

ALMAによる太陽観測 —ALMAが得意なこと&苦手なこと—

下条圭美
国立天文台・チリ観測所

資料作成協力: 永井 洋



本公演の目的

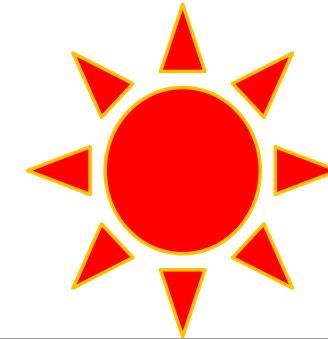
干渉計の基礎の基礎を理解してもらう。

- 干渉計観測の利点・欠点

ALMAによる太陽観測の現状のスペックを知ってもらう。

**データ解析やプロポーザルを準備するために
必要な知識を知ってもらう。**

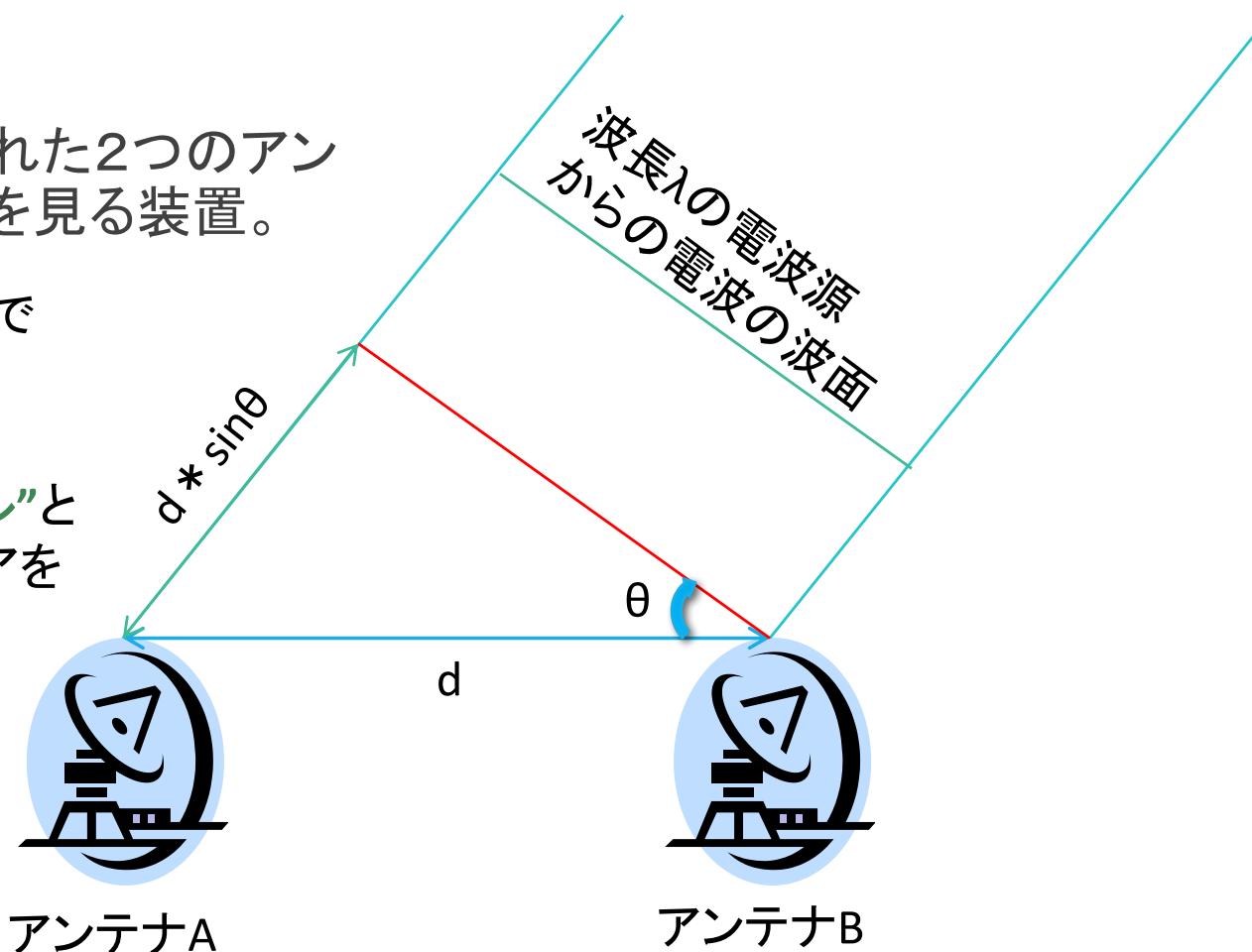
電波干渉計とは？



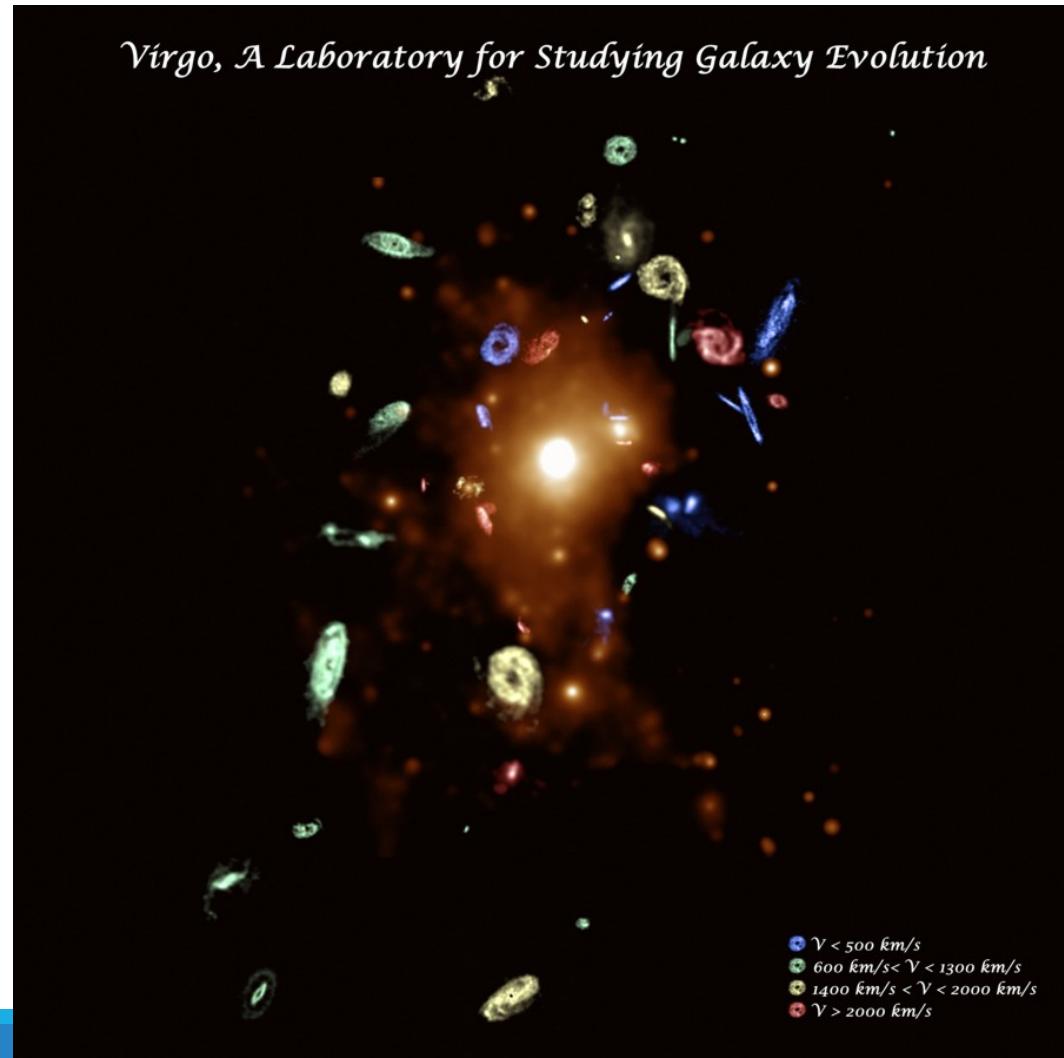
ある距離d[基線長]はなれた2つのアンテナの出力変動の相関を見る装置。

$d * \sin\theta$ が波長 λ の整数倍であれば、干渉が発生。

d のベクトルを”基線ベクトル”と言い、2つのアンテナのペアを”基線(Baseline)”という。
 d の長さは”基線長”

