

太陽研究最前線体験ツアー：3日目

# 電波でみる太陽

国立天文台・野辺山太陽電波 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- : 国立天文台・野辺山太陽電波観測所 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
  - 現在、東海大学修士2年1名 (梶田君) を指導
- 2011年11月から三鷹勤務

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による太陽観測の実現と推進
- 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



# 国立天文台

## 野辺山太陽電波観測所

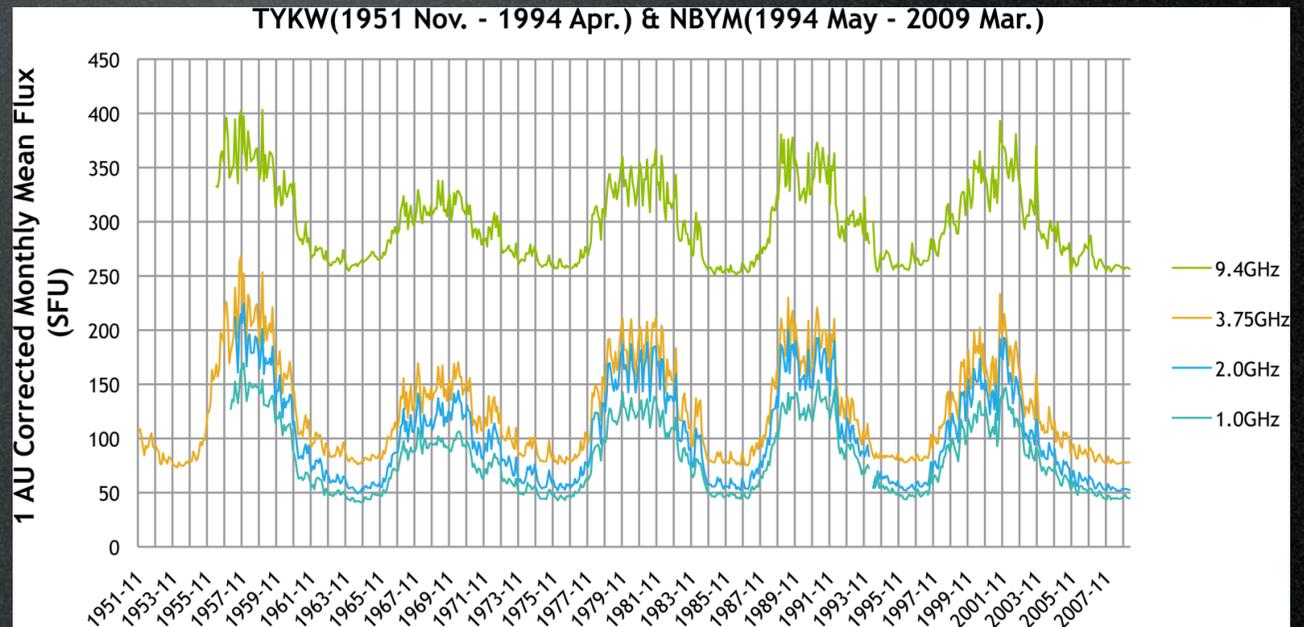
- 住所：長野県南佐久郡南牧村野辺山
  - 標高 約1300 m
  - 四方を山に囲まれた土地
  - 2月は $-20^{\circ}\text{C}$ を下回る気温
- 1969年開所：今年で45年目
  - マイクロ波（GHz帯）の太陽観測
  - 1988年に名古屋大学空電研の太陽電波グループと国立天文台の野辺山太陽電波観測所が合流し、現在の観測所になる。
- 来年3月で閉所（観測機器は引き続き運用）



# 野辺山太陽電波観測所の観測装置:1

## 野辺山強度偏波計(NoRP)

- 太陽全面から放射されるマイクロ波の強度と偏波（円偏波）を観測
- 観測周波数（全7周波）
  - 1, 2, 3.75, 9.4, 17, 34, 80GHz
- 観測開始年
  - 1, 2 GHz : 1957年
  - 3.75 GHz : 1951年
    - 今年で63年目
  - 9.4GHz : 1956年
  - 17GHz : 1978年
  - 34GHz : 1983年
  - 80GHz : 1984年
- 来年度も国立天文台が運用。



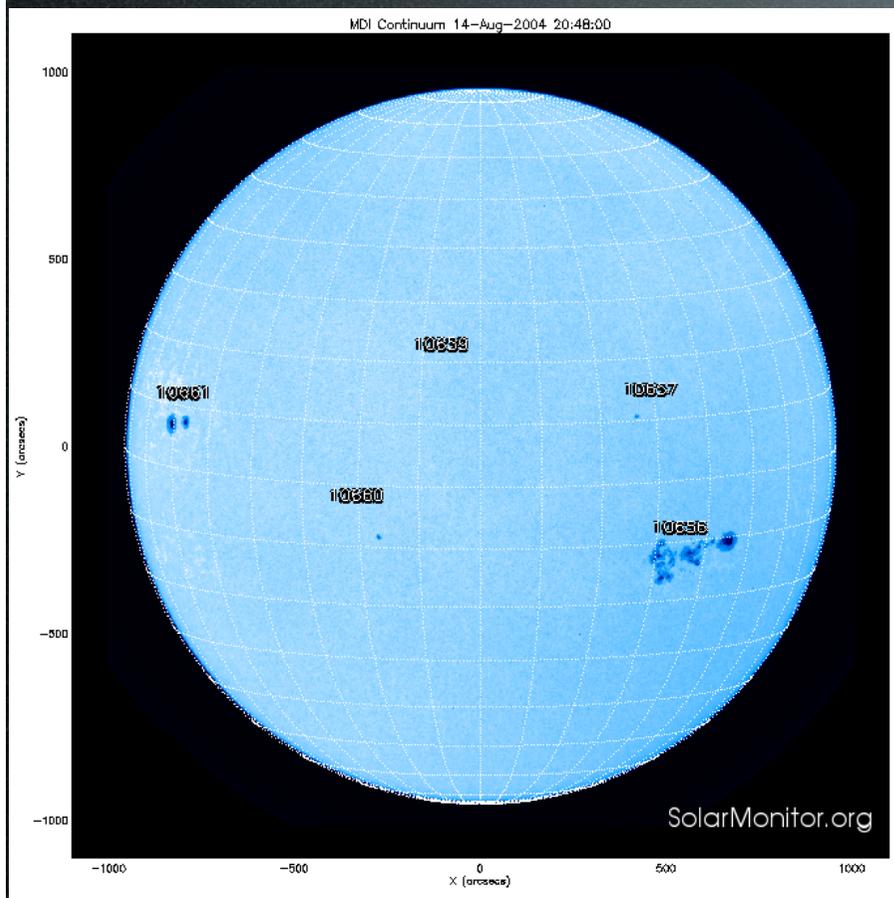
## 野辺山太陽電波観測所の観測装置:2

# 野辺山電波ヘリオグラフ(NoRH)

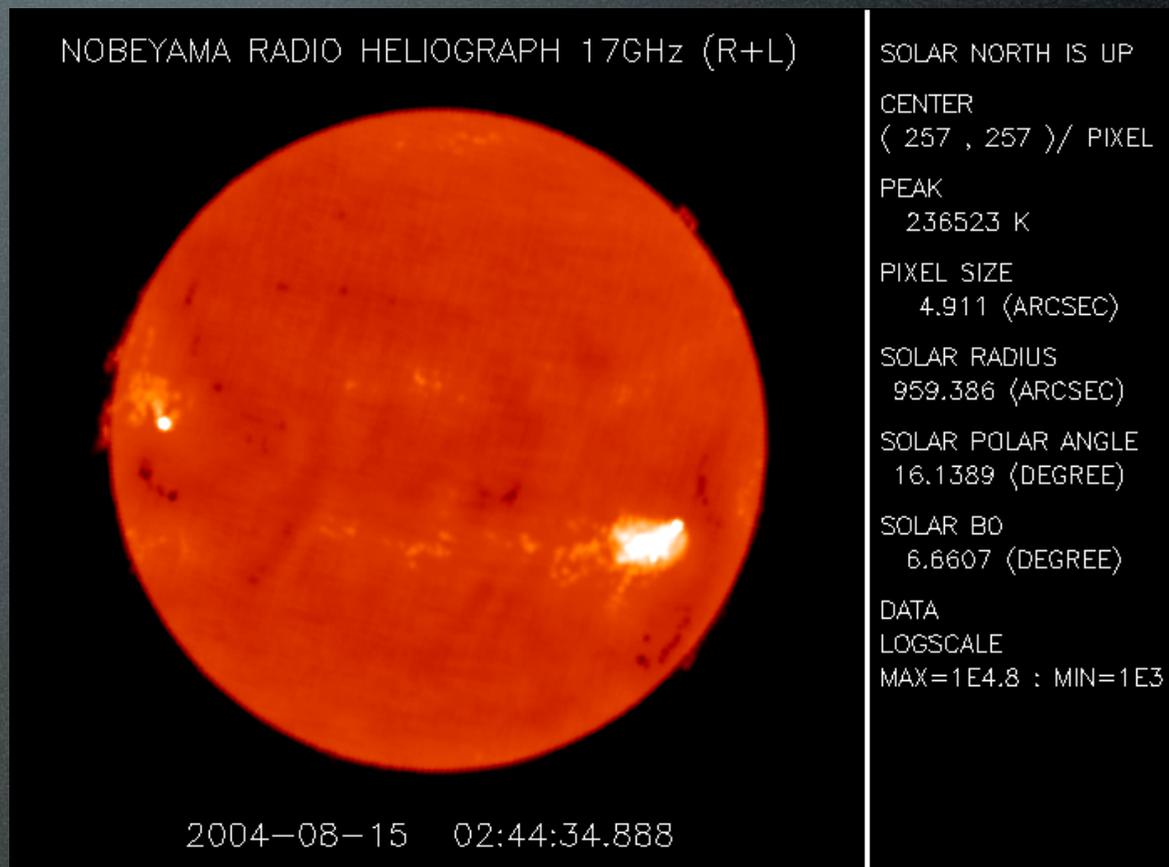
- 太陽専用の電波干渉計
- アンテナ口径：80 cm
- アンテナ数：84台
- 観測周波数：17/34 GHz
- 基線長：南北250m/東西500m
  - 空間分解能：10" @ 17GHz / 5" @ 34GHz
    - ひのでSOT：0.2-0.3" @ 可視光 (口径50cm)
    - ひのでXRT：~2" @ X線 (口径34cm)
- 観測開始：1992年7月 (今年で23年目)
  - 現在でも世界で唯一17/34GHzにて太陽像を取得できる望遠鏡
- 来年度から、名古屋大学が運用を行なう。



