

太陽物理学イントロダクション

横山 央明

(東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻)

謝辞: 共同研究者のみなさま、国立天文台、JAXA、NASA、ESA、京都大学
飛騨天文台、「ようこう」「ひので」チームのみなさま、、、

自己紹介

1992年3月 京都大学 工学部 航空工学科卒業(学部・修士)

1995年3月 総合研究大学院大学 (国立天文台三鷹)で学位
取得

国立天文台三鷹でポスドク

1998年4月 国立天文台野辺山助手

2003年4月より 東京大学 地球惑星科学専攻助教授・准教授

目次

太陽物理学：イントロダクション

- 太陽の観測
- 太陽大気ダイナミズム
- 太陽物理学の研究

コンピュータの中の太陽

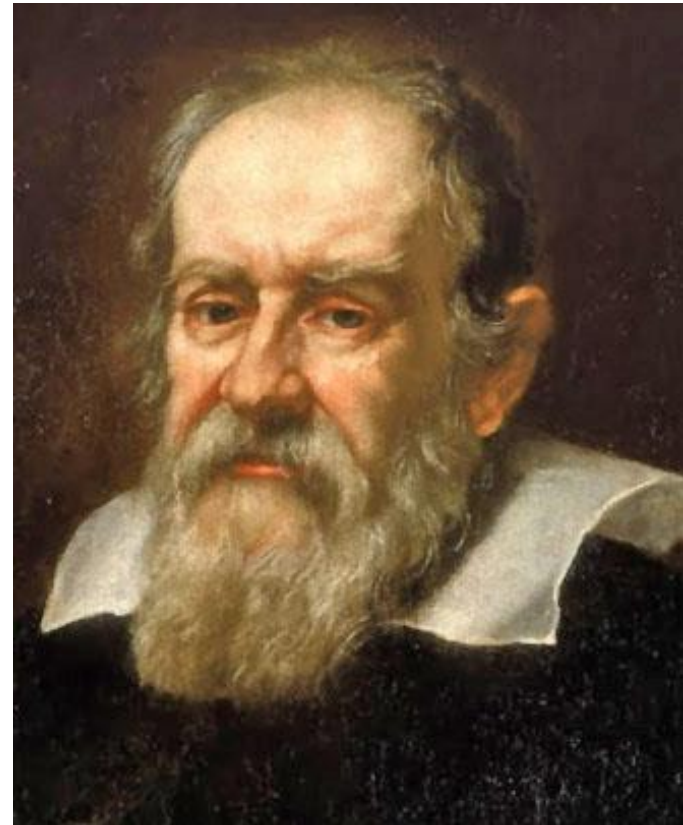
太陽の観測

ガリレオ=ガリレイの太陽観測



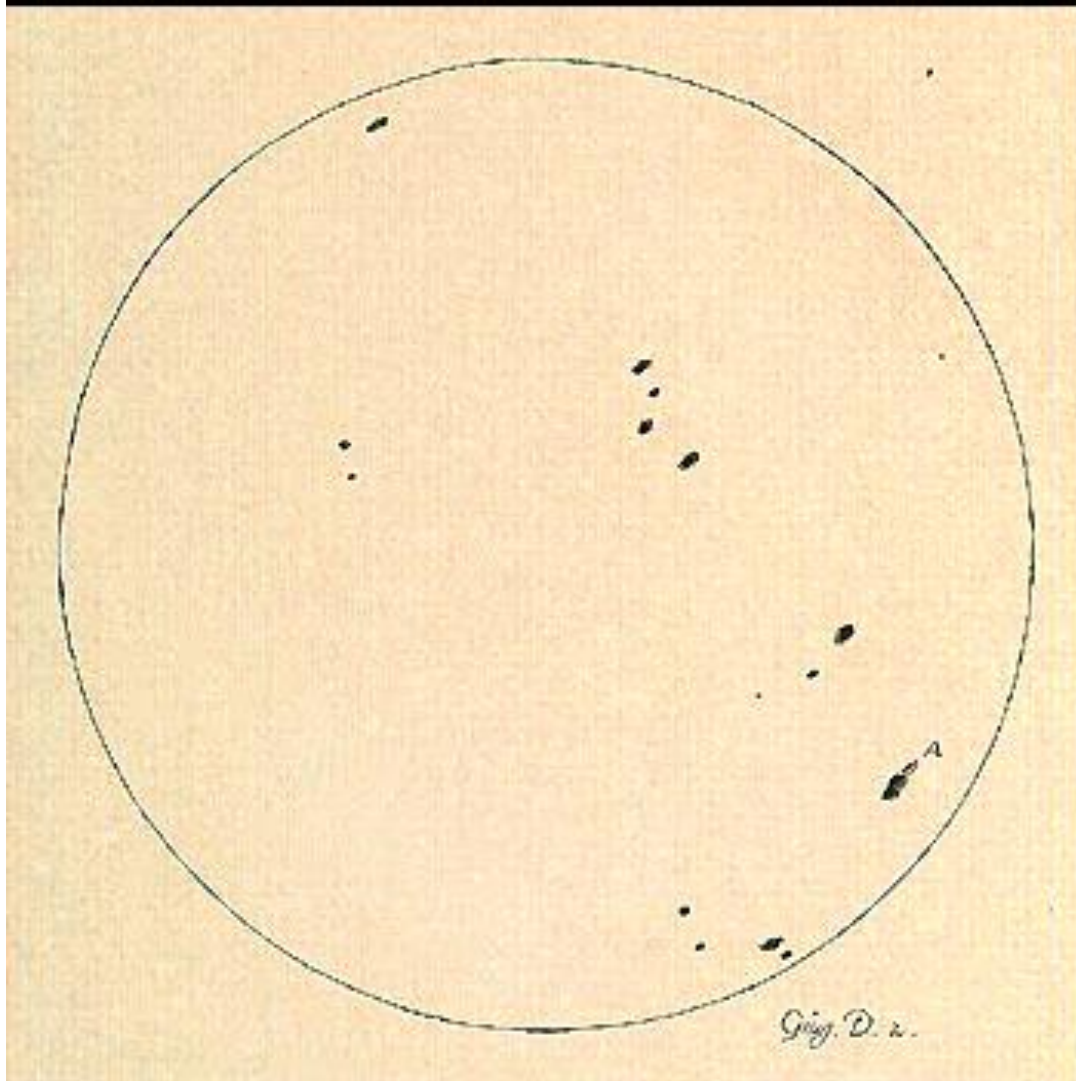
「太陽黒点にかんする第二書簡」 (1612)

- ヴェルザー氏との手紙で、太陽黒点について詳述。



Wikipediaより

ガリレオ=ガリレイの太陽観測「太陽黒点にかんする第二書簡」

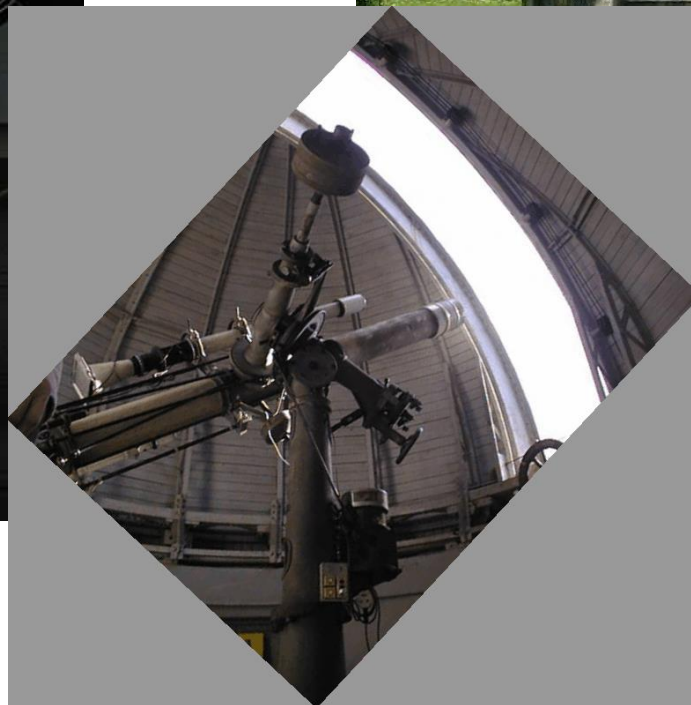
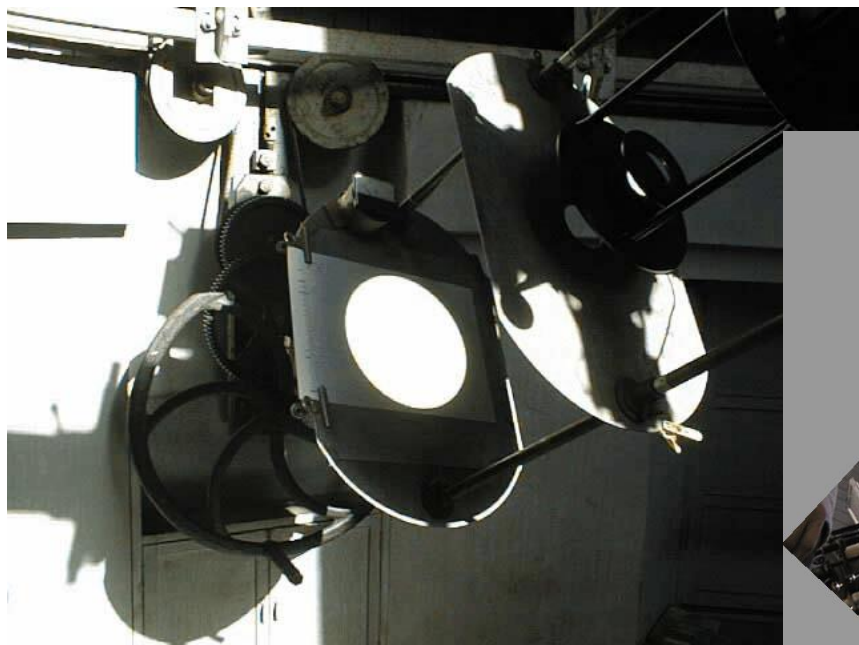


- 約2カ月にわたる黒点のスケッチが掲載
- 太陽が自転していること
- 黒点が太陽表面の現象であること
- 形が不規則に変化し、その寿命が数日から1カ月ほどであること

国立天文台三鷹の黒点観測望遠鏡

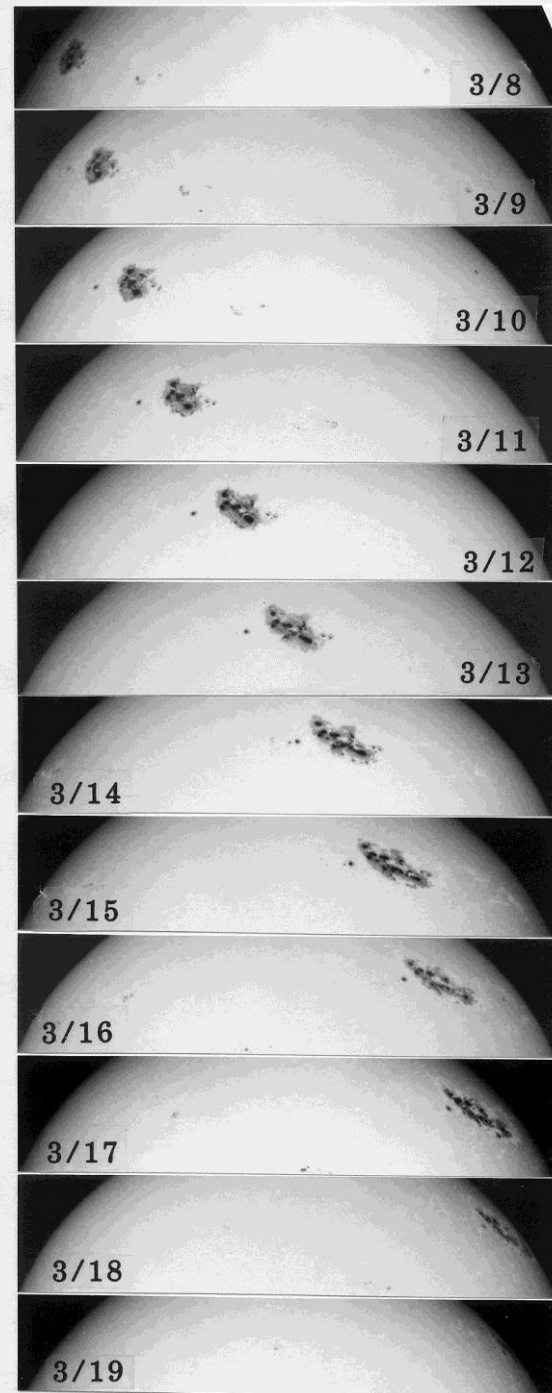
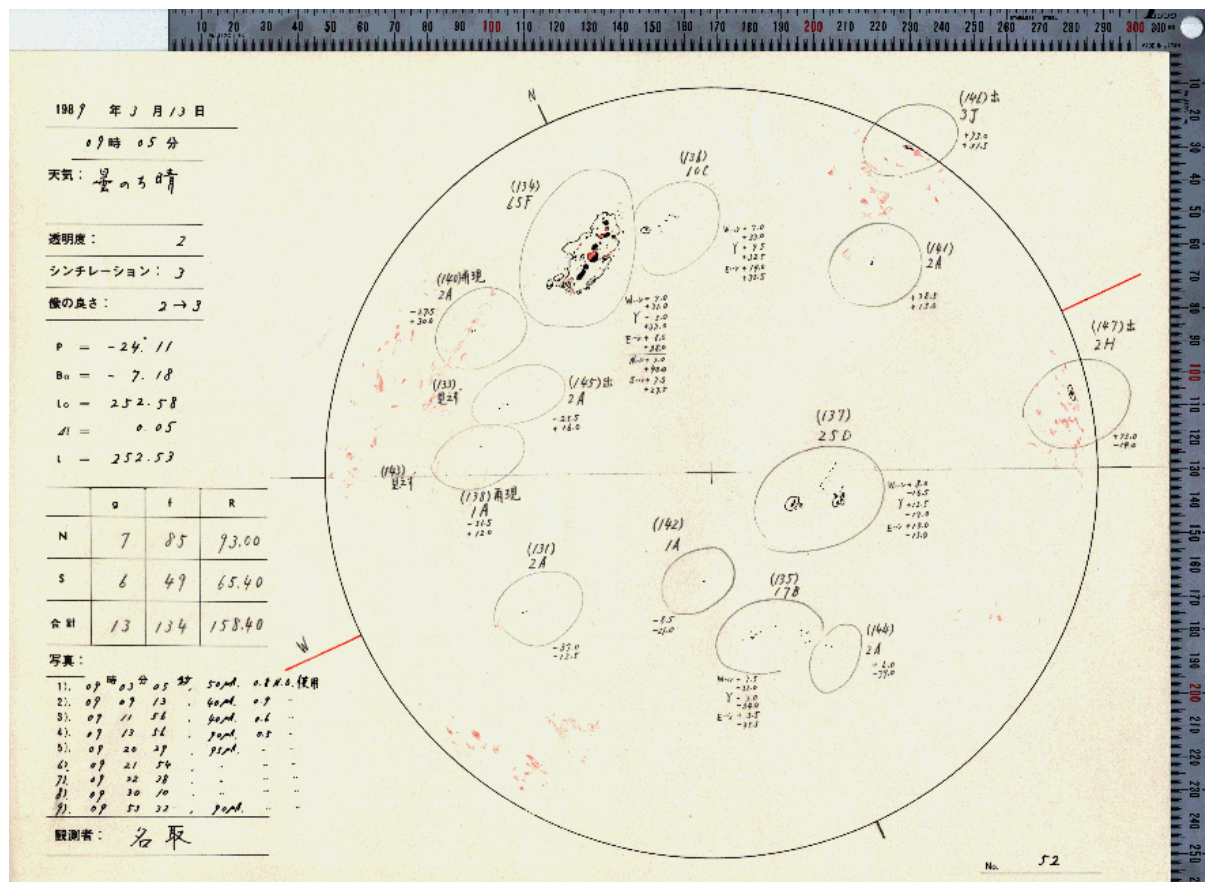
1938年から1998年まで観測
(現在は自動化)

基本的な手法は、ガリレイが記
述しているのと同じ



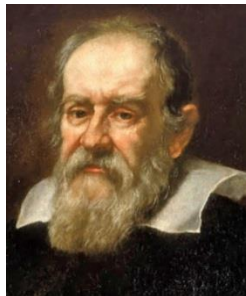
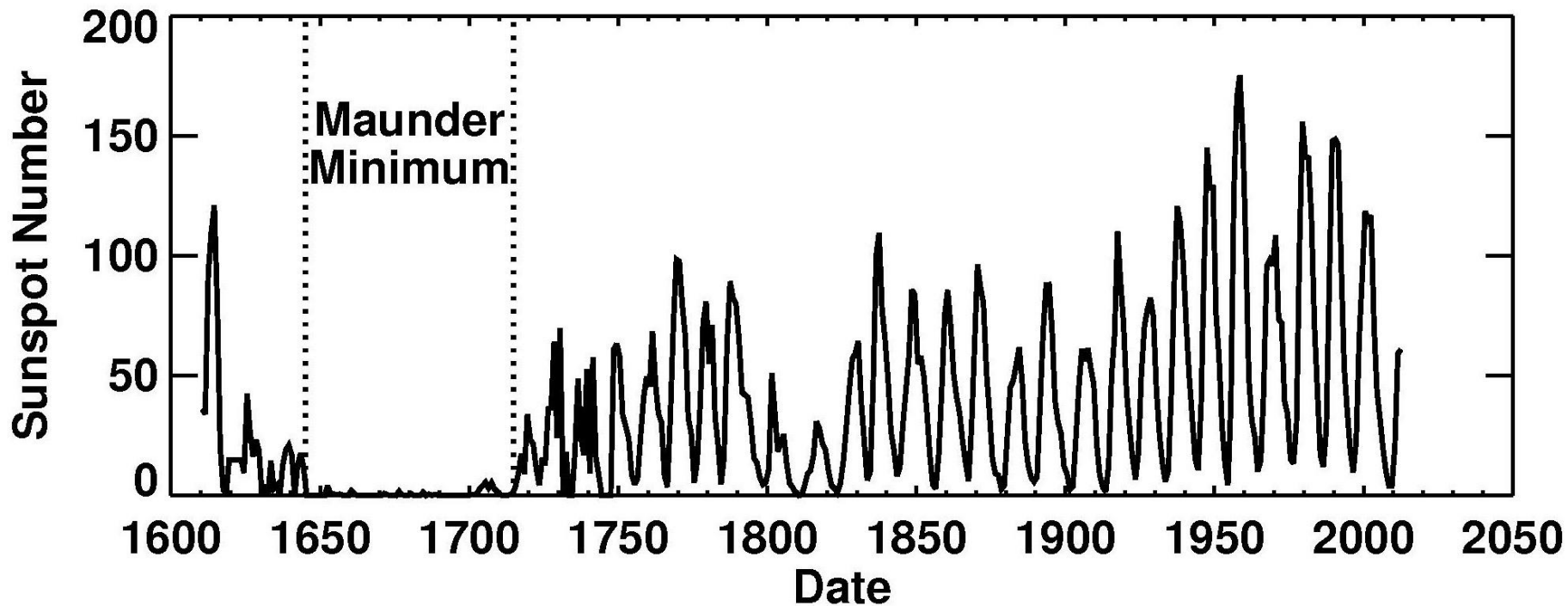
現在の黒点スケッチ

