

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 第6講

電波でみる太陽

国立天文台・野辺山太陽電波 下条圭美

2011/08/18@NSRO/NAOJ

自己紹介

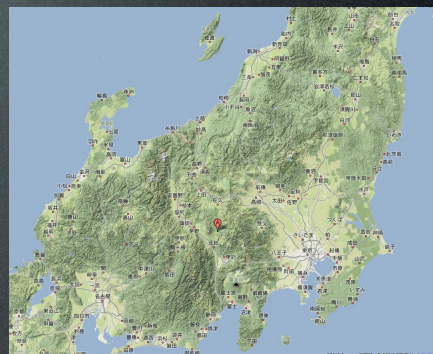
- 下条圭美 (しもじょう ますみ)
 - E-mail: shimojo@NRO (NROはnro.nao.ac.jpに変換)
- 略歴
 - 栃木県宇都宮市生まれ
 - 東海大学 [学部・修士] ⇒ 総研大 [博士 1999年3月修了]
 - 学部4年から天文台で研究を開始 [師匠は京大の柴田教授]
 - 1999-2000：JAXA/ISAS COE研究員
 - 2000-：国立天文台・野辺山太陽電波観測所 助教
 - 総研大提携教官 (現在、博士課程の学生1名を指導)
 - 今年11月から三鷹へ勤務地異動の予定
- 専門および現在進行中のプロジェクト
 - 観測による太陽活動現象
 - 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
 - ALMAによる太陽観測の実現と推進
- 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

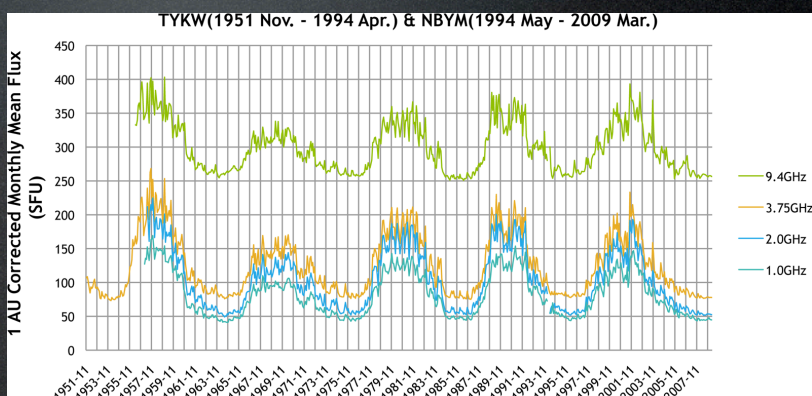
- 住所：長野県南佐久郡南牧村野辺山
 - 標高 約1300 m
 - 四方を山に囲まれた土地
 - 2月は -20°C を下回る気温
- 1969年開所：今年で42年目
 - マイクロ波（GHz帯）の太陽観測
 - 1988年に名古屋大学空電研の太陽電波グループと国立天文台の野辺山太陽電波観測所が合流し、現在の観測所になる。



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)

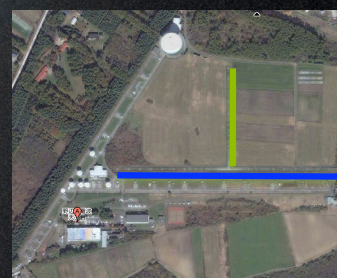
- 太陽全面から放射されるマイクロ波の強度と偏波（円偏波）を観測
- 観測周波数（全7周波）
 - 1, 2, 3.75, 9.4, 17, 34, 80GHz
- 観測開始年
 - 1, 2 GHz：1957年
 - 3.75 GHz：1951年
 - 今年で60年目
 - 9.4GHz：1956年
 - 17GHz：1978年
 - 34GHz：1983年
 - 80GHz：1984年



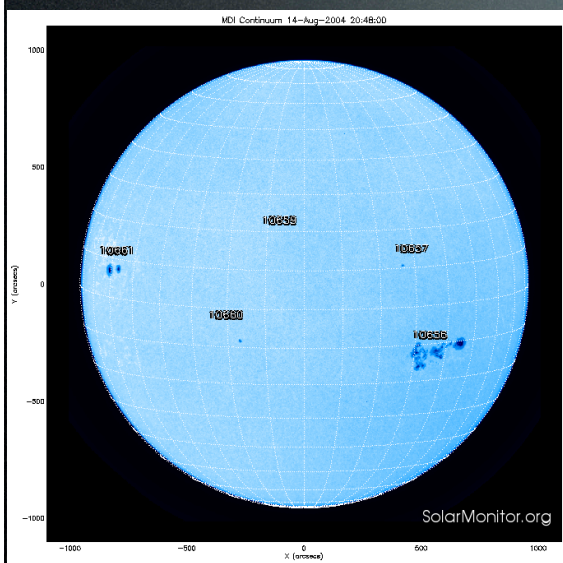
野辺山太陽電波観測所の観測装置:2

野辺山電波ヘリオグラフ(NoRH)

