

ALMAでみる黒点

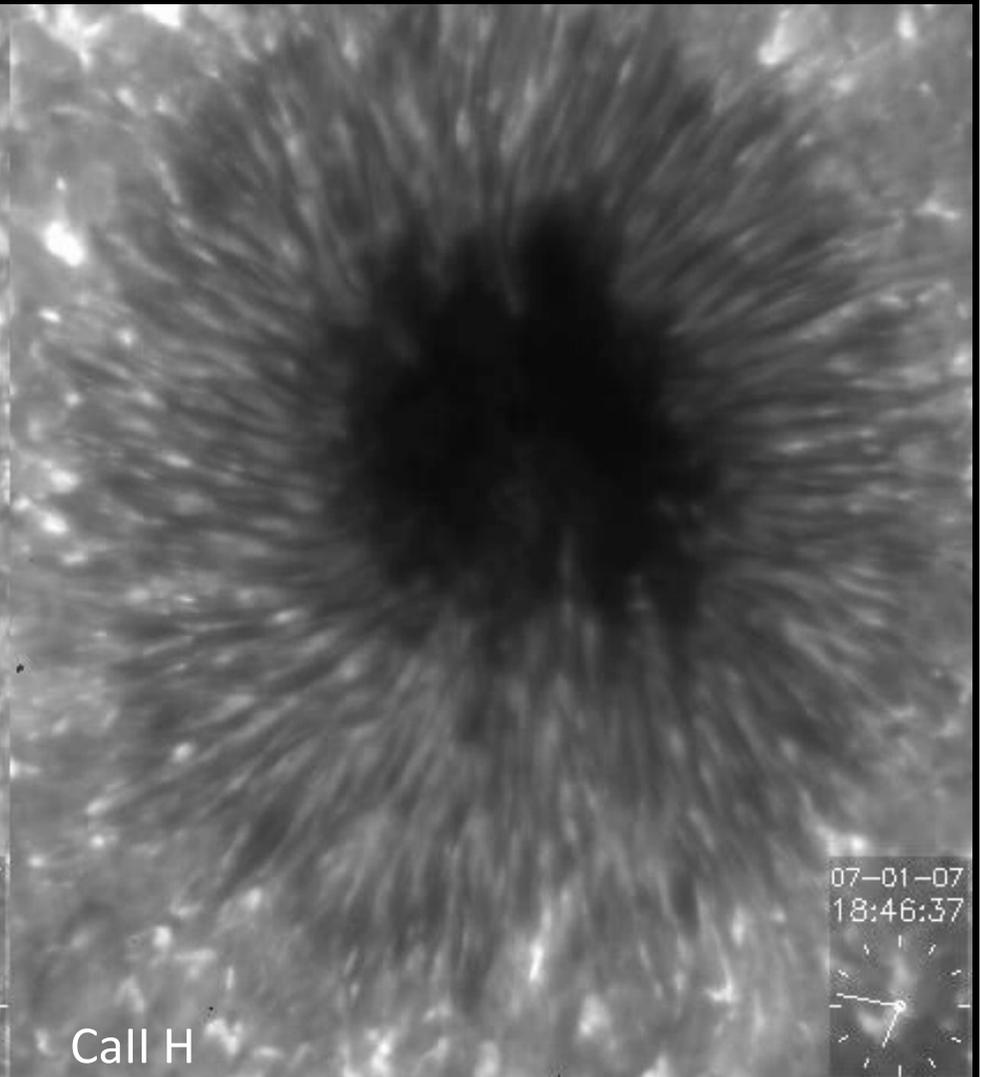
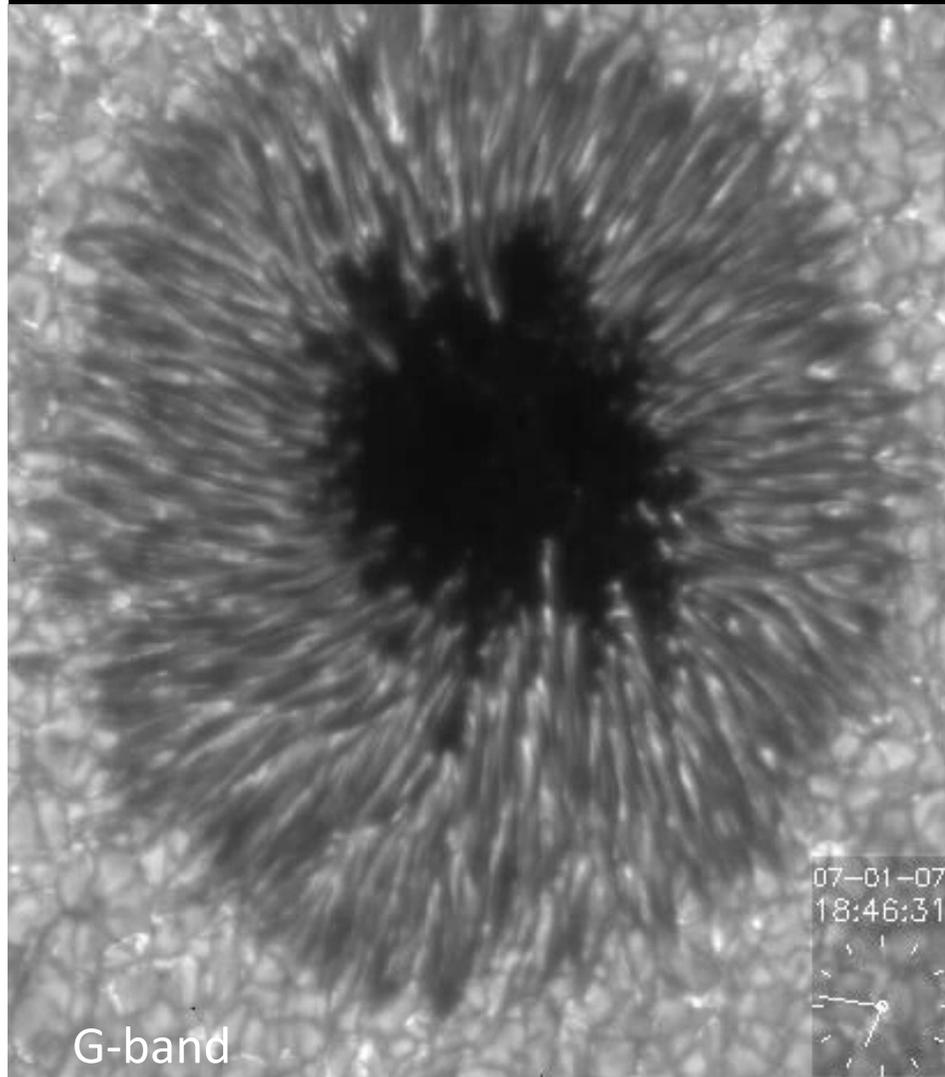
京都大学附属天文台 一本 潔

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現象の宝庫；

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



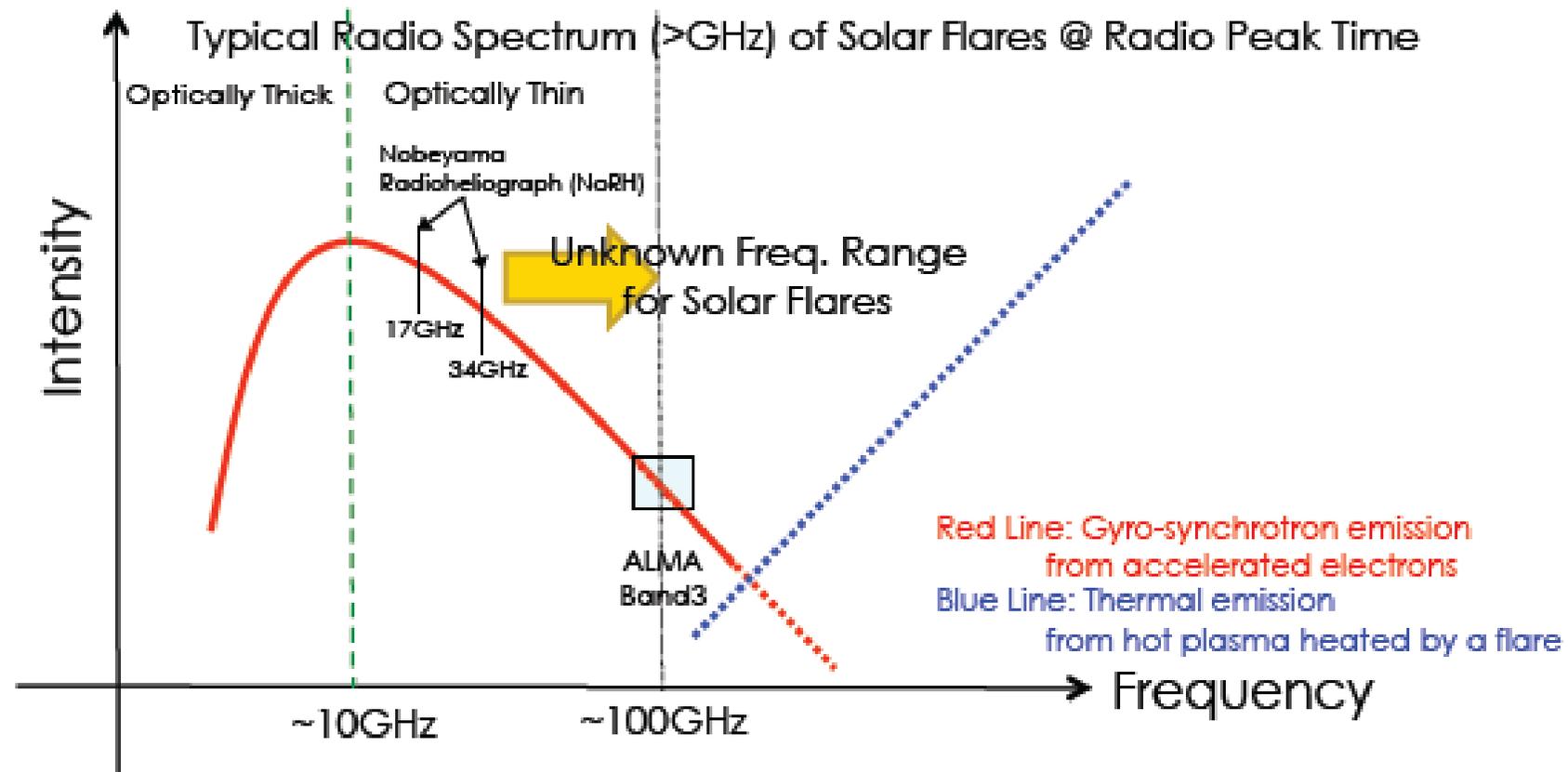
ALMA performance

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

Fast switching?

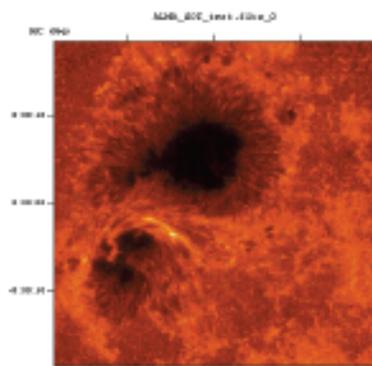
- Time resolution
 - 32msec or 30sec?

ミリ波放射機構



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

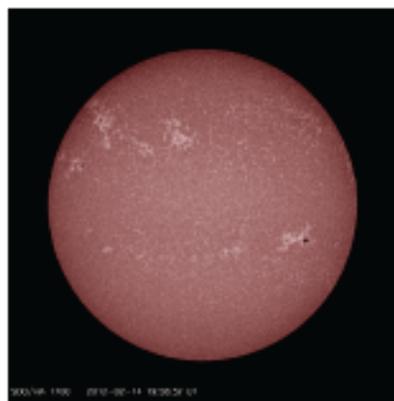
- The mm/sub-mm emission from non-flare sun is thermal continuum from around $\tau = 1$ layer = lower chromosphere.



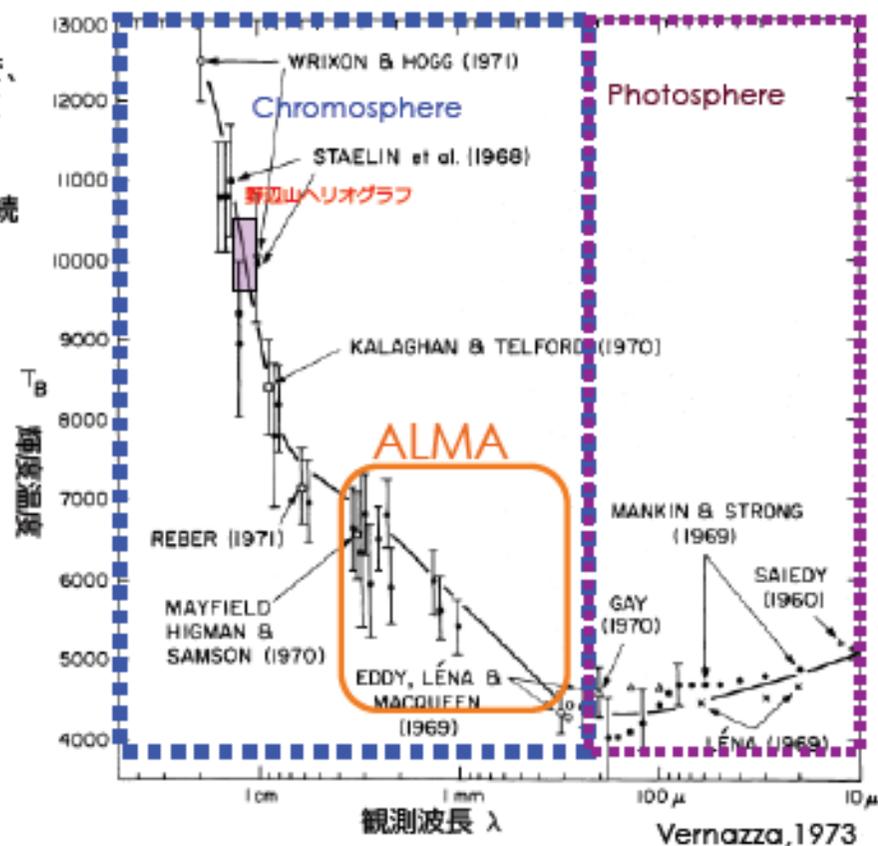
Ca II (SOT)

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

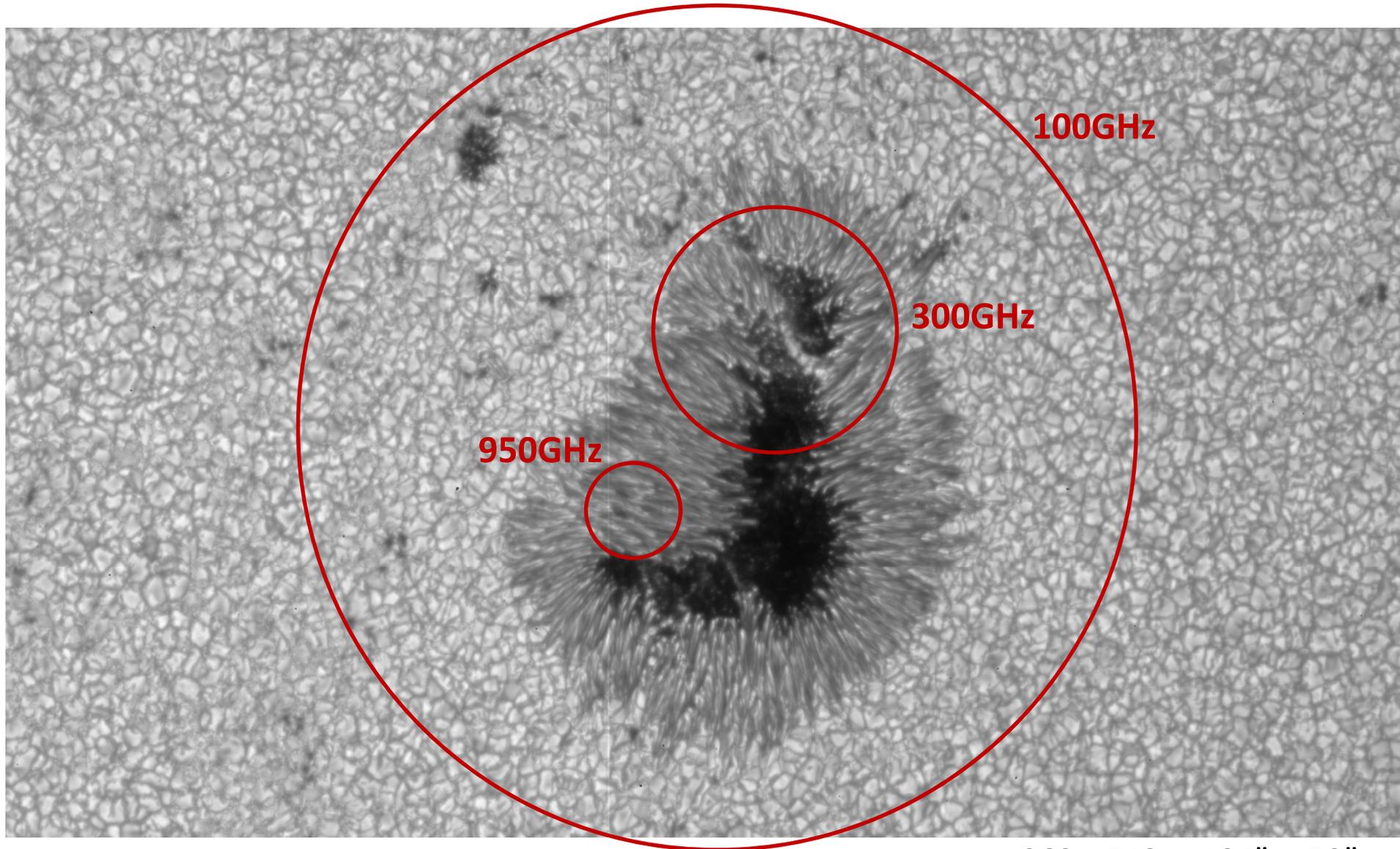
よって、ALMAはCa IIやUV連続光(1700Å)の画像と同じ様な層を観測できます。



