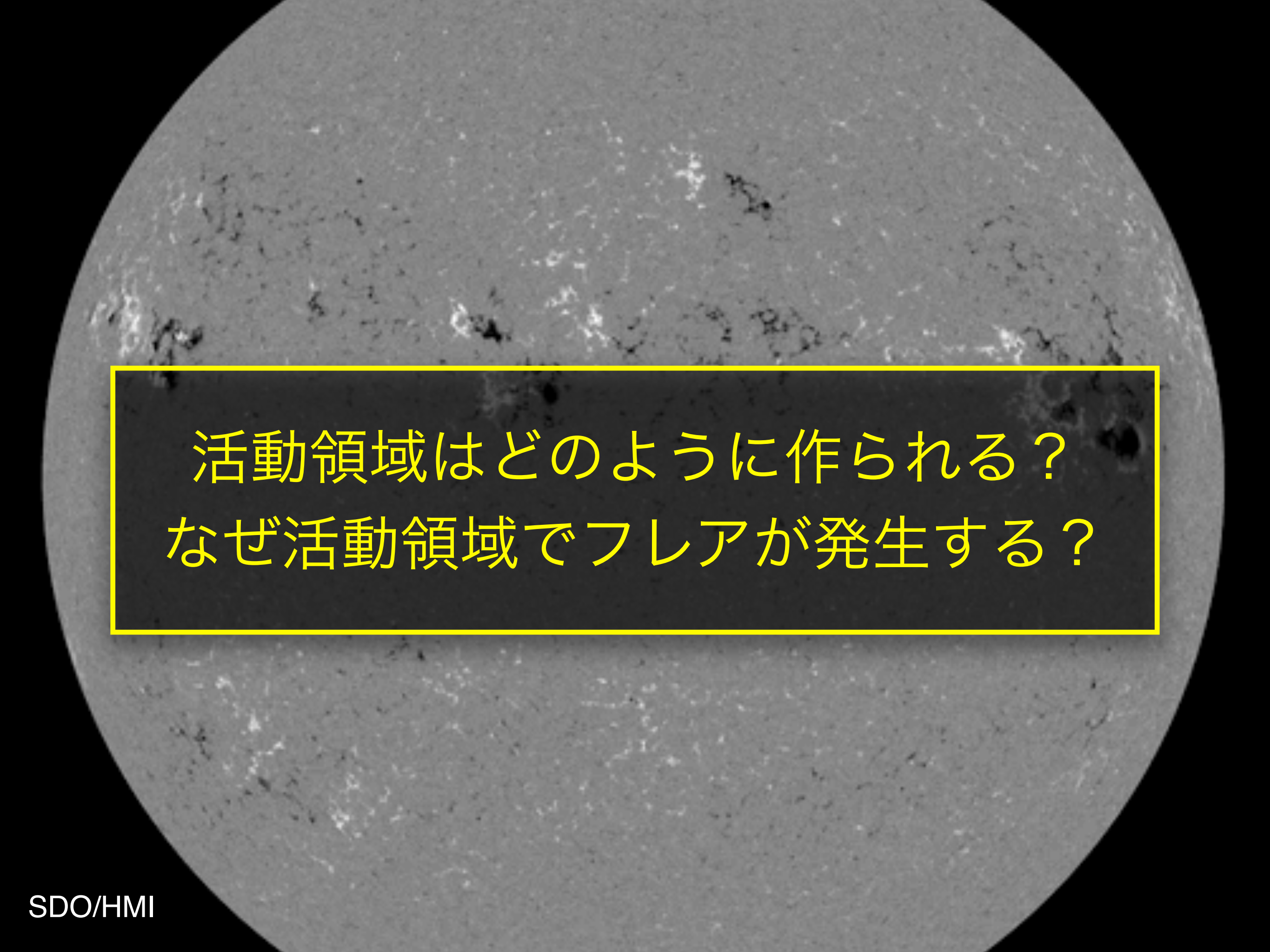


シミュレーションと観測から探る
太陽活動領域・フレア現象

鳥海 森
(国立天文台)

A grayscale image of the Sun's surface, showing various solar features such as sunspots and solar flares. The image is circular and has a dark background. A yellow rectangular box is overlaid on the center of the image, containing two lines of Japanese text in yellow. The text asks about the formation of active regions and why flares occur there.

活動領域はどのように作られる？
なぜ活動領域でフレアが発生する？

0. 自己紹介

- ・ 鳥海 森 (とりうみ しん)

- ・ 経歴

- ・ 2005- 東京大学 理学部 地球惑星物理学科
- ・ 2009- 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 (横山研)
- ・ [2014年3月学位取得]
- ・ 2014- 国立天文台 太陽天体プラズマ研究部

- ・ 専門

- ・ 太陽物理学
- ・ 特に活動領域形成理論・フレア発生理論

- ・ 所属学会

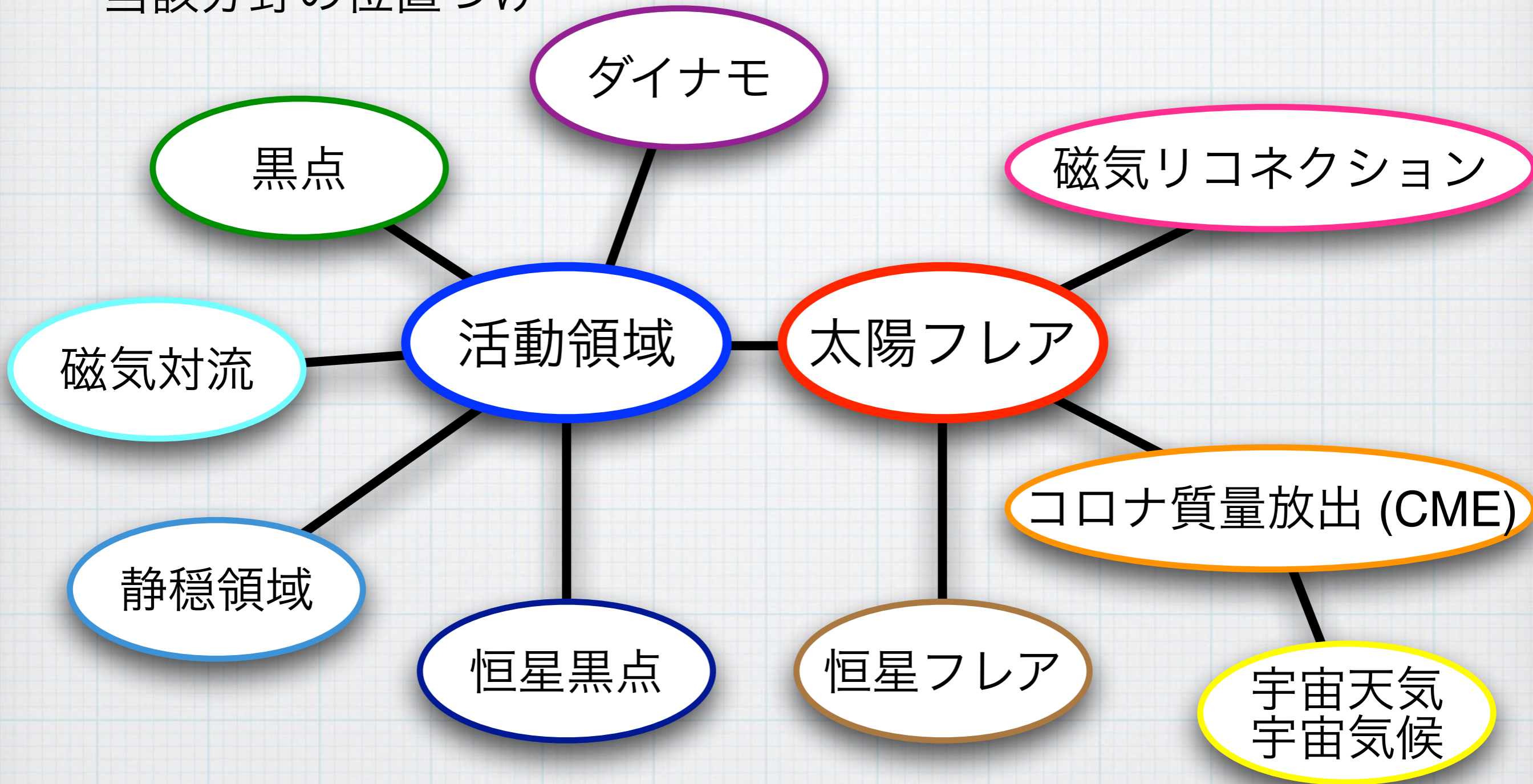
- ・ 日本天文学会、日本地球惑星科学連合

- ・ 趣味・特技

- ・ 合気道・剣術

1. イントロダクション

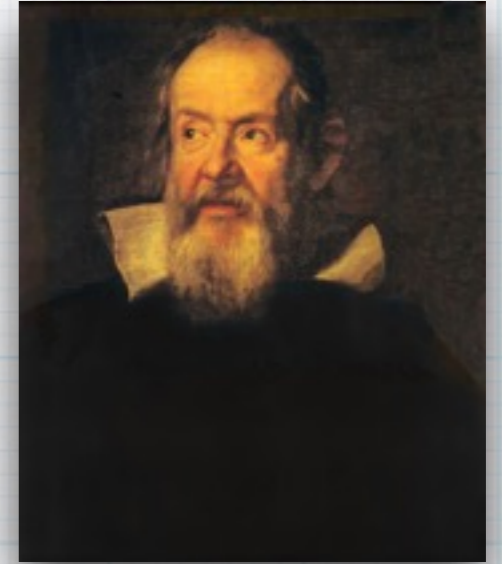
- ・ 当該分野の位置づけ



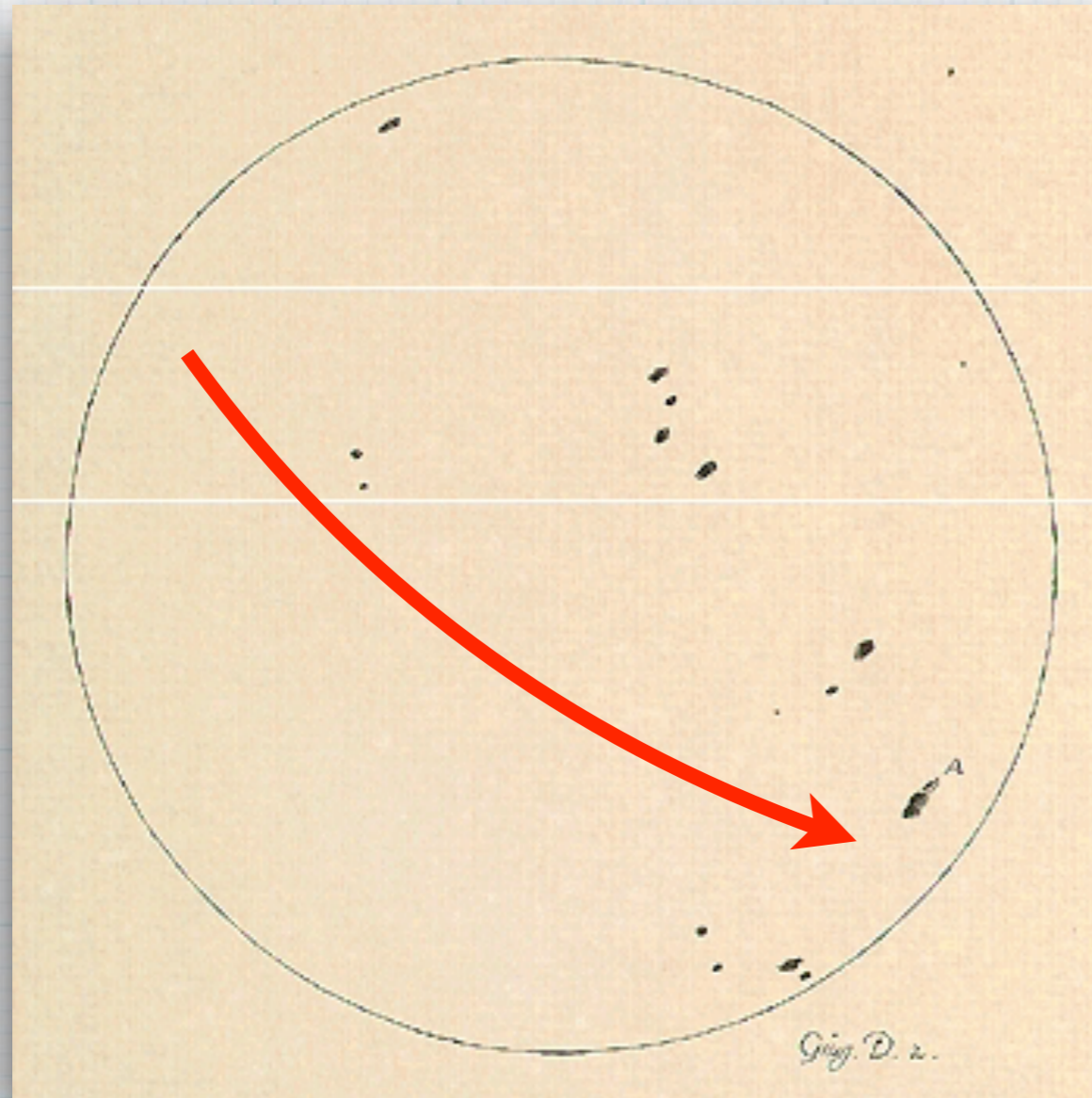
- ・ 各過程は独立ではなく、互いに密接に関連している
- ・ 本来は広い枠組みで理解するべき

1. イントロダクション

- 太陽物理学の歴史
 - 17世紀初頭：科学的研究の幕開け
 - 1609年ガリレオが望遠鏡で天体観測を開始



ガリレオ・ガリレイ
(1564-1642)

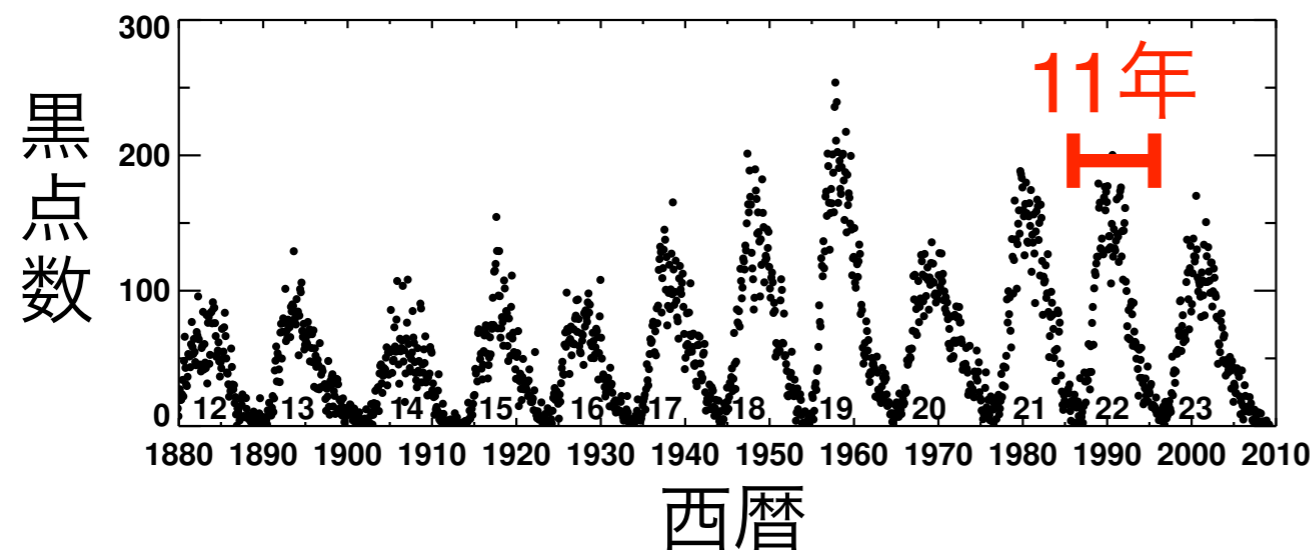
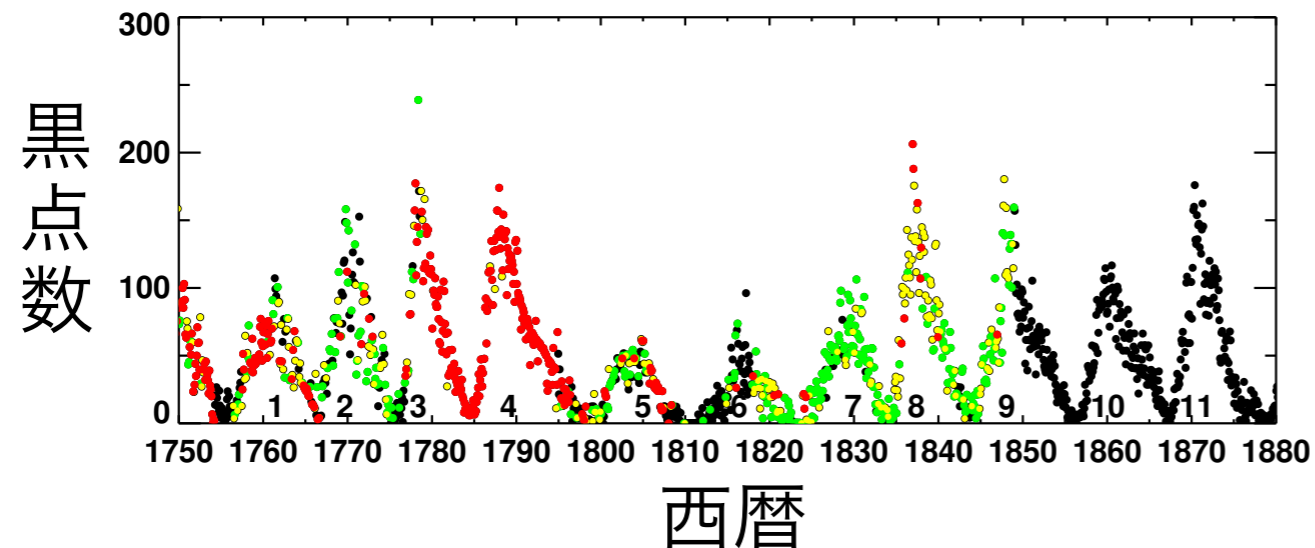


1612年6月-7月の黒点スケッチ
(Rice Univ./Galileo Project)

- 太陽には「黒点」が存在する
- 太陽表面の“暗い”部分
- 黒点は太陽とともに動く
→ 太陽は球形であり、自転する
- アリストテレス的価値観からの脱却・地動説への転換
- この後も黒点観測は続けられた