# 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)

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？
- 何の情報から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

# 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

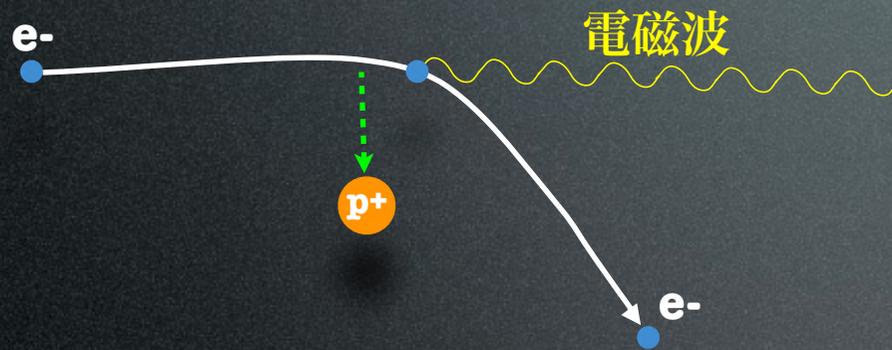
太陽大気は温度 4000 K--1 MK

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。

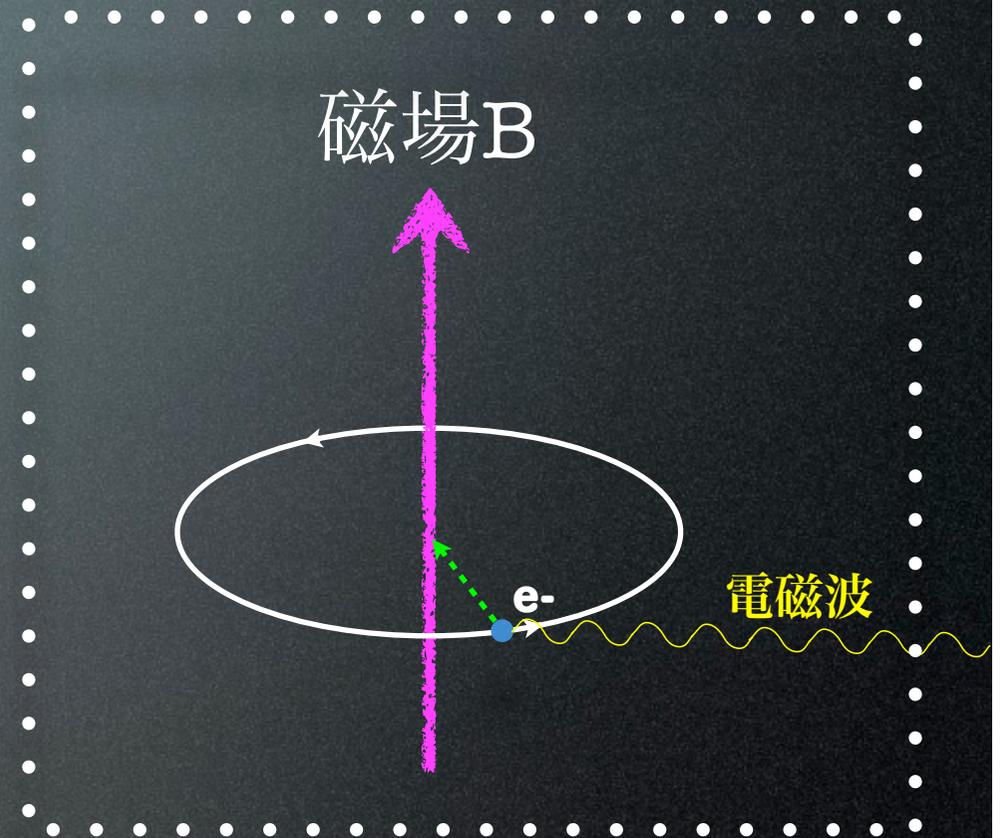
電気を通す気体 ⇒ “**プラズマ**”

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)

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

$n$ 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

e:電荷

B:磁場

m:電子の質量

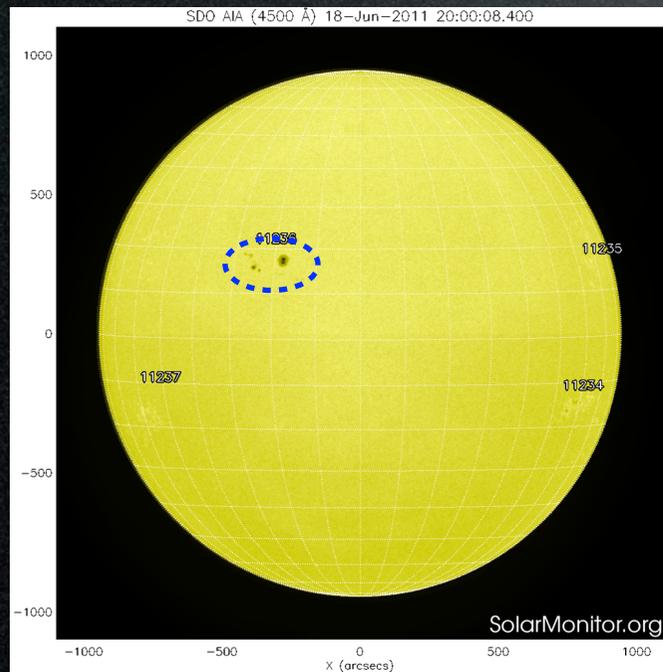
c:光速

# 黒点周辺で見える

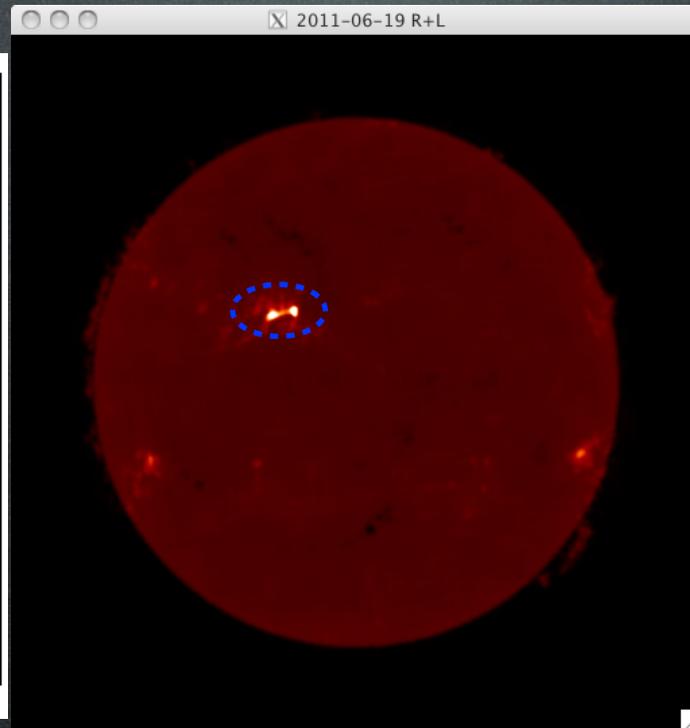
## ジャイロレゾナンス放射

ジャイロレゾナンス：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

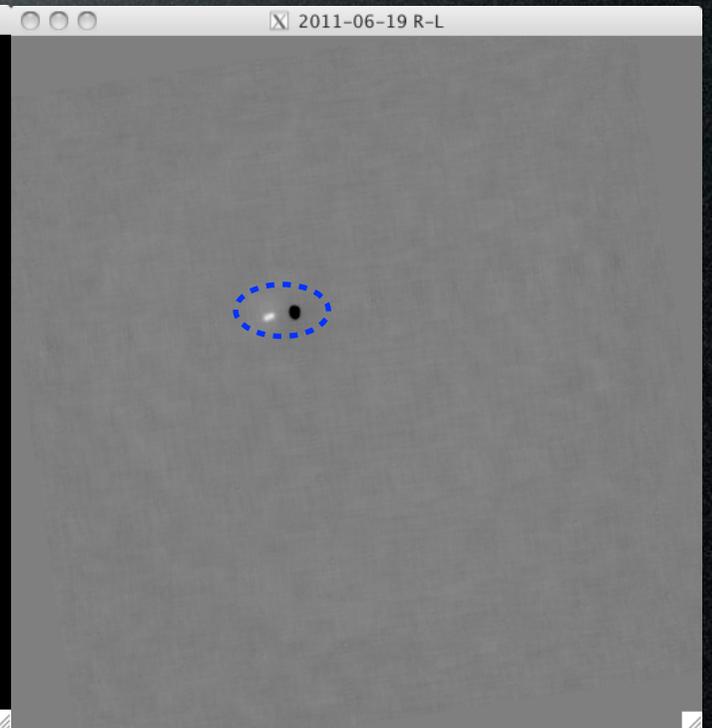
可視光



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。

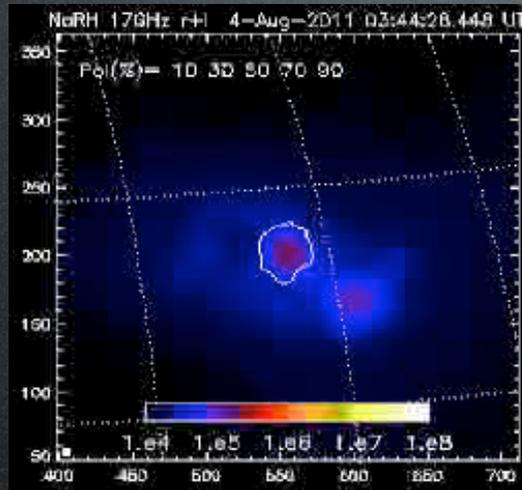
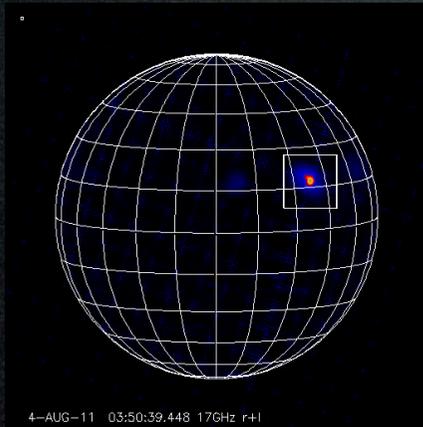
# フレア時に見られる