UV (AIA 1700)



ALMA FOV



960 x 548 = 104" x 59"

ALMA resolution



$$1.22\lambda/D$$

ALMA の特徴

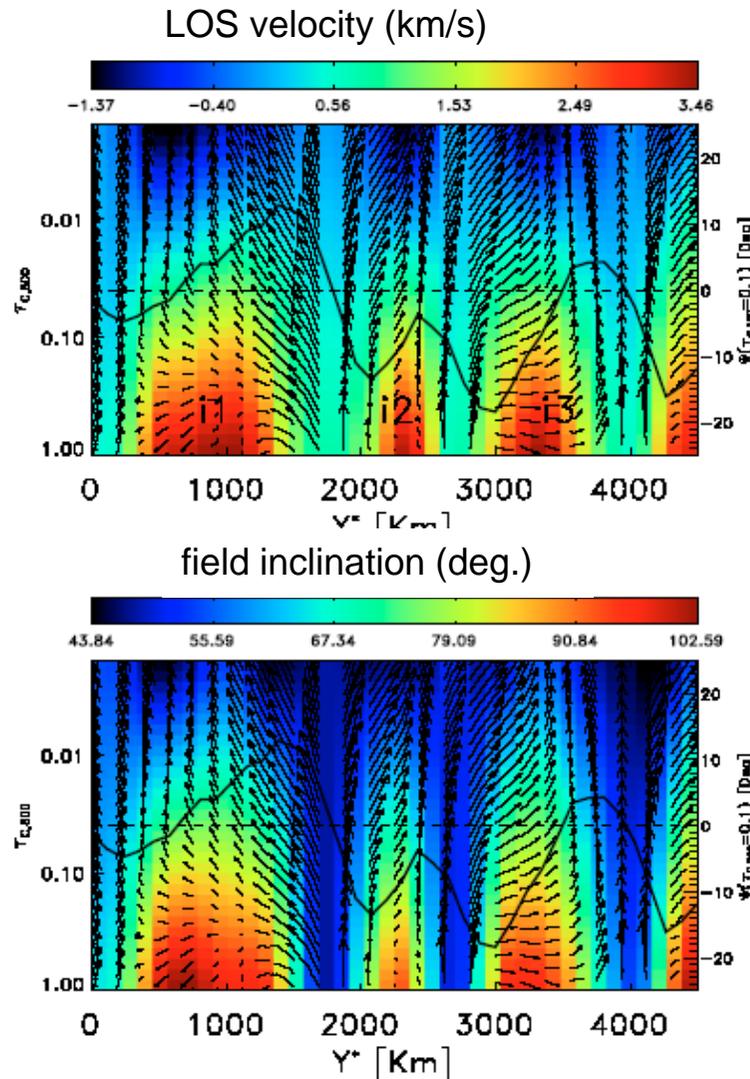
- 高空間分解能
- Thermal thick で T_{\min} より上空の温度構造
- LTE, simple emission mechanism
- 一部非熱的放射
- 高いダイナミックレンジ > 1000 (?)

- 5分ごとによそ見？

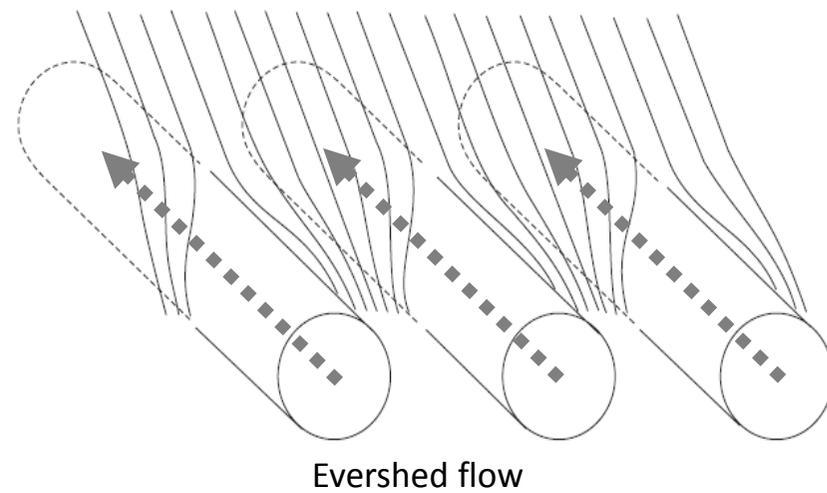
ターゲット

- 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（逆エバーシエッド）
- 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



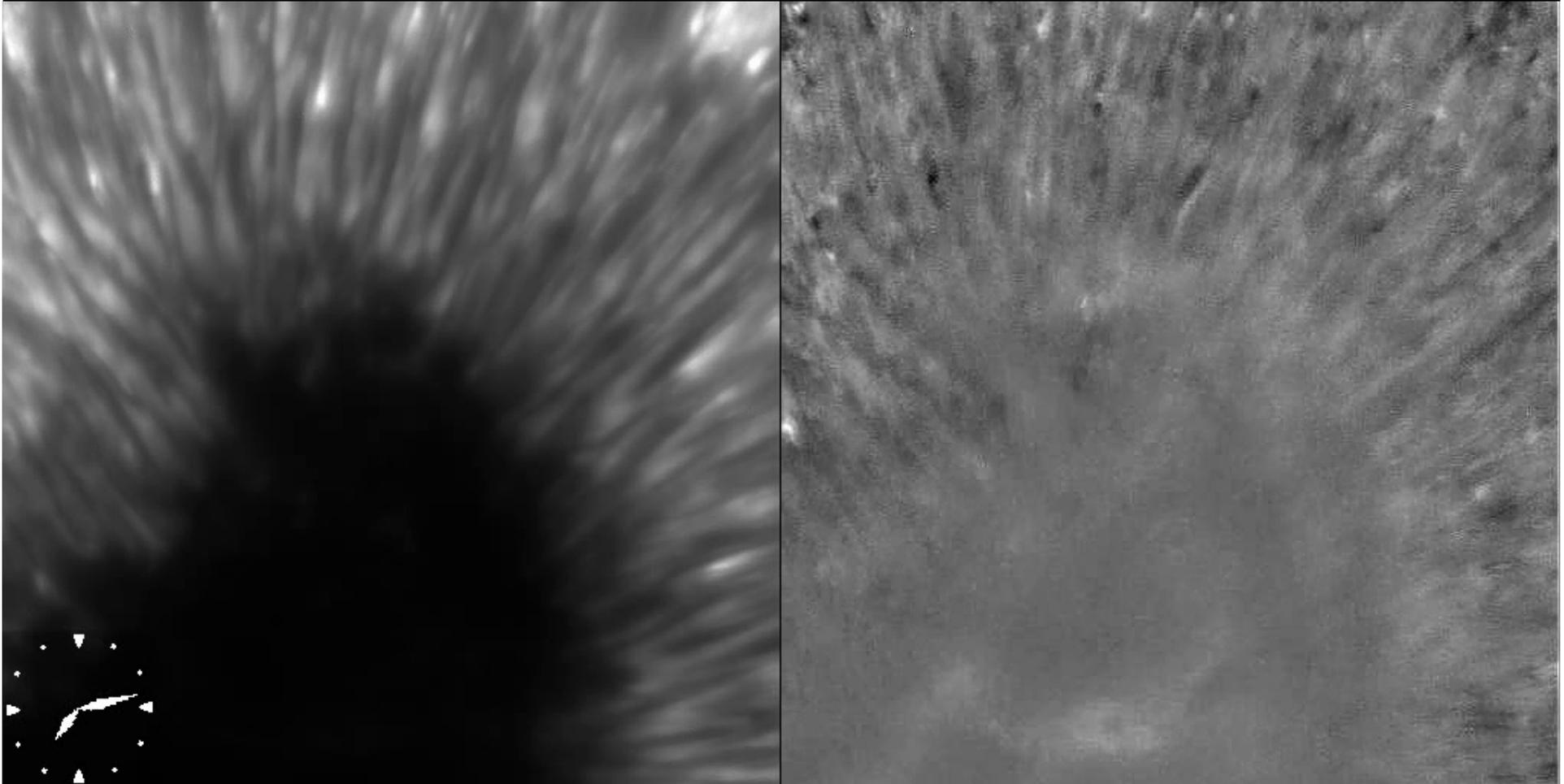
ALMA でみる高さは磁場はほぼ一様。しかし密度構造はガスを注入する領域のサイズで決まるので、いくらでも小さな構造はあり得る。



Penumbral micro jets

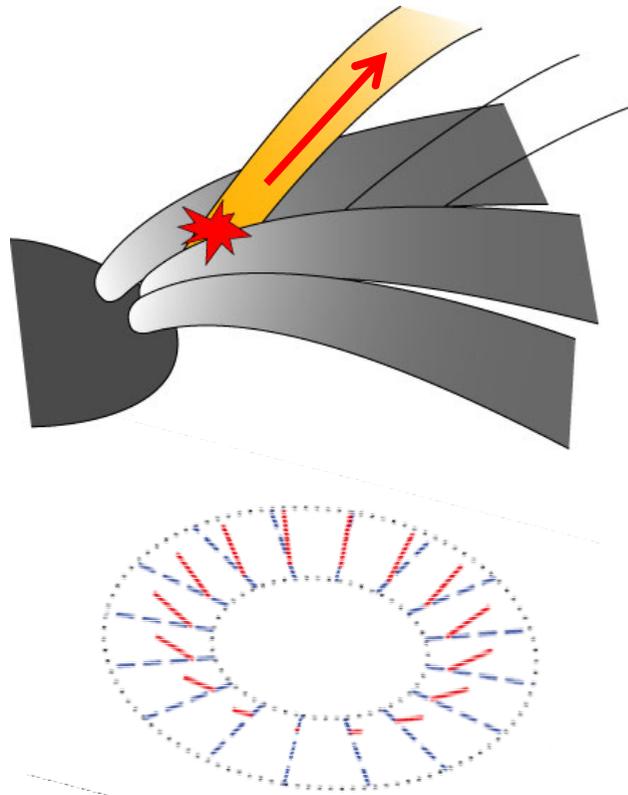
Call H movie

Katsukawa et al. (2007)

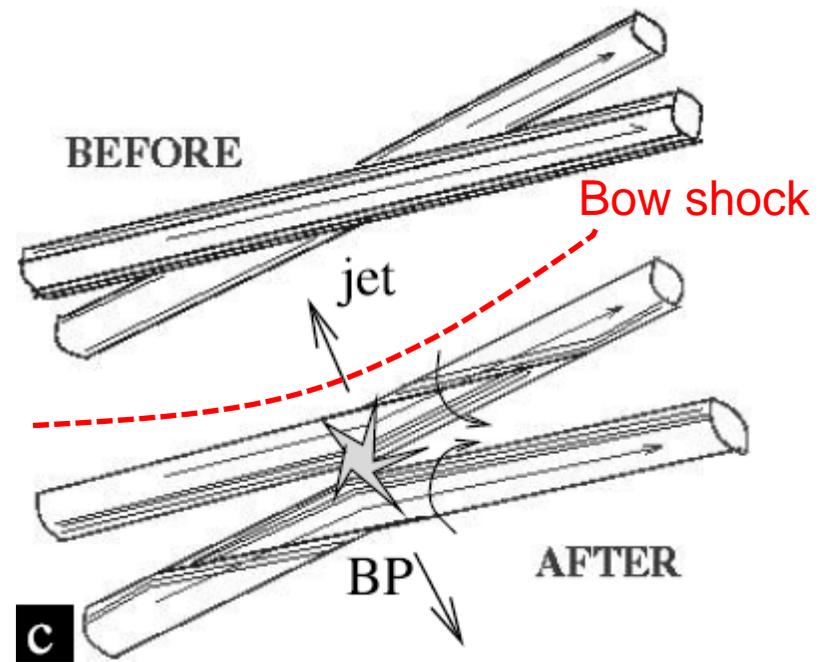


- Length: 1" ~ 5" (1000km ~ 4000km), Width: ~ 0.4" (300km)
- Duration: Shorter than 1 min
- Observed everywhere above the penumbra!

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



Katsukawa et al. 2007

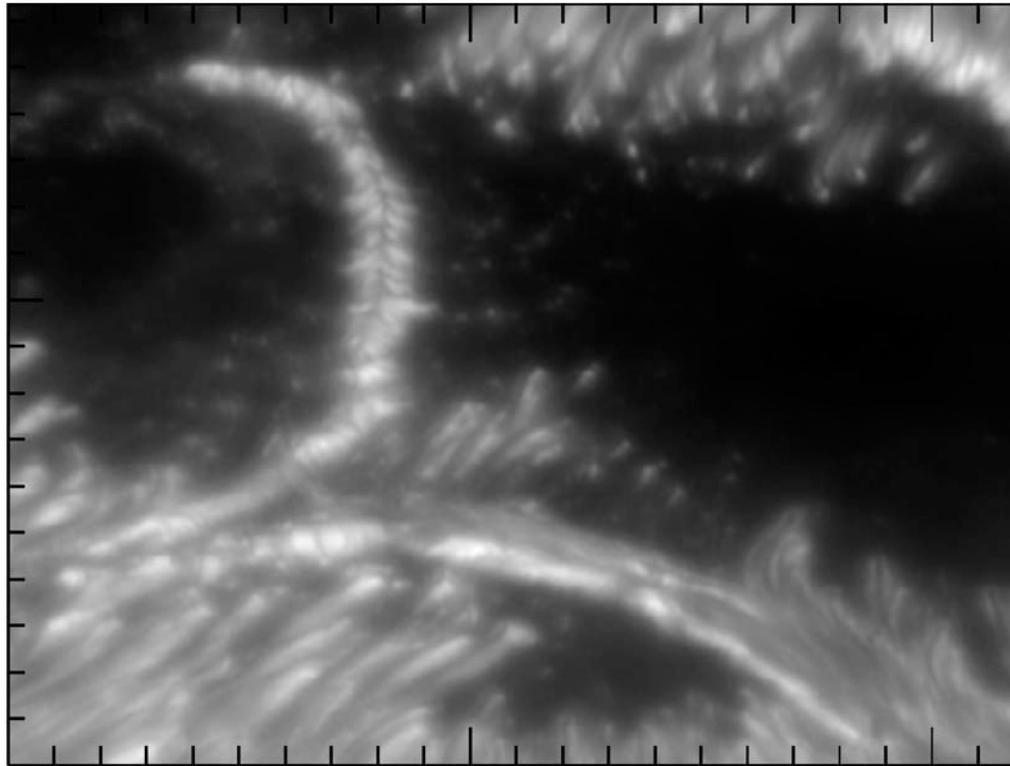


Ryutova et al. 2008

ALMA半暗部ジェットを観測

- 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](#)

