

# 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

•  $r_{\max}=0.99R_{\text{sun}}$   
•  $512 \times 2048 \times 4096$



t= 0.00 [day]

# 太陽研究の手段

## 観測

データ解析

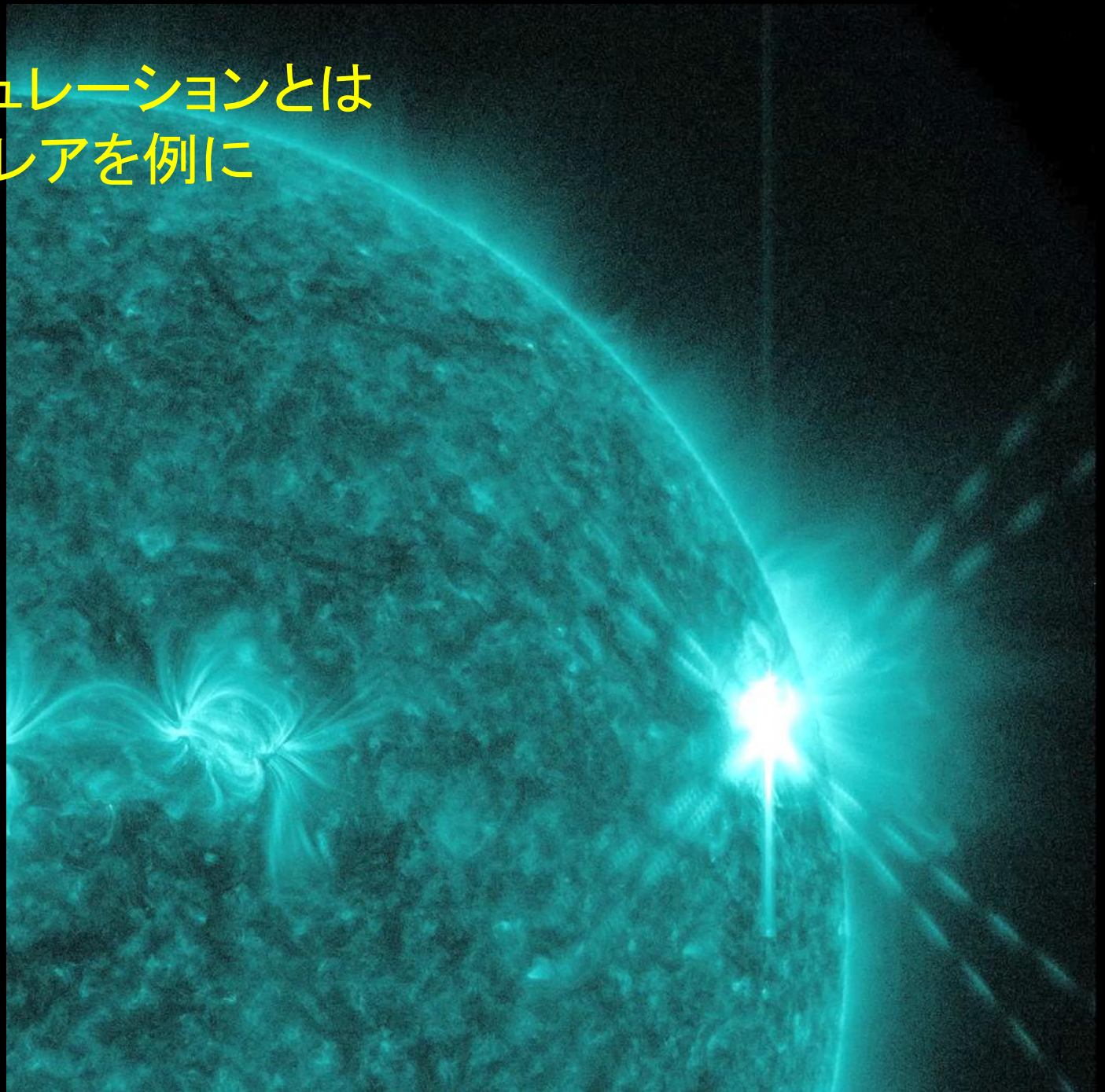
観測器開発

## 理論

解析的手法(紙と鉛筆)

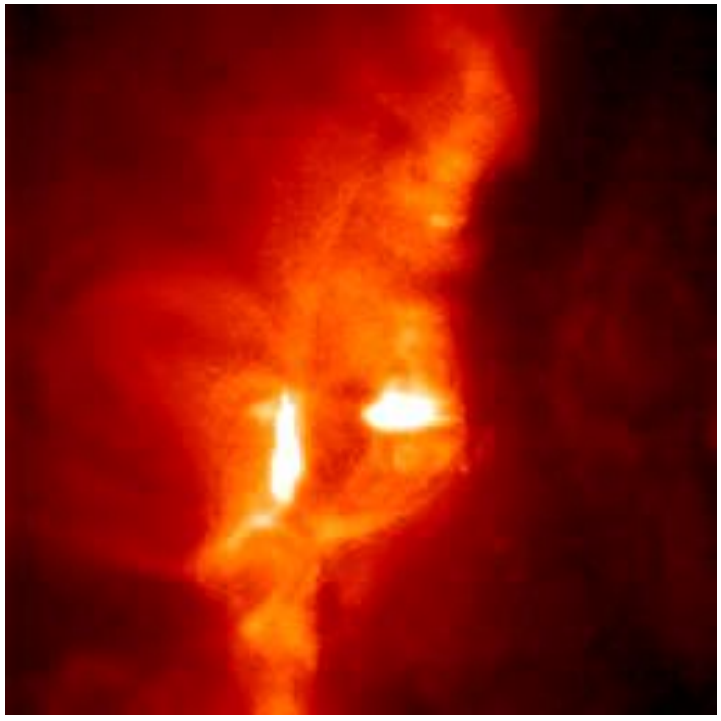
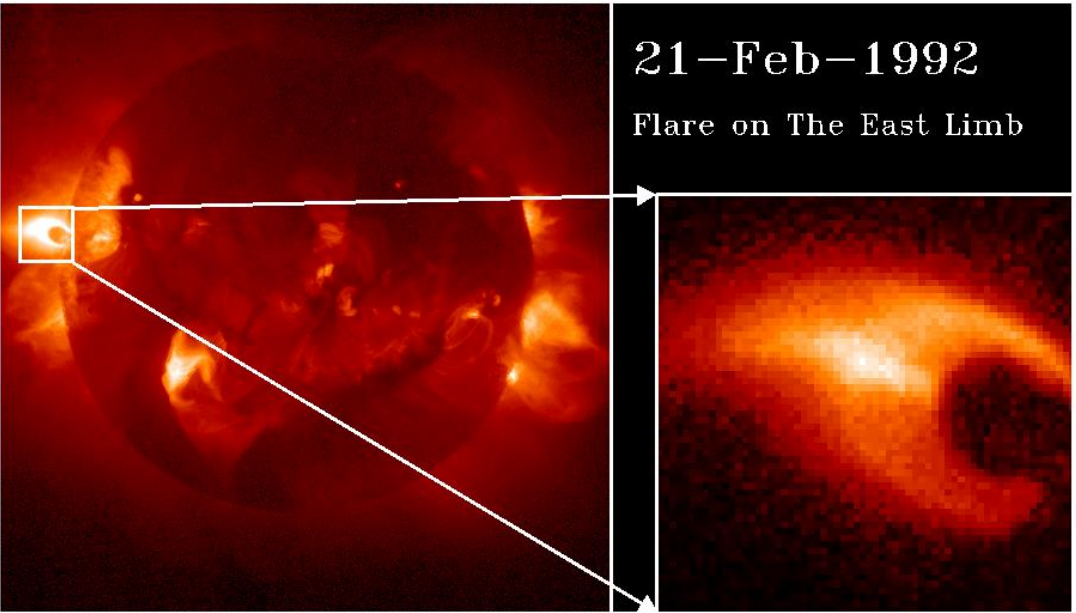
数値シミュレーション