1. イントロダクション

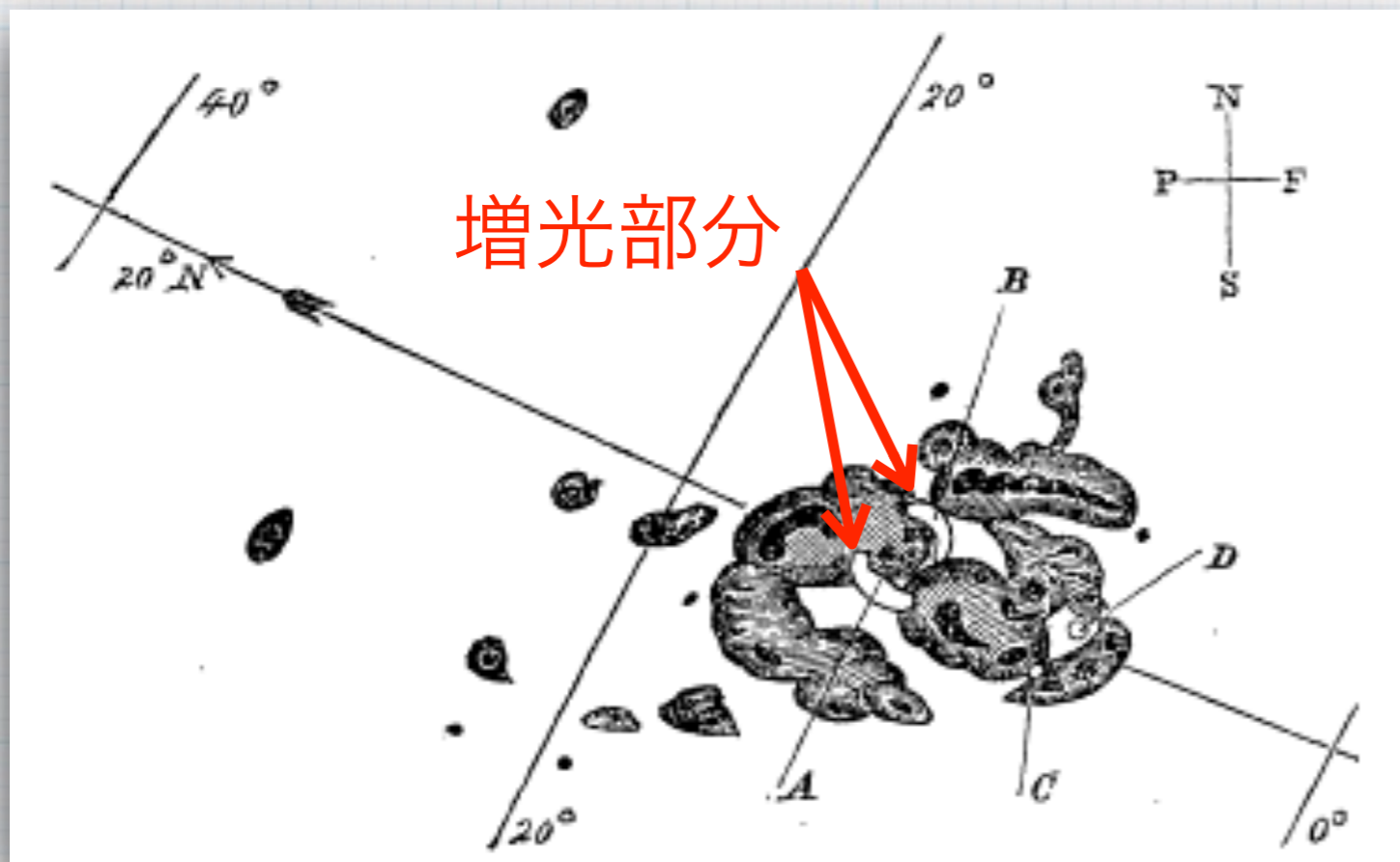
- 太陽物理学の歴史
 - 17世紀初頭：科学的研究の幕開け
 - 1843年：11年周期の発見
 - シュワーベが発見。ウォルフがガリレオ観測まで遡って確認



- 周期の長さや黒点数にはバラつきがある
- 黒点数のほか、太陽フレアやオーロラの発生数も増減
- 現在は第24太陽周期 (2008年から)

1. イントロダクション

- 太陽物理学の歴史
 - 17世紀初頭：科学的研究の幕開け
 - 1843年：11年周期の発見
 - 1859年：太陽フレアの発見
 - キャリントンらがフレアを観測

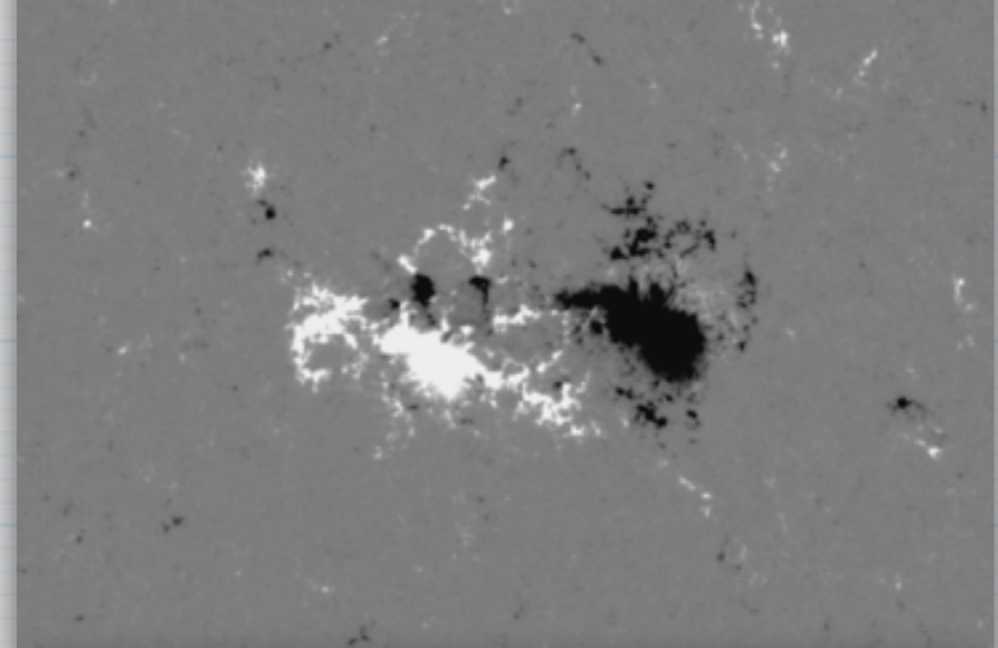
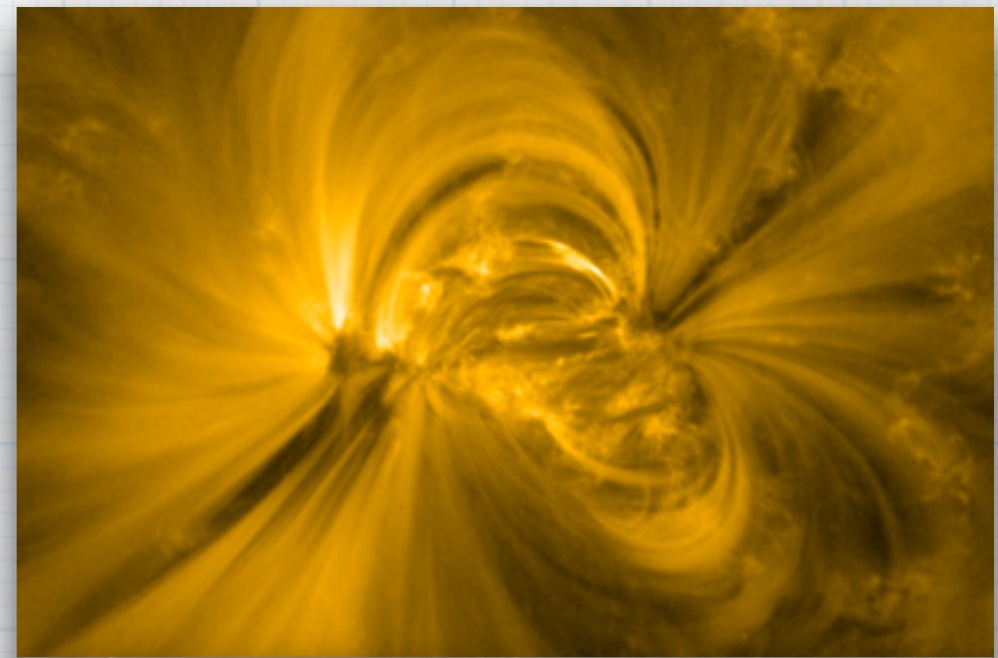


- **フレア** = 電磁波の突発的増光
- **CME** = コロナ質量放出
- キャリントンは黒点の近くが突然明るく輝くのを偶然に観測した
- 現在までで「最大の」フレア
- $\sim X45$, $\sim 5 \times 10^{32}$ erg (Cliver & Dietrich 2013)

1859年9月1日の太陽フレア (Carrington 1859)

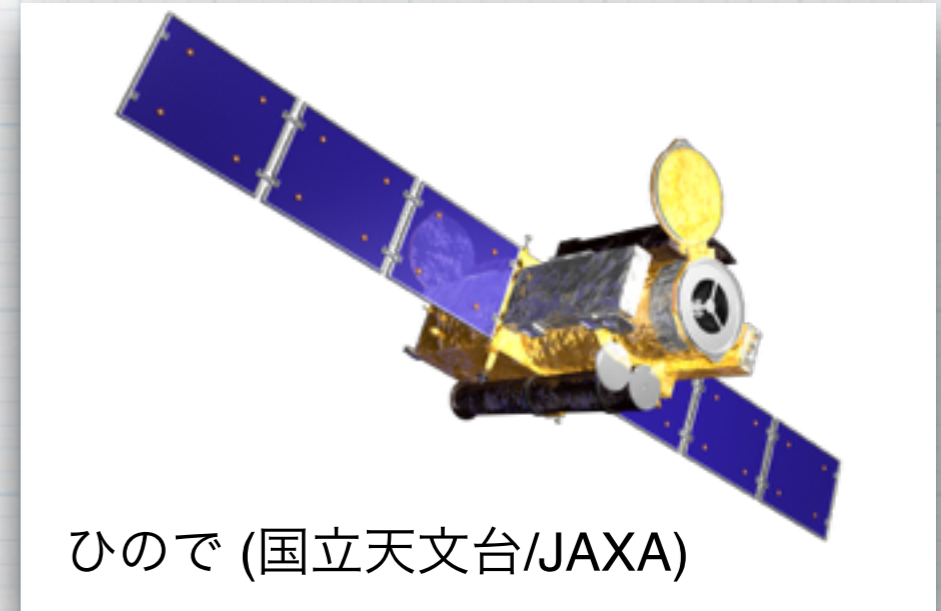
1. イントロダクション

- 太陽物理学の歴史
 - 17世紀初頭：科学的研究の幕開け
 - 1843年：11年周期の発見
 - 1859年：太陽フレアの発見
 - 1908年：黒点磁場の観測
 - ヘールがゼーマン効果を利用し観測
 - 磁場強度：数1000 ガウス
 - 周囲のガス圧と圧力平衡
- 磁場強度は恒星表面のガス圧で決まる



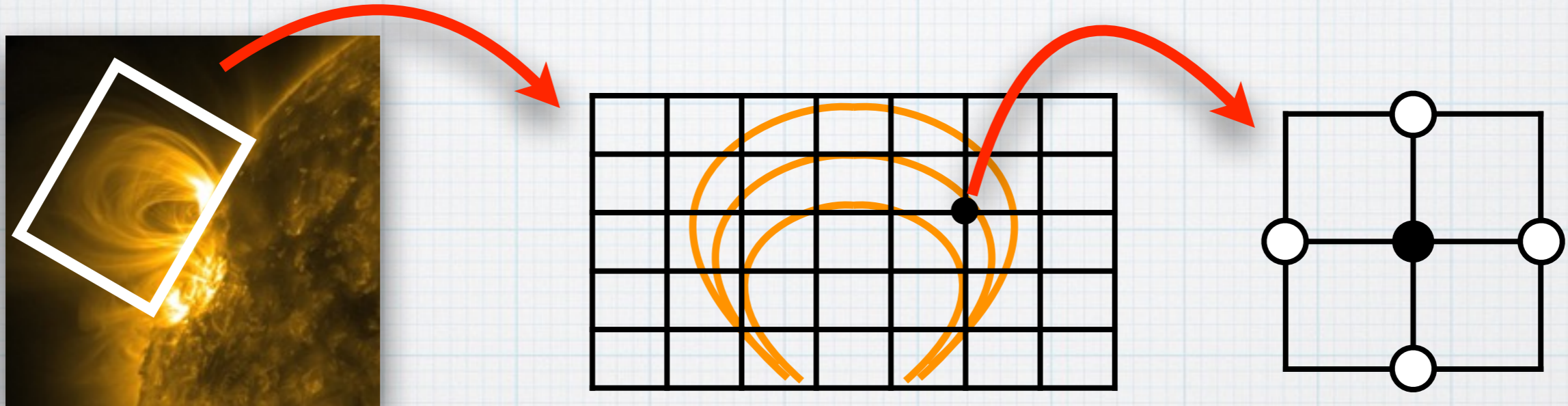
1. イントロダクション

- 太陽物理学における2つの手法
 - 観測データ解析
 - 宇宙観測の時代：大気の影響を受けない。24時間観測も可能
 - ロケット
 - 宇宙ステーション
 - 人工衛星
 - 現在稼働中の太陽観測衛星
 - ひので (国立天文台/JAXA)
 - 高空間・時間分解能観測
 - SDO (米国 NASA)
 - 全面恒常観測
 - ほか、全部で約10機が稼働中



1. イントロダクション

- 太陽物理学における2つの手法
 - 数値シミュレーション
 - 実験不可能なパラメータ・長時間発展が扱える
 - 空間上の“すべての点”で物理量が測定できる

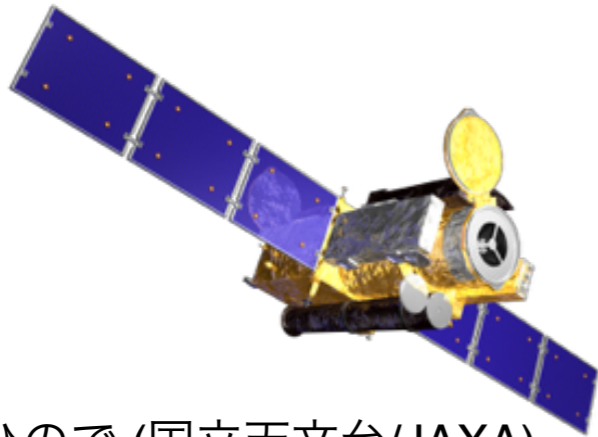


- 空間に格子 (メッシュ/グリッド) を取り、初期条件を各格子点上に与える
- 各格子点上で、周囲の格子点からの流入・流出を考慮し、差分化した時間発展方程式を解くことで、次の時刻における物理量を求める
 - 全格子点について計算 → 時間積分を繰り返す
- 多くの場合、基礎方程式として磁気流体力学 (MHD) 方程式を用いる
 - 流体方程式 + Maxwell方程式

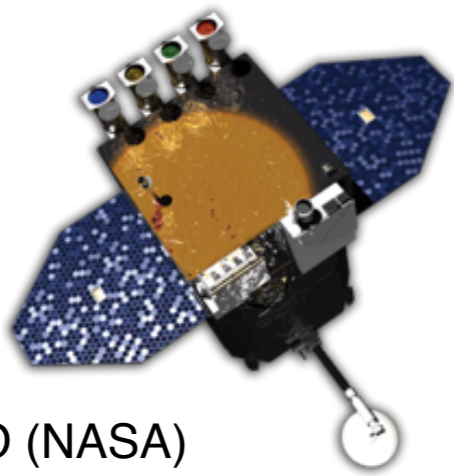
1. イントロダクション

- 太陽物理学における2つの手法
 - 現代の太陽物理学では両者は「車の両輪」

観測データ解析



ひので (国立天文台/JAXA)



SDO (NASA)

- 問題提起
- 観測的検証



- モデル提案
- 理論的予測

数値シミュレーション



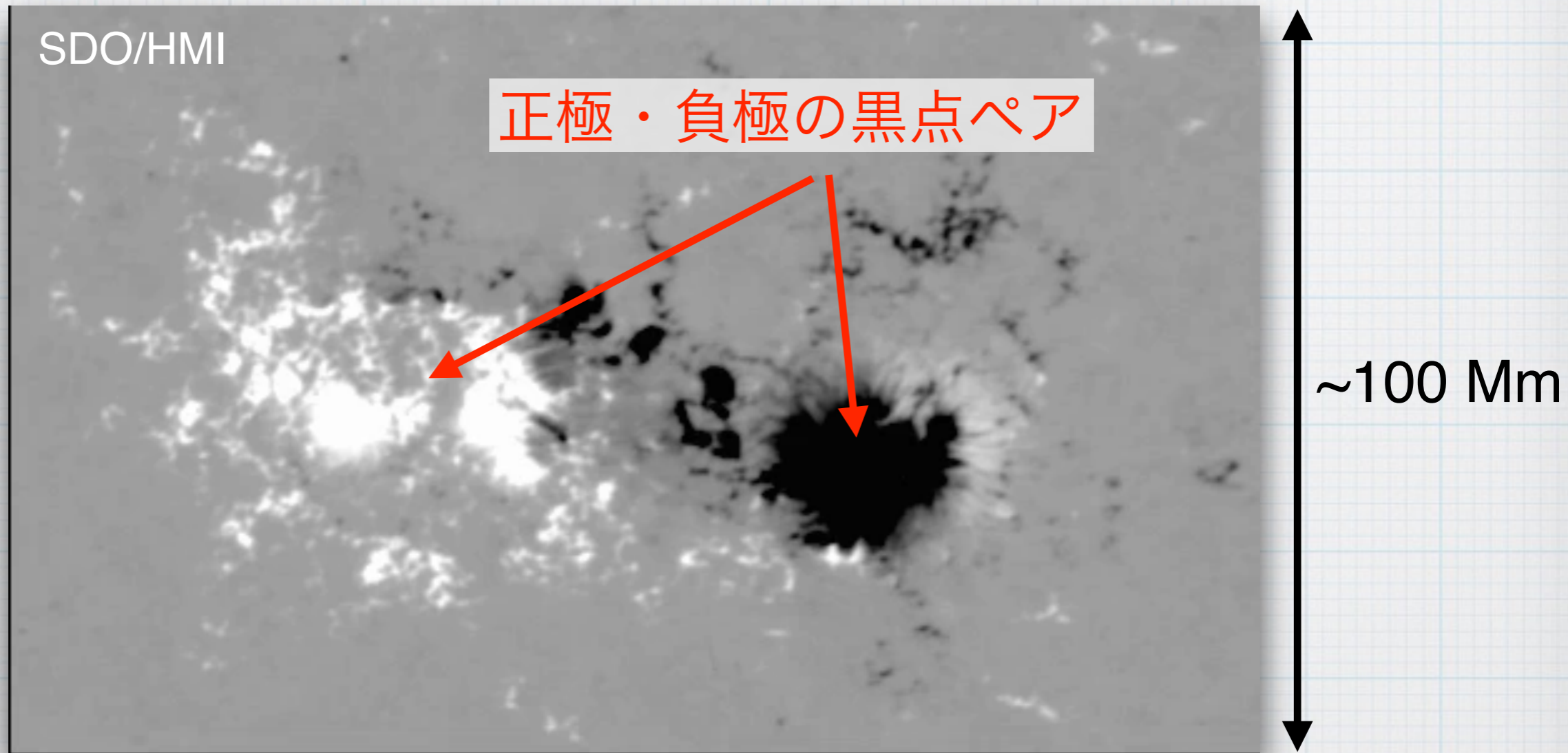
京 (理化学研究所)



アテルイ (国立天文台)

2. 活動領域形成

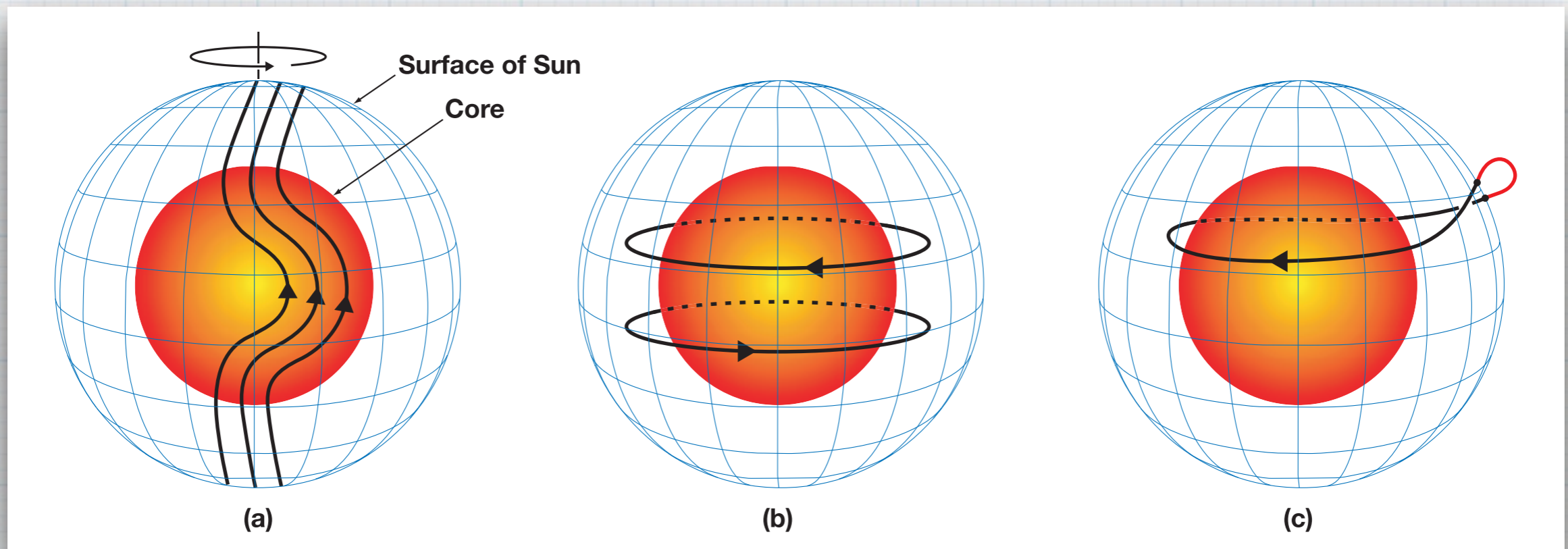
- ・ 浮上磁場



- ・ 光球表面の視線方向磁場 (2010 Nov 27-Dec 01: AR 11130)
- ・ 正負両極の微細な磁気要素が出現。同極どうしで合体し黒点に成長
- ・ 太陽内部からの磁束浮上 → 「**浮上磁場**」と呼ばれる

