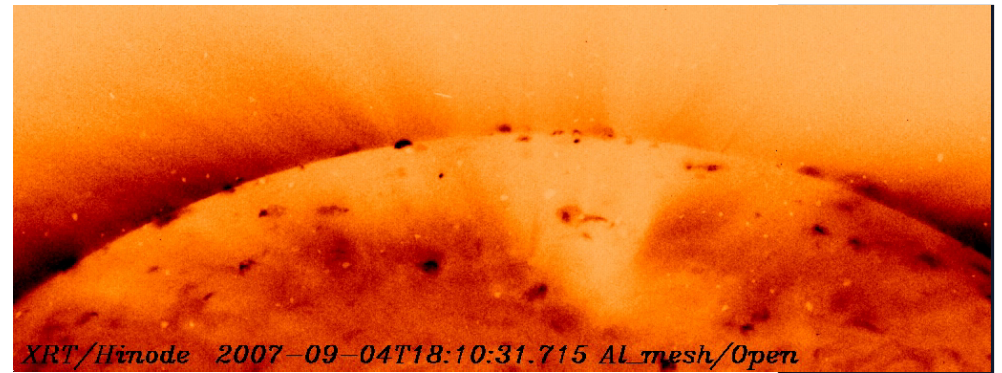


講義 7 電波で見る太陽

下条圭美 (しもじょうますみ)
国立天文台・野辺山太陽電波観測所

自己紹介



◎ 下条 圭美 (しもじょう ますみ)

◎ 経歴

- 東海大・理[学部・修士]→総研大[博士:1999年3月修了]
 - 卒業研究(学部4年)からこの業界に入る。
- 1999~2000: JAXA・宇宙科学研究所 COE研究員
- 2000~ : 国立天文台・野辺山太陽電波観測所 助教

◎ 専門

- 観測による太陽活動研究
 - フレア・ジェット・プロミネンス放出現象の研究
 - 観測による太陽周期の研究
- 太陽データ解析環境/データベースシステムの構築
- 画像解析による太陽活動現象の自動検出

◎ 所属学会

- 日本天文学会・日本地球惑星科学連合・IAU・AAS・AGU

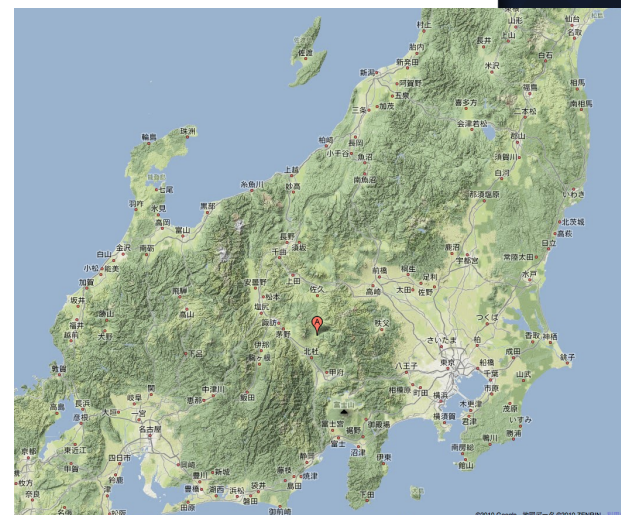
国立天文台 野辺山太陽電波観測所

◎ 所在：長野県 野辺山高原

- 標高 約1300m
- 四方を山に囲まれた場所
 - 西に八ヶ岳、東に秩父山系と山に囲まれている。
 - 昔はradio quietだったが、今は携帯電話などで、radio loudな場所になってしまった。
- 2月にはマイナス20℃を下回る気温。
 - 水蒸気量が少なくなり、高周波観測に最適（野辺山宇宙電波観測所も隣接。）
 - 雪は少ないが、一度降ったら溶けない場所。

◎ 1969年開所：今年で創立41年目

- 初期は130MHz帯の干渉計などもあったが、基本的に太陽から放射されるマイクロ波(GHz)の観測を行っている。
- 1988年名古屋大学空電研の太陽電波グループと東京天文台の太陽電波グループが合流し、国立天文台の野辺山太陽電波観測所となる。



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)

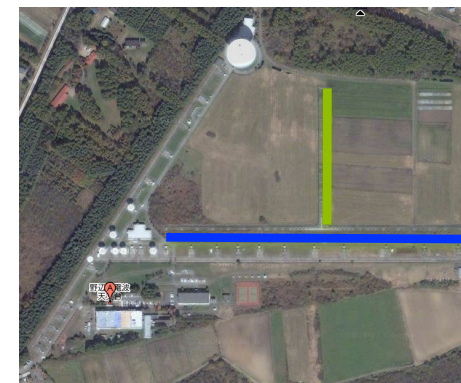
- ◎ 視野：太陽全面
- ◎ 空間分解能：なし
- ◎ 観測周波数
 - 1, 2, 3.75, 9.4, 17, 34, 80 GHz
- ◎ 時間分解能：0.1 秒
- ◎ 観測時間：7時-16時 (JST)
 - 季節により変動
- ◎ 1,2,3.75, 9.4, 17, 34 GHzでは、円偏波(R+L, R-L)を測定
 - 80GHzは、干渉強度計となっている
- ◎ 観測開始年
 - 1,2: 1957年, 3.75:1951年, 9.4:1956年, 17: 1978年, 34:1983年, 80:1984年
 - 1,2,3.75, 9.4 GHzは、1994年まで名古屋大学空電研(豊橋)で観測し、その後野辺山へ移設した



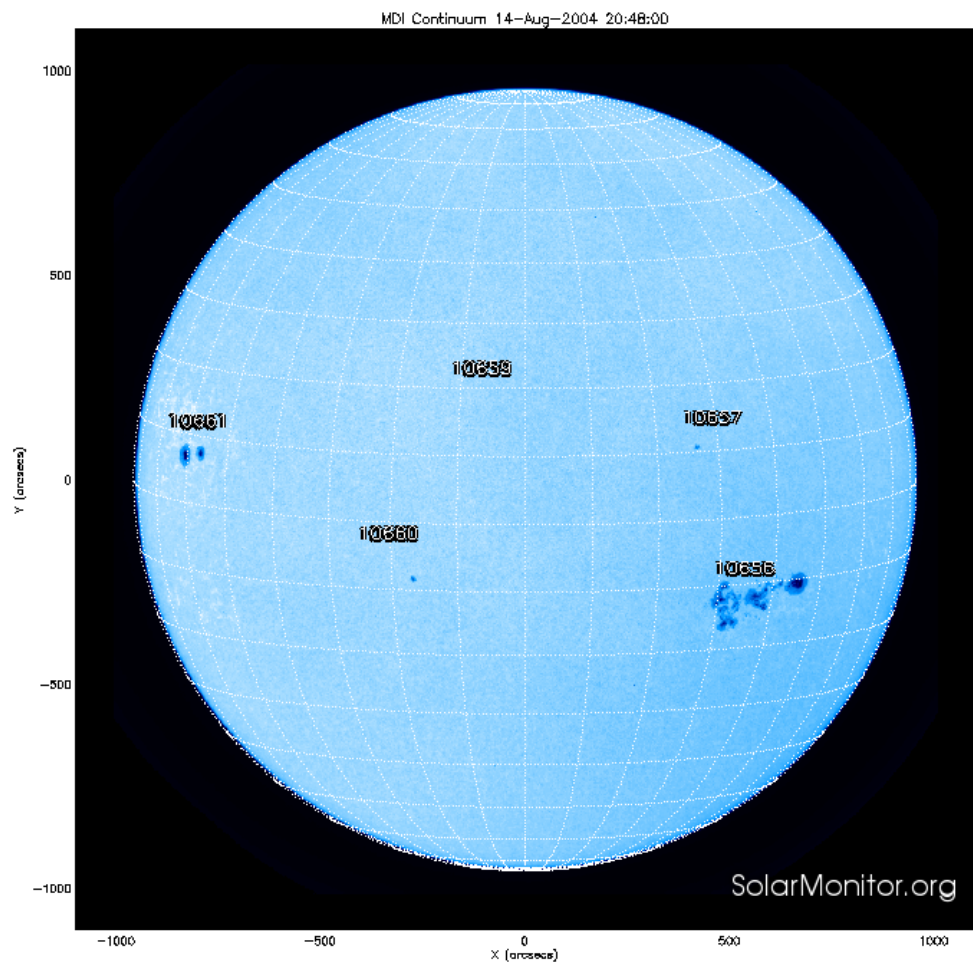
野辺山太陽電波観測所の観測装置: 2

野辺山電波ヘリオグラフ(NORH)

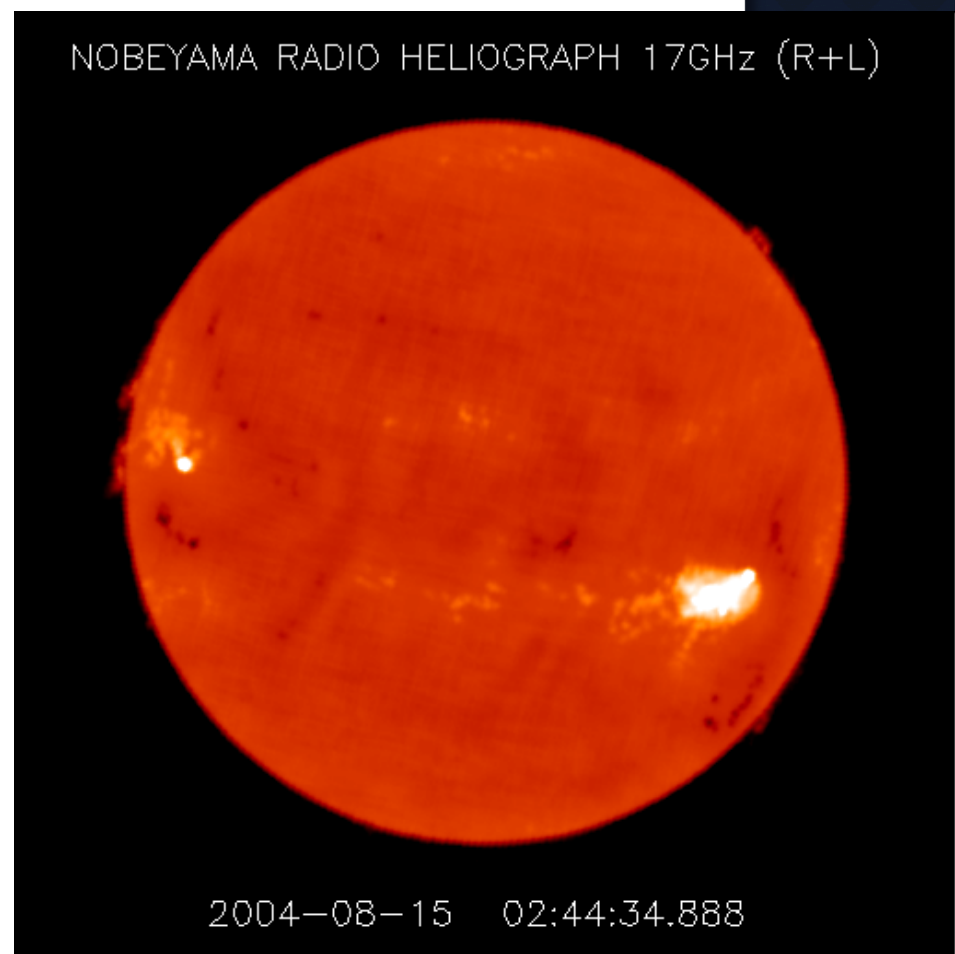
- ◎ 太陽専用の電波干渉計
- ◎ 視野：太陽全面
- ◎ パラボラ口径：84cm
- ◎ アンテナ数：84台
- ◎ 基線長：
 - 東西500m, 南北250m
- ◎ 観測周波数：17GHz, 34GHz
- ◎ 空間分解能：10”@17GHz, 5”@34GHz
- ◎ 偏波測定：17GHzのみ円偏光を測定可
- ◎ 時間分解能：
 - イベント時：0.1 sec, 定常時：1 sec
- ◎ 定常観測開始：1992年7月
 - 34GHzは、1995年11月から観測開始
- ◎ 観測時間：7:30~15:30JST (季節により15分程変動)



野辺山電波ヘリオグラフで見た太陽



可視光画像 (MDI/SOHO衛星)



17GHz画像 (NoRH)

SOLAR N
CENTER
(257 ,
PEAK
23652
PIXEL SI
4.911
SOLAR R
959.386
SOLAR P
16.1389
SOLAR B
6.6607
DATA
LOGSCAL
MAX=1E4

講義の内容

- ◎ 太陽大気から放射される電波のメカニズム
 - GHz (波長がcm ~ mm程度) : UHF~SHF マイクロ波
 - MHz (波長がkm ~ m程度) : VHF~HF
- ◎ 干渉計データによる電波画像の合成
 - 電波干渉計とは？
 - 干渉計データから画像へ。
- ◎ マイクロ波でみた太陽活動現象
 - 太陽フレア
 - 電波で探る粒子加速
 - プロミネンス放出現象・CME
 - 宇宙空間を乱す擾乱現象

プラズマとは？ @太陽大気

- ◎ 電子とイオンで構成される気体
 - イオン化した原子を含む気体。
 - 電気を通す。
 - 磁場に拘束される。(Frozen-In)
- ◎ 太陽大気の温度構造とそれぞれの層でのイオン化
 - 光球 (6000 K) : 弱電離
 - イオン化エネルギーが低い一部の原子がイオン化
 - 彩層 (数万 K) : 弱電裏
 - 水素の一部がイオン化
 - イオン化エネルギーが低いものは、ほとんどイオン化
 - コロナ (100万 K以上) : 完全電離
 - 水素がほとんどイオン化

プラズマ(粒子)と電磁波の相互作用

◎ Free-Free

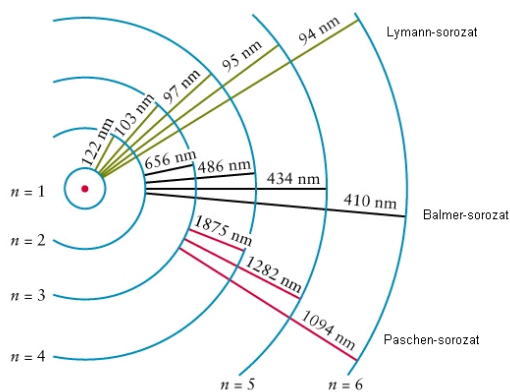
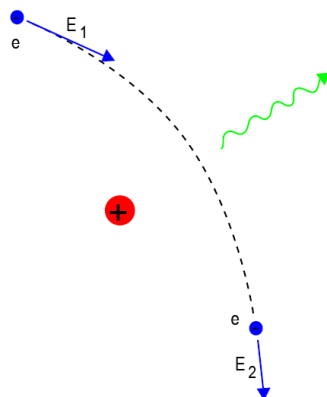
- 自由電子とイオンとの相互作用

◎ Bound-Bound

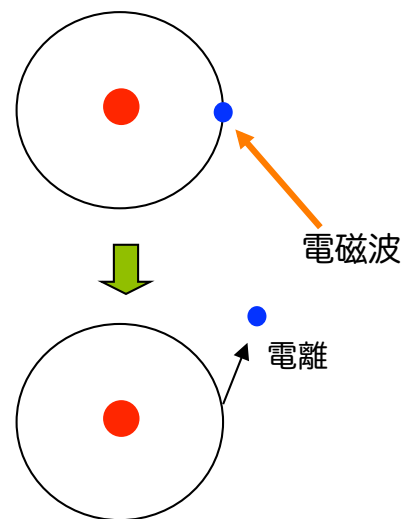
- 原子の束縛された電子のエネルギー順位の変動

◎ Bound-Free

- 電子が自由電子 \leftrightarrow 束縛された電子を行き来する変動



水素原子のエネルギー順位(Bound-Bound)



プラズマ(粒子)と”電波”の相互作用

◎ Bound-Bound

- 電子がエネルギー順位間を遷移する時のエネルギー差のほとんどは、波長換算すると電波より短波長側にある。
 - 太陽電波観測では無視。
- 分子の回転・振動エネルギー順位の違いは、電波の波長範囲。
 - 低温ガス（数百K以下）の診断 - 星間分子雲の観測

◎ Bound-Free

- 水素原子によるBound-Freeの相互作用のいくつかは、電波の波長範囲の反応があるが・・・。
 - 現在のところ、太陽観測で見つかっていない。

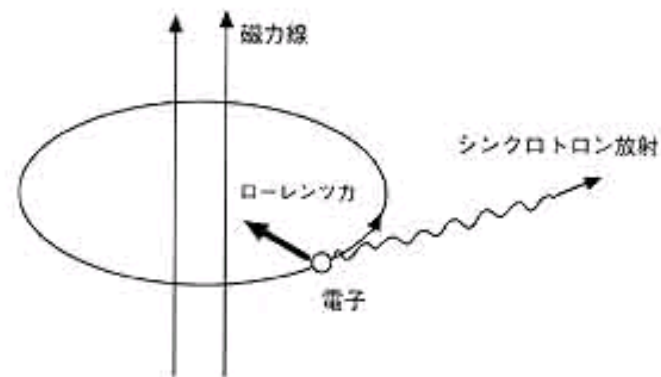
FREE-FREEと電波

◎ 制動放射

- 自由電子がイオンに”衝突”→電磁波放射
- 制動放射の肝→自由電子の運動が偏向される。

◎ 自由電子の運動を偏向するものは？

- +の電荷を持つもの：イオン[陽子]
- 磁場：ローレンツ力によるジャイロ運動



ジャイロ運動と電波

◎ 電子のジャイロ周波数

$$\Omega_e \equiv \frac{eB}{m_e c} \approx 0.2 \left(\frac{B}{10 \text{Gauss}} \right) \text{GHz}$$

