



ALMA太陽観測 ワークショップ@京都

2012年10月3日
至：京都大学・理学部セミナーハウス

国立天文台・チリ観測所/京都大学

本ワークショップの目的

- ALMAにより太陽観測ができることを知ってもらう。
 - mm/sub-mm波は、太陽物理学にとって新しい窓である。
- ALMA太陽観測でのScience Targetを議論する。
 - mm/sub-mm波で観測できる大気層や活動現象において、ALMAが実現する高空間分解能で何ができるか？
 - 個々のScienceを実現する上で、ALMAに要求するスペックは何か？
- ALMAデータを利用した研究のためのチーム作り。
 - プロポーザルにむけてのKick Off



太陽観測における ALMAの性能と準備状況



国立天文台 野辺山太陽電波観測所/チリ観測所
下条 圭美

2012/10/3 ALMA太陽観測ワークショップ@U. Kyoto

Contents

1. Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array
の基本性能
2. ALMAでの太陽観測の準備状況
3. 試験観測からわかった
ALMAの太陽観測における制限
4. ALMAで何が見えるか？

Atacama Millimeter/sub-millimeter Large Array (ALMA)

- ALMA is the largest mm/sub-mm wave interferometer in the world.
- ALMA is located at the Chilean Atacama desert (Chajnator). The altitude of the antenna site is 5000 m for observing sub-mm wave.
- ALMA is constructed from 54 12m-antennas and 12 7m-antennas.

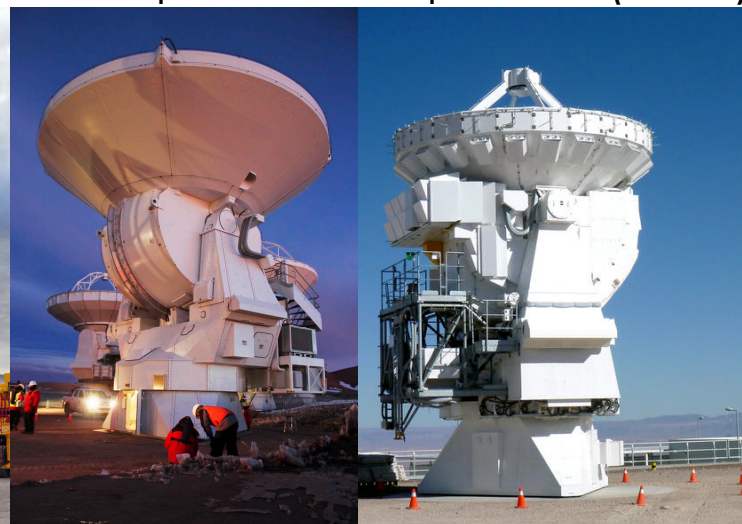
US 12m



Japan 12 m



Europe 12 m Japan 7m(ACA)



2012.10.3

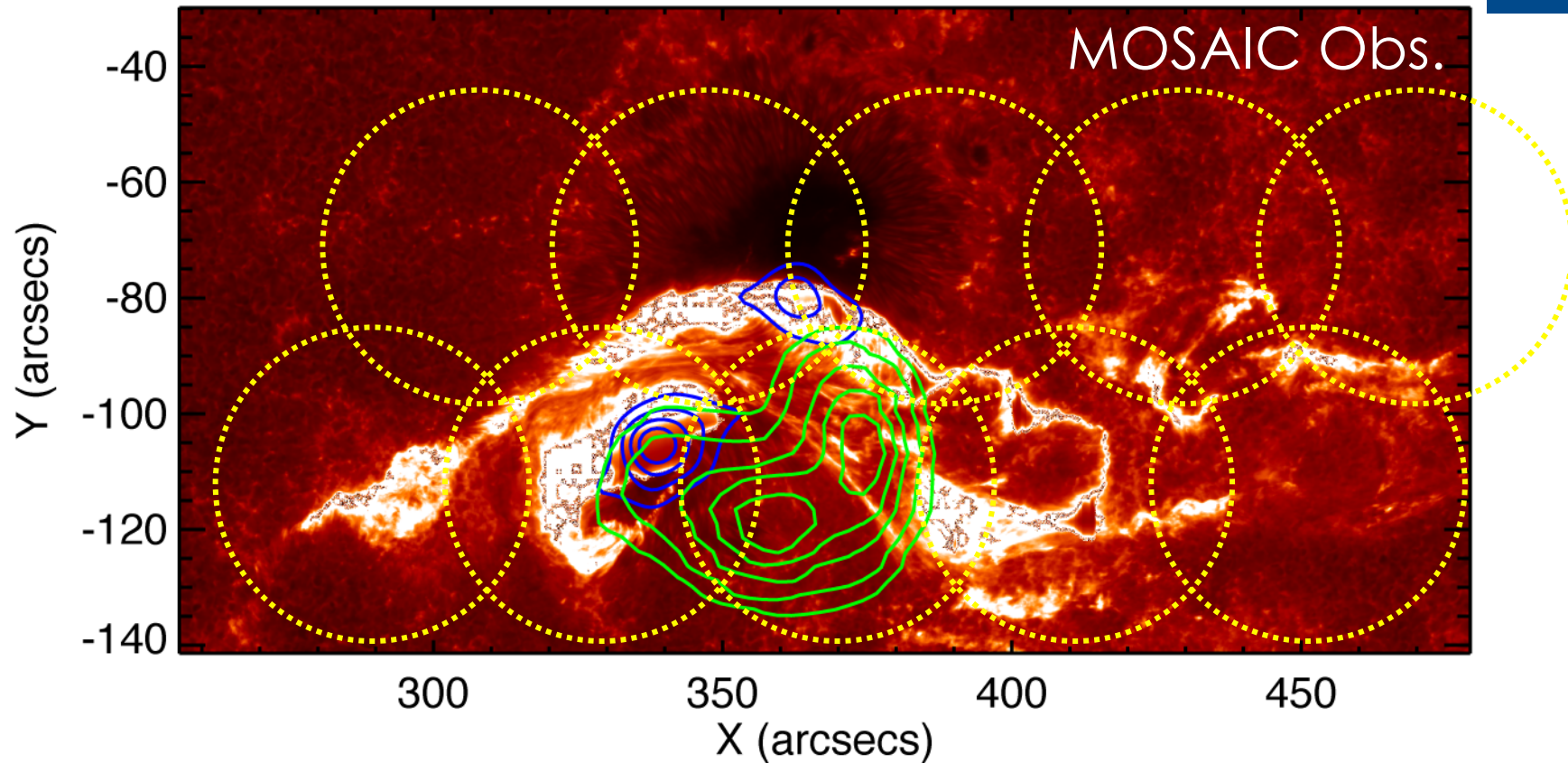
Spatial Resolution, FoV & Shortest Integration Time



- The spatial resolution of interferometer depends on the observing frequency & the longest baseline.
 - FWHM of synthesized beam ["] = $76 / \text{max. baseline [km]} / \text{Freq. [GHz]}$
 - Maximum of the longest baseline :16 km
 - FWHM of synthesized beam : 0.06"@85GHz - 0.005"@950GHz
 - In solar observations, the spatial resolution is not possible.
- Basically, the size of FoV is depend on the diameter of the antenna & the obs. frequency.
 - FoV: 62"@100GHz, 18"@300GHz, 7"@950GHz
 - The large FoV is possible by MOSAIC, but the time resolution is down.
- Shortest Integration Time : 32 msec
 - The value is not "time resolution". The time resolution of synthesized images strongly depends on a target. We need to verify the time resolution for solar observations in the CSV activities.

ALMA's Field of View [Band 3]

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



An X class flare observed with NoRH, RHESSI and Hinode. Green Contours: NoRH 34 GHz, Blue Contours: RHESSI 35-100keV, Color Scale: Hinode Ca II H band.

Spatial Resolution, FoV & Shortest Integration Time



- The spatial resolution of interferometer depends on the observing frequency & the longest baseline.
 - FWHM of synthesized beam ["] = $76 / \text{max. baseline [km]} / \text{Freq. [GHz]}$
 - Maximum of the longest baseline :16 km
 - FWHM of synthesized beam : 0.06"@85GHz - 0.005"@950GHz
 - In solar observations, the spatial resolution is not possible.
- Basically, the size of FoV is depend on the diameter of the antenna & the obs. frequency.
 - FoV: 62"@100GHz, 18"@300GHz, 7"@950GHz
 - The large FoV is possible by MOSAIC, but the time resolution is down.
- Shortest Integration Time : 32 msec [TDM]
 - The value is not "time resolution". The time resolution of synthesized images strongly depends on a target. We need to verify the time resolution for solar observations in the CSV activities.

