

「ひので」による太陽極域磁場 と磁場反転の観測

京都大学 理学研究科
宇宙物理学教室 M1

田中悠基

紹介論文

① 太陽極域の磁場描像

THE MAGNETIC LANDSCAPE OF THE SUN'S
POLAR REGION

S.Tsuneta et al. 2008, ApJ, 668, L1374

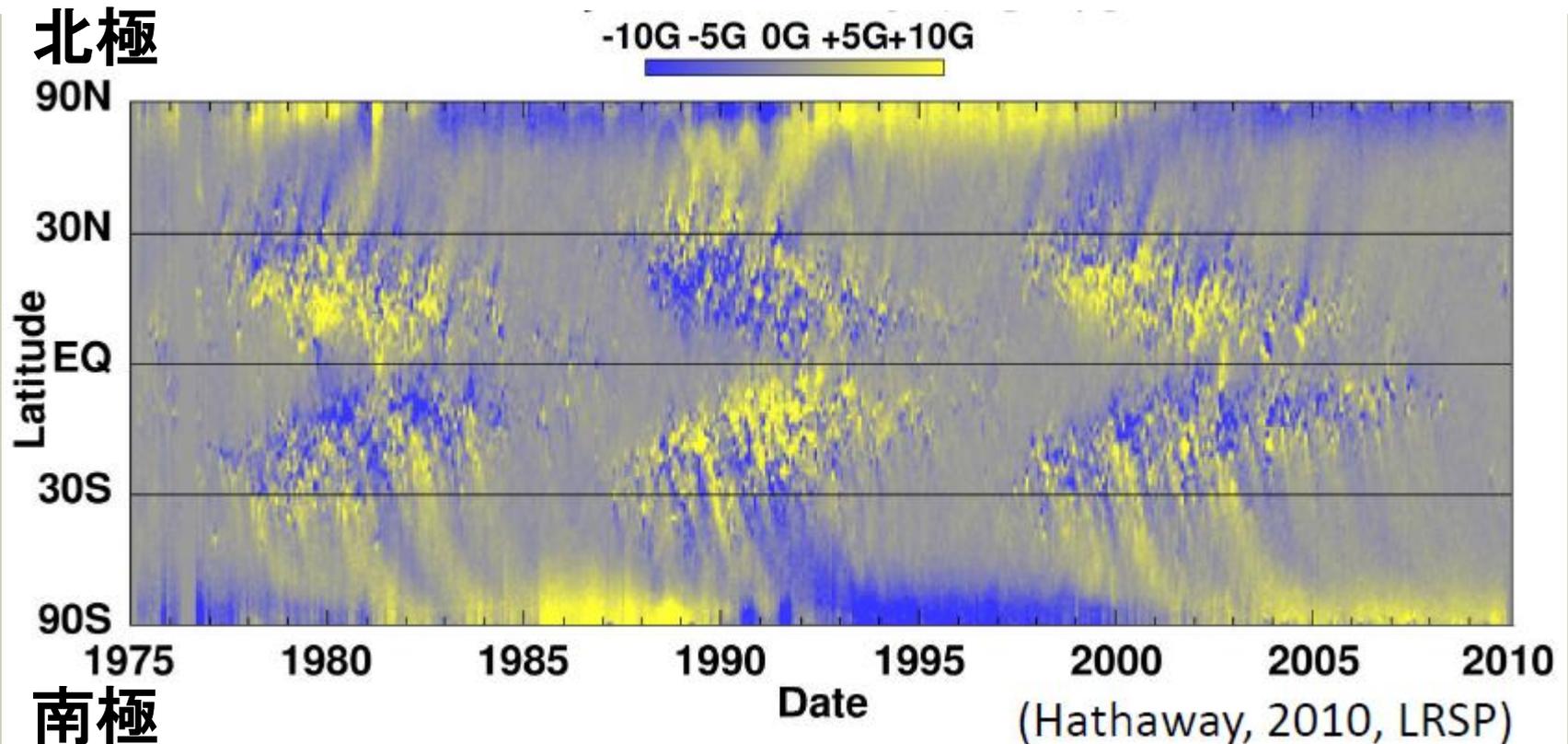
② 「ひので」による極域磁場反転の観測

Polar Field Reversal Observations with *Hinode*

D.Shiota et al. 2012, ApJ, 753, 157

イントロダクション

太陽の11年周期と磁場反転



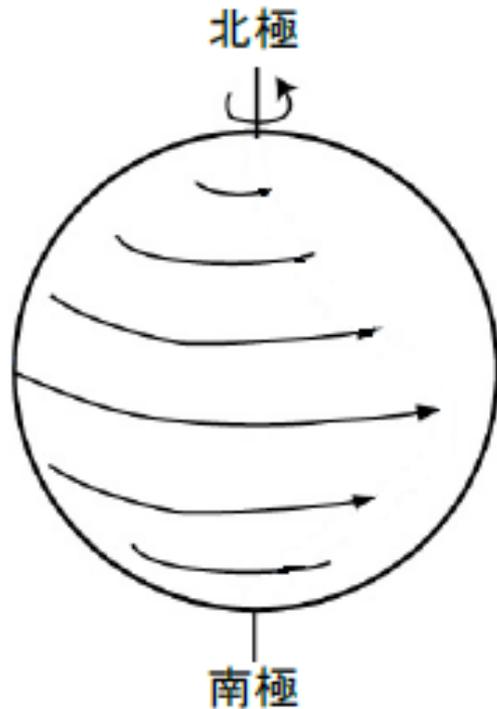
極磁場の極性は約11年ごとに反転
→反転の原因を解明したい

極域磁場反転と 太陽ダイナモモデル

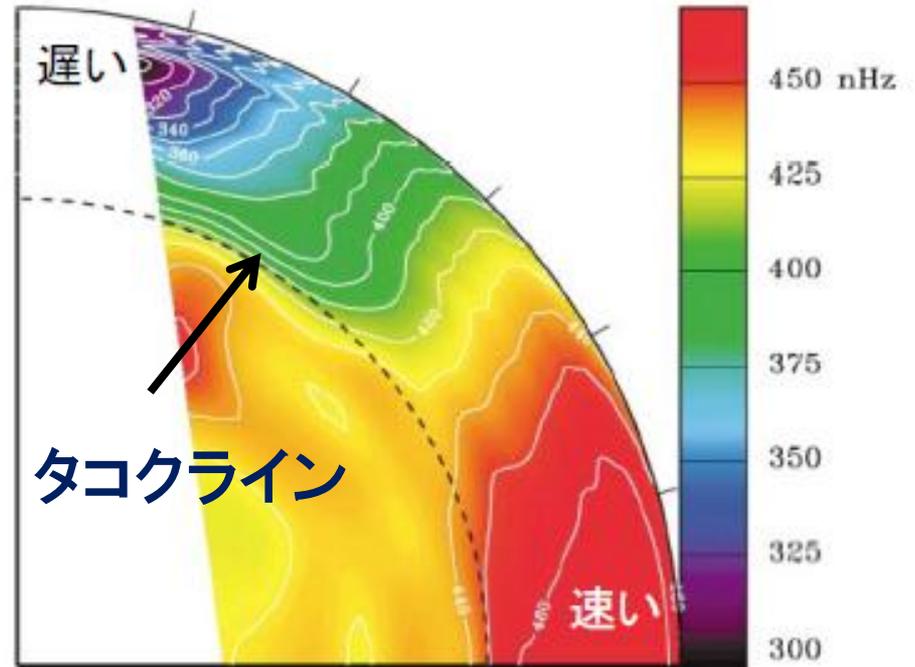
太陽ダイナモ

- ダイナモ:ガスの運動エネルギーを磁気エネルギーに変換する機構
- 太陽ではダイナモ機構が太陽の磁場活動を駆動していると考えられている(太陽ダイナモ)

