

ALMAでみる黒点

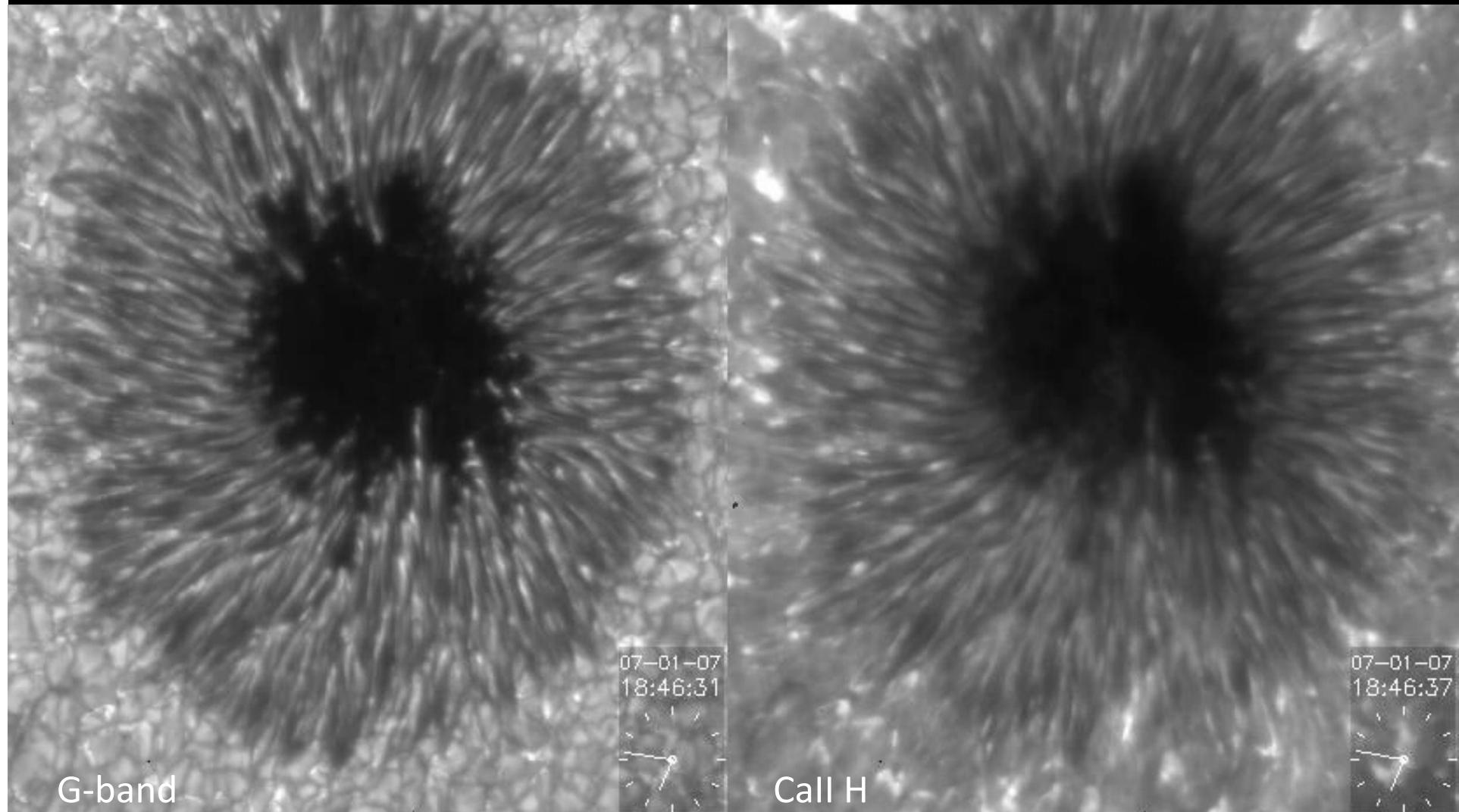
京都大学附属天文台 一本 潔

ALMA太陽観測ワークショップ@京都

2012年9月3日

太陽黒点は磁気流体现象の宝庫；

磁気対流・微細構造形成、振動・波動・衝撃波、
ジェット・磁気リコネクション、加熱・粒子加速



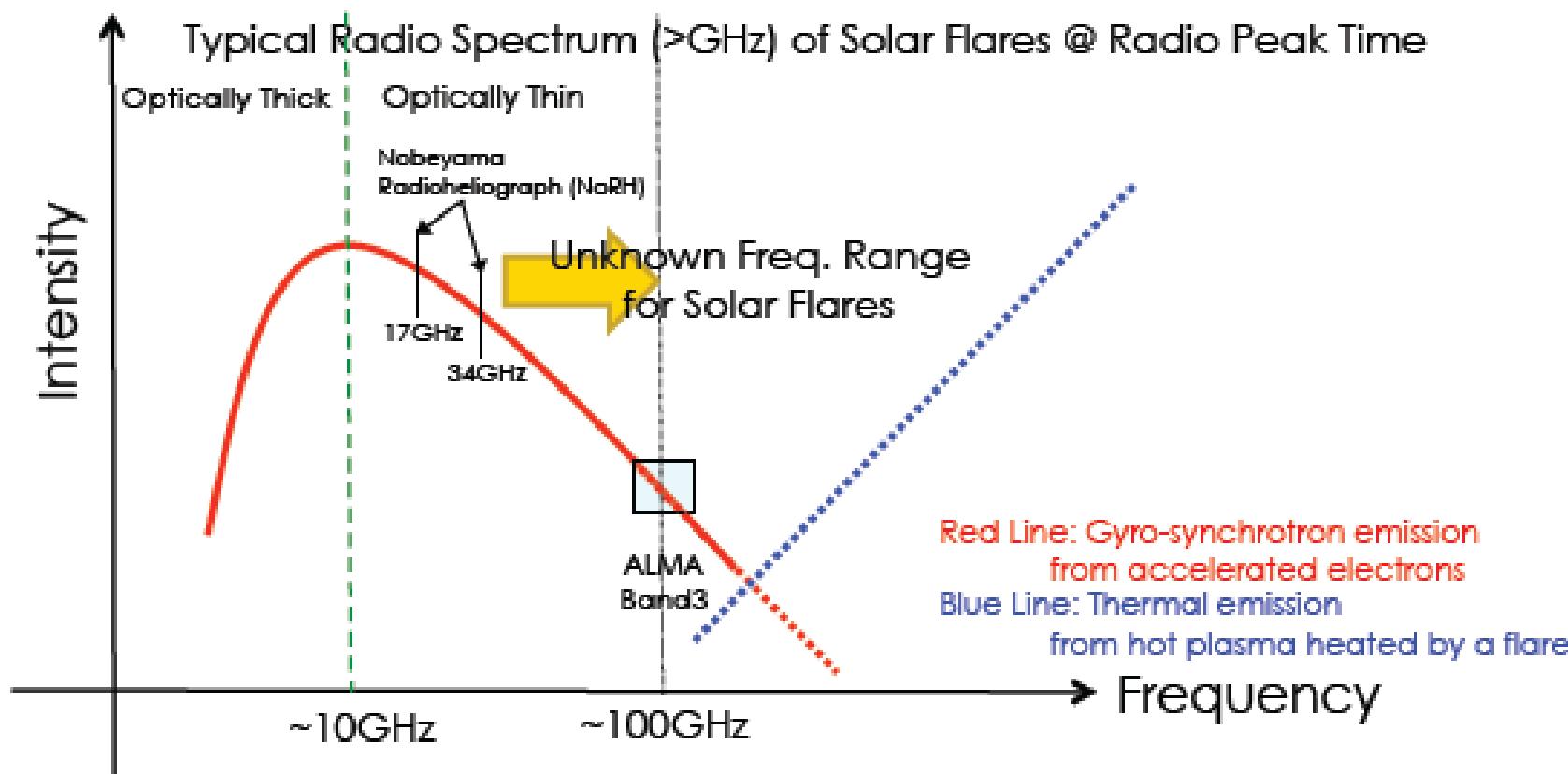
ALMA performance

Freq. [GHz]	Spatial resolution [arcsec] (max. baseline = 2km)	FOV [arcsec]
100	0.38	62
300	0.126	18
950	0.04	7

Fast switching?

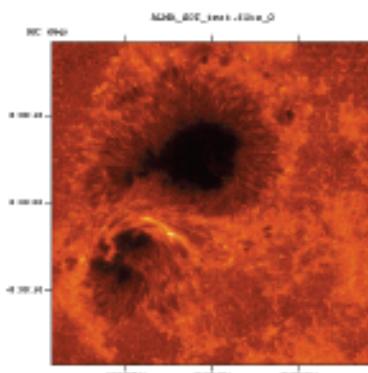
- Time resolution
 - 32msec or 30sec?

ミリ波放射機構



Where is the mm/sub-mm emission layer except flares ?

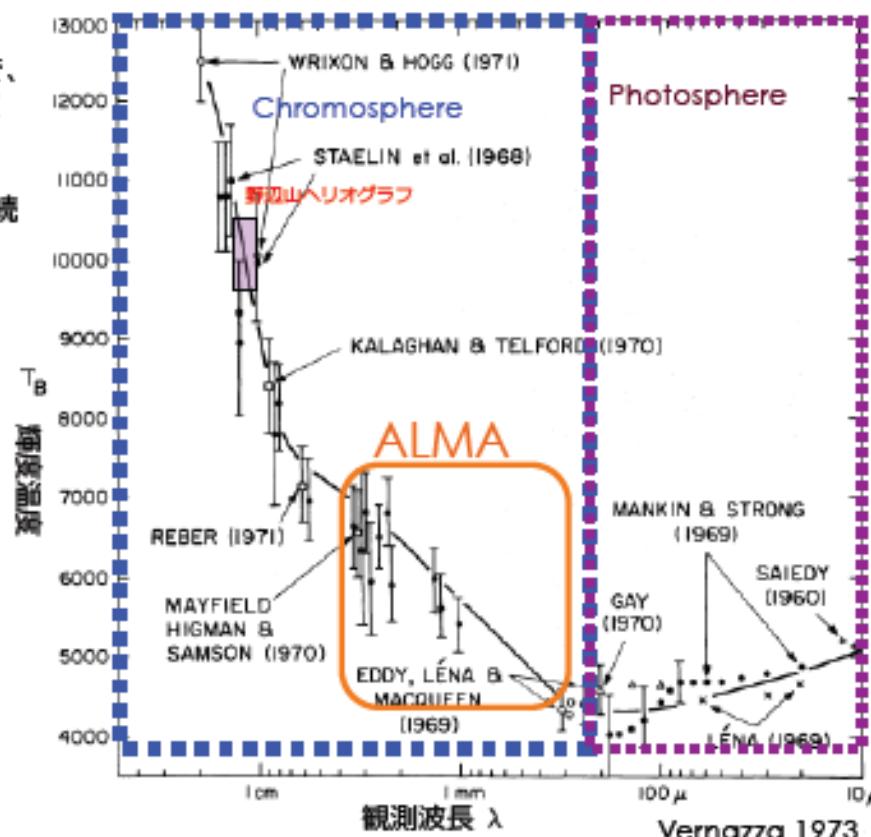
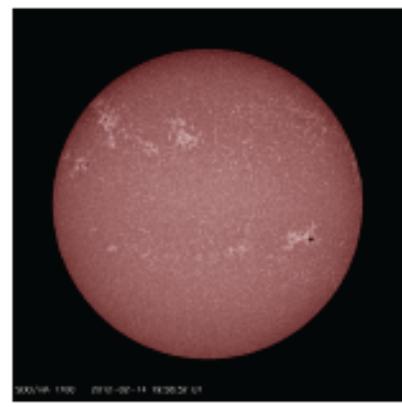
- The mm/sub-mm emission from non-flare sun is thermal continuum from around $\tau = 1$ layer = lower chromosphere.



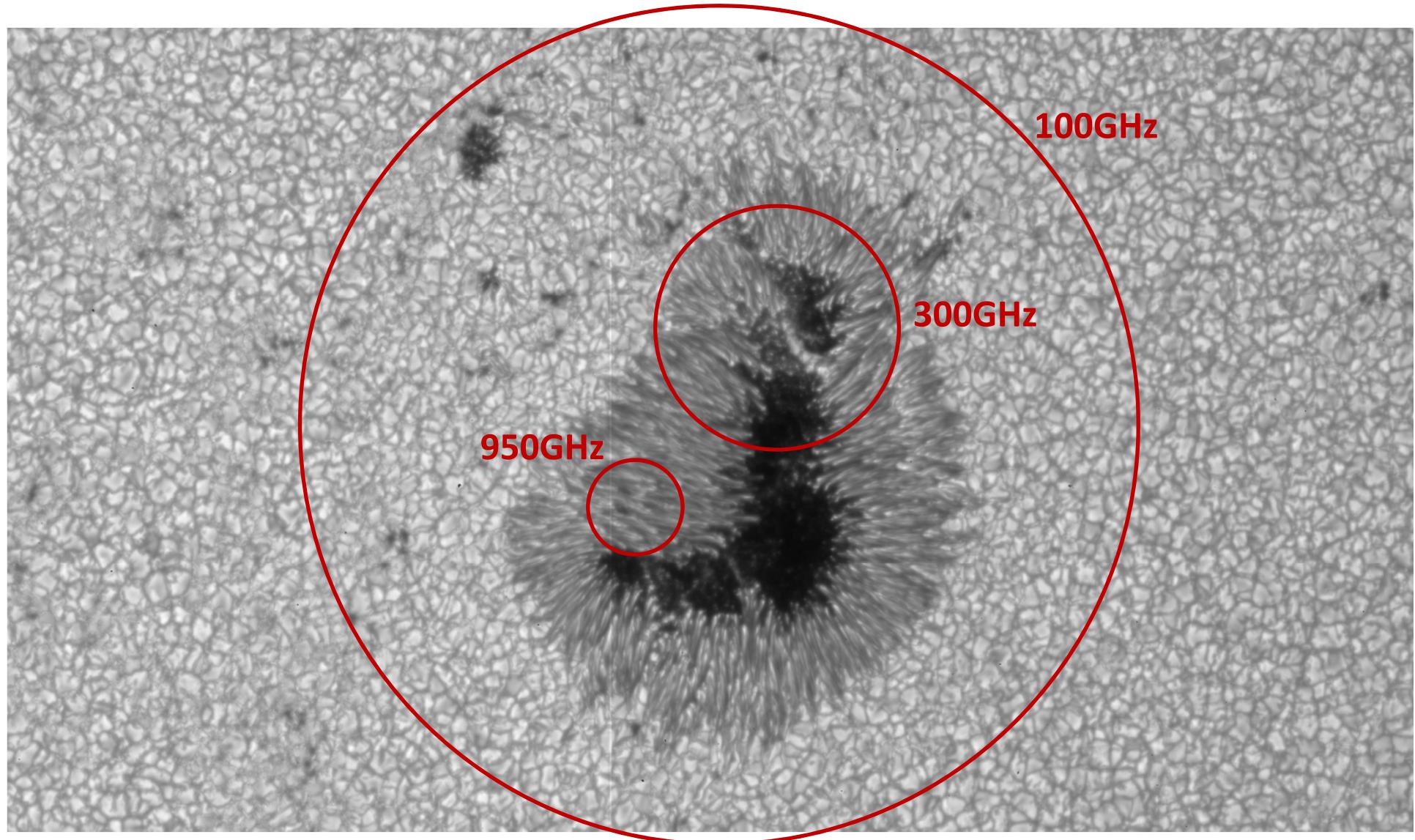
光学的厚い層からの放射なので、
 T_B (輝度温度 : 右図縦軸) は放
射層の物理的温度と同じです。

よって、ALMAはCa IIやUV連続
光(1700Å)の画像と同じ様な層
を観測できます。

Ca II (SOT)

