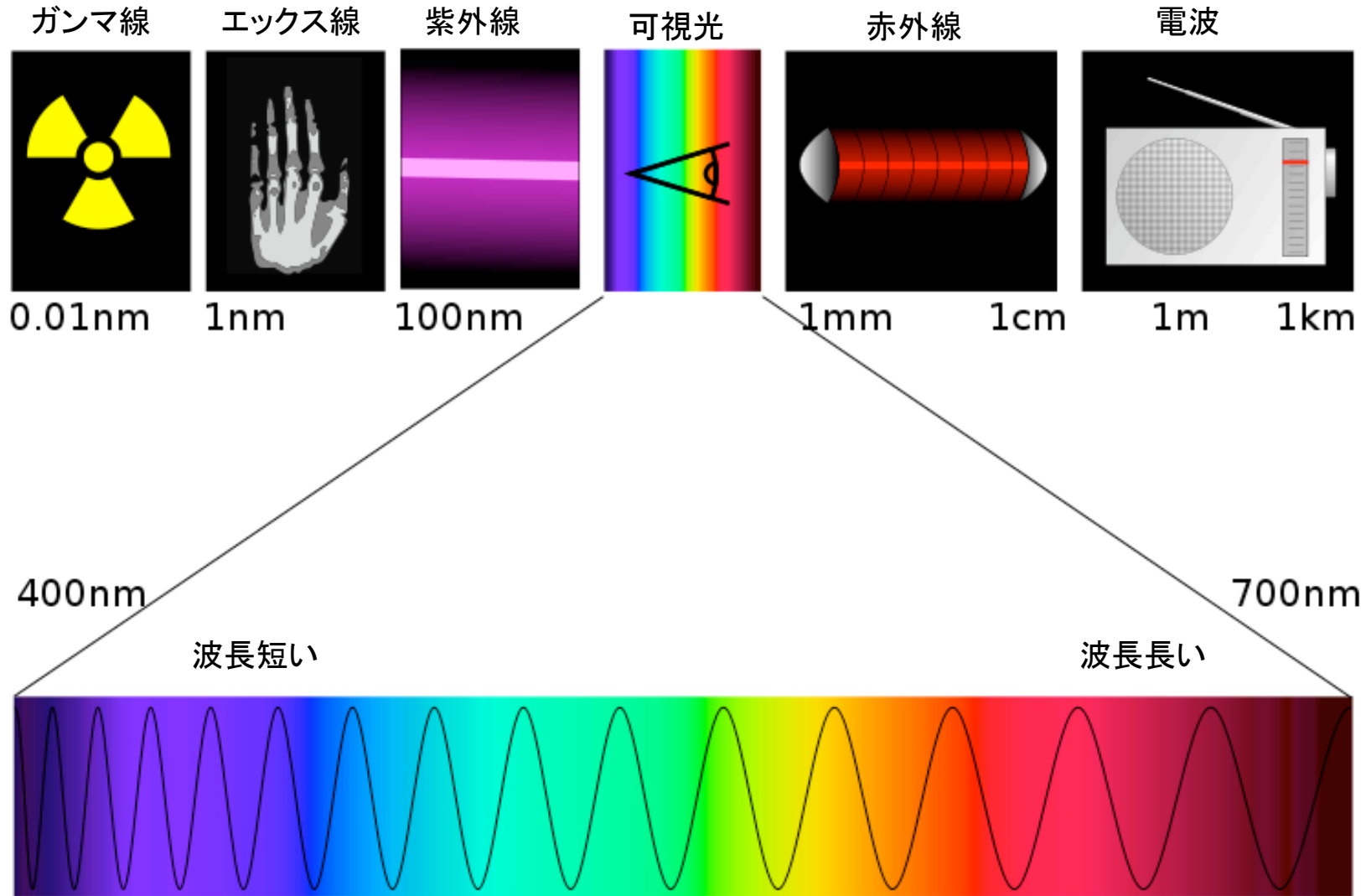
紫外線



X線



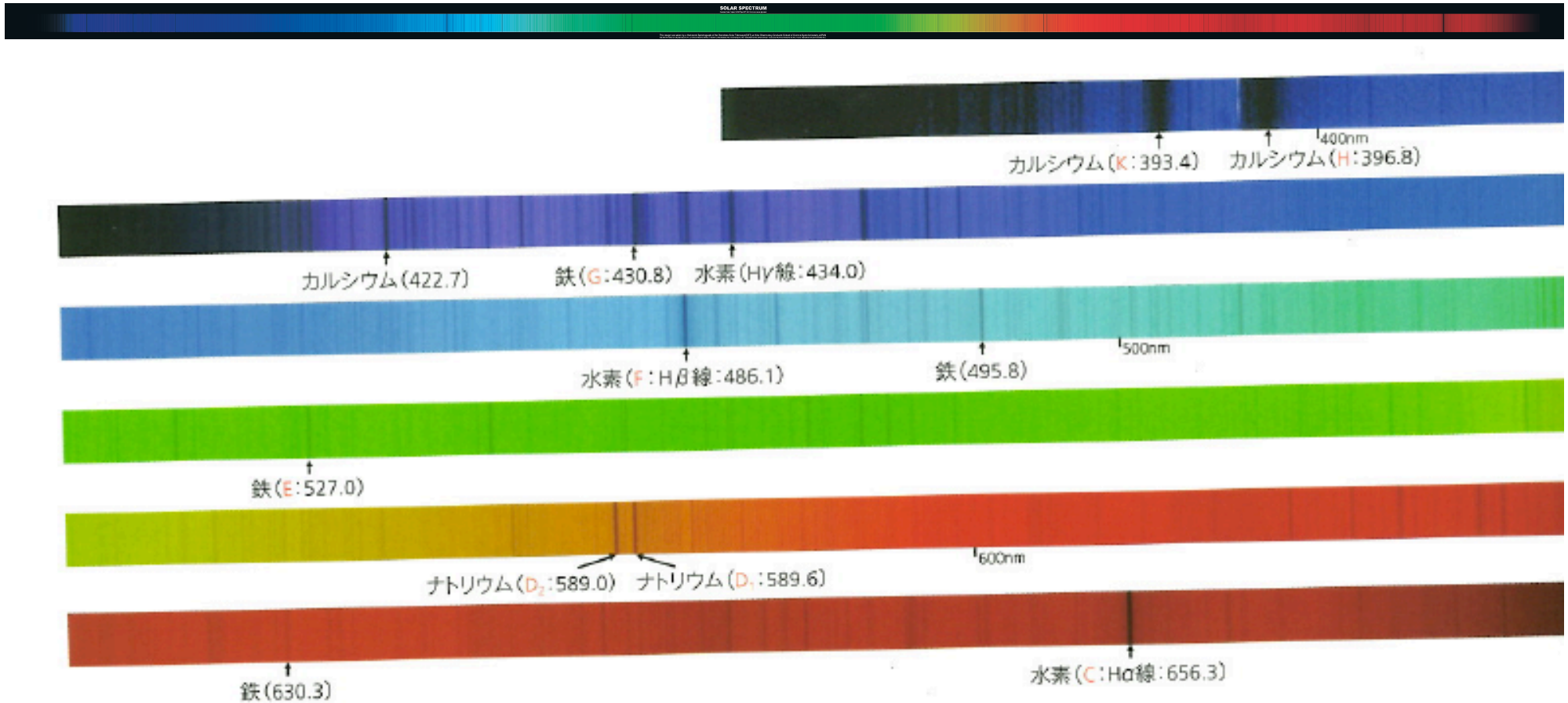
目に見える光(可視光)も電磁波の一種



1nm(ナノメートル) = 10億分の1メートル

From wikipedia commons

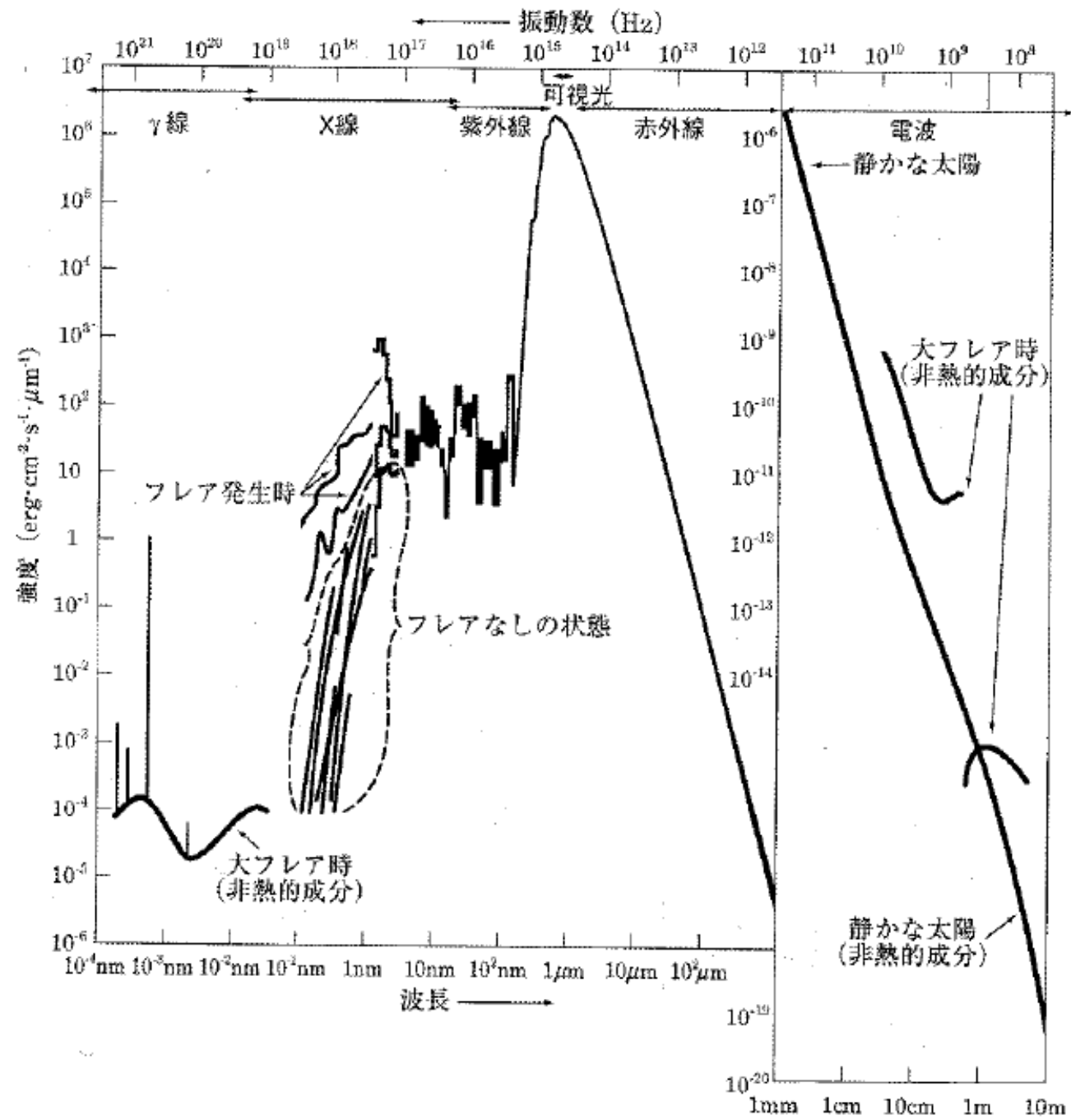
可視光スペクトル



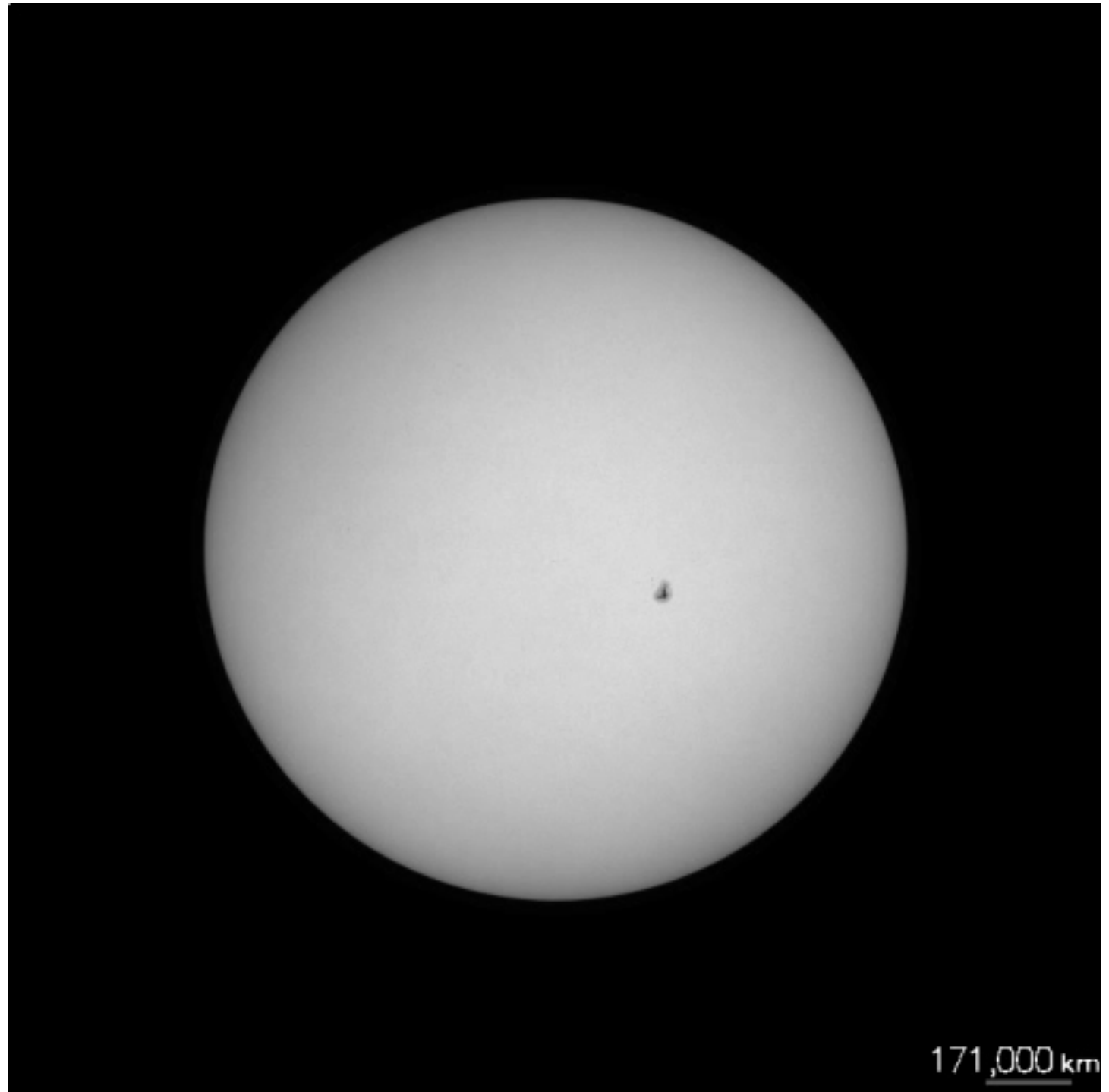
スペクトル線の観測から

- 太陽に存在する元素の量
- 太陽大気中の速度場(ドップラーシフト)
- 彩層活動の診断
- 磁場の診断(偏光も使う) ...などがわかる

太陽からくる 電磁波



黒点



Movie by
T. J. Okamoto

Hinode/SOT

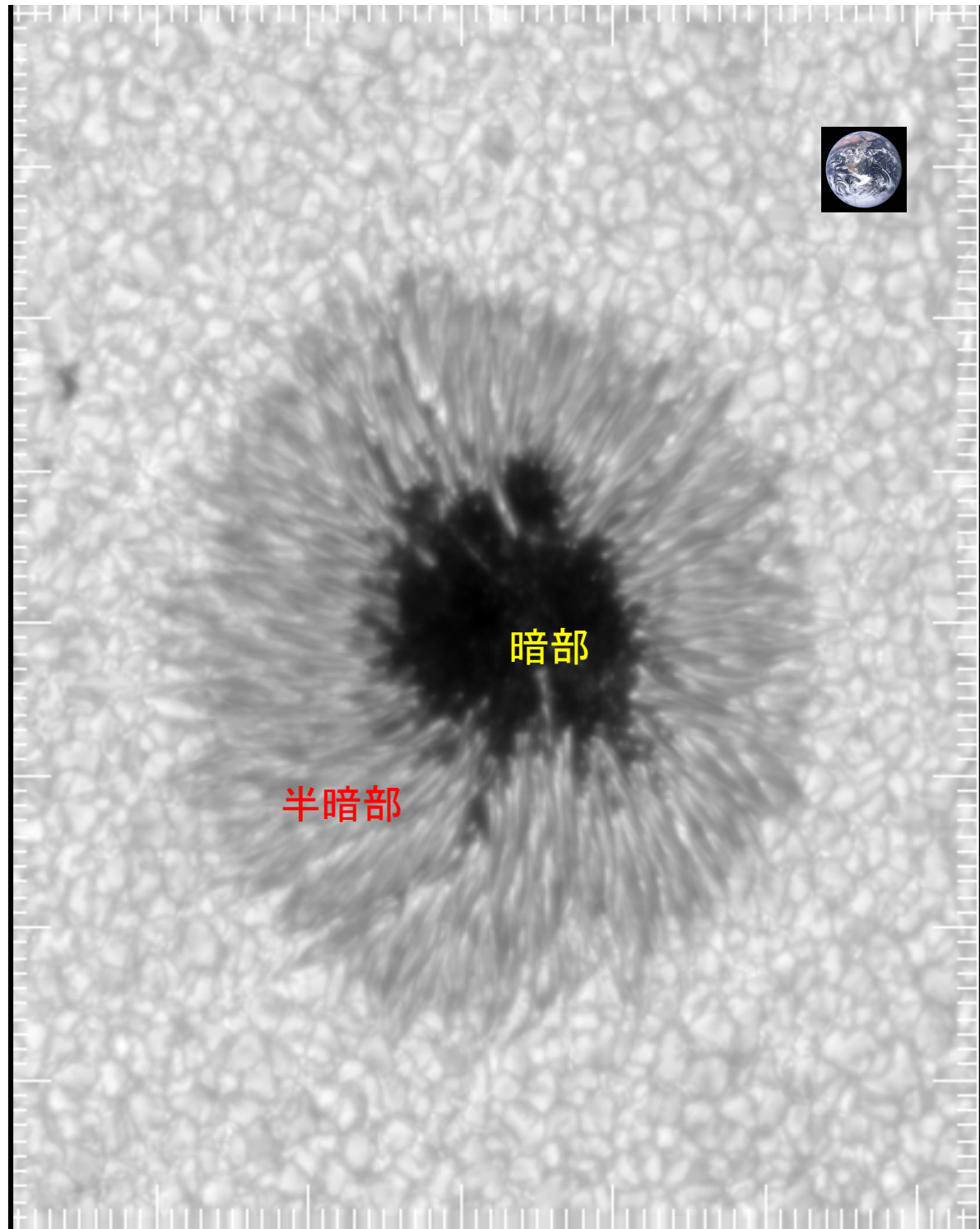
171,000 km

黒点の構造

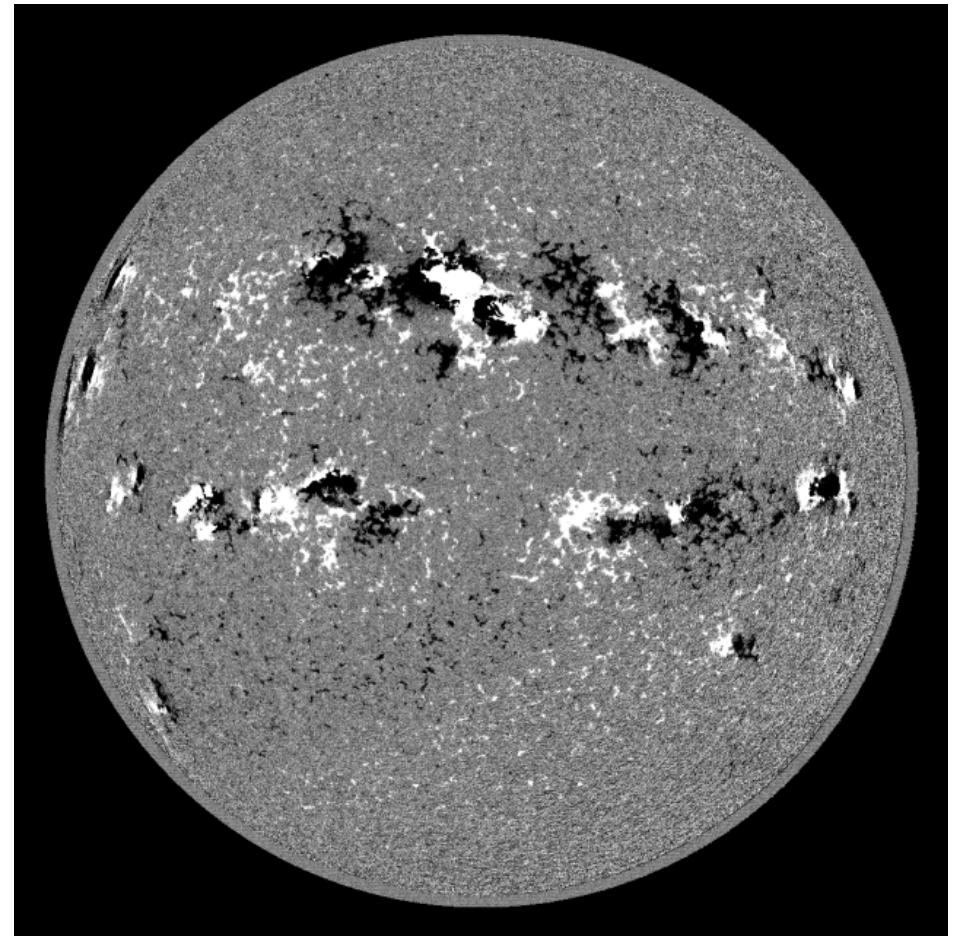
