

太陽フレア高エネルギー 現象の電波観測

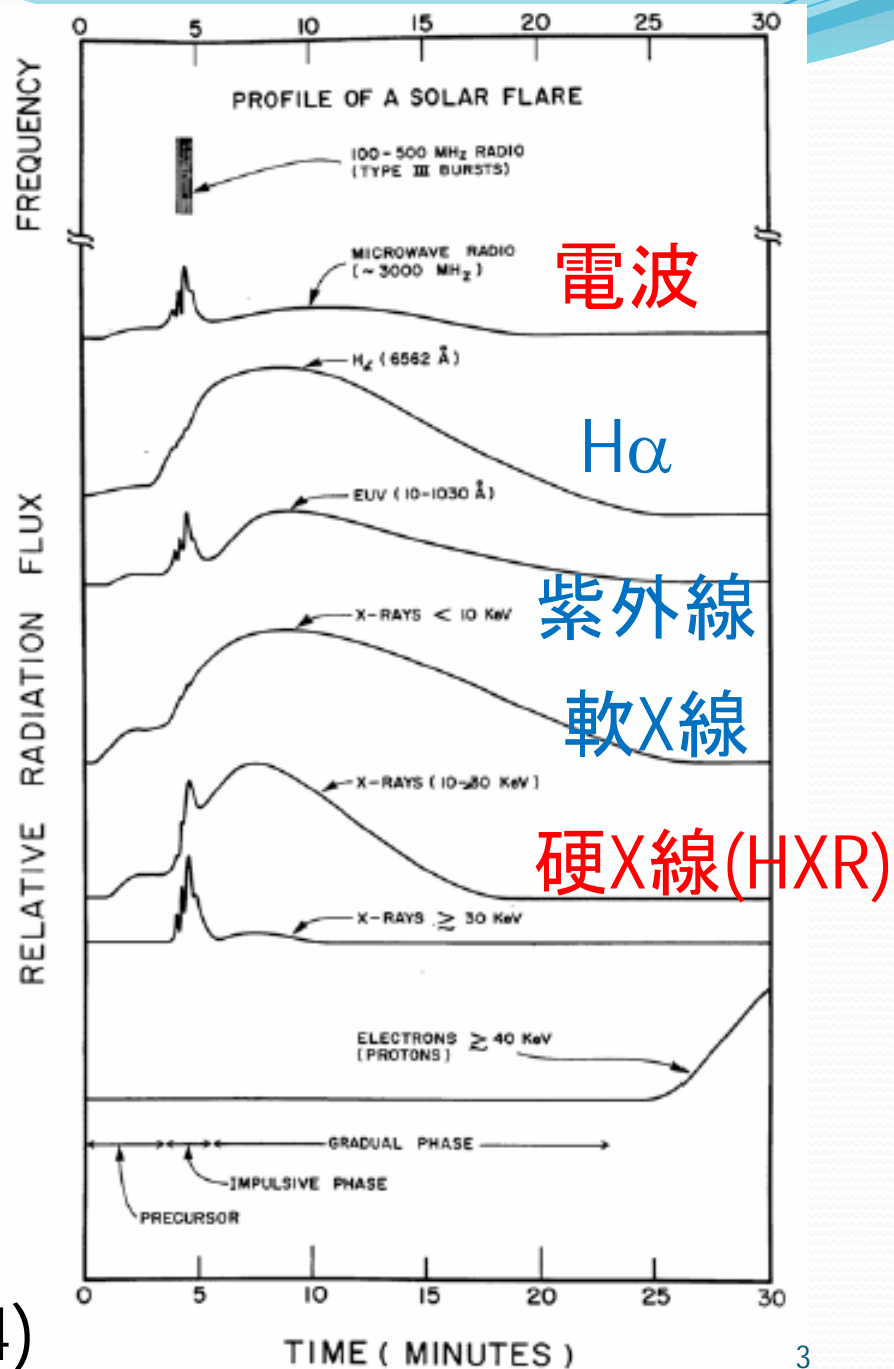
簗島 敬(海洋研究開発機構)

内容

- 太陽フレア電波のおさらい
- 太陽フレア電波観測研究の進展
- ALMAで狙うサイエンスターゲット

太陽フレア

- 加熱されたプラズマからの熱的放射
- 加速された電子からの非熱的放射
- ミリ波電波は非熱的放射



Kane (1974)

野辺山太陽電波

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

偏波計 (NoRP)



7波長で太陽全面からの放射を観測

電波ヘリオグラフ (NoRH)



2波長で太陽の2D画像を取得

NoRH vs. ALMA

下条さんスライドより抜粋

	NoRH	ALMA (Band 3)
波長	17 GHz, 34 GHz	84-116 GHz の間の4波長
空間分解能	10" @17 GHz 5" @34 GHz	0.38" @ 100 GHz(*1)
視野	太陽全面	62" @ 100 GHz(*2)
時間分解能	> 100 ms	> 32 ms
円偏光観測	Yes(17GHz)	No

*1:太陽観測モード時であって、ALMAの最高性能ではない

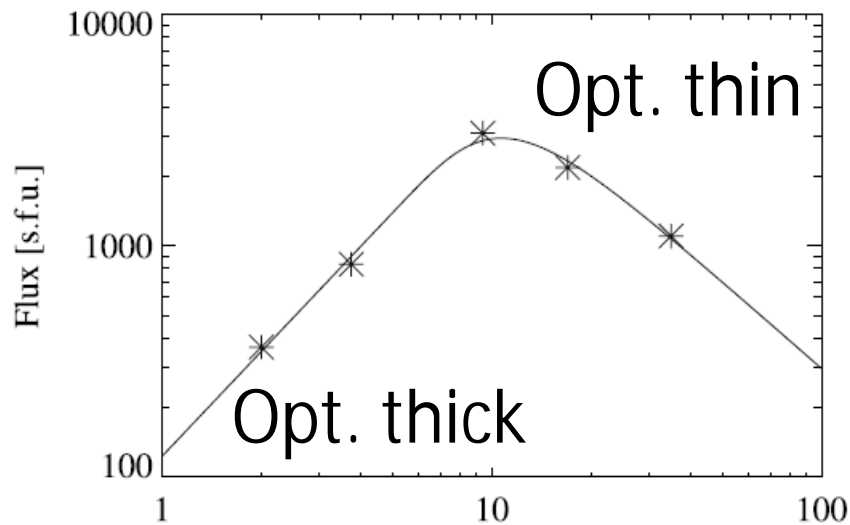
*2:大フレアの空間スケールは~100"