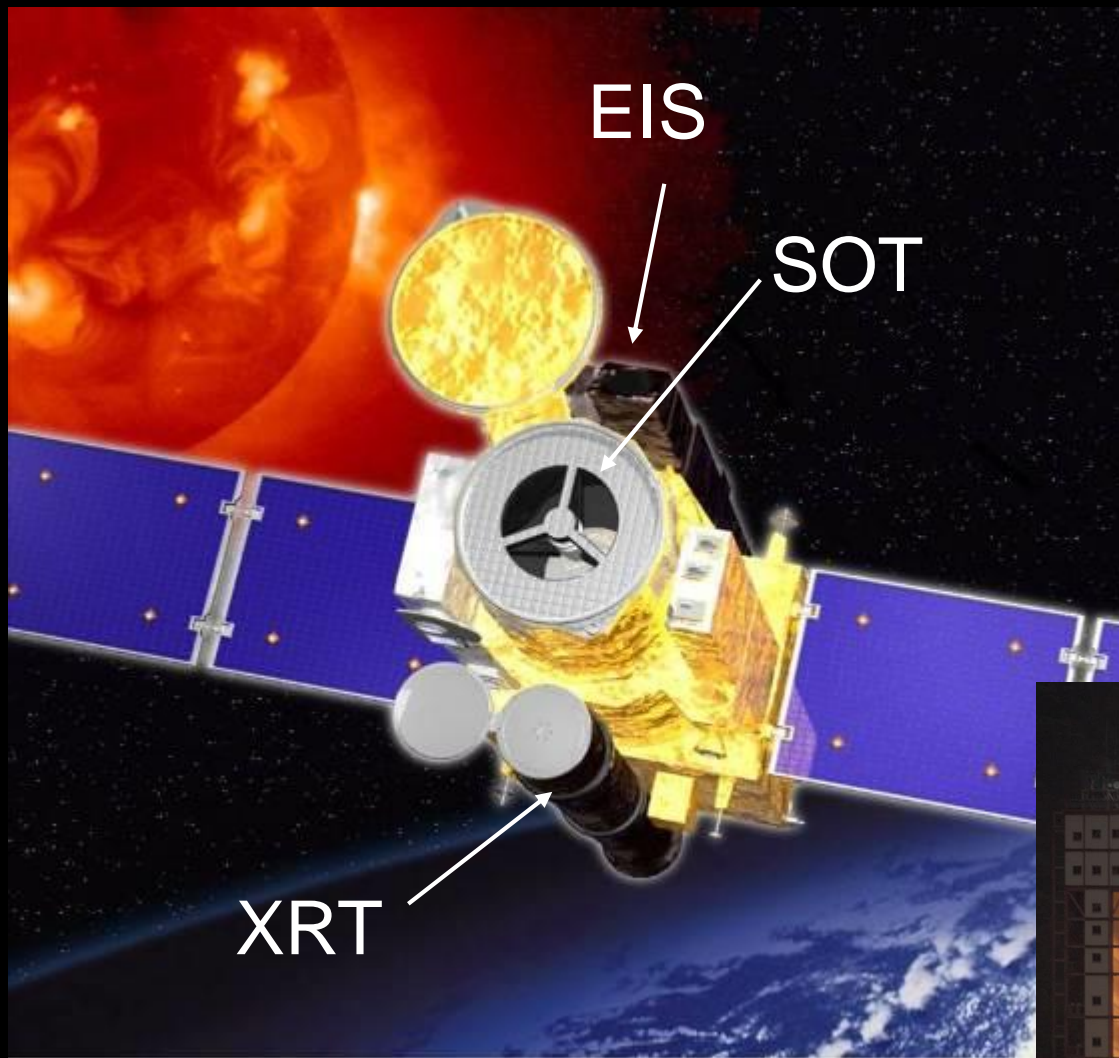
東西反転に注意



黑点数

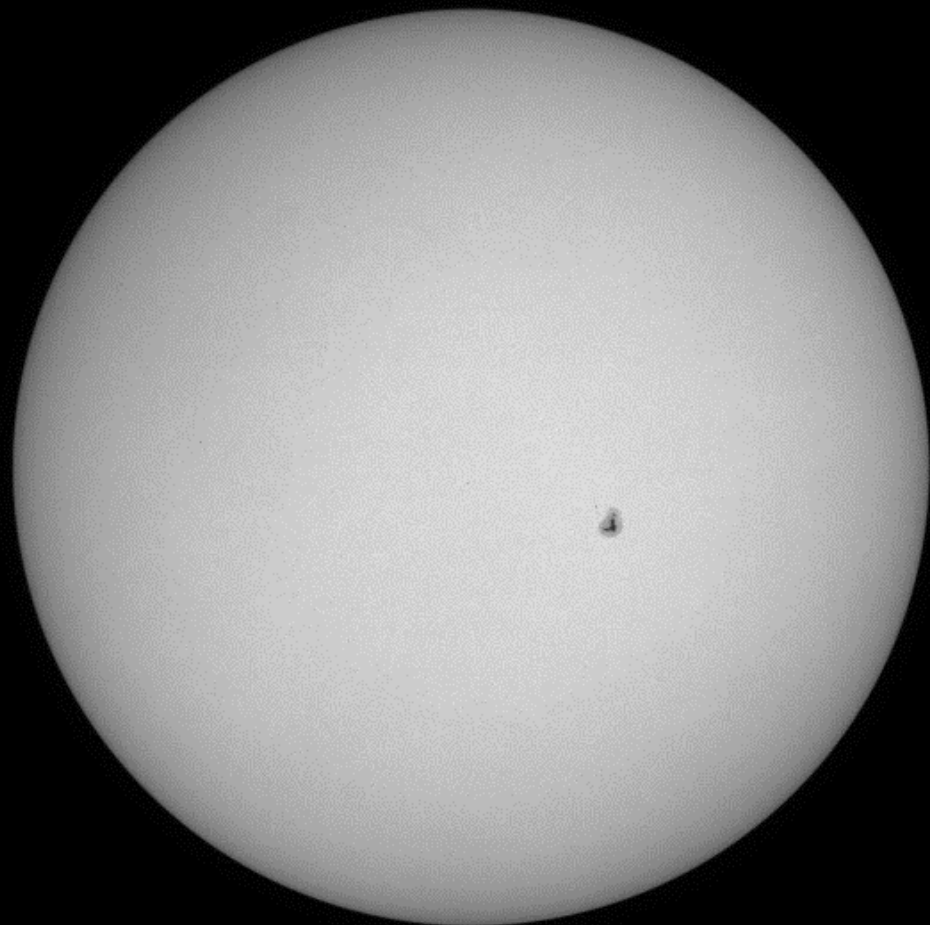
(NASA提供)





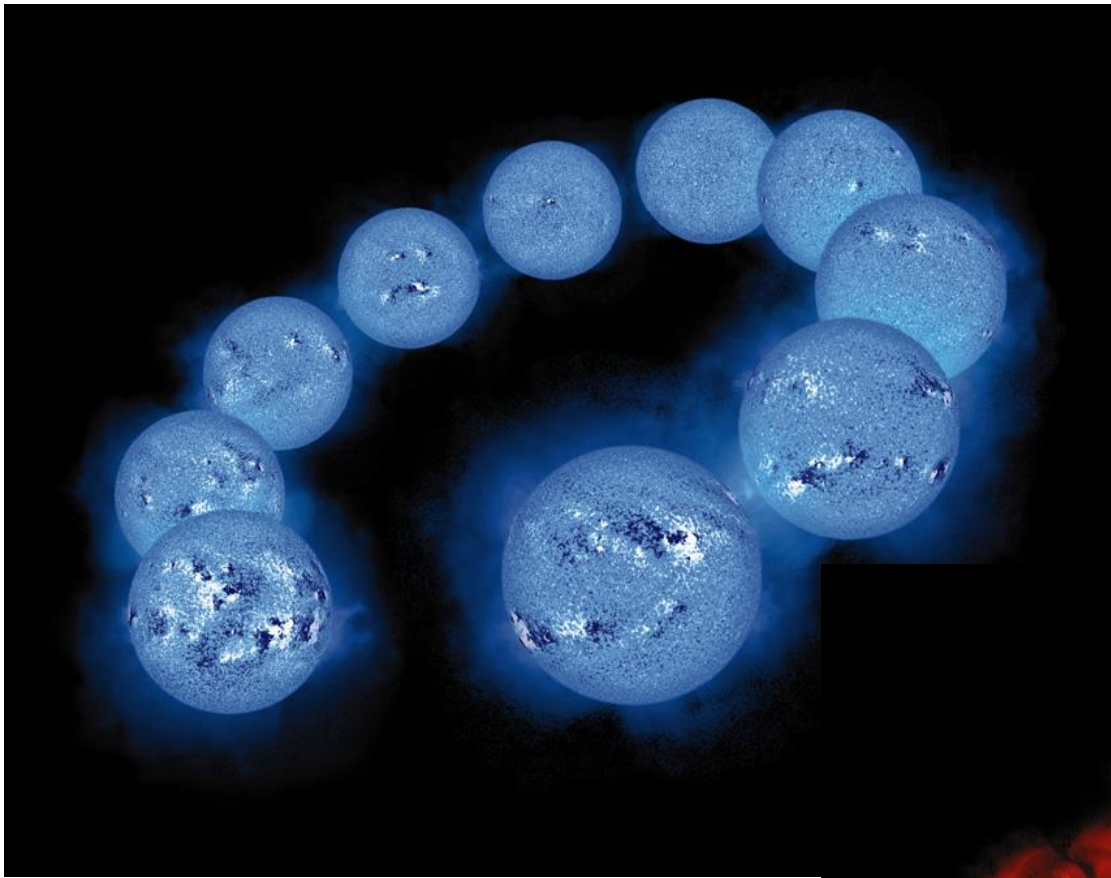
「ひので」衛星



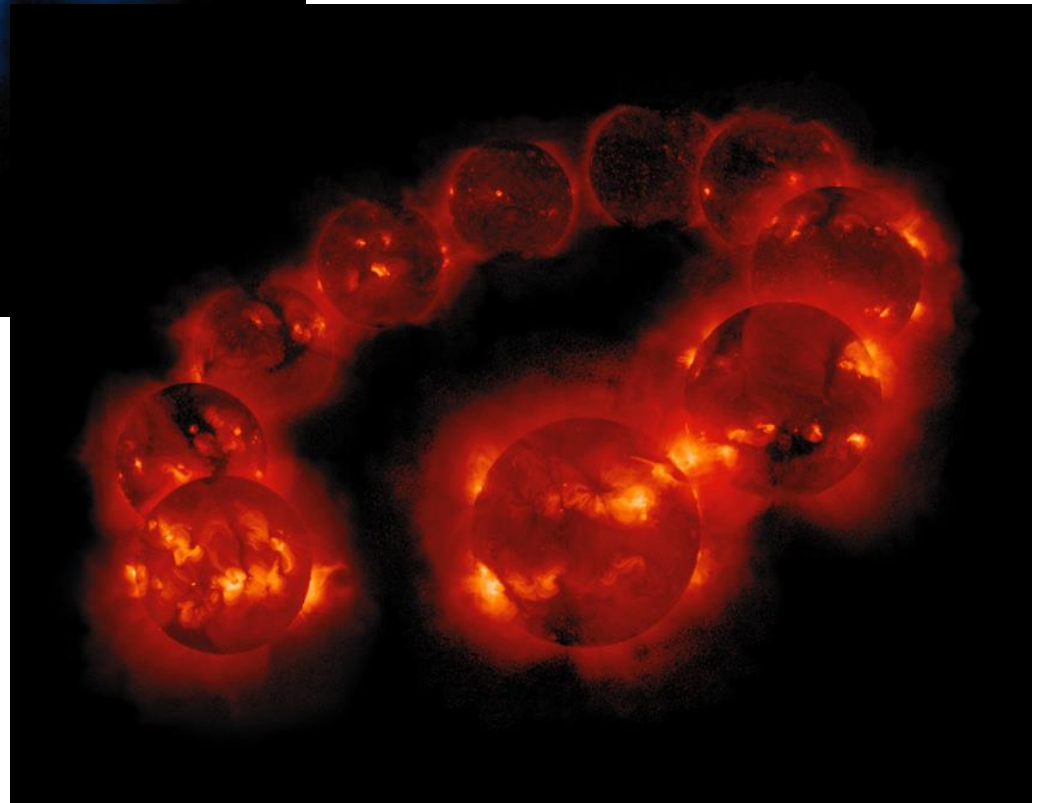


171,000 km

太陽光球磁場の
約10年間の変動
(米国NSO提供)

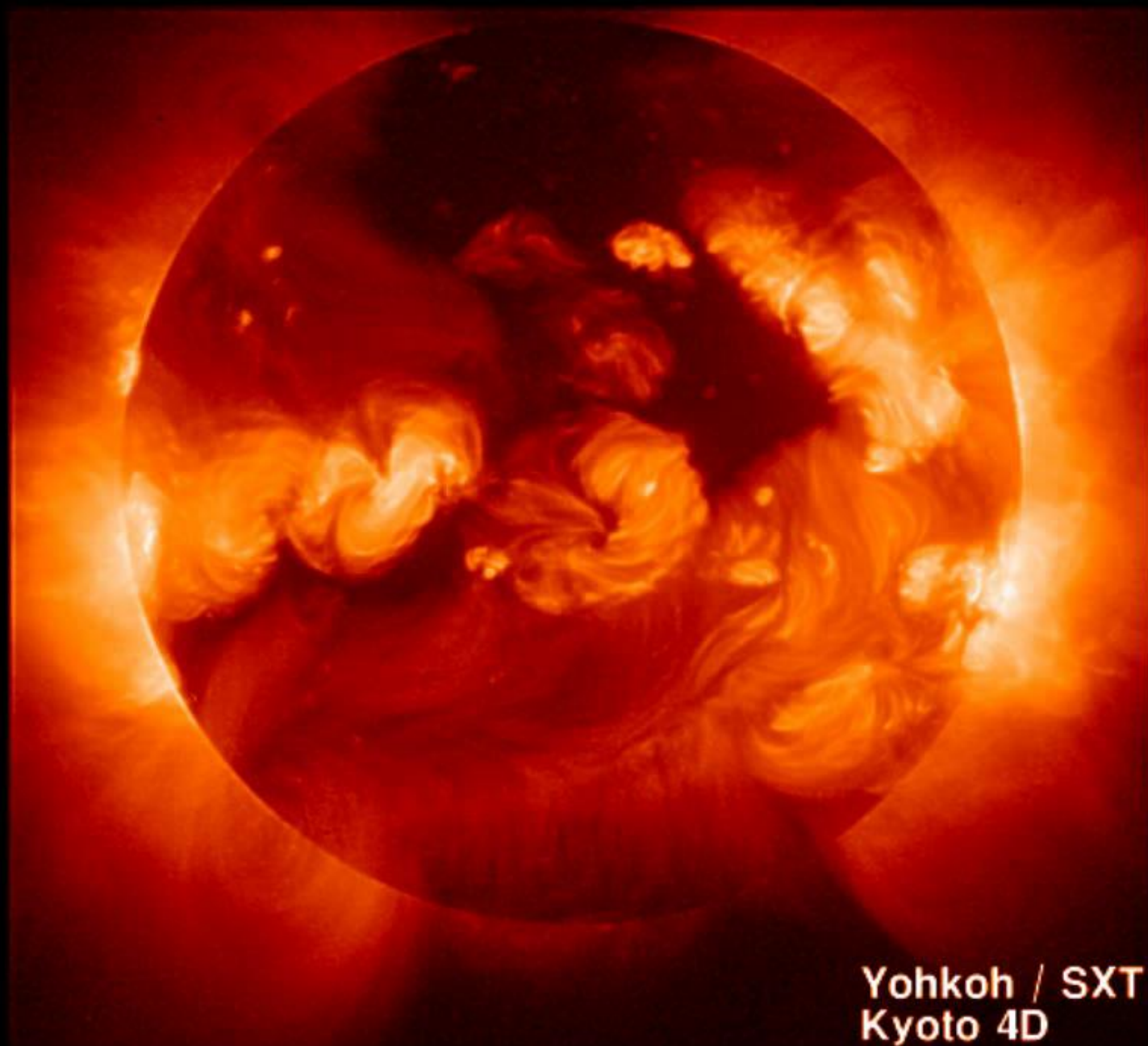


太陽X線放射の
約10年間の変動
(ようこう: JAXA宇宙研提供)