# 数値シミュレーションとは —太陽フレアを例に



# 1992-2-21イベント

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



カस्प型フレアループ

# 太陽フレア

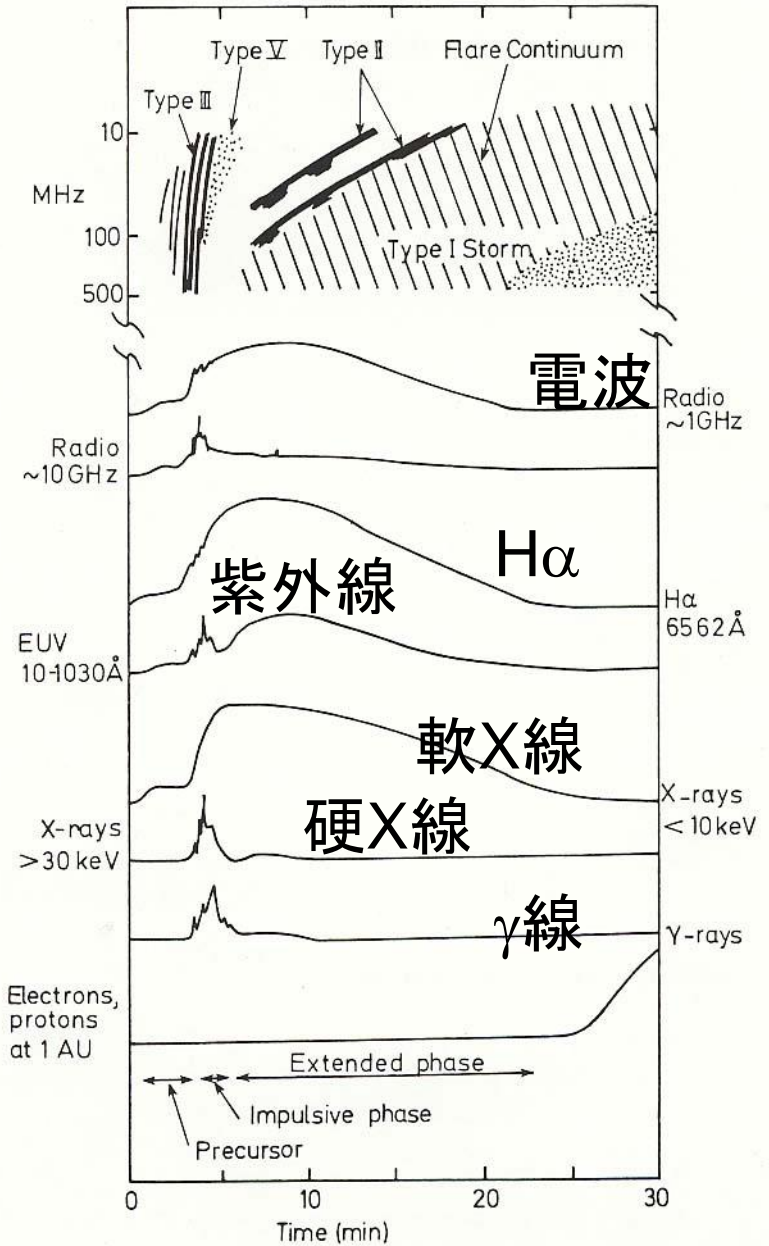
太陽大気でおこる爆発現象  
あらゆる波長(電波からγ線まで)の電磁波  
が、数分から数時間にわたって増光

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

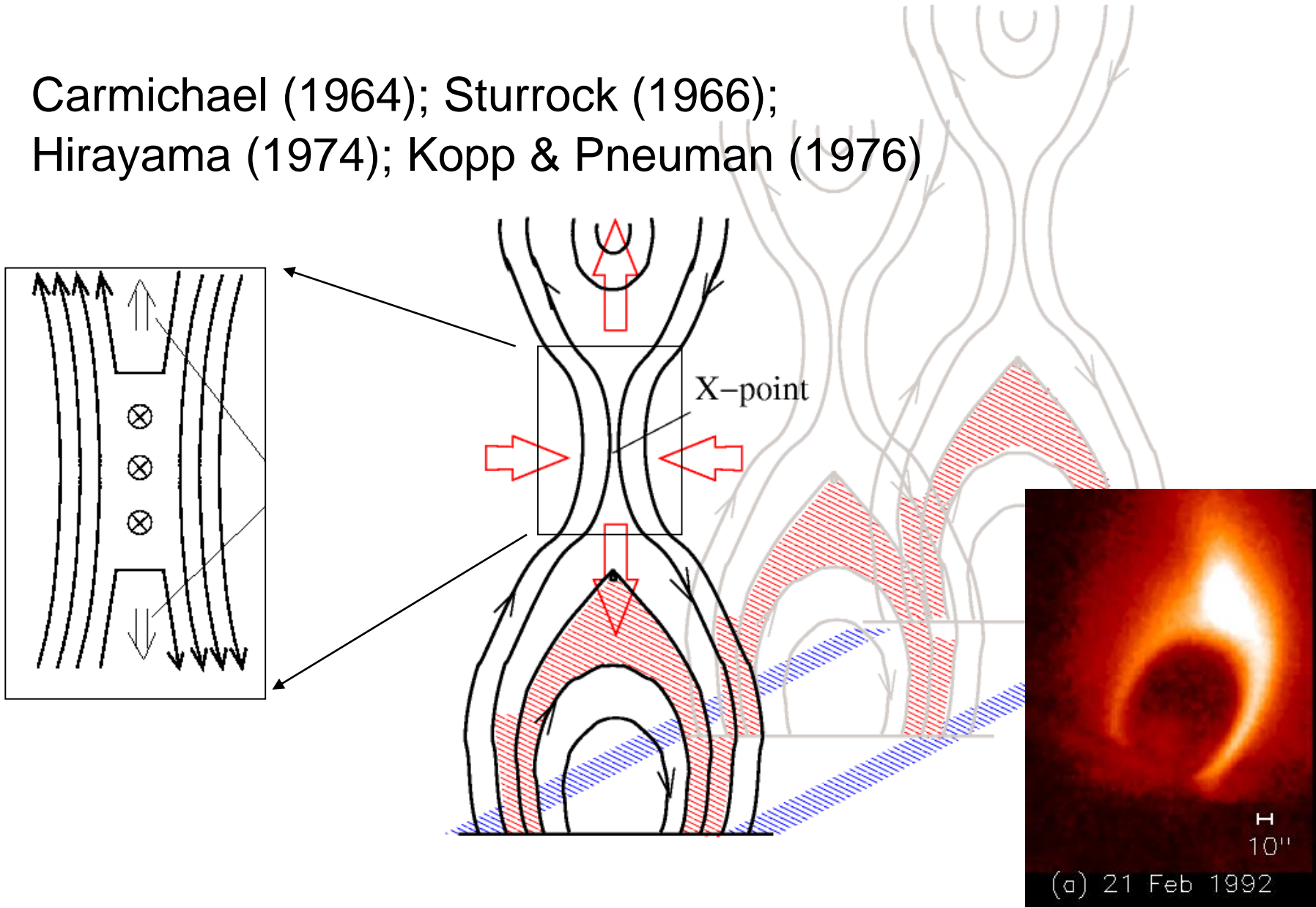
ときにCMEやフィラメント放出などの大規模な  
プラズマ放出現象をともなう



(Kane, 1974, IAU, p105)