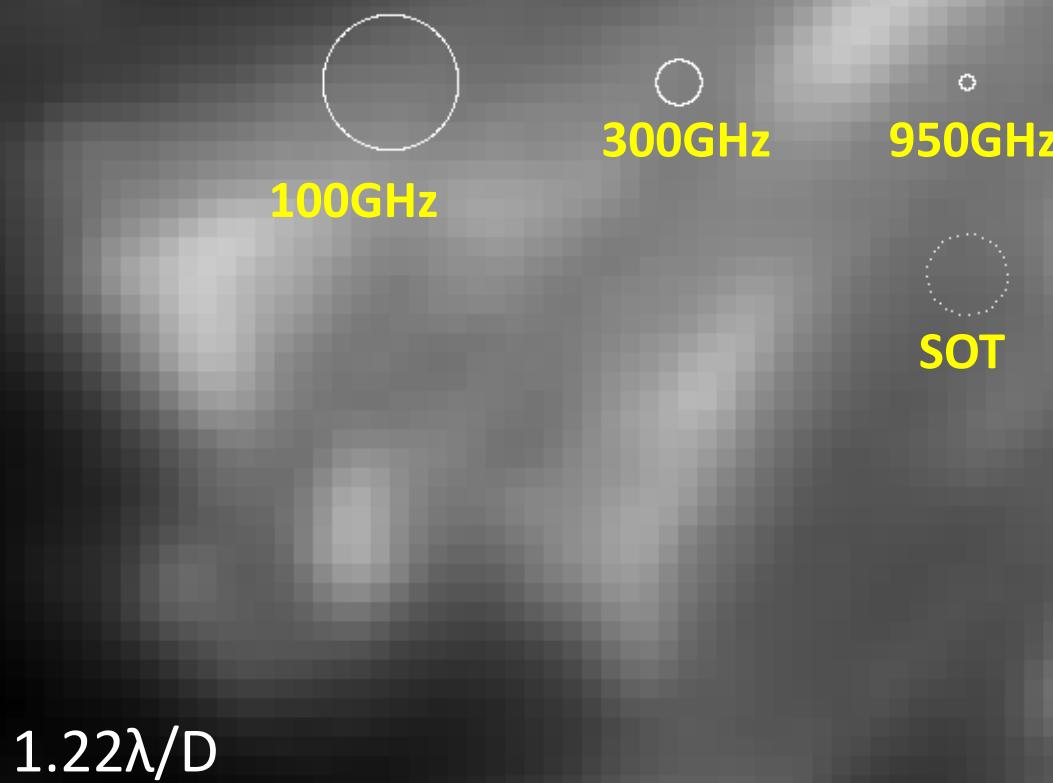


ALMA FOV



$960 \times 548 = 104'' \times 59''$

ALMA resolution



ALMA の特徴

- 高空間分解能
- Thermal thick で T_{\min} より上空の温度構造
- LTE, simple emission mechanism
- 一部非熱的放射
- 高いダイナミックレンジ > 1000 (?)
- 5分ごとによそ見？

ターゲット

- 黒点微細構造
 - 半暗部ジェット, light bridge, umbral dots,
- 三次元Canopy構造、彩層流(逆エバーシェッド)
- 黒点振動, wave
- ブライトニング、粒子加速、磁場構造
- 大気モデル
- 分子線の同定、ドップラー
-

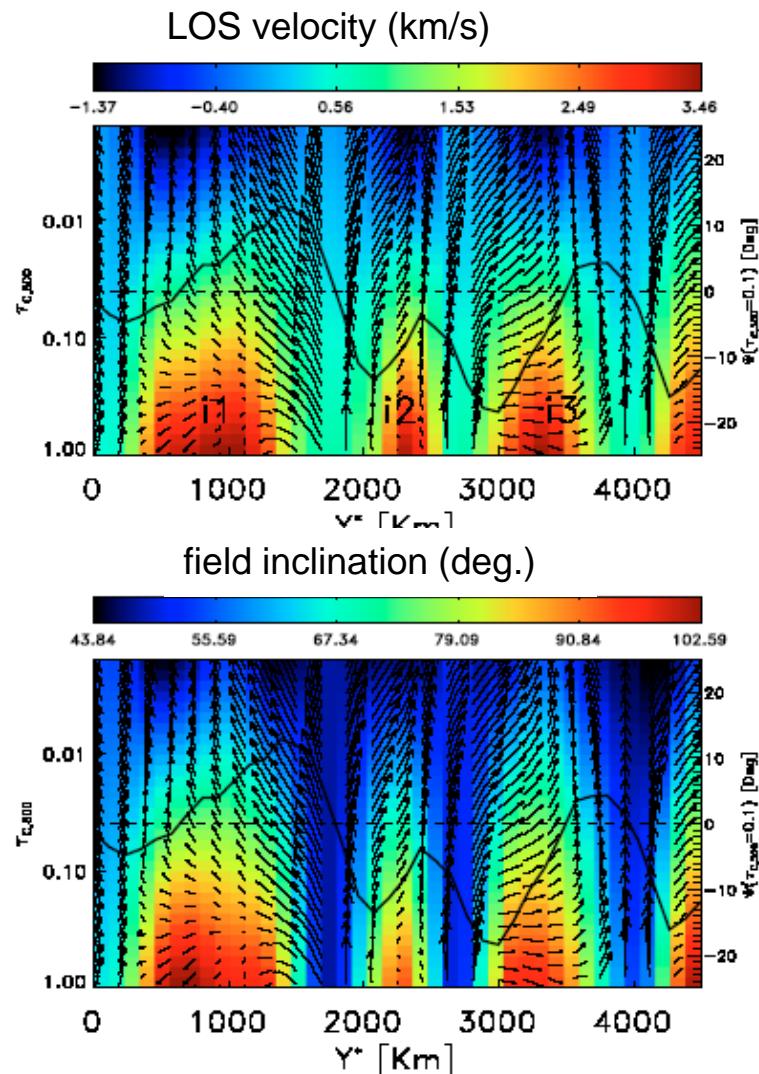
黒点における光球とコロナ境界領域の探査

多様な現象、

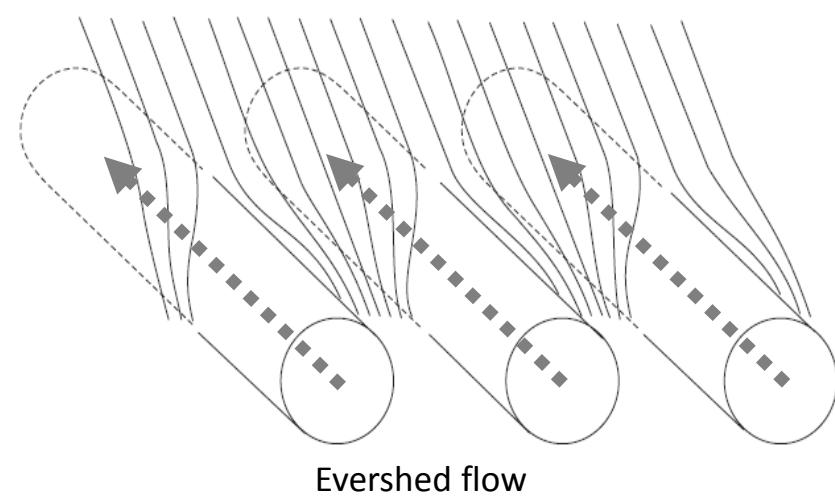
一般大気とは違った環境

ある意味わかりやすい磁場構造

半暗部の磁場・速度構造



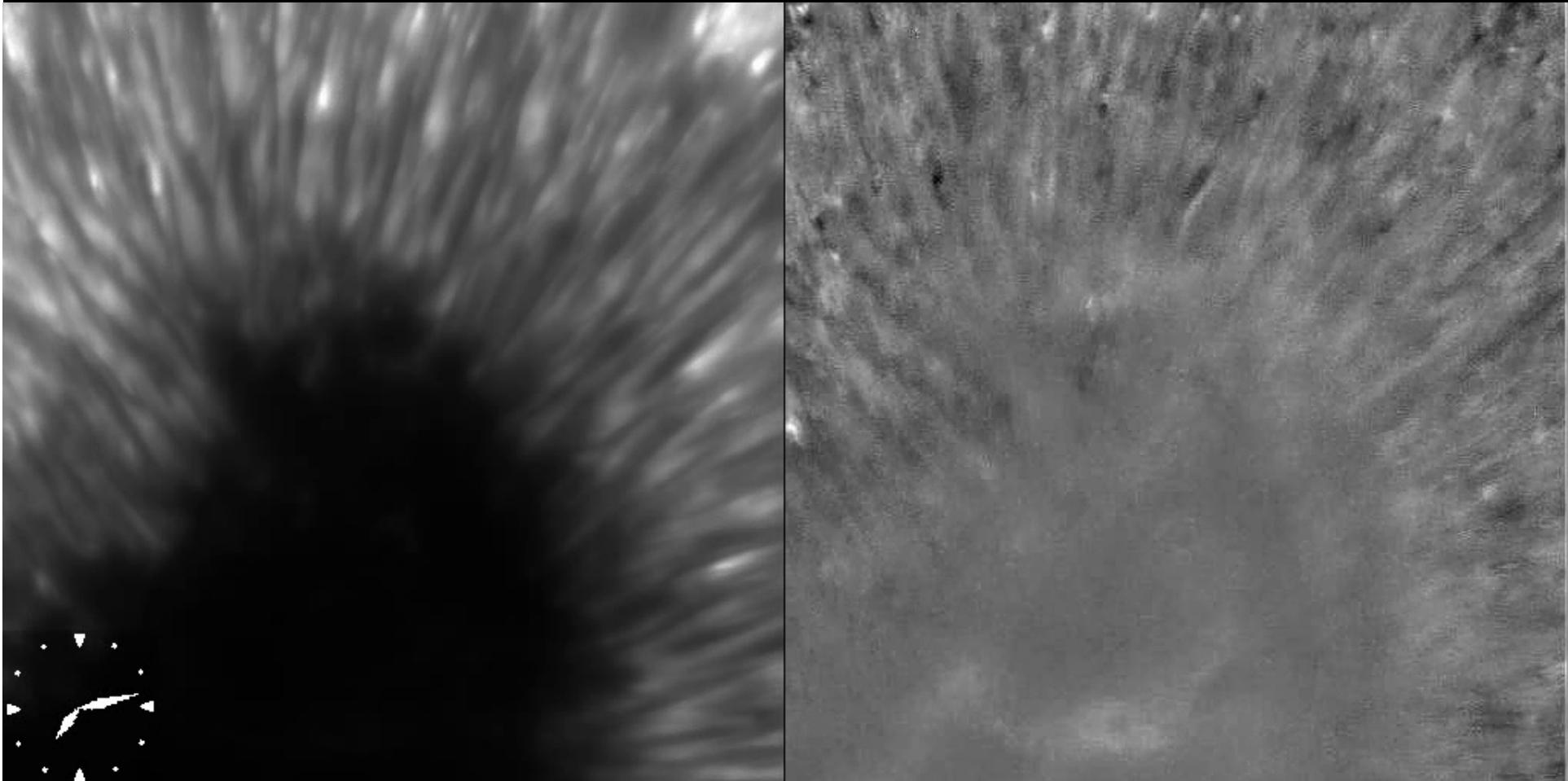
ALMA でみる高さは磁場はほぼ
一様。しかし密度構造はガスを
注入する領域のサイズで決まる
ので、いくらでも小さな構造はあ
り得る。



Penumbral micro jets

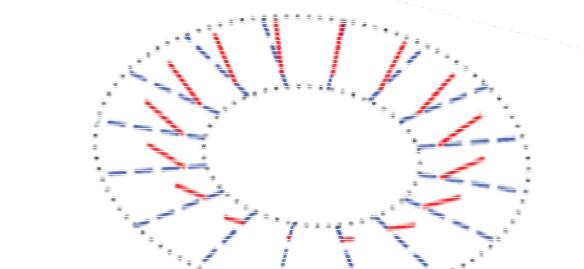
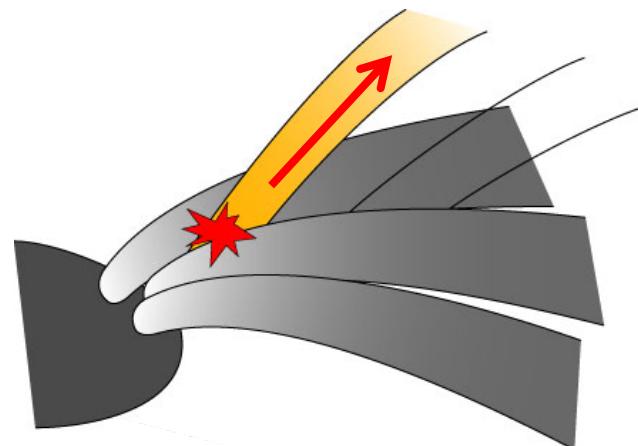
Call H movie

Katsukawa et al. (2007)

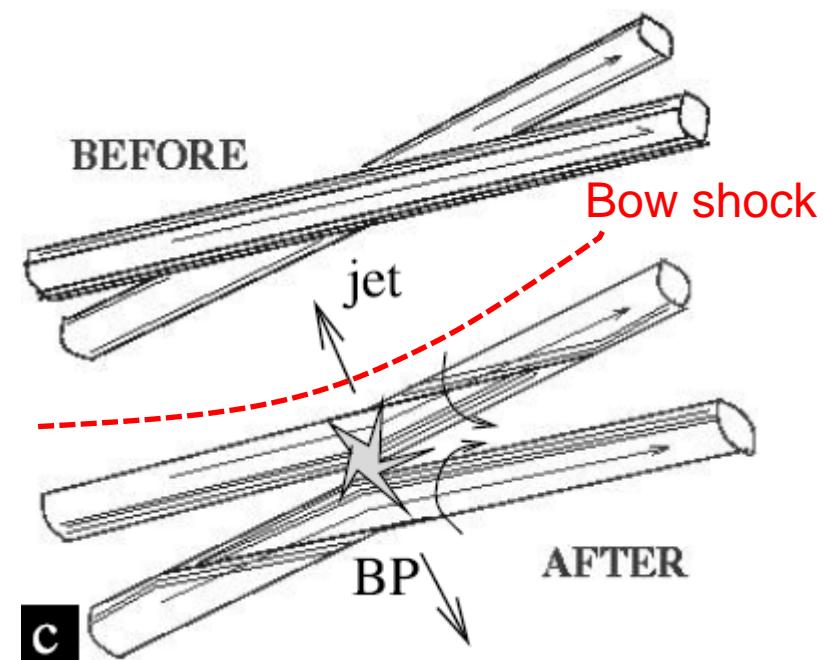


- Length: $1'' \sim 5''$ (1000km \sim 4000km), Width: $\sim 0.4''$ (300km)
- Duration: Shorter than 1 min
- Observed everywhere above the penumbra!

Interpretation: Magnetic field reconnection in the uncombed 3D penumbral configuration.



Katsukawa et al. 2007

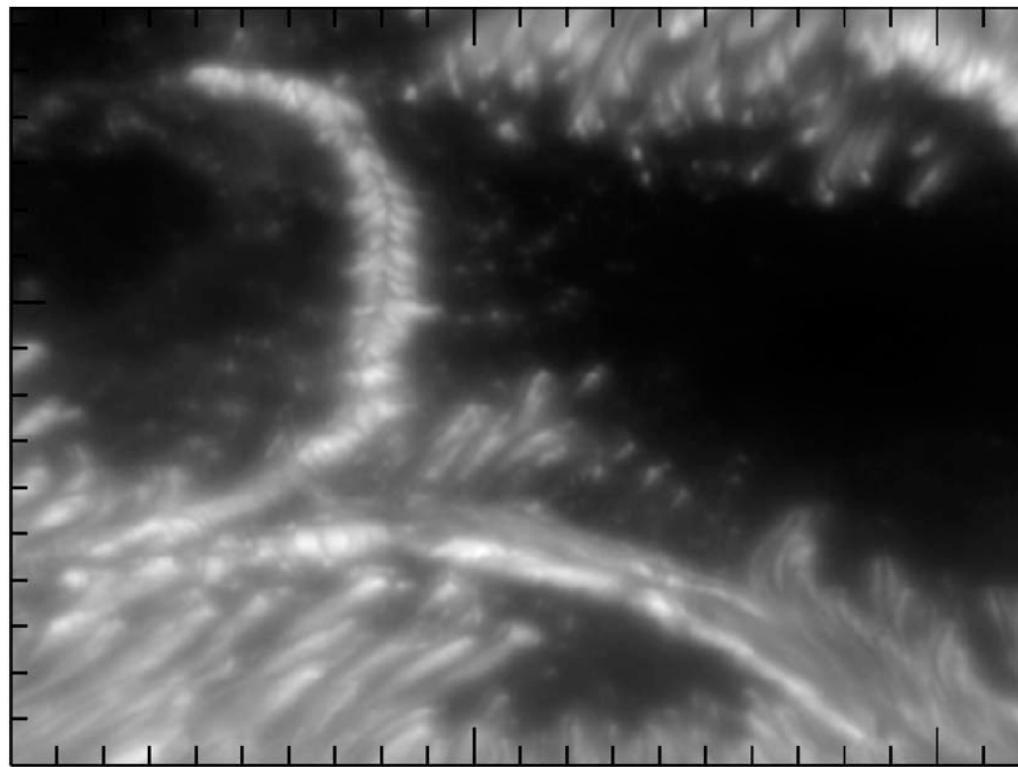


Ryutova et al. 2008

ALMA半暗部ジェットの観測

- リコネクションの現場は深すぎておそらくALMAでは見えない(はず)。
- もし見えたなら半暗部磁場構造の再検証必要。
- ジェットに伴う何らかの増光は観測されると期待できる。
- 高空間分解能によるジェットの横方向の運動、噴出速度、密度分布、捻れ構造、など。
- 高ダイナミックレンジによるリム観測。
- 時間分解能<10s 必要