太陽大気ダイナミクス

1992/01/12

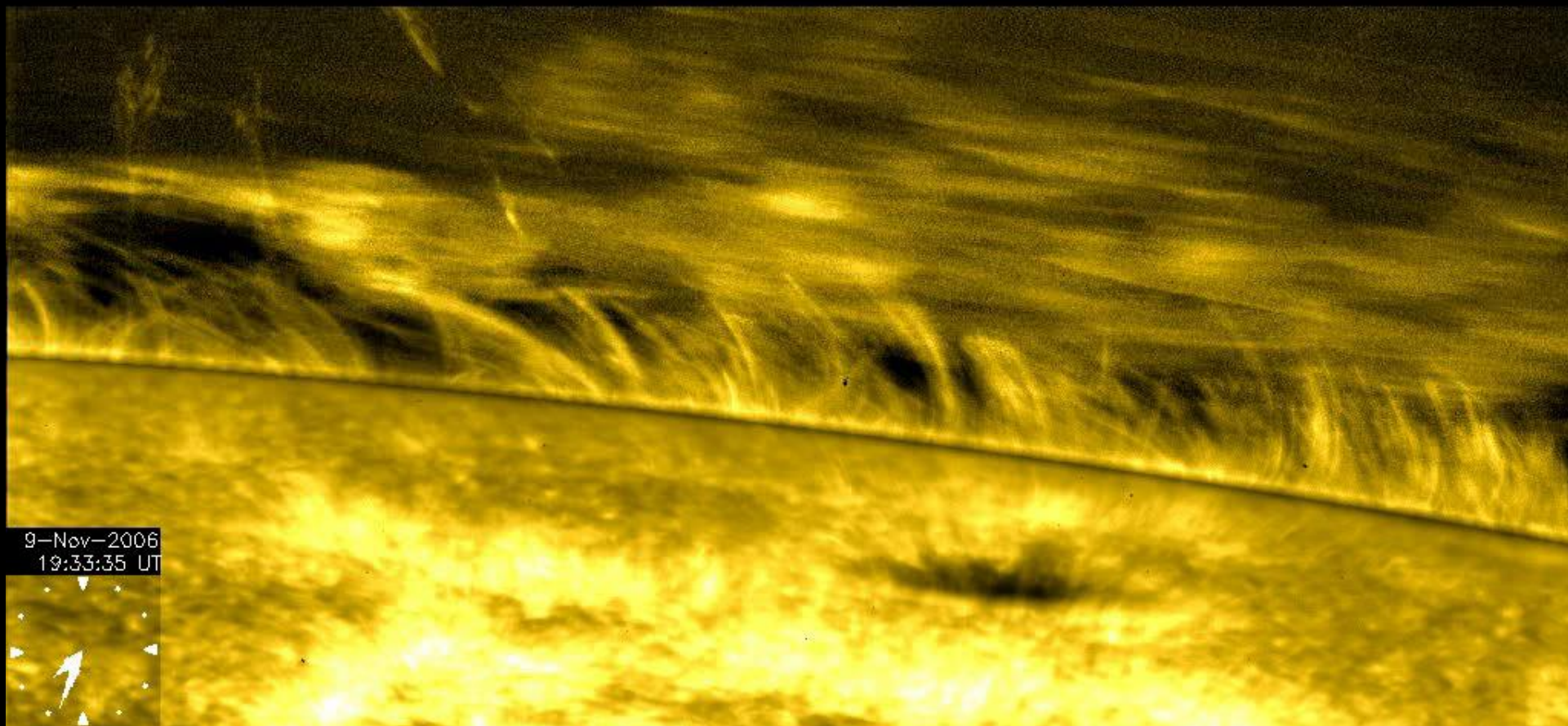


Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

「ひので」衛星が観測した太陽彩層 (NAOJ/JAXA提供)

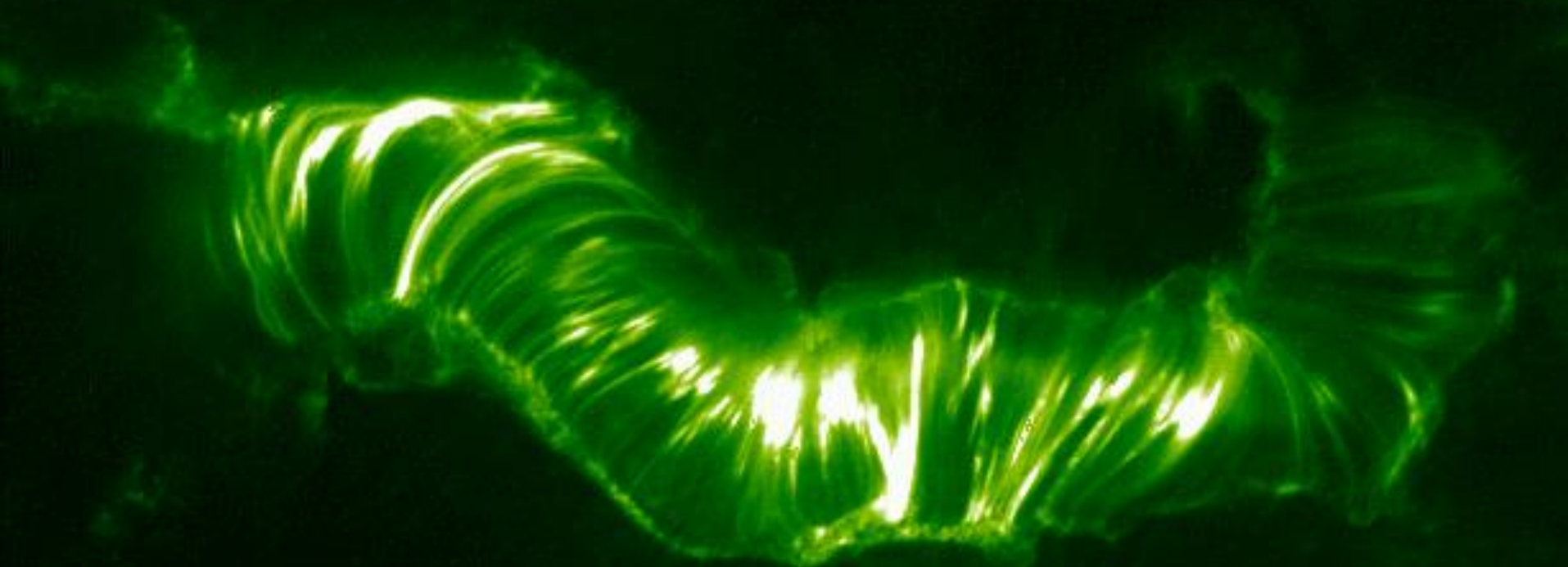


太陽大気中で揺れる磁力線(アルヴェーン波)



(Okamoto et al. 2007; NAOJ/JAXA提供)

太陽フレア

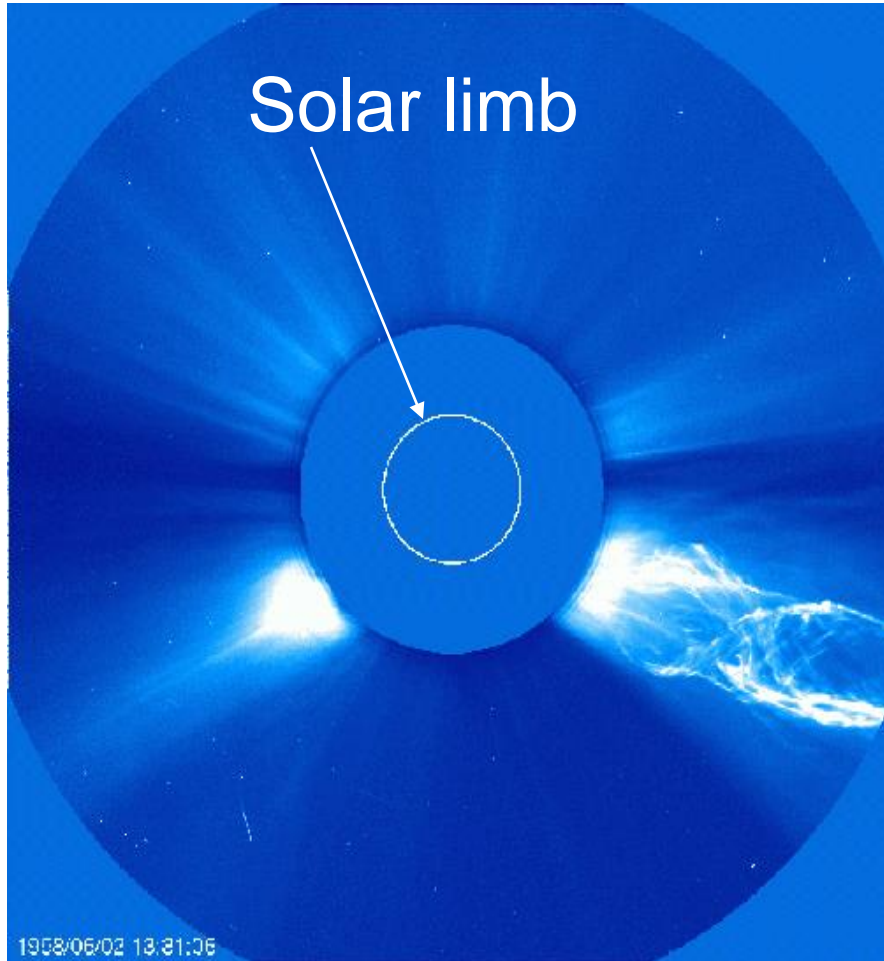


TRACE衛星 NASA提供
SOHO衛星 NASA/ESA提供

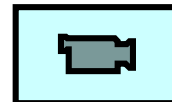
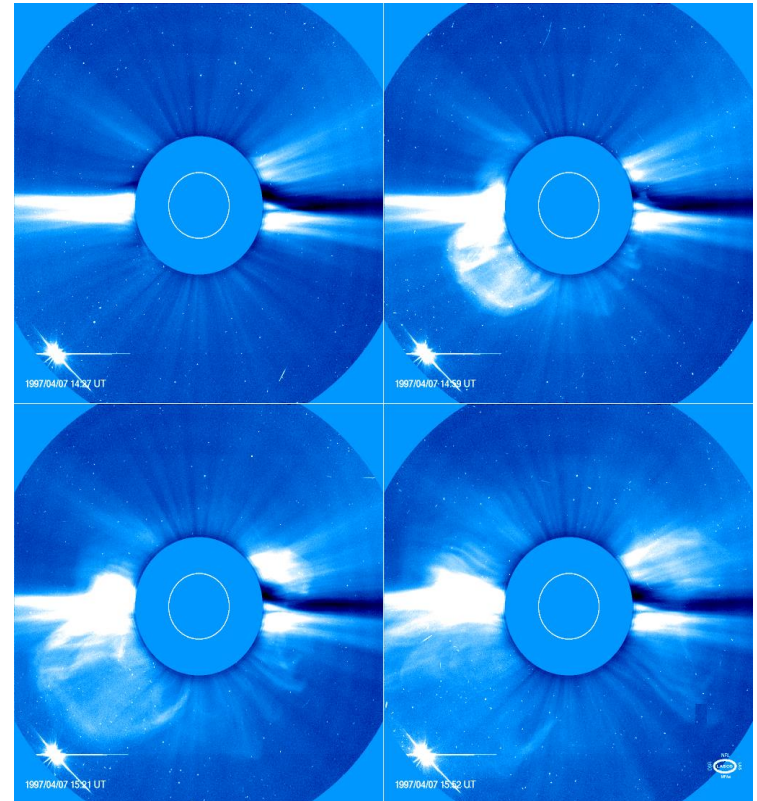
ムービー1

ムービー2

コロナ質量放出現象 (CME)



SOHO/LASCO
NASA・ESA提供



1000 km/sec
30億トン

太陽フレア

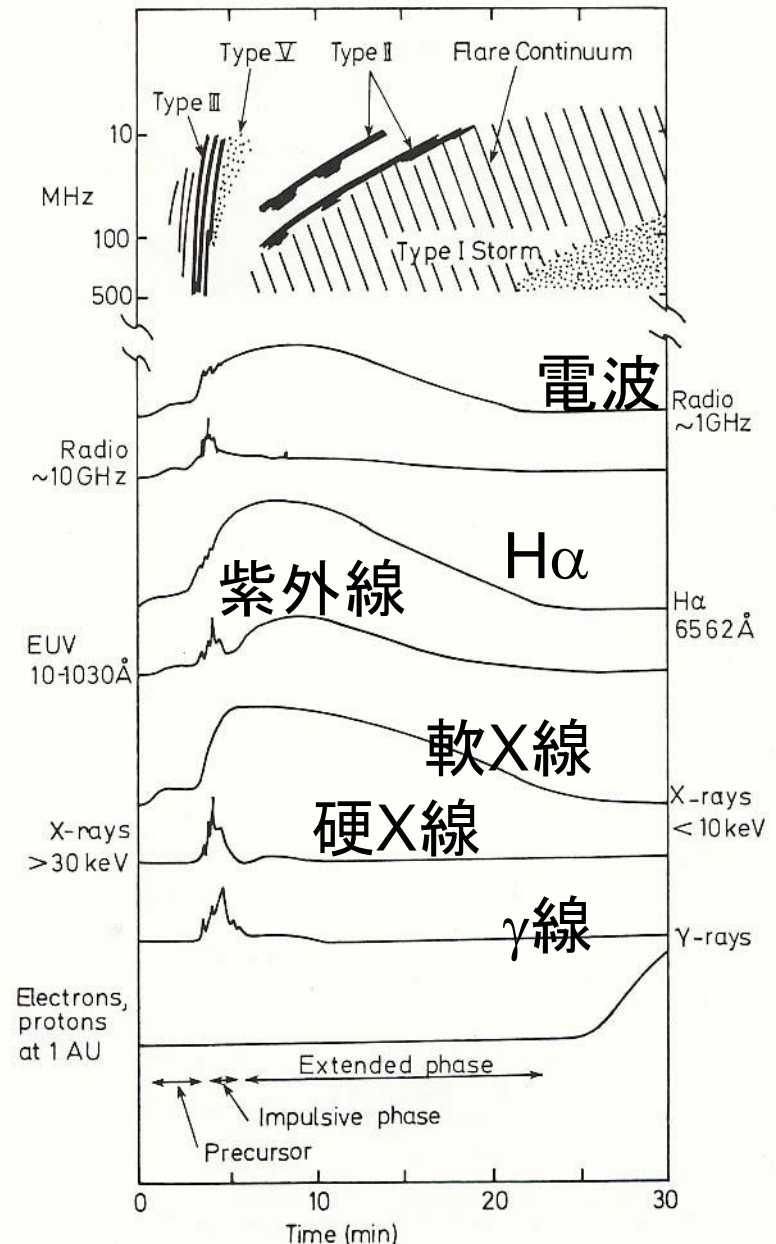
太陽大気でおこる爆発現象
あらゆる波長(電波からγ線まで)の電磁波
が、数分から数時間にわたって増光

エネルギー 10^{29} – 10^{32} erg
マグニチュード8の地震のエネルギーの10万倍
から1億倍
(現在の)太陽系で最大規模の爆発現象
10年間で3000個程度

超高温プラズマ 数千万度から数億度(もとの
コロナの数から数百倍)

高エネルギー粒子(Maxwell分布からはずれた
粒子) 数十keVから数MeV

ときにCMEやフィラメント放出などの大規模な
プラズマ放出現象をともなう



(Kane, 1974, IAU, p105)

フレアのエネルギー源は何か？

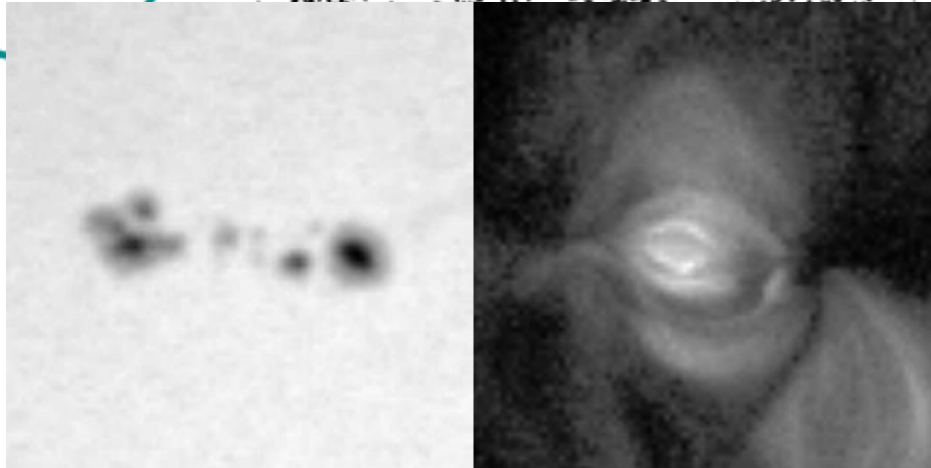
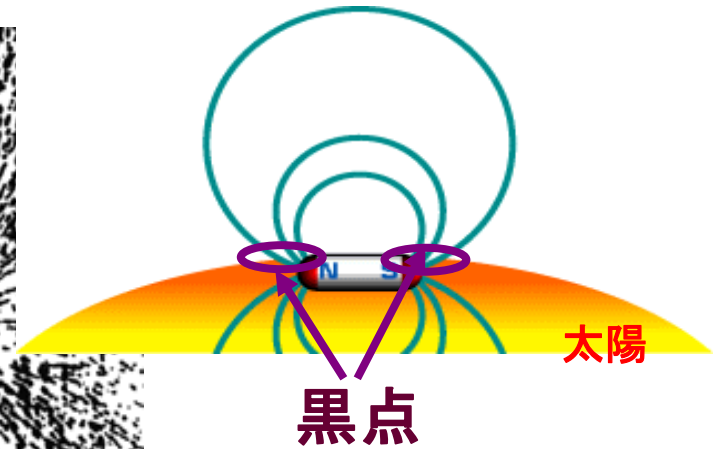
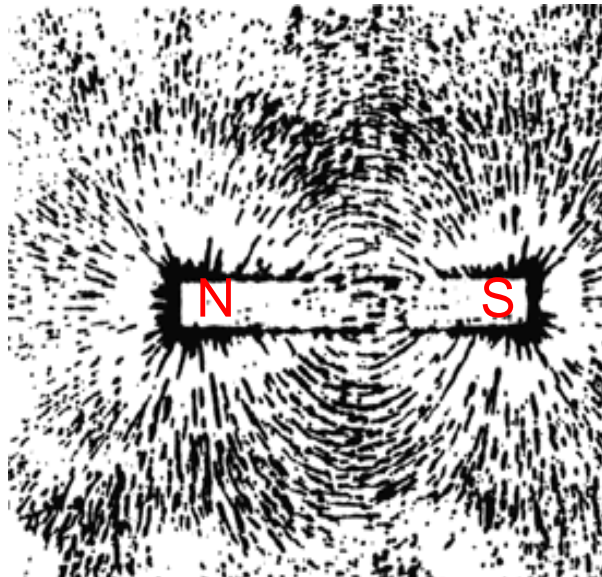
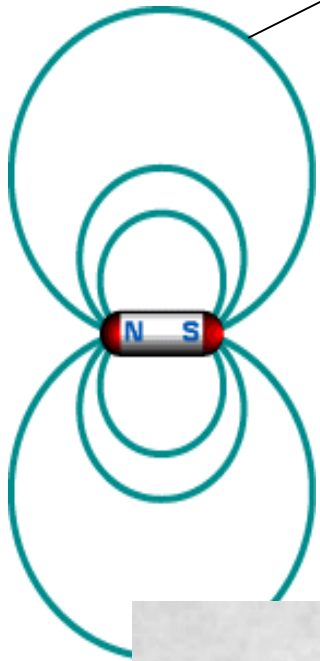
黒点周辺(「活動領域」)でよくおこる
黒点数とフレア数とはよい相関