フレアのミリ波放射機構

- **ジャイロシンクロトロン(GS)放射** (Ramaty 1969)
 - 準相対論的電子のシンクロトロン放射
- 観測波長と現場のプラズマ環境の兼ね合いで、特性が大きく変わる

フレアのミリ波放射機構

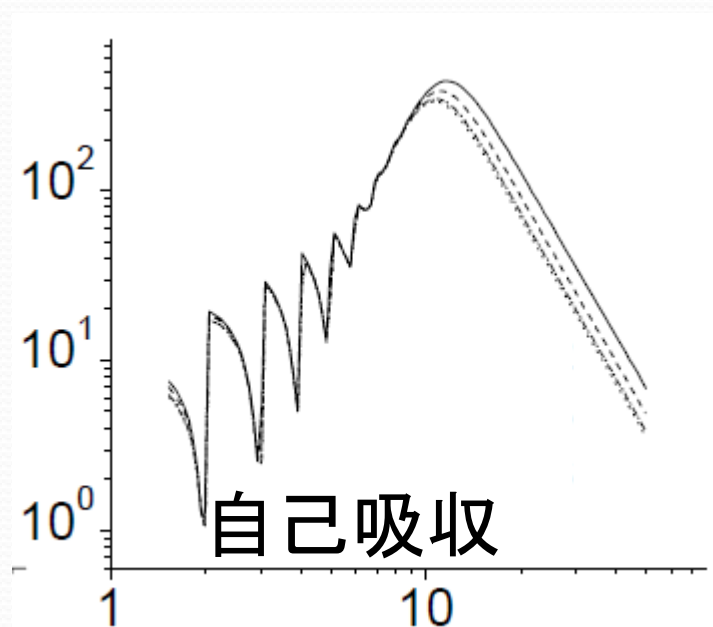
NoRP観測 (Minoshima+ 2008)



周波数 (GHz)

シンボルは観測
実線はフィッティング

数値計算 (Fleishman+ 2003)



周波数 ν/ν_B

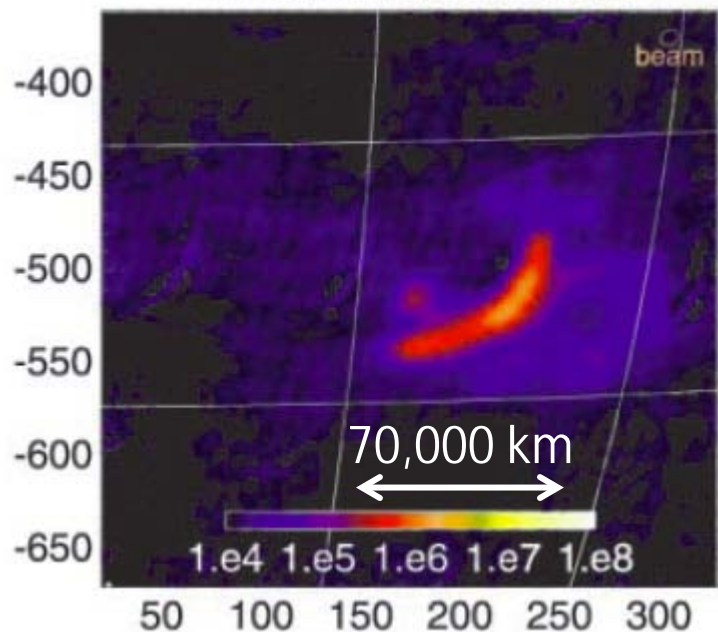
ν_B : ジャイロ周波数

フレアミリ波放射のパラメータ

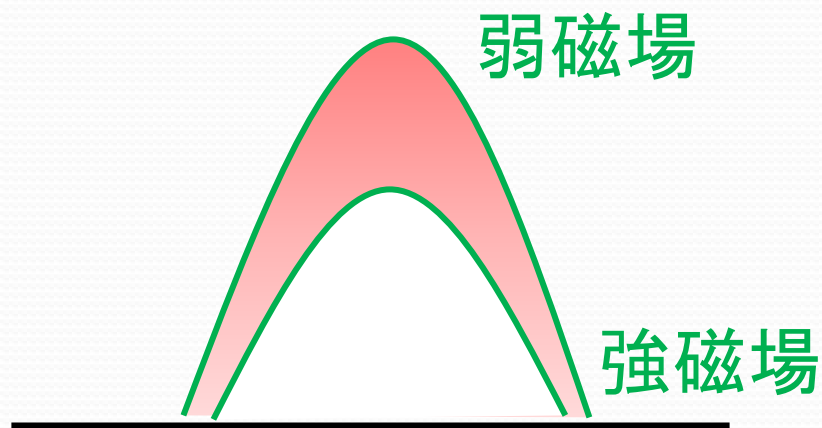
- 放射電子
 - 数密度
 - エネルギースペクトル
 - ピッチ角分布
- 背景場
 - 磁場強度
 - 磁力線と観測者の成す角
 - プラズマ密度

フレアミリ波放射の空間分布

Tb 34GHz 00:56:42



NoRH 34G
(Yokoyama+ 2002)