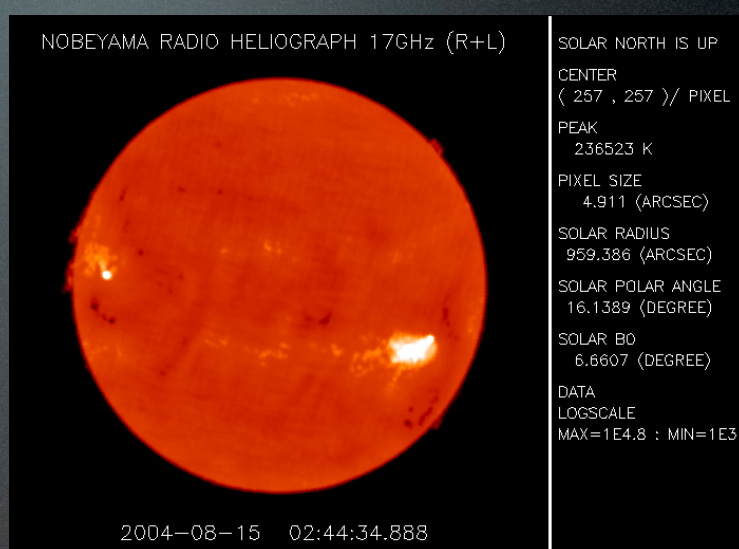
- 太陽専用の電波干渉計
- アンテナ口径：80 cm
- アンテナ数：84台
- 観測周波数：17/34 GHz
- 基線長：南北250m/東西500m
 - 空間分解能：10" @ 17GHz / 5" @ 34GHz
 - ひのでSOT：0.2-0.3" @ 可視光 (口径50cm)
 - ひのでXRT：~2" @ X線 (口径34cm)
- 観測開始：1992年7月 (来年で20年)
 - 現在でも世界で唯一17/34GHzにて太陽像を取得できる望遠鏡



