

分裂性磁束管の浮上による 太陽面現象の駆動過程

真柄 哲也

(国立天文台 ひので科学プロジェクト)

第21回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム
2008年12月15日～17日 於 国立天文台

太陽面磁場の振る舞い ~ Hinode observation ~

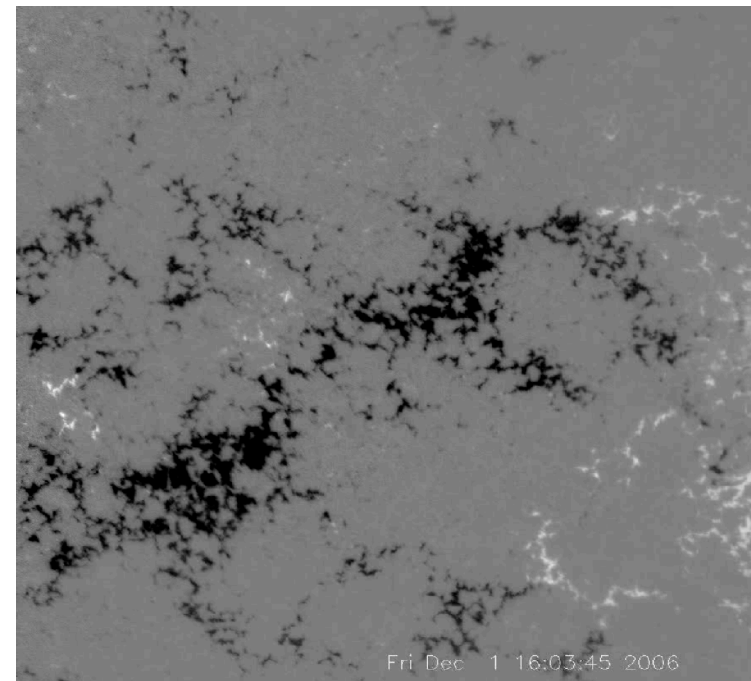
Flux cancellation

異極どうしの対消滅現象



Flux merging

同極どうしの融合現象

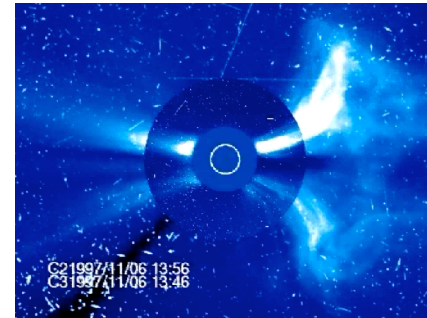
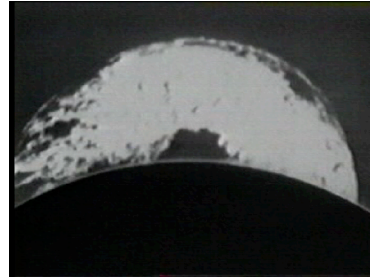
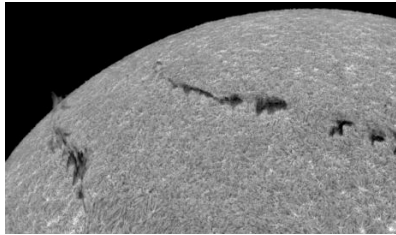


140" ~ 10100 km

太陽面磁場…種々の太陽活動現象に関与

Flux cancellation が関与する現象

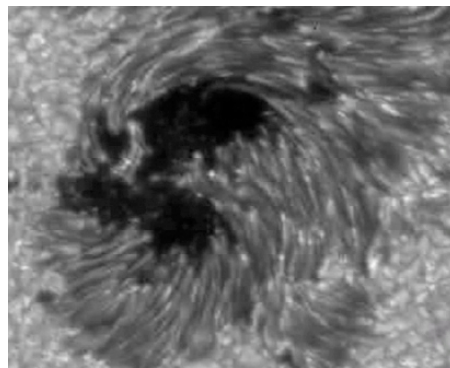
filament formation → activation → eruption (coronal mass ejection)