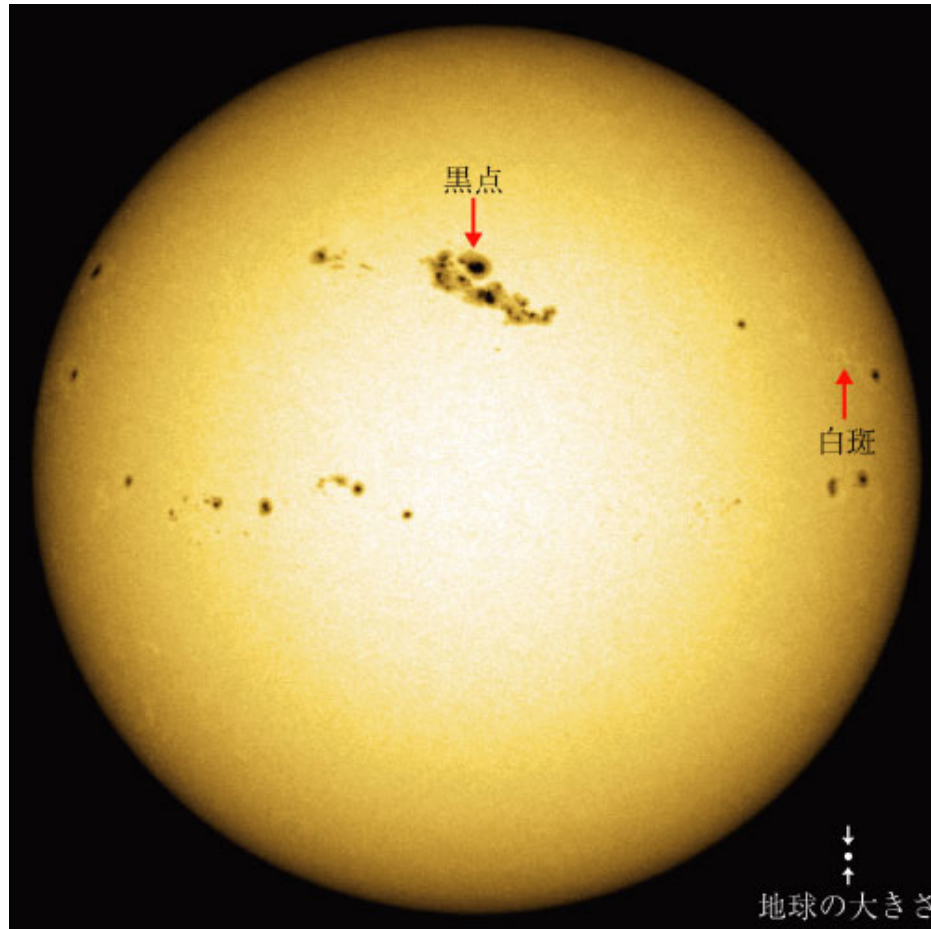


黒点暗部の温度は約4000度。周囲(6000度)より冷たいので暗くみえる。

ただし、黒点だけ取り出して夜空に置けば満月より明るい。



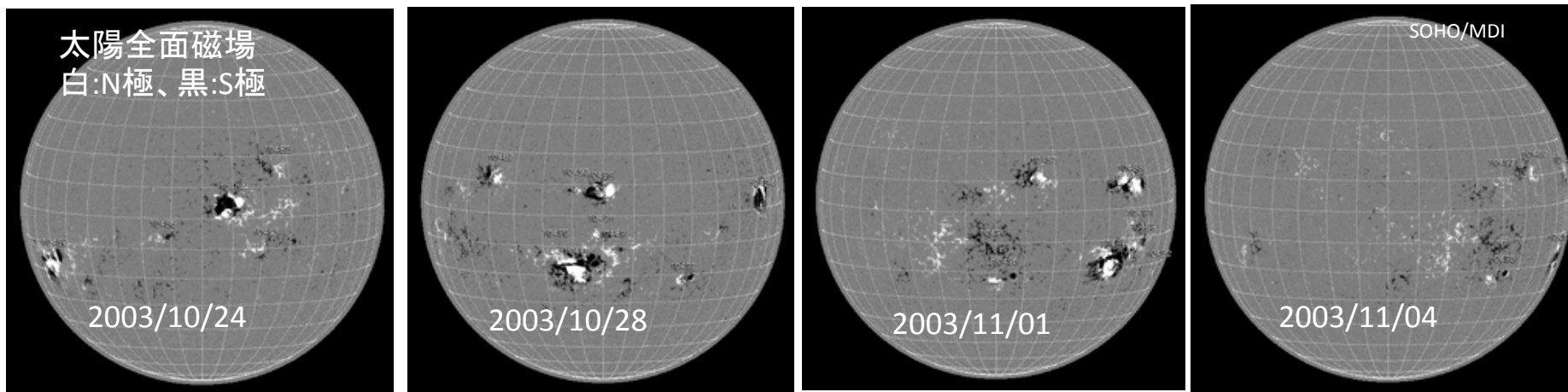
黒点は巨大な磁石



磁場強度～暗部の最大値で3000ガウス(0.3テスラ)、半暗部で1000ガウス(0.1テスラ)程度

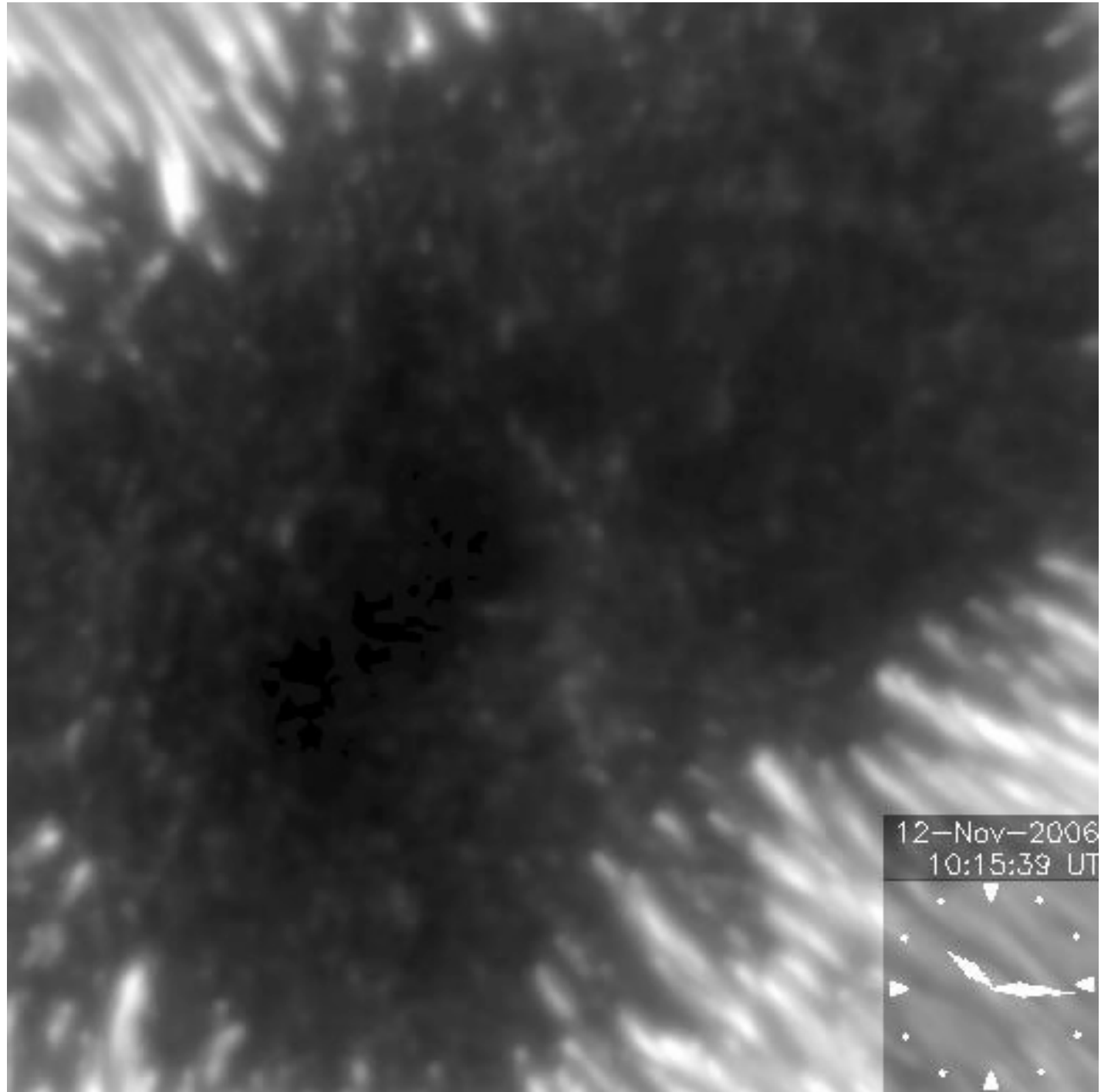
黒点の変化

寿命:2週間~2ヶ月くらい

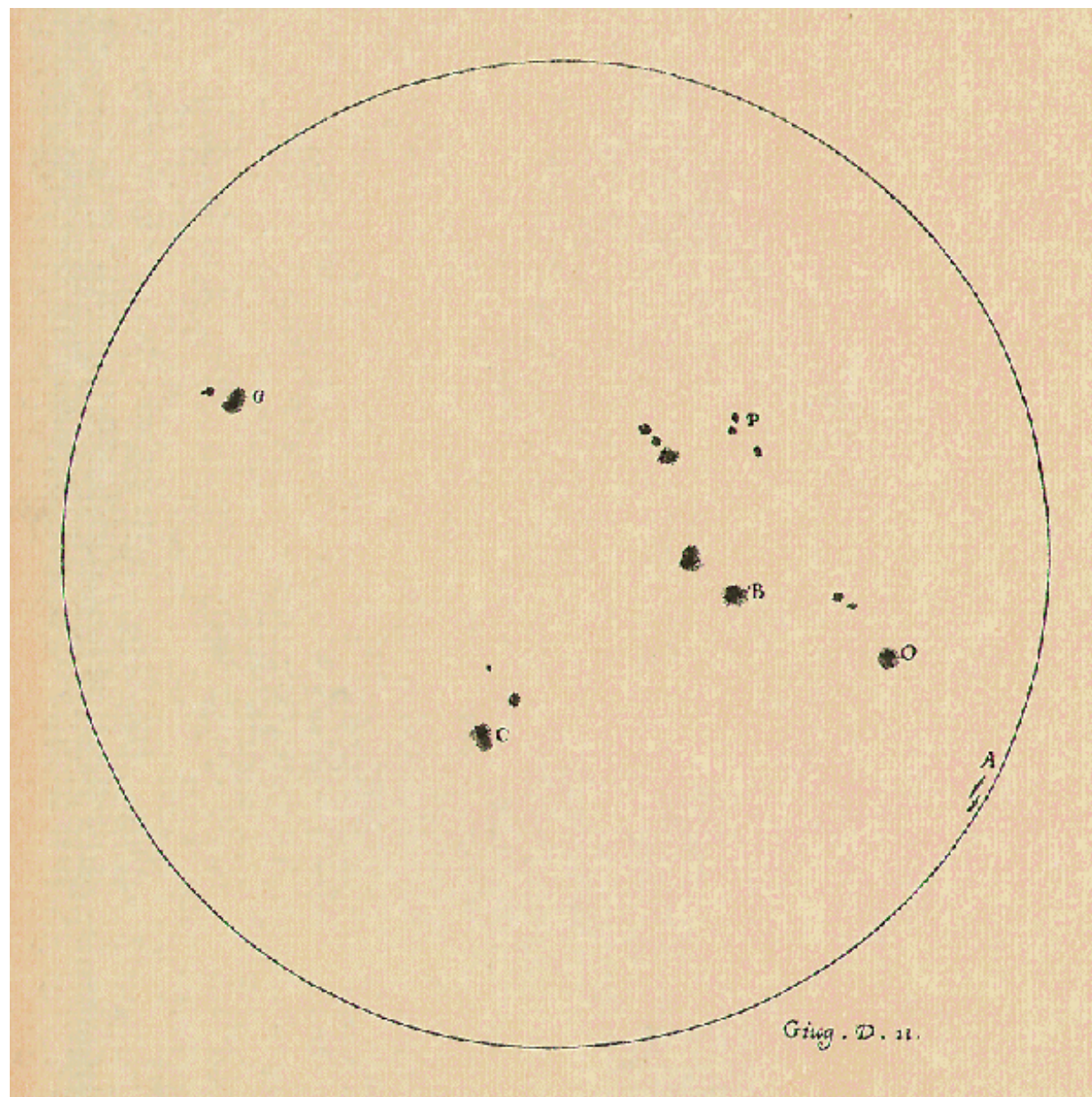


Light Bridge
and
Umbral dots

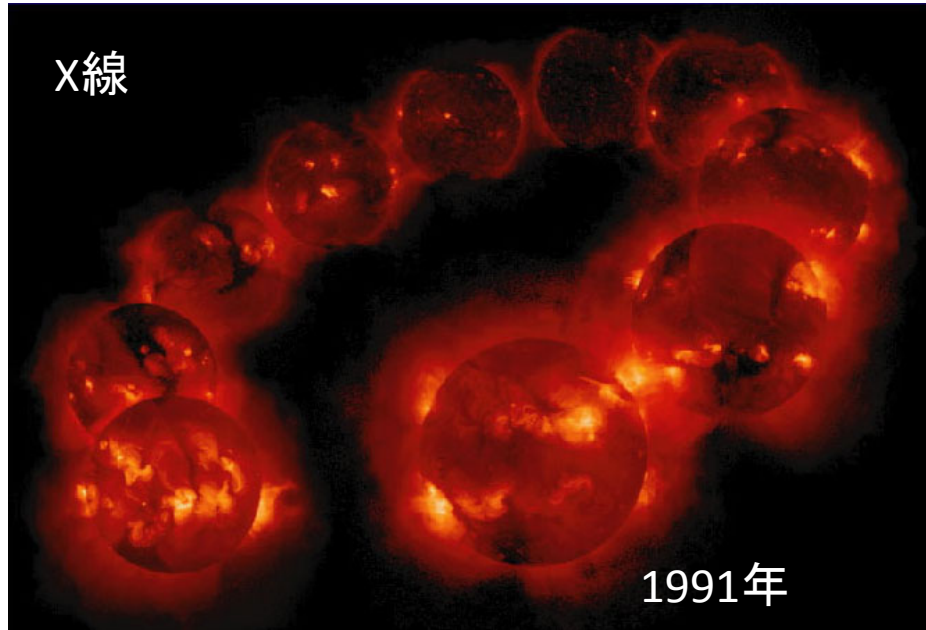
Hinode/SOT
Katsukawa+ 2007



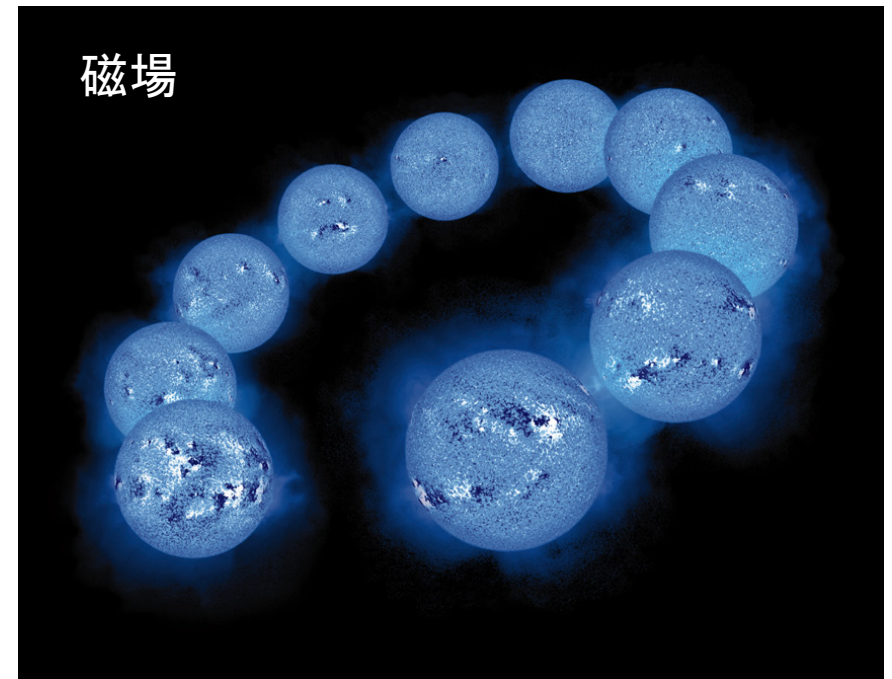
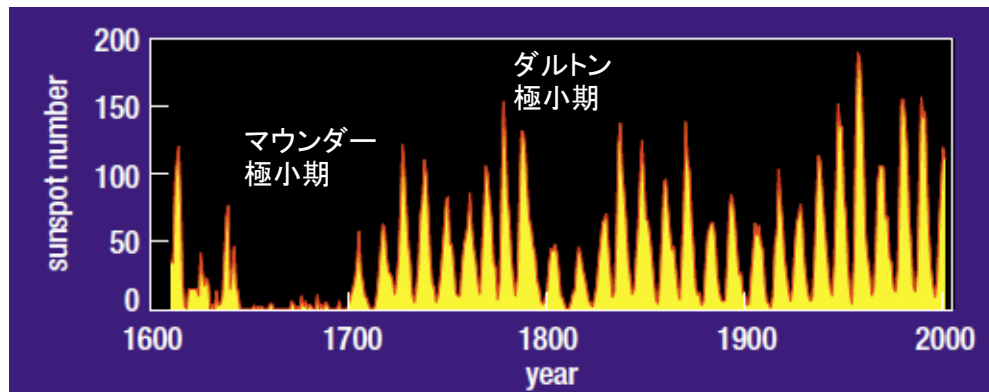
ガリレオによる黒点のスケッチ