エネルギー源は磁場

太陽の磁場

(ウェブページ YPOPより)

磁力線



磁場の強さ
黒点で数キロガウス

JAXA提供

活動領域周辺の磁場エネルギーの見積もり

$L = 10^5 \text{ km}$ 立方の空間を占める

$B = 100 \text{ Gauss}$ の磁場のエネルギー

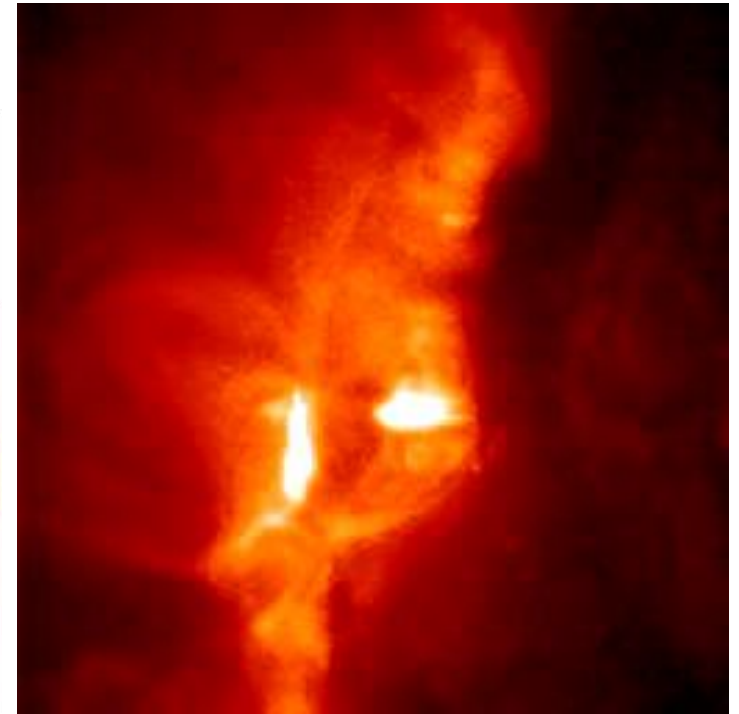
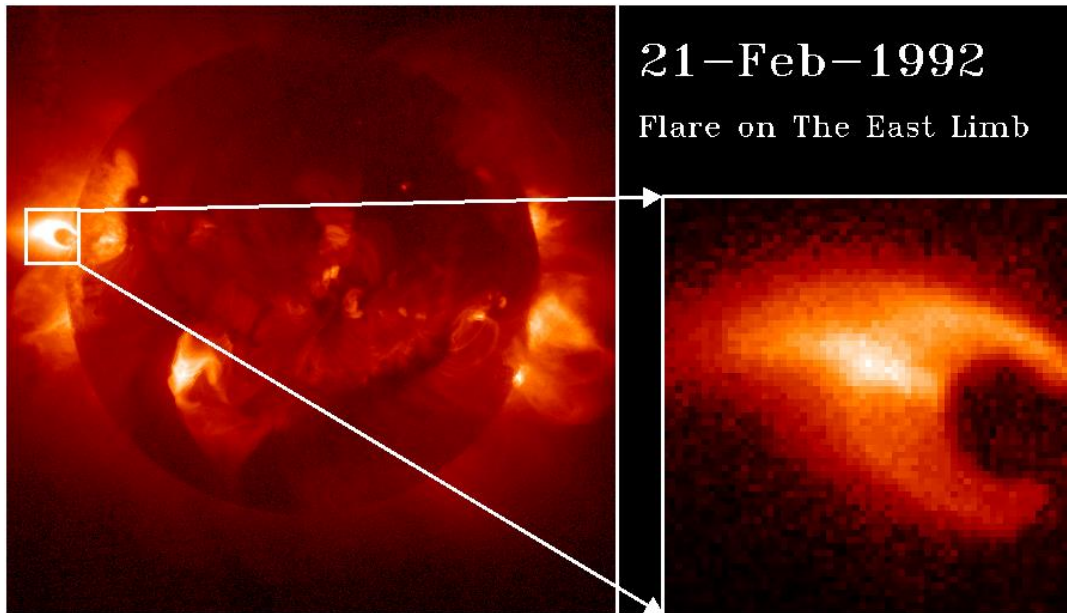
$$E_{\text{mag}} = \frac{B^2}{8\pi} L^3$$

$$\approx 4 \times 10^{32} \text{ erg} \left(\frac{B}{100 \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{L}{10^5 \text{ km}} \right)^3$$

$$(E_{\text{flare}} \approx 10^{29} - 10^{32} \text{ erg})$$

太陽フレア:1992-2-21イベント

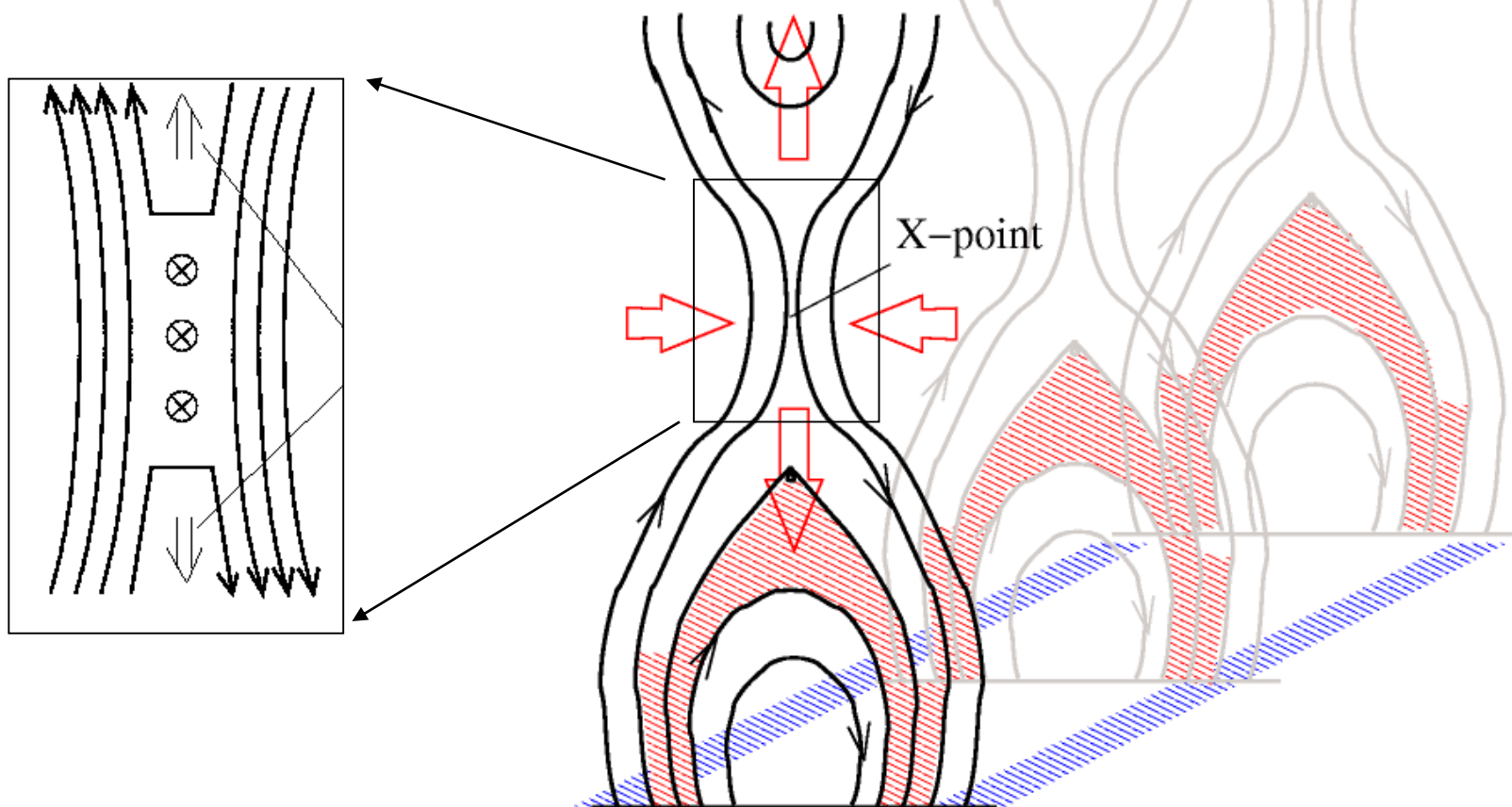
Tsuneta et al. (1992) PASJ, 44, L63



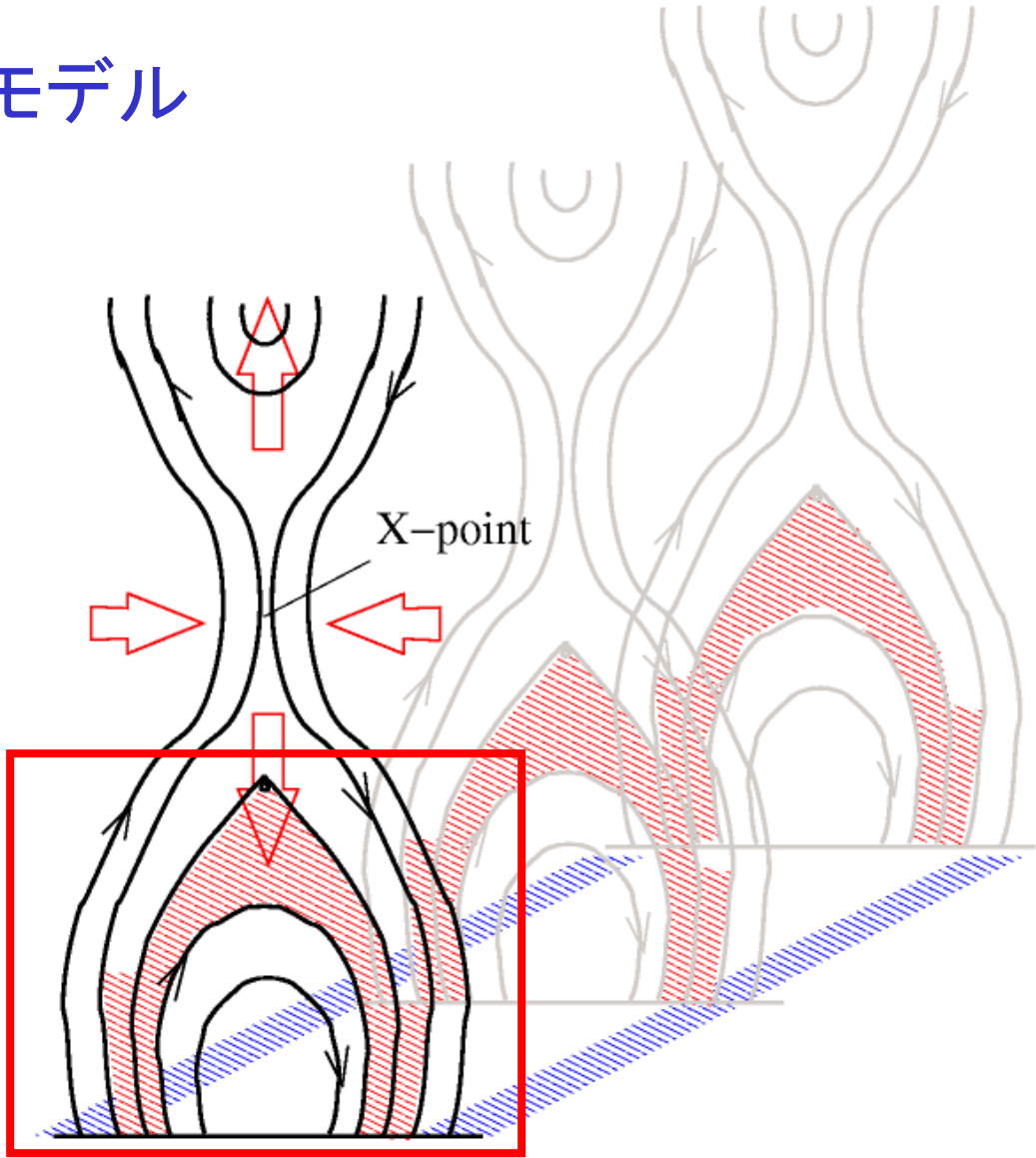
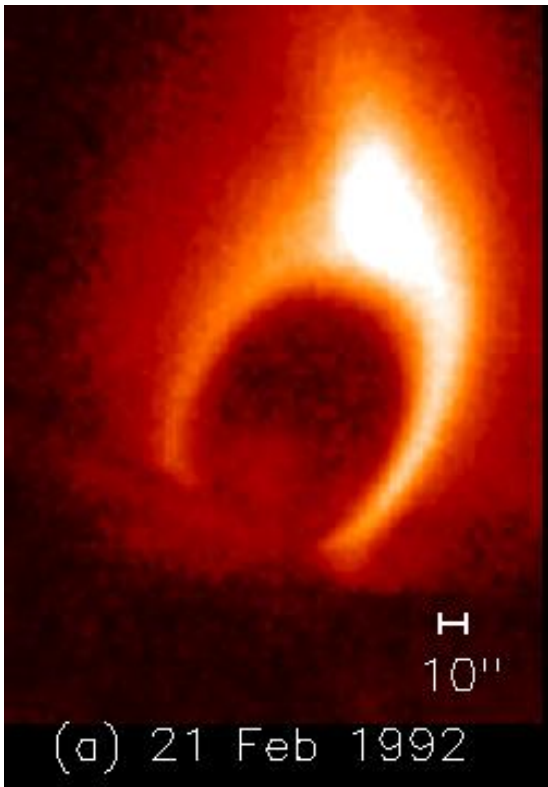
カस्प型フレアループ

磁気リコネクションモデル または フレア「標準」モデル

Carmichael (1964); Sturrock (1966);
Hirayama (1974); Kopp & Pneuman (1976)



磁気リコネクションモデル



太陽物理学の研究

太陽研究の魅力

ムービー・ムービー・ムービー...

人間が観測可能な時間スケールで変動がおこる数少ない天体现象

豊かな構造

磁場とガスとが織りなす世界

活動的天体现象の代表例

他天体研究への波及効果

プラズマ物理学の実験室



なぜ太陽を研究するのか？

- 天文学の一里塚
 - 宇宙において、もっとも詳しく観測可能な天体
- 日常生活への影響
 - 宇宙天気予報
- プラズマ物理学の実験室
 - 極限的な環境
 - 超高温、超低密、高い電気伝導性

研究手法

観測

地上望遠鏡

飛騨天文台ドームレス望遠鏡

野辺山電波ヘリオグラフ

宇宙望遠鏡

ひので衛星

日震学

理論・シミュレーション

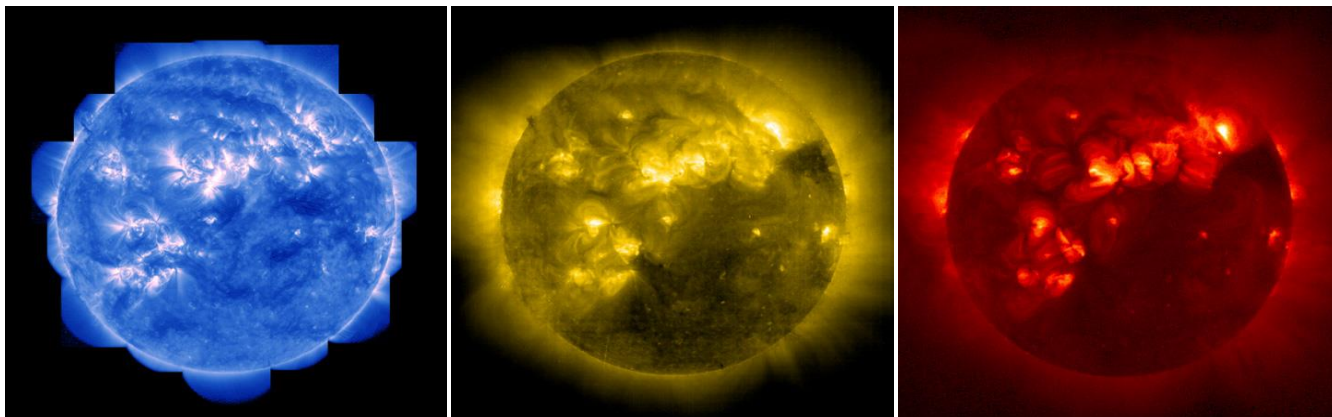
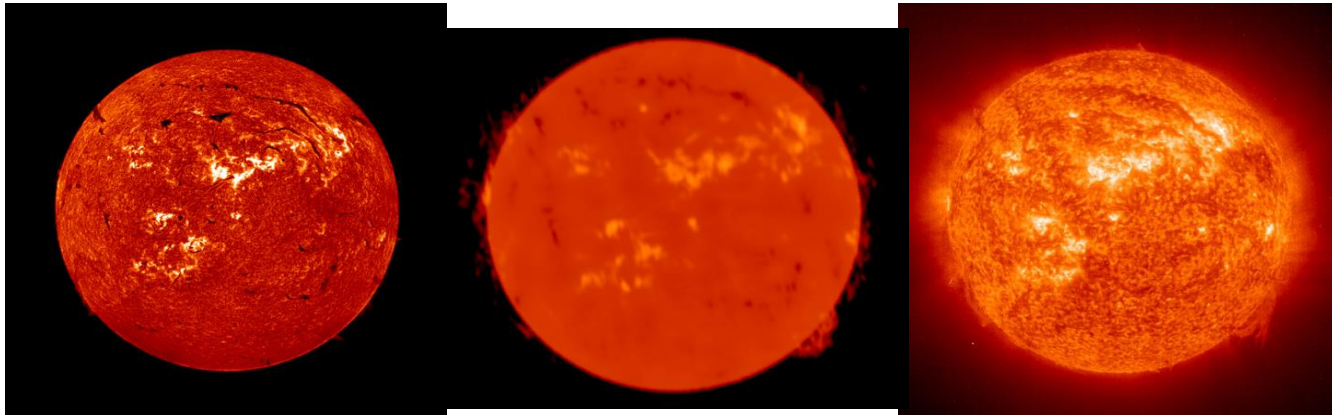
機器開発