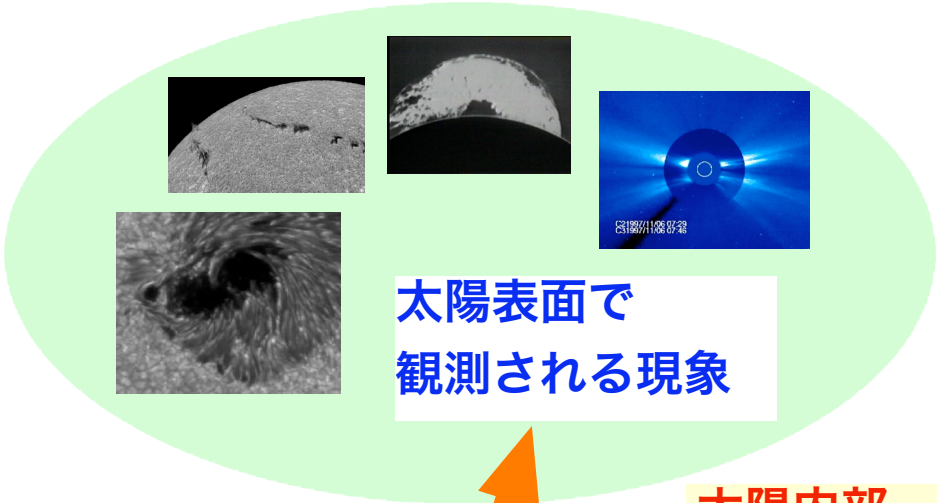
宇宙天気

Flux merging が関与する現象

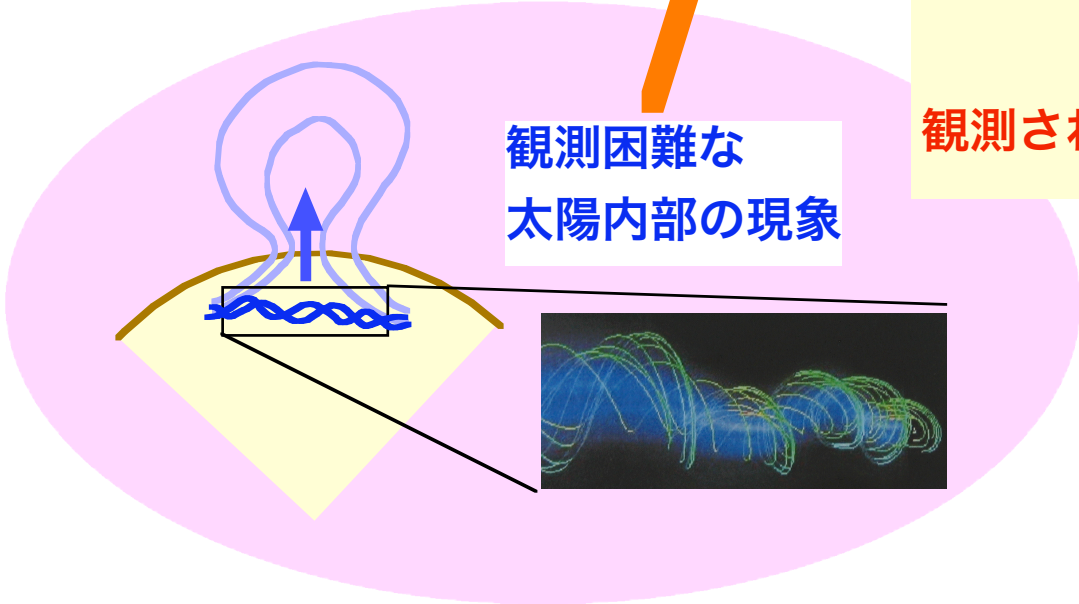
黒点形成



→ 太陽内エネルギー輸送過程
に影響



駆動

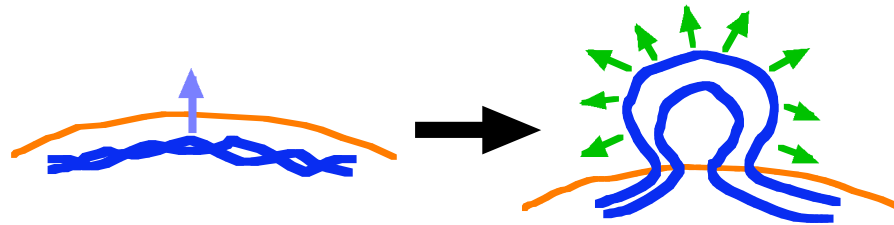


太陽内部・表層大気を一体とした
数値シミュレーション
↓
観測される現象の駆動過程を解明

本講演の内容：

太陽内部・大気一体モデルを用いて浮上磁場の観点から
太陽面活動現象の駆動過程を明らかにする

浮上磁場の物理... 外界のガス圧の急激な低下により激しく膨張



数千km ($\approx 0.1 R_{\odot}$) で7桁に及ぶガス圧の低下