ライトブリッジ



3D structure of light bridge
Lites et al, 2004, Solar Physics

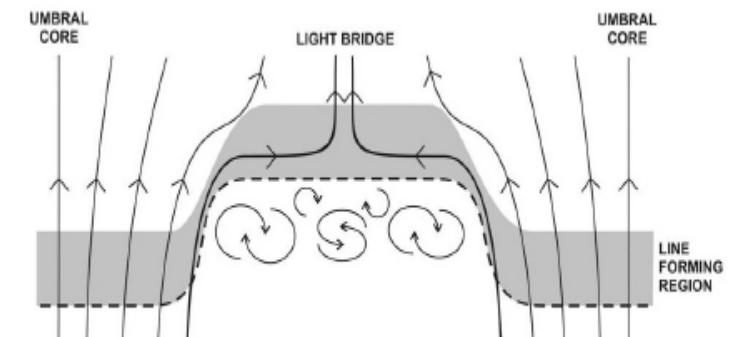
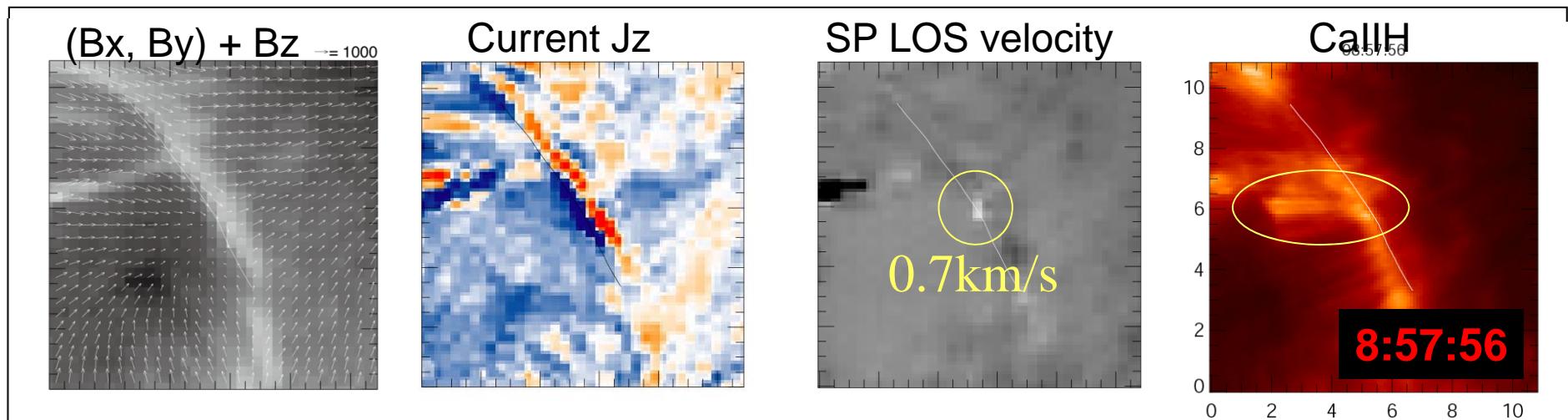
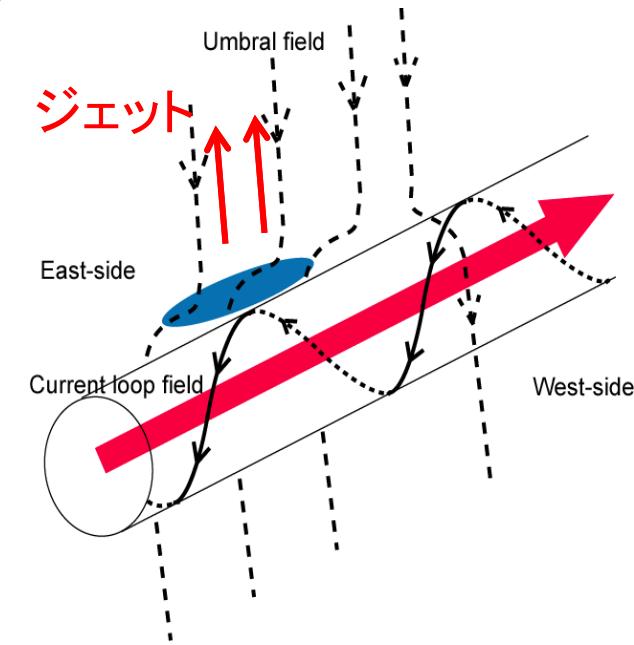
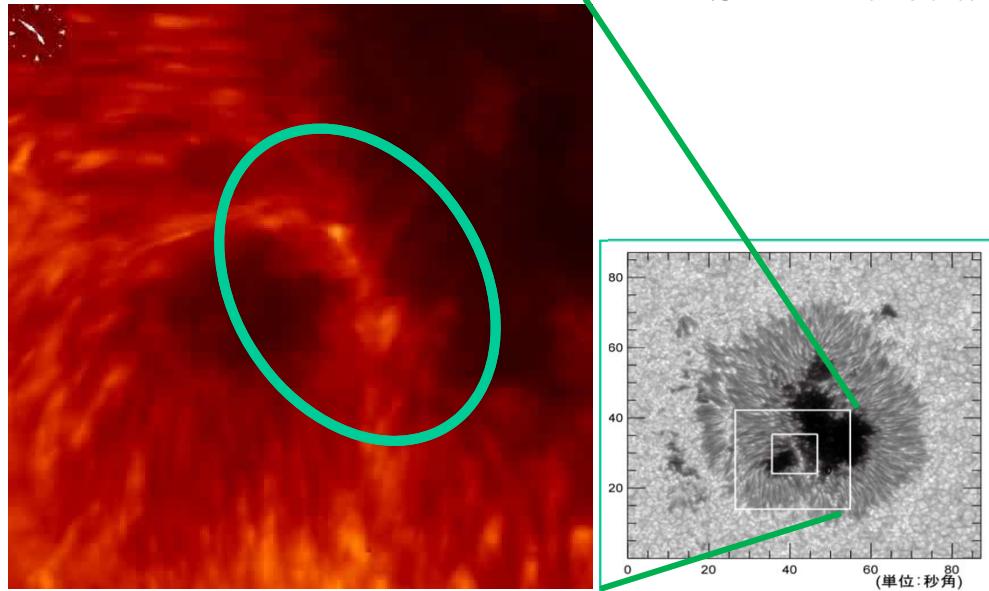


Fig. 7. Schematic view of the magnetic canopy above LB.

Jurcak et al 2006.

ライトブリッジからのジェット

Shimizu et al. 2009, 2011



ライドブリッジのジェット

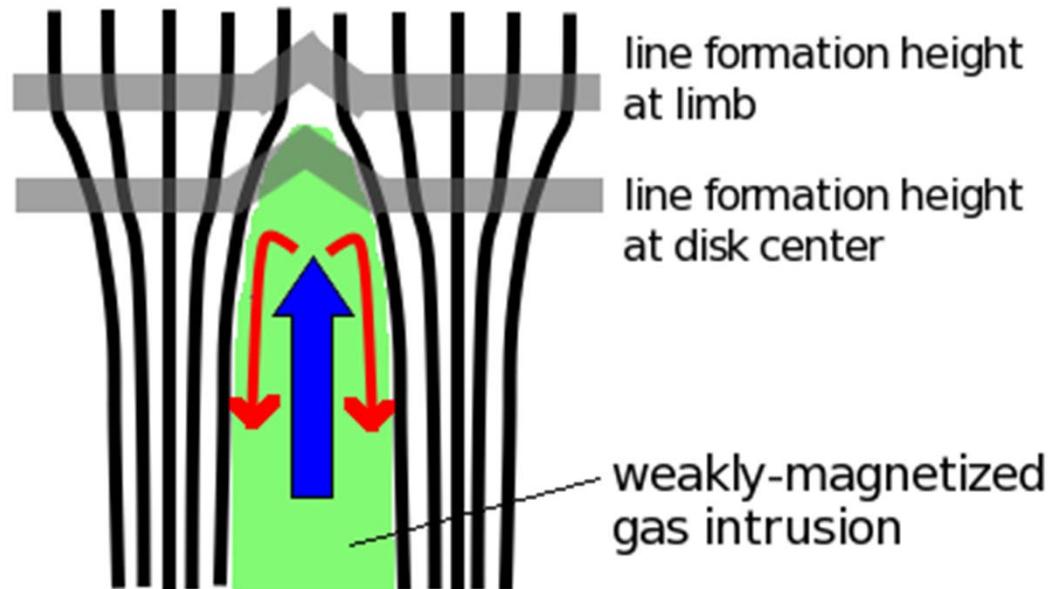
カーテン状のジェット

- ひのでよりも高い空間分解能によるジェット足下の微細構造
 - ジェットの真の太さ
 - 磁気リコネクション要素のサイズ
- 捻れ的構造

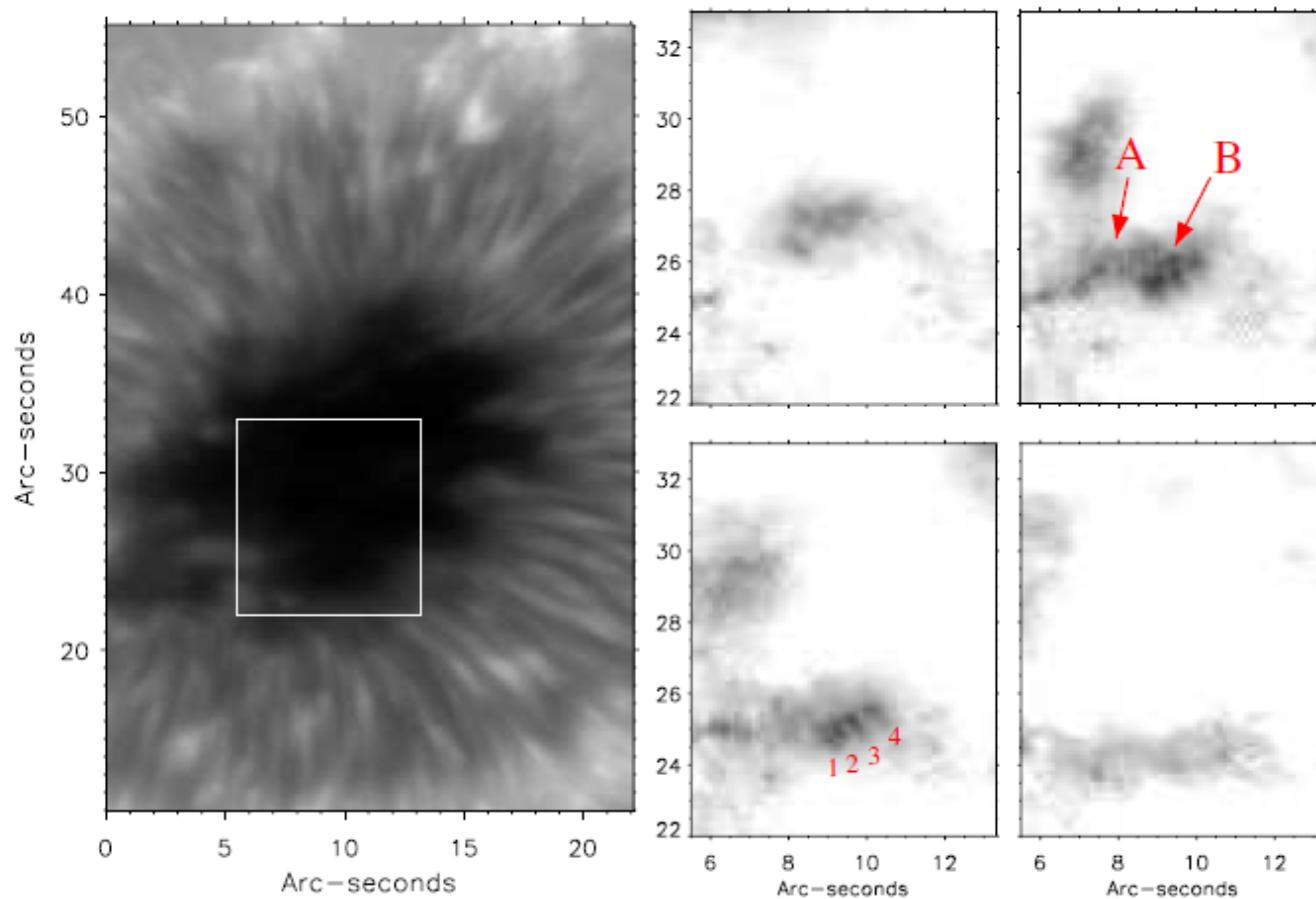
umbral dotの磁場と速度場

- 磁場強度が弱く(Fe I 6302で17Gauss)、水平に傾いていて(0.6°)、上昇流(28m/s)を伴う

H.Watanabe et al. (2008)
in preparation
center-to-limb variation
によるcusp型磁力線の 証拠



Umbral flush の微細構造



Socas Navarro et al. 2009

SOTの分解能以下の構造
早い変化、 $\sim 30\text{km/s}$ の移動

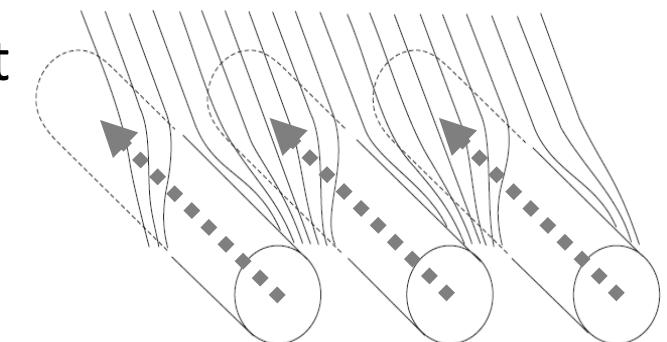
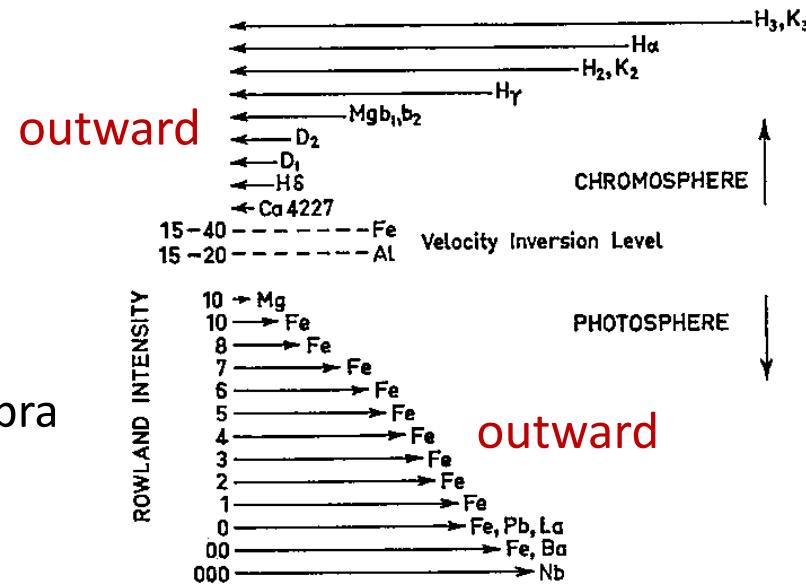
逆エバーシェット流

known as a gas flow
towards the umbra in
chromospheric layer over
the penumbra.

Doppler signal in penumbra
Bray & Loughhead 1965

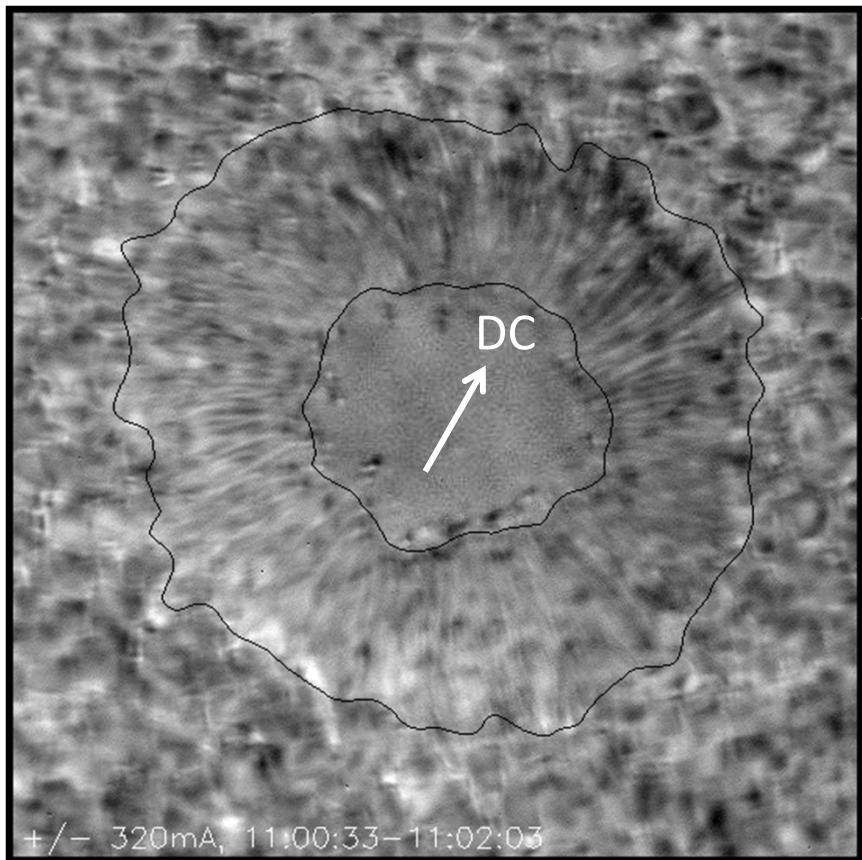
Questions;

- Does the invers Evershed flow take place in the elevated magnetic field component of the interlocking penumbral structure?
- Is the flow intermittent or stationary?
- What is the origin of the flow?