◎ ジャイロ運動する電子が放射する電場の変動

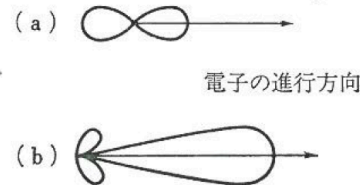
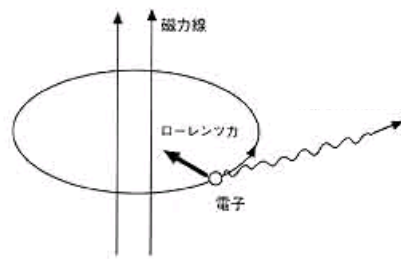
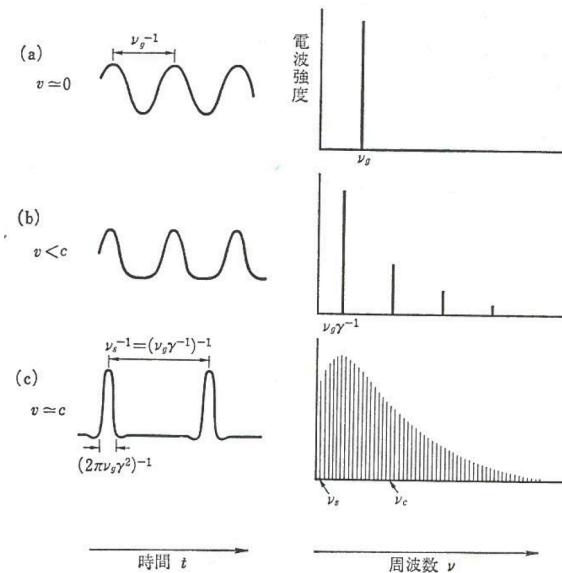


図 2.30 電子の進行方向と加速度方向とが垂直な場合に生じる双極子放射の放射強度パターン。
 (a) 電子の速度が0に近づいた場合
 (b) 電子の速度が光速に近づいた場合



ある観測点で観測される変動

フーリエ変換

- ◎ ある関数は、異なる周期の正弦関数と余弦関数の足し合わせで表現できる。
- ◎ ある関数を、フーリエ級数へ変換する= a_n, b_n を求める。

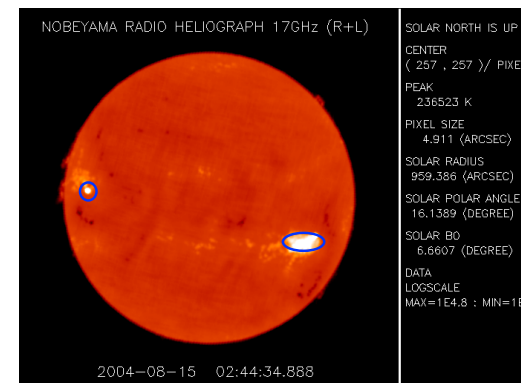
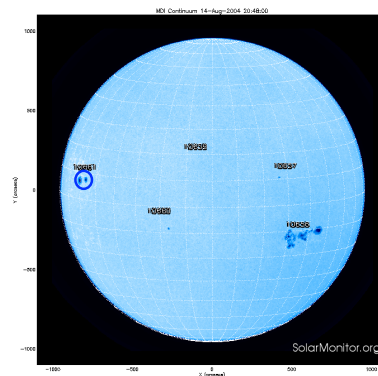
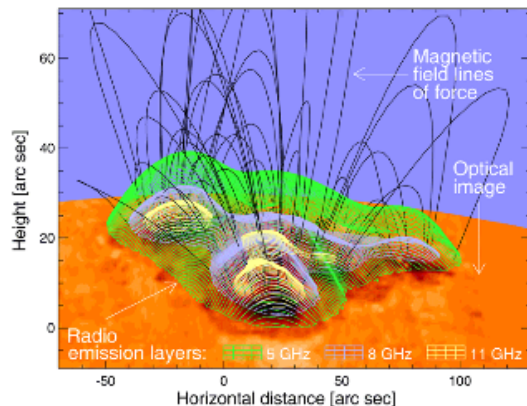
$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 x) + b_n \sin(n\omega_0 x))$$

- ◎ δ 関数をフーリエ変換すると、
全ての周波数成分で $a_n = b_n = 1$ となる。
→ δ 関数に近い関数は、
フーリエ級数の高周波成分を持っている。

太陽大気における 電子のジャイロ運動による放射： 1

◎ ジャイロ共鳴放射 (Gyro-resonance emission)

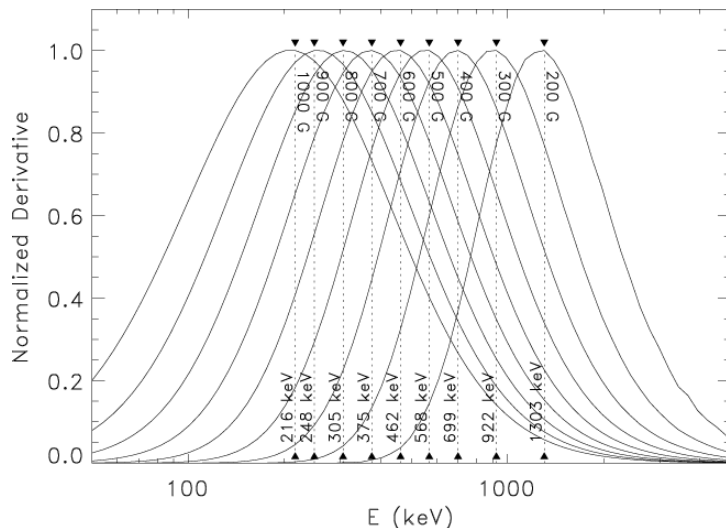
- 熱運動（速度が熱速度: $v \ll c$ ）をしている電子がジャイロ運動することにより電磁波が放射される。
- 周波数は、ほとんどジャイロ周波数。
 - 2GHz → 磁場強度100ガウスの領域から放射
 - 20GHz → 磁場強度が1000ガウスの領域から放射
- 磁場が強いところ (>1000ガウス=黒点上空) でしか、ジャイロ周波数がマイクロ波程度にならない。



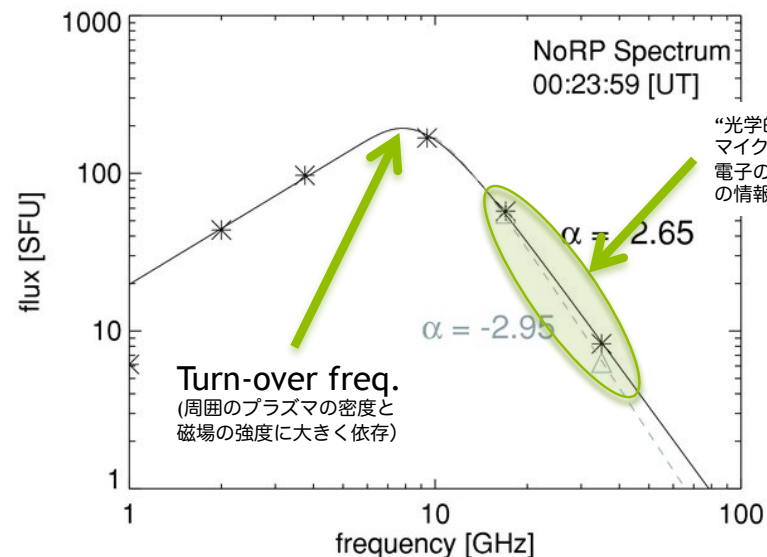
太陽大気における 電子のジャイロ運動による放射：2

◎ ジャイロ-シンクロトロン放射

- 光速の30%程度の速度まで加速された電子がジャイロ運動することにより電磁波が放射される。
 - 太陽では、フレア爆発等の活動現象が起きないと観測されない。
 - 電子の速度が、光速により非常に近い場合(~90%)は、シンクロトロン放射
- 周波数は、ジャイロ周波数×10~>100
 - 電子の速度が速ければ速いほど高周波の電磁波が放射される。
 - マイクロ波のスペクトルからマイクロ波の放射する電子のエネルギーがわかる。
- 放射は非等方的 (beamingしている)。
 - 電子の運動方向と磁場ベクトルの角度に、電場強度が強く依存する。
 - 磁場の3次元構造がわかれば、電子運動方向と磁場のなす角(Pitch-angle)がわかる。



ベキ指数-4のエネルギースペクトルをもつ非熱的電子の
17GHzの放射におけるContribution Function
(Bastien 1998)

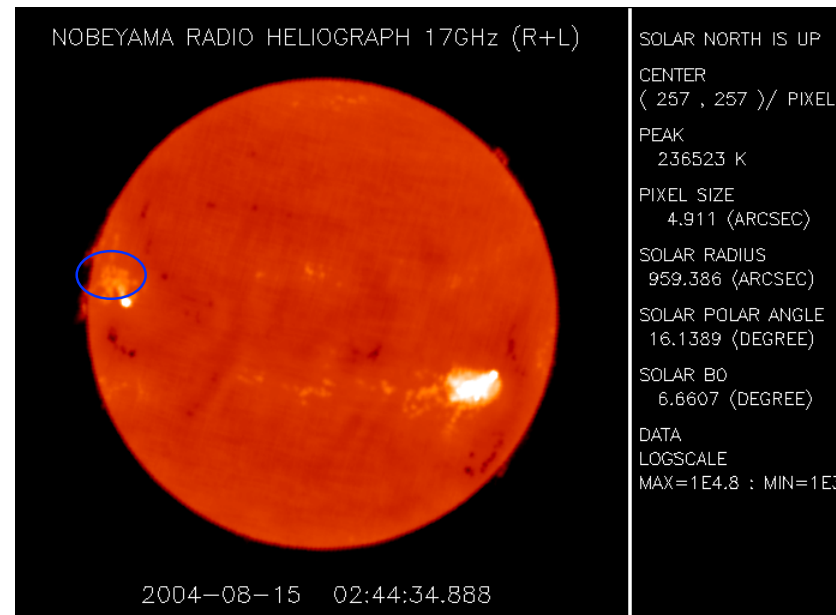
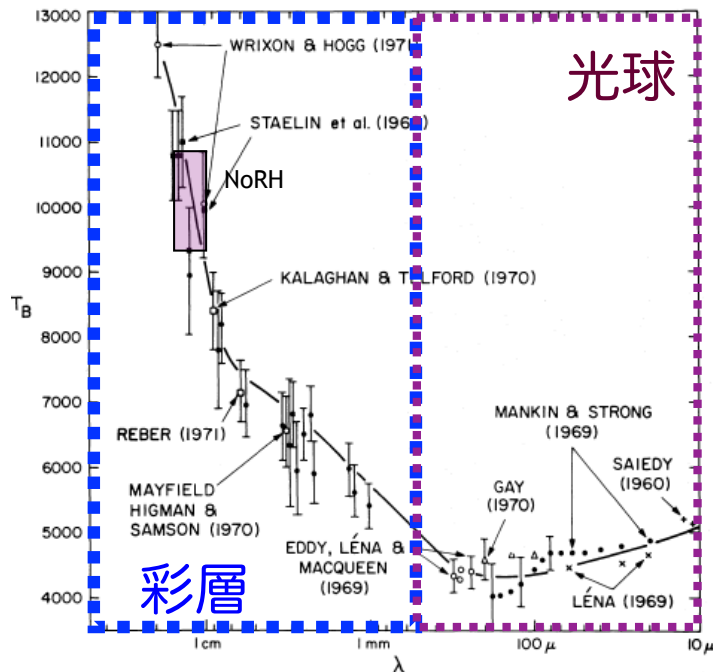


フレアによるマイクロ波スペクトルの例

“光学的薄い場所からの放射”
マイクロ波スペクトルは、
電子のエネルギースペクトル
の情報をもつ

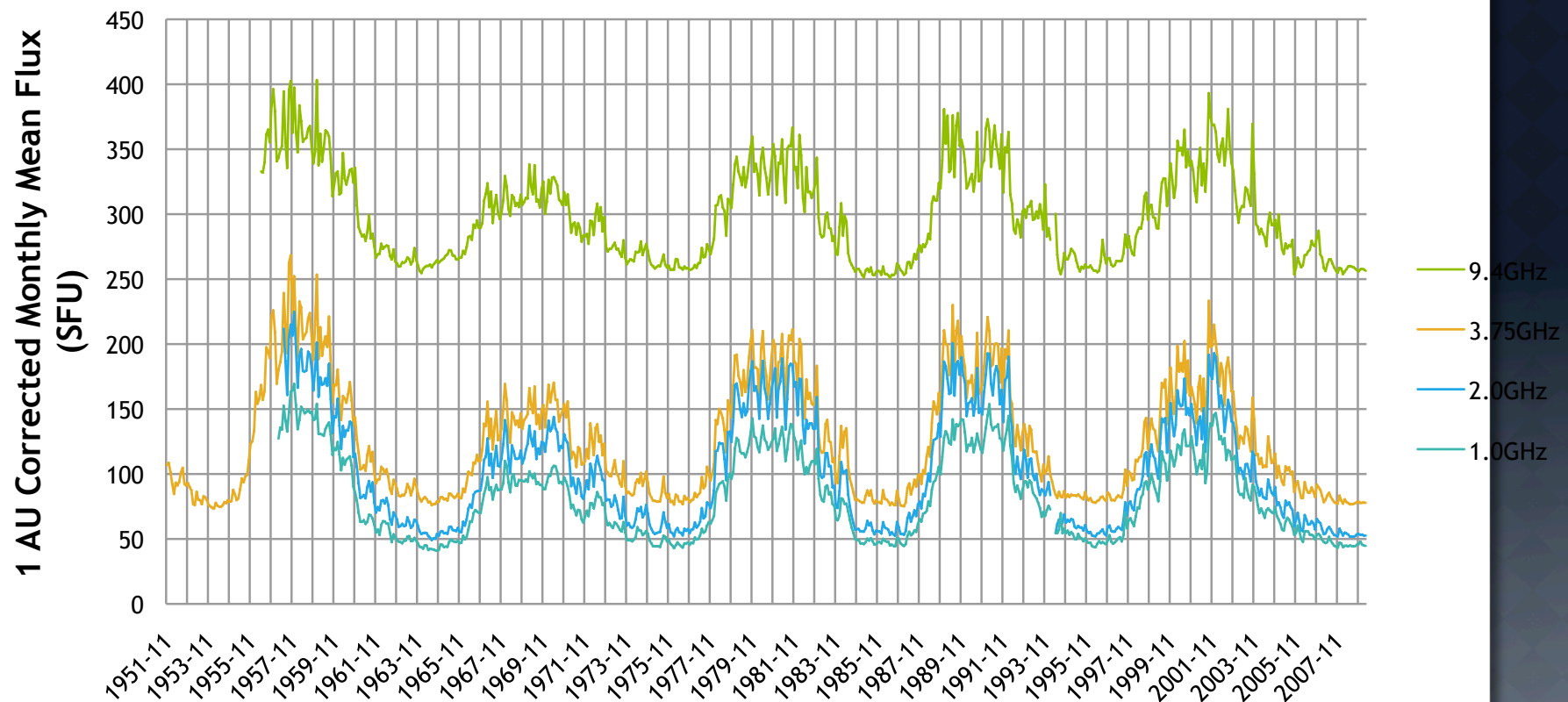
黒点・フレア時以外に 太陽大気から放射されるマイクロ波

- ◎ 熱運動をしている電子による制動放射
 - 太陽のディスク：光学的厚さが $\tau \sim 1$ からの放射
 - この放射は黒体放射
 - 活動領域上空：コロナ物質からの熱放射
 - この放射は、光学的に薄い($\tau < 1$)ところからの放射



太陽大気からのマイクロ波放射 (静穏時) 熱放射 + GYRO-RESONANCE放射

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



太陽大気から放射されるマイクロ波 —まとめ—

- ◎ 太陽からのマイクロ波は、電子とイオン、または磁場との衝突により放射される。
 - 熱放射（制動放射）
 - 1万度程度の彩層(ディスク)
 - 活動領域上空の高温・高密度コロナ
 - ジャイロ共鳴放射（磁場と自由電子の衝突1）
 - 電子の速度が熱速度
 - 黒点からしか放射されない。
 - 周波数は、電子のジャイロ周波数 $\times 1\sim 2$
 - ジャイロシンクロトロン放射（磁場と自由電子の衝突2）
 - 電子の速度が光速の30%程度。
 - フレア時しか放射されない。
 - 周波数は、電子のジャイロ周波数 $\times 10\sim 100$

太陽大気から放射されるメーター波 (MHZ帯の電波)