太陽内部の角速度分布



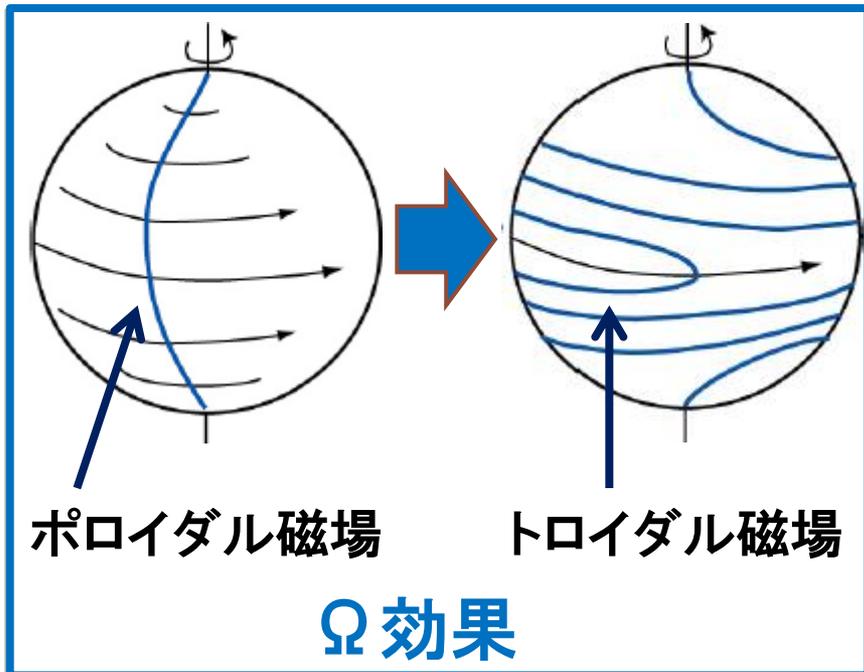
赤道付近は極より早く自転(差動回転)



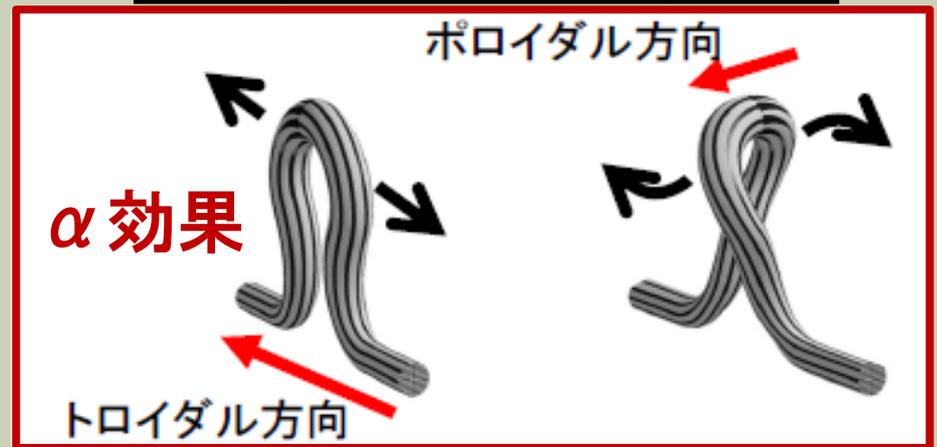
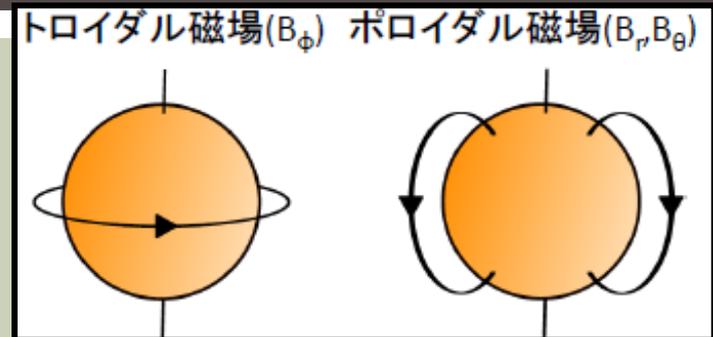
差動回転 Thompson et al. 2003