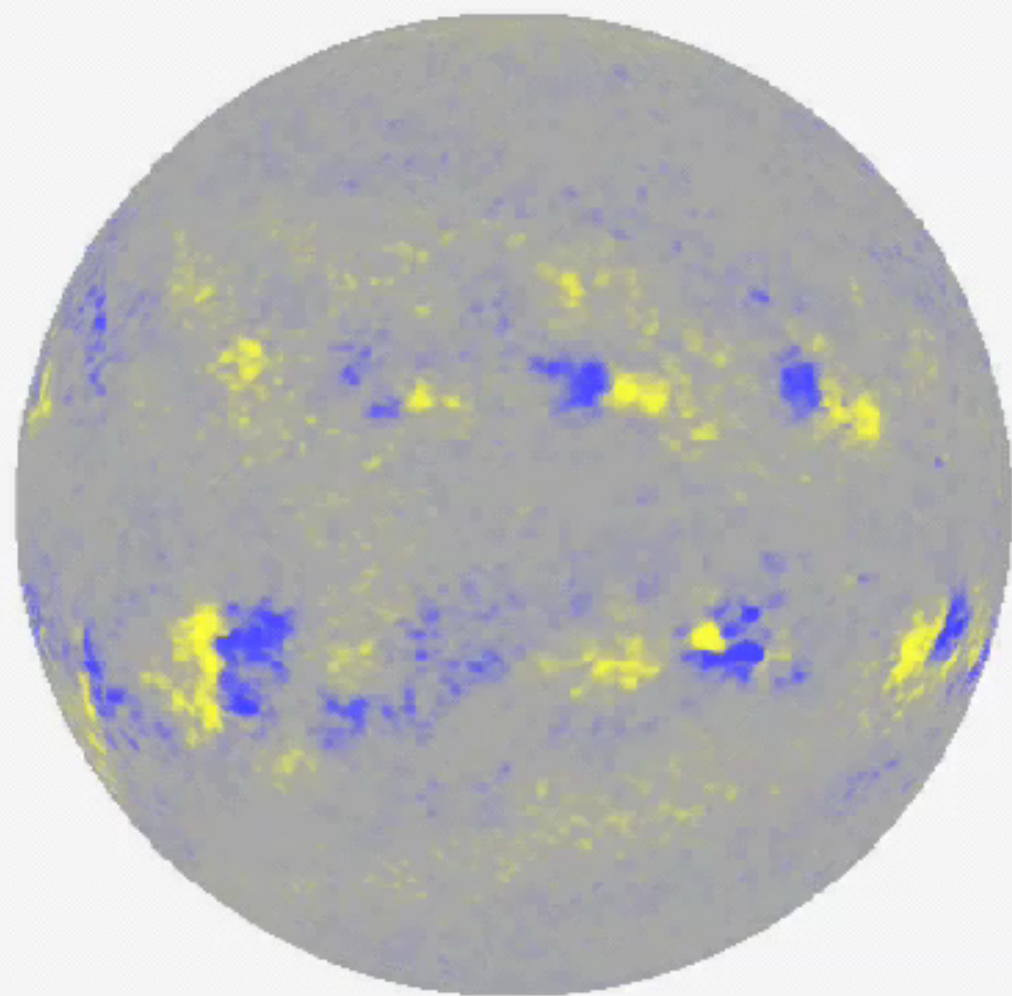


太陽は11年ごとに変化する

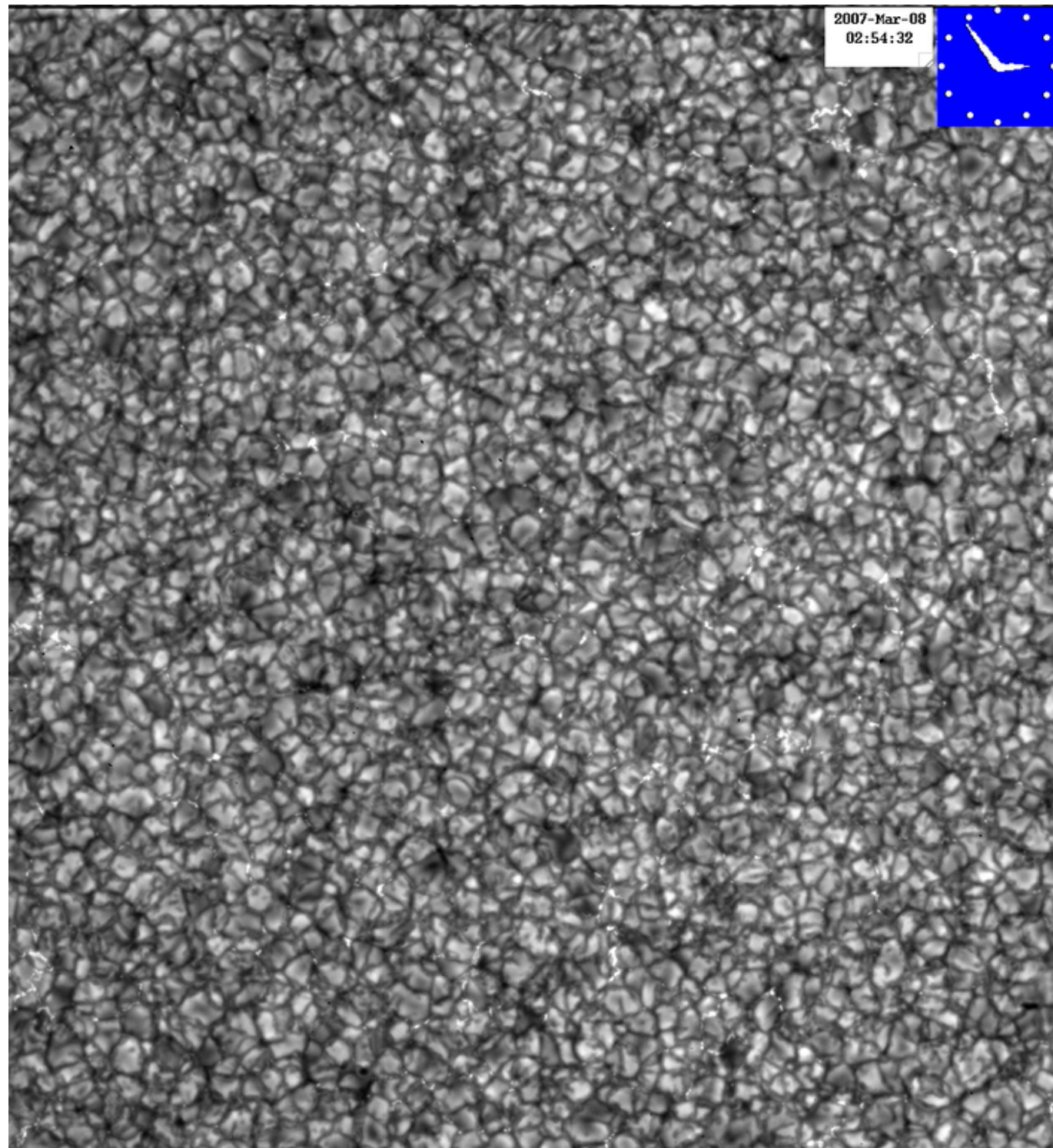


黒点の数が約11年で
ふえたりへったりする





粒状斑 (granules)



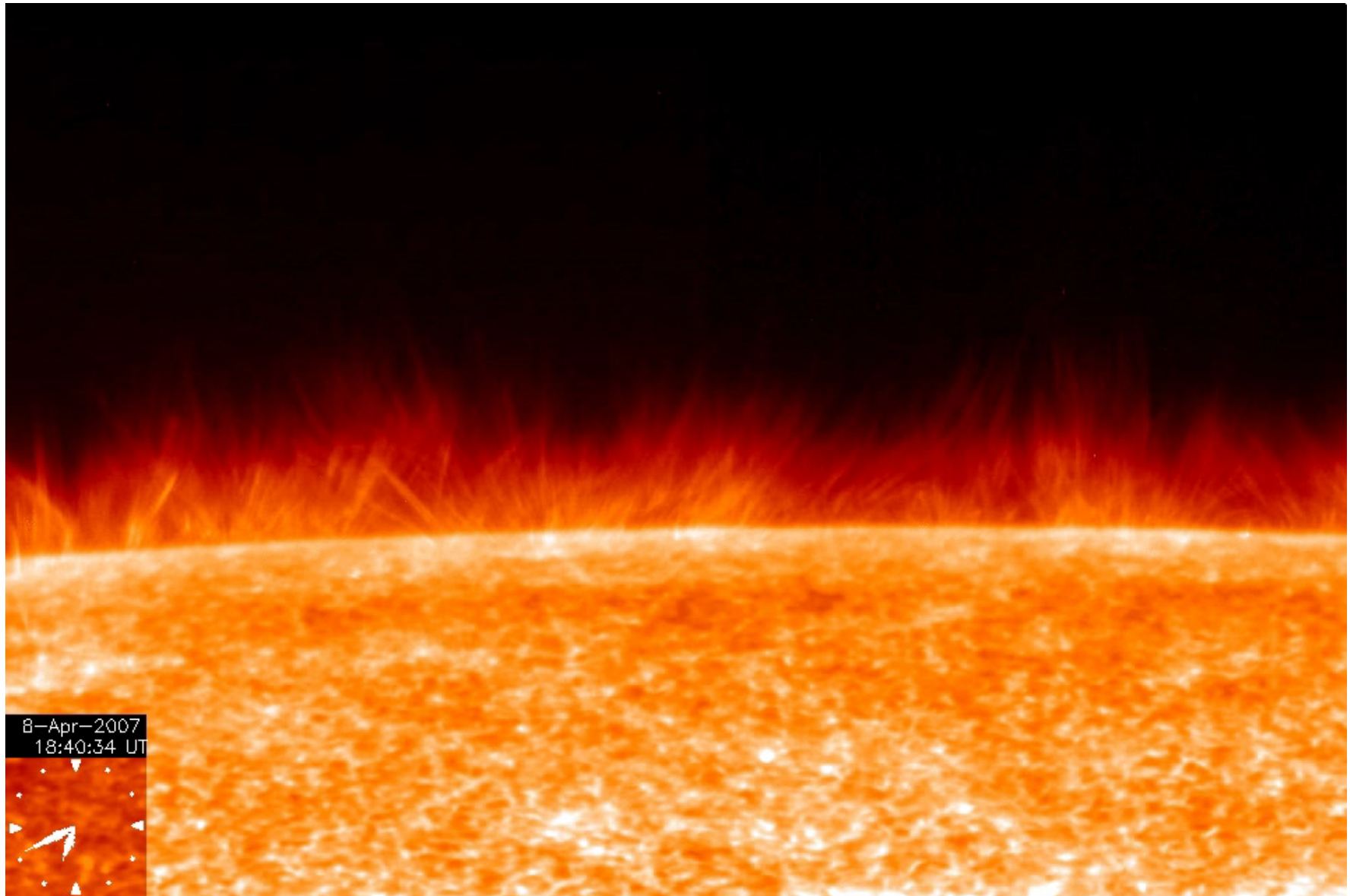
Hinode/SOT

彩層(Chromosphere)



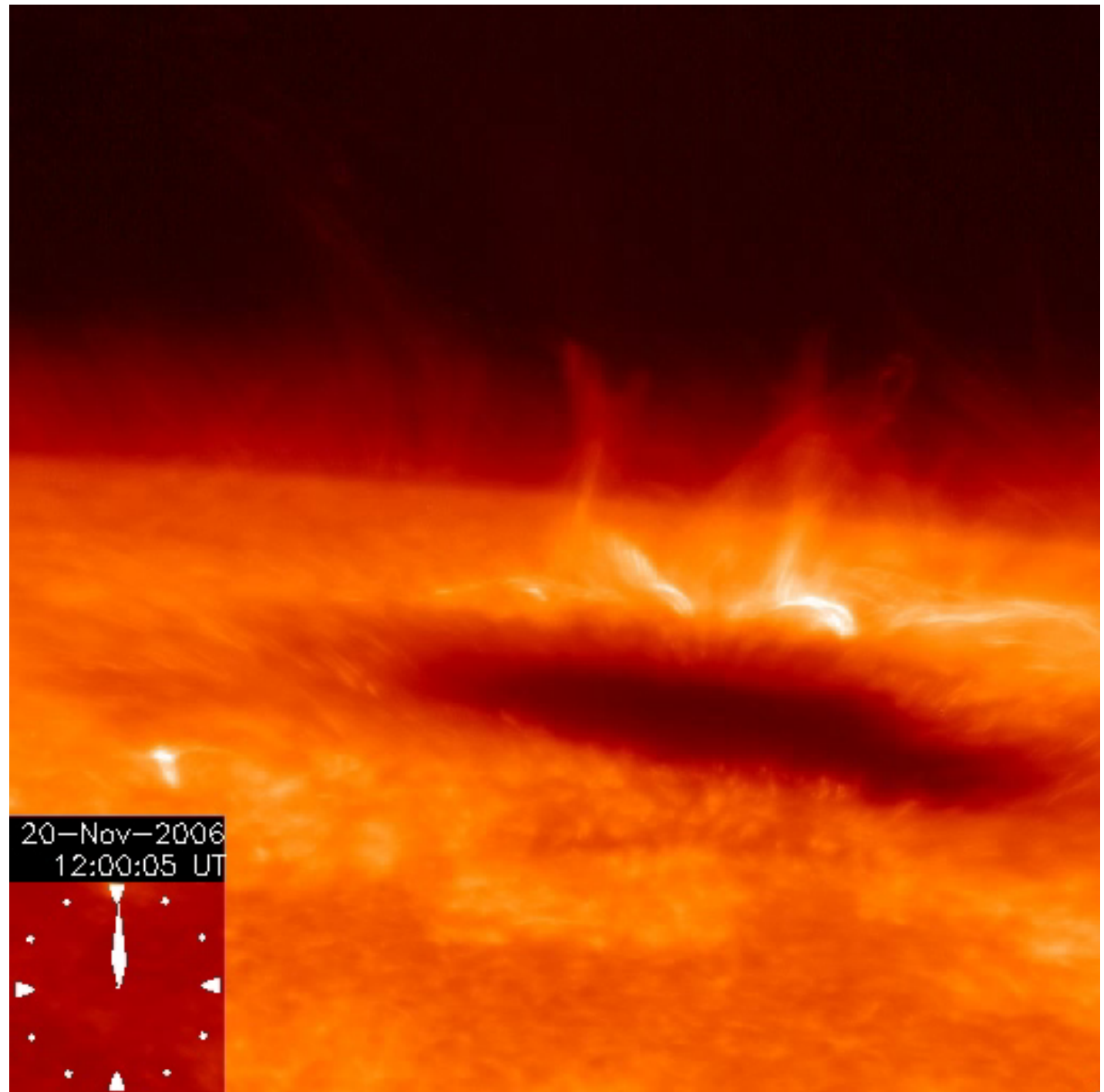
日食の時に縁の近くにピンク色(H α の色)に見えたため、この名がついた.

可視連続光で見える表面(光球)上空の、厚さ数1000kmの層



ひので可視光望遠鏡(SOT)が見た彩層。
彩層はジェット状の噴出するガス(スピキュール)の集合体。

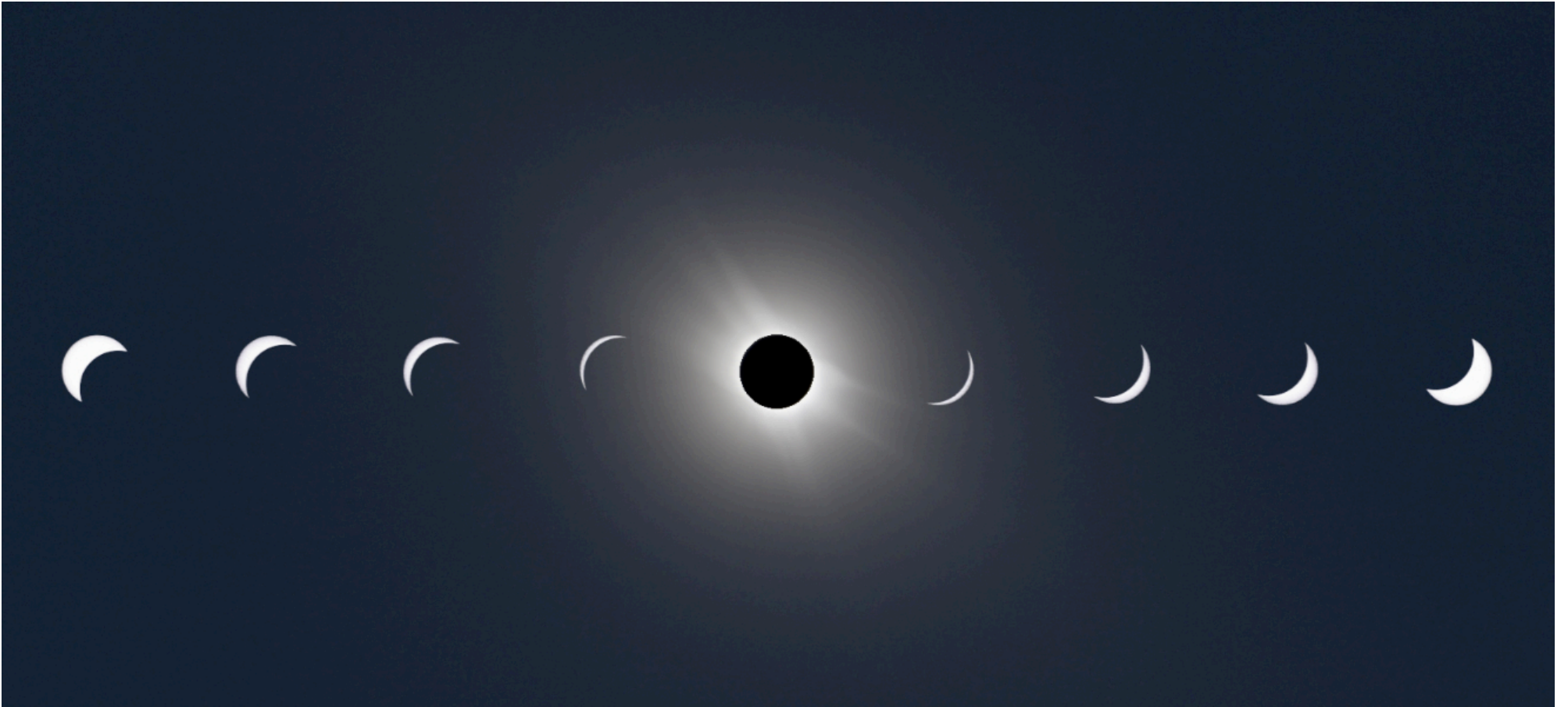
黒点の周りの の活動現象



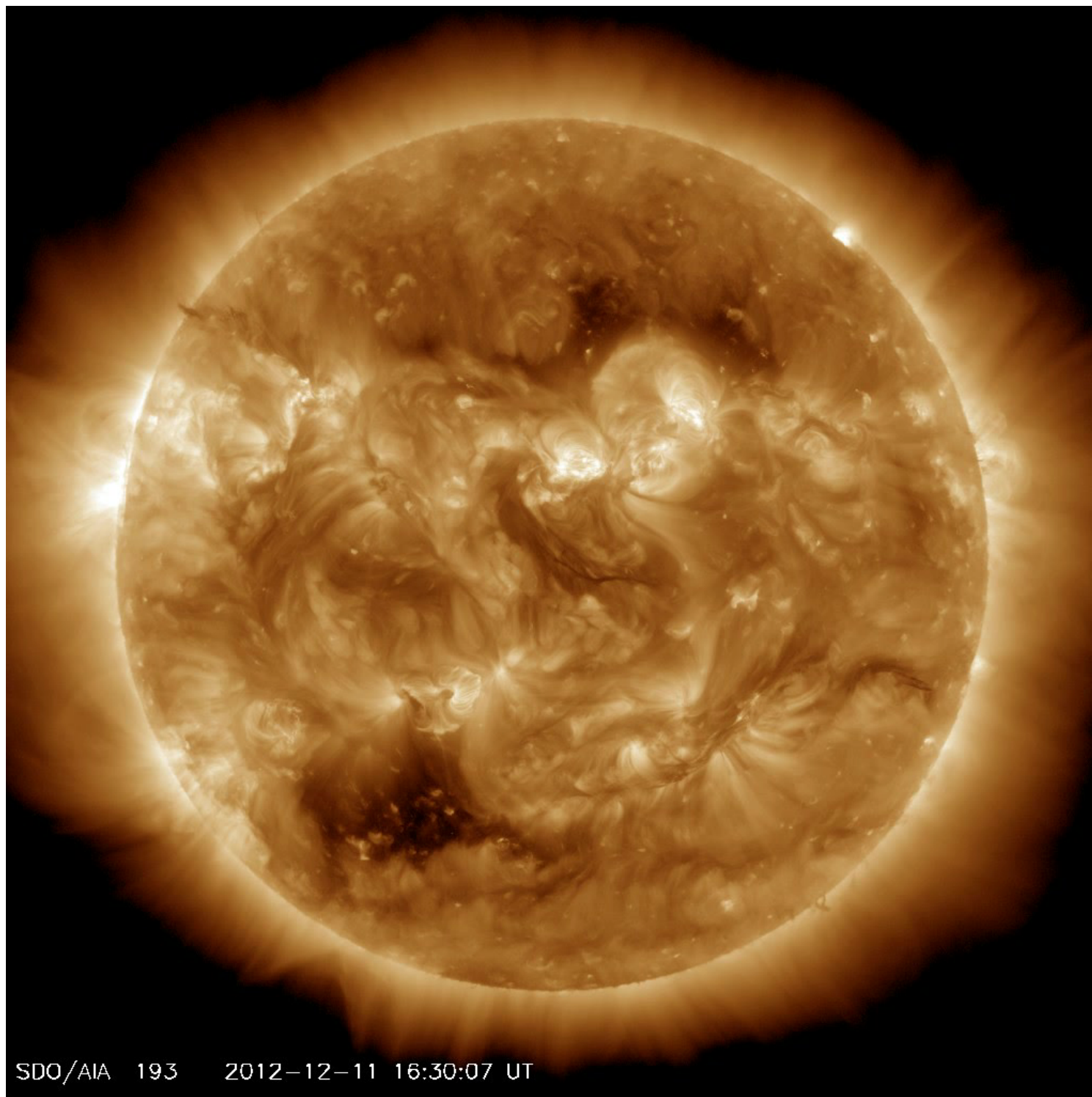
Hinode/SOT

コロナ: 100万度の超高温大気

2006年の皆既日食(トルコ)