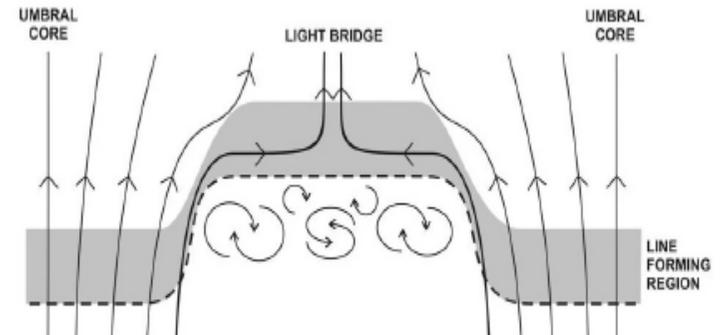
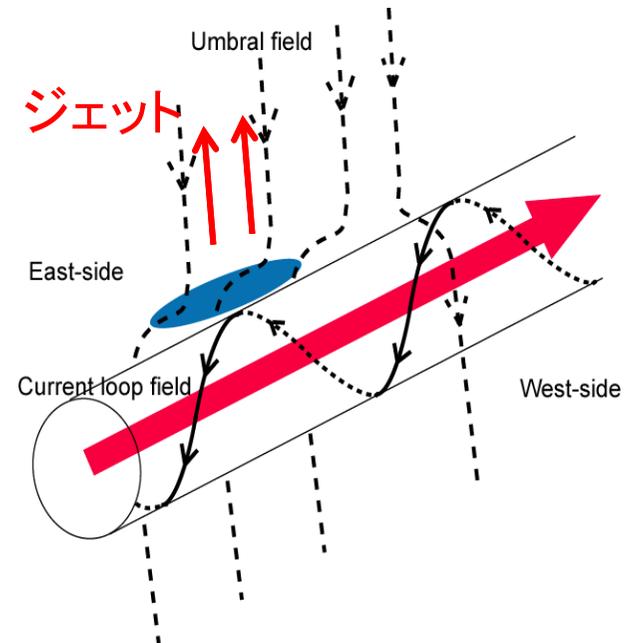
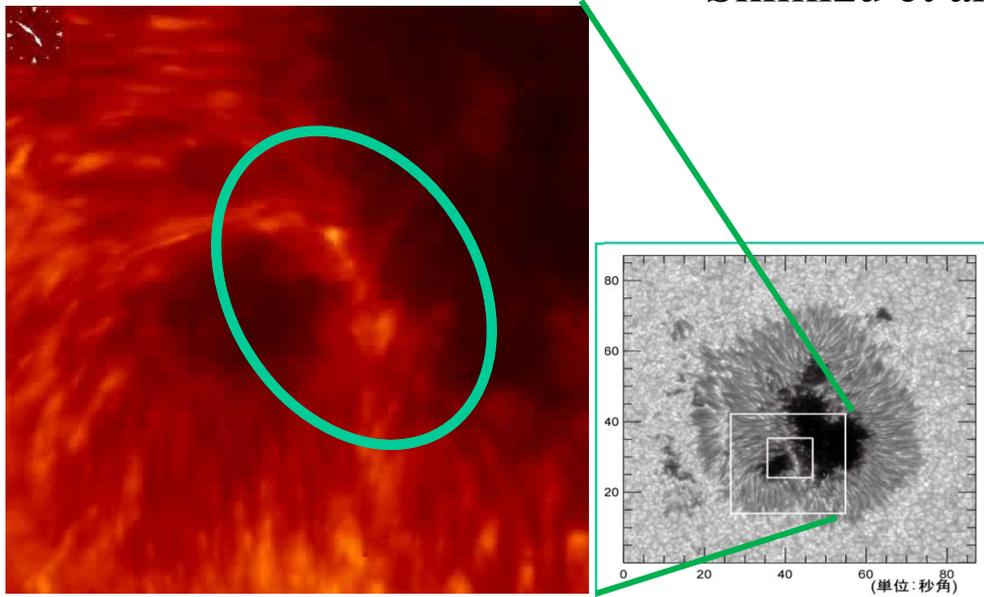


Fig. 7. Schematic view of the magnetic canopy above LB.

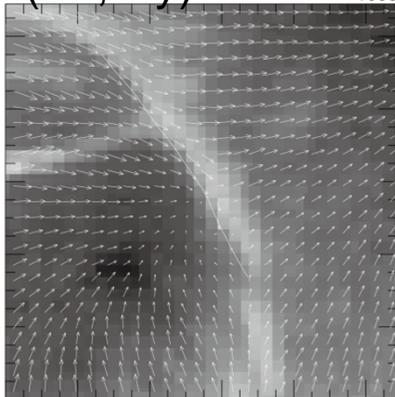
[Jurcak et al 2006.](#)

ライトブリッジからのジェット

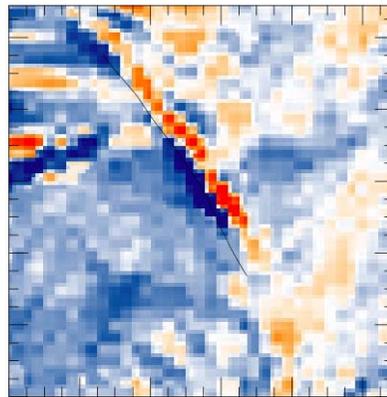
Shimizu et al. 2009, 2011



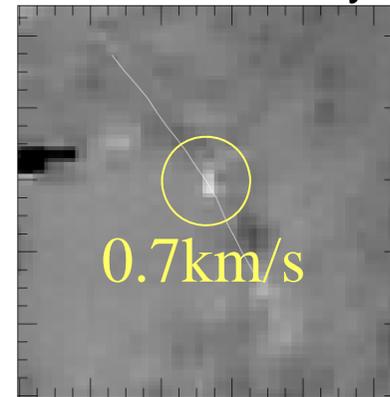
$(B_x, B_y) + B_z$ $\rightarrow = 1000$



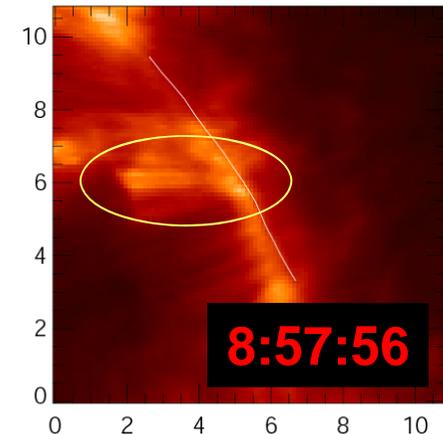
Current J_z



SP LOS velocity



Ca II H



ライドブリッジのジェット

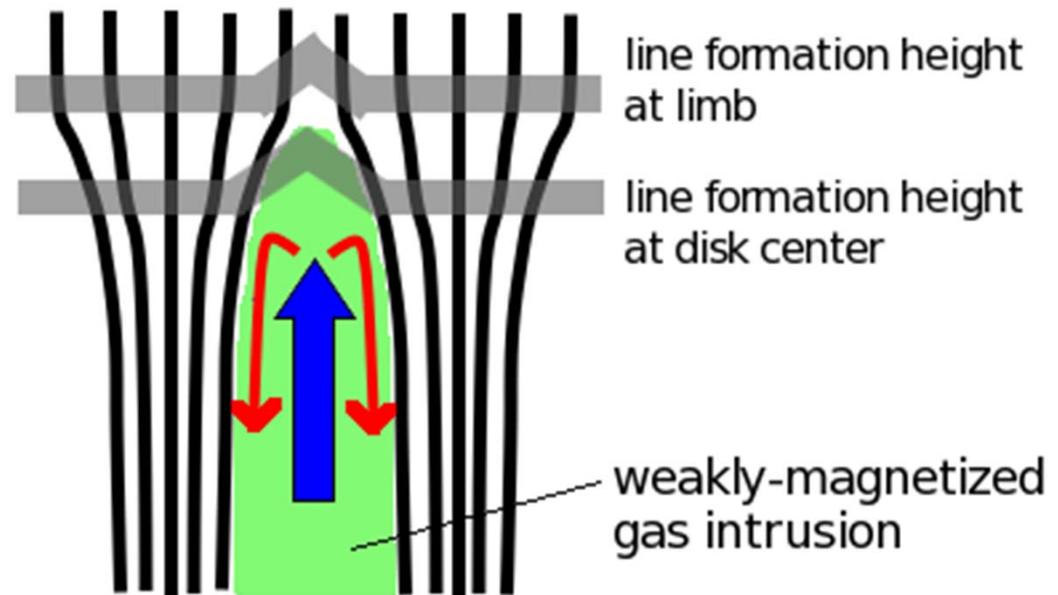
カーテン状のジェット

- 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
- 捻れの構造

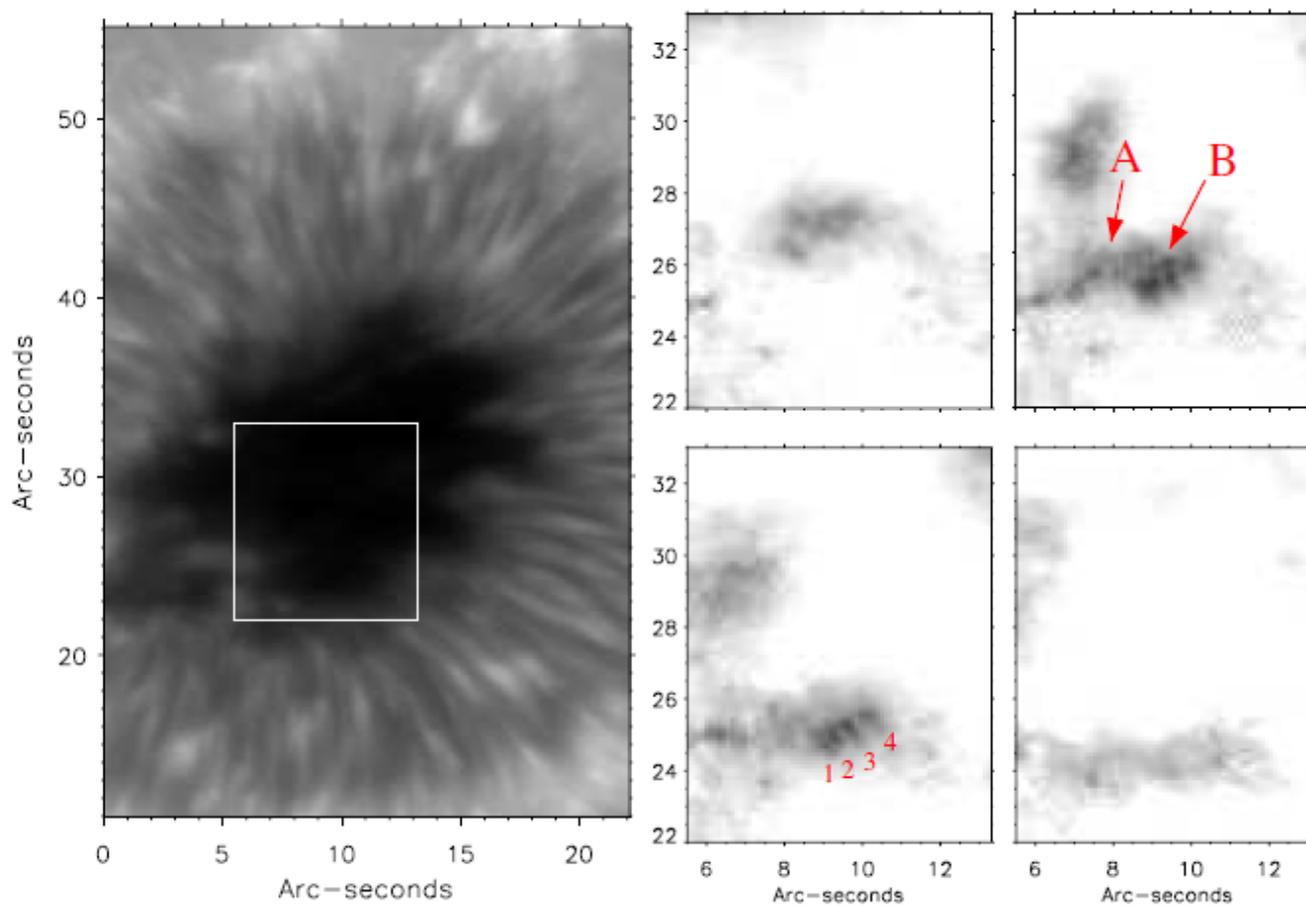
umbral dotの磁場と速度場

- 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



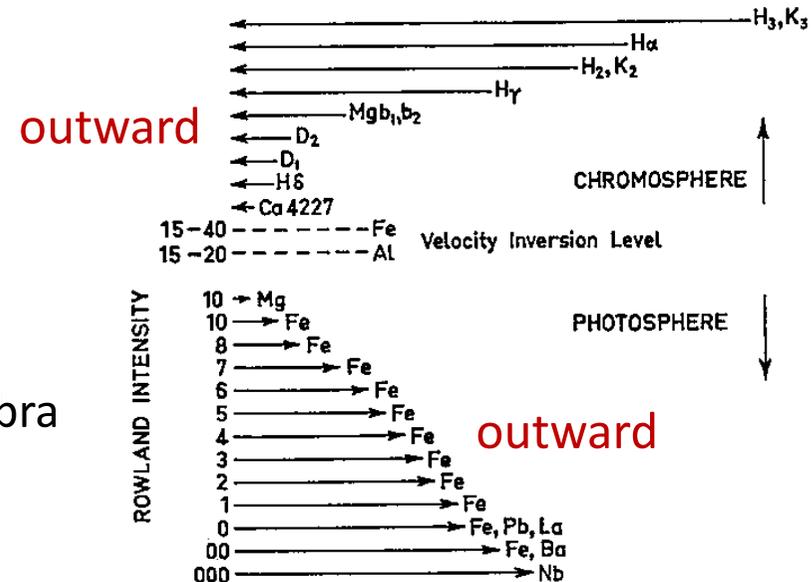
Socas Navarro et al. 2009

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

逆エバーシエツド流

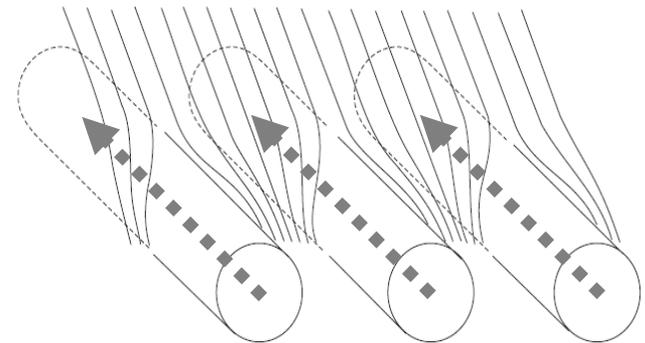
known as a gas flow towards the umbra in chromospheric layer over the penumbra.

Doppler signal in penumbra
Bray & Loughhead 1965



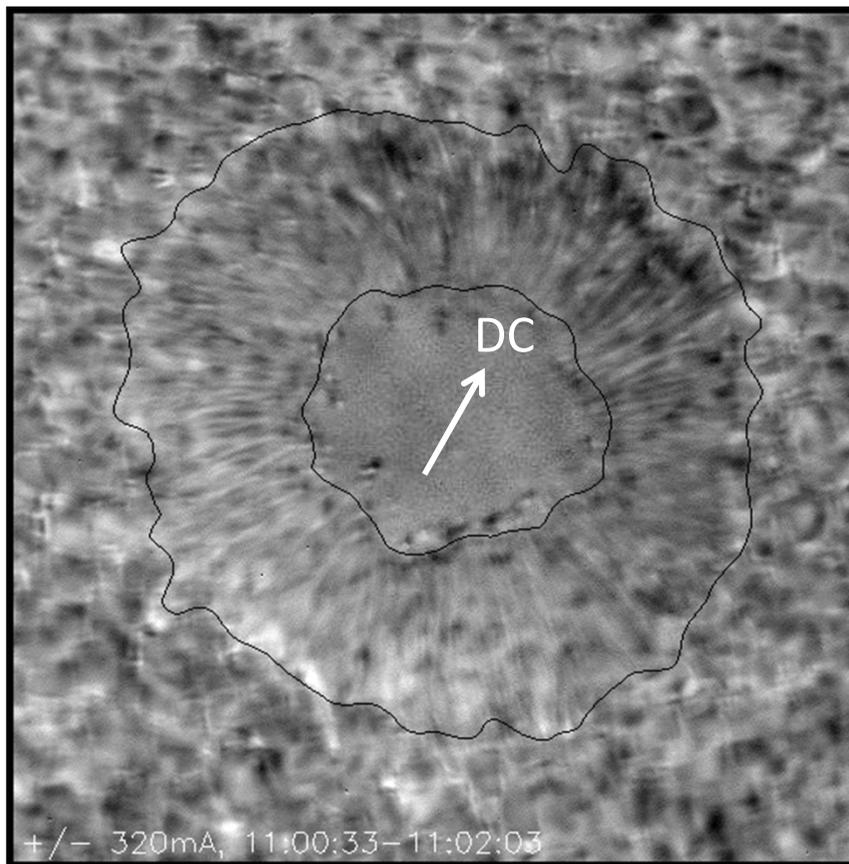
Questions;

- 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?