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

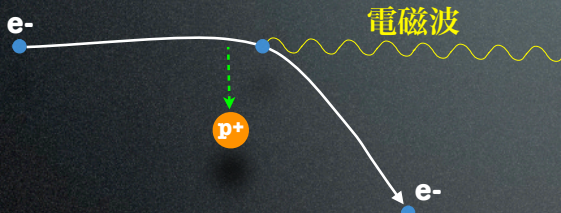
電波画像は何を見ているのか？

- ◎ 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

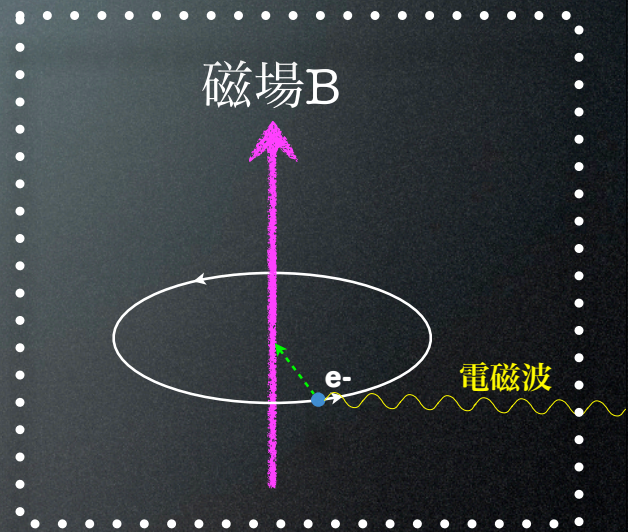
太陽大気は何から出来てる？

- 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

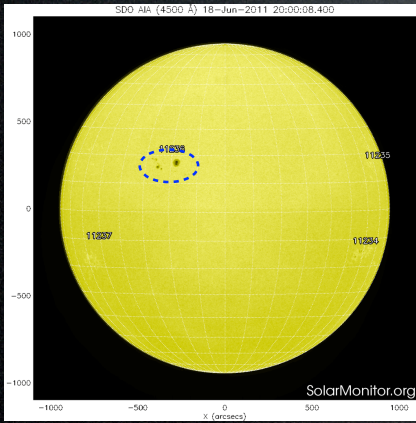
e:電荷
B:磁場
m:電子の質量
c:光速

黒点周辺で見える

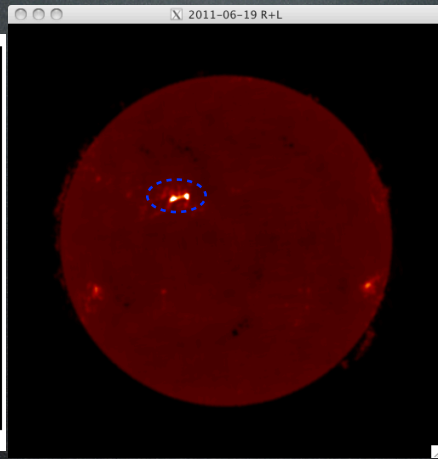
ジャイロレゾナンス放射

- 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

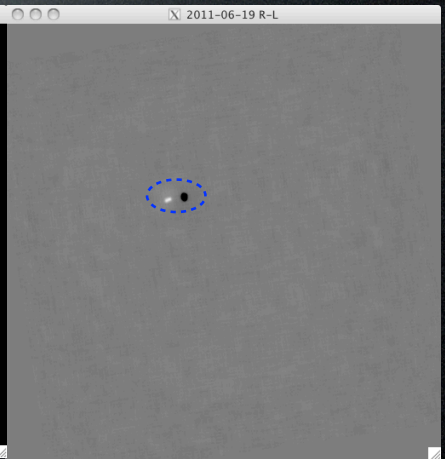
可視光



17GHz 強度



17GHz 円偏波率



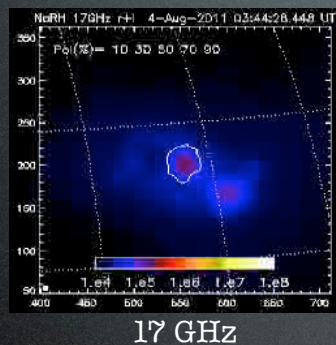
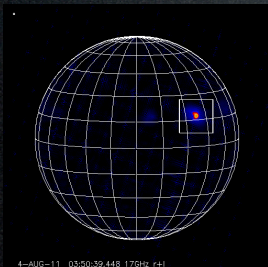
ジャイロレゾナンスによる放射は磁場強度により円偏波率が增大。磁場の情報が得られる。

フレア時に見られる

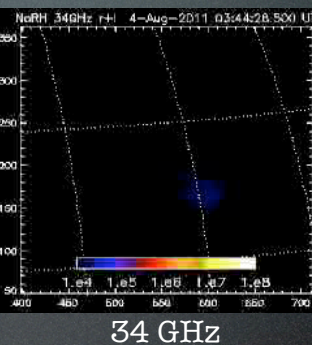
ジャイロシンクロトロン放射

- 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。

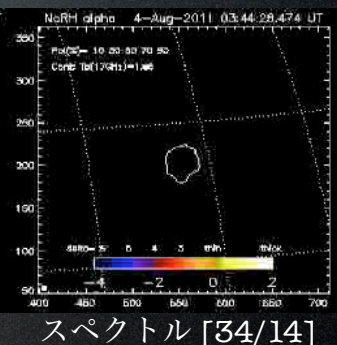
2011/8/4 Flare



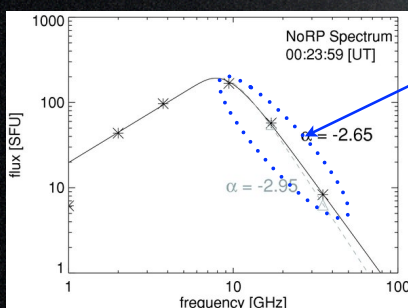
17 GHz



34 GHz



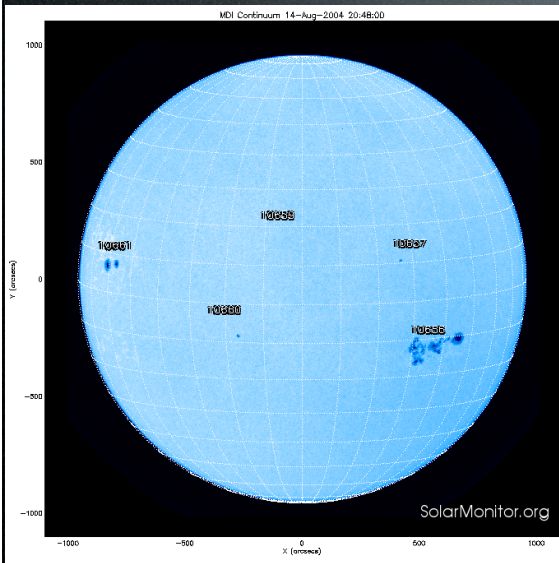
スペクトル [34/14]