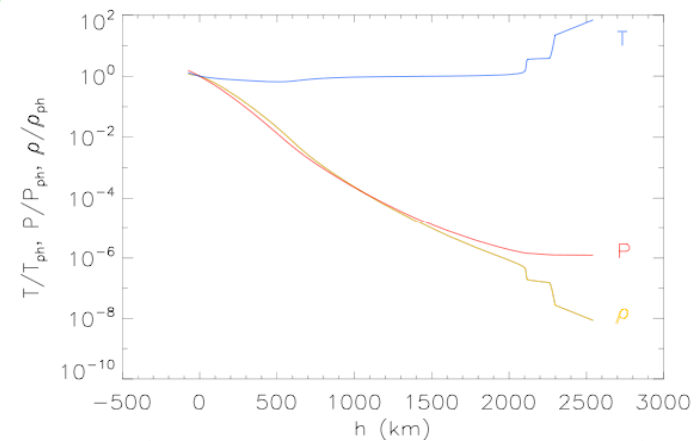
光球下 1000 km... $10 P_{ph}$

光球面... P_{ph}

彩層 (光球上空 840 km) ... $10^{-3} P_{ph}$

コロナ (光球上空 7000 km) ... $10^{-6} P_{ph}$

太陽表面近傍の T, P, ρ 分布

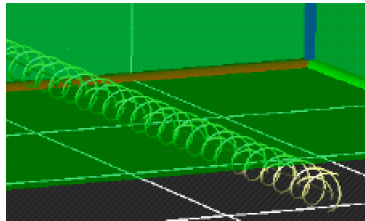


太陽半径の 0.5 %

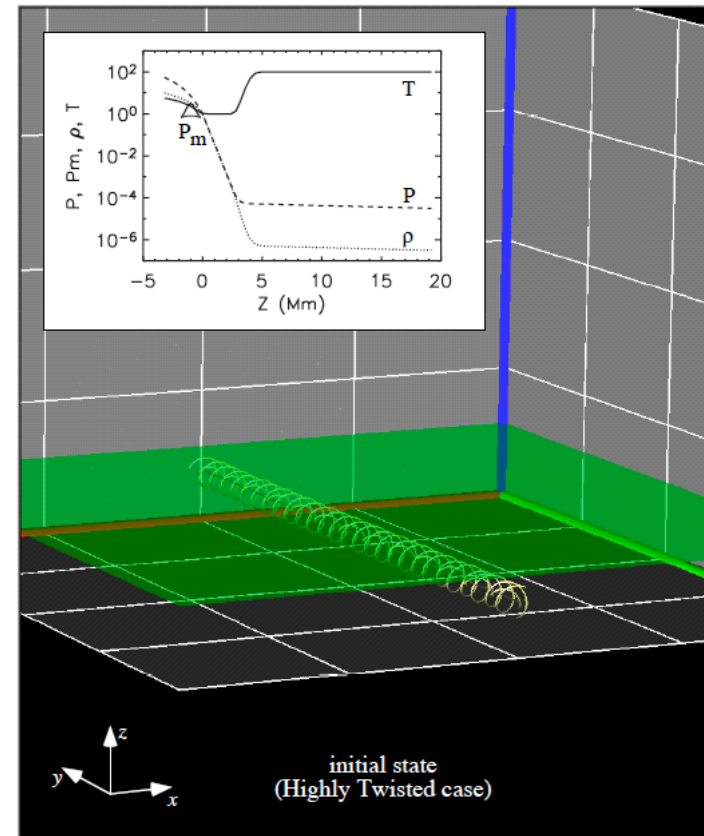
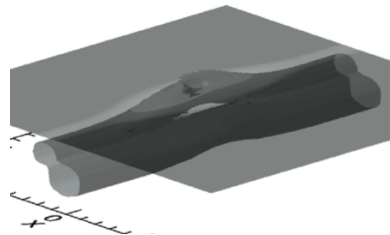
数値モデル