2. 活動領域形成

- 磁束の起源
 - 太陽ダイナモ：古典的描像

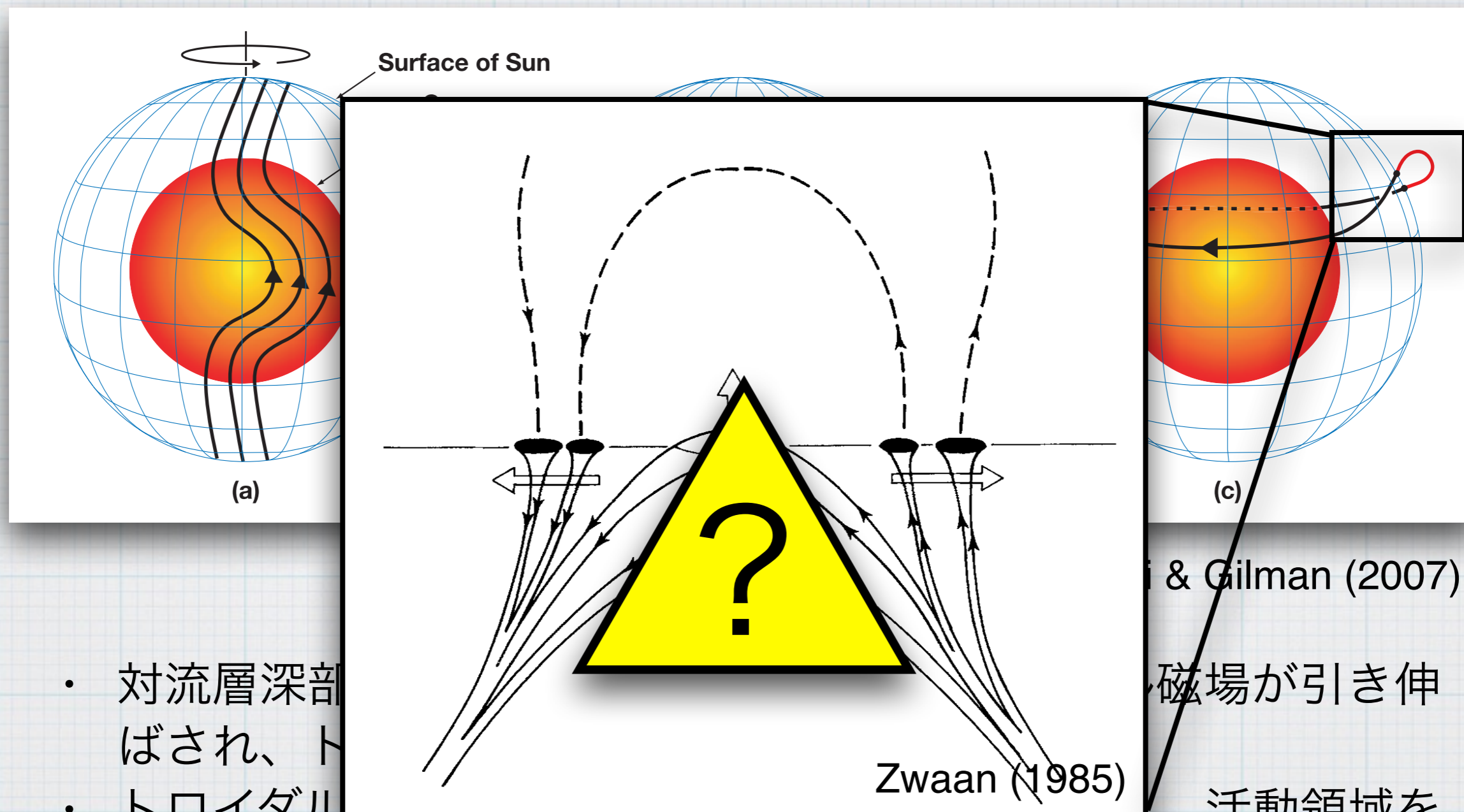


Dikpati & Gilman (2007)

- 対流層深部で太陽の差動回転によってポロイダル磁場が引き伸ばされ、トロイダル磁場が形成される
- トロイダル磁場が磁気浮力を獲得し、表面へ浮上、活動領域を形成する

2. 活動領域形成

- 磁束の起源
 - 太陽ダイナモ：古典的描像



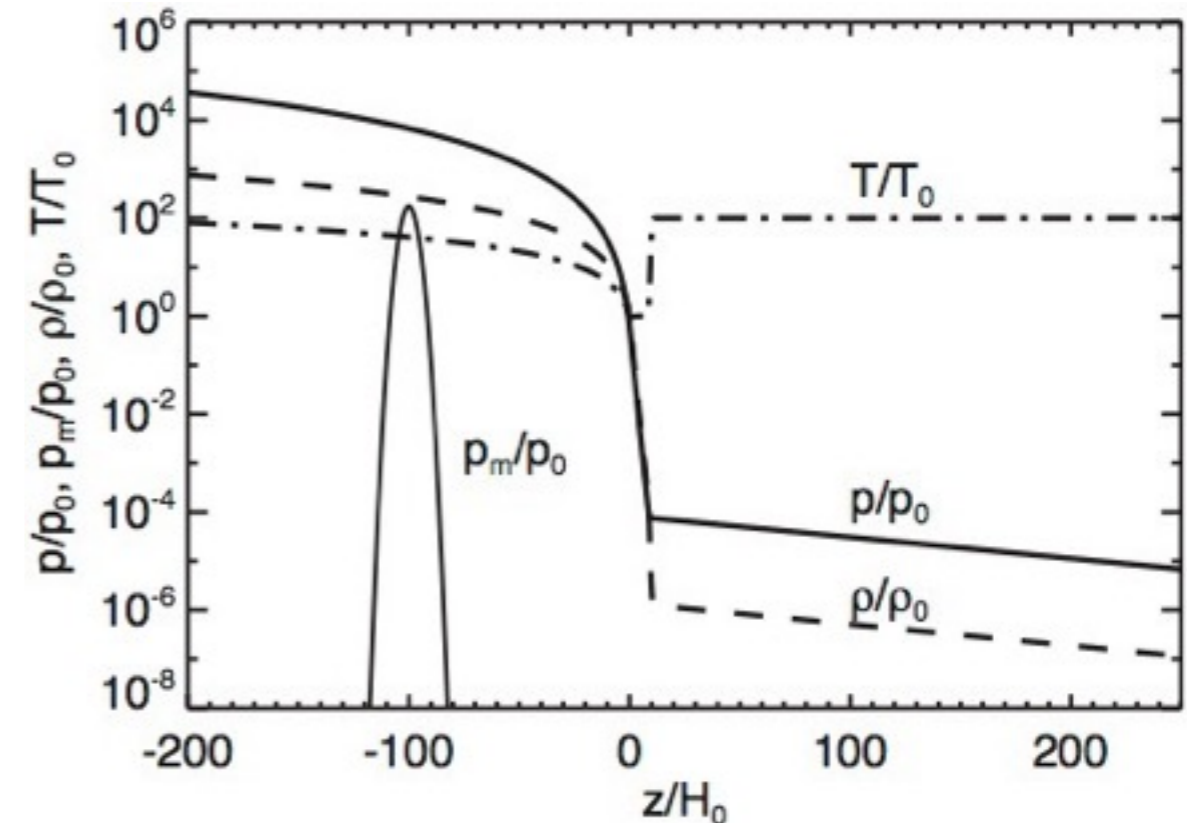
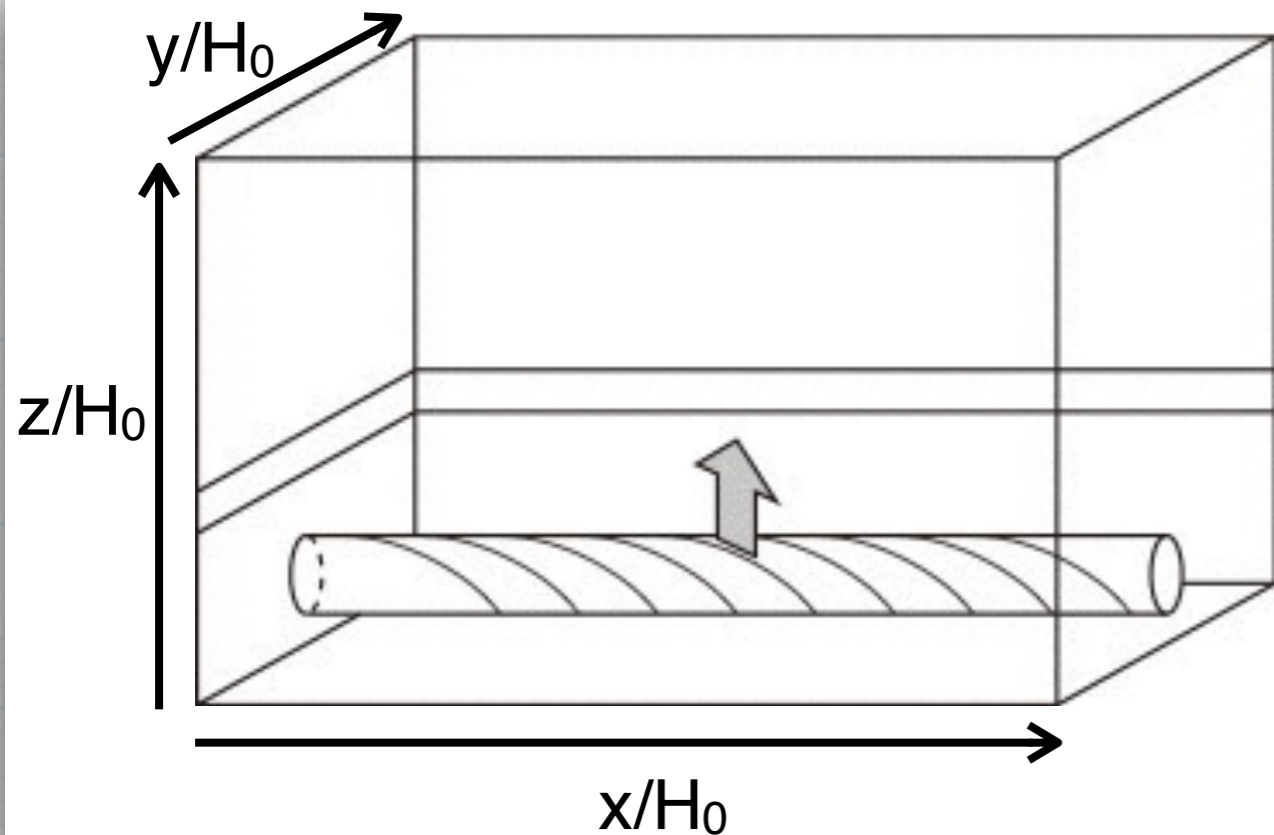
- 対流層深部
ばされ、ト
- トロイダル
形成する

磁場が引き伸
活動領域を

2. 活動領域形成

- ・ 浮上磁場シミュレーション
 - ・ 深さ20 Mmからの磁束浮上

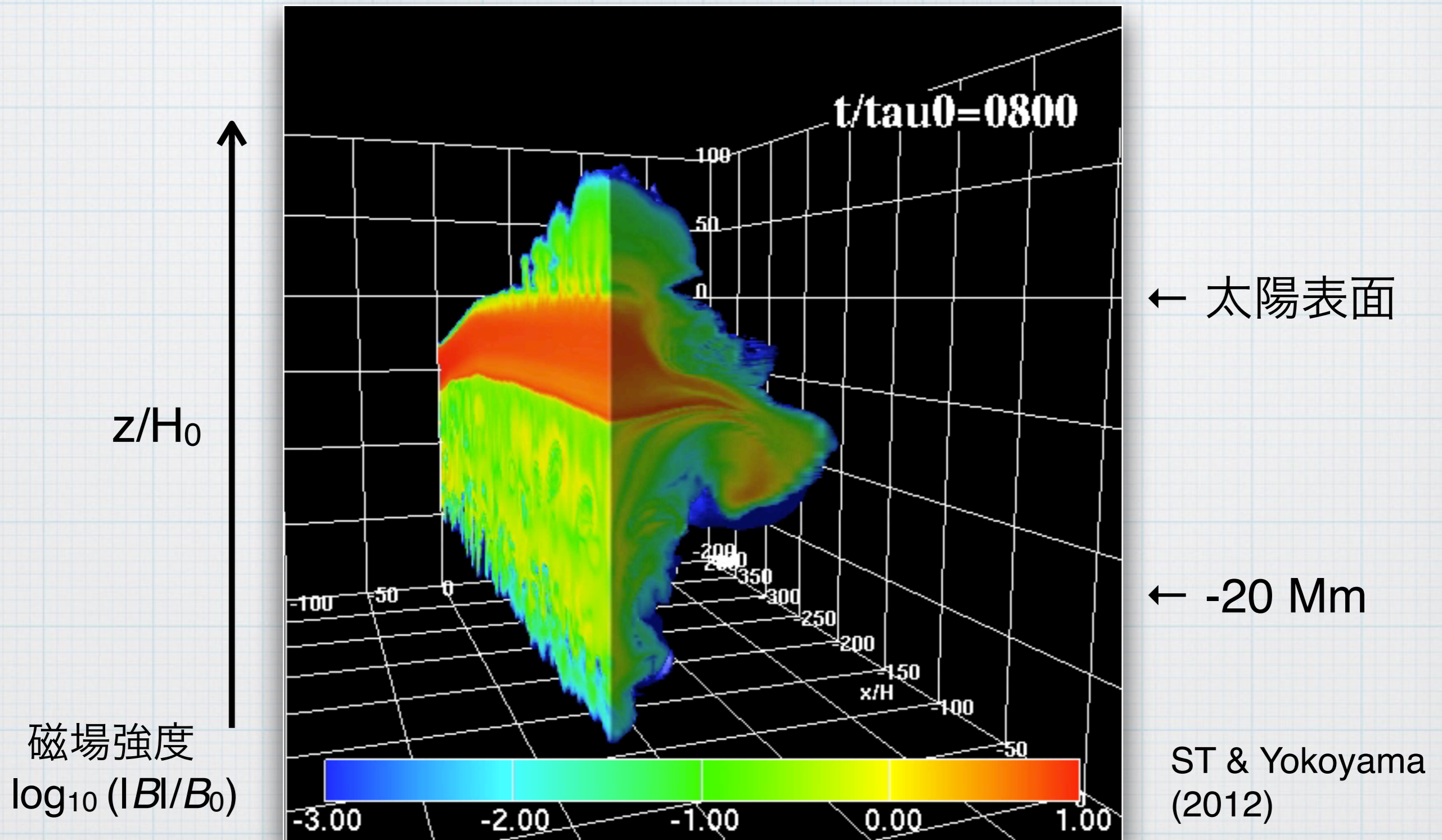
ST & Yokoyama (2012)



- ・ 対流層 + 光球 + コロナの3温度層を背景場として設定
- ・ 対流層に磁束管を力学平衡を保つよう設置。密度擾乱によって磁気浮力不安定をトリガし、自発的に浮上させる
- ・ 無次元化量： $H_0=200$ km、 $C_{s0}=8$ km s $^{-1}$ 、 $\tau_0=25$ s、 $\rho_0=1.4 \times 10^{-7}$ g cm $^{-3}$ 、
 $p_0=9.0 \times 10^4$ dyn cm $^{-2}$ 、 $T_0=4000$ K、 $B_0=300$ G
- ・ 浮上磁場計算のレビューはCheung & Isobe (2014)など参照

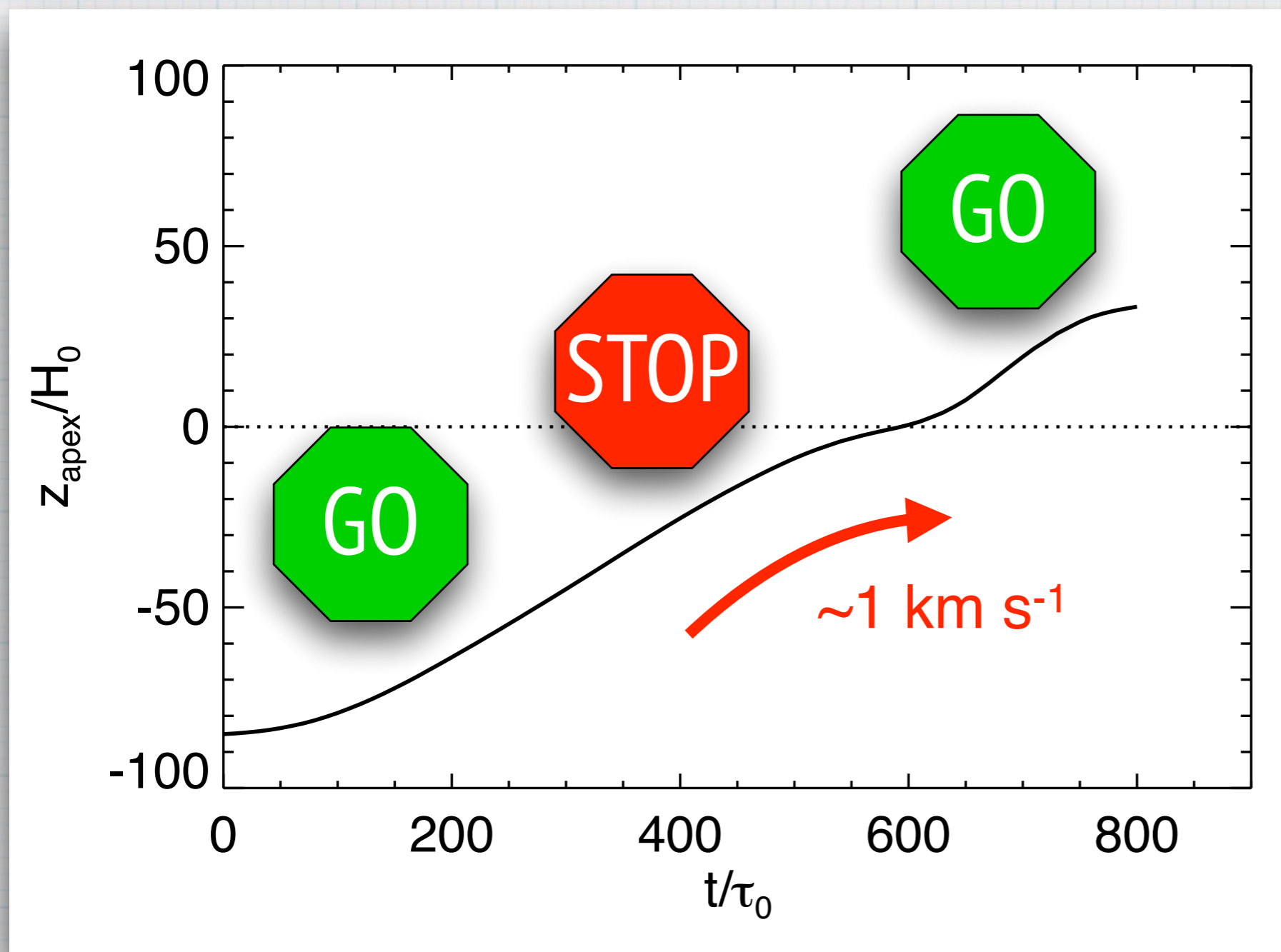
2. 活動領域形成

- ・ 浮上磁場シミュレーション
 - ・ 深さ20 Mmからの磁束浮上



2. 活動領域形成

- ・ 浮上磁場シミュレーション
 - ・ 深さ20 Mmからの磁束浮上



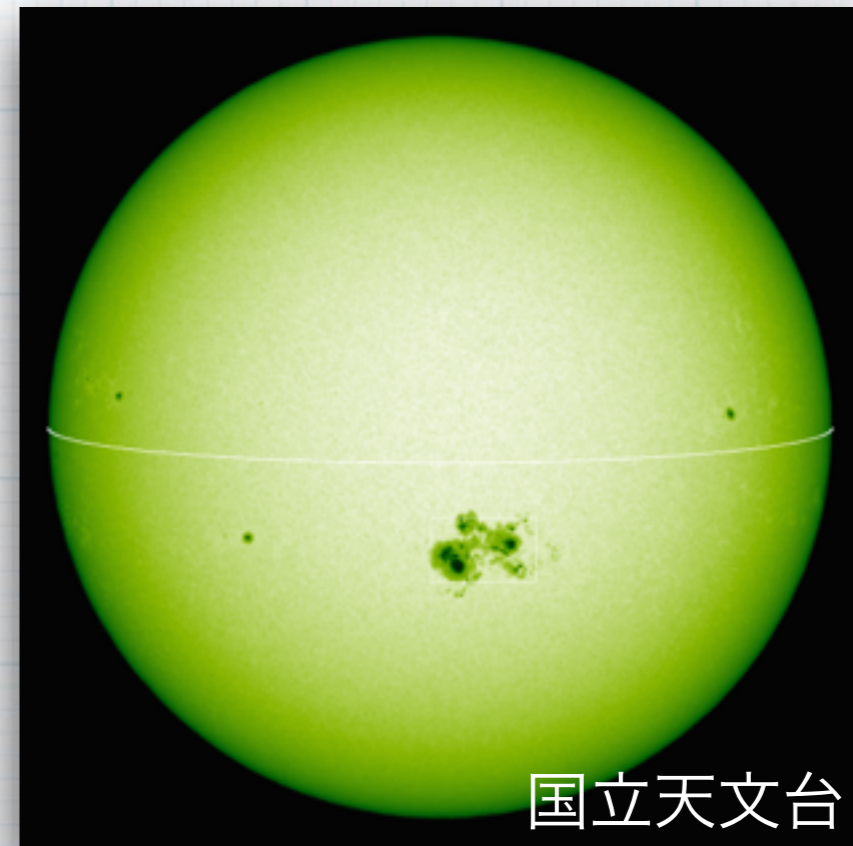
- ・ 浮上速度 $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$
- ・ 磁束管は光球に接近すると一時減速
- ・ 対流安定層である光球の効果