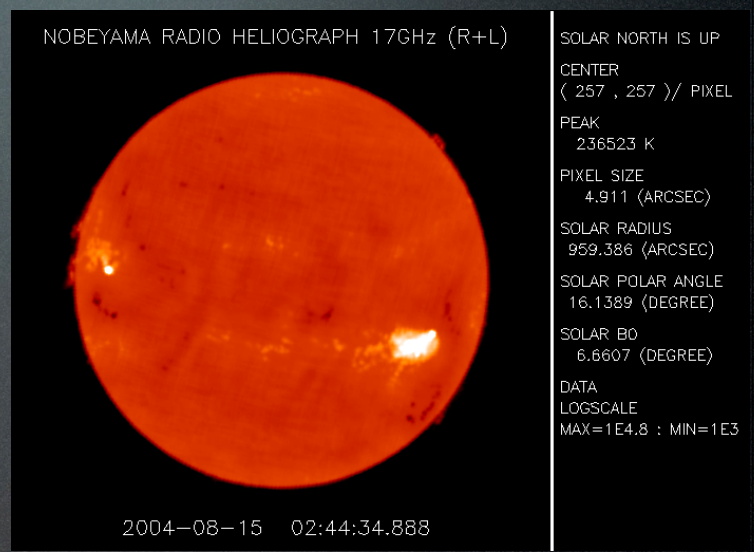
このスペクトルが電子のエネルギーの分布を示している。

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

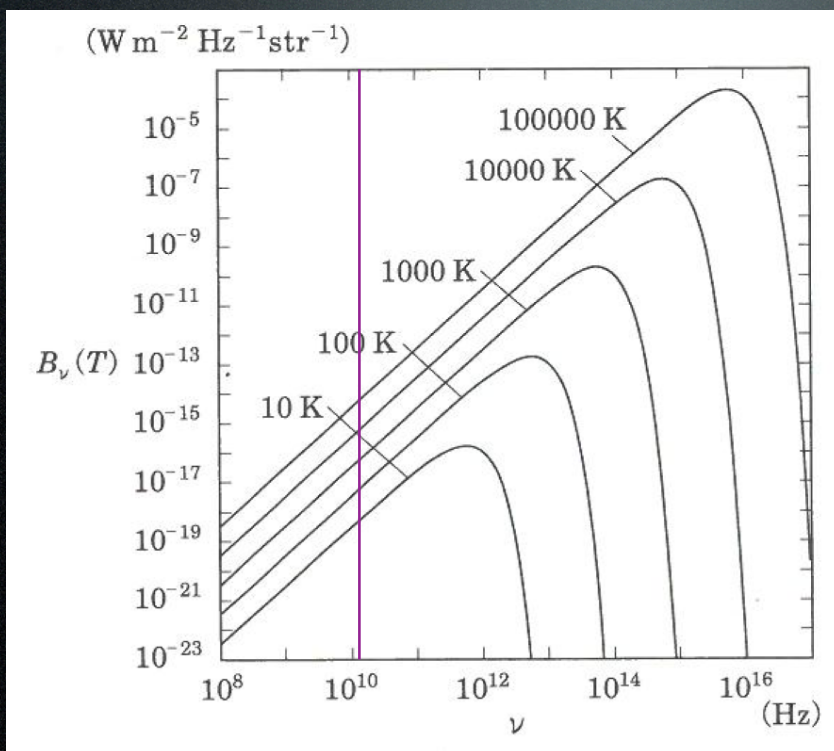


可視光
(MDI/SOHO)



電波[17 GHz]
(野辺山電波ヘリオグラフ)

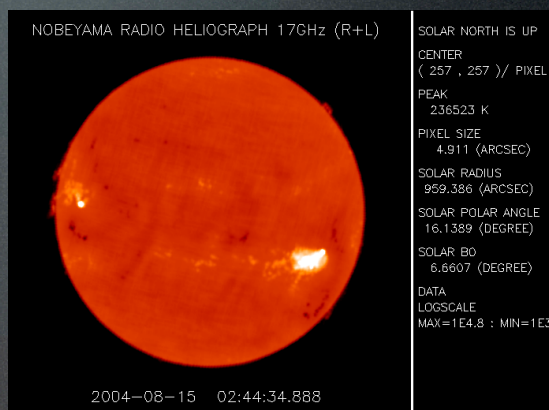
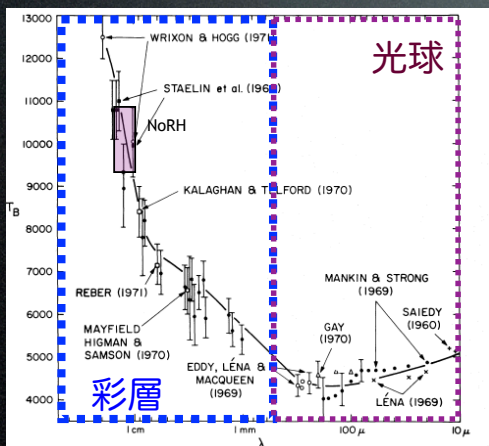
大いなる熱放射 [黒体放射]



