

理系大学生のための
「太陽研究最前線体験ツアー」

太陽研究最前線体験ツアー：2日目午前

電波による太陽観測

国立天文台・チリ観測所 下条圭美

自己紹介

下条圭美 (しもじょう ますみ)

E-mail: masumi.shimojo@NAOJ (NAOJはnao.ac.jpに変換)

略歴

栃木県宇都宮市生まれ

東海大学 [学部・修士] ⇒ 総研大 [博士 1999年3月修了]

- 学部4年から国立天文台で研究を開始 [師匠は京大の柴田教授]

1999-2000 : JAXA/ISAS COE研究員

2000-2015 : 国立天文台・野辺山太陽電波観測所 助教

2015- 現在 : 国立天文台・チリ観測所 助教

- 総研大提携教官
 - これまでの指導した学生 (のべ人数)
 - 卒研究生 3名、修士課程 2名、博士課程 1名

専門および現在進行中のプロジェクト

観測による太陽活動現象

- ALMAによる太陽観測の推進
- フレア・ジェット・プロミネンス現象による太陽磁気活動の解明
- 太陽データ解析環境/データベースシステムの構築

所属学会

日本天文学会・日本地球惑星連合・IAU・AAS・AGU



この話の主題

電波画像は何を見ているのか？

- 何が電波[マイクロ波]を出しているのか？
- 何の情報が電波から得られるのか？
- 電波の像を作るには・・・
- “これまで”・”これから”の太陽電波観測

マイクロ波：この話で扱うのは1 GHz - 1 THz (3cm—0.3mm)

太陽大気は何から出来てる？

太陽は水素、ヘリウム、・・・のガス玉

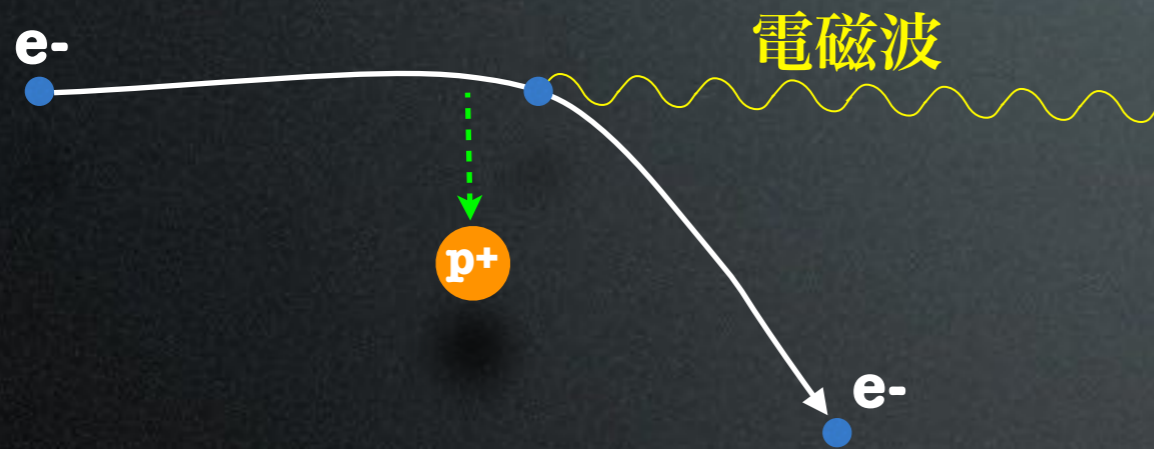
太陽大気は温度 4000 K--1 MK

太陽大気の至る所で、電離(イオン化)が起こっている。⇒太陽大気は電気を通す気体。

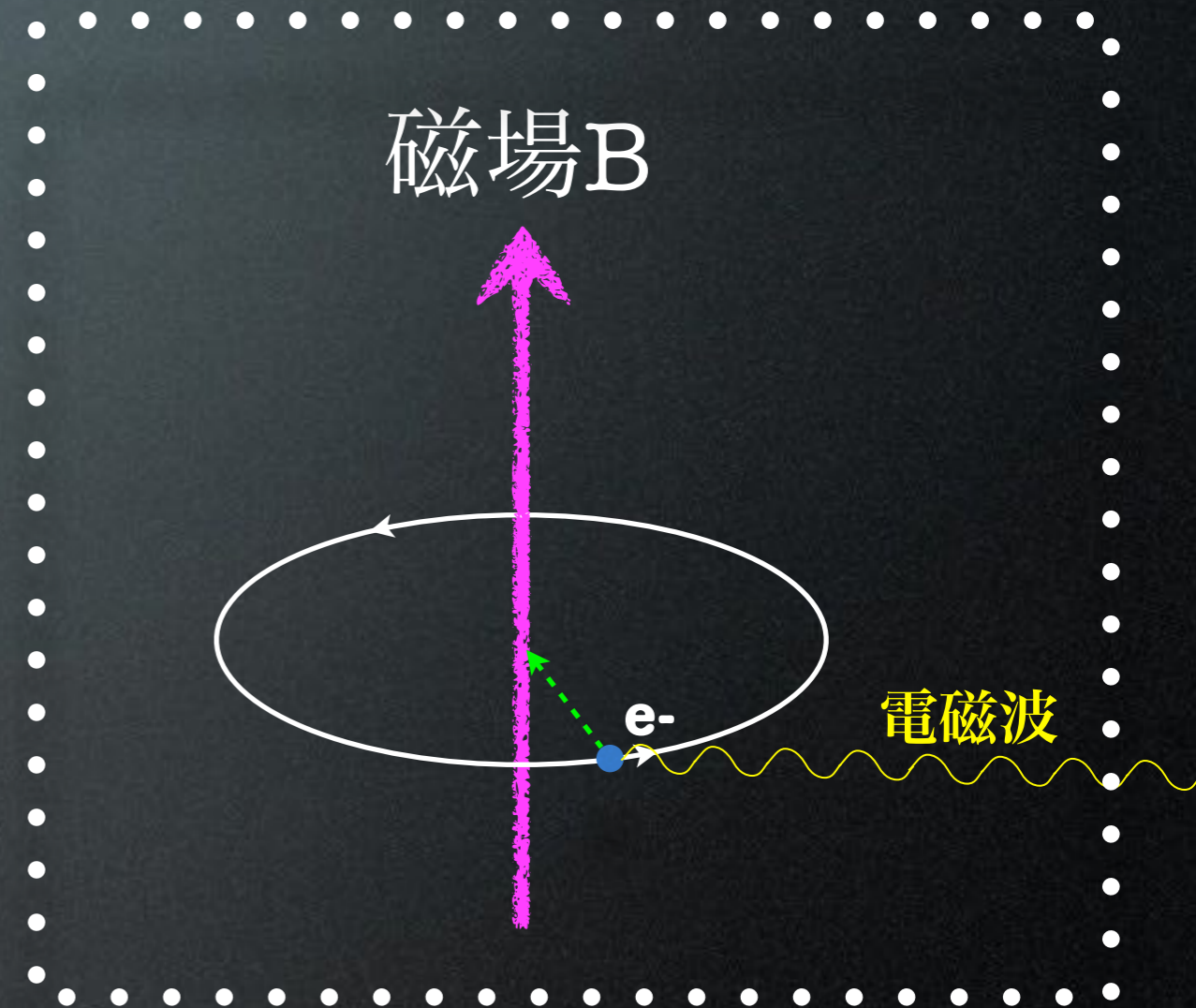
電気を通す気体 ⇒ “**プラズマ**”

負の電荷を持つ電子と正の電荷を持つ陽子・イオンが”**自由**”に飛び回っている。

本当は自由に動けない荷電粒子



クーロン力による偏向
(クーロン衝突)



ローレンツ力による偏向
(ジャイロ運動)

荷電粒子が加速度運動すると、電磁波が放射される。

ジャイロ運動によって

マイクロ波を出す電子とは？

ジャイロ運動によって一つの電子から放射される電磁波の周波数

= ジャイロ運動の周期 $\Omega_e \times n$ (整数)

$$\Omega_e \equiv eB/mc \sim 0.2 (B/10 \text{ Gauss}) \text{ GHz}$$

e:電荷
B:磁場
m:電子の質量
c:光速

nは、電子のエネルギー（速度）によって決まる。

数千～数百万度の熱速度 $\Rightarrow n = 1, 2 \dots < 5$

- 17GHzを出そうとすると、
 $B=850[425] \text{ Gauss}$ ($n=1[2]$) が必要 \Rightarrow 黒点付近

高エネルギーの電子 [MeV] $\Rightarrow n > 5$

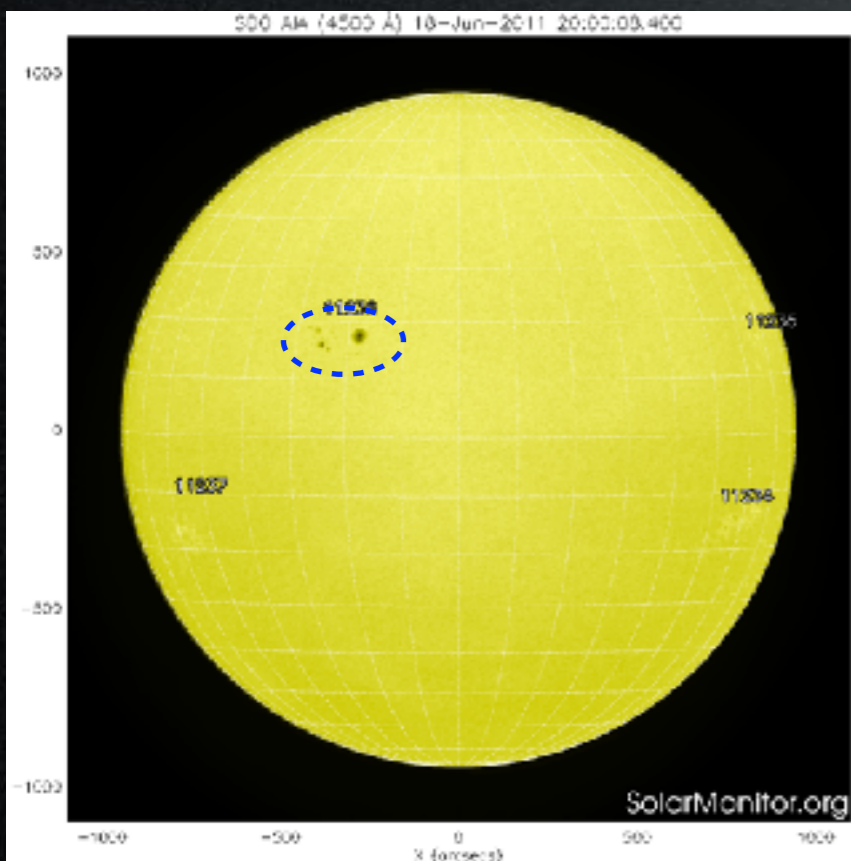
- 高エネルギー電子がある場所・時間 \Rightarrow フレア

黒点周辺で見える

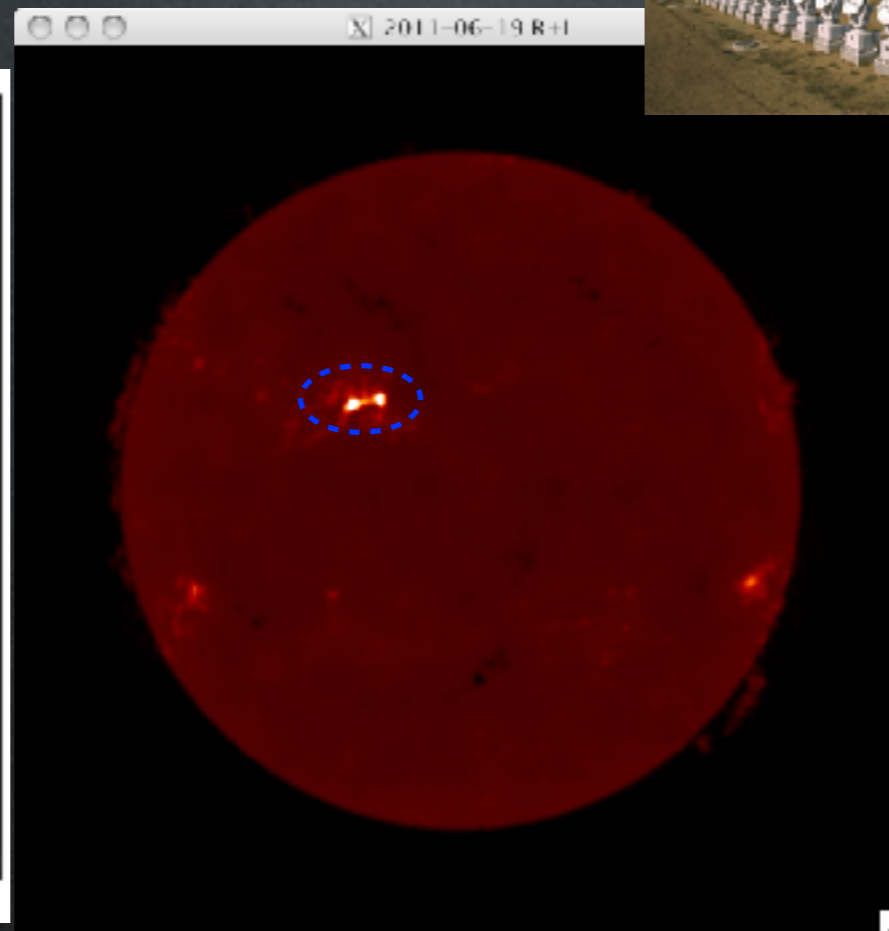
ジャイロレゾナンス放射

ジャイロレゾナンス放射：
磁場が十分強く、熱運動している電子からマイクロ波が放射される機構

可視光



17GHz 強度



17GHz 円偏波率



ジャイロレゾナンスによる放射は磁場強度により円偏波率が増大。磁場の情報が得られる。

ジャイロ運動によって

マイクロ波を出す電子とは？

ジャイロ運動によって一つの電子から放射される電磁波の周波数

= ジャイロ運動の周期 $\Omega_e \times n$ (整数)

$$\Omega_e \equiv eB/mc \sim 0.2 (B/10 \text{ Gauss}) \text{ GHz}$$

e:電荷
B:磁場
m:電子の質量
c:光速

nは、電子のエネルギー（速度）によって決まる。

数千～数百万度の熱速度 $\Rightarrow n = 1, 2 \dots < 5$

- 17GHzを出そうとすると、
 $B=850[425] \text{ Gauss}$ ($n=1[2]$) が必要 \Rightarrow 黒点付近

高エネルギーの電子 [MeV] $\Rightarrow n > 5$

- 高エネルギー電子がある場所・時間 \Rightarrow フレア

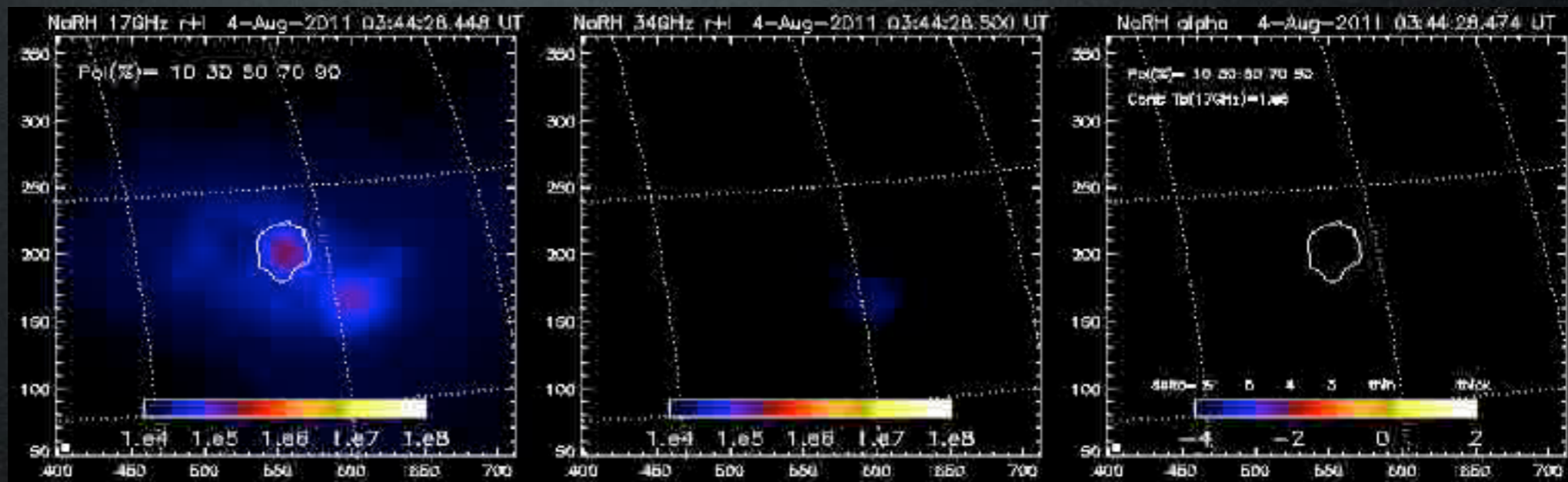
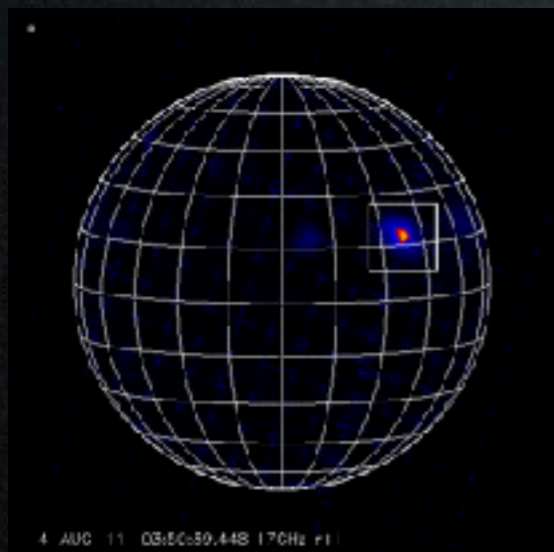
フレア時に見られる