# 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)

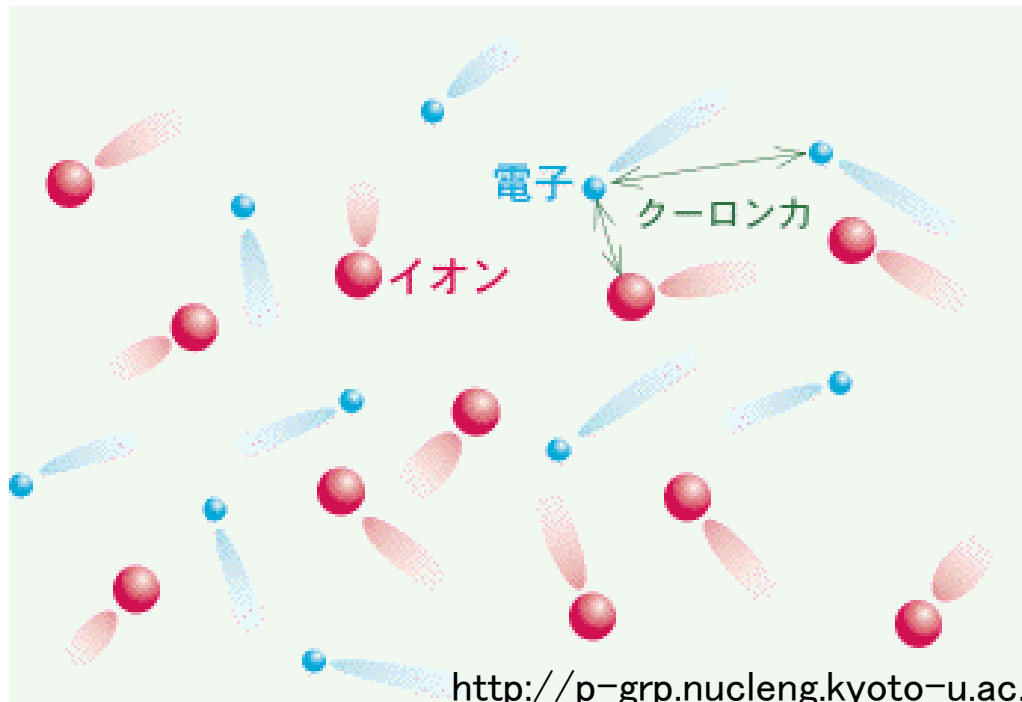


(a) 21 Feb 1992

# 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  $\rho$  と圧力  $p$

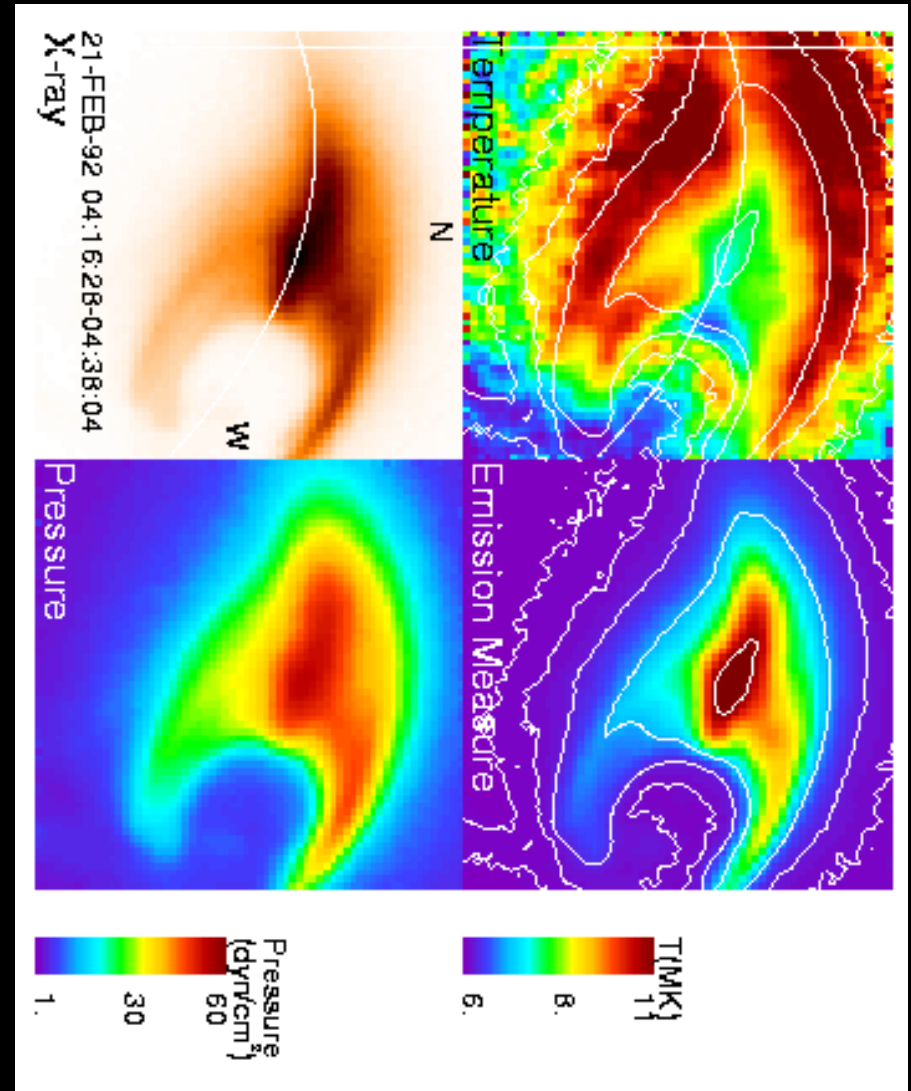
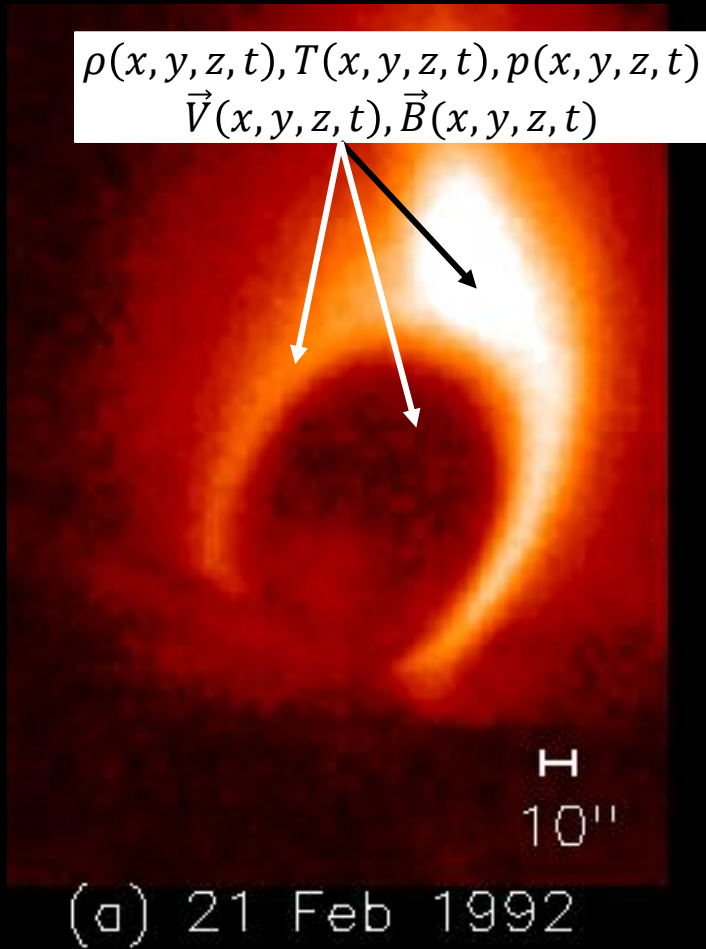
とで表現できる。

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 ( $\rho$ 、 $p$ 、 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{E}$ ) 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)

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

大体的場合、  
紙と鉛筆では無理！

} = 0

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

Ohm の法則

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

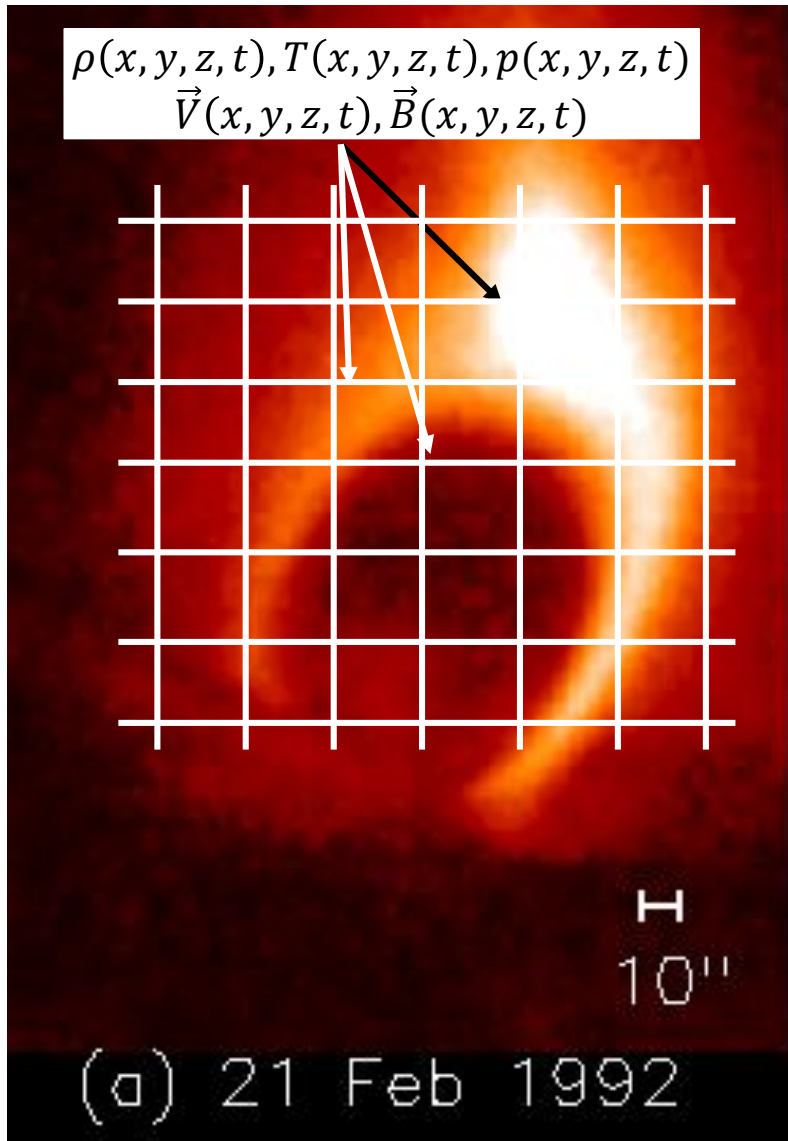
以上の方程式 (成分を考えると 14 本) に対して、従属変数は 14 個 ( $\rho$ 、 $p$ 、 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{E}$ ) である。  
必要に応じて次の方程式をもちいる。