3-d MHD simulation for the emergence of a twisted flux tube

非分裂性磁束管



分裂性磁束管



基礎方程式：

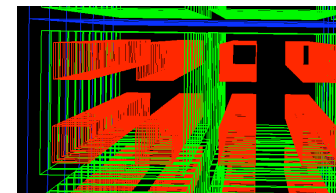
3次元理想MHD方程式（一様重力場）

3次元散逸性MHD方程式（for 分裂性磁束管）

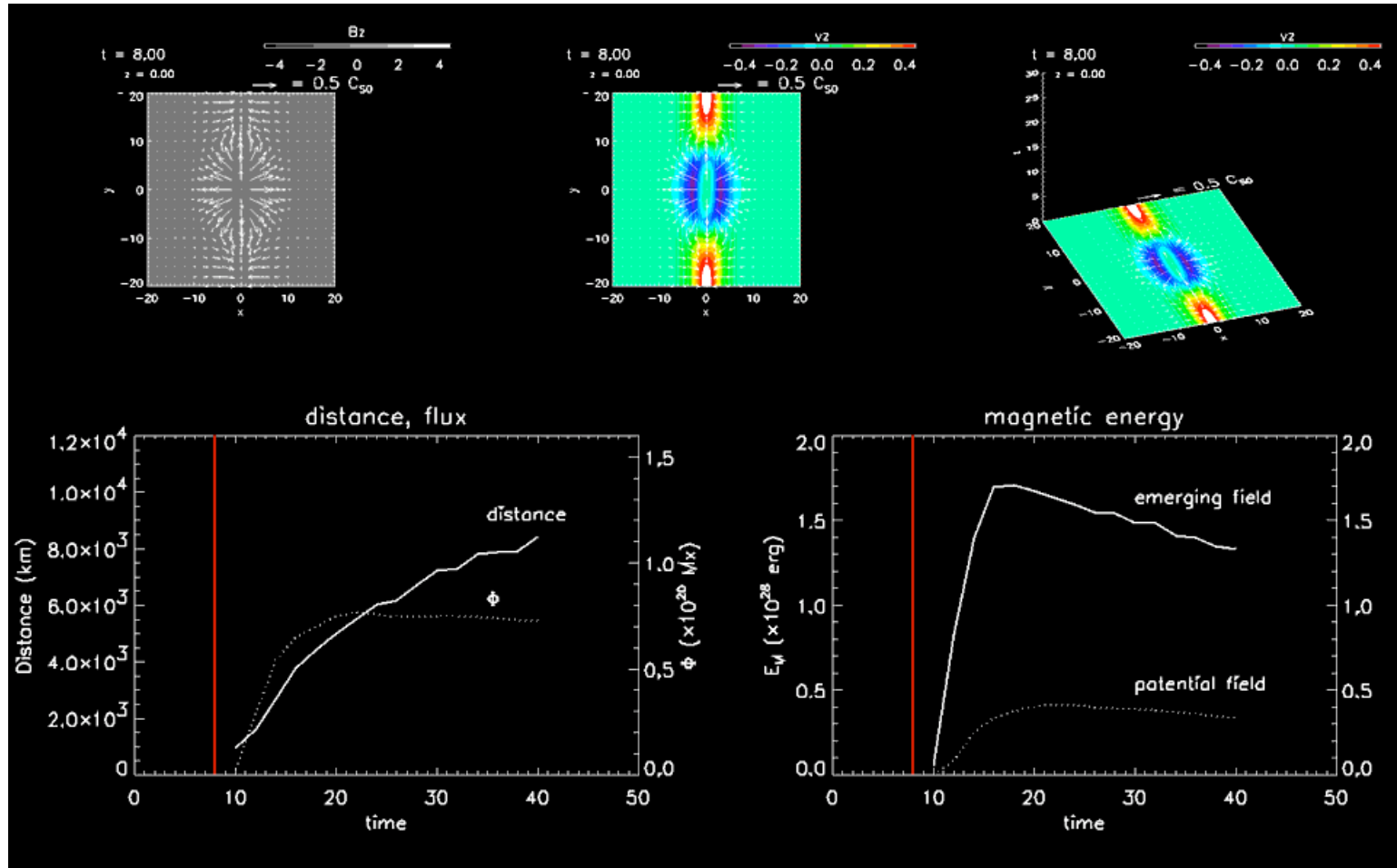
数値コード：

Lax-Wendroff method（人工粘性）

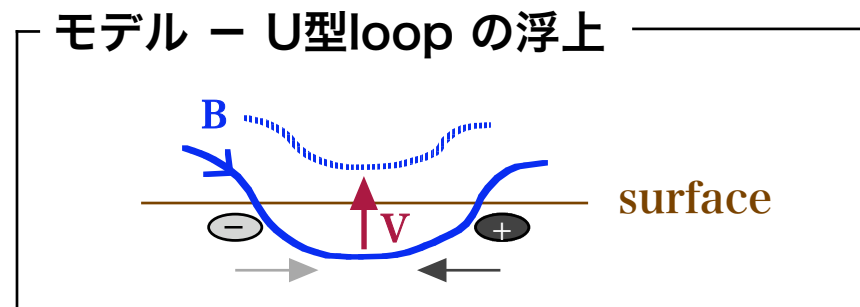
Flux-corrected transport method + Adaptive mesh refinement



浮上磁束管の進化 (非分裂性の場合)

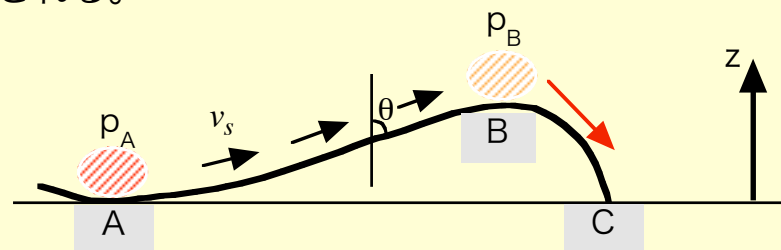


Flux cancellation



U型loop 上に沿った流れは以下の方程式で記述される。

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial s} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta$$



この方程式は、定常性 ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) と断熱過程 ($p \propto \rho^\gamma$) の下で積分でき、

$$\frac{1}{2} v_B^2 - \frac{1}{2} v_A^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_A}{\rho_A} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_B}{\rho_B} - g z_B$$