対流層の底付近に薄い角速度勾配層(タコクライン)が存在

太陽ダイナモのメカニズム

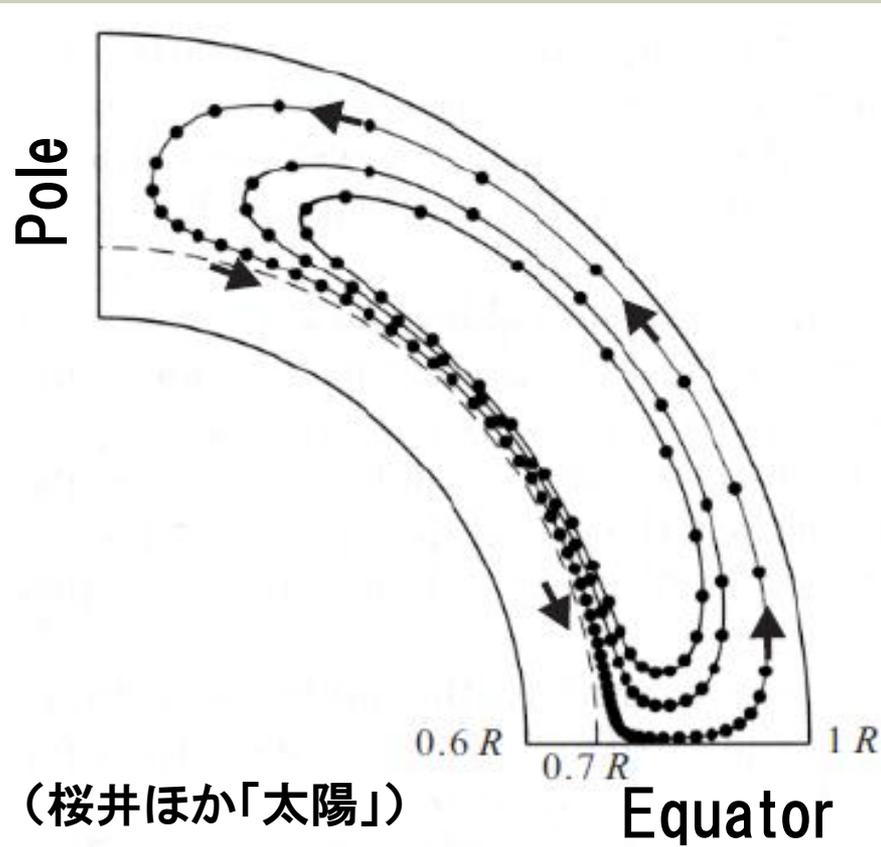


Ω 効果: 差動回転により磁場を引き伸ばし、タコクラインでポロイダル磁場からトロイダル磁場を作る



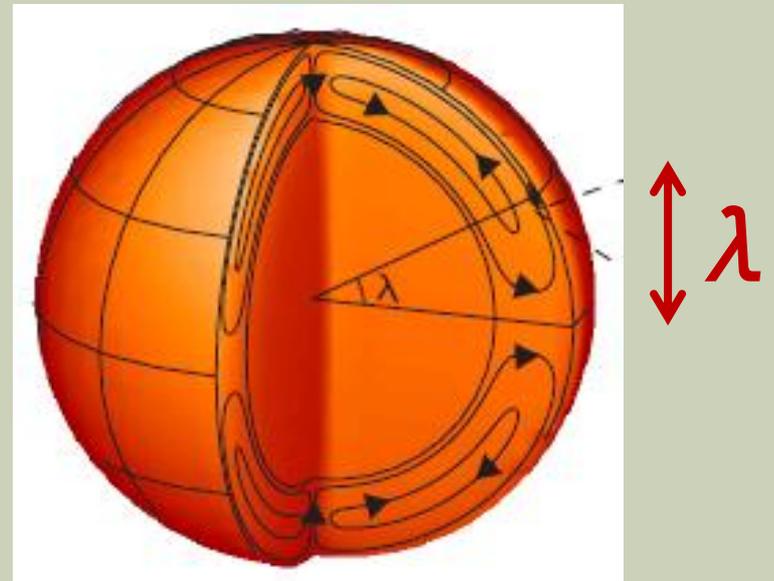
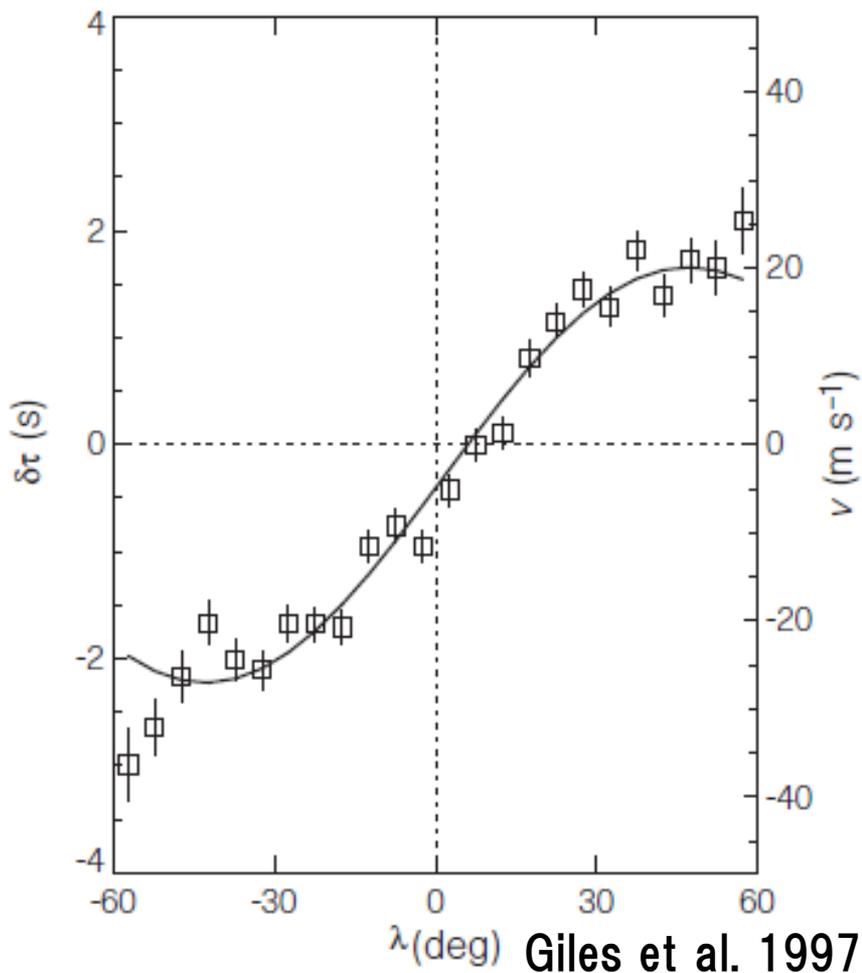
α 効果: 磁束管が浮上する際にコリオリ力によってトロイダル磁場からポロイダル磁場を作る 7

子午面環流



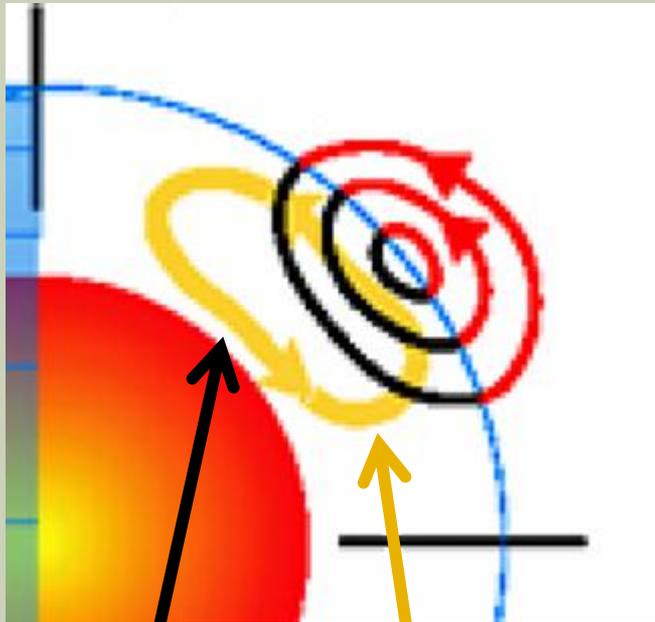
- ドップラー観測や日震学などから、太陽表面で**極に向かう 20m/s ほどの流れ**があることが判明 (Haber et al. 2002, Giles et al. 1997)
- 太陽内部での流れはまだ分かっていないが、質量保存から対流層の底では赤道に向かう流れが予想される(**子午面環流**)

子午面環流速度



Giles et al. 1997 による子
午面環流速度の観測
おおむね $\sim 20\text{m/s}$

磁束輸送ダイナモモデル



タコクライン 子午面環流
磁束輸送モデル
(Dikpati & Charbonneau
1999)の概略図

- Ω 効果によって生成したトロイダル磁場は赤道付近で浮上し、 α 効果でポロイダル磁場を生成
- 生成したポロイダル磁場は子午面環流や拡散によってタコクラインへ輸送され、次の Ω 効果や黒点の種となる
- 極域で観測される磁場は次の太陽周期に現れる黒点の種
- 極域を観測 → 太陽周期活動の理解

磁束輸送ダイナモの問題点

- 磁束輸送ダイナモでは、 Ω 効果で生成したトロイダル磁場強度が「 10^5G 」よりも小さい場合、タコクラインでの磁場強度が弱く

① コリオリ力によって高緯度に浮上
(Choudhuri and Gliman 1987)

② 表面に浮上した際の**先行黒点**と**後行黒点**の東西方向からの傾きが大きくなる(図1) (Caligari et al. 1995)