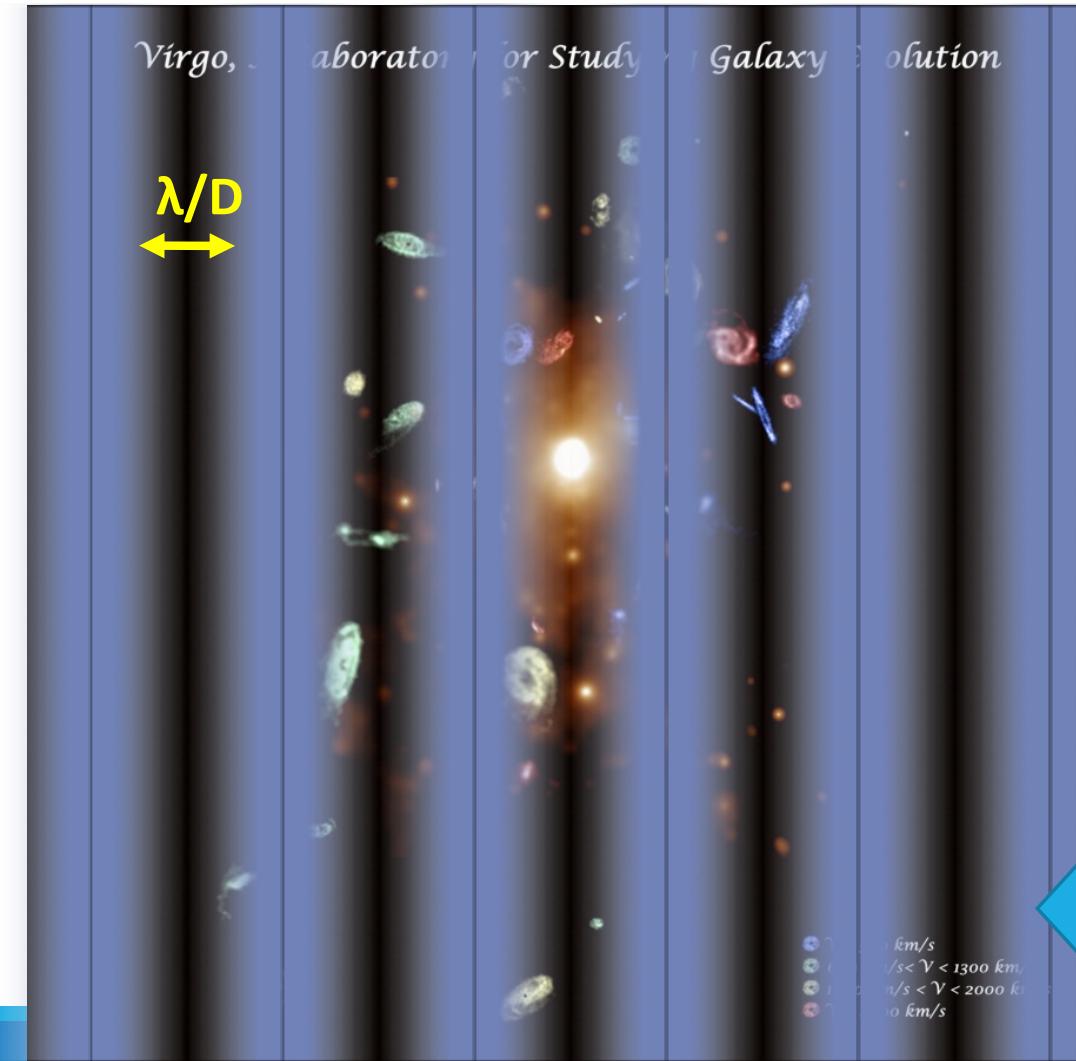


一つの基線で空を見ると？

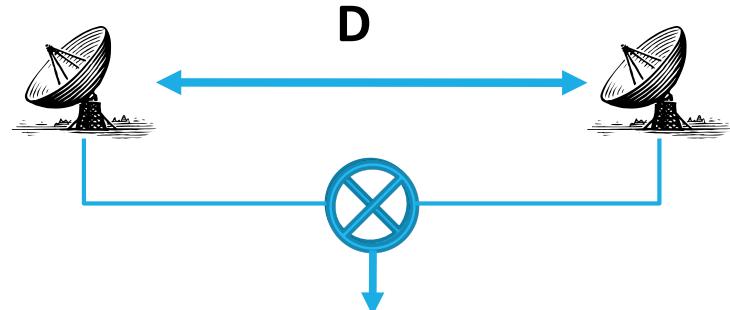


※厳密にはDは天体から見た射影長

一つの基線で空を見ると？



※厳密にはDは天体から見た射影長

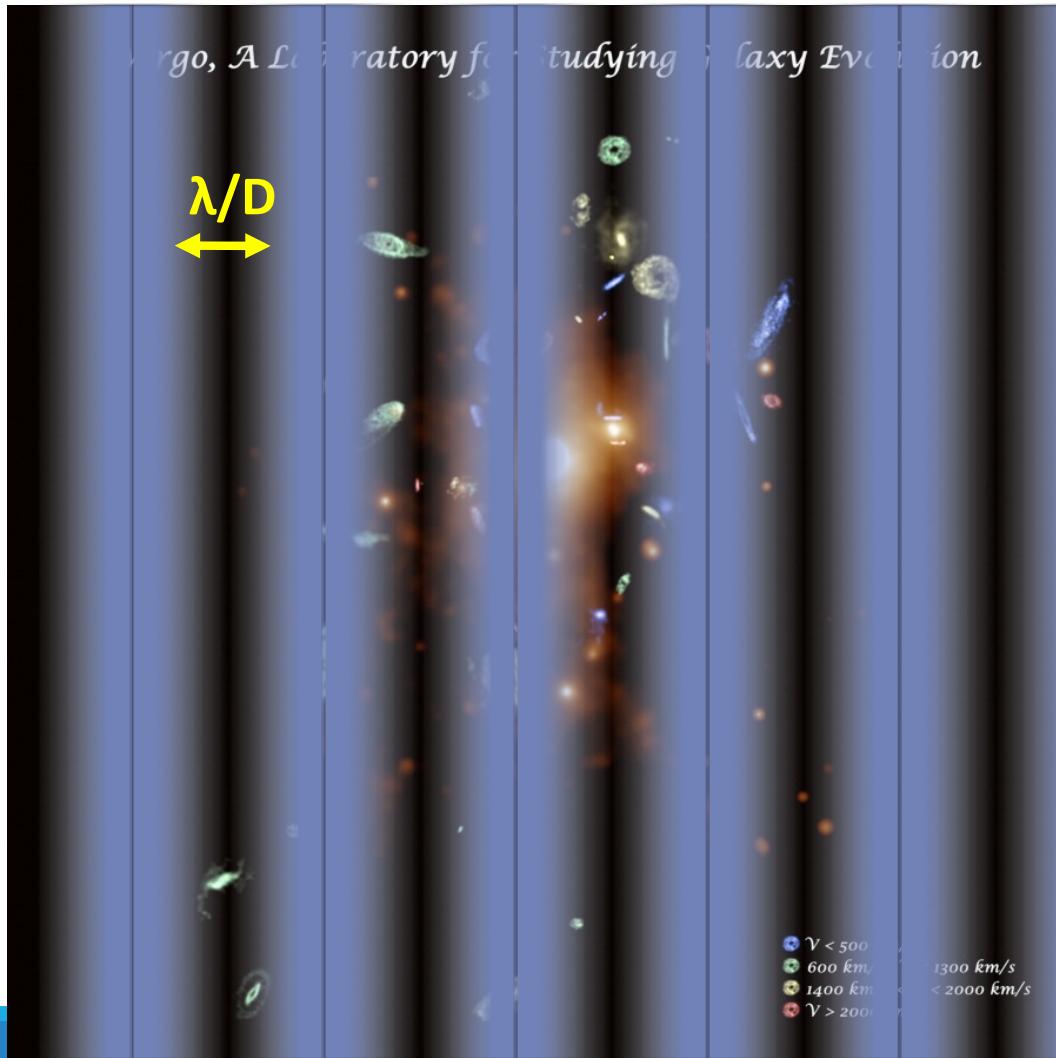


左のような縞々のフィルター
(cos関数フィルター)
を通した強度のようなもの

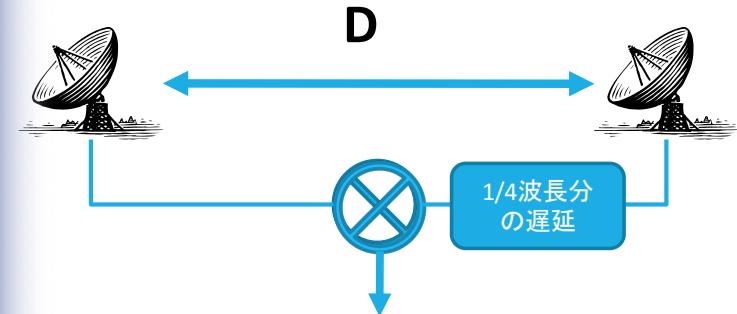
$$a_n$$

感度がない領域

一つの基線で空を見ると？



※厳密にはDは天体から見た射影長



左のような繰々のフィルター
(sin関数フィルター)
を通した強度のようなもの
 b_n

一つの基線で得られる情報 ＝天空の輝度分布のフーリエ係数

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{D2\pi x}{\lambda} + b_n \sin \frac{D2\pi x}{\lambda} \right)$$

干渉計はこの値を求める装置

観測されたフーリエ係数を”**Visibility**”と呼んでいる。

複素フーリエ級数にすると $f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i \frac{2\pi D}{\lambda} x}$