ジャイロシンクロトロン放射

ジャイロシンクロトロン：
電子の速度が十分早く（高速の数10%） n が大きい放射

注：電子の速度がほぼ光速の場合は”シンクロトロン放射”という。円偏波は出ず、直線偏波しか出ない。

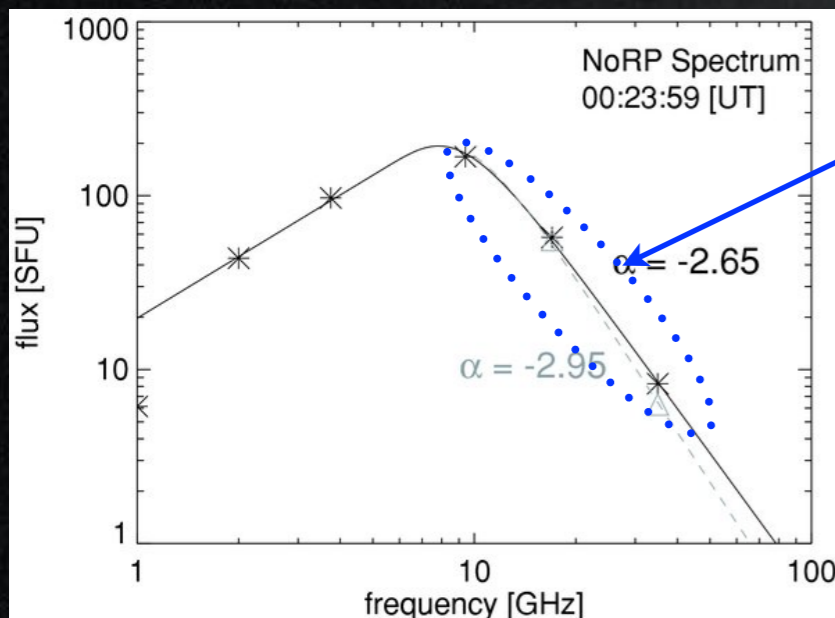
2011/8/4 Flare



17 GHz

34 GHz

スペクトル [34/14]

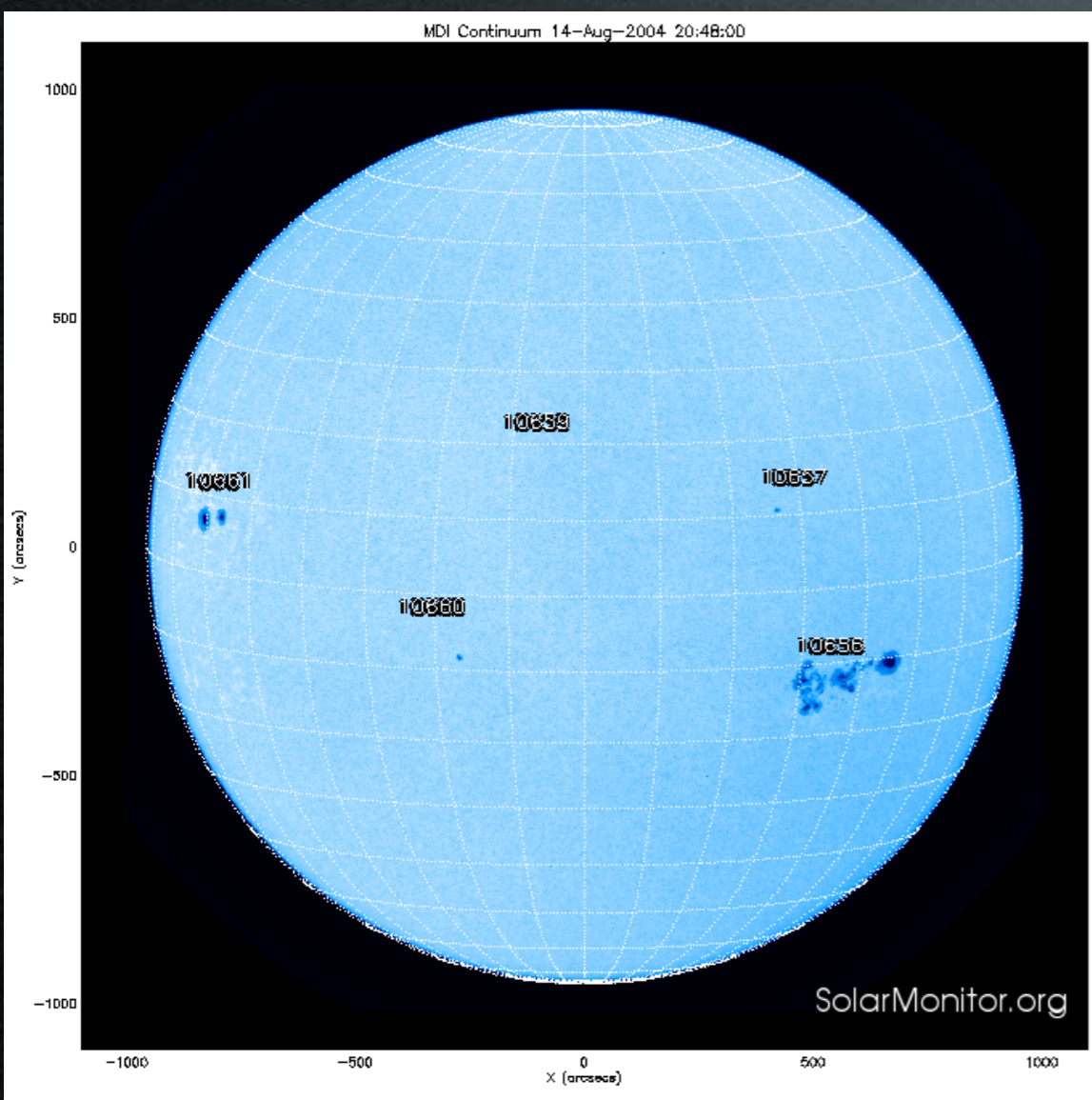


このスペクトルが電子のエネルギーの分布を示している。

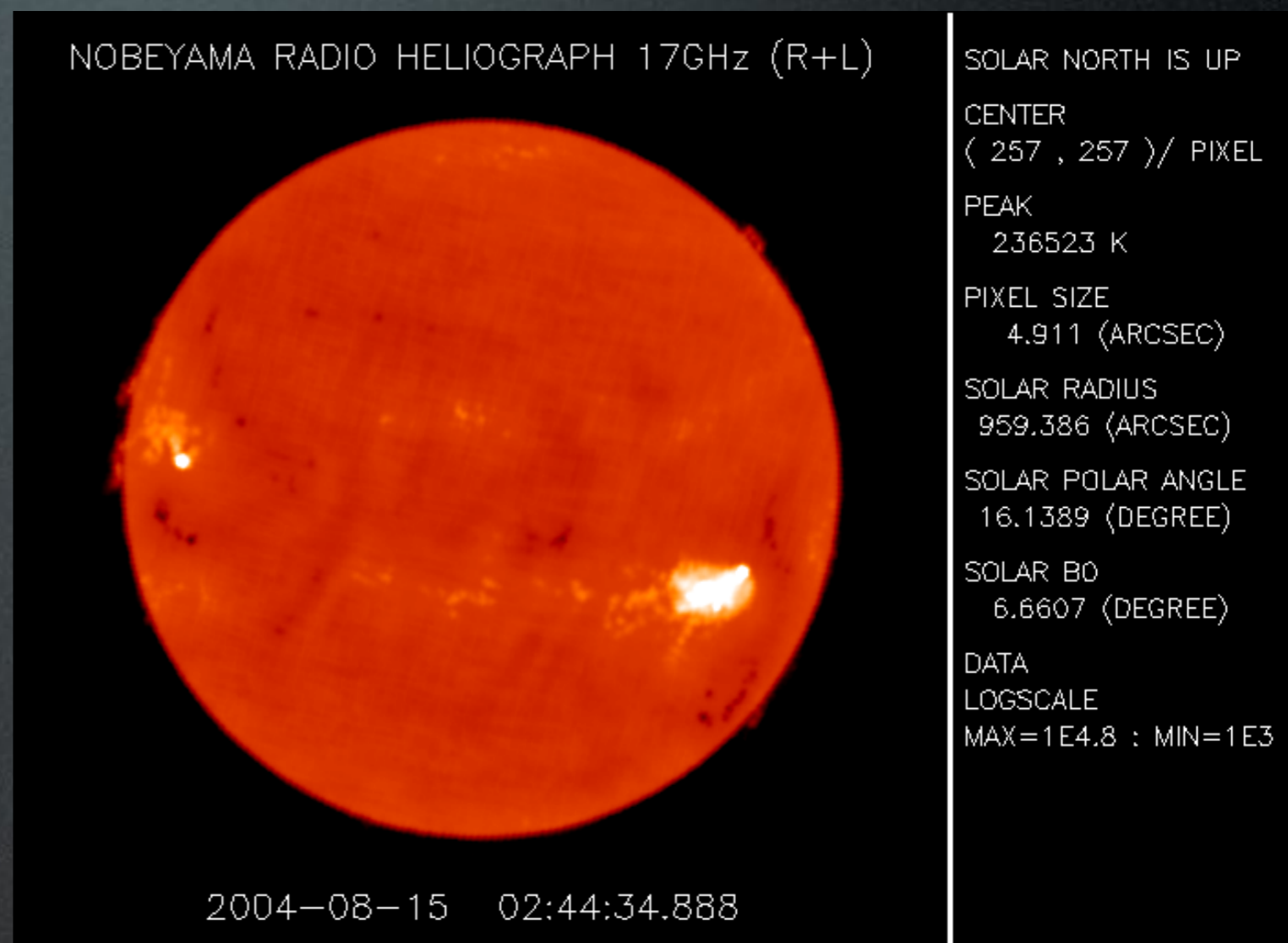
シンクロトロン放射の画像とスペクトルを得る事で、
どこに、どの程度のエネルギーの電子が居るかがわかる。



野辺山電波ヘリオグラフで見た太陽

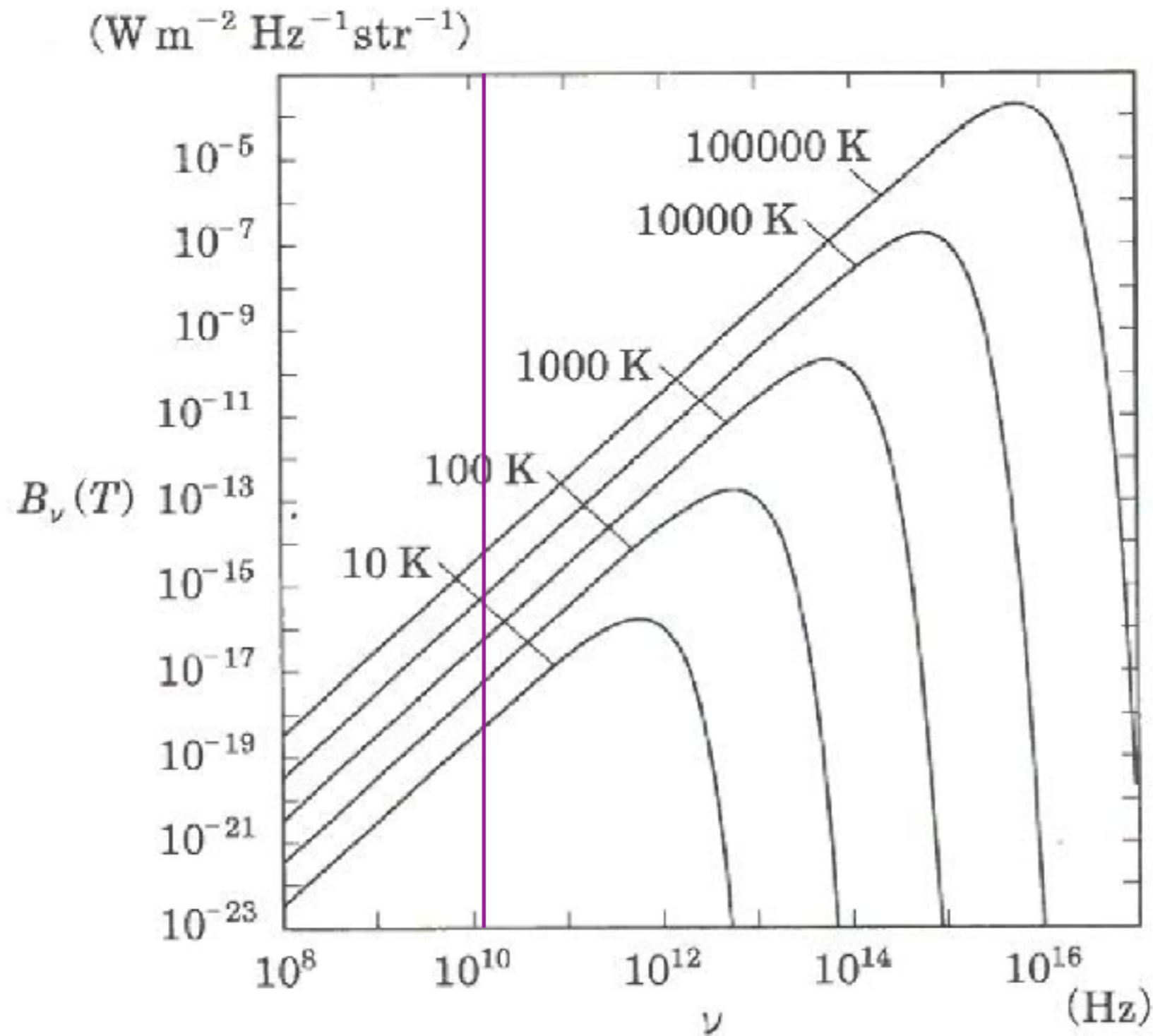


可視光
(MDI/SOHO)



電波[17 GHz]
(野辺山電波ヘリオグラフ)