等、**観測と合致しない**

→この問題を解決する手立てとなりうる構造が太陽極域で観測

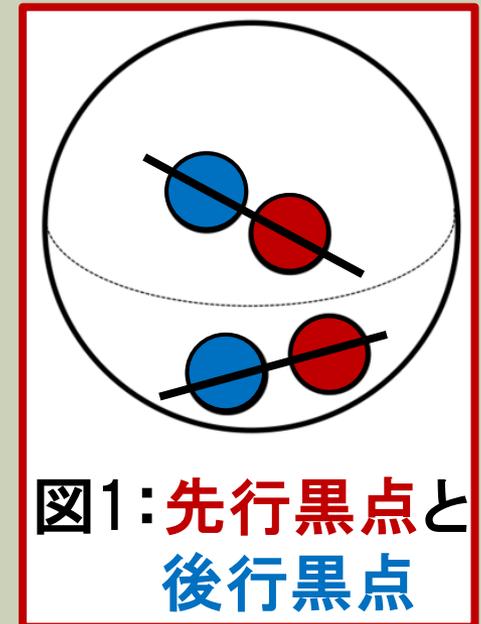


図1: **先行黒点**と**後行黒点**

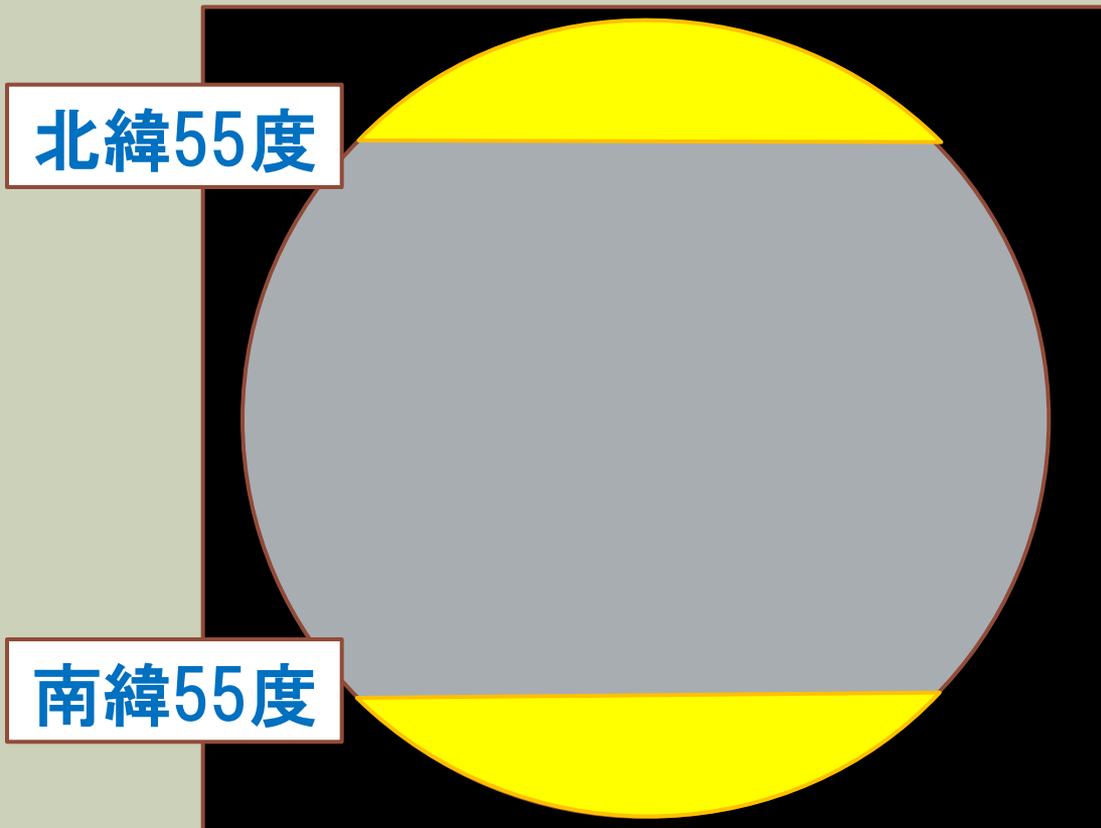
論文紹介①

THE MAGNETIC LANDSCAPE
OF THE SUN'S POLAR REGION

太陽極域の磁場描像

S.TSUNETA ET AL. 2008
ASTROPHYSICAL JOURNAL, 668, L1374

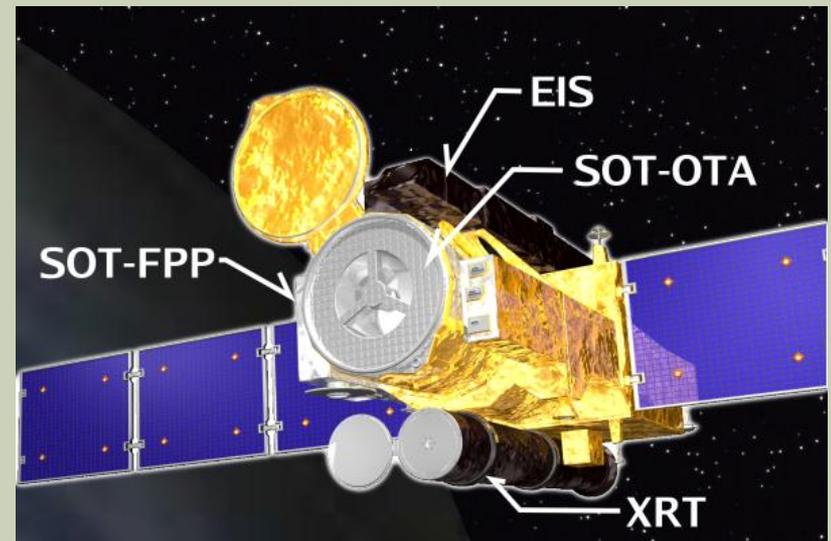
従来の極域磁場観測



従来の極域磁場観測：緯度55度より極域全体で平均

太陽観測衛星「ひので」

- 可視光・磁場望遠鏡 (SOT: Solar Optical Telescope) により、高い空間分解能(0.2~0.3秒角, 150~220km)で極域の詳細な磁場ベクトルの観測が可能

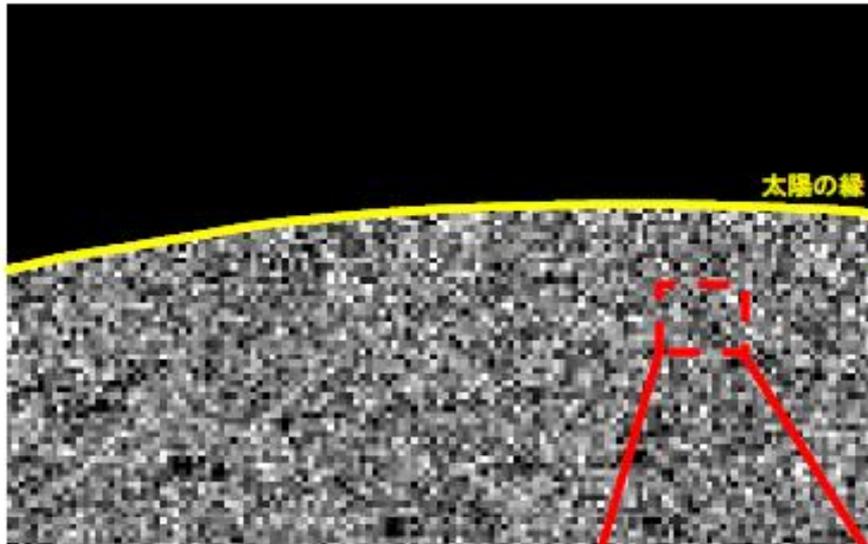


太陽観測衛星「ひので」
2006年9月打ち上げ

画像:

[http://hinode.nao.ac.jp/news/120419Press
Release/](http://hinode.nao.ac.jp/news/120419PressRelease/) 国立天文台 提供