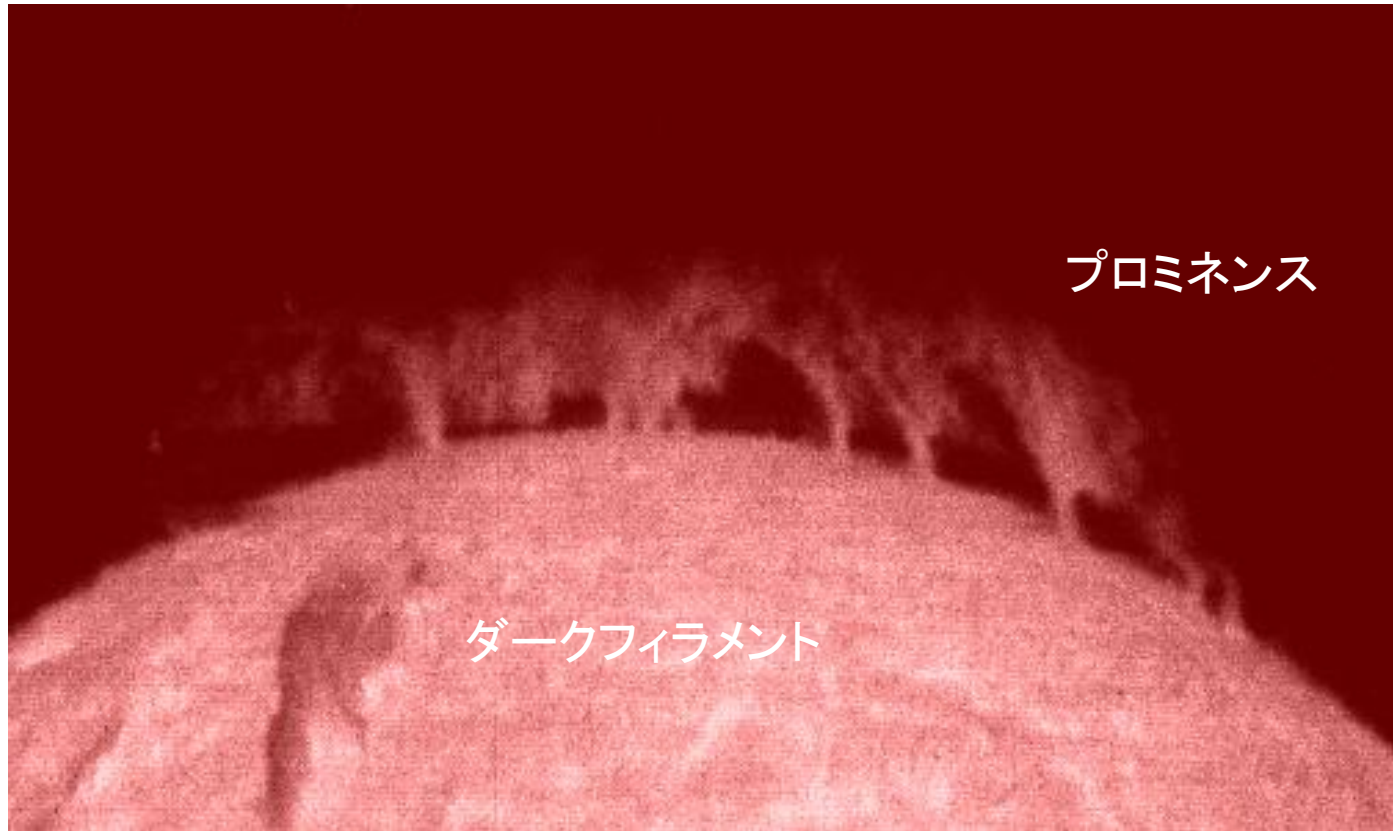


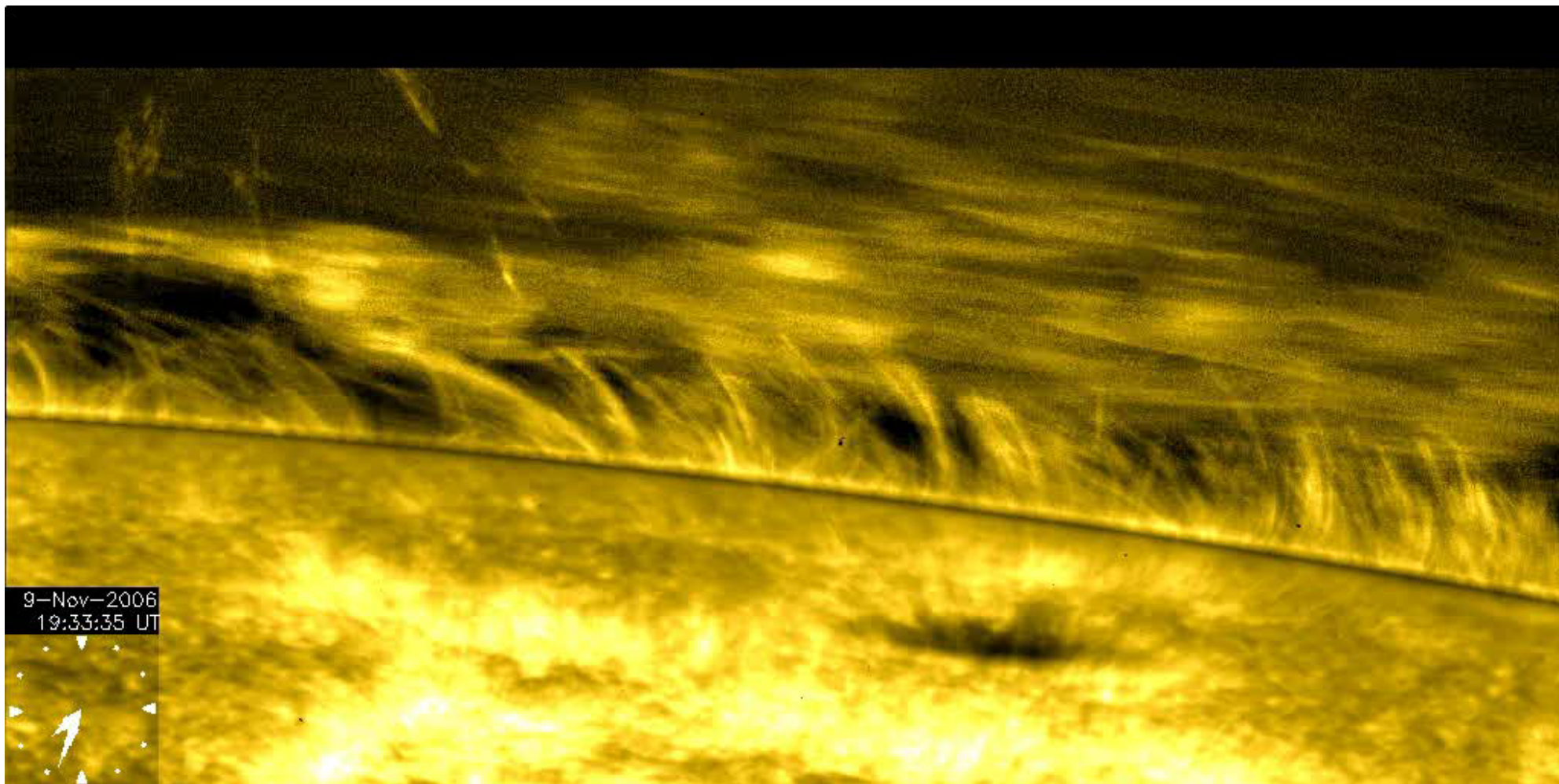
極紫外線で見た
コロナ
(SDO/AIA)



SDO/AIA 193 2012-12-11 16:30:07 UT

プロミネンス (prominence, 紅炎) と
ダークフィラメント (dark filament, 暗条)

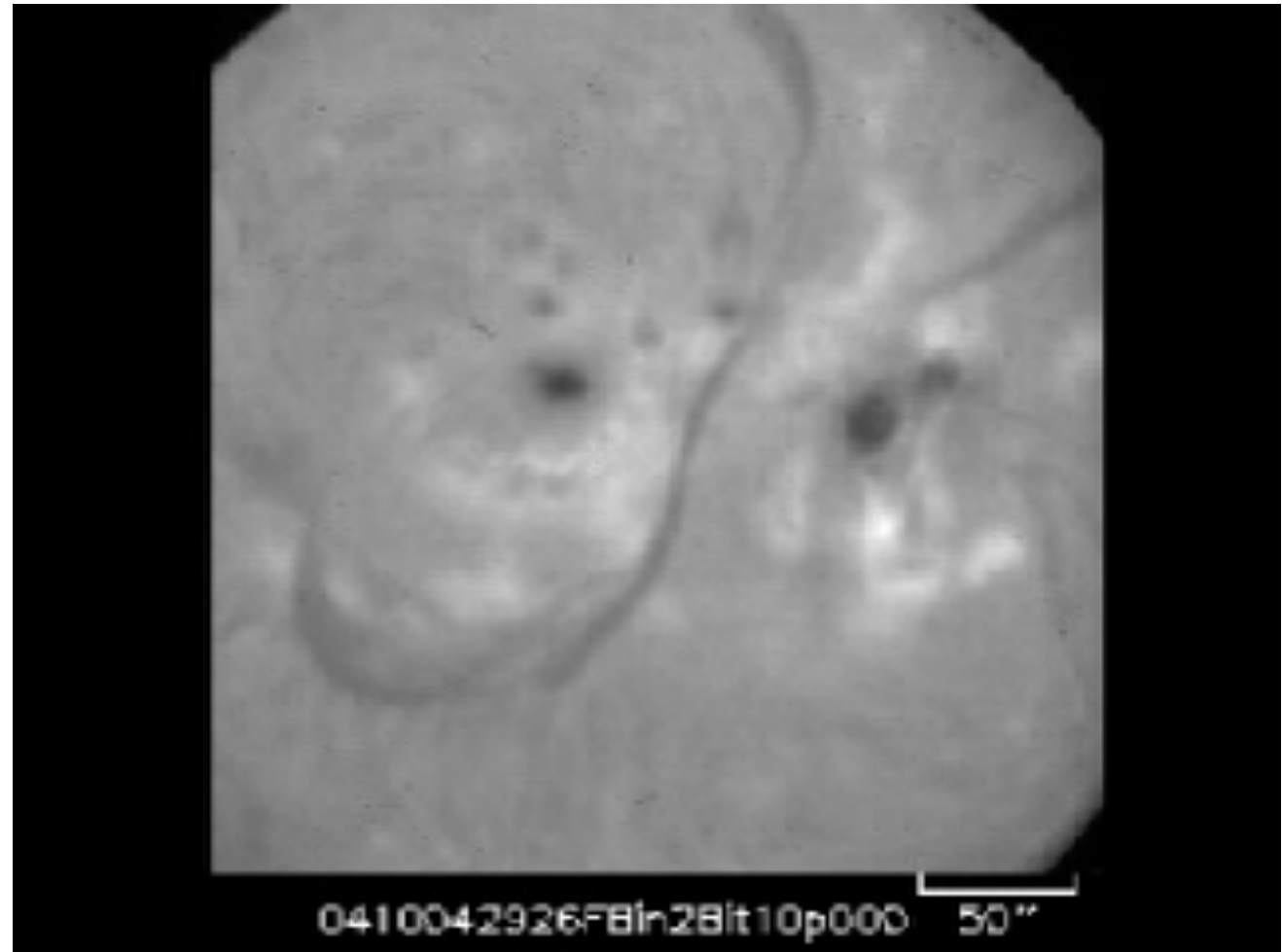
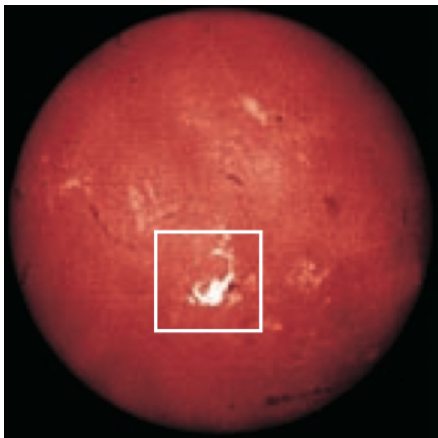