大いなる熱放射



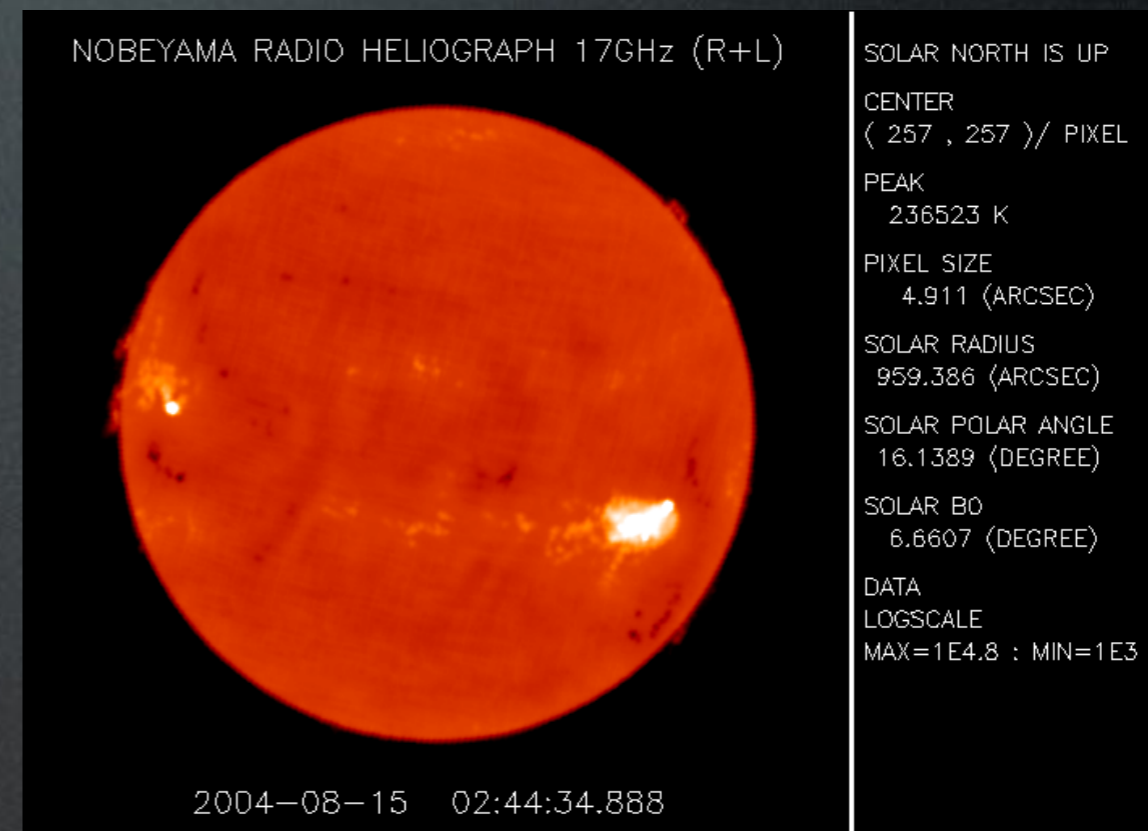
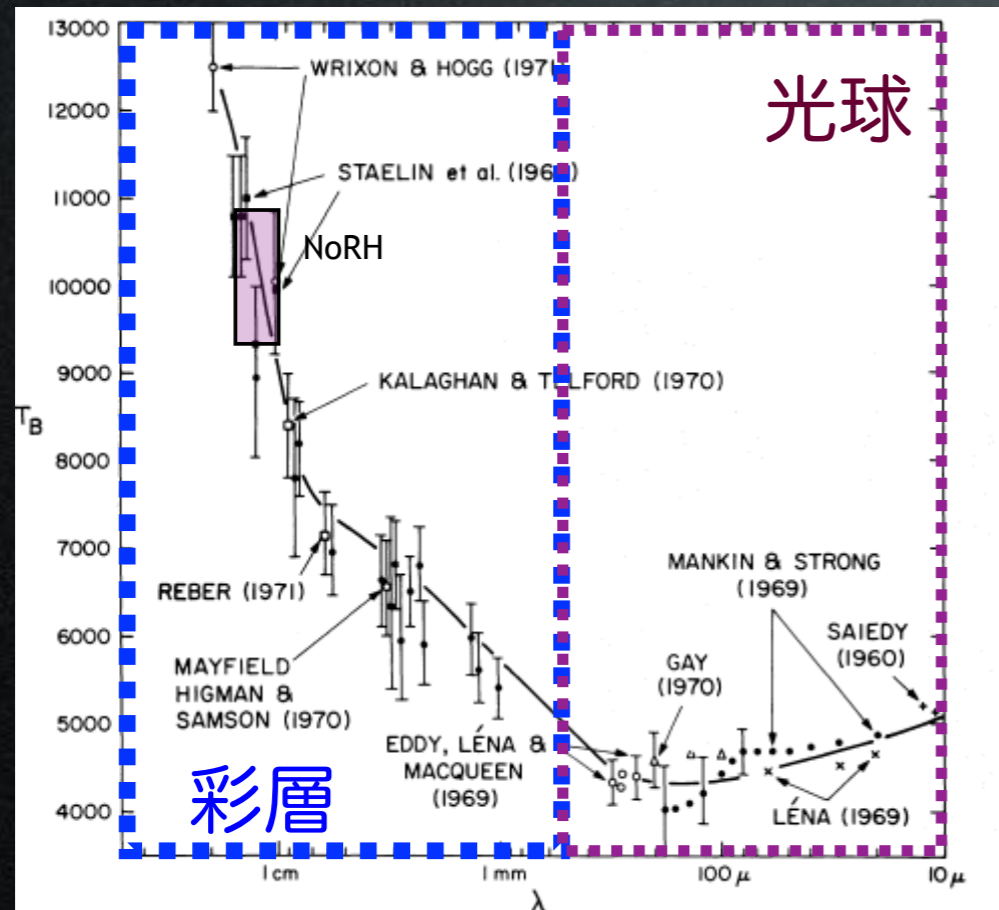
17GHzで見えている円盤のほとんどはこれ。

光学的に厚い場合、温度で放射強度が決まる。

17GHzのディスクはどこを見ているのか？

輝度温度：電波の強度の指標。

- * その放射が、光学的に厚いプラズマから来ていれば、**輝度温度=プラズマの温度**
- * ディスクからのマイクロ波放射は、ほぼ光学的に厚いプラズマからの放射。



17GHzでのディスクでの平均輝度温度=約1万度
⇒17GHzのディスクは、彩層を見ている。

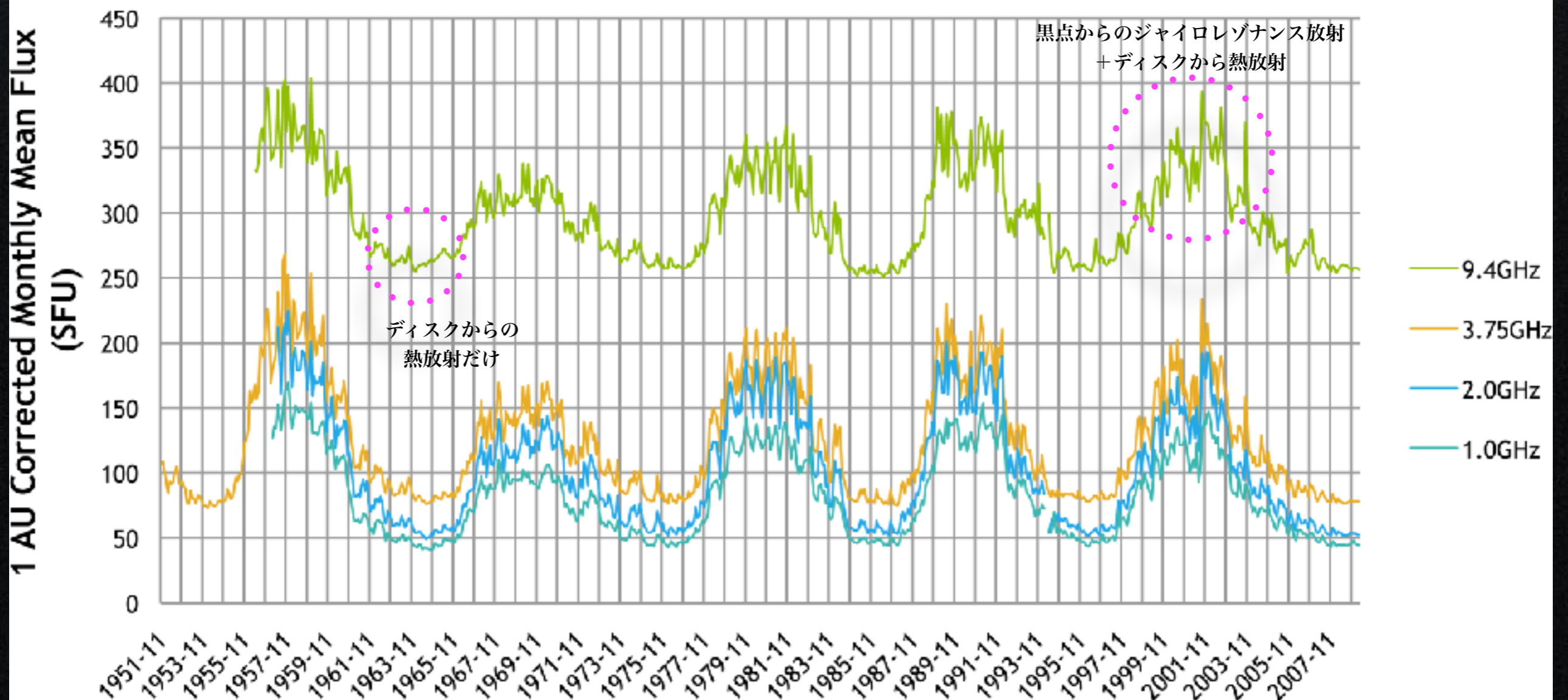
マイクロ波長期変動の解釈

電波の変動と黒点数の変動は同期している。

NoRPの長期変動にフレアは入っていない。



TYKW(1951 Nov. - 1994 Apr.) & NBYM(1994 May - 2009 Mar.)



この話の主題

電波画像は何を見ているのか？

- 何の情報が電波から得られるのか？
 - マイクロ波を出している**温度**
[熱放射@静音領域]
 - マイクロ波を出している**高エネルギー電子のエネルギー**
[ジャイロシンクロトロン@フレア]
 - **強磁場 (>500G@彩層)の存在**
[ジャイロレゾナンス@黒点]

[電波観測の弱点]周波数によっては、全部混ざってる。

この話の主題

電波画像は何を見ているのか？

- 何が電波[マイクロ波]を出しているのか？
- 何の情報が電波から得られるのか？
- 電波の像を作るには・・・
- “これまで”・”これから”の太陽電波観測

空間分解能は何で決まる？

望遠鏡の空間分解能は、以下の式で示される理論的制限がある（回折限界）。

$$\sin\theta \cong 1.22 \times \lambda / D$$

θ ：角分解能， λ ：観測波長， D ：主鏡の口径

もし1秒角($1/3600^\circ$)の分解能を持つ望遠鏡を作るとすると、

1. 波長 5700 \AA (黄色) \Rightarrow 口径 **14 cm** の主鏡

2. 波長 1.7 cm (17GHz) \Rightarrow 口径 **4.2 km** の主鏡

鏡は、波長より十分小さい精度で磨かなければならない。
 \Rightarrow XRTが口径34cmで1秒角分解能の理由。

魔法の級数：フーリエ級数

全ての関数は、周期の異なるsinとcos関数の足し合わせ（フーリエ級数）で表現できる。

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 x) + b_n \sin(n\omega_0 x))$$

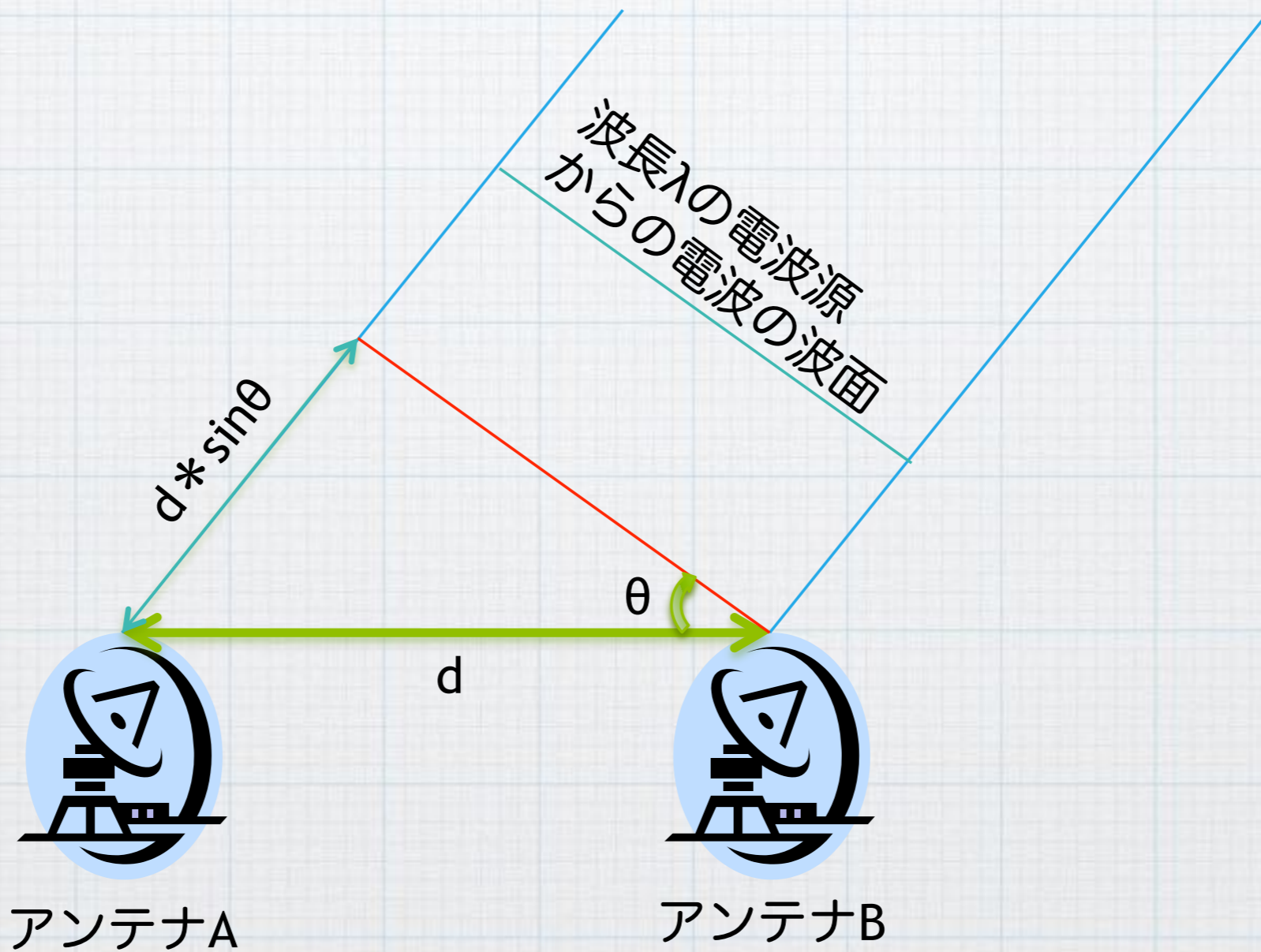
上式のa,bが全てわかっているならば、元の関数を復元できる。

全てのa,bがわからなくとも、**主成分の周期のa,b**がわかれば、**大体のところは復元できる**。

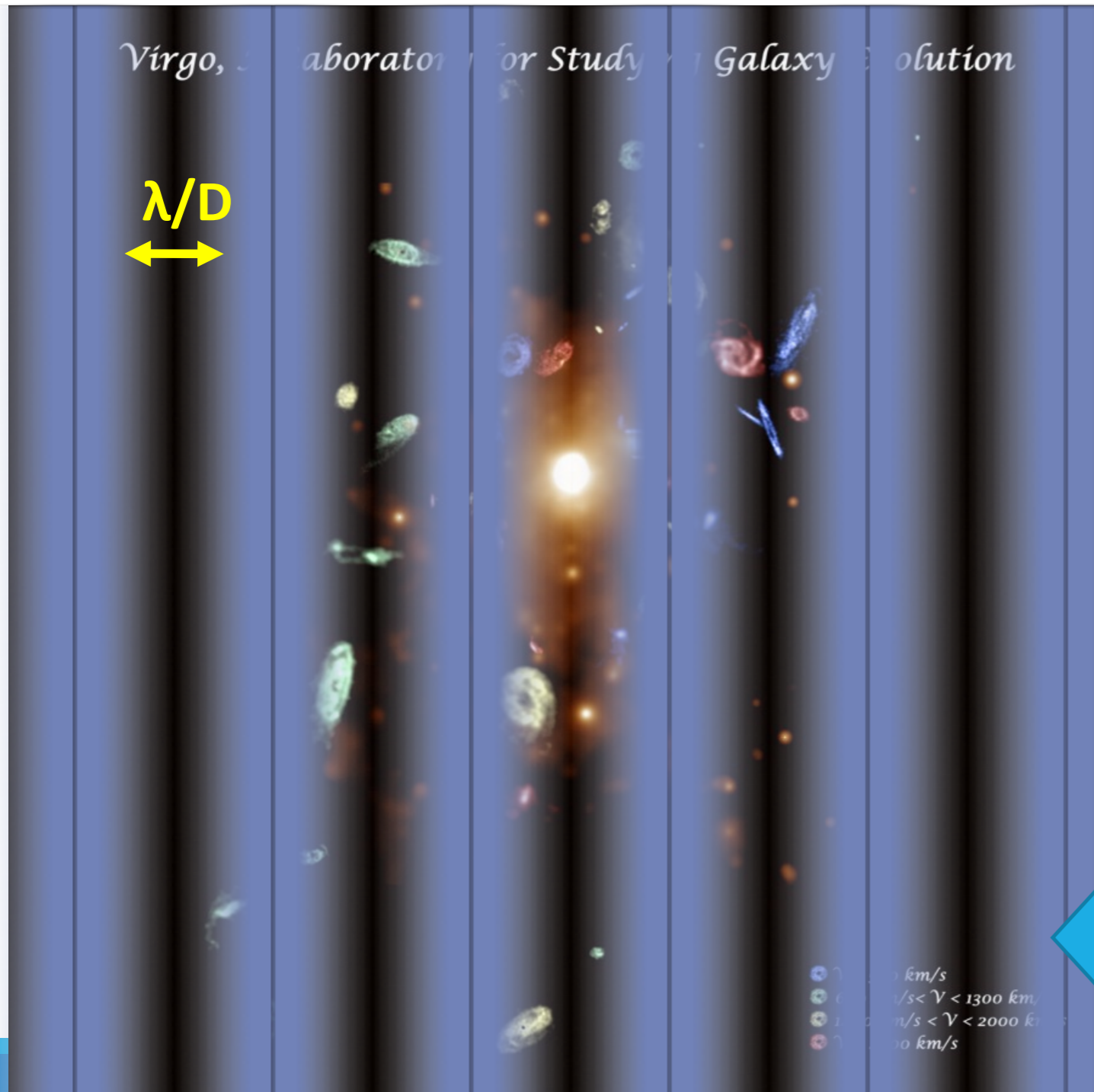
実は身近なフーリエ級数

地デジ・DVD/BD・動画サイト・デジカメ・オーディオプレイヤー(iPod)・[携帯]電話・etc.