- 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？

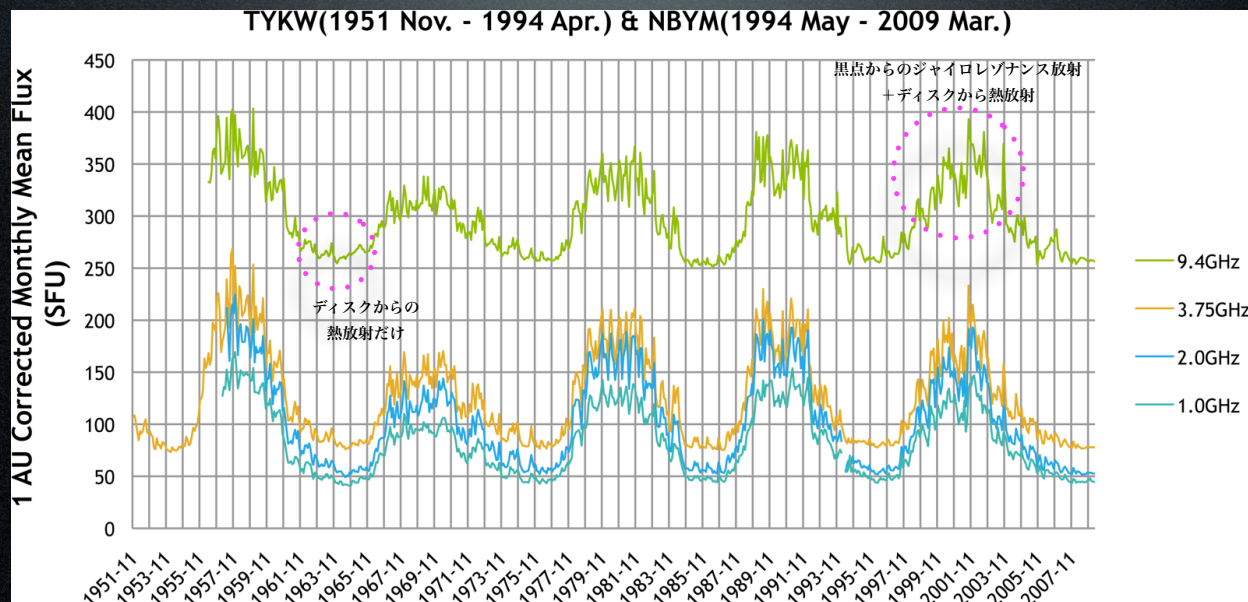
- 輝度温度：電波の強度の指標。
 - その放射が、光学的に厚いプラズマから来ていれば、**輝度温度=プラズマの温度**
 - ディスクからのマイクロ波放射は、ほぼ光学的に厚いプラズマからの放射。



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°)の分解能を持つ望遠鏡を作るとすると、
 - 波長 5700 Å (黄色) ⇒ 口径 **14 cm** の主鏡
 - 波長 1.7 cm (17GHz) ⇒ 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。 ⇒ 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

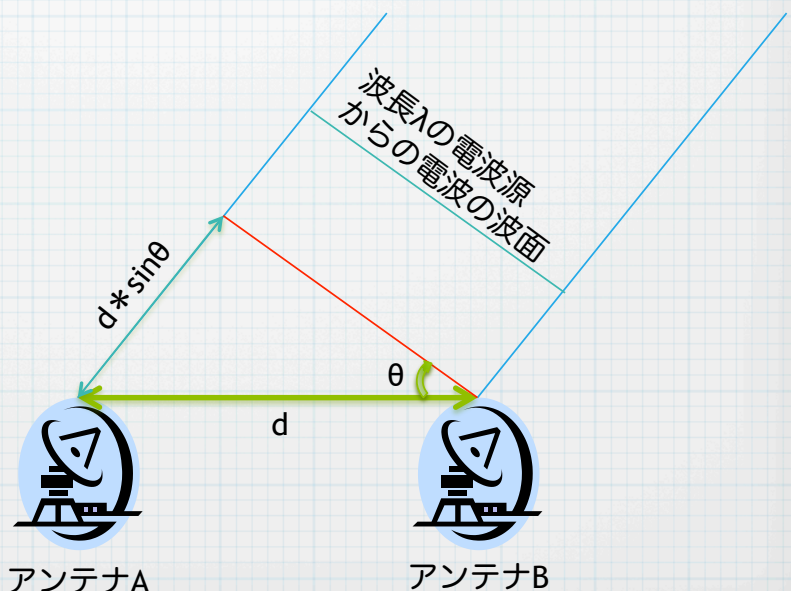
- 全ての関数は、周期の異なるsinとcos関数の足し合わせ（フーリエ級数）で表現できる。

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

- 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.

