

ALMAで分解する黒点振動

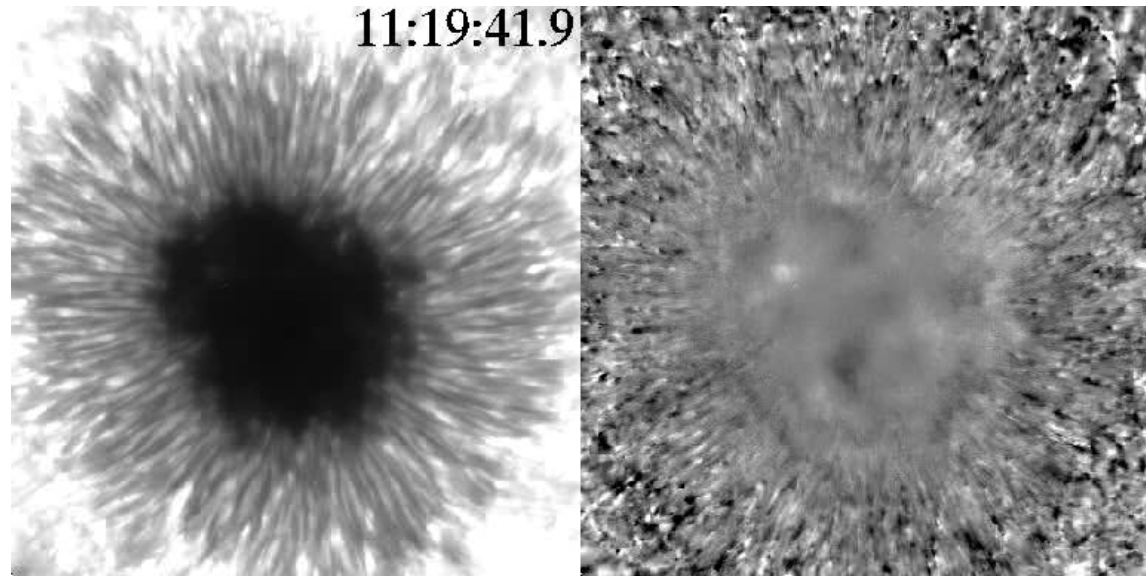
ALMA太陽観測ワークショップ@京都

2012年10月3日 京都

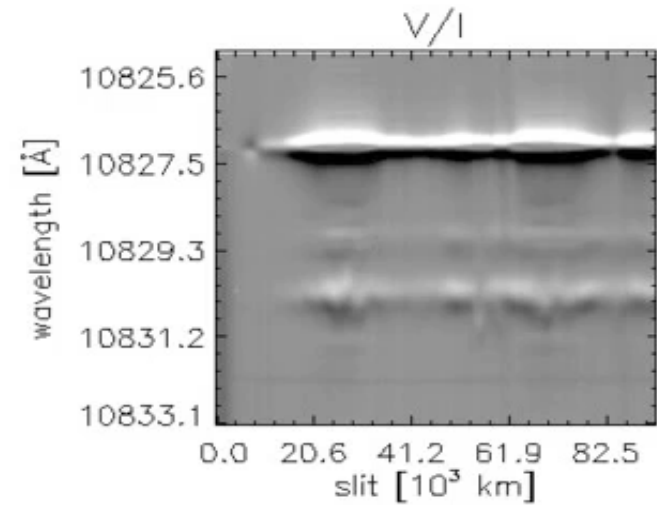
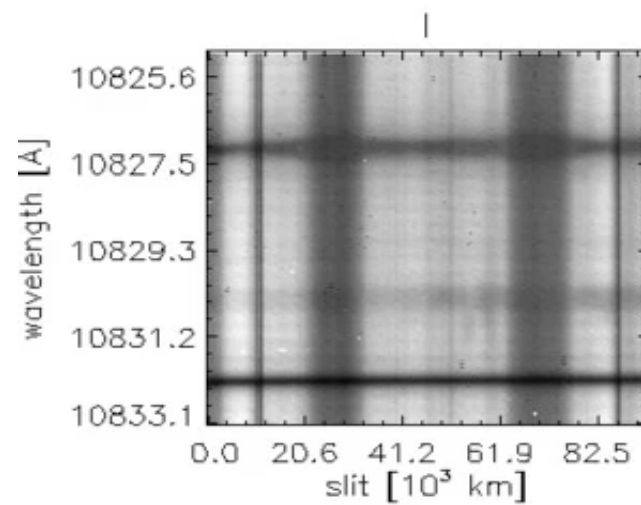
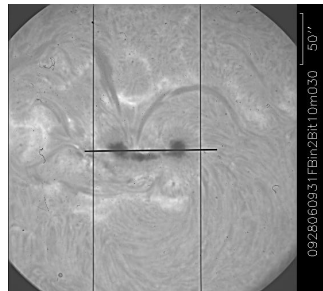
京都大学 阿南 徹