Observing frequencies of ALMA

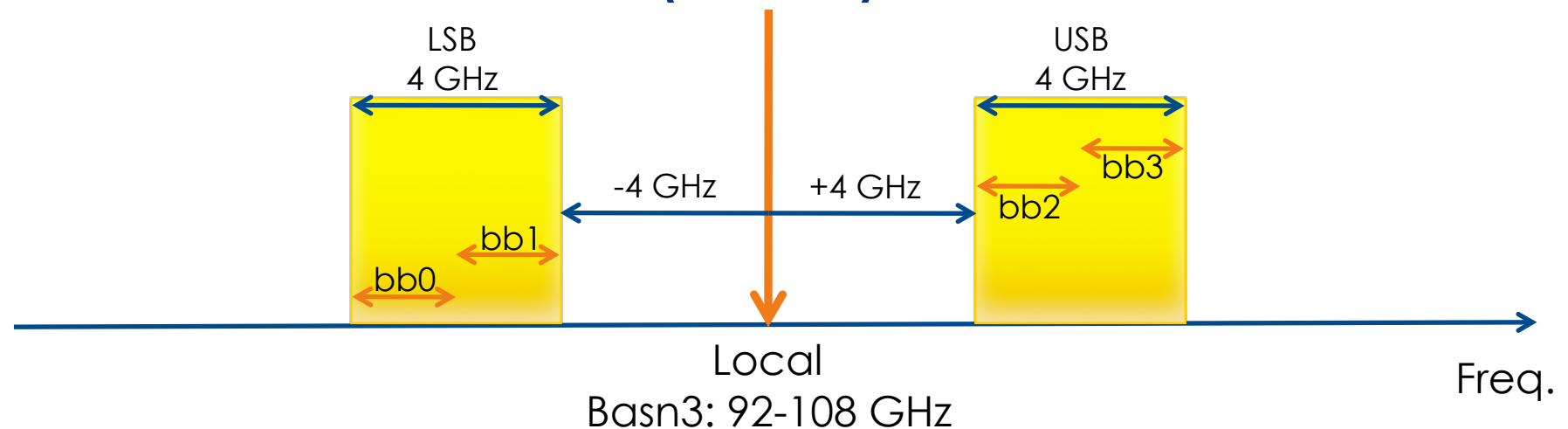


- ALMA will have 7 observing bands when the full operation is started in 2013.

■ <u>Band 3:</u>	84 – 116 GHz	*	(3.6 – 2.6 mm)	
■ Band 4:	125 – 163 GHz	*		
■ <u>Band 6:</u>	211 – 275 GHz	*		
■ Band 7:	274 – 373 GHz	*	Circular Polarization	
■ Band 8:	385 – 500 GHz	*		
■ Band 9:	602 – 720 GHz			Ex. Nobeyama Radioheliograph 17 GHz (1.7cm) & 34GHz (8.8mm)
■ Band 10:	787 – 950 GHz		(0.4 – 0.3 mm)	

- Asterisks indicate that the receiver (band) can observe 4 frequency ranges in the band (Width of each range is 2 GHz) simultaneously. Band 9 /10 can observe 2 frequency ranges simultaneously.
- A few mins is needed for changing the band.

Setting of Obs. Frequency For Continuum (TDM)



- Time Domain Mode (TDM : 上図の設定)
 - 256 channels / N polarizations / one Baseband (bb) [2GHz幅]
- Frequency Domain Mode (FDM)
 - 細かい周波数設定が可能。

Solar Filter

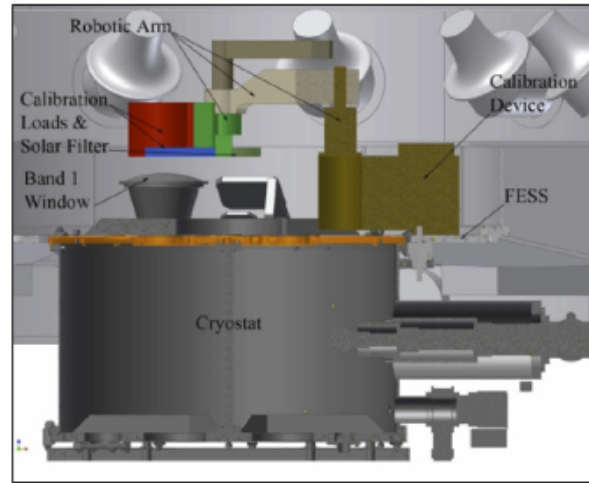
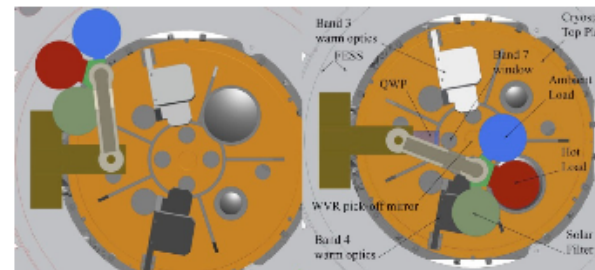


Figure A.7: Lateral view of the ACD on top of the ALMA frontends.

- ALMAは超高感度な望遠鏡
 - ex. 検出感度 $0.2 \text{ mJy/Beam} = 1\sigma @ \text{Band7}/1.5 \text{ min}/\text{Cycle}1$
- 太陽は強烈な電波源 $\sim 10^5 \text{ Jy/Beam}$
 - Good: 積分時間は最小値でも十分すぎる強度
 - Bad: 受信機の線形性が保てていない領域を使う事になる。
- 受信機に入る前に減衰し、受信機が線形性を保つレンジで観測する。
→ 受信機前の太陽フィルター[-10dB@100GHz/-5dB@1THz]

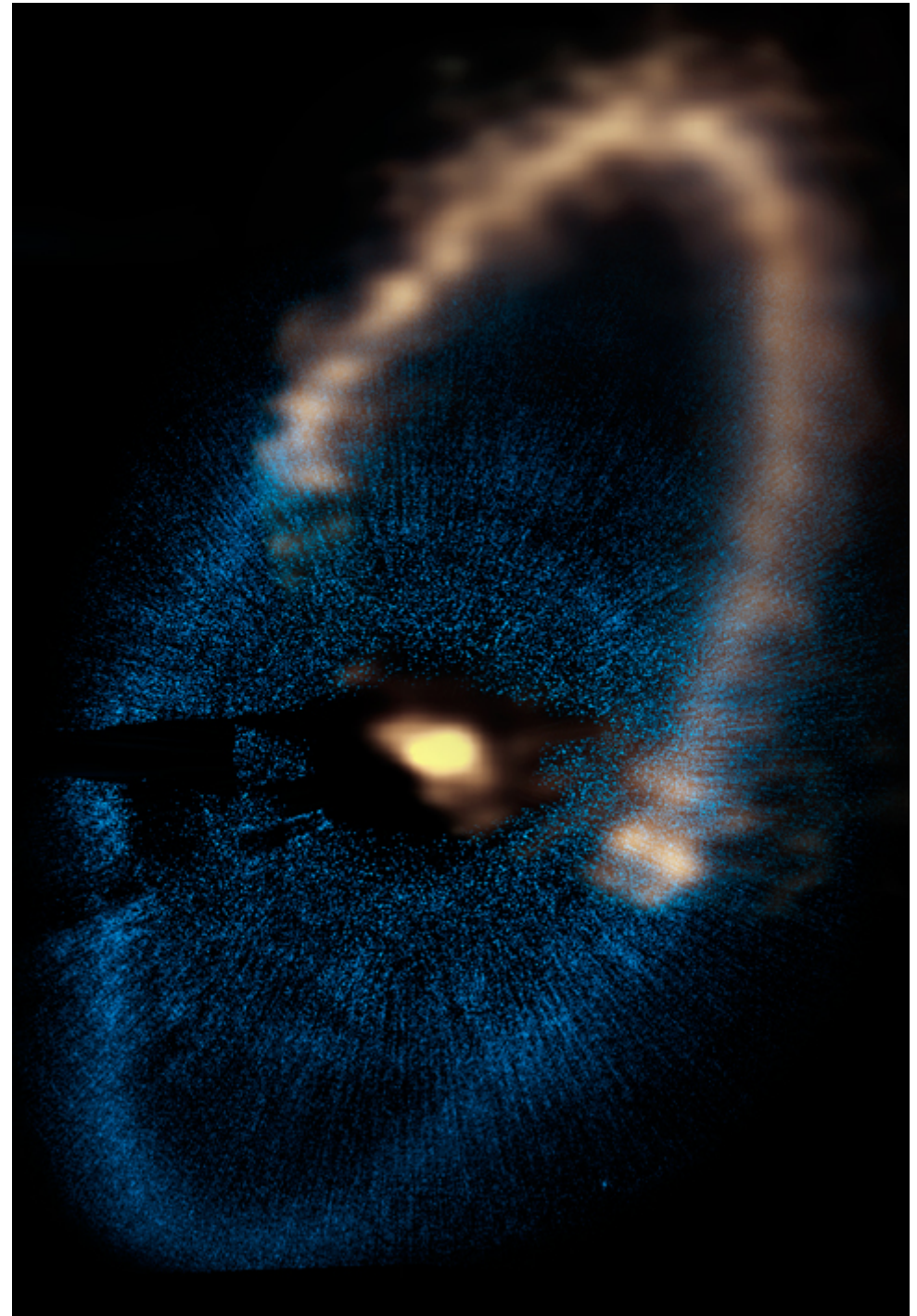


Cycle 0 and SV refereed papers



- High-z, extragalaxies
 - Cycle 0 Nagao et al. A&A 542, L34 $z=4.76$ SMG LESS J033229.4 [NII]
 - SV Wagg et al. ApJ 752, L30 $z=4.7$ SMG BR1202 [CII]
 - SV Herrera et al. A&A 538, L9 Antennae CO3-2
- Galactic
 - SV Zapata et al. ApJ 754, L17 Ori KL SiO outflow
 - SV Pineda et al. A&A 544, L7 IRAS16293 P-Cygni profile
 - Cycle 0 Boley et al. ApJ 750, L21 Fomalhaut B7 continuum
 - SV Oberg et al. ApJ 749 162 TW Hya HCN
 - SV Rosenfeld et al. ApJ in press TW Hya CO2-1,3-2
 - SV Hirota, Kim, Honma ApJL in press Ori KL 232G H₂O maser discovery
 - Cycle 0 Late-type star, European PI, Nature in press
- Astrochemistry
 - SV Jorgensen et al. ApJL in press IRAS16293 Glycolaldehyde

- Boley et al.
- ApJ 750, L21
- Fomalhaut
- B7 continuum



Current Status

- 46 antennas at AOS (12 of them are Japanese)
 - 27 of them are being used for Cycle 0 (cf. nominal 16)
- All 16 ACA antennas have been delivered to JAO
- 18 Band-4, 25 Band-8, 6 Band-10 cartridges have been shipped.