CLASPロケット実験

Solar-C

太陽を研究する手段 観測

- 可視光・赤外線 飛騨天文台(講義4@飛騨)
- 紫外線・X線・ガンマ線 「ひので」衛星(講義6@三鷹)
- 電波 野辺山(講義5@野辺山)
- 宇宙線(中性子) 講義2@名古屋



「ひので」衛星搭載 3観測機器

Solar Optical Telescope (SOT)

ベクトル磁場の高精度高分解能観測

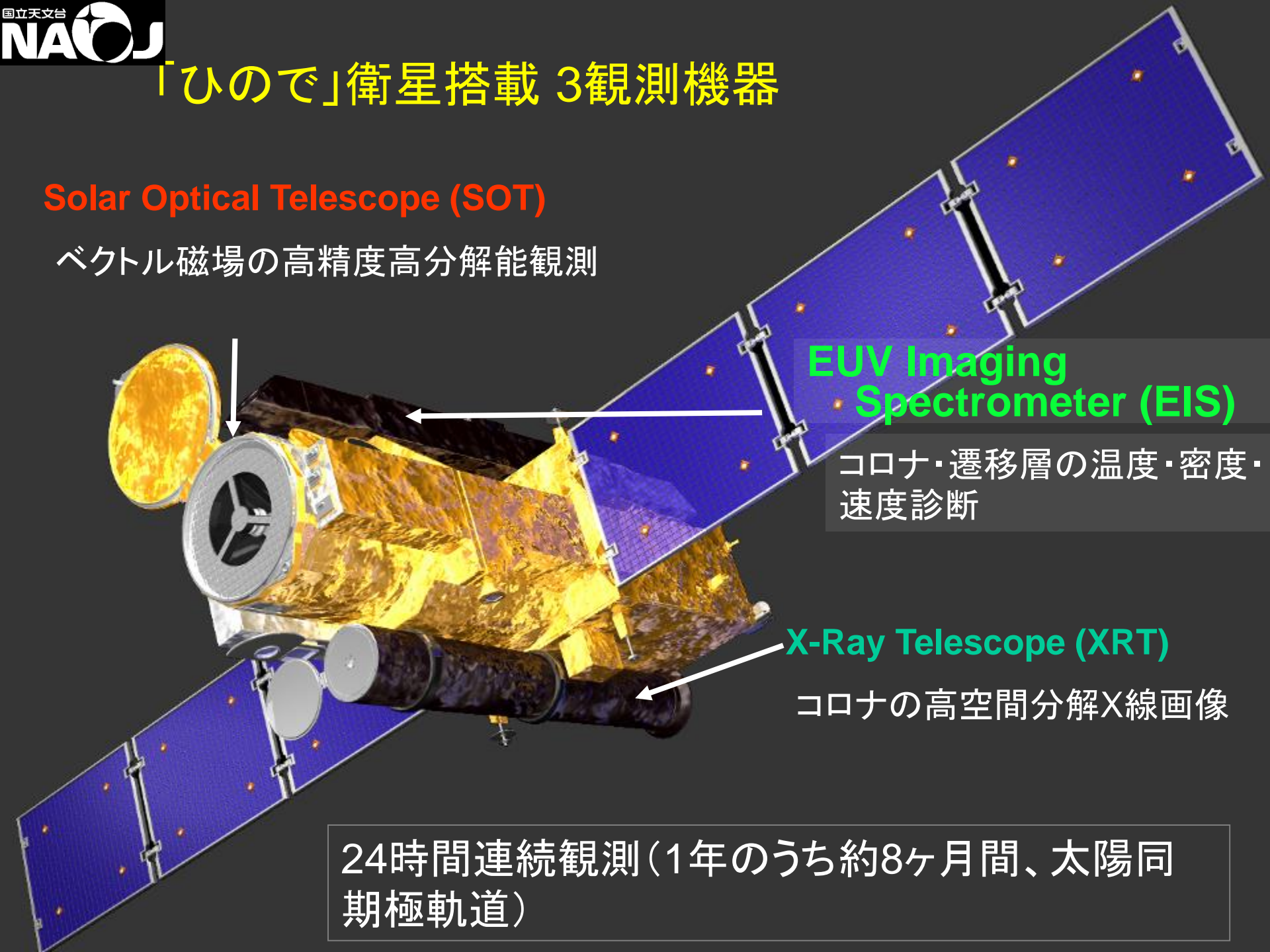
EUV Imaging Spectrometer (EIS)

コロナ・遷移層の温度・密度・速度診断

X-Ray Telescope (XRT)

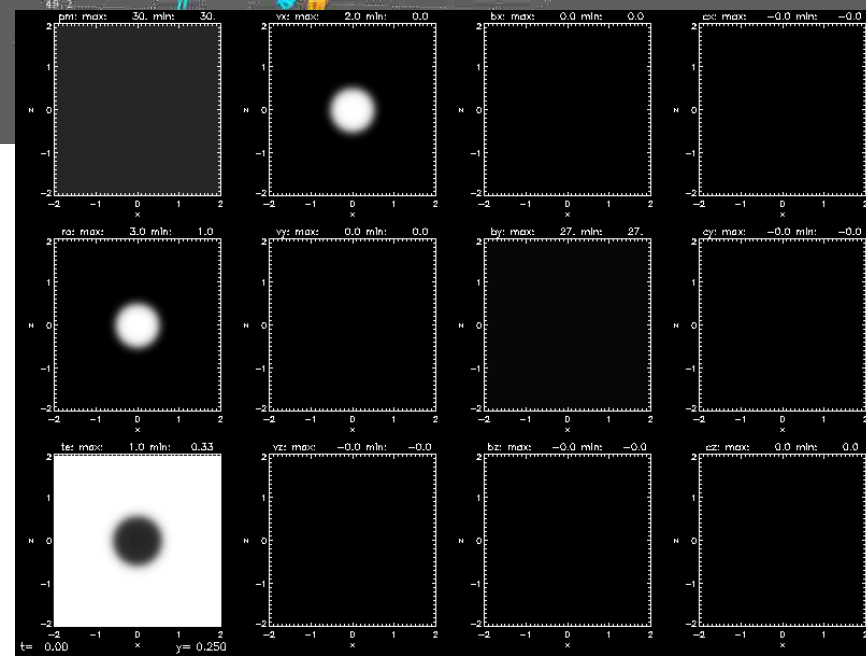
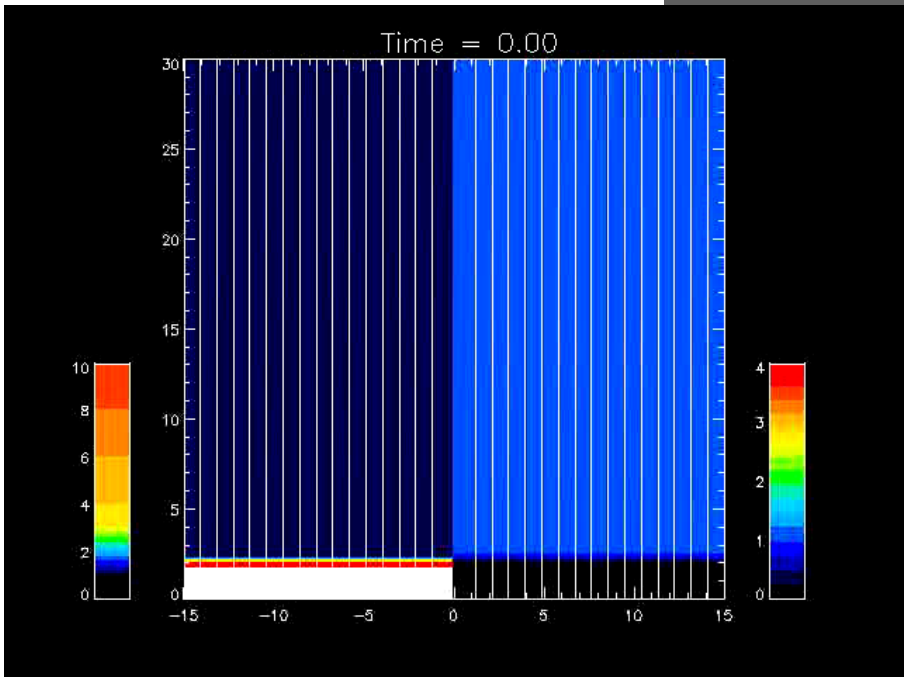
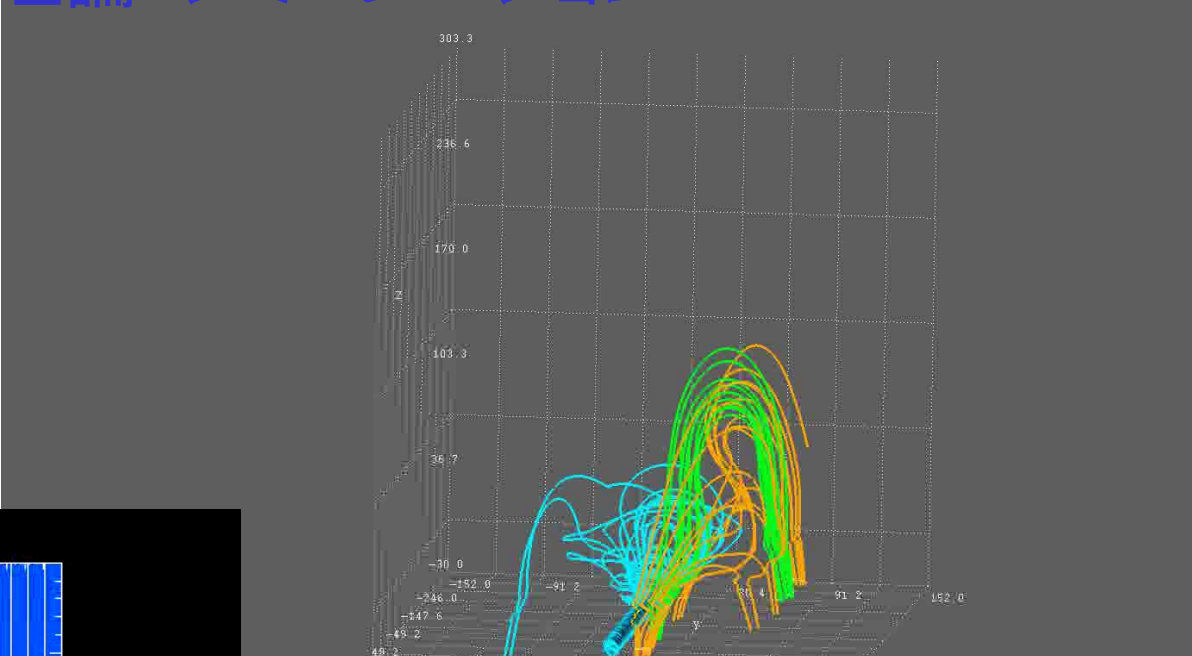
コロナの高空間分解X線画像

24時間連続観測(1年のうち約8ヶ月間、太陽同期極軌道)



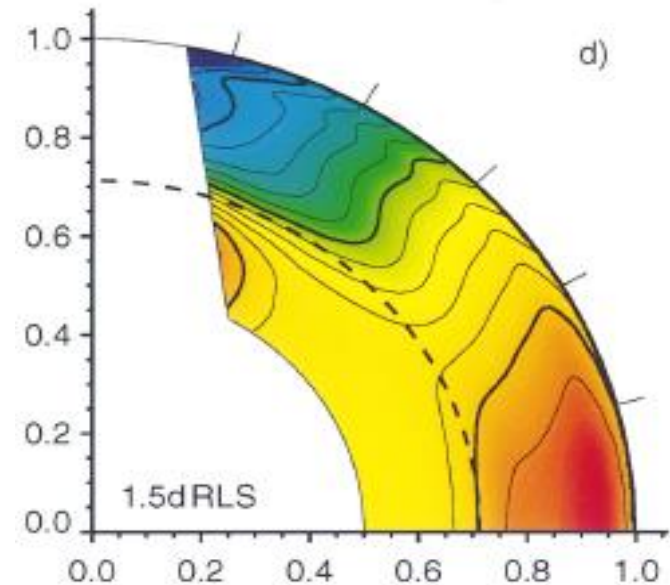
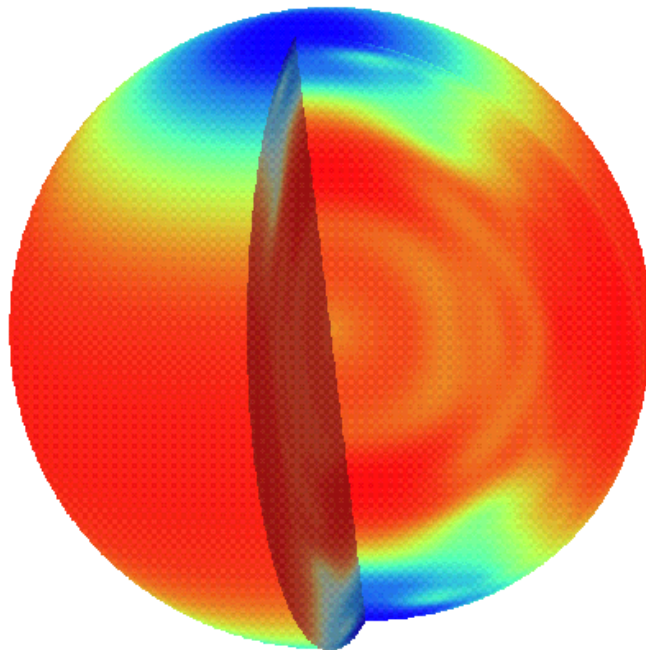
太陽を研究する手段 理論・シミュレーション

- 磁気流体力学
- プラズマ粒子運動論
- 放射輸送



太陽を研究する手段 日震学

- おもに可視光観測データを用いるが、理論的手法を併用して、太陽内部の情報を得る



太陽物理学イントロダクション:ここまでのまとめ

太陽大気は、ダイナミックな現象に満ちている。

突発的な増光・爆発・噴出・ジェットなど

太陽はプラズマ(電離ガス)の塊。

磁場エネルギーがダイナミズムを生み出す。

観測・理論・シミュレーション・観測器開発などさまざまなアプローチで研究できる。

コンピュータの中の太陽

横山 央明

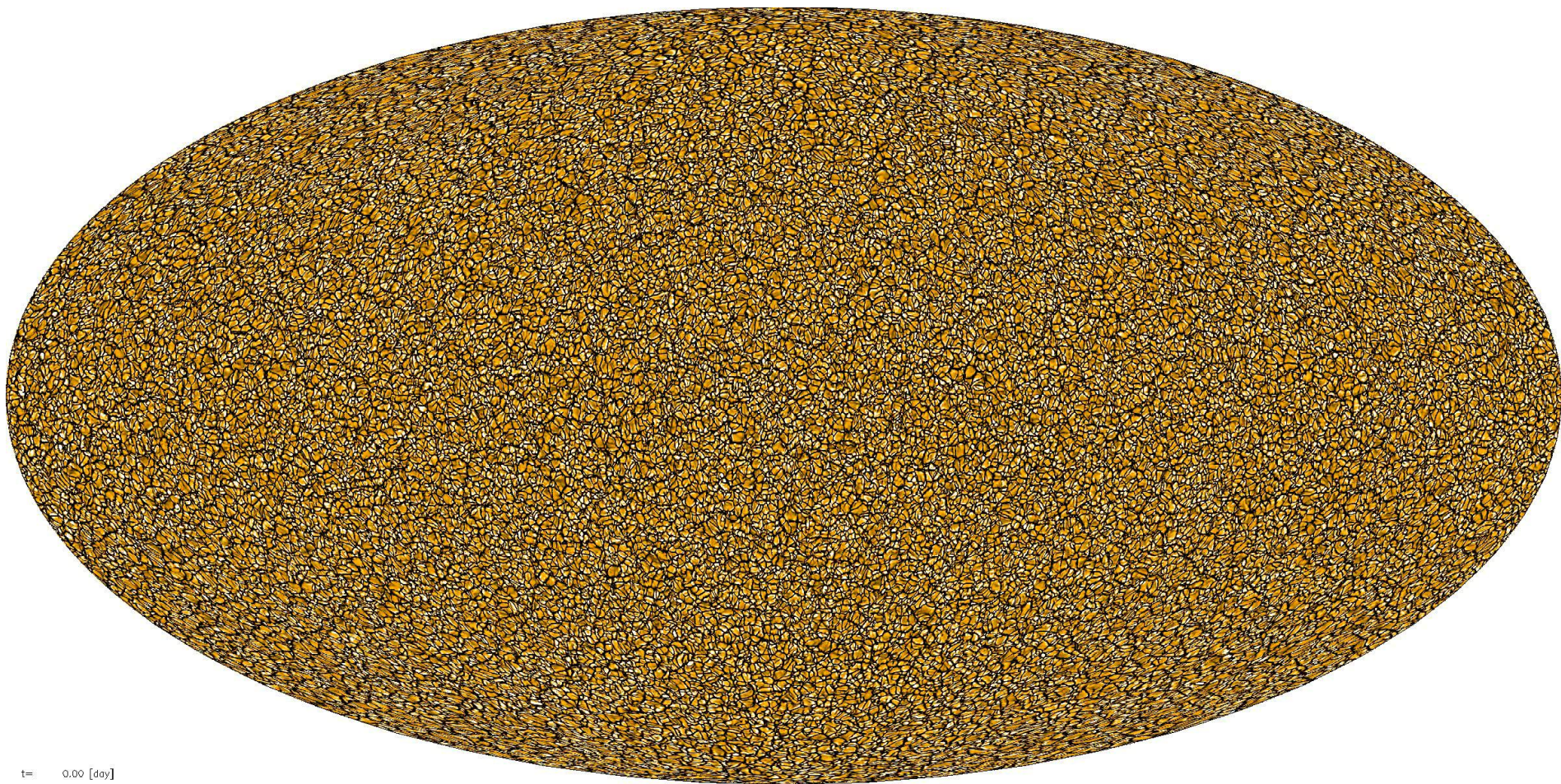
東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

