

黒点暗部微細構造に関する 観測的研究

京都大学 物理学・宇宙物理学専攻
修士2年 渡邊 皓子

黒点暗部微細構造に関する 観測的研究

京都大学 物理学・宇宙物理学専攻
修士2年 渡邊 皓子

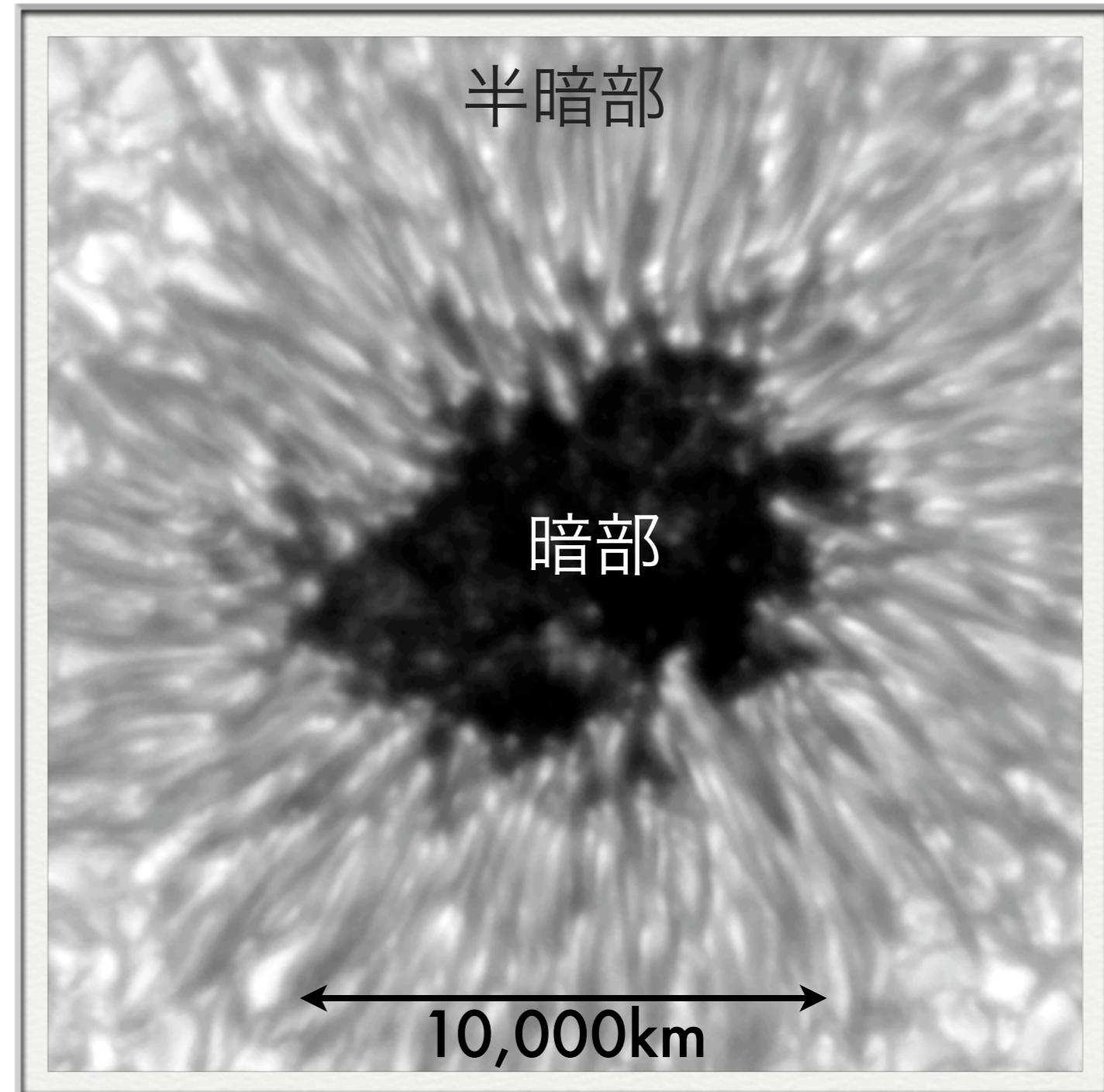
これまでに行なった研究

- Ellerman Bombと磁場の関係
- 太陽フレアにおけるCa II K線の時間変化
- Ly α ロケット実験における偏光観測装置
- Umbral Dotの統計解析

Introduction

■ Umbral dot (UD)

サイズ	200 - 400 km
寿命	5-40 分 典型的には10 分
固有運動	peripheral: 0.5-1km/s で暗部中心方向 central: なし
磁場強度	2000-2500 Gauss 周囲より数十Gauss弱い
ドップラー速度	上昇流 30 - 100 m/s

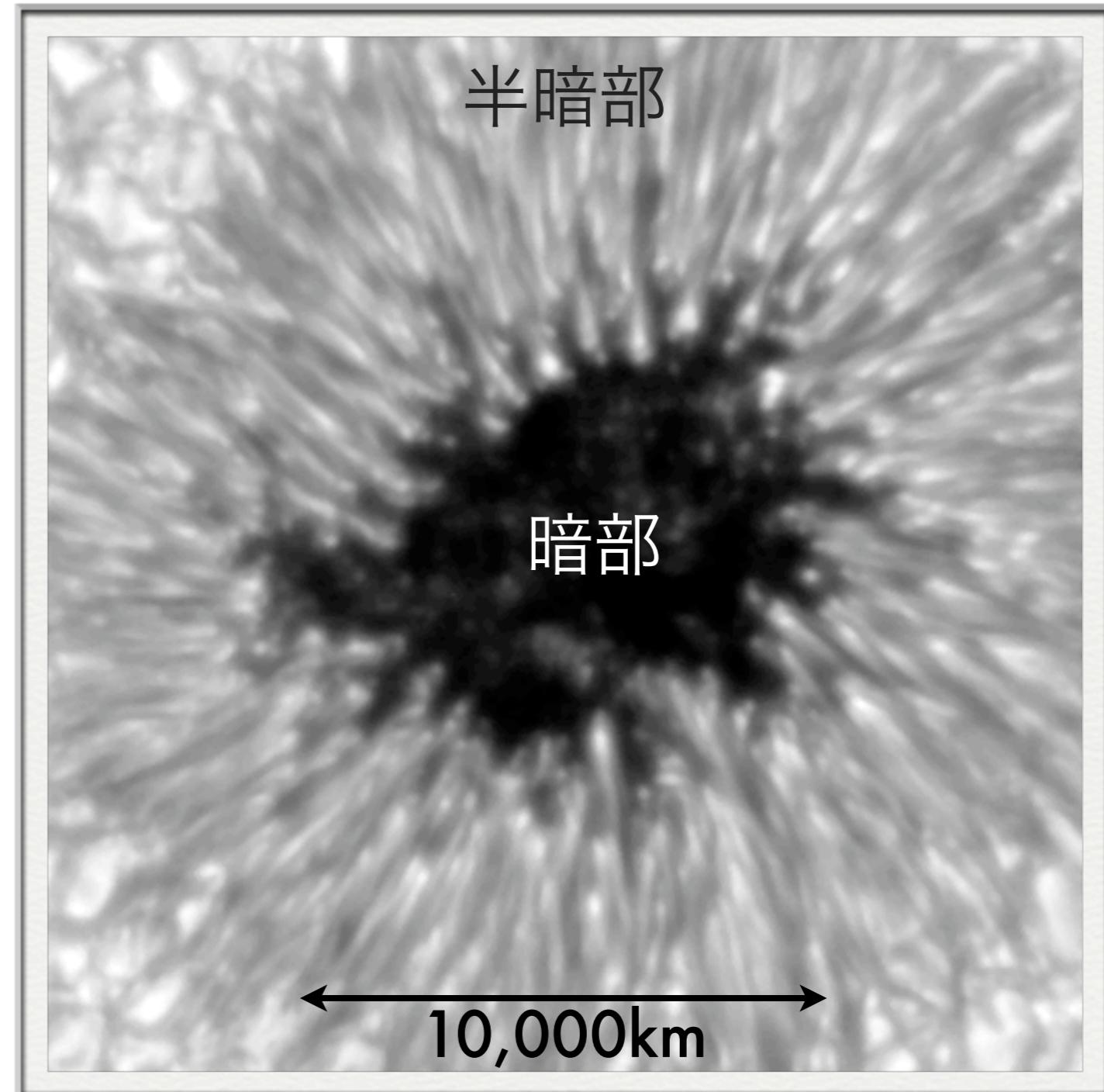


Hinode SOT blue continuum (光球)

Introduction

■ Umbral dot (UD)

サイズ	200 - 400 km
寿命	5-40 分 典型的には10 分
固有運動	peripheral: 0.5-1km/s で暗部中心方向 central: なし
磁場強度	2000-2500 Gauss 周囲より数十Gauss弱い
ドップラー速度	上昇流 30 - 100 m/s



Hinode SOT blue continuum (光球)

Background 1/2

■ 観測

暗部の明るさは
静穏領域の2-3割

暗部の磁場は
最大でも3500Gauss

umbral dot
暗部より500Kほど高温

Danielson (1964), ApJ, 139, 45

■ 理論

磁場によって
対流を抑制

対流が完全に抑制なら
磁場は5000Gauss

磁気対流が
起こっているはず

Deinzer (1965), ApJ, 141, 548

Background 2/2

Beckers & Schröter (1968)

UDのサイズ 150-200km



Kitai (1986) UDの固有運動

central UD... 運動なし

peripheral UD... 約0.4km/sで暗部中心へ



Ewell (1992)

CCDが改良されたころ

UDの寿命 約15分

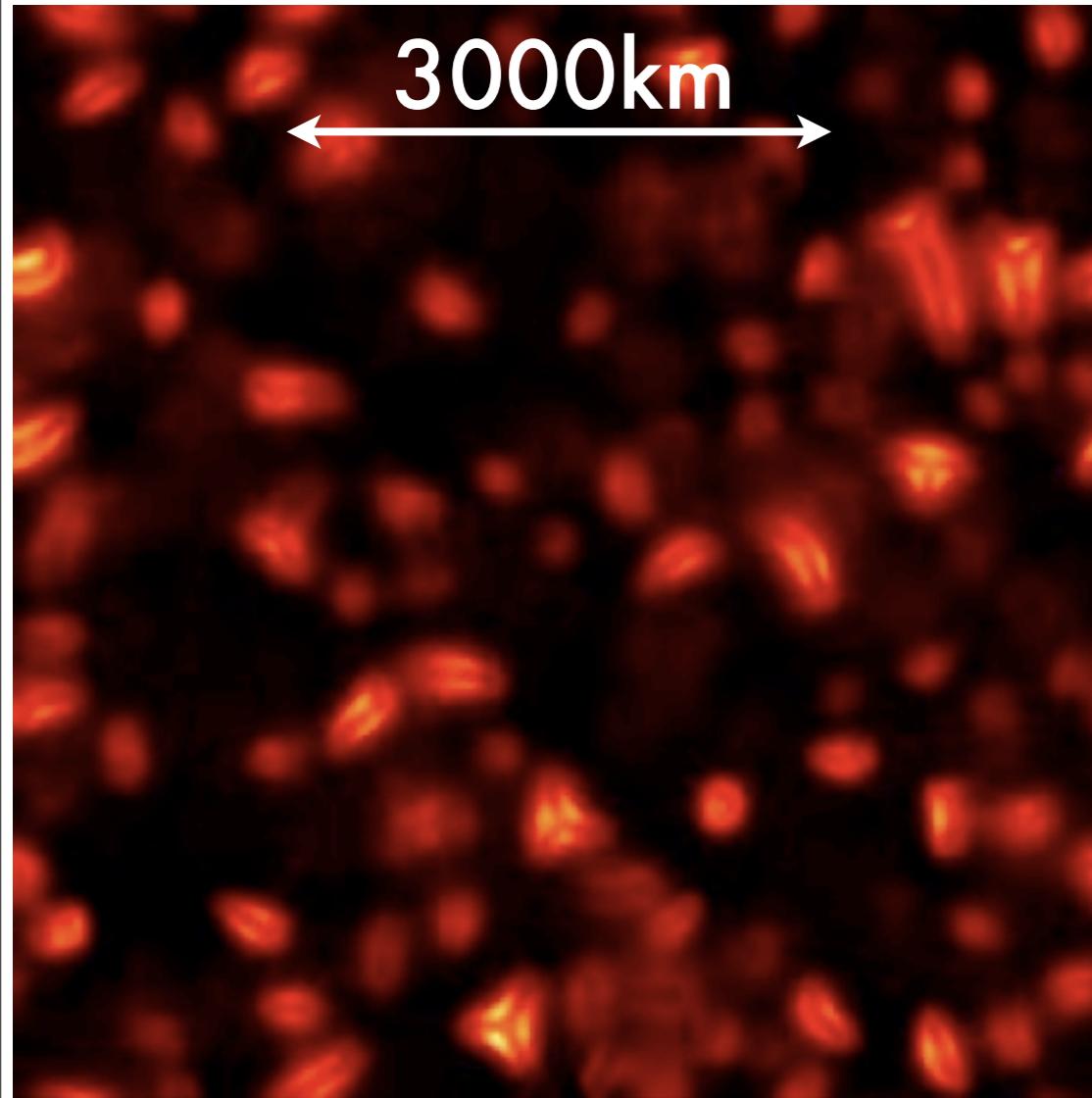
地上観測の制約

- ① seeing
- ② 観測時間

Zwaan (1986)

UDが多い所は磁場が弱い

Recent MHD simulation

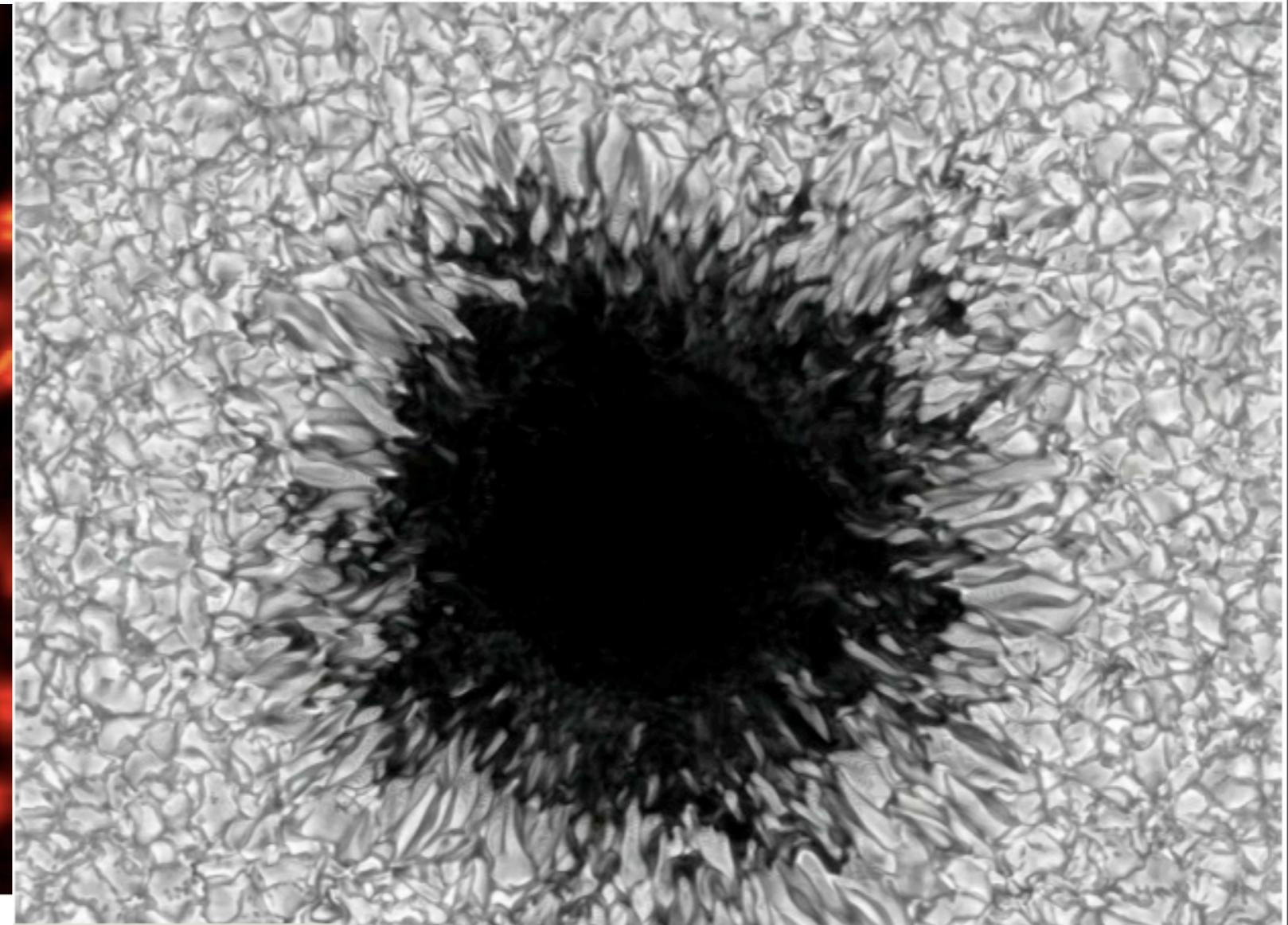


↔Intensity

上: Schüssler&Vögler(2006)

右: Rempel(2008)

磁場強度分布⇒



10,000km
↔



Motivation

- 太陽観測衛星 *Hinode* の高分解能データ
- 磁気対流（磁場と対流の相互作用）
 - ▶ サイズ、寿命、固有運動
 - ▶ 磁場強度、磁場の向き
 - ▶ 磁場と、サイズや寿命との相関
- 3次元MHDシミュレーションとの比較
 - ▶ 黒点の構造
 - ▶ Umbral dotの分類