# ジャイロシンクロトロン放射

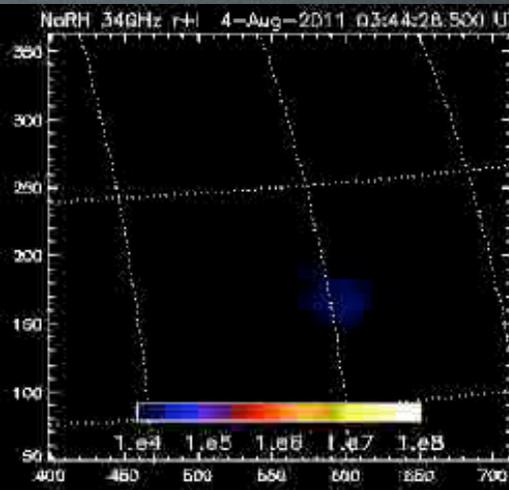
ジャイロシンクロトロン：  
電子の速度が十分早く（高速の数10%） $n$ が大きい放射

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。

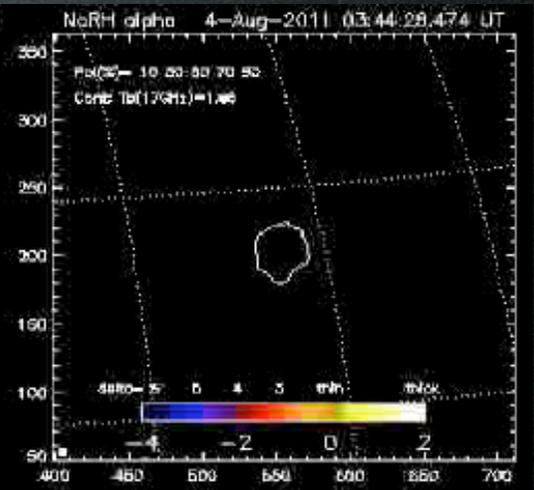
2011/8/4 Flare



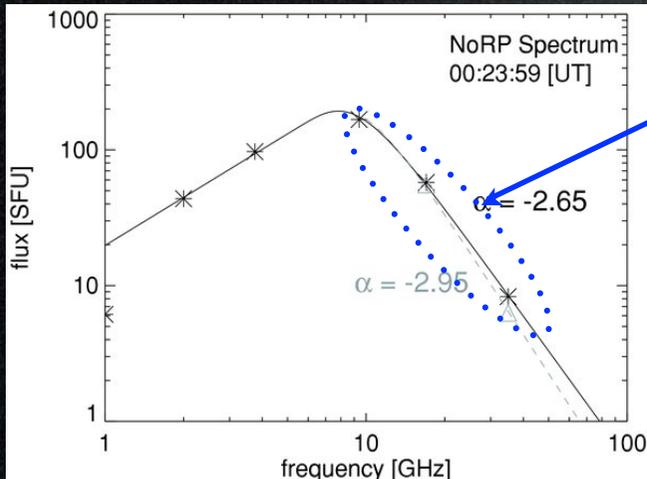
17 GHz



34 GHz



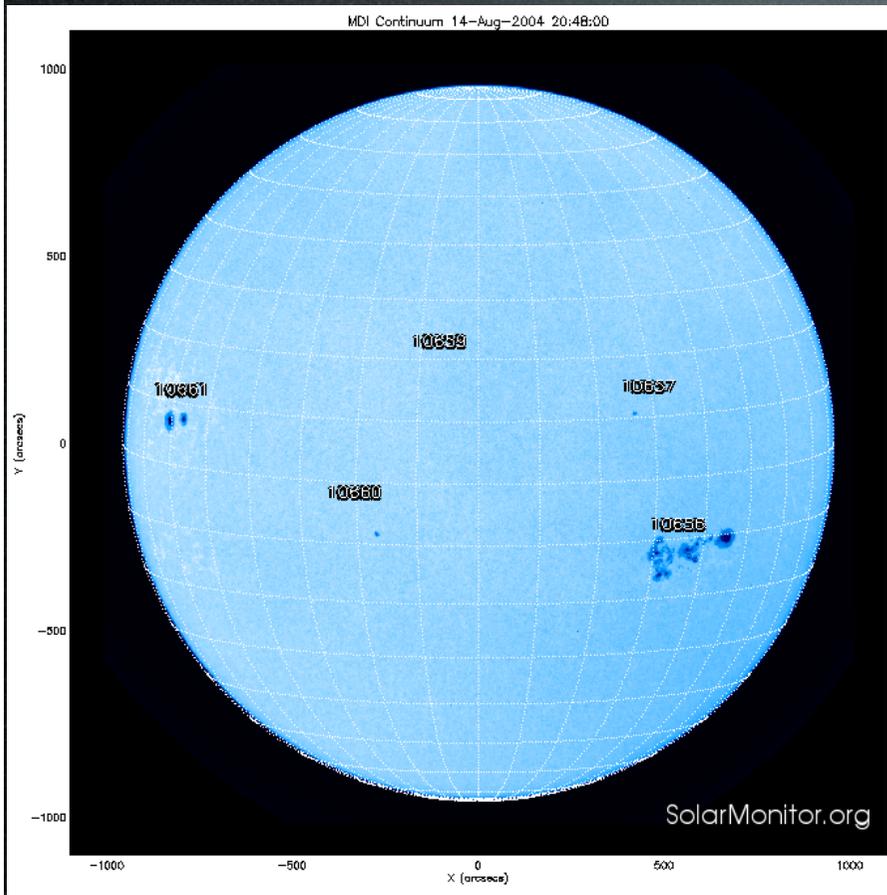
スペクトル [34/14]