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

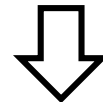


$$\rho(x, y, z, t)$$



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

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



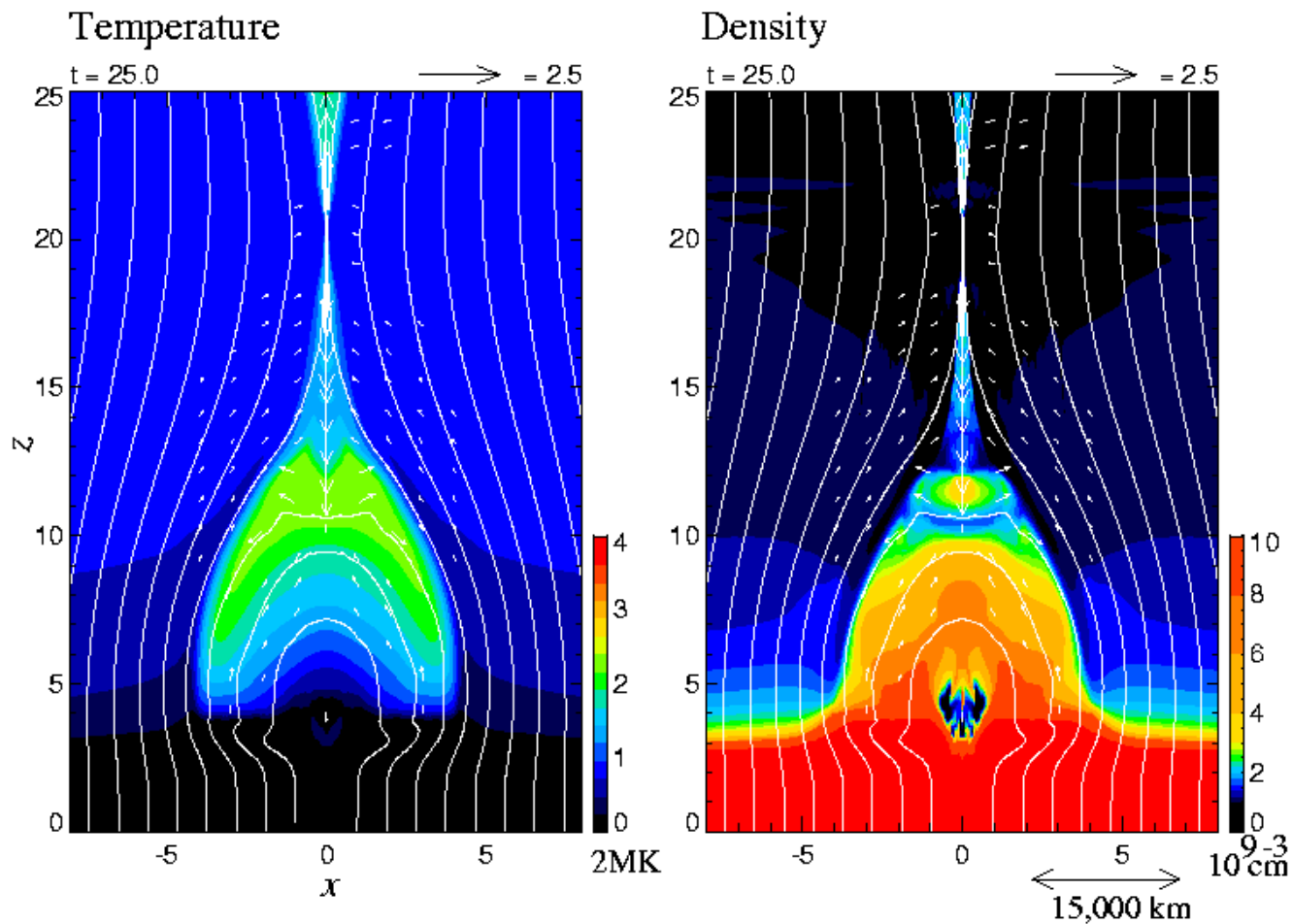
$$\dots = -\frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta x} + \dots$$

```
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

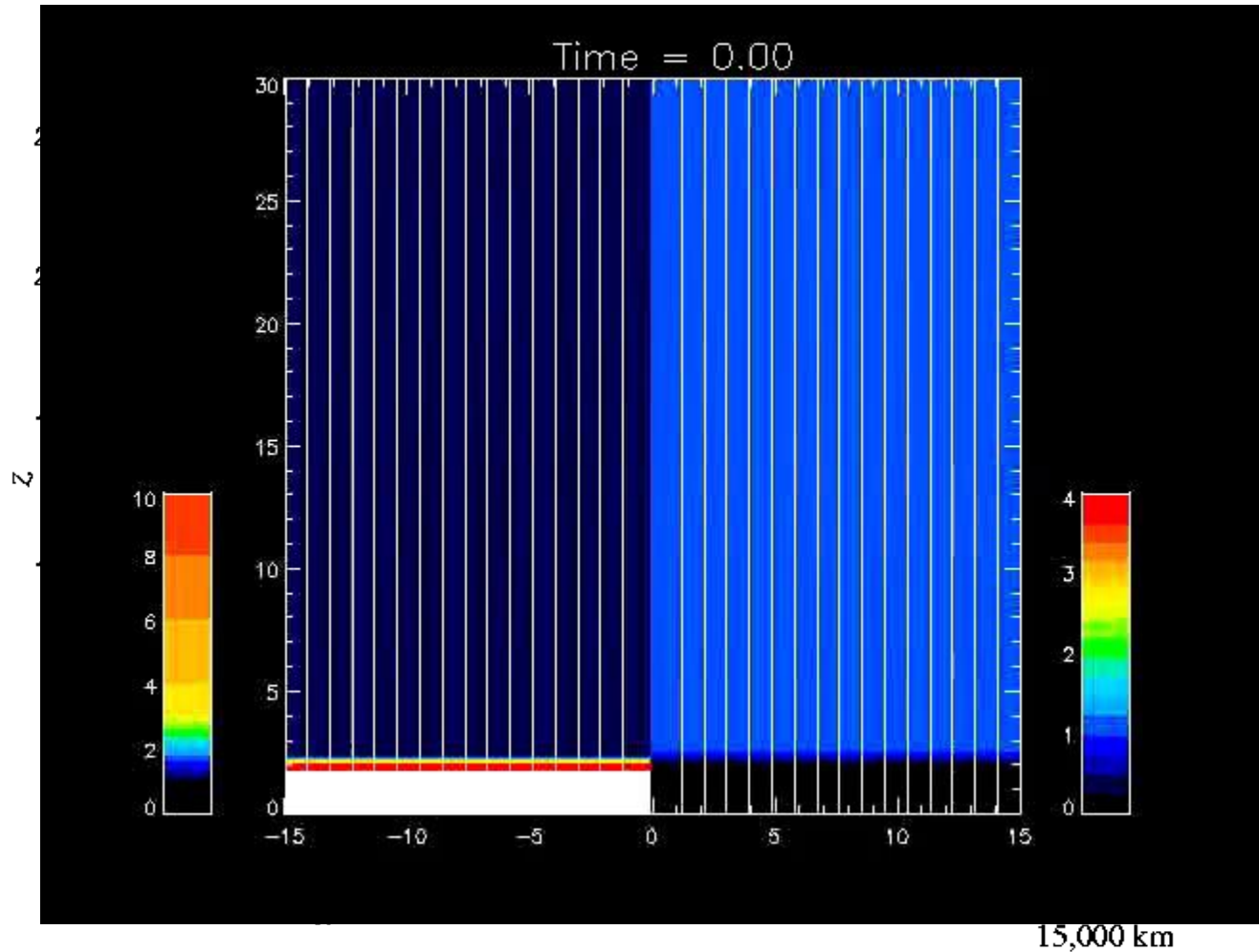
Yokoyama & Shibata (1998)