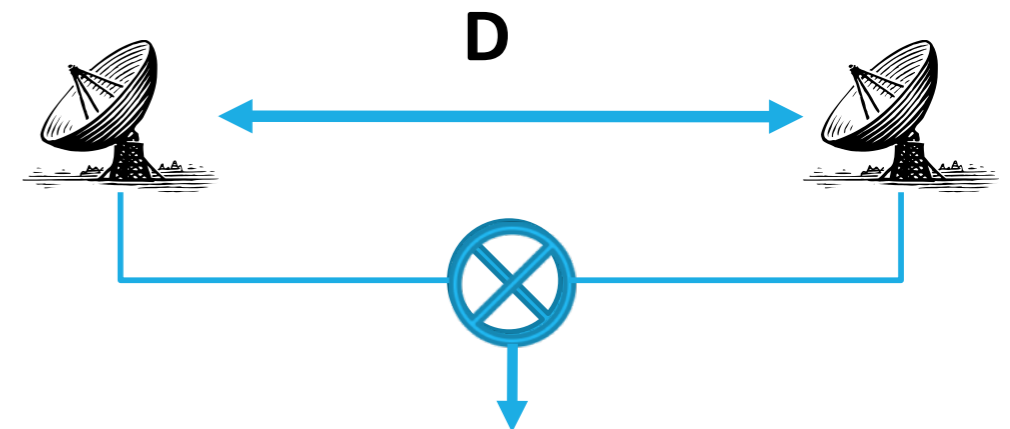
電波干渉計は天空の フーリエ級数の係数測定機？



一つの基線で空を見ると？



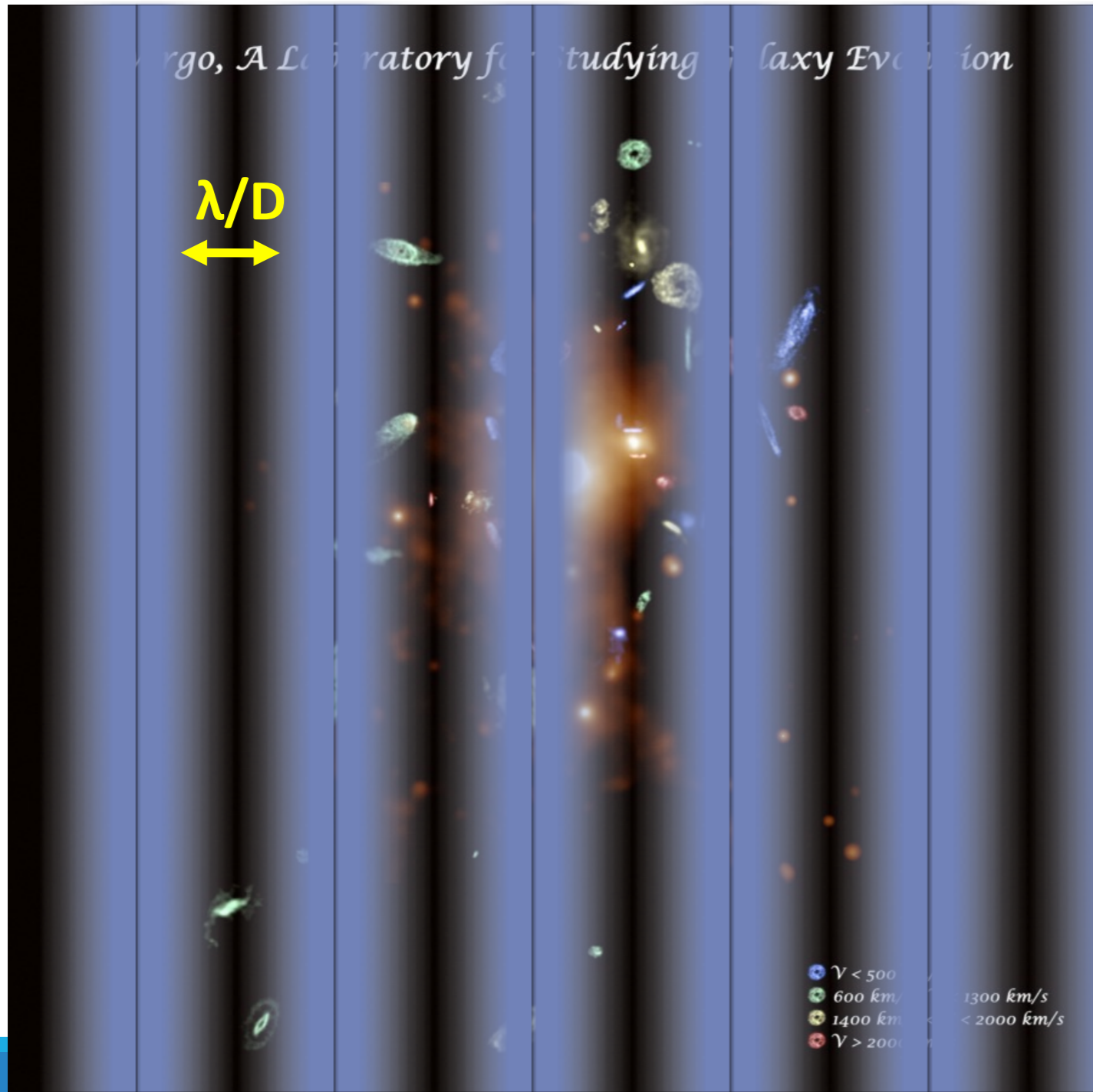
※厳密にはDは天体から見た射影長



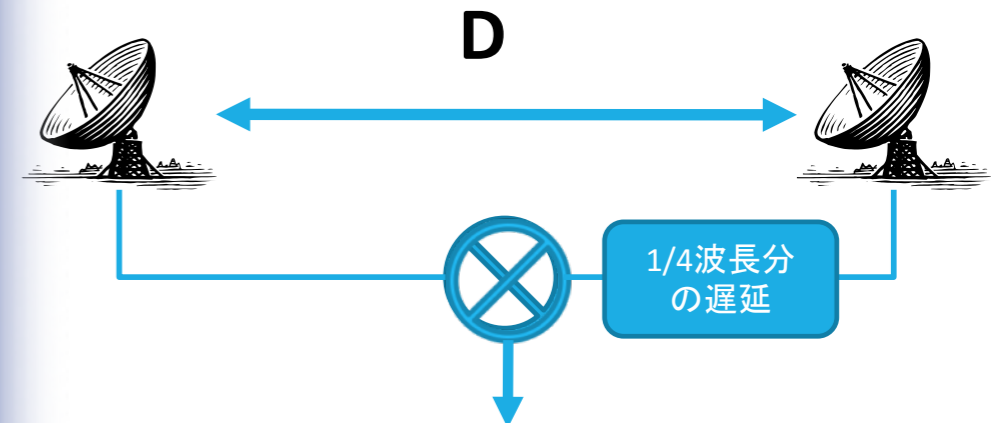
左のような縞々のフィルター
(cos関数フィルター)
を通した強度のようなもの
 a_n

← 感度がない領域

一つの基線で空を見ると？



※厳密にはDは天体から見た射影長



左のような縞々のフィルター
(sin関数フィルター)
を通した強度のようなもの
 b_n

魔法の級数：フーリエ級数

全ての関数は、周期の異なるsinとcos関数の足し合わせ（フーリエ級数）で表現できる。

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 x) + b_n \sin(n\omega_0 x))$$

上式のa,bが全てわかっているならば、元の関数を復元できる。

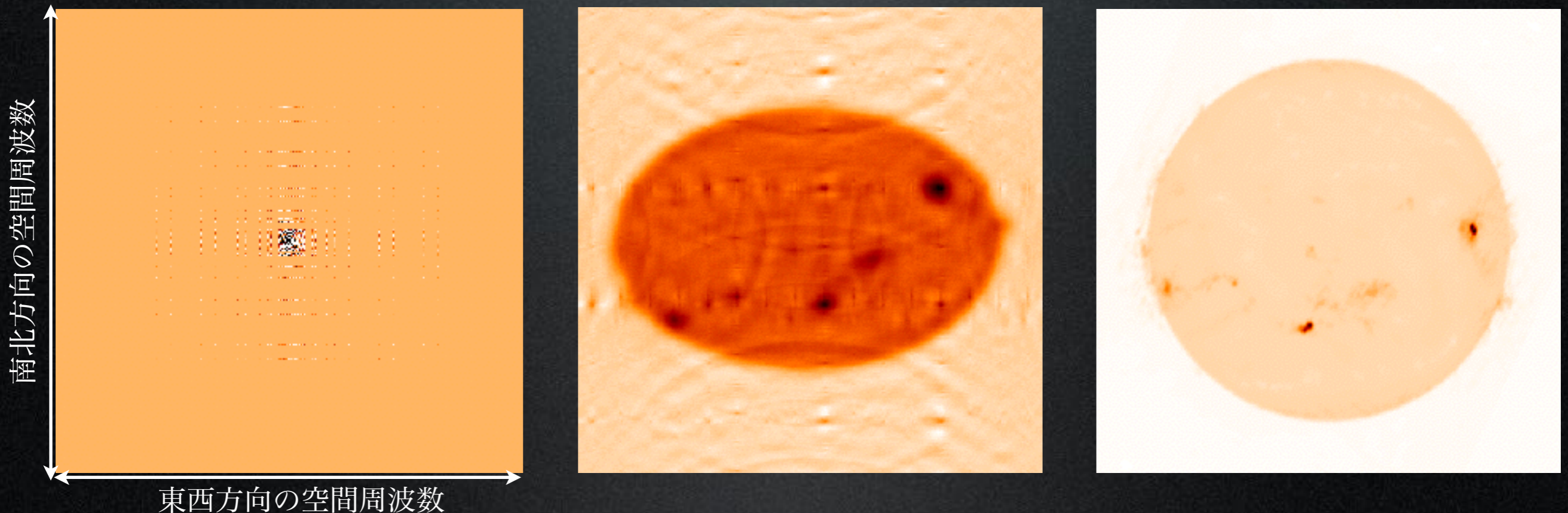
全てのa,bがわからなくとも、**主成分の周期のa,b**がわかれば、**大体のところは復元できる**。

実は身近なフーリエ級数

地デジ・DVD/BD・動画サイト・デジカメ・オーディオプレイヤー(iPod)・[携帯]電話・etc.

電波画像が出来るまで。

1. 電波干渉計で観測
2. 大気の揺らぎや機器内部起源の変動を校正。
3. 観測で得たフーリエ級数を元に、画像を計算。
4. 足りない係数分を、モデルで再構築。



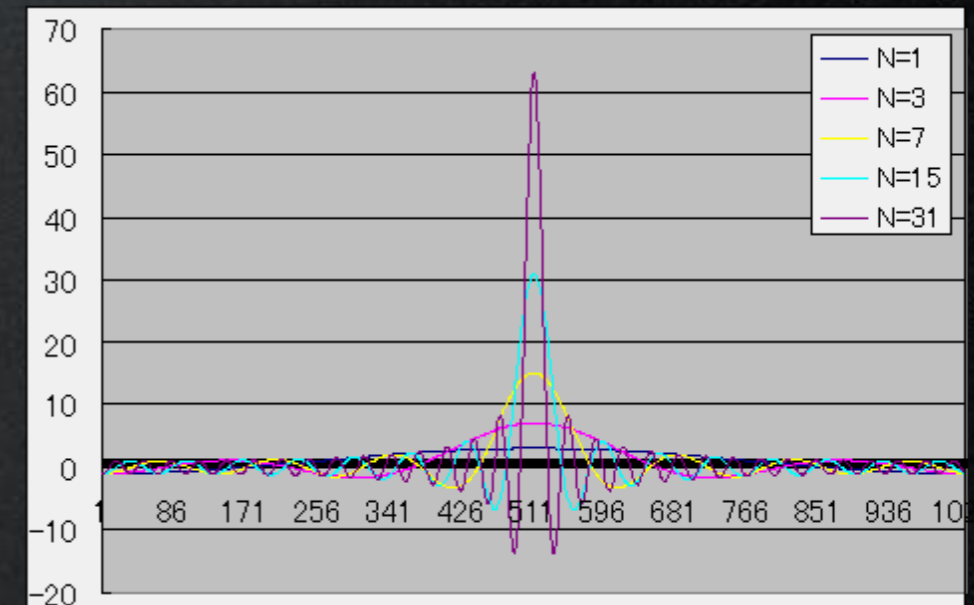
電波干渉計の利点/欠点

利点

- * フーリエ級数の係数を求めるだけなので、
 - 巨大な(kmスケール)アンテナは不要。
 - 受信機を、CCDのようにアレイ化する必要はない。

欠点

- * アンテナの台数がある程度必要。
 - 時間分解能を求めなければ、数台でもOK。
 - 空間分解能を高めるには、広い土地（長い基線長）が必要。
- * 全ての係数がわかる訳ではないので、画像の不確定性が大きい。
 - ダイナミックレンジが小さい。



この話の主題

電波画像は何を見ているのか？

- 何が電波[マイクロ波]を出しているのか？
- 何の情報が電波から得られるのか？
- 電波の像を作るには・・・
- “これまで”・”これから”の太陽電波観測

これまでの太陽電波における サイエンスターゲット

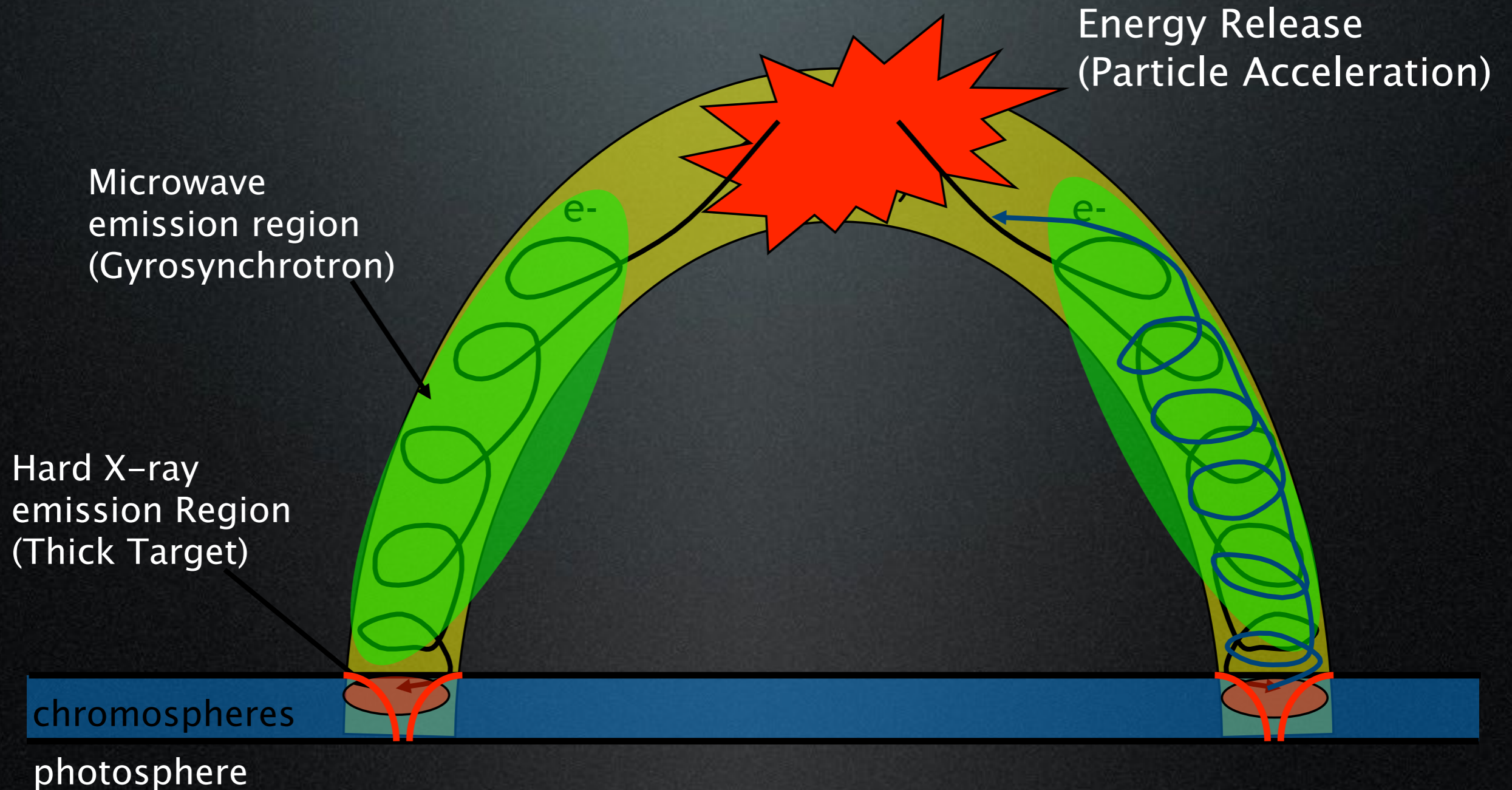
フレアにおける**粒子加速機構の解明**

- ジャイロシンクロトロン放射で高エネルギー電子の情報を得る事が可能。
- 硬X線と相補的關係

プロミネンス放出やCMEの研究 [宇宙天気]