◎ 以下のプロセスで放射される。

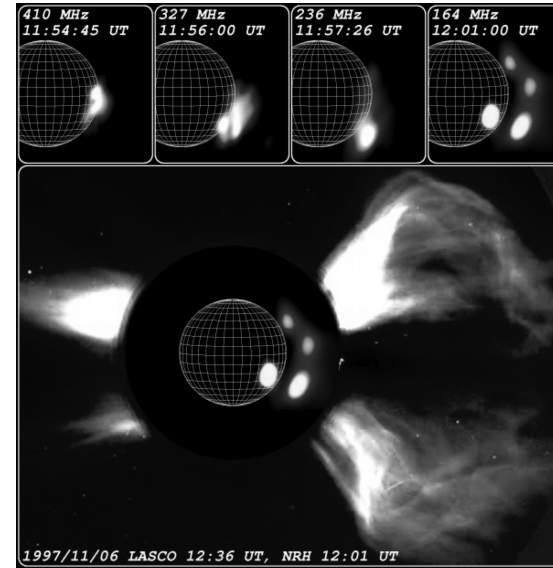
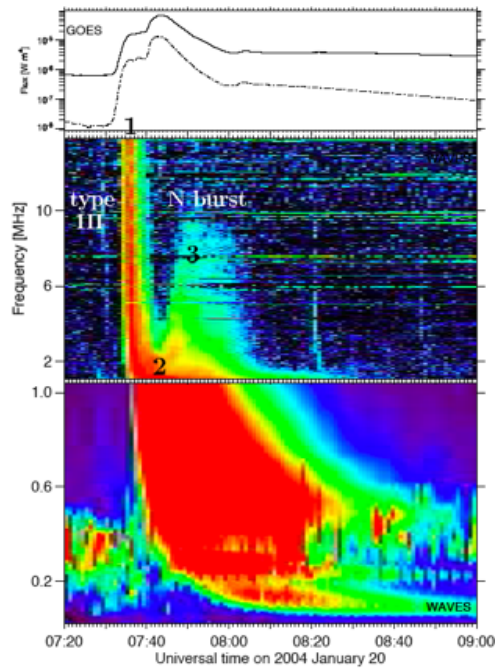
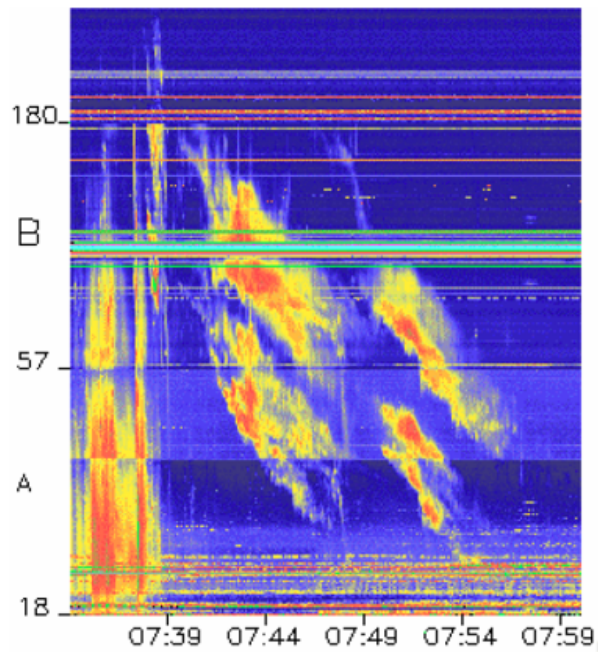
1. 電子が加速される。
2. 加速された電子が、プラズマ振動を励起
3. プラズマ振動が、電磁波にモード変換され電磁波が放射。

◎ 電磁波の周波数は、プラズマ振動の周波数。

$$\omega_{pe} \equiv \left(\frac{4\pi e^2 n}{m_e} \right) \cong 10^3 \left(\frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ MHz}$$

- 周波数 \propto 電子の数密度 \propto 太陽表面からの高度

MHZの観測



講義の内容

- ◎ 太陽大気から放射される電波のメカニズム
 - GHz (波長がcm ~ mm程度) : UHF~SHF マイクロ波
 - MHz (波長がkm ~ m程度) : VHF~HF
- ◎ 干渉計データによる電波画像の合成
 - 電波干渉計とは？
 - 干渉計データから画像へ。
- ◎ マイクロ波でみた太陽活動現象
 - 太陽フレア
 - 電波で探る粒子加速
 - プロミネンス放出現象・CME
 - 宇宙空間を乱す擾乱現象

なぜ、電波観測は光学観測のような望遠鏡で画像が作れないのか？

○ 望遠鏡の空間分解能の上限（回折限界）

$$\sin \theta \cong 1.22 \times \frac{\lambda}{D}$$

- λ : 波長、 D : 主鏡（対物レンズ）の直径、 θ : 分解能
- 1 秒角(1/360度) の分解能を達成したければ . . .
 - 波長 5700 Å（黄色） \Rightarrow $D=14$ cmの主鏡
 - 17GHz : 波長1.7cm \Rightarrow $D=4.2$ kmの主鏡
- 4.2kmの鏡（パラボラアンテナ）は作れない！！
- 擬似的に、大きな主鏡を作れないか？

フーリエ級数

- ◎ ある関数は、異なる周期の正弦関数と余弦関数の足し合わせで表現できる。

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

⇒ 天空に様々な周期のsin/cosの空間フィルターをかけた時の強度(a_n, b_n)がわかれば、フーリエ逆変換を使って、天空の電波強度分布がわかる。

電波干渉計

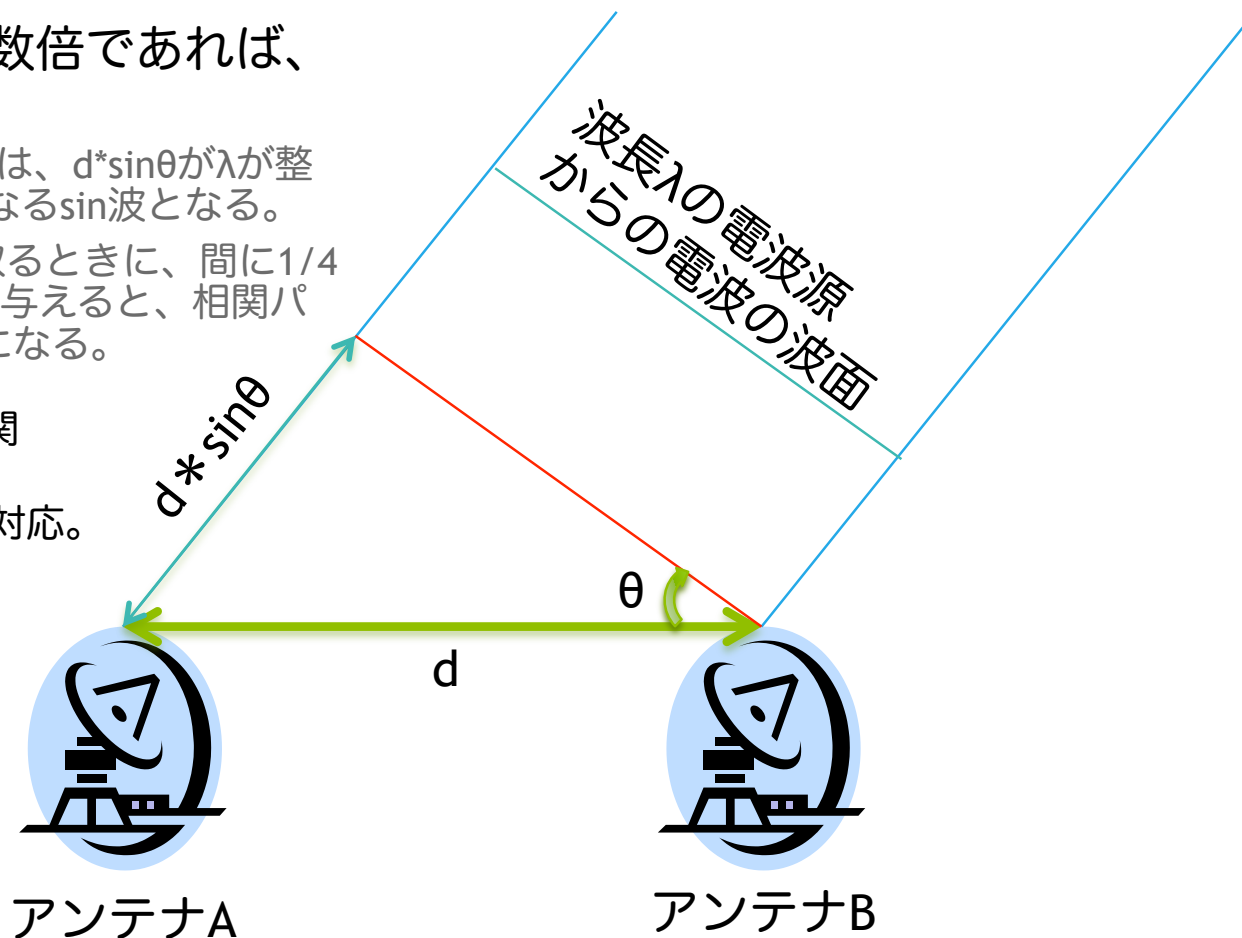
◎ 基本：2つのある距離 d [基線長]はなれたアンテナの出力の相関をとる。

◎ $d \cdot \sin\theta$ が λ の整数倍であれば、干渉が発生。

- 相関のパターンは、 $d \cdot \sin\theta$ が λ が整数倍の θ が山となるsin波となる。
- AとBの相関を取るときに、間に1/4波長分の遅延を与えると、相関パターンはcos波になる。

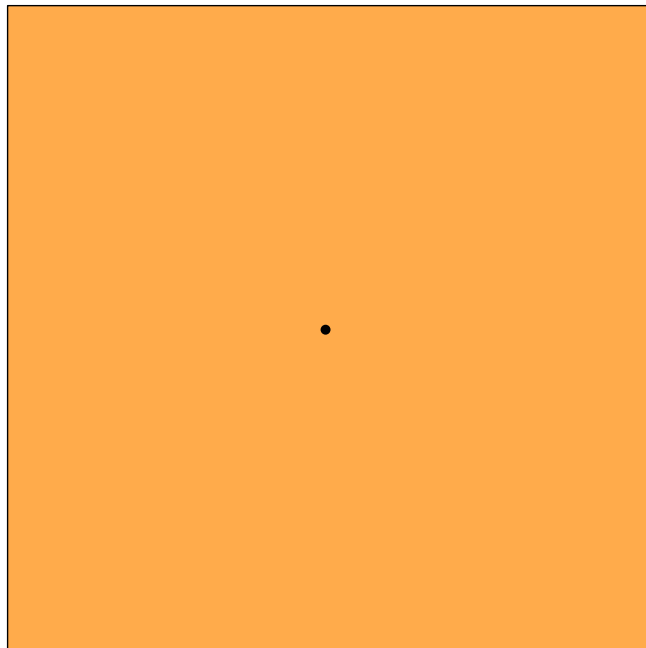
2つのアンテナの出力の相関を取る事=フーリエ級数のある周期の a_n, b_n を得る事に対応。

d が長ければ、短周期
 d が短ければ、長周期の成分を得る事に対応。

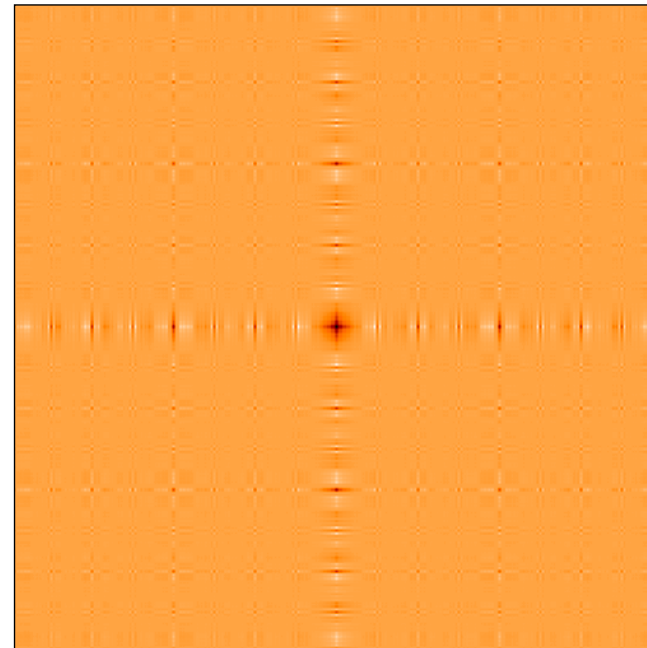


干渉計で像合成した画像の質

- ◎ 画質に影響するもの。
 - アンテナ台数・受信機の性能・位相の更正・・・
 - 下図：アンテナ台数による画質低下の一例



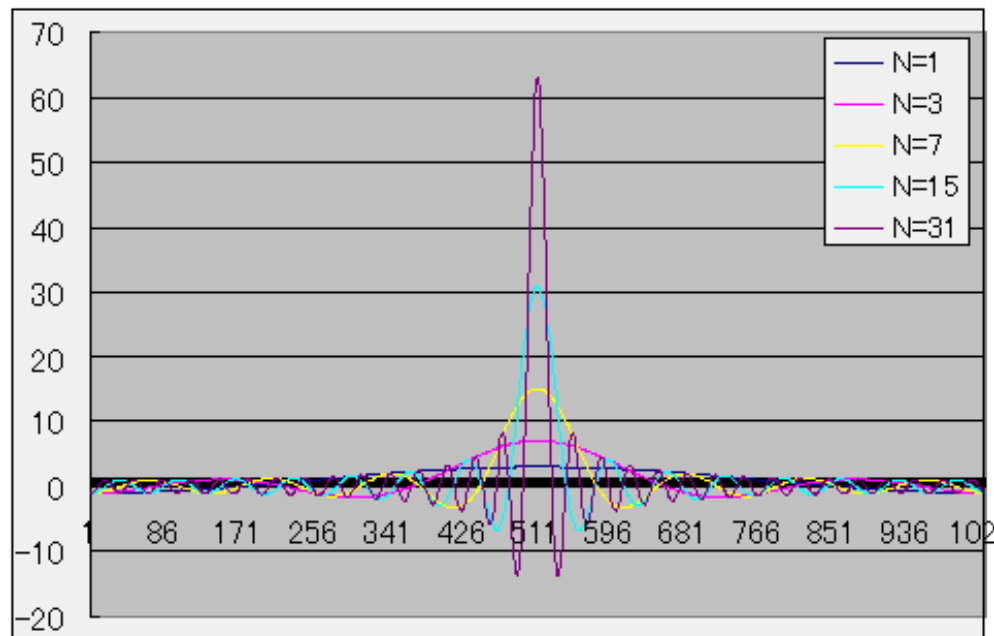
元の画像
(実際の黒丸の大きさは無限小)