# フレアの磁気流体シミュレーション

Yokoyama & Shibata (1998)

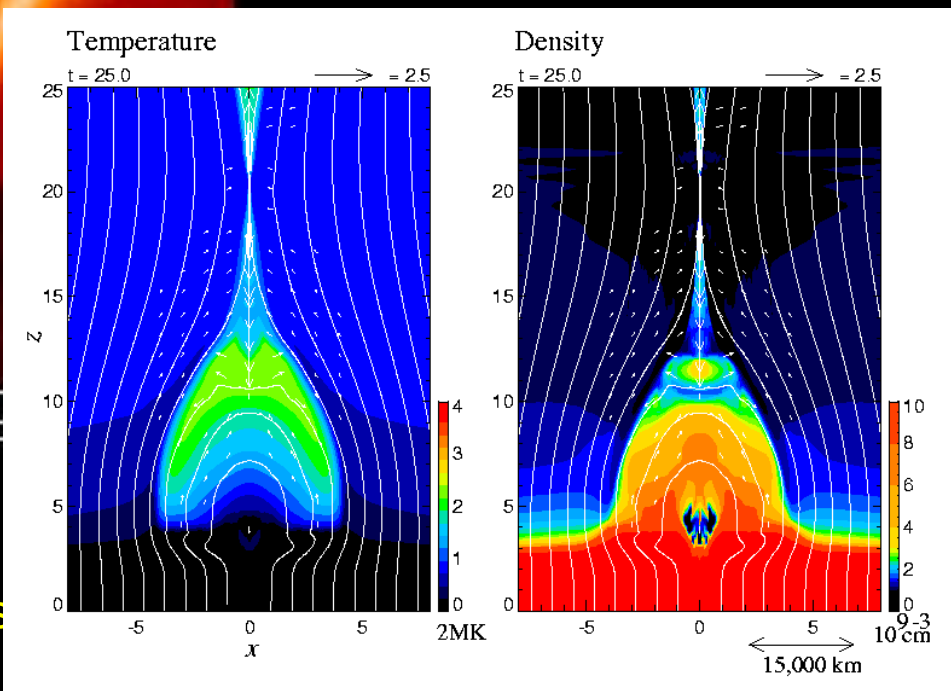
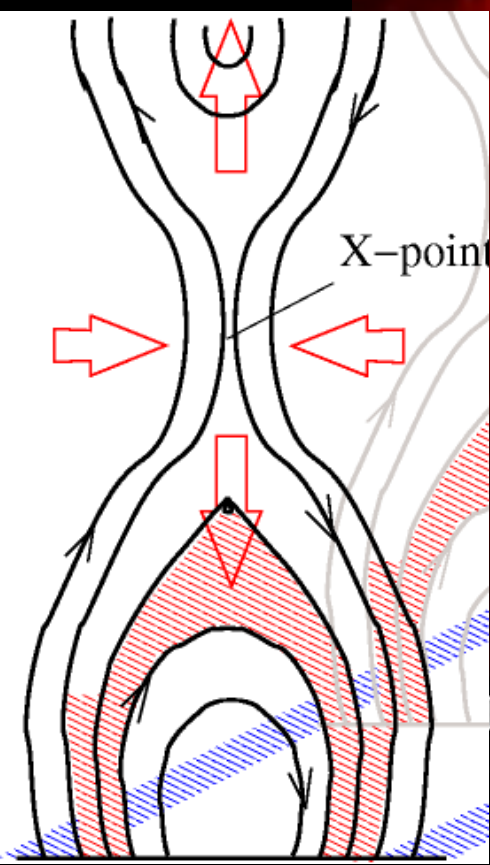


# 1992-2-21イベント



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

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



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



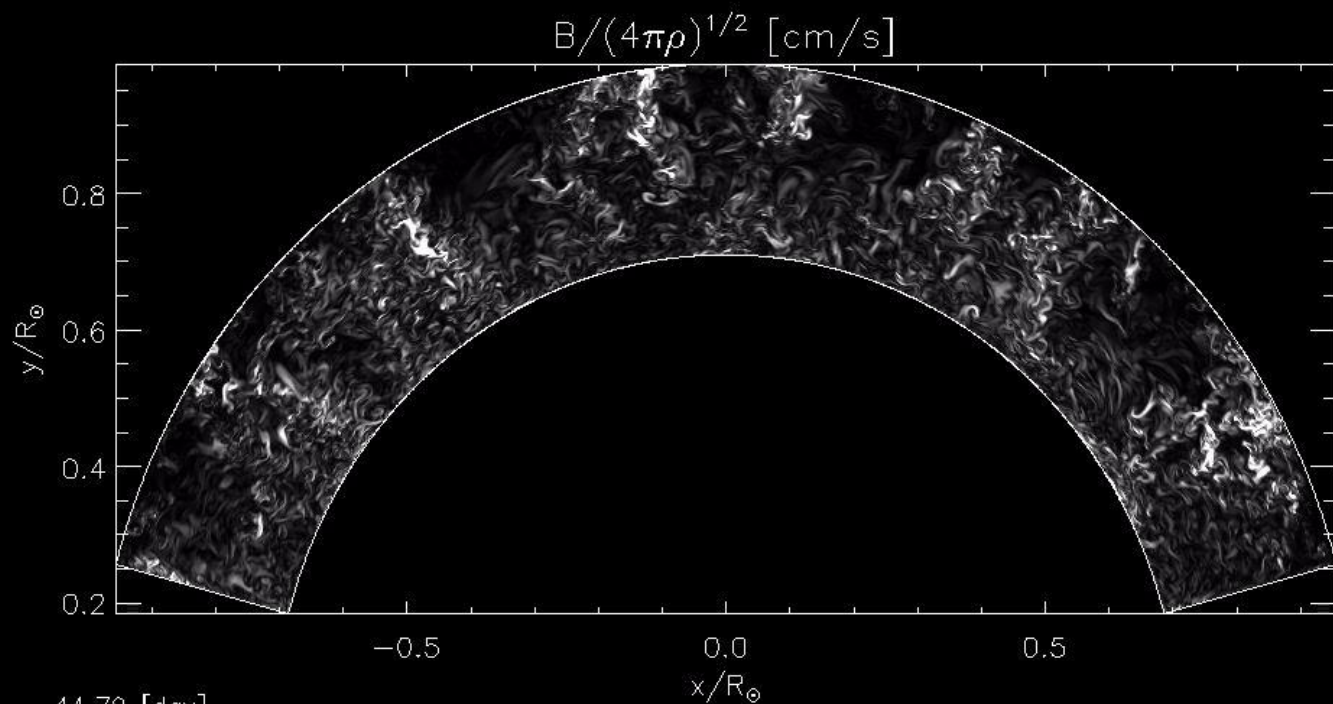
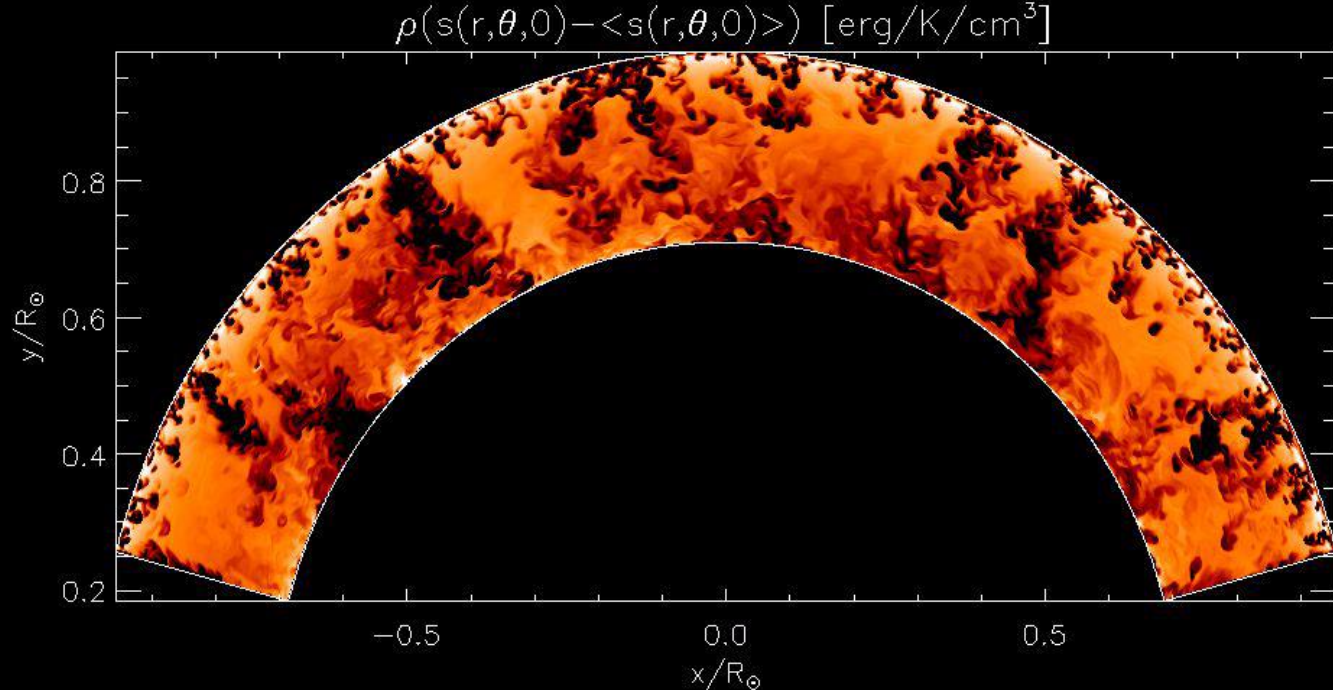
$r=0.85R_{\text{sun}}$



Hotta, Rempel, TY (2013)

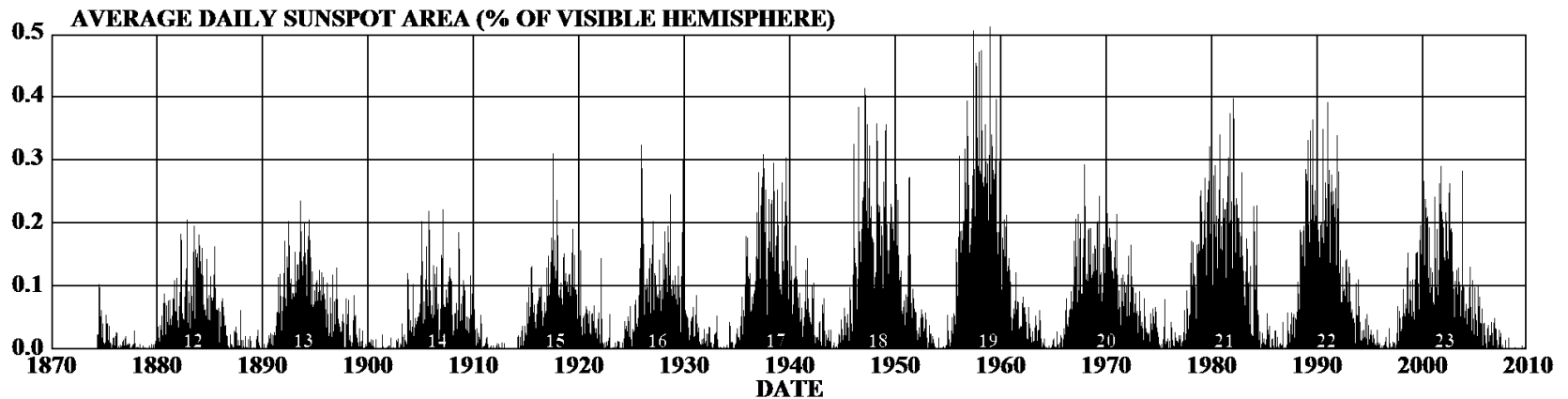