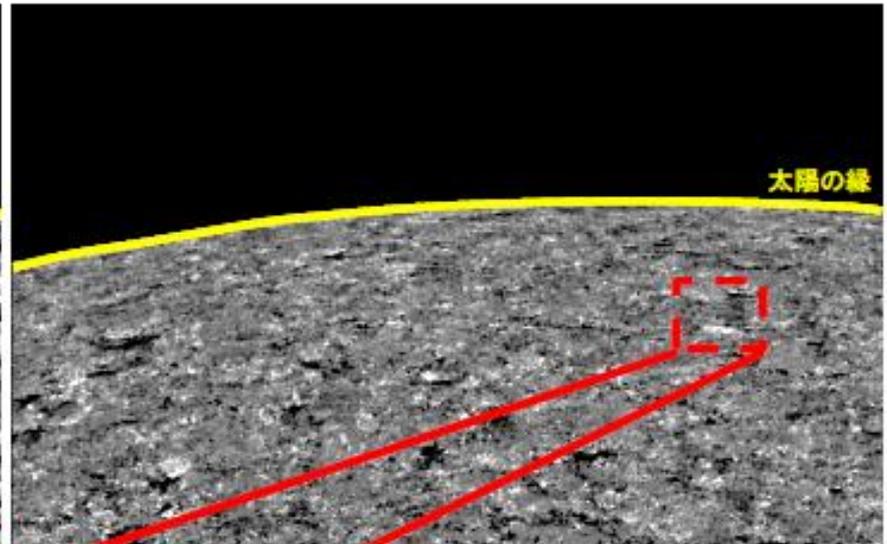
「ひので」の高分解能



SOHO衛星

空間分解能: 2秒角

ほとんど構造が見分けられない



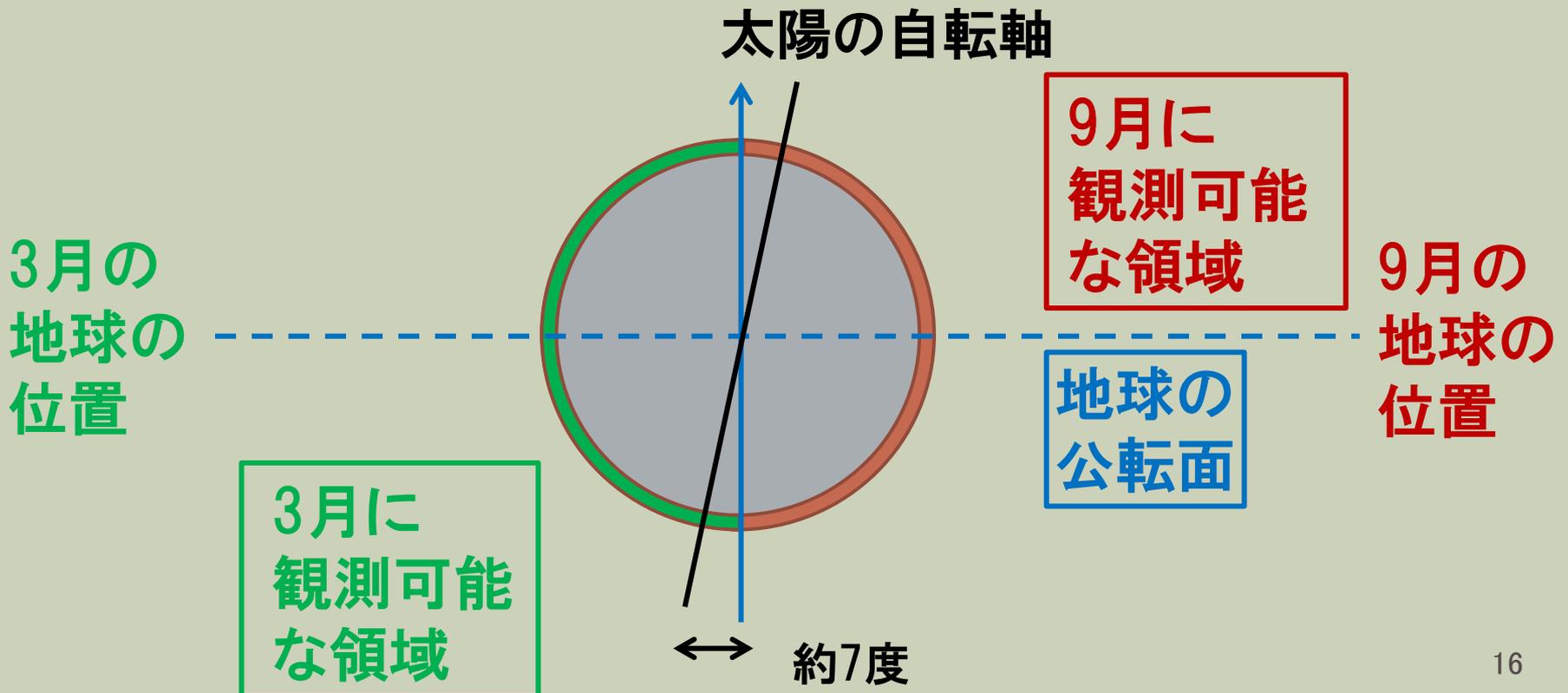
「ひので」衛星
可視光・磁場望遠鏡

空間分解能: 0.2秒角

鮮明に構造を分解している

「ひので」による極域観測

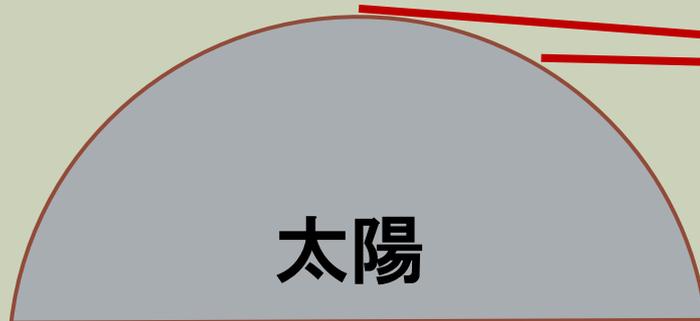
- ・太陽の自転軸は、地球の公転軸に対して7度傾いている
- ・3月頃に南極が、9月頃に北極が観測しやすくなる



観測内容

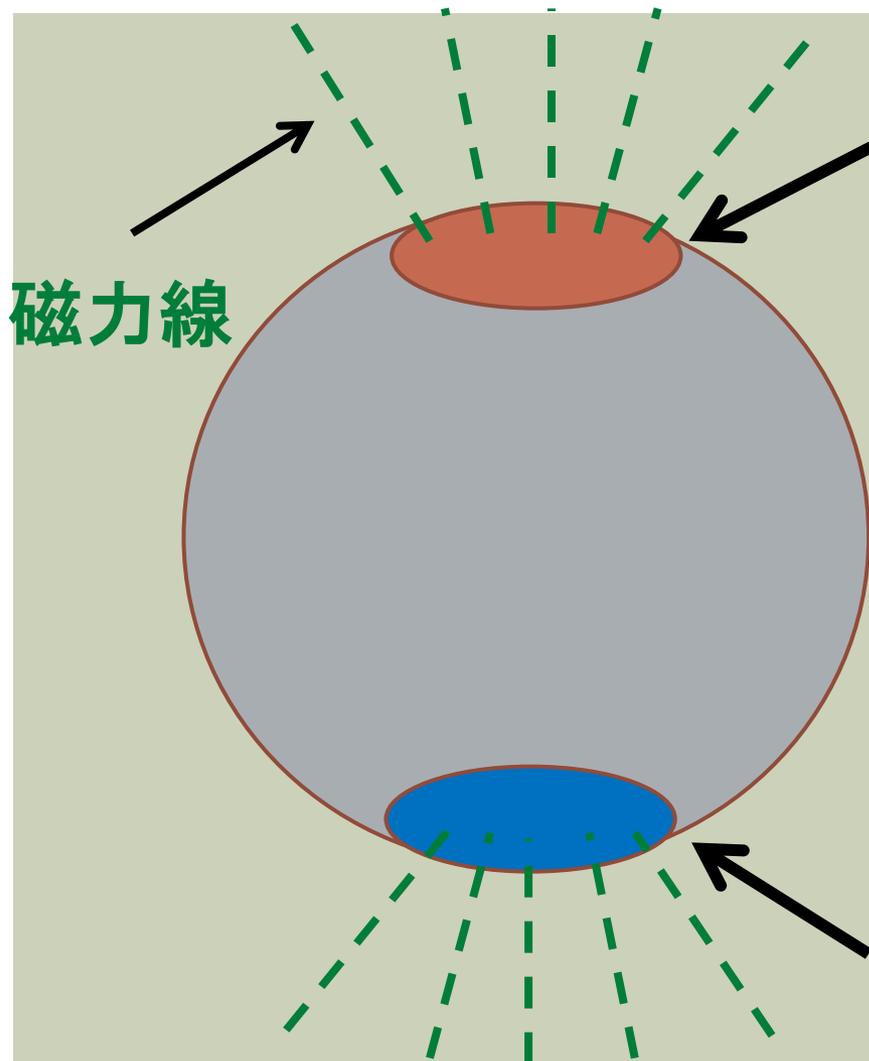
- 「ひので」の可視光・磁場望遠鏡(SOT)により2007年5月に太陽極域を観測し、極域のベクトル磁場分布を求める