観測周波数固定

- 高エネルギー電子@弱磁場
- 低エネルギー電子@強磁場

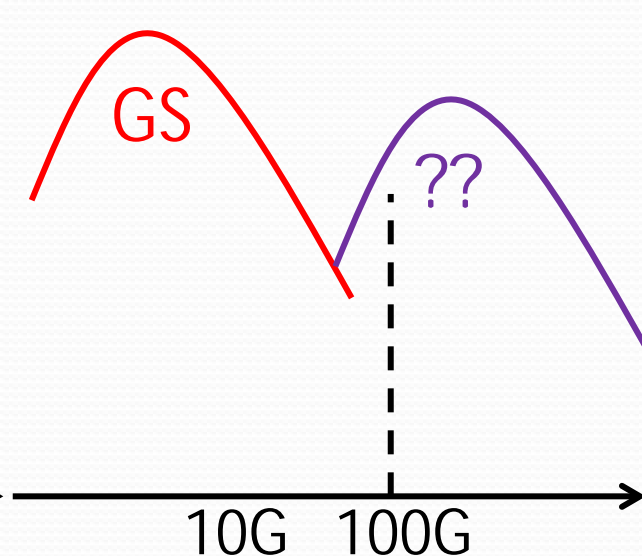
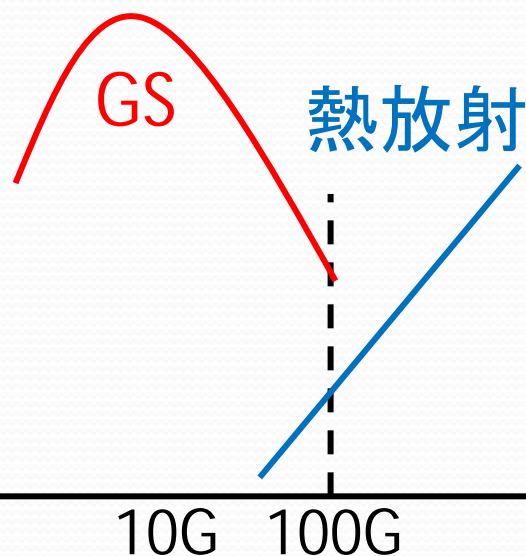
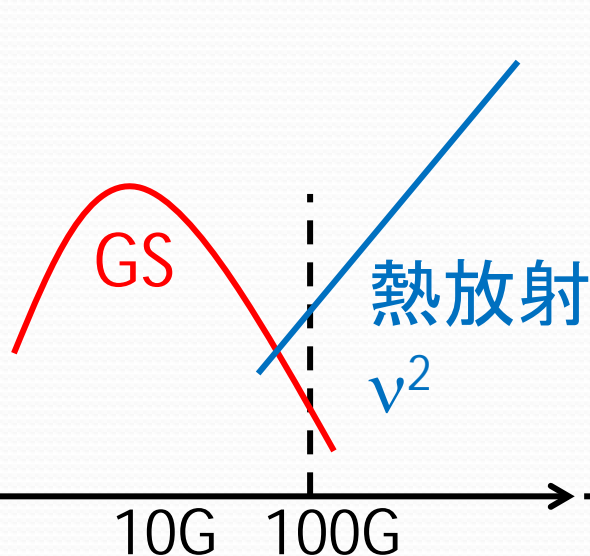
ALMAでは何が見えそう?

- NoRHでフレアを見てきた人々にとっては、**未知の周波数帯100 GHz**

(1) 熱放射?

(2) 同じ成分?

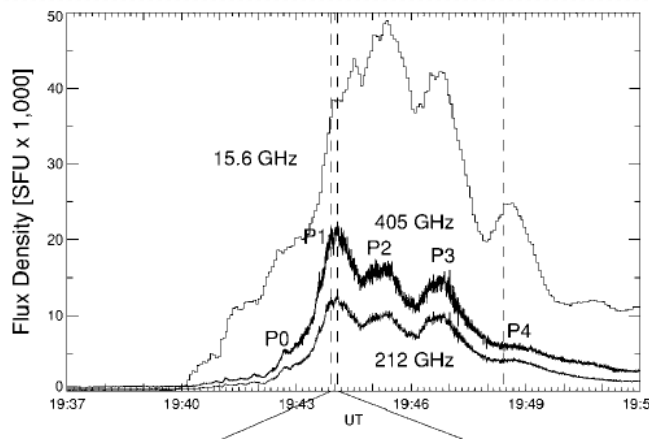
(3) 別の成分?



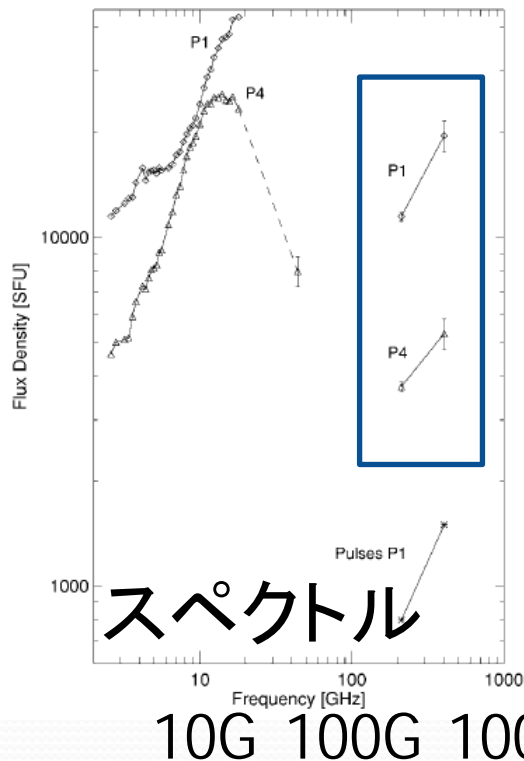
>100 GHz 電波の先行観測

Solar Submillimeter Telescope
(SST; Kaufmann+ 2001)

光度曲線



Figures from
Kaufmann+ (2004)



- Zhou+ (2011)から抜粋
- <100 GHz のGSの外挿っぽいイベント => ~10 MeV電子@コロナ!?
- 左図のようなイベント => 高エネルギー電子 @強磁場領域?

太陽フレア電波観測研究の進展

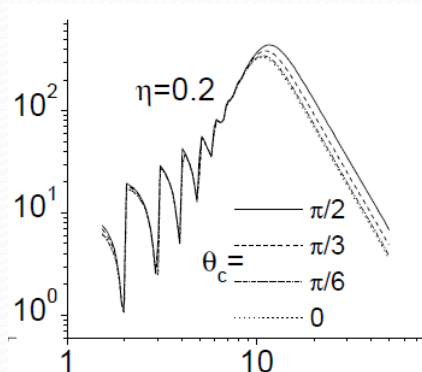
- 硬X線との共同観測
- 観測を再現する電子分布をフォワードフィット

電子分布

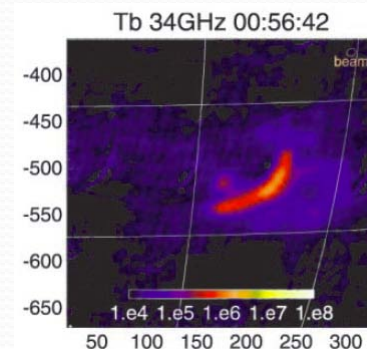
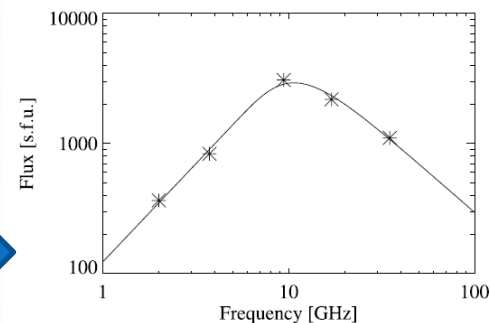
- 数密度
- エネルギー分布
- ピッチ角分布