c_n は複素数なのでオイラー表記をすると、 $c_n = r e^{i\phi}$

r を ”**amplitude**”, ϕ を ”**phase**” と呼んでいる

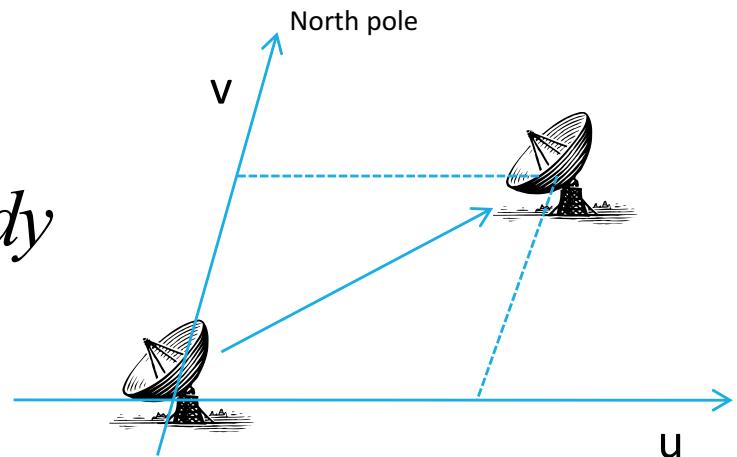
ALMAの生データ＝各基線でのamplitude と phase

Visibility

干渉計の観測量Visibility

$$V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(i(ux + vy)) dx dy$$

- u, v は投影基線長を波長で規格化 ($\frac{2\pi D}{\lambda}$)
 - 別名: 空間周波数



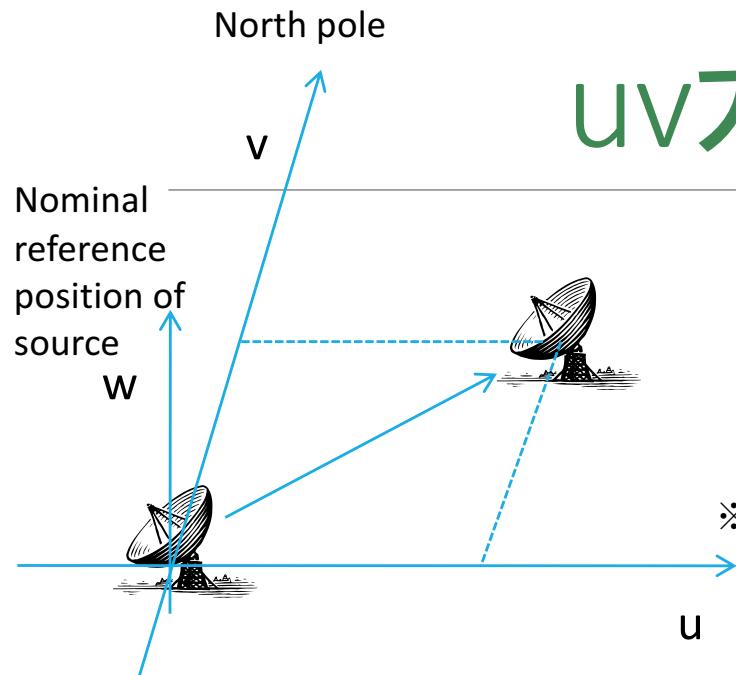
※厳密には天体から見て常に同一平面にアンテナ群が存在しているわけではないので、空間周波数を表現するにはuv面に直交する軸wが必要になる。しかし、wの影響は微々たるものなので、無視をしても実際の観測にはほとんど影響しない

実際の観測では有限の(u, v)データ点(=有限の基線長
=有限のアンテナ)で、Visibilityをサンプリングする

$$\Rightarrow V_{\text{obs}}(u, v) = S(u, v)V(u, v)$$

Visibilityのサンプリング関数 → アンテナの数とその配置に依存

uvカバレッジ

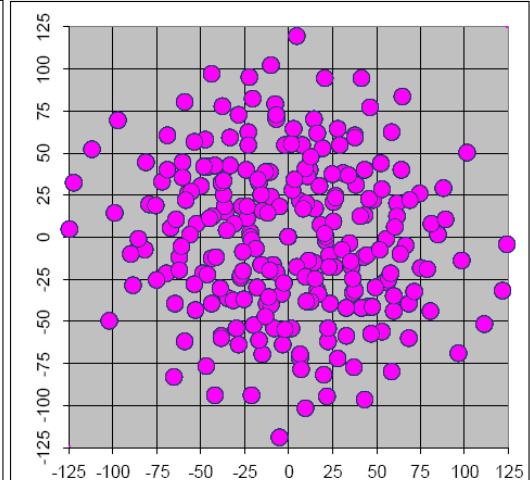
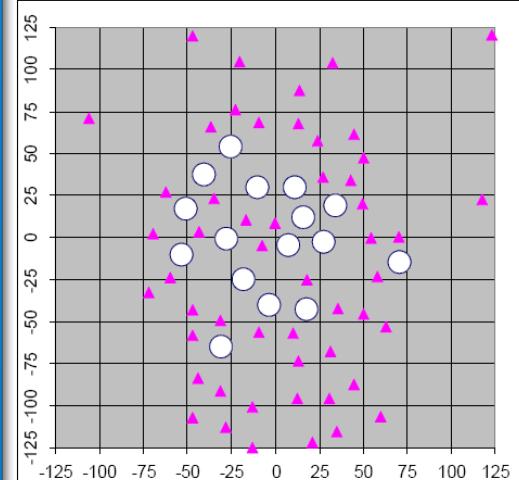


定性的な理解

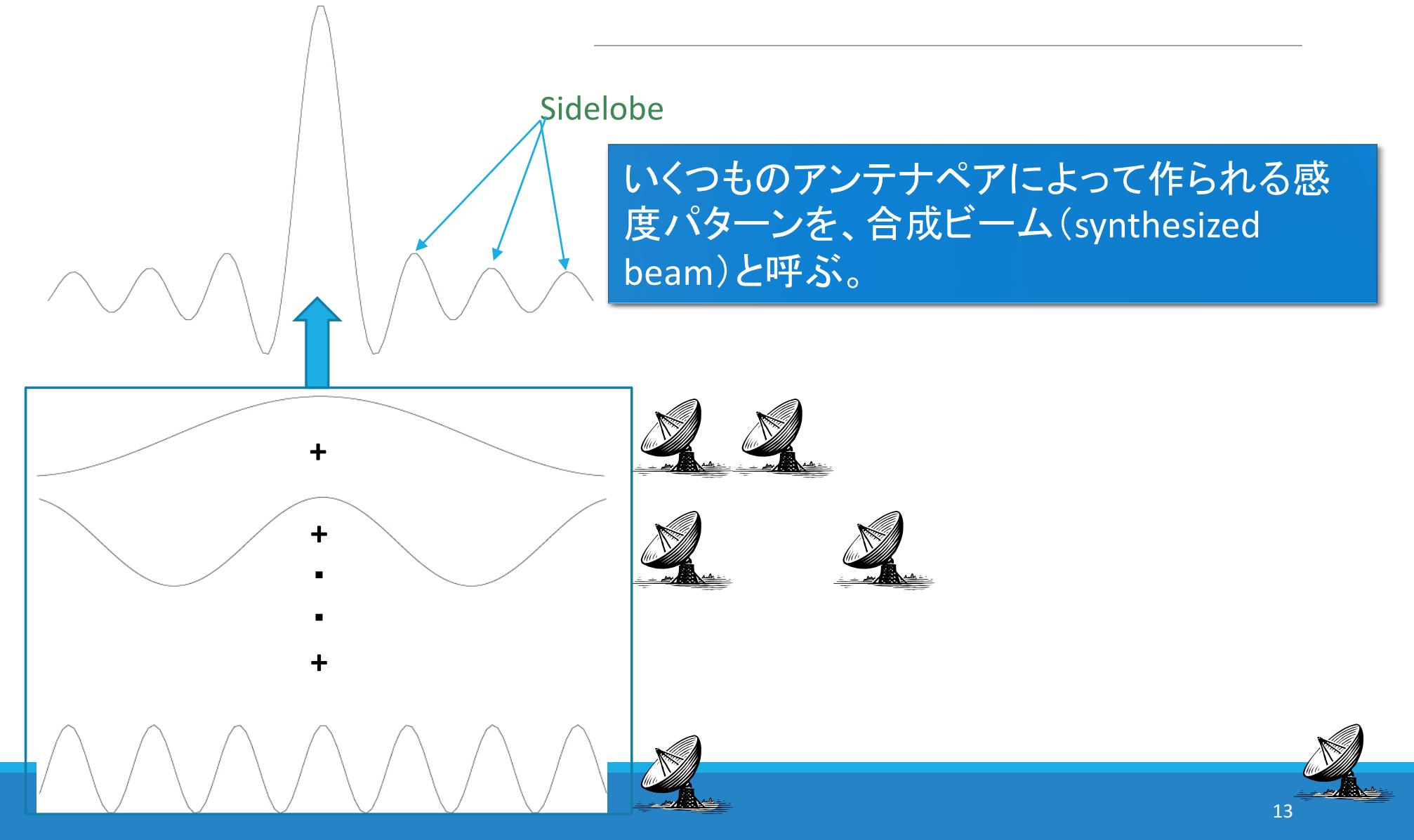
- uvカバレッジが密に、かつ対称的に埋まっているほど“きれいな”合成ビームになる
- 原点から最も遠いuvポイントが最大分解能を決める
- 最も内側のuvポイントが、どれだけ広がった構造までイメージングできるかを決める