プロミネンス(紅炎) ... 100万度のコロナにうかぶ1万度のガス
スピキュール ... 太陽の表面から吹き出すジェット

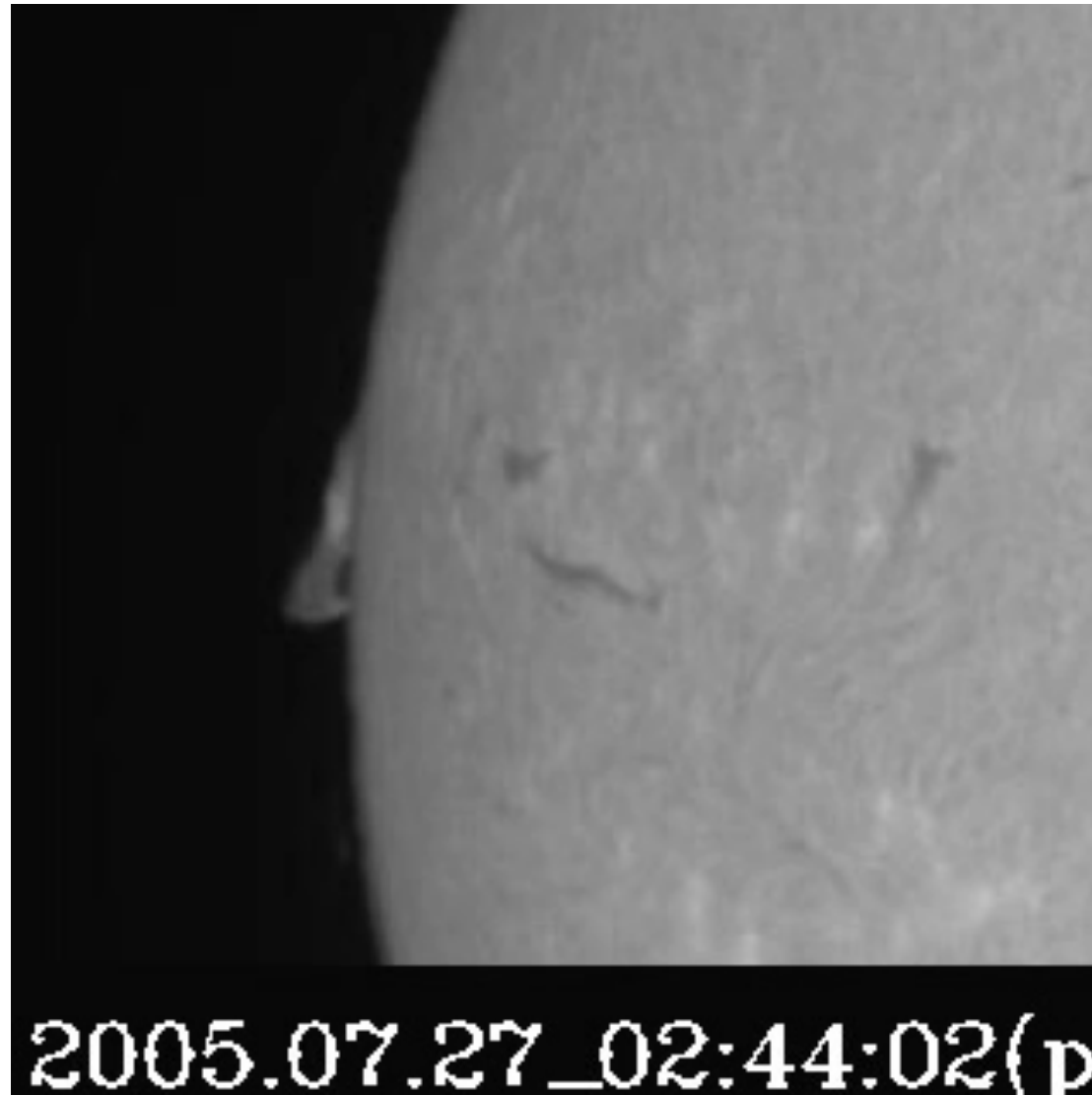
プロミネンス(フィラメント)噴出とフレア

京都大学飛騨天文台
ドームレス太陽望遠鏡

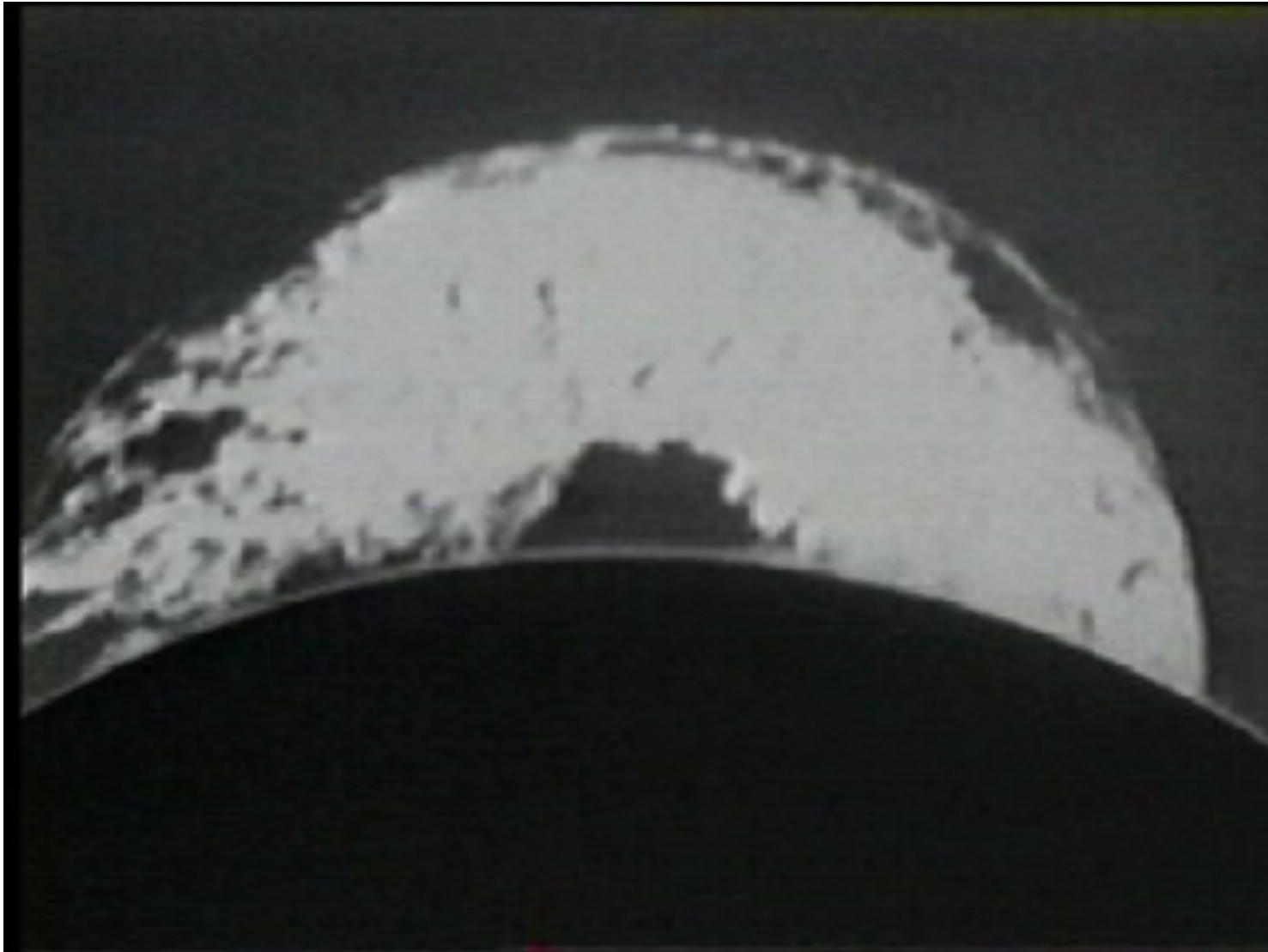


二つの黒点の間でフレアが起きる

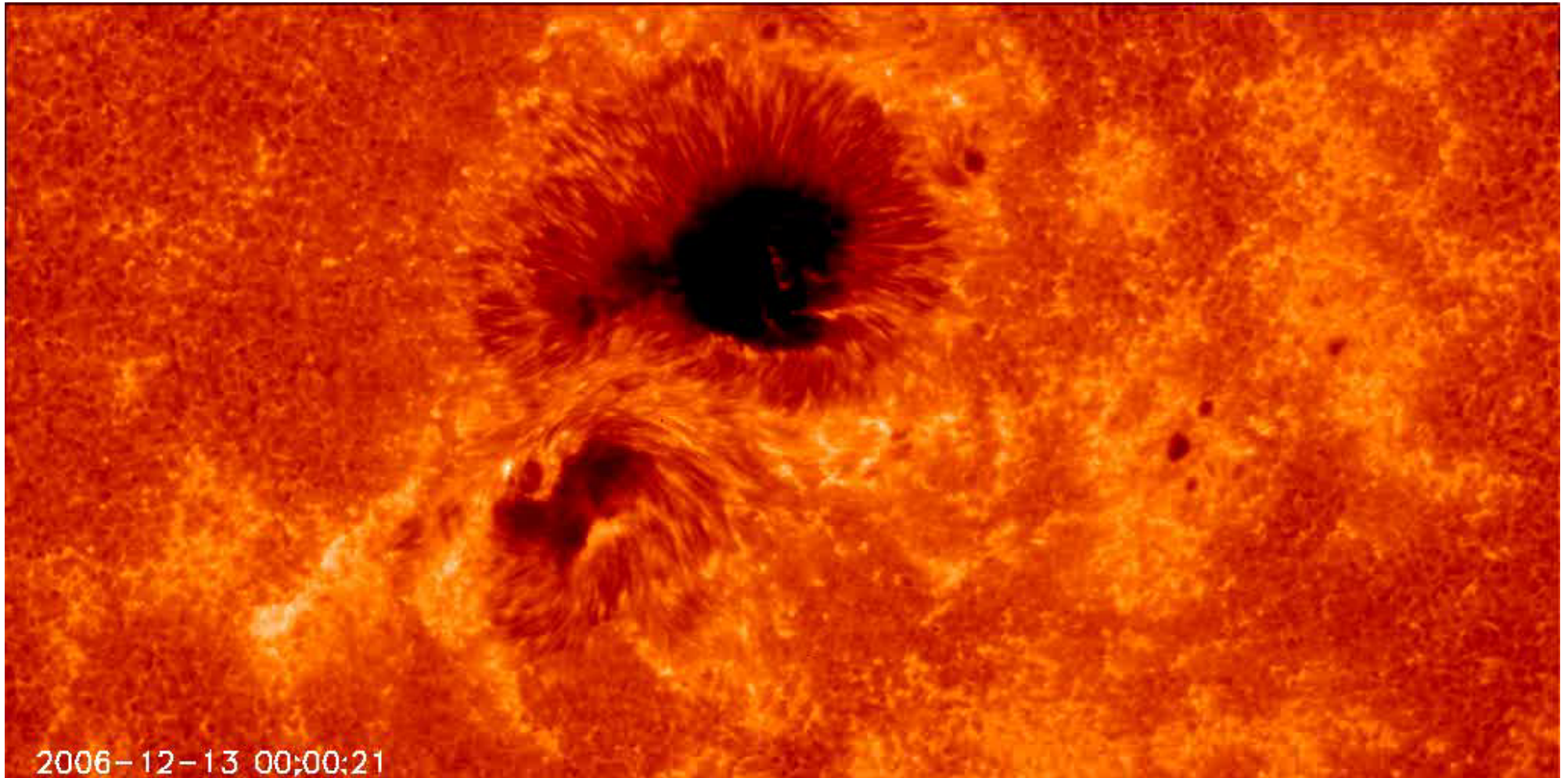
プロミネンス噴出



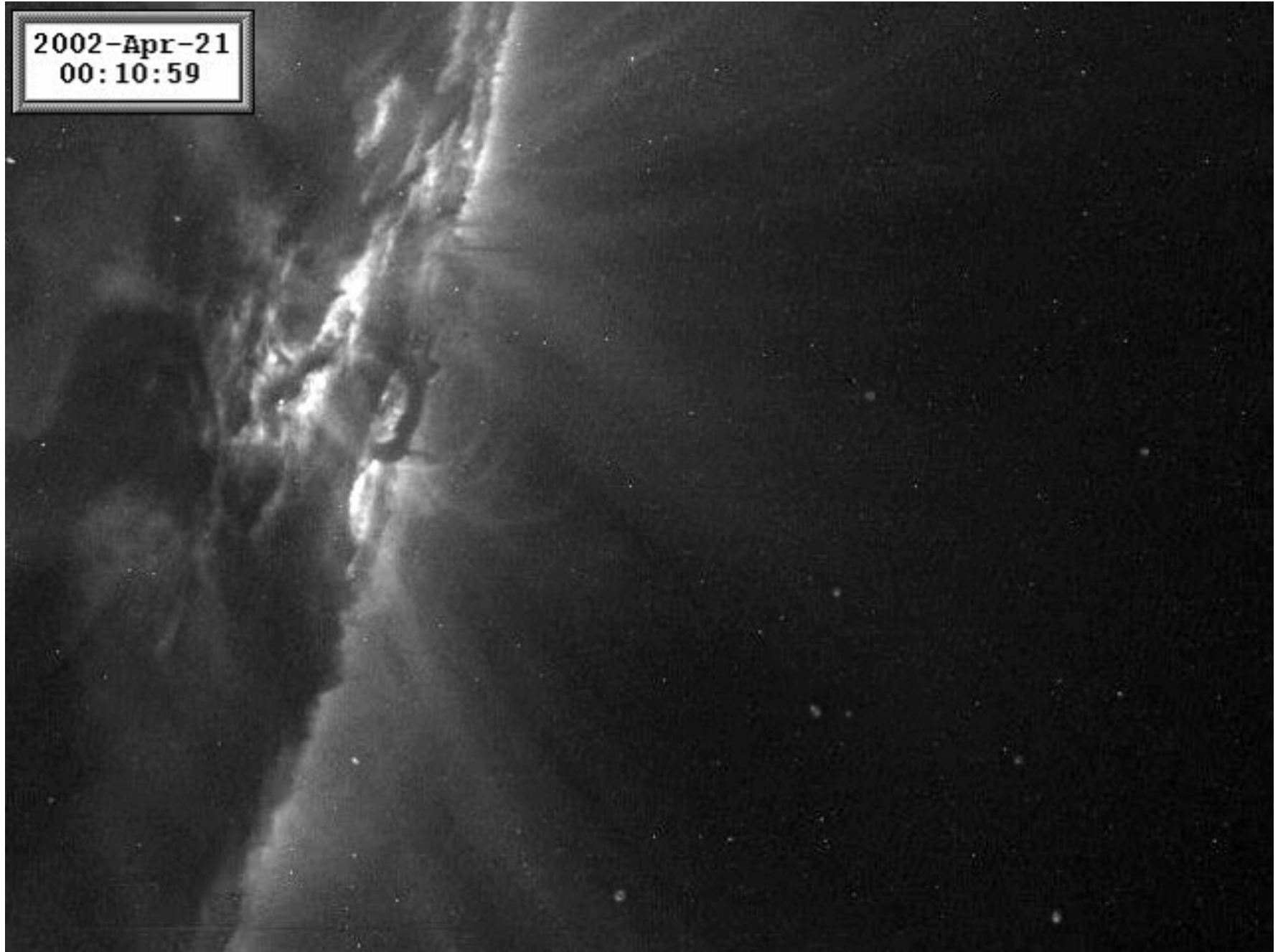
観測史上最大のプロミネンス噴出



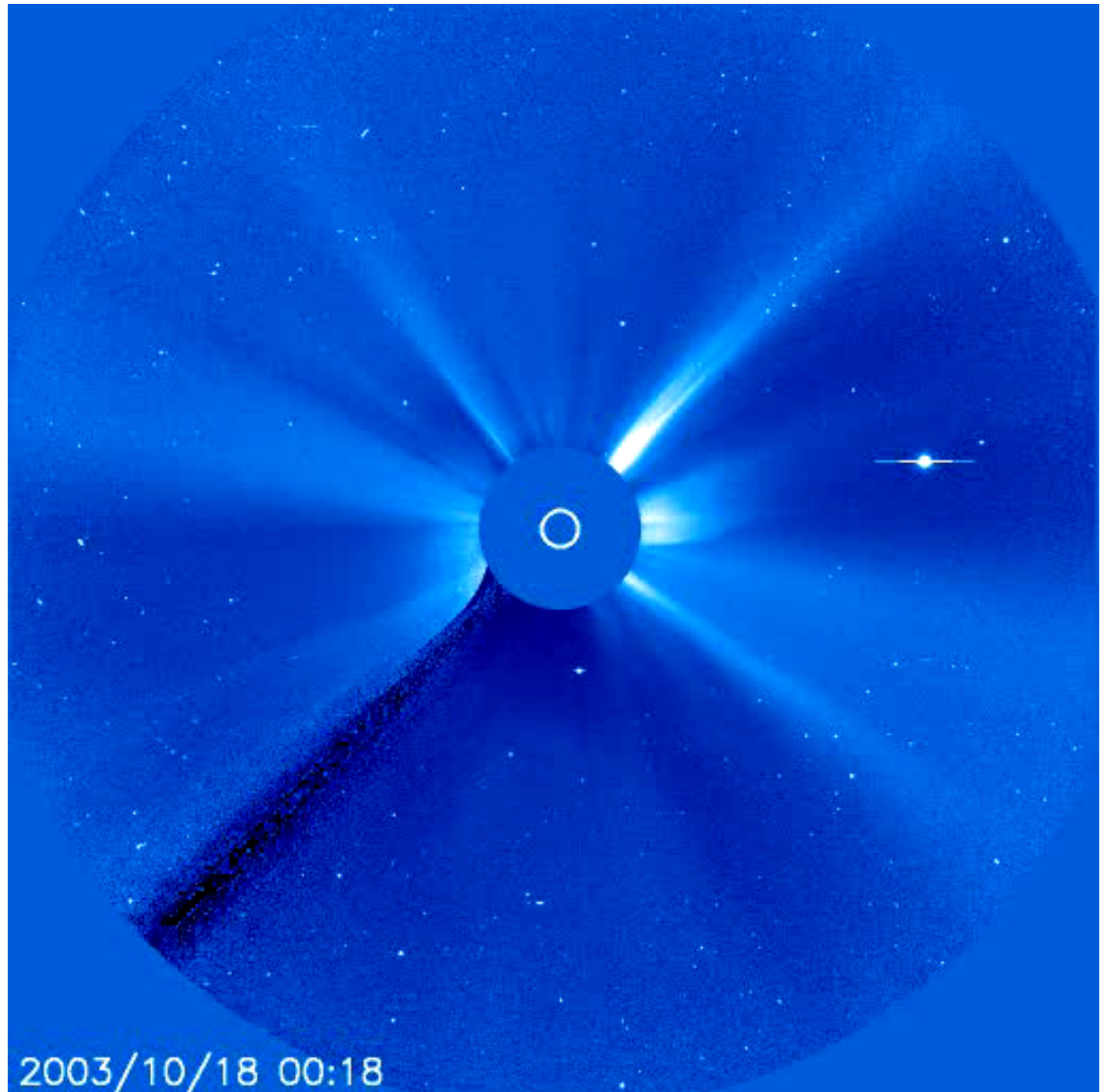
フレア



2002-Apr-21
00:10:59



太陽風と コロナ質量放出



2003/10/18 00:18

1コマめのまとめ

- 様々な波長で見ることで、太陽の異なる部分が見える。
- 太陽物理学の主要部分は、黒点、プロミネンス、コロナ、フレアなど、主に磁場とプラズマの相互作用に起因する様々な現象を、物理学の言葉で説明すること。

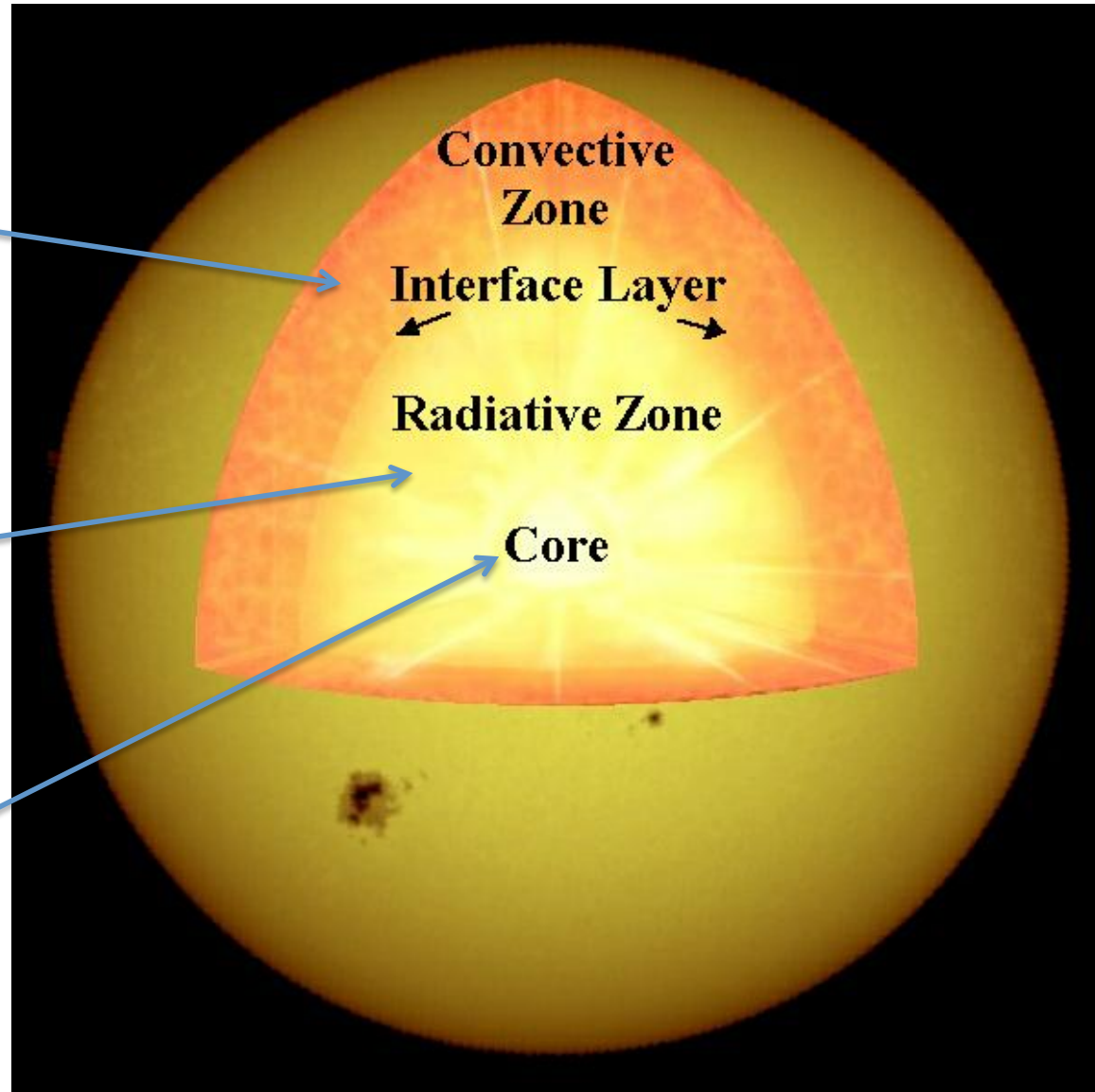
内部構造と大気

太陽の内部

対流層
(ガスの流れでエネルギーを外に運ぶ)

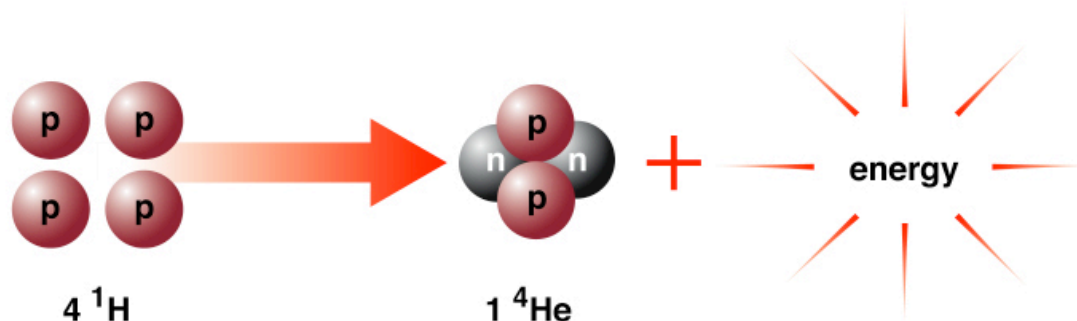
放射層
(光でエネルギーを外に運ぶ)

コア
(核融合が起きる場所。温度1500万度)



太陽のエネルギー源...核融合

水素の原子核4つがくっついてヘリウム原子核を作る
この時、質量(重さ)が少しだけ(約0.7%)減る。



Copyright © Addison Wesley

質量はエネルギーと等価 $E = mc^2$
減った質量分のエネルギーは光子とニュートリノとして放出

太陽ニュートリノ問題

- 太陽

小問題1

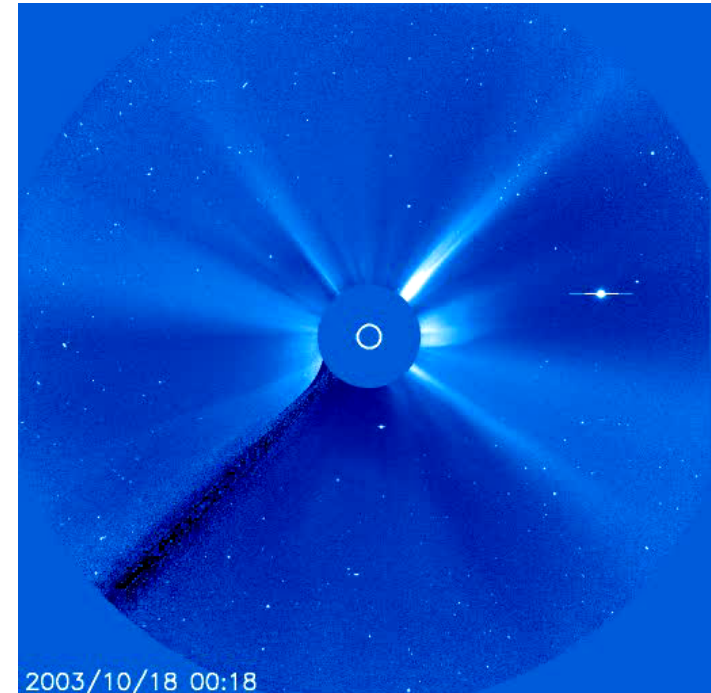
- 太陽の総放射量は $\approx 3.85 \times 10^{26} \text{W} (= \text{J/s})$
- ということは1秒間に何kgの質量を失っているか？