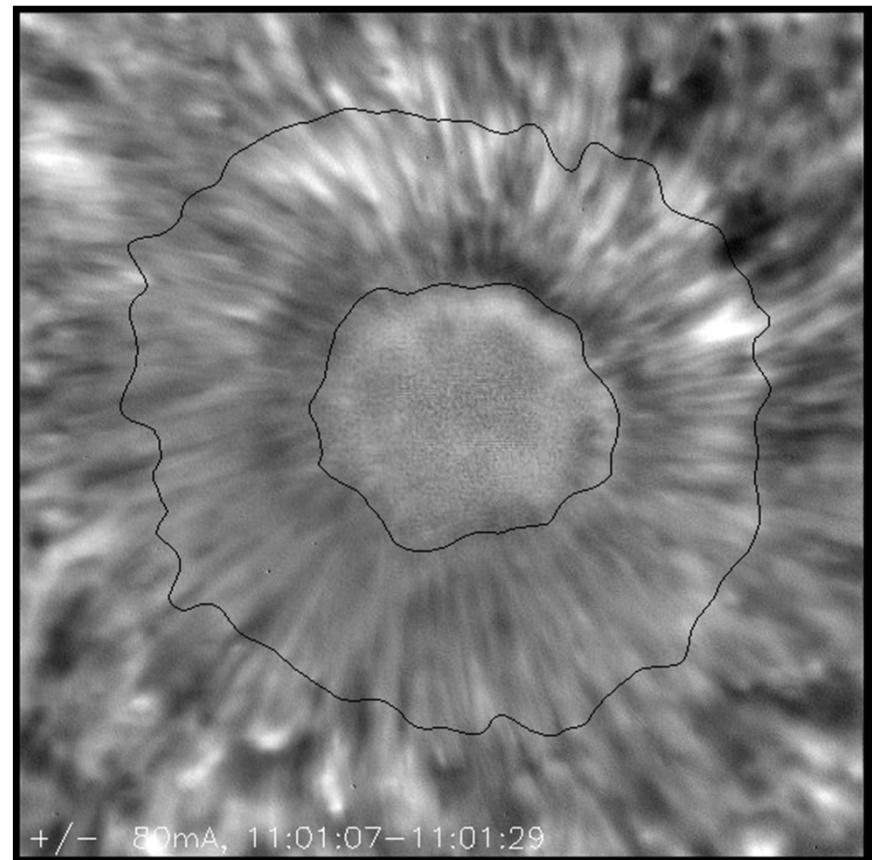


逆エバーシェット流; SOT観測

Na D Dopp. \pm 320mA

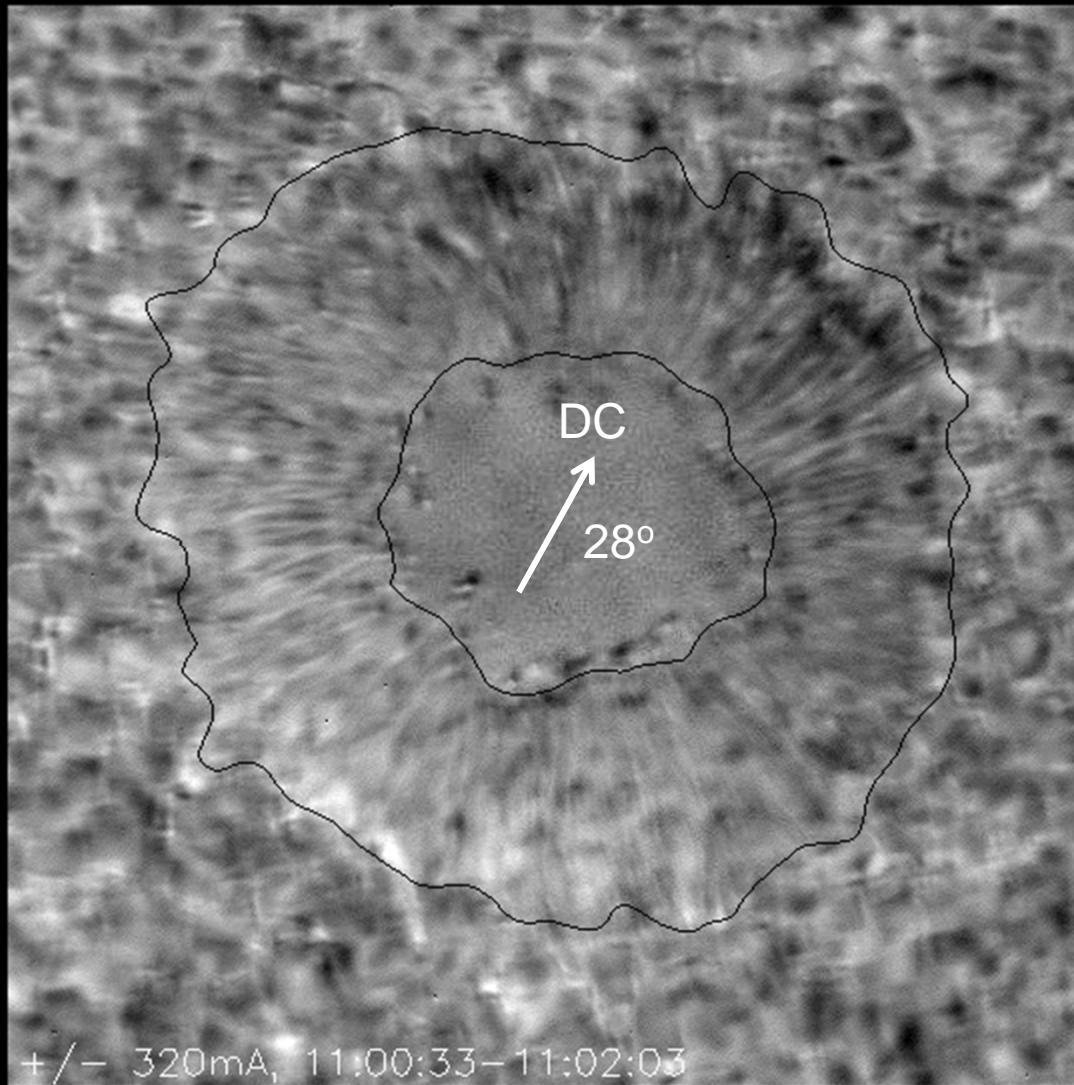


Na D Dopp. \pm 80mA



Na D Dopp. \pm 320mA

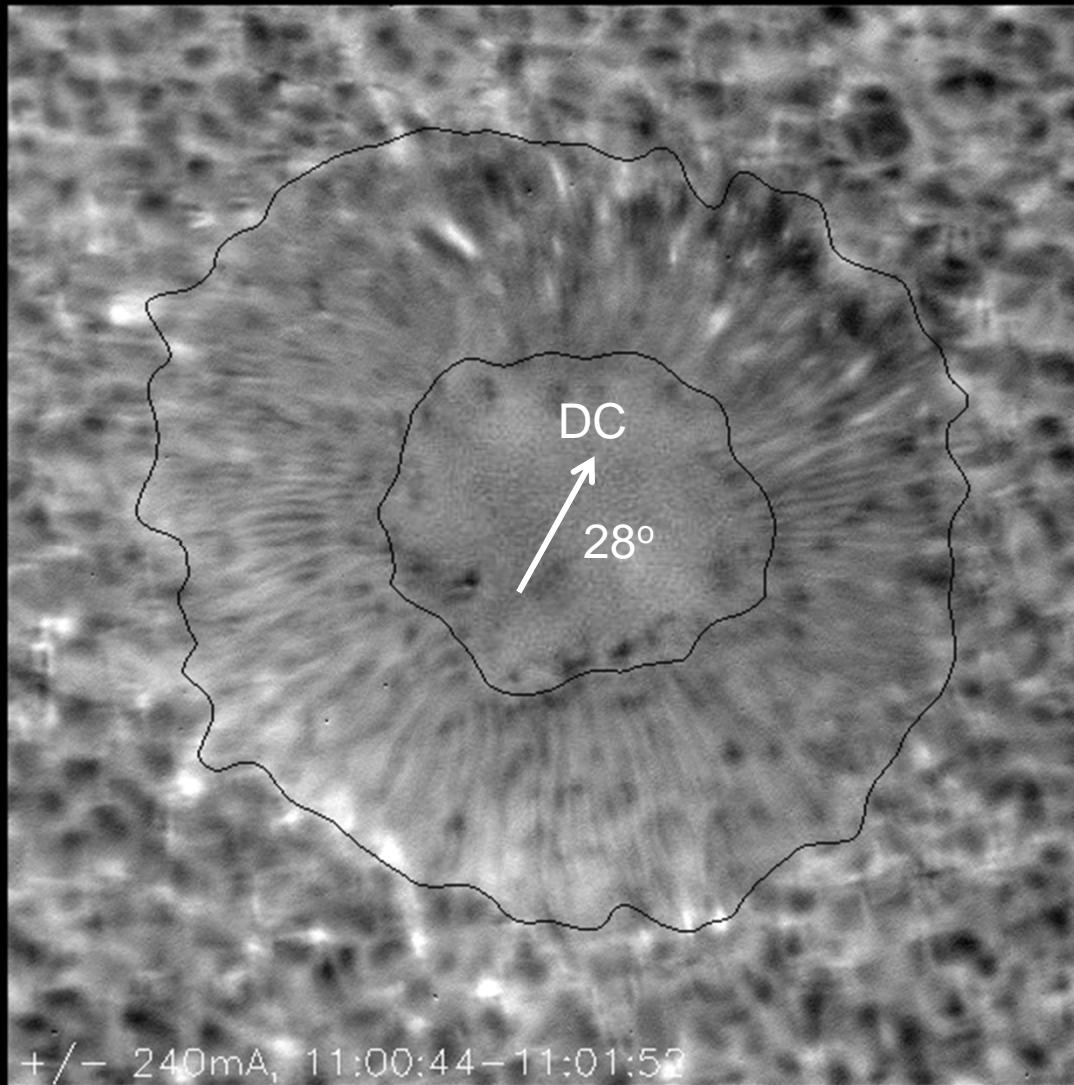
(Hinode/SOT/NFI)



Photospheric Evershed flow

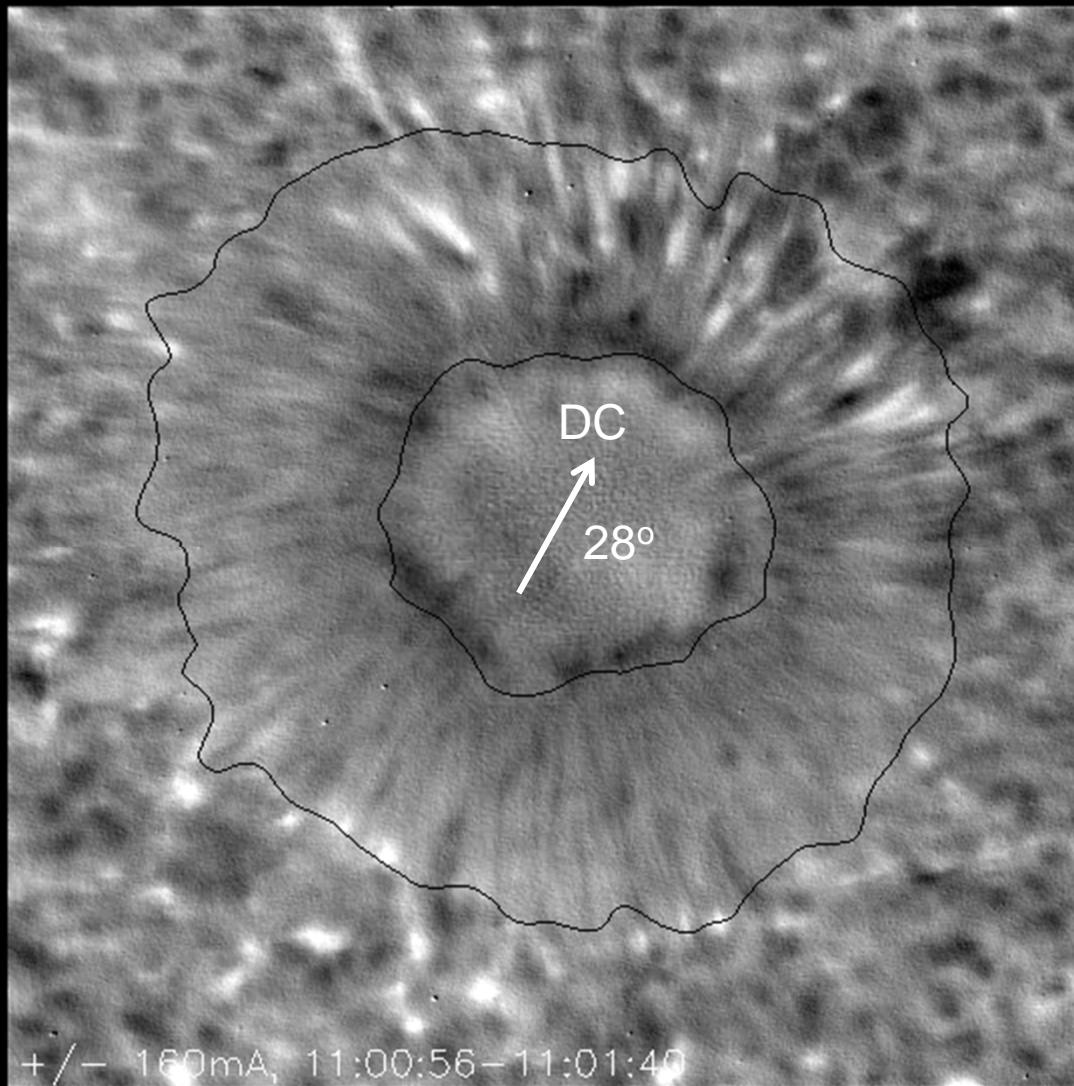
Na D Dopp. \pm 240mA

(Hinode/SOT/NFI)