Photo: 2012 May 12 when 33rd antenna arrived



Contents

1. Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array
の基本性能
2. ALMAでの太陽観測の準備状況
3. 試験観測からわかった
ALMAの太陽観測における制限
4. ALMAで何が見えるか？

ALMA太陽観測の歴史

- ALMAのスペック策定時に、米国/ヨーロッパ主導で「太陽観測が可能であること。」との方針が盛り込まれる。ただし、その後の太陽電波コミュニティからのインプットはほぼ無かったらしい。
- 2010年末：EA-ARC(NAOJ)主導で、太陽観測の立ち上げがスタート。
- 2011年2月：アンテナ・受信機の太陽に対する耐性をみるため、アンテナ1台による太陽全面スキャンを行う。
- 2011年5月：太陽観測キャンペーン1回目
- 2011年12月：太陽観測キャンペーン2回目
- 2012年6月：太陽観測キャンペーン3回目

太陽観測キャンペーン 1 回目



- 太陽観測における問題点の洗い出しが目的。
 - 実施日：2011年5月11~19日
 - 参加者（敬称略）：R. Hill, 森田, A. Hales, 下条
- 成果
 - 差動回転を考慮した、太陽ディスク内構造のトラッキングができることを確認。
 - Pointingの記録にバグがある事を発見。次の運用ソフトで改修。
 - 太陽観測における初FRINGE（干渉計観測の確認）
 - 太陽フィルターの設定変更。
 - この時のフィルターにおける想定対象がM-Xクラスフレアであったため、現実のフレア観測の可能性およびキャリブレーションの方法との齟齬があった。

ALMAの生データは？

- 電波干渉計は、

$$V(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_N(x,y) I(x,y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$$A_N(x,y) I(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u,v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv$$

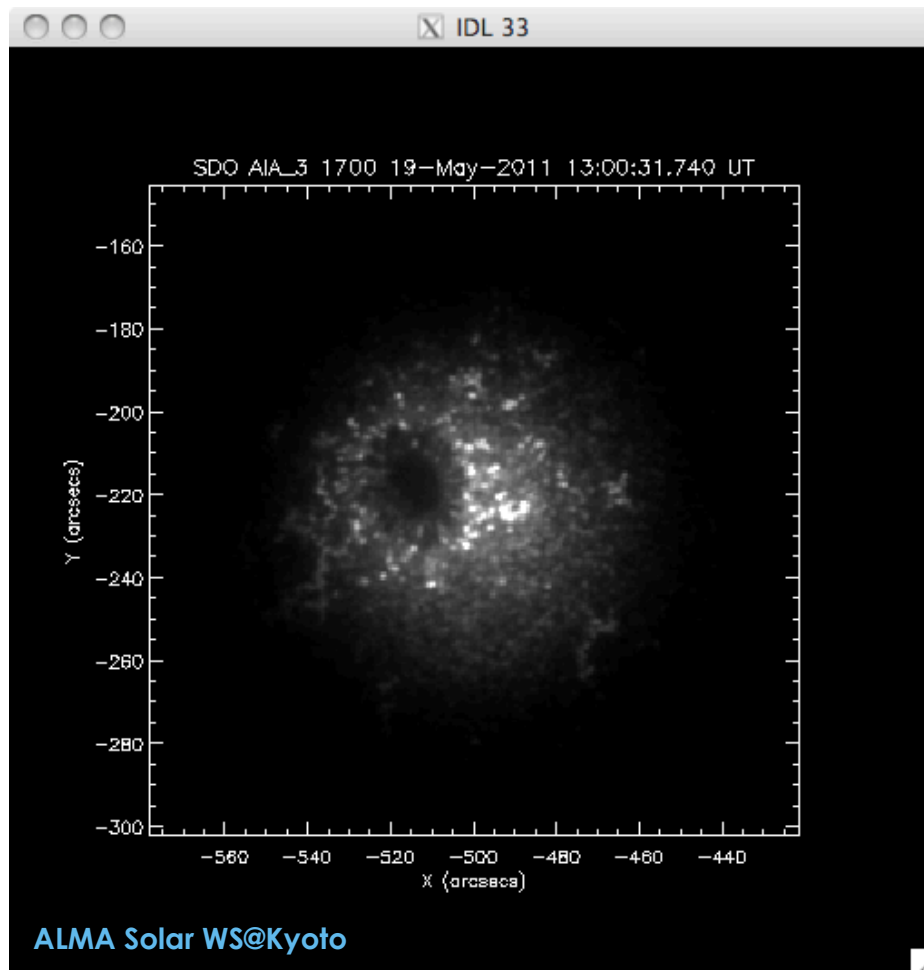
$$V(u,v) = |V(u,v)| e^{i\Phi(u,v)}$$

天球上の電波強度分布（ I ）をアンテナの合成ビームパターン（ A_n :干渉計のPSF）でコンボリューションしたものの、フーリエ成分“ V ”（ビジビリティ）を直接測定する観測装置。

- ALMAの生データは、
 - 相関フラックス(Amplitude) $|V(u,v)|$
 - 位相(Phase) $\Phi(u,v)$

この二つの値を精度良く決めることが最重要課題。

Target Region



- NOAA 11216
 - 19 May, 2011 13:00UT
 - ALMA observed the spot using 8 12m-antennas.
 - Number of baselines (number of data point in u - v plane) : 28
 - Integration Time : 1 sec
 - SDO/AIA
 - 1700 band (UV continuum)
 - Time resolution : 24 sec

太陽観測キャンペーン第2回

■ 実施日程

- 2011年12月2日~8日
- 参加者：R. Hill, 森田, R. Mauersberger, A. Hales, P. Yagoubov, 下条

■ 目的

- 新太陽フィルターの実機による特性測定（特に遅延量）
- 長時間(>2時間)太陽観測による、Pointing・Focus・太陽フィルターの変動の測定
- 像合成用の太陽観測データの取得。

■ 成果

- 太陽フィルターが観測開始時に自動的に抜かれてしまうという、ソフトウェアのバグが判明。そのbugfixのため、ほとんどの観測ができなかった。

太陽観測キャンペーン第3回

- 実施日程
 - 2012年6月20日~27日
 - 参加者 : R. Hill, R. Mauersberger, A. Hales, R. Brajsa (EU-ARC), 下条
- 目的 : 第2回とほぼ同じ。以下の項目が追加。
 - ACA (日本製7mアンテナ群) による初太陽観測
 - 干渉計観測とSingle-Dishによるスキャン観測の同時観測。
- 成果
 - 太陽フィルター特性測定用のデータ取得
 - 干渉計-SingleDishの同時観測成功
 - ACAによる初太陽観測・初フリンジ
 - 5時間半の長時間太陽観測
 - Solar Filter無しでの活動領域・静穏領域・リム・プロミネンスの干渉計観測データの取得

Contents

1. Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array
の基本性能
2. ALMAでの太陽観測の準備状況
3. 試験観測からわかった
ALMAの太陽観測における制限
4. ALMAで何が見えるか？

ALMAの生データは？

- 電波干渉計は、

$$V(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_N(x,y) I(x,y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

$$A_N(x,y) I(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u,v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv$$

$$V(u,v) = |V(u,v)| e^{i\Phi(u,v)}$$

天球上の電波強度分布（ I ）をアンテナの合成ビームパターン（ A_n :干渉計のPSF）でコンボリューションしたものの、フーリエ成分“ V ”（ビジビリティー）を直接測定する観測装置。

- ALMAの生データは、
 - 相関フラックス(Amplitude) $|V(u,v)|$
 - 位相(Phase) $\Phi(u,v)$

この二つの値を精度良く決めることが最重要課題。

ALMAにおける 太陽観測の特異な点



- アンテナへの（特にサブレフへの）巨大な熱入力
 - Pointing, Focus, 受信機温度への影響→評価済み：特に考慮する必要無し。
- 他の天体に比べて明るすぎる太陽。
 - 受信機のサチレーション→Solar Filter無しでは観測が難しい。
- 太陽観測は、秒オーダーの時間変動を捉える必要がある。
 - 他天体では、1枚の画像を作るのに数時間以上かける事が普通。
- 多くの場合、視野全面が電波ソース

ALMAにおける 標準的な校正方法



太陽の場合

1. 観測対象天体付近の明るい点源（クエーサー等）を使って、位相と相関Fluxを校正する。
 - 点源が視野中心にあれば、全てのフーリエ係数は等しく、位相は 0° である。
 - クエーサー観測と対象天体の観測時の設定は、視野中心の方向以外、全て同じとする。
 - クエーサー観測を基に、生データを校正する。
2. Water Vapor Radiometer(WVR)を使って、地球大気中の水蒸気量をリアルタイムでモニターする。
 - ALMAには、アンテナの視野中心を同じ方向を見て、水蒸気の吸収線を観測する装置(WVR)がある。
 - リアルタイムの水蒸気量を基に校正を行う。