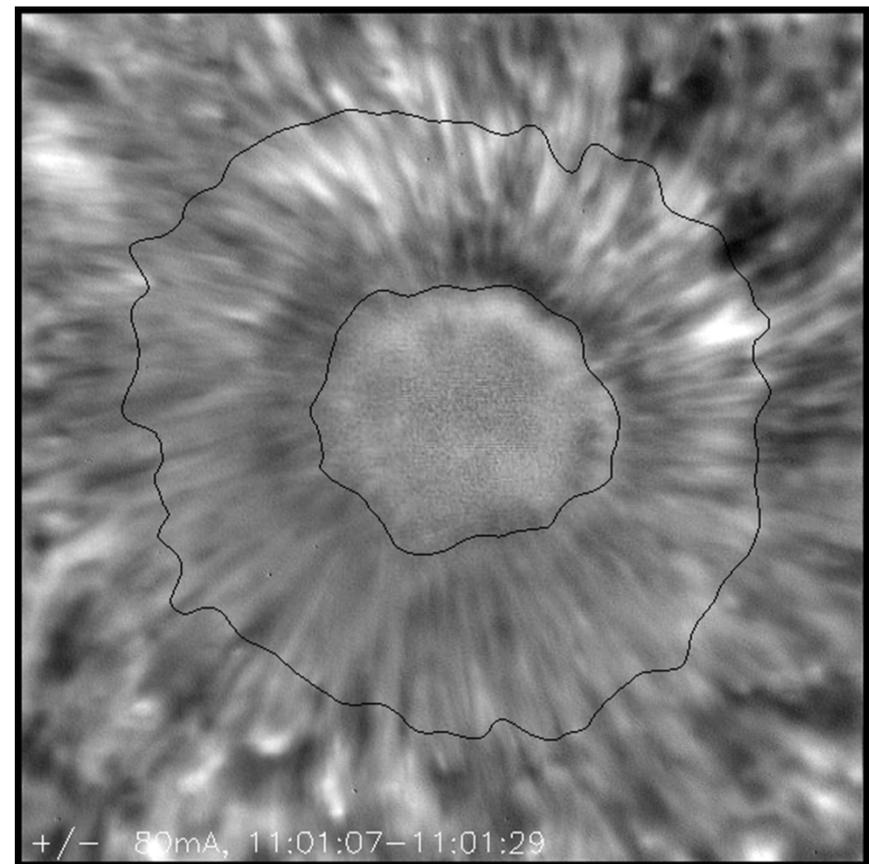


逆エバーシエツド流; SOT観測

Na D Dopp. \pm 320mA

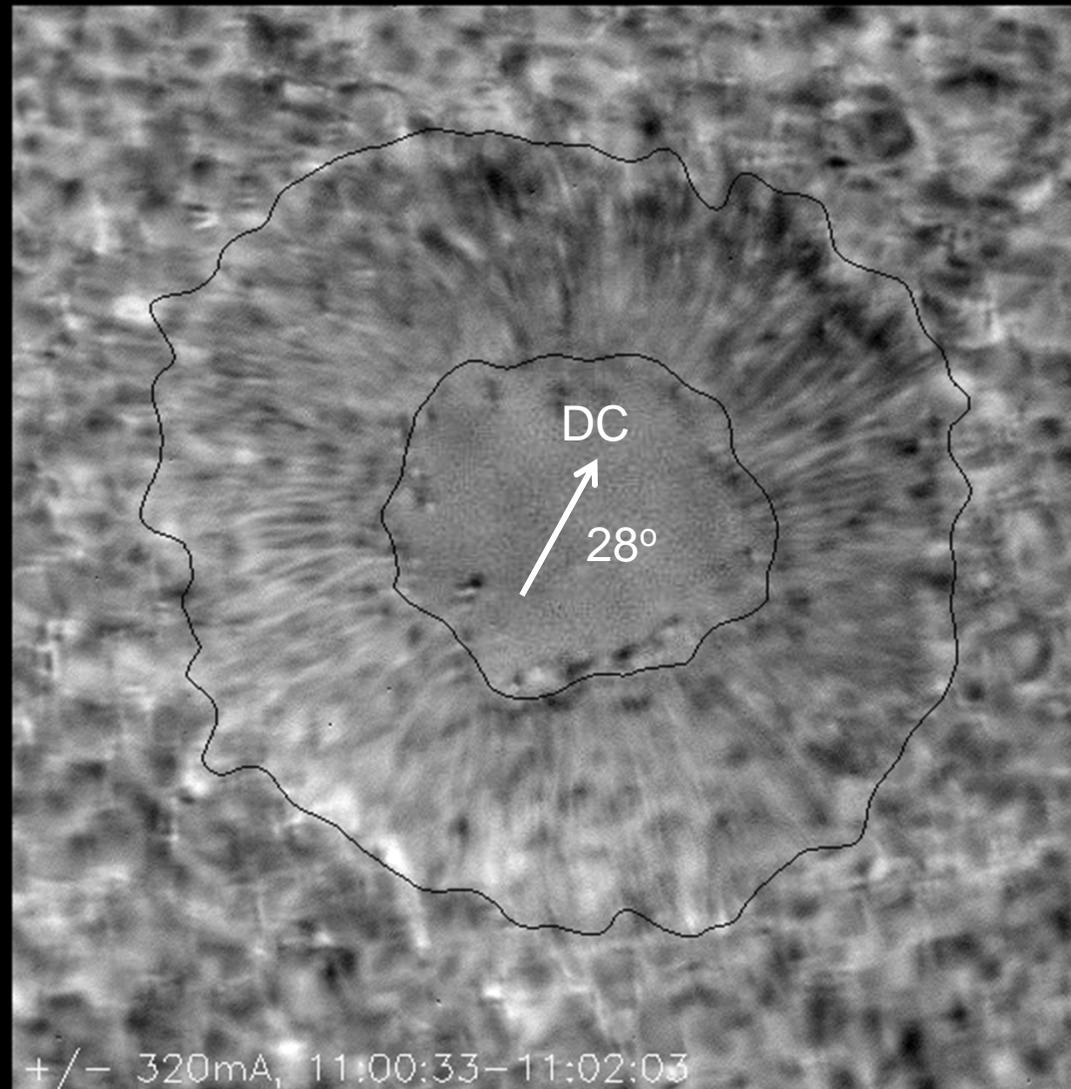


Na D Dopp. \pm 80mA



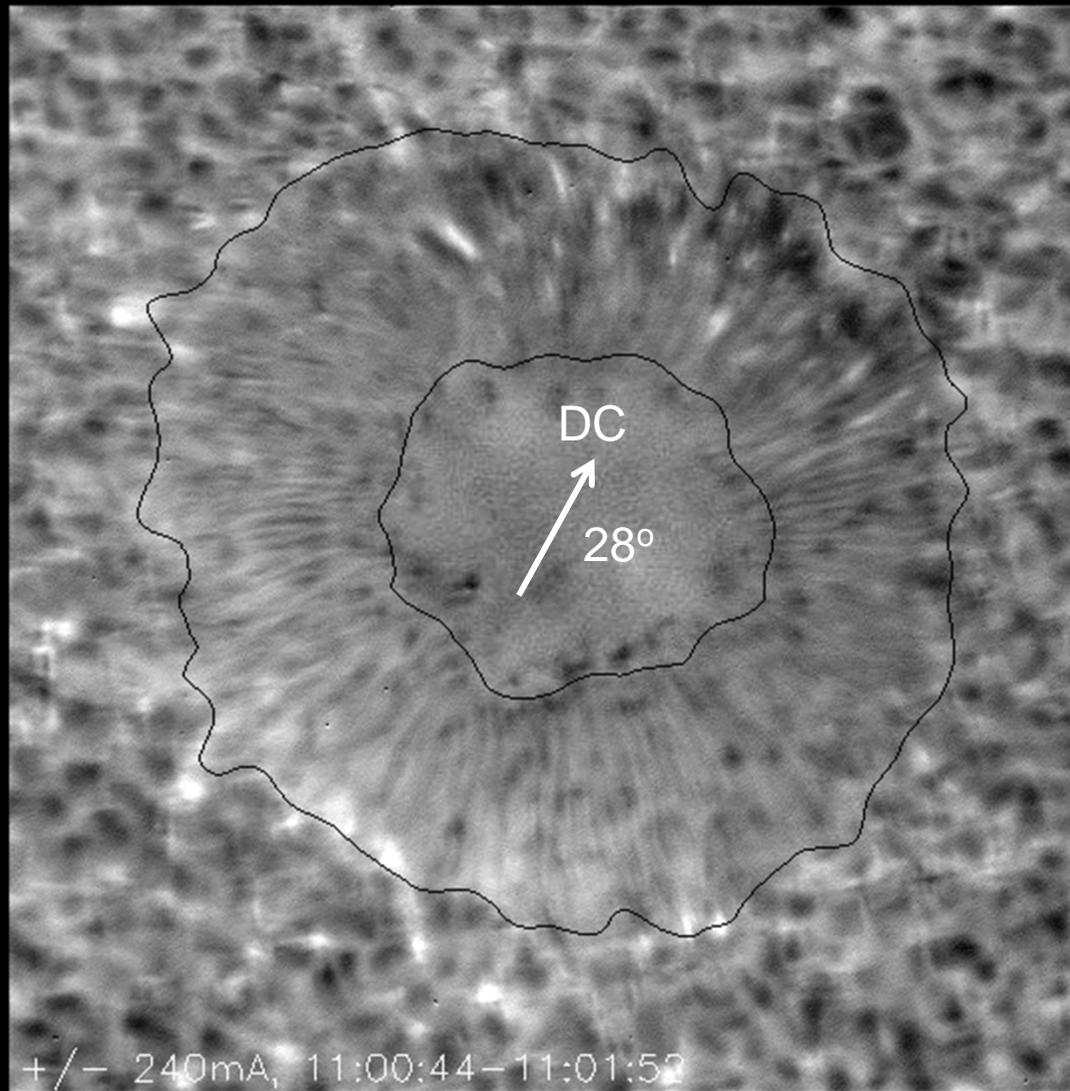
Na D Dopp. $\pm 320\text{mA}$

(Hinode/SOT/NFI)

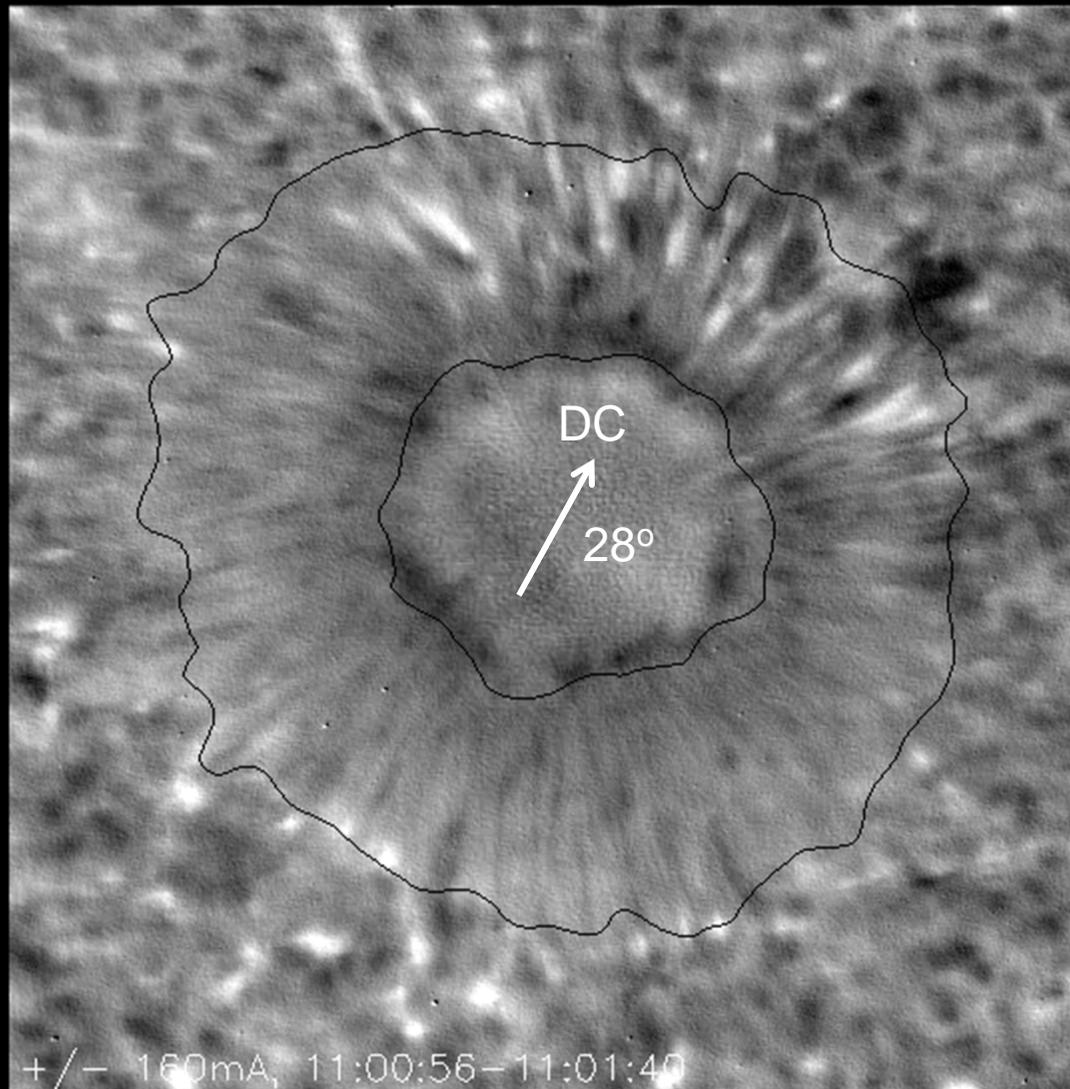


Photospheric Evershed flow

Na D Dopp. $\pm 240\text{mA}$ (Hinode/SOT/NFI)

