

宇宙磁気流体プラズマシミュレーションサマースクール

2012.8.6. 千葉大

## 太陽活動現象の 磁気流体シミュレーション

横山央明 東京大学 地球惑星

共同研究・スライド提供 金子岳史・松井悠起・飯島陽久・鳥海森・堀田英之









図1.1 温度-密度面上でのガスの状態の分類. nλp<sup>3</sup>=1 の直線の左 側の領域ではガスは自由粒子の集合と見なせる. 面上での電子の 平均自由行路 l 一定の線も示されている. 種々の天体の温度-密度 面上での代表的位置も示されている.

加藤(1989)改変

#### 太陽コロナ

温度 2MK 密度 10<sup>9</sup>cm<sup>-3</sup> 磁場 数-100G ループ長 10<sup>4</sup>ー10<sup>5</sup> km プラズマβ(ガス圧/磁気圧) 0.01-0.1 Alfven時間 1-100 sec 拡散時間 1 Myr 磁気Reynolds数 10<sup>13</sup>



### 太陽活動現象

## さまざまな時間軸スケール数秒から数10年まで

フレア粒子加速 フレアエネルギー熱解放・プラズマ放出現象 浮上磁場・黒点形成 表面対流 ダイナモ

### 太陽活動現象

## さまざまな時間軸スケール数秒から数10年まで

# フレア粒子加速(要プラズマ運動論) フレアエネルギー熱解放・プラズマ放出現象 浮上磁場・黒点形成

表面対流 ダイナモ





NASA

- T<sub>flare</sub>=10 100 MK (1 - 10) x 10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>
- 時間スケール 60-10<sup>5</sup> sec エネルギー 10<sup>29</sup> - 10<sup>32</sup> erg





(Tsuneta et al. 1992)

JAXA ようこう衛星

## フレアモデル:リコネクション+熱伝導+彩層蒸発



シミュレーションの設定



2.5次元MHD 重力なし 初期局所抵抗+異常抵抗(η∝J/ρ) 非線型非等方熱伝導

$$TAlfv = 100 sec$$
  
$$J = \vec{\lambda} \vec{\lambda} \vec{\lambda} \vec{\beta} = 0.2$$
  
$$T = 600 sec$$

12/56



#### 

シミュレーション結果



# 原始星フレア (X線/あすか衛星:小山ら1995)





太陽型星でのスーパーフレア

(前原ほか 2012)

#### LETTER Published in Nature (2012, May 17)

#### Superflares on solar-type stars

Hiroyuki Maehara<sup>1</sup>, Takuya Shibayama<sup>1</sup>, Shota Notsu<sup>1</sup>, Yuta Notsu<sup>1</sup>, Takashi Nagao<sup>1</sup>, Satoshi Kusaba<sup>1</sup>, Satoshi Hond Daisaku Nogami<sup>1</sup> & Kazunari Shibata<sup>1</sup>

Solar flares are caused by the sudden release of magnetic energy stored near sunspots. They release 10<sup>29</sup> to 10<sup>32</sup> ergs of energy on a timescale of hours<sup>1</sup>. Similar flares have been observed on many stars, with larger 'superflares' seen on a variety of stars<sup>2,3</sup>, some of which are rapidly rotating<sup>4,5</sup> and some of which are of ordinary solar type<sup>3,6</sup>. The small number of superflares observed on solartype stars has hitherto precluded a detailed study of them. Here we report observations of 365 superflares, including some from slowly rotating solar-type stars, from about 83,000 stars observed over 120 days. Quasi-periodic brightness modulations observed in the solar-type stars suggest that they have much larger starspots than does the Sun. The maximum energy of the flare is not correlated with the stellar rotation period, but the data suggest that superflares occur more frequently on rapidly rotating stars. It has been proposed that hot Jupiters may be important in the generation of superflares on solar-type stars7, but none have been discovered around the stars that we have studied, indicating that hot Jupiters associated with superflares are rare.

We searched for stellar flares on solar-type stars sequence stars) using data collected by NASA's Kepler8 the period from April 2009 to December 2009 (a brief s flare search method is described in the legend of Fig. 1 a is provided in Supplementary Information). We use temperature  $(T_{eff})$  and the surface gravity  $(\log(g))$  ava Kepler Input Catalogº to select solar-type stars. The se are as follows: 5,100 K  $\leq T_{\text{eff}} \leq 6,000$  K,  $\log(g) \geq 4.0$ . The of solar-type stars are 9,751 for quarter 0 of the Keple length of observation period is about 10 d), 75,728 for q 83,094 for guarter 2 (90 d) and 3,691 for guarter 3 (90 c We found 365 superflares (flares with energy >10 solar-type stars (light curves of each flare are si Supplementary Fig. 8 and properties of each flare sta Supplementary Table 1). The durations of the detec are typically a few hours, and their amplitudes are ger 0.1-1% of the stellar luminosity. The bolometric lumir bolometric energy of each flare were estimated from th









Hayashi et al. 1996



## **太陽フィラメント放出現象** (Filament Eruption) フィラメント(1万~10万K)が、コロナ(100万K)中へ放出 される低温プラズマ放出現象



多くの観測的研究が、 地球磁気圏にも大きな影響を及 ぼすコロナ質量放出(CME)との 相関を示している。

しかし、 フィラメントの形成プロセス、 磁気的な構造、放出のトリガー などの詳細は未解明

フィラメント放出 Nov. 21-23, 2011, SDO

(スライド提供金子岳史)