降着円盤や低温星の物理にも応用可能

修士論文の内容

1. Statistical Survey of Umbral Dots

寿命、サイズ、温度、固有運動を求めた
Umbral Dotのfusion, fissionを報告

→ Kitai et al. (2007), PASJ, 59, 585

2. Magnetic Structure of Umbral Dots

弱い磁場、上昇流を伴う
ライトカーブの振動

→ Watanabe et al. (2009), ApJ, in press

3. Characteristic Dependence of Umbral Dots on their Magnetic Structure

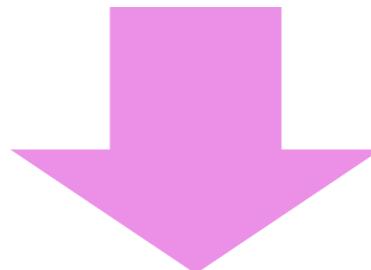
→ Today's talk

Umbral dotの特徴は

磁場とどのような関係をもつ？

Outline

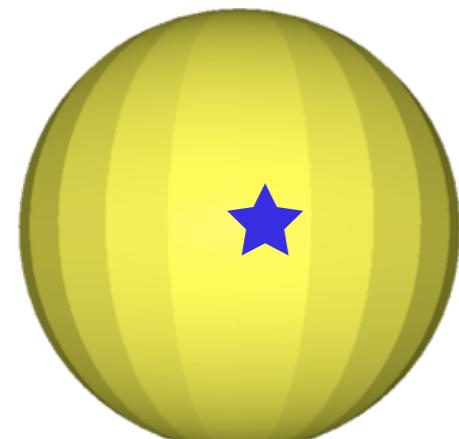
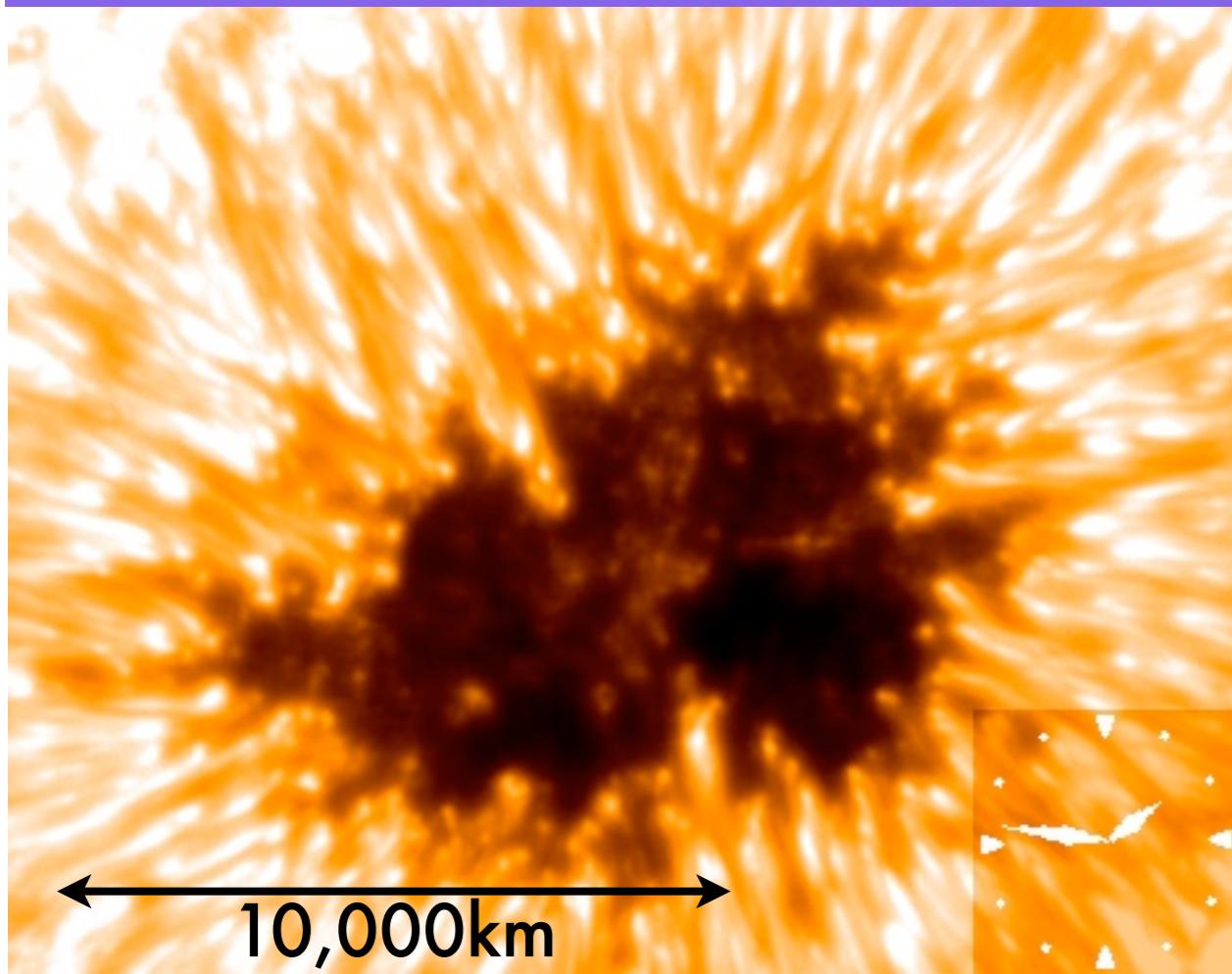
- UDの寿命やサイズ、固有運動をbiasなく検出
 - ▶ automatic detection algorithm
- 分光データから磁場の強度と向き



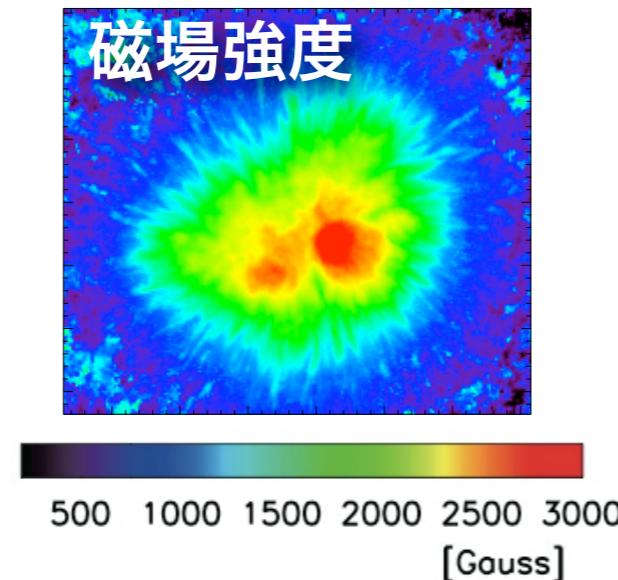
相関関係

磁気対流のパラメーターサーベイ

Data

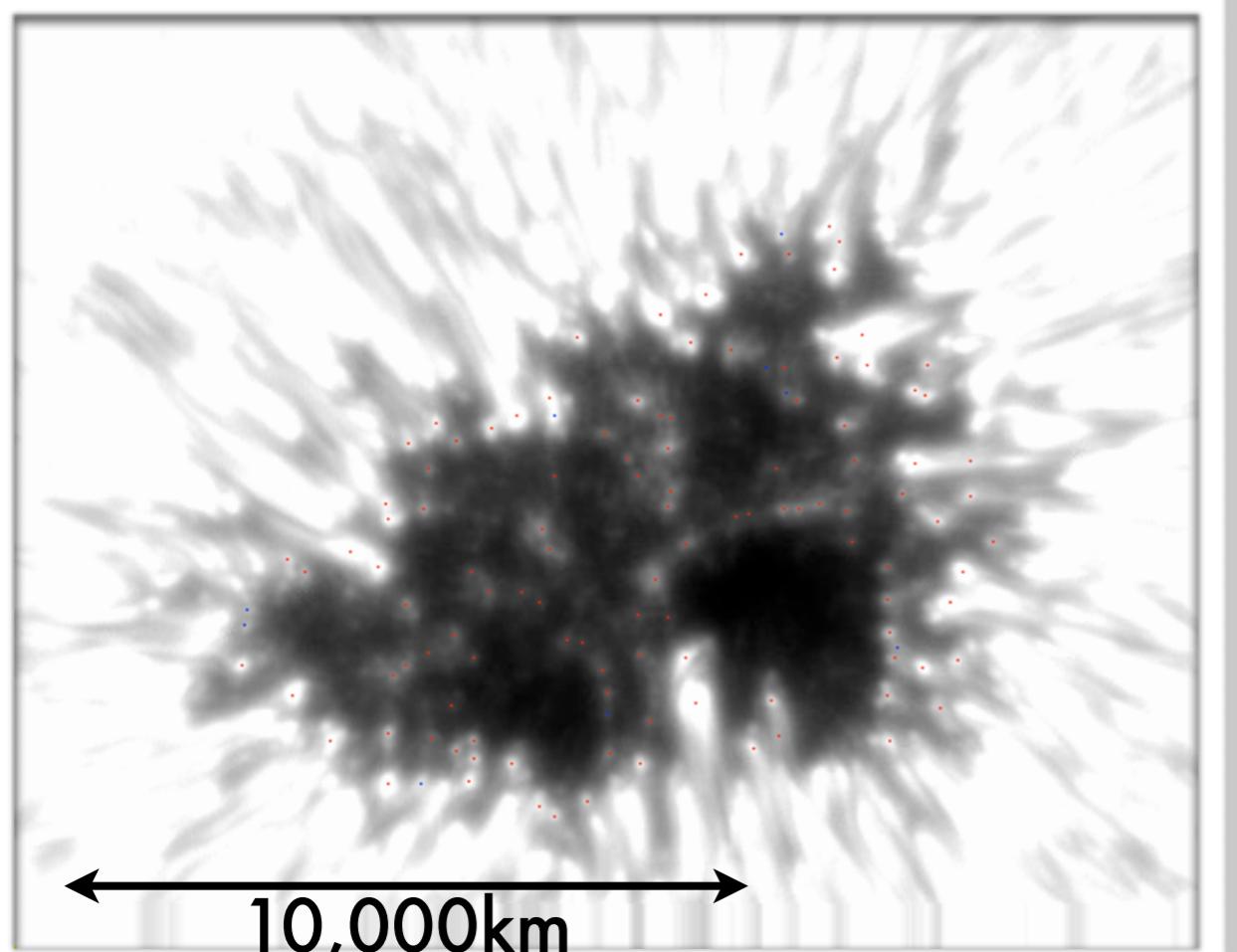


太陽面上での位置



- *Hinode* 可視光望遠鏡
- 2007年3月1日
- 撮像: blue continuum (4505Å)
 - 25秒間隔、約2時間連續
 - pixel size 0.054秒角(40km)
- 分光: Fe I 6302.5Å
 - 20,000km(黒点全体)をスキャンするのに約15分
 - pixel size 0.16秒角(110km)

Analysis 1/2

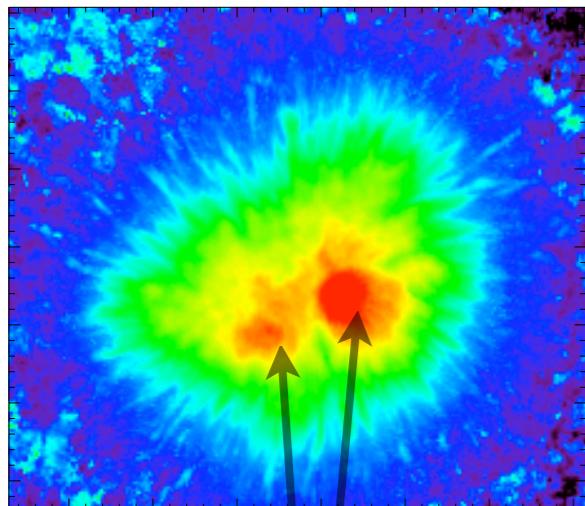


- Umbral dotを自動で検出
 - ▶ 周囲より3割以上明るいpeak
 - ▶ 次のフレームとの連續性

- 検出されたUD 2268個
- UD parameters
 - ▶ 寿命
 - ▶ サイズ
 - ▶ 明るさの比
(peakの明るさと周囲の明るさの比)
 - ▶ 運動の速さ
 - ▶ 運動の向き

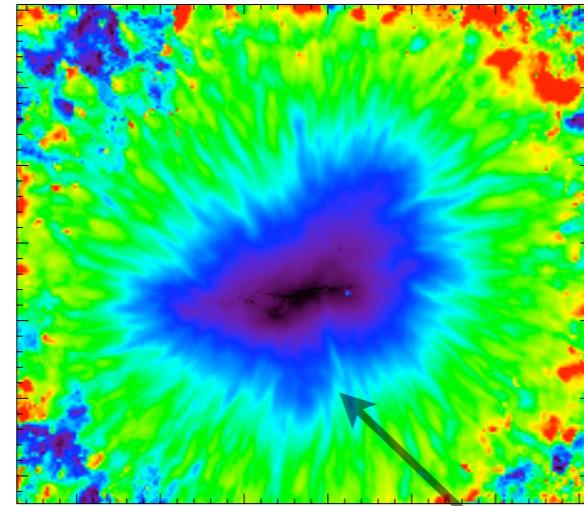
Analysis 2/2

field strength B



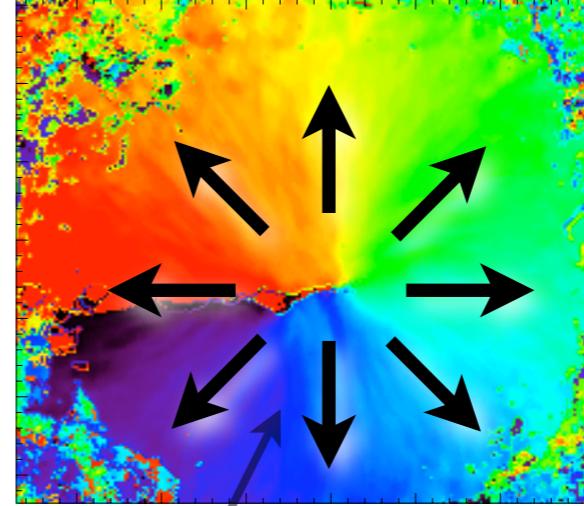
特に磁場の強い所
dark core

field inclination i

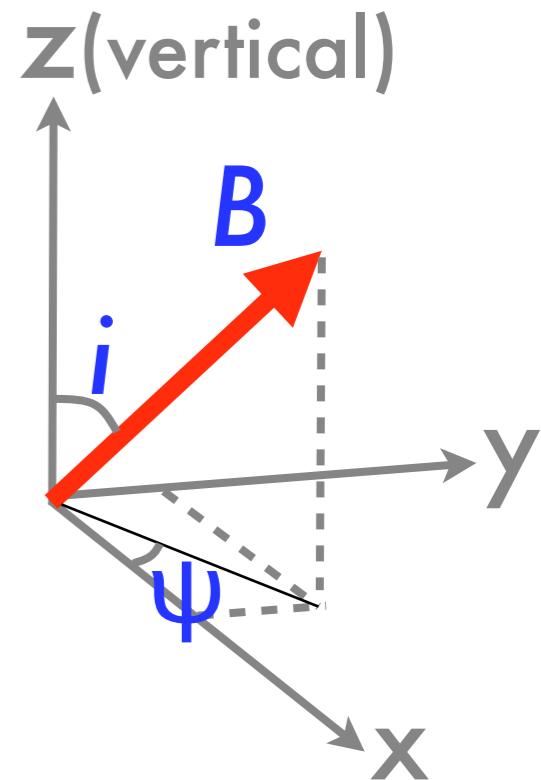


暗部中心から
等方的な分布

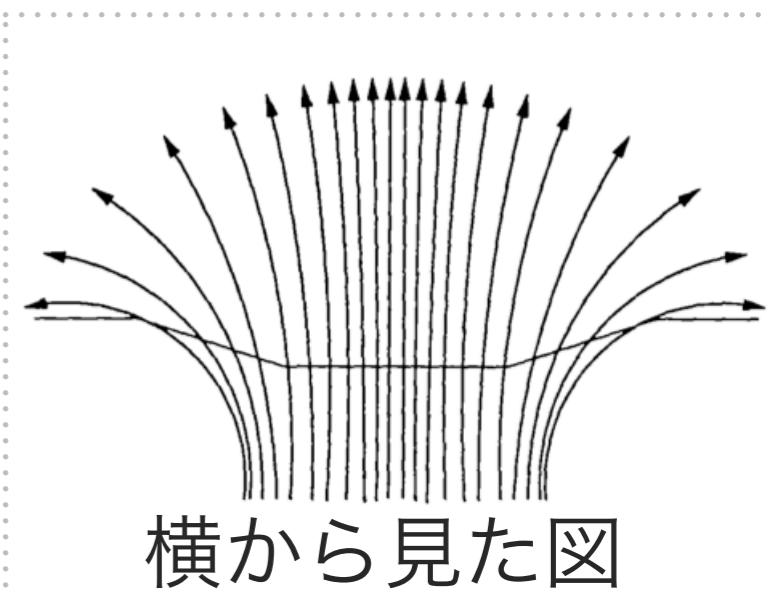
field azimuth ψ



0 100 200 300
[degree]