極域を観測



「ひので」

極域磁場：これまでの考え



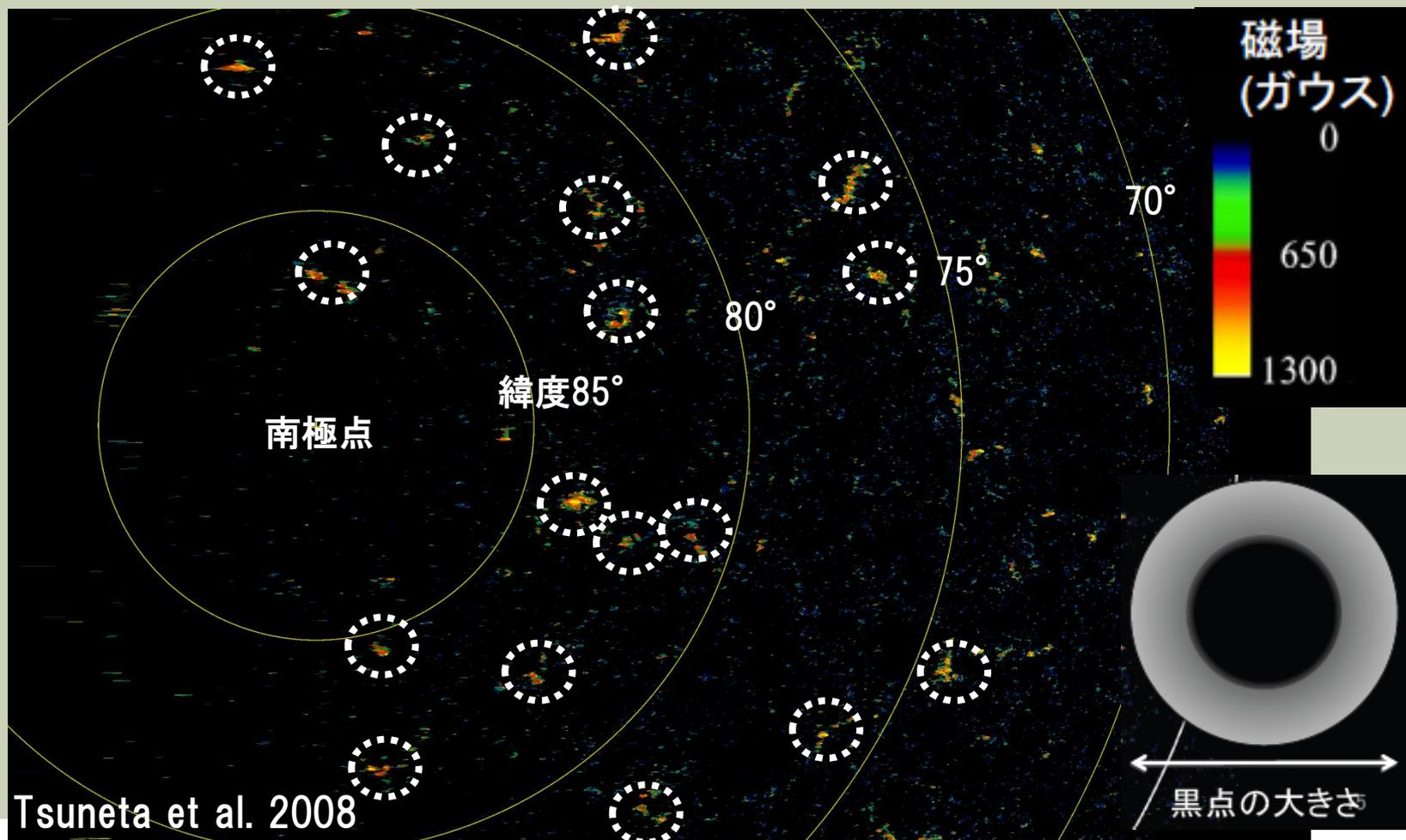
弱いN極の磁場で
覆われている極

これまでの極域の考え：
極域付近は一様な弱い磁
場(～10G)で覆われている

弱いS極の磁場で
覆われている極

「ひので」による極域磁場観測： 磁場パッチの発見

太陽極域に磁場パッチ(強磁場斑点)が点在

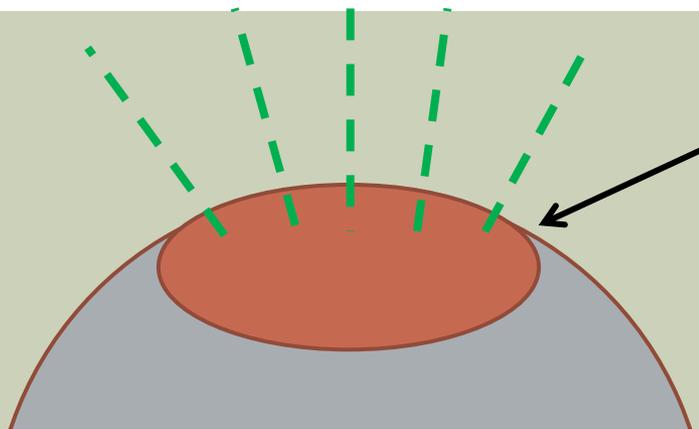


磁場パッチの特徴

	極域の磁場パッチ	黒点
発生領域	北極および南極付近	中緯度帯 (緯度40度以下)
磁場強度	~1kG	1kG以上
大きさ	約4000km (黒点の10分の1以下)	4万~6万km以上
磁場の極性	<ul style="list-style-type: none">・極によって極性が異なる・同じ極域では一方の極性のみ	多くの場合N極とS極の両方が同時に現れる
寿命	約10時間	数日~数か月

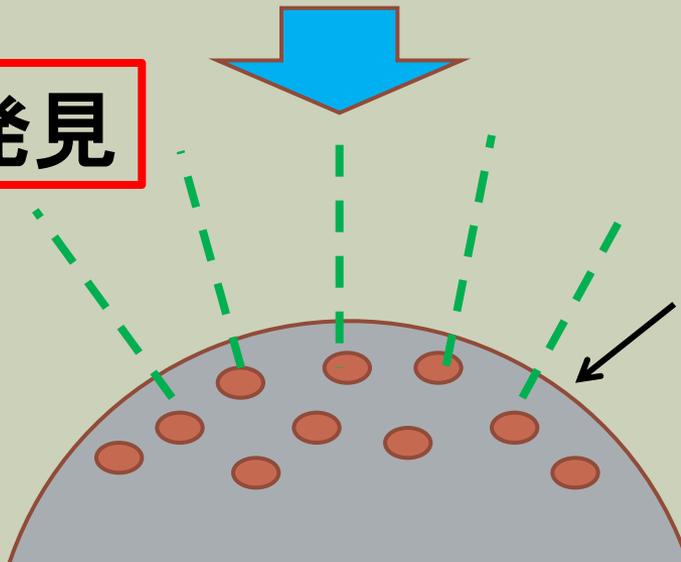
極域磁場のパラダイムシフト

これまでの理解



極付近は一様な弱い磁場($\sim 10\text{G}$)で覆われている

ひのけによる発見



小さく、黒点と同程度の磁場強度($\sim 1\text{kG}$)を持った磁場パッチが点在

磁束輸送ダイナモの問題点と磁場パッチ

- **一様な弱磁場($\sim 10\text{G}$)**で極が覆われている
従来の考えでは、「 **10^5G** 」のトロイダル磁場強度を実現することができない
- 磁場パッチは一様な弱磁場と比べて、強い磁場強度(**$\sim 1\text{kG}$**)を持つ
- この強い磁場構造を用いることで、1太陽周期内(~ 10 年)で Ω 効果によって「 **10^5G** 」のトロイダル磁場強度を実現できる可能性がある(Choudhuri 2003)

磁場パッチによる 10^5 Gの磁場の実現

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r v_r B_\phi) + \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta B_\phi) \right] = \eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{s^2} \right) B_\phi + \boxed{s(\mathbf{B}_p \cdot \nabla) \Omega} - \nabla \eta \times (\nabla \times B_\phi \mathbf{e}_\phi),$$

トロイダル成分の
発展を表す式
 $s = r \sin \theta$

Choudhuri 2003

**ポロイダル磁場からトロイダル磁場を
生み出す項**

タコクラインで生成されるトロイダル磁場は
 $B_\phi \approx s(\mathbf{B}_p \cdot \nabla) \Omega \tau$ τ : 磁場の引き伸ばし時間

差動回転が主にタコクラインで起こるとすると、

$$\frac{B_\phi}{B_r} \approx \mathbf{s} \frac{\Delta \Omega}{\Delta r} \tau$$

磁場パッチによる 10^5 Gの磁場の実現

タコクラインでは

Ω : 2150nHz(top)、2800nHz(bottom)

$\Delta\Omega \approx 650$ nHz、 $s \approx 0.5R_{\odot}$ 、 $\Delta r \approx 0.1 R_{\odot}$ 、 $\tau \approx 10$ yrとすると

$\frac{B_{\phi}}{B_r} \approx 1000$ (最大値、実際はもっとreasonableな値をとる)

一様磁場($B_r \sim 10$ G)ではポロイダル磁場は $B_{\phi} \sim 10^4$ Gしか生成されないが、**磁場パッチ**($B_r \sim 10^3$ G)の考えを用いることで、 $B_{\phi} \sim 10^5$ Gを実現できる可能性がある。

まとめ

- 「ひので」による観測から、太陽極域では**1kG**程度の磁場強度を持った「磁場パッチ」が点在していることが判明
- 極域は一様な弱い磁場で覆われているという従来の考えを改めるものとなった
- 「磁場パッチ」の構造は、磁束輸送ダイナモでの「 10^5 G」磁場の解決の手立てとなりうる

論文紹介②

POLAR FIELD REVERSAL OBSERVATIONS WITH *Hinode*

「ひので」による極域磁場反転の 観測

D.SHIOTA ET AL. 2012
ASTROPHYSICAL JOURNAL, 753, 157

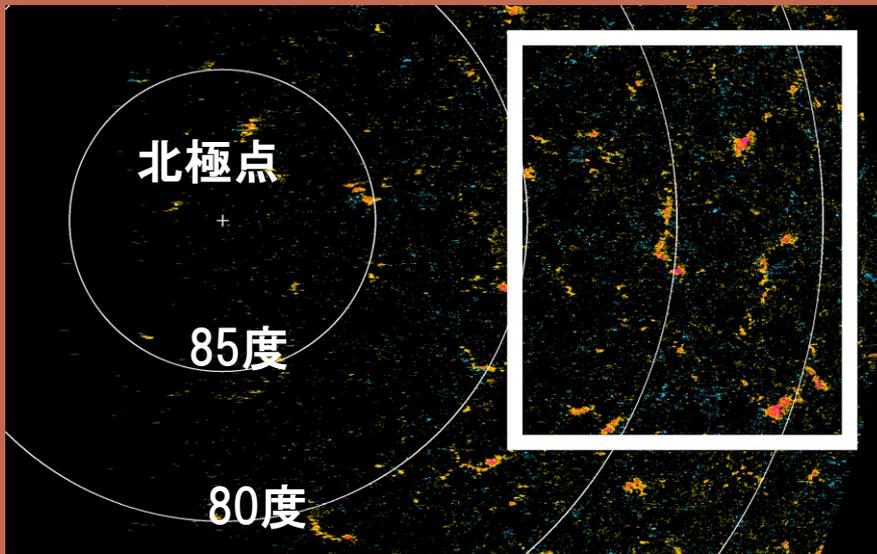
観測内容

- 「ひので」の可視光・磁場望遠鏡(SOT)により2008年9月から太陽極域を**長期観測**し、ベクトル磁場分布を求める
- 磁場パッチの極性と磁束の分布を求める