2. 活動領域形成

- 日震学観測

- 日震学

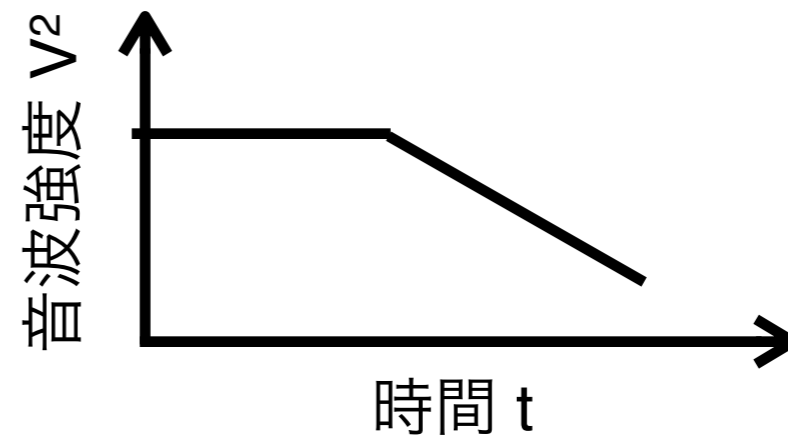
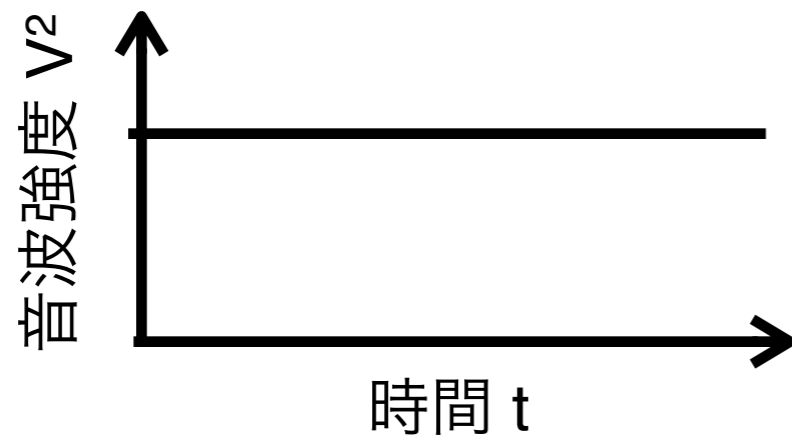
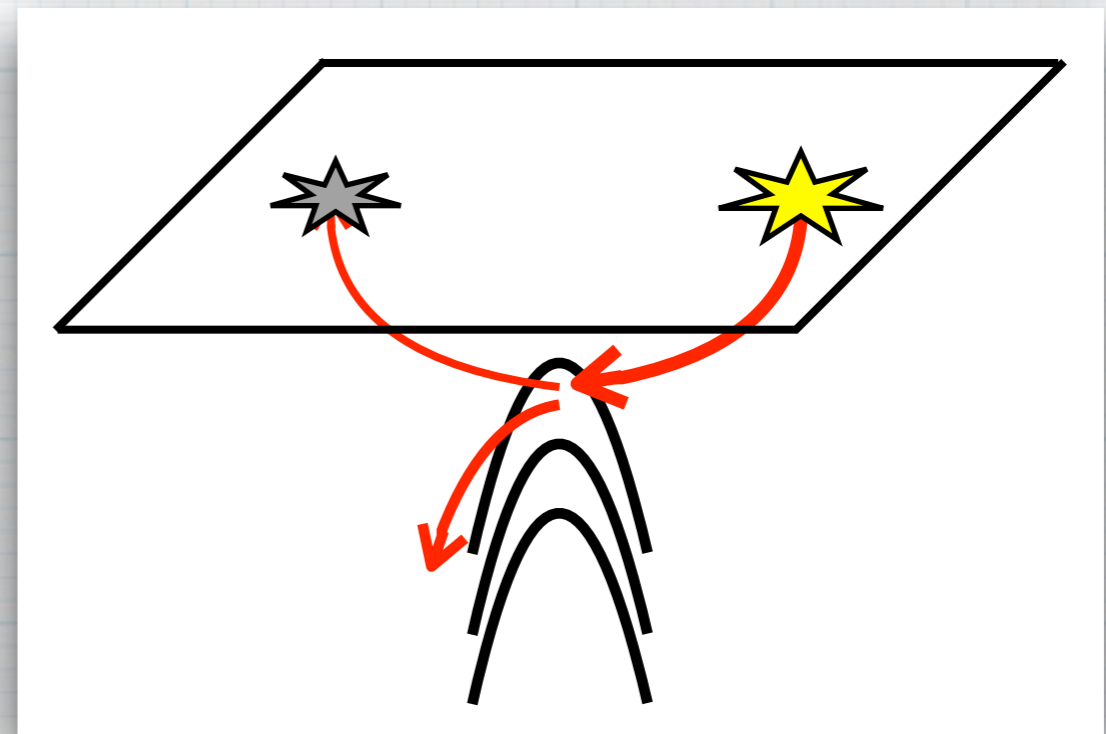
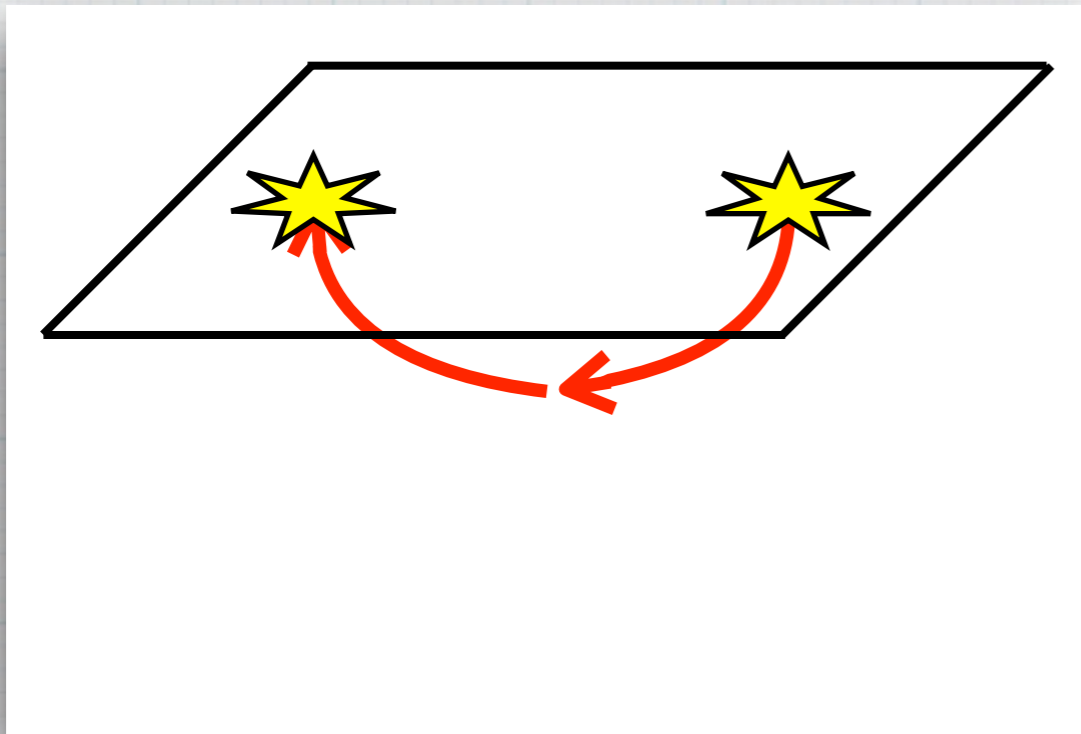
- 太陽は対流によってつねに波動が励起されている。つまり、太陽は絶えず振動している。周波数や波数の関数としての振動パワー分布は振動体（=太陽）の構造による。太陽表面における振動場（とくに音波）を観測すれば内部構造を探查できる



- (局所)日震学のレビューはGizon (2005)を参照

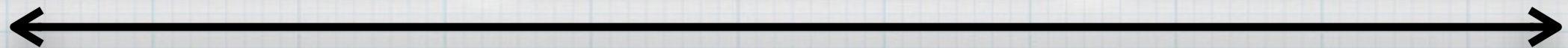
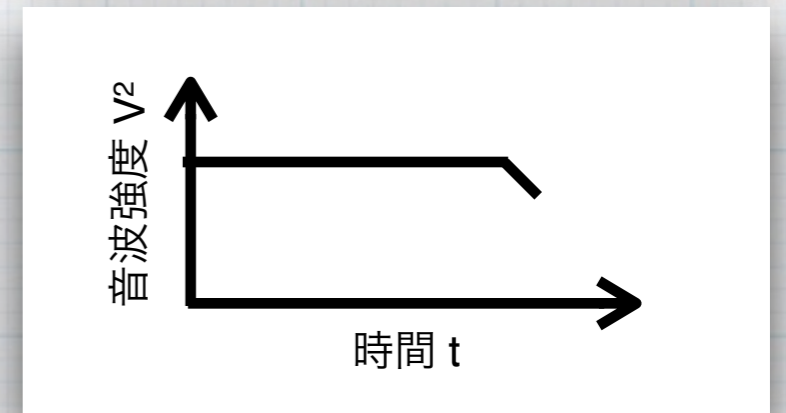
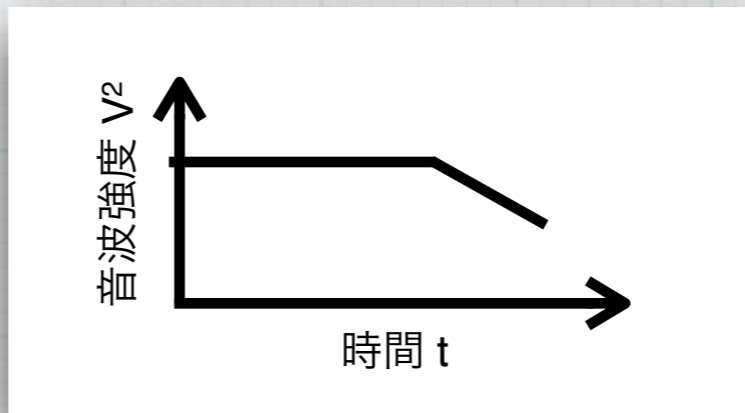
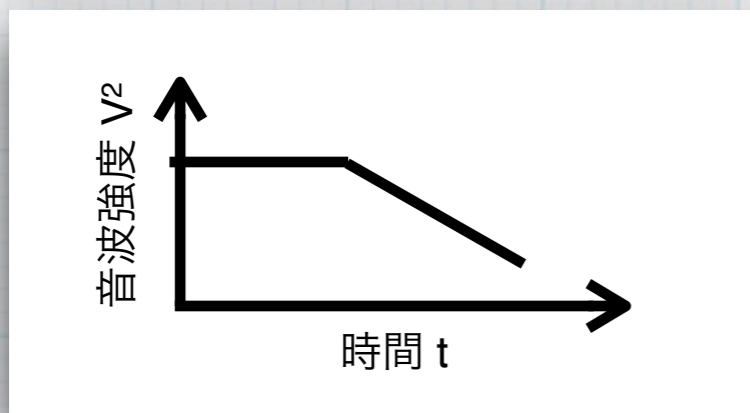
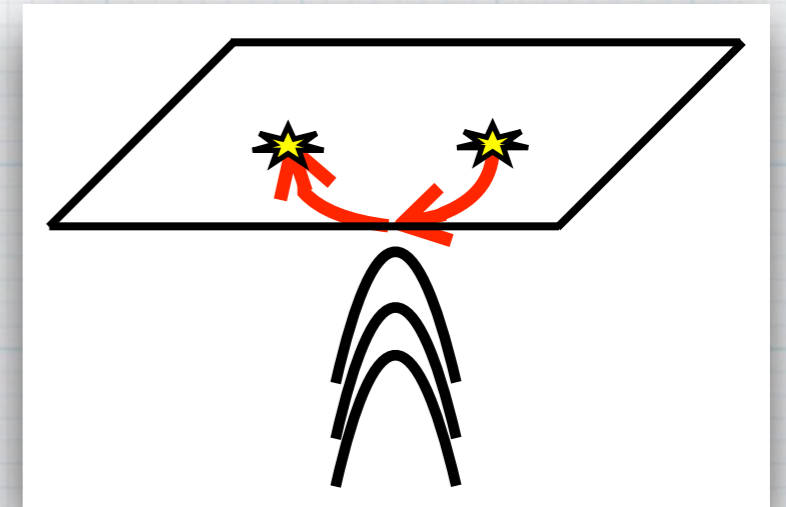
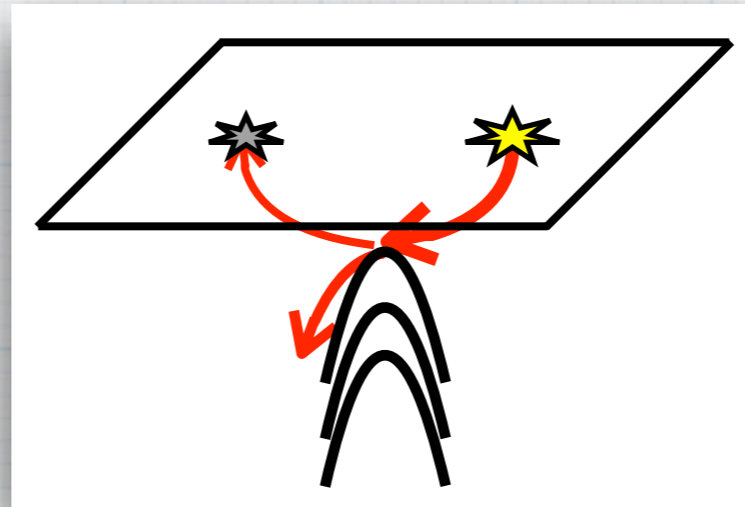
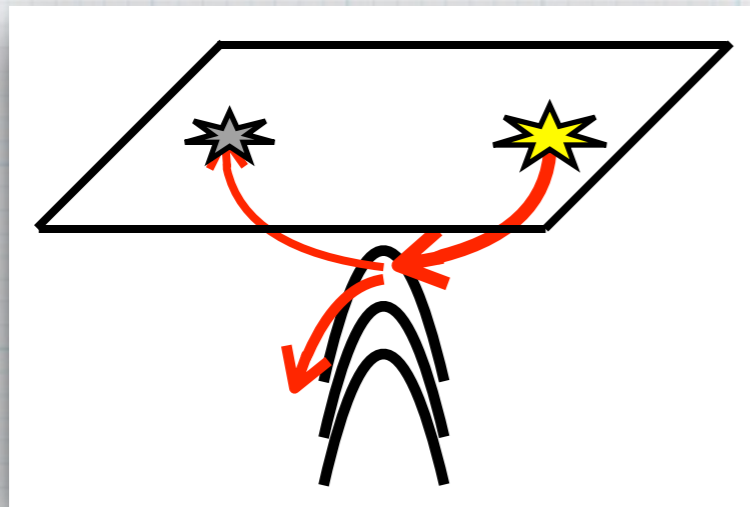
2. 活動領域形成