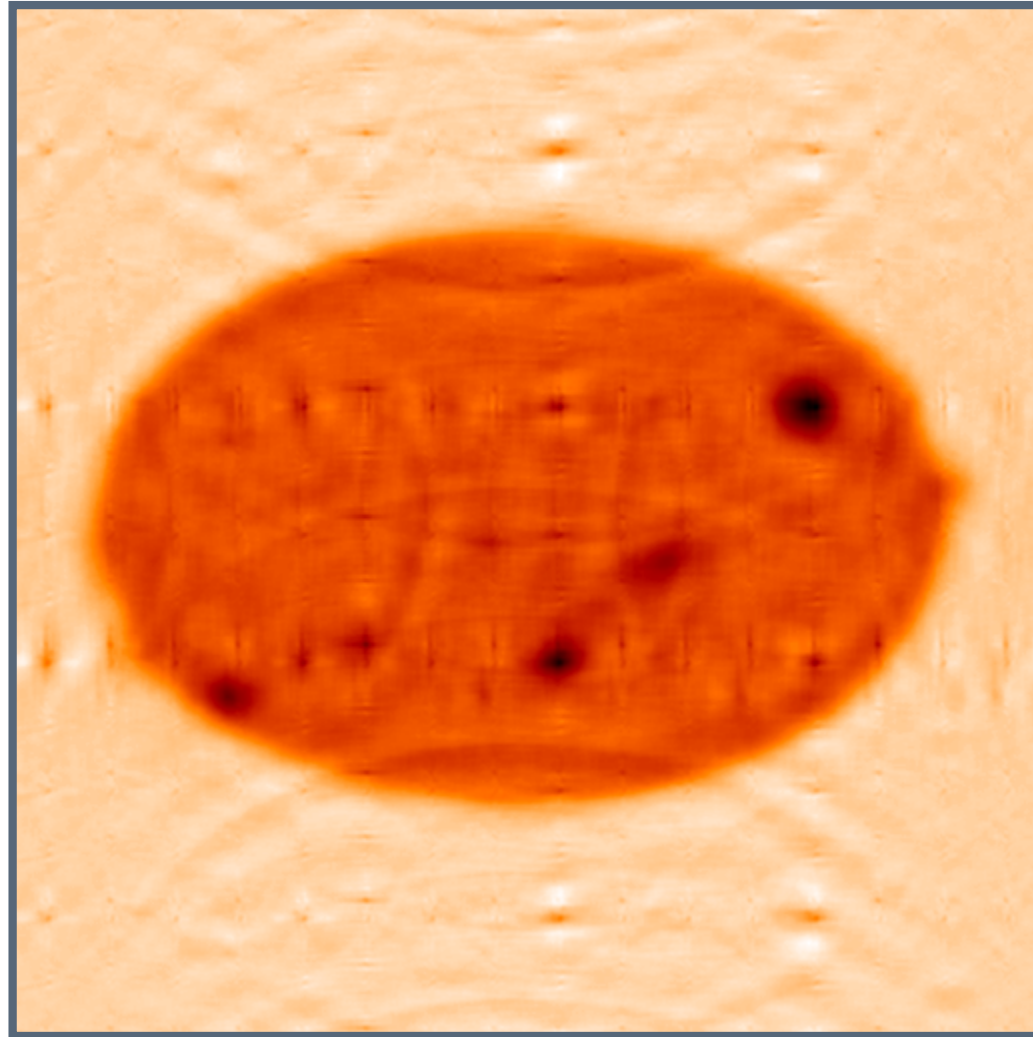
左の画像をNoRHで
擬似的に観測したもの

デルタ関数とフーリエ変換

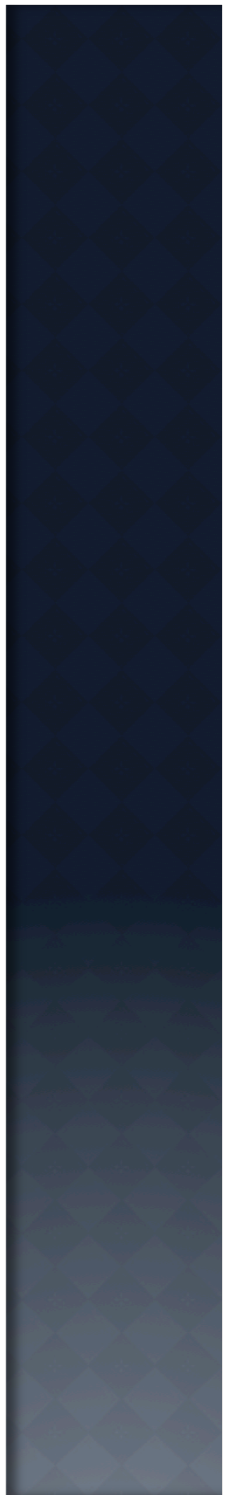
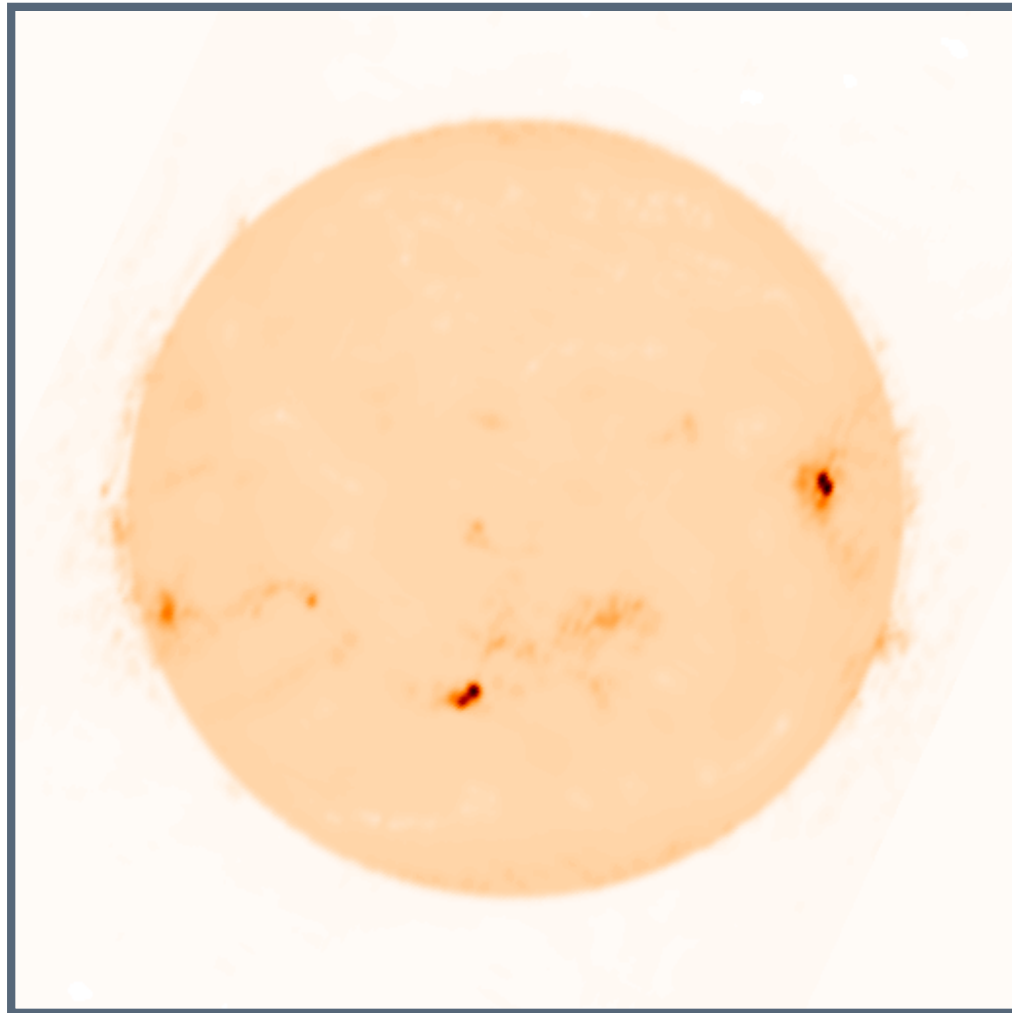
- ◎ 原理：ある関数は、異なる周期の正弦関数と余弦関数の足し合わせで表現できる。
- ◎ δ 関数 (=点源) をフーリエ変換すると、全ての周波数成分 (=無限個の周波数成分) で $a_n=b_n=1$ となる。



野辺山電波ヘリオグラフで取られた、
フーリエ逆変換だけした画像



クリーンを行った画像

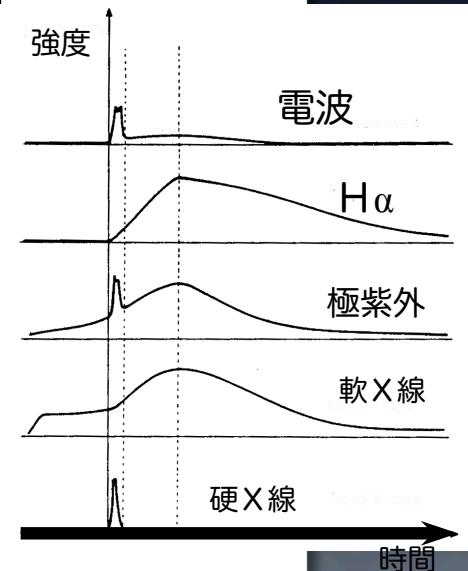


講義の内容

- ◎ 太陽大気から放射される電波のメカニズム
 - GHz（波長がcm ~ mm程度）：UHF~SHF マイクロ波
 - MHz（波長がkm ~ m程度）：VHF~HF
- ◎ 干渉計データによる電波画像の合成
 - 電波干渉計とは？
 - 干渉計データから画像へ。
- ◎ マイクロ波でみた太陽活動現象
 - 太陽フレア
 - 電波で探る粒子加速
 - プロミネンス放出現象・CME
 - 宇宙空間を乱す擾乱現象

太陽フレアとは

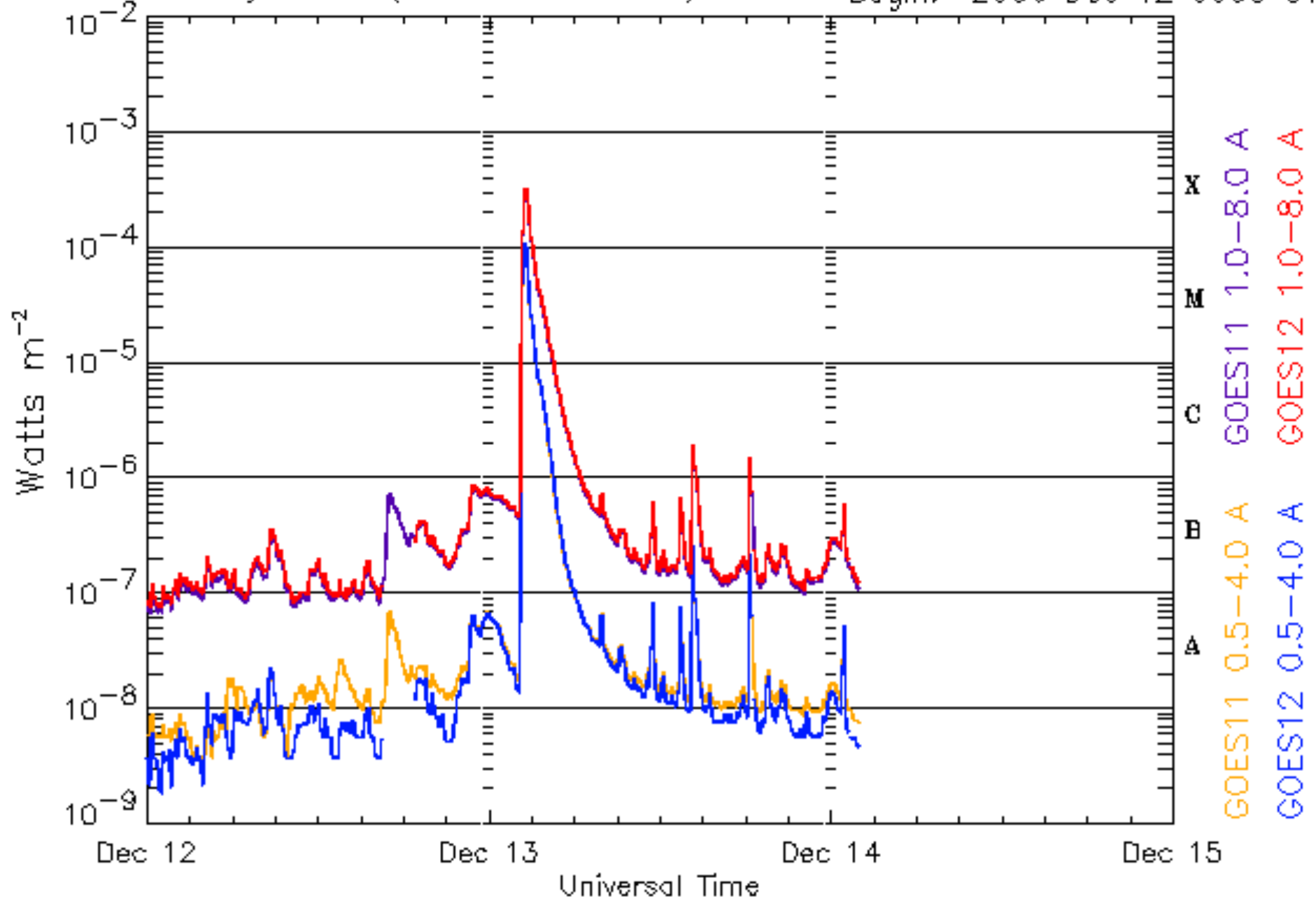
- ◎ 太陽コロナ中にて、磁気エネルギーが解放され、
 - 超高温プラズマ (> 1億度) の生成
 - 軟X線の増大 (1~3桁増大)
 - 極紫外線の増大 ← 超高温プラズマが冷却されて放射
 - 可視光・紫外線の増大
← 熱がコロナから遷移層・彩層へ伝搬して放射
 - 電子/イオンの加速 (~光速の30%)
 - 硬X線の放射
 - 電波放射の増大 (ジャイロシンクロトロン放射)
 - プラズモイド・ジェットの出
 - 衝撃波の形成
 - etc.



太陽から来る電磁波の強度変化 (フレア時)

GOES Xray Flux (5 minute data)