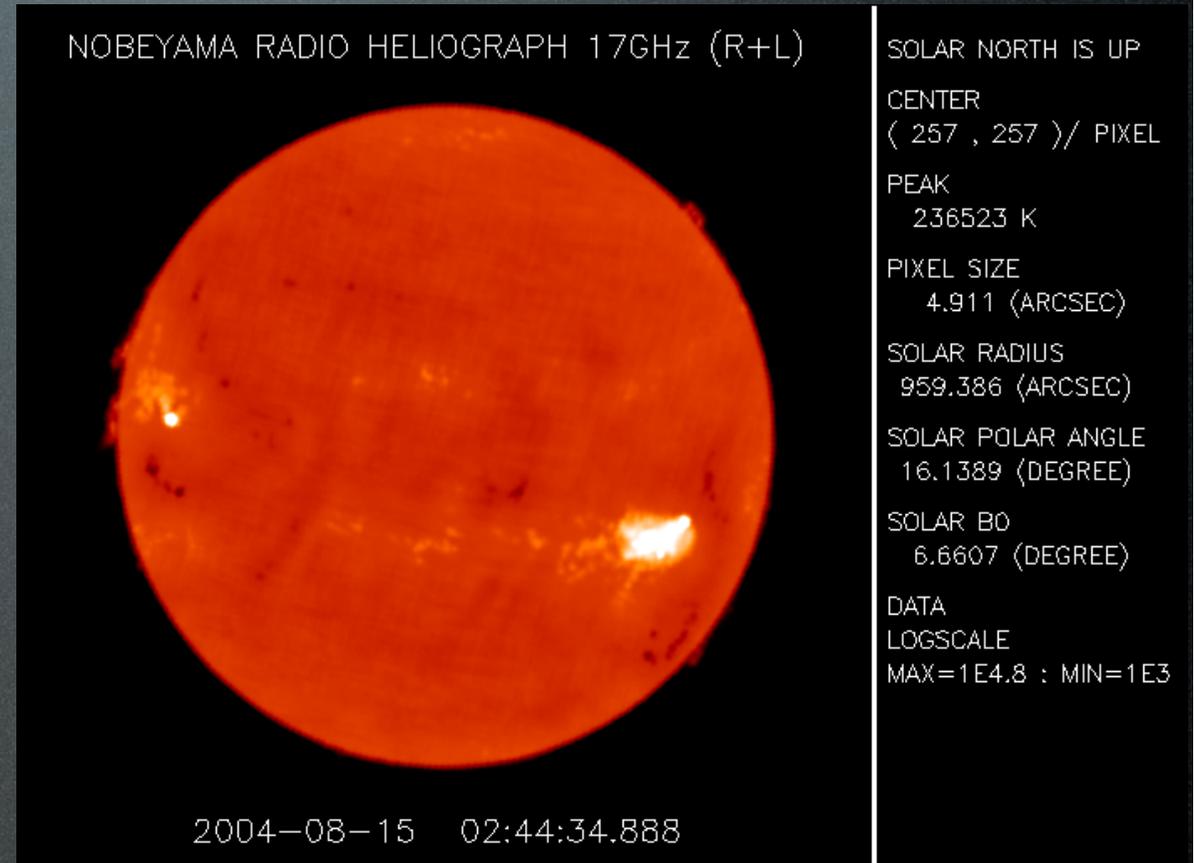
このスペクトルが電子のエネルギーの分布を示している。

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

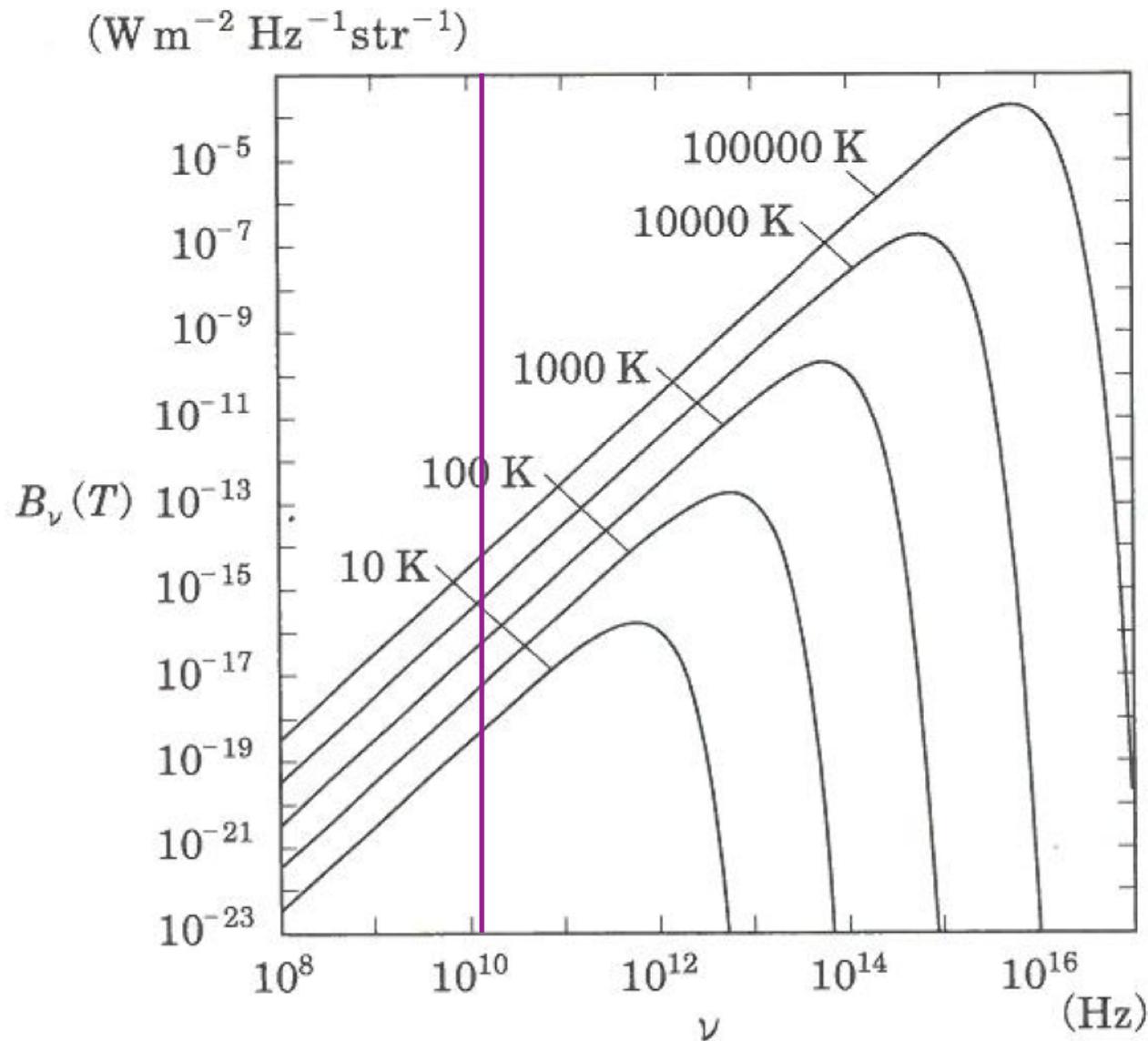


可視光  
(MDI/SOHO)



電波[17 GHz]  
(野辺山電波ヘリオグラフ)

# 大いなる熱放射 [黒体放射]



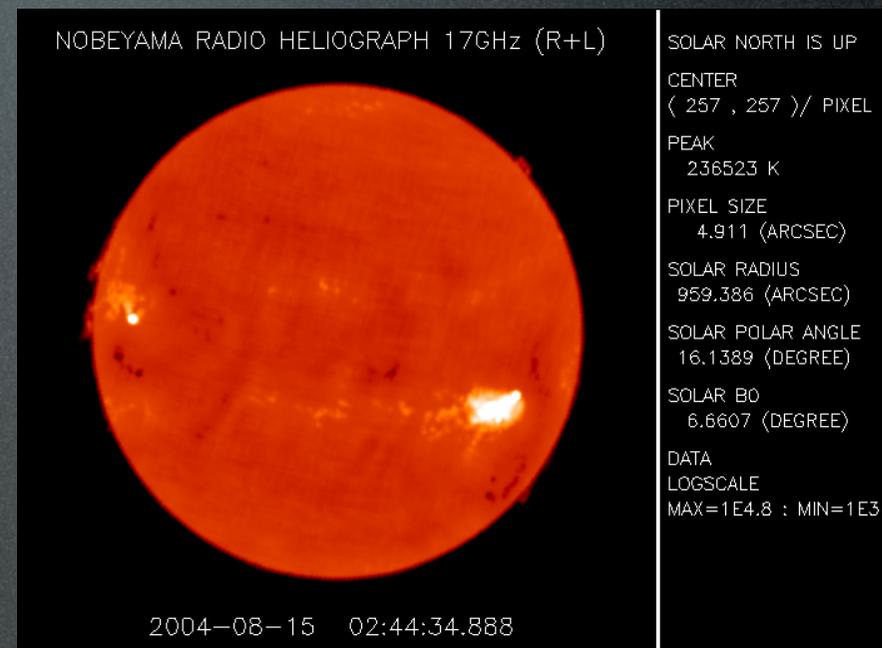
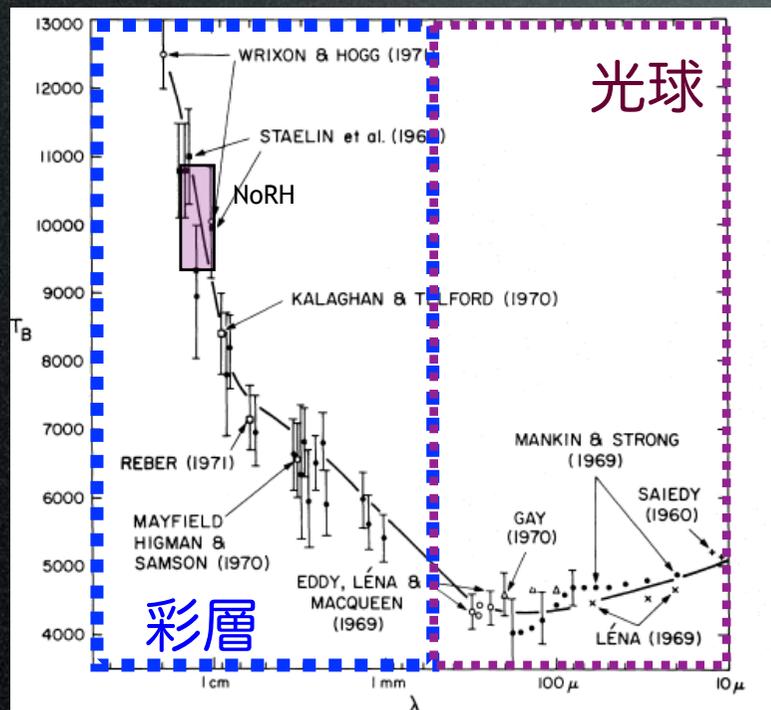
NoRHで見えている円盤のほとんどはこれ。

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。

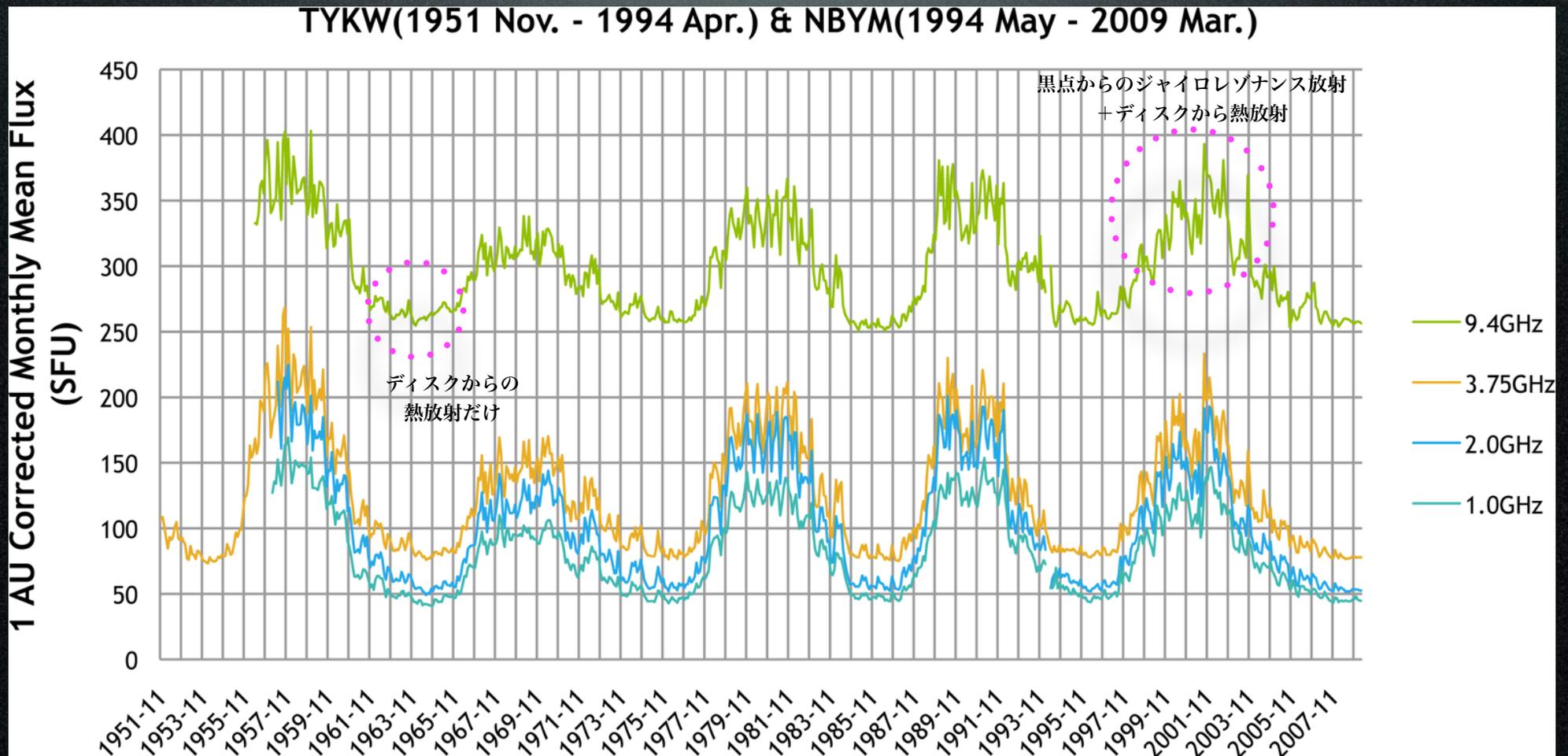


17GHzでのディスクでの平均輝度温度=約1万度  
⇒17GHzのディスクは、彩層を見ている。

# NoRP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。



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？
- 何の情報から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）。

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

$\theta$  : 角分解能,  $\lambda$  : 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  $5700 \text{ \AA}$  (黄色)  $\Rightarrow$  口径 **14 cm** の主鏡

2. 波長  $1.7 \text{ cm}$  ( $17 \text{ GHz}$ )  $\Rightarrow$  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**。