GS計算

放射量

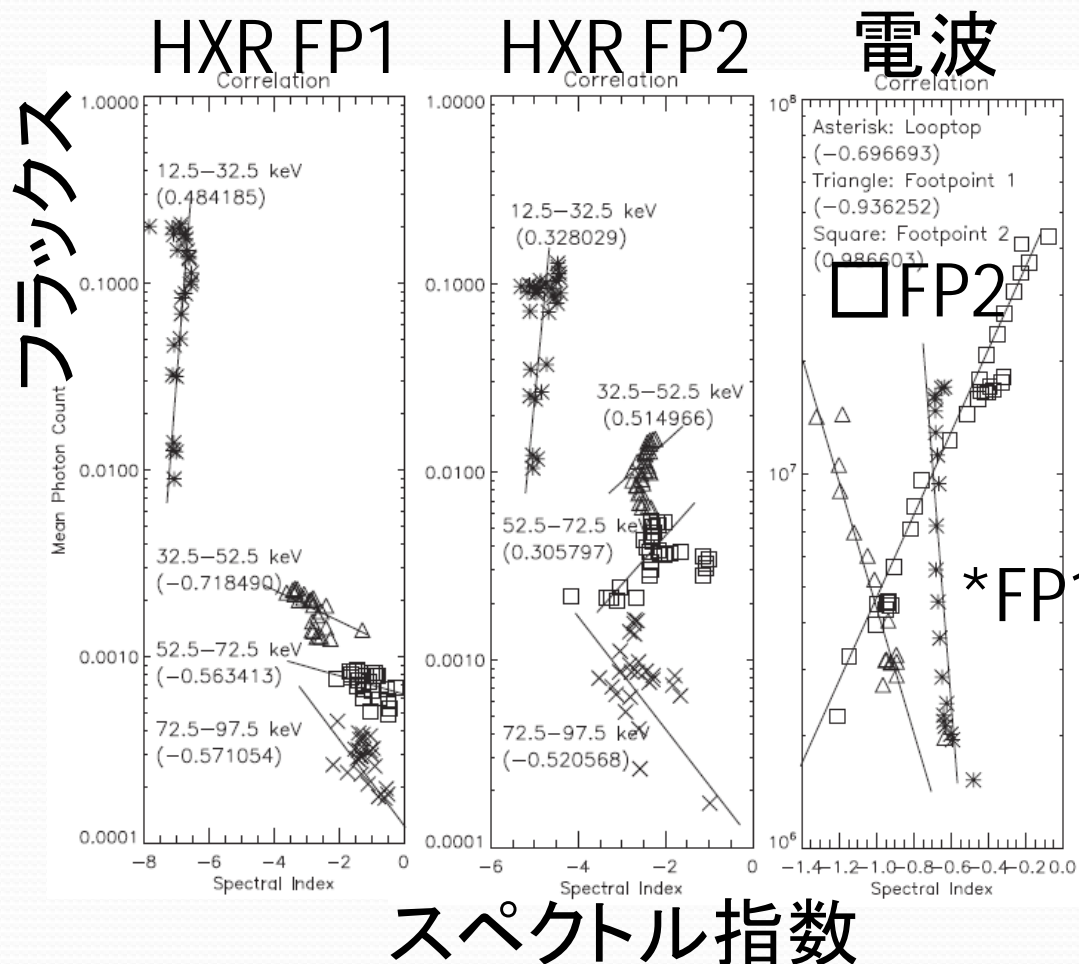


観測量



Figures from Yokoyama+ (2002),
Fleishman+ (2003), Minoshima+ (2008)

硬X線・電波共同観測



Huang+ (2011)

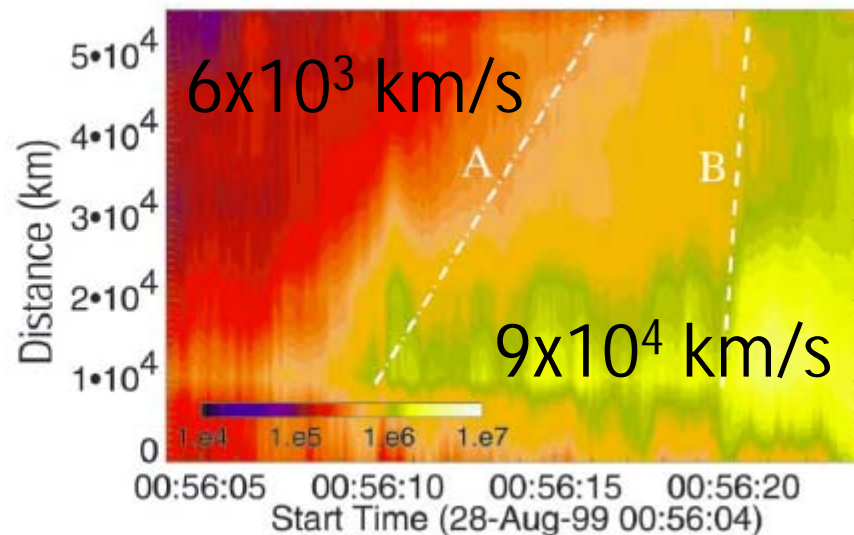
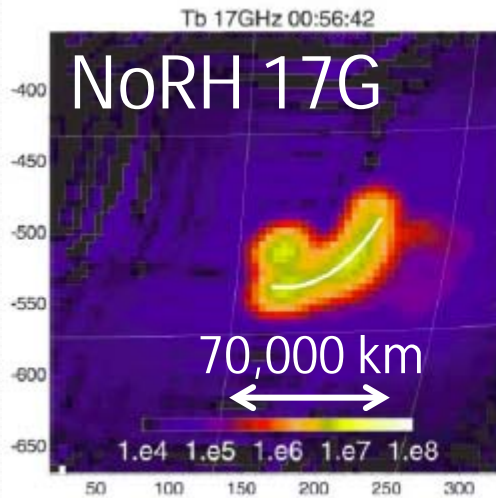
- 低エネルギー硬X線スペクトルとの相違
- 高エネルギー硬X線スペクトルとの類似
- 捕捉電子の寄与

E.g., Minoshima+ (2008); Song+ (2011); Kawate+ (2012)

高エネルギー電子伝播の観測

Yokoyama+ (2002)