- Umbral dotの出現位置での磁場
 - ▶ field strength, field inclination, field azimuth

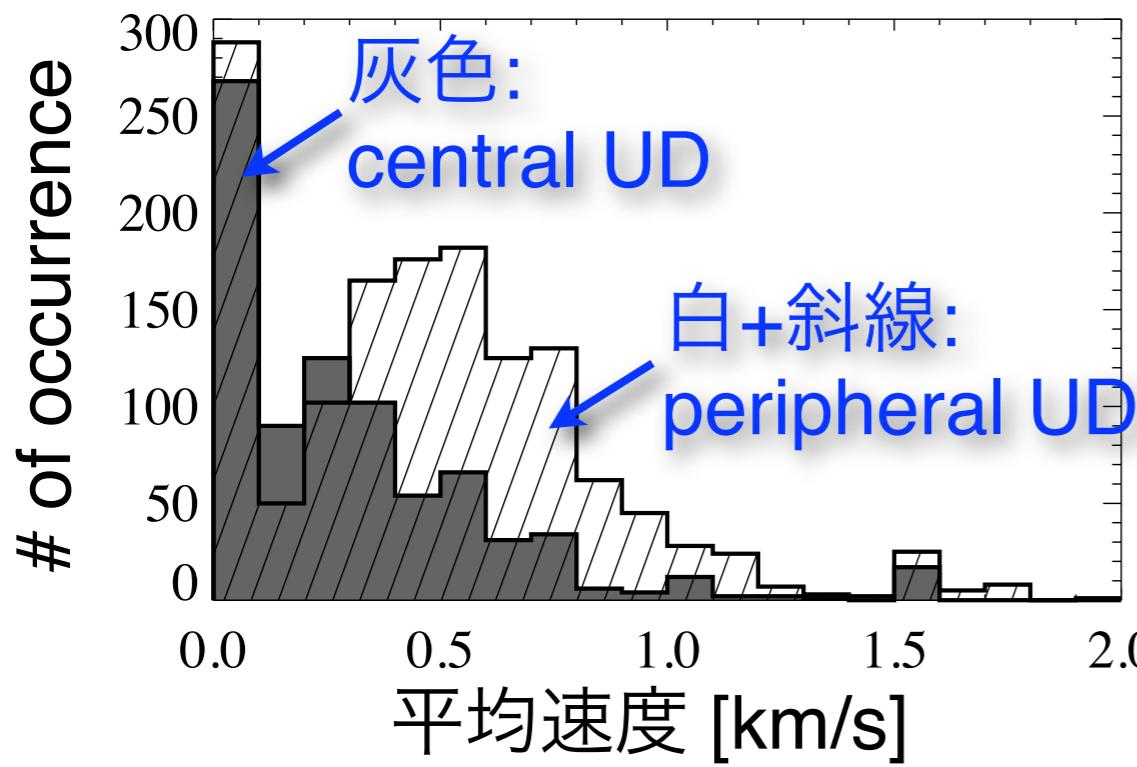
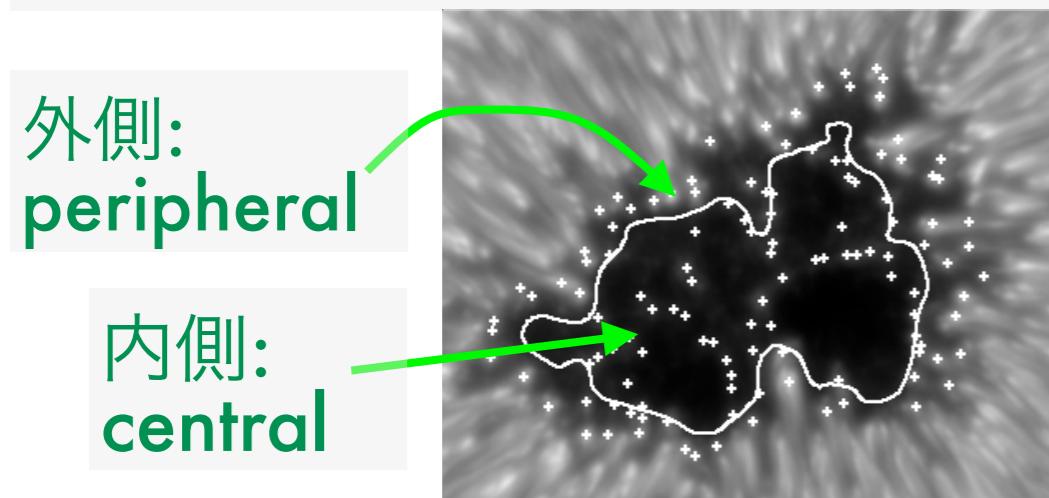


横から見た図

Result 1/4

Histogram

境界は0.2×(静穏領域の明るさ)



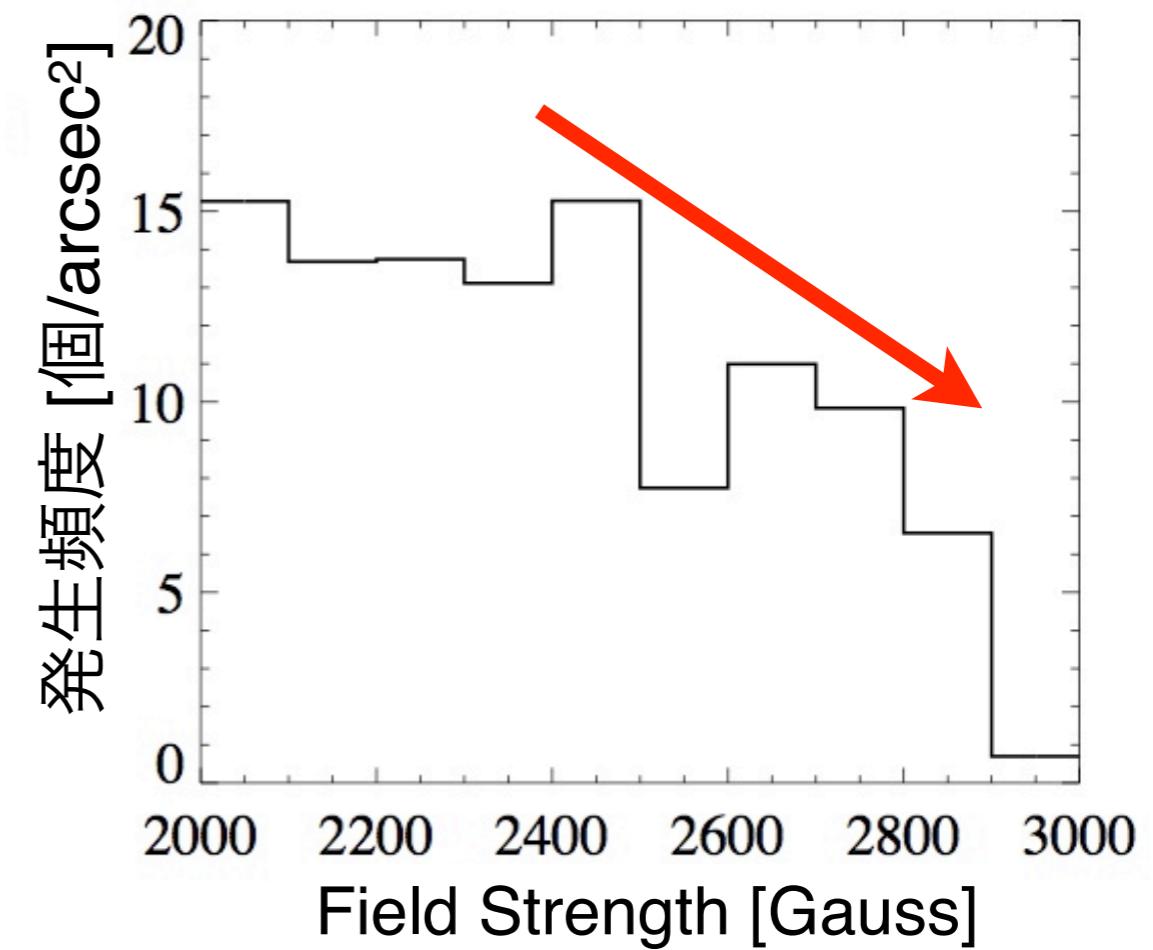
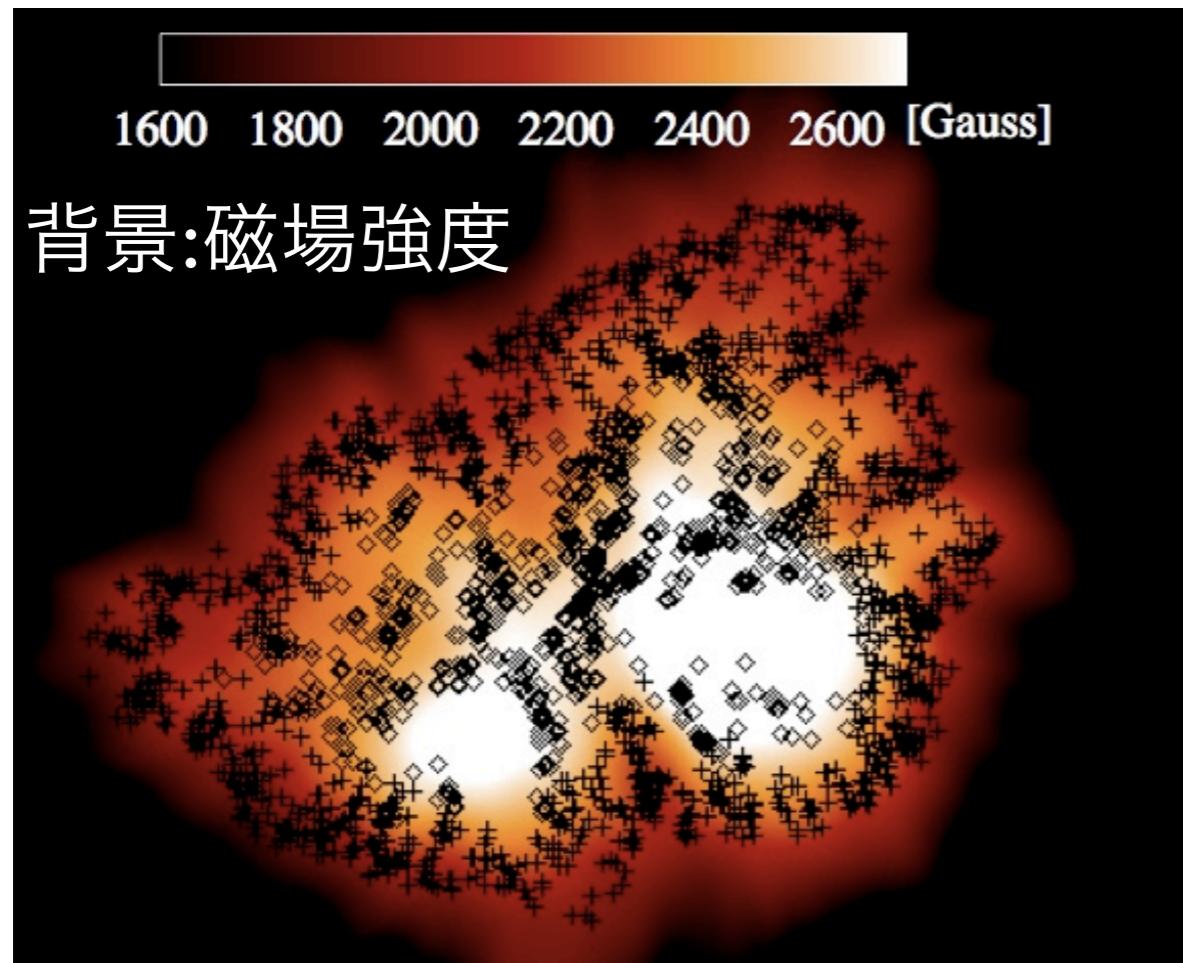
	全体の 平均	central	peripheral
寿命	7.4分	6.5分 < 7.8分	
半径	184km	178km < 187km	
$I_{\text{peak}} / I_{\text{bg}}$	1.73	1.51 < 1.85	
平均 速度	0.44 km/s	0.33 km/s < 0.50 km/s	

これまでの研究
(Kitai et al. 2007) と同じ分布

Result 2/4

■ 空間分布

- ▶ 磁場が強い所にはUDは少ない⇒対流をより強く抑制
- ▶ セル状の構造⇒黒点深部のglobalな構造を反映？



Result 3/4

■ 相関関係

▶ 寿命

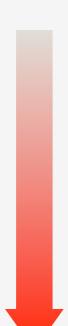
ほとんど変化なし (約10分)

▶ サイズ

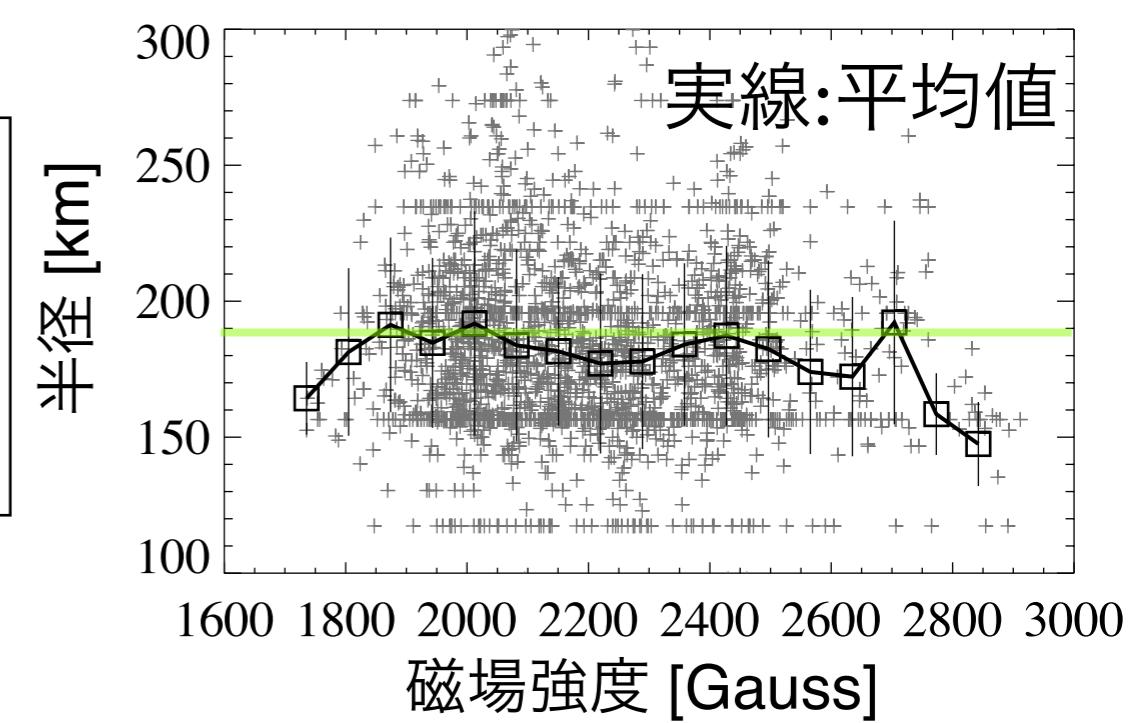
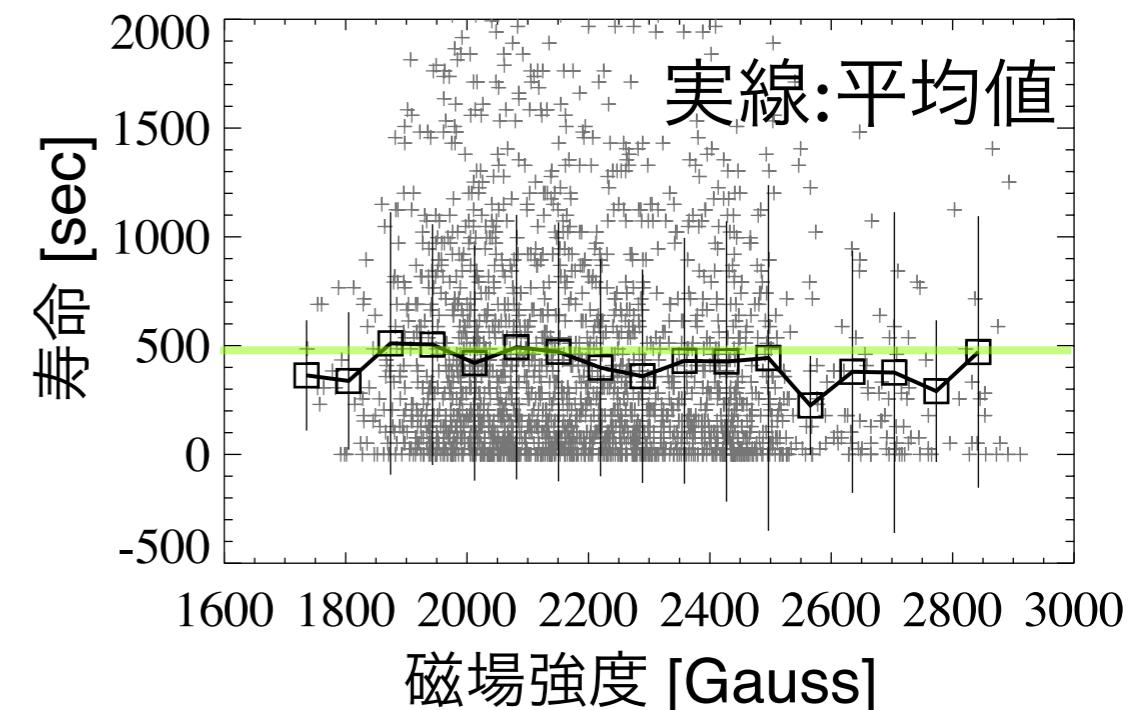
磁場が強い所で小さい

磁場無し

磁場あり



浮上速度と
サイズは
Bに逆相関



Lifetime

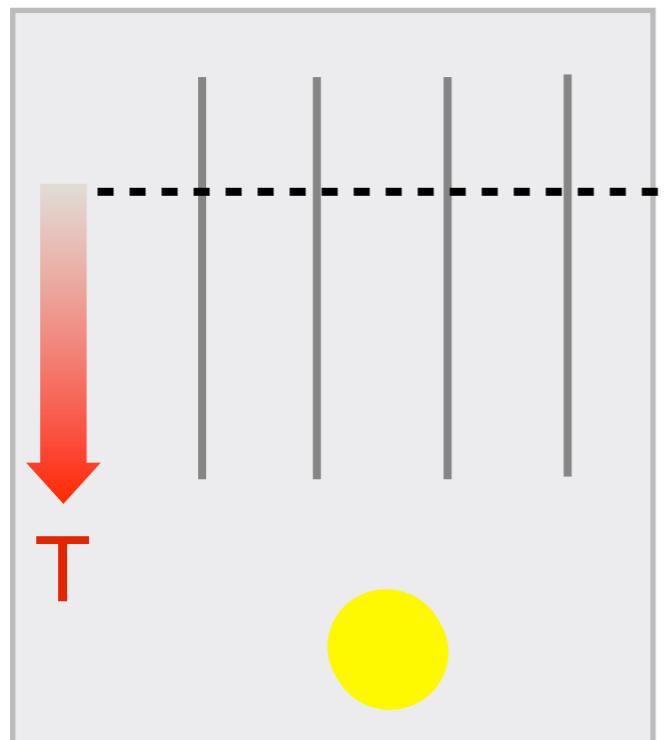
■ What determines the lifetime of UDs?