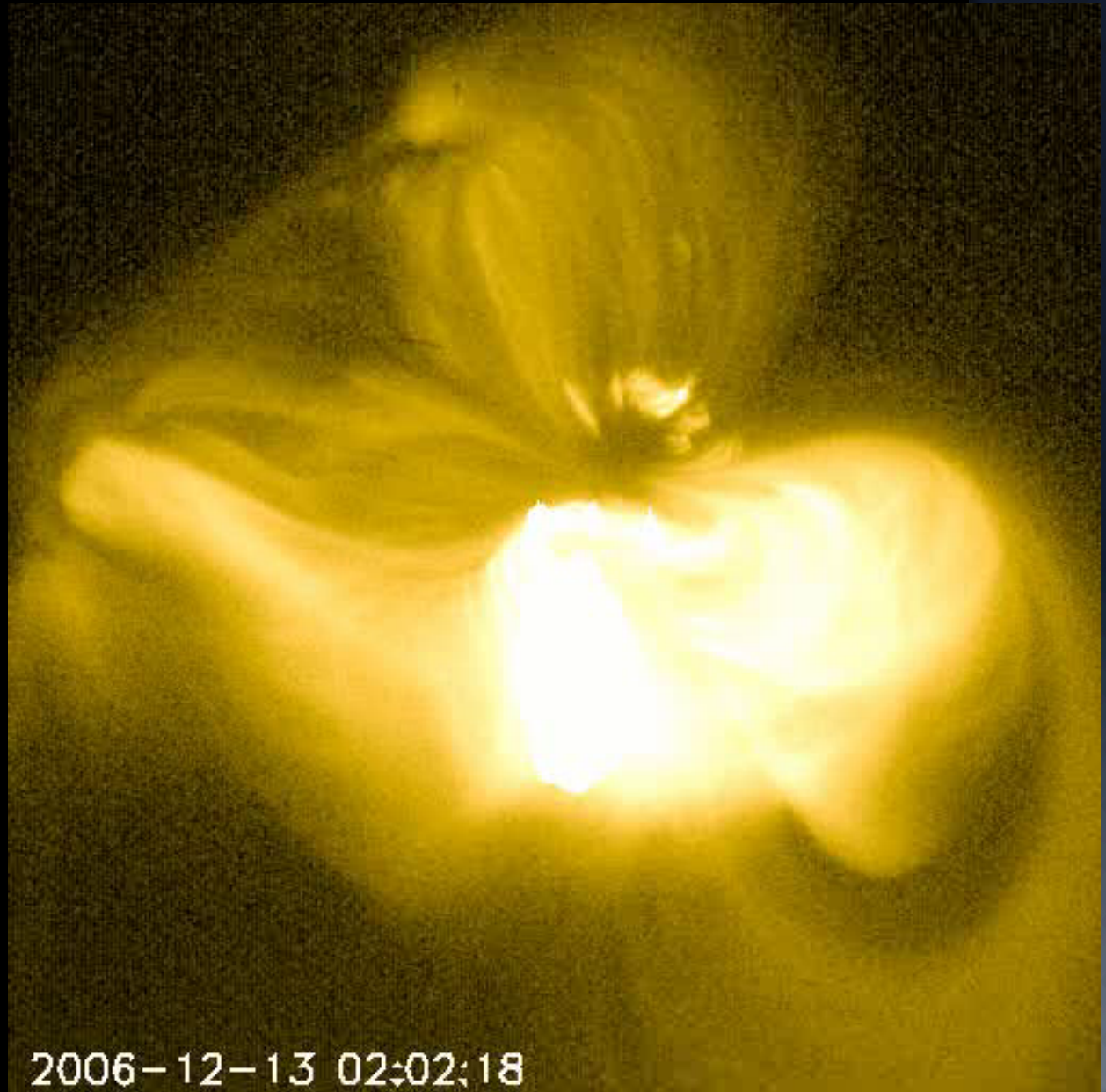
Begin: 2006 Dec 12 0000 UTC



Updated 2006 Dec 14 02:11:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

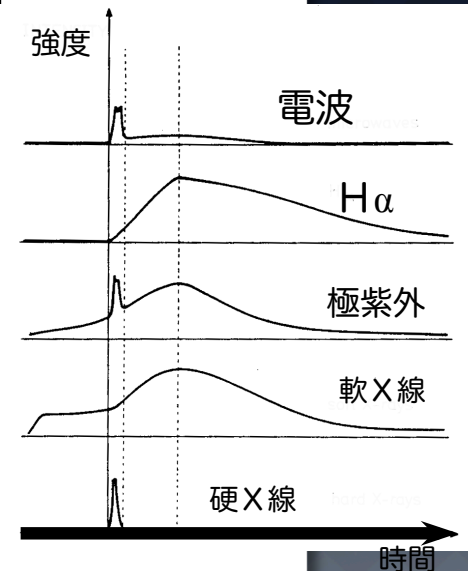
太陽フレア（ひのでの観測から）



2006-12-13 02:02:18

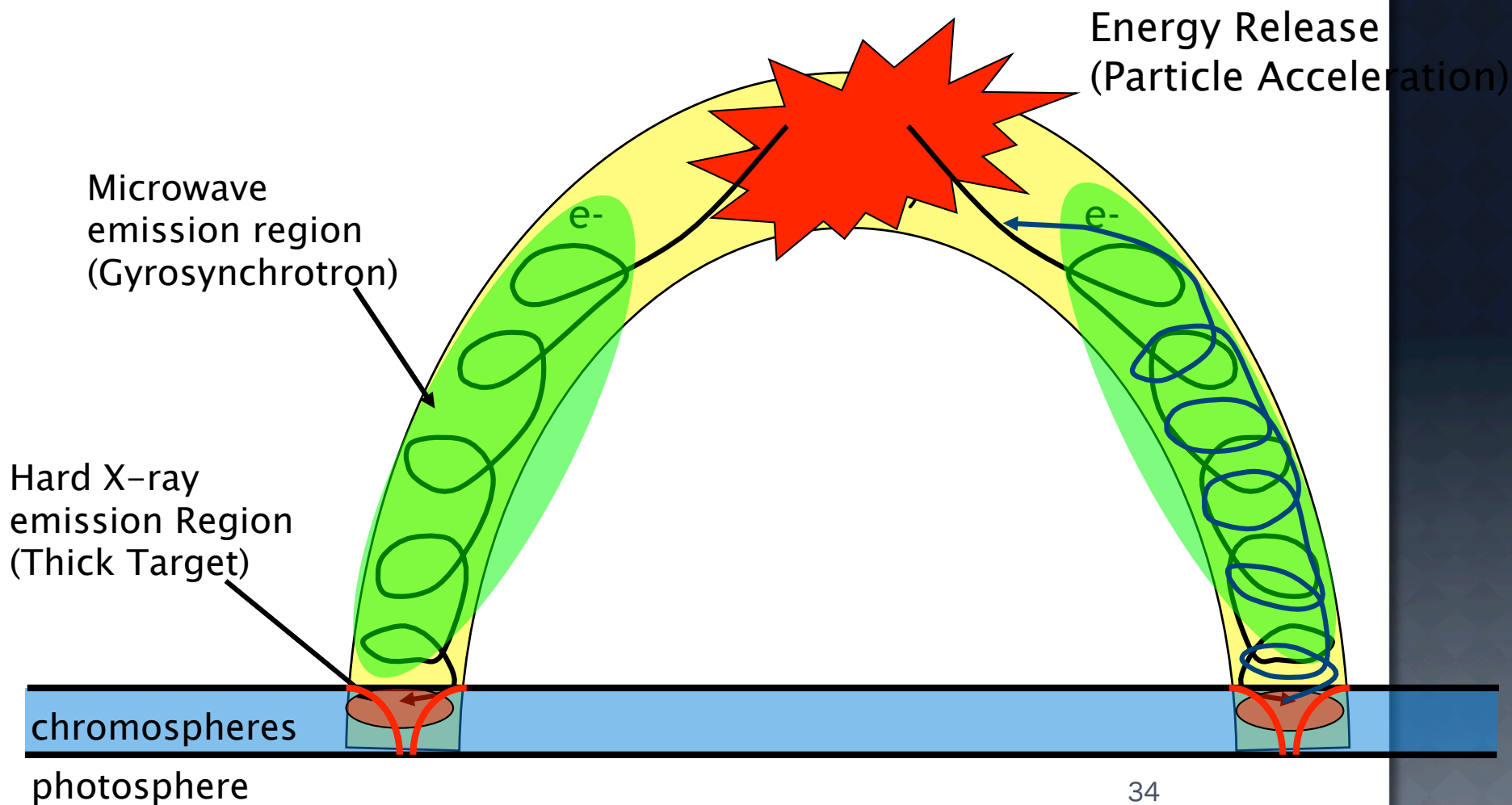
太陽フレアとは

- ◎ 太陽コロナ中にて、磁気エネルギーが解放され、
 - 超高温プラズマ (> 1億度) の生成
 - 軟X線の増大 (1~2桁増大)
 - 極紫外線の増大 ← 超高温プラズマが冷却されて放射
 - 可視光・紫外線の増大
← 熱がコロナから遷移層・彩層へ伝搬して放射
 - 電子/イオンの加速 (~光速の30%)
 - 硬X線の放射
 - 電波放射の増大 (ジャイロシンクロトロン放射)
 - プラズモイド・ジェットの出
 - 衝撃波の形成
 - etc.



太陽から来る電磁波の強度変化 (フレア時)

フレアで発生した 非熱的電子による電磁波放射

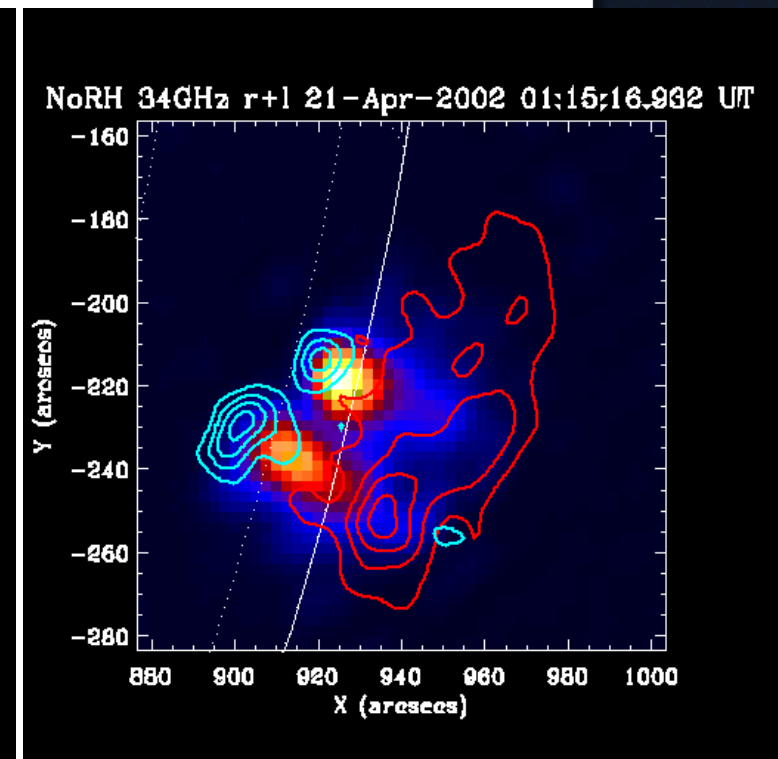
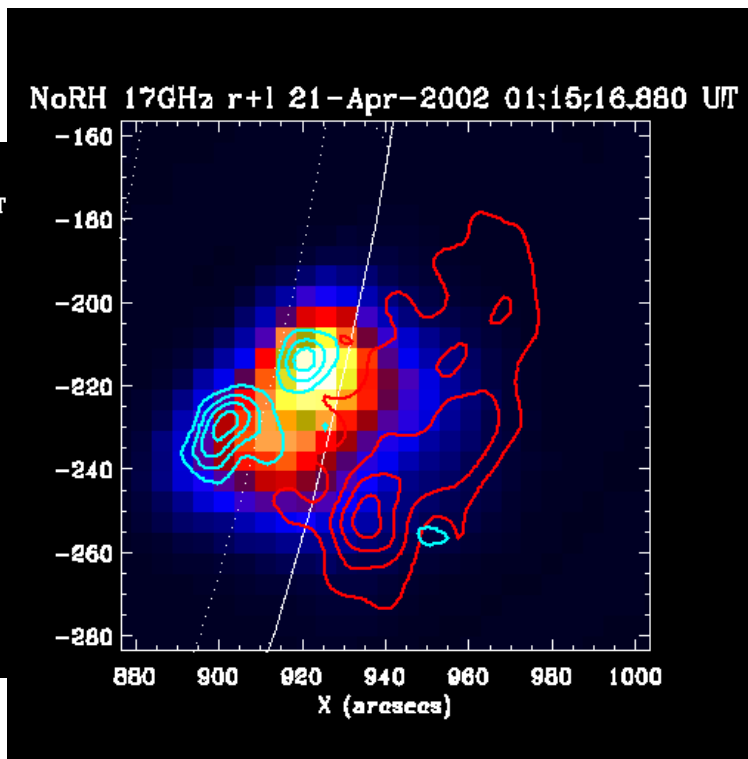
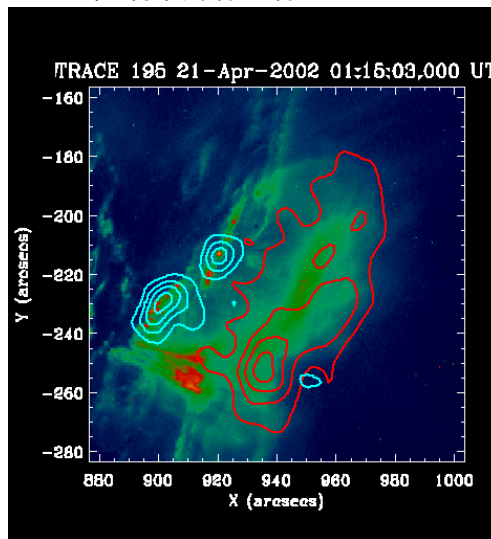


野辺山電波ヘリオグラフと RHESSI衛星によるフレアフレア観測

2002年4月21日 X1.5 flare
17GHz

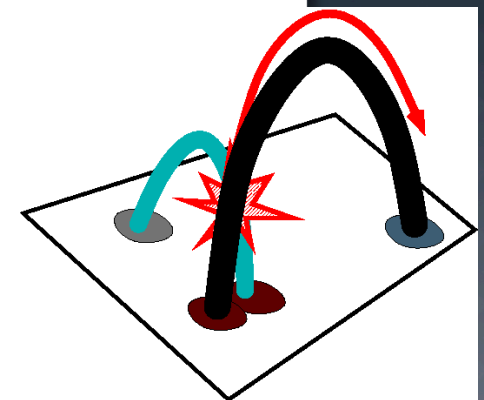
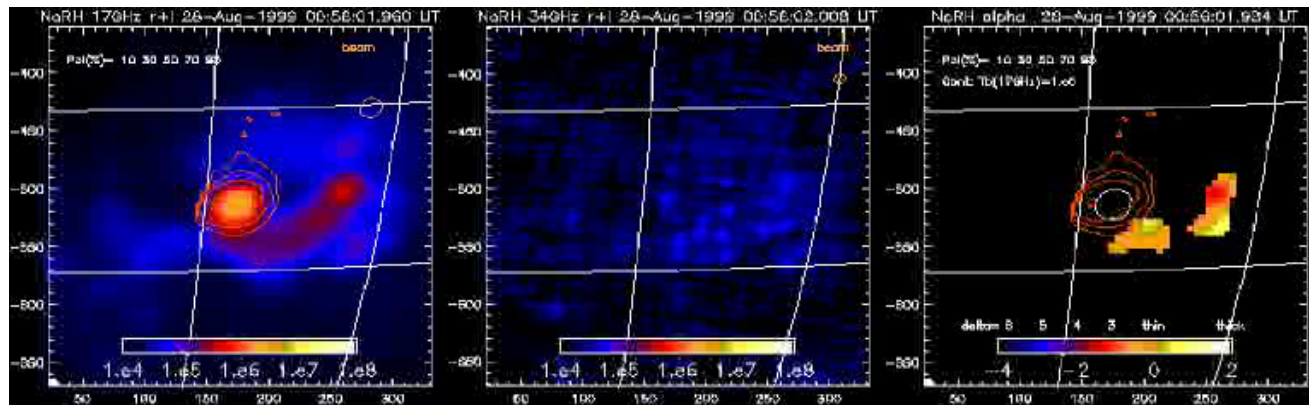
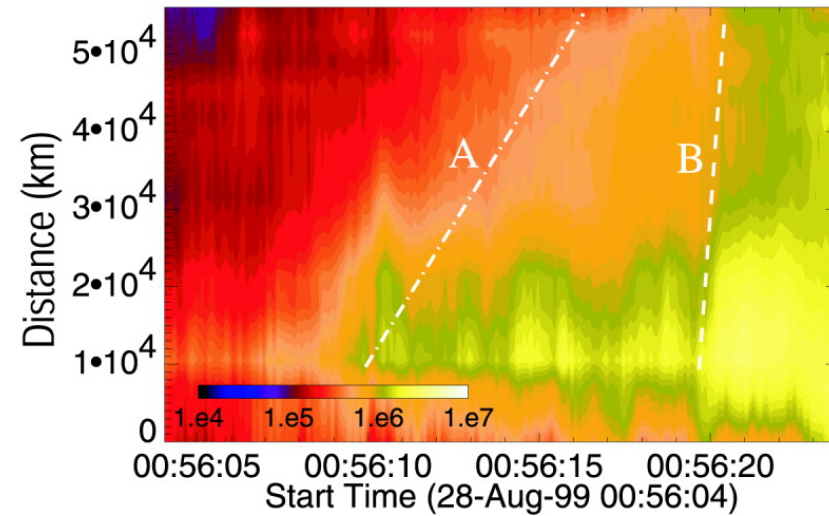
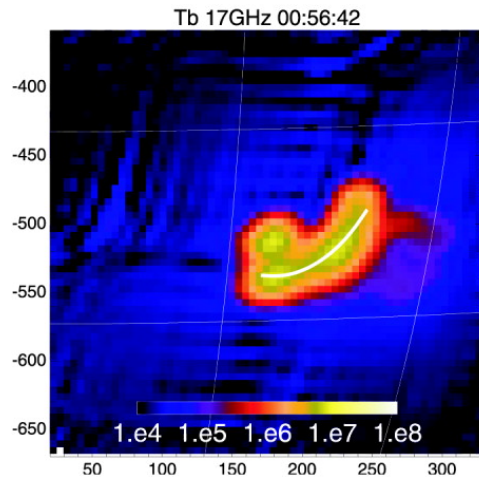
34GHz