- 日震学観測
 - 本研究のアイデア
 - 音波振動強度 V^2 の測定



2. 活動領域形成

- 日震学観測
 - 本研究のアイデア
 - 音波振動強度 V^2 の測定



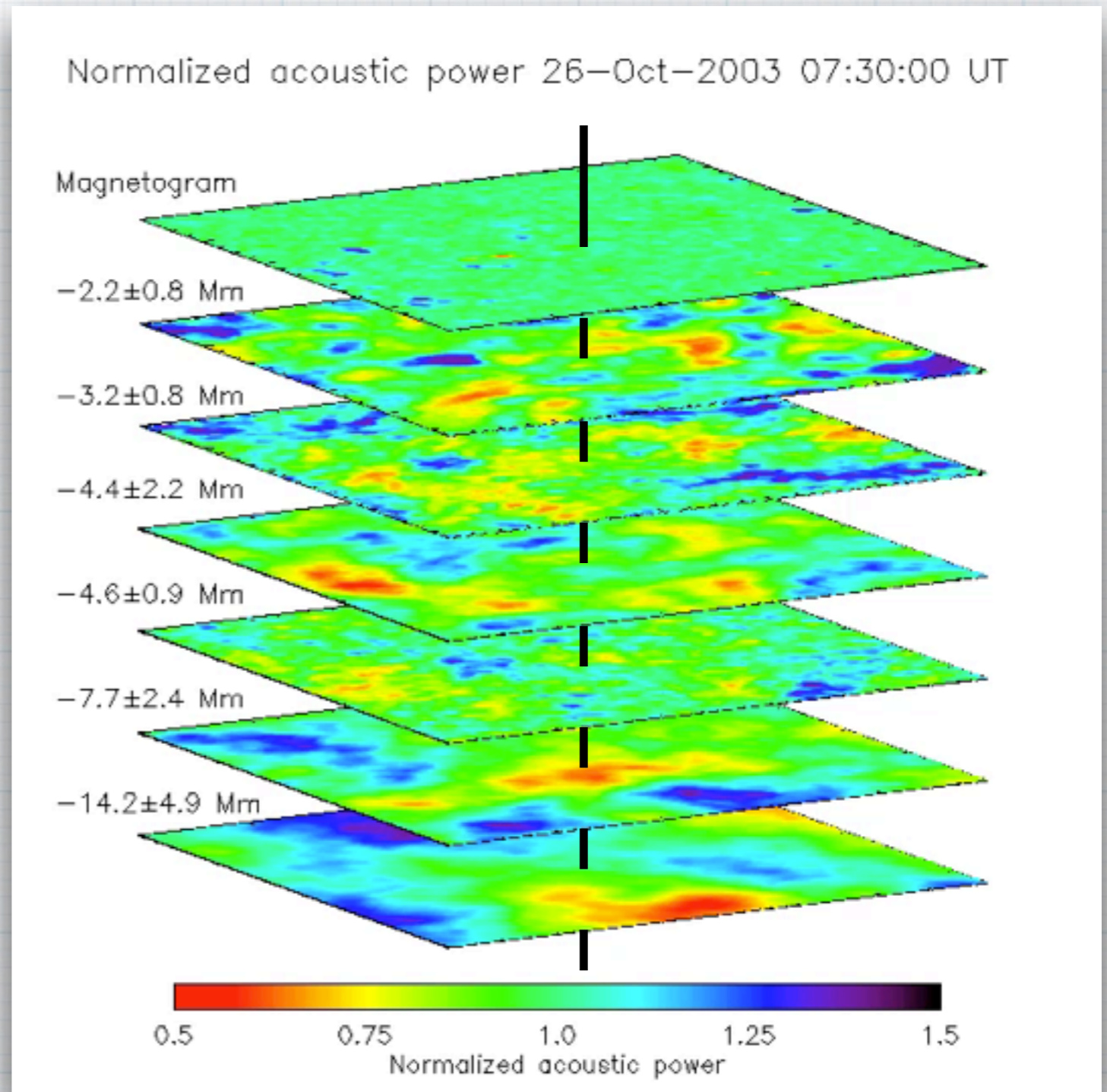
深 ← フィルター感度 → 浅

2. 活動領域形成

- 日震学観測
 - 浮上磁場検出

太陽表面磁場マップ →

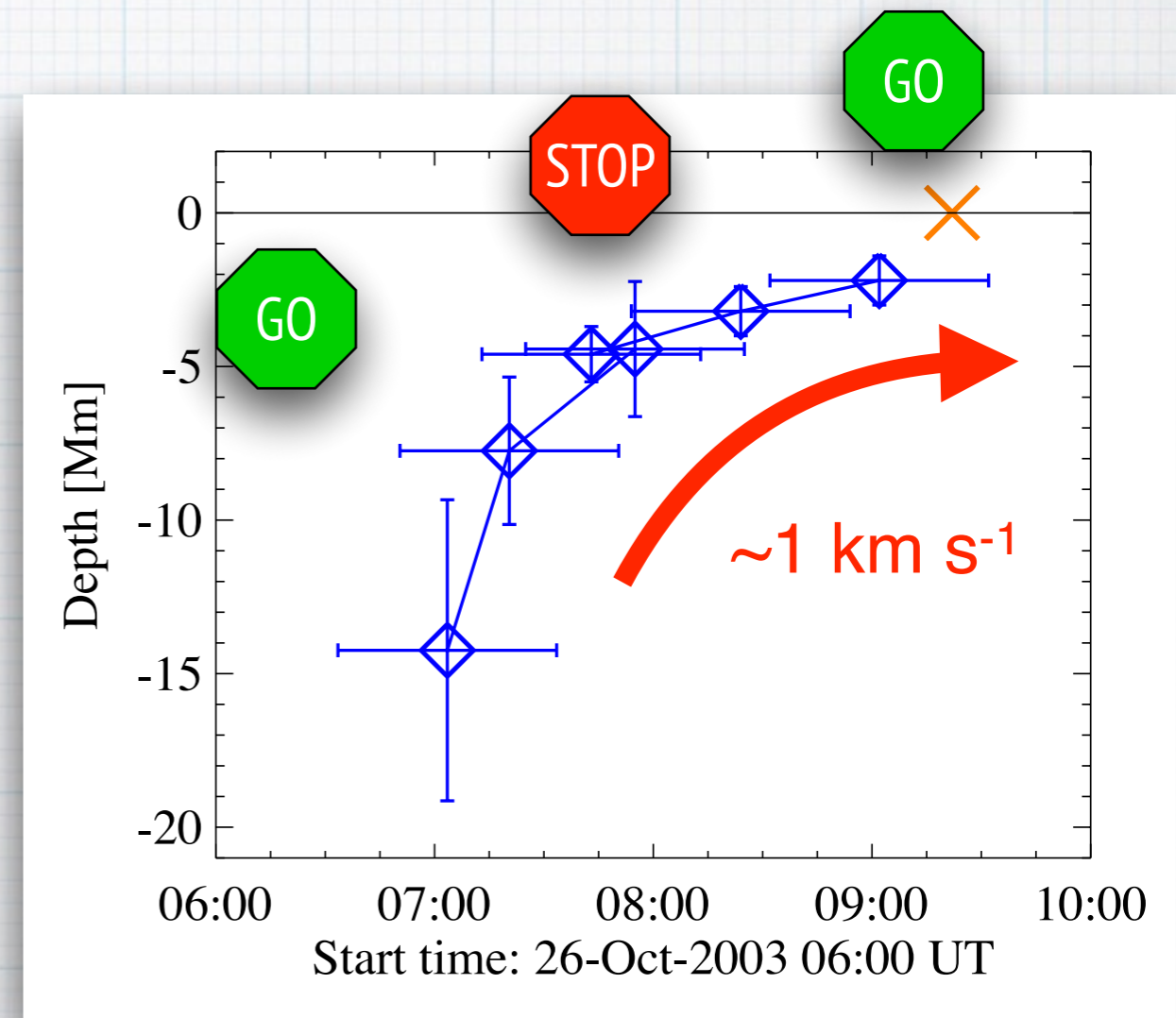
表面下6層における
音波強度マップ



2. 活動領域形成

- 日震学観測
 - 浮上磁場検出

- 各深度における音波振動の減衰開始時刻のプロット
- ×は表面での磁場出現時刻
- 上昇＋減速の傾向を示す
 - 上昇速度 $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$

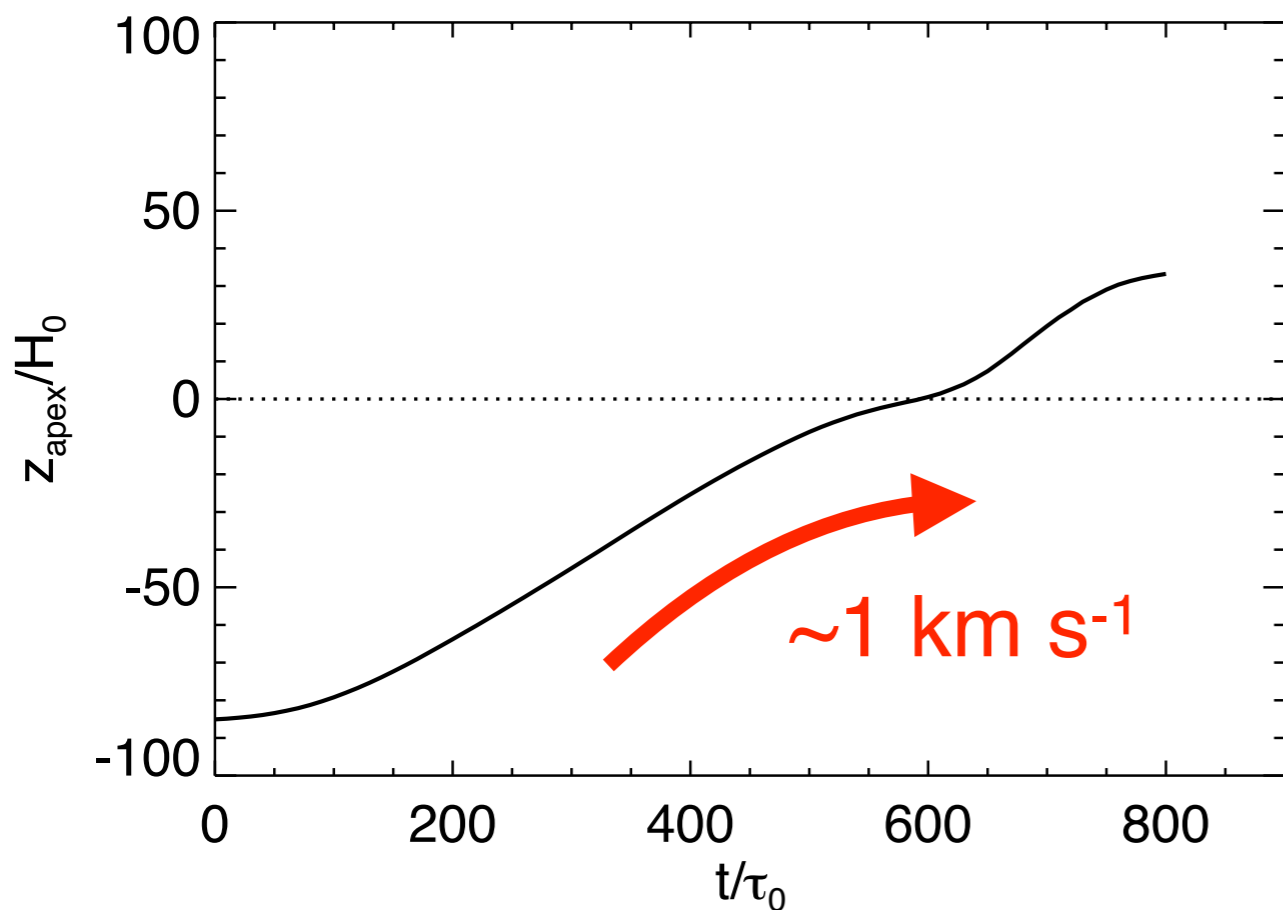


Toriumi+ (2013)

2. 活動領域形成

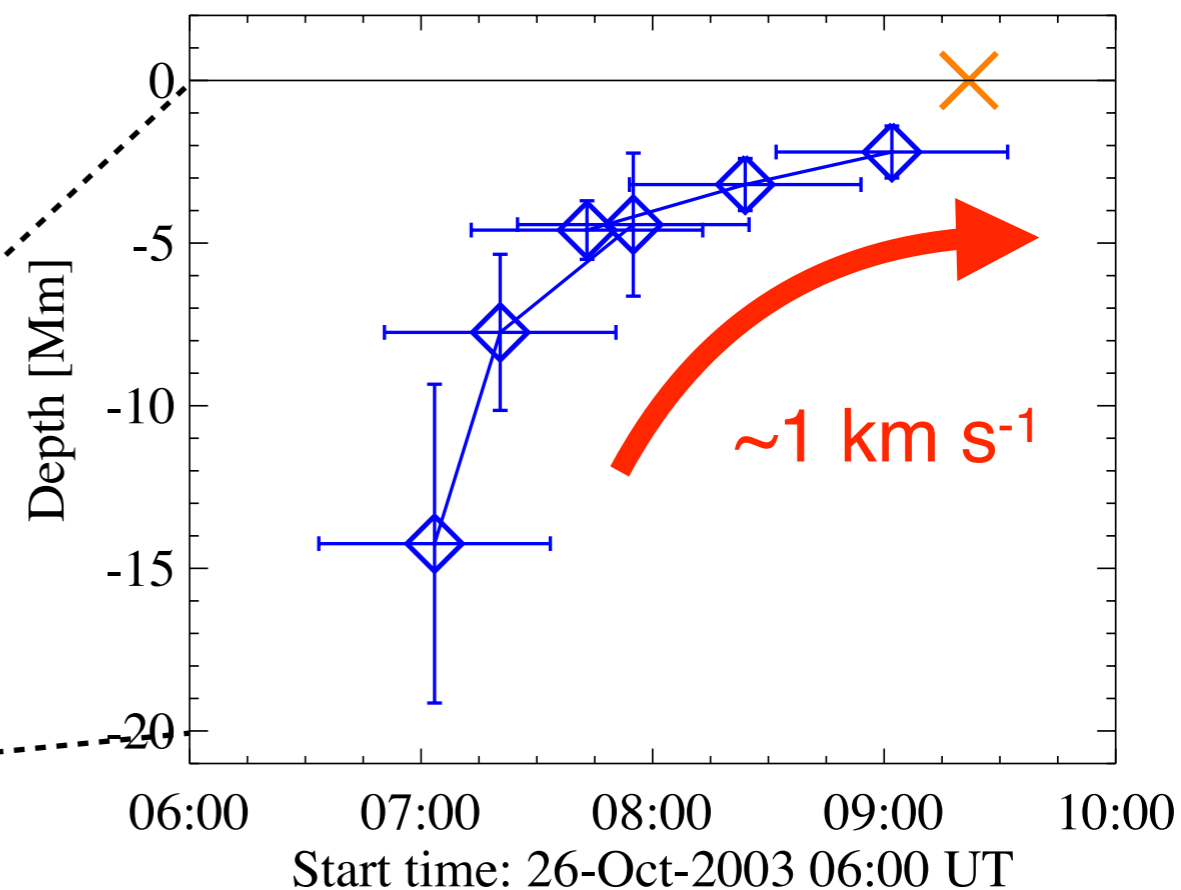
- 日震学観測
 - 浮上磁場検出

シミュレーション結果



ST & Yokoyama (2012)

観測結果

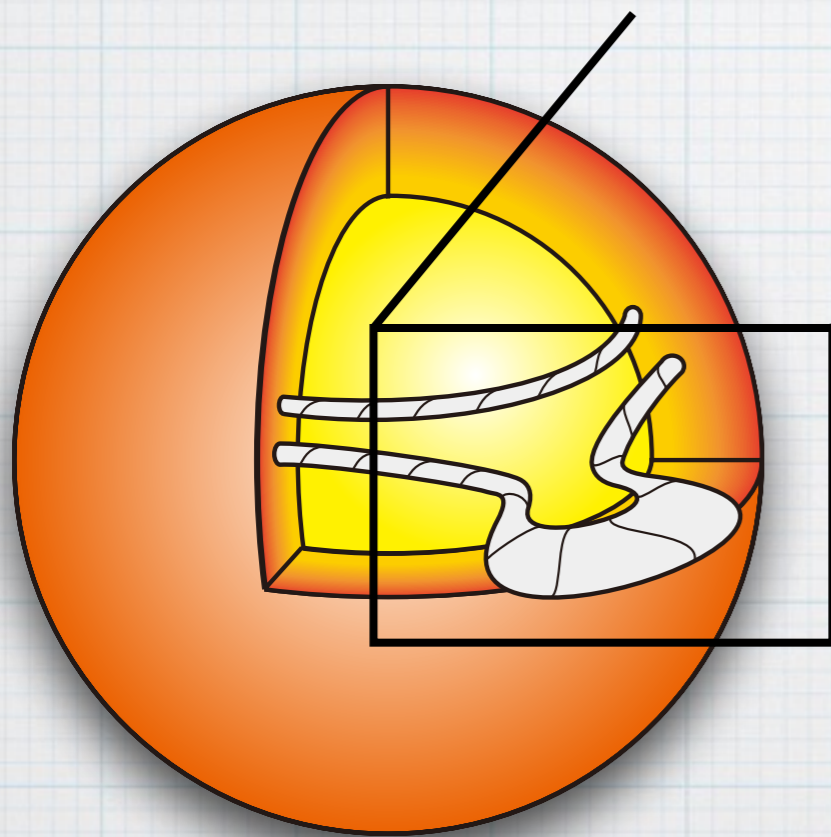
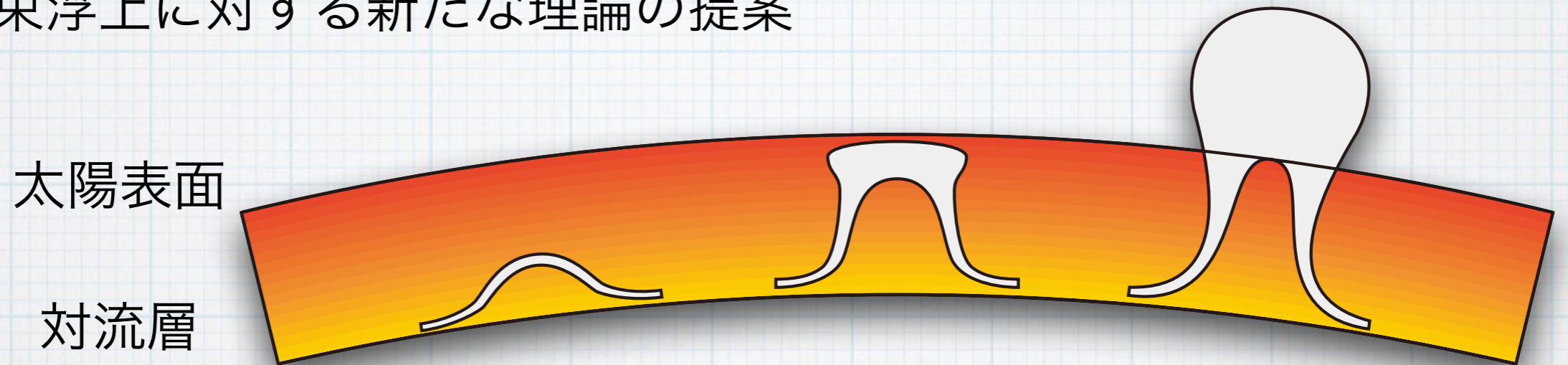


Toriumi+ (2013)

- 日震学による浮上磁場検出については Ilonidis et al. (2011), Zharkov & Thompson (2008), Komm et al. (2008) など参照

2. 活動領域形成

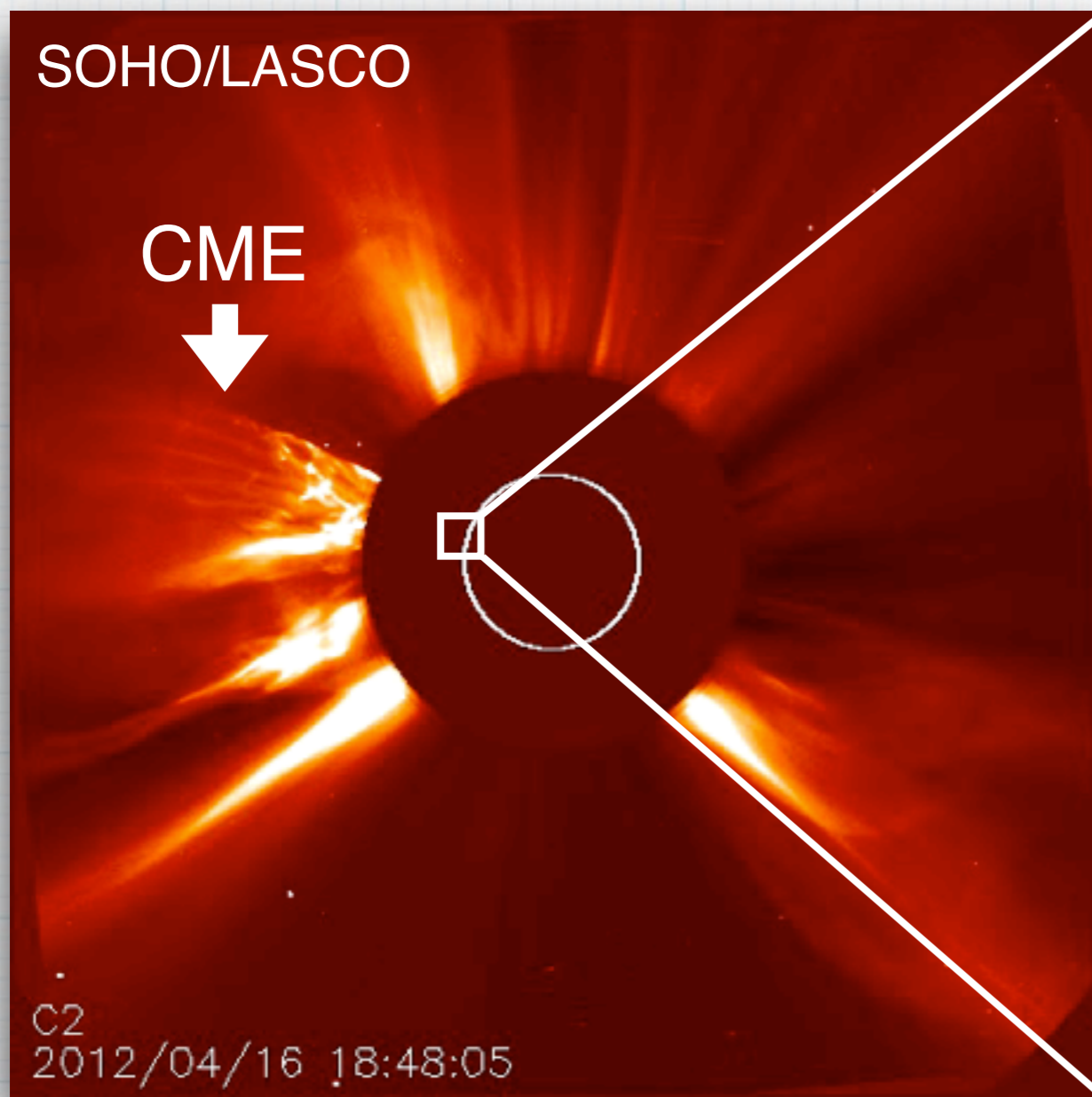
- ・ シミュレーションと観測との比較
- ・ 磁束浮上に対する新たな理論の提案