- 熱的放射によるプロミネンス観測(NoRH)
- CMEはMHz帯の電波バーストを発生させる。

フレア内の電子の動き

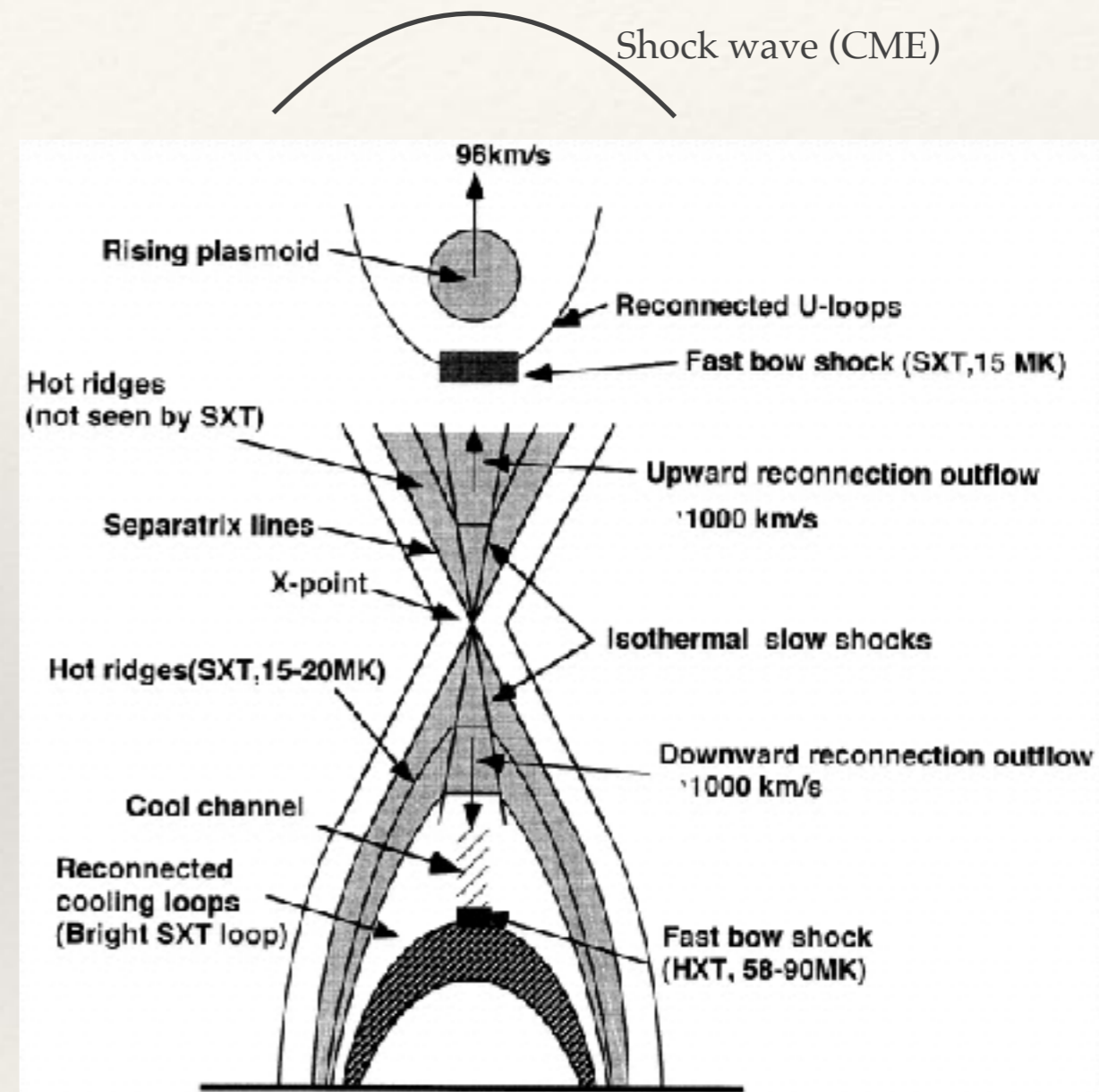


太陽フレアにおける粒子加速メカニズム候補

Table 11.1: Overview of particle acceleration mechanisms in solar flares.

Acceleration Mechanisms	Electromagnetic fields
DC electric field acceleration: – Sub-Dreicer fields, runaway acceleration ¹ – Super-Dreicer fields ² – Current sheet (X-point) collapse ³ – Magnetic island (O-point) coalescence ⁴ – (Filamentary current sheet: X- and O-points) – Double layers ⁵ – Betatron acceleration (magnetic pumping) ⁶	$E < E_D$ $E > E_D$ $E = -u_{inflow} \times B$ $E_{conv} = -u_{coal} \times B$ $E = -\nabla V$ $\nabla \times E = -(1/c)(dB/dt)$
Stochastic (or second-order Fermi) acceleration: Gyroresonant wave-particle interactions (weak turbulence) with: – whistler (R-) and L-waves ⁷ – O- and X-waves ⁸ – Alfvén waves (transit time damping) ⁹ – Magneto-acoustic waves ¹⁰ – Langmuir waves ¹¹ – Lower hybrid waves ¹²	$k \parallel B$ $k \perp B$ $k \parallel B$ $k \perp B$ $k \parallel B$ $k \perp B$
Shock acceleration: Shock-drift (or first-order Fermi) acceleration ¹³ – Fast shocks in reconnection outflow ¹⁴ – Mirror-trap in reconnection outflow ¹⁵ Diffusive-shock acceleration ¹⁶	

Aschwanden 2004



Tsuneta 1996

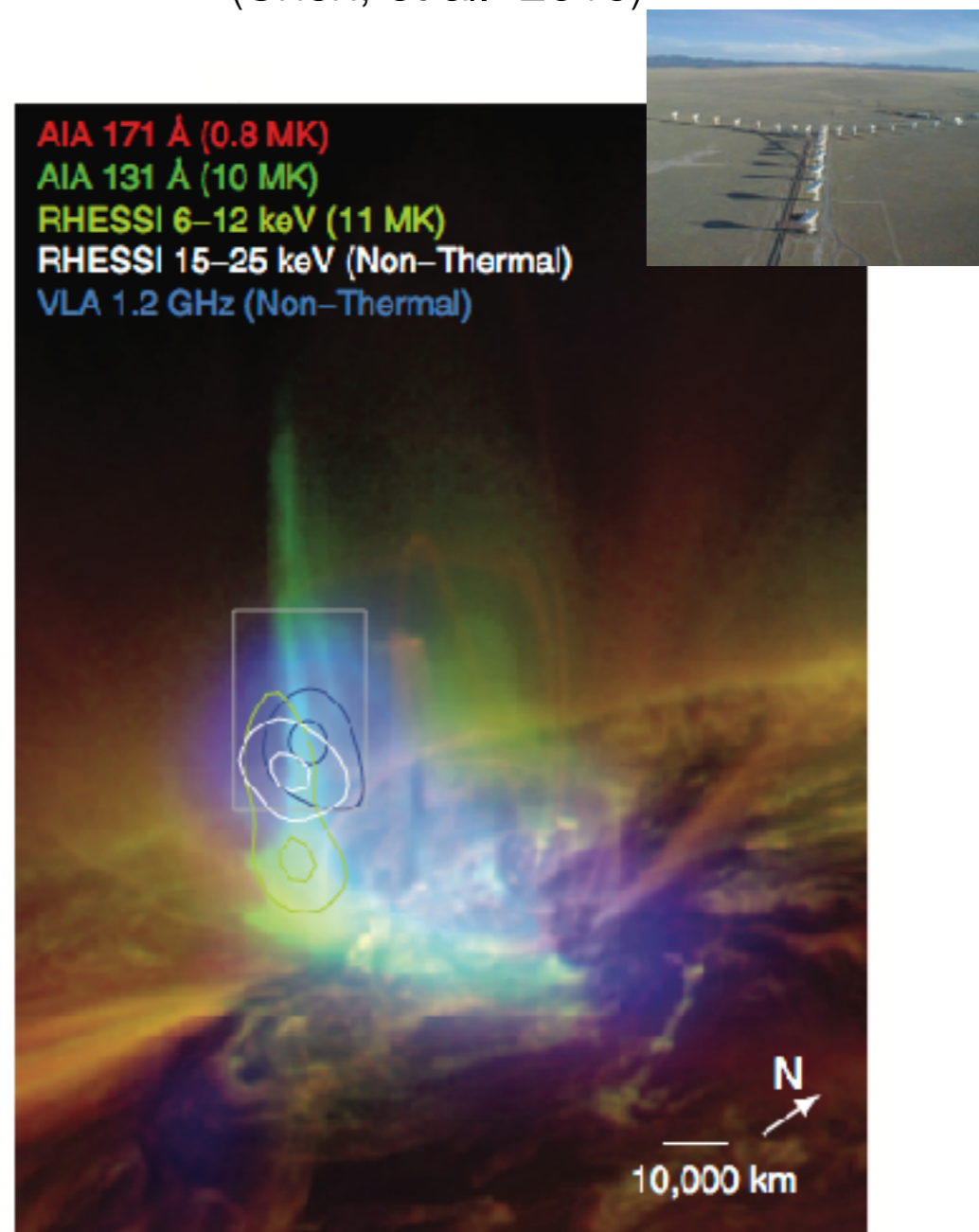
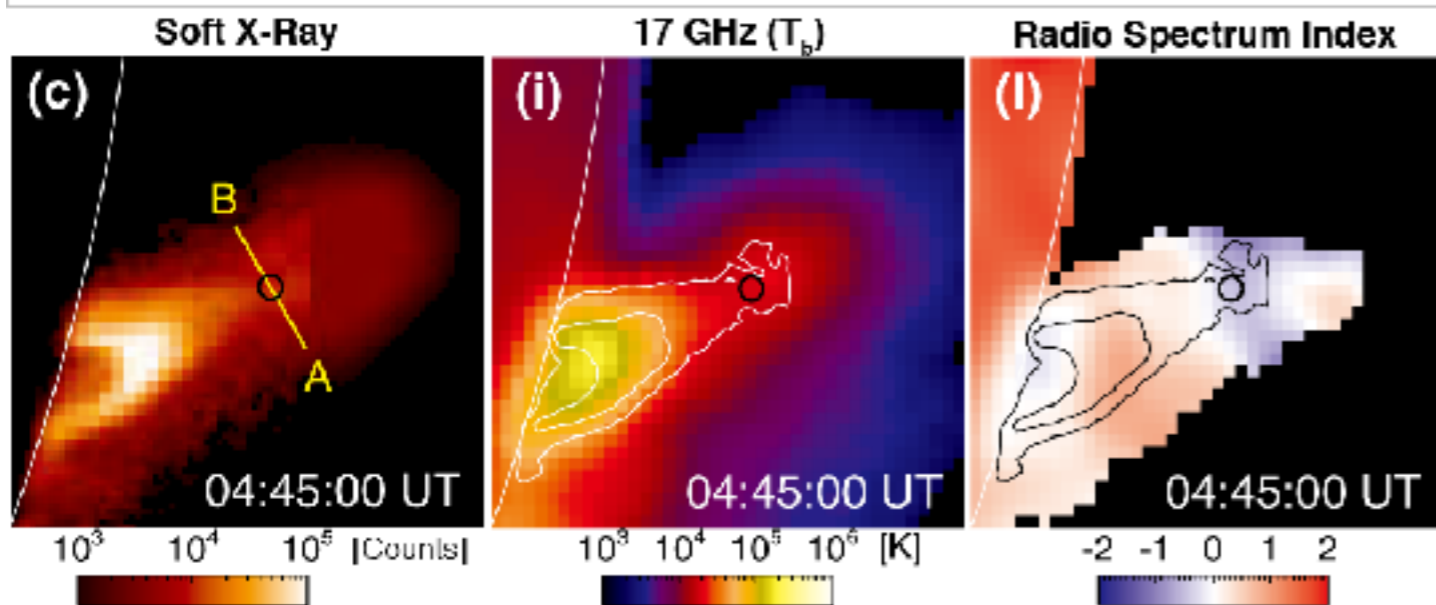
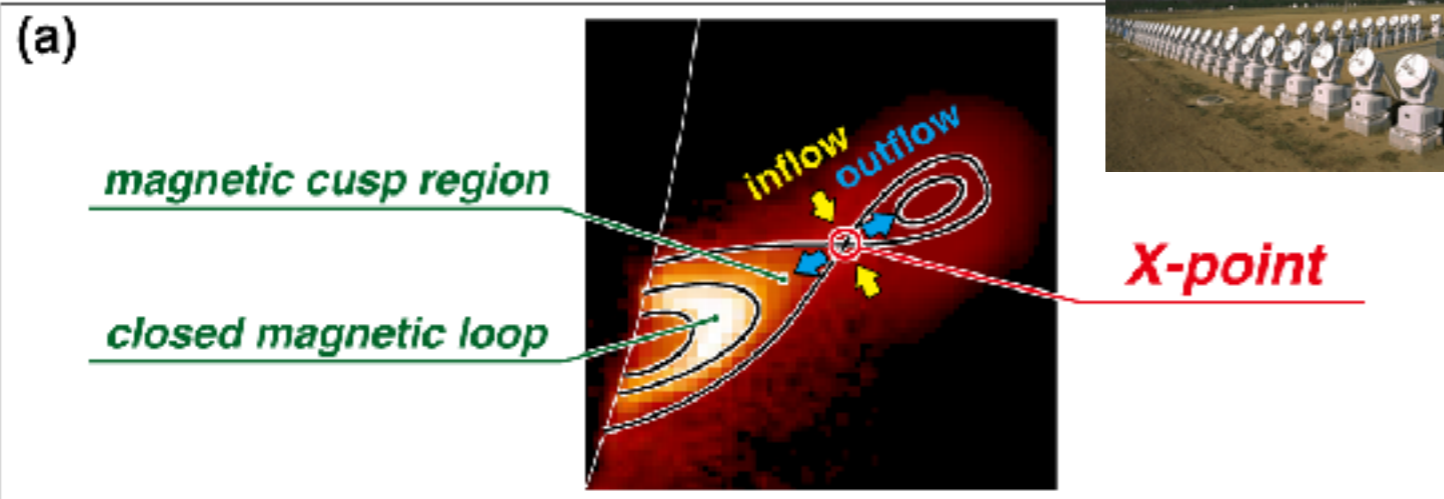
どこで粒子は加速されているのか？

これまでの電波による観測結果... (野辺山 vs. JVLA)

Nobeyama Radioheliograph (17/34GHz)
(Narukage, Shimojo, & Sakao 2014)