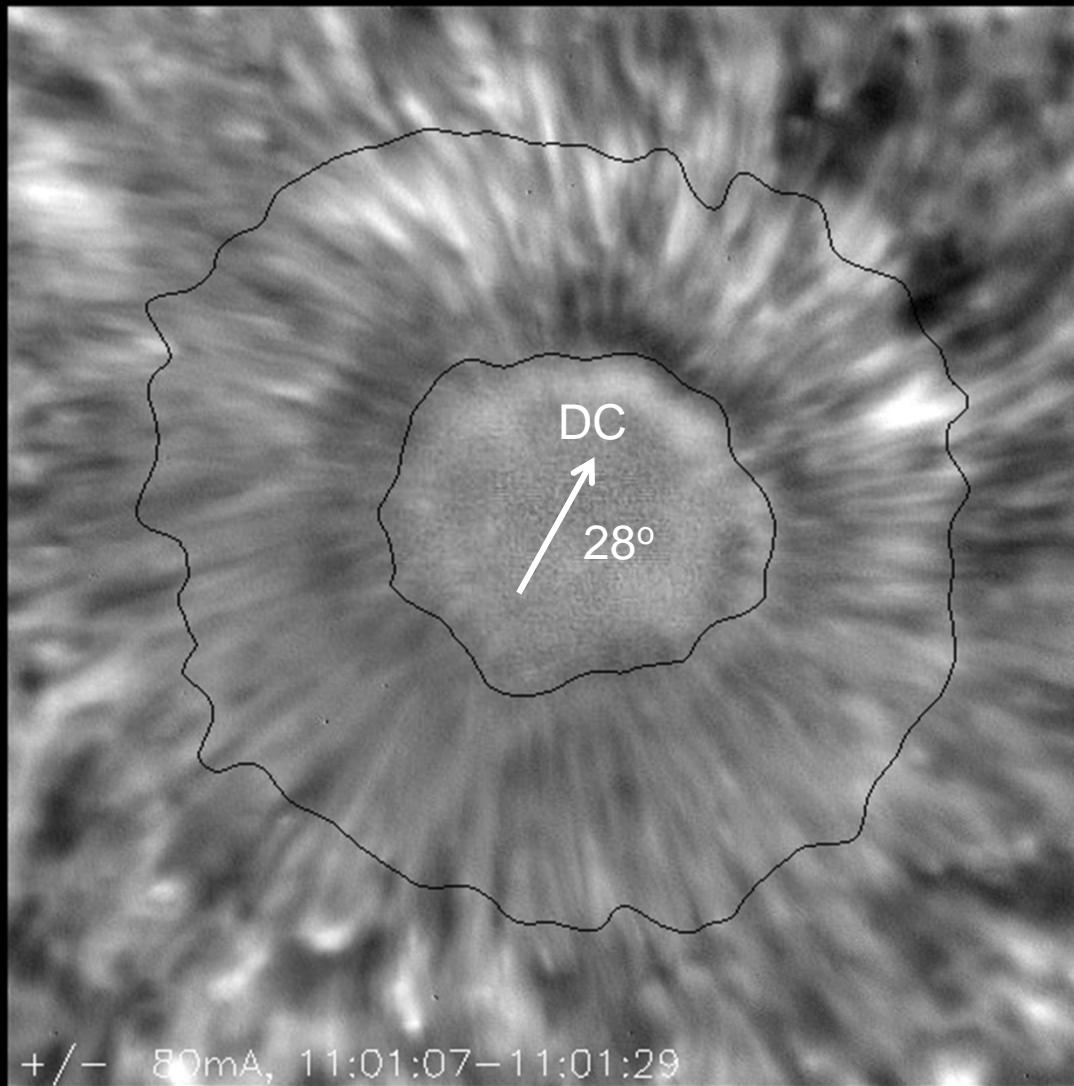
Na D Dopp. \pm 160mA

(Hinode/SOT/NFI)



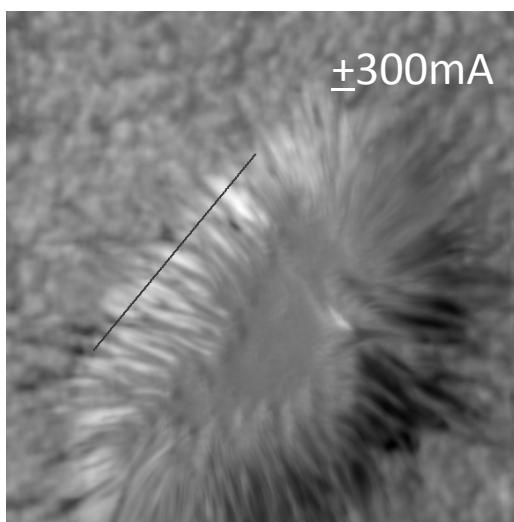
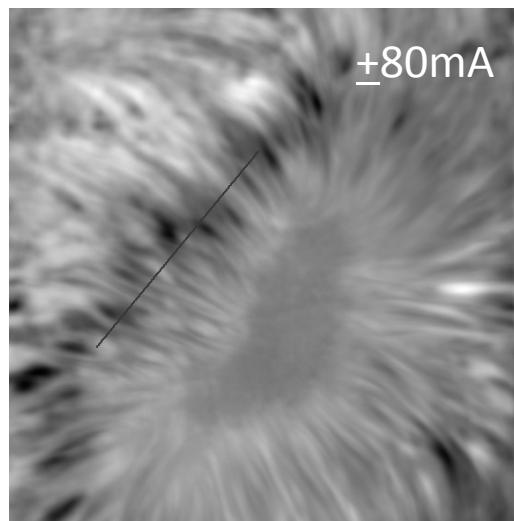
Na D Dopp. \pm 80mA

(Hinode/SOT/NFI)



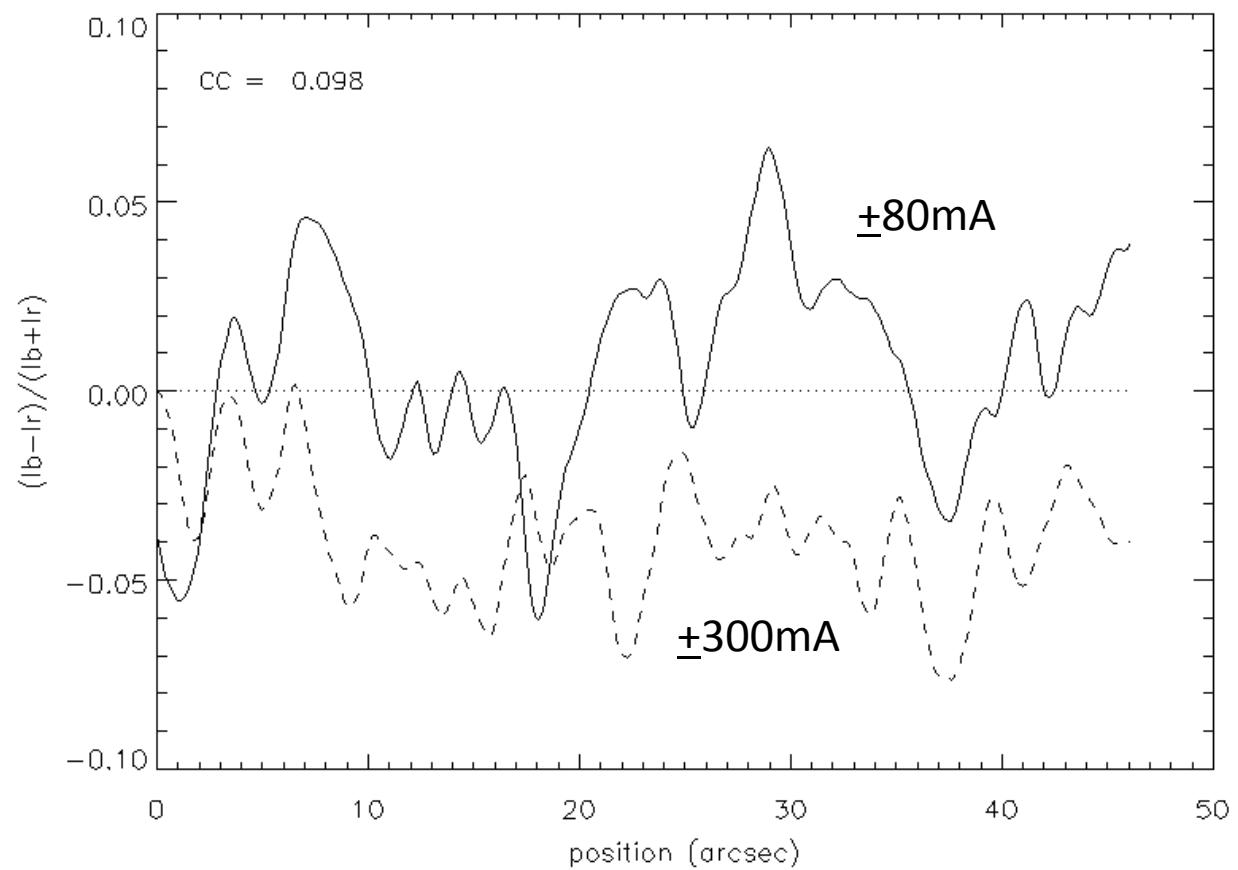
Inverse chromospheric Evershed flow

Spatial correlation, DC side

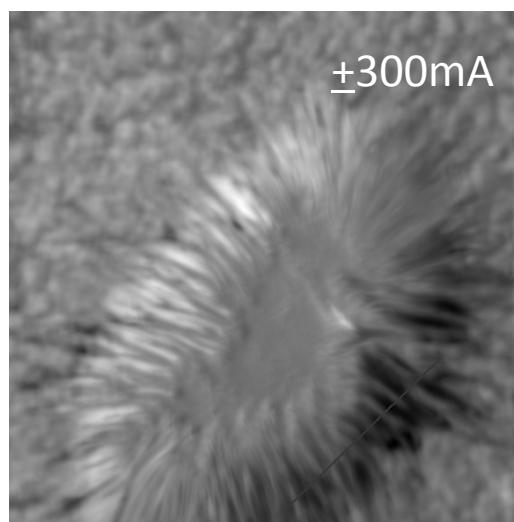
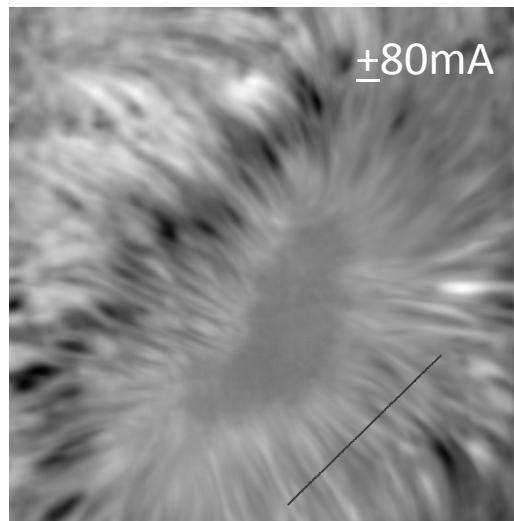