天体から見た投影基線長を(u, v)の2次元平面上で示す。 $\rightarrow S(u, v)$

Cycle 0のアンテナ配置とinstantaneousなuvカバレッジ

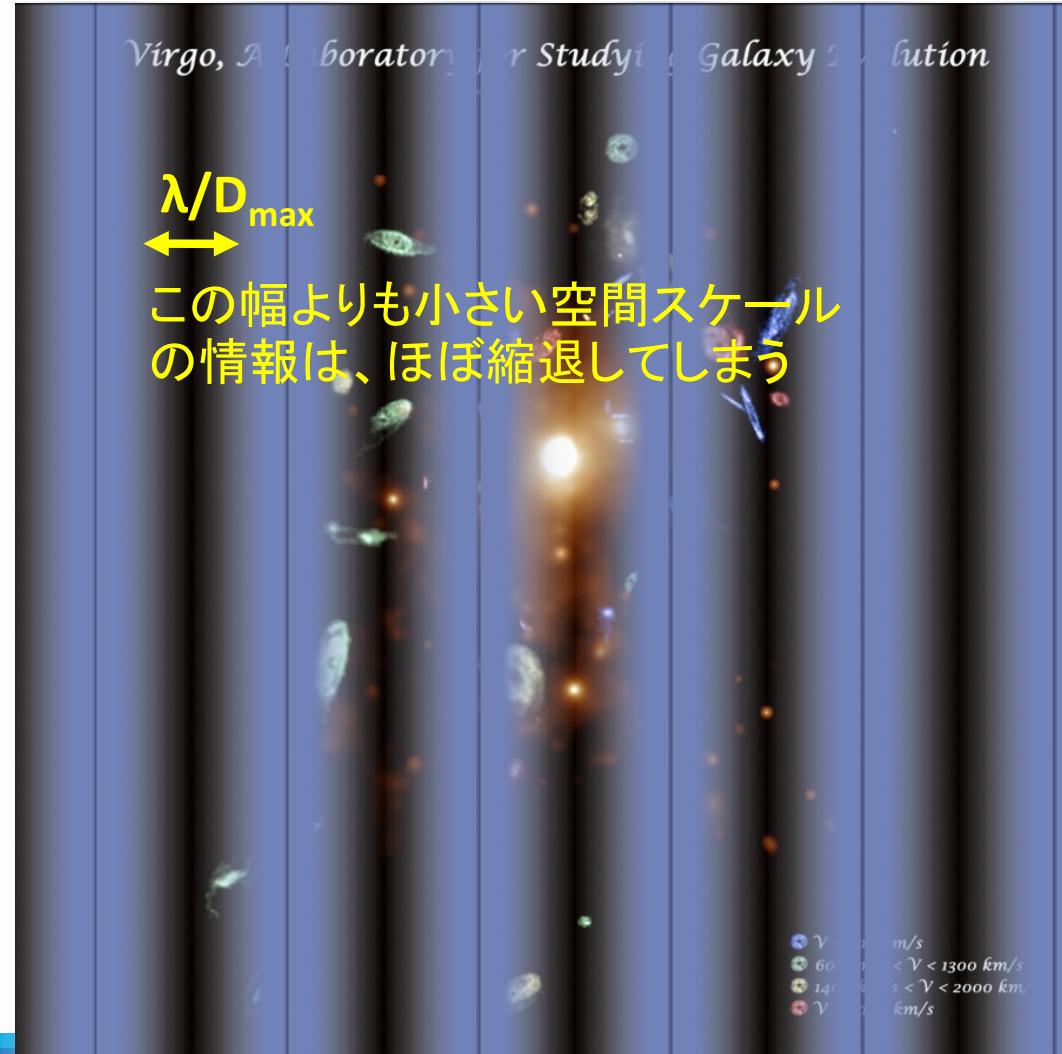


合成ビーム“Synthesized beam” = 干渉計のPSF



分解能、イメージング可能領域、視野の関係

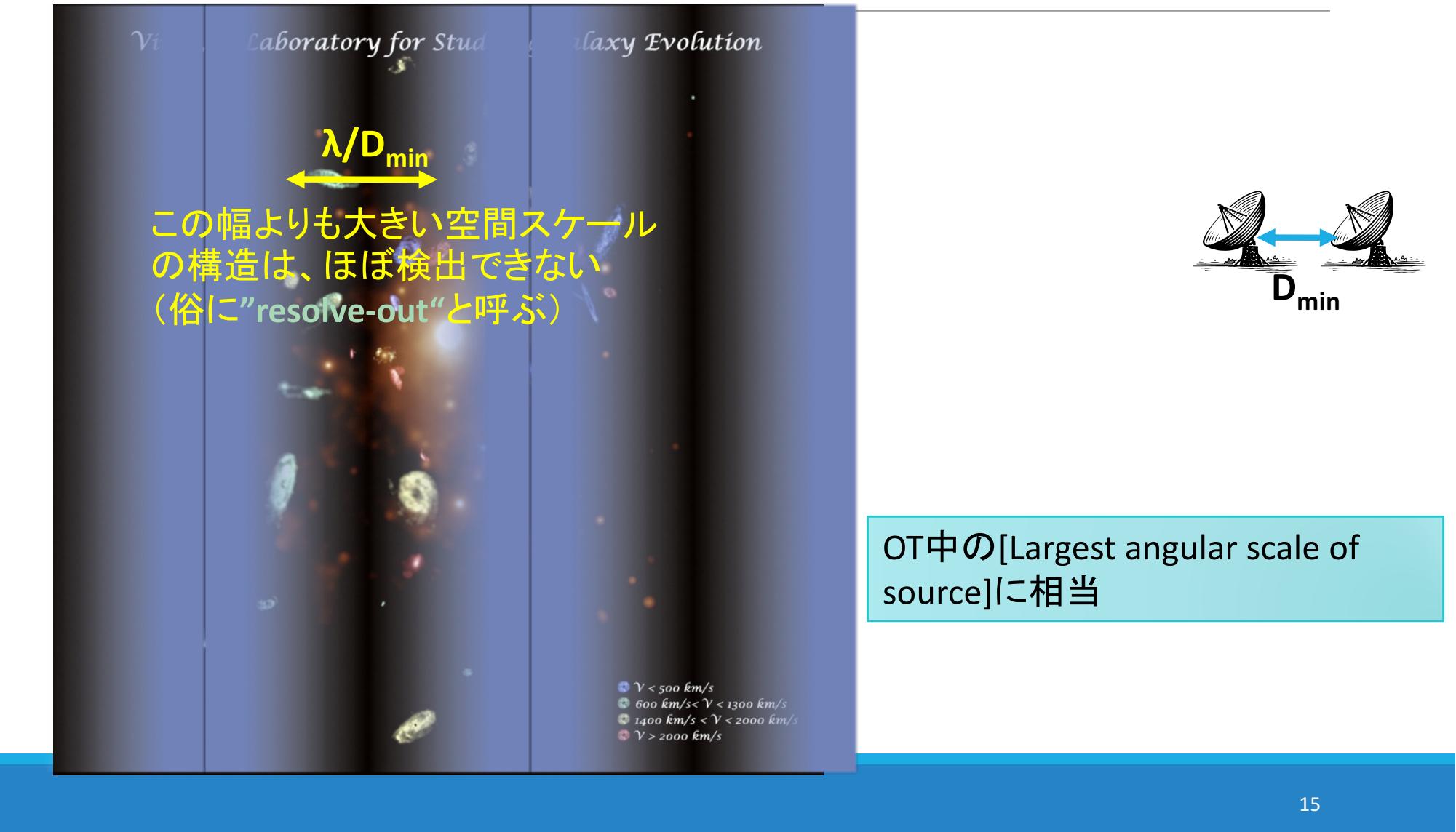
干渉縞のことを、"フリンジパターン"などと呼んだりする



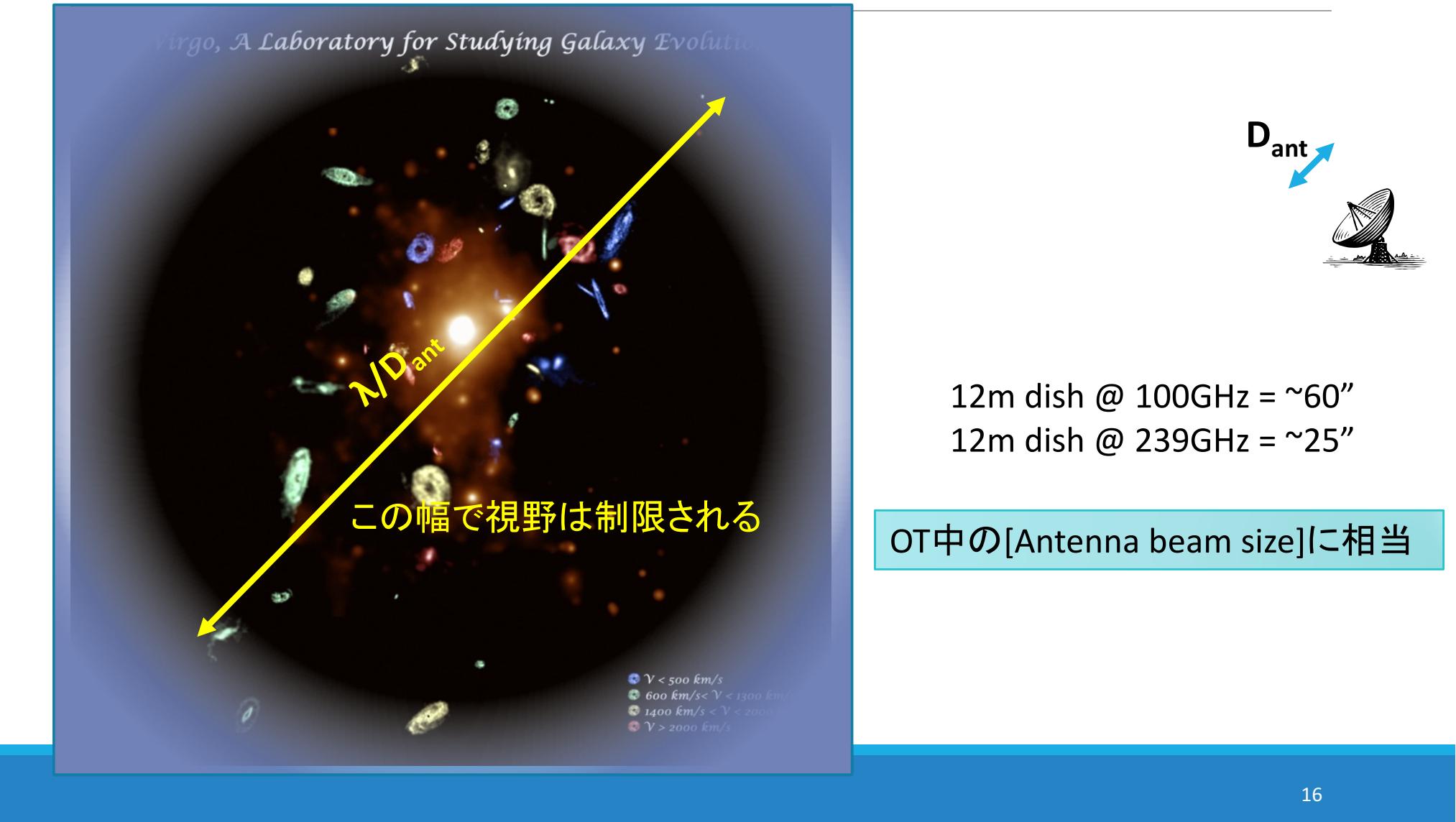
※厳密にはDmaxは天体から見た射影長

OT中の[Desired angular resolution]に相当

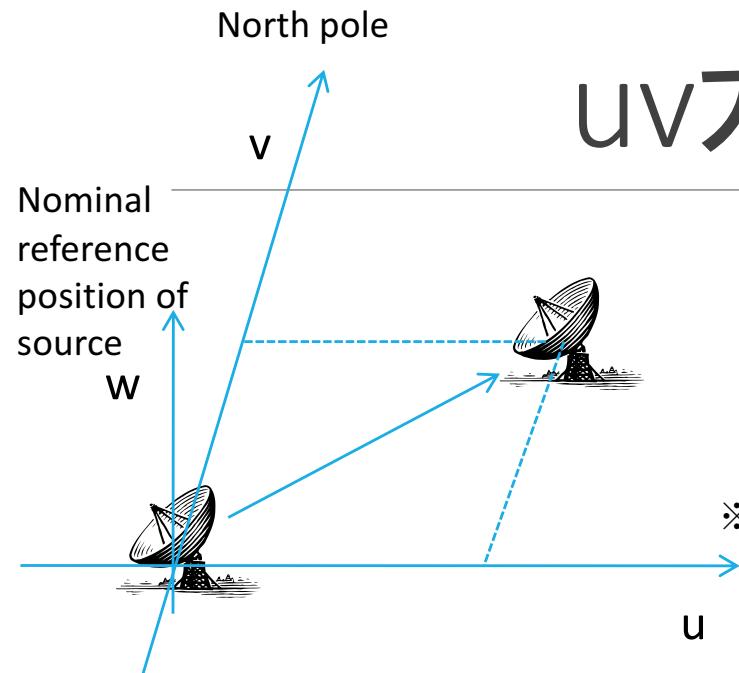
分解能、イメージング可能領域、視野の関係



分解能、イメージング可能領域、視野の関係



uvカバレッジ

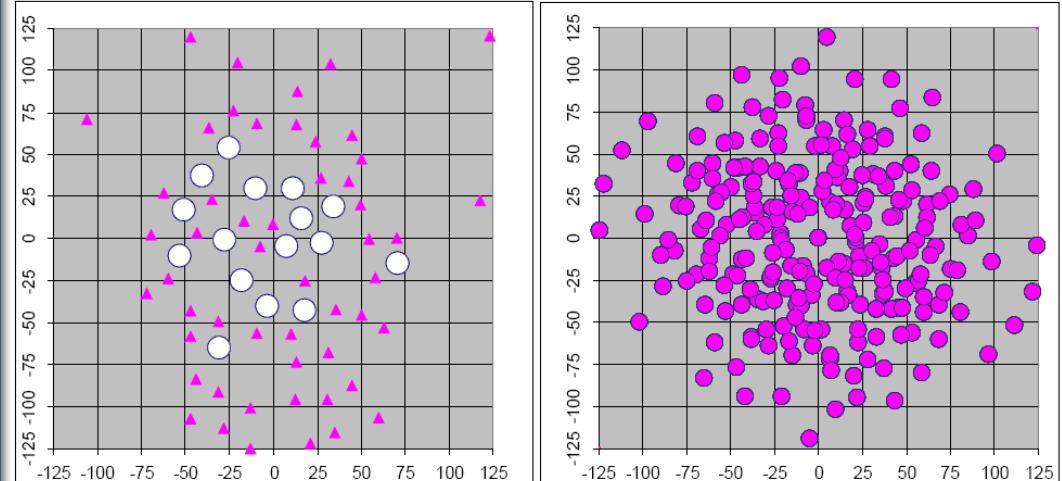


天体から見た投影基線長を(u, v)の2次元平面上で示す。 $\rightarrow S(u, v)$

定性的な理解

- uvカバレッジが密に、かつ対称的に埋まっているほど“きれいな”合成ビームになる
- 原点から最も遠いuvポイントが最大分解能を決める