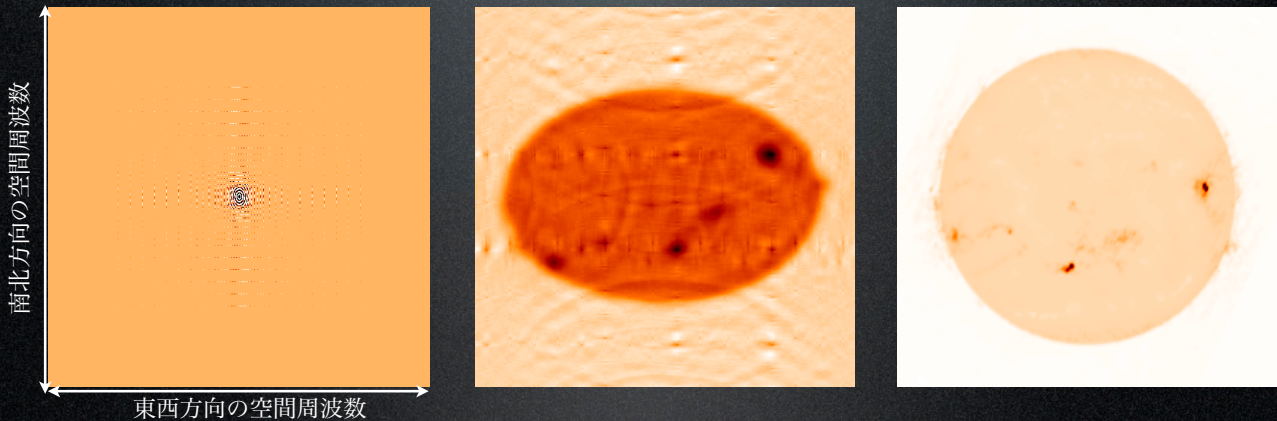
電波干渉計は天空の フーリエ級数の係数測定機

- * 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ーをかけたデータを取得できる。



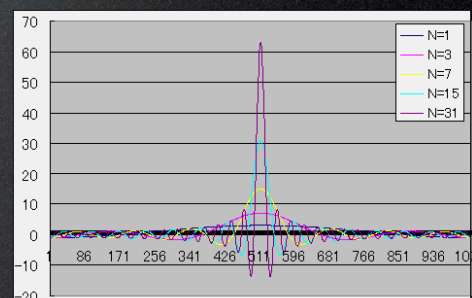
電波画像が出来るまで。

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。（機器校正）
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、画像の不確実性が大きい。
 - 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？

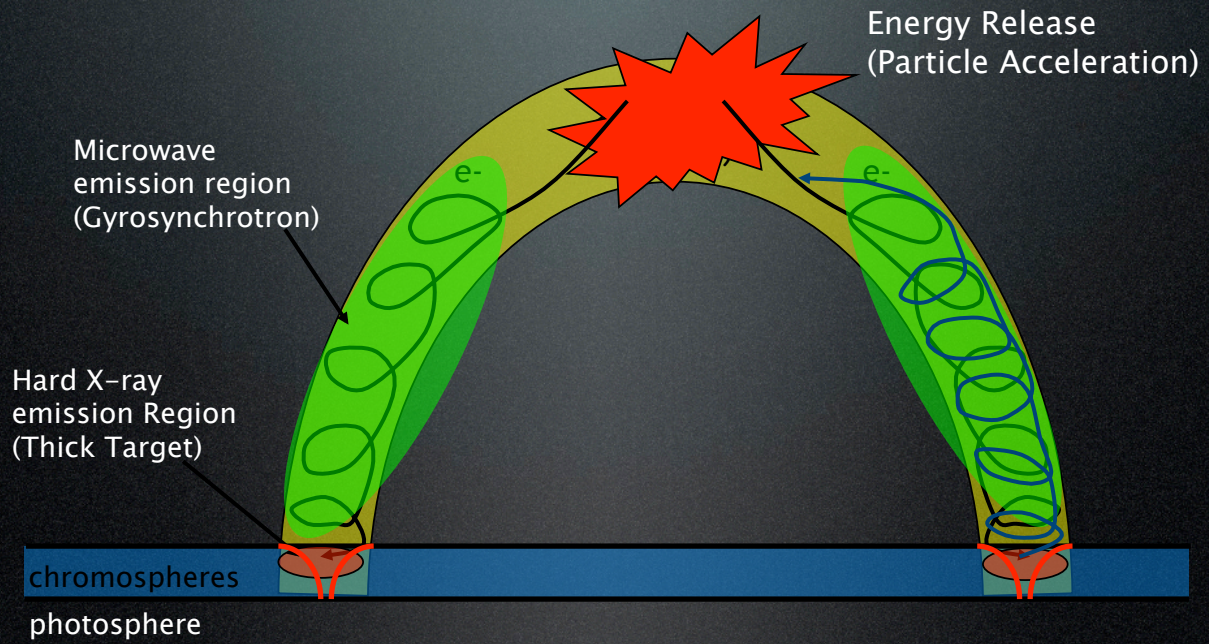
- ◎ 何が電波[マイクロ波]を出しているのか？
 - ✓ 何の情報が電波から得られるのか？
- ◎ 電波の像を作るには・・・
- ◎ “これまで”・”これから”の太陽電波観測