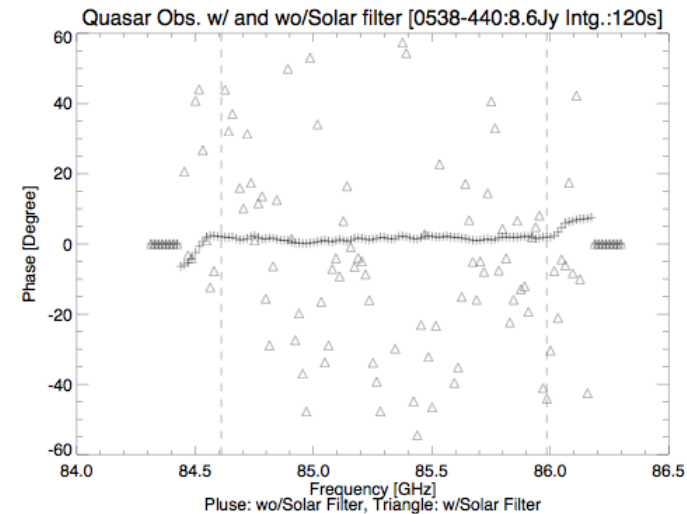
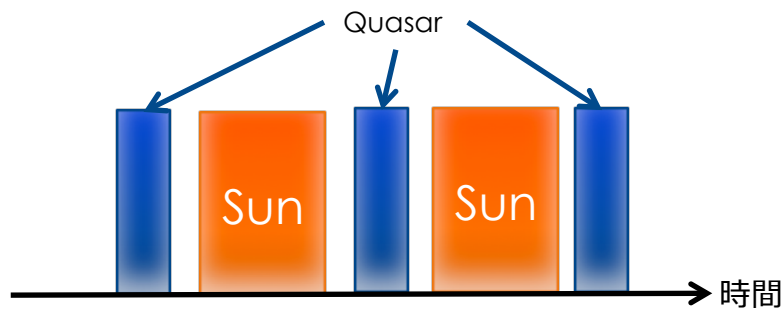
そのまま適応
できない。
理由：Solar Filter



利用不可
理由: Background
である太陽が明る
すぎる。

クエーサーを使った校正法 による観測シーケンスの制限

CSV data



- 太陽を連続観測できない。
 - かならずTBD分（現在5分程度を予想）に1回クエーサーを観測しなければならない。
 - 太陽以外でも同じ制限あり。ただし、天体がこの時間オーダー変動していないので問題にならない。
- Solar Filterを使ったまま、クエーサーを観測できない。
 - 受信機内のアッテネーターのレベルが異なる観測を、太陽とクエーサー観測で使う事になる。アッテネーターのレベルの違いによる遅延量を校正に組み込む必要がある。
 - アッテネーターのレベルの違いによる遅延量を現在評価中。

Disadvantage of solar observations

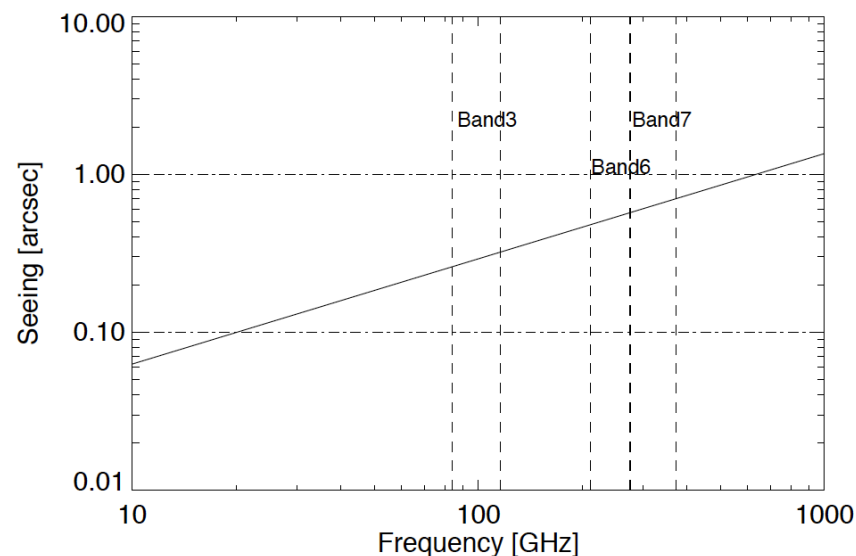
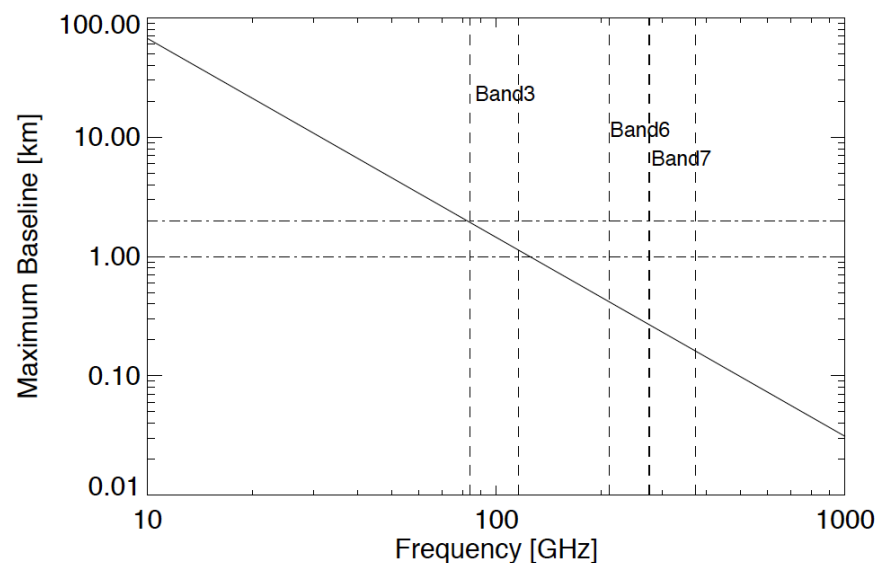


- **During solar observations, we can not use “Water Vapor Radiometer (WVR)” of ALMA.**
 - During observations, WVR always observes the absorption line that is caused by water vapor in the earth’s atmosphere, and monitors the gross volume of the water vapor in the line of sight in realtime.
 - Because of the realtime water-vapor monitoring, ALMA can use long (over a few km) baselines.
 - During solar observations, WVR can not detect the line because the background level (= solar emission) is very high.
- For solar observations, the baselines that is shorter than a few km may be available.
 - Synthesized beam [“] = $76 / \text{max. baseline [km]} / \text{Freq. [GHz]}$

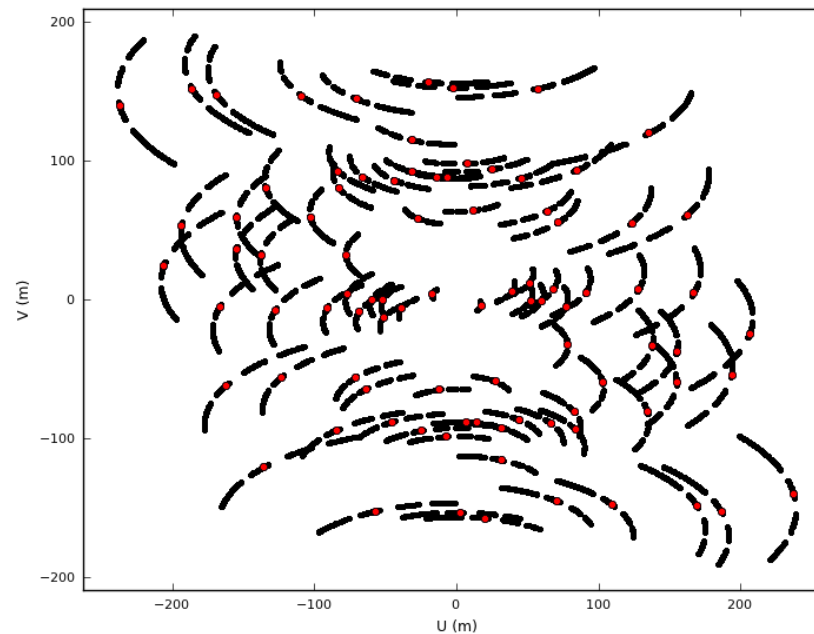
WVR無しでの最大基線長



- 大気による位相変動の大きさによる評価。
 - 位相変動のr.m.s. < 1 rad. が目安。
 - ALMA実機による測定はまだ無い。
 - ALMA MEMO 471を基に計算
 - Band3 (~100GHz) : 1 ~ 2 km Baseline = 0.3 arcsec
 - Band6 (~250GHz) : ~ 300 m Baseline = 0.4 arcsec
 - Band7 (~320GHz) : ~ 200 m Baseline = 0.5 arcsec
- Fast Switchによる大気による位相変動の補正をする。(Feature Plan)