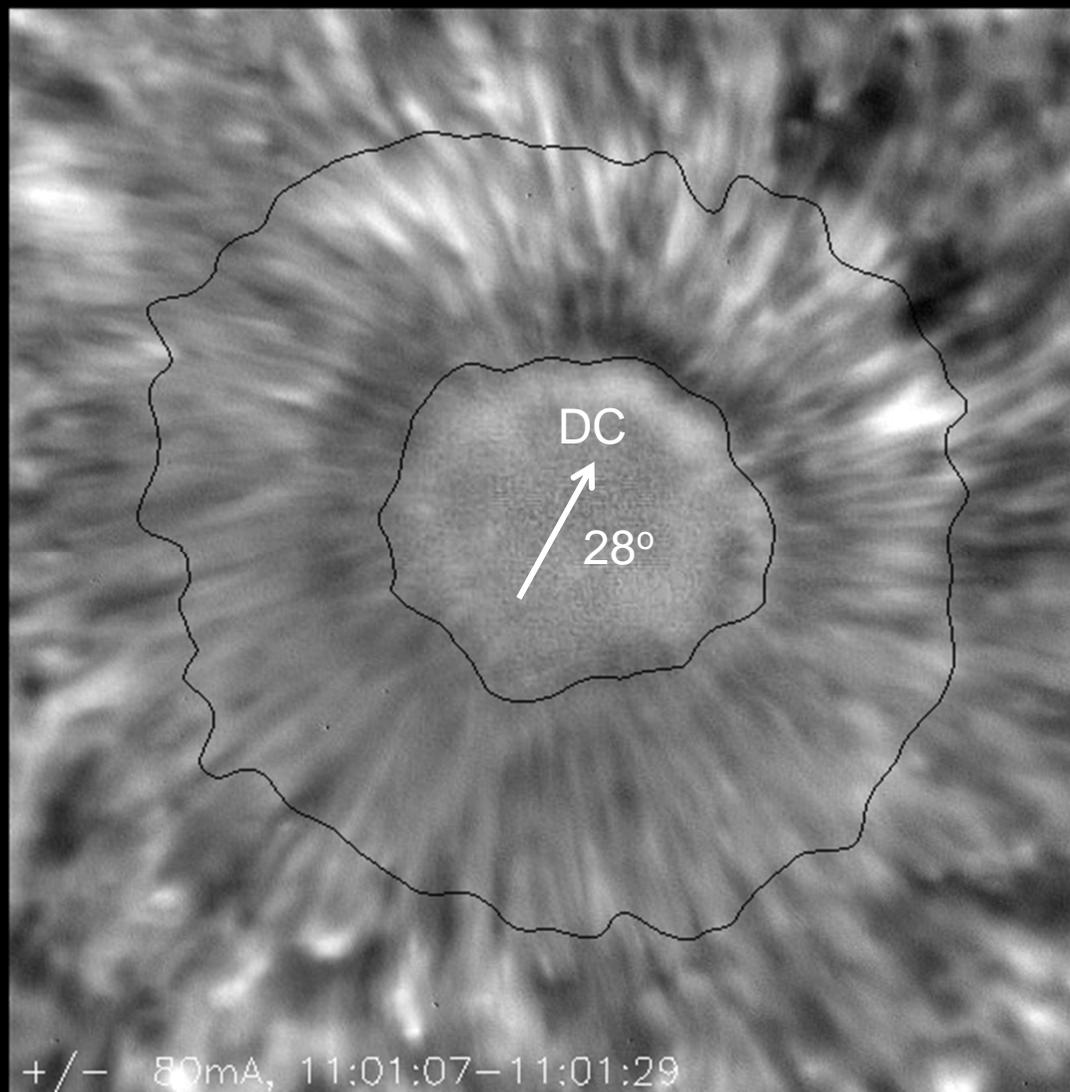


Na D Dopp. $\pm 160\text{mÅ}$ (Hinode/SOT/NFI)



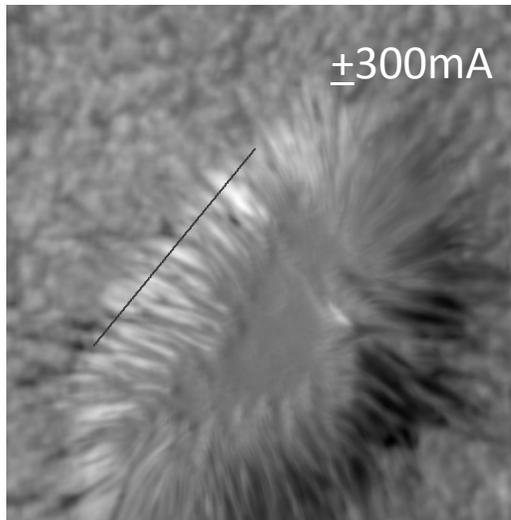
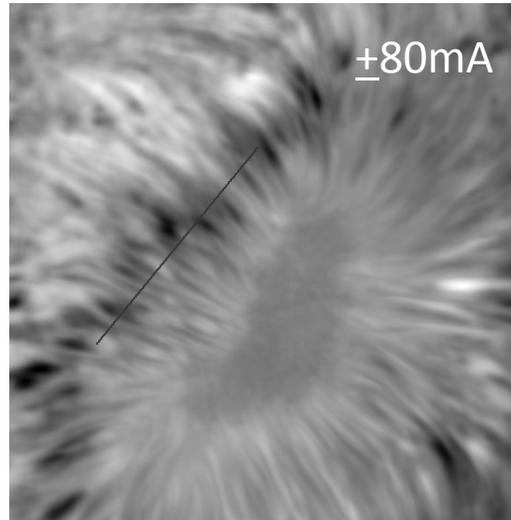
Na D Dopp. \pm 80mA

(Hinode/SOT/NFI)



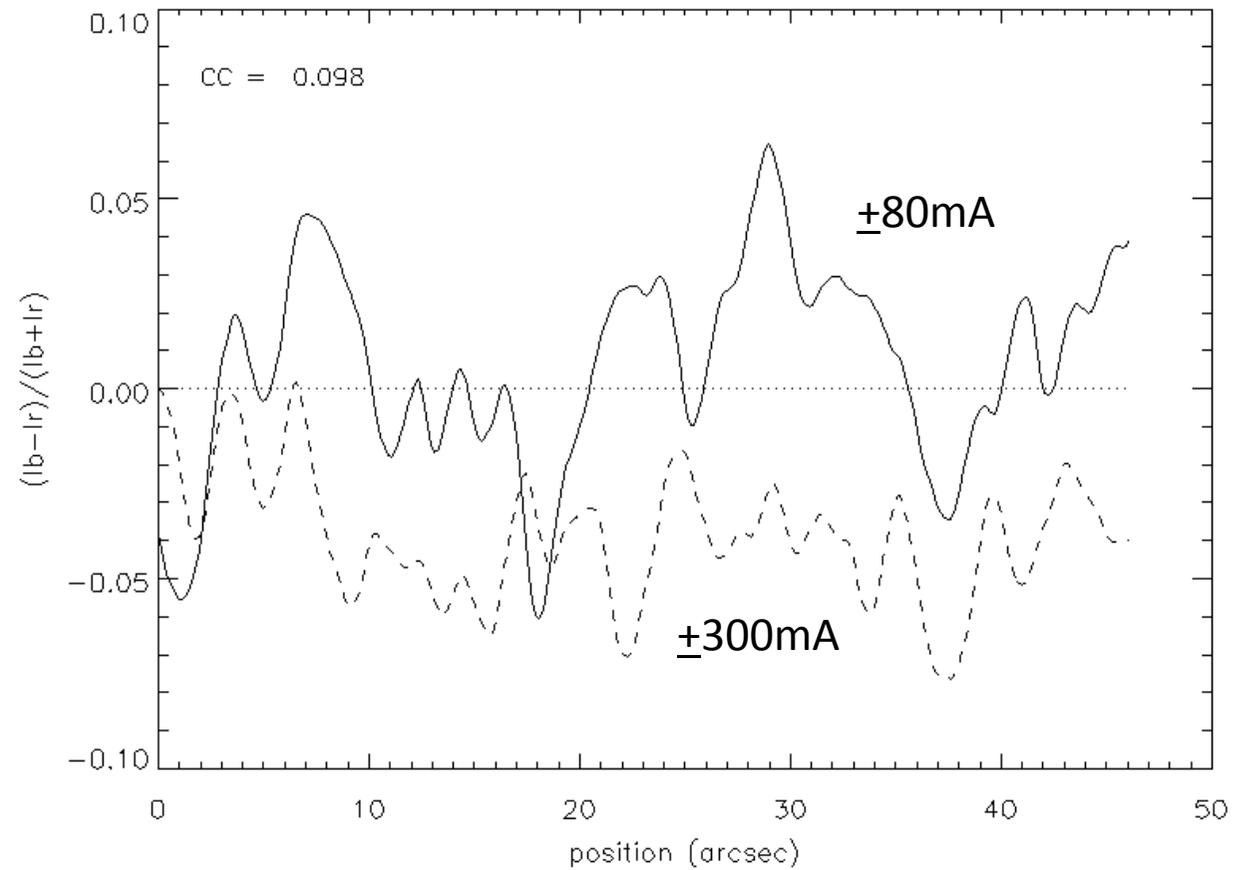
Inverse chromospheric Evershed flow

Spatial correlation, DC side

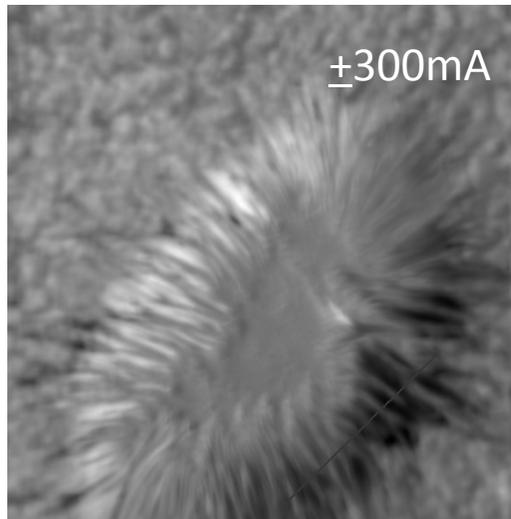
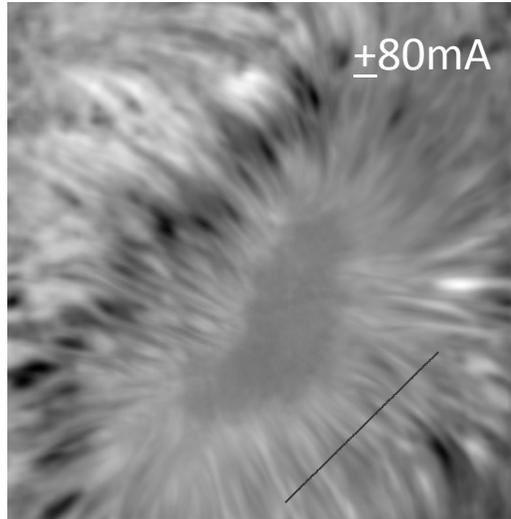