小問題2

地球近傍 (@1AU= 1.5×10^{11} m) で計測した太陽風の平均的な速度は600km/s、密度は 10^7 個/m³程度。

太陽風はほぼ水素プラズマとすると、粒子1個の重さ=陽子の重さ= 1.67×10^{-27} kg

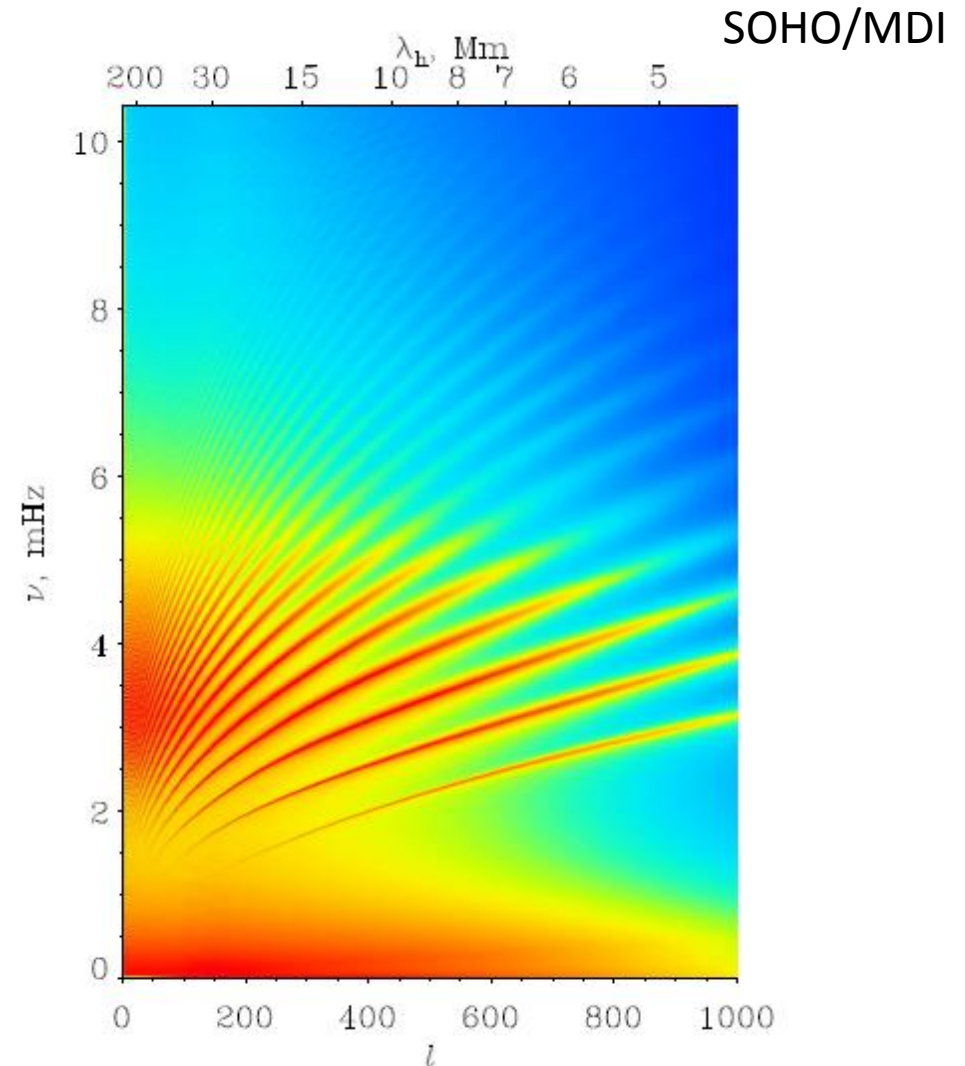
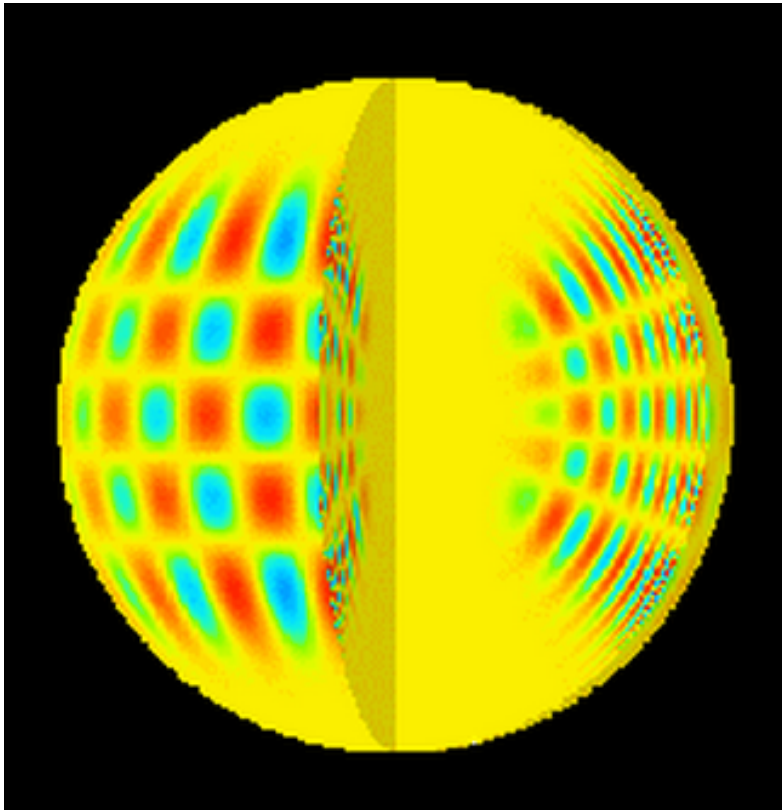
太陽風はほぼ等方的に流れているとすると、太陽風による質量損失率はどれくらいか？核融合による質量損失と比べてどうか？



小問題3

- 前出の質量損失率が太陽が主系列星である約100億年の間一定と仮定した時、太陽は主系列星の間にどれくらい軽くなるか？

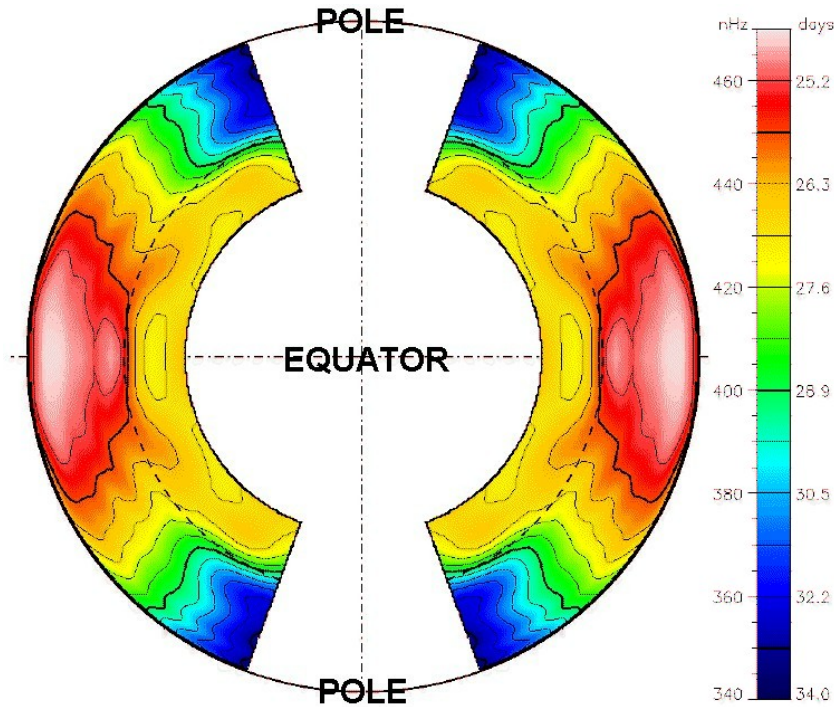
どうやって内部構造を探るか？ 日震学(helioseismology)



太陽の中を伝わる音波(が表面に現れたもの)を観測し、その情報から内部の音速分布(=温度分布)や回転速度分布を引き出す。

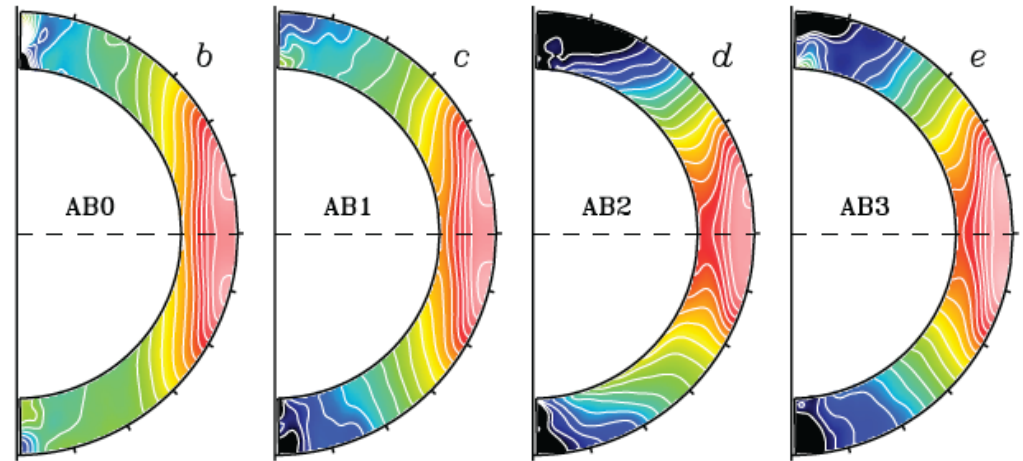
内部の差動回転

日震学の結果



- 赤道付近ほど速い
- 放射層はほぼ剛体回転
- 対流層の底(点線)に強い角速度シアが存在(tachocline)
- この角度シアが黒点を作るのに大事。

数値流体シミュレーションの結果(Miesch+06ApJ)

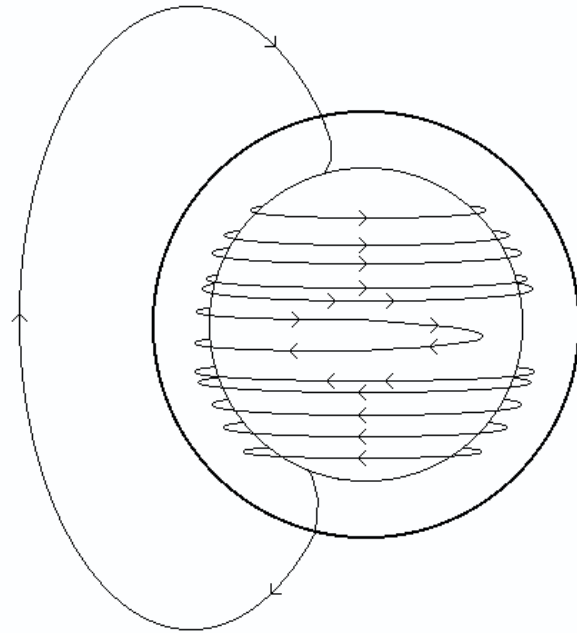


普通に回転球殻+熱対流のシミュレーションをやると、回転軸方向に等角速度になる(Taylor-Proudmanの定理)

対流層の底に緯度方向の温度勾配をつける(極側を10Kほど温める)と、観測と似たプロファイルになる。

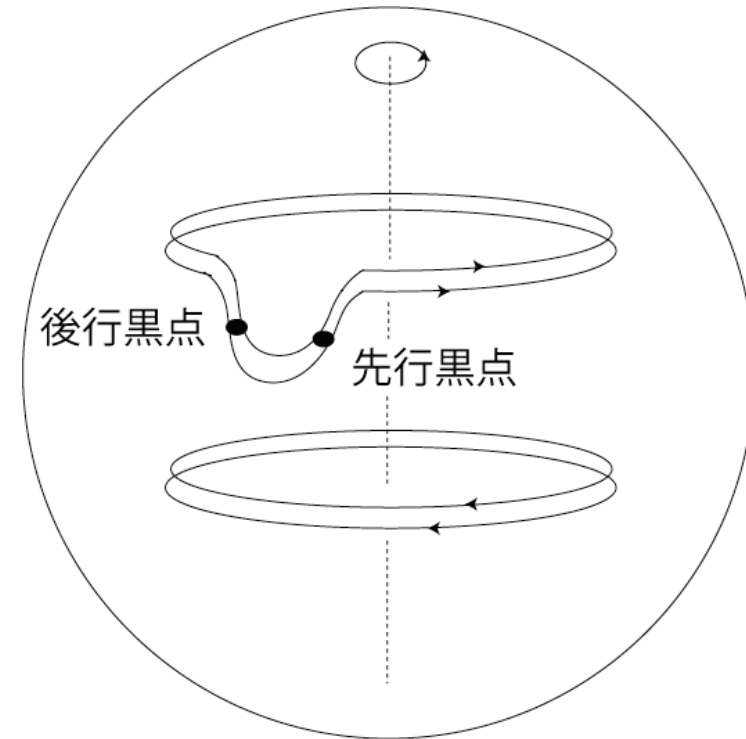
黒点の作り方

- プラズマ中では磁力線はゴムひものような性質を持つ。
- 差動回転で磁場をぎりぎりの引き延ばして強くなる。



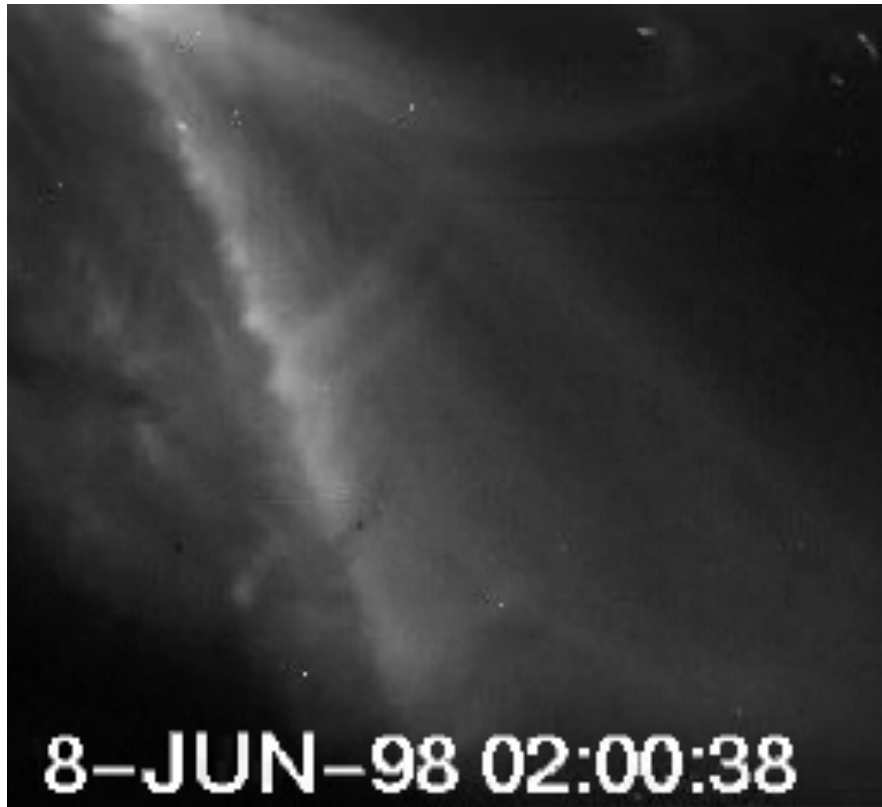
The ω -effect

- 浮き上がってきた磁力線の切り口が、黒点として見える。

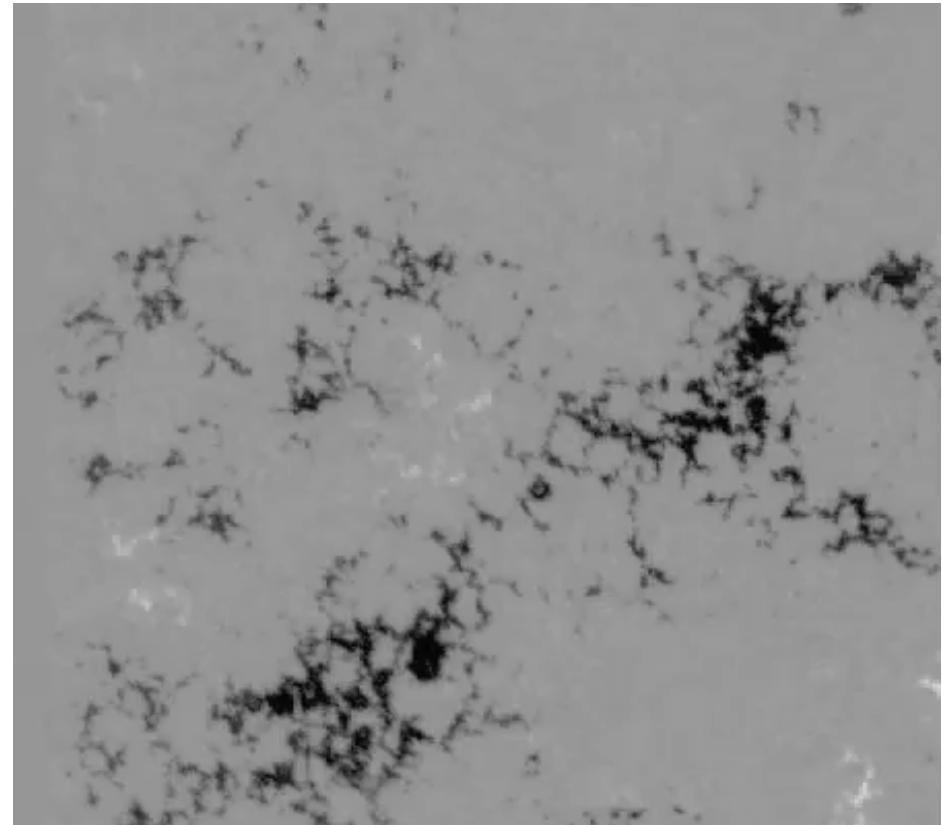


- これだけでは、なぜ11年ごとに黒点数が変化し、極性が反転するのか
- といった観測を説明できない。
- 磁場の起源(ダイナモ機構)は太陽物理最大の未解決問題の一つ(明日詳述)

磁場が浮上してくる現場

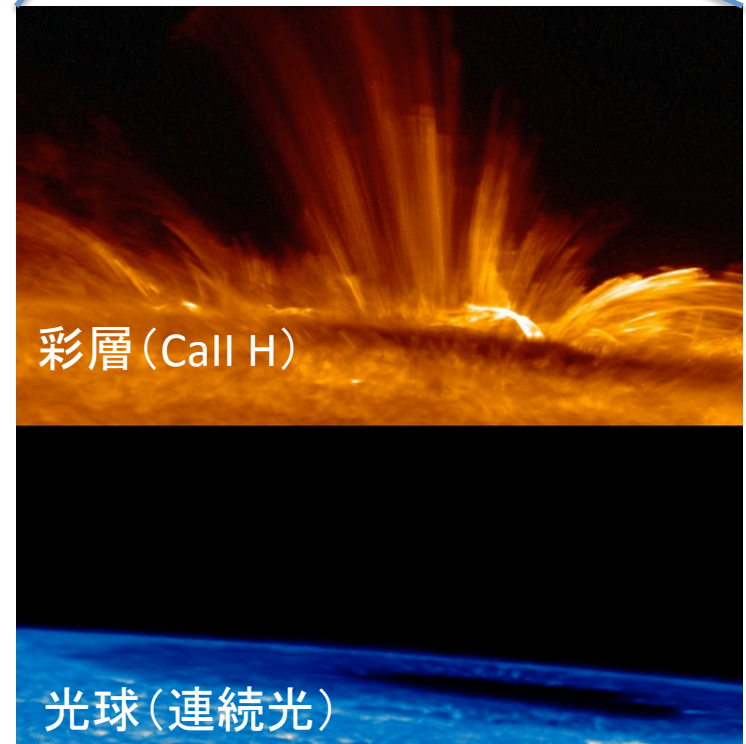
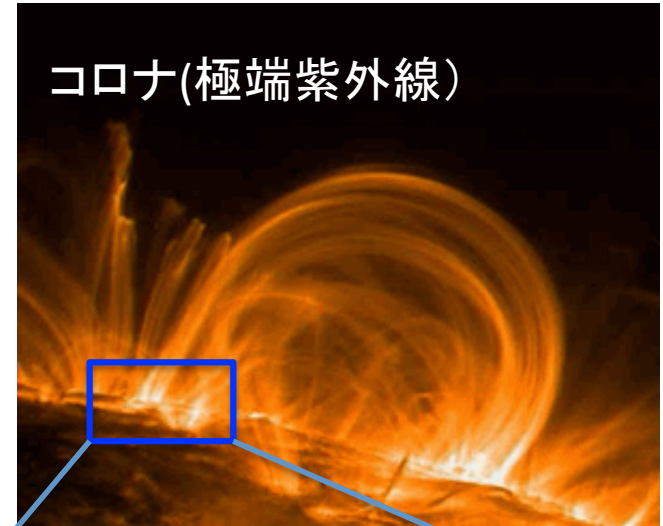
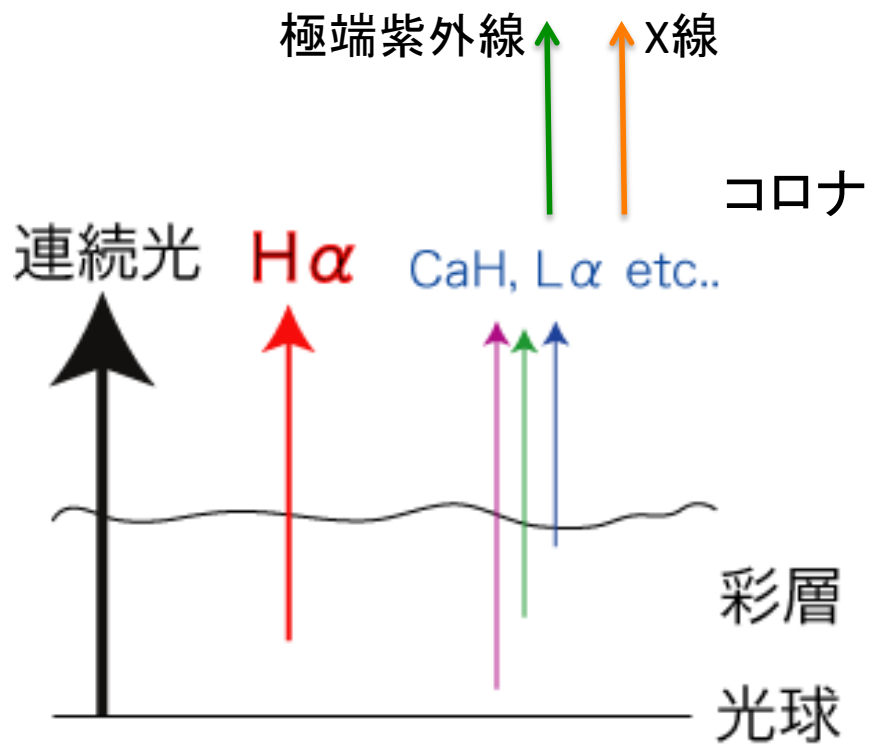