uv面上でのデータ点数



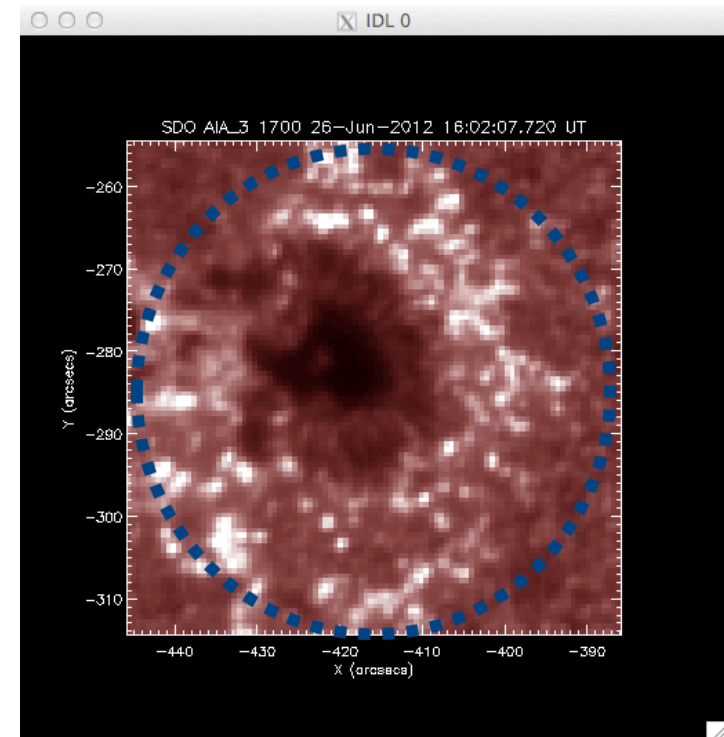
アンテナ 14 台での観測
uv平面上でのデータ点分布

黒：4時間の観測
赤：スナップショット

- uv平面上でのデータ点が多ければ、多い程画質が向上
- 太陽の場合、数時間のデータを使うと、時間変動成分が全て無くなってしまうので、スナップショットでのデータでズを作る必要がある。
→アンテナ台数が多い必要がある。(Full Operation時では問題はないだろう。)

視野全面に電波ソースが存在 →低い空間周波数のデータが重要

- 視野60秒角の中に、数十秒角の構造（黒点、プラージュ、超粒状斑・・・）が存在する。
- 数十秒角に対応する空間周波数のuv面上での多数のデータ点が必須。
 - 数十秒角
→ALMAでは最低空間周波数成分。
→最短基線長付近のデータが重要
 - ACA 7mアンテナのデータが必須。
 - Compact(最大基線長2km程度) の時にしか太陽観測できない可能性はある。
 - ALMAのアンテナ配置は、1年で連続的にCompact→Expand→Compactと変動する。



Contents

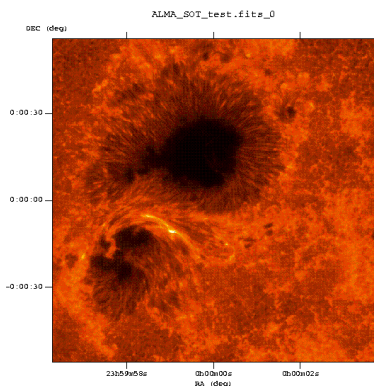
1. Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array
の基本性能
2. ALMAでの太陽観測の準備状況
3. 試験観測からわかった
ALMAの太陽観測における制限
4. ALMAで何が見えるか？

ALMAによる太陽観測 まとめ

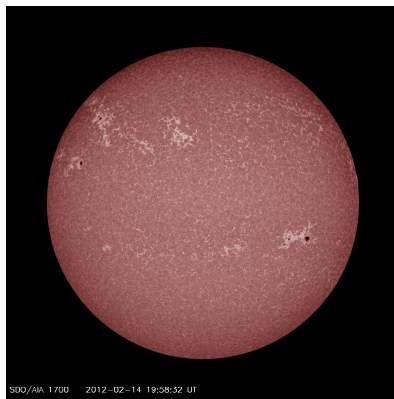
- ALMAによる太陽観測は、電子顕微鏡的な観測
 - ex. Band9: 視野 Φ 7秒角で空間分解能0.04秒角@2km Baseline
- 太陽観測に向けての準備は着々と進行中
 - Solar Filterを利用した場合の校正方法の確立が急務。
 - Cycle2での共同利用開始が目標。
 - 共同利用開始前にScience Verification dataの取得がある。
 - このSVデータは誰でも論文が書けるデータ。
 - どのようなデータを撮るべきか？
(日本からのプロポーザルに繋がるものを撮りたい。)
- 太陽観測は、他天体の観測からは大きく異なる。
 - 最高空間分解能は、WVRが使用不可のため制限される。
 - 観測に適した季節が限られる可能性がある。

Where is the mm/sub-mm emission layer except flares ?

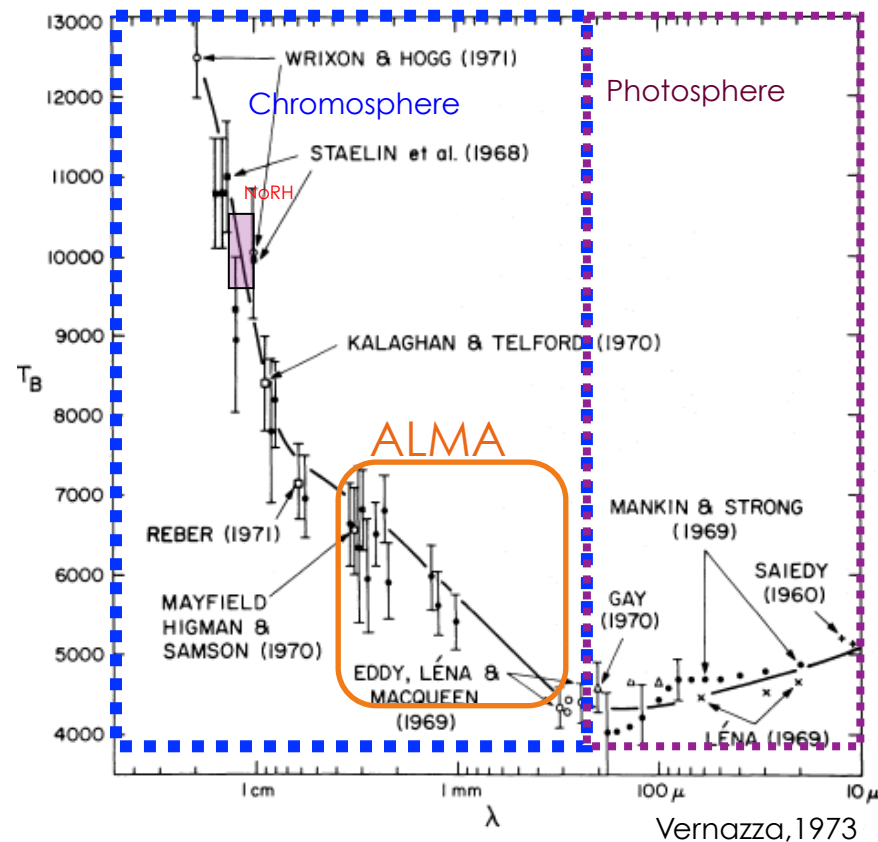
- The mm/sub-mm emission from non-flare sun is **thermal continuum from around $\tau = 1$ layer** = lower chromosphere.



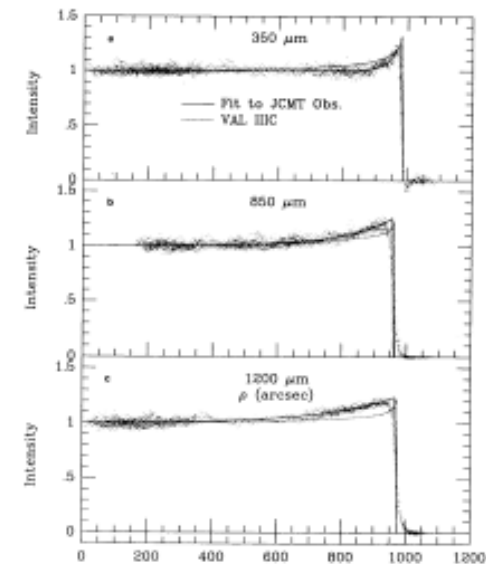
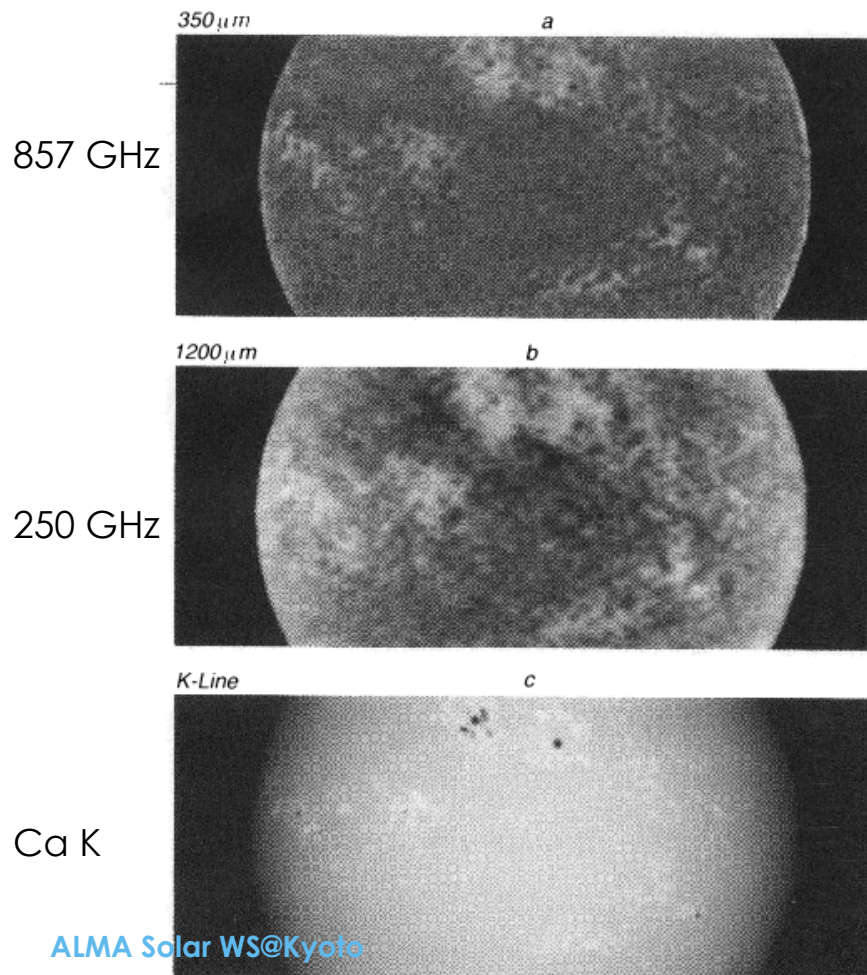
Ca II (SOT)