- 最も内側のuvポイントが、どれだけ広がった構造までイメージングできるかを決める

Cycle 0のアンテナ配置とinstantaneousなuvカバレッジ



uv カバレッジを良くするための ALMAの戦略

1. 大きいアンテナ(12m x 44: 12m array)と小さいアンテナ(7m x 12: 7m array)を組み合わせる。さらに単一鏡観測
2. アンテナの配置を変えていく。
3. 地球の自転を使う。



太陽観測の特殊性(一部)

1. 太陽はでかい。(視野全面が太陽を覆い尽くす)。

- 視野と同じくらい大きい構造が必ず存在する。



- 短い基線からのVisibilityが無いと、正しい像を合成不可。

- 短い基線から長い基線まで連続的に無いと、正しい像を合成不可。

2. 太陽の構造の時間変動は激しい。

- 長時間観測による時間積分が基本的にできない。

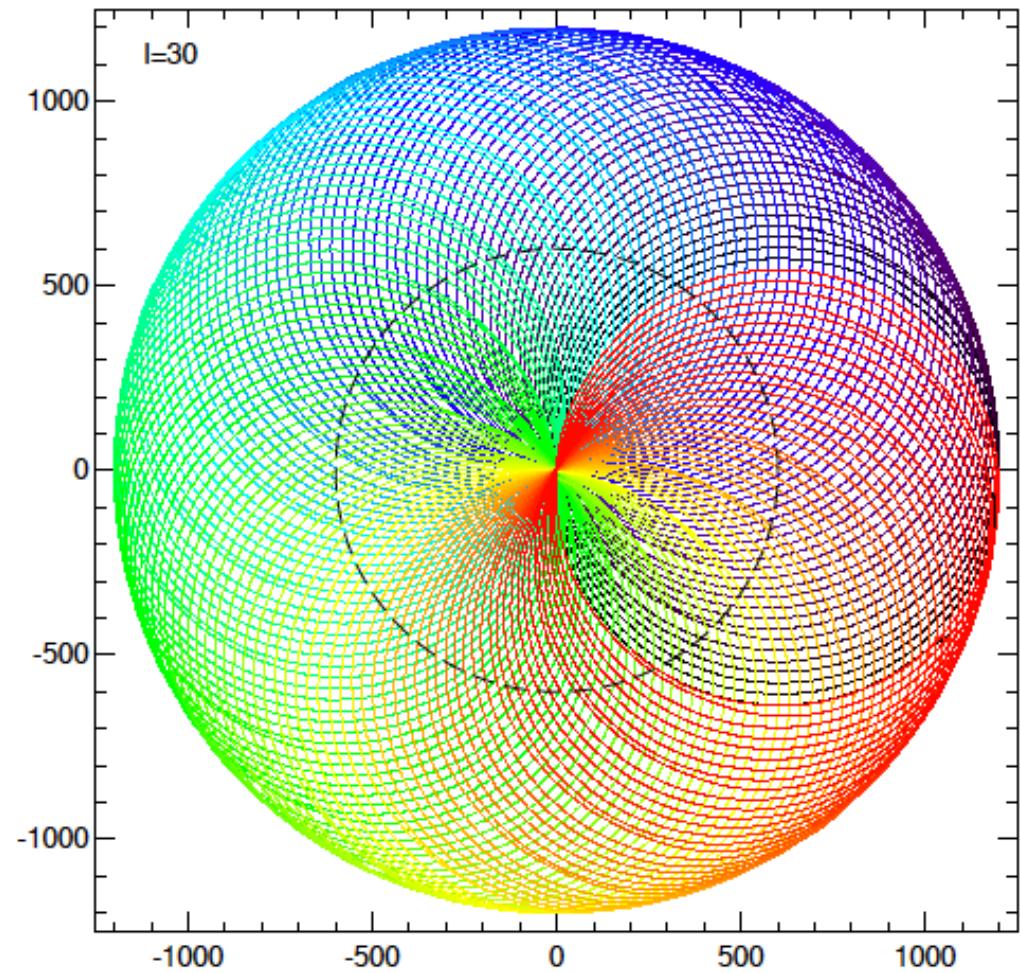
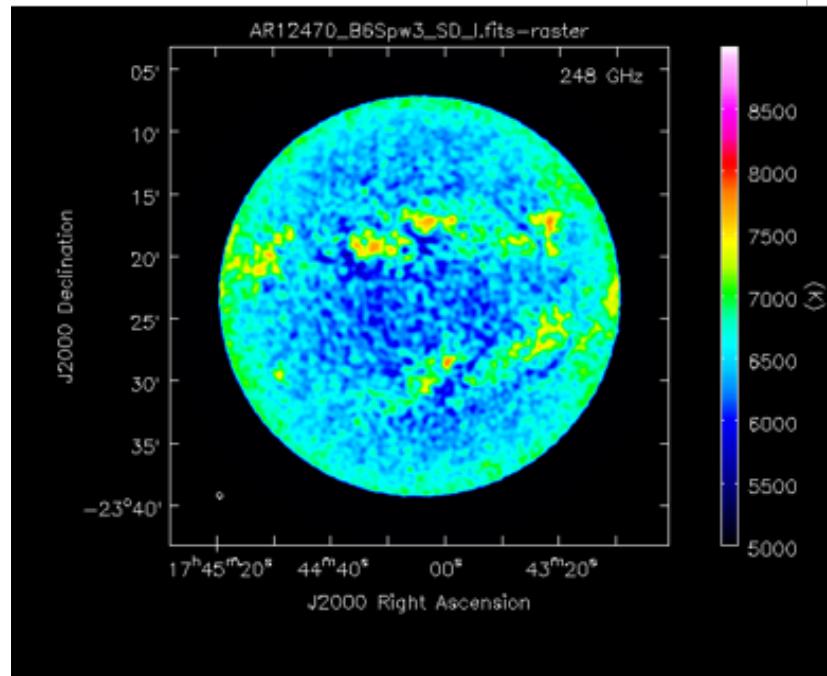
uv カバレッジを良くするための ALMAの戦略

1. 大きいアンテナ(12m x 44: 12m array)と小さいアンテナ(7m x 12: 7m array)を組み合わせる。さらに単一鏡観測
2. アンテナの配置を変えていく。
3. 地球の自転を使う。