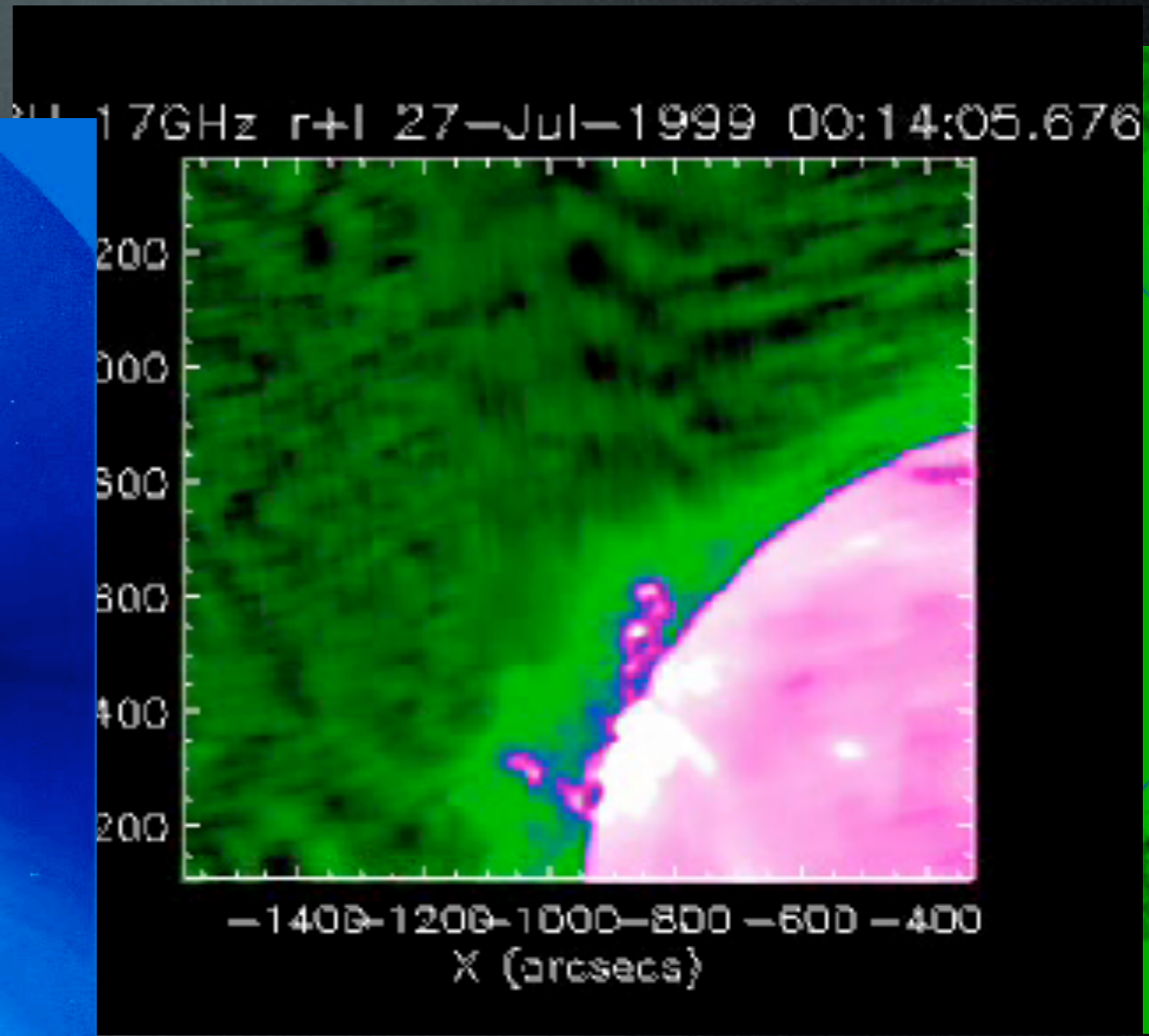
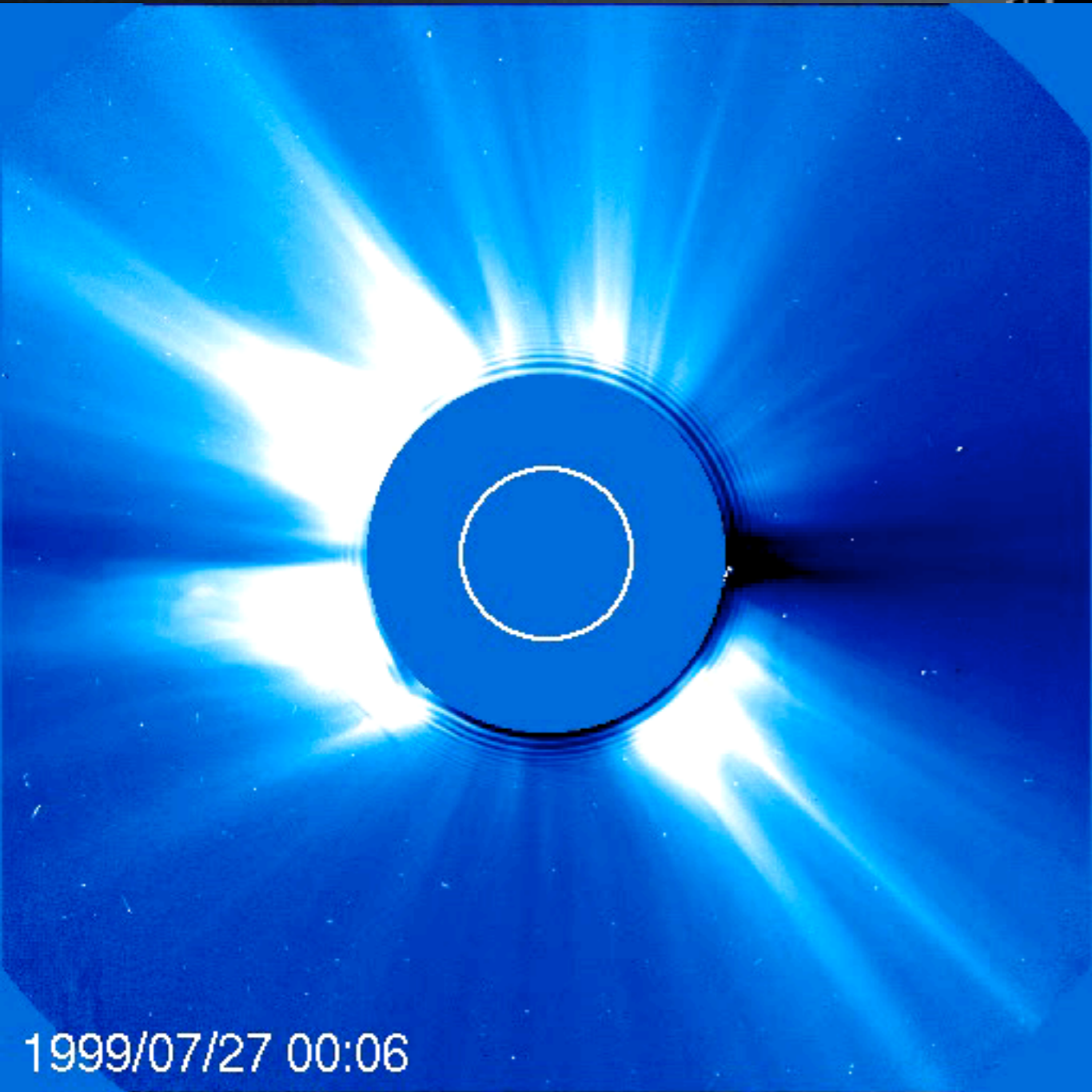
Karl G. Jansky VLA (1~1.8 GHz)
(Chen, et al. 2015)