高時間分解能(0.1s)
空間サイズ大



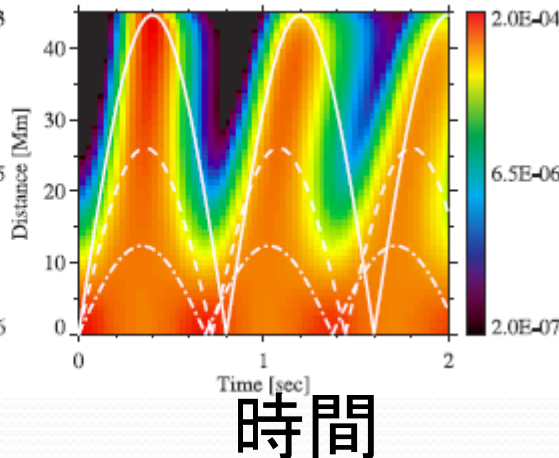
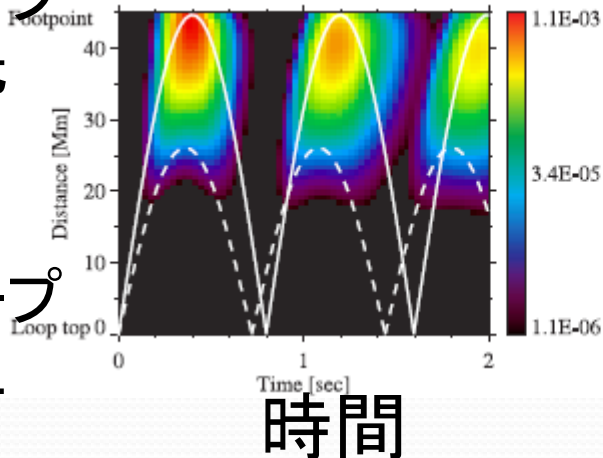
- 6×10^3 km/s = ホイッスラーに捕捉された電子?
(Stepanov+ 2007)
- 9×10^4 km/s = ピッチ角70度の電子?

高エネルギー電子伝播の検証

Minoshima+ (2008)

ループ
足元

ループ
頂上

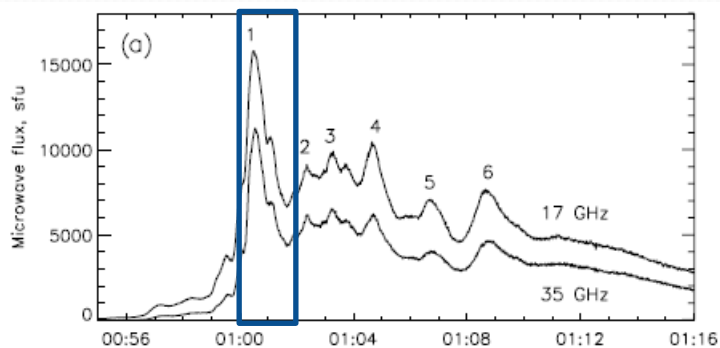


放射分布

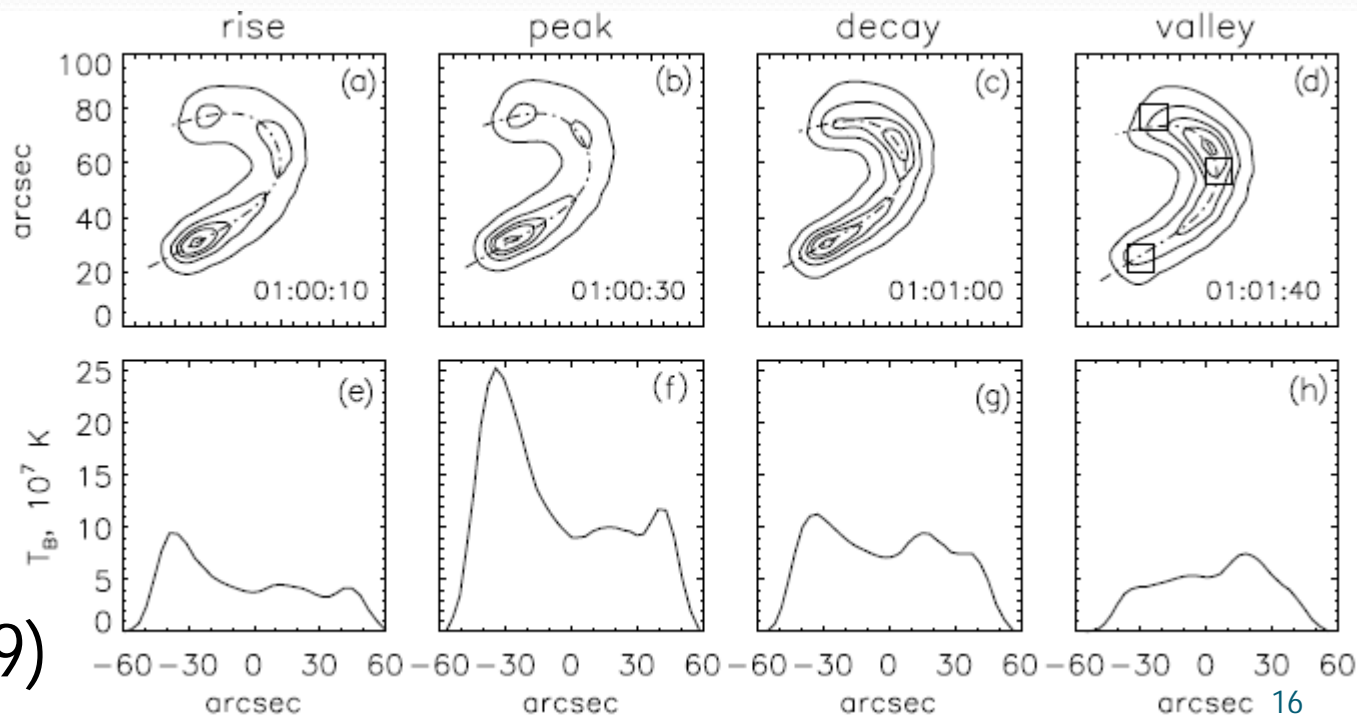
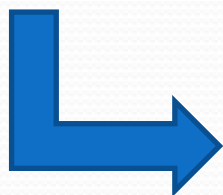
- 左: 注入電子のピッチ角が特定の場合
- 右: 注入電子のピッチ角が等方的

- 電子輸送数値計算 + GS計算
- 加速された電子ピッチ角は等方的

電波源分布と注入電子分布



- ループに沿った強度分布が時々刻々変化



Reznikova+ (2009)

電波源分布と注入電子分布

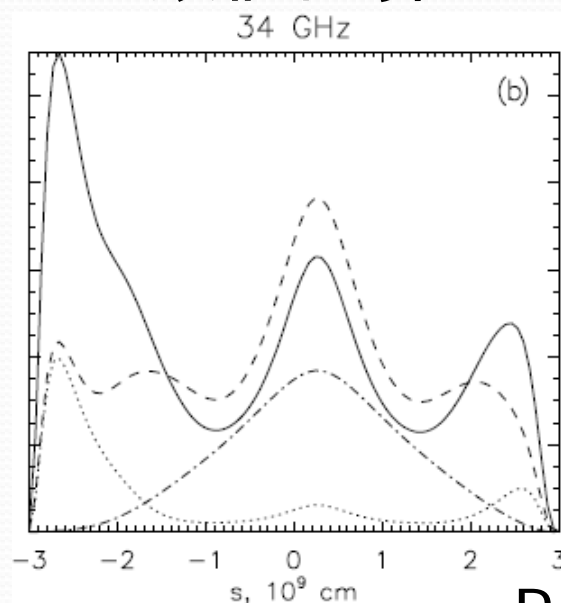
- フォッカー・プランク輸送モデル

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(D_{\mu\mu} \frac{\partial f}{\partial \mu} \right) + S,$$