UV (AIA 1700)



Large Area Scanning by JCMT (Single-Dish) in mm/sub-mm



- Lindsey et al. 1995
 - Beam size 5~7" @857GHz
14~18" @250GHz
 - They found the limb brightening in the wave range.

mm/sub-mm帯での 輝線サーベイ

■ Predicted Emission Lines

■ From Chromosphere

■ Hydrogen Lines [na transition with high-n]

- The theoretical ratio of the line intensity to continuum is < 1 % with n>20 from the disk (Hoang-Binh 1982) ⇒ undetected

- H42a → 85GHz(Band 3), H29a→270GHz(Band 6:0.15%)

- Near the limb ⇒ detected

(H22a[661GHz], H20a[886GHz]: Clark et al. 2000a,b)

■ From Transition Region and Corona

■ Dielectronic Recombination Lines from Ions

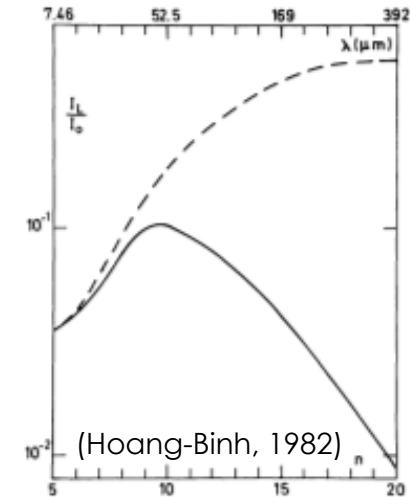
- Theoretical prediction (only na transition)

[C III, C IV, O V, Ne VII, Si XI] (Berger & Simon 1972)

- The theoretical ratio of the line intensity to continuum is ≤ 0.01% ⇒ undetected (Kheronskii & Varshalovich 1980)

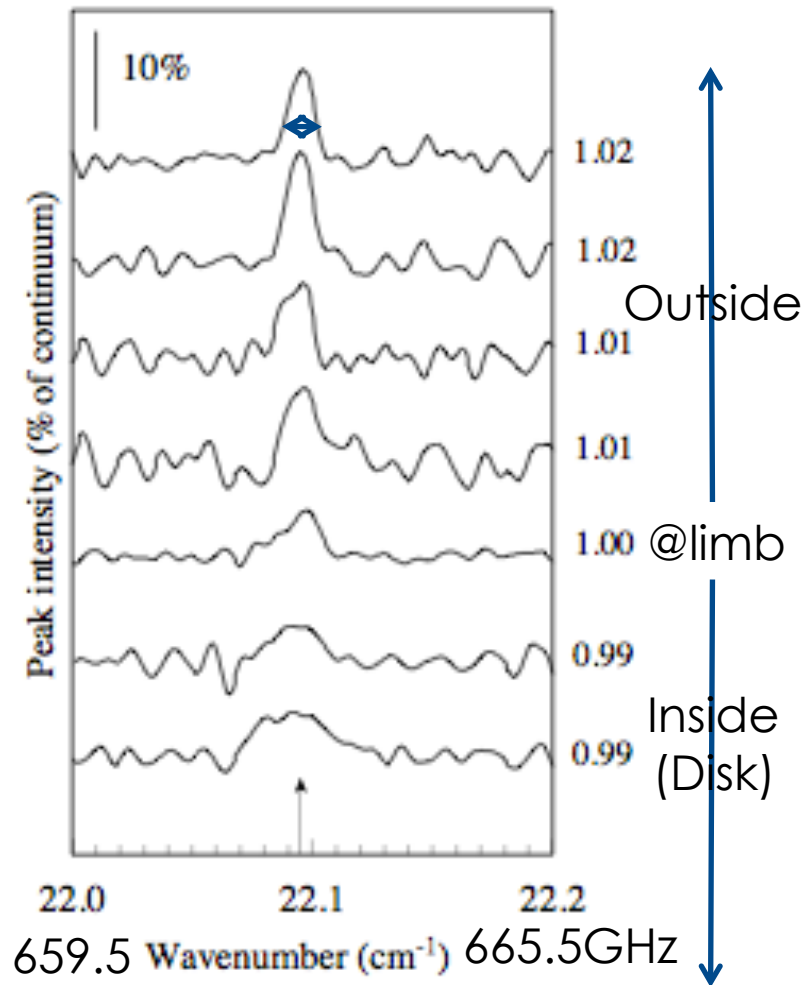
TABLE I. H I Recombination Lines of Solar Radio Emission

n	λ_n mm	$(F_B^i - F_B^c)/F_B^c$	n	λ_n mm	$(F_B^i - F_B^c)/F_B^c$
24	0.630	$1.06 \cdot 10^{-2}$	31	1.358	$7.96 \cdot 10^{-4}$
25	0.713	$7.01 \cdot 10^{-3}$	32	1.494	$5.76 \cdot 10^{-4}$
26	0.801	$4.72 \cdot 10^{-3}$	33	1.639	$4.21 \cdot 10^{-4}$
27	0.896	$3.23 \cdot 10^{-3}$	34	1.792	$3.11 \cdot 10^{-4}$
28	1.001	$2.23 \cdot 10^{-3}$	35	1.955	$2.31 \cdot 10^{-4}$
29	1.112	$1.56 \cdot 10^{-3}$	36	2.128	$1.74 \cdot 10^{-4}$
30	1.231	$1.11 \cdot 10^{-3}$			



λ	n	h_n	Δb	$\log (\Delta T_i / T_{mb})_{lim}$	$\Delta W_{\mu} / \Delta W_D$
a) C III					
100 μ	27	82.79	-4.53	-6.8	
300 μ	39	33.61	-2.58	-5.8	0.16
1 mm	58	8.325	-0.50	-5.5	2
3 mm	84	2.454	-0.077	-5.3	34
1 cm	125	1.213	-0.009	-5.2	580
3 cm	181	1.032	-0.001	-5.2	7300
b) O IV					
100 μ	33	1358	+12	-5.3	
300 μ	47	936.4	-45.9	-4.6	0.047
1 mm	70	263.7	-14	-4.0	0.58
3 mm	102	53.46	-2.33	-3.8	10
1 cm	152	8.474	-0.234	-3.8	170
3 cm	219	2.148	-0.027	-3.7	2100
c) O V					
100 μ	37	210.7	+12.2	-6.2	
300 μ	55	371.8	+0.3	-5.9	0.033
1 mm	79	229.1	-7.2	-4.7	0.41
3 mm	118	62.46	-1.94	-4.2	7
1 cm	177	12.42	-0.28	-4.0	120
3 cm	254	3.028	-0.04	-3.9	1500
d) Ne VII					
100 μ	46	118.9	+5.0	-7.4	
300 μ	69	226.4	+1.7	-6.7	0.0056
1 mm	100	157.1	-3.6	-6.2	0.07
3 mm	148	46.78	-1.16	-5.6	1.2
1 cm	222	9.011	-0.17	-5.4	20
3 cm	319	2.260	-0.021	-5.4	260
e) Si XI					
100 μ	62	61.51	+1.84	-7.9	
300 μ	93	119.5	+1.4	-7.0	0.002
1 mm	134	108.1	-1.5	-6.4	0.026
3 mm	200	32.43	-0.63	-5.6	0.44
1 cm	300	5.735	-0.082	-5.5	7.5
3 cm	431	1.454	-0.010	-5.4	95.0

Observation of Hydrogen recombination line (n=22-21: 662.4GHz) @ limb



- Clark et al. 2006
 - Antenna: JCMT
 - Single Dish
 - The evaluated the difference from the average spectrum on Disk.
 - Line width : ~1GHz
 - Pressure broadening occurs in chromosphere.