冷却時間

radiative cooling time

No!

10秒程度で短すぎ



表面ですぐ
冷える

上昇速度と
サイズは
Bに逆相関

供給継続時間

size / rise velocity

Maybe Yes!

size~300km、

lifetime~600sec、

∴ rise velocity~0.5km/s

B強⇒size↓, rise velocity↓

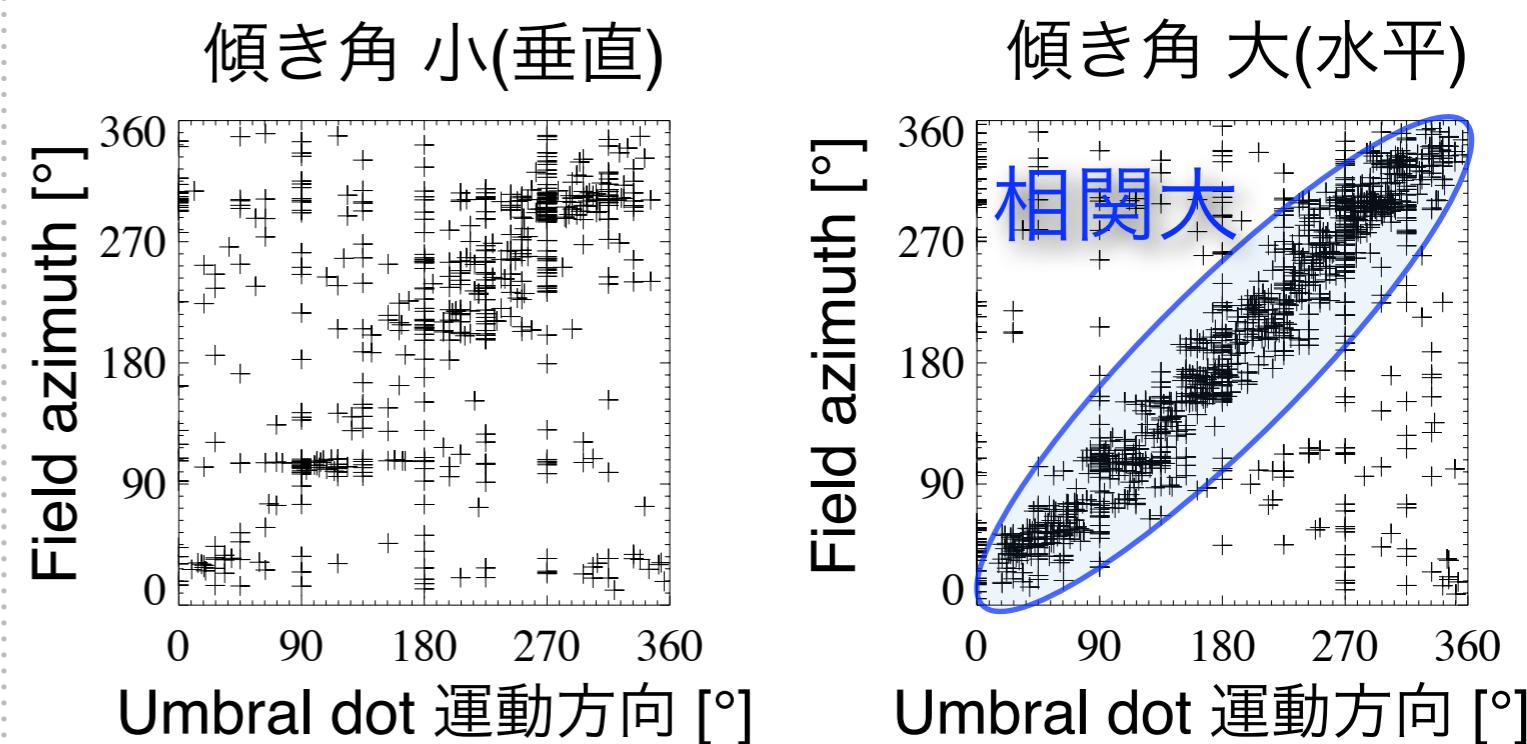
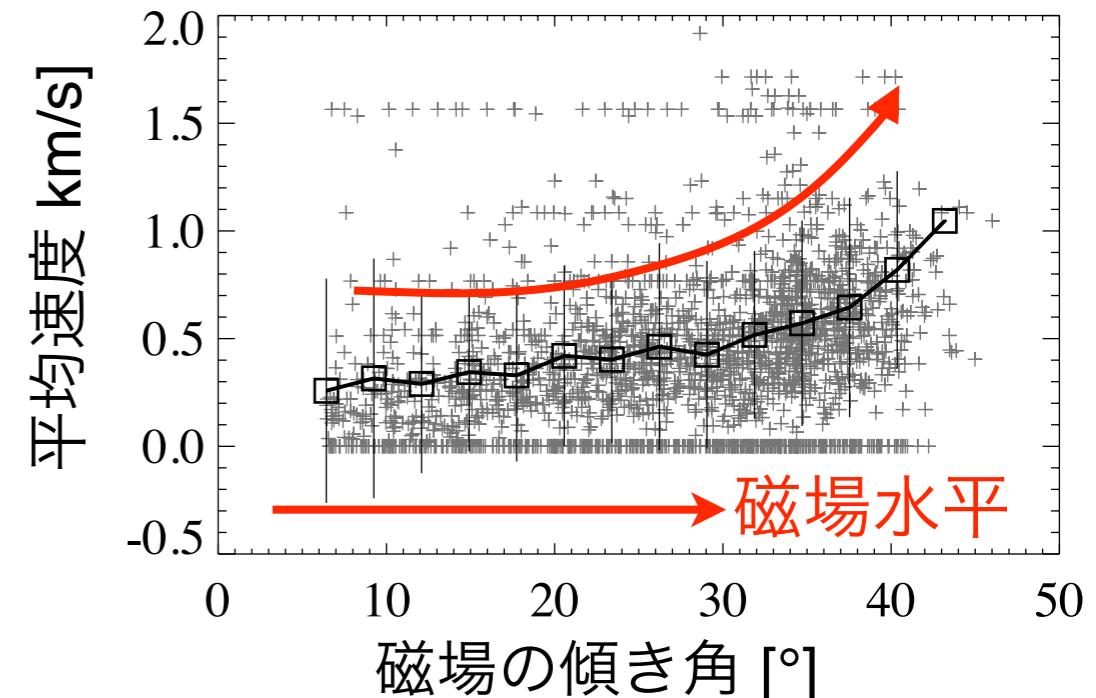
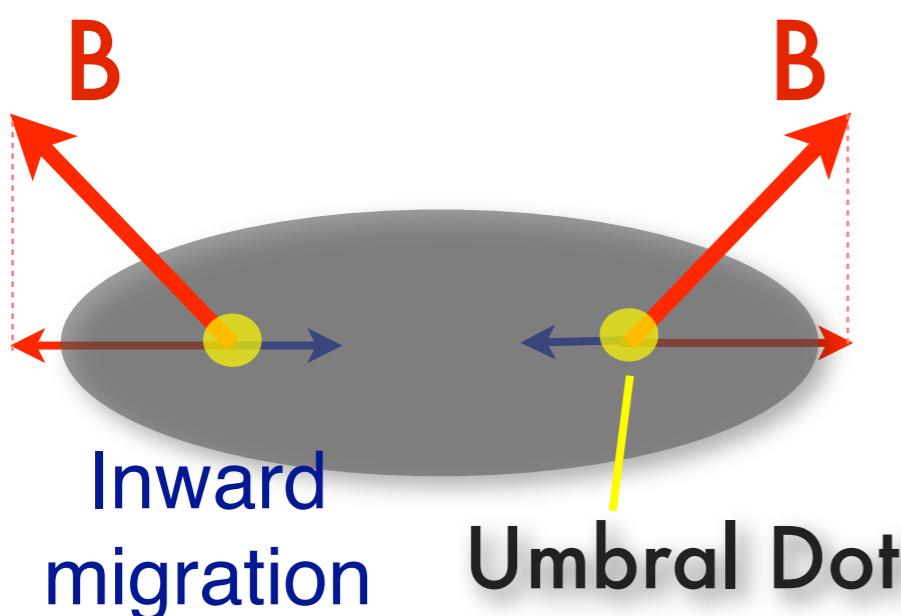
よって lifetimeは **B** に
ほとんど依存しない

Result 4/4

運動解析

最重要

- ▶ 速さ...磁場が水平の方が速い
- ▶ 方向
 - 磁場が水平 暗部中心方向
 - 磁場が垂直 相関小さい

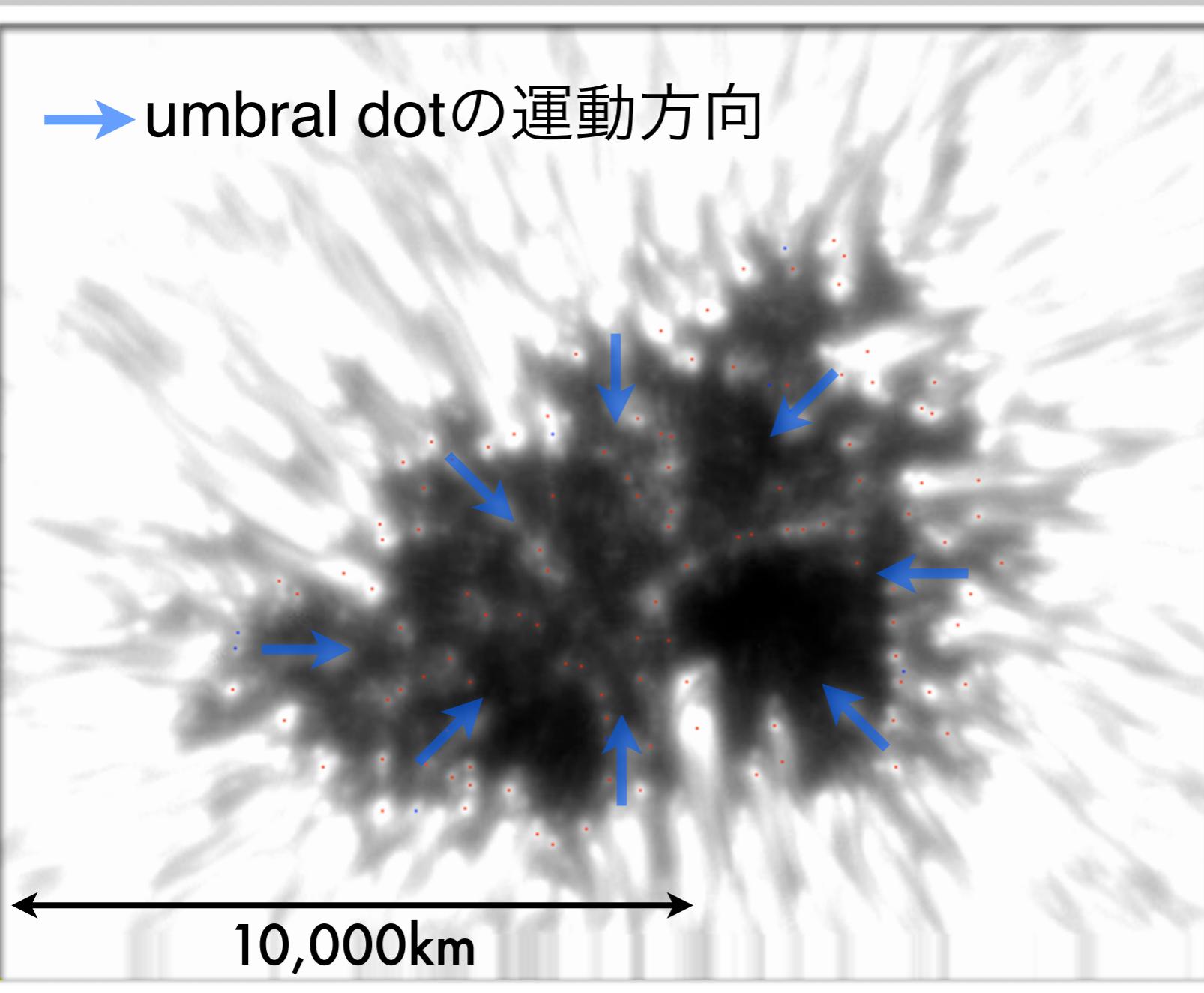


Proper motion

■ 運動解析

最重要

→ umbral dotの運動方向

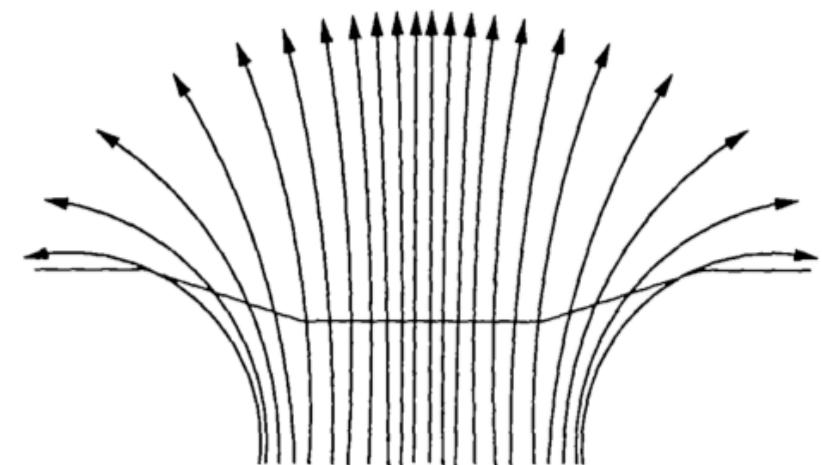


周辺部 (磁場斜め)

▶ inward migration

中心部 (磁場垂直)

▶ almost no motion

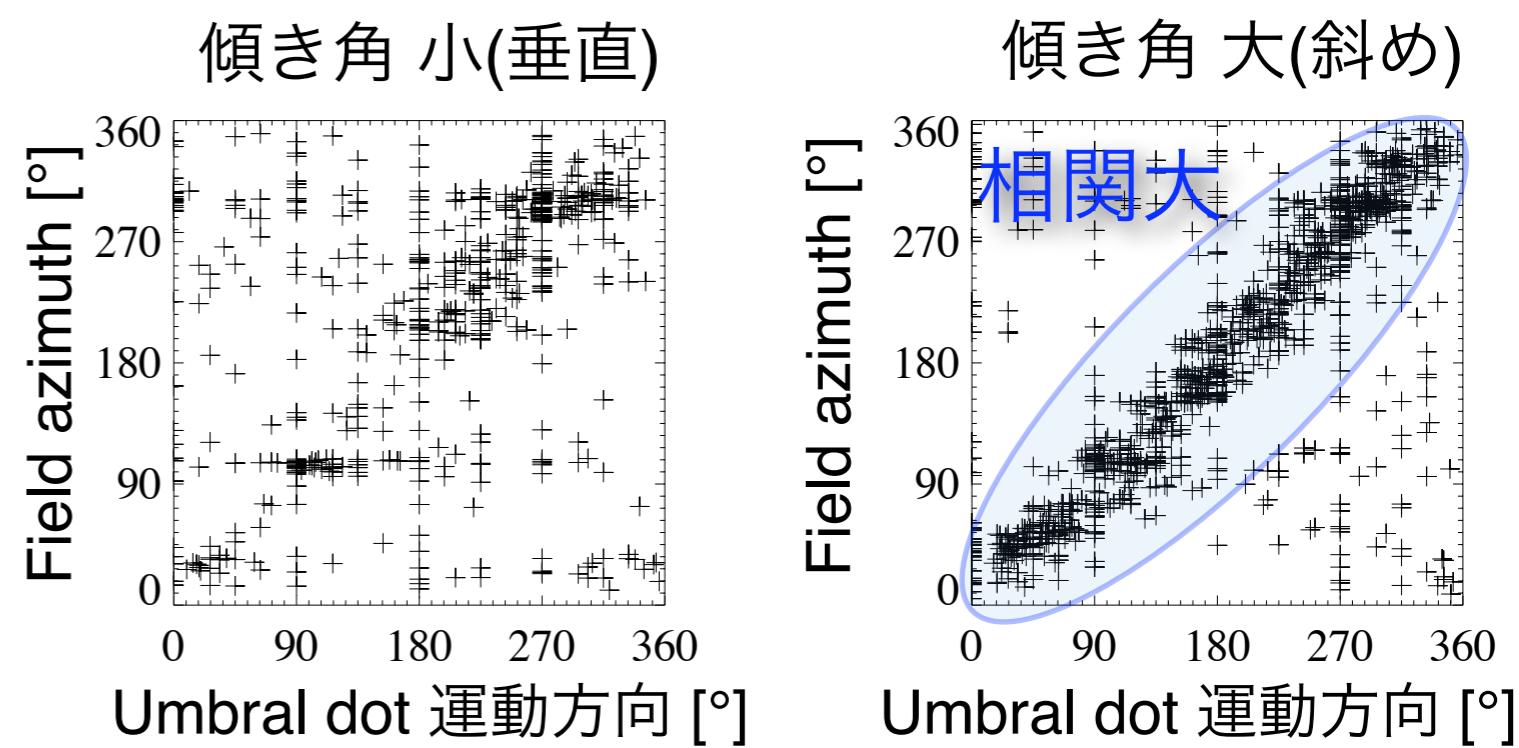
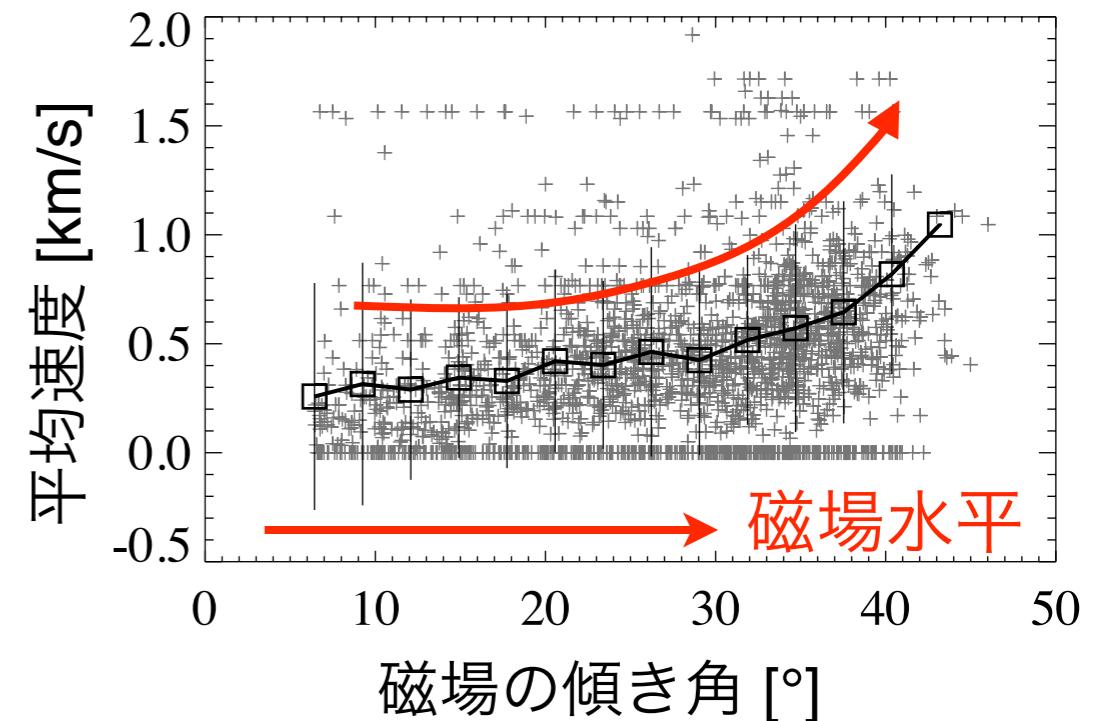
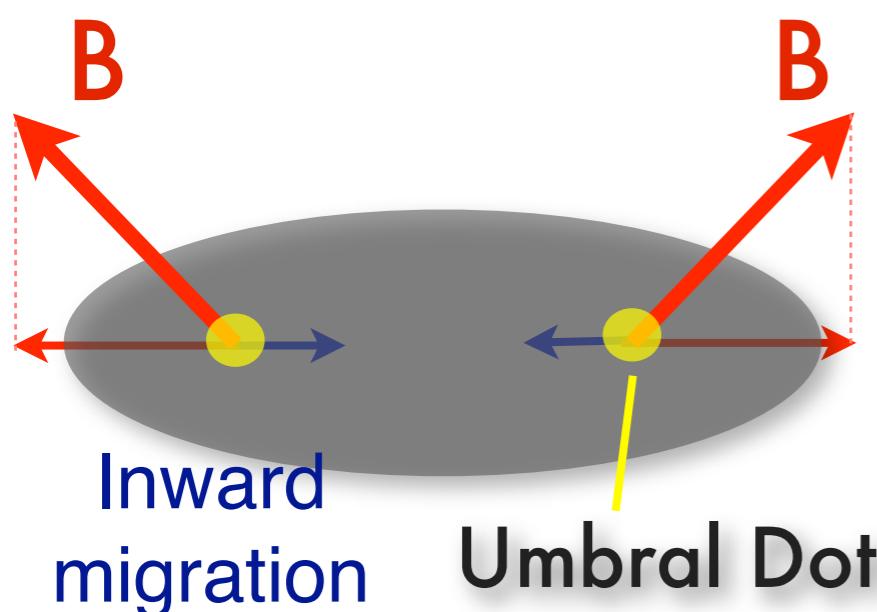