1. ダイナモにより磁束が形成
2. 対流層内部を浮上
3. 表面に到達する直前、一時的に停滞、水平方向に膨張
4. 表面を突破し活動領域を形成

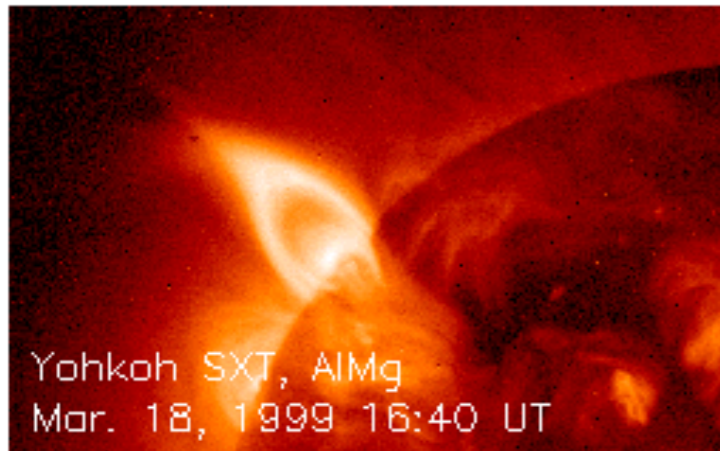
3. 太陽フレア

- ・ フレア現象
 - ・ 突発的な電磁波の増光

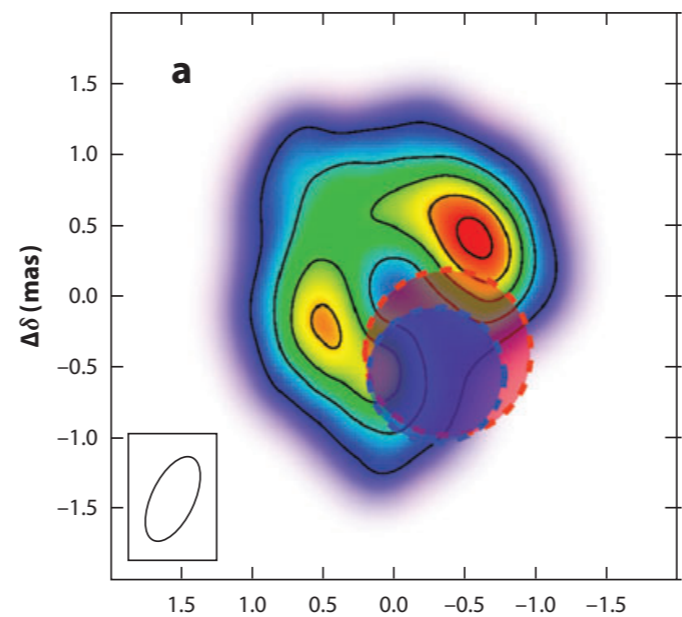


3. 太陽フレア

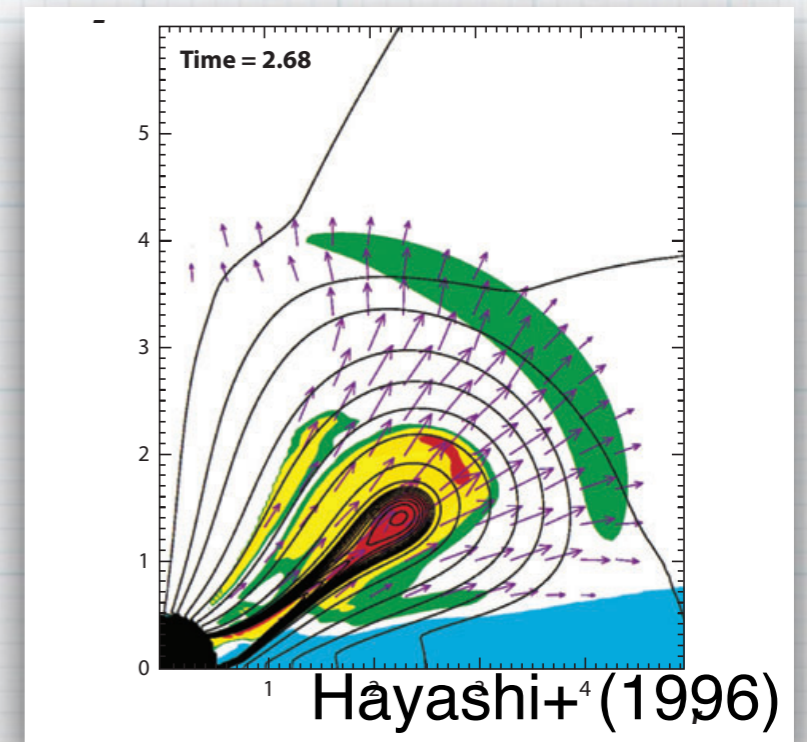
- フレア現象
 - 太陽以外にもさまざまな天体に同様の現象が存在
 - 普遍的な現象



Yohkoh/SXT



Peterson+ (2010)



- 太陽フレア

$B \sim 100$ G

$L \sim 10^4 - 10^5$ km

$E_{\text{mag}} \sim 10^{29} - 10^{32}$ erg

- 恒星フレア

$B \sim 100$ G

$L \sim 10^5 - 10^6$ km

$E_{\text{mag}} \sim 10^{32} - 10^{35}$ erg

- 原始星フレア

$B \sim 100$ G

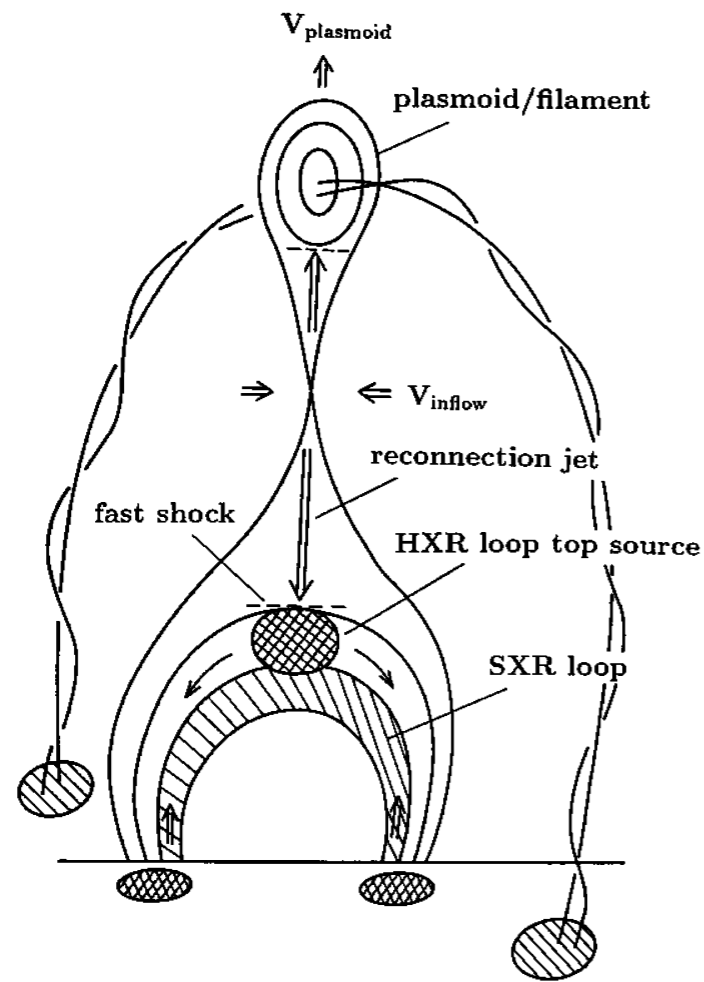
$L > 10^6$ km

$E_{\text{mag}} > 10^{35}$ erg

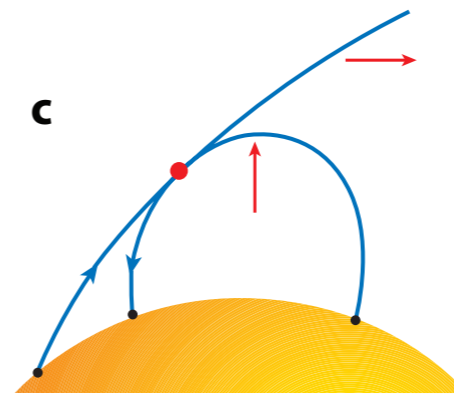
3. 太陽フレア

- フレア現象

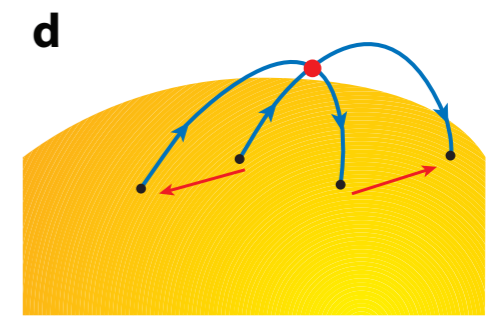
- 「磁気リコネクション」を通じた磁気エネルギーの解放過程
- 解放エネルギー = 実際の磁気エネルギー - 最低の磁気エネルギー



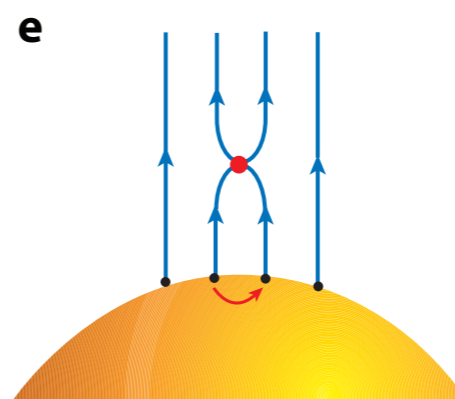
標準モデル：Shibata+ (1995)



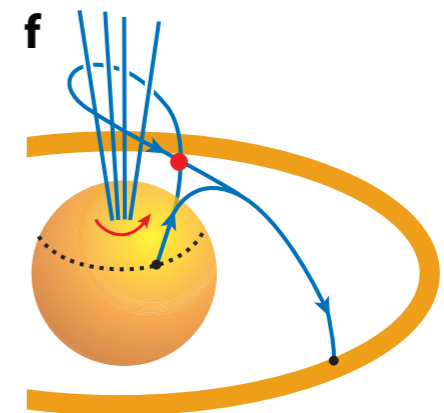
Interchange



Shear



Twist



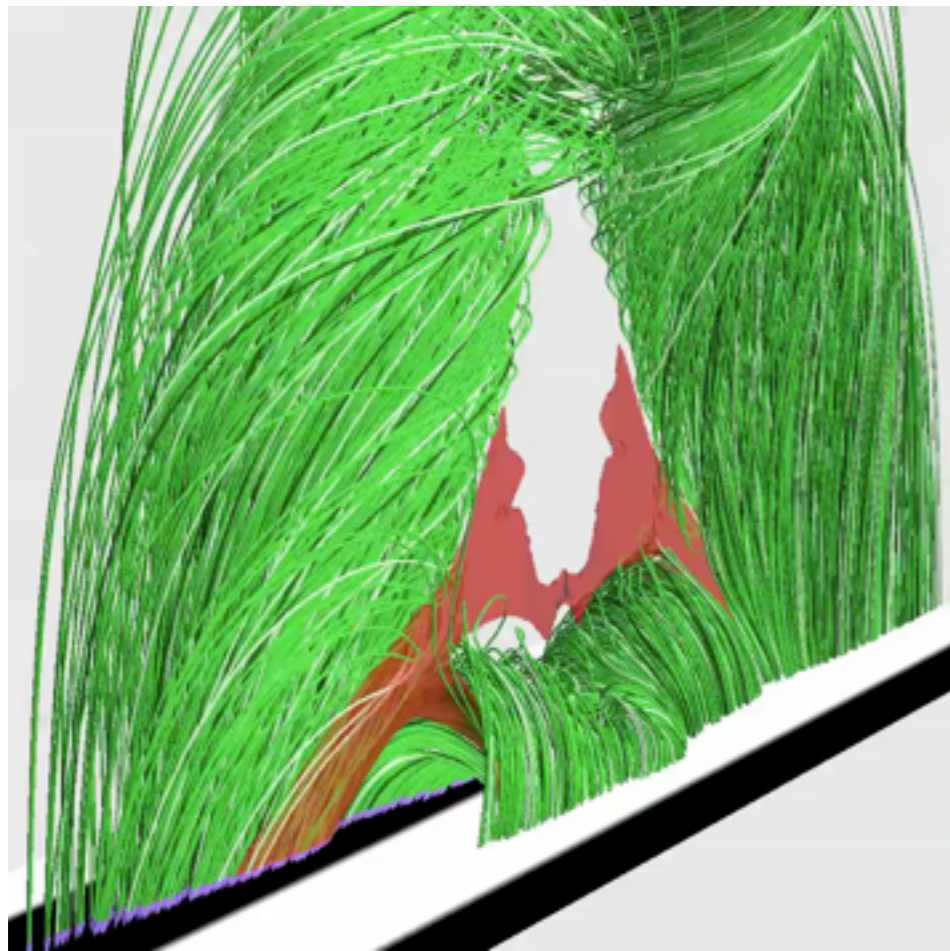
Star-disk

Benz & Güdel (2010)

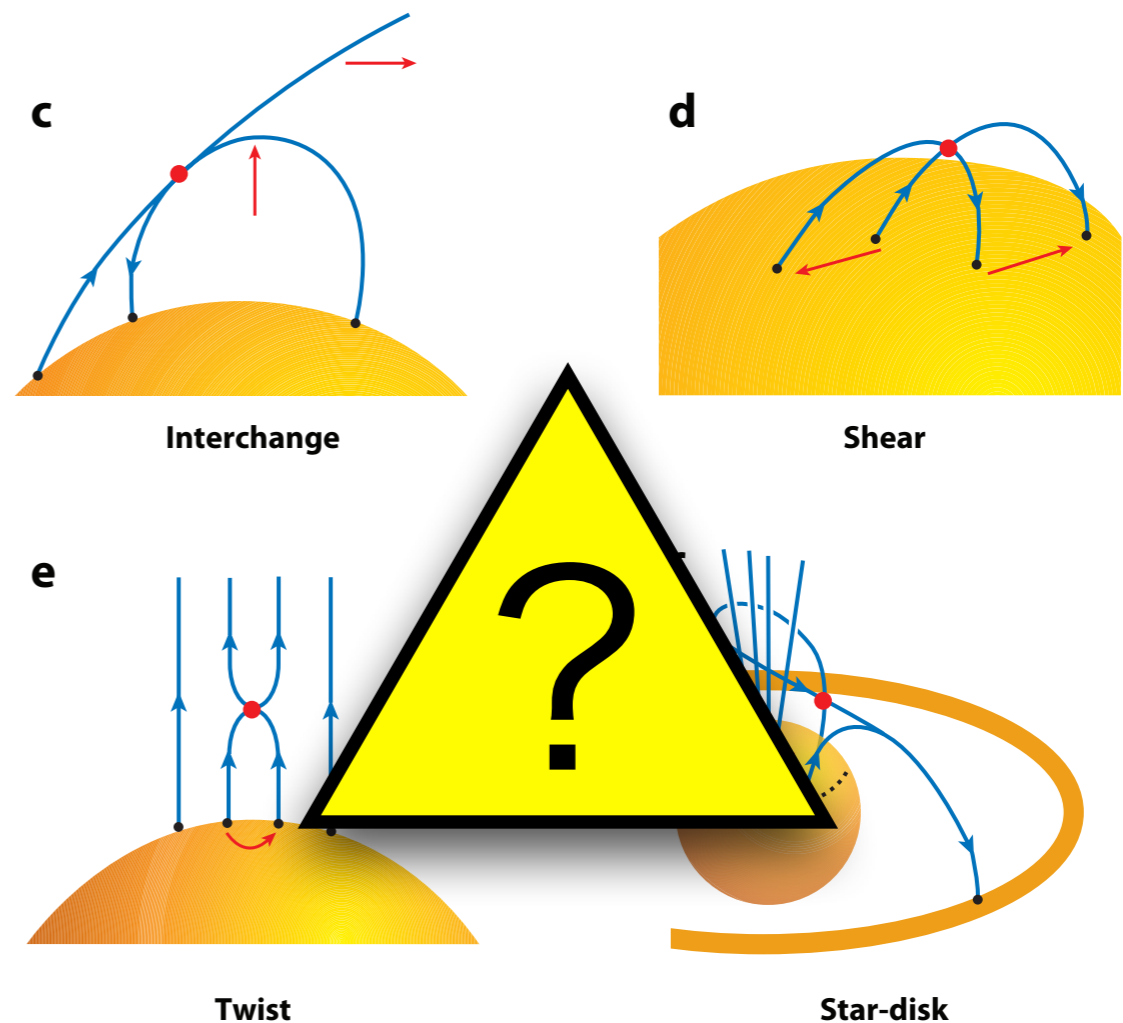
3. 太陽フレア

- フレア現象

- 「磁気リコネクション」を通じた磁気エネルギーの解放過程
- 解放エネルギー = 実際の磁気エネルギー - 最低の磁気エネルギー



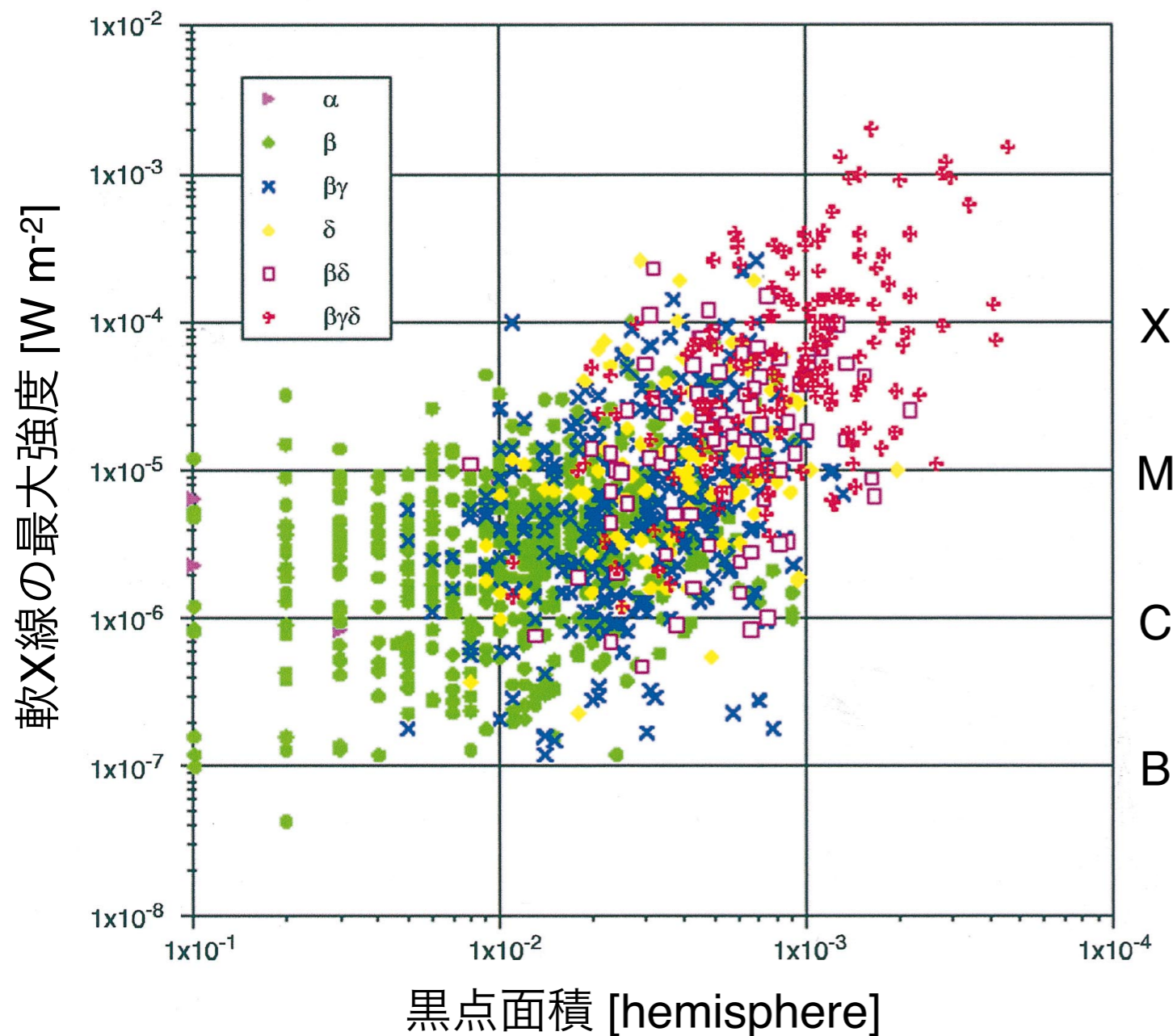
Kusano+ (2012)