黒点振動

ひので/SOT
CA II H

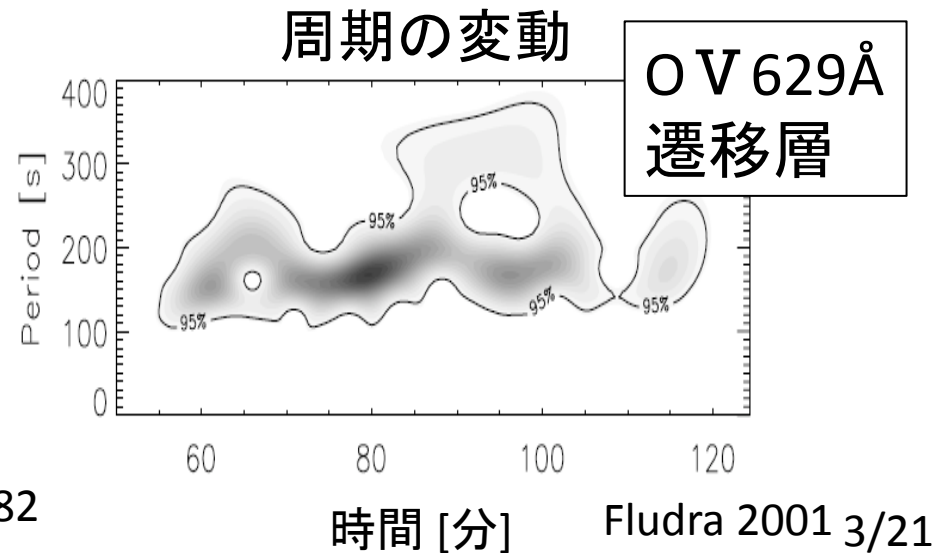
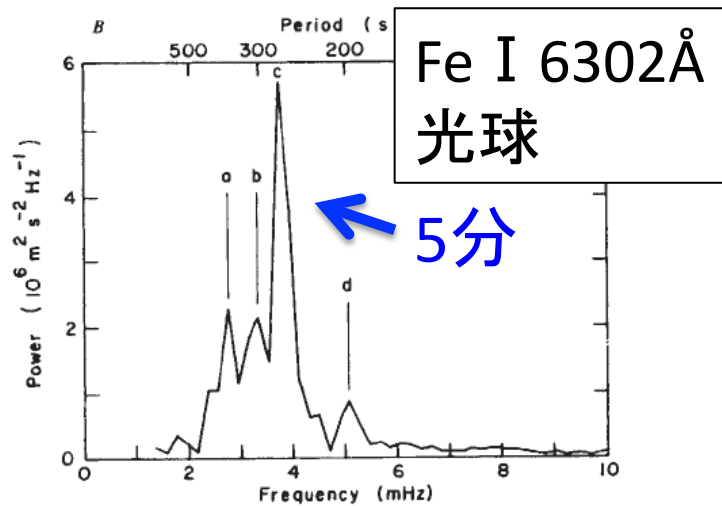
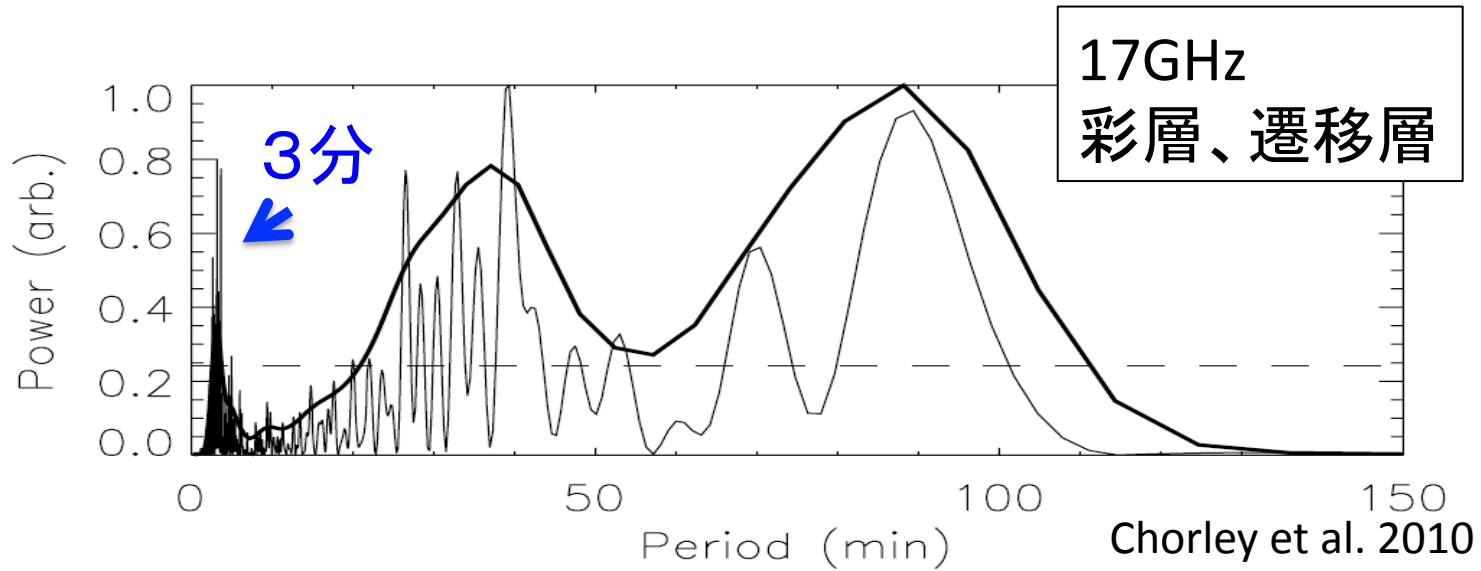