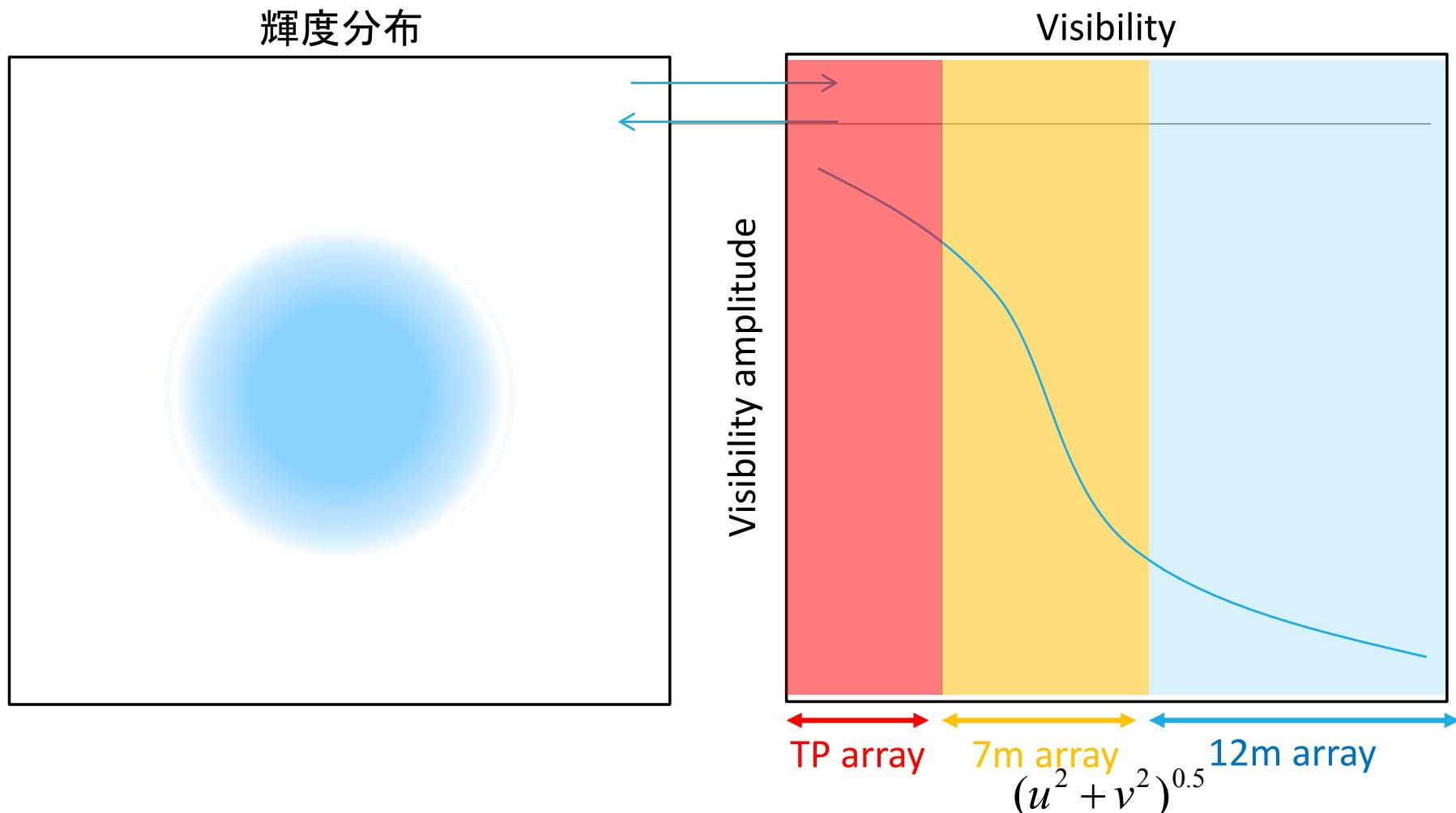
単一鏡観測 (Total Power)

DC 成分からアンテナ大きさで決まる
分解能程度までの空間周波数をカバーする。
時間ケーデンス 7~10min/FullSun



White et al. (2017)

ACA, TP array



- 12m arrayだけでは低い空間周波数成分を取得できない
- ACA 7m arrayを追加することで軽減可能
- トータルフラックスを完全に再現するためにはTP array(単一鏡)が必要

uv カバレッジを良くするための ALMAの戦略

1. 大きいアンテナ(12m x 44: 12m array)と小さいアンテナ(7m x 12: 7m array)を組み合わせる。さらに単一鏡観測
2. アンテナの配置を変えていく。
3. 地球の自転を使う。



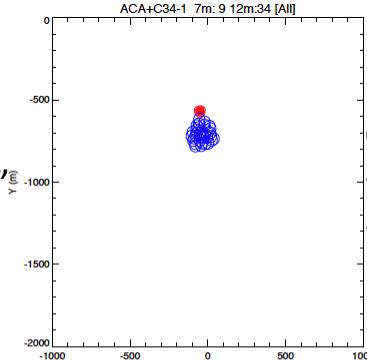
アンテナの移動



アンテナ配置の変更(Cycle3)

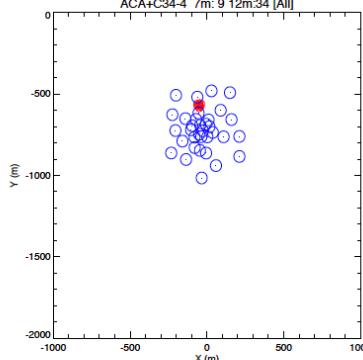
C36-1

最大スケール $25.3''$
最小スケール $3.4''$



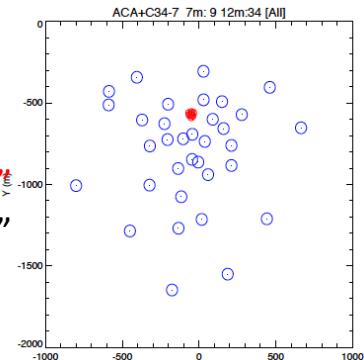
C36-4

最大スケール $9.6''$
最小スケール $0.7''$



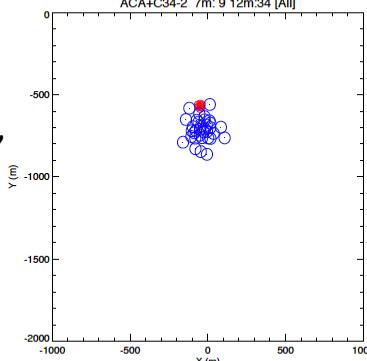
C36-7

最大スケール $1.5''$
最小スケール $0.1''$



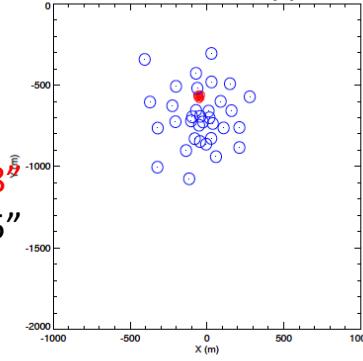
C36-2

最大スケール $25.2''$
最小スケール $1.8''$



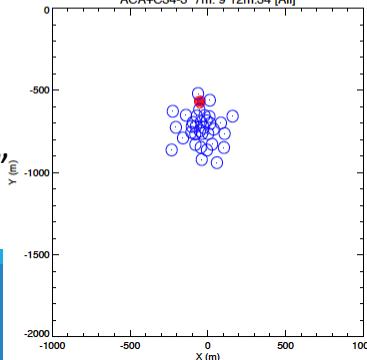
C36-5

最大スケール $7.8''$
最小スケール $0.5''$



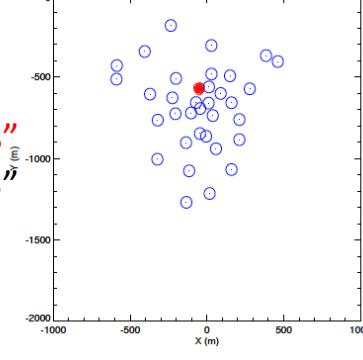
C36-3

最大スケール $25.2''$
最小スケール $1.2''$



C36-6

最大スケール $4.8''$
最小スケール $0.3''$



7m array
最大スケール $42.8''$
最小スケール $15.0''$

空間スケールは、観測
周波数100GHz時のもの

ALMAが対応する アンテナ配置組み合わせ (Cycle4)

Table A-2: Allowed Array Combinations and Time Multipliers

| Most Extended configuration | Allowed Compact configuration pairings | Extended 12-m Array Multiplier | Multiplier if compact 12-m Array needed | Multiplier if 7-m Array needed | Multiplier if TP Array needed and allowed |
|-----------------------------|--|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| 7-m Array | TP | | | 1 | 1.7 |
| C40-1 | 7-m Array & TP | 1 | | 5 | 8.5 |
| C40-2 | 7-m Array & TP | 1 | | 5 | 8.5 |
| C40-3 | 7-m Array & TP | 1 | | 1.4 | 2.38 |
| C40-4 | C40-1 & 7-m Array & TP | 1 | 0.3 | 3 | 5.1 |
| C40-5 | C40-2 & 7-m Array & TP | 1 | 0.3 | 1.4 | 2.38 |
| C40-6 | C40-3 & 7-m Array & TP | 1 | 0.3 | 0.4 | 0.68 |
| C40-7 | C40-4 | 1 | 0.3 | | |
| C40-8 | C40-5 | 1 | 0.3 | | |
| C40-9 | C40-6 | 1 | 0.3 | | |

アンテナ配置スケジュール表 (Cycle4)