TRACE衛星による
極端紫外線画像



等高線は、RHESSI衛星による高X線画像 赤：10keV 青：40keV

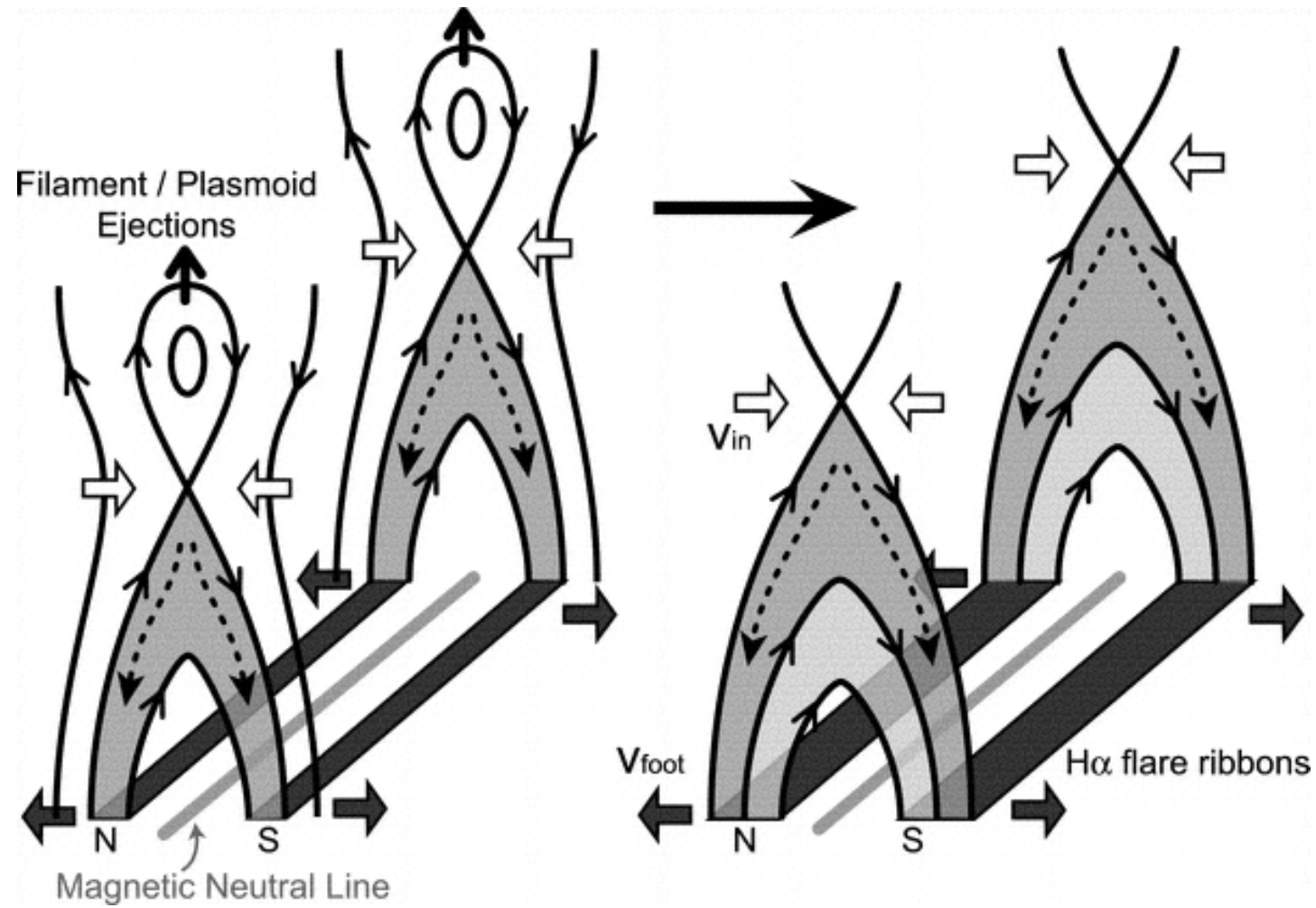
フレアループ中を伝搬する加速電子



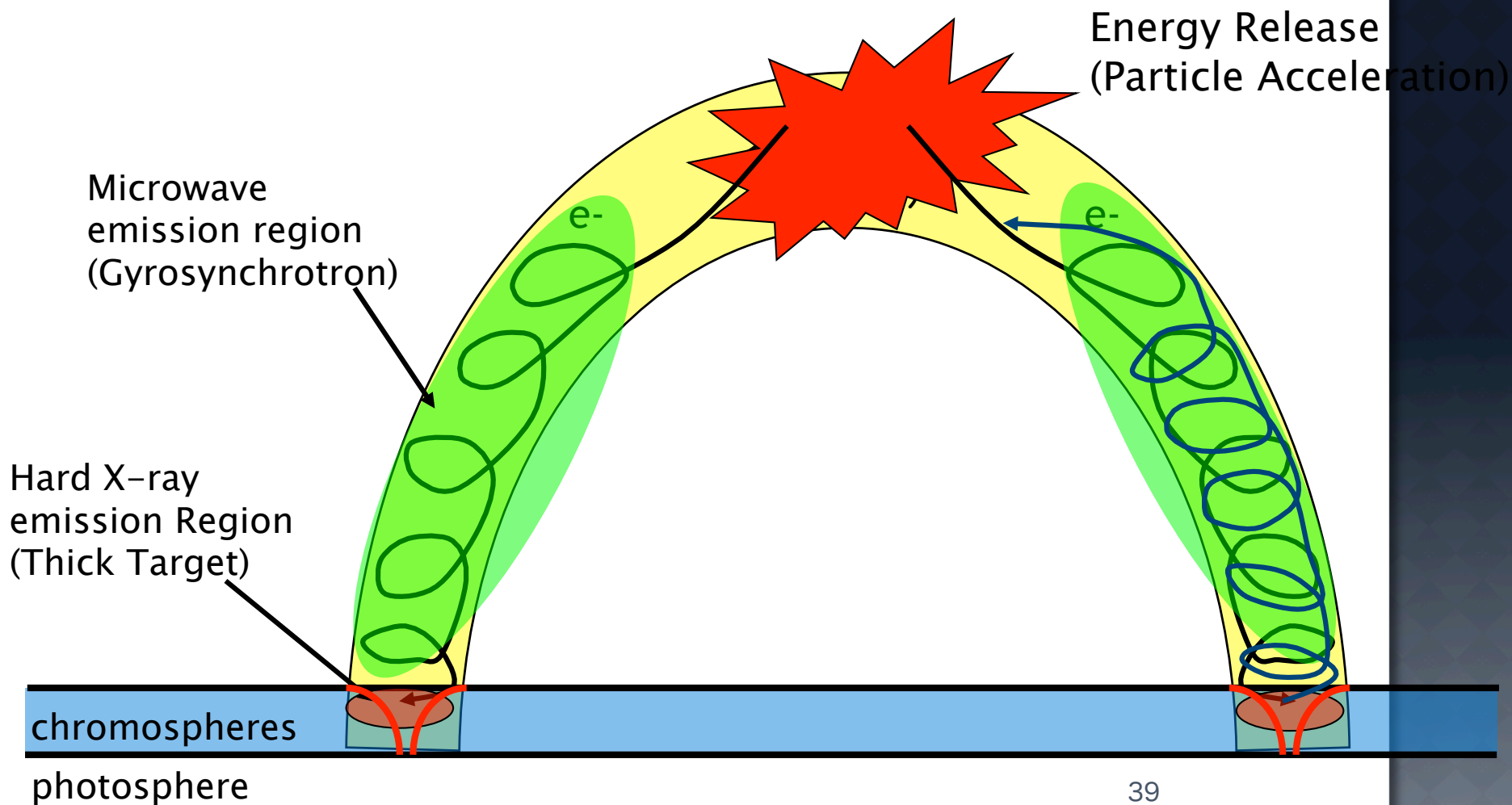
太陽研究での大きな3つの謎

- ◎ なぜ、太陽は11年周期で黒点が増減するのか？
 - 太陽ダイナモ
 - 宇宙の磁場進化
- ◎ なぜ、温度の低い光球の上に、1万度の彩層、100万度のコロナがあるのか？
 - 彩層・コロナ加熱問題
 - 銀河や銀河団の広がったX線源
- ◎ なぜ、フレア時に粒子が光速近くまで加速されるのか？
 - 粒子加速
 - 宇宙の高エネルギー粒子の起源
 - 粒子加速問題上、太陽の粒子加速は、特に時間的制限が厳しく、難しい。

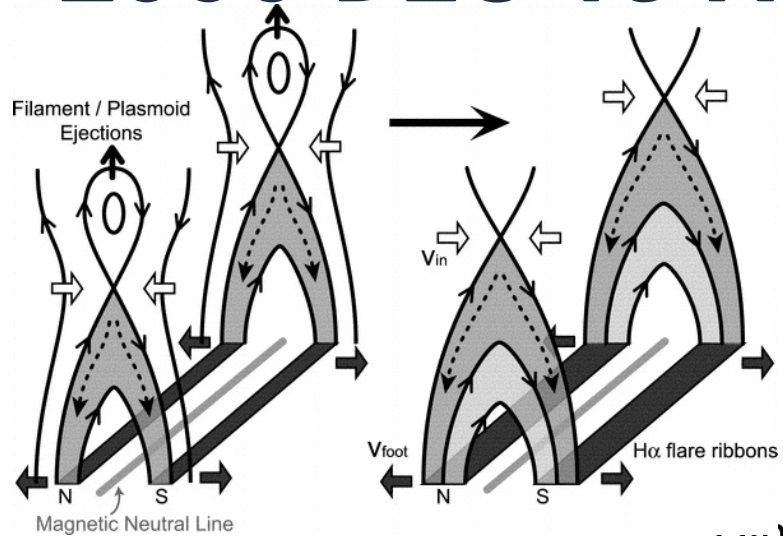
太陽フレアのモデル



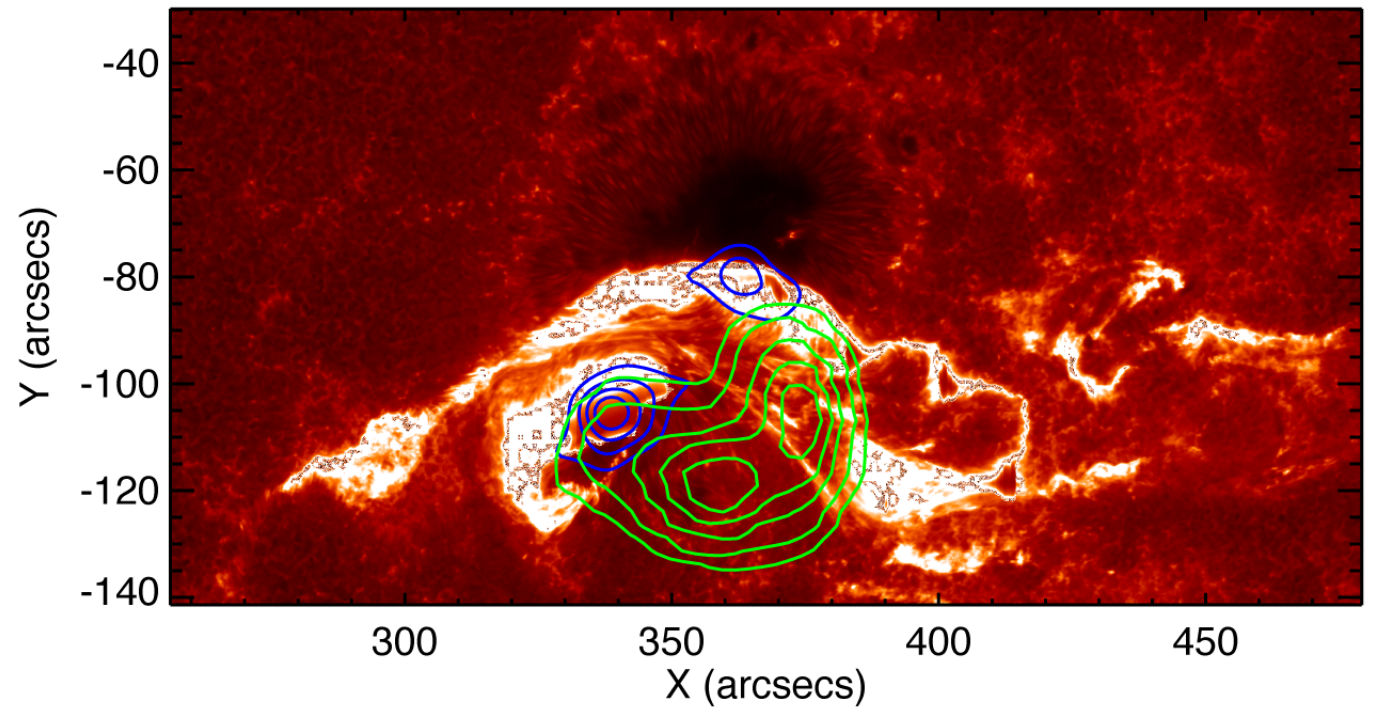
フレアで発生した 非熱的電子による電磁波放射



2006 DEC 13 X FLARE



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



フレアにおける粒子加速

◎ 加速場所

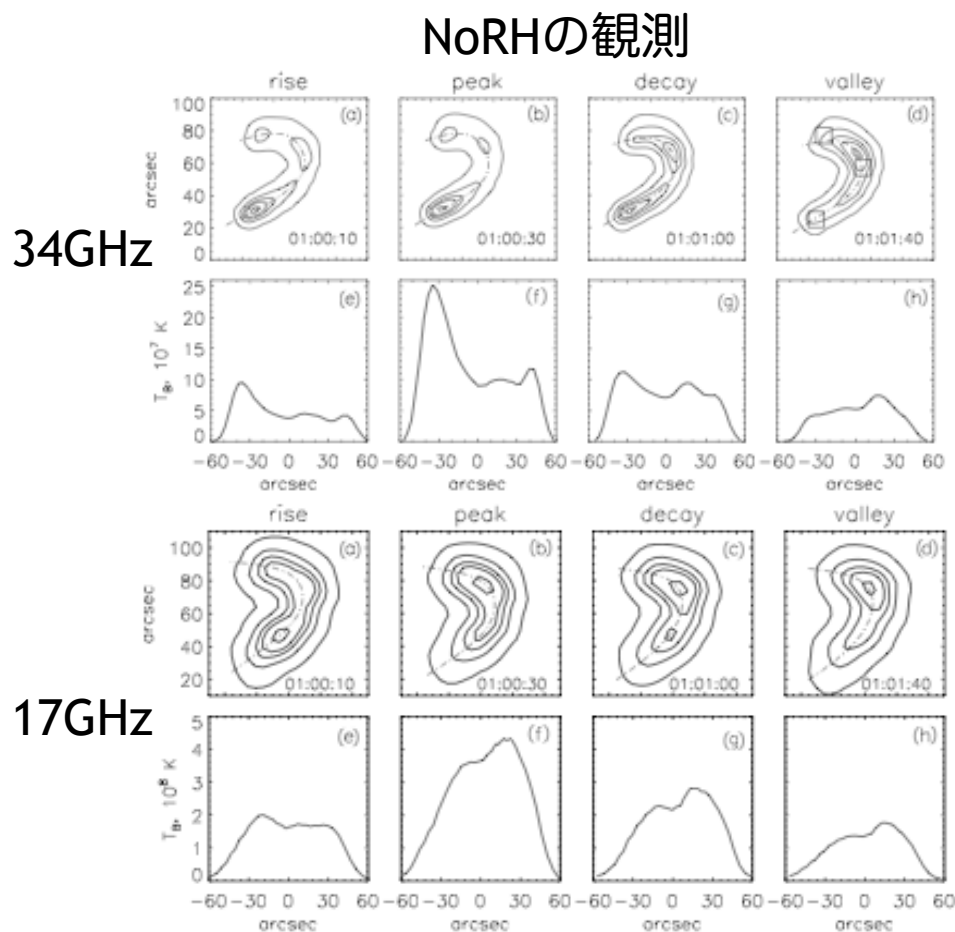
- ループの上の方？
- 粒子加速が激しく起きているのは、多くのフレアループの中のごく一部。
⇒粒子加速が起きる条件とは？

◎ 加速メカニズム

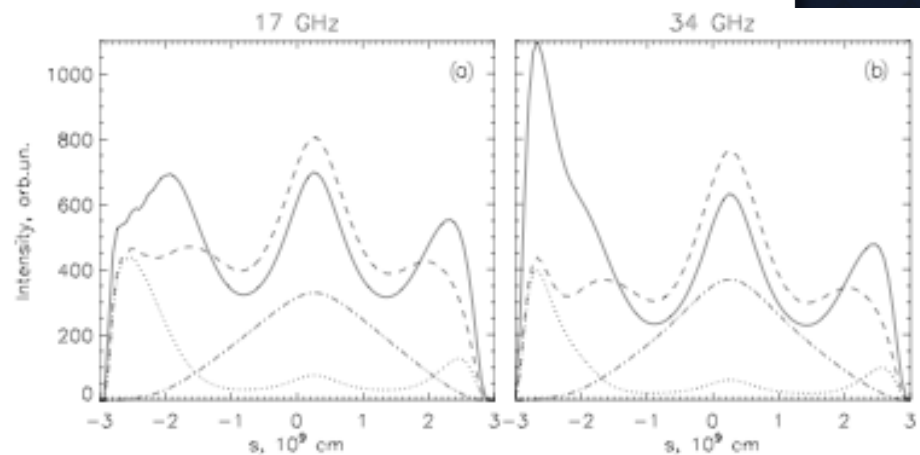
- よくわからない
 - 問題の原因
 - 加速場所は、観測しづらい。
 - 電波でも硬X線でも暗いと思われる。
 - コロナの磁場が観測的に得る事が、非常に難しい。
 - 磁場と電子の速度の方向は？

時間依存放射モデルと観測の比較

- ◎ NoRHによるフレアループ中のマイクロ波光度分布と時間依存Fokker-Plankシミュレーションの比較。



シミュレーションの結果



- シミュレーションに入れた非熱的粒子
- 非熱的電子の入射場所：ループトップ
- Pitch-angle:
 - beaming型（磁場に平行）で南の足下へ流れる電子が多い（主成分）
 - 少量のpitch-angleが等方的な成分

電波によるフレア研究の今後

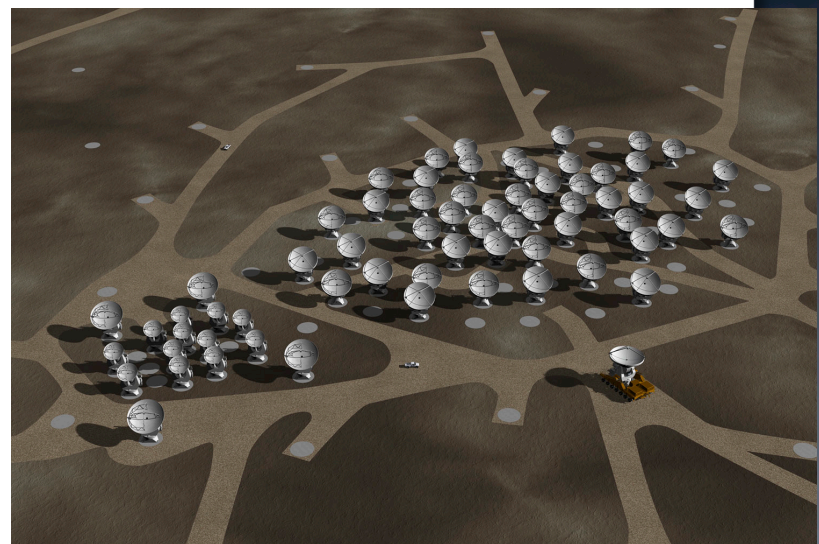
◎ 観測：

- 空間・時間・スペクトル分解能を高めた装置
 - 高空間分解能⇒長い基線長⇒広く平な土地 (>数km四方)
 - アメリカ・中国・ロシアが、個別に太陽干渉計を開発中
 - **ALMAによる太陽観測**