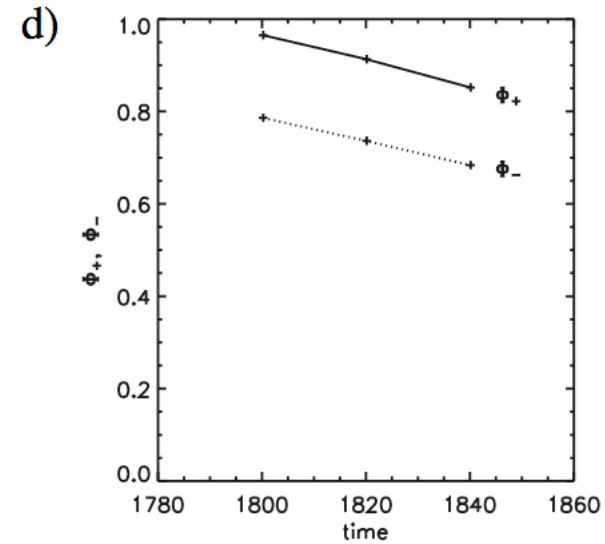
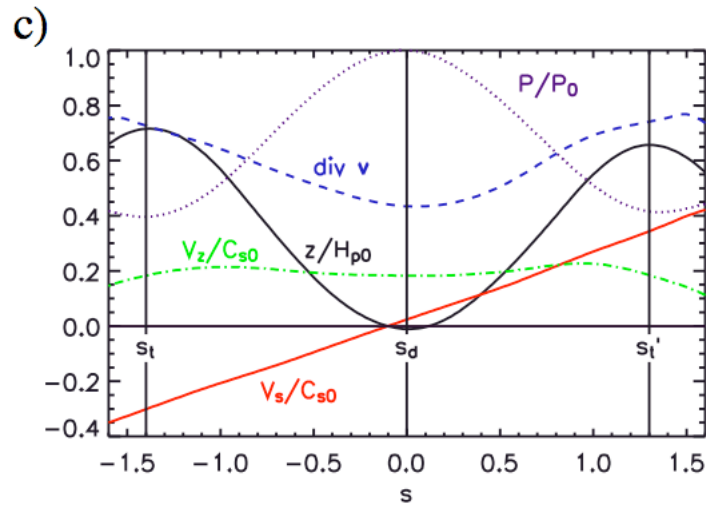
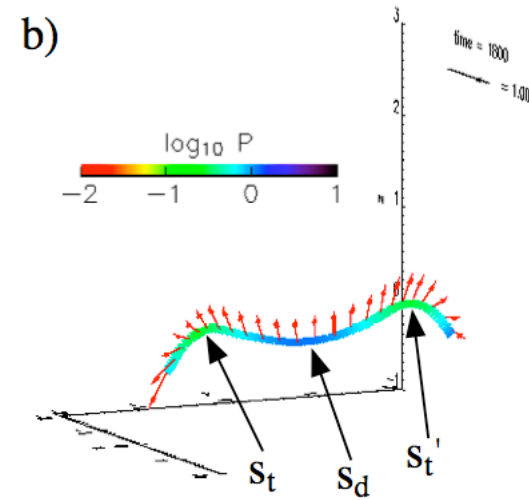
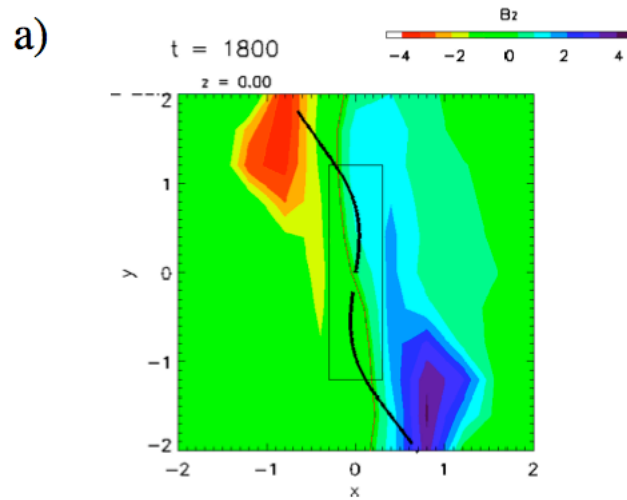
A を出発したガスが B まで到達するための条件は、

$$z_B - z_A < h_c \equiv \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_A}{\rho_A g} \sim H_{PA}$$

このとき、A の密度は減少し浮力が生じて U型loop の浮上が実現する。

U型loopの浮上とそれに伴う flux cancellation の MHDシミュレーション

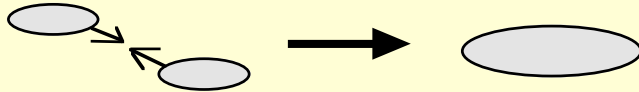
Magara (2005)



Flux merging

モデル.... 分裂性磁束管の浮上

分裂部分が浮上すると、見かけ上 flux の融合が観測される。



Key observational result

融合磁場領域は回転流を伴う
(0.1 km/s 以下)