reconnection picture



電波でみるプロミネンス放出

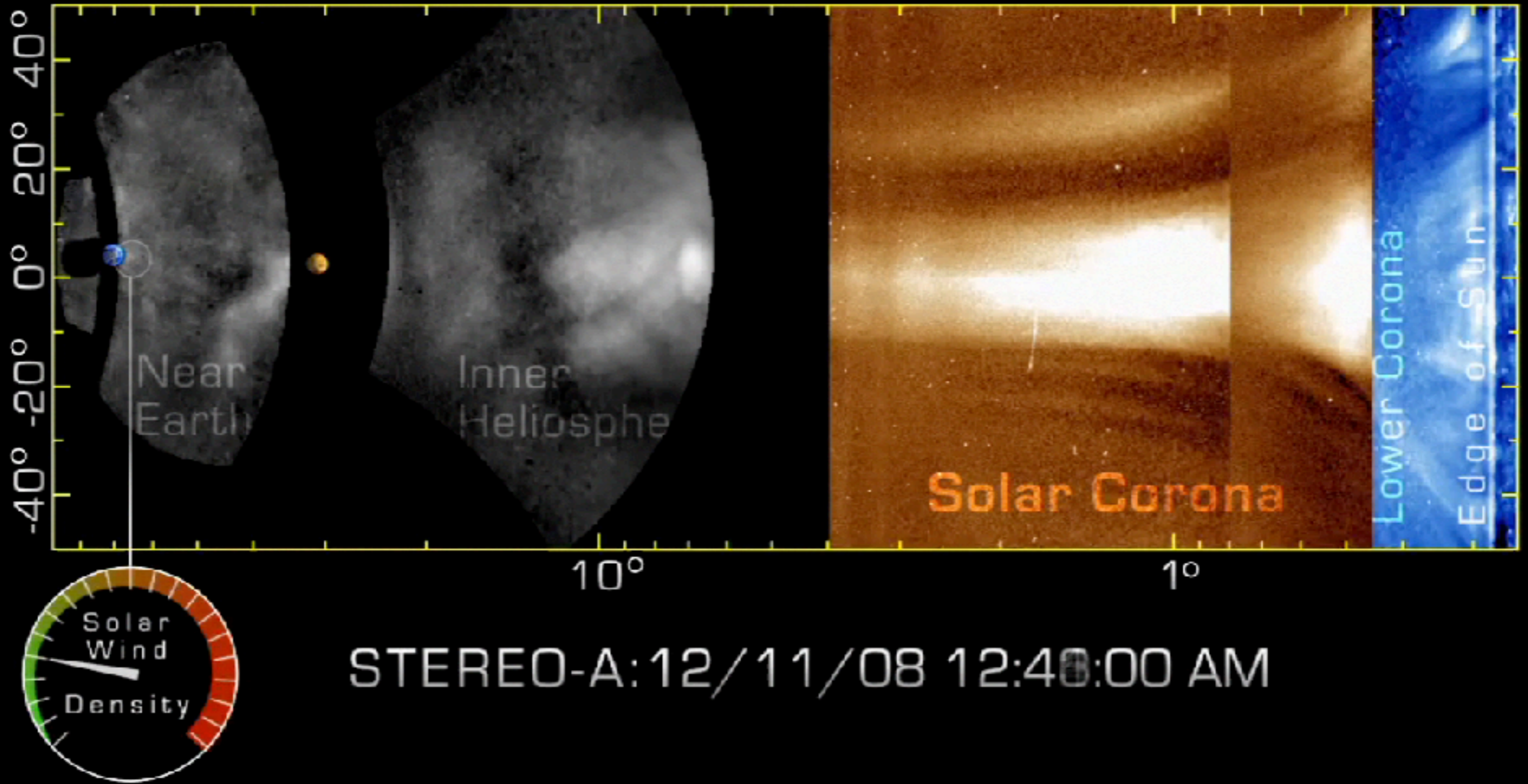
プロミネンス/ダークファイ



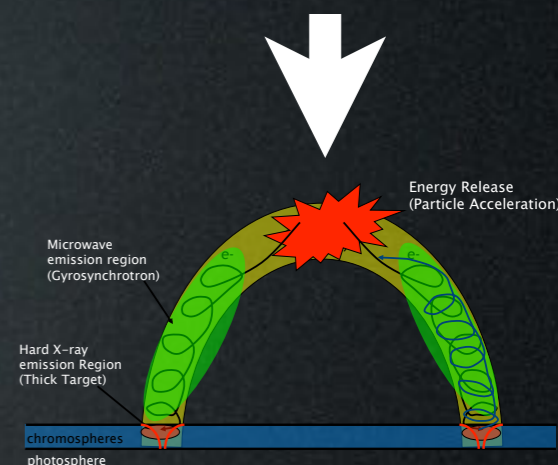
える

1999/07/27 00:06

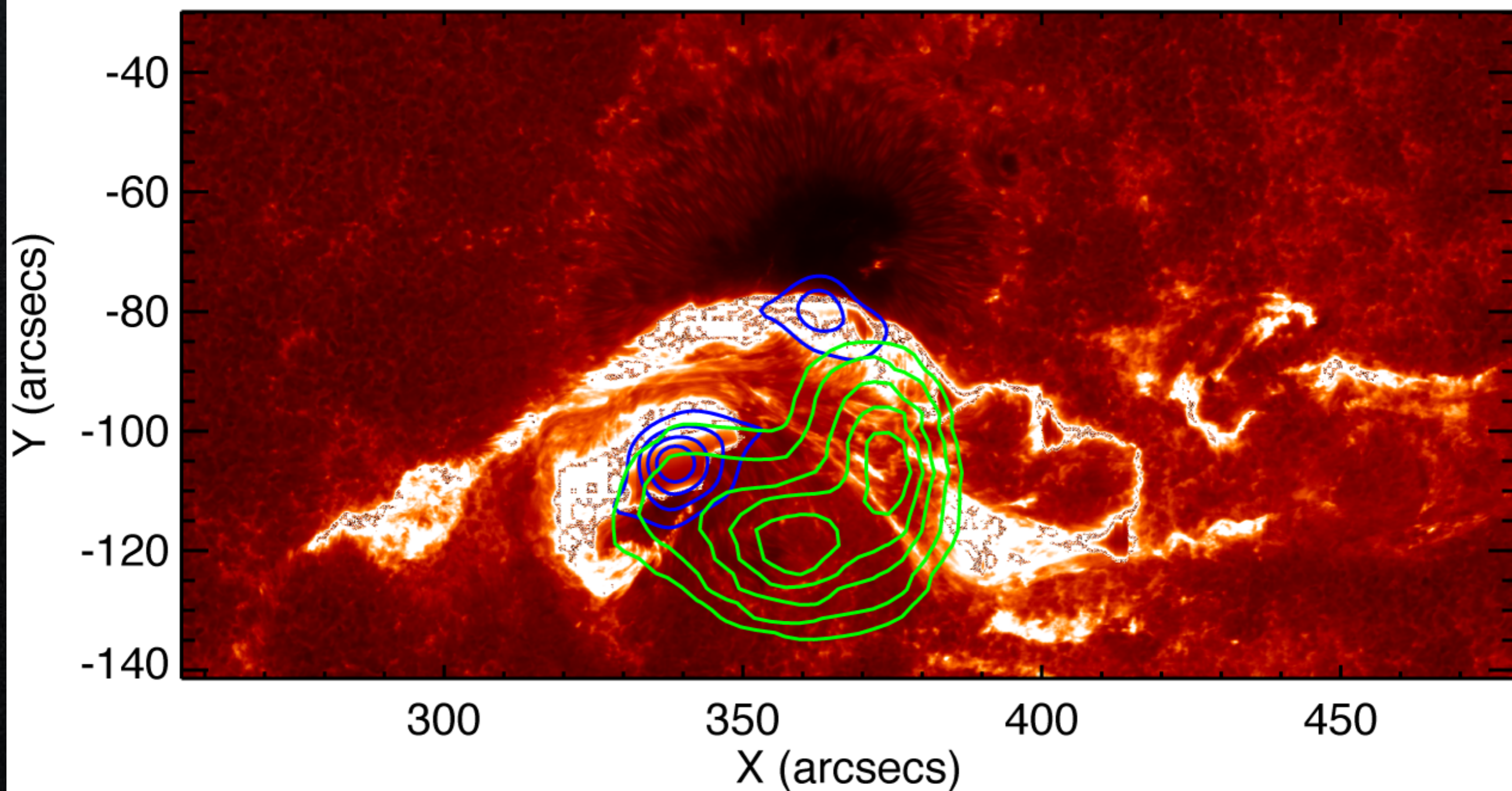
地球への影響



ひので/NoRH/RHESSI



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



ALMAで開かれる新たな太陽研究



ALMA（アタカマ大型ミリ波/サブミリ波干渉計）

66台のアンテナで構成される、世界最大の電波干渉計

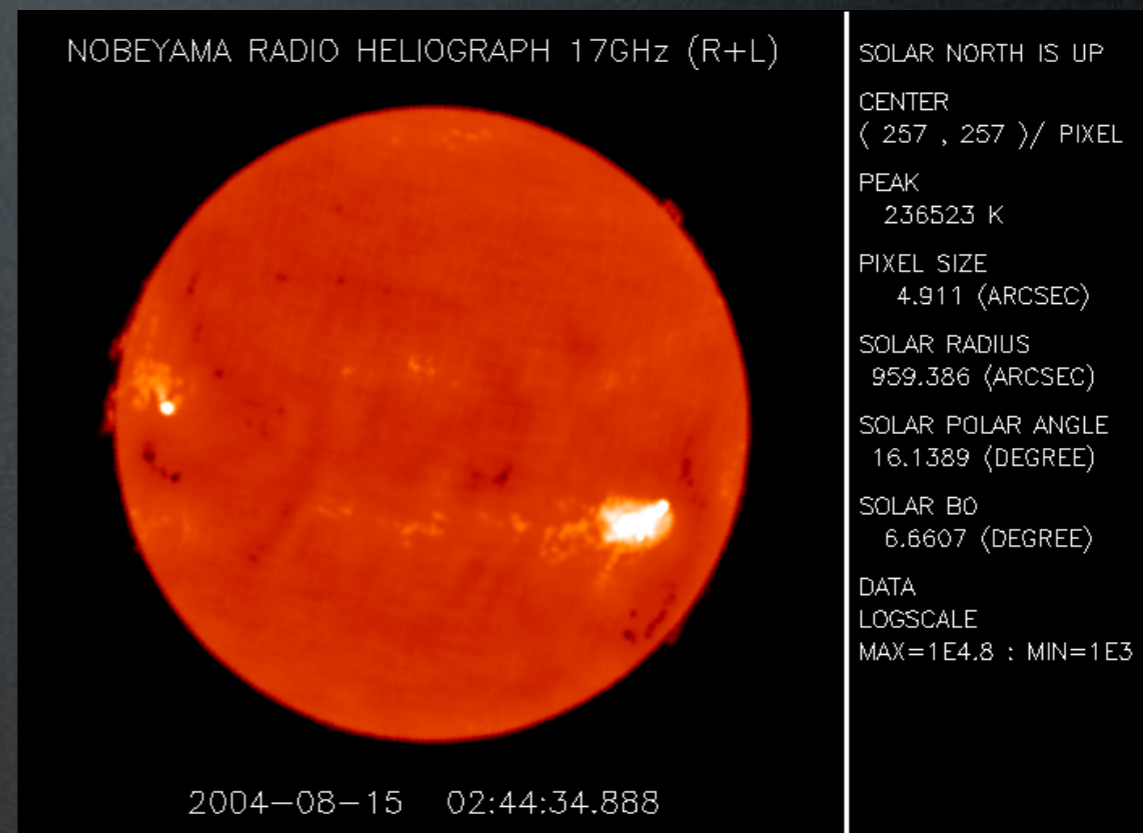
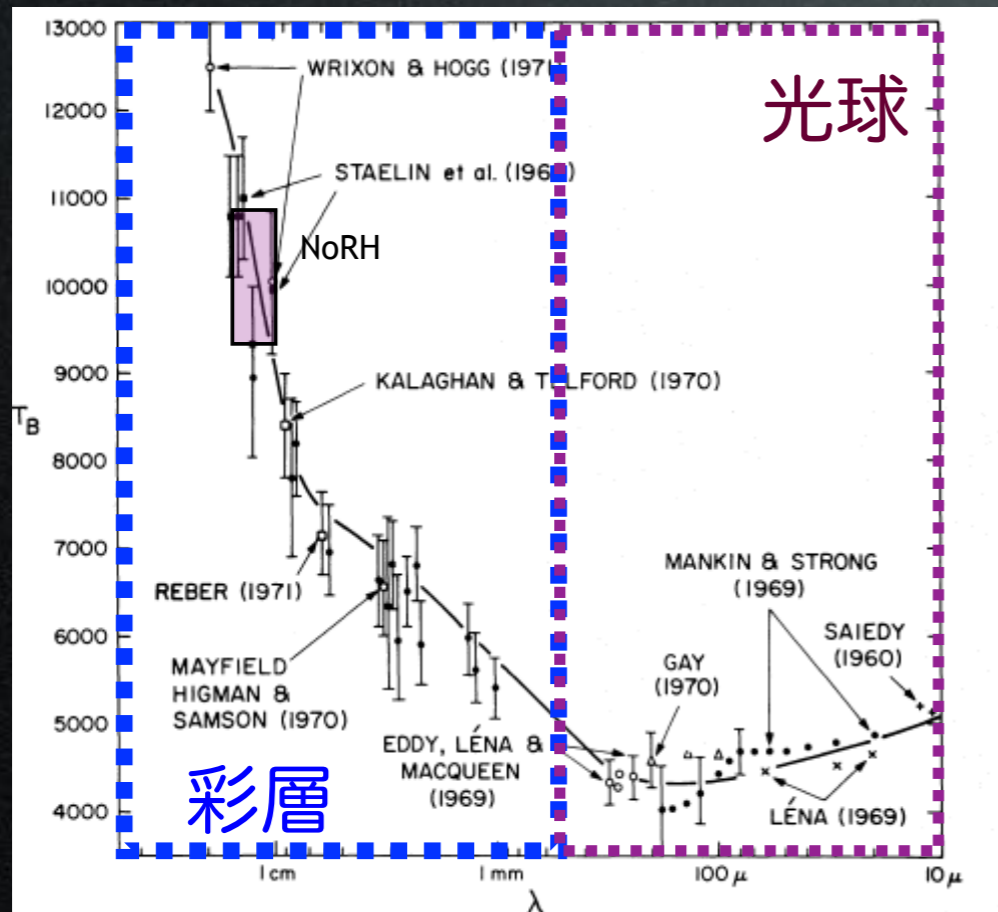
太陽も観測できる！

それもNoRHの10倍以上高い空間分解能で！！

17GHzのディスクはどこを見ているのか？

輝度温度：電波の強度の指標。

- * その放射が、光学的に厚いプラズマから来ていれば、**輝度温度=プラズマの温度**
- * ディスクからのマイクロ波放射は、ほぼ光学的に厚いプラズマからの放射。

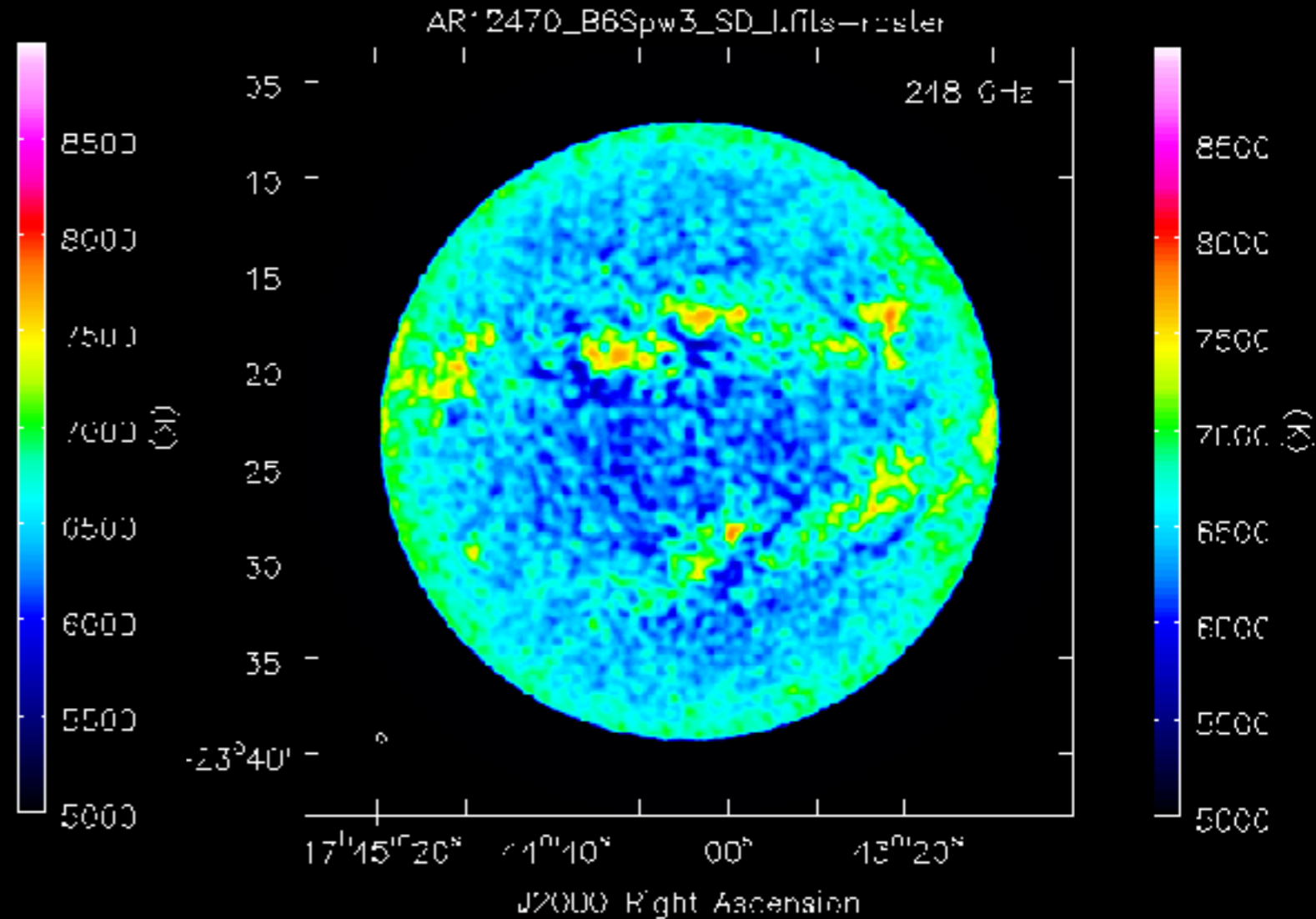
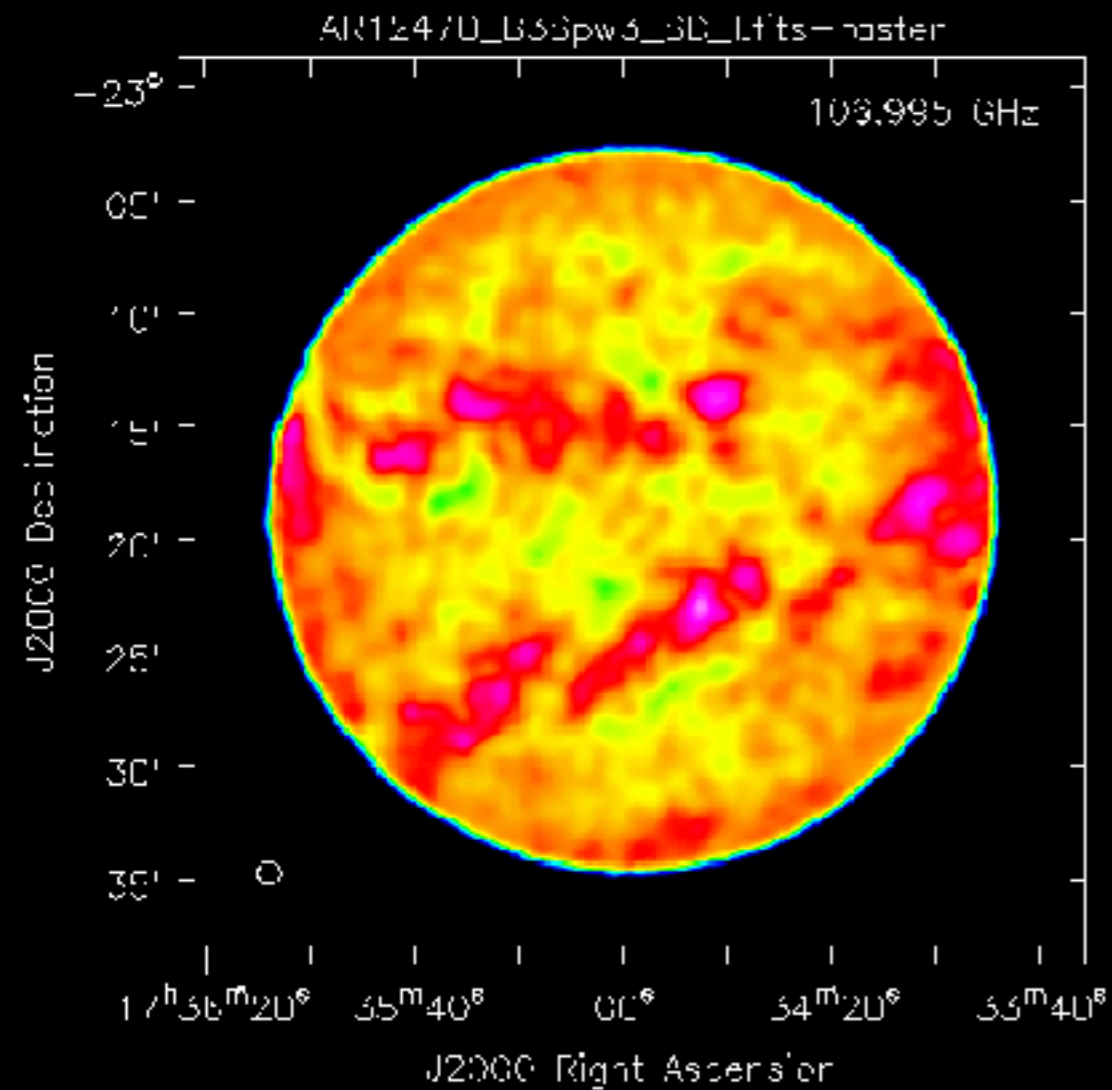


17GHzでのディスクでの平均輝度温度=約1万度
⇒17GHzのディスクは、彩層を見ている。

ALMAはどこを見る？→彩層

Band 3/107 GHz

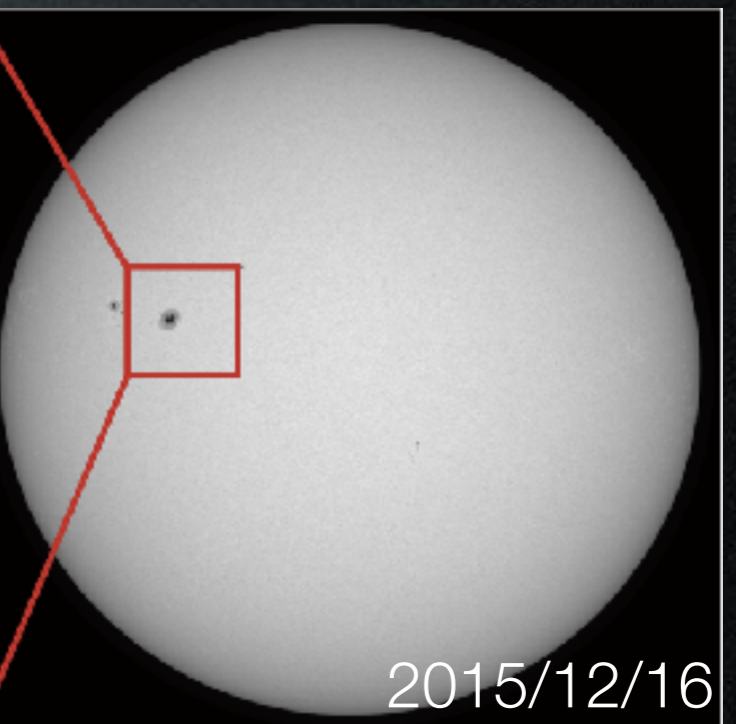
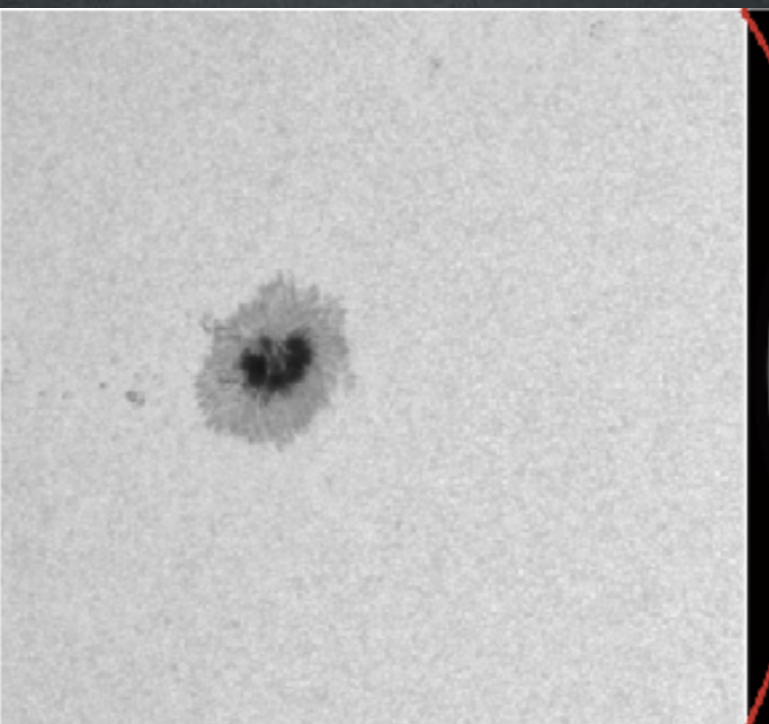
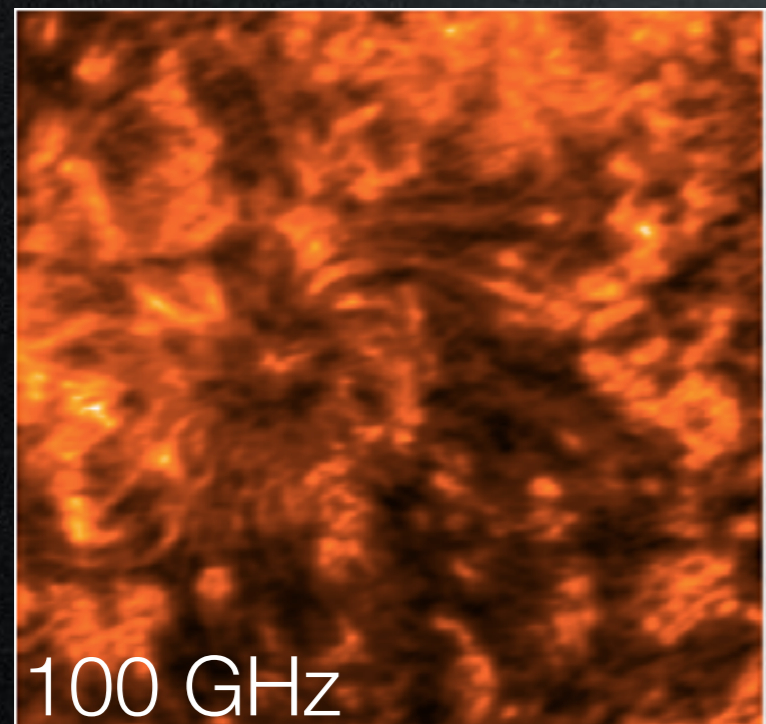
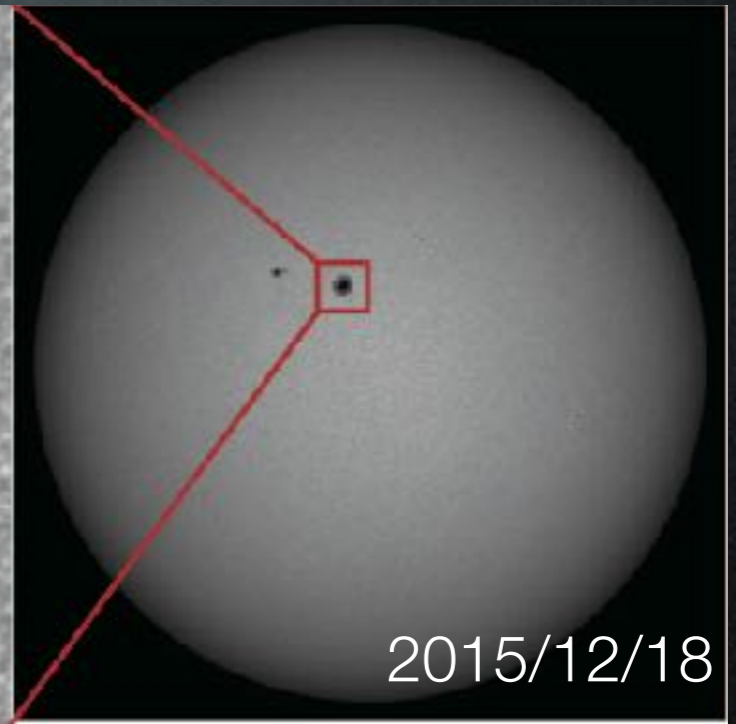
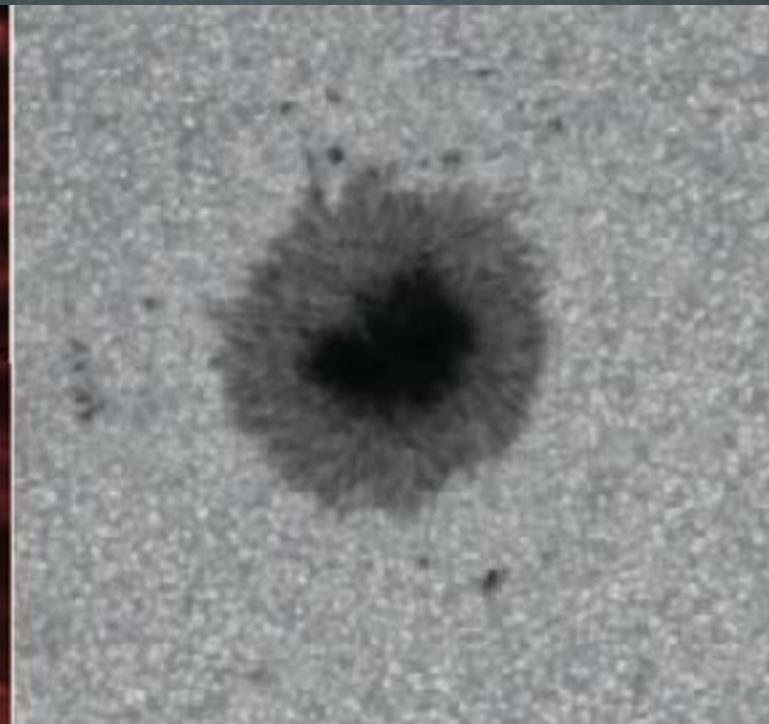
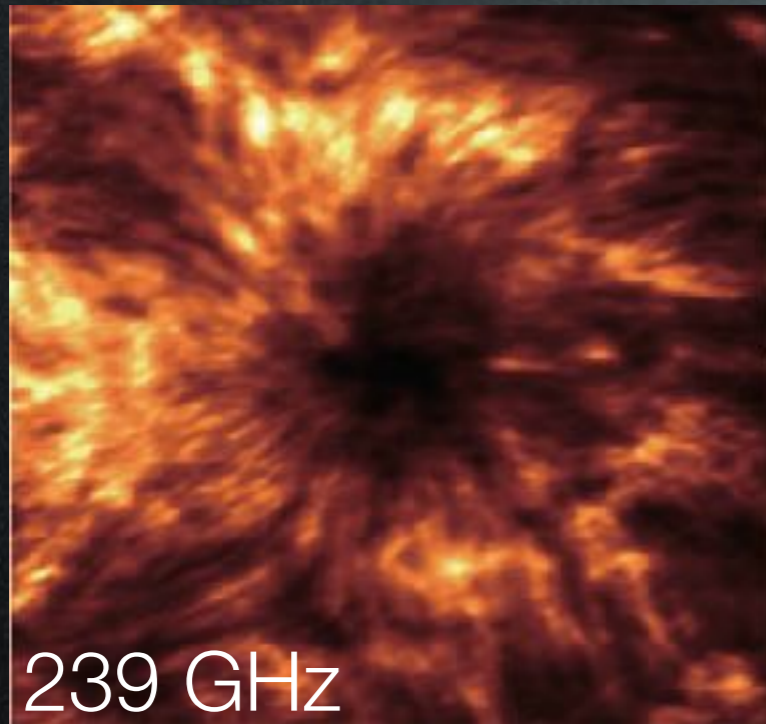
Band 6/248 GHz