横から見た図

Result 4/4

運動解析

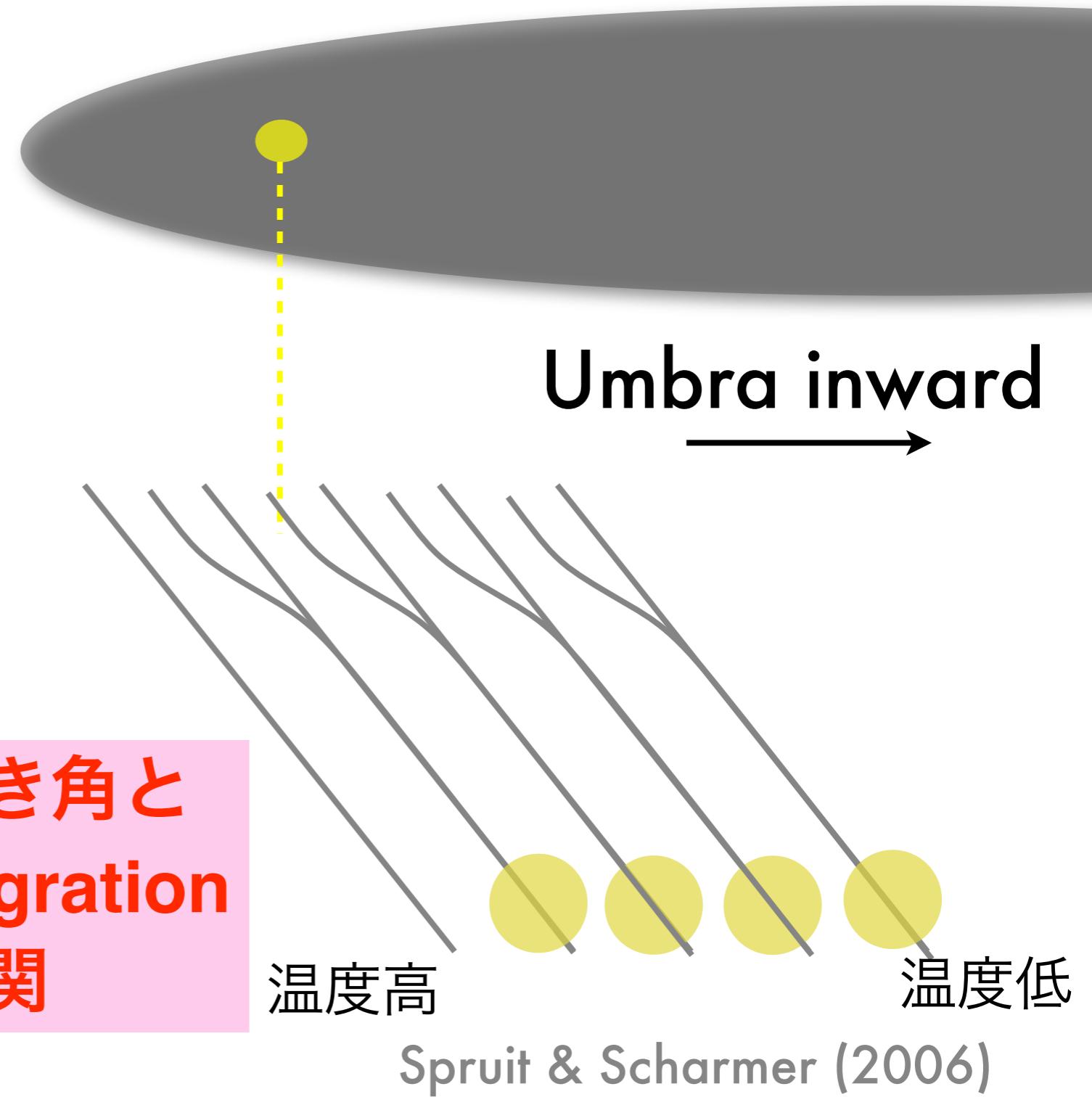
- ▶ 磁場が垂直...ゆっくりとランダムな運動
- ▶ 磁場が斜め...速い速度で暗部中心方向へ運動



Inward migration

1. gasの上昇、冷却
2. 磁力線の折り曲げ
3. 磁気圧減少
4. ガス上昇

磁場の傾き角と
inward migration
の相関



Spruit & Scharmer (2006)

Summary

umbral dotは、磁場と対流の相互作用を直接測定できる貴重な対象

- 磁場が強い所では...
 - ▶ 発生頻度が少ない ⇒ **対流をより強く抑制**
 - ▶ sizeが小さい ⇒ **gasの膨張を抑制**
 - ▶ lifetimeは一定 ⇒ **lifetime~size/rise velocityで、size ↓, rise velocity ↓**
- 磁場が水平に傾いている所では...
 - ▶ 暗部中心方向に速いスピードで運動する
⇒ **傾いた磁場中のガスによる磁力線の折り曲げ**

End of the Talk

Special Thanks

北井 礼三郎 先生

一本 潔 先生

柴田 一成 先生

宇宙物理教室の皆様

花山・飛騨天文台の皆様

Backup slides

Lightcurve 1/2

■ 特徴的なlightcurve

▶ 磁場の弱い所

明るい

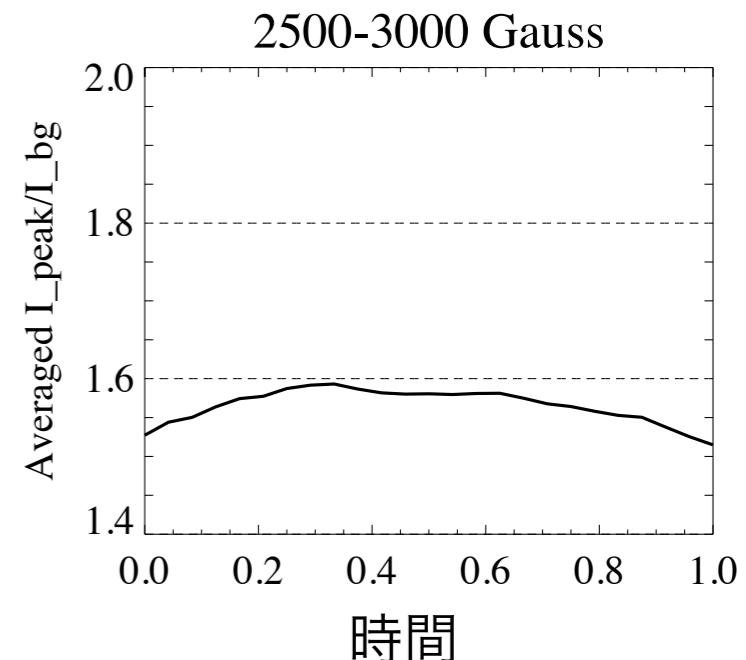
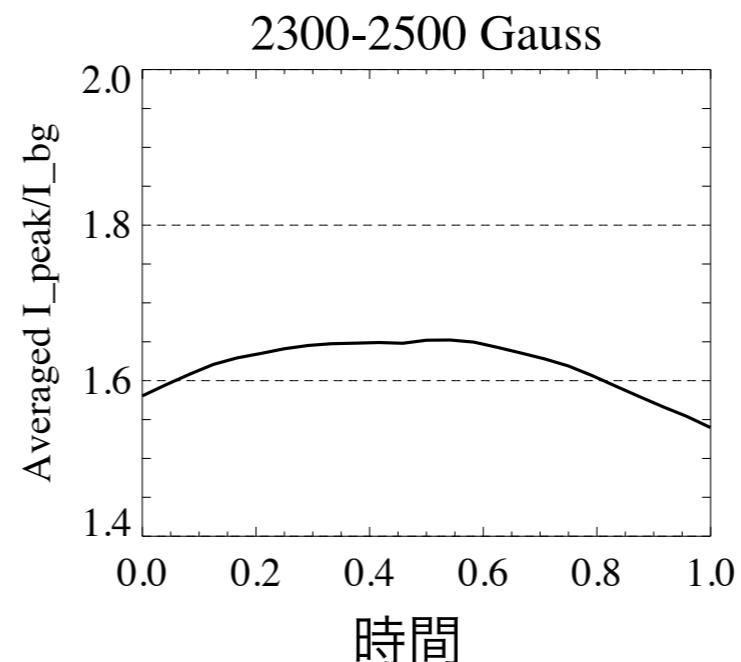
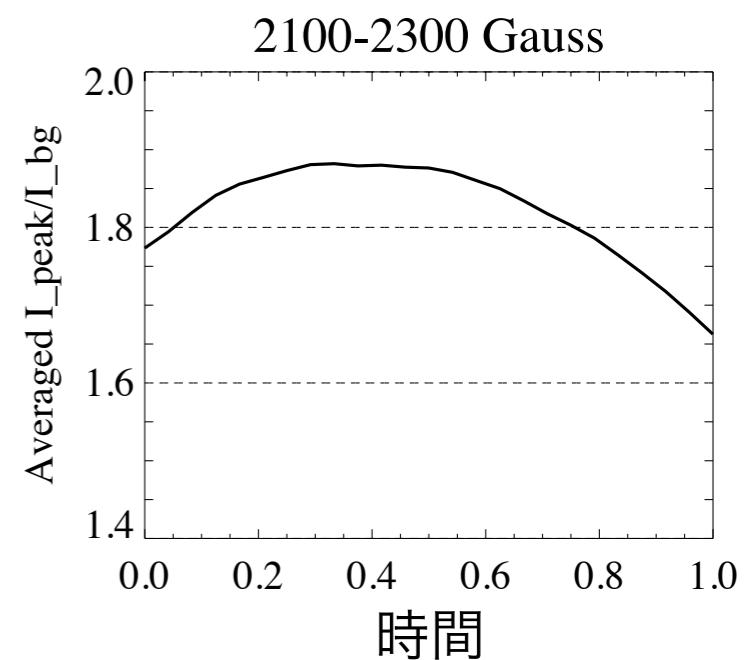
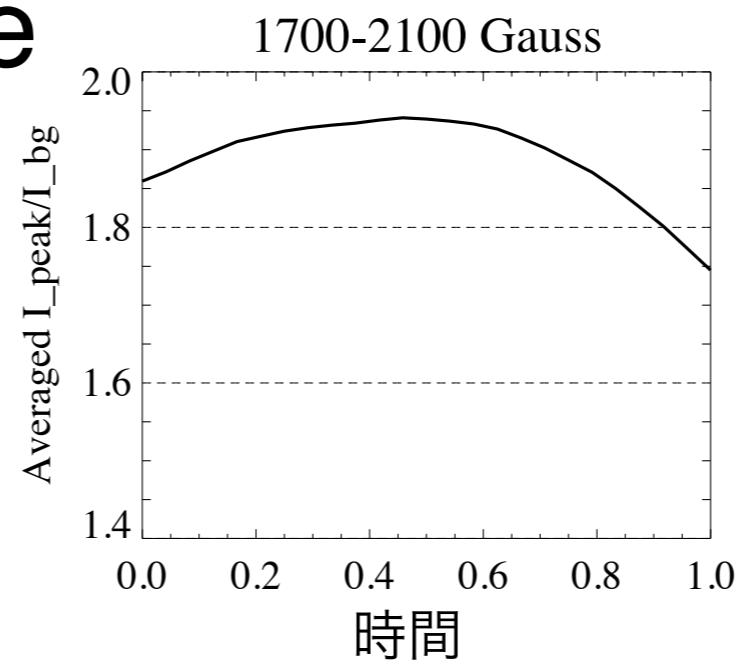
fast brightening
& slow darkning