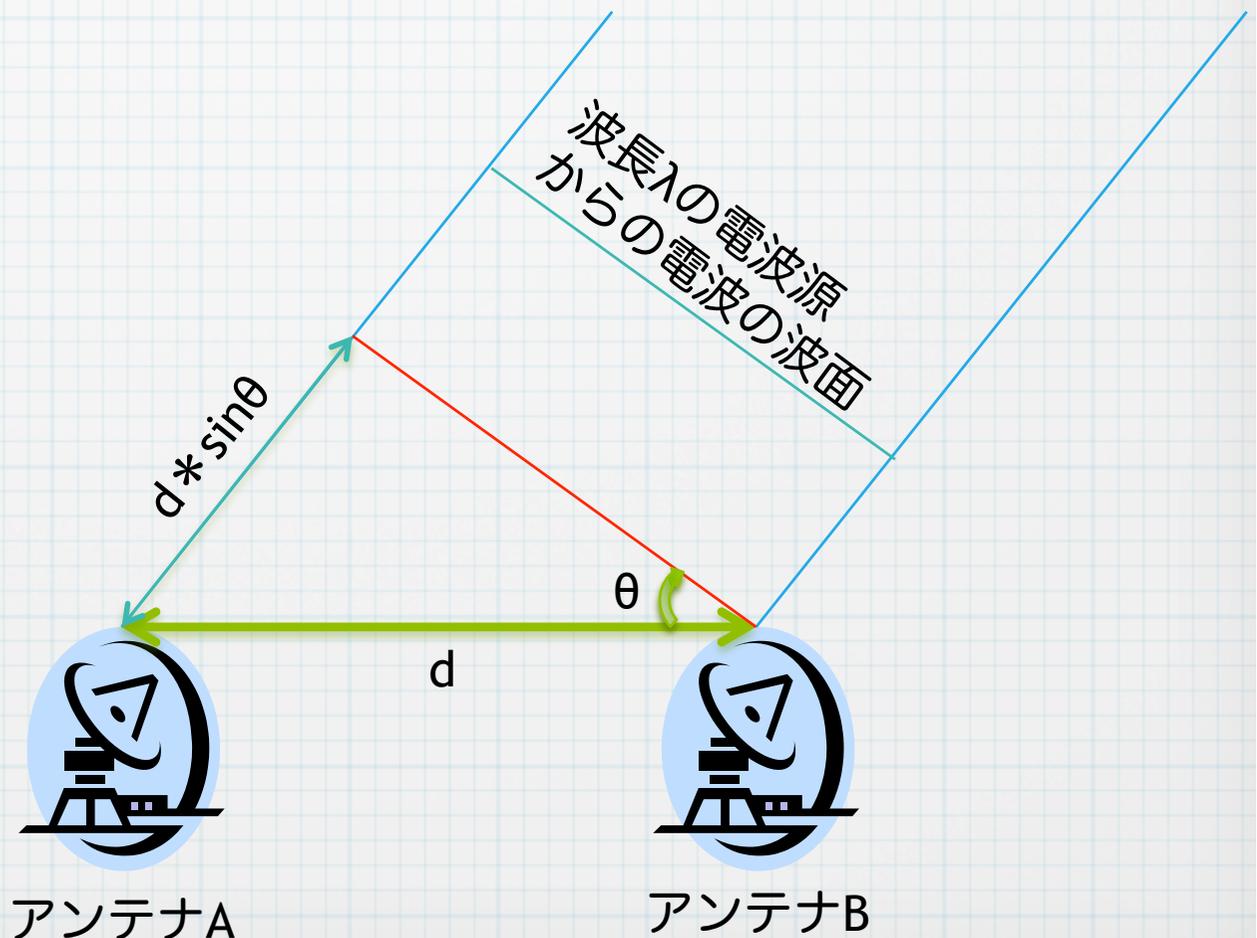
実は身近なフーリエ級数

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

# 電波干渉計は天空の

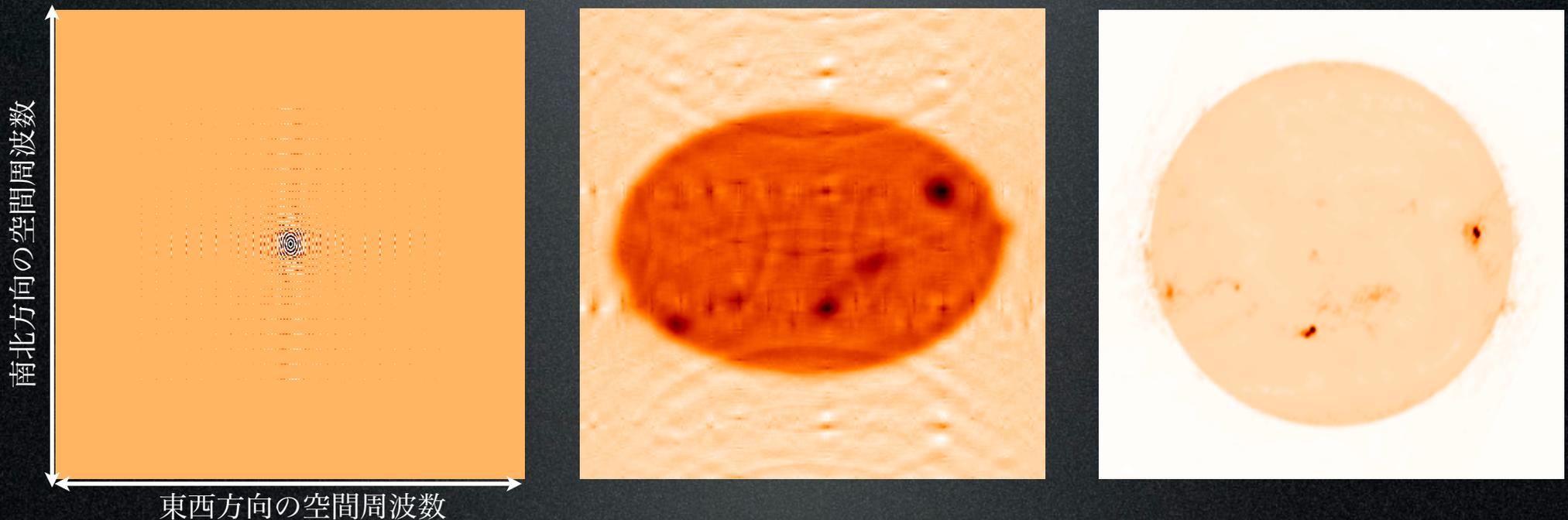
## フーリエ級数の係数測定機

- \* 2つのアンテナの出力を足し合わせると、天空にsin/cos関数の空間フィルタをかけたデータを取得できる。



# 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。



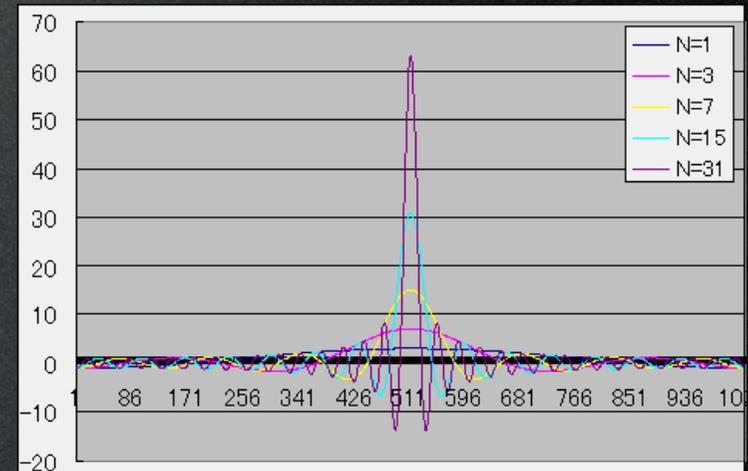
# 電波干渉計の利点/欠点

## 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

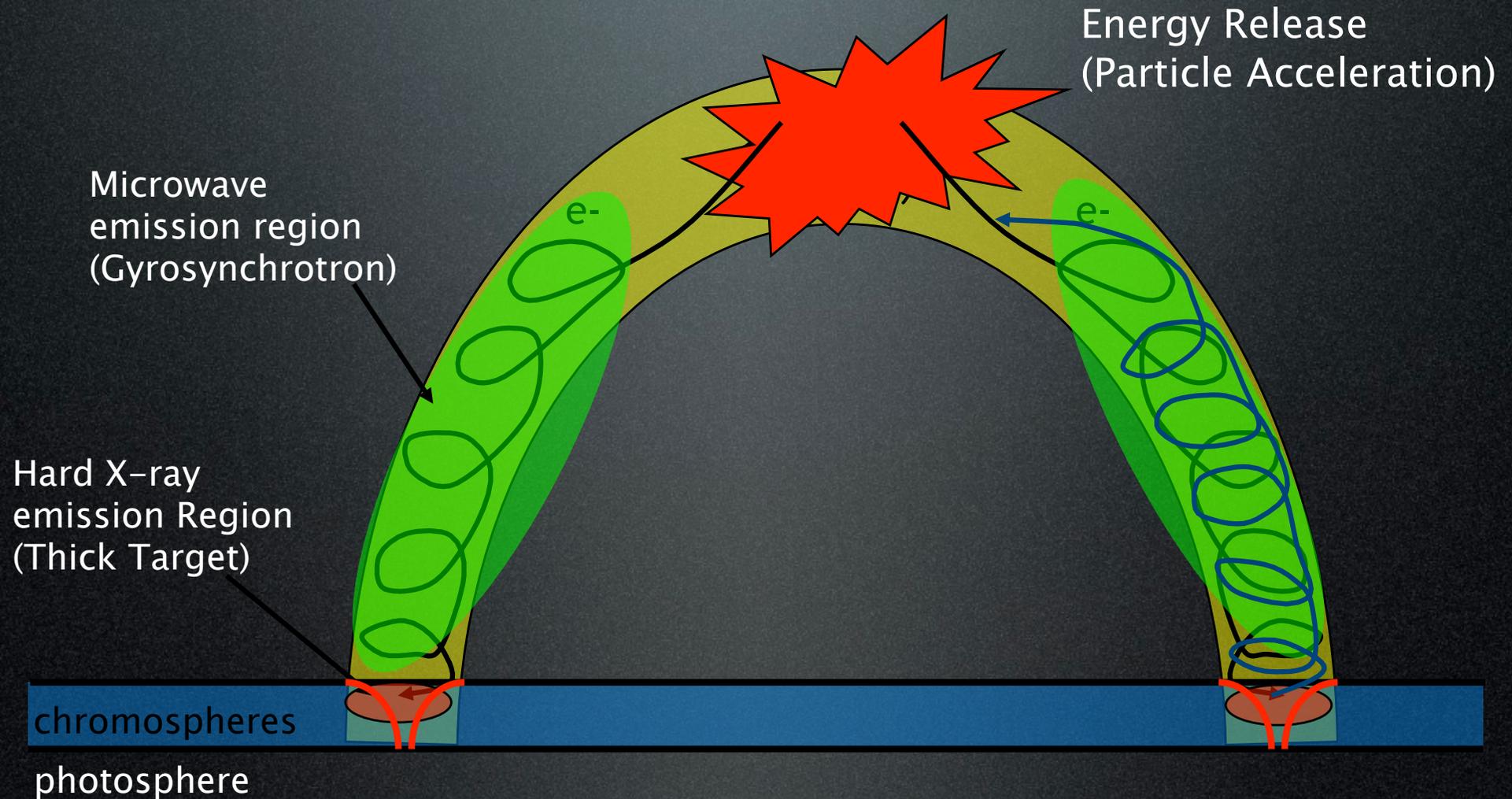
## フレアにおける**粒子加速機構の解明**

- 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**

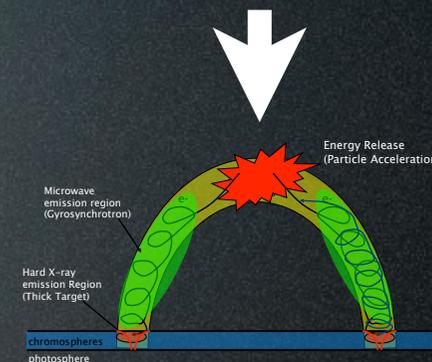
## プロミネンス放出やCMEの研究 [宇宙天気]