Benz & Güdel (2010)

3. 太陽フレア

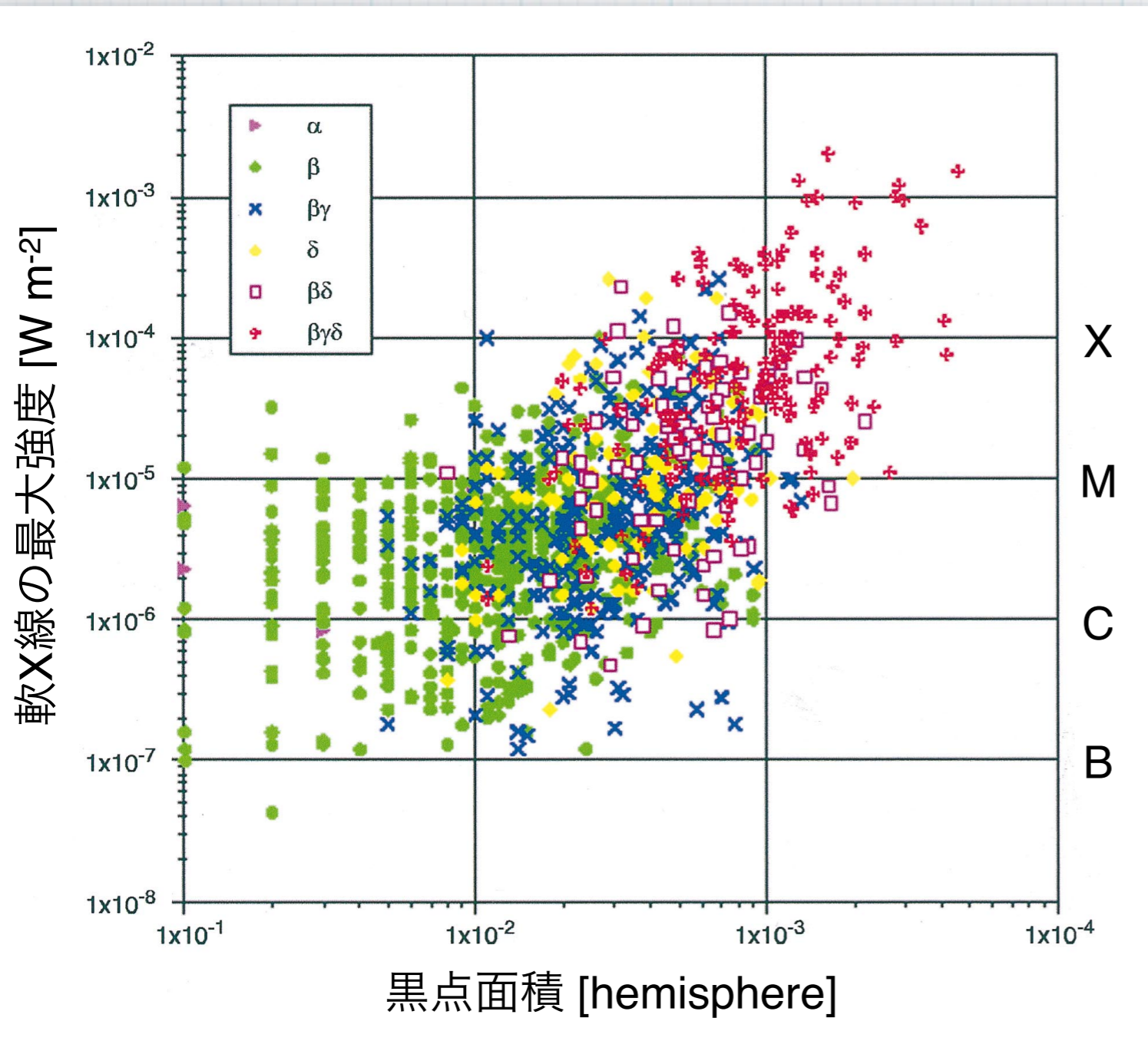
- フレア活動領域
 - フレアは「複雑な」活動領域に生じる



- 大型フレアは
 - より大きく
 - 複雑な (δ型) 活動領域に生じる

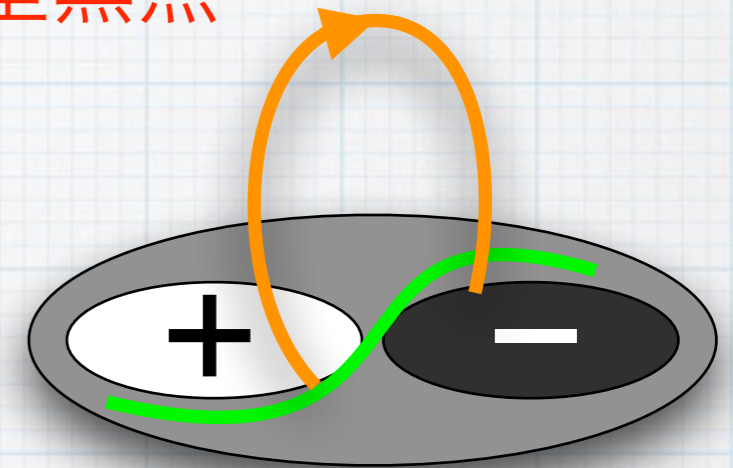
3. 太陽フレア

- フレア活動領域
 - フレアは「複雑な」活動領域に生じる



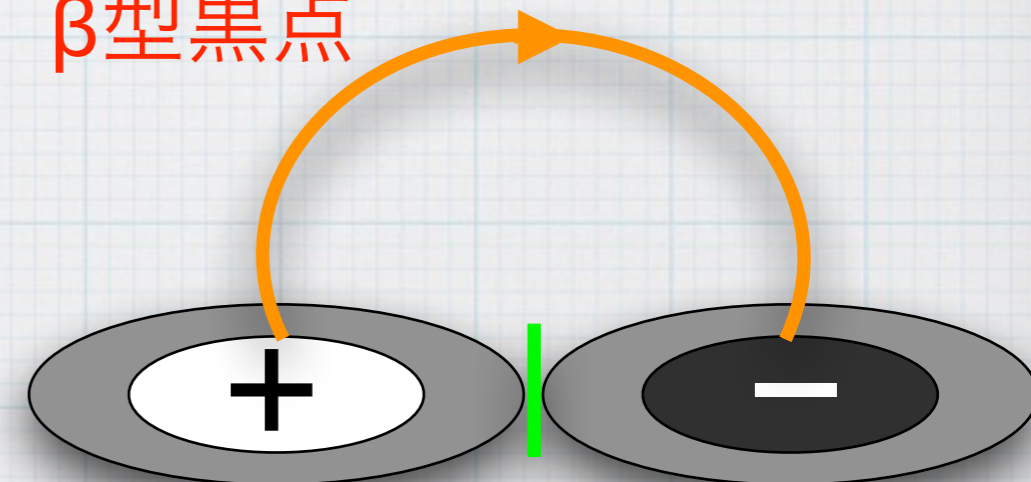
Sammis+ (2000)

δ 型黒点



- 正負両極の黒点暗部が同じ半暗部を共有
- 磁力線のシアが強い
→ 磁気エネルギー大

β 型黒点

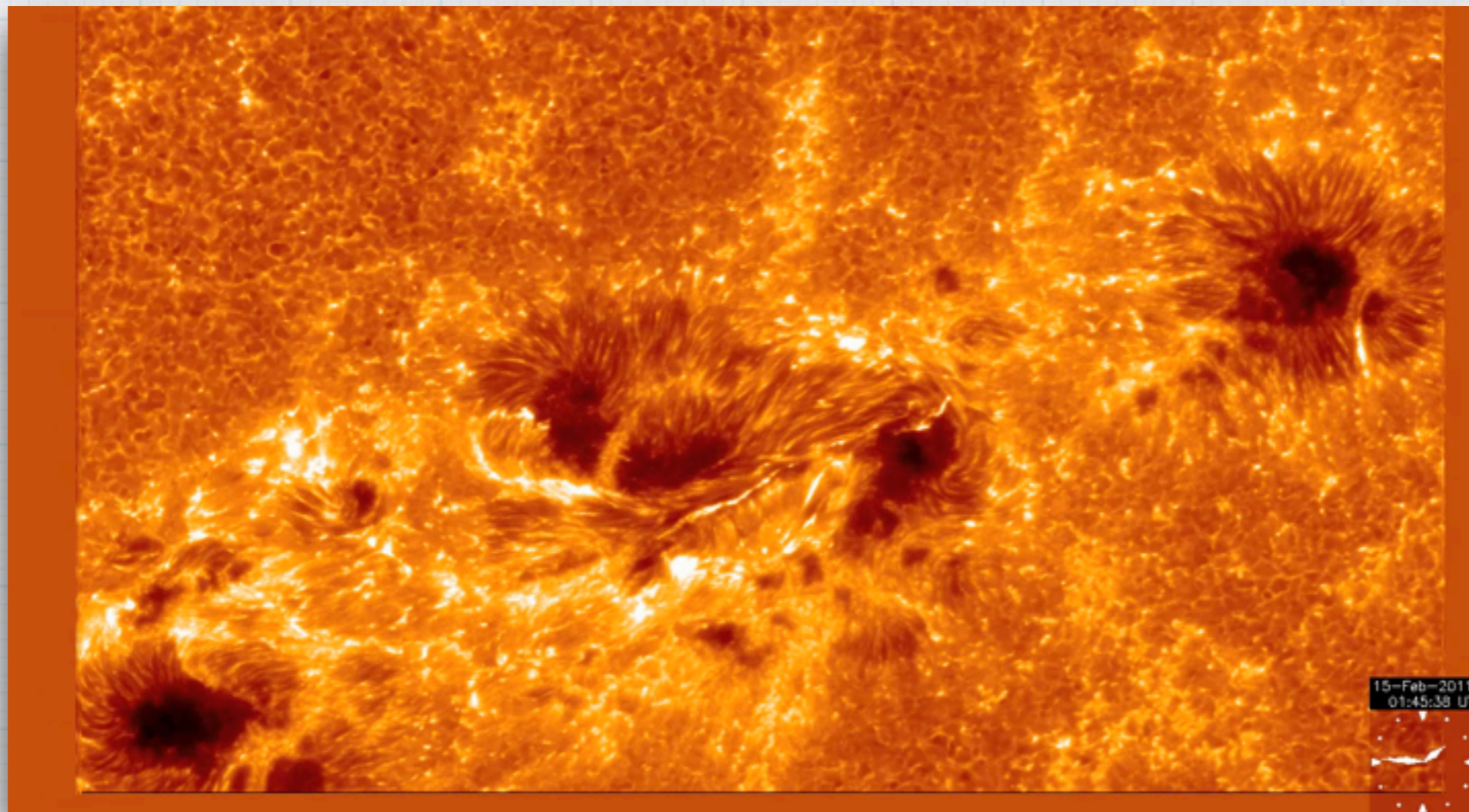


[see, e.g., Zirin & Liggett (1987)]

3. 太陽フレア

- ・ フレア磁気エネルギー蓄積過程
- ・ 活動領域NOAA 11158

Hinode/SOT Ca II (2011 Feb: AR 11158)

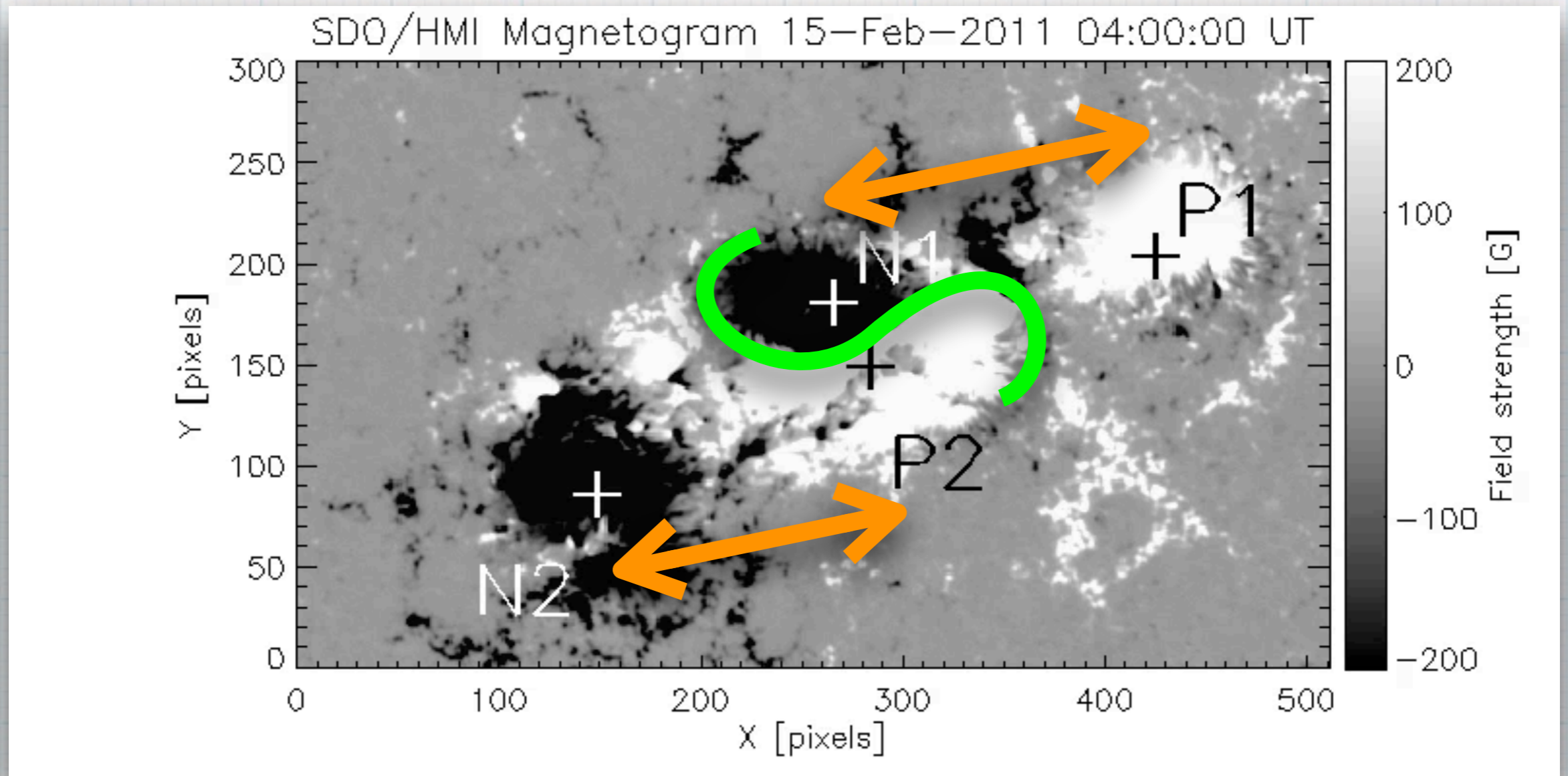


Movie courtesy of T.J. Okamoto

Toriumi et al. (2014)