(Brown et al. 2003)

Zwaan (1985)

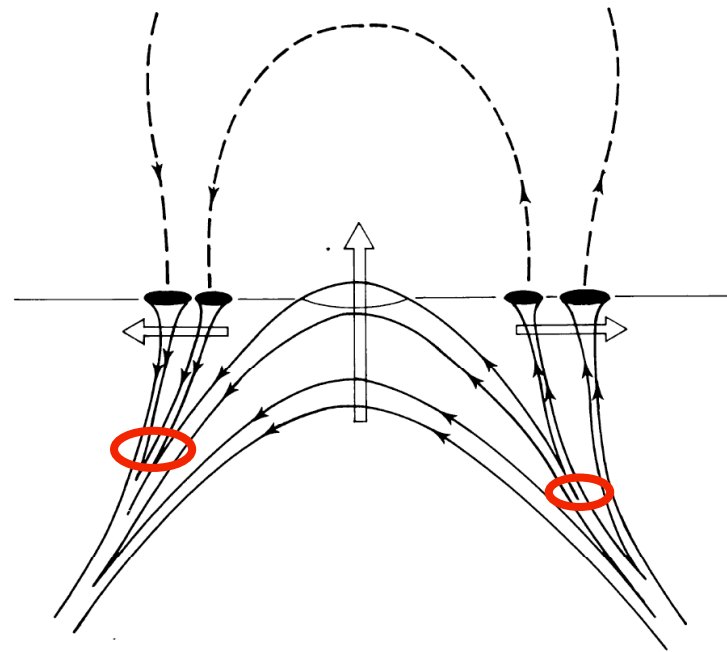