Table 3: Planned 12-m Array Configuration Schedule for Cycle 4

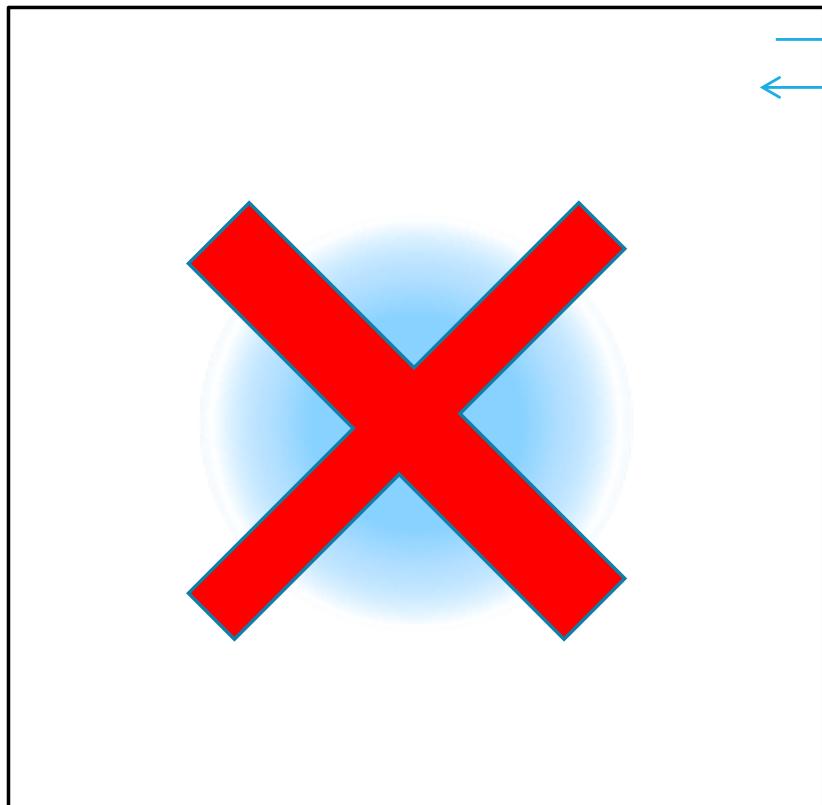
| (1) Planned Start Date | (2) Configuration (planned campaigns) | (3) Longest baseline | (4) LST with best observing conditions | (5) LST with unstable observing conditions | (6) PI Observing Time (days) |
|---------------------------|--|----------------------------|---|--|---------------------------------------|
| 14 October 2016 | C40-7 | 3.7 km | ~22h - 11h | ~11h-22h | 13 |
| 4 November 2016 | C40-6 | 1.8 km | ~23h - 12h | ~12h-23h | 11 |
| 25 November 2016 | C40-5 | 1.1 km | ~1h - 13h | ~13h-1h | 7 |
| 9 December 2016 | C40-4 | 0.70 km | ~2h - 14h | ~14h-2h | 7 |
| 23 December 2016 | C40-3 (Solar) | 0.46 km | ~3h - 15h | ~15h-3h | 11 |
| 19 January 2017 | C40-2 (Solar) | 0.27 km | ~4h - 17h | ~17h-4h | 9 |
| 1 February 2017 | <i>February maintenance period</i> | | | | |
| 16 March 2017 | C40-1 (Solar/VLBI) | 0.15 km | ~8h - 22h | 22h-8h | 17 |
| 6 April 2017 | C40-3 (Solar/VLBI) | 0.46 km | ~9h - 23h | ~23h-9h | 11 |
| 27 April 2017 | C40-5 | 1.1 km | ~10h - 1h | ~1h-10h | 7 |
| 11 May 2017 | <i>Move to configuration C40-9</i> | | | | |
| 8 June 2017 | C40-9 | 12.6 km | ~12h - 3h | ~3h-12h | 16 |
| 6 July 2017 | C40-8 | 6.8 km | ~14h - 5h | ~5h-14h | 22 |
| 17 August 2017 | C40-7 | 3.7 km | ~17h - 8h | ~8h-17h | 23 |

アンテナ配置は、1～2ヶ月のタイムスケールで変わっていく。

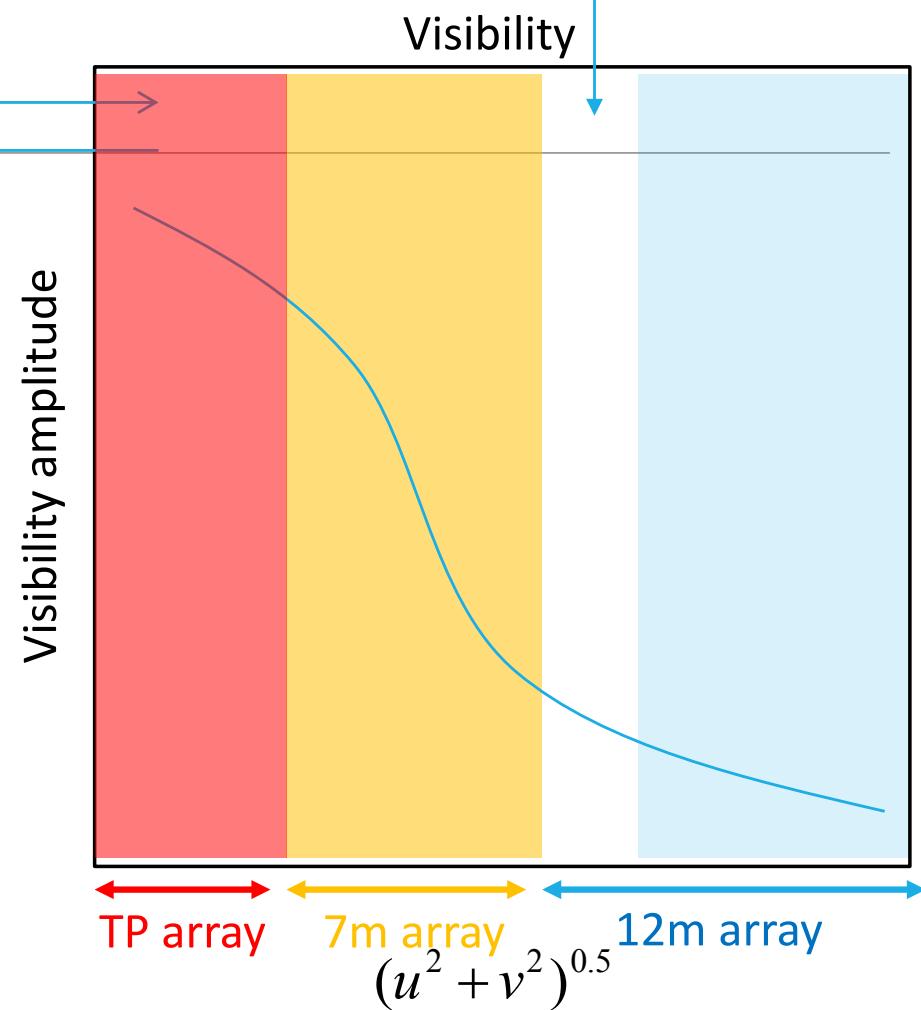
1ヶ月前の太陽は、今の太陽とは全く違うよう。

ACA, TP array

輝度分布



C40-4より広いアンテナ配置の場合
ギャップ(15~数秒角)ができるてしまう。



- 12m arrayだけでは低い空間周波数成分を取得できない
- ACA 7m arrayを追加することで軽減可能
- トータルフラックスを完全に再現するためにはTP array(単一鏡)が必要

uv カバレッジを良くするための ALMAの戦略

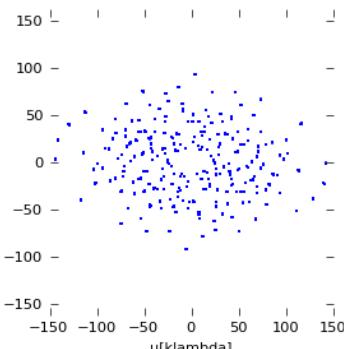
1. 大きいアンテナ(12m x 44: 12m array)と小さいアンテナ(7m x 12: 7m array)を組み合わせる。さらに単一鏡観測
- ✗ アンテナの配置を変えていく。
3. 地球の自転を使う。