3. 太陽フレア

- ・ フレア磁気エネルギー蓄積過程
- ・ 活動領域NOAA 11158



- ・ 2つの浮上磁場からなる四重極型構造
- ・ 中央に δ 型黒点を形成 → 多数の大型フレア

3. 太陽フレア

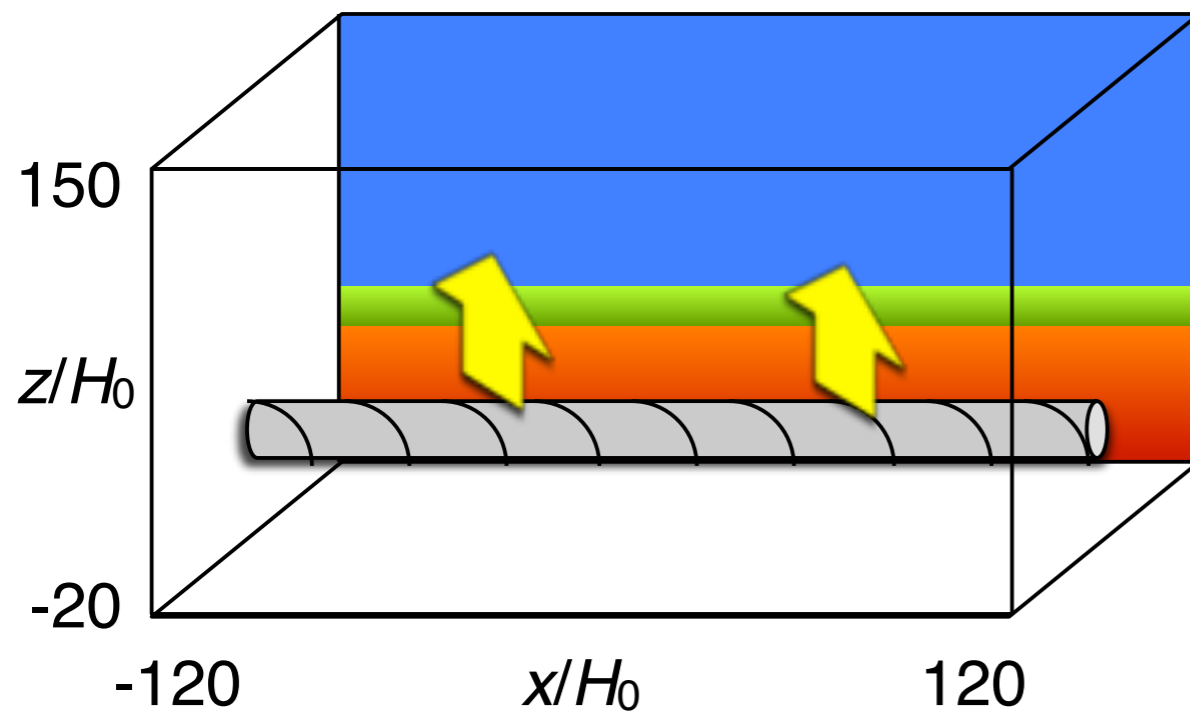
- ・ フレア磁気エネルギー蓄積過程
- ・ 活動領域NOAA 11158

Length: $H_0 = 170$ km

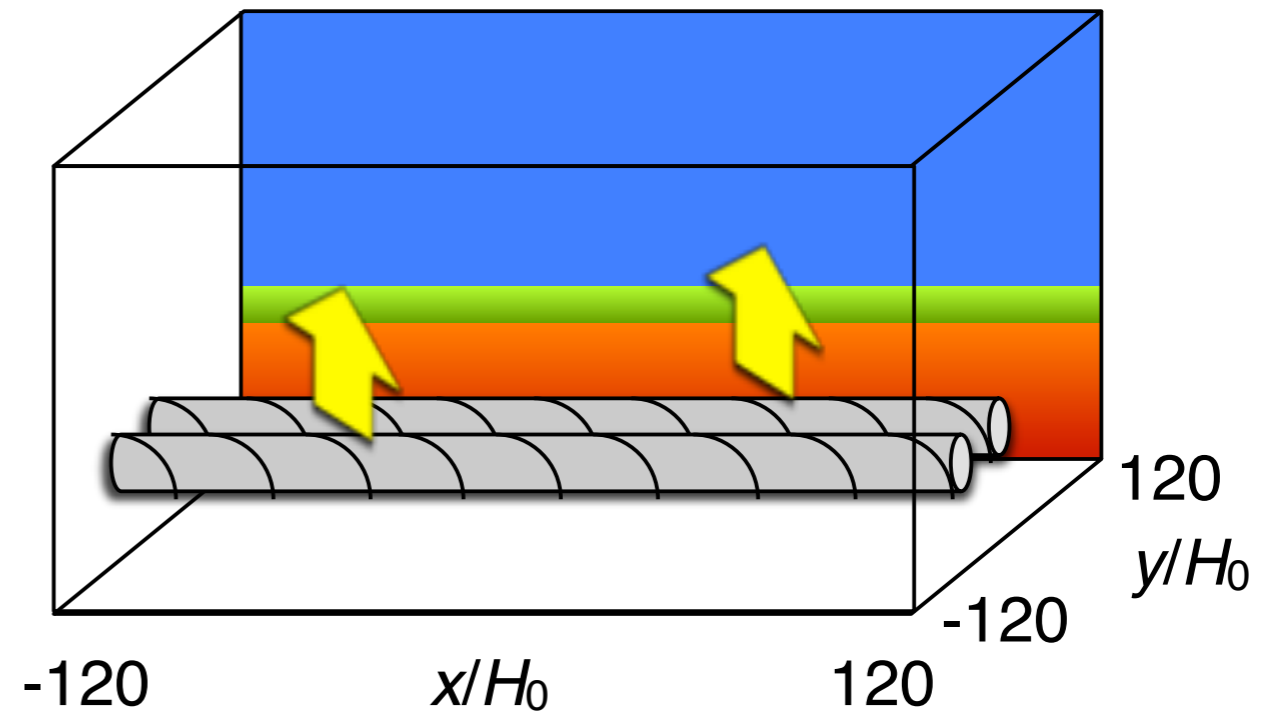
Time: $\tau_0 = 25$ s

Field strength $B_0 = 250$ G

Case 1



Case 2



- ・ 2つの形成モデル
 - ・ Case 1: 1本の磁束管が2箇所て浮上
 - ・ Case 2: 2本の独立した磁束管がそれぞれ浮上

3. 太陽フレア

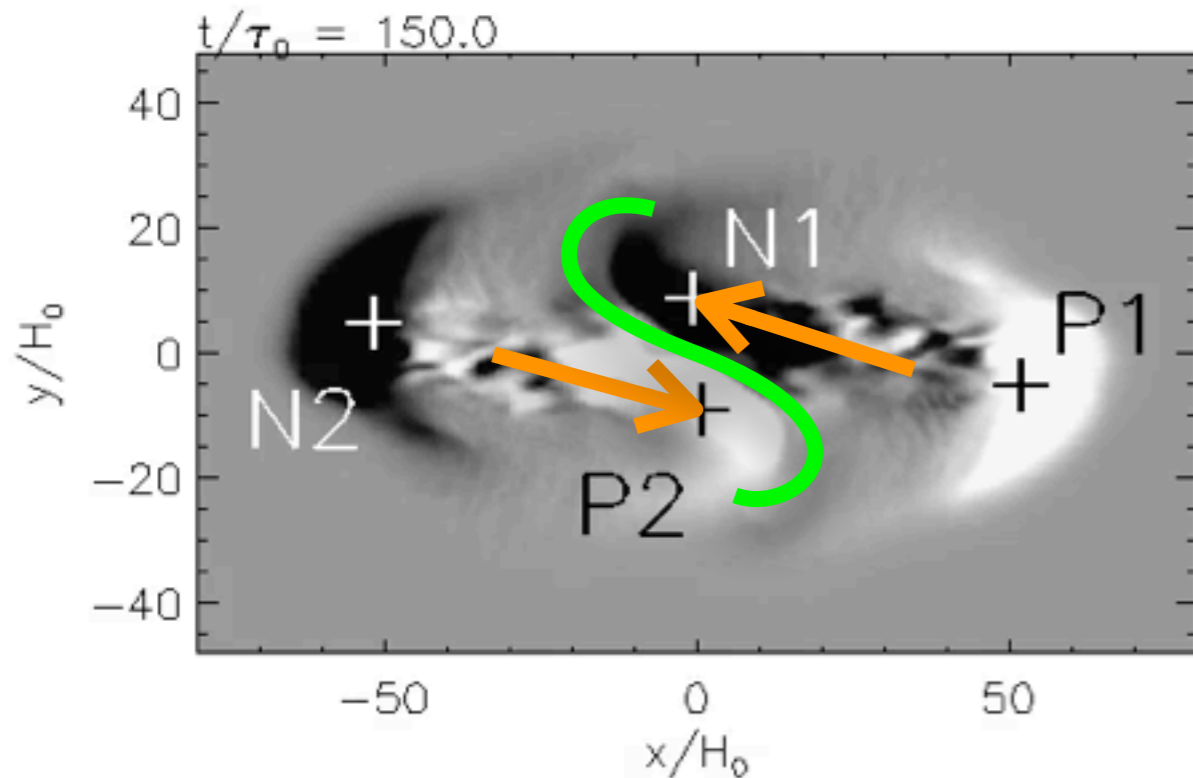
- ・ フレア磁気エネルギー蓄積過程
- ・ 活動領域NOAA 11158

Length: $H_0 = 170$ km

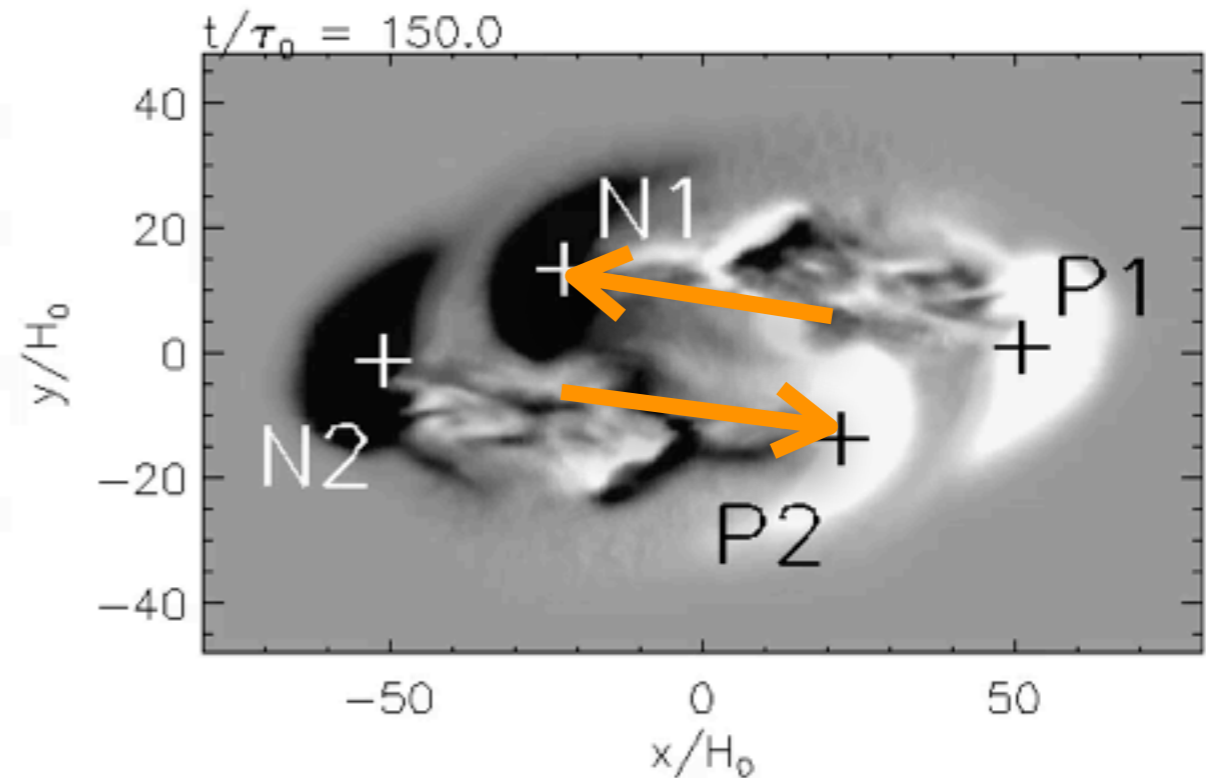
Time: $\tau_0 = 25$ s

Field strength $B_0 = 250$ G

Case 1: single tube



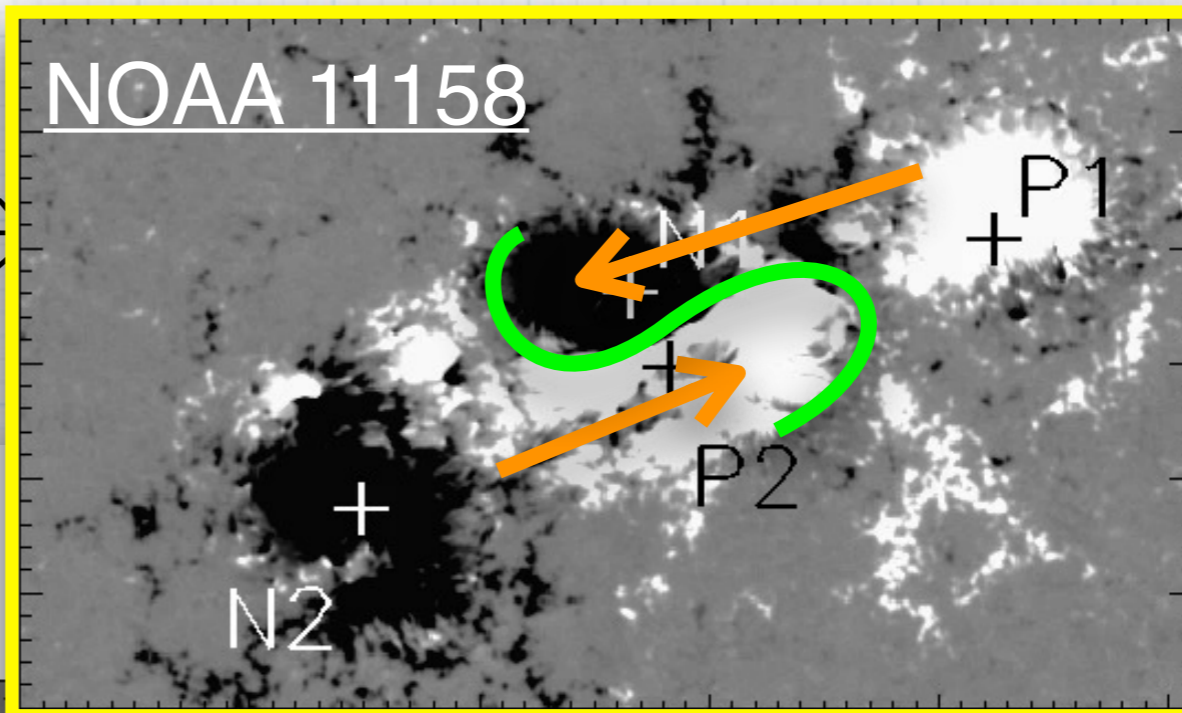
Case 2: double tube



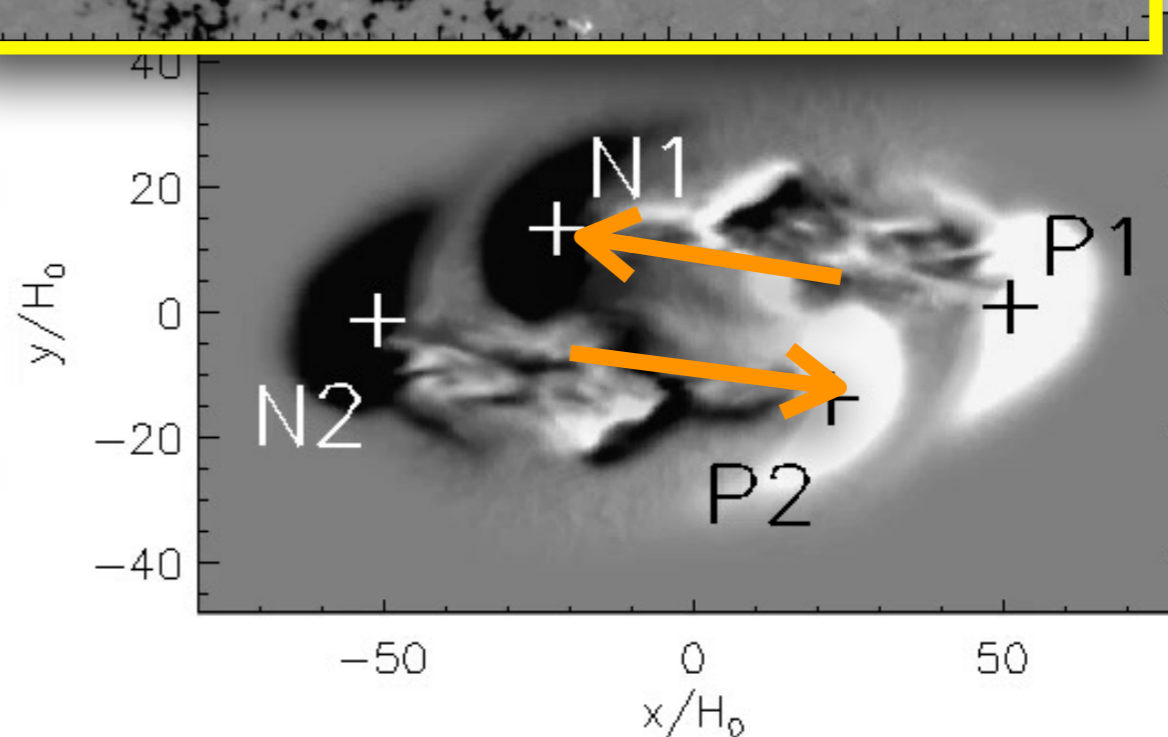
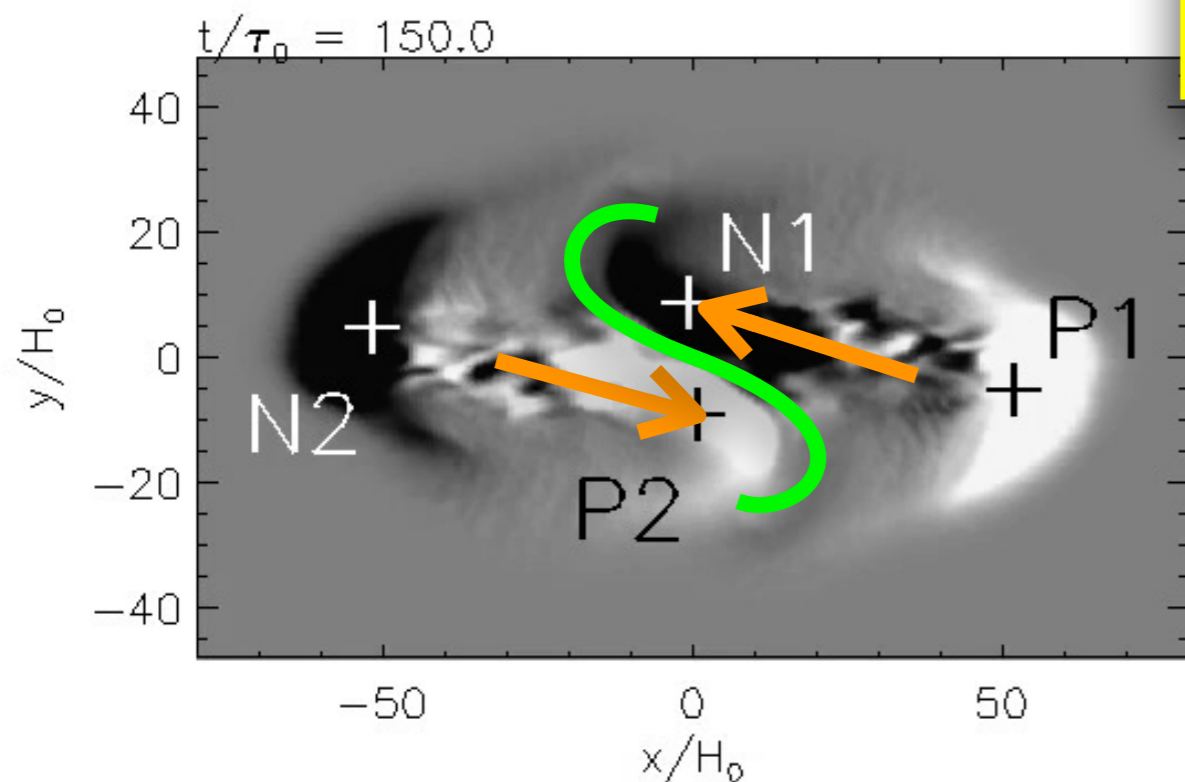
- ・ いずれも四重極構造を形成： **δ 型構造はCase 1のみ**
 - ・ Case 1: 2つの浮上磁場は表面下で磁束を共有
 - ・ Case 2: 2つの浮上磁場は完全に独立

3. 太陽フレア

- ・ フレア磁気エネルギー蓄積
- ・ 活動領域NOAA 11158



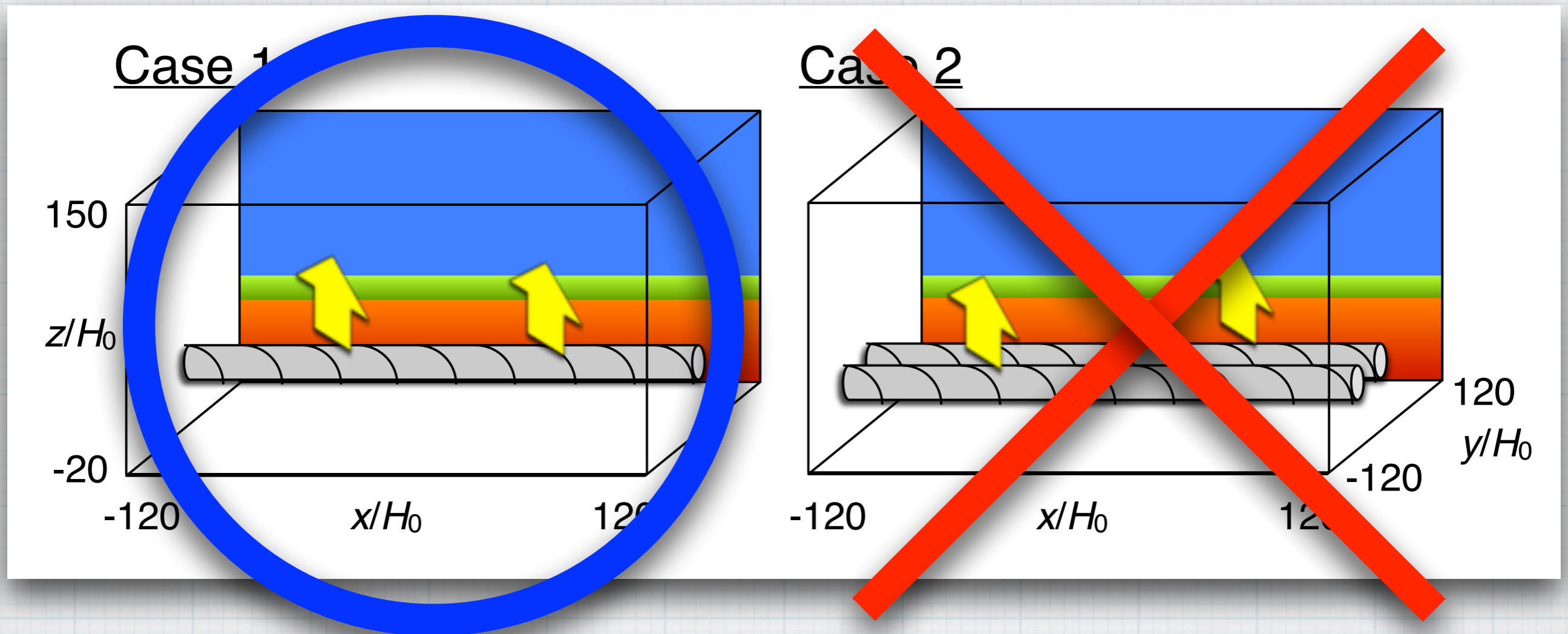
Case 1: single tube



- ・ いずれも四重極構造を形成： **δ 型構造はCase 1のみ**
 - ・ Case 1: 2つの浮上磁場は表面下で磁束を共有
 - ・ Case 2: 2つの浮上磁場は完全に独立

3. 太陽フレア

- ・ シミュレーションと観測との比較
- ・ フレアは活動領域形成の結果として発生



- ・ 2つの形成モデル
 - ・ Case 1: 1本の磁束管が2箇所て浮上
 - ・ Case 2: 2本の独立した磁束管がそれぞれ浮上

4. さいごに

- 今後の太陽物理について
 - 「精密科学」としての太陽物理
 - 他分野では実現困難なハイレゾ観測により超微細なプラズマ過程まで追求可能
 - プラズマ実験室として太陽を捉える
 - より高分解能を目指すSolar-Cではこの観点から研究を推進すべき
 - 「天文学」としての太陽物理
 - 例えばフレアや黒点は他の恒星にも存在
→ 恒星物理学との再融合
 - 恒星として太陽を捉える “Sun as a star”

太陽はどちらも
可能な唯一の恒星

Thank you for your attention!