謝辞: 共同研究者のみなさま

太陽熱対流のシミュレーション

$r_{\max} = 0.99 R_{\text{Sun}}$

512x2048x4096



$t = 0.00$ [day]

太陽研究の手段

観測

データ解析

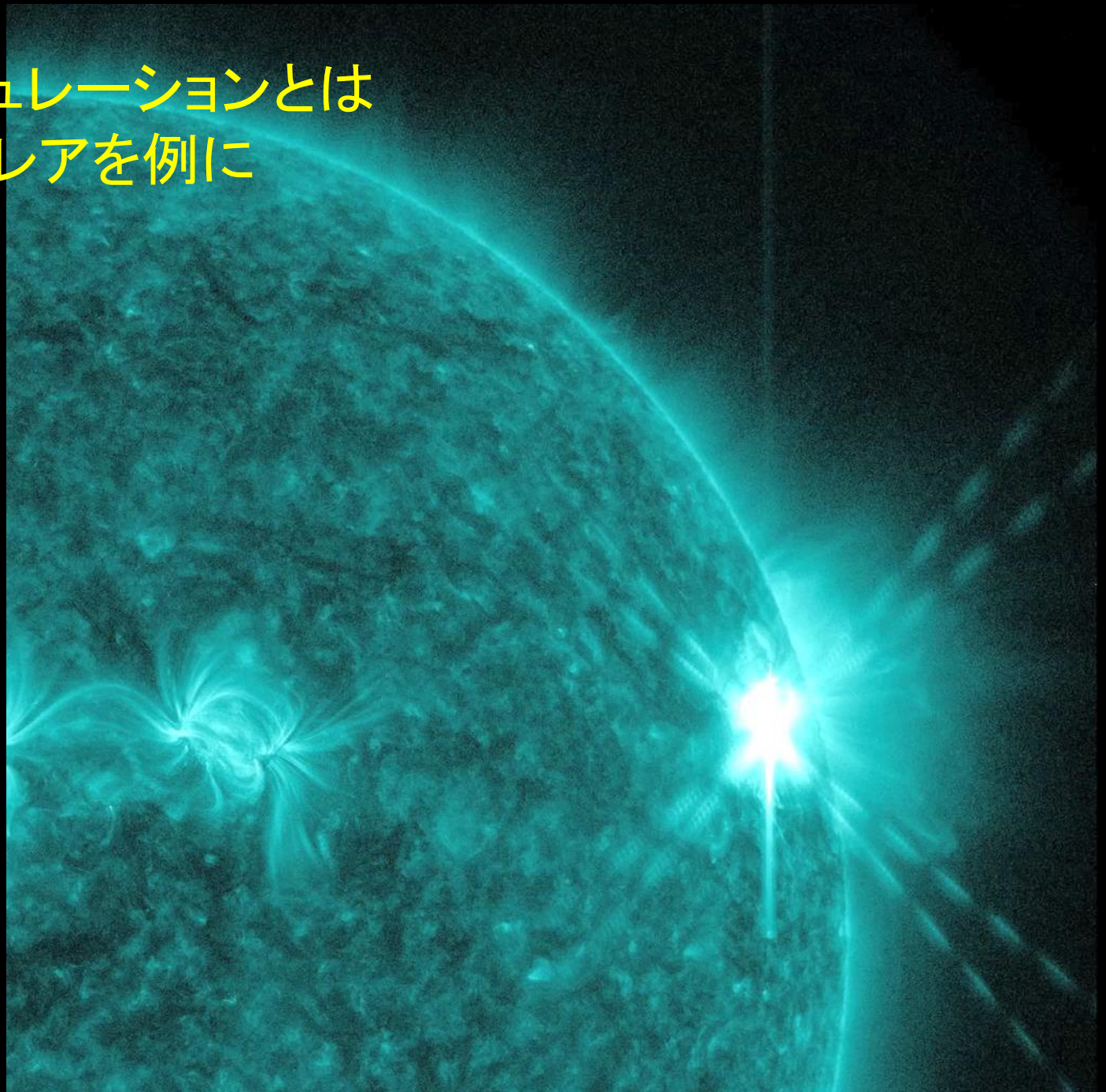
観測器開発

理論

解析的手法(紙と鉛筆)

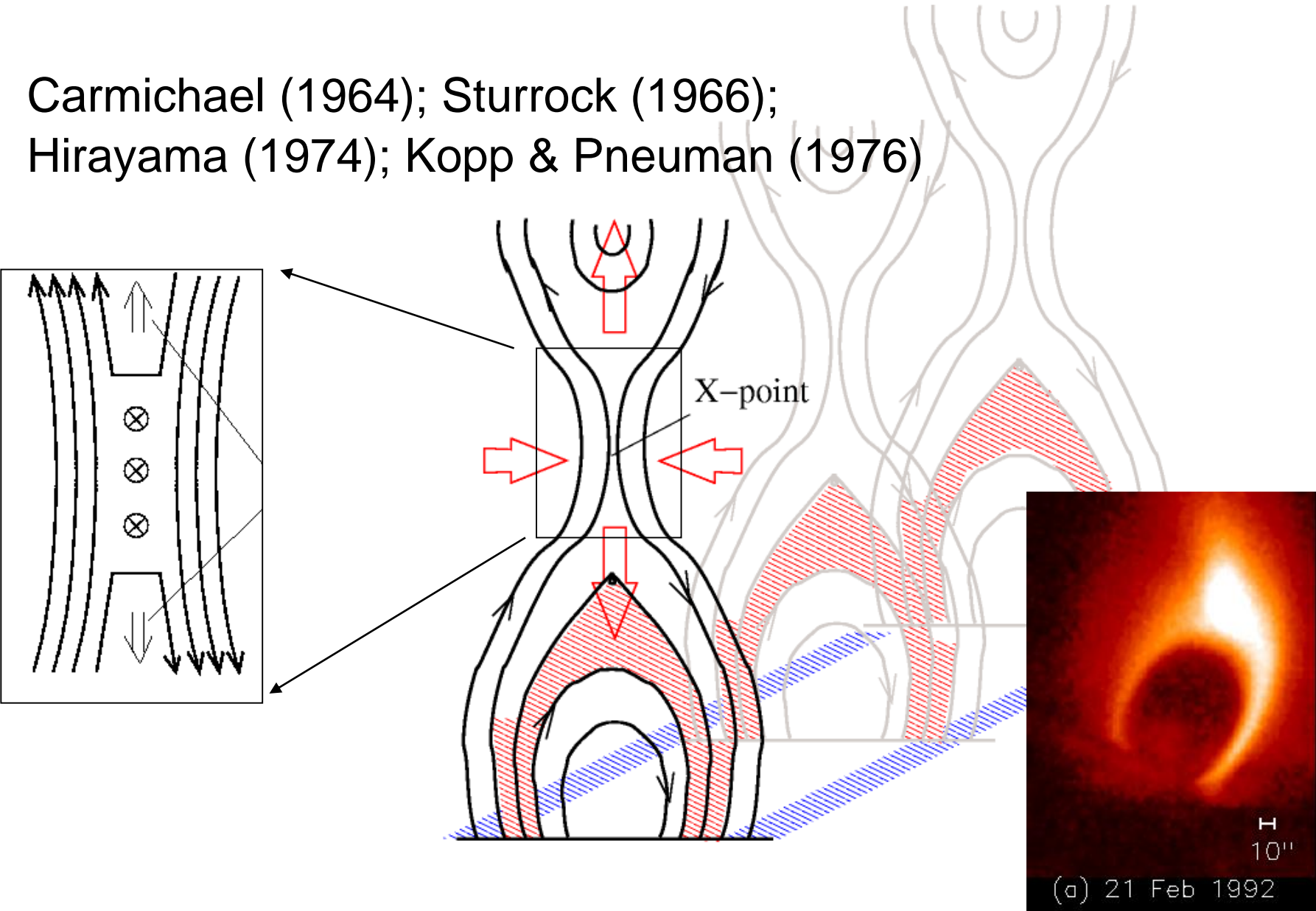
数値シミュレーション

数値シミュレーションとは —太陽フレアを例に



磁気リコネクションモデル (フレア「標準」モデル)

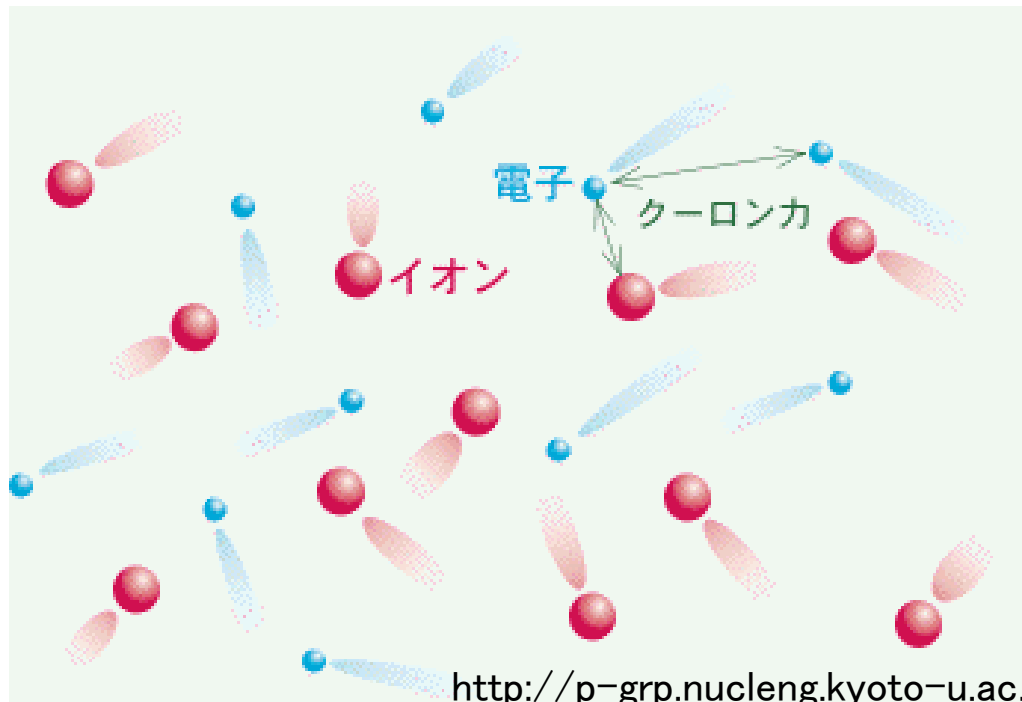
Carmichael (1964); Sturrock (1966);
Hirayama (1974); Kopp & Pneuman (1976)



プラズマ 太陽大気を構成する物質の

プラズマ：原子内の電子がはぎとられて、電荷をもったイオンと電子とが自由に飛び回っている状態

- 固体：原子が規則正しく並んでいて、形が定まっている
- 液体：原子同士の結びつきがやや弱く、形が定まらない
- 気体：原子同士の結びつきが弱く、ほぼ自由に飛び回っている



磁気流体

プラズマを巨視的に眺めると「導電性のある流体」すなわち
磁気流体

流体の物理状態は、

速度場 3 成分 $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$

熱力学量 2 個 たとえば密度 ρ と圧力 p

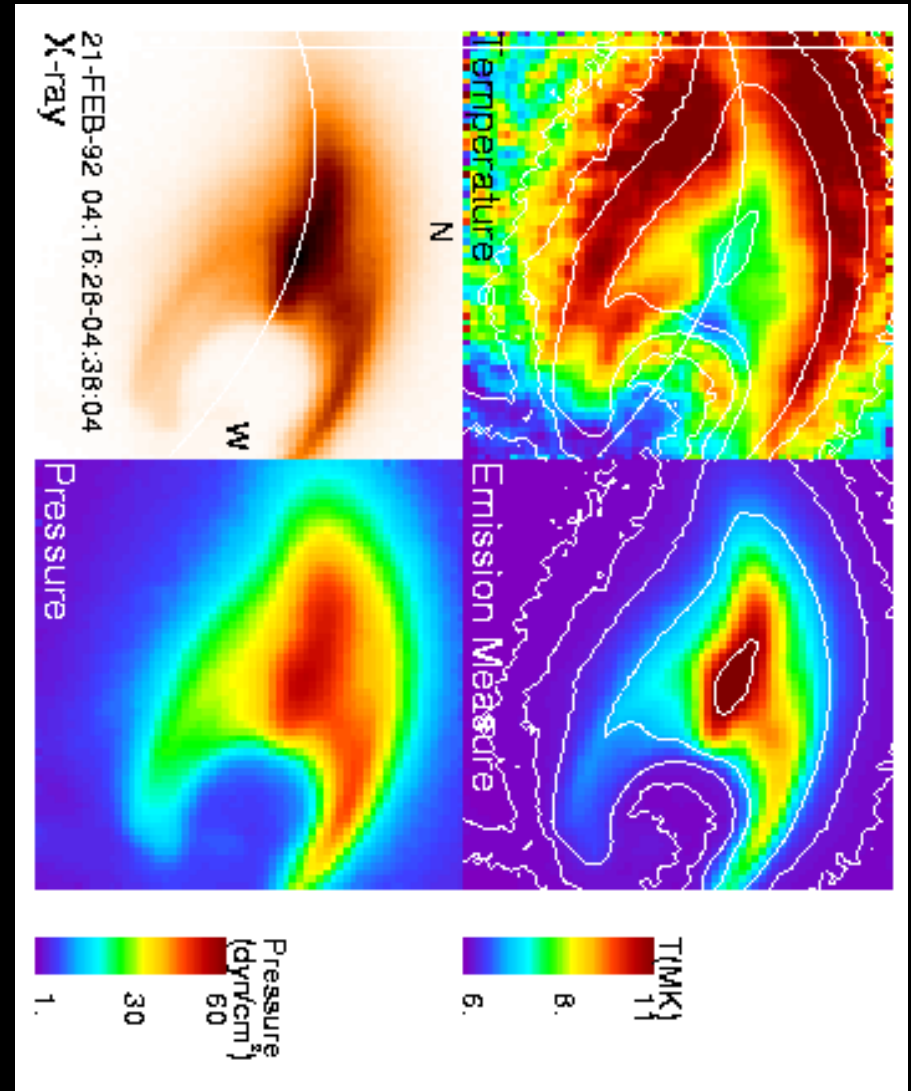
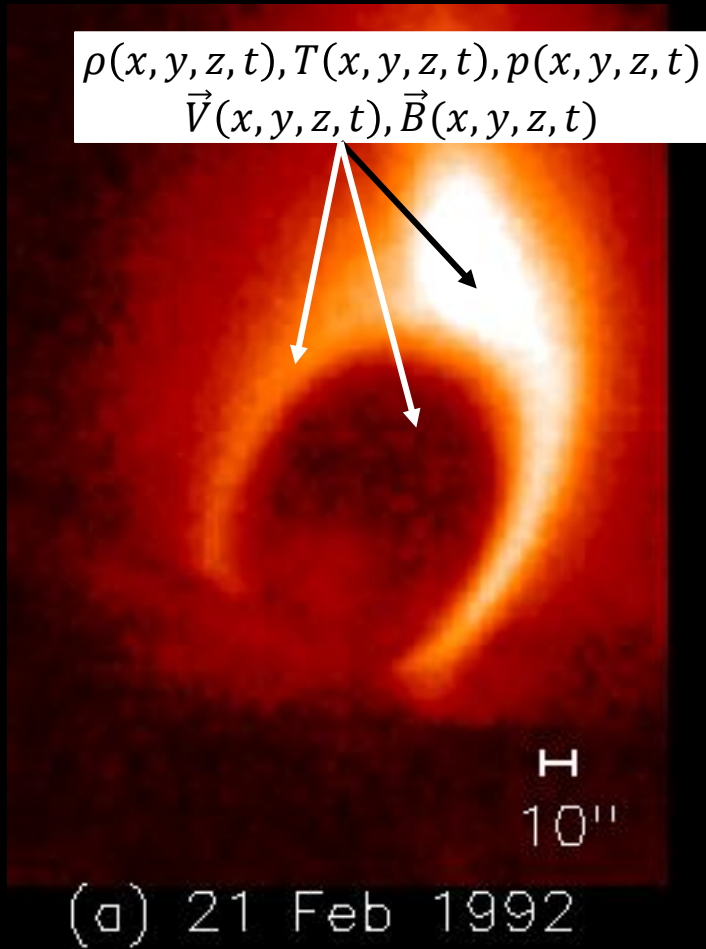
とで表現できる。

時間 t 、空間 \mathbf{x} の関数として記述される。たとえば

$$V_x(t, x, y, z), \quad V_y(t, x, y, z), \quad \rho(t, x, y, z)$$

など。

1992-2-21イベント



(Tsuneta et al. 1992)

JAXA ようこう衛星

磁気流体の方程式

質量保存 (連続方程式)