(アンテナ 1 台だけ使った観測結果)

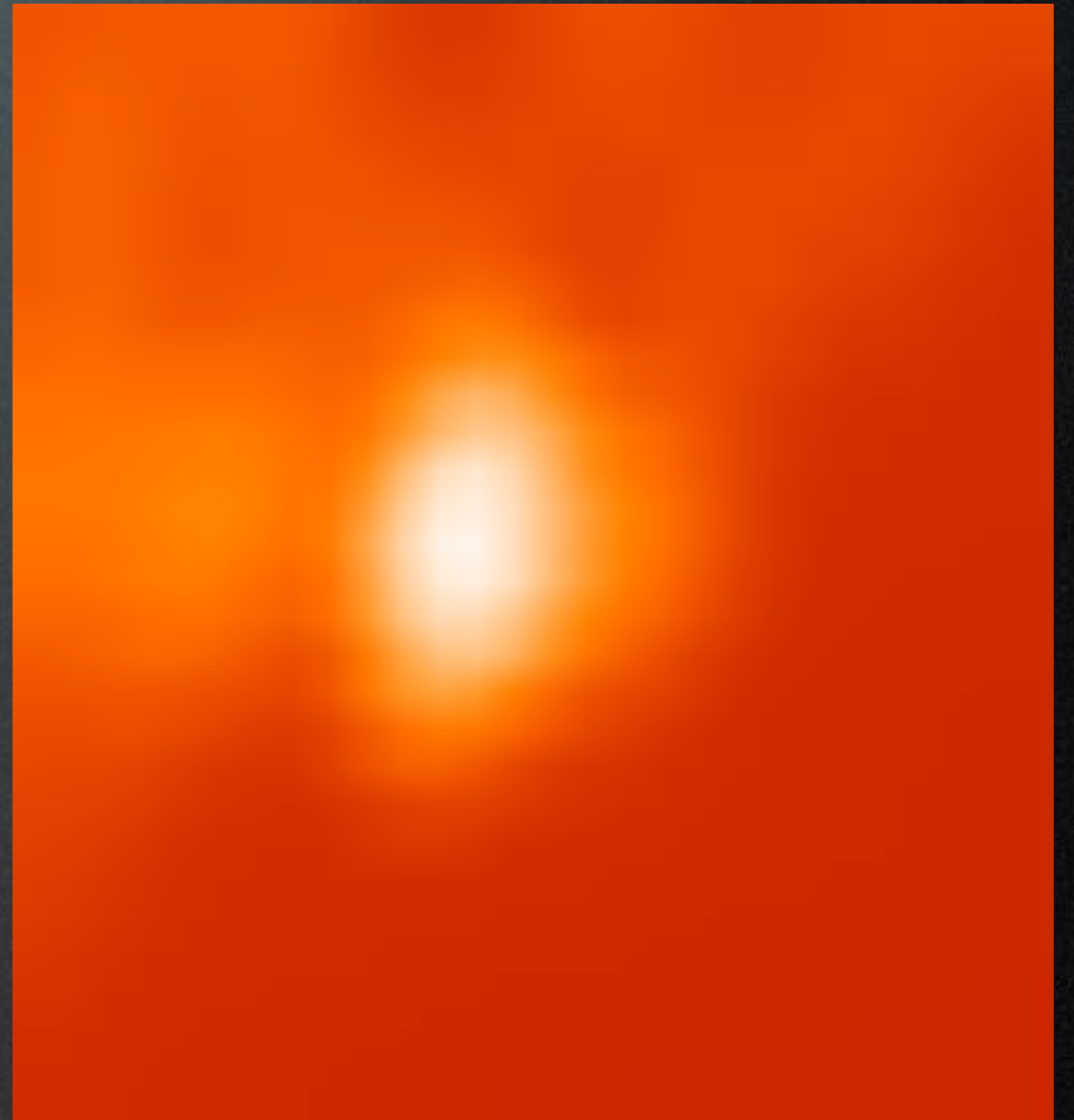
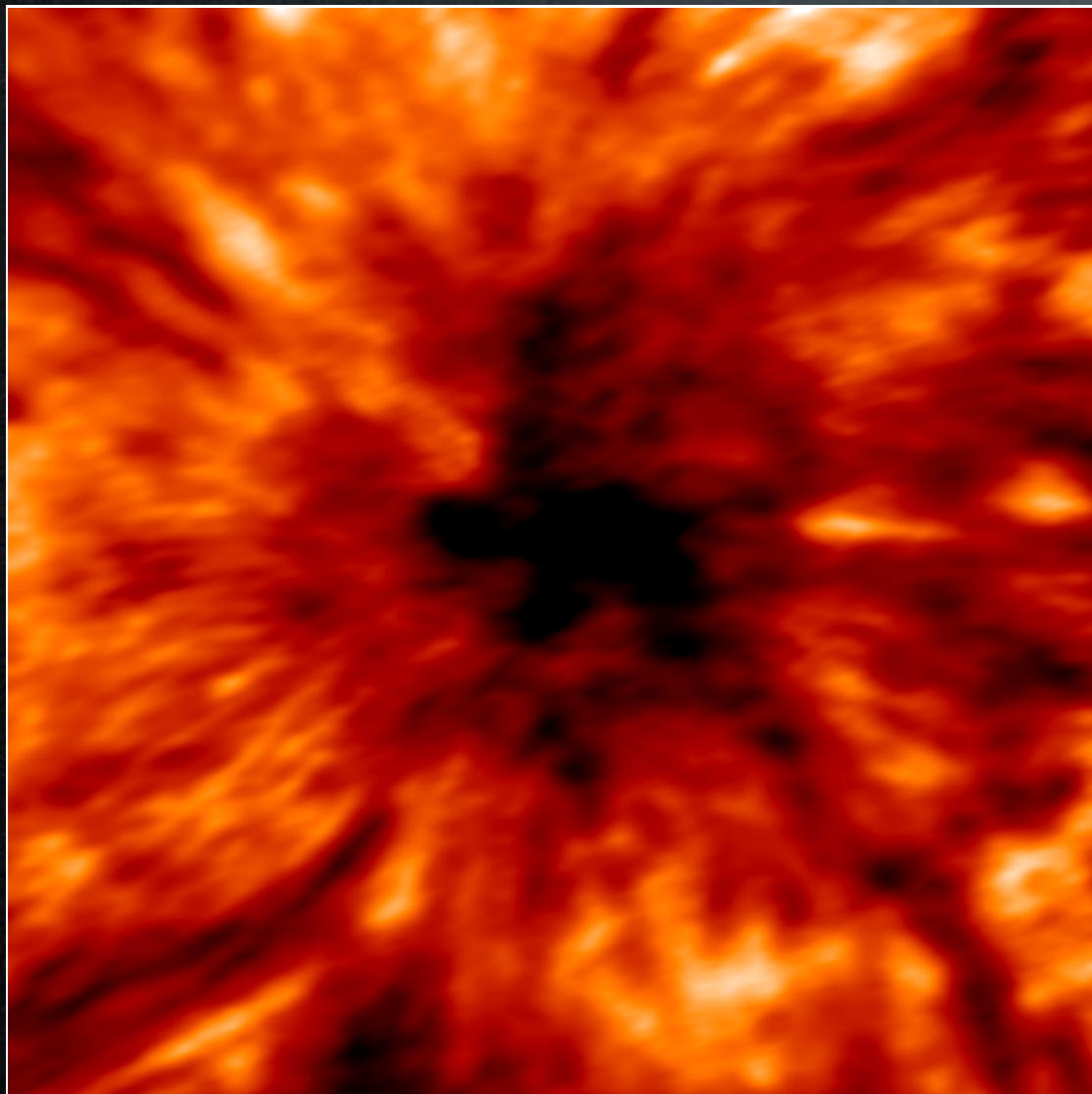
@QS 100GHz ~7300K, 239 GHz: ~5900K

ALMAで観測した黒点



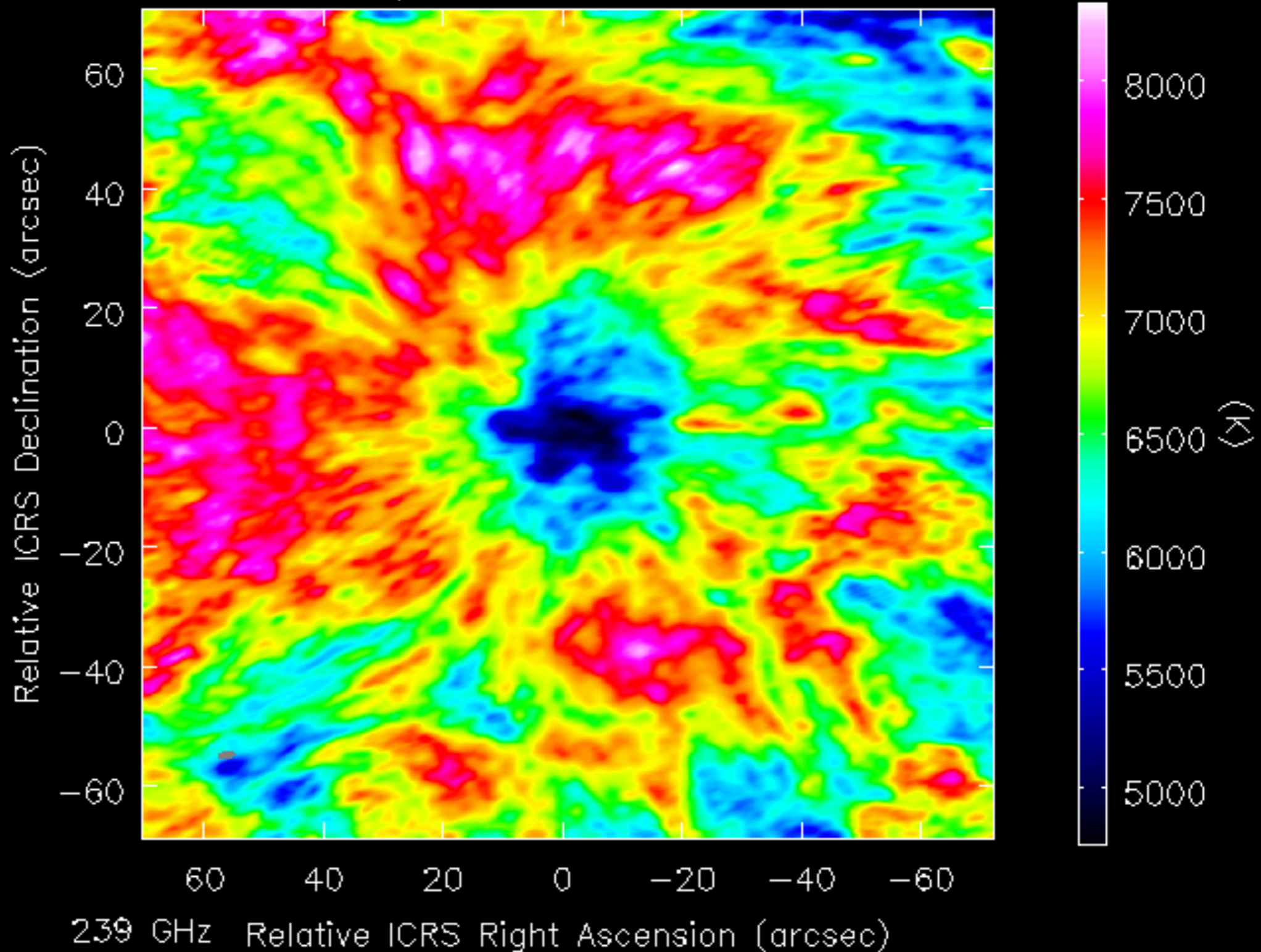
ALMA-Hinode/SOT & NoRH (17GHz)

ALMA 239 GHz 18-Dec-2015 19:39 -- 20:03 UT



ALMAの画像はサーモグラフィ

AR12470_B6A11Spw_l_Feather_wSDRescl_K.fits-raster



他の波長域では難しい温度も、精度良く決まる！

ALMAの観測は始まったばかり

100 GHzより高周波の高空間分解能
(≈ 1 秒角) 電波観測は、誰も経験がない。

自分のアイディアでこの分野を開拓できる！

これから太陽電波研究をする為には

大学院

1.総合研究大学大学 天文科学専攻 [下条]

- ALMAを使った観測的研究[彩層・フレア]

2.東京大学 地球惑星科学専攻 [横山研]

- フレアにおける粒子加速の理論的研究

3.名古屋大学 太陽地球環境研究所 [増田研]

- 硬X線観測を使った粒子加速研究

おわり