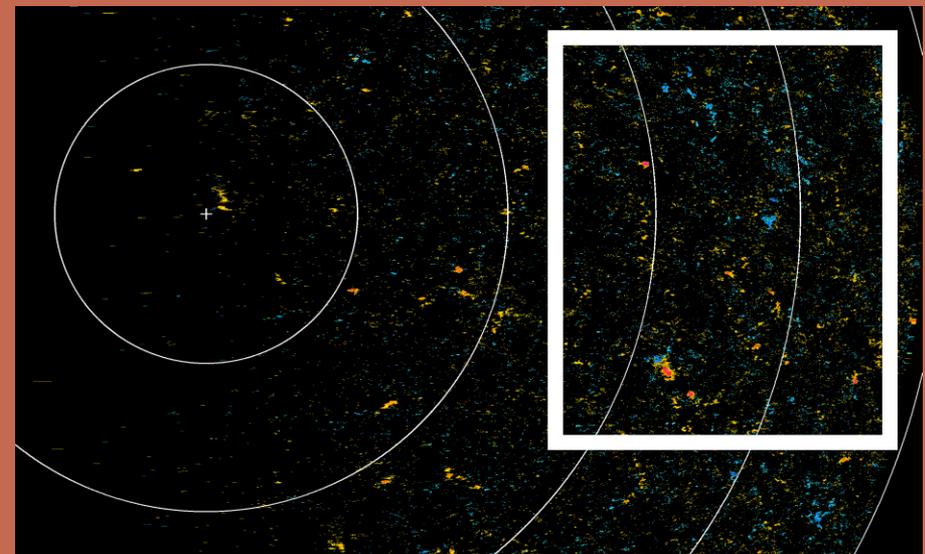
北極域の磁場の様子

北極

負極←磁場→正極



2008年



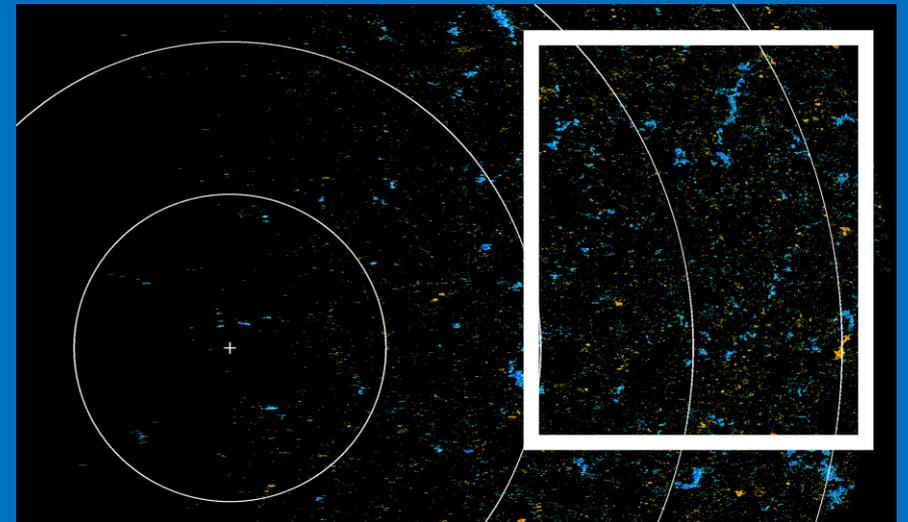
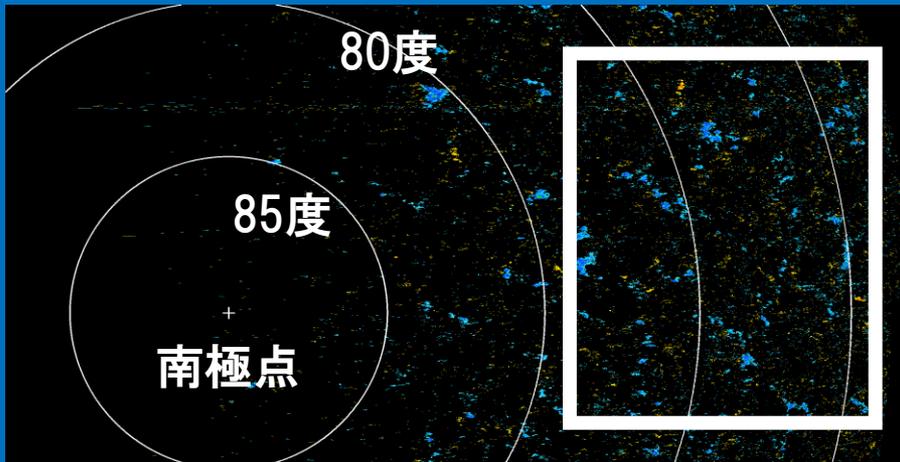
2011年