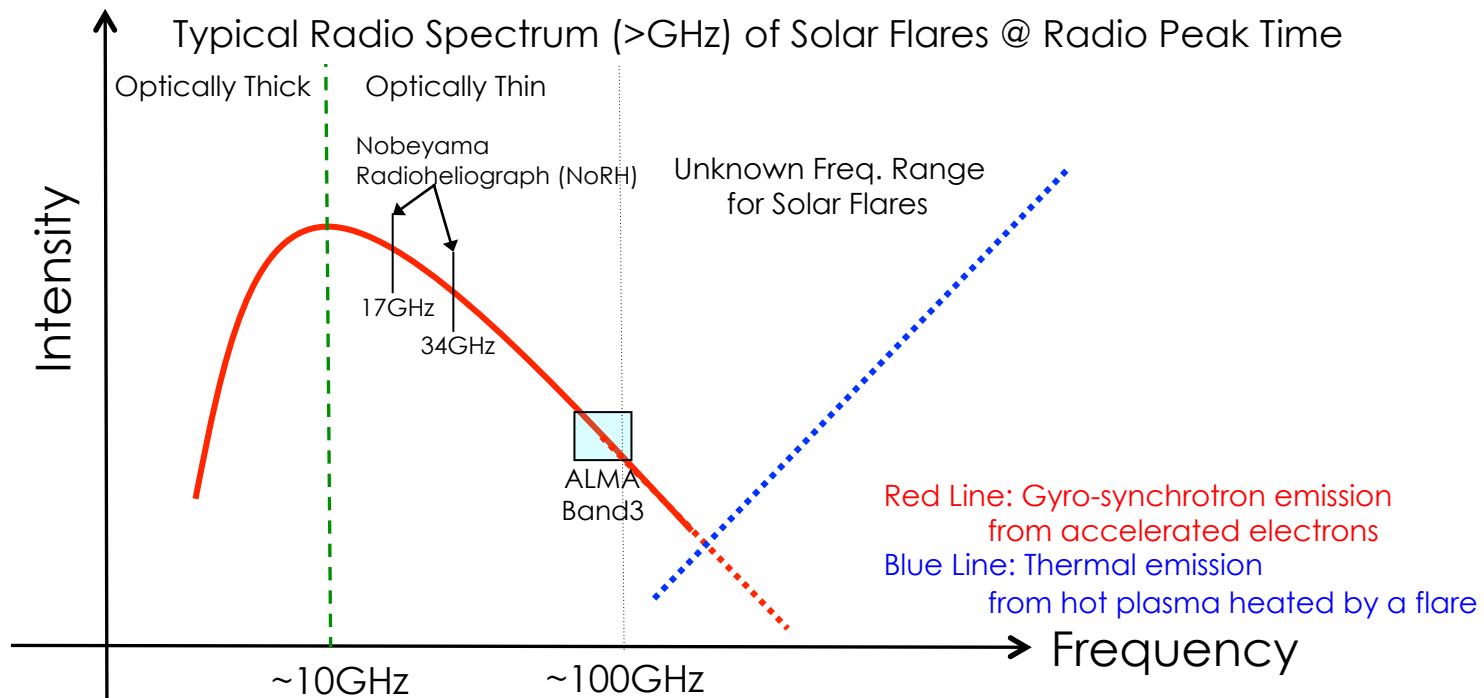
彩層：まとめ

- ALMAで見れるのは温度最低層～彩層下部。
 - 温度にして、4000~7000°K。
 - ほとんどは、Optically-ThickのThermal Continuum
 - 輝度の分布は温度の分布。
 - 放射の解釈は簡単だが、出せる情報は構造の形状。
 - 多周波で観測する事により、高さ方向の構造変化・変動の伝搬などを調べることができる。
 - 水素の再結合線の存在は確認されているが、非常に弱い。
 - 研究ターゲットの一つ。ラインサーベイをするべき。
 - 日本では、誰がこの周波数帯のライン同定ができるか？
 - シュタルク効果によりライン幅が太く、FDMを使う必要性は無いと予想される。

cm/mm-wave from a solar flares

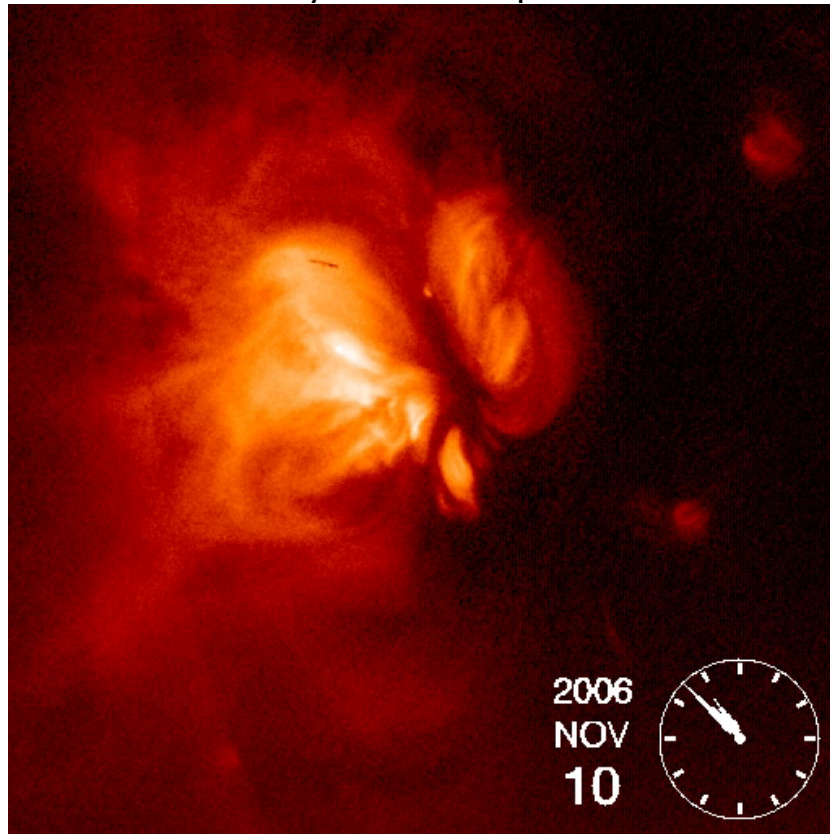


- The energy release in a flare makes high-energy charged particles.
 - The electrons are accelerated to $\sim 30\%$ of light speed ($\sim \text{MeV}$) in a flare.
 - The accelerated electrons emitted cm/mm-waves.
 - The emission mechanism is “gyro-synchrotron” emission, not “synchrotron”, because the accelerated electron is mildly relativistic (not relativistic).
 - The waves from the accelerated electrons are circular polarized. (not linear polarization).