これまでの太陽電波における

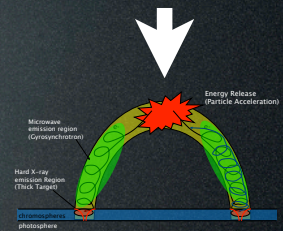
サイエンスターゲット

- 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。

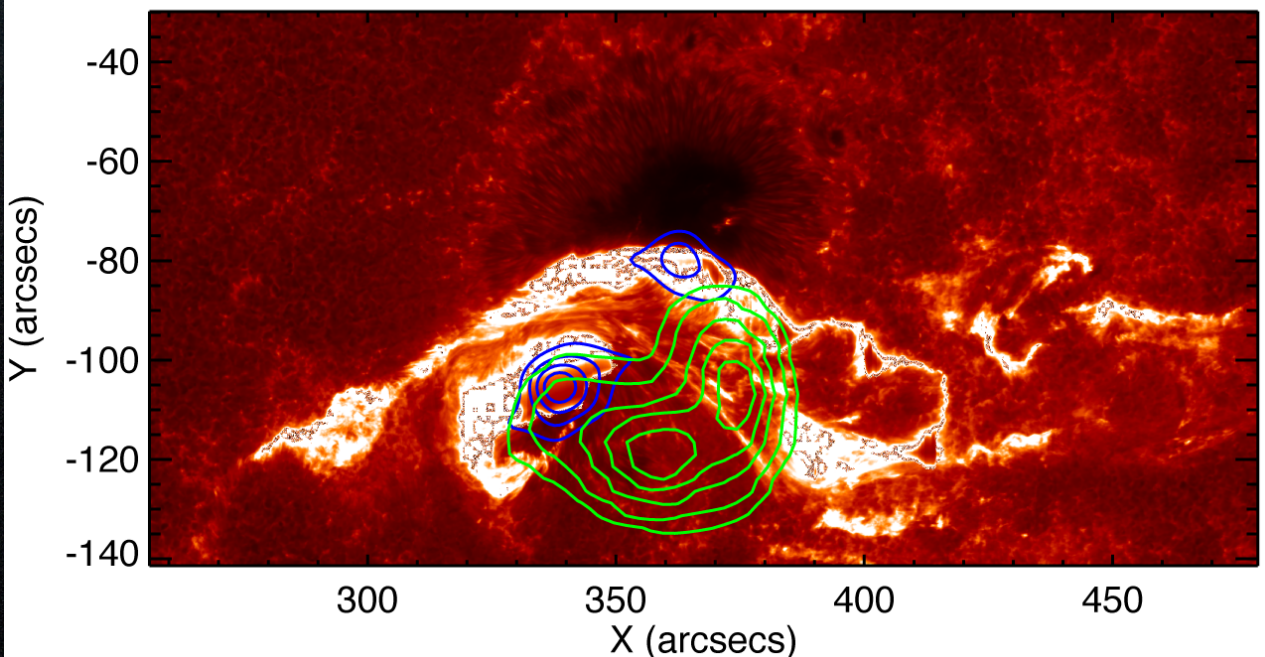
フレア内の電子の動き



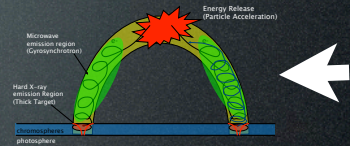
ひので/NoRH/RHESSI



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



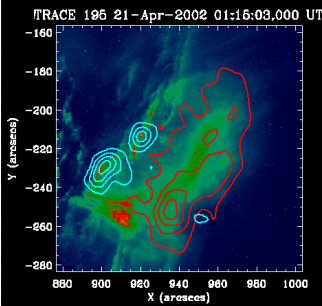
NoRH/TRACE/RHESSI



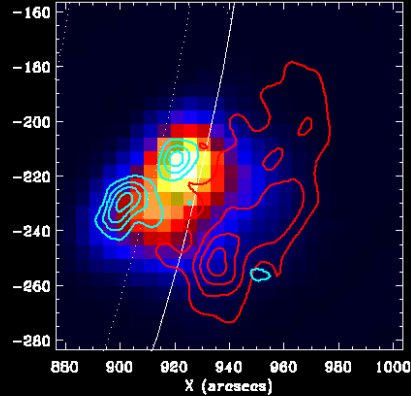
17GHz + RHESSI

34GHz + RHESSI

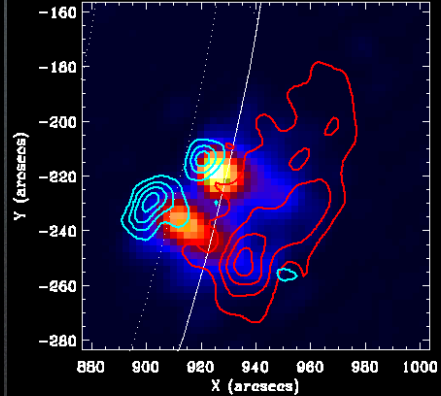
RHESSI/TRACE



NoRH 17GHz r+l 21-Apr-2002 01:16:16.880 UT



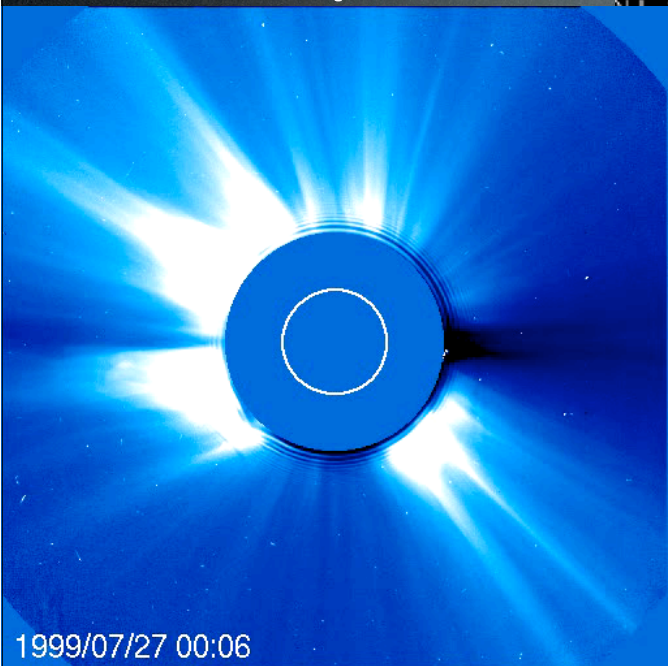
NoRH 34GHz r+l 21-Apr-2002 01:16:16.982 UT



赤：10 keV, 青：40 keV

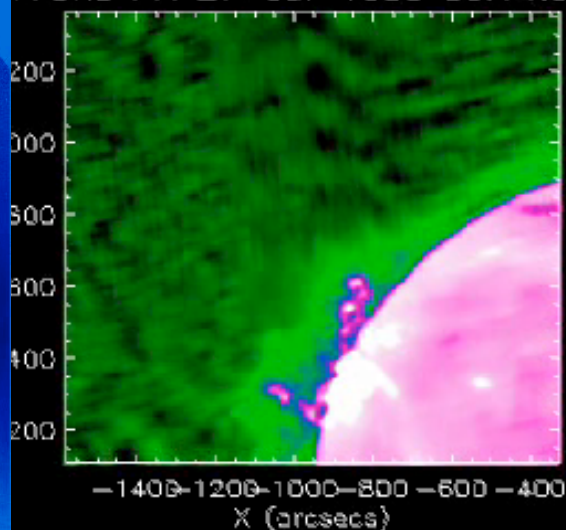
電波でみるプロミネンス放出