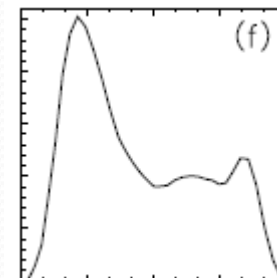
$$f = f(r, E, \mu; t).$$

- GS数値計算

数値計算



観測

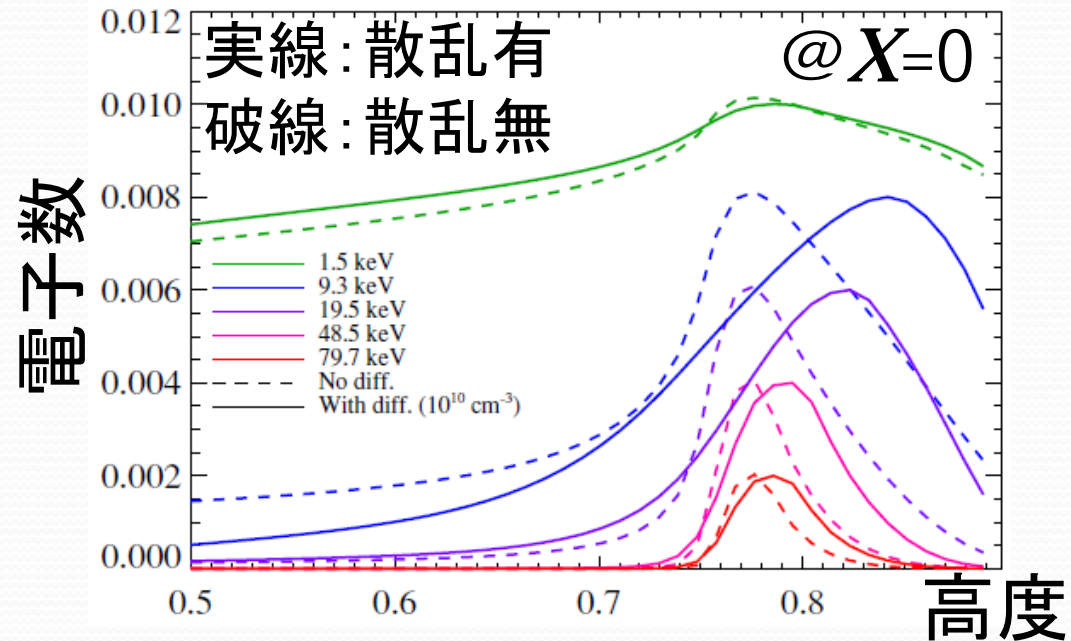
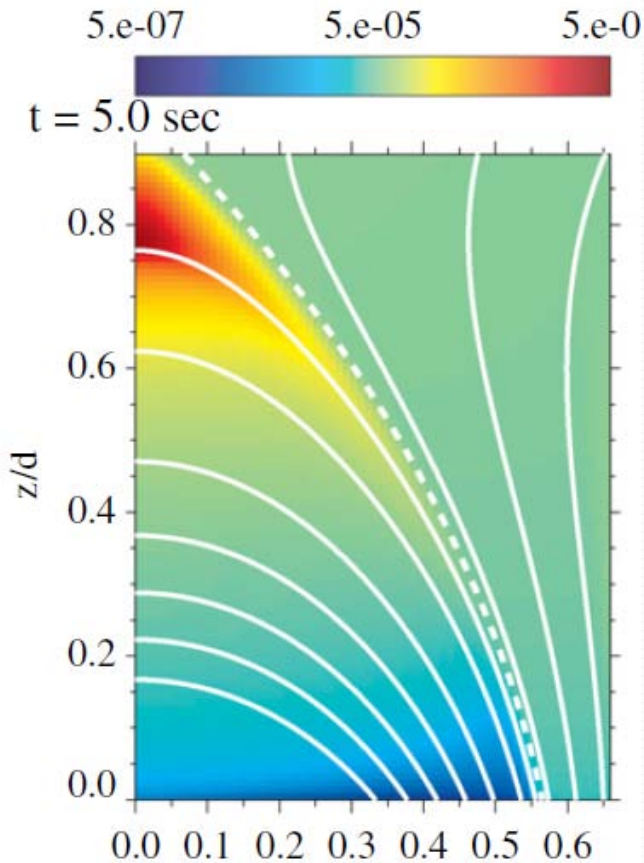


Reznikova+ (2009)

- 注入電子分布 S の推定 \Rightarrow 加速モデルへ制約
- このイベントでは、ビーム+等方

電子加速・輸送のモデリング

20 keV電子密度



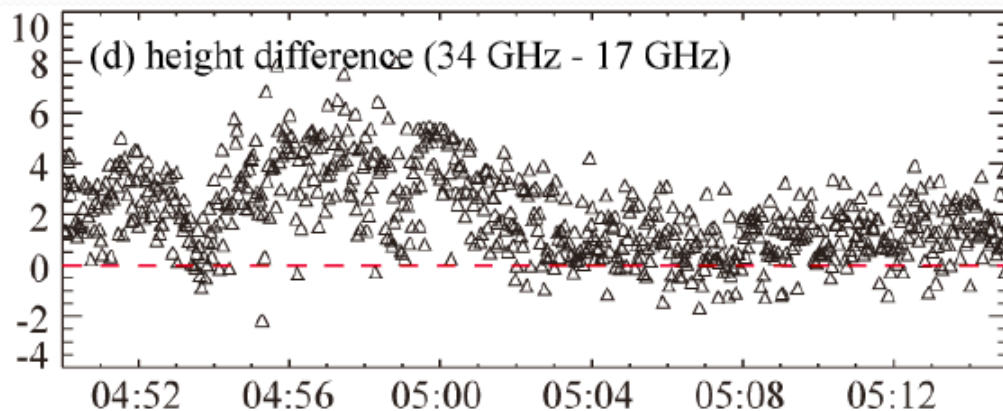
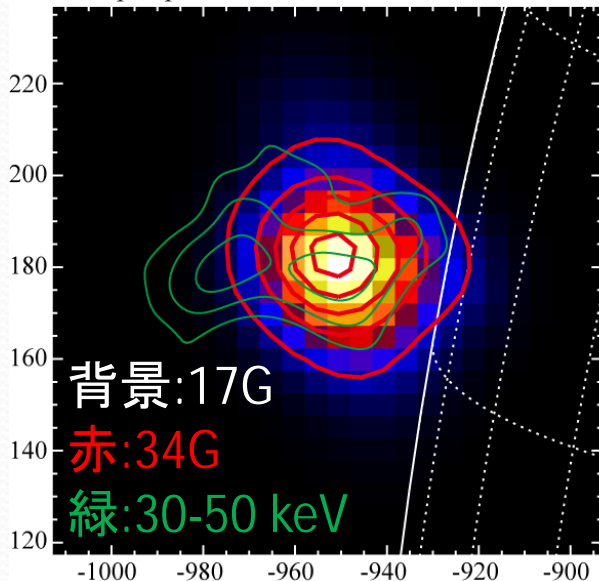
- 断熱加速とピッチ角散乱
- 加速・輸送・散逸のバランスで高度分布が決まる