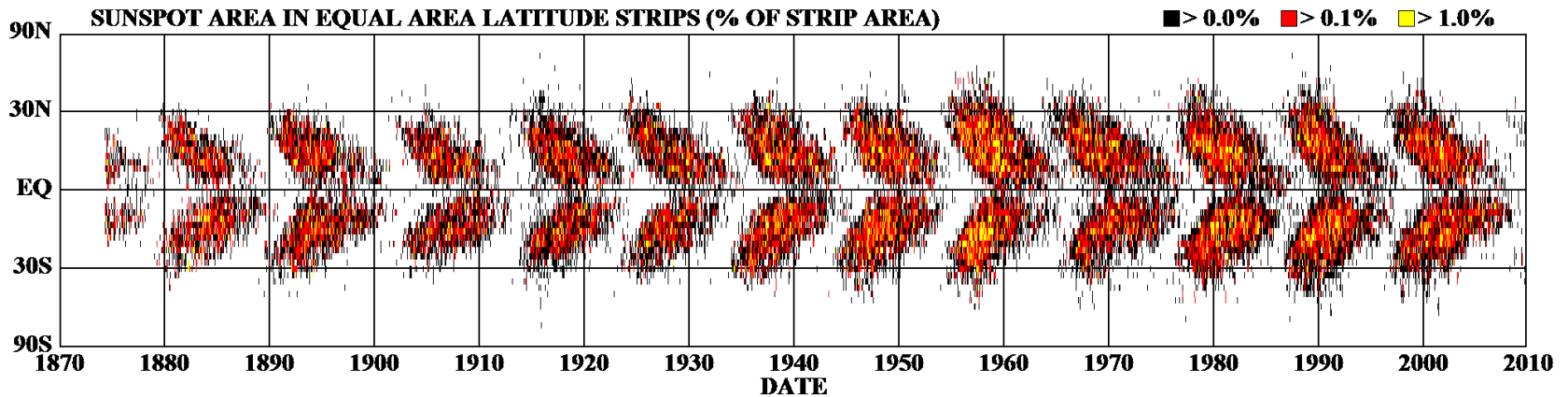
# 太陽内部 熱対流による 磁場生成

Hotta,  
Rempel, TY  
(2013)



# 黒点11年周期と緯度出現分布(蝶形図)

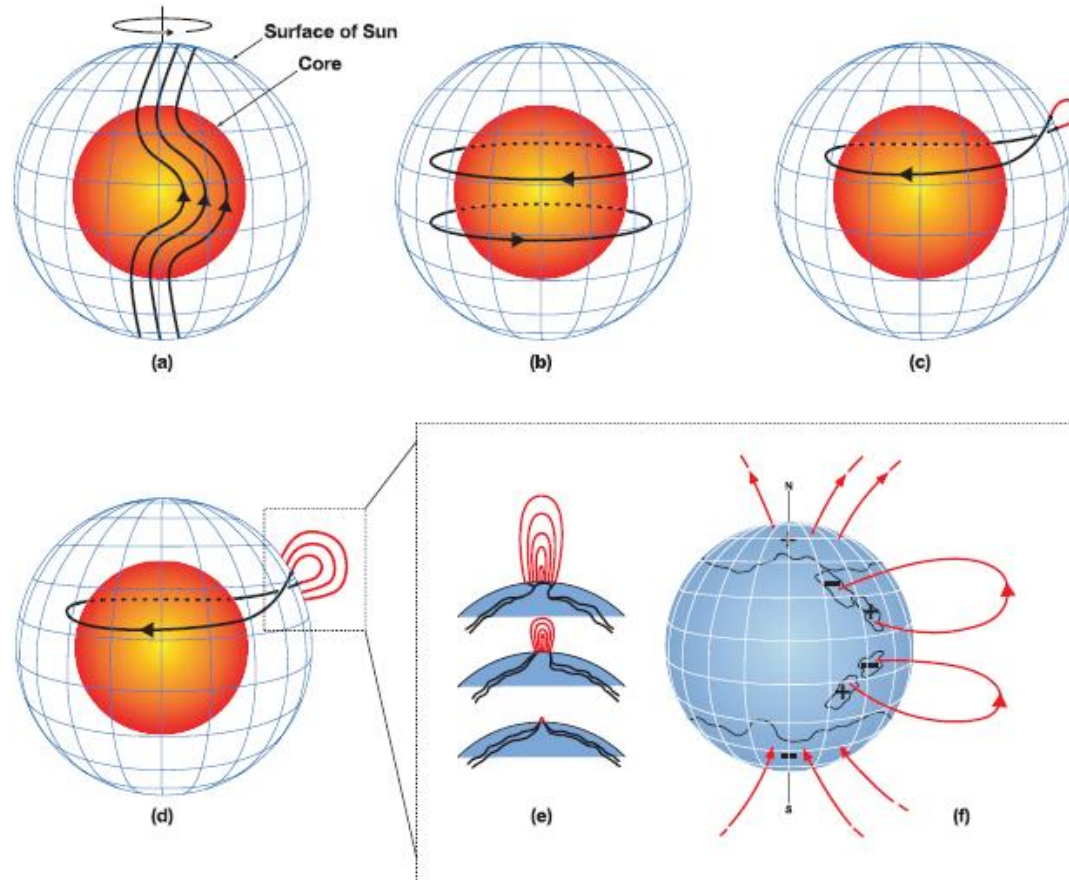
## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

HATHAWAY/NASA/MSFC 2009/12

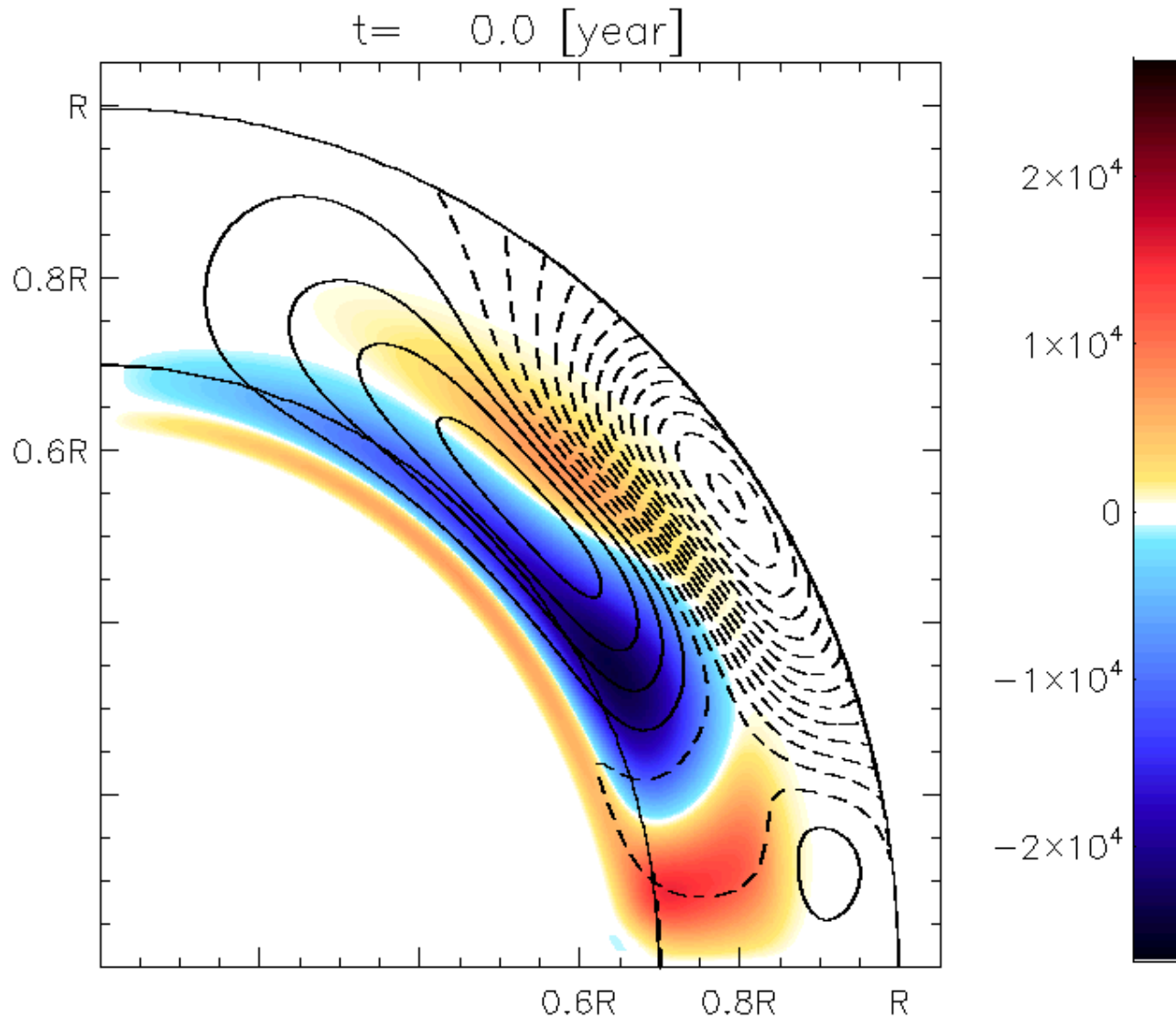
# 太陽ダイナモ



(図はDikpati et al. 2006)

# 磁束輸送ダイナモ

- 線:ポロイダル磁場の磁力線
- 色:トロイダル磁場の強さ



(Hotta & Yokoayama, 2010)



東京大学 理学系研究科  
地球惑星科学専攻  
横山研の紹介





# 東京大学で太陽研究するには

## 天文学専攻

柴橋博資 教授 本郷が本拠。おもに日震学・星震学

原弘久 准教授 国立天文台が本拠地