- 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。

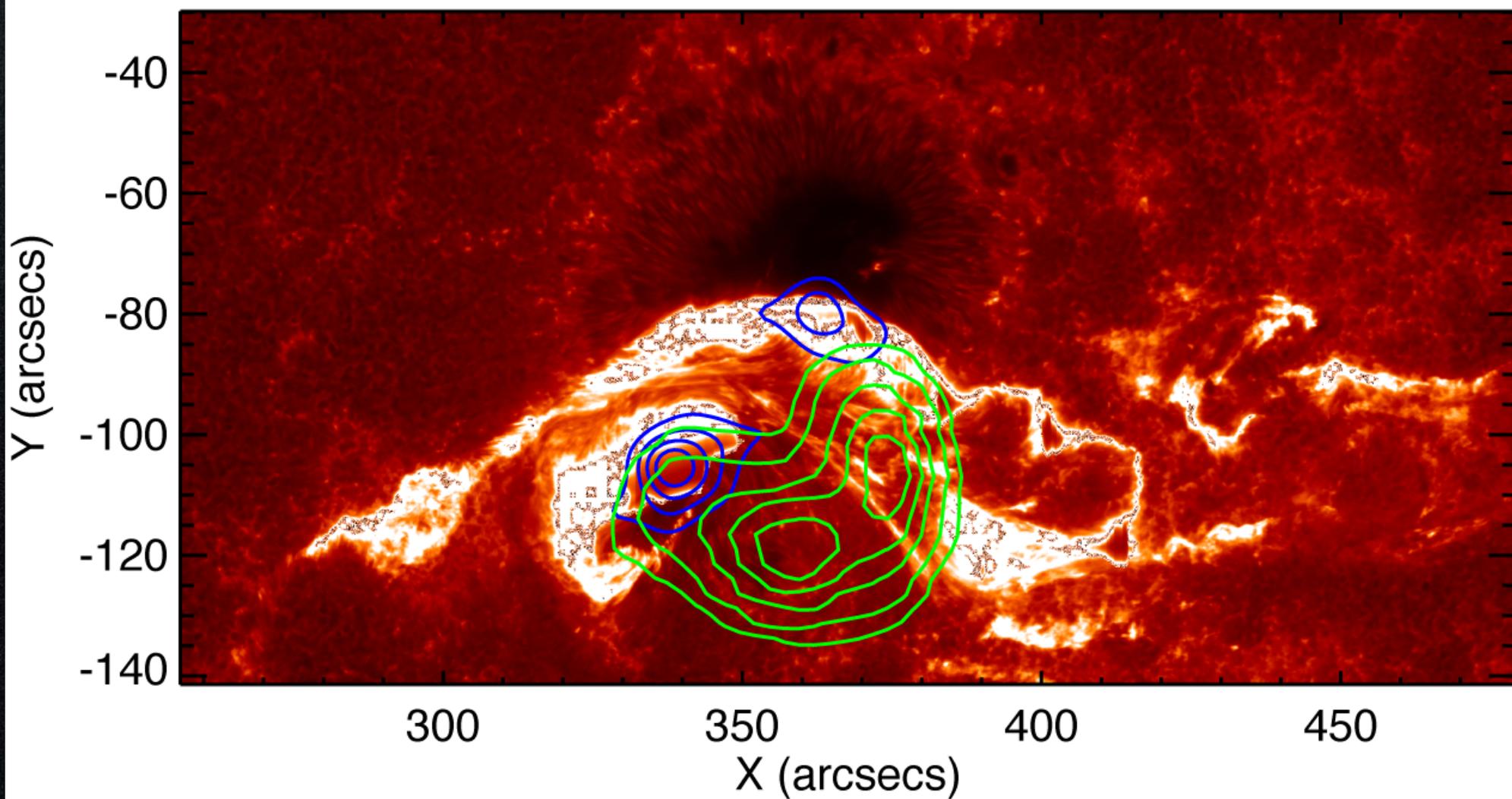
# フレア内の電子の動き



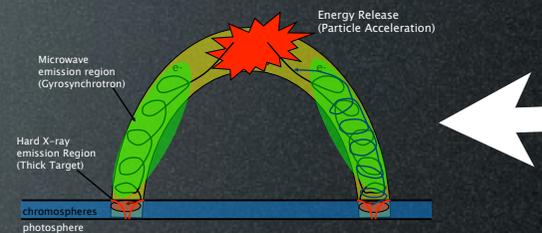
# ひので/NoRH/RHESSI



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



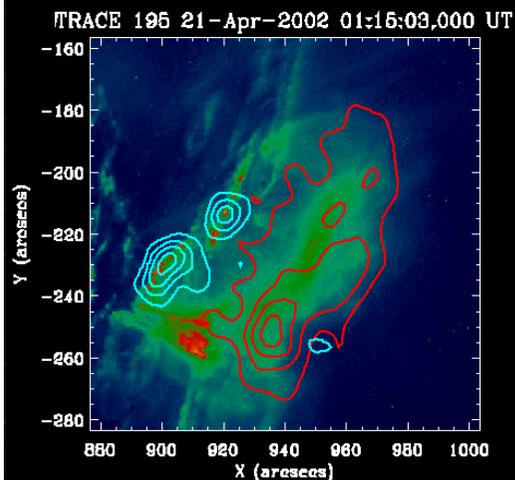