- ・**負極性**の磁場パッチの数が減少し、**正極性**の磁場パッチが現れる

南極域の磁場の様子

南極

負極←磁場→正極



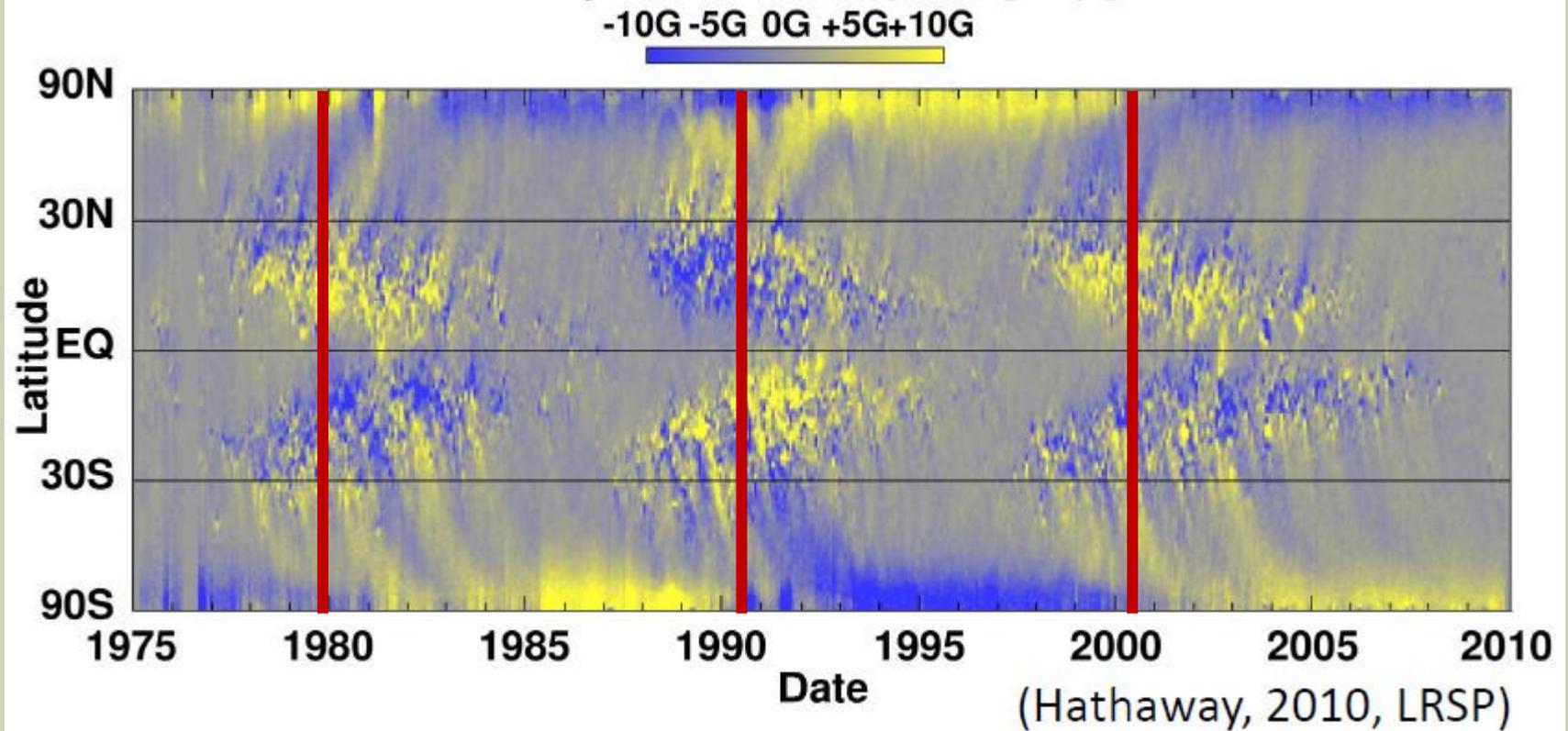
2009年

2012年

- ・ **正極性**の磁場パッチの量はほとんど変化がない
- ・ **負極性**の磁場パッチはほとんど現れていない

画像：<http://hinode.nao.ac.jp/news/120419PressRelease/> 国立天文台 提供 29

従来の極域磁場反転



従来の極域磁場反転

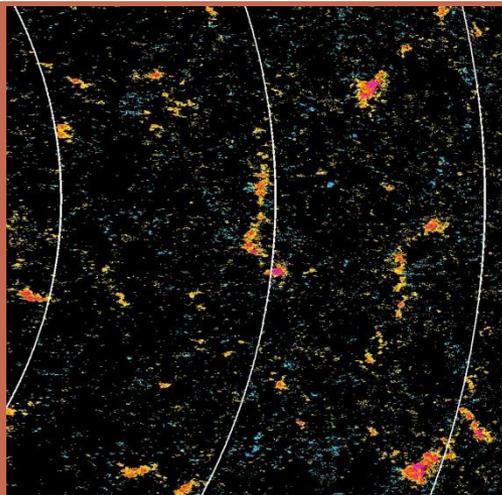
→ 両極がほぼ同時に反転

極域磁場の非対称な反転

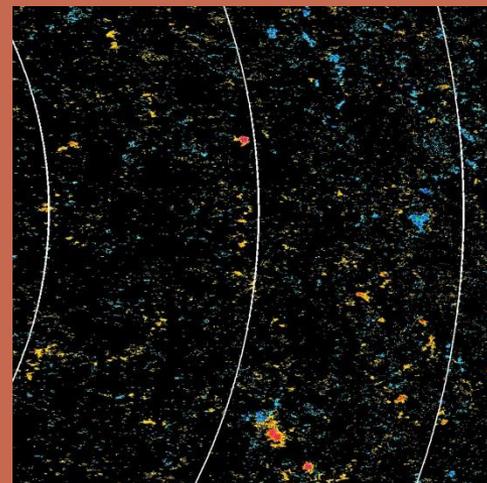
負極 ← 磁場 → 正極

北極

2008年

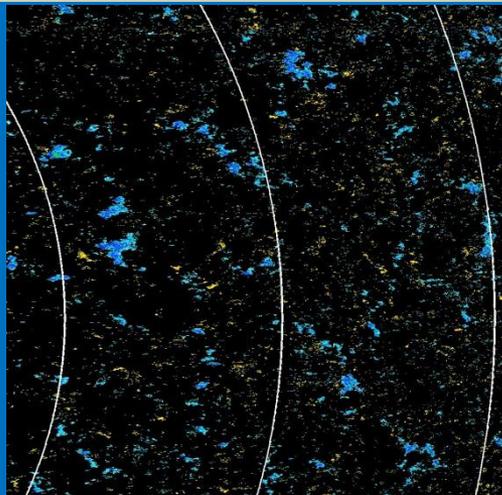


2011年

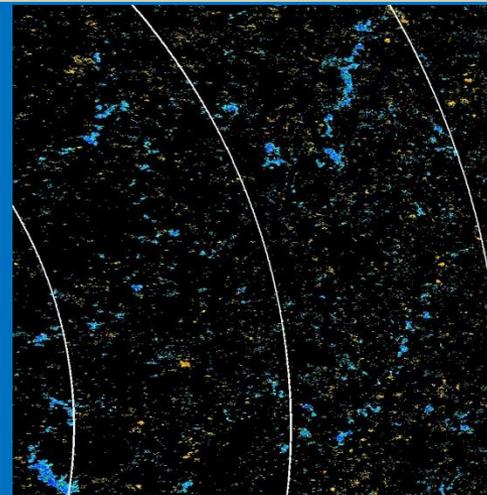


南極

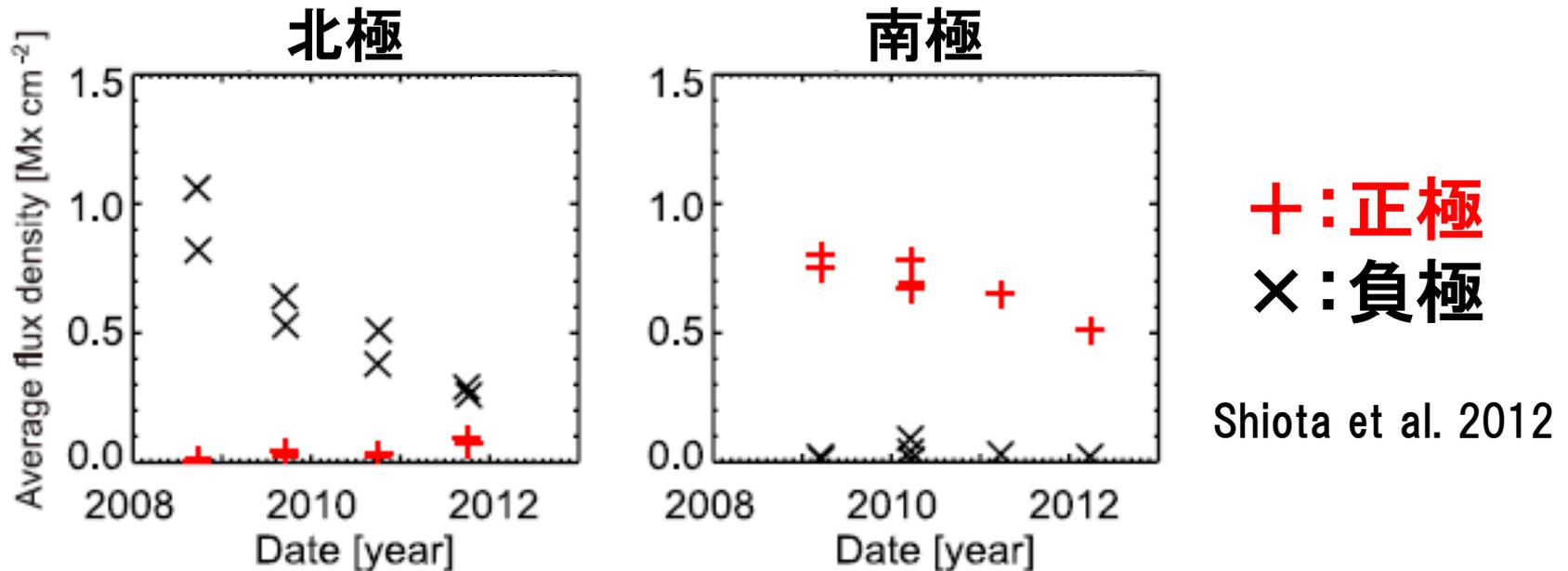
2009年



2012年



極域の平均磁束密度の変化



- ・北極の負極の磁場パッチが急速に減少
- ・北極では**正極**の磁場パッチが現れ始める
- ・南極は極性の反転の傾向がほとんど見られない

まとめ

- 「ひので」により**太陽極域の磁場構造を分解し、磁場パッチの極性反転の様子を捉えた**
- 太陽の**北極域では負極性の磁場パッチが減少し、正極に反転していく**様子が観測されたが、**南極域では磁場パッチに顕著な変化は見られず**安定な状態を保っており、太陽の基本対称性が崩れている

今後の展望

- 極域では次の太陽周期での黒点の種となる磁場が観測
 - 極域磁場を観測することで、今後の太陽活動の予想が得られる
- 現在の太陽は極により磁場反転が異なる
 - 太陽内部の様子が変化している可能性
 - 極域での反転の様子を観測することで手がかりを得たい