## 地球惑星科学専攻

清水敏文准教授 宇宙研が本拠地

横山研。このあと詳細に説明

(物理学専攻)

## 最近のテーマ

太陽コロナを伝える磁気流体波動の理論研究

太陽活動周期ダイナモのシミュレーション

太陽磁場浮上現象のシミュレーション

太陽コロナジェットの観測とシミュレーション

太陽磁場と熱対流との相互作用のシミュレーション

乱流磁気リコネクションのシミュレーション

太陽フレアリコネクションの観測

3次元磁気リコネクションのシミュレーション

太陽爆発現象のシミュレーション

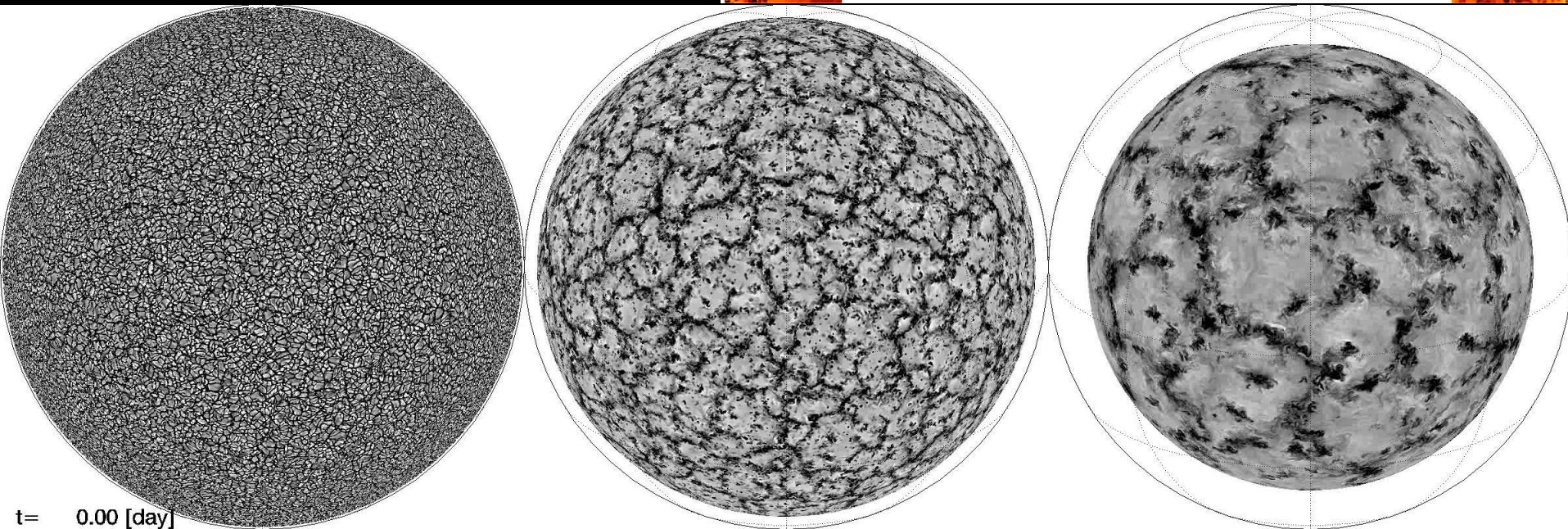
相対論的磁気リコネクション

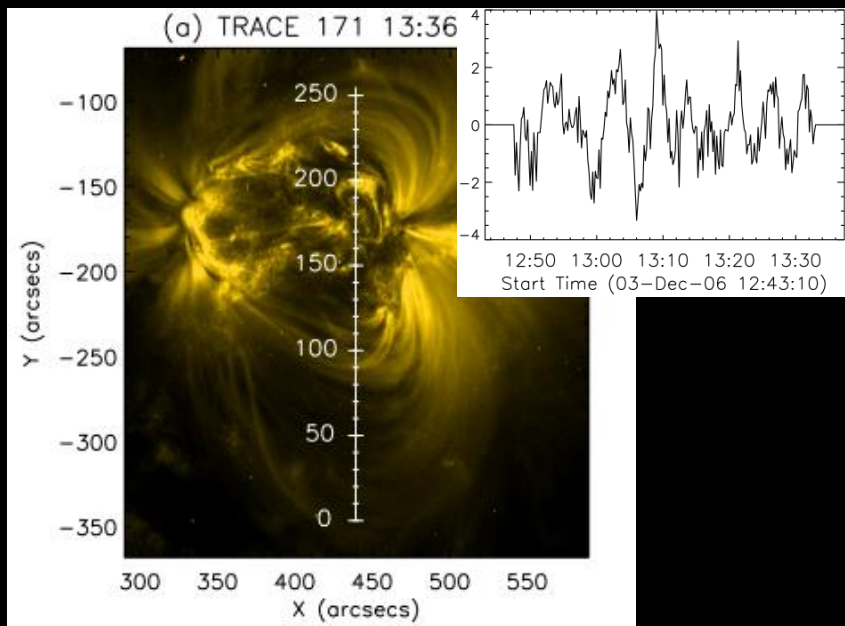
太陽フレア粒子加速の観測

# 研究

- 教員1名
- 博士3名、修士4名

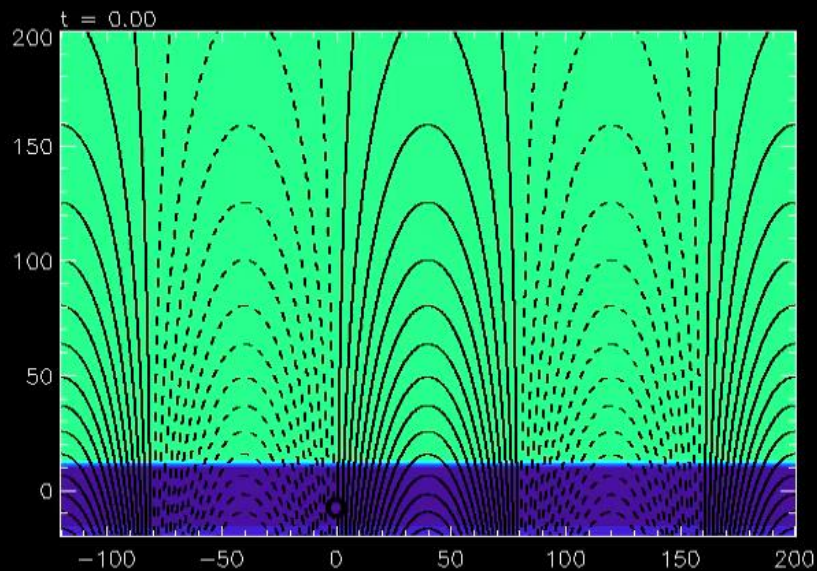
太陽内部熱対流運動（堀田英之）





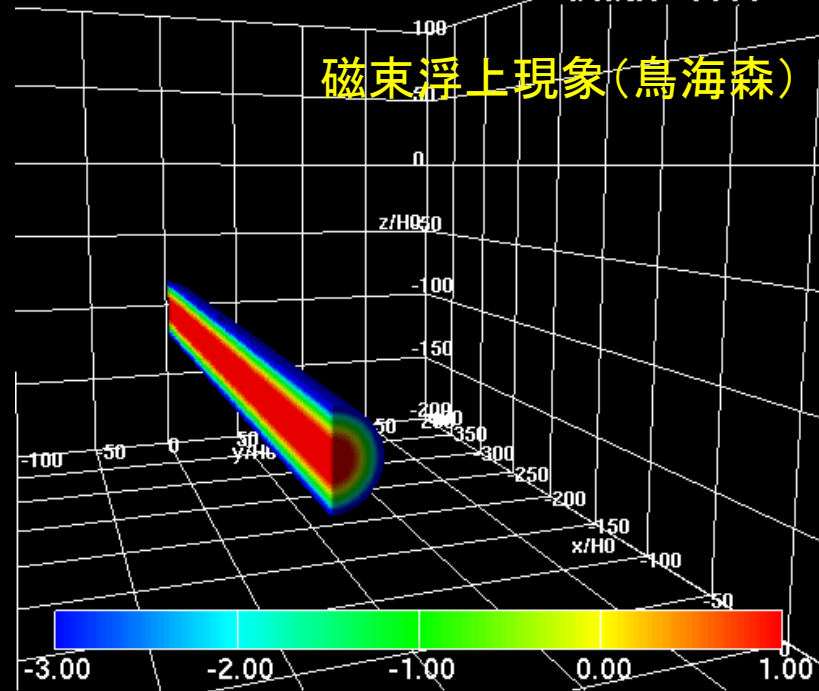