PSF @ Taurus (Dec=+25d00m) 345GHz

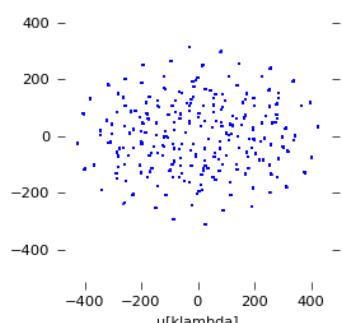
5 minutes Integration

Compact

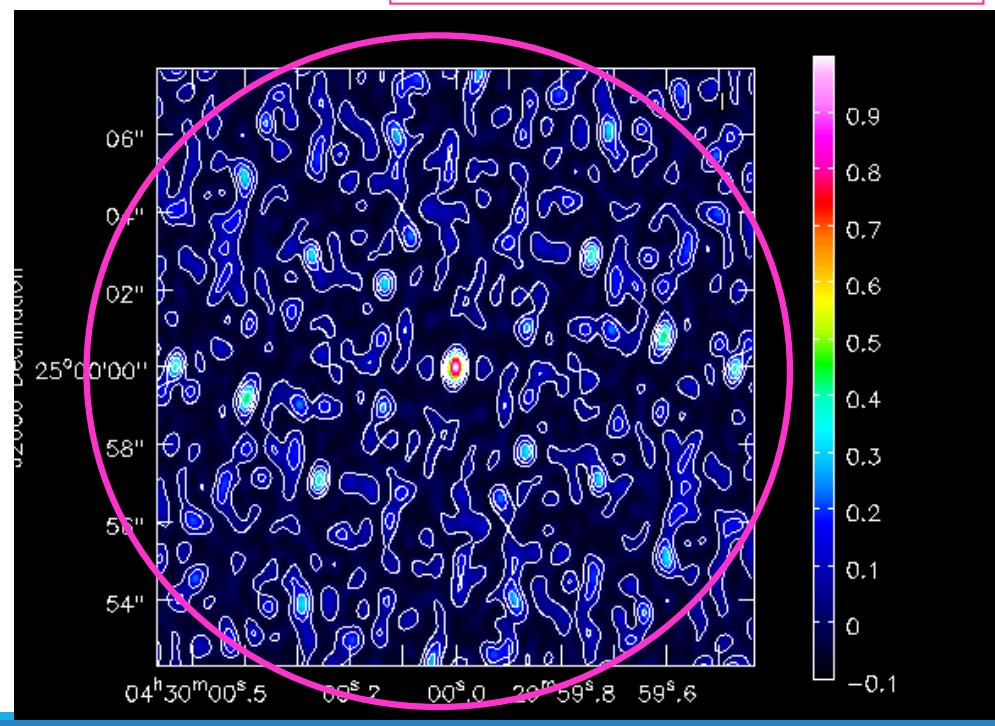
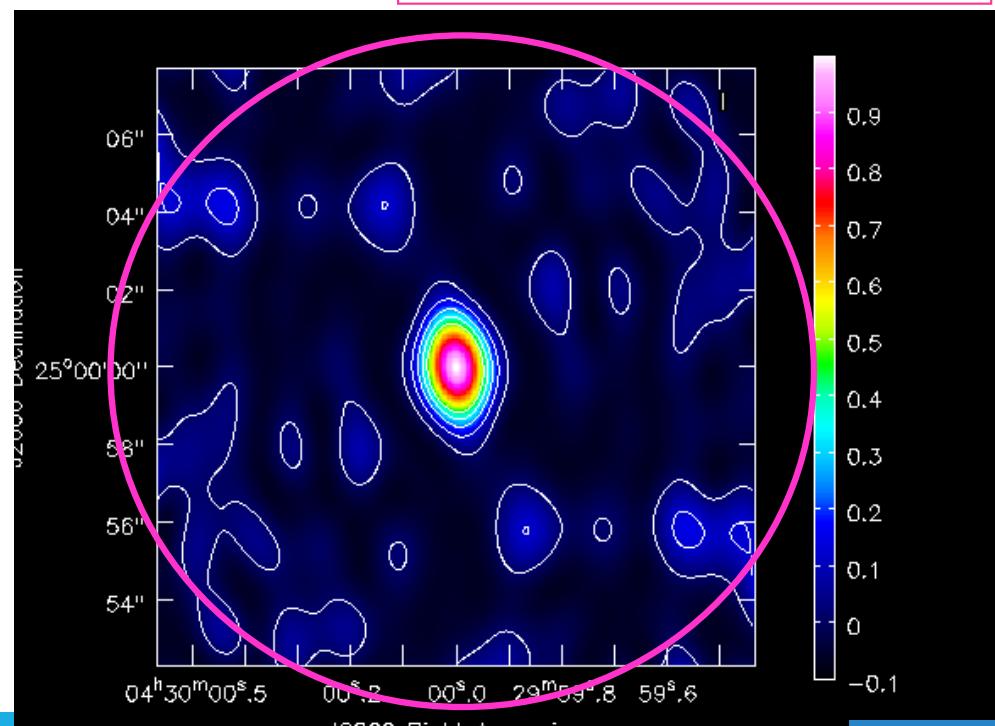


- beam
FWHM(2.3",1.5")
PA \sim -10deg
- side-lobe
 $<\sim 17\%$
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.56mJy (1.80mK)

Extended



- beam
FWHM(0.64",0.43")
PA \sim 0deg
- side-lobe
 $<\sim 45\%$
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.56mJy (23.0mK)

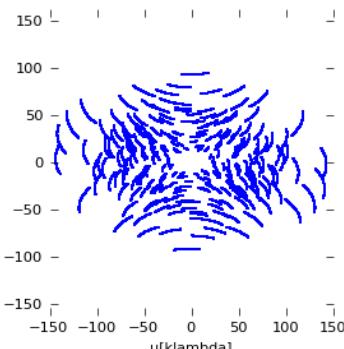


パネルは345GHzでのおよその視野サイズ(~ 18 arcsec)
コントアは、下から0%,10%, 20%, 30% ,40%,50%のノイズレベル。³⁰

PSF @ Taurus (Dec=+25d00m) 345GHz

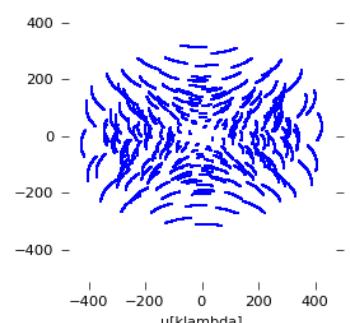
2 hours Integration

Compact

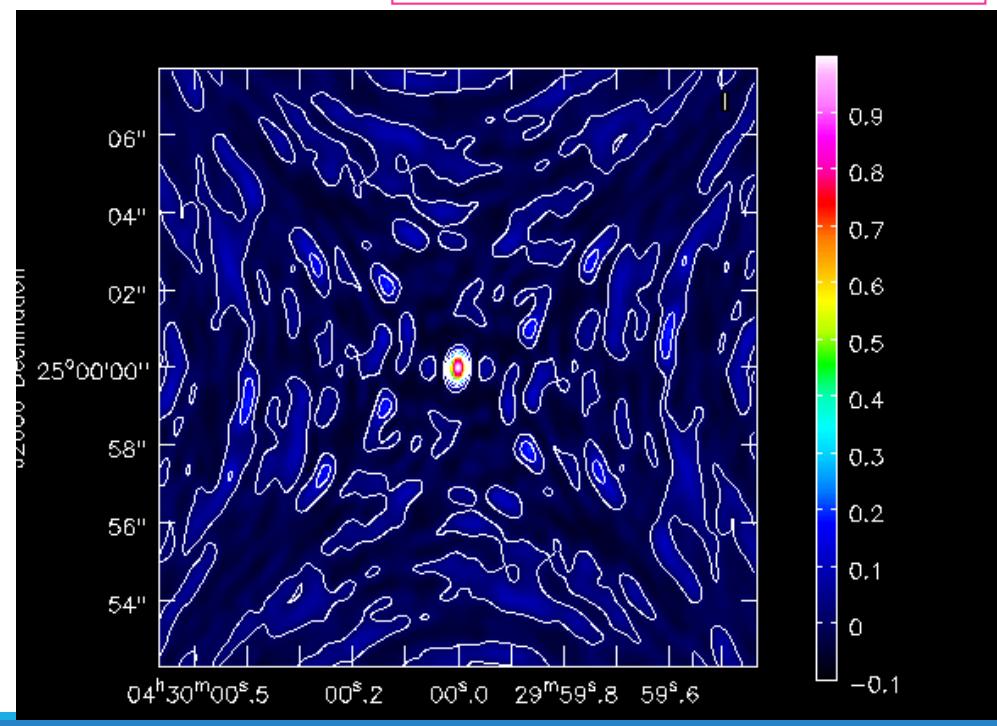
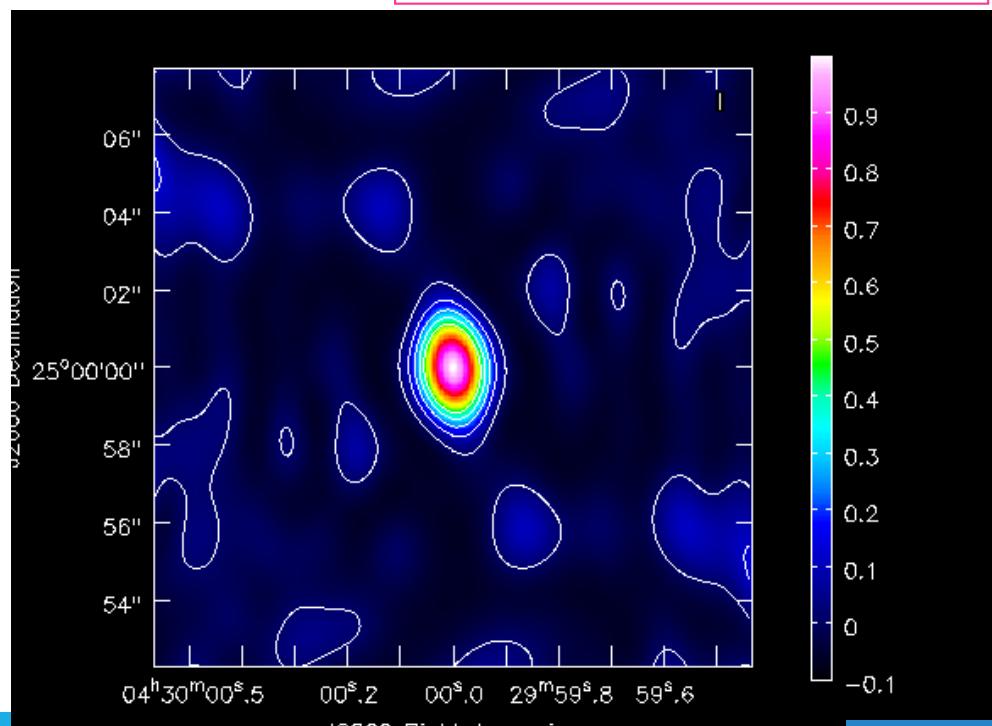


- beam
FWHM(2.3",1.5")
PA \sim -10deg
- side-lobe
 $<\sim 15\%$
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.11mJy (0.37mK)

Extended



- beam
FWHM(0.64",0.43")
PA \sim 0deg
- side-lobe
 $<\sim 19\%$
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.11mJy (4.7mK)

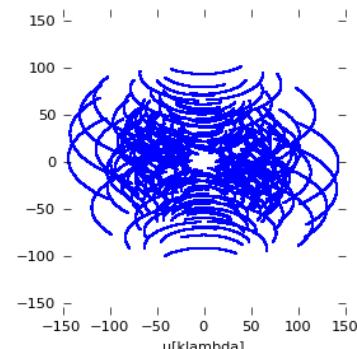


パネルは345GHzでのおよその視野サイズ(~ 18 arcsec)
コントアは、下から0%,10%, 20%, 30% ,40%,50%のノイズレベル。³¹

PSF @ Taurus (Dec=+25d00m) 345GHz

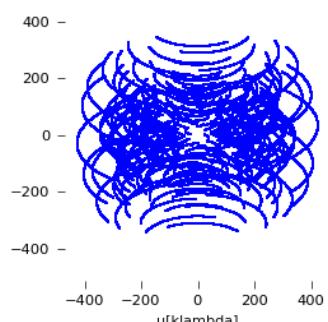
6 hours Integration

Compact