# NoRH/TRACE/RHESSI



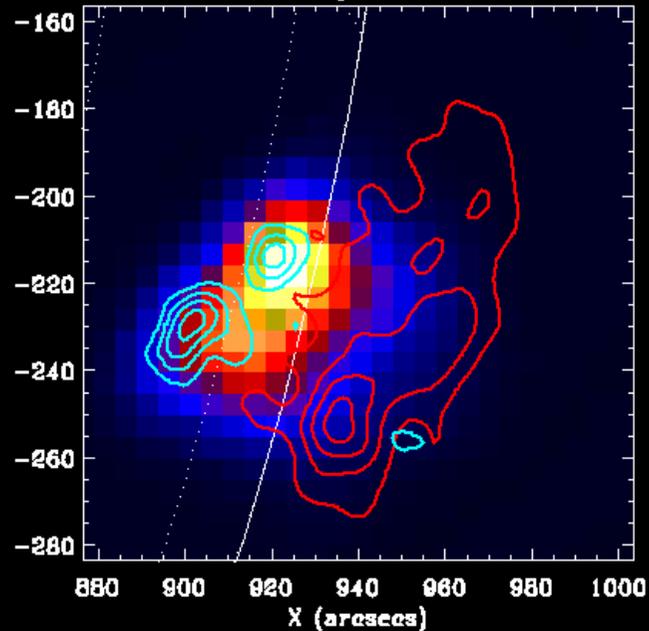
17GHz + RHESSI

34GHz + RHESSI

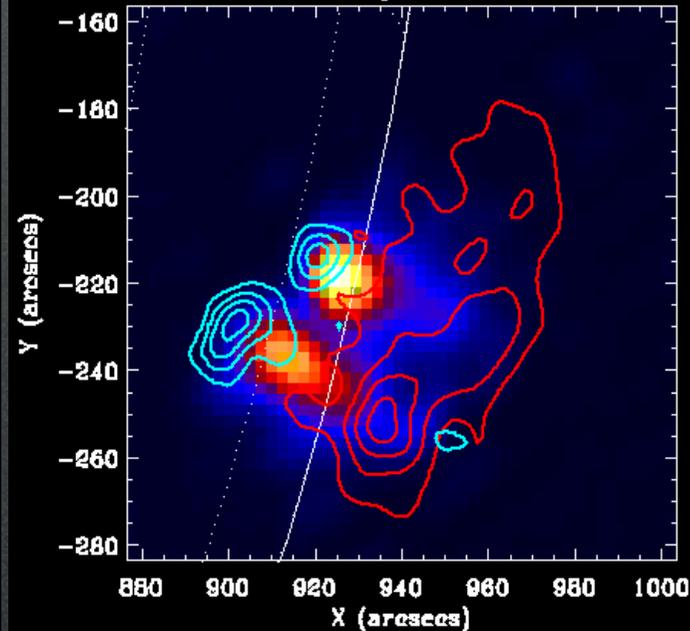
RHESSI/TRACE



NoRH 17GHz r+l 21-Apr-2002 01:15:16.880 UT



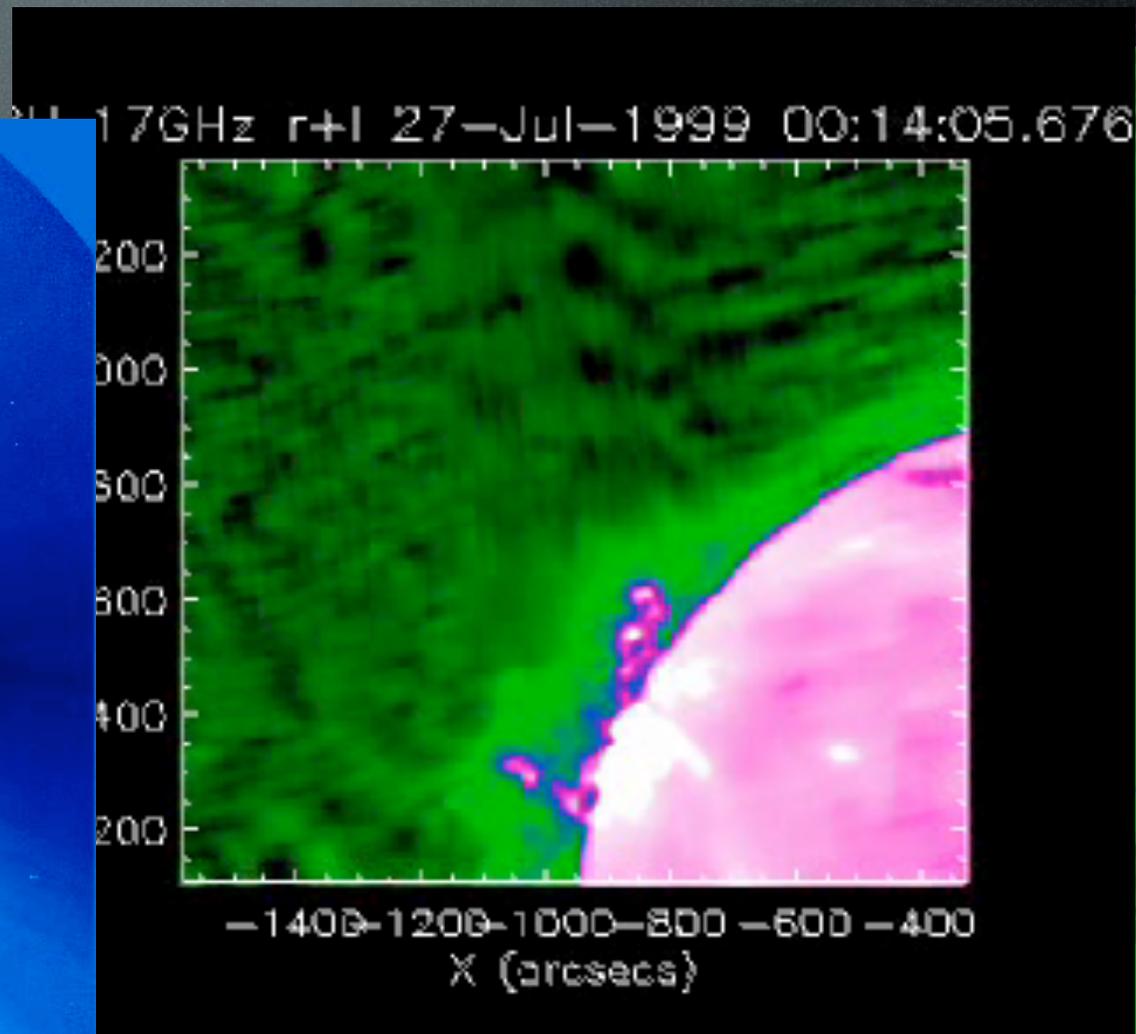
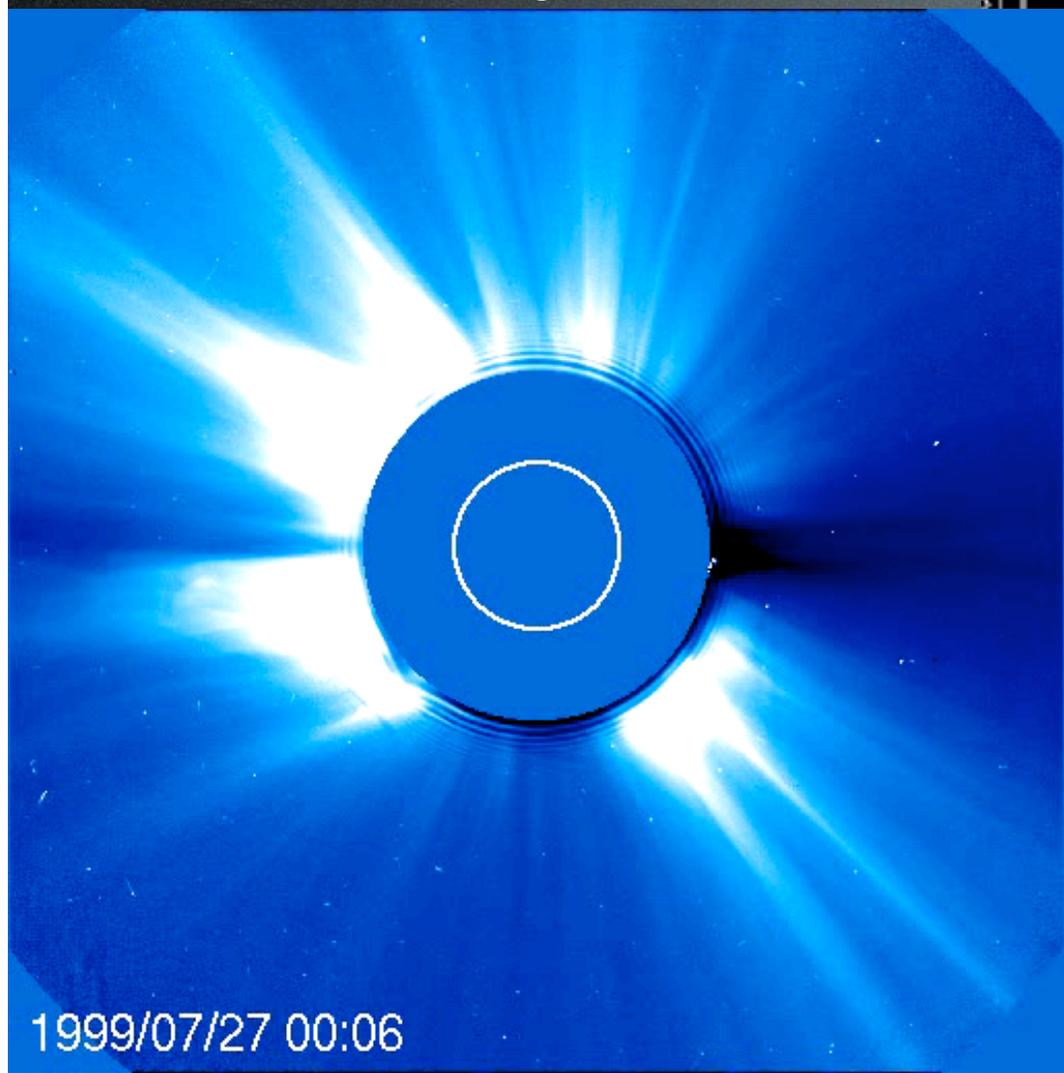
NoRH 34GHz r+l 21-Apr-2002 01:15:16.932 UT