Time average

2011.04.26

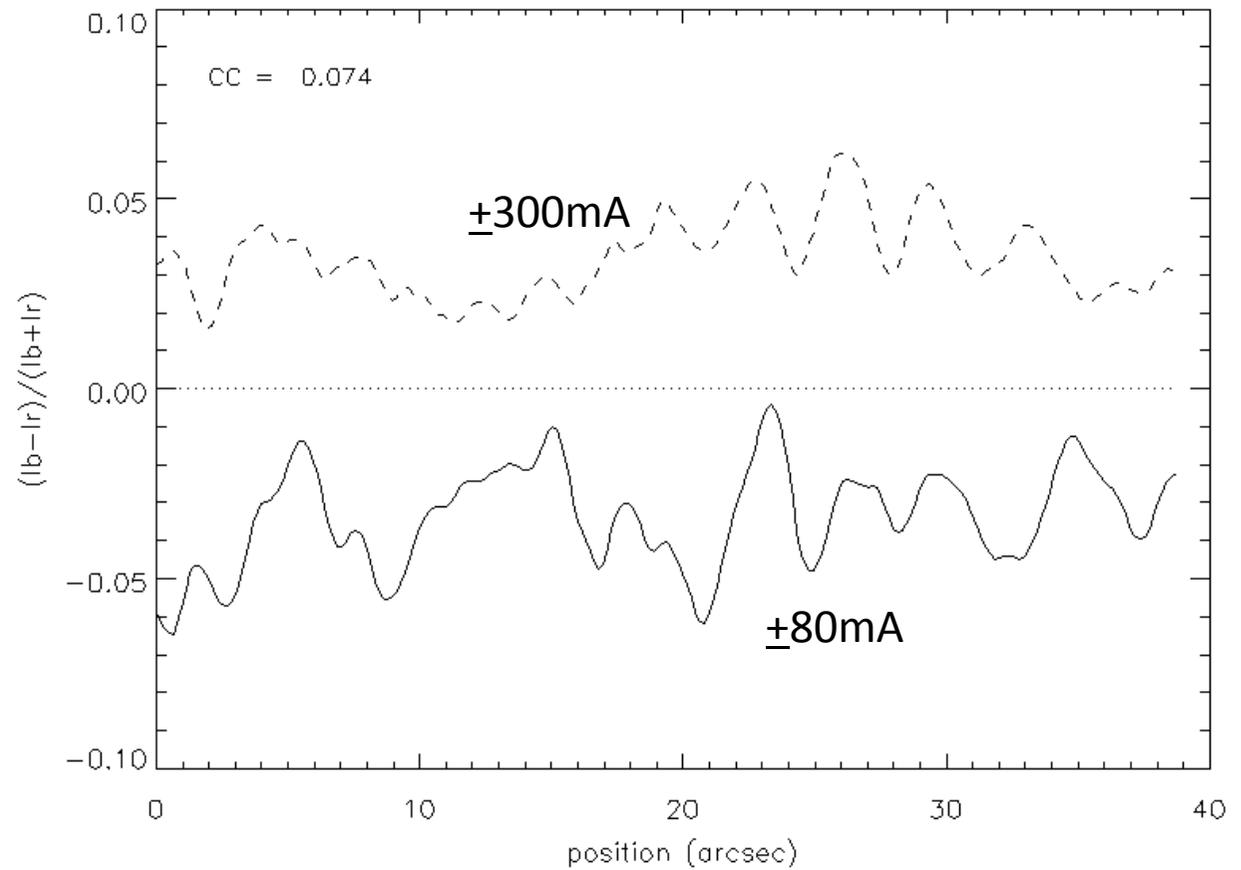


Spatial correlation, limb side

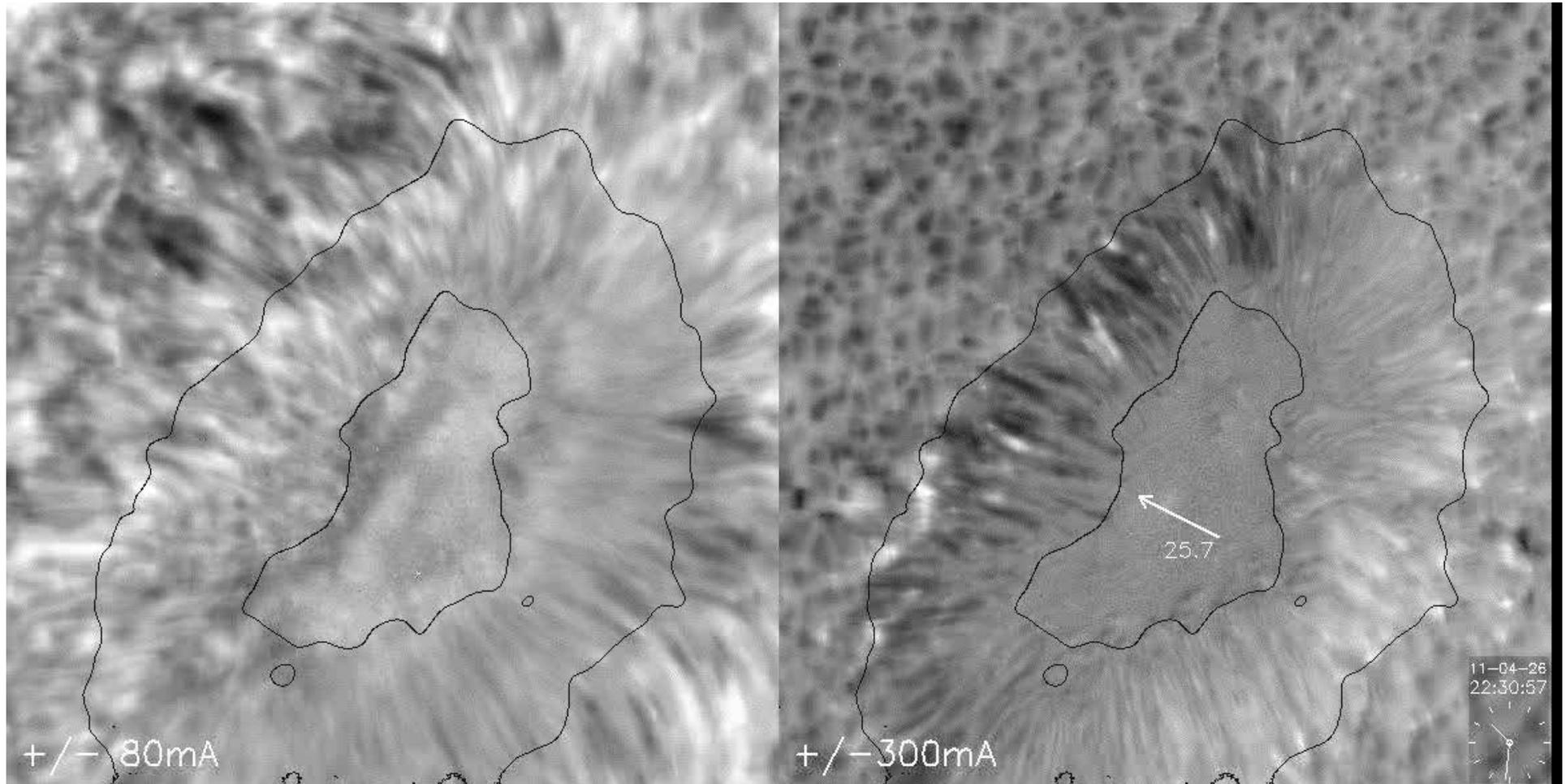


Time average

2011.04.26



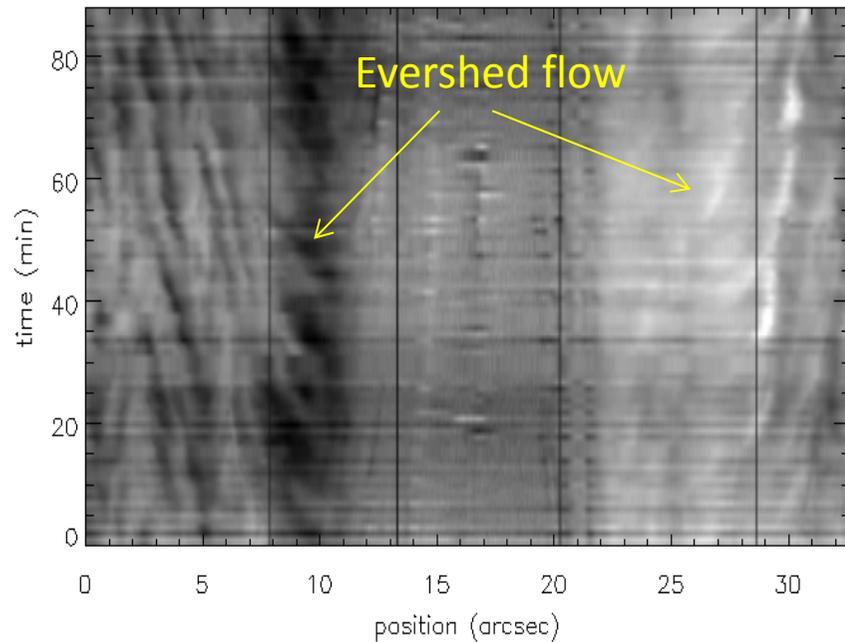
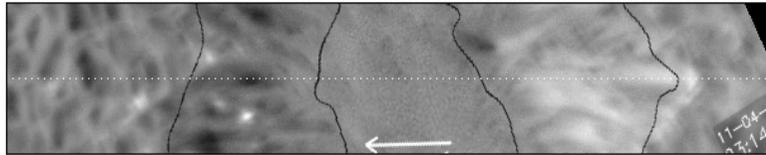
2011.04.26



Dopp.gram Time slice

← Disk center

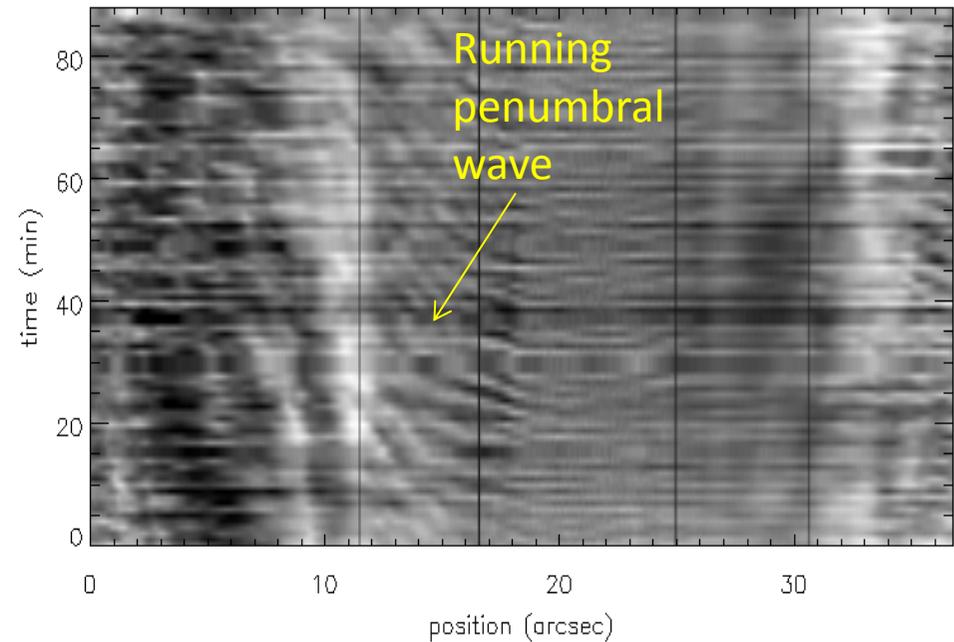
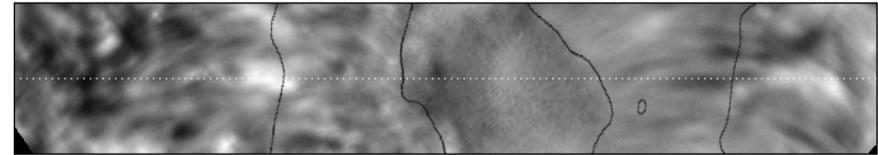
limb →



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

← Disk center

limb →



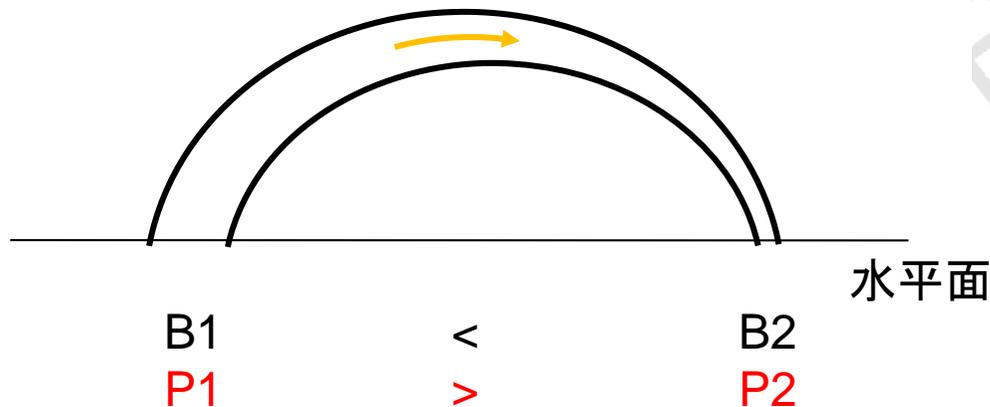
$$(I_{-80} - I_{+80}) / (I_{-80} + I_{+80})$$

Running penumbral wave is one of the dominant source of Doppler signal in $\pm 80\text{mA}$. 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

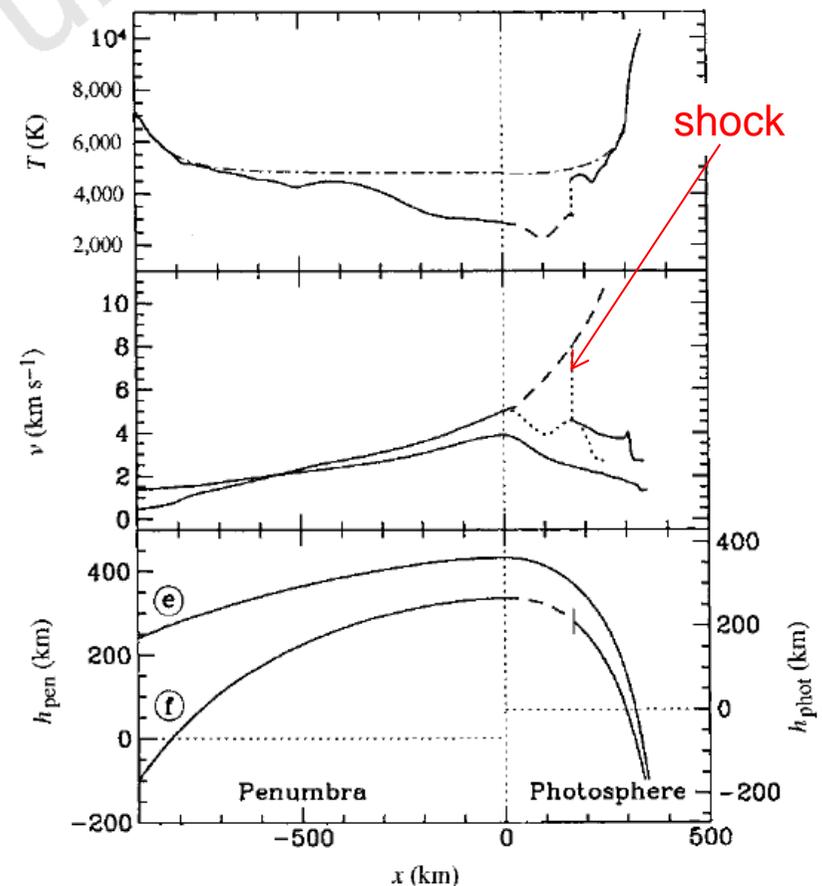
$$P_g + \frac{B^2}{8\pi} = \text{一様}$$



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、、、

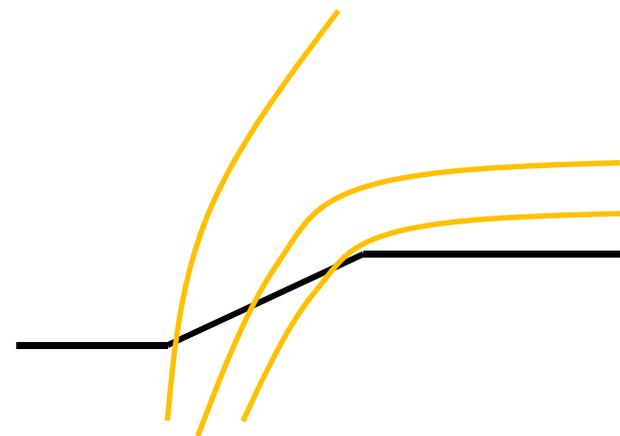
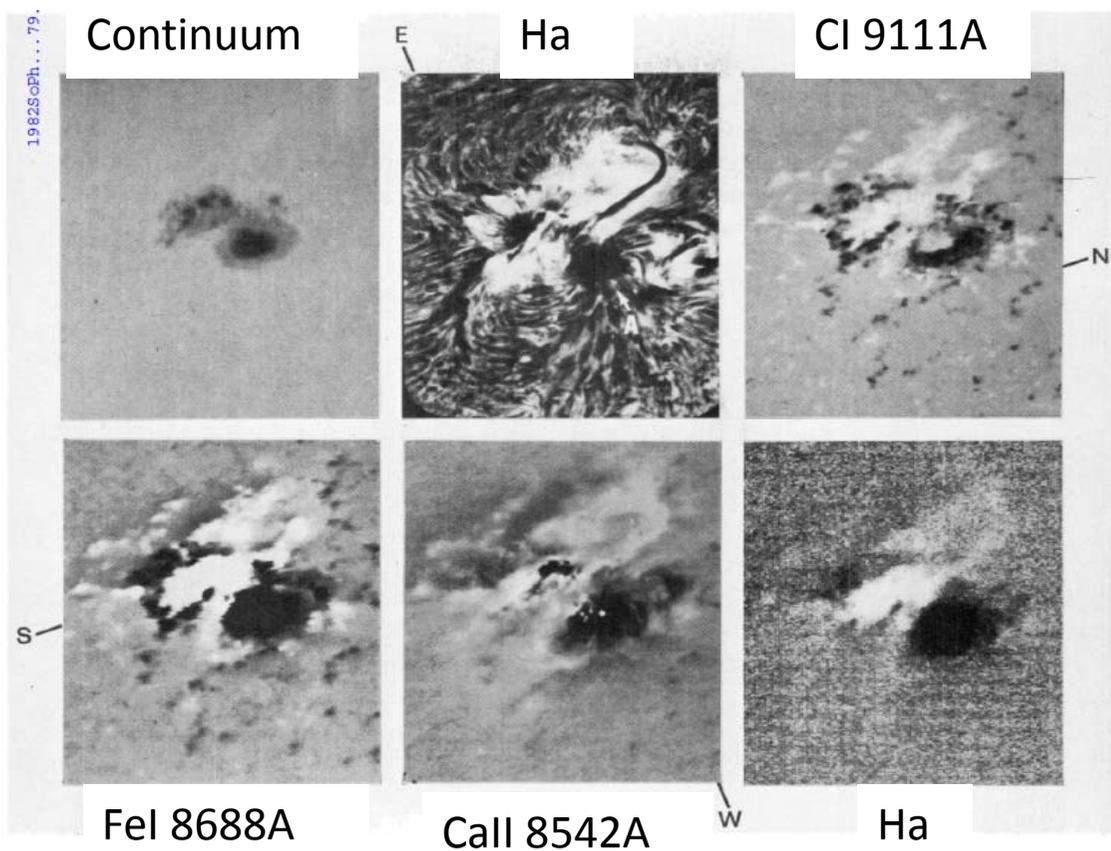
Meyer & Shimidt, 1968, Astron.J, 73, S72
 Thomas, 1981, in "The Physics of sunspots"
 Thomas, 1988, ApJ, 333, 407
 Montesinos and Thomas, 1993, ApJ, 402, 314
 Montesinos and Thomas, 1997, Nature, 390,4



ALMA 逆エバーシエツド流の観測

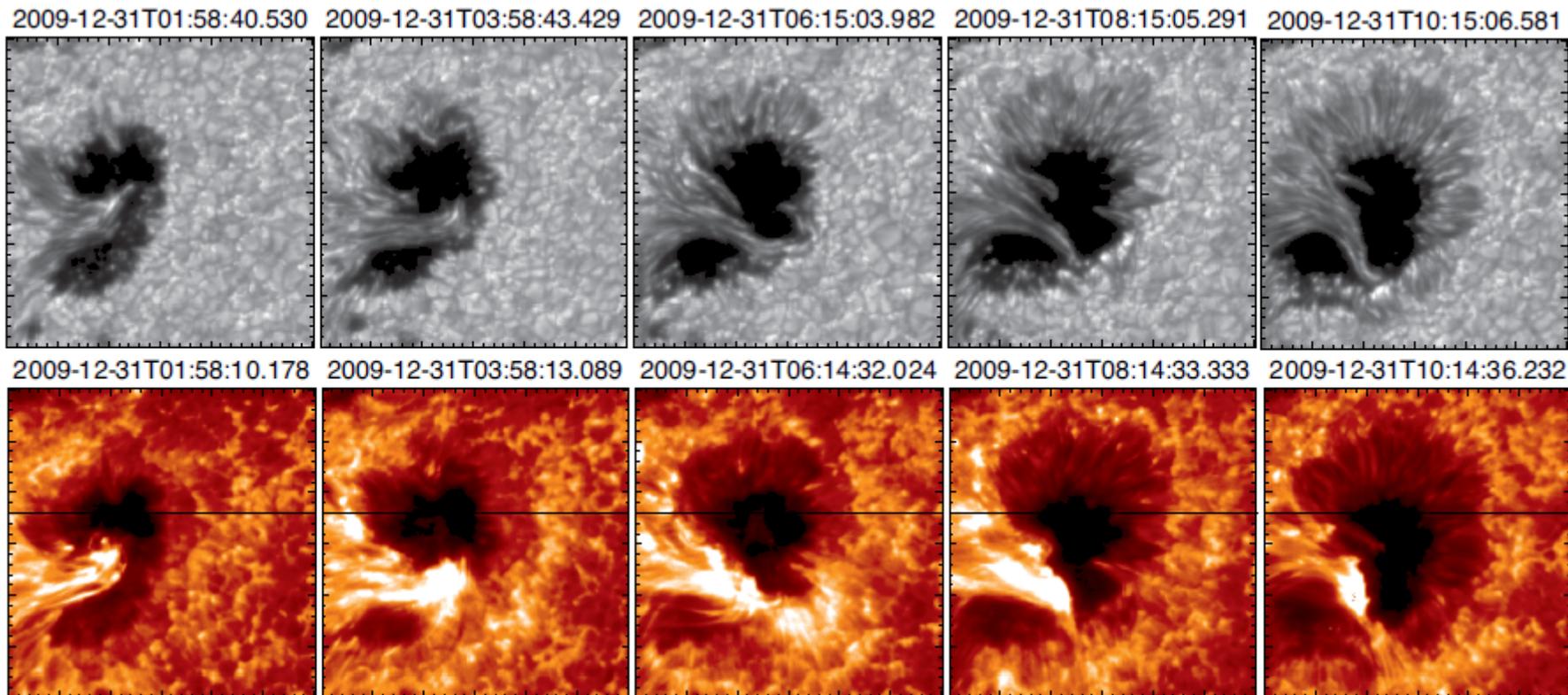
- 高い空間分解能により、流れるガス(むらがあるとして)を追跡。
- メカニズム:サイフォンフローが主流だが。。速度分布、衝撃波の存在、等の検証。
- 逆エバーシエツド流はどこを流れているか？
- 半暗部の磁場構造は？