EUV(TRACE衛星)

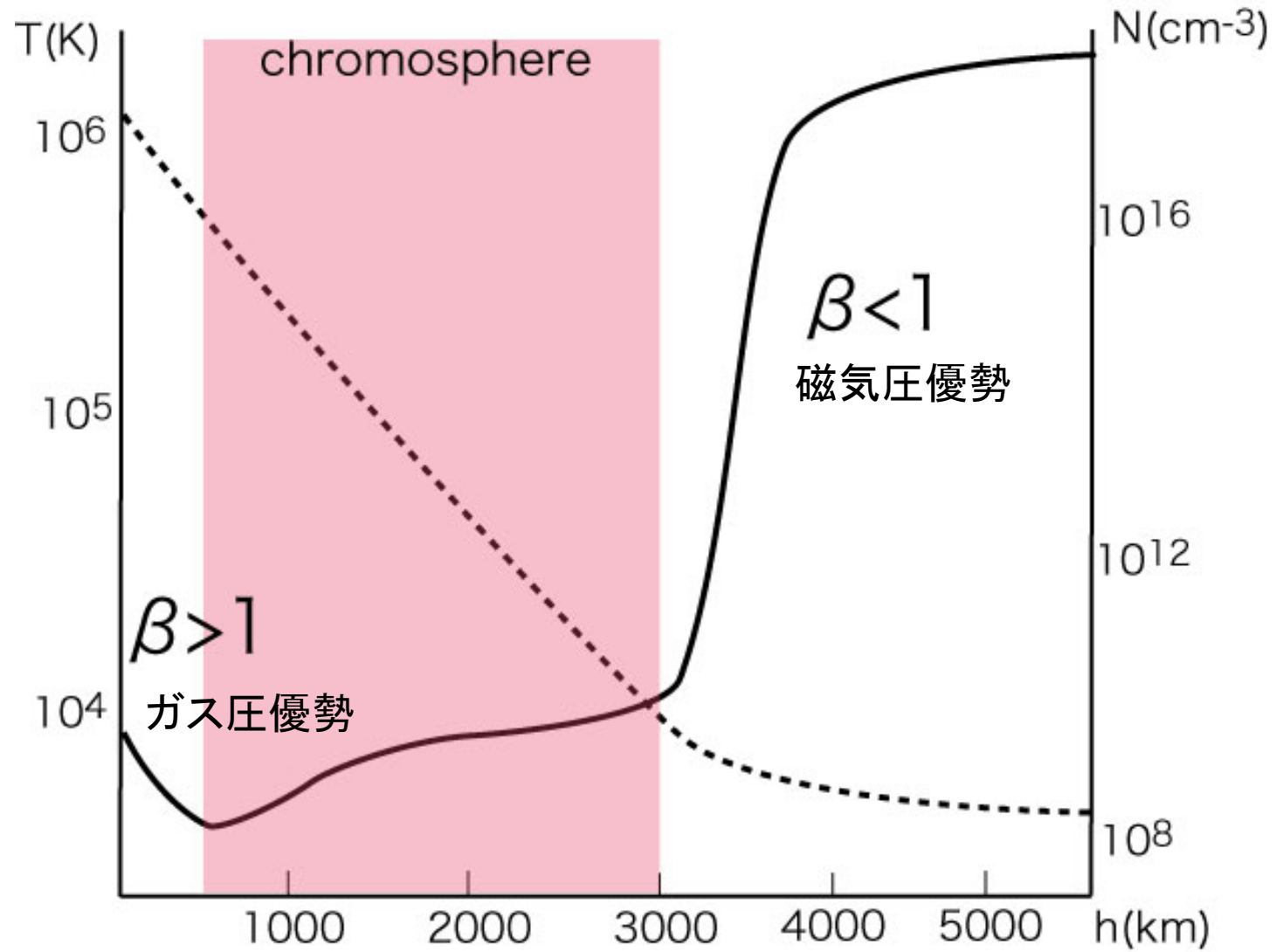


磁場(Hinode/SOT)

大気の構造

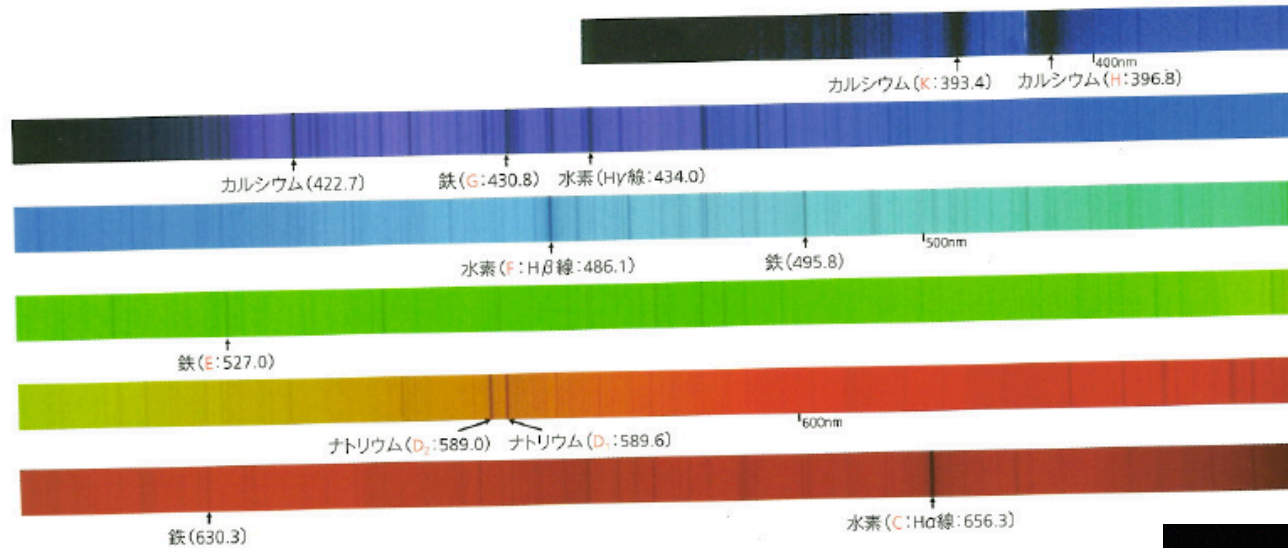


大気の構造



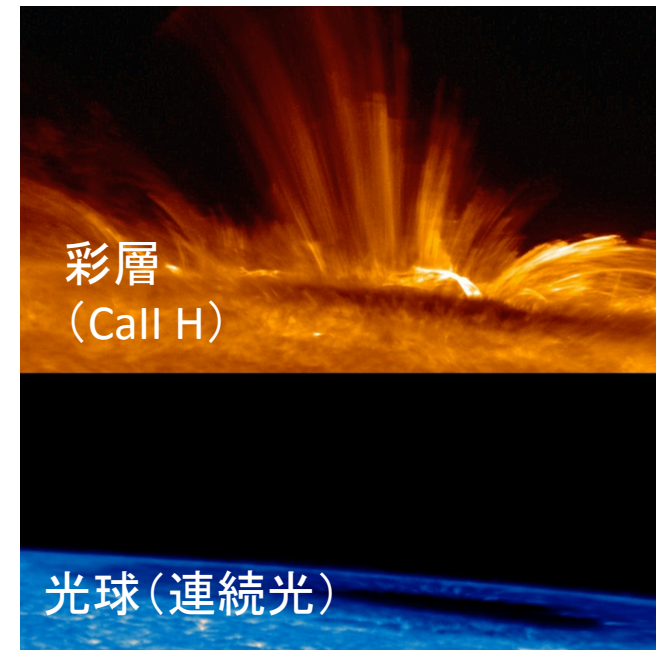
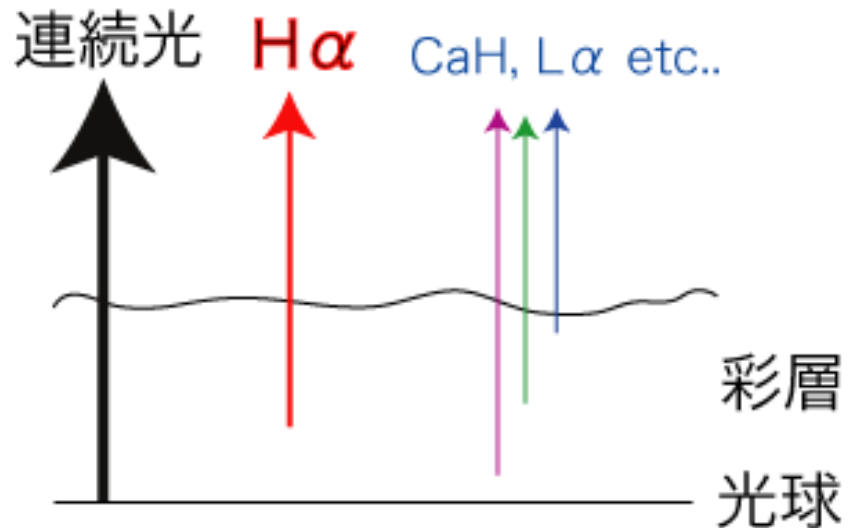
光球、彩層は温度が低くスケールハイト(後述)が小さいため、密度が急激に下がる

放射メカニズム(光球、彩層)

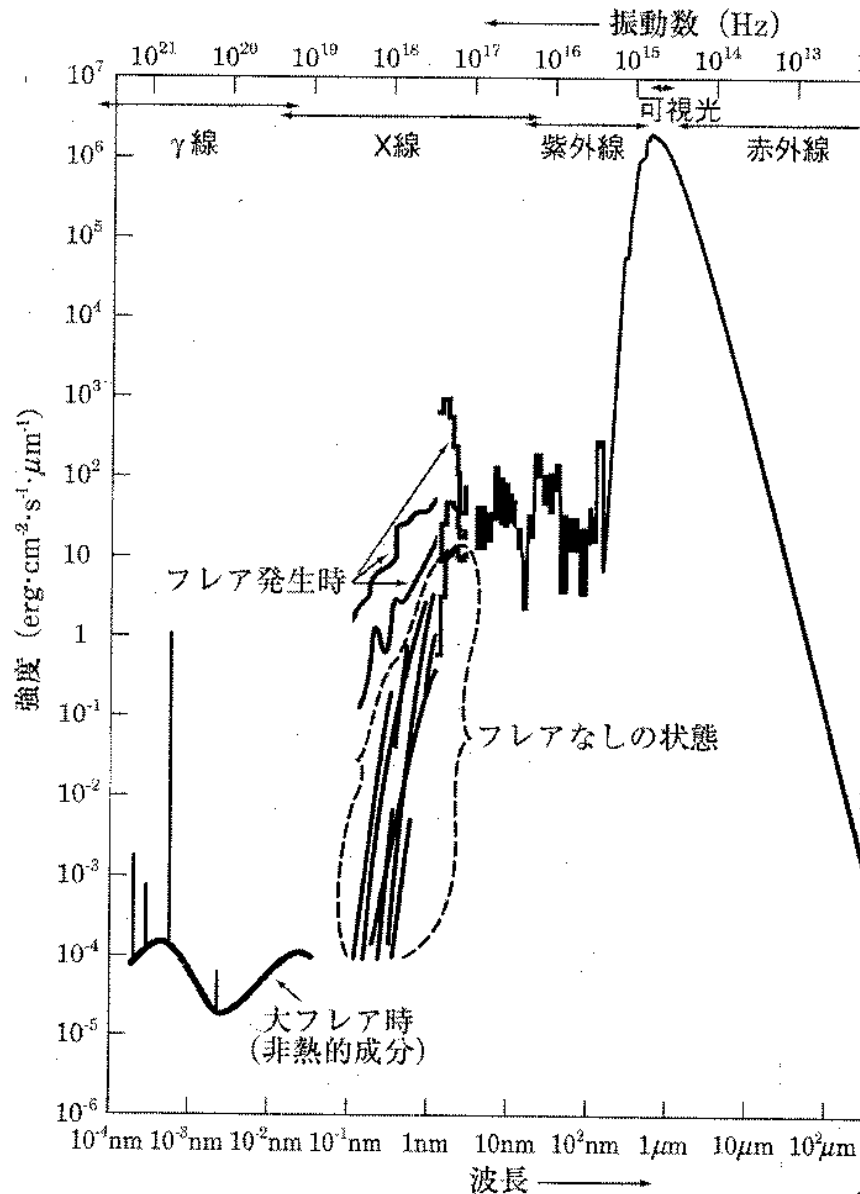


光球からは
黒体輻射(連続光)

彩層はH α やCaK線、
CaH線などの可視スペ
クトル線で観測される。



放射メカニズム(コロナ)



極端紫外線($\lambda < \text{数十nm}$)領域には、コロナに存在する高階電離したイオンからのスペクトル線(輝線)が多数ある。

軟X線領域($\sim 0.1\text{nm}$)では熱的な、硬X線領域($< 0.1\text{nm}$)では非熱的な電子の制動放射が見える。

高階電離したイオンからのスペクトル線

プラズマが高温になる

粒子の平均的運動エネルギー上昇

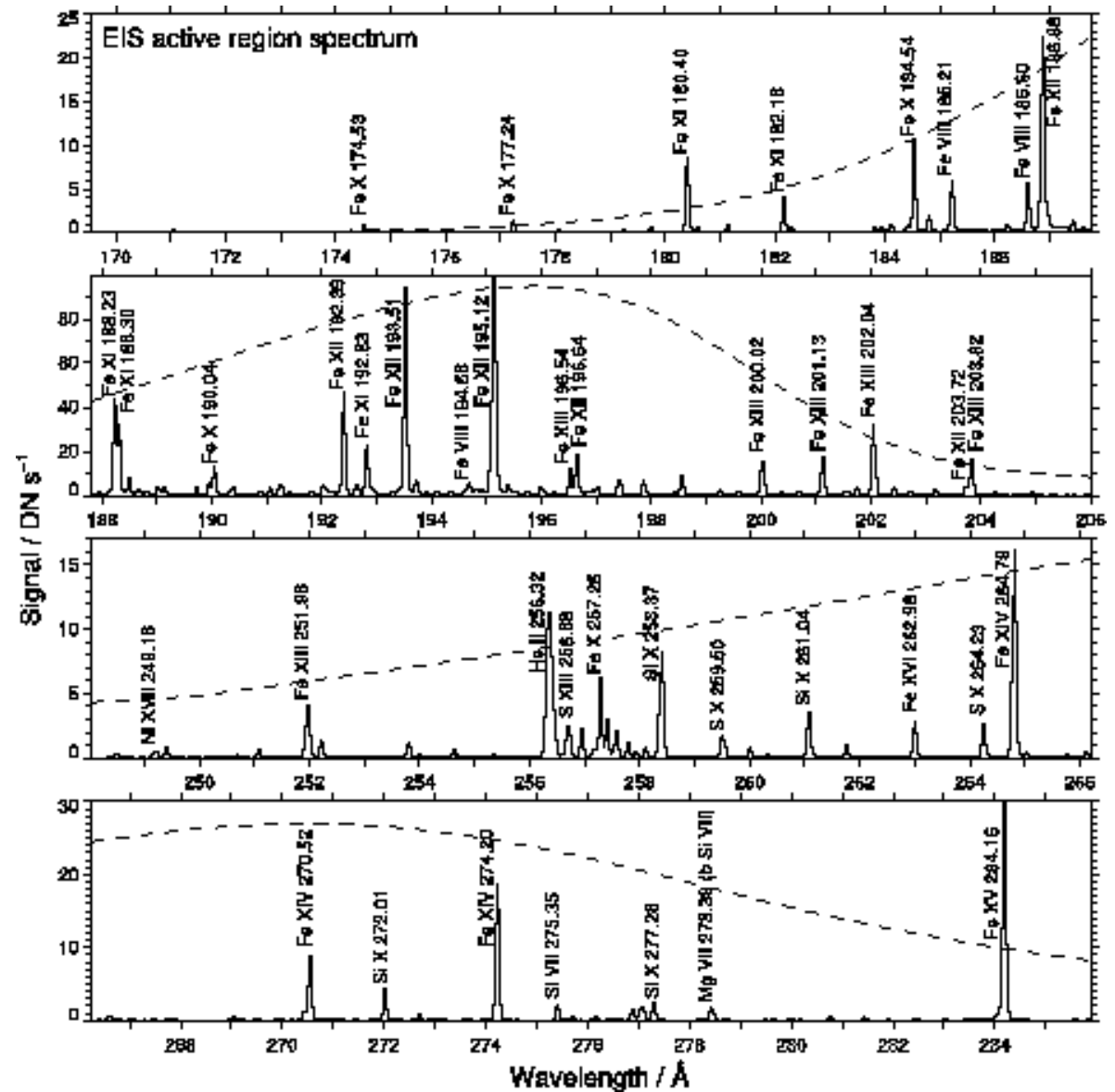
衝突により原子からイオンがはじき飛ばされる=>イオン化

高温になればなるほど、多く電子を失う (=高階電離)

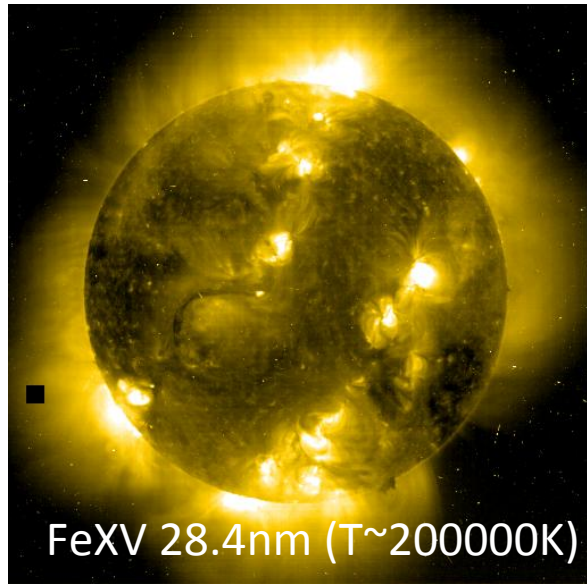
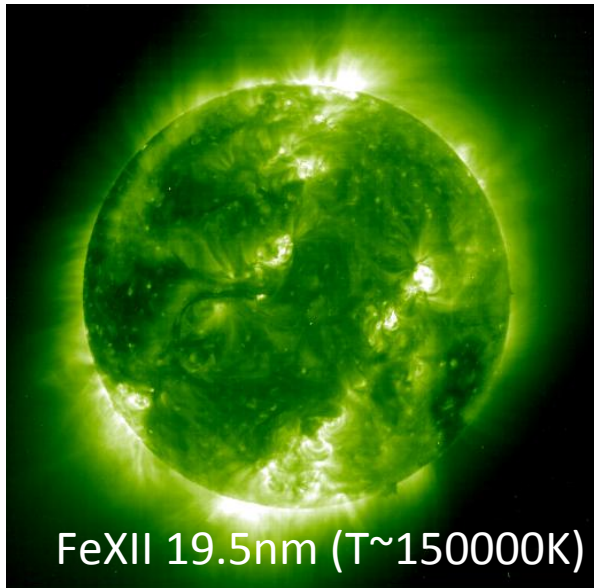
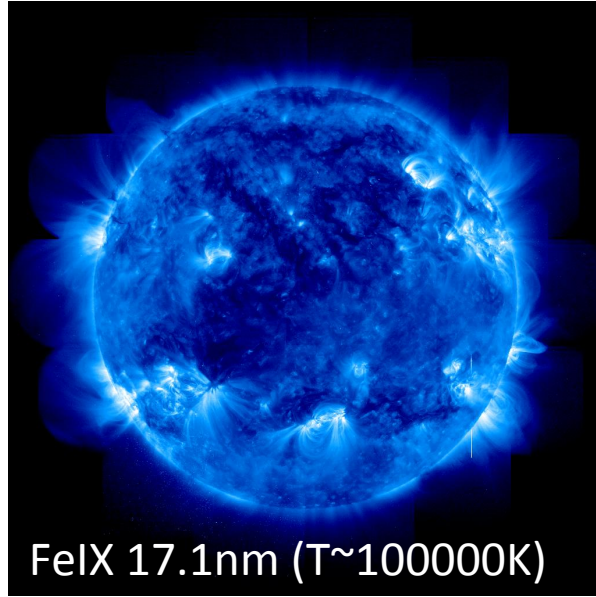
例えば100万K程度だと8個電子を失った鉄イオンFeIXが多い。