飛騨/DST
He I 10830Å



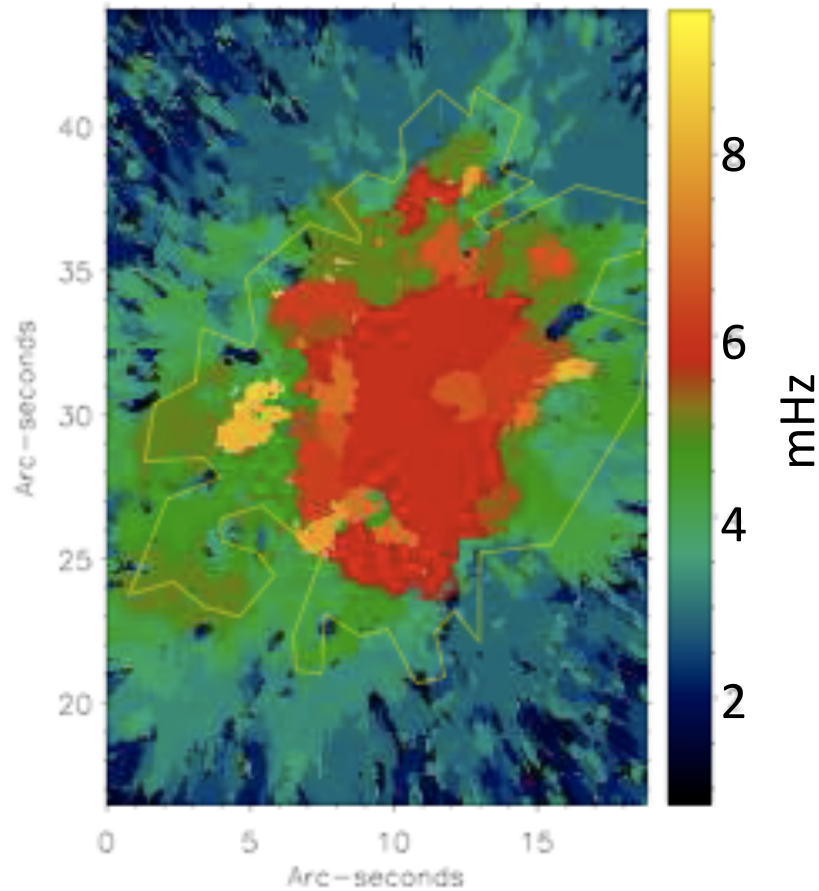
14:41:41 JST

周期



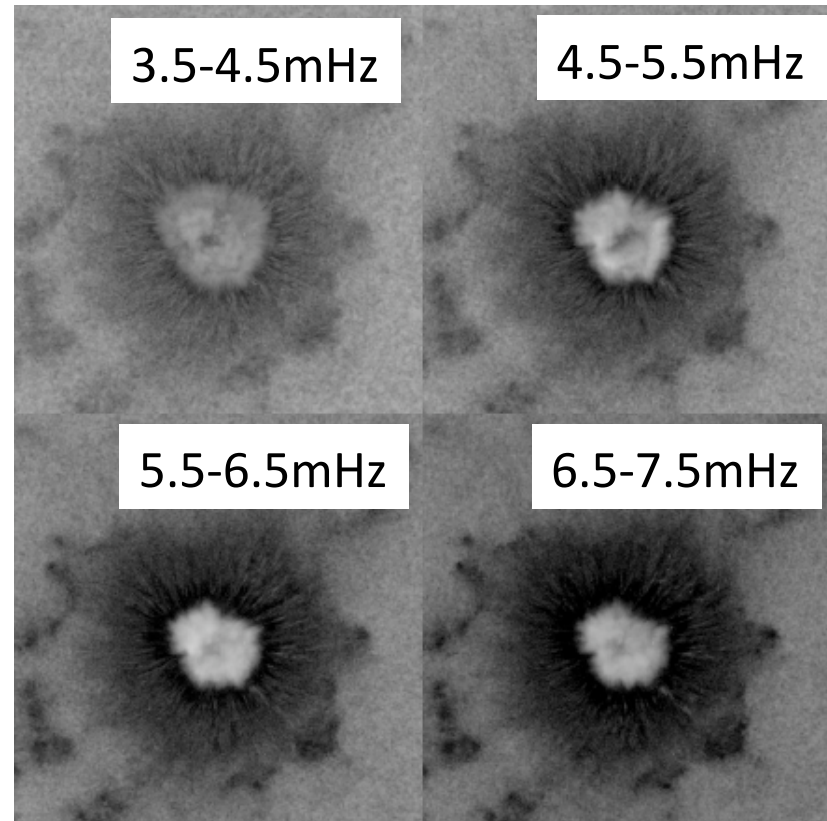
振動数分布

Ca II H、彩層



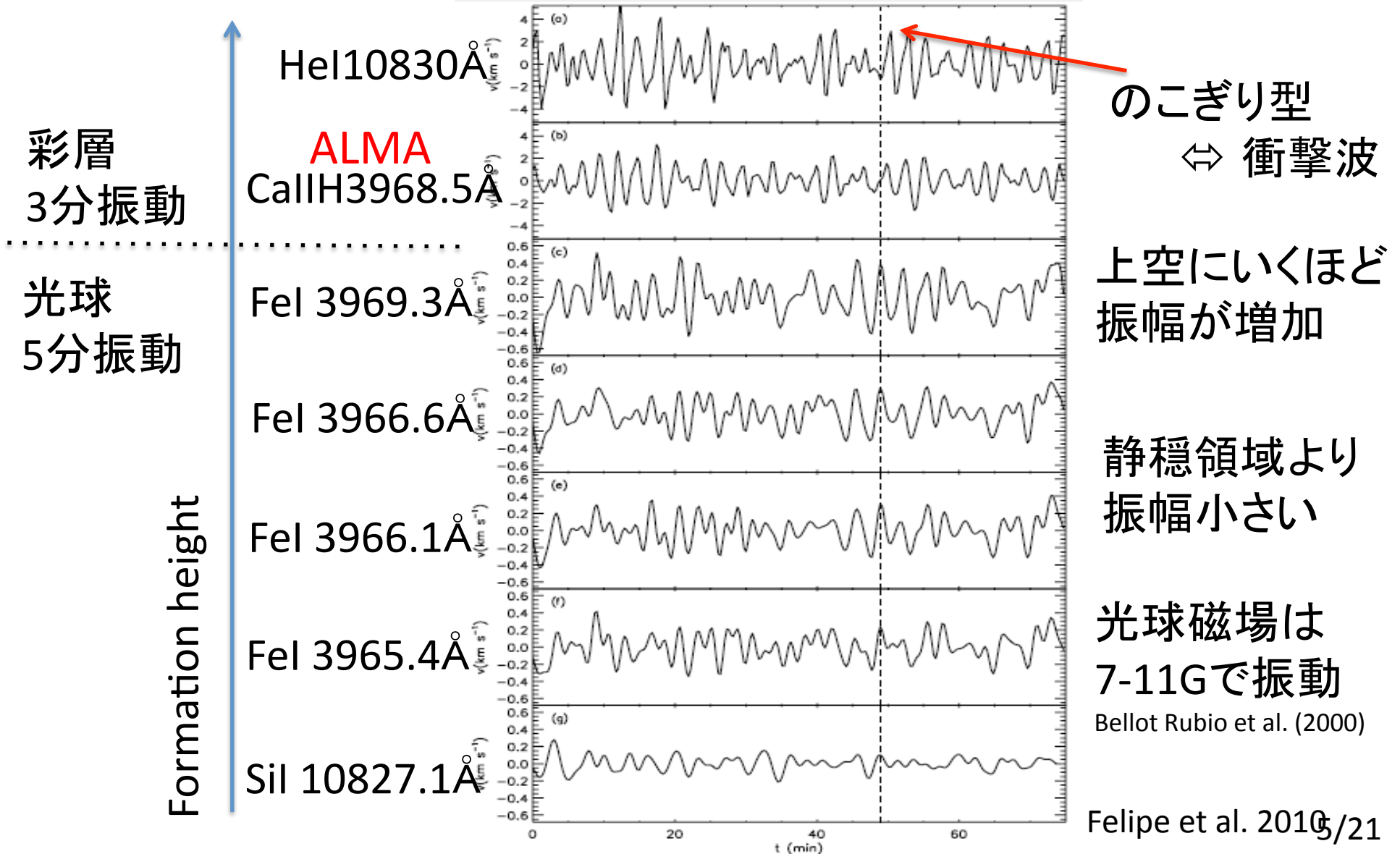
Socas-Navvaro et al. 2009

Ca II H、彩層



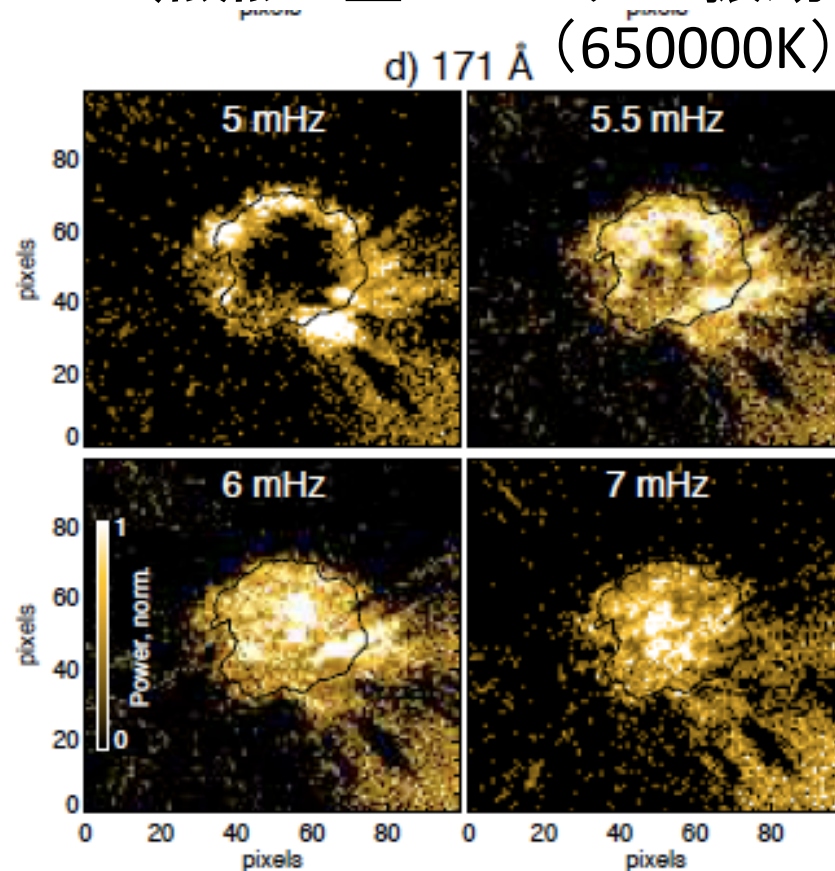
Nagashima et al. 2007

光球から彩層へ ドップラー速度時間変化



コロナ

黒点上空のコロナの振動



Rezníkova et al. 2012

• コロナで観測される3分振動

– ファン構造

(Krishna Prasad et al. 2012)

- 周期: 3分、9分
- 速度: 84、101 km/s

– コロナループの振動

(De Moortel et al. 2000)