Magnetic Canopy



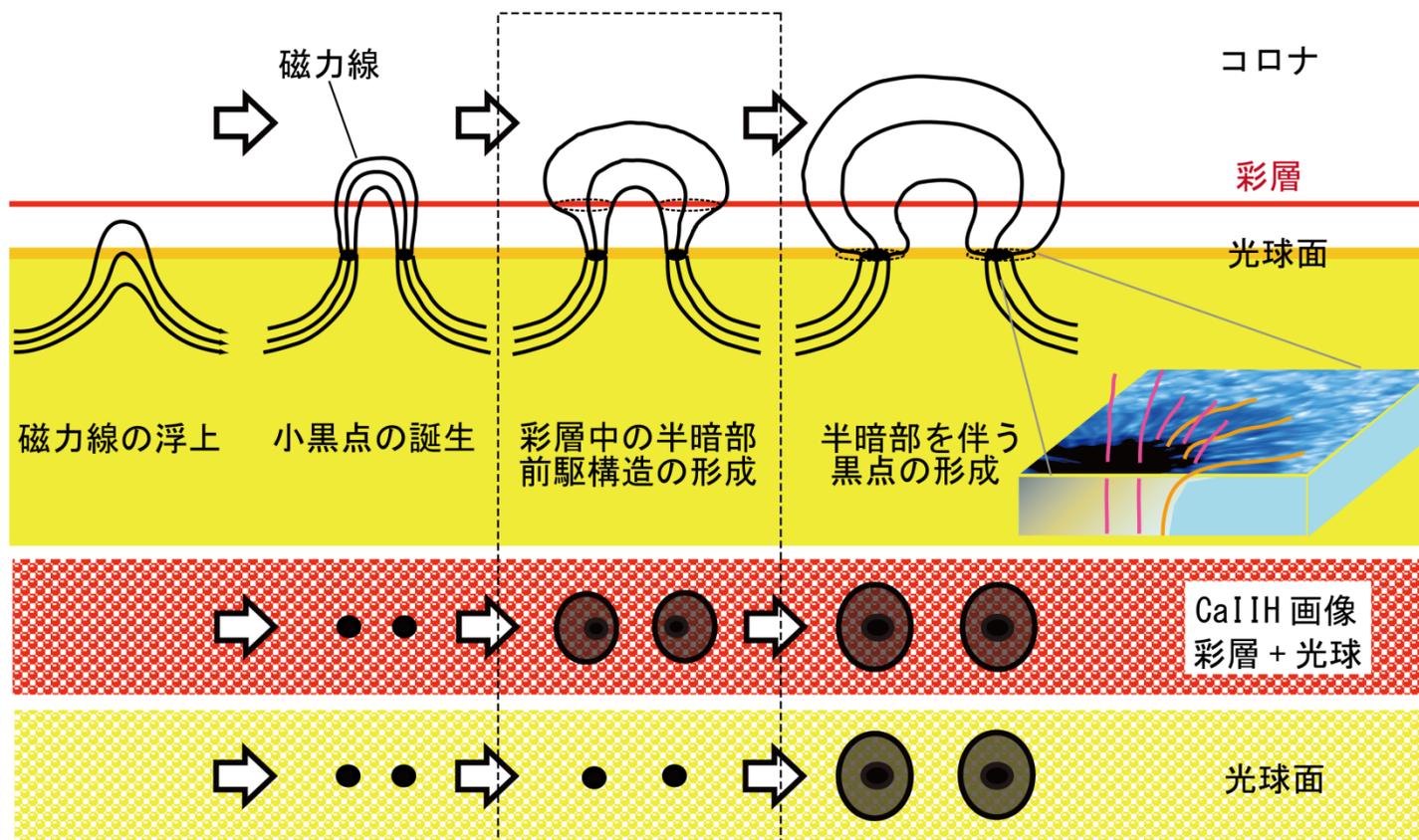
Giovanelli and Ronald 1982

半暗部形成の前駆構造



Shimizu et al 2012

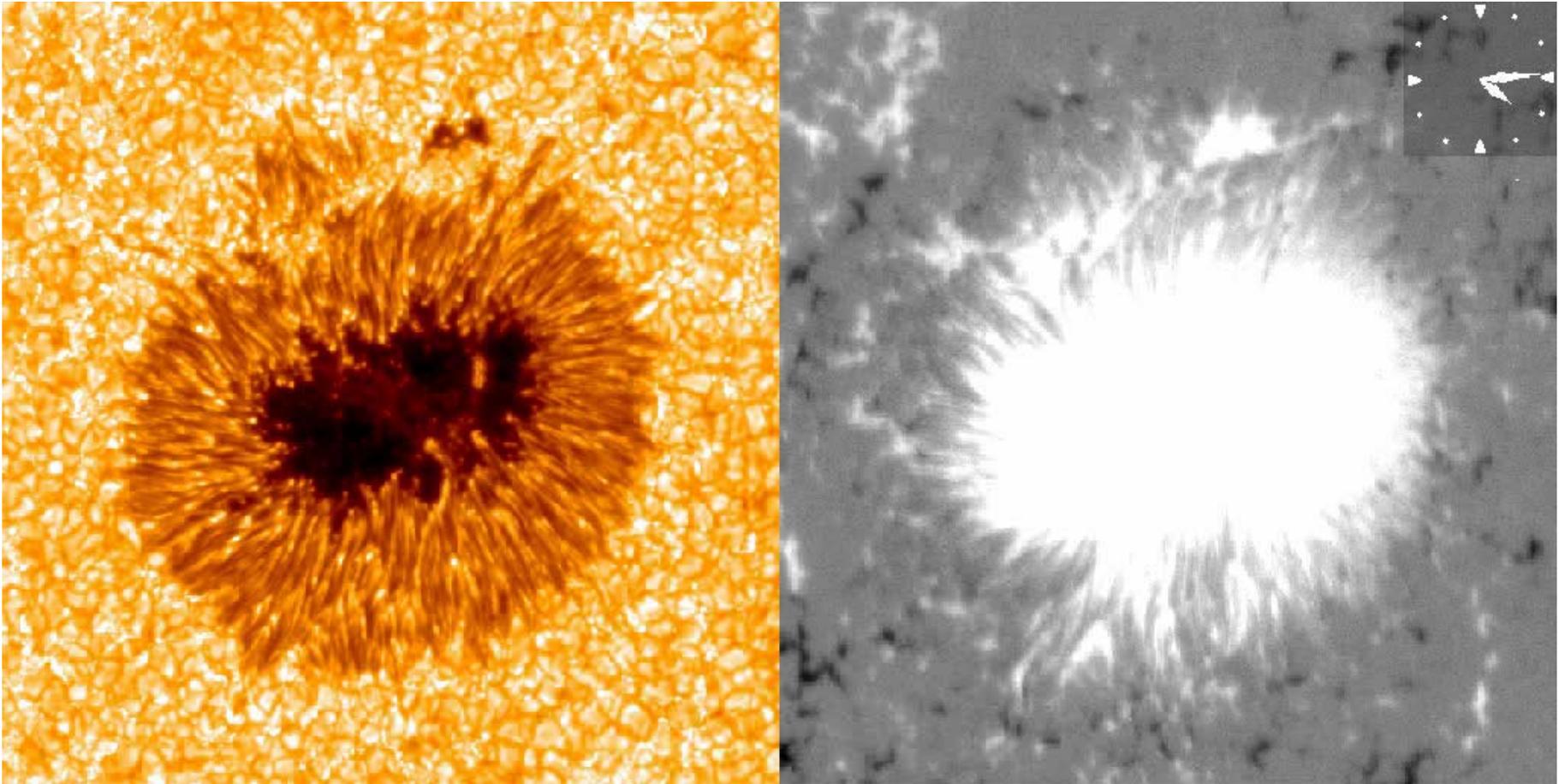
半暗部形成の前駆構造



Canopy の形成、逆エバーシエツド流はいつ始まるのか？

黒点の衰退とMMF

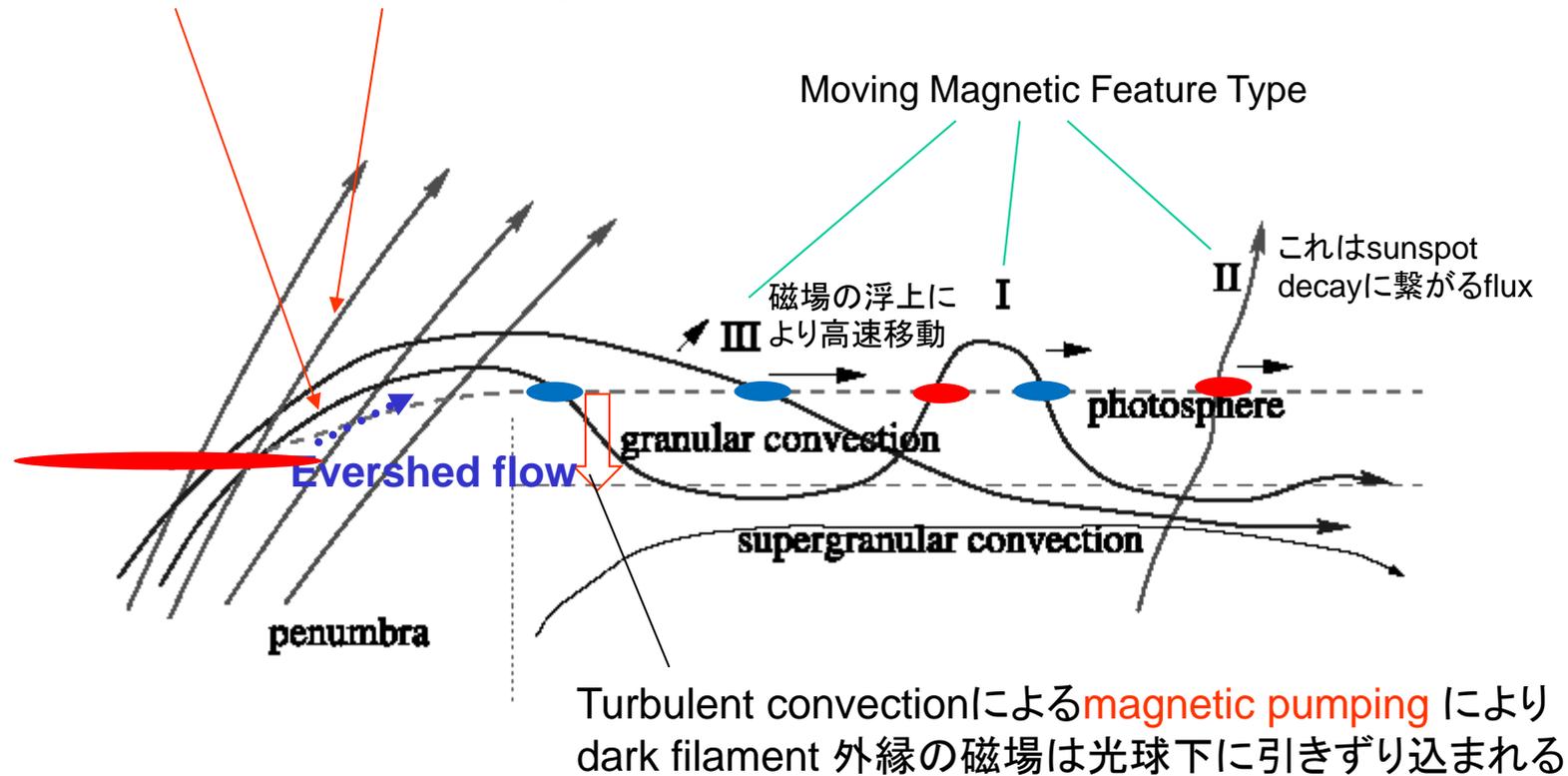
Moving Magnetic Feature (MMFs, Harvey & Harvey 1973)



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

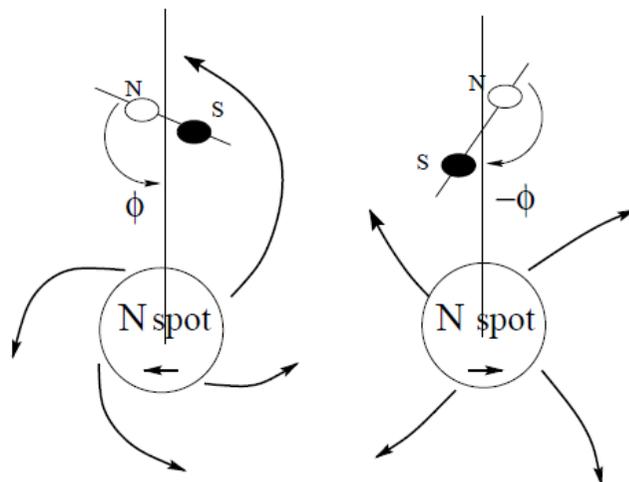
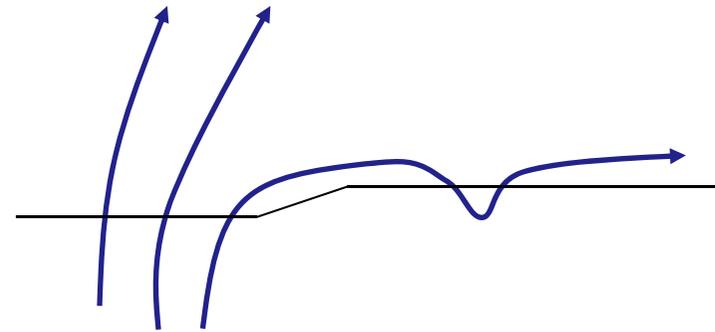
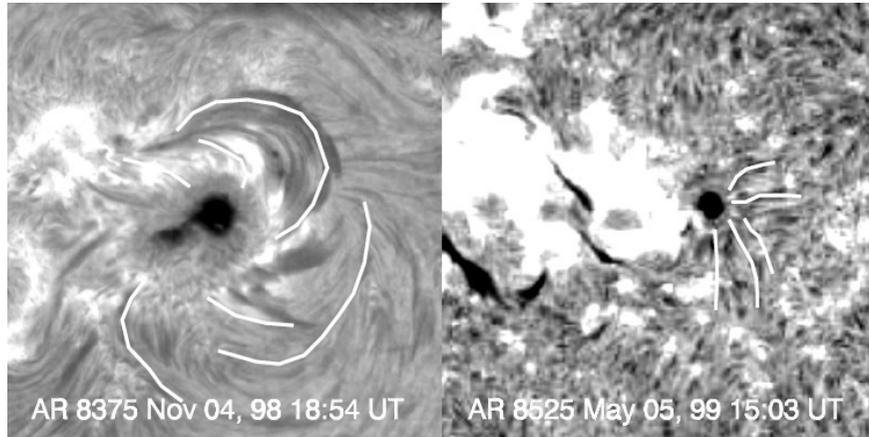


Weiss, etal, ApJ, 2004, 600, 1073-1090

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 etal 2008
Multinez Pillet 2002, Kubo etal 2007

Moving Magnetic Feature (MMF)