Numerous small flares occur in an “active” active region

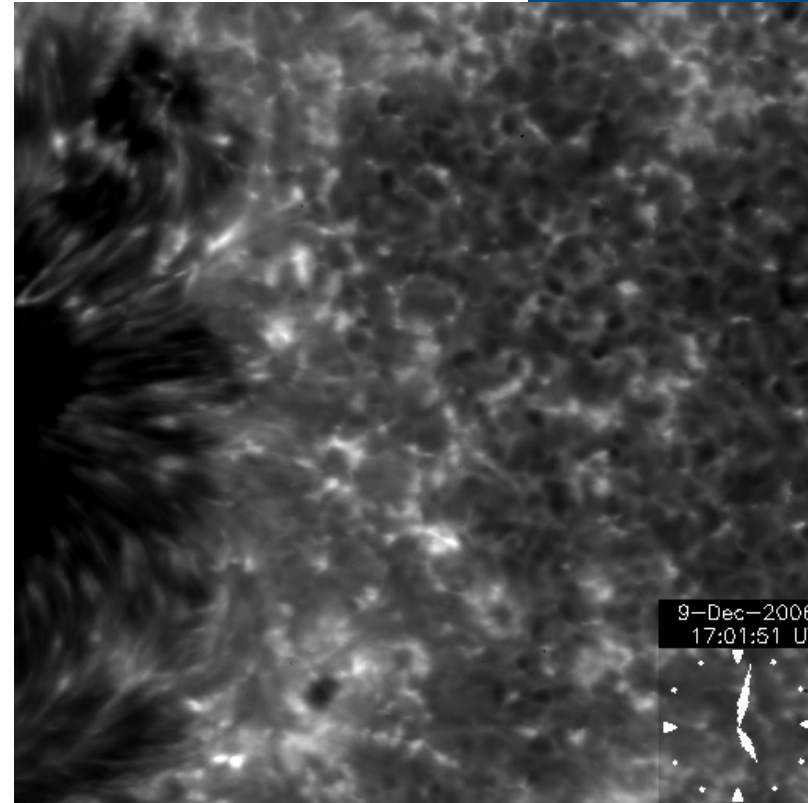
Hinode/X-Ray Telescope



30 arcsec

Solar corona around a sunspot

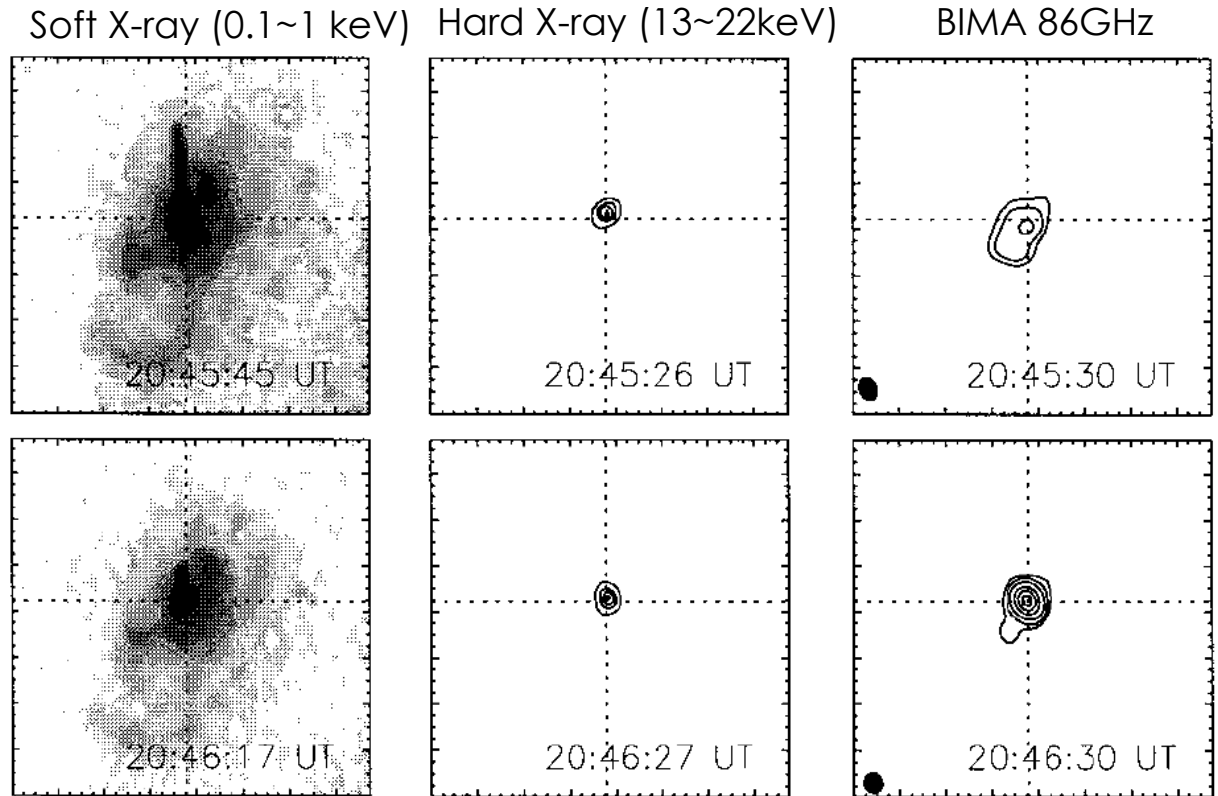
Hinode/Solar Optical Telescope Ca II H



30 arcsec

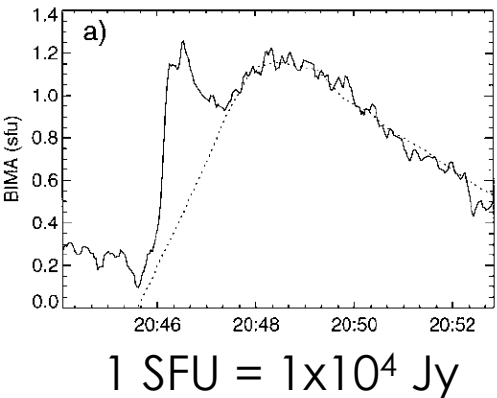
Lower chromosphere around a sunspot

BIMA observed a small flare (C3.5)



Silva et al. 1996

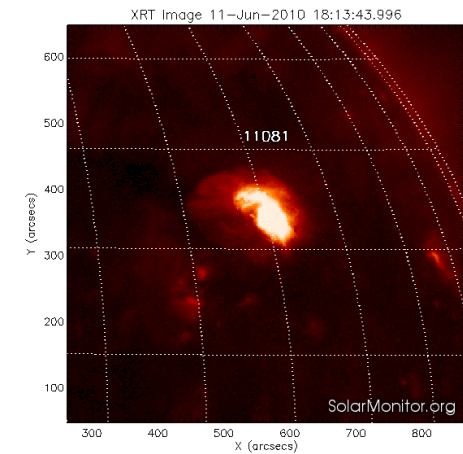
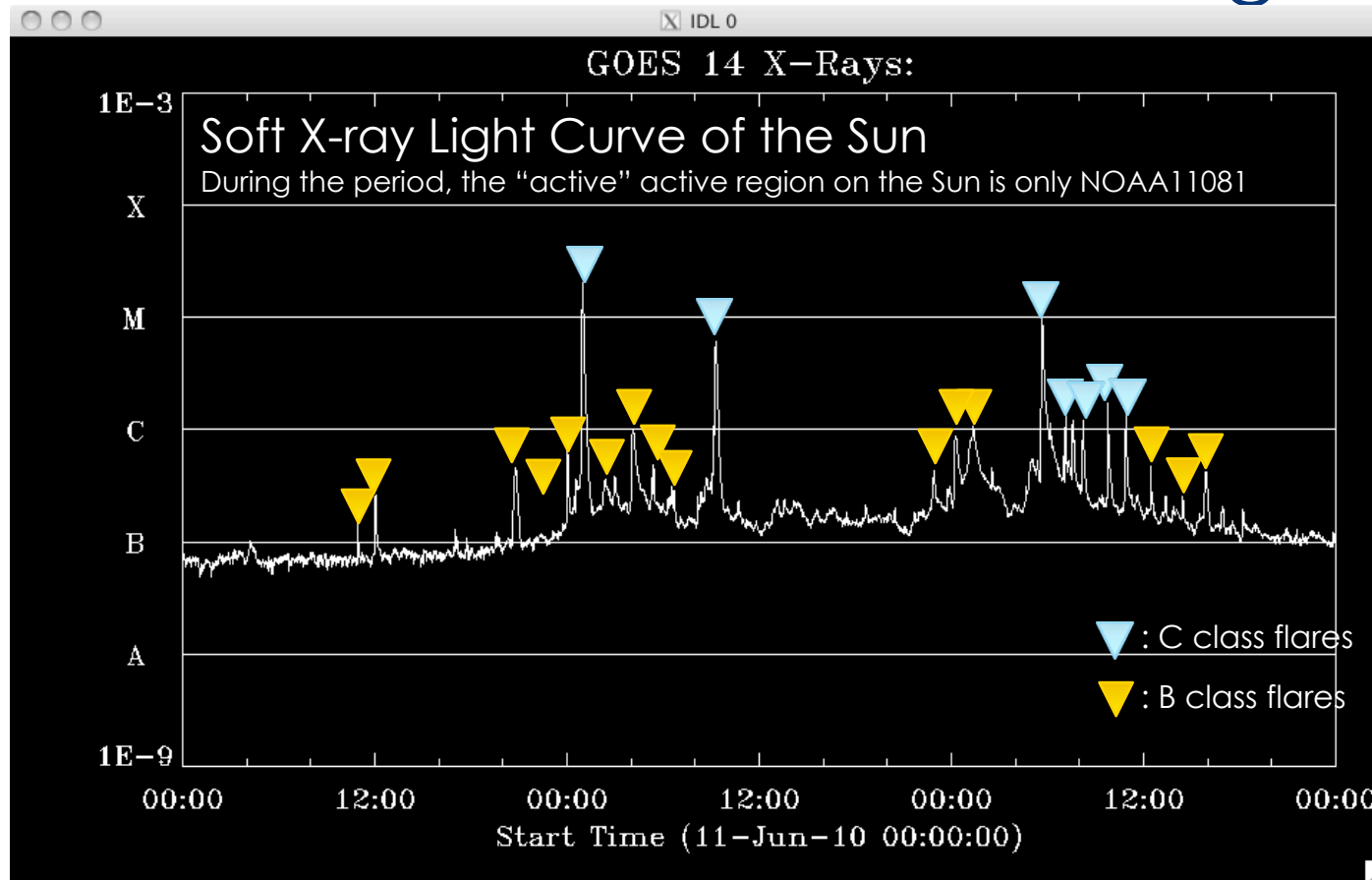
86GHz time profile



- BIMA made the 86 GHz images of C class flare.
 - The size of the flare is 8" measured from the SXR image.
 - Beam size of BIMA is 9"x 7" (-> the flare is not resolved in 86 GHz)

ALMA Solar WS@Kyoto ■ The C class flare is not a large flare.

Flares occurred in an active region



- NOAA11081 : 11-June-2010 ~ 14-June-2010
- The active region appeared on 10 June, 2010.
- The active region occurred 7 C class flares during 3 days. (Ave. 2 event/day)



www.almaobservatory.org

The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), an international astronomy facility, is a partnership among Europe, North America and East Asia in cooperation with the Republic of Chile. ALMA is funded in Europe by the European Organization for Astronomical Research in the Southern Hemisphere (ESO), in North America by the U.S. National Science Foundation (NSF) in cooperation with the National Research Council of Canada (NRC) and the National Science Council of Taiwan (NSC) and in Japan by the National Institutes of Natural Sciences (NINS) in cooperation with the Academia Sinica (AS) in Taiwan. ALMA construction and operations are led on behalf of Europe by ESO, on behalf of North America by the National Radio Astronomy Observatory (NRAO), which is managed by Associated Universities, Inc. (AUI) and on behalf of East Asia by the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ). The Joint ALMA Observatory (JAO) provides the unified leadership and management of the construction, commissioning and operation of ALMA..