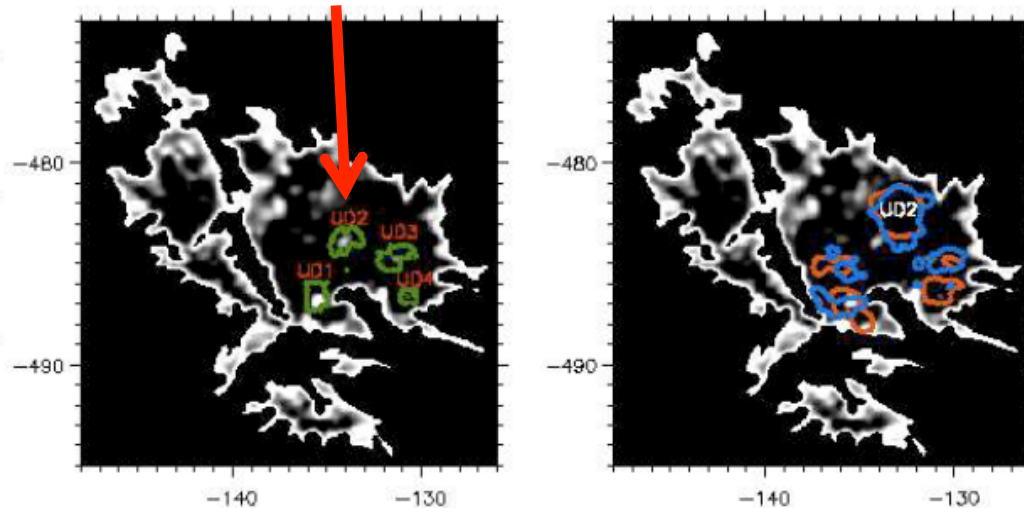
- 周期: 180 – 420 s
- 速度: 70 – 165 km/s
- エネルギーフラックス
: 3.5×10^2 ergs/cm²/s
(ループの加熱に足りない)

彩層・低層コロナの加熱

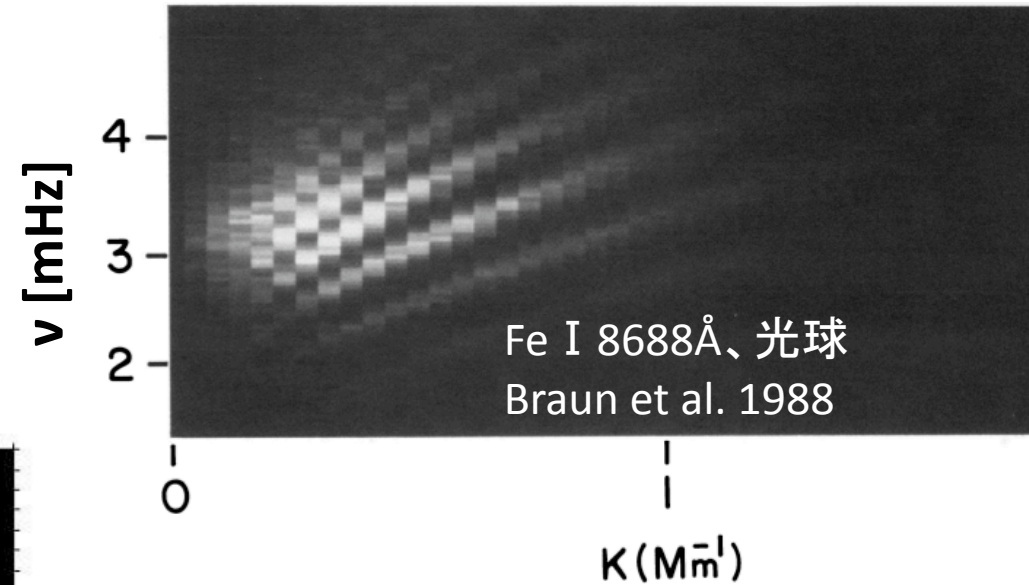
- 彩層・低層コロナの加熱に不十分
 - コロナループの振動 (De Moortel et al. 2000)
 - 観測を元にした黒点振動の数値計算 (Felipe et al. 2011)
 - 観測量
 - 光球磁場 (Si I 10827Å)
 - 光球ドップラー速度の時間変化 (Si I 10827Å)
 - 3D シミュレーションで彩層 (Ca II H、He II 10830Å) のドップラー速度時間変化を再現
 - 波の平均エネルギーフラックス = 3×10^5 ergs/cm²/s
(彩層の温度維持に必要なエネルギーフラックス 2×10^6 ergs/cm²/s)
- しかし、波による加熱過程の観測に適している (私見)