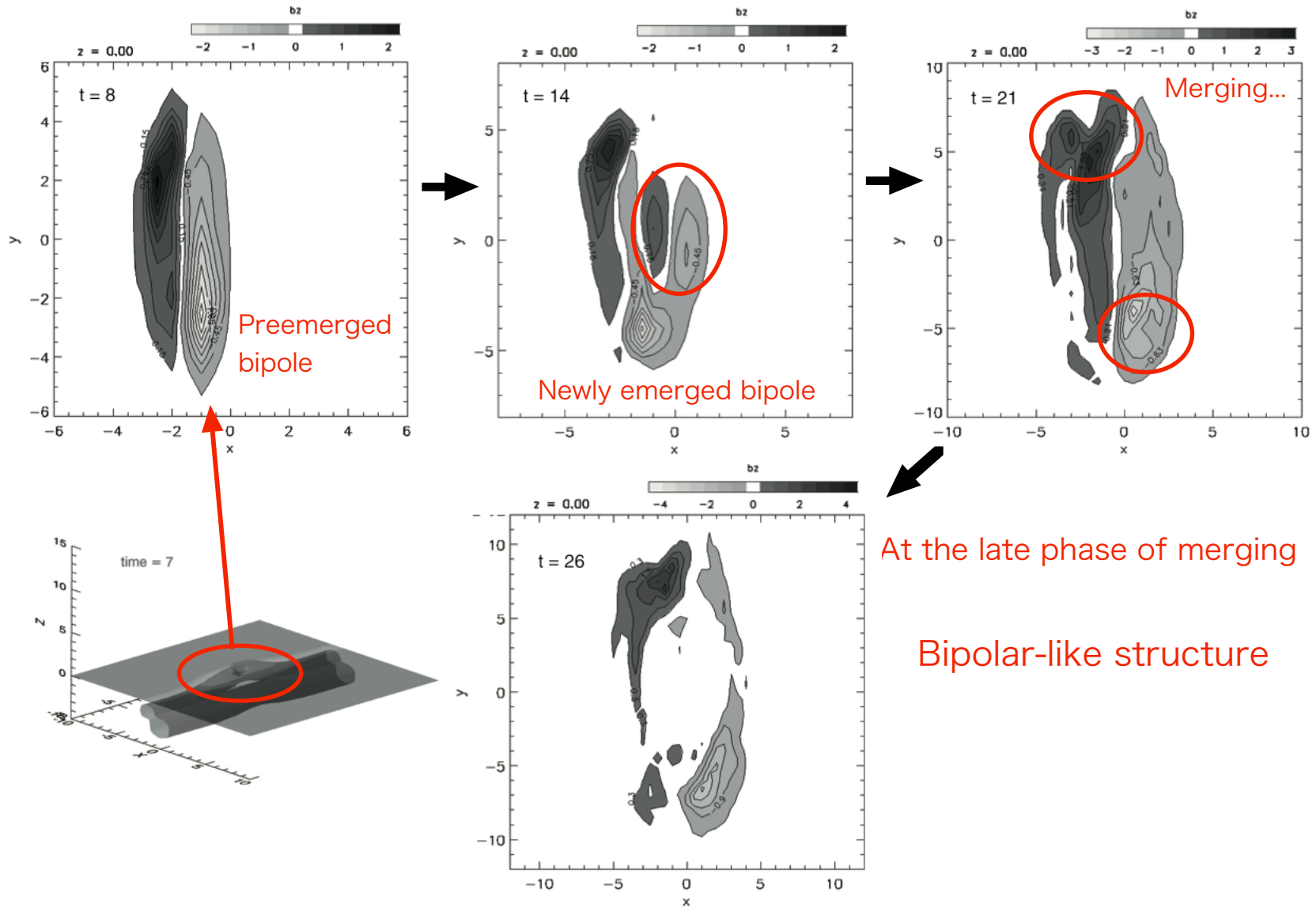
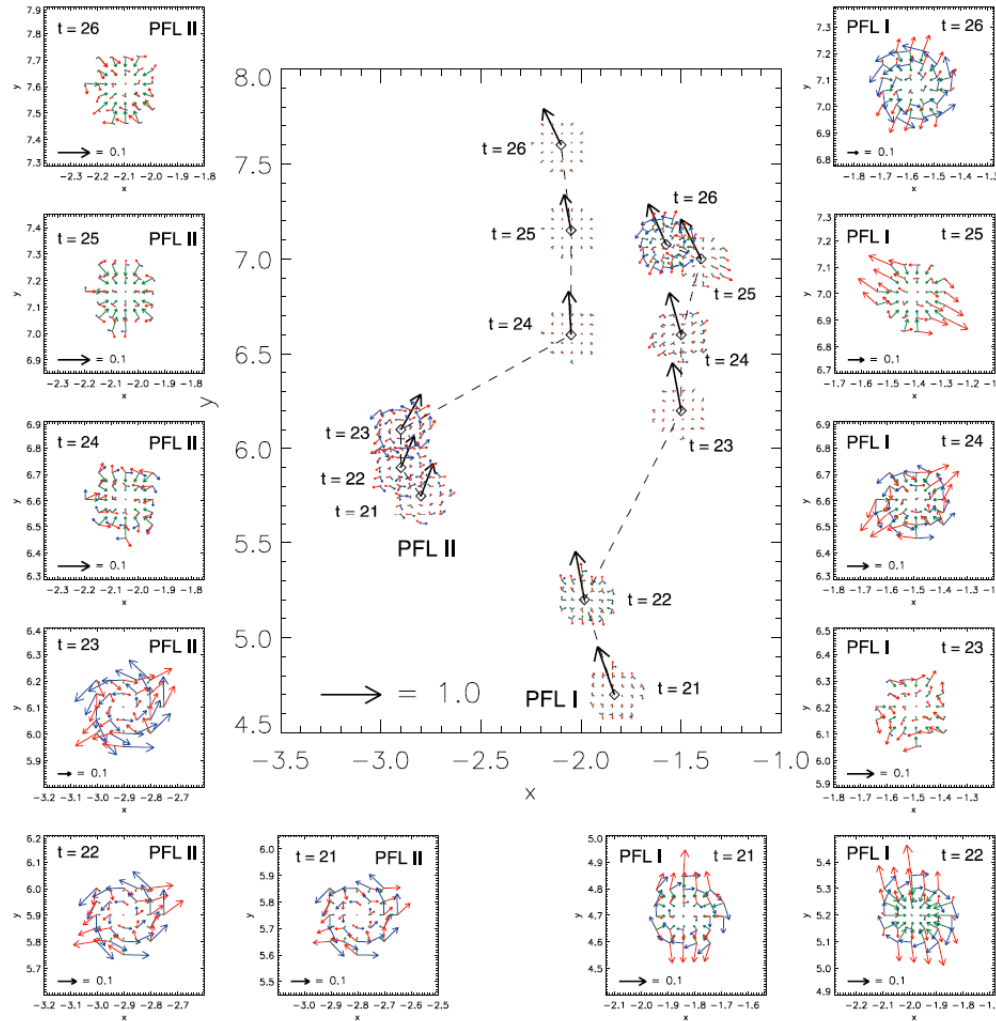