電波源の高度分布

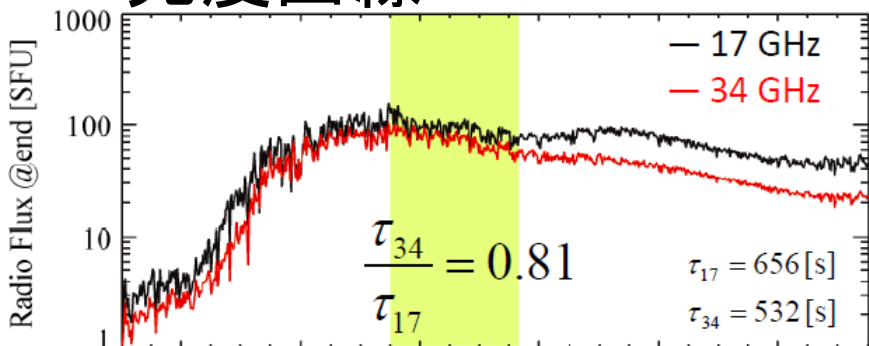
後藤智子 (2012) 修士論文

高度差 (34G - 17G)

Loop-top sources 27-Jul-2005 04:55:30 UT



光度曲線



- 断熱加速が始まる前から高エネルギー電子は存在
- 高エネルギー電子を速く散乱する機構を示唆

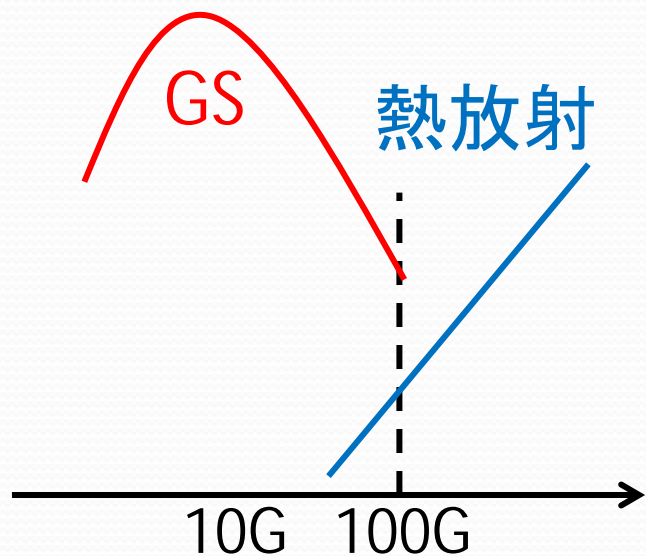
ALMAで狙うサイエンスターゲット

- フレア 100 GHz 放射の空間分解は世界初
- 利点
 - 超高空間分解能 $0.38'' @ 100 \text{ GHz}$
 - 超高時間分解能 $> 32 \text{ ms}$
- 弱点
 - 観測視野 $62'' @ 100 \text{ GHz}$
 - 観測占有時間

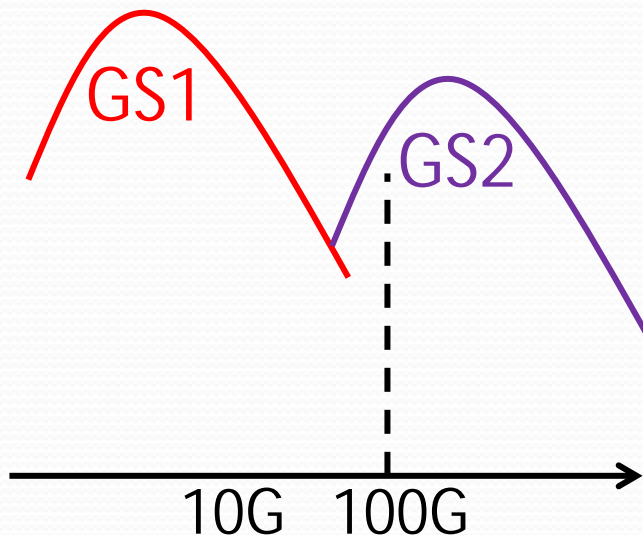
小規模で頻発するマイクロフレア

- 個人的にはリムイベントのコロナ観測が魅力

>100 GHz放射源の特定



OR



~10 MeV電子@コロナ!?

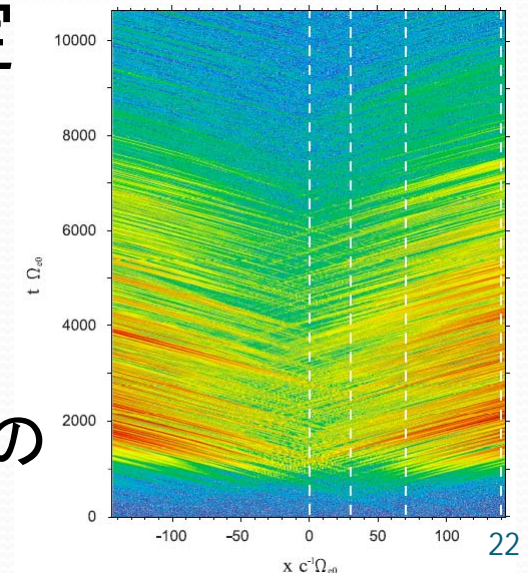
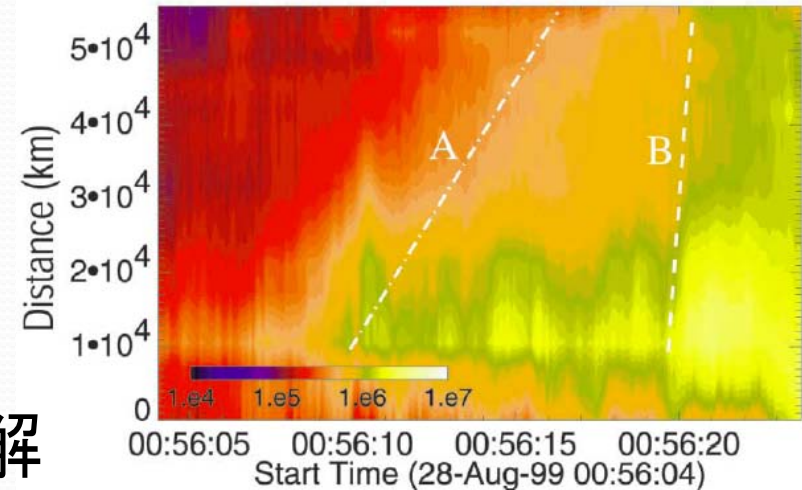
高エネルギー電子
@強磁場領域?