150万K程度だと11個失ったFeXIIが多い

200万K程度だと14個失ったFeXVが多い



電離階数が異なるイオンが出すスペクトル線で観測すると、温度の異なるプラズマの分布が分かる



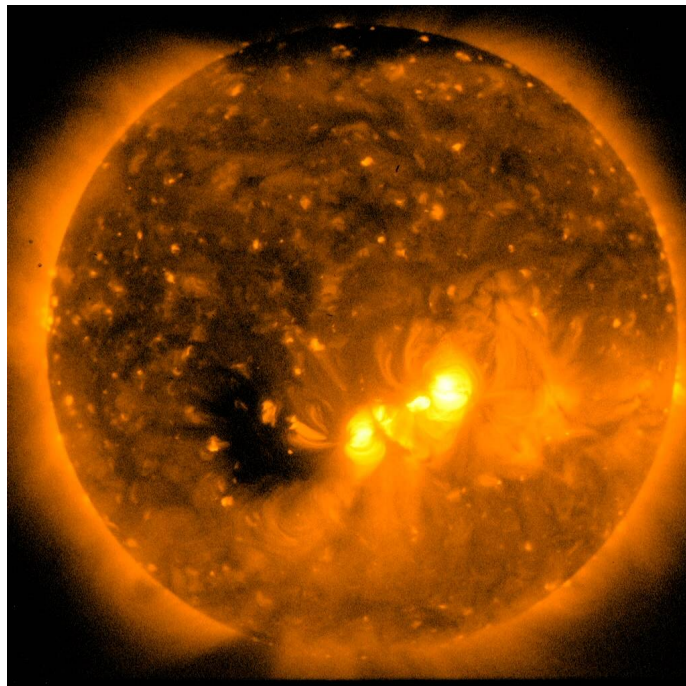
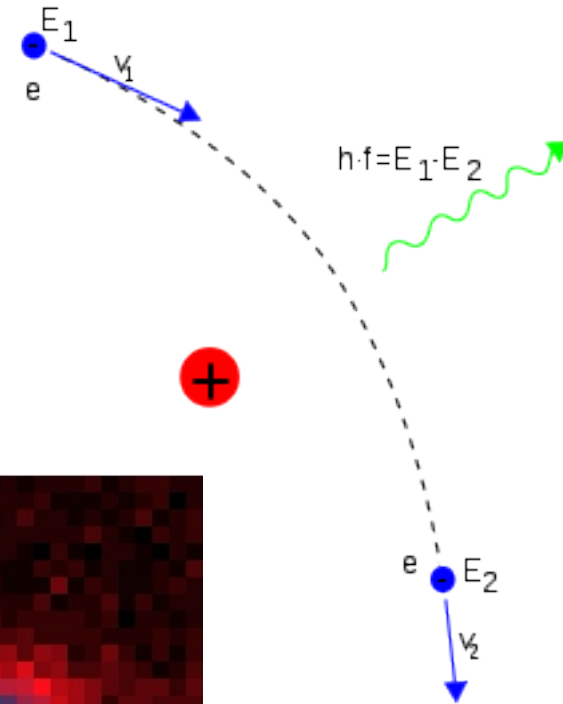
小問題4

- 水素の第一電離ポテンシャルは13.6eV。どれくらい高温になれば、水素原子はほぼ全て電離するか？
 - ただし、1eVは電子が1Vの電位差で得るエネルギーで、 $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$
 - ボルツマン定数 $1.38\times 10^{-23}\text{J/K}$

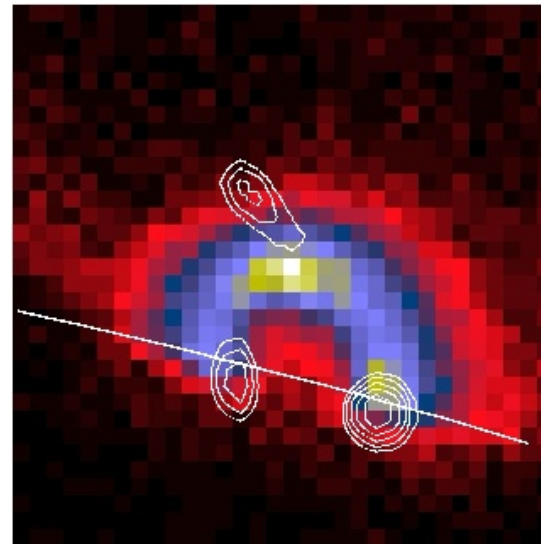
制動放射(Bremsstrahlung)

電子がイオンに衝突(正確には近くを通る)際にクーロン力で加速度を感じて軌道が変わる。

この時失ったエネルギーを光子で放出。



熱的制動放射($\sim 0.1-1\text{keV}$ 、Hinode/XRT)



非熱的制動放射($> \text{数}10\text{keV}$ 、Yohkoh/HXR)

小問題5

- 100万Kのプラズマの粒子の平均的な速度はどれくらいか？
 - 電子の場合
 - 陽子の場合
- 100万Kのプラズマの粒子の平均的なエネルギーをeVで表現するとどれくらいか？

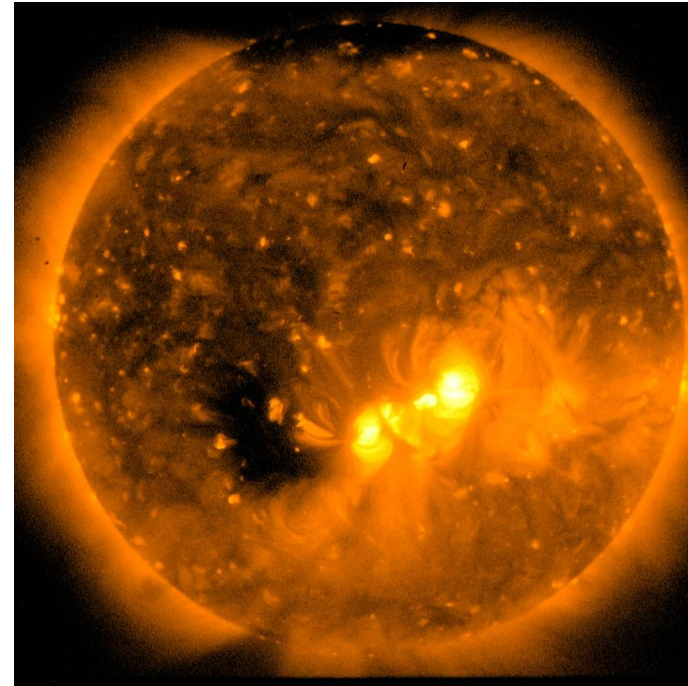
小問題6

- 1keV(~ 1000 万K)の電子が陽子に”ぶつかる”ためにはどれくらい近づけばよいか？
- この値を用いて衝突断面積を出せ

プラズマと電磁流体力学の基礎

太陽は何でできているか？

- 水素原子
 - 電子
 - 陽子
- ヘリウム等重粒子
- 磁場



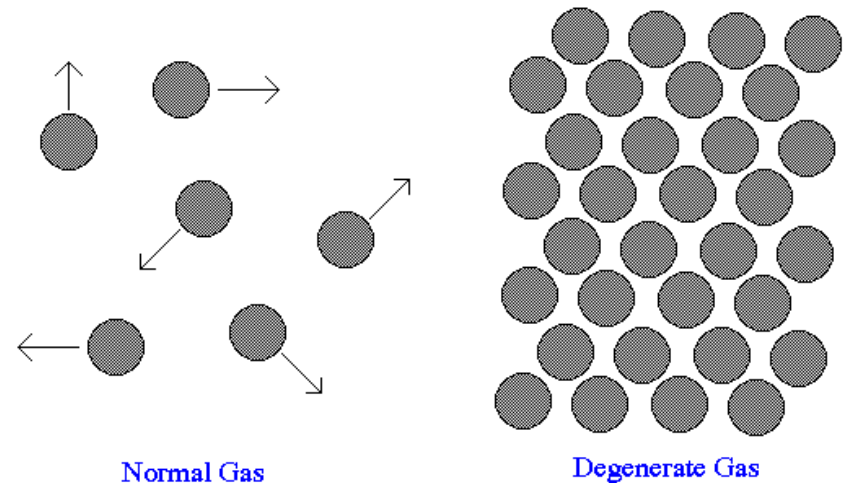
下層大気のものぞいて、ほぼ電離している。

(ほぼ)理想気体として扱える条件

運動エネルギー \gg クーロンポテンシャル

デ바이長

When a gas becomes extremely high in density, the atoms are not as free to move and they become degenerate.



the result is that you can increase the temperature of the gas (the atoms can wiggle more) but the pressure stays constant (they have no where to move).

<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec12.html>

小問題7: 太陽大気は理想大気として扱えるか？

流体として扱える条件

平均自由行程 \ll システムサイズ



無衝突系



微妙



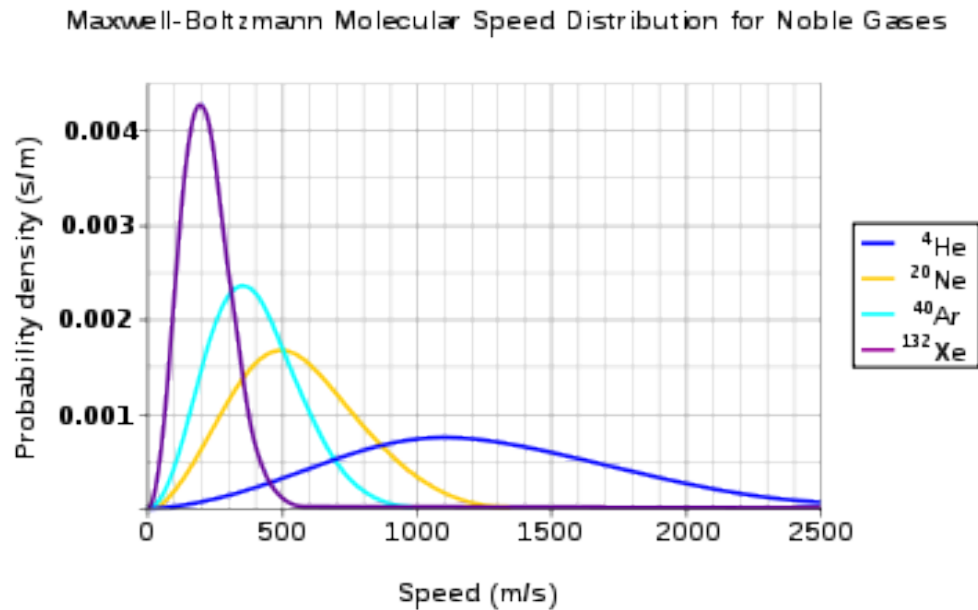
衝突系(流体)

小問題8: 太陽大気は流体として扱えるか？

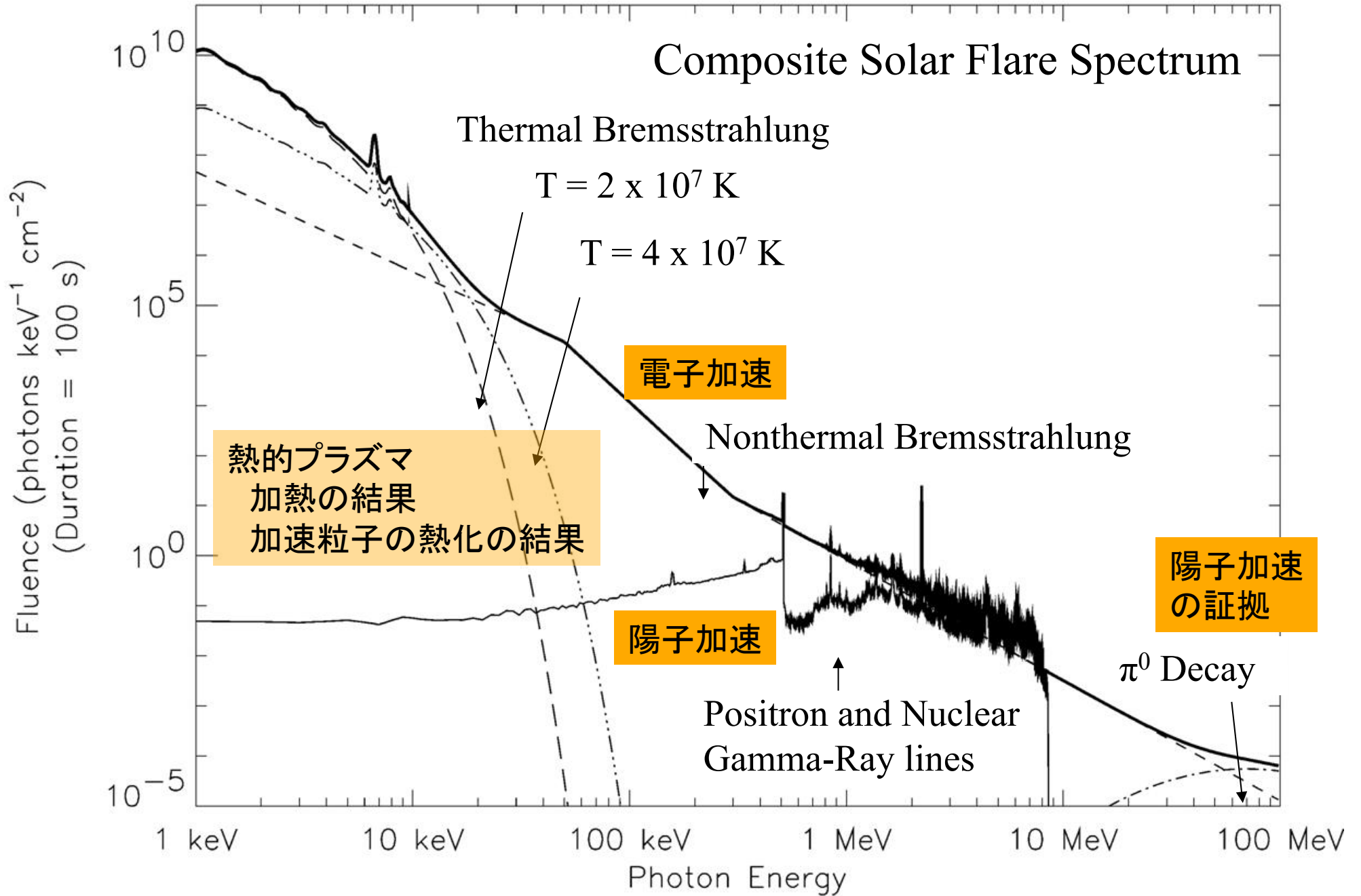
熱的と非熱的の意味と粒子加速

Maxwell 分布

$$f(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right)$$



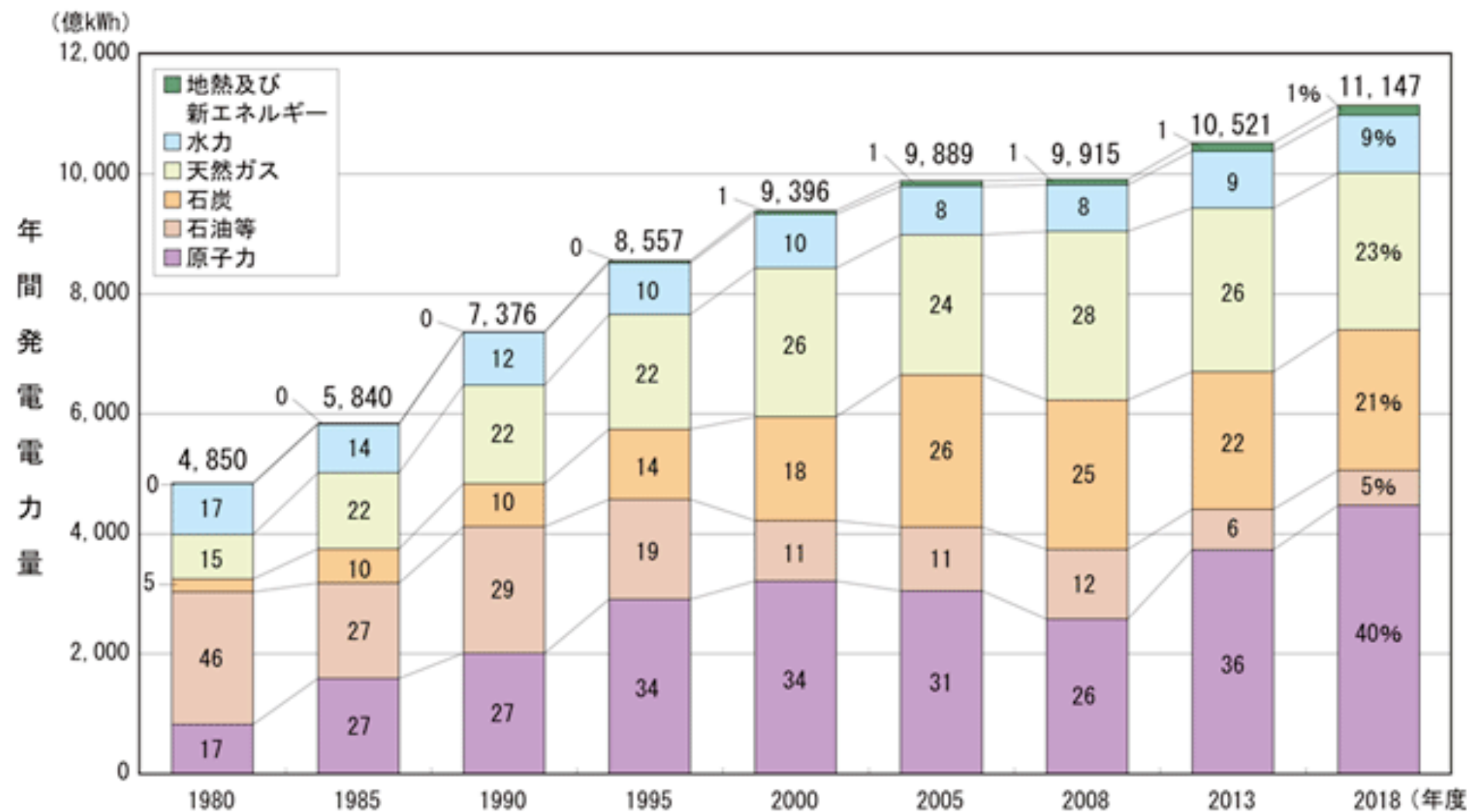
Composite Solar Flare Spectrum



Soft X-ray Hard X-ray Gamma-ray

宇宙天気予報スクール

電源別発電電力量の実績および見通し



(注) 石油等にはLPG、その他ガスおよび瀝青質混合物を含む
 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある
 発電電力量は10電力会社の合計値 (受電を含む)
 グラフ内の数値は構成比 (%)

電気事業連合会のHPより
<http://www.fepec.or.jp/present/jigyuu/japan/index.html>

小問題10

- 太陽常数 $1\text{kW}/\text{m}^2$
- 太陽電池パネルの効率20%
- 夜や雲の影響などで、実効的に発電できる時間は1日3時間
- とすると、日本の年間電力量1兆 kW 時を全て太陽光で賄うにはどれほどの面積が必要か