◎ 理論：

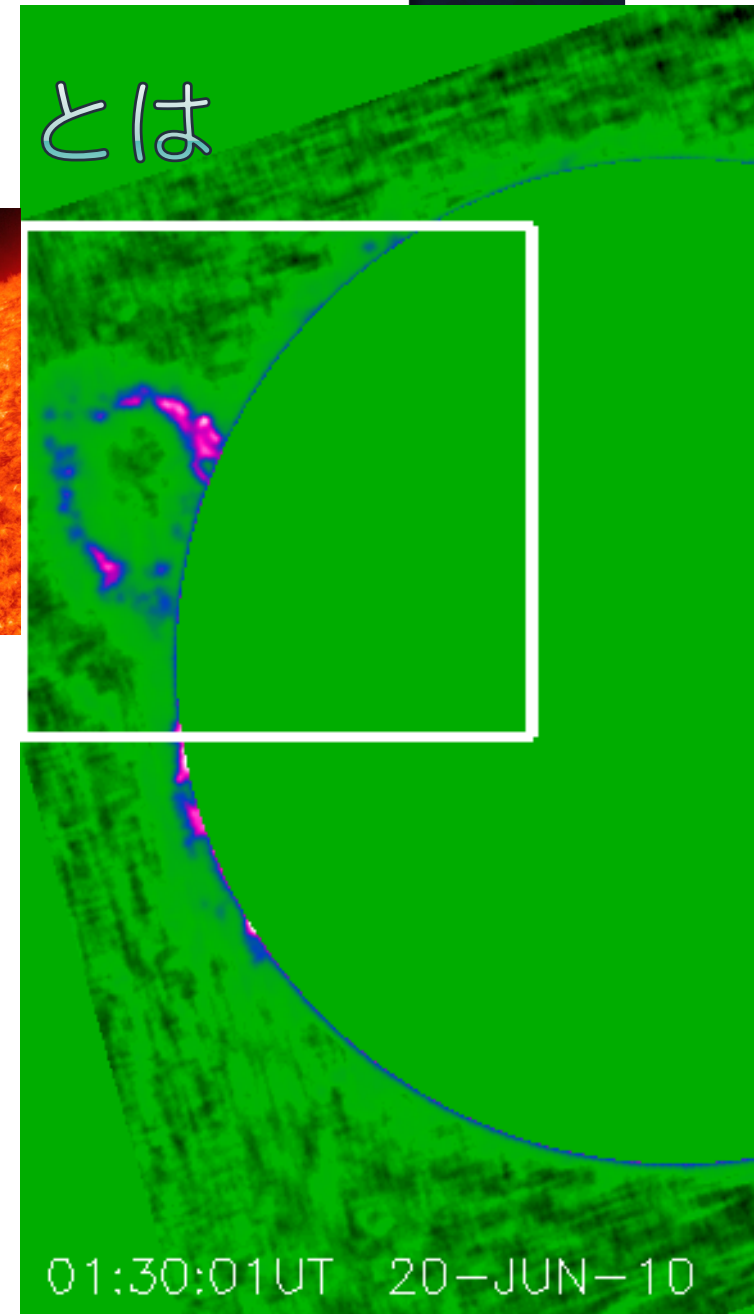
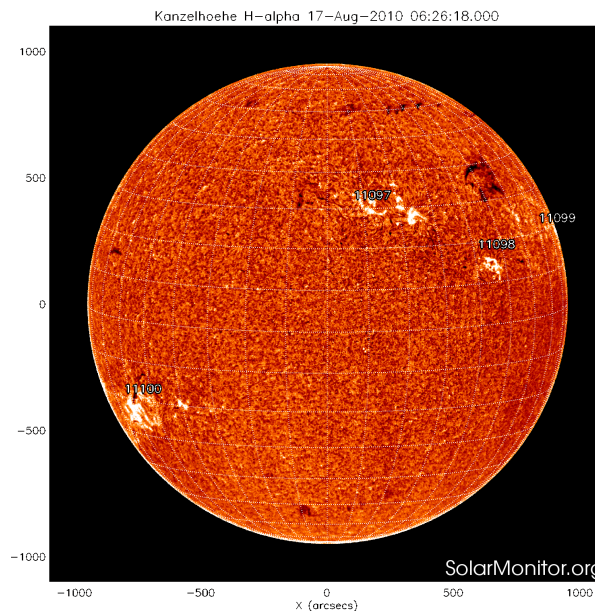
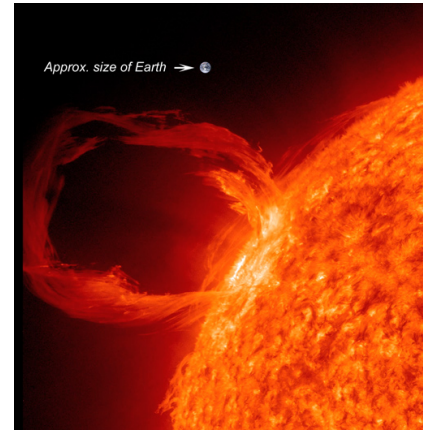
- MHD+粒子シミュレーションより、計算機上で電波・硬X線のフレア画像をつくる。
 - どの加速モデルが、一番観測を説明できるか？



プロミネンス (ダークフィラメント) とは

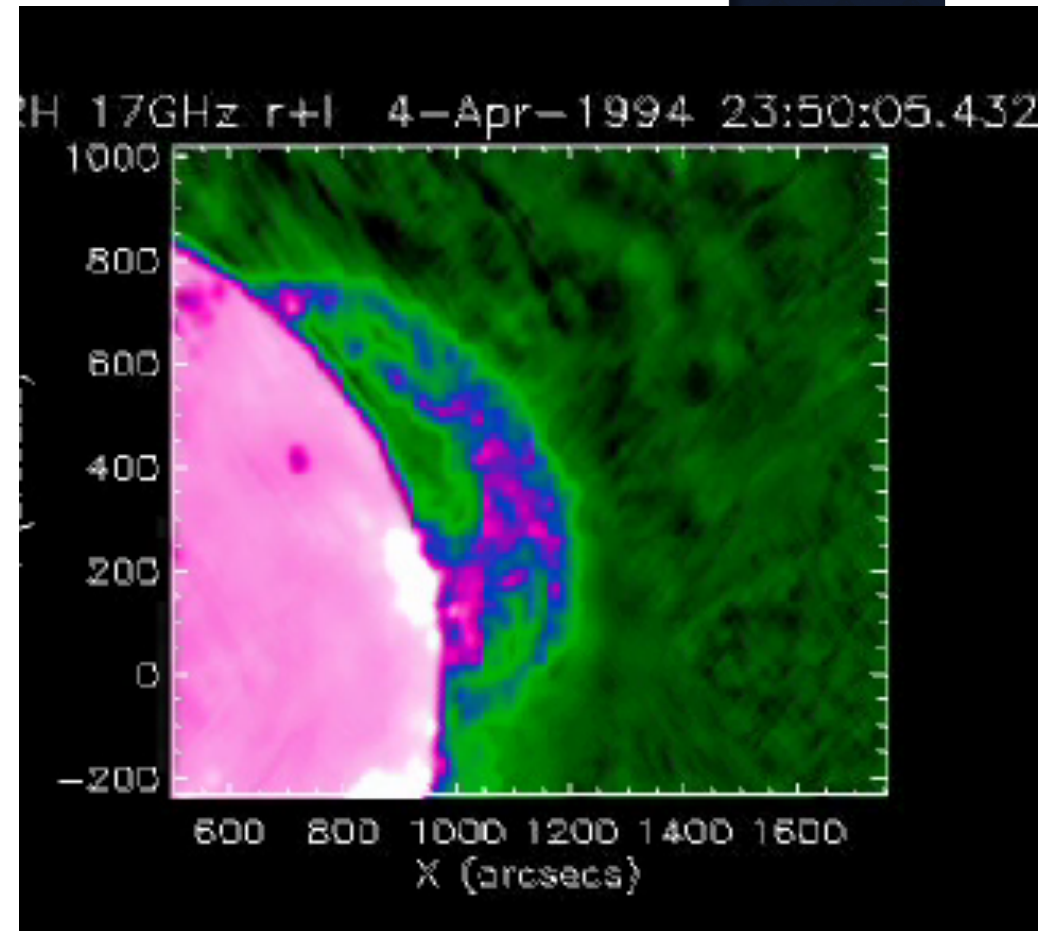
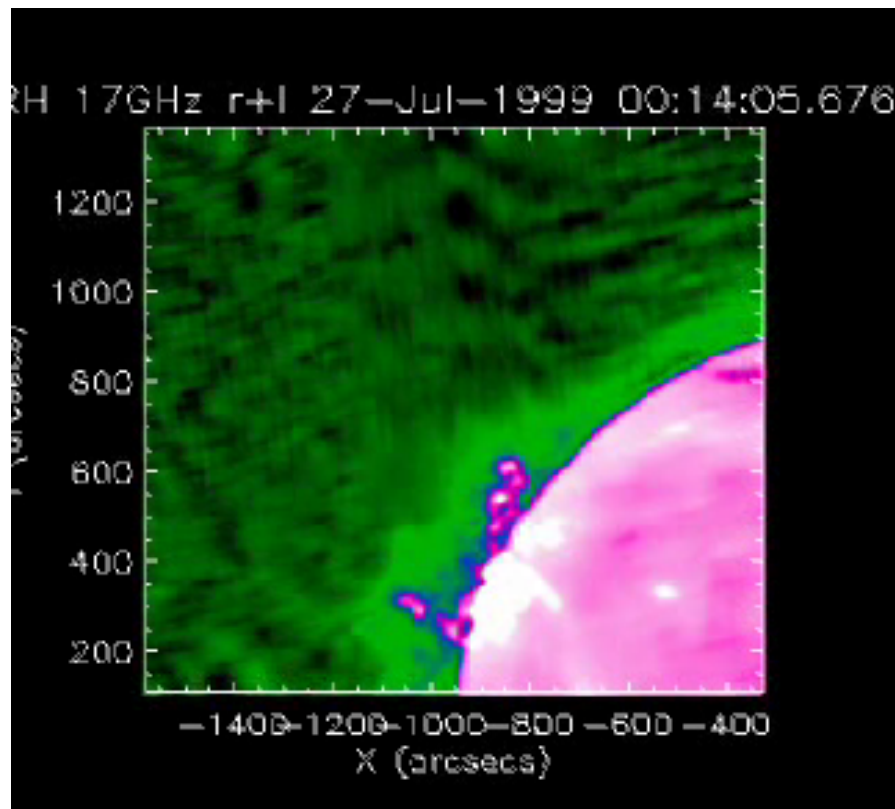
- ◎ コロナ中 (100万度) に浮かぶ低温 (~1万度) の雲
- ◎ H α ・極紫外で観測
- ◎ マイクロ波でも観測

■ 熱放射

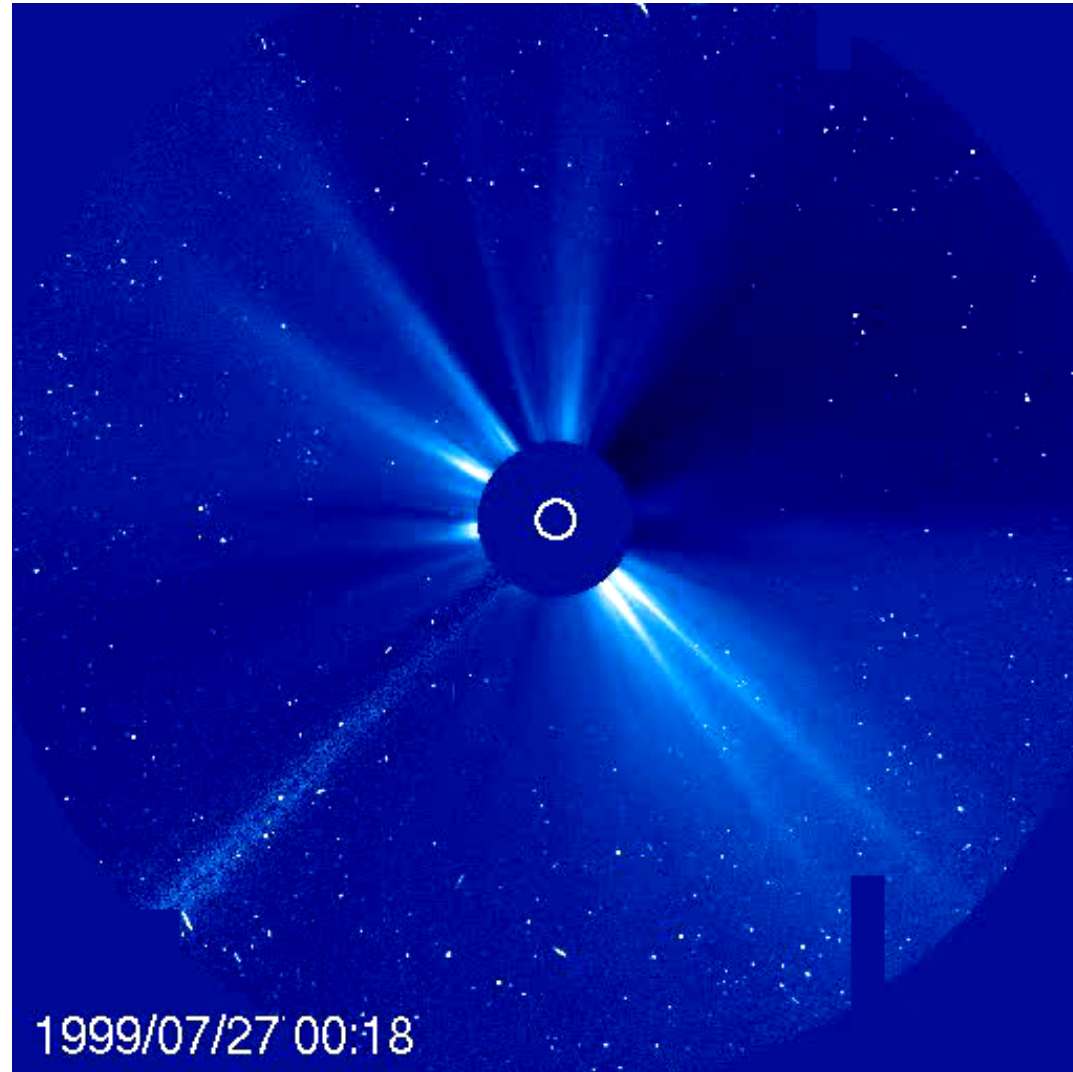
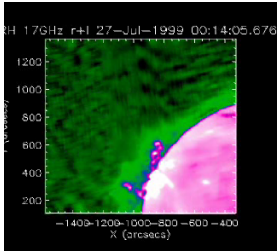


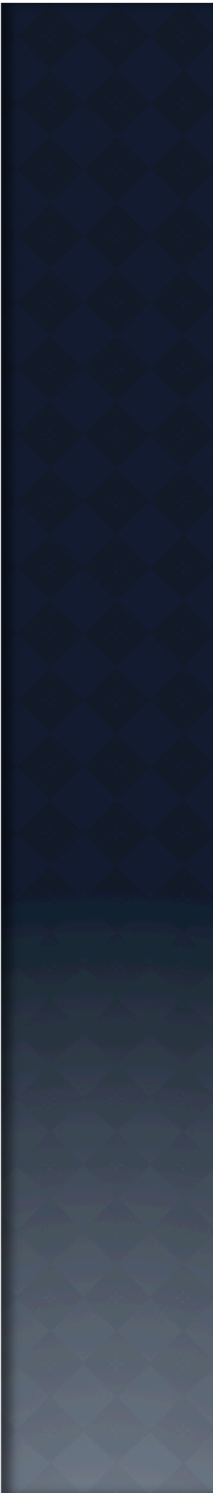
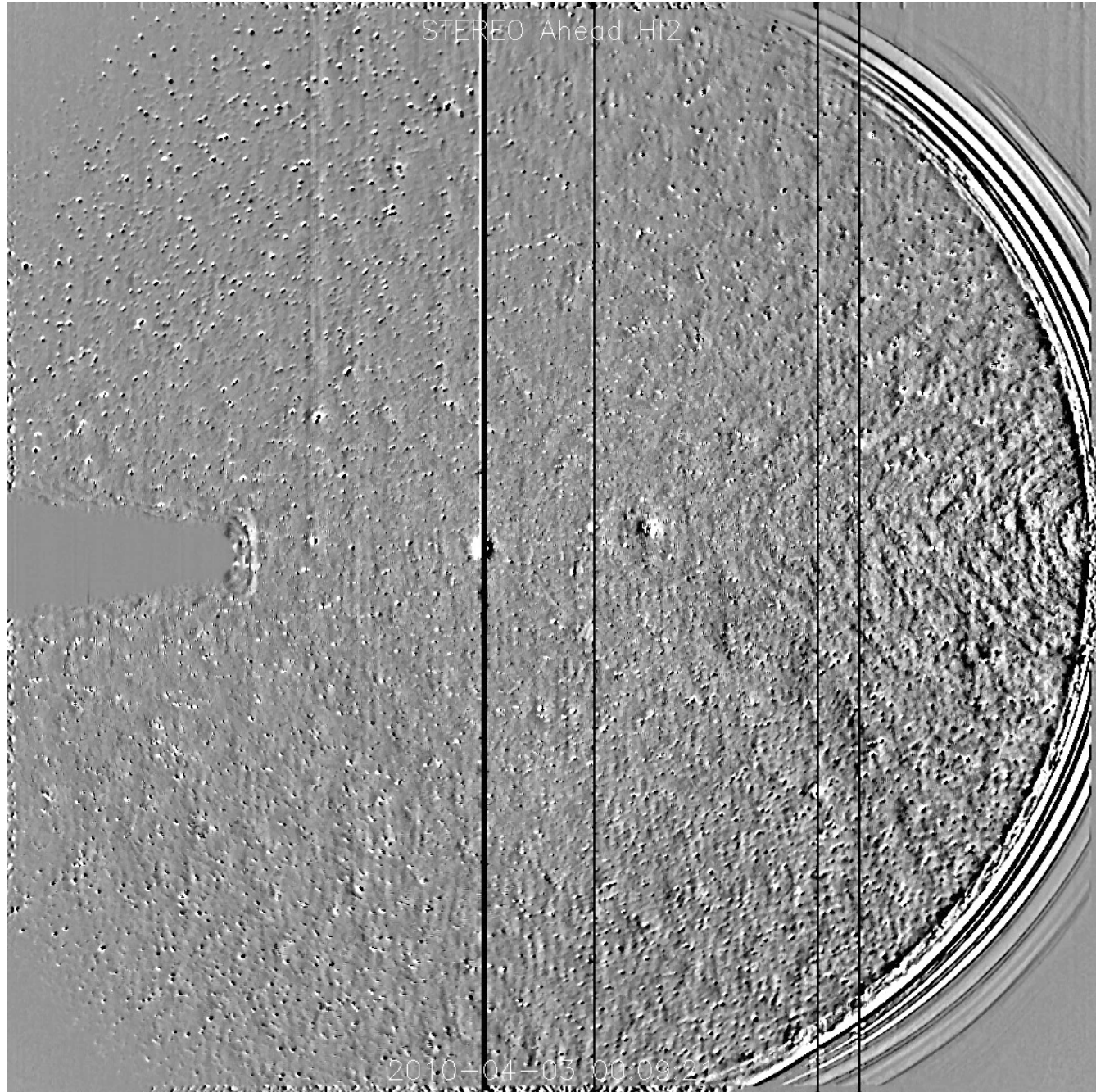
プロミネンス放出現象