▶ 磁場の強い所

暗い

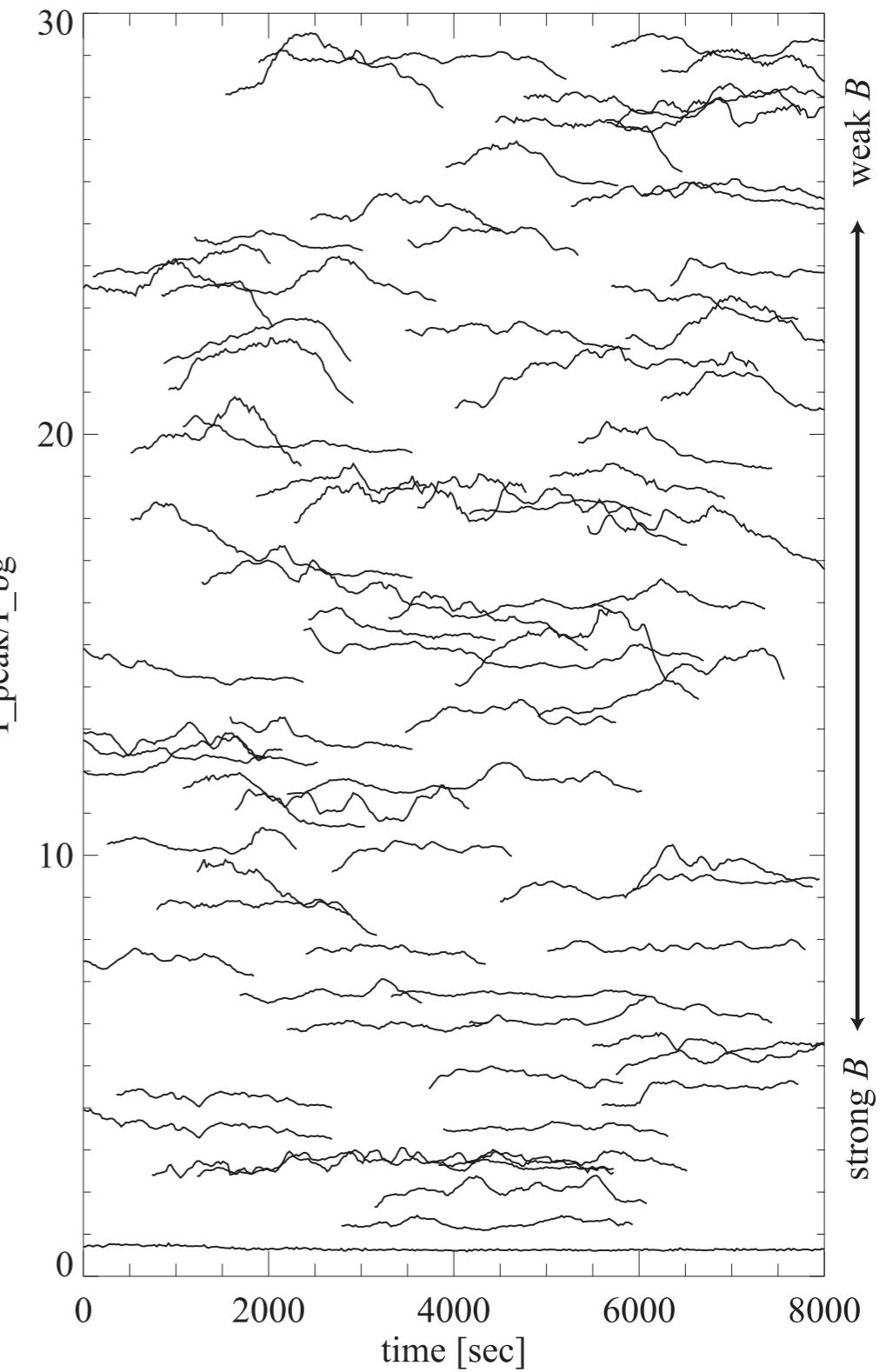
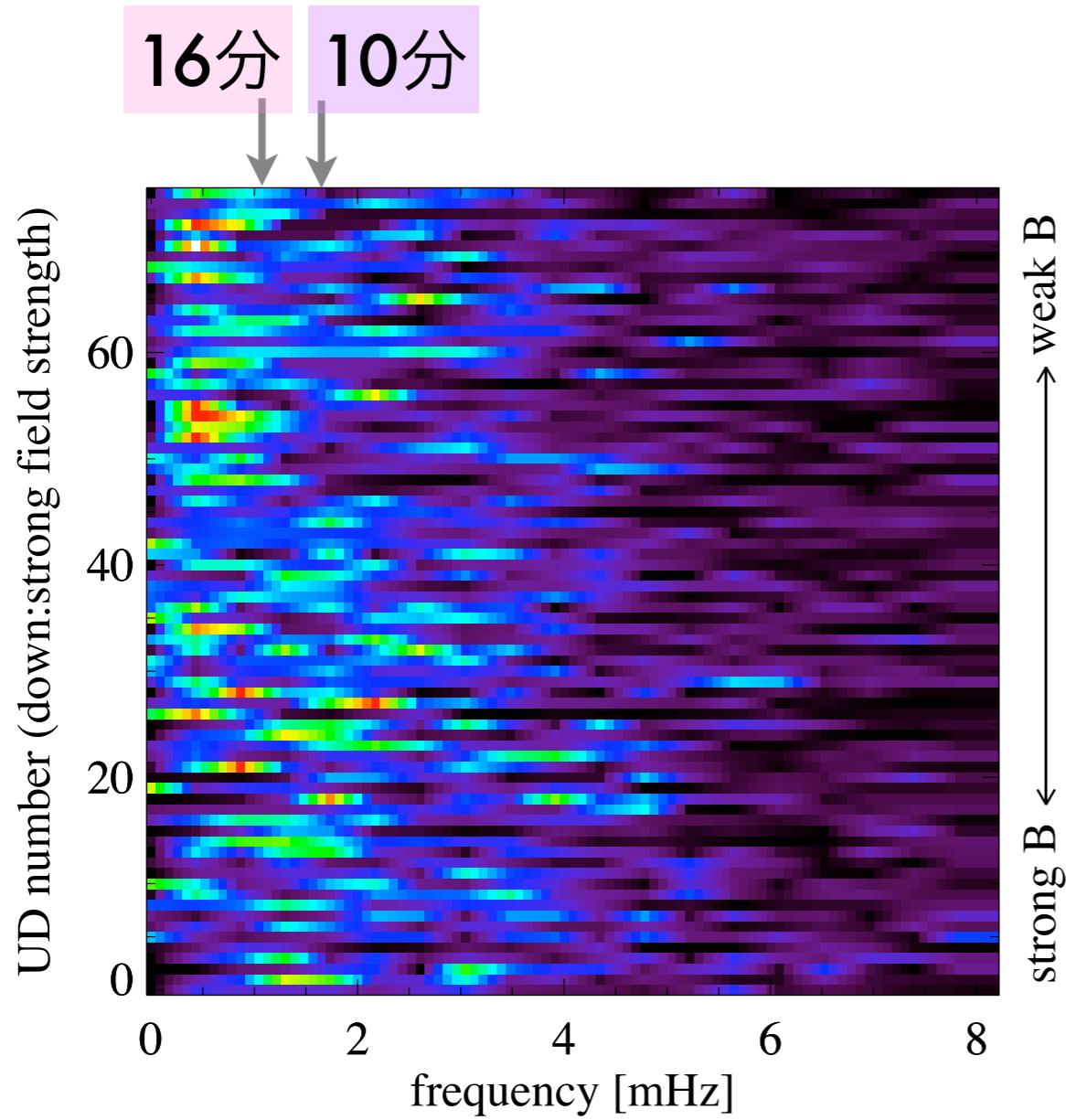
変動幅も小さい

symmetric brightening
& darkning

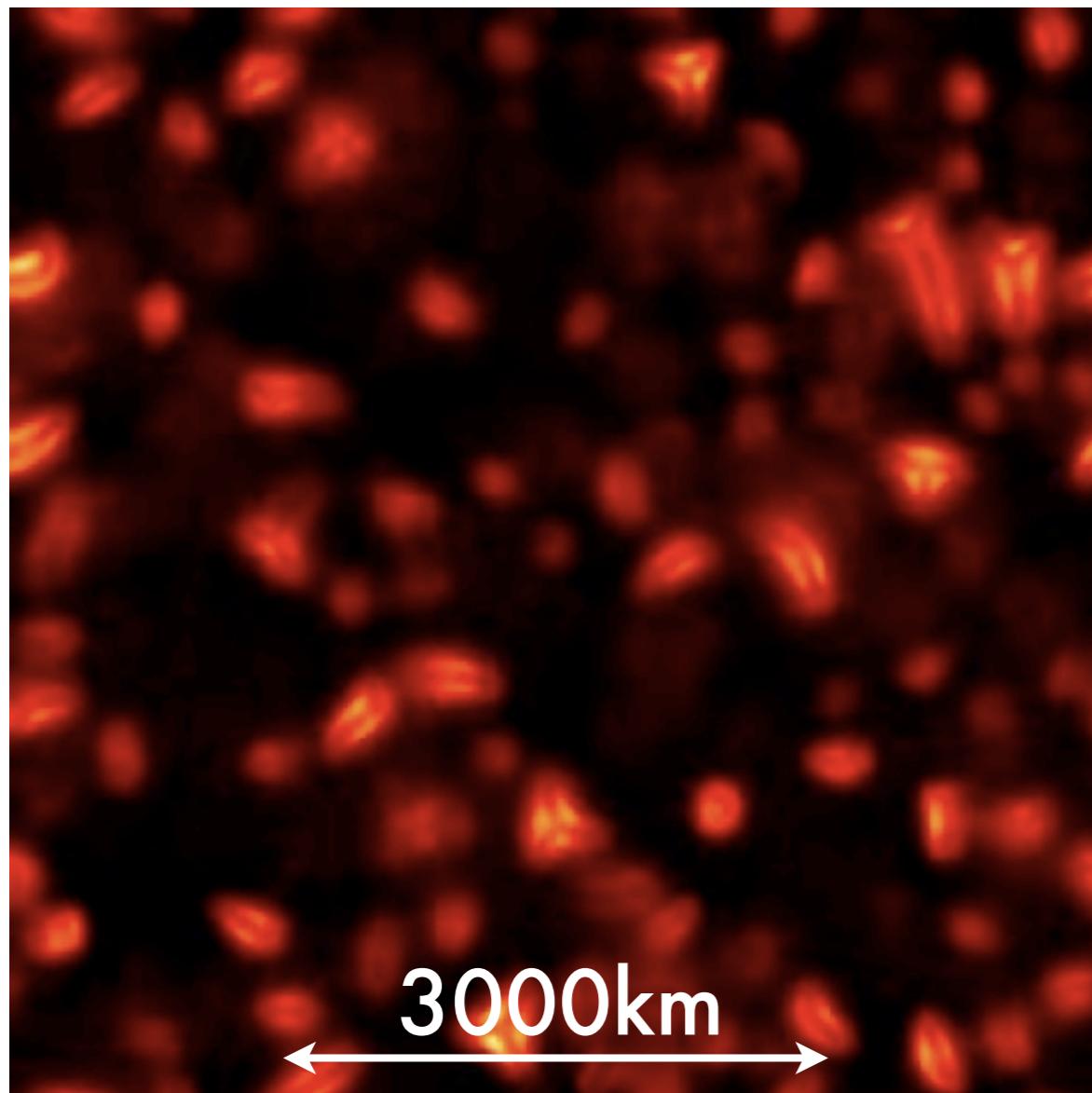


Lightcurve 2/2

- lightcurveが振動している?
 - ▶ 30分以上のlifetimeのUD 76個



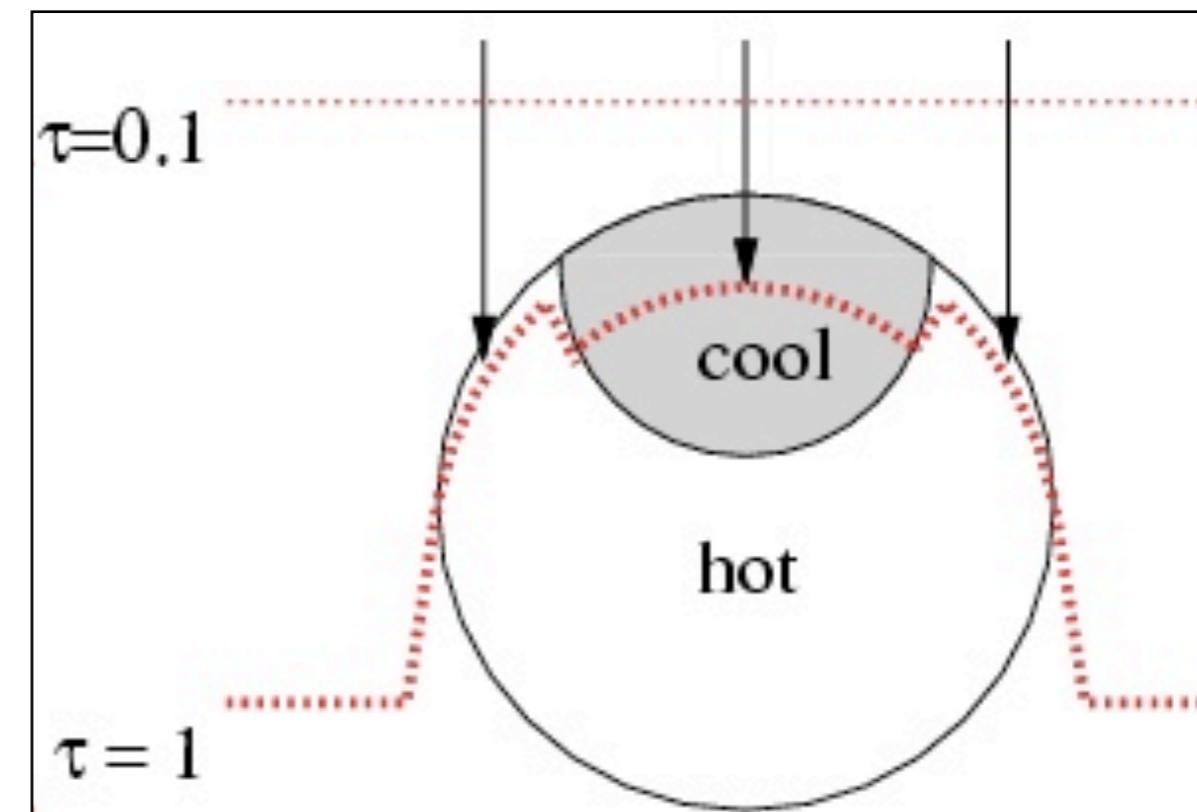
Dark lane



↑ Intensity

Sütterlin et al. (2004)

- topにcoolでdenseなmaterial
- 観測される高さ $\tau=1$ がcool materialを横切る

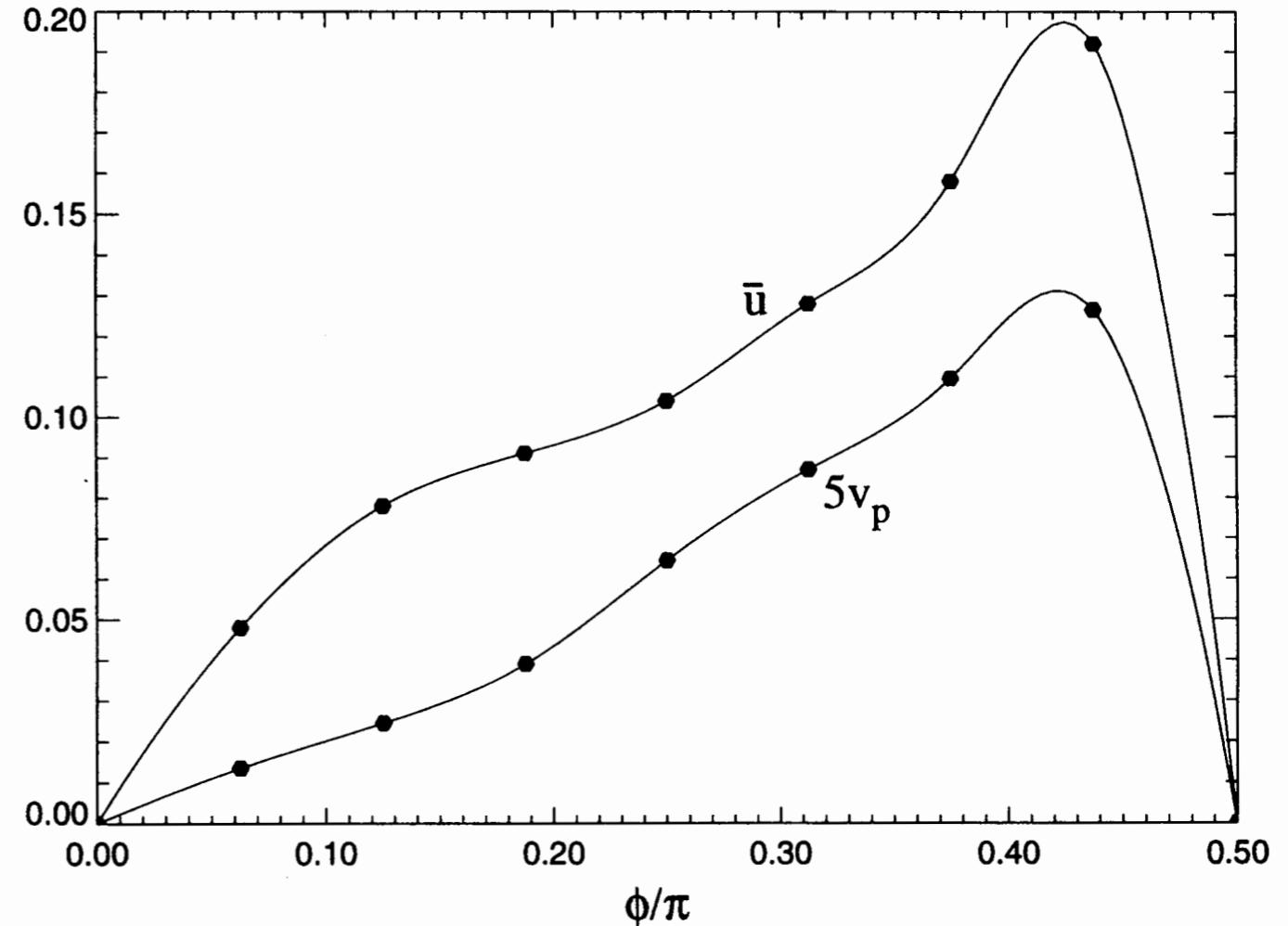


UD Parameters

- lifetime
 - ▶ (消滅した時間)-(出現した時間)
- radius
 - ▶ peak位置から $0.5 * (l_{peak} + l_{bg})$ までの距離
- average speed
 - ▶ (出現から消滅までの距離)/(寿命)
- velocity orientation
 - ▶ 出現位置から消滅位置へのベクトル方向

Traveling wave

- The speed of traveling wave depends on...
 - field strength
 - stratification
 - obliquity ϕ