源

- 黒点の構造の解明に繋がる
- 太陽固有振動 p-mode
- 黒点内部の磁気対流
 - Umbral dot



黒点振動のk- ω 図



3分振動の強いところ
光球の明るさ
彩層の明るさ
彩層の視線速度

Jess et al. 2012

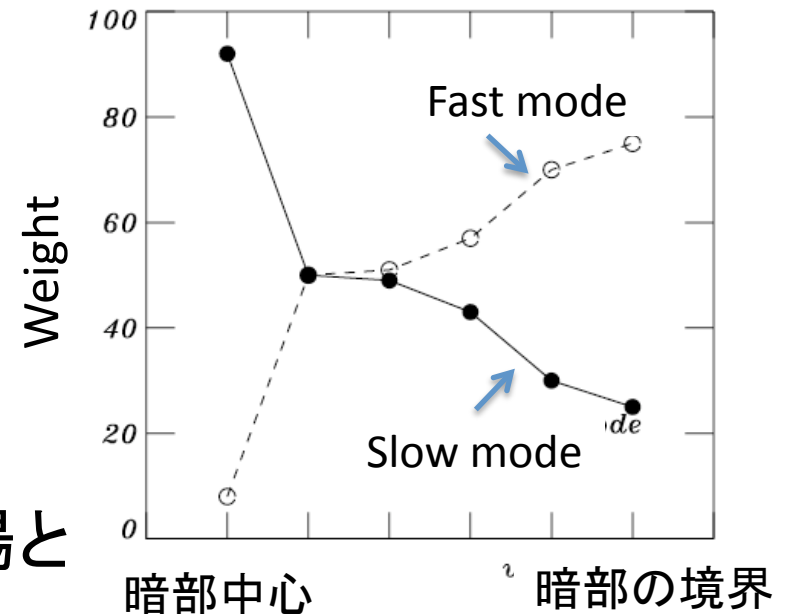
- **それぞれの定量的評価が課題**
- 磁気対流と黒点振動の関係をはっきりさせる

モード

- 黒点の構造の解明に繋がる
- 観測的に明らかになっていない
 - 光球磁場の振動 => **Fast mode** と **Slow mode** の混合 (low- β) (Khomenko et al. 2003)
 - 17GHzの輝度温度変化 => **traveling acoustic wave** (Shibasaki 2001)
 - 光球の速度の振動が磁場に沿っている => **Slow mode** (Schunker et al. 2005)
 - 光球と彩層での振動の位相差と振幅の増大
=> low- β **slow mode** の進行波 (Centeno et al. 2006)
 - 活動領域におけるTime – distanceの関係 (局所日震学)
=> **Fast mode** (e.g. Braun 1997)

モード

- モード変換・混合
 - $\beta \sim 1$ で発生
 - 変換率や方向は磁場と波数ベクトルの間の角度、振動数に依存
 - 観測されていない
- 振動モードは領域毎に違う
 - * 統一的に説明されていない
- 必要な情報
 - 各大気層、各領域の振動モード
 - $\beta \sim 1$ の層とその大気層での磁場と波数ベクトルの間の角度



Khomenko et al. 2003

彩層、遷移層、コロナでの3分振動

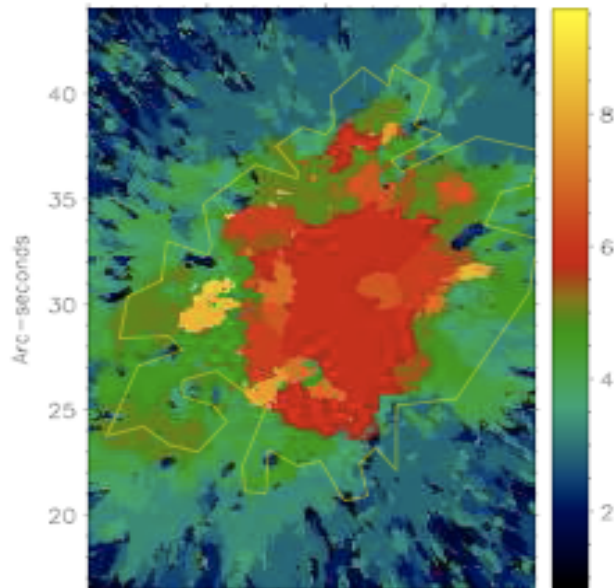
- 共鳴振動の寄与は観測的に未解明

- Cut-off 振動数

$$f_c = \frac{\gamma g_o \cos \theta}{2\pi C_S(T)} < \frac{\gamma g_o \cos \theta}{2\pi C_S(T_{\min})} \approx 5 \cos \theta \text{ [mHz]}$$

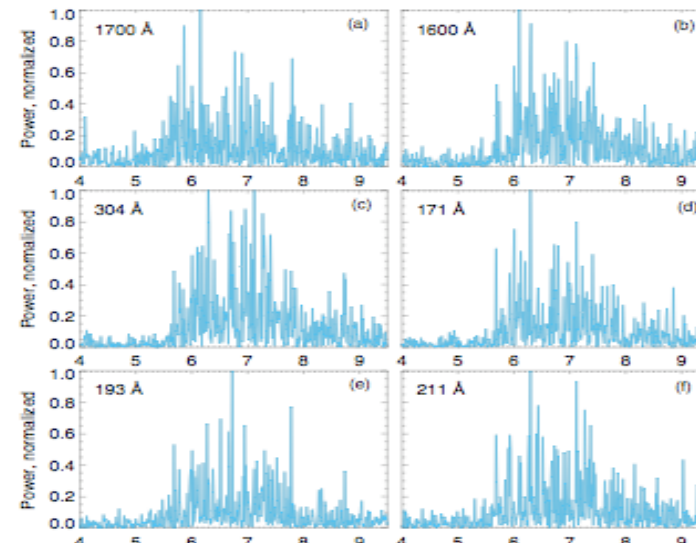
– Slow Low- β MHD wave

振動数マップ [mHz]



Socas-Navvaro et al. 2009

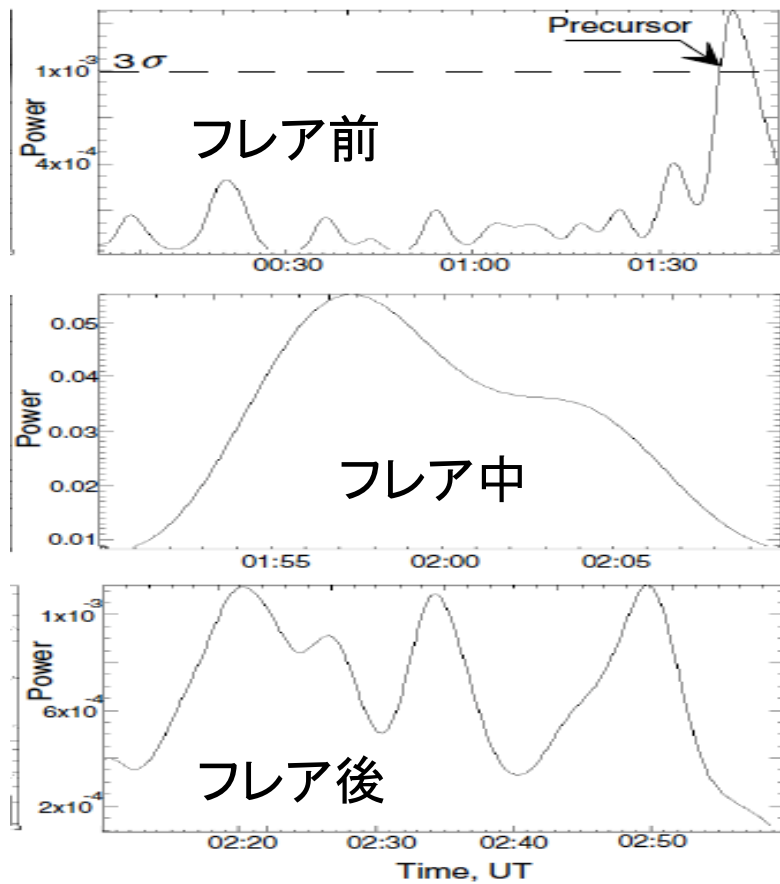
パワースペクトル (SDO/AIA)