コロナ波動の検出とコロナ加熱(北川直優)

プラズマ放出現象(金子岳史)

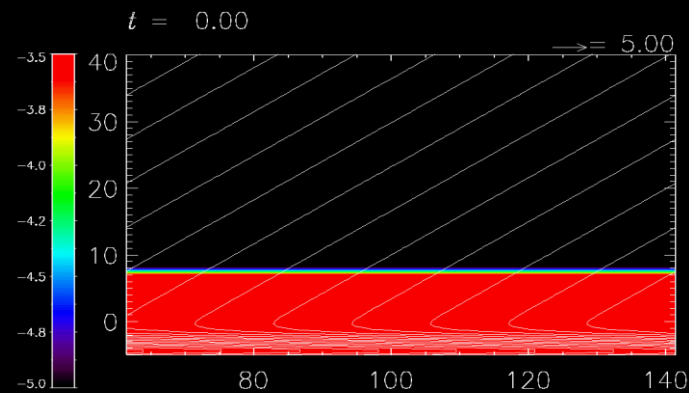


Magnetic Field Strength  $\log(|B|/B_0)$

$t/\tau_0=0000$



コロナジェット(松井悠起)



# ある大学院生の1日

朝11時ごろ大学へ

12時ごろ仲間を誘って昼食

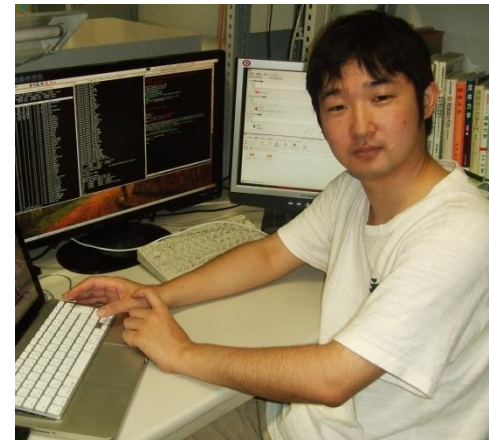
13時ごろから研究

15時から横山と2時間議論(教員との議論は週1回)

17時からもうひとがんばり研究

19時ごろ夕食

21時まで研究、下宿に帰って寝る



議論の時間が、日によって研究室セミナーや自主ゼミに入れ替わる。たまに学会発表や、衛星運用



# これから取り組みたいテーマ

弱電離プラズマのシミュレーション

太陽彩層

星形成

高温低密プラズマ(非等方熱伝導・粘性効果)

太陽コロナ

銀河団・銀河高温ガス



太陽研究に  
興味ある方、  
意欲ある若者を  
求めています。

終