Fig. 1. A model for the emergence of magnetic flux, separation of polarities and coalescence of sunspots. Broad arrows indicate local displacements of flux tubes. (Real emerging flux regions consist of many more separate flux loops.)

分裂性磁束管の浮上... 光球面で merging が進行



成分分解により明らかにされた merging に伴う回転流



Magara (2008)

Decomposed flow velocity

(Stokes' theorem; ref. Shu 1992)

rotation,
expansion/contraction,
distortion

$$\mathbf{v}_{rel} \sim \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R} + \mathbf{K} \mathbf{R} + \nabla_R F$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R} \dots \text{rotation} \left(\boldsymbol{\Omega} = \frac{\nabla \times \mathbf{v}}{2} \right)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{R} \dots \text{expansion/contraction} \left(\mathbf{K} = \frac{\nabla \cdot \mathbf{v}}{3} \right)$$

$$\nabla_R F \dots \text{distortion} \left(F = \frac{D_{ik} R_i R_k}{4}, D_{ik} \equiv \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \delta_{ik} \right)$$

回転流 (0.5 km/s 以下) を伴いながら融合する磁場領域を

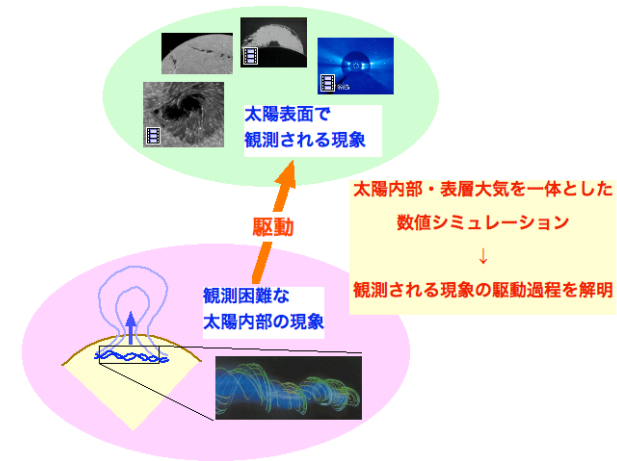
再現



観測事実を支持

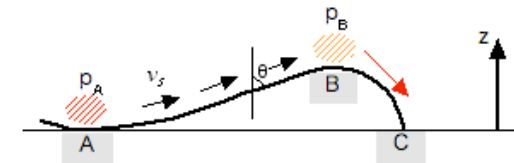
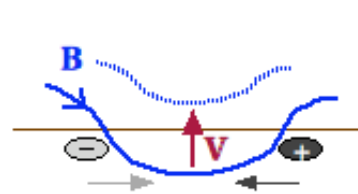
Summary

太陽内部・外層大気を一体とした数値シミュレーションにより、観測される太陽面現象の駆動プロセスに関して太陽内部の物理過程に基づいた説明を与えた。



Flux cancellation...

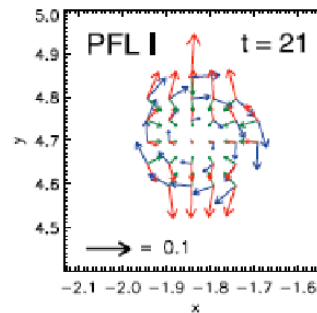
- emergence of U-loops
- siphon mechanism
- 臨界高度差 $\sim H_p$



$$z_B - z_A < h_c \equiv \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_A}{\rho_A g} \sim H_p$$

Flux merging...

- 分裂性磁束管の浮上過程
- merging に伴う回転流



$$\mathbf{v}_{rel} \sim \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R} + K \mathbf{R} + \nabla_R F$$

$$\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R} \dots \text{rotation} \left(\boldsymbol{\Omega} = \frac{\nabla \times \mathbf{v}}{2} \right)$$

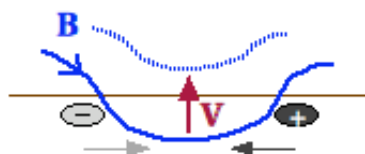
$$K \mathbf{R} \dots \text{expansion/contraction} \left(K = \frac{\nabla \cdot \mathbf{v}}{3} \right)$$

$$\nabla_R F \dots \text{distortion} \left(F = \frac{D_{ik} R_i R_k}{4}, D_{ik} = \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \delta_{ik} \right)$$

Future work

太陽内部の現象 → 観測される活動性に具体的にどう関与？

U型loopの浮上



太陽表面活動現象（宇宙天気）

黒点下の分裂性磁束管構造

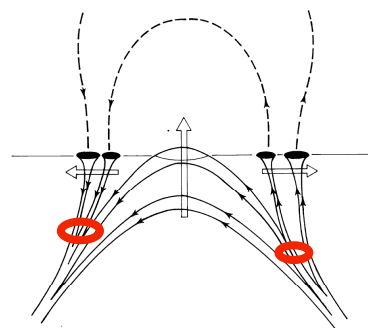
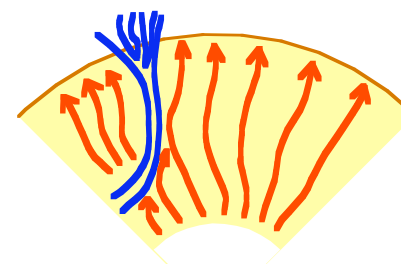


Fig. 1. A model for the emergence of magnetic flux, separation of polarities and coalescence of sunspots. Broad arrows indicate local displacements of flux tubes. (Real emerging flux regions consist of many more separate flux loops.)



太陽内部のエネルギー輸送過程
（宇宙気候）