Time average

2011.04.26

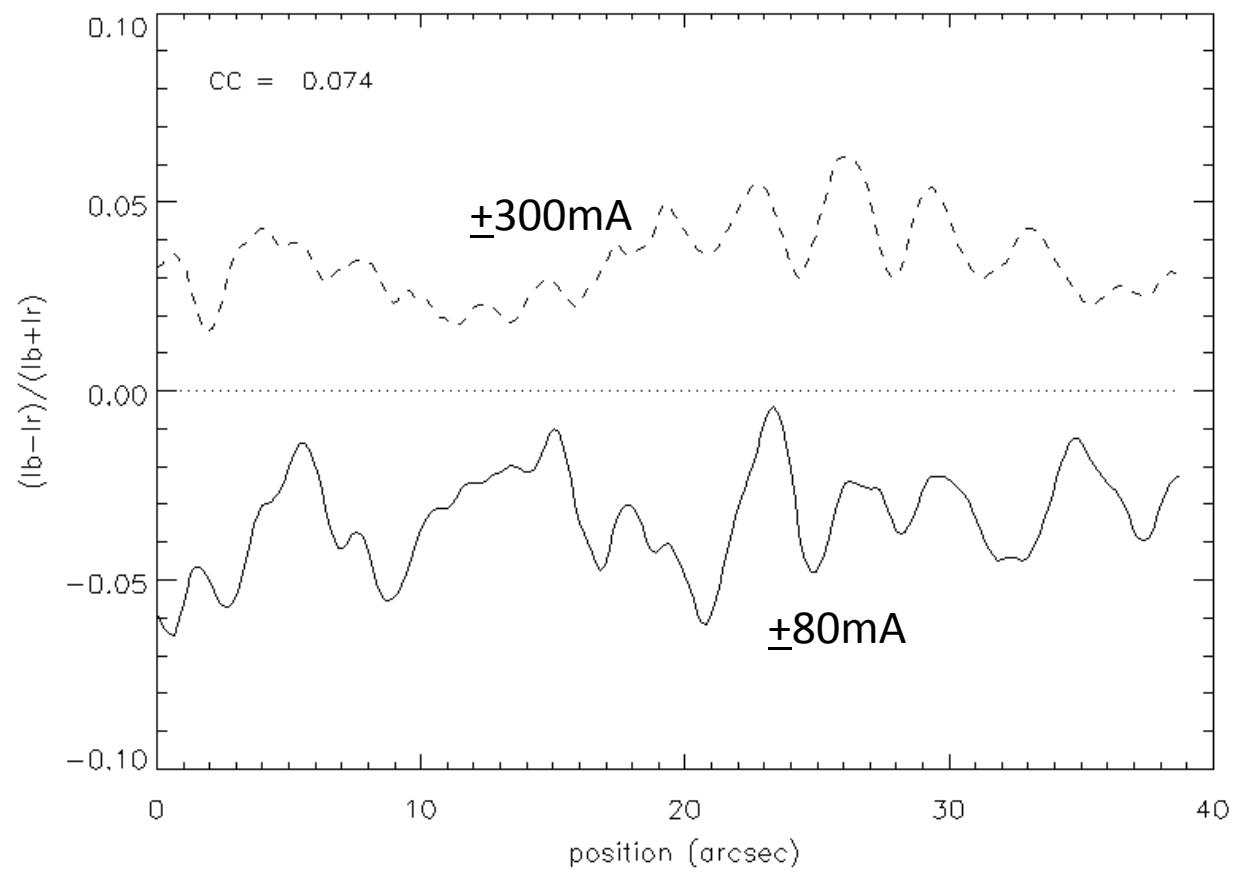


Spatial correlation, limb side

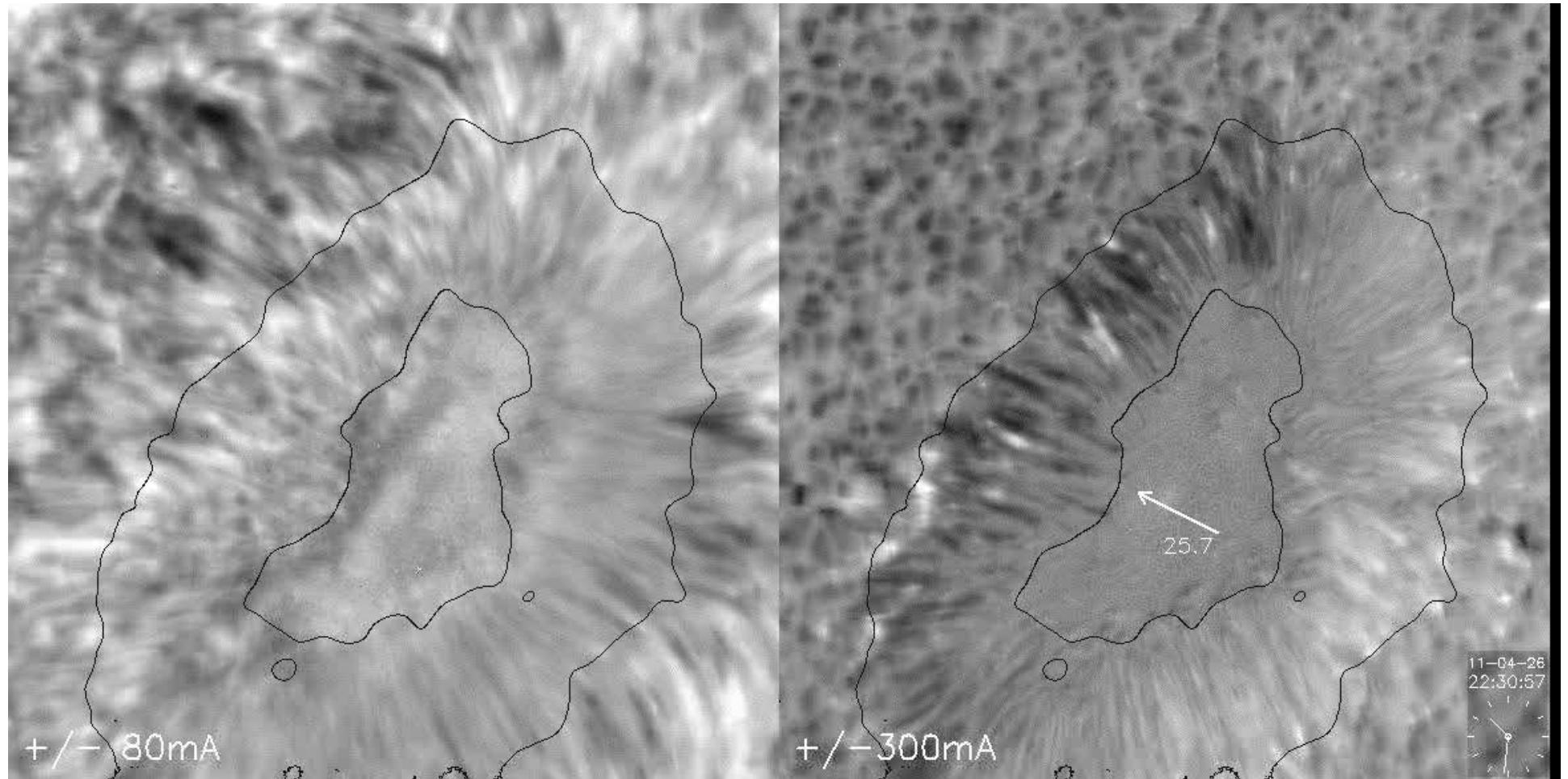


Time average

2011.04.26



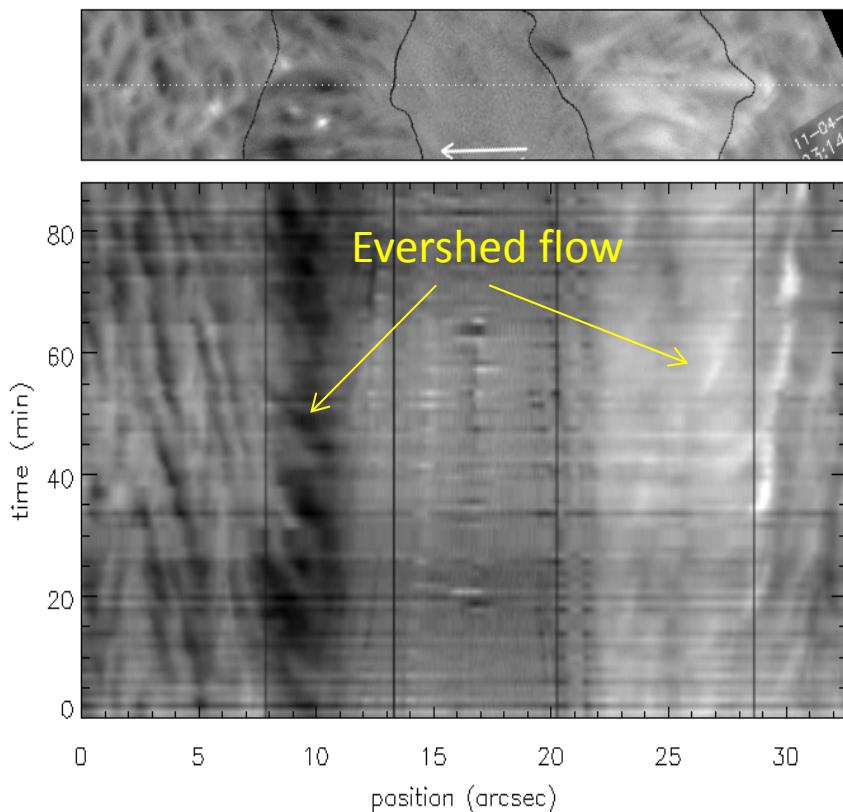
2011.04.26



Dopp.gram Time slice

← Disk center

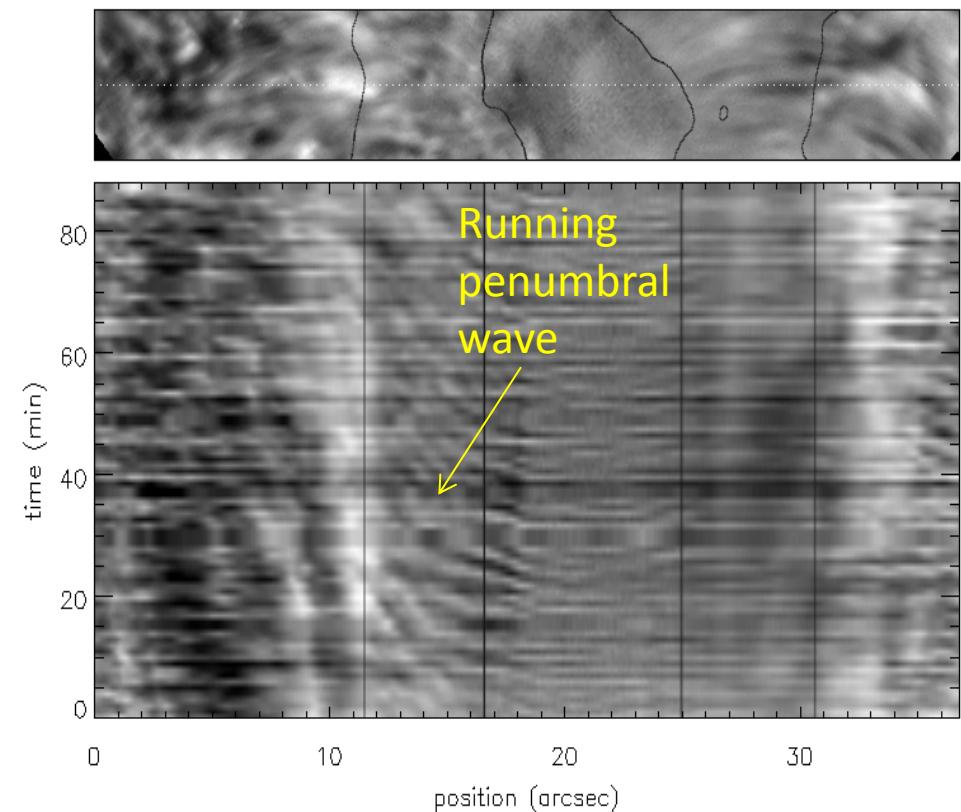
limb →



$$(I_{-300} - I_{+300})/(I_{-300} + I_{+300})$$

← Disk center

limb →



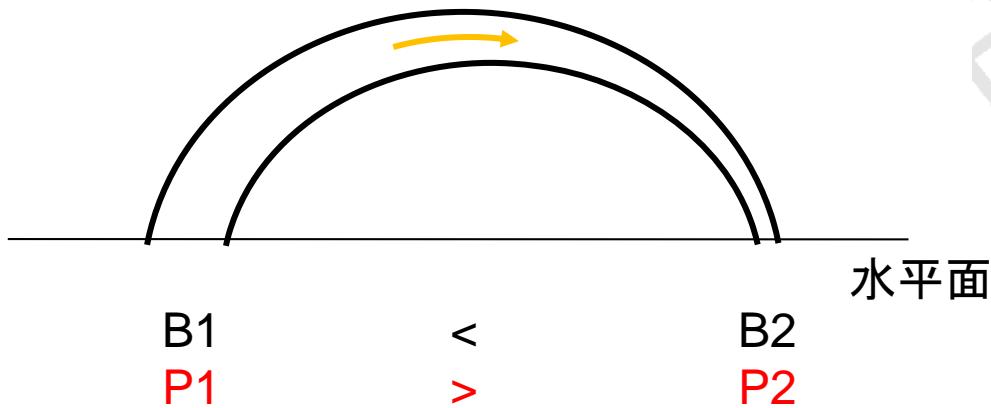
$$(I_{-80} - I_{+80})/(I_{-80} + I_{+80})$$

Running penumbral wave is one of the dominant source of Doppler signal in ± 80 mA. Inverse Evershed flow is not visible in timeslice.

超音速流をドライブするメカニズムは何？

サイフォンフローモデル

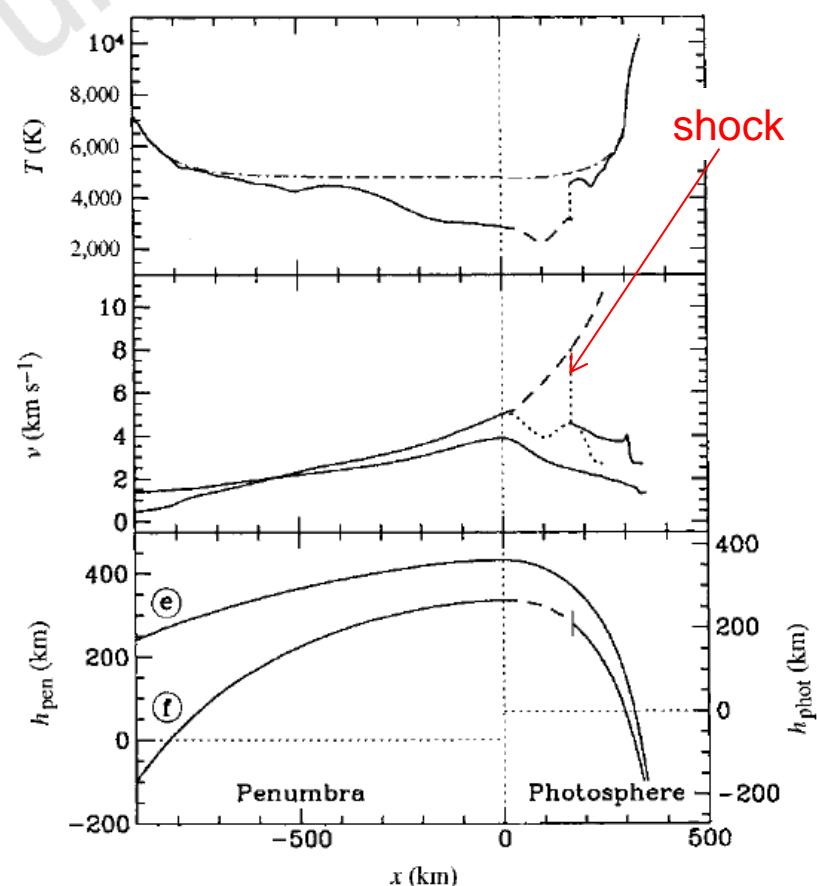
$$P_g + \frac{B^2}{8\pi} = \text{一定}$$



thin flux tube 近似 → 1次元流体運動方程式

- ・ 与えるのは定常解
- ・ 外側のfoot point の磁場が常に umbra側 よりも強いことを要求
- ・ 原理的に、、、

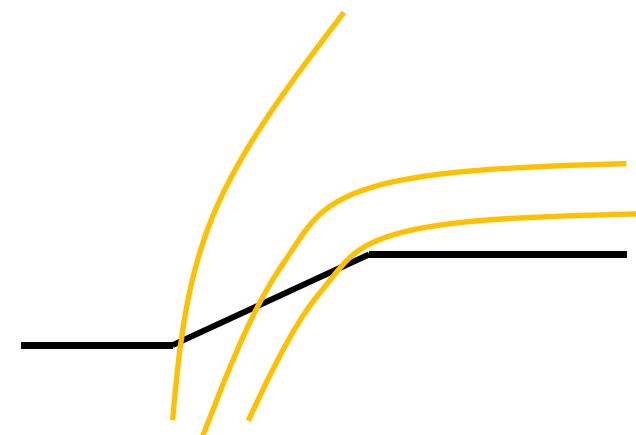
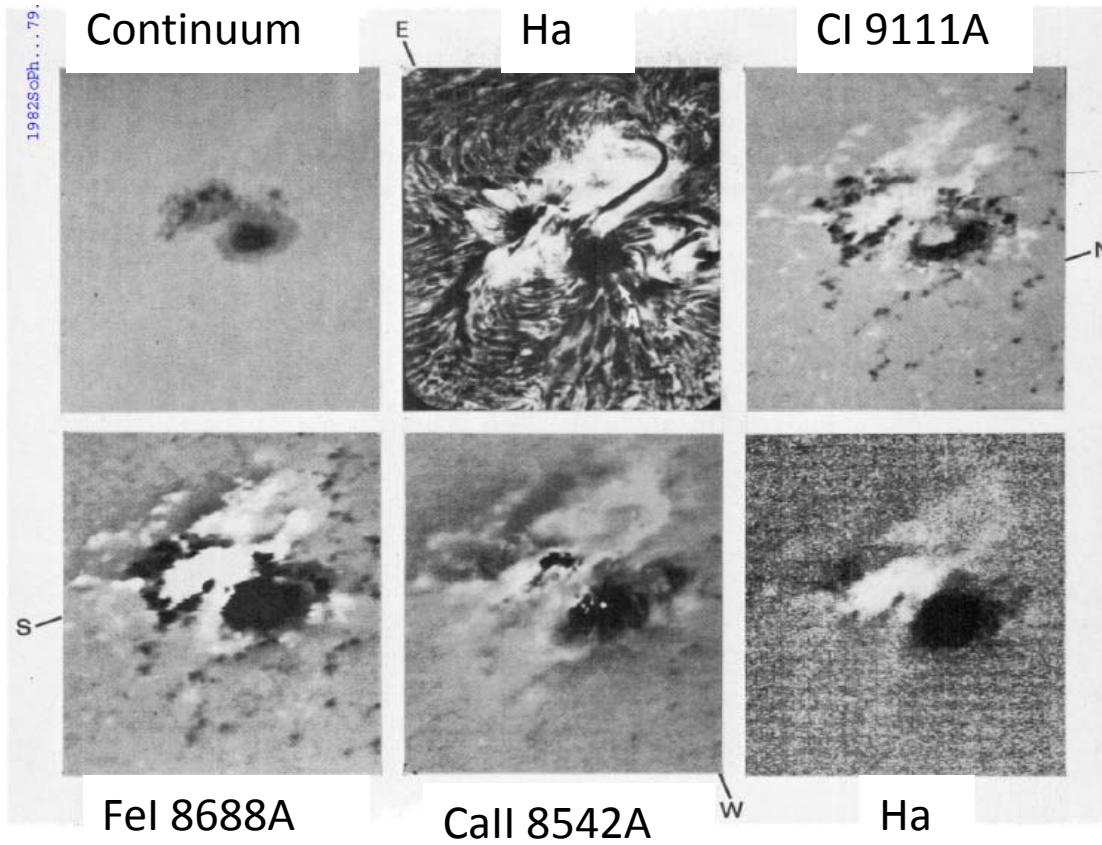
Meyer & Shimidt, 1968, Astron.J., 73, S72
Thomas, 1981, in "The Physics of sunspots"
Thomas, 1988, ApJ, 333, 407
Montesinos and Thomas, 1993, ApJ, 402, 314
Montesinos and Thomas, 1997, Nature, 390, 4



ALMA 逆エバーシェット流の観測

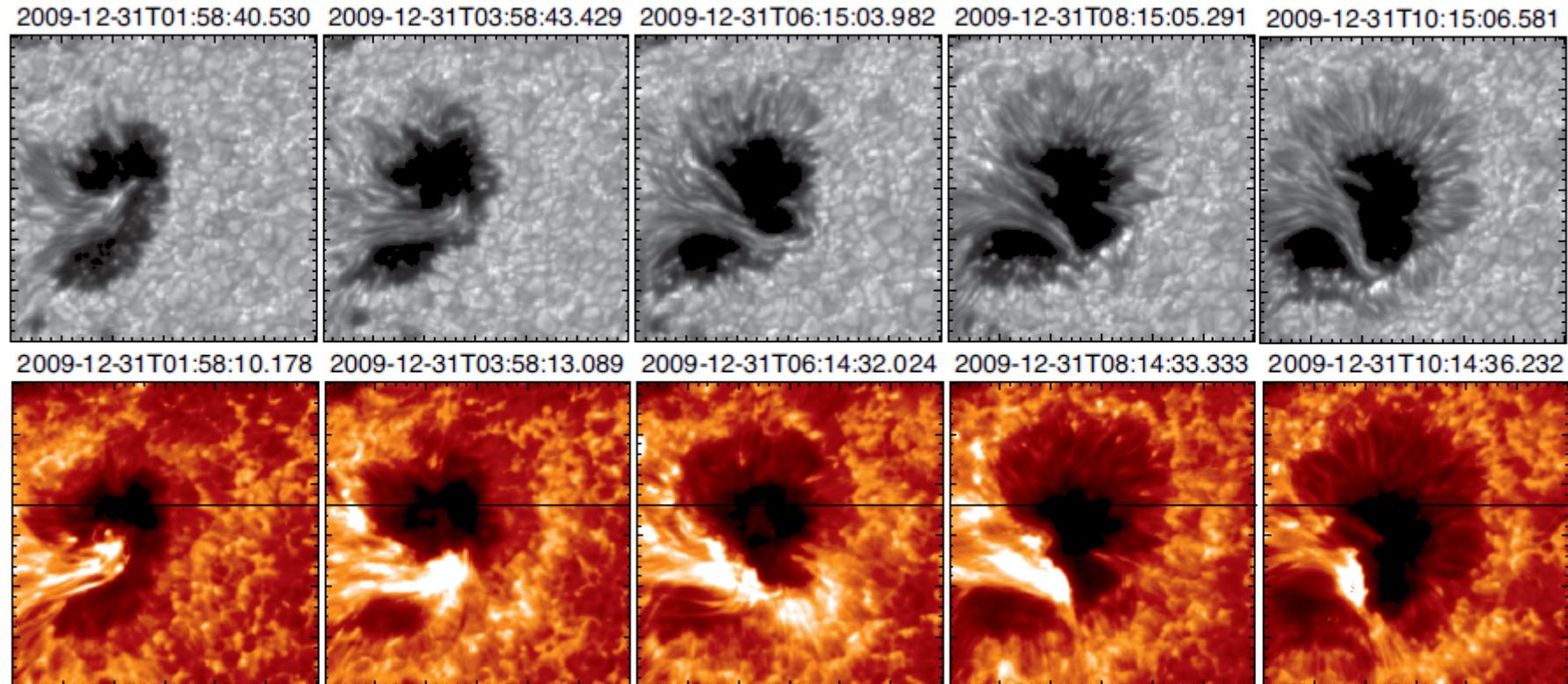
- 高い空間分解能により、流れるガス(むらがあるとして)を追跡。
- メカニズム: サイフォンフローが主流だが。。速度分布、衝撃波の存在、等の検証。
- 逆エバーシェット流はどこを流れているか？
- 半暗部の磁場構造は？