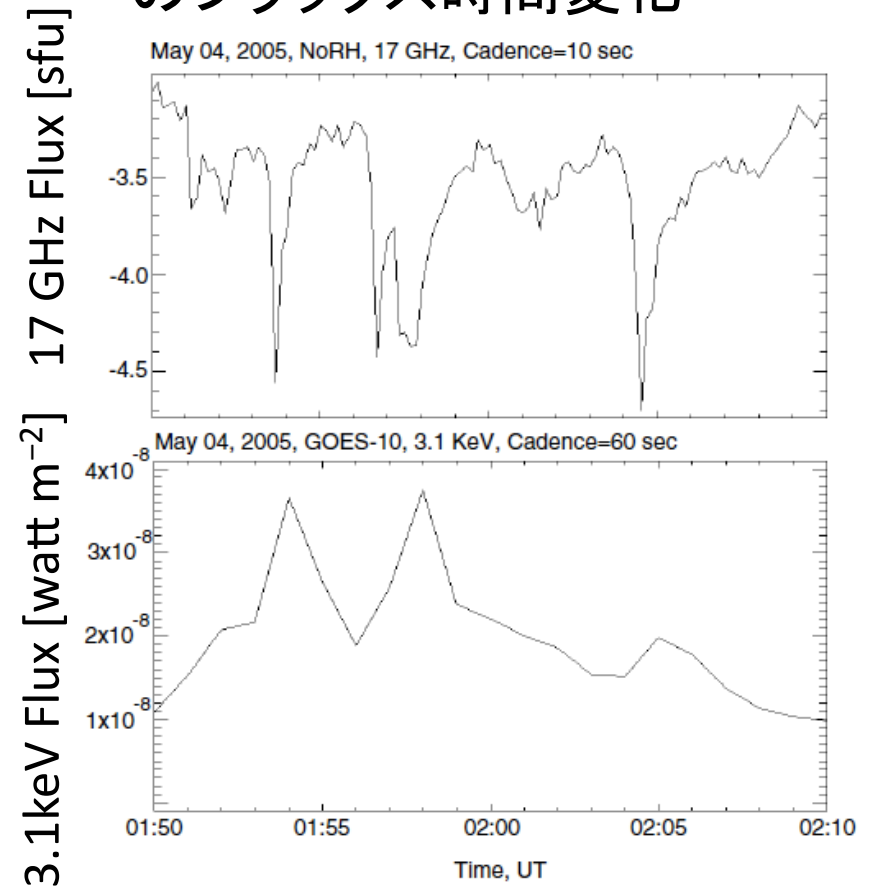
Reznikova et al. 2012

黒点振動とフレア

3分振動パワーの時間変化(17GHz)



フレア中の17GHzとGOES
のフラックス時間変化



黒点振動の研究

- 黒点振動
 - ローレンツカ～ガス圧勾配～浮力を復元力とする波
- 太陽物理
 - 黒点構造
 - (黒点での)波動によるコロナ・彩層加熱
- 知りたい事
 - エネルギー収支
 - 波源
 - 各大気層における波
 - モード
 - 進行波、定在波(共鳴振動)
 - モード変換の観測

黒点振動の研究

- 黒点振動
 - ローレンツカ～ガス圧勾配～浮力を復元力とする波
- 太陽物理
 - 黒点構造
 - (黒点での)波動によるコロナ・彩層加熱
- 知りたい事
 - エネルギー収支
 - 波源
 - 各大気層における波
 - モード
 - 進行波、定在波(共鳴振動)
 - モード変換の観測