## フィラメント放出のモデル(のひとつ)



(スライド金子岳史 改変)





## 結果2(放出の他の例)<sup>(Kaneko & TY 2012)</sup>



皮脂のリコネリンヨ. メカニズムⅡ





- ・ようこう衛星の軟X線観測により発見された。[Shibata et al. 1992]
- •100km/s(音速)--1000km/s(Alfven速度)程度

(スライド松井悠起 改変)

25

## 磁気リコネクションモデル:2つの加速機構





- •対流層:磁束シート
- •熱伝導によりコロナの熱は彩層に伝わる

27

方程式

(Matsui & TY 2012)

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot (\rho \boldsymbol{V}) = 0,$	•MHD : CIP法 •熱伝導 : SOR 法 •grid : 512 x 1024	
$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \mathbf{\nabla} \cdot \left[\rho \mathbf{V} \mathbf{V} + \left(p + \frac{\mathbf{B}}{8\pi}\right)\xi - \frac{\mathbf{B}\mathbf{B}}{4\pi}\right] = \rho \mathbf{g},$	•box size: x=[0,80],y=[-3,80	0]
$\frac{\partial}{\partial t}(\boldsymbol{B}) + c\nabla \times \boldsymbol{E} = 0,$	<ul> <li>resistivity : anomalous resistivity : anomalous : a</li></ul>	sistivity 云導•放射冷却•
$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho V^2 \right  + \frac{B^2}{8\pi} \right) + \nabla \cdot \left( (\frac{\gamma}{\gamma - 1} p + \frac{1}{2} \rho V^2) \mathbf{V} + c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{4\pi} \right)$	コロナ加熱を含む )	
$- \rho \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{V} = \nabla \cdot (\kappa_{\parallel} \nabla_{\parallel} T) - R + H,$		
$oldsymbol{E} = rac{4\pi}{c^2} \eta oldsymbol{J} - rac{1}{c} oldsymbol{V}  imes oldsymbol{B},$	規格化 •密度・温度: 光球の初期(	直
$\boldsymbol{J} = \frac{c}{4\pi} \boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{B},$	•長さ: 光球の圧力スケー) •速度: 光球の音速	
$p = \frac{k_{\rm B}}{m}\rho T.$	「可回:元球の圧力スクーク	レハコ Γ/ 日 述





- •右図黒線で示した磁力線の時間発展をトレース
- ・黒線上の1次元分布
- •横軸:高さ
- •左上:密度、右上:温度
- •左下:速度、右下:圧力

- •カラーコンター:密度
- •白線:磁力線
- •矢印:速度
- ・横境界は周期境界なので、同じ計算を 横に2つ並べている





## 磁気ネットワークと表面活動



白斑

超粒状斑

粒状斑

(画像は大山・柴田2004)

磁気エネルギースペクトルから見た磁気ネットワーク



- ・磁気ネットワークは数10Mm程度の構造。
- 磁気エネルギースペクトルで見るとピーク。

(スライド飯島陽久)

## 粒状斑と超粒状斑



- 水平速度の水平パワースペクトルをとると、2つの異なるピークが現れる。
   = 粒状斑と 超粒状斑
- 超粒状斑と磁気ネットワークは大きさが似ているため、超粒状斑の水平 流によって磁気エレメントが流された結果が磁気ネットワークだろうと一 般には信じられている。

## 超粒状斑の起源

電離度 (%

- ヘリウムの部分電離
  - Simon & Leighton 1964
    - 超粒状斑の深さ~5 Mm
    - ヘリウムの部分電離が超粒 状斑を駆動。
  - Stein et al. 2009
    - 現実的なシミュレーション
    - 超粒状斑のピークはほとん ど見えず。
- 磁場の移流・合体
  - Crouch et al. 2007
    - 粒状斑によって磁気エレメントが移流・合体

=> 磁気ネットワーク

- 磁気ネットワークに伴う流れ
  - = 超粒状斑

(スライド飯島陽久)



シミュレーション

(lijima & TY 2012)

- 概要
  - イオン平衡を仮定した部分電離と局所熱力学平衡を仮定した放射輸送を含む放射磁気流体コードを開発。
     計算負荷の少ない2次元でパラメータ解析。









- 磁場が強い場合に、水平速度場の長波長側にスペクトルのピークが出現。
- 磁気エネルギーも長波長側がさらに強くなっている。

## 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









トロイダル方向

対流、乱流、コリオリカ、磁気 浮力、不安定、黒点の拡散... などの原因でトロイダル磁場か らポロイダル磁場が作られる。 よく解明されておらず、起こる 場所も様々な説がある。 Babcock-Leighton α効果 速度勾配層α効果



Dikpati & Gilman 2007

(スライド堀田英之)





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)

## 磁場を入れた対流数値計算



## 太陽内部のコンピュータシミュレーション

#### 堀田·横山



太陽活動現象 — MHD・プラズマシミュレーションの チャレンジの舞台として

フレア粒子加速

プラズマ運動論

フレアエネルギー熱解放・プラズマ放出現象

Rm>>1、リコネクション、ミクロマクロ結合・乱流

浮上磁場·黒点形成

対流層底(β>10<sup>6</sup>)から表面(β~1)まで、熱対流乱流 表面対流

放射輸送・部分電離・磁場との相互作用

ダイナモ

極端なダイナミックレンジ(100km-1Mm、秒-10年)、乱流