Magnetic Canopy



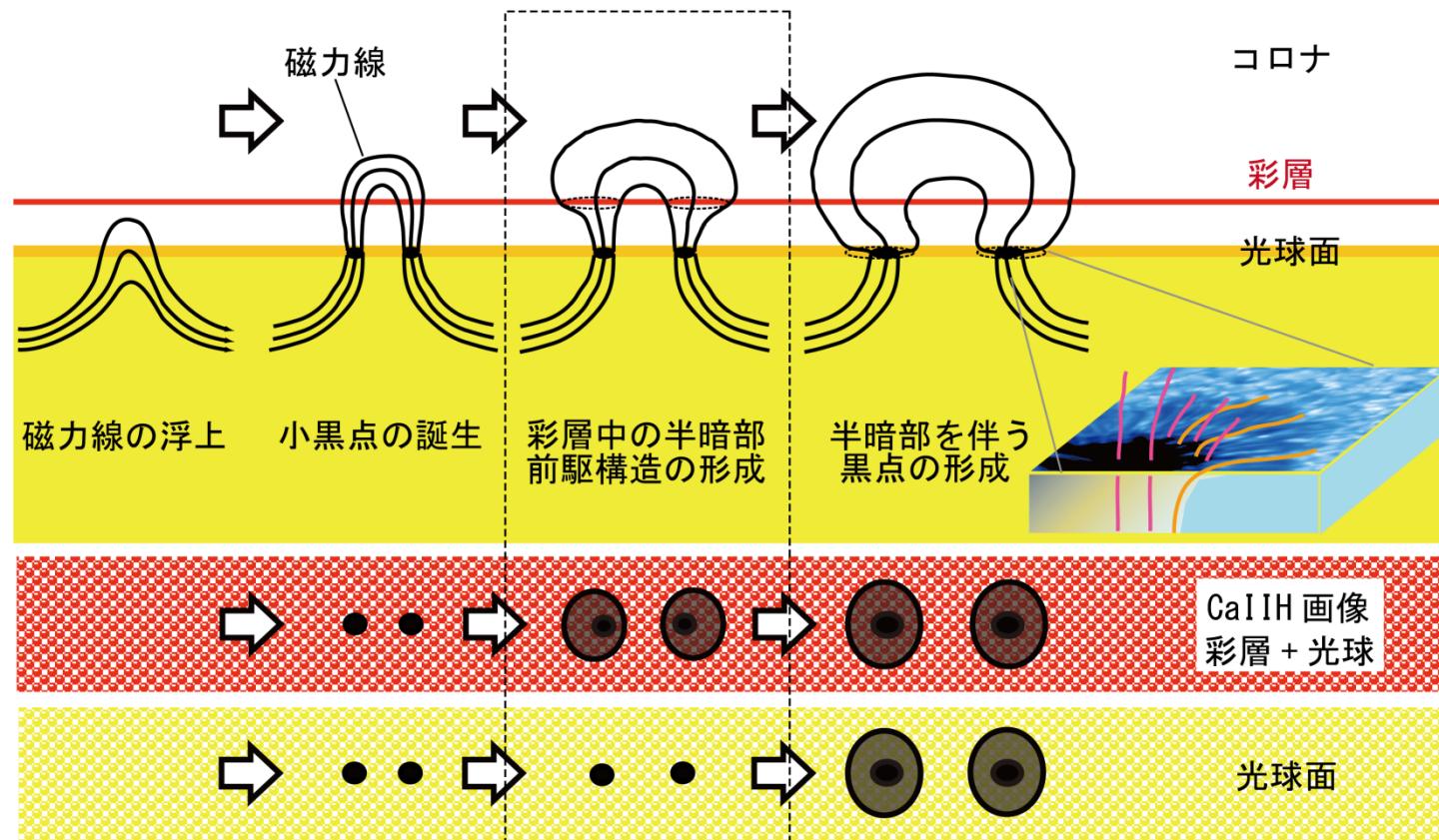
Giovanelli and Ronald 1982

半暗部形成の前駆構造



Shimizu et al 2012

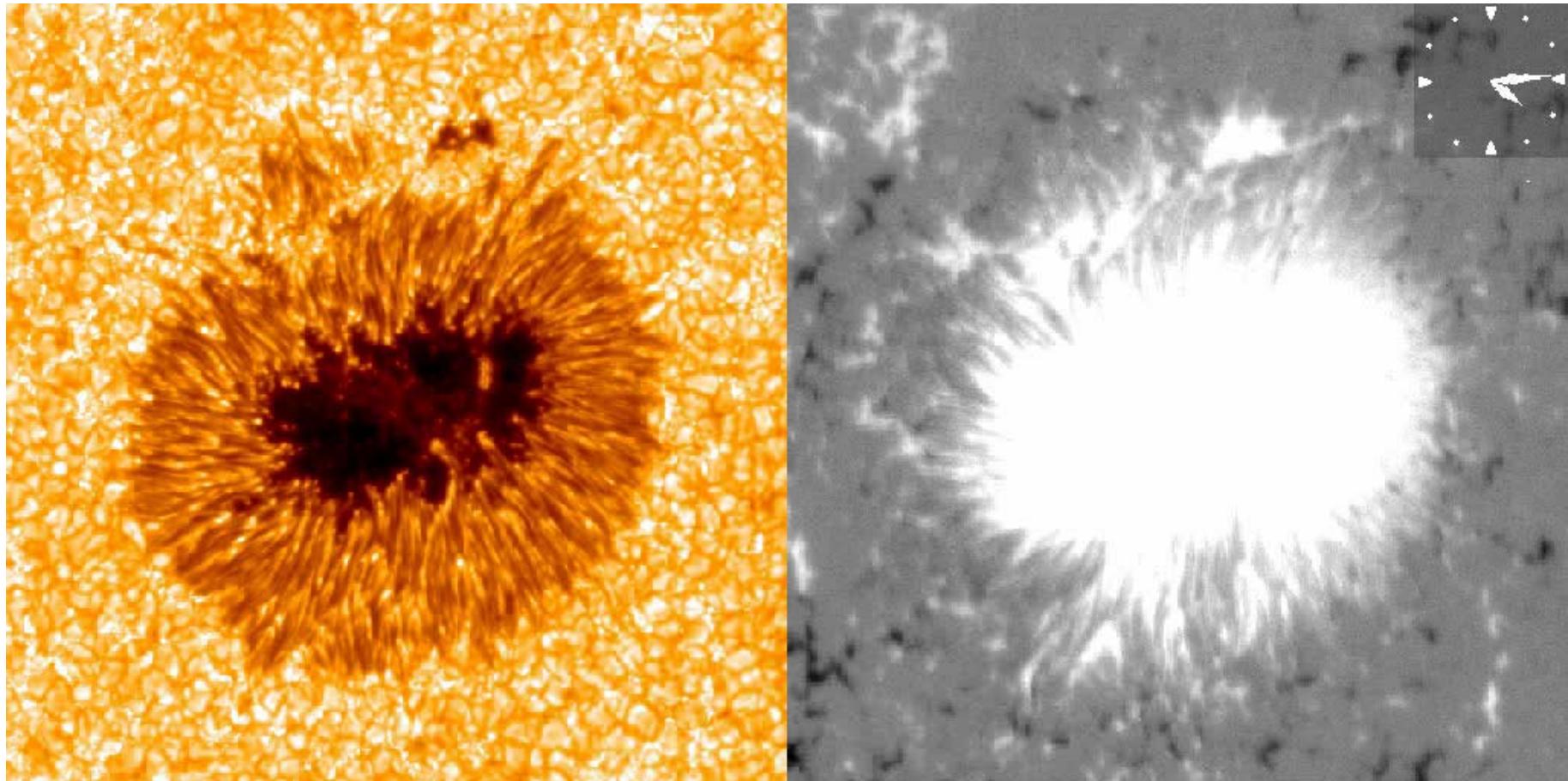
半暗部形成の前駆構造



Canopy の形成、逆エバーシェッド流はいつ始まるのか？

黒点の衰退とMMF

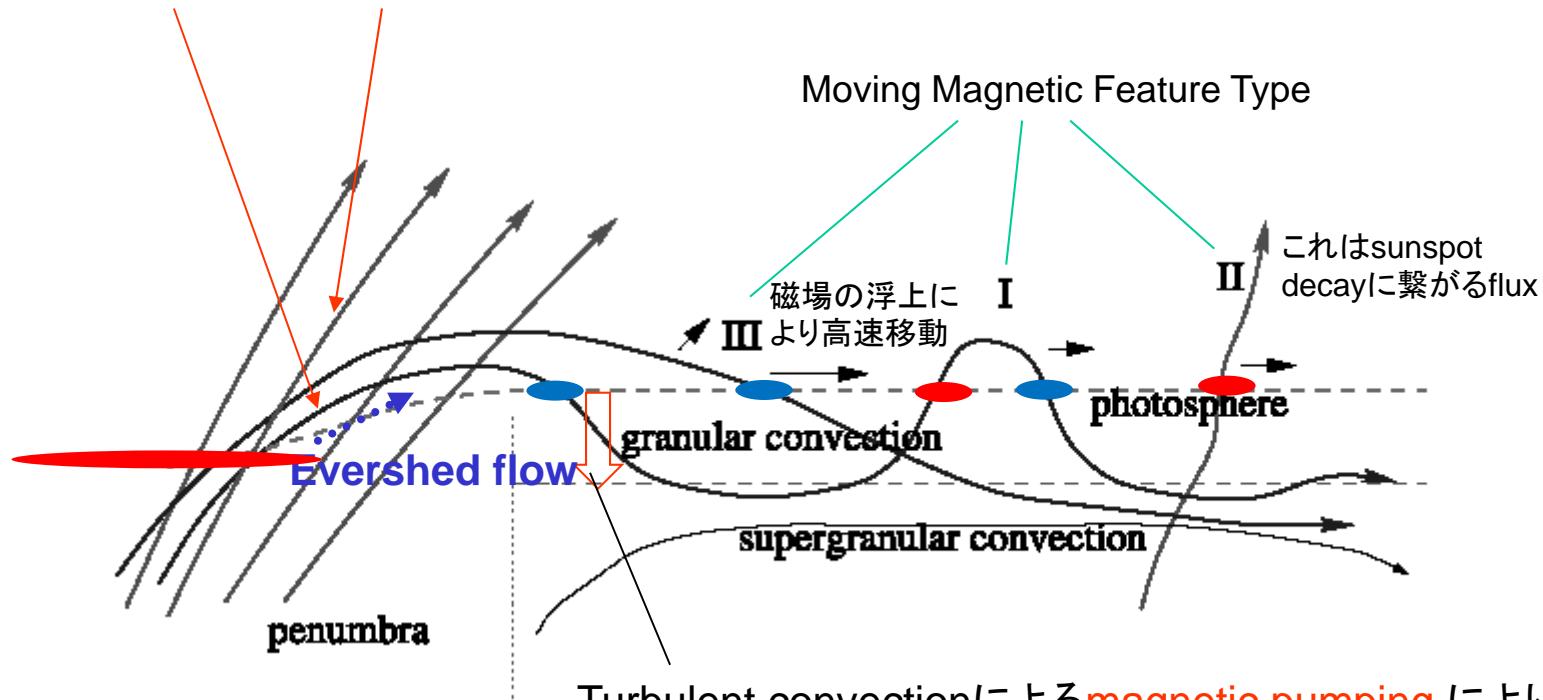
Moving Magnetic Feature (MMFs, Harvey & Harvey 1973)



2007.1.4 Hinode/FG

Moving Magnetic Feature (MMF)

Penumbra dark filament と bright filament は相互に混ざらない別の磁場



Turbulent convectionによるmagnetic pumping により
dark filament 外縁の磁場は光球下に引きずり込まれる

Weiss, et al, ApJ, 2004, 600, 1073-1090

MMFで運ばれる磁束は

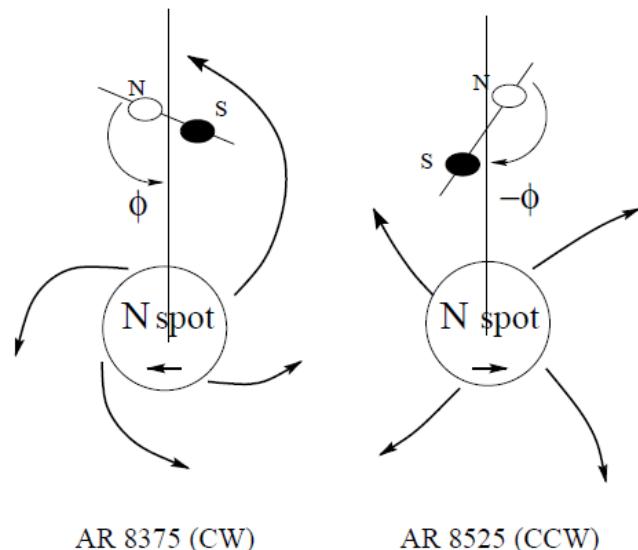
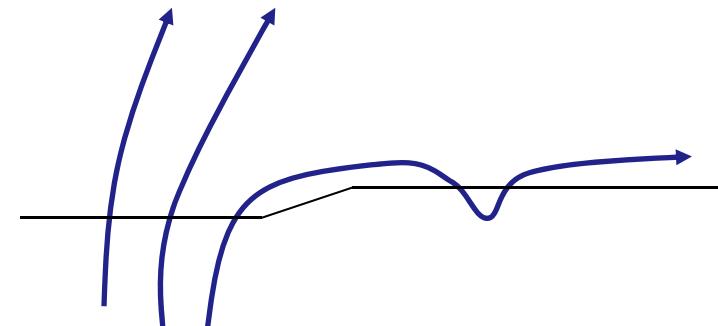
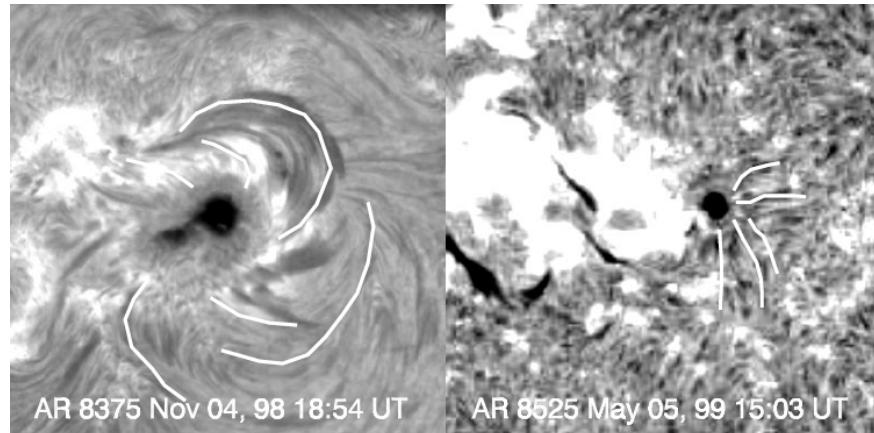
黒点の減衰率と一致する