ALMAで迫る

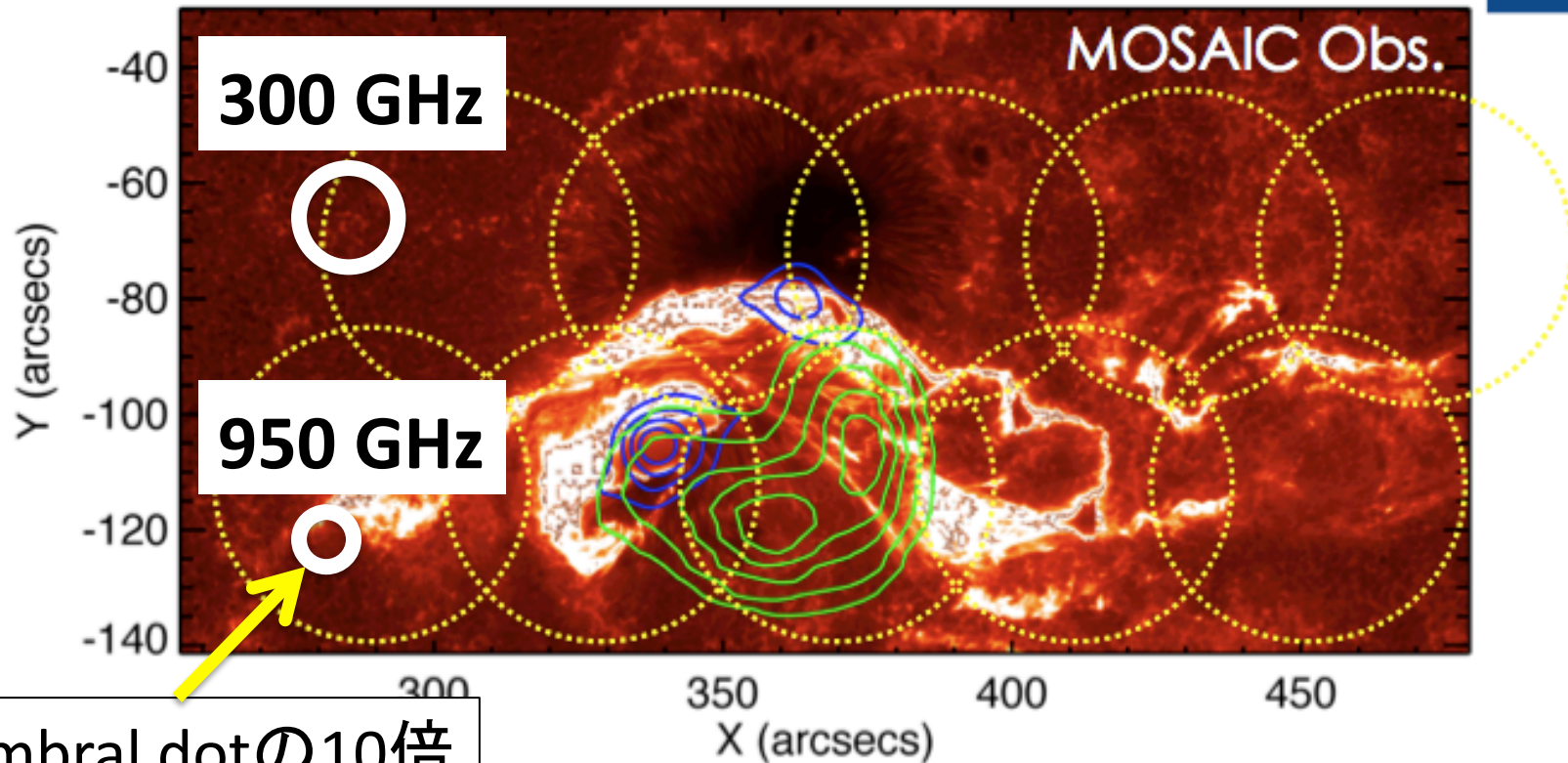
- 超高解像度観測
- 多層での温度分布

視野

7

ALMA's Field of View [Band 3](100 GHz)

Hinode/SOT-FG Ca II H 13-Dec-2006 02:30:38.130 UT



An X class flare observed with NoRH, RHESSI and Hinode. Green Contours: NoRH 34 GHz, Blue Contours: RHESSI 35-100keV, Color Scale: Hinode Ca II H band.

温度変化の分解

- 音波、進行波 (Landau & Lifshitz 1959)

$$\frac{\delta T}{T} = (\gamma - 1) \frac{v}{C_s} \approx 0.2 \left(\frac{v}{2 \text{ km/s}} \right) \left(\frac{C_s}{10 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

$\Delta v \sim 2 \text{ km/s}$ @ Call H (Felipe et al. 2010)

$\Delta v \sim 0.2 \text{ km/s}$ @ 光球

- ALMAの検出感度 (下条さんスライドより)

– ex. 検出感度 $0.2 \text{ mJy/Beam} = 1\sigma$

@ Band 7 / 1.5 min / Cycle 1

– 太陽: $\sim 10^5 \text{ Jy/Beam}$

充分分解できる

空間方向の分解

励起源の情報に迫る

- 構造の分解は励起源の情報に繋がる

- 微細構造

- フィラメント構造 (Socas-Navvaro et al. 2009)
- 0.2秒角の分解能できりぎり分解できる

- 励起源 (磁気対流)

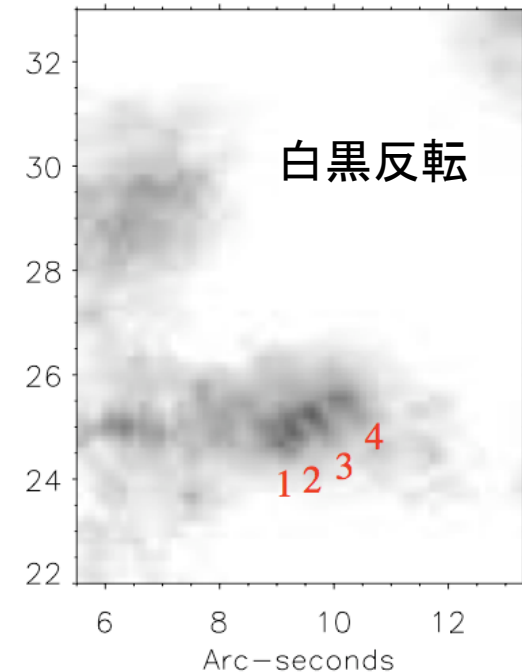
- Umbral dots (Jess et al. 2012)
 - 大きさ~0.4秒角

- ALMAの空間分解能

- 0.38秒角 @ 100 GHz
- 0.12秒角 @ 300 GHz
- 0.04秒角 @ 900 GHz

- 微細構造の分解、磁気対流の定量的評価を期待

Hinode/SOT Ca II H



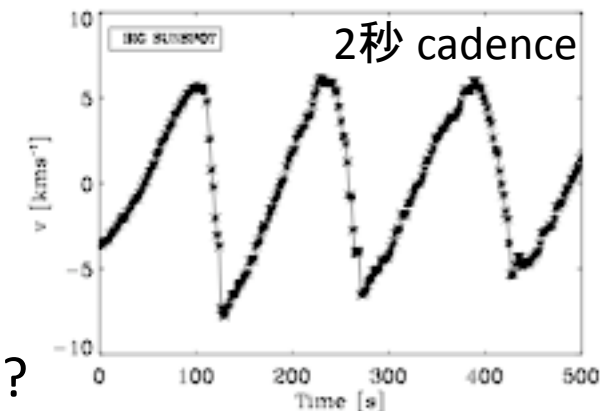
Socas-Navvaro et al. 2009

時間方向の分解

必要な時間分解能

- ALMAの時間分解能はターゲットによる
- できるだけ短いTime cadenceが良い
 - 3分振動 => ~ 30 秒、最低1分
 - 進行波の分解 => 60秒 \sim 20秒
 - 音速 ~ 10 km/s
 - 2周波数帯、放射層の高さの差 ~ 600 km?
 - 4周波数帯、放射層の高さの差 ~ 200 km?
 - 振動パターンの空間方向の広がり => 20秒以下
 - 50 \sim 80 km/s (Kobanov et al. 2006)
 - 20秒以下の時間分解能でも充分分解できない (Socas-Navvaro et al. 2009)
 - 彩層上層部での非線形化 => ~ 10 秒