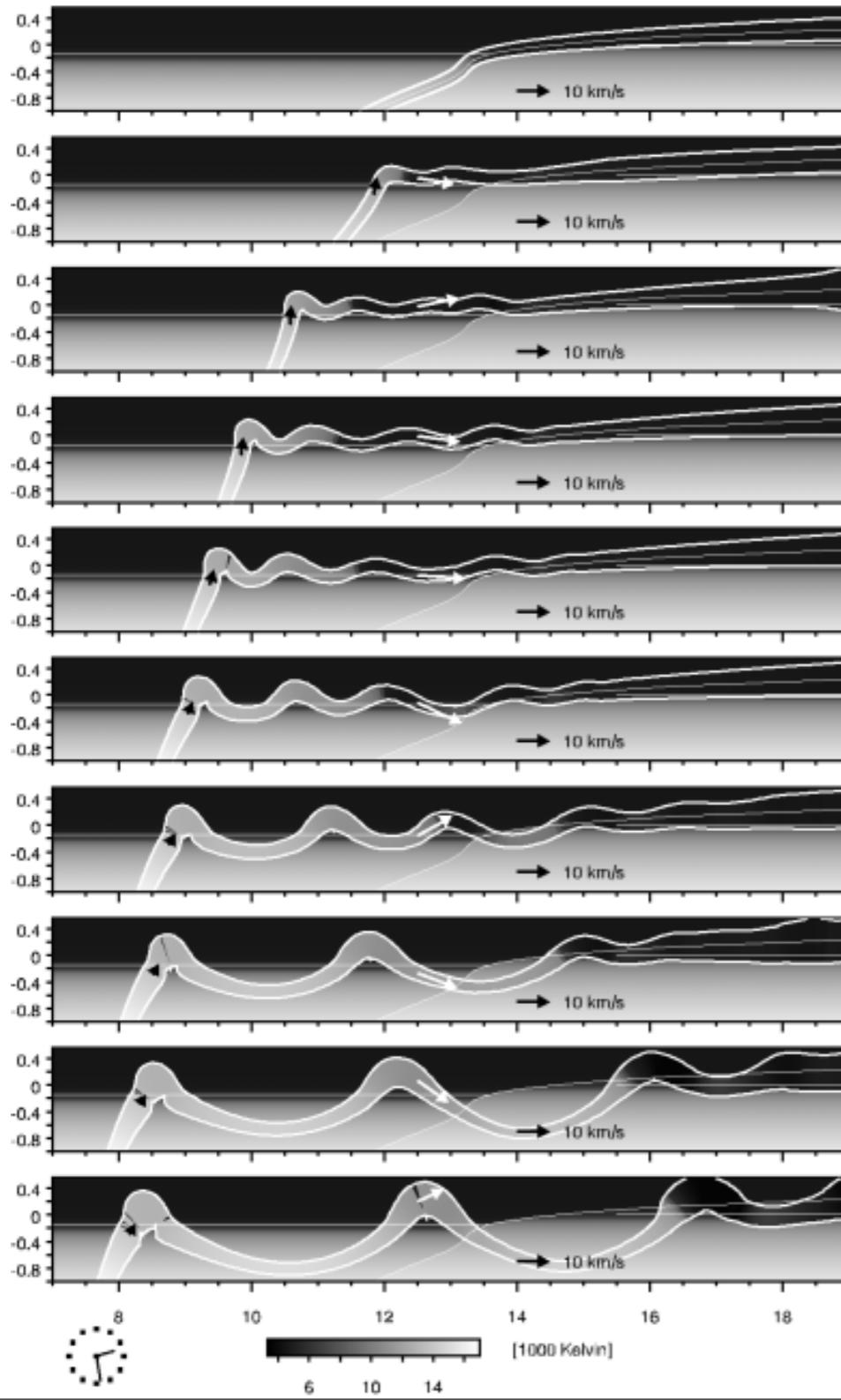


- 磁場>対流では traveling の方向は 磁場と逆向き

v_p : phase speed of the traveling waves
 u : mean horizontal flow at the surface

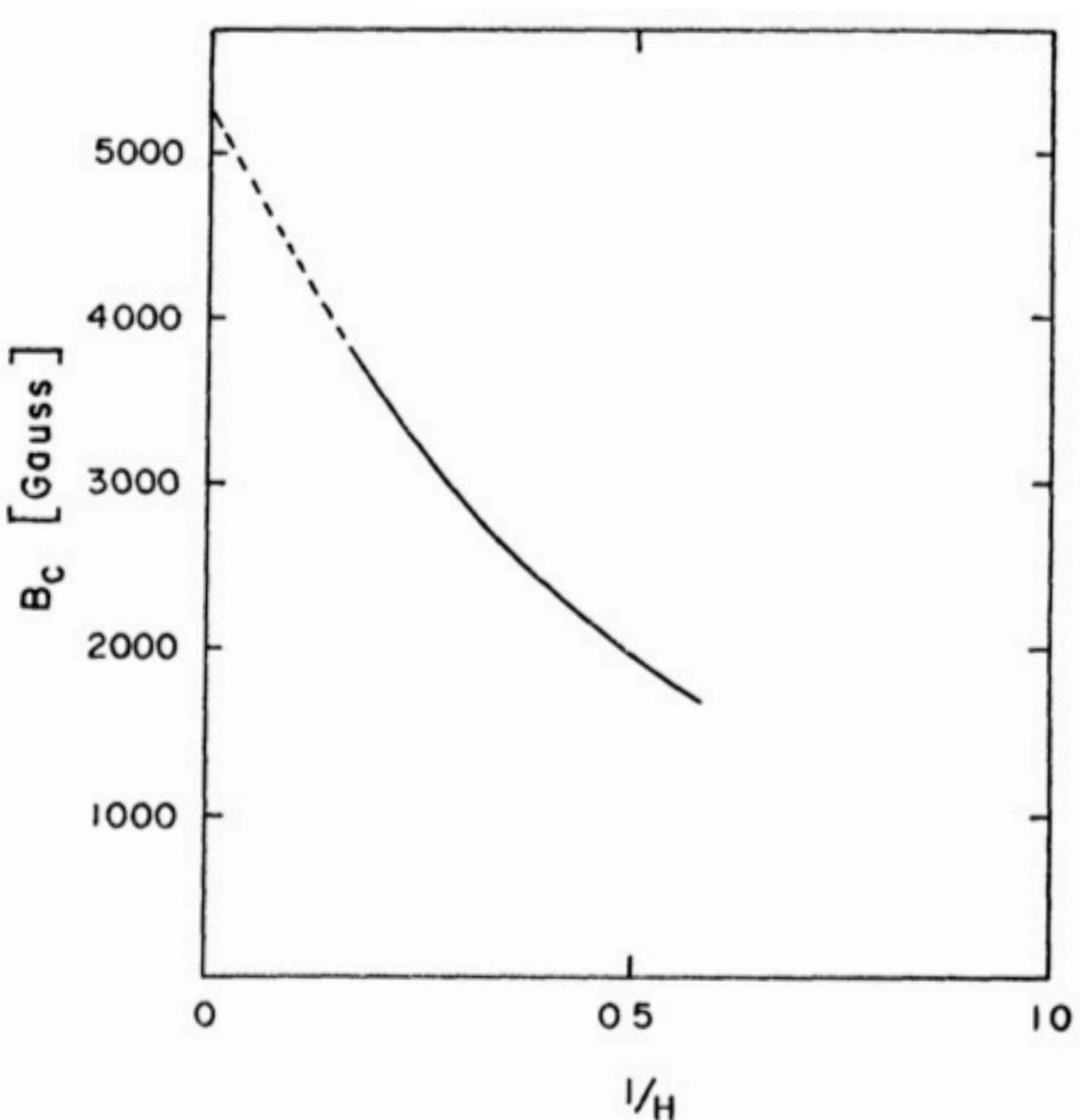
Hurburt, Matthews, Proctor (1996)

Inward migration



- Schlichenmaier et al. (2002)
- moving tube model
- 磁束管の浮上に伴う足元の
inward motion
- central UDは再現できない
- penumbraの明るさを説明で
きない

Mixing length theory



Deinzer (1965)

- 対流の効率を決めるパラメーター

$$I/H$$

I ... Prandl's mixing theory
(周囲の物質と混合する距離)

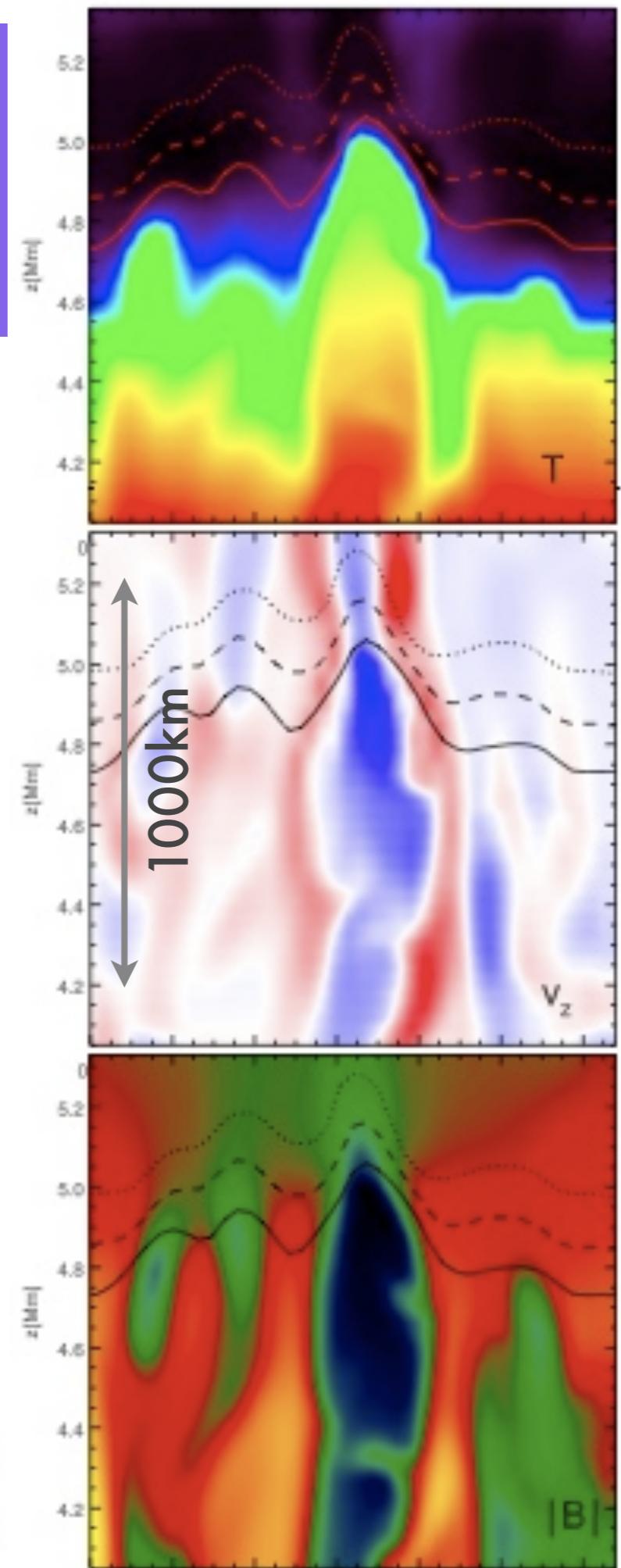
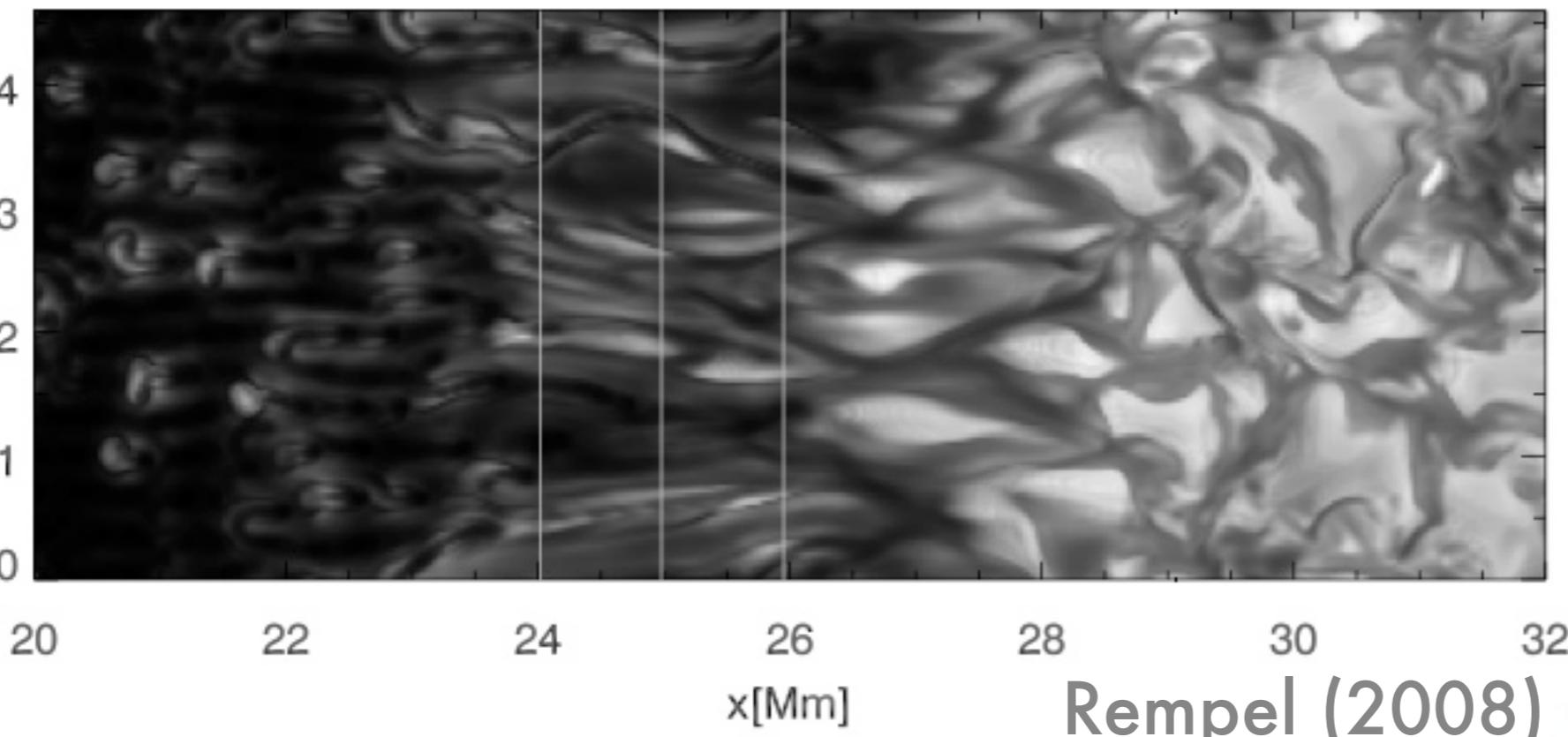
H ... pressure scale height

$I/H \rightarrow 1$ 磁場なし

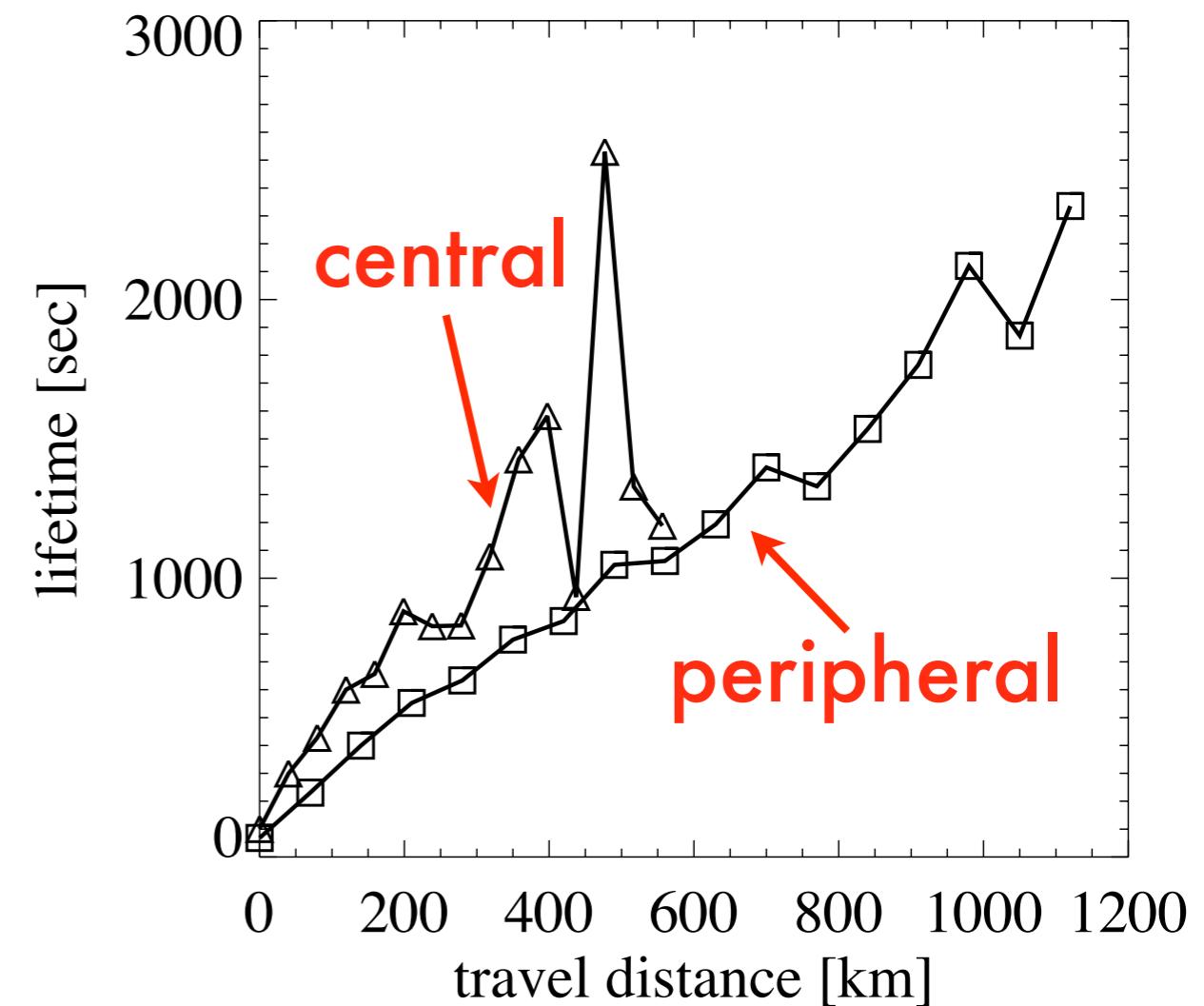
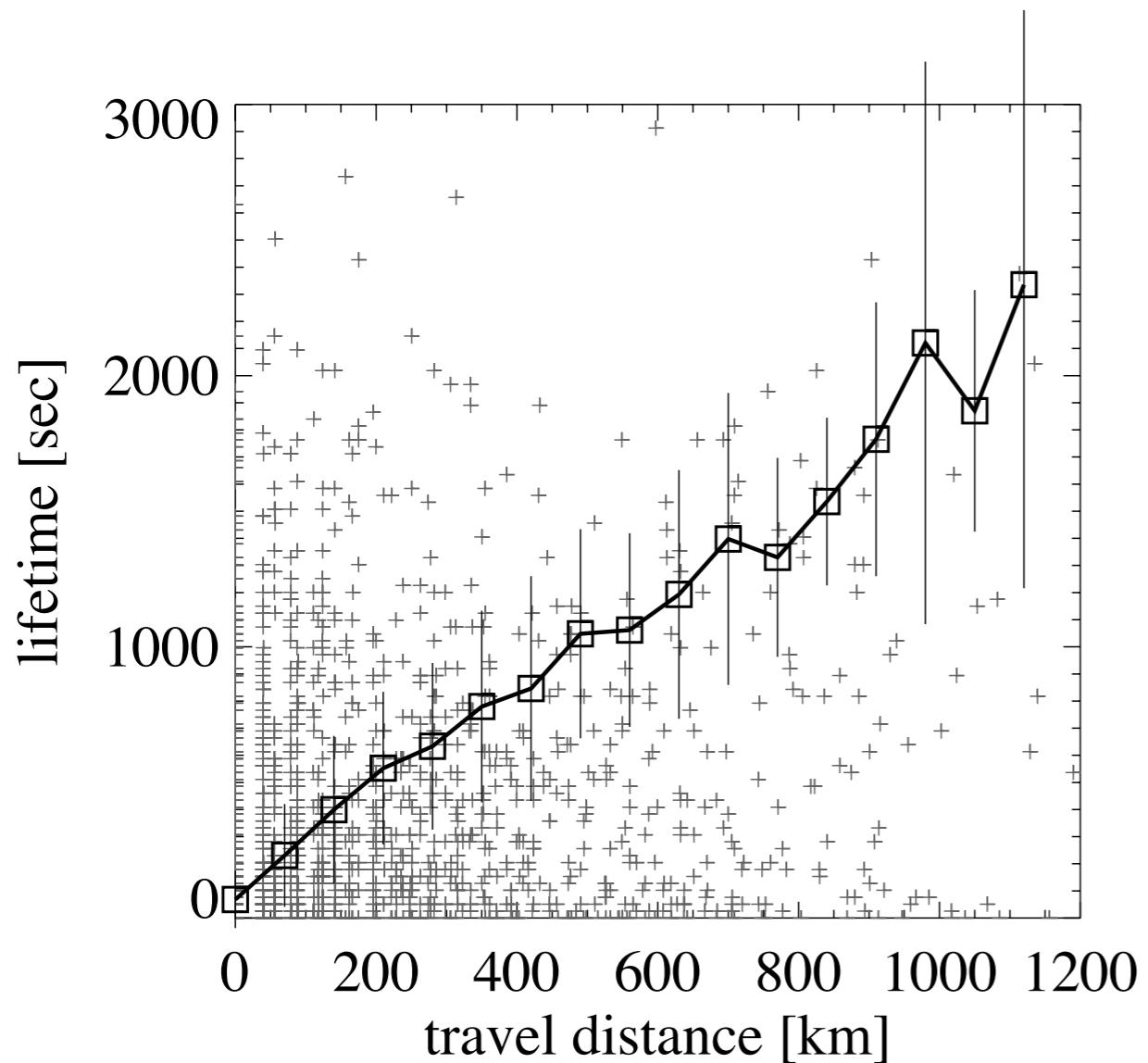
$I/H \rightarrow 0$ 対流を完全に抑制