黒点の減衰率よりも有意におおきい

Harvey & Harvey 1973, Kubo et al 2008

Multinez Pillet 2002, Kubo et al 2007

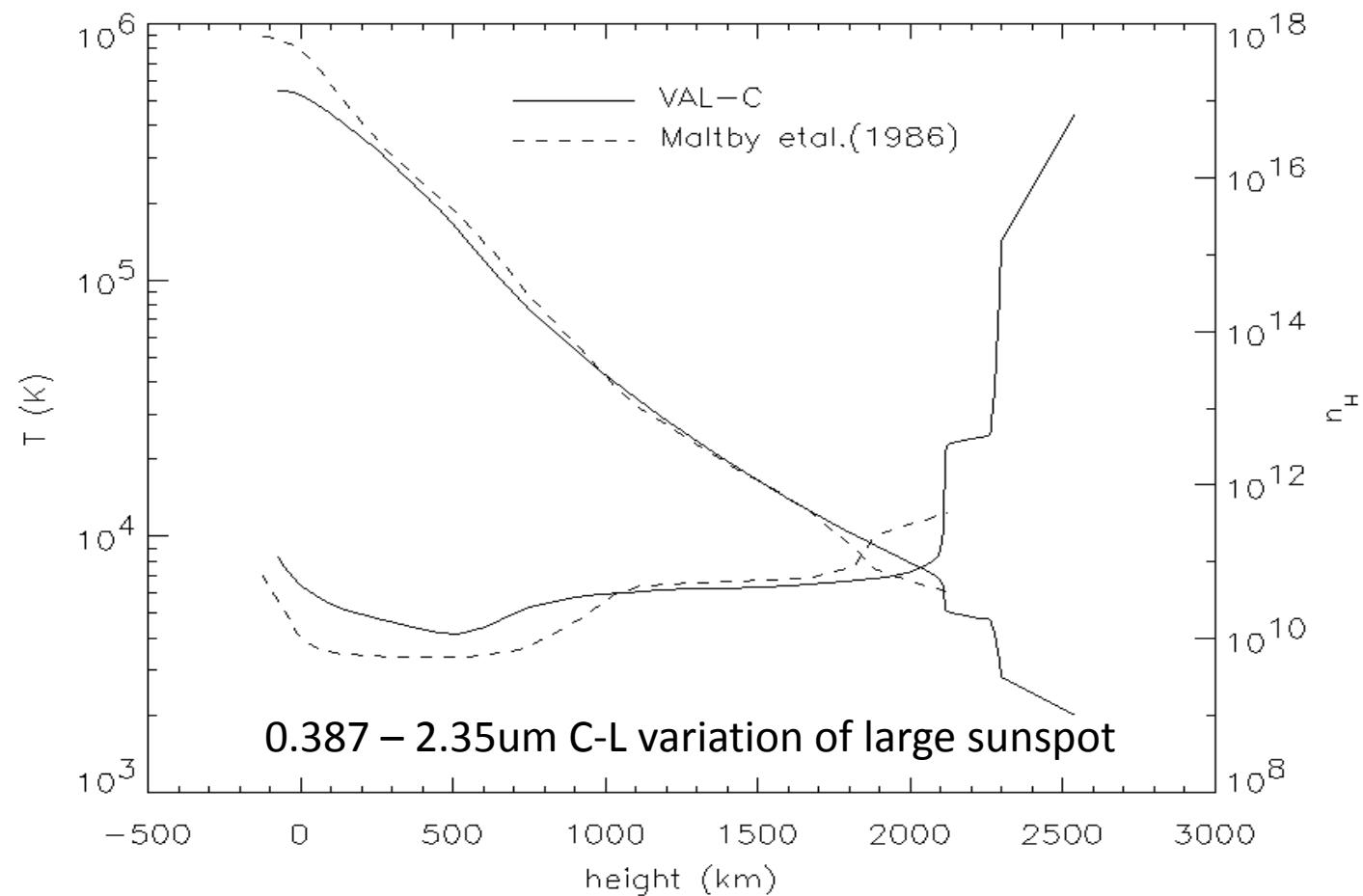
Moving Magnetic Feature (MMF)



MMFのペアは超半暗部の筋方
法に並んでいる。
Canopy構造から生じるU-
loop?

Yurchyshyn et al, 2001

黒点暗部の大気モデル



暗部に彩層。スピキュールもリコネクションも無いのに。
暗部モデルは信頼できるか？

大気モデル

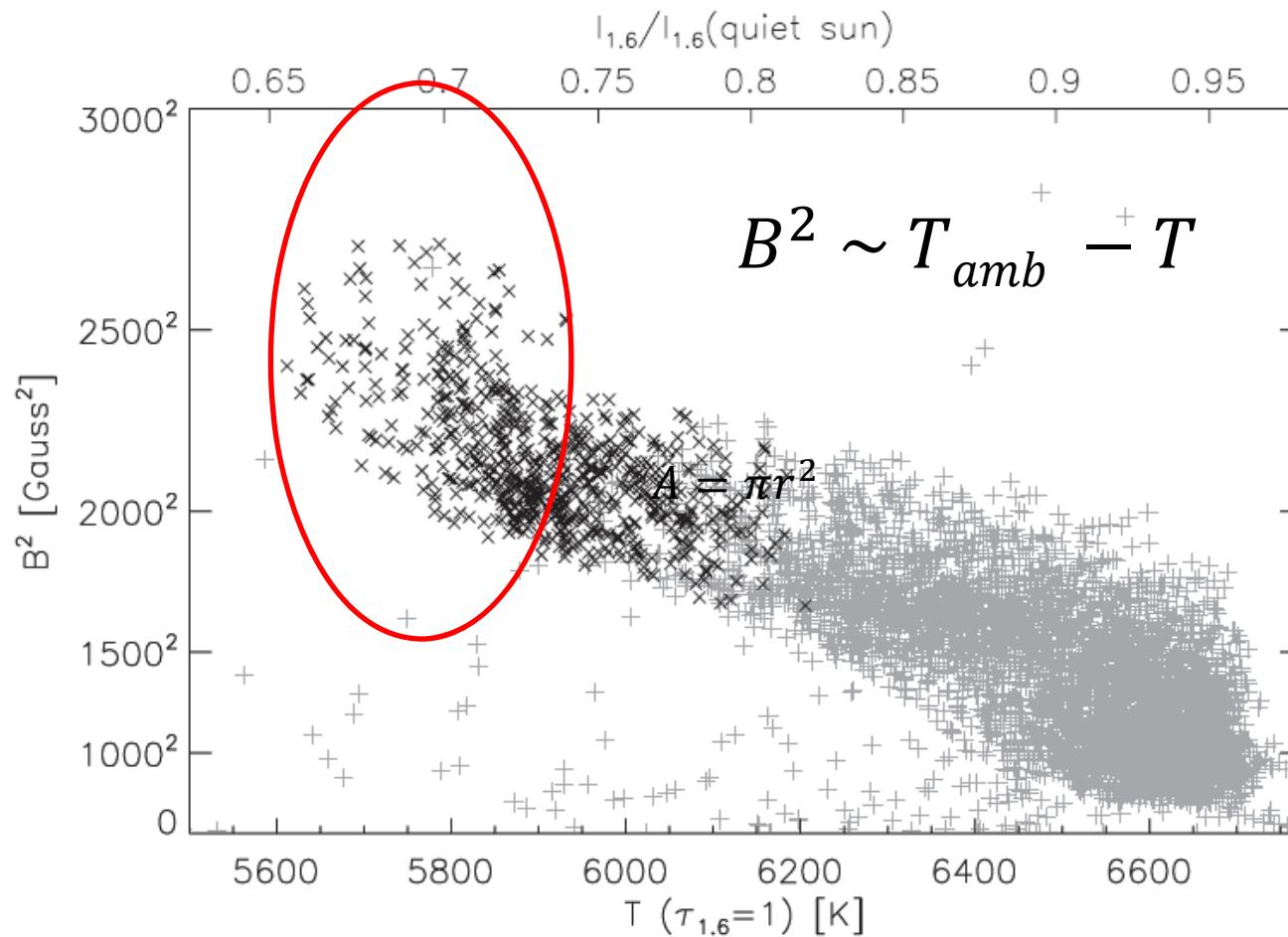
- ALMA 全周波数で黒点は暗く見えるのか？
- Wilson depression は見えるか？
- C-to-L variation から LTE ($S=B$) の仮定で信頼度の高い暗部彩層モデルができる。
- 暗部の彩層温度構造は本来の彩層加熱問題にヒントを与えるはず。

黒点には多数の分子が存在

- CN, TiO, CaH, CH, MgH, FeH, AlH, AlF CN, C₂, MgO, ZrO, CO, VO, CrH, H₂, H₂O,,,

eg. Shanmugavel et al 2008

B^2 vs. T



低温部で温度低下を伴わない磁場の上昇

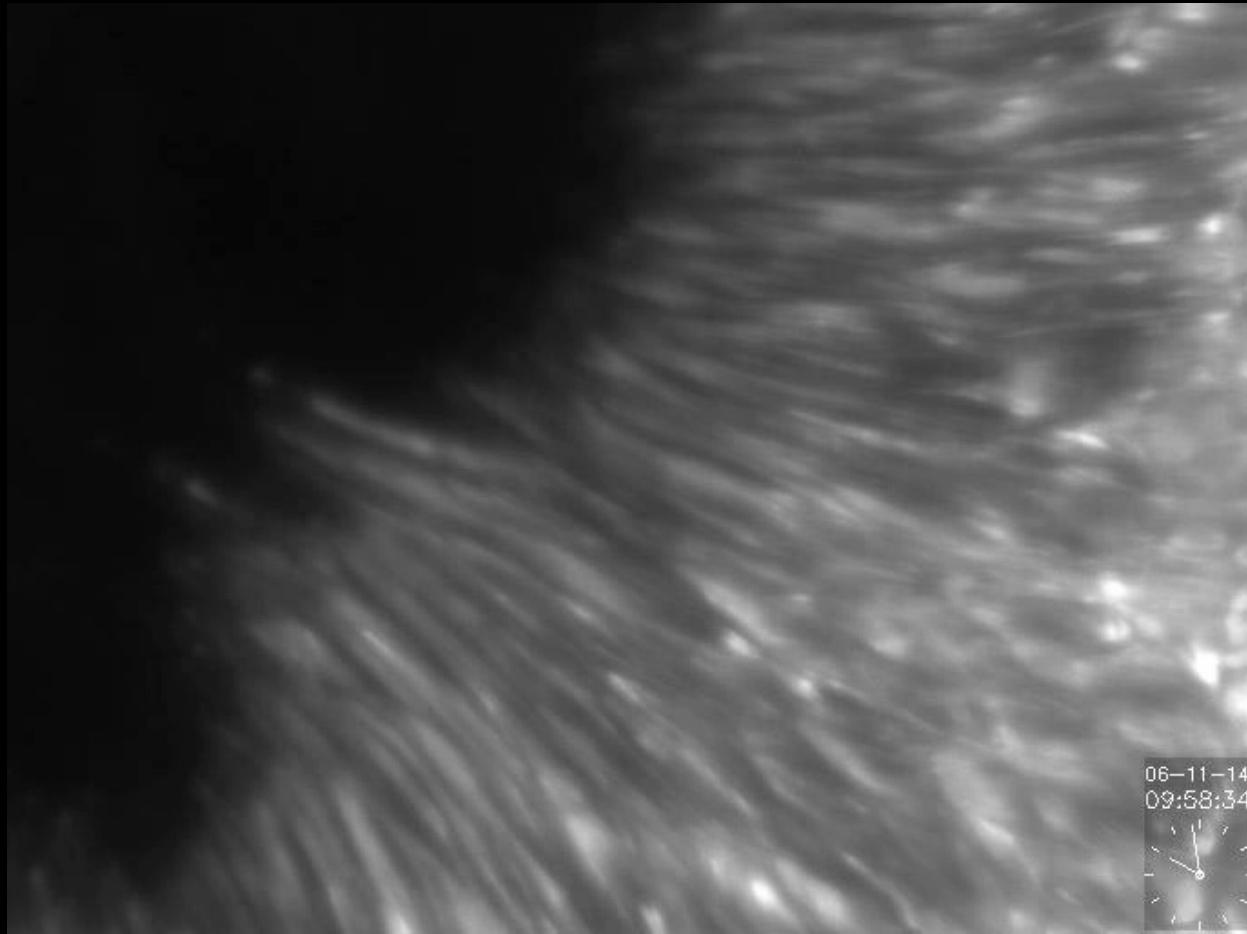
Jaeggli, Lin, and Uitenbroek, 2012

分子の重要性

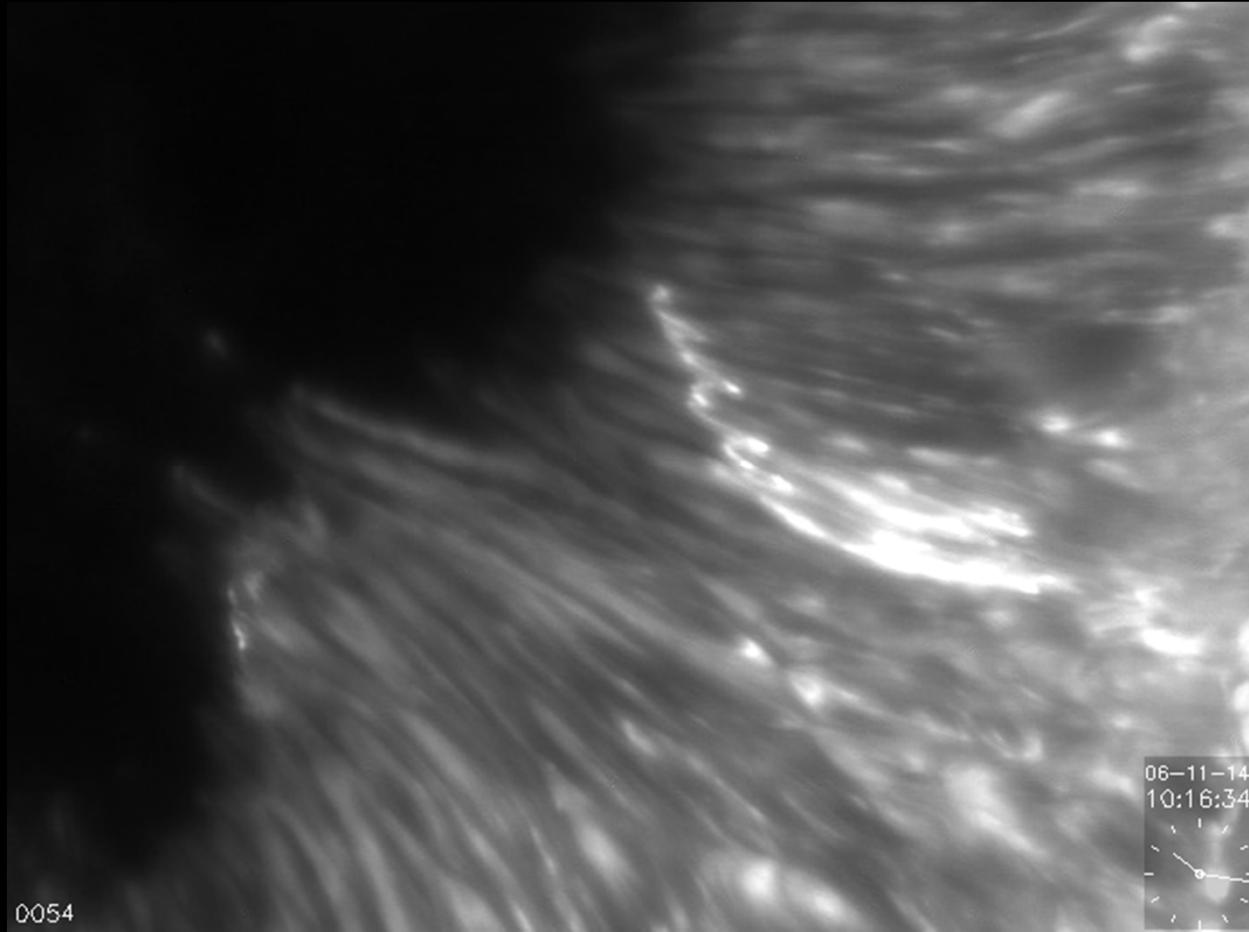
分子が形成されると、

- 粒子数減少→圧力減少→収縮→磁場増大
- 振動、回転自由度 →比熱の上昇
→黒点の熱力学的構造、寿命に重要な役割
- H_2 分子が支配的、しかし H_2 は可視一近赤外域にラインなし
- ALMAによる分子ラインの観測は可能か？
– データベース調査。。

半暗部短命增光 → 粒子加速?



半暗部短命增光 → 粒子加速?



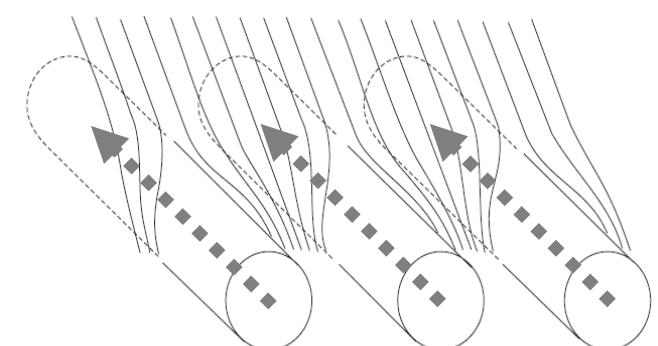
May give a hint of

- magnetic field configuration of penumbra,
- particle acceleration and their transport.

Not studied yet.

ALMA ブライトニングの観測

- Band0-3(?) によるジャイロシンクロトロン放射をまずは検出、
- タイミング、スペクトルのリボンに沿った分布
- なぜギザギザの形になるか？
- 加速領域の広がり or 粒子拡散による効果？
→ 半暗部磁場構造の検証。



まとめ: ALMAで狙う黒点の課題

- 高空間分解能を生かした微細構造の研究、とくにジェット、ガス流の3次元構造
- LTEにもとづく黒点大気構造、彩層加熱の問題へ
- 非熱的放射の微細構造から粒子加速、磁場構造の研究
- 分子ラインによる黒点熱力学構造、ドップラー信号によるダイナミクスの研究(?)