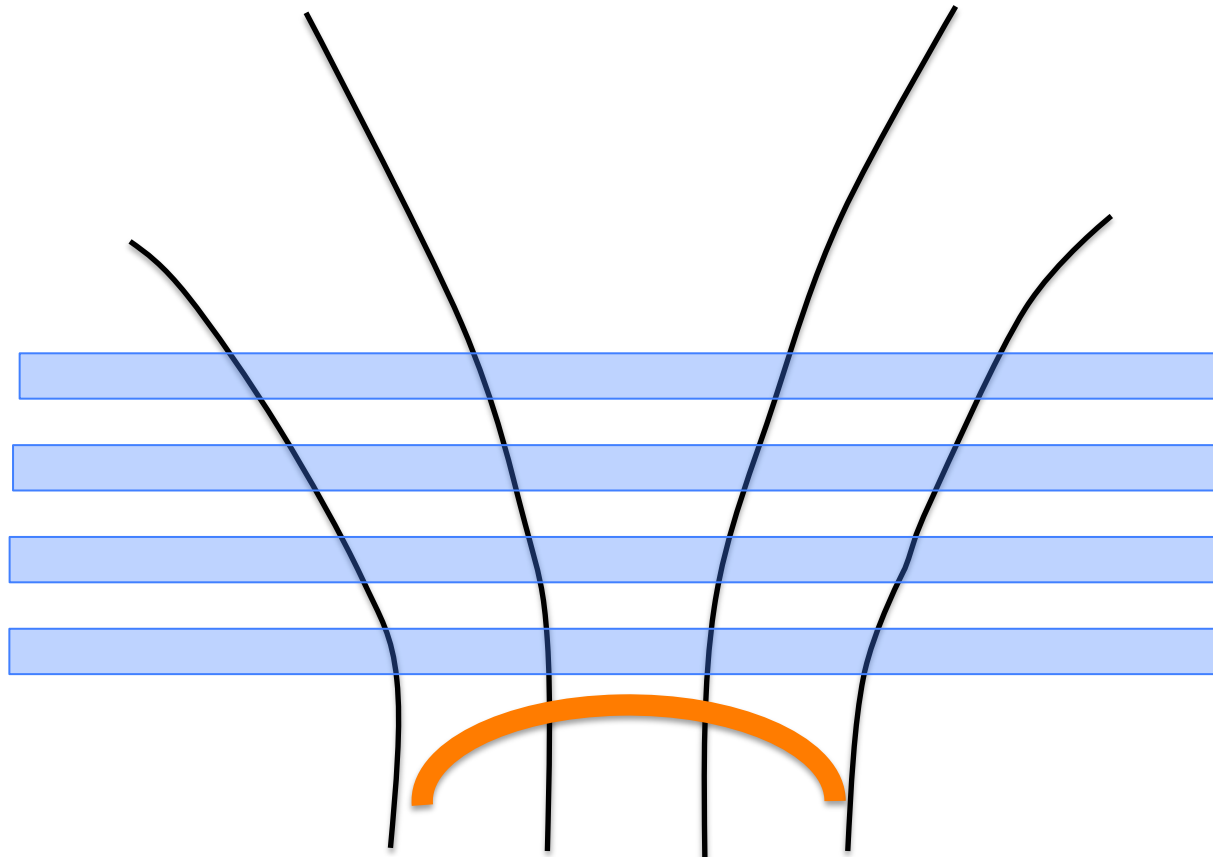
彩層上層部(He I 10830Å)におけるドップラー速度時間変化



Centeno et al. 2009

高さ方向の分解

4 周波数帯同時観測



「高さ方向の分解」でできる研究

多周波同時温度分布観測

位相速度と音速の比較

(+放射層の高さ)

各層のパワーマップや微細構造

=> 波数ベクトル

磁場構造との比較

=> 振動モード

=> 進行波と定在波の定量的評価

温度の振幅(+位相速度+密度)

エネルギー収支、フラックスの測定

振幅の増大=>密度比

「5分振動から3分振動への変化」と温度の比較 (+モード仮定)

=> Cut-off の直接観測

温度最低層の温度と彩層での振動数との比較

⇒ 温度最低層と3分振動の関係

(温度最低層が観測してる大気層に入れば)

まとめ

- 黒点振動
 - ローレンツカ～ガス圧勾配～浮力を復元力とする波
 - 黒点構造
 - 波動によるコロナ・彩層加熱
- ALMAによって可能となるサイエンスの展望
 - 超高解像度観測を活かして、
 - 黒点振動に対する磁気対流の影響を定量的に評価
 - 微細構造
 - 多周波同時温度分布観測を活かして、
 - エネルギーフラックス
 - 温度最低層～彩層下部における波の位相速度と音速との関係
 - 温度最低層の温度と3分振動の関係

ご清聴ありがとうございました

質問

- 黒点でのスペクトル線
- 複数の周波数帯を選んだときの高さ方向の差分

Running penumbral wave

- 半暗部を外に向かって伝播

- 暗部／半暗部境界

- 位相速度 : 15 – 20 km/s

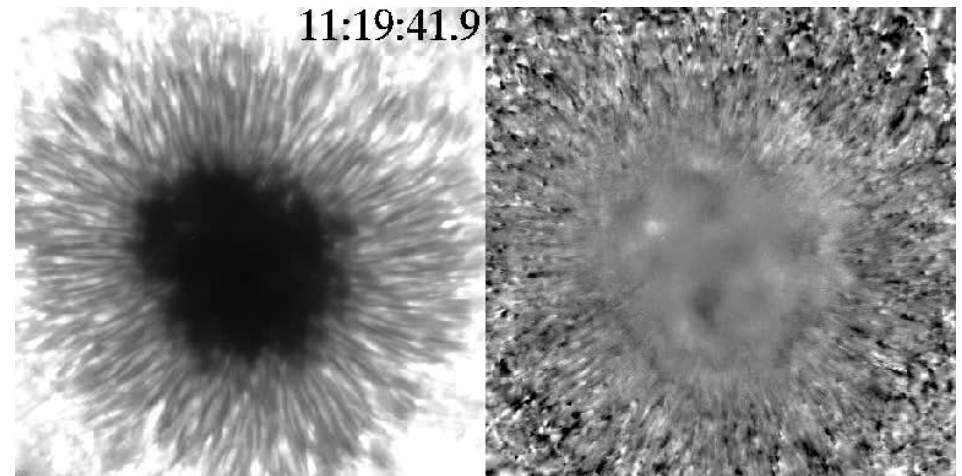
- 周期 : 3分

- 半暗部の外側の縁

- 位相速度 : 4 – 7 km/s

- 周期 : 8分

- 暗部の振動が伝播していると考えられている



ひので/SOT CA II H

理由は？

進行波と定在波の混合

$$C_{obs} e^{i(k_{obs}x - \omega_{obs}t)} \equiv A e^{i(kx - \omega t)} + B e^{i(-kx - \omega t)}$$
$$= \left\{ (A - B) e^{ikx} + B \right\} e^{-i\omega t}$$

$$\omega_{obs} = \omega \quad k_{obs} = -\frac{i}{x} \log \left(\frac{A - B}{C} e^{ikx} + \frac{B}{C} \right)$$

$$C_{obs} = (A - B) e^{ikx} + B$$