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

運動量保存 (運動方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

エネルギー保存 (エネルギー方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}^2 + \frac{1}{8\pi} \mathbf{B}^2 \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\gamma p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho \mathbf{V}^2 \right) \mathbf{V} + \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right] = 0$$

磁場発展 (誘導方程式)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (c\eta \mathbf{J})$$

Ampère の法則

$$\mathbf{J} = \frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}$$

Ohm の法則

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c + \eta \mathbf{J}$$

以上の方程式 (成分を考えると 14 本) に対して、従属変数は 14 個 (ρ 、 p 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{J} 、 \mathbf{E}) である。必要に応じて次の方程式をもちいる。

$$\text{状態方程式} \quad p = \rho \frac{k_B}{m} T$$

磁気流体の方程式

質量保存 (連続方程式)

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

運動量保存 (運動方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

大体の場合、
紙と鉛筆では無理！

} = 0

$$\mathbf{J} = \frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}$$

Ohm の法則

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c + \eta \mathbf{J}$$

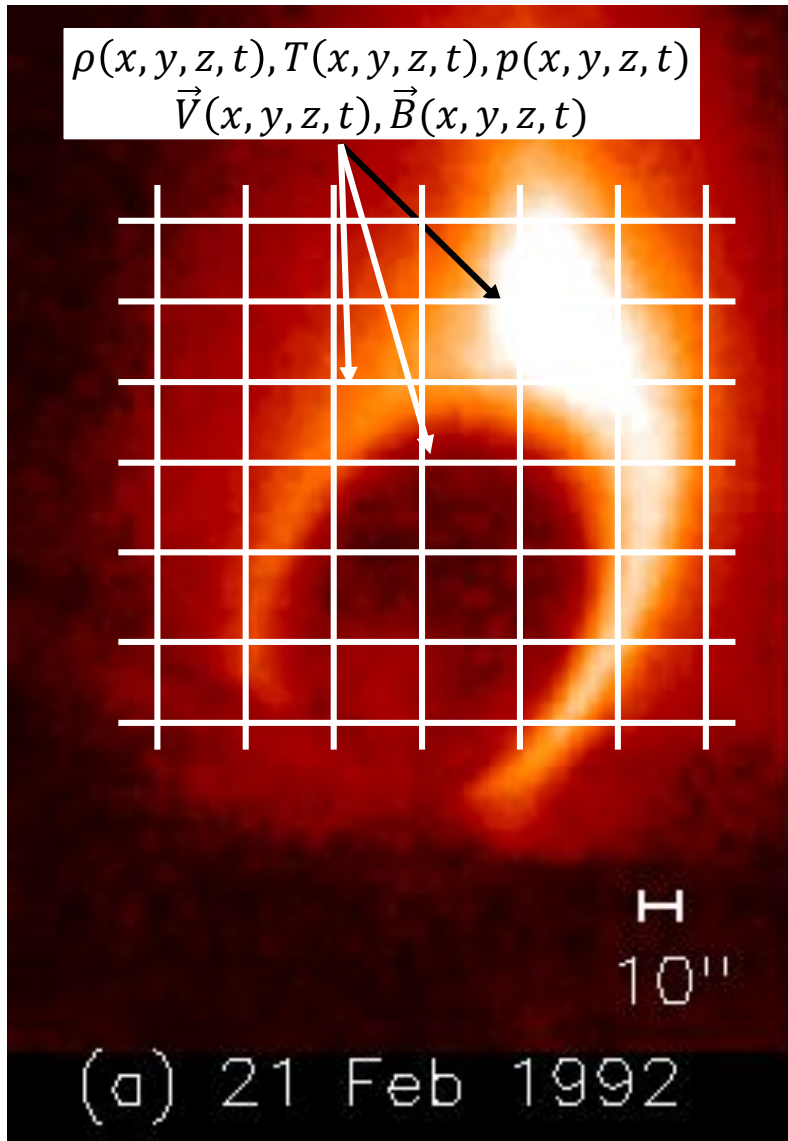
以上の方程式 (成分を考えると 14 本) に対して、従属変数は 14 個 (ρ 、 p 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{J} 、 \mathbf{E}) である。
必要に応じて次の方程式をもちいる。

状態方程式 $p = \rho \frac{k_B}{m} T$



理論の望遠鏡
スーパーコンピュータ

方程式をコンピュータに載せる

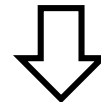


$$\rho(x, y, z, t)$$



$$\rho_{i,j,k}^n$$

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \boxed{-\frac{\partial p}{\partial x}} + \frac{1}{c} (\vec{J} \times \vec{B})_x$$



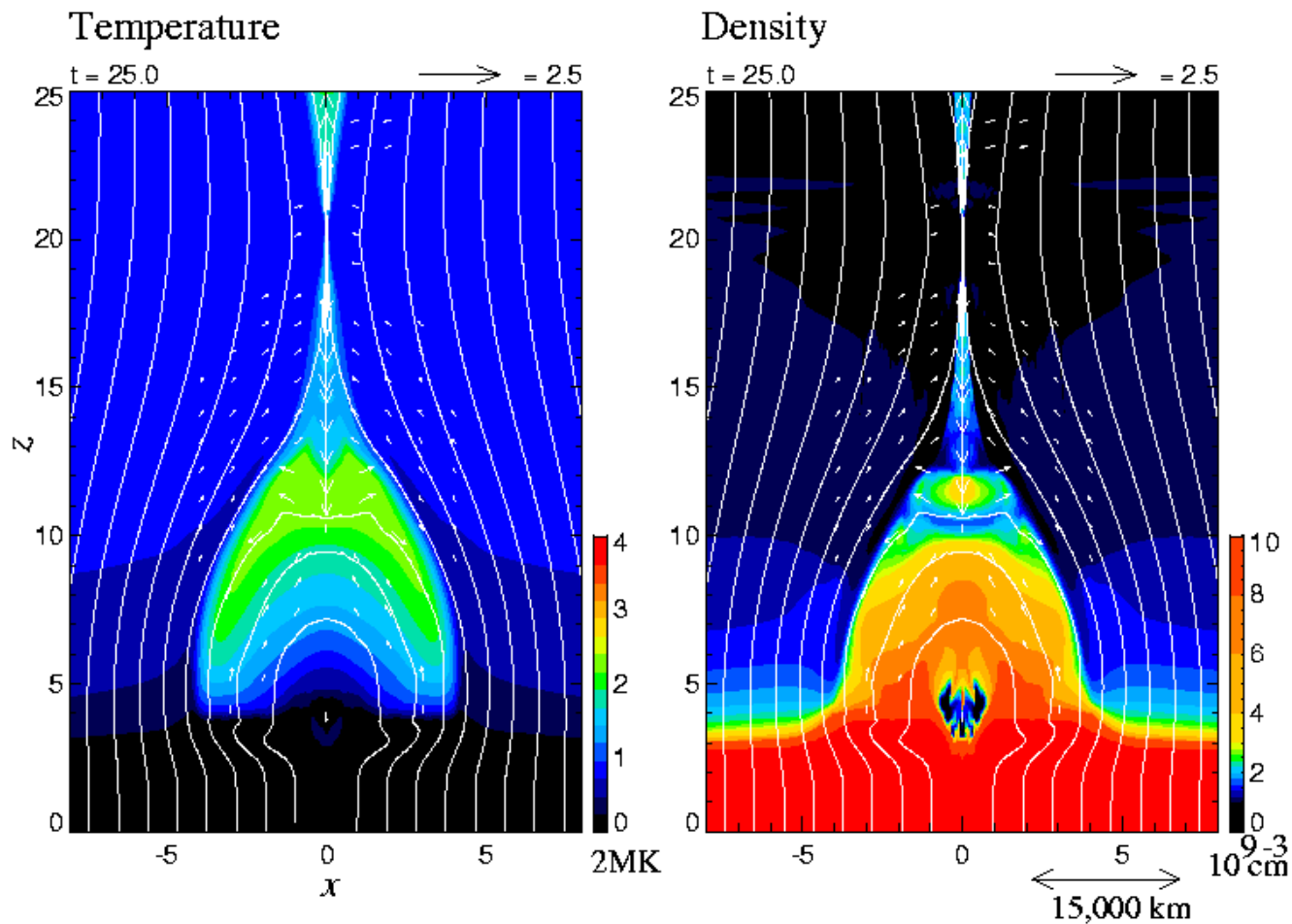
$$\dots = -\frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta x} + \dots$$

```
127.0.0.1:20000 - flare : /home/yokoyama/libw/cans/develop/cans/can VT
ファイル(F) 編集(E) 設定(S) コントロール(O) ウィンドウ(W) Resize ヘルプ(H)
-----
subroutine mlw_m(ro, pr, vx, vy, vz, bx, by, bz, dt, qav, gm
& , dx, dxm, ix, dy, dym, jx, dz, dzm, kx)
-----
implicit double precision (a-h, o-z)
dimension dx(ix), dxm(ix)
dimension dxi(ix), dxim(ix)
dimension ux0(ix), ux1(ix)
dimension dy(jx), dym(jx)
dimension dyi(jx), dyim(jx)
dimension uy0(jx), uy1(jx)
dimension dz(kx), dzm(kx)
dimension dzi(kx), dzim(kx)
dimension uz0(kx), uz1(kx)
dimension ro(ix, jx, kx), pr(ix, jx, kx)
dimension vx(ix, jx, kx), vy(ix, jx, kx)
dimension bx(ix, jx, kx), by(ix, jx, kx)
dimension ex(ix, jx, kx), ey(ix, jx, kx)
dimension ee(ix, jx, kx), rx(ix, jx, kx)
dimension roh(ix, jx, kx), eeh(ix, jx, kx)
dimension rxh(ix, jx, kx), ryh(ix, jx, kx)
dimension bxh(ix, jx, kx), byh(ix, jx, kx)
dimension exh(ix, jx, kx), eyh(ix, jx, kx)
dimension prh(ix, jx, kx), vxh(ix, jx, kx)
dimension dro(ix, jx, kx), dee(ix, jx, kx)
dimension drx(ix, jx, kx), dry(ix, jx, kx)
dimension dbx(ix, jx, kx), dby(ix, jx, kx)
dimension fx(ix, jx, kx), qx(ix, jx, kx)
dimension fy(ix, jx, kx), qy(ix, jx, kx)
dimension fz(ix, jx, kx), qz(ix, jx, kx)
C
flare[44]% █
```

```
127.0.0.1:20000 - flare : /home/yokoyama/libw/cans/develop/cans/can VT
ファイル(F) 編集(E) 設定(S) コントロール(O) ウィンドウ(W) Resize ヘルプ(H)
& + (by(i, j, k)*ex(i, j, k)-bx(i, j, k)*ey(i, j, k))*pi4
& enddo
& enddo
& enddo
& call mlwhalf(ee, eeh, dee, dt
& , fx, dxi, dxim, ix, fy, dyi, dyim, jx, fz, dzi, dzim, kx)
C--- x-momentum ---
do k=1, kx
do j=1, jx
do i=1, ix
fx(i, j, k)= ro(i, j, k)*vx(i, j, k)**2+pr(i, j, k)
& +pi8i*(by(i, j, k)**2+bz(i, j, k)**2-bx(i, j, k)**2)
& fy(i, j, k)= ro(i, j, k)*vx(i, j, k)*vy(i, j, k)
& -pi4i*bx(i, j, k)*by(i, j, k)
& fz(i, j, k)= ro(i, j, k)*vx(i, j, k)*vz(i, j, k)
& -pi4i*bx(i, j, k)*bz(i, j, k)
& enddo
& enddo
& enddo
& call mlwhalf(rx, rxh, drx, dt
& , fx, dxi, dxim, ix, fy, dyi, dyim, jx, fz, dzi, dzim, kx)
C--- y-momentum ---
do k=1, kx
do j=1, jx
do i=1, ix
fx(i, j, k)= ro(i, j, k)*vy(i, j, k)*vx(i, j, k)
& -pi4i*by(i, j, k)*bx(i, j, k)
& fy(i, j, k)= ro(i, j, k)*vy(i, j, k)**2+pr(i, j, k)
& +pi8i*(bx(i, j, k)**2+bz(i, j, k)**2-by(i, j, k)**2)
```

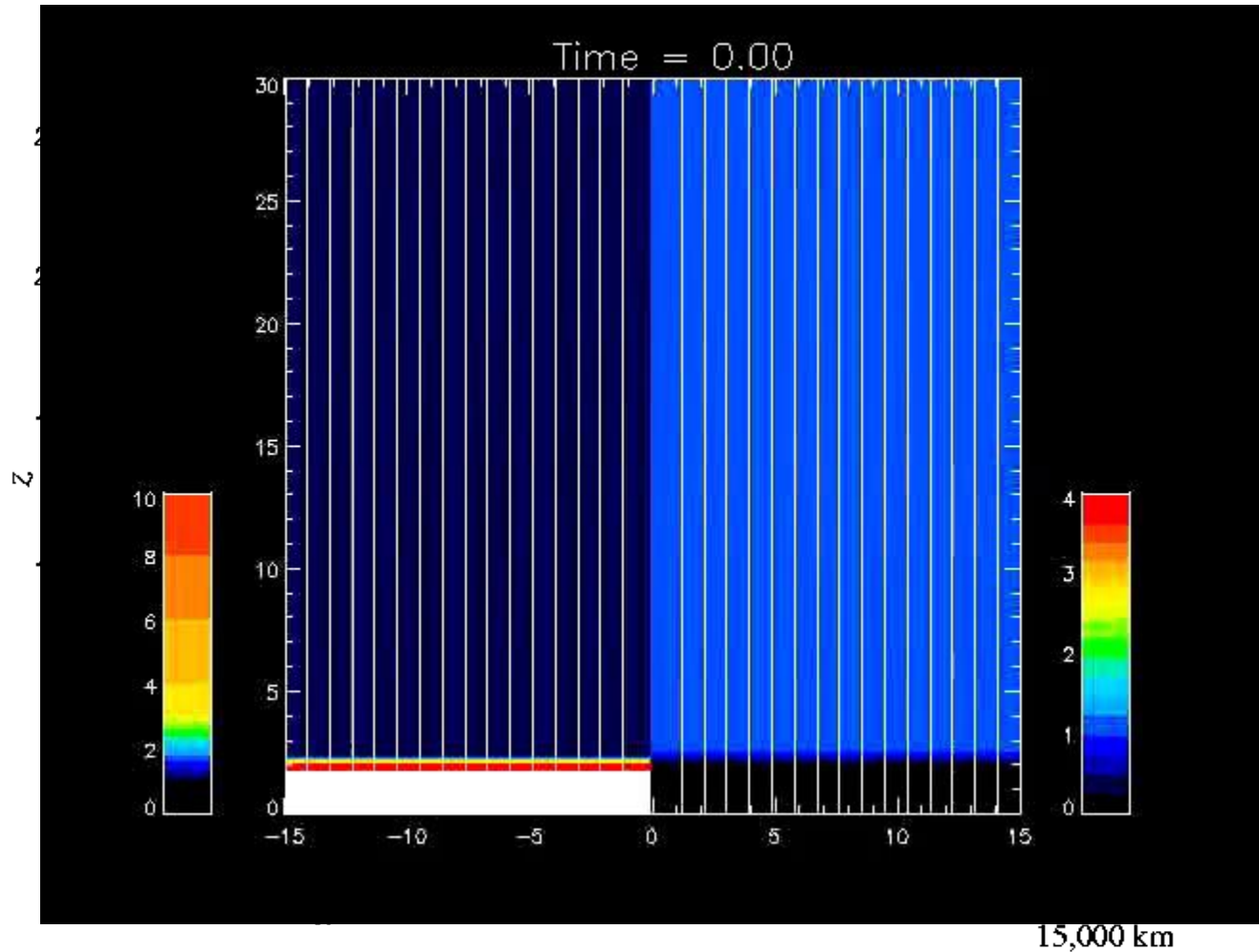
フレアの磁気流体シミュレーション

Yokoyama & Shibata (1998)