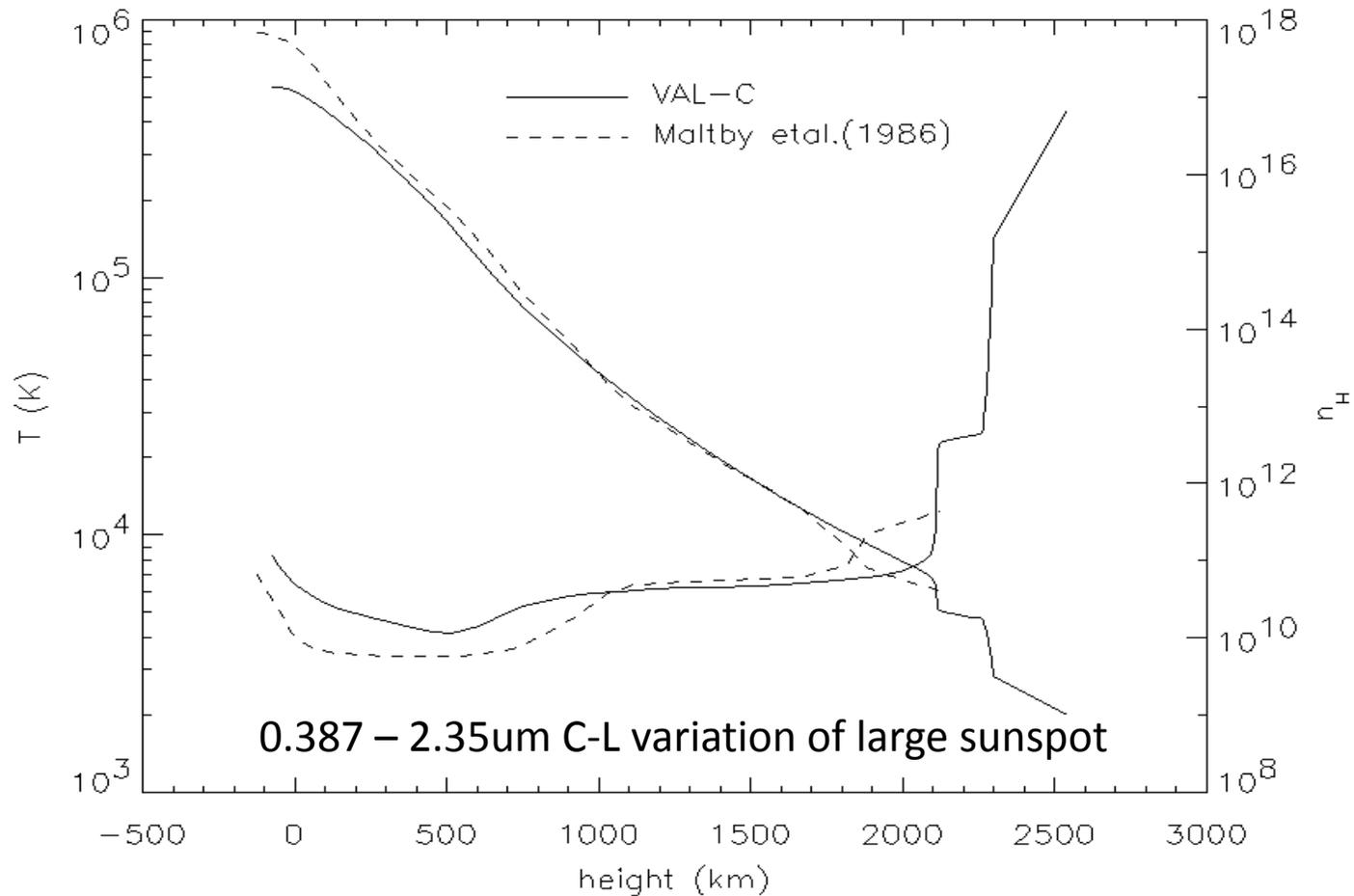
AR 8375 (CW)

AR 8525 (CCW)

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

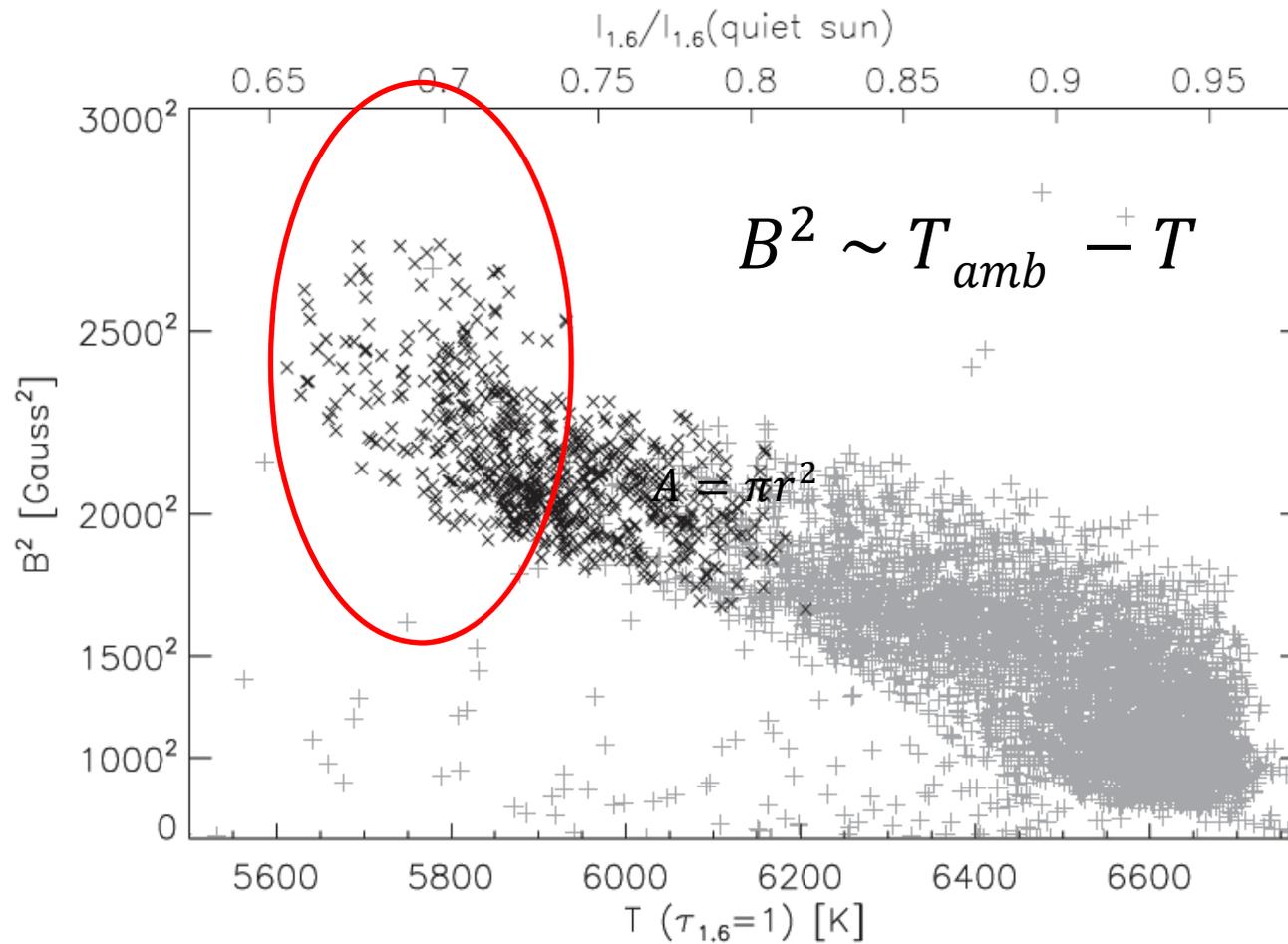
- ALMA 全周波数で黒点は暗く見えるのか？
- Wilson depression は見えるか？
- C-to-L variation から LTE ($S=B$) の仮定で信頼度の高い暗部彩層モデルができる。
- 暗部の彩層温度構造は本来の彩層加熱問題にヒントを与えるはず。

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 etal 2008

B^2 vs. T



低温部で温度低下を伴わない磁場の上昇

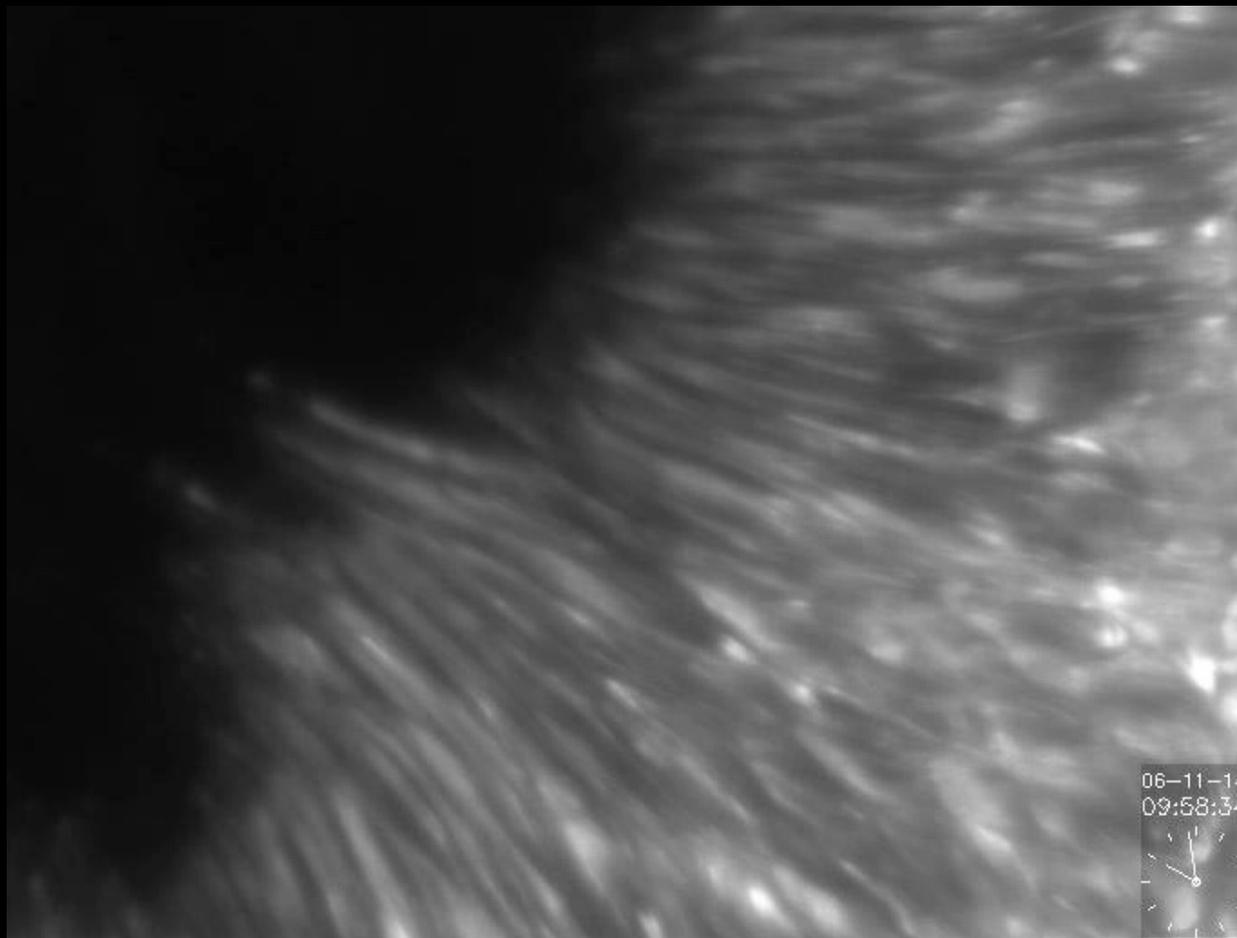
Jaeggli, Lin, and Uitenbroek, 2012

分子の重要性

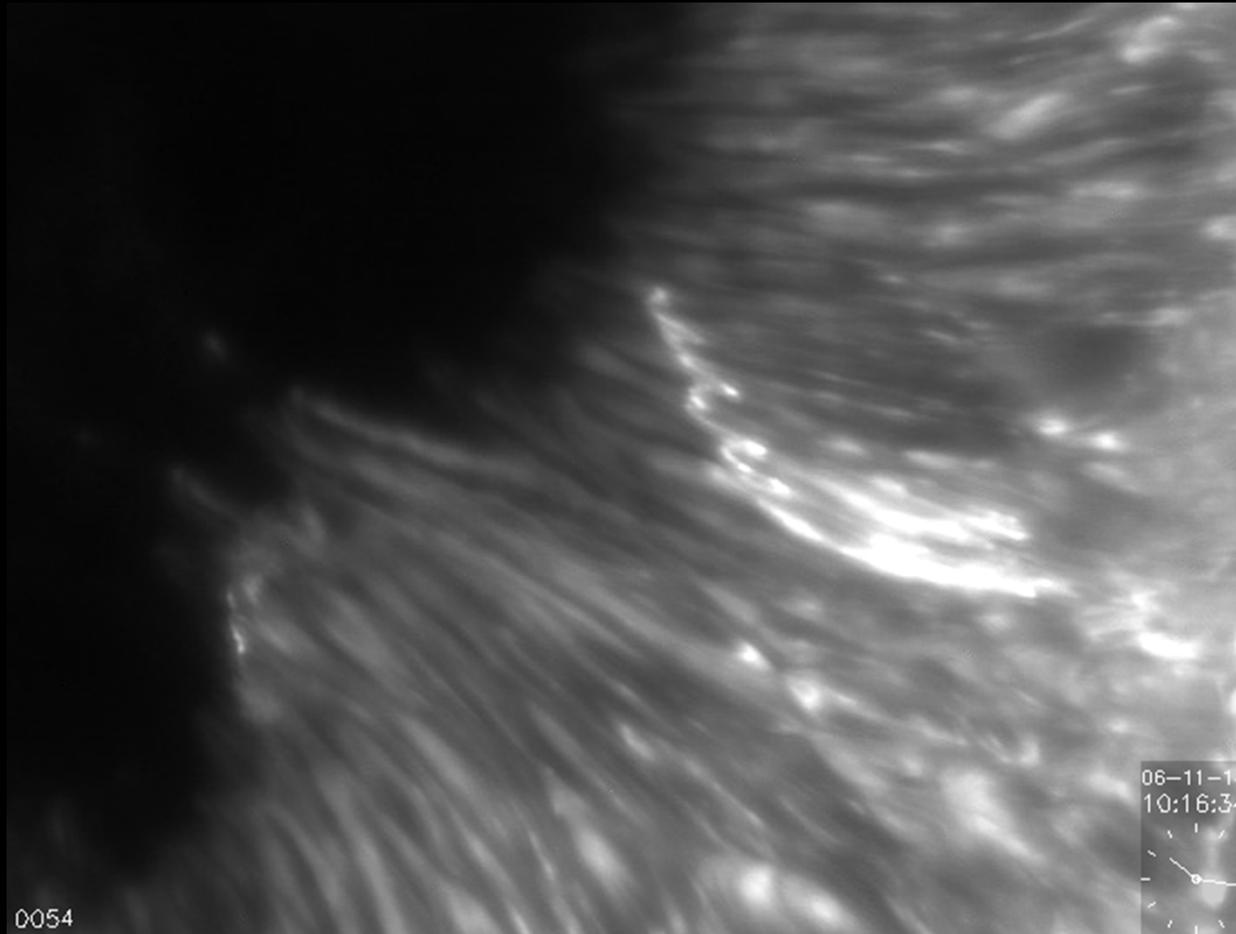
分子が形成されると、

- 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
- H₂分子が支配的、しかしH₂は可視-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?



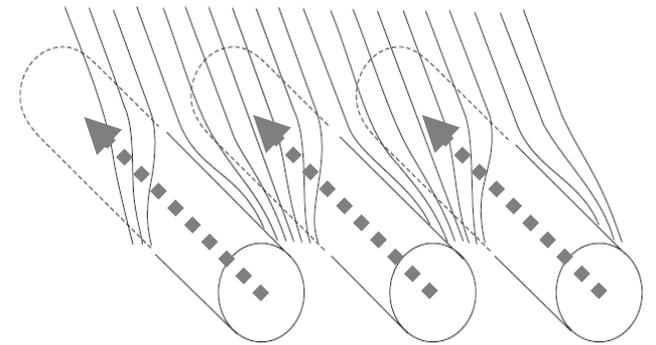
May give a hint of

- 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(?)