- 画像合成で解決
- コロナで光っていればインパクト大

電波源高速伝播が観測された唯一のイベント

電波源の空間分解

- NoRH: 大サイズ限定
 - 100秒角を10-20点で分解
- ALMA
 - ループを最大~100点で分解
- 高速伝播: 電子加速場所の決定
- 低速伝播: ホイッスラー伝播?

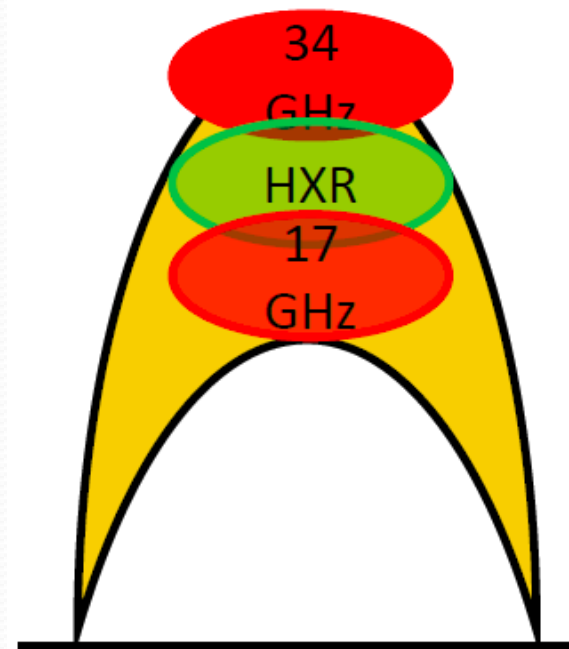


温度異方性に伴うホイッスラー波動伝播の数値シミュレーション (Hikishima+ 2009)

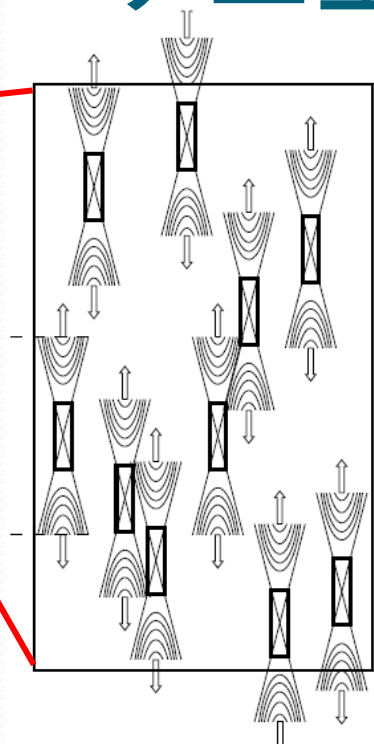
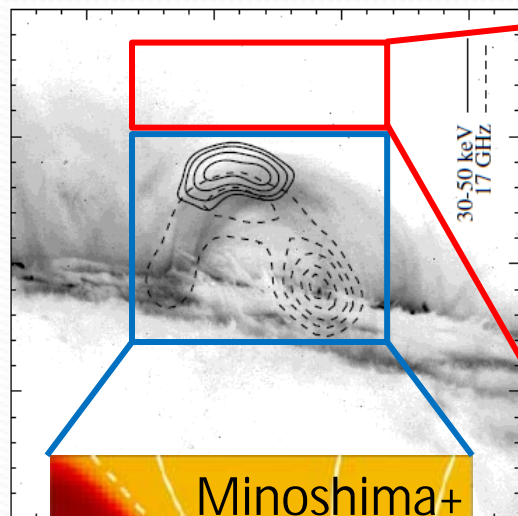
電波源の高度分布

- NoRH 34 GHz は 17 GHz より上空 (後藤, 2012)
 - 上空での電子加速
 - 高エネルギー電子の速い散乱
 - NoRHでは解像度不十分
- さらに高エネルギーの 100 GHz は? ピーク高度、時間スケール
 - 空間分解、スペクトル分解
 - 10点程度で分解

HXRと17Gの関係は
Minoshima+ (2012)でOK.
34G は不明

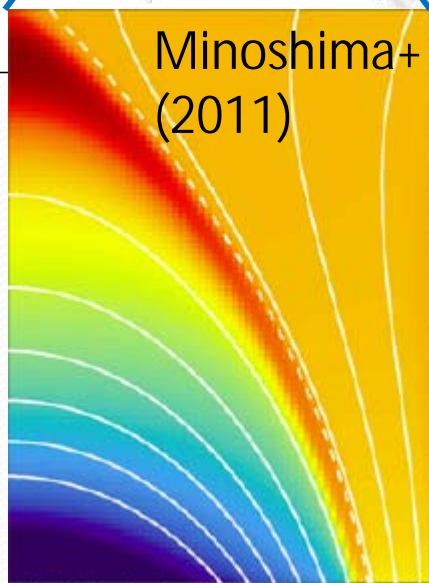


加速現場@コロナ上空



1000 km 以下の多くの加速領域
(Aschwanden 2002)

- 初期加速 + 第2加速・輸送
- ALMA 空間分解能 $0.38'' = 266 \text{ km}$ で初期加速領域を分解できるか?



まとめ

- 太陽フレア電波のおさらい
 - 非熱的電子のジャイロシンクロトロン(GS)放射
 - ALMA 100GHz では、コロナかループ足元
- 太陽フレア電波観測研究の進展
 - 電子数値モデル+GS計算+観測で、電子分布関数の推定
- ALMAで狙うサイエンスターゲット
 - 放射源の特定
 - 電波源の空間分解観測
 - 加速現場そのものを分解出来るかも?