プロミネンス/ダークフィ



1999/07/27 00:06

NoRH 17GHz r+l 27-Jul-1999 00:14:05.676



える

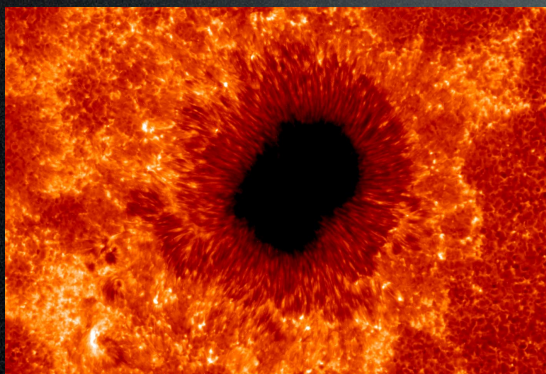
これからの太陽電波研究

- 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 300 GHz - 1 THz
 - 最大基線長：14 km
 - 空間分解能（最大）：0".01

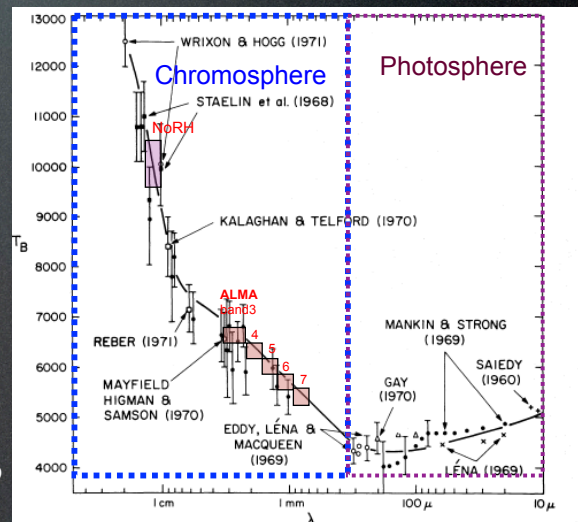


ALMAでのサイエンスターゲット

- 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



ALMAでの太陽観測

- 現在ALMAにおいて、太陽試験観測プロジェクトが**日本のリード**により実行中。
- 1年後の共同利用開始を目指している。
- この周波数帯の太陽研究は皆無に近い。
- 今からやれば、すぐ世界の第一人者に。
 - ただし、誰もやった事が無い世界・・・。

これから太陽電波研究をする為には

- 大学院
 - 総合研究大学大学 天文科学専攻 [修士・博士]
 - 野辺山：柴崎 [NoRH]
 - 三鷹：下条 [ALMA/NoRHプロミネンス放出]
 - 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
 - 名古屋大学 太陽地球環境研究所 [増田研]
 - 硬X線を含んだ粒子加速研究

おわり