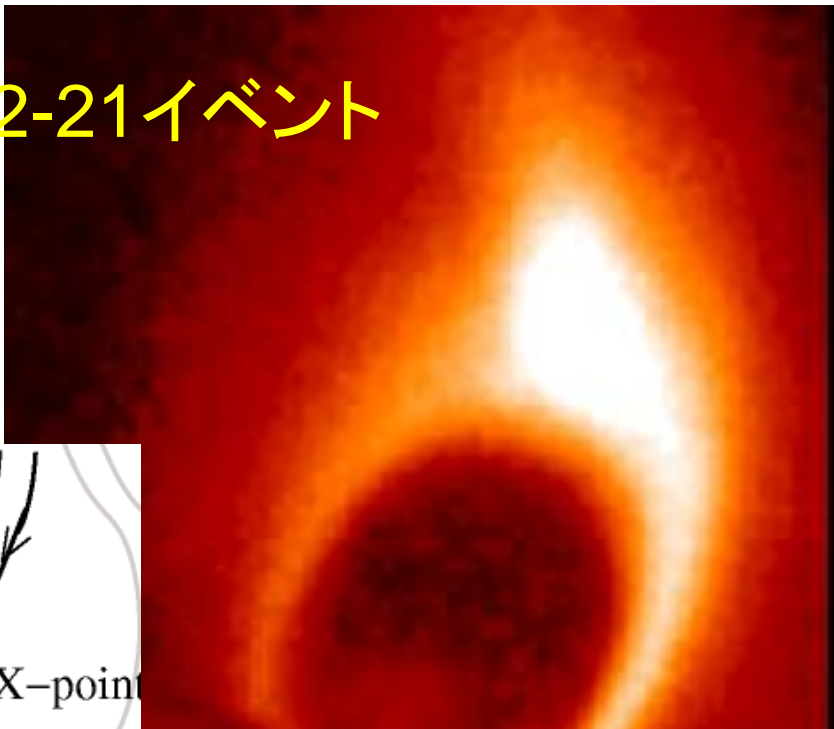


フレアの磁気流体シミュレーション

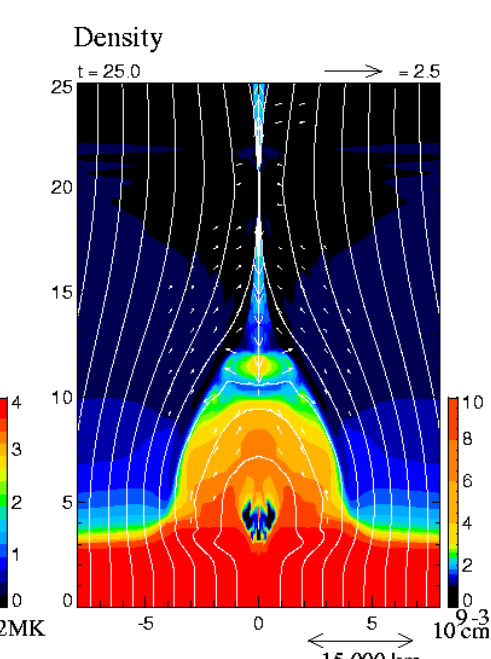
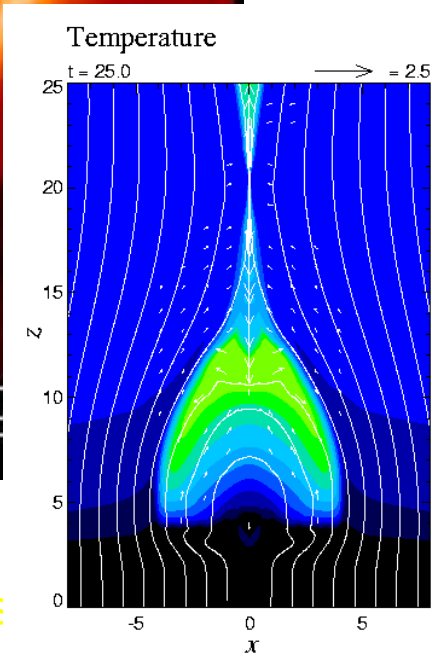
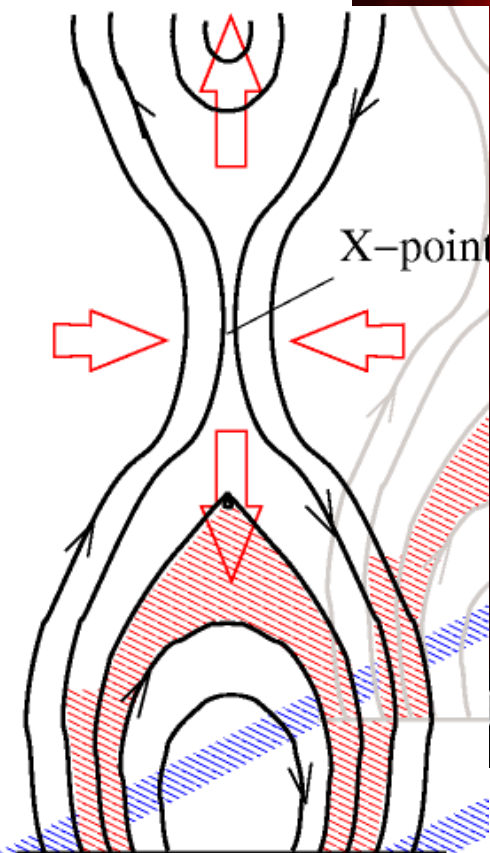
Yokoyama & Shibata (1998)



1992-2-21イベント



21 Feb 19



(Ts)

なぜシミュレーション？

見えないところを「見る」

観測できる範囲は、さまざまな条件で制約されている。

装置性能 空間・時間分解能

観測条件 地球大気の影響、観測波長

電磁波の透過条件 星内部の観測は困難

遠方天体

アイデアを試す

数値的に実験して、観測を説明し、定量的・定性的な予言をおこなう

太陽内部の熱対流運動

$r=0.99R_{\text{sun}}$



$r=0.95R_{\text{sun}}$



$r=0.85R_{\text{sun}}$



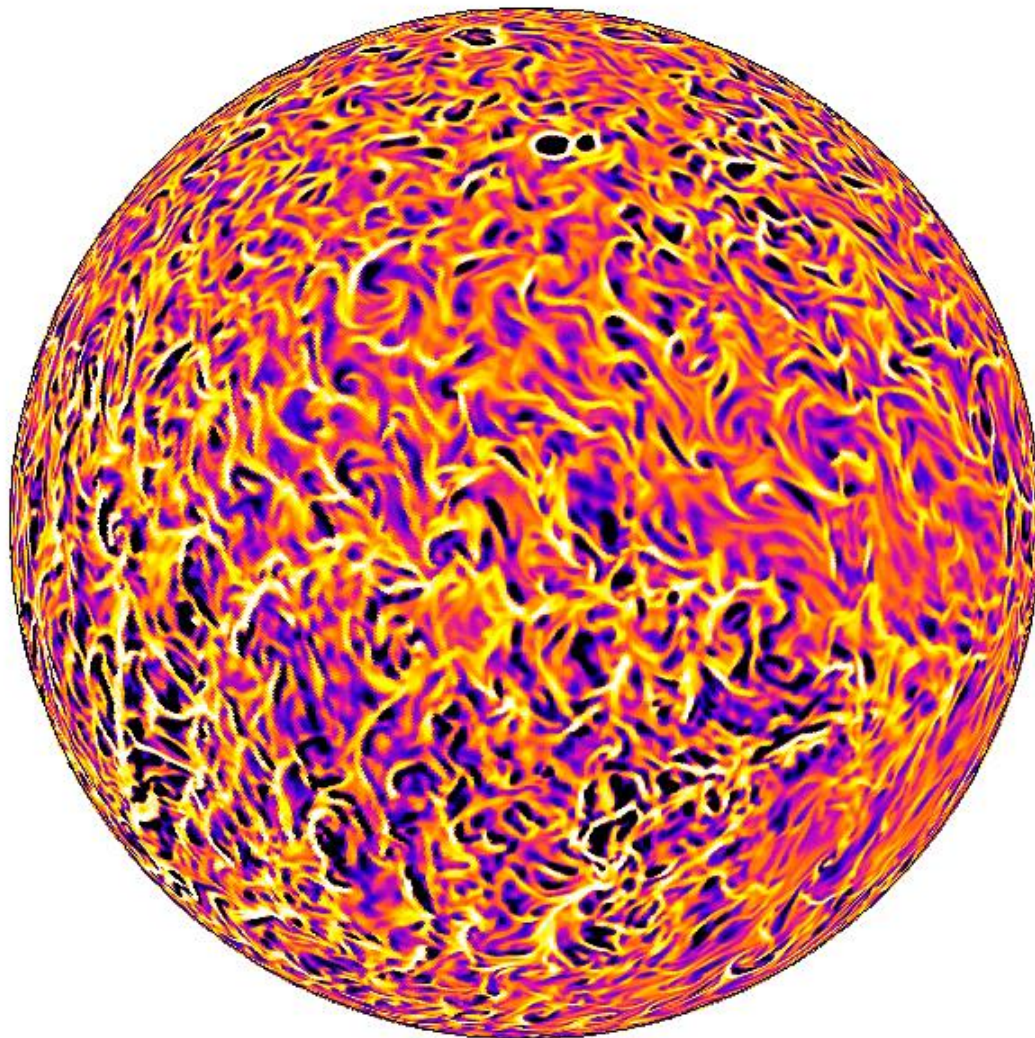
Hotta, Rempel, TY (2013)



$r = 0.715R$



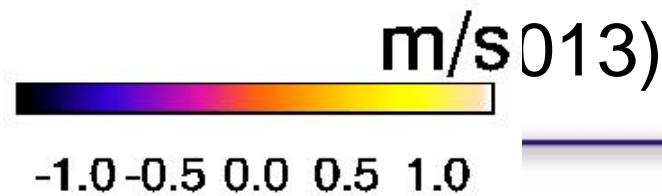
$t = 0.00$ [day]



in

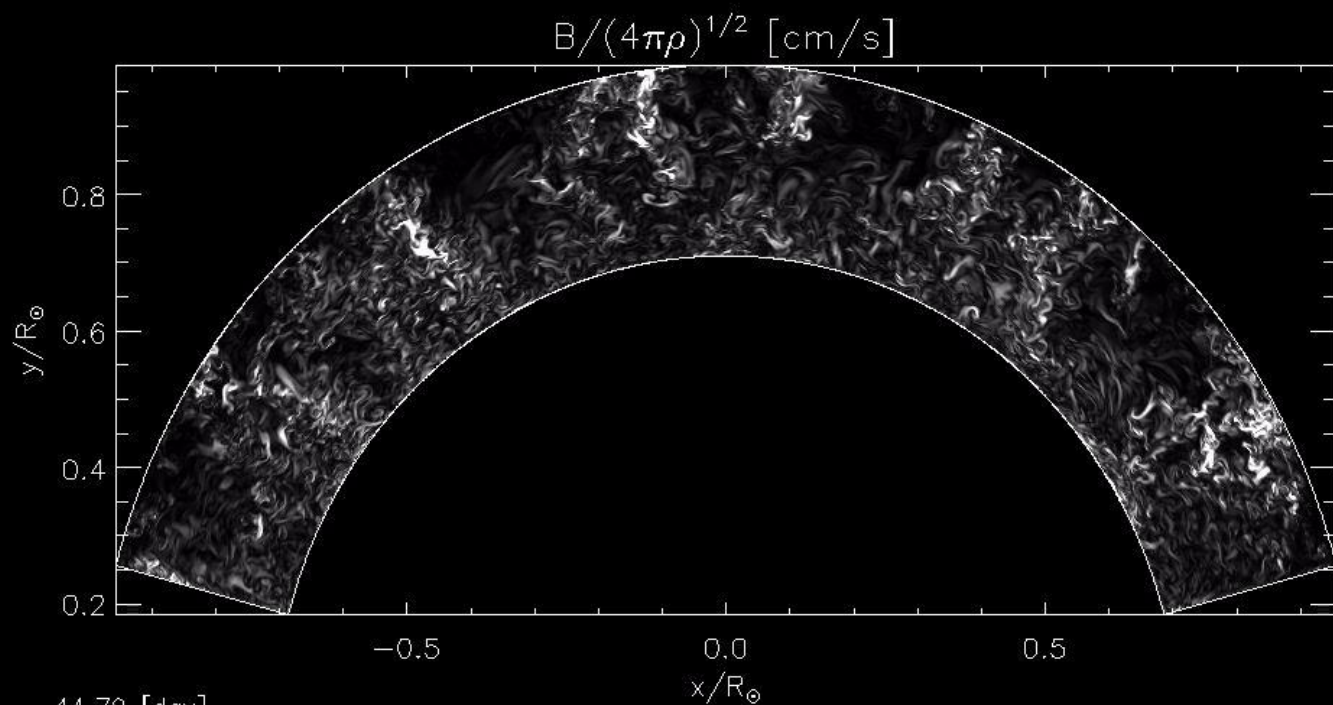
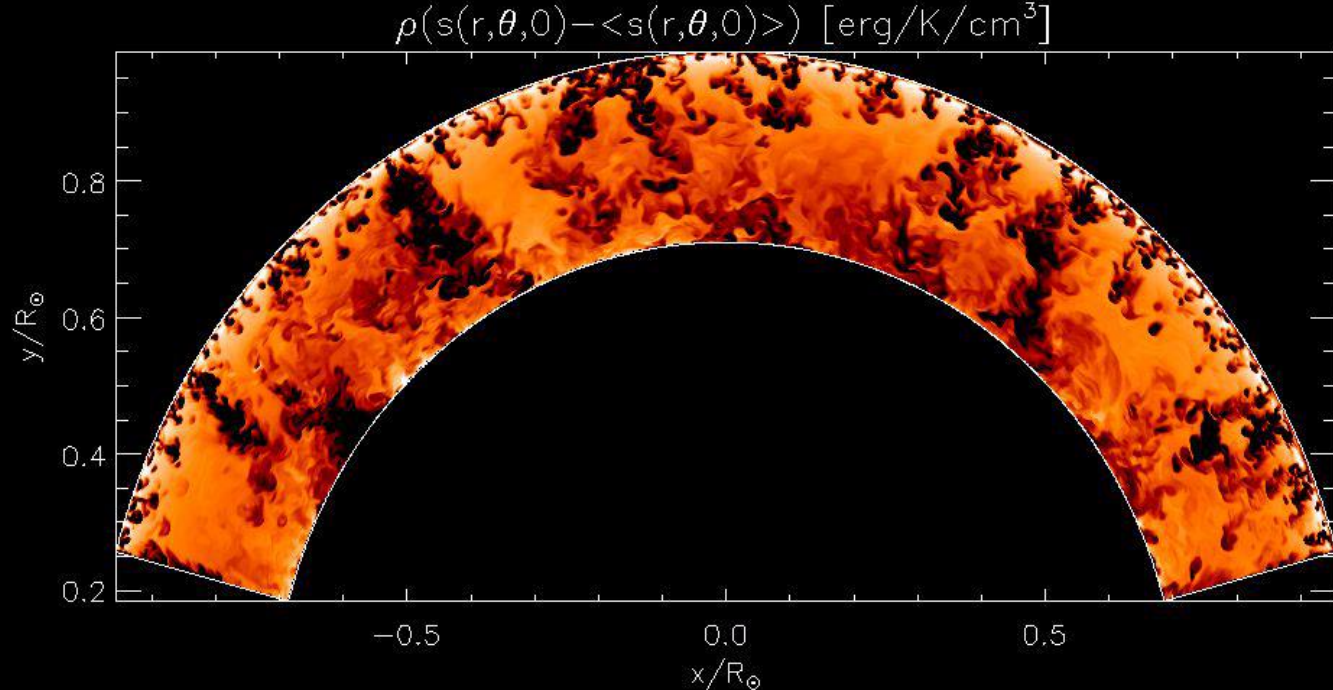


$t = 0.0$ [day]

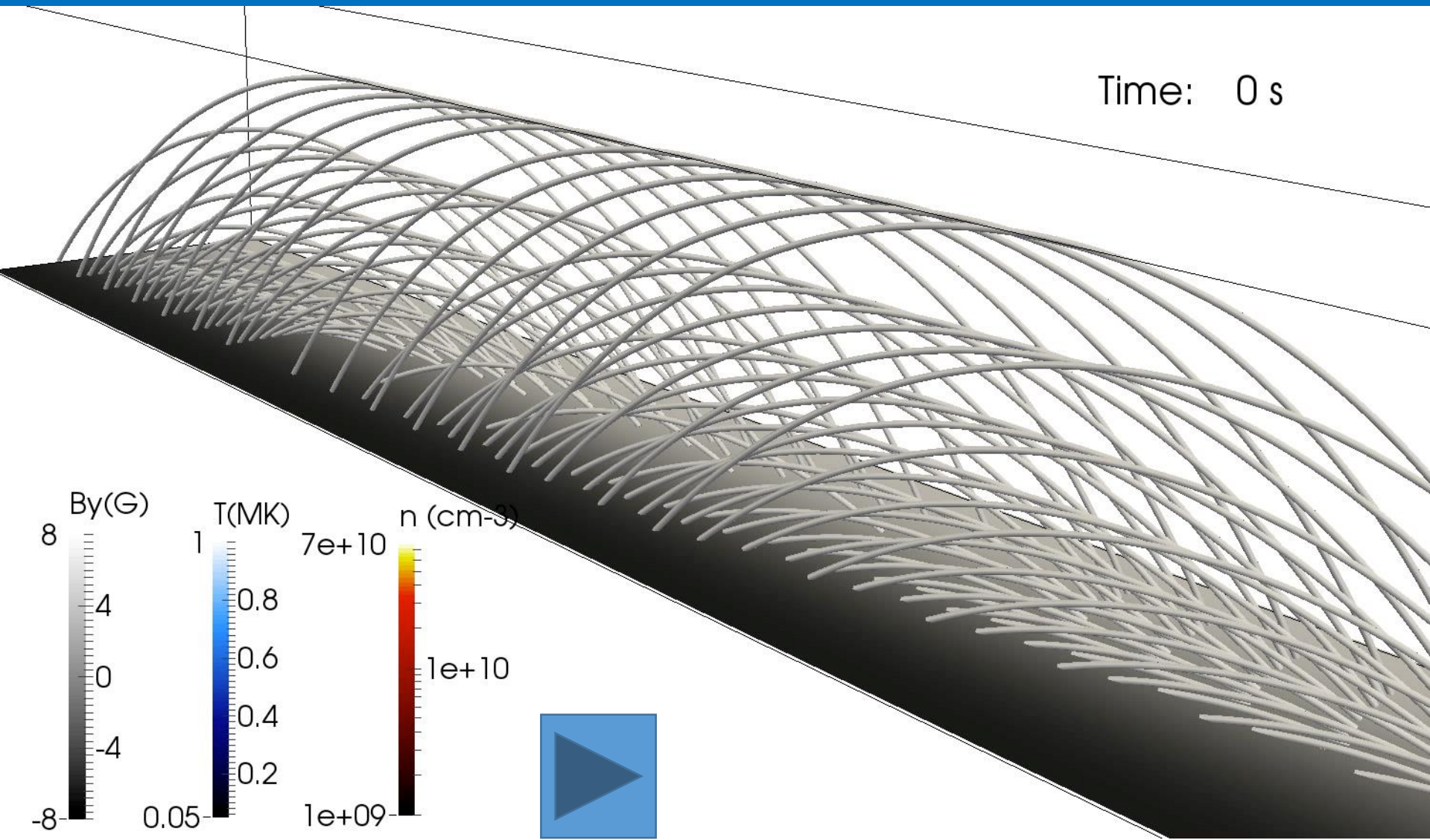


太陽内部
熱対流による
磁場生成

Hotta,
Rempel, TY
(2013)



太陽プロミネンス（低温雲）の形成



(Kaneko & Yokoyama, 2017)

コンピュータによる太陽研究:まとめ

見えないところを「見る」

観測できる範囲は、さまざまな条件で制約されている。

装置性能 空間・時間分解能

観測条件 地球大気の影響、観測波長

電磁波の透過条件 星内部の観測は困難

遠方天体

アイデアを試す

数値的に実験して、観測を説明し、定量的・定性的な予言をおこなう