MHD simulation

- 下降流はまだ観測されていない
- central UDとperipheral UDは、磁場の傾きが違うだけ

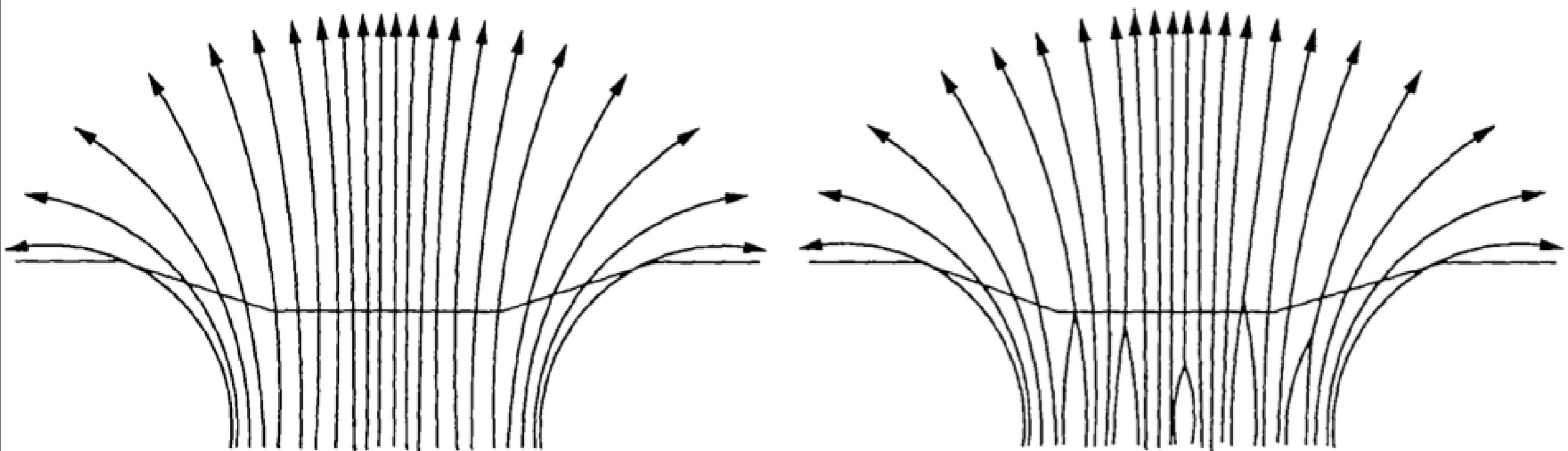


Distance v.s. Lifetime

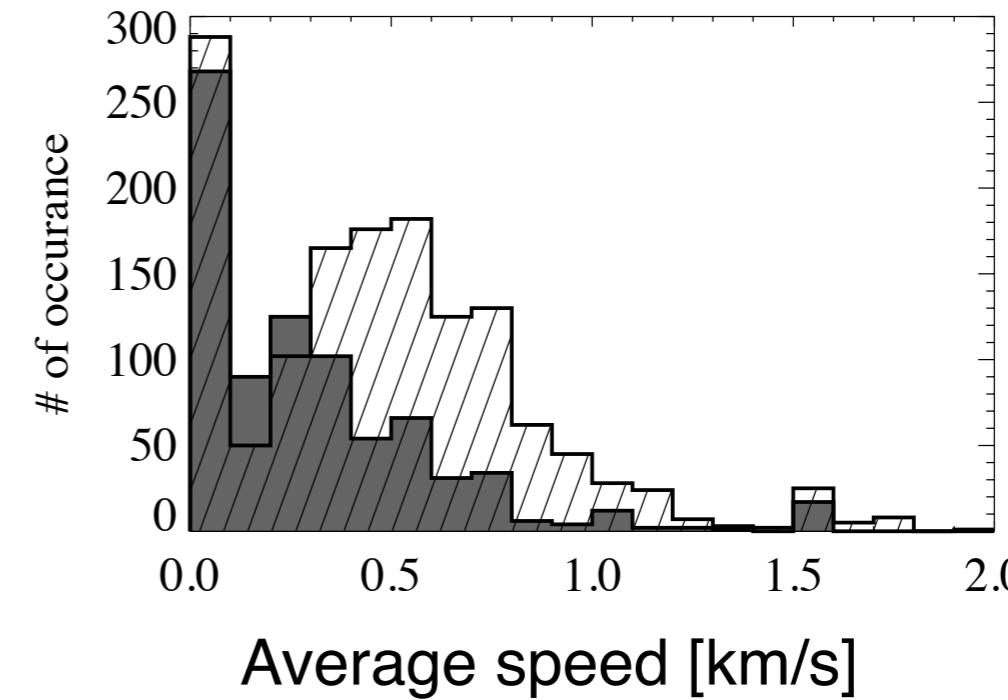
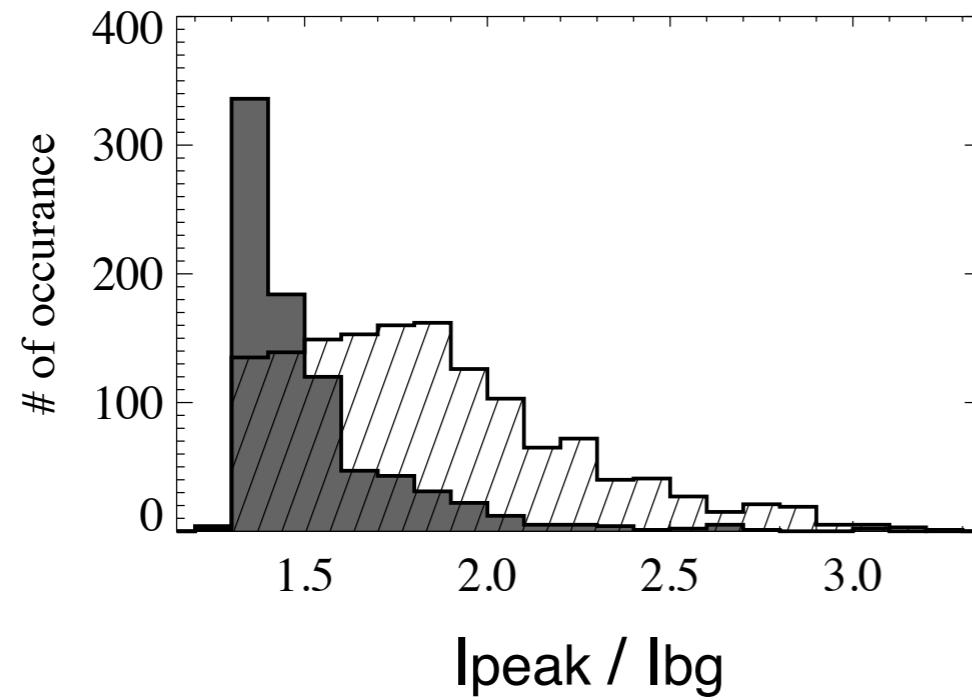
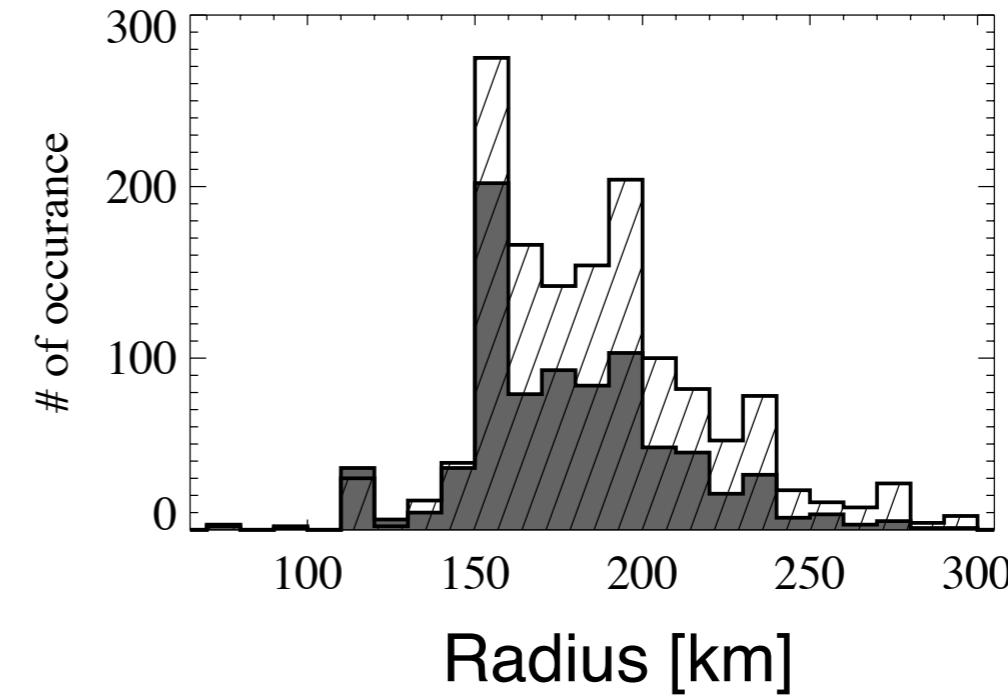
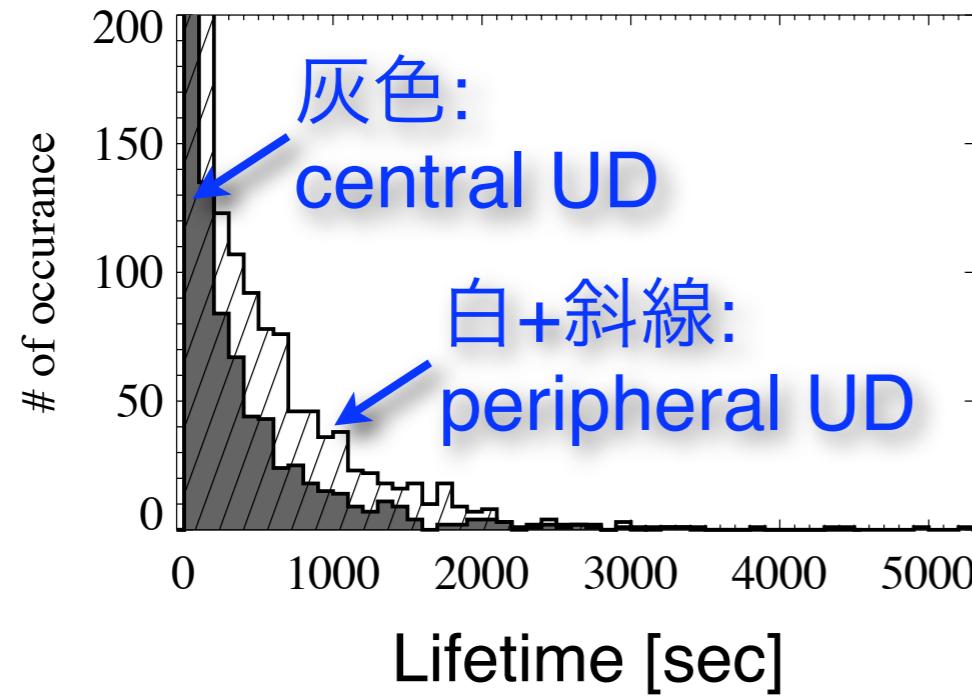


- Lifetime \propto travel distance

Cluster? Monolithic?



Histogram



Magnetoconvection

黒点における磁気対流

- ▶ 圧力や磁場が高さ方向に大幅に変化
- ▶ 非線形

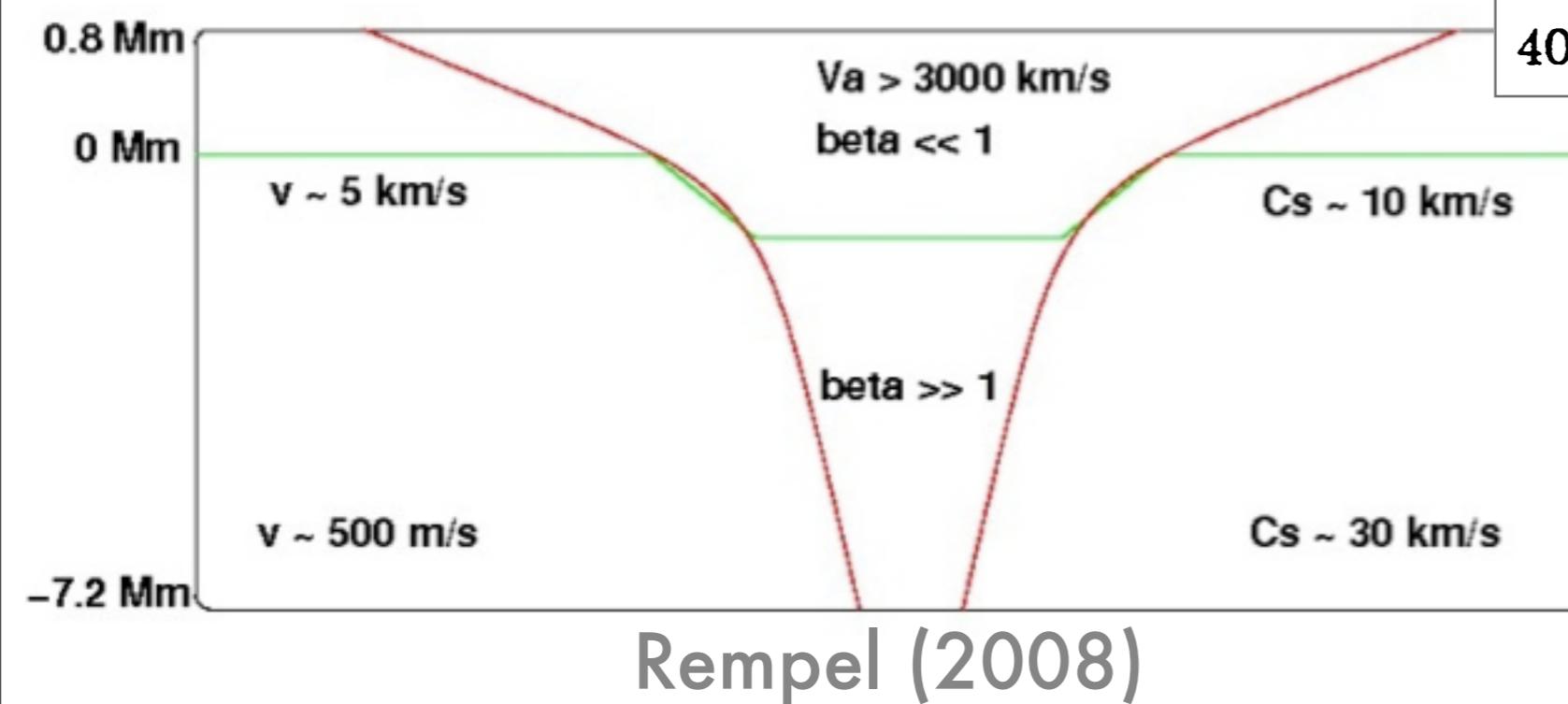


Table 1. Properties of a model umbra with $B_0 = 3000$ G.

z (km)	P (dynes cm $^{-2}$)	v_A (km s $^{-1}$)	ζ
0	2.7×10^5	8.1	0.003
100	6.3×10^5	6.8	0.008
500	3.8×10^6	4.7	0.056
1000	1.1×10^7	3.1	0.29
2000	5.3×10^7	1.7	3.1
4000	4.1×10^8	0.8	32

Weiss (1981) J. Fluid Mech

数値計算が
不可欠