- ◉ プロミネンスが惑星間空間へ放出
- ◉ フレアを伴う時もある。

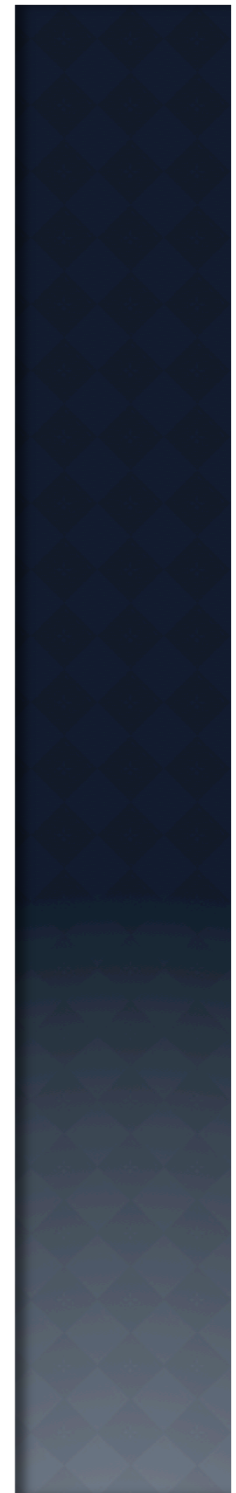
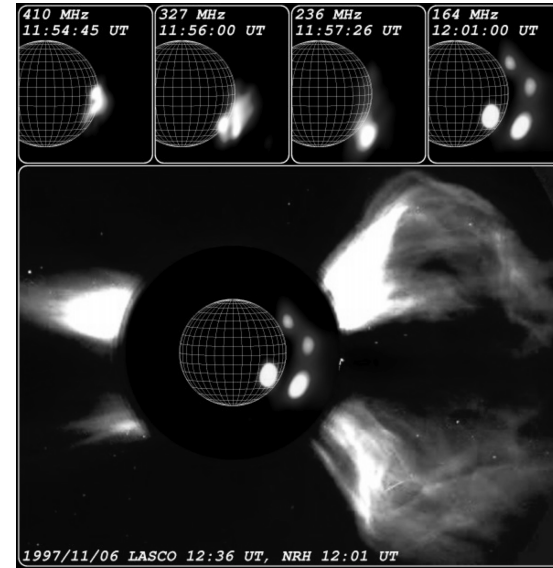
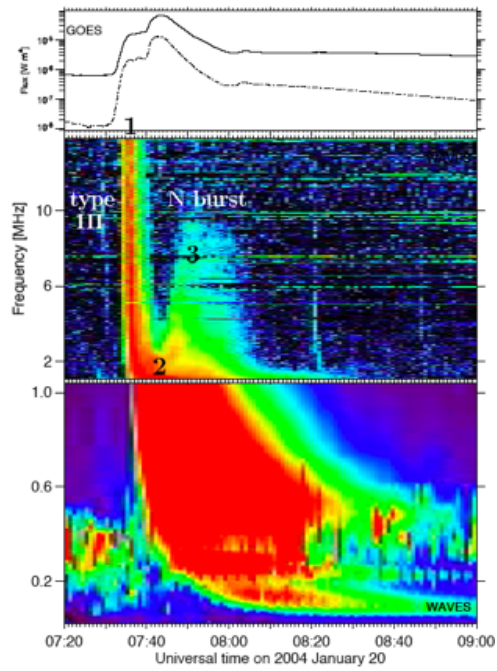
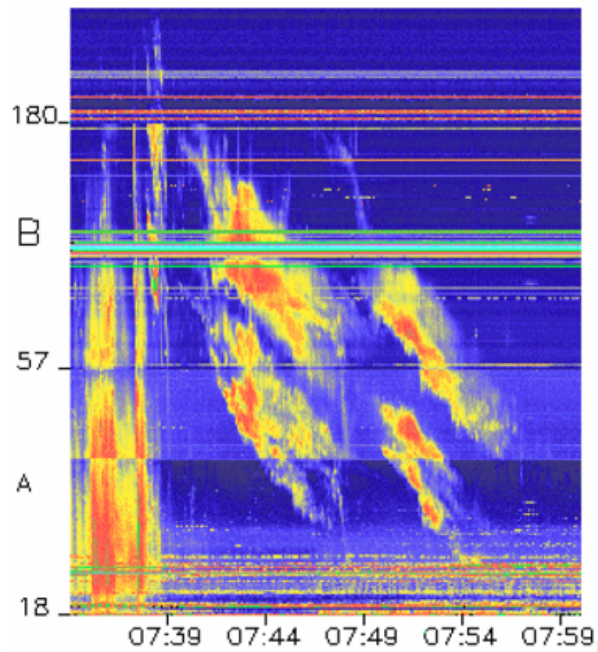


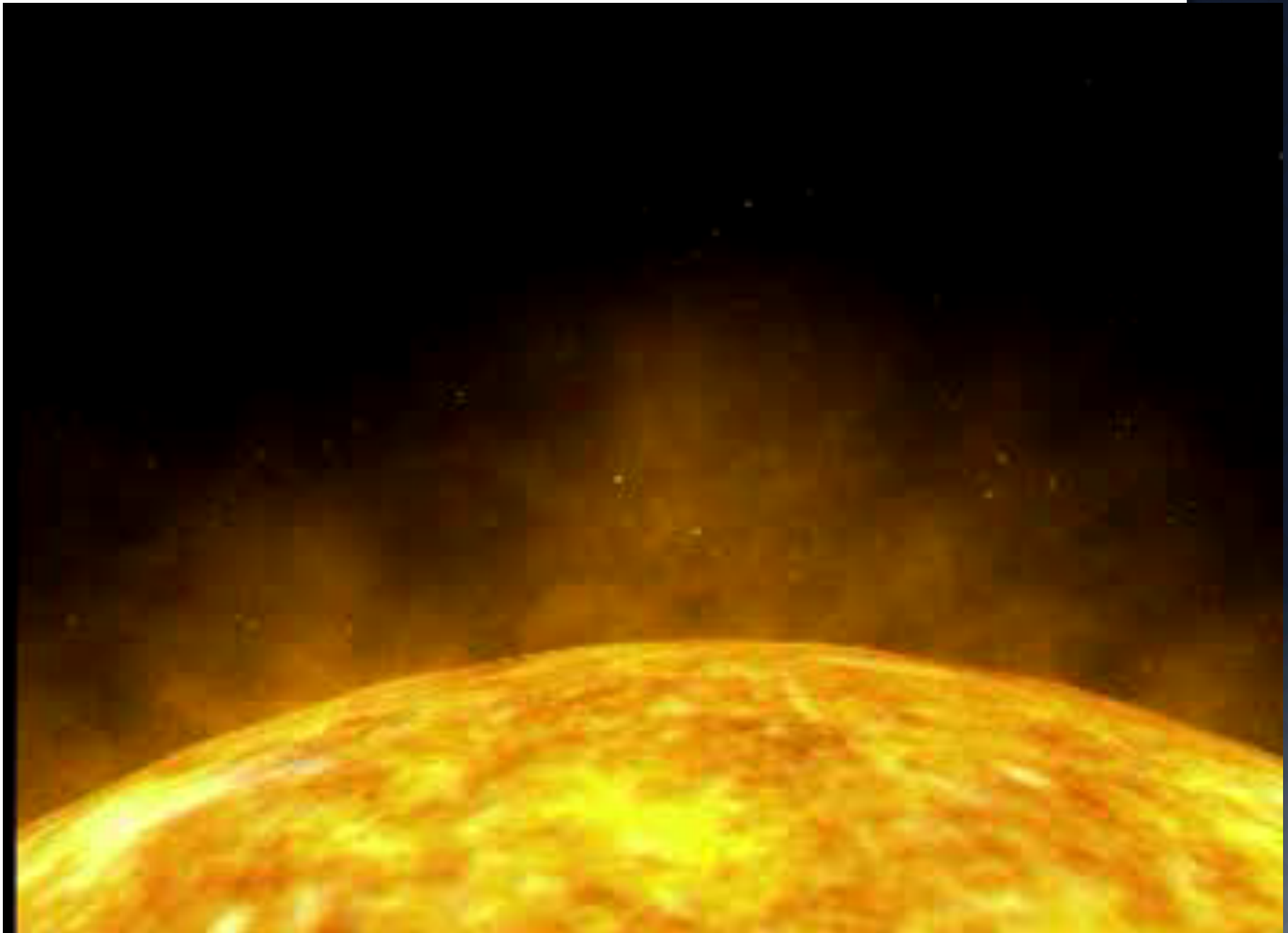
プロミネンス放出のその後



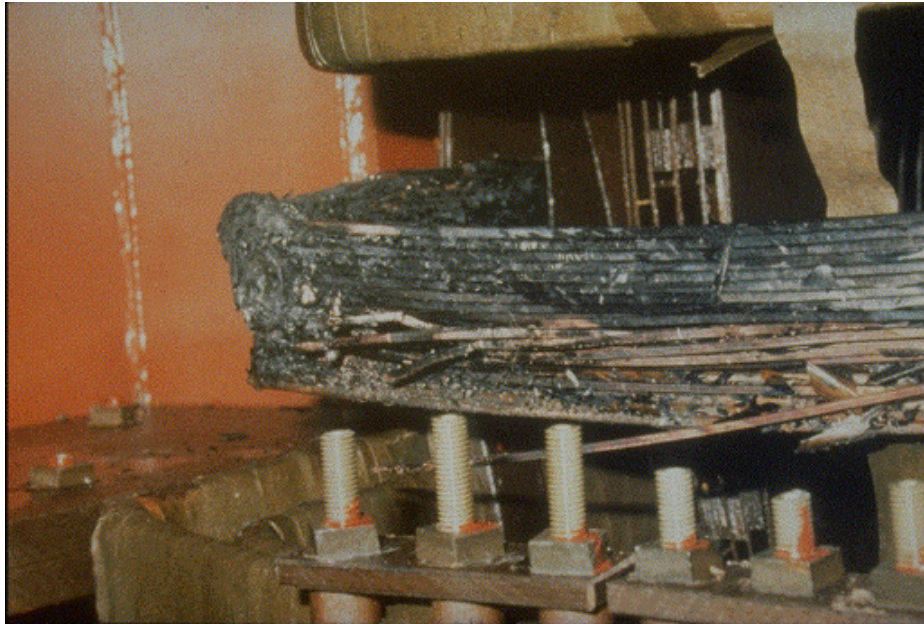


MHZの観測





地球での影響



asahi.com : 科学・自然・宇宙 : ニュース - Microsoft Internet Explorer

アドレス http://www.asahi.com/space/news/010405.html

asahi.com

asahi.com

ASAH WEEKLY English! ~Let's Study English!

天気 | フリーメール | 辞書 | 地図 | サイトマップ | ランキング | 最新情報

home > 科学・自然 > 宇宙 > ニュース >

宇宙

【ニュース】

太陽で12年ぶりの大爆発

活動が活発な「極大期」に入っている太陽の表面で3日前6時半ごろ、大きな爆発(フレア)が観測された。通信総合研究所平磯太陽観測センターによると、この爆発は平常時の約2000倍だった。これほどの規模は89年8月以来、ほぼ12年ぶりだという。

この影響で電離層が乱れた。国土交通省無線課によると、運航やダイヤには影響はなかったが、3日午後3時半ごろから約2時間にわたり、成田空港と飛行中の国際線の航空機との通信状況が数分ずつ、断続的に悪くなった。

同センターによると、今後、地球の磁場が大きく乱れる「磁気嵐」が起こる可能性もある。秋岡真樹センター長は「航空、船の無線や、短波放送、人工衛星の運用などに影響が出る恐れもある」と注意を呼びかけている。



太陽観測衛星がとらえた太陽フレア=3日午後4時43分、宇宙科学研究所提供

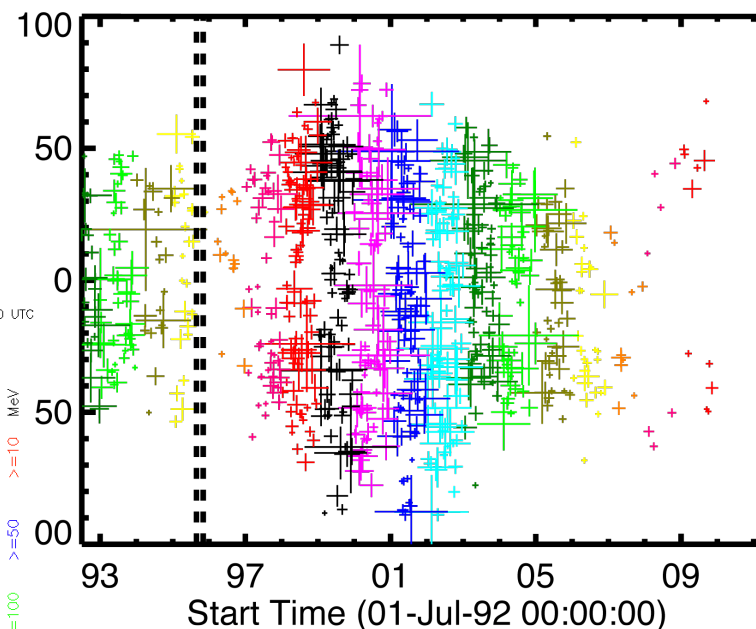
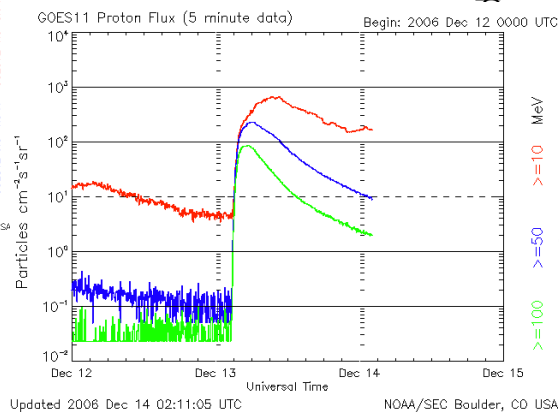
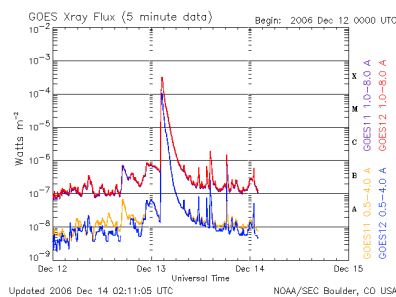
(2001/04/05)

インターネット

電波で探る宇宙天気

◎ 発生源（太陽表面）

- プロミネンス放出現象
- 太陽フレア
 - フレアによる加速粒子



◎ 太陽圏での伝搬（衝撃波・加速粒子の伝搬）

- メートル波バーストの、スペクトル変化による伝搬

野辺山太陽電波で研究をする方法

◎ 総合研究大学院大学 天文科学専攻

- 5年一貫博士課程（修士＋博士）：8月に入試
 - 面接＋筆記試験（英語・専門科目）
- 博士課程3年時編入（博士）：8月・1月に入試
 - 研究発表＋口頭試問＋筆記試験（英語）

◎ 国立天文台特別共同利用研究員（受託院生）

- 修士課程：1年間のみ
- 博士課程：1年＋延長が可能

野辺山太陽電波観測所のデータ

◎ 即日オープン (取って出し状態)

◎ Webによるデータ取得が可能

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/>

- 低時間分解能だが、すでに像合成済みの画像あり。
- フレア、プロミネンス放出のイベントリスト有り。

◎ 干渉計データから像合成のための環境を提供

- 野辺山太陽電波観測所の計算機アカウント申請

URL: <http://solar.nro.nao.ac.jp/computer/account.html>