赤 : 10 keV, 青 : 40 keV

# 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

# これからの太陽電波研究

新しい観測装置⇒ALMA

Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array

世界最大のミリ波・サブミリ波電波干渉計

- 観測周波数 85 GHz - 1 THz
- 最大基線長：15 km
- アンテナ：66台



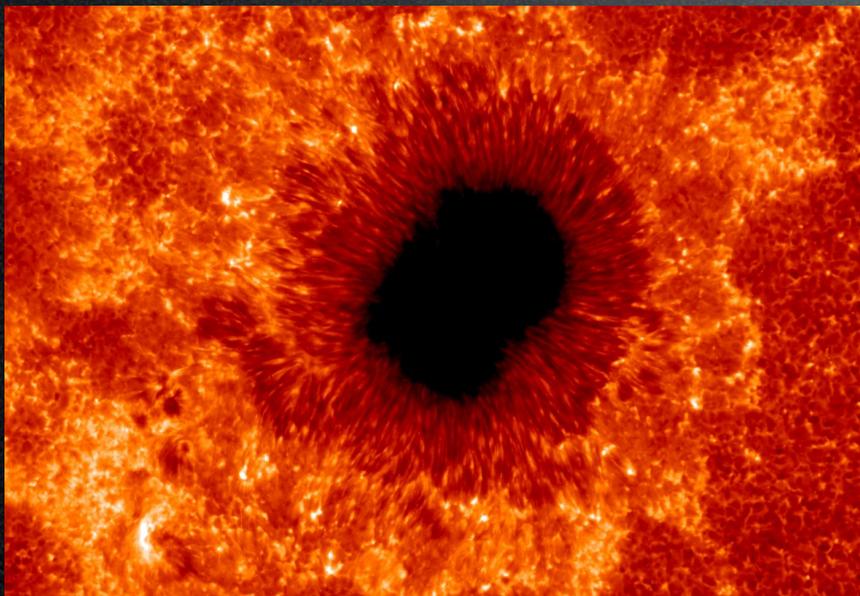
# ALMAでのサイエンターゲット

## フレアによる粒子加速機構の解明

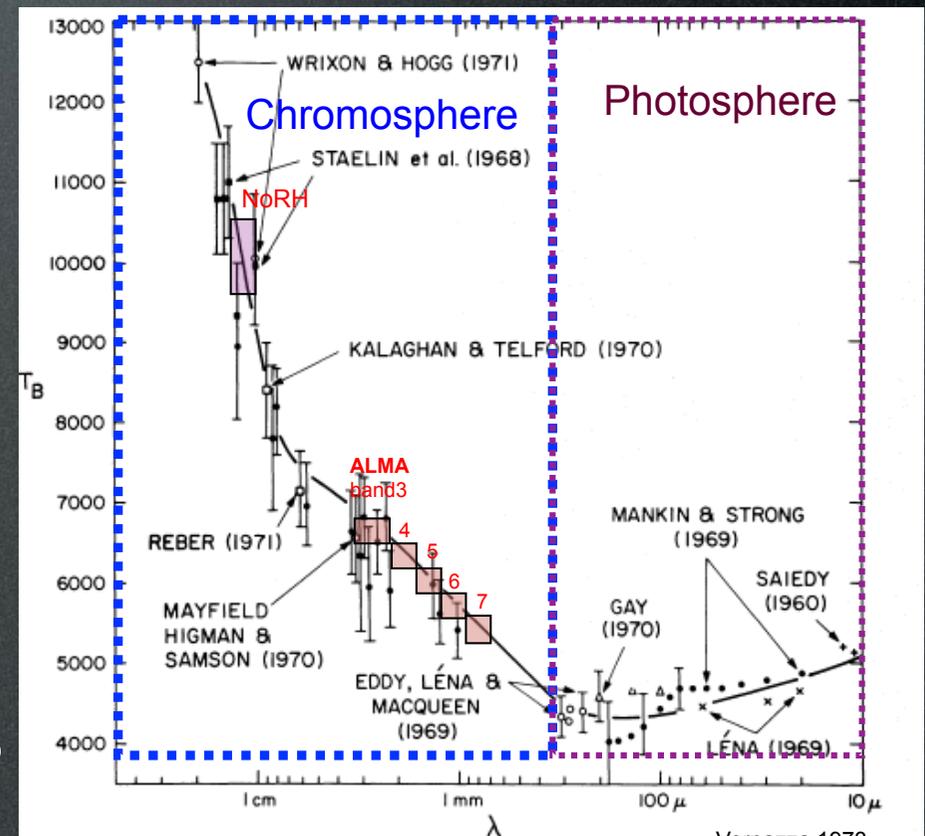
- \* 1"以下のスケールでの電子の分布

## 彩層下部での、超高空間分解能観測

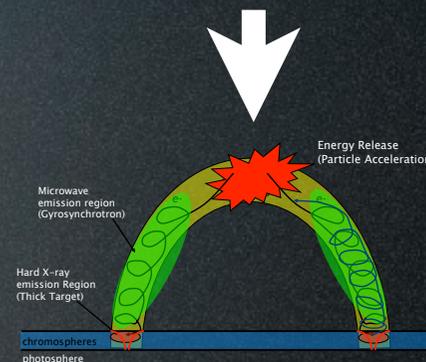
- \* 磁束管の運動・波動伝搬・彩層活動の微細構造  
⇒コロナ加熱/太陽風問題



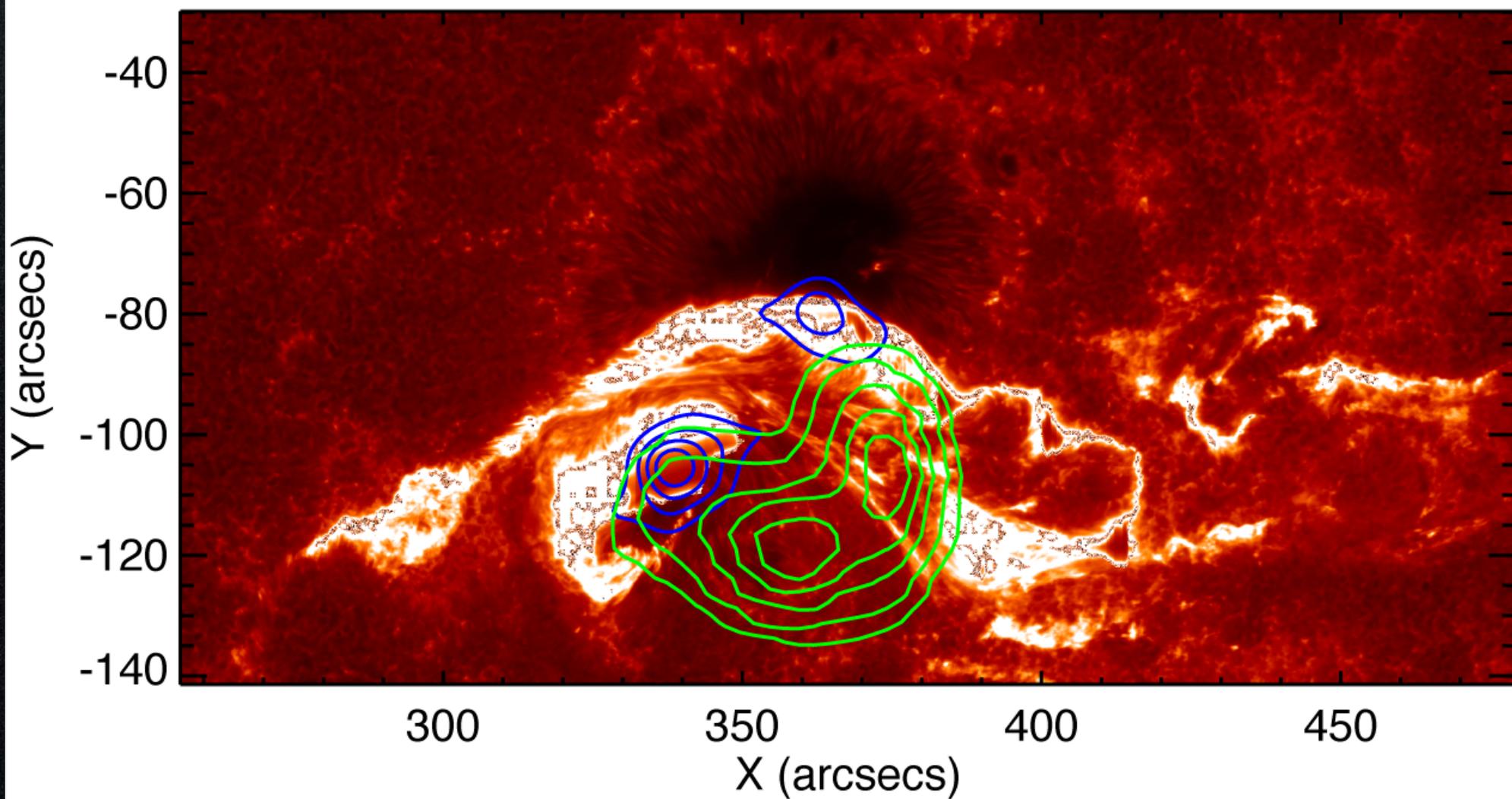
この絵を、0".01秒角分解能で見る



# ひので/NoRH/RHESSI



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



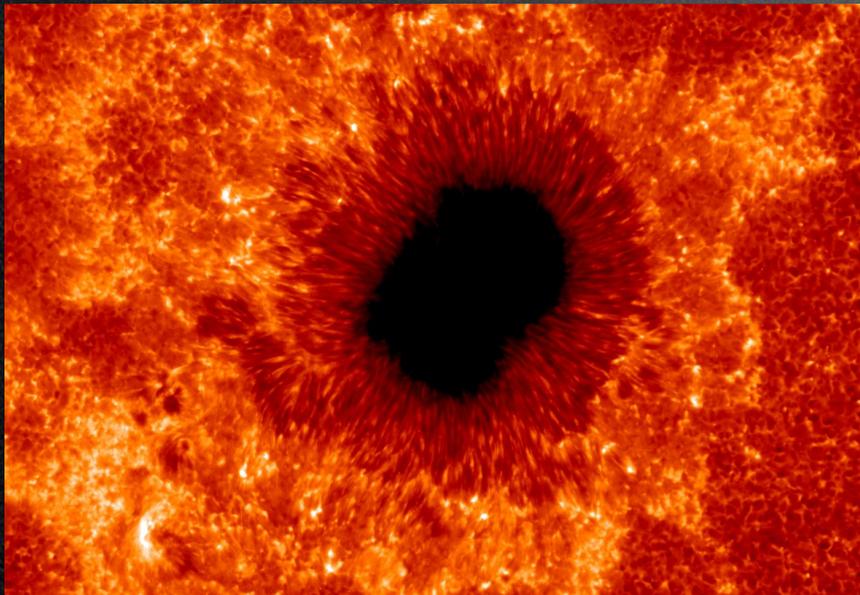
# ALMAでのサイエンターゲット

## フレアによる粒子加速機構の解明

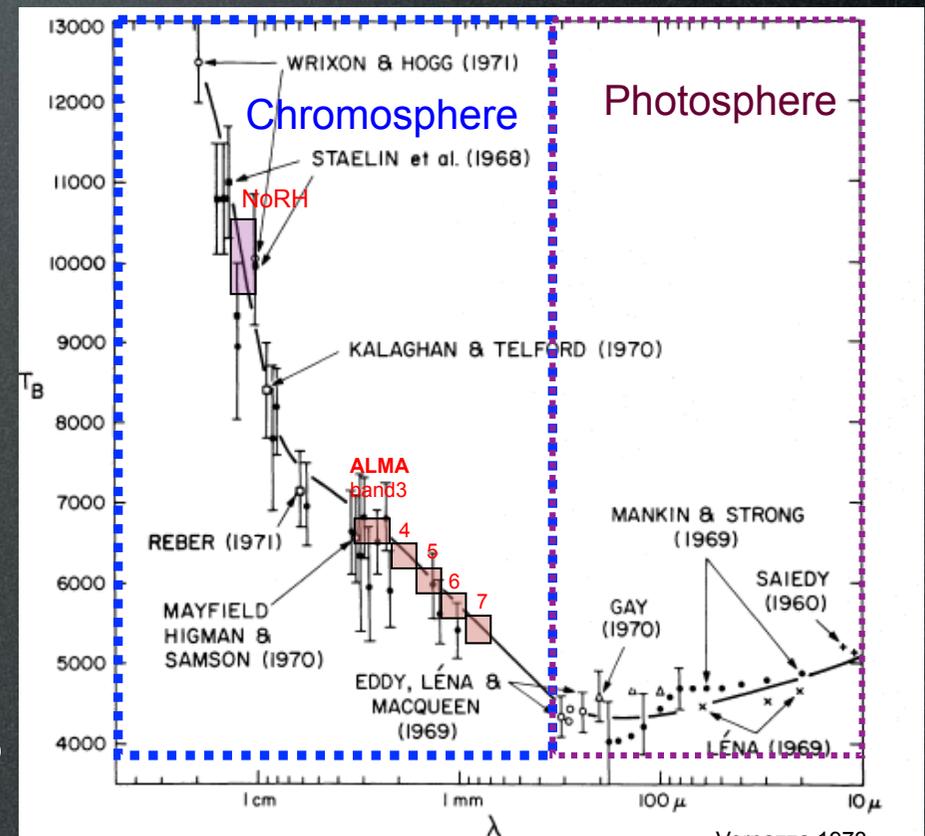
- \* 1"以下のスケールでの電子の分布

## 彩層下部での、超高空間分解能観測

- \* 磁束管の運動・波動伝搬・彩層活動の微細構造  
⇒コロナ加熱/太陽風問題



この絵を、0".01秒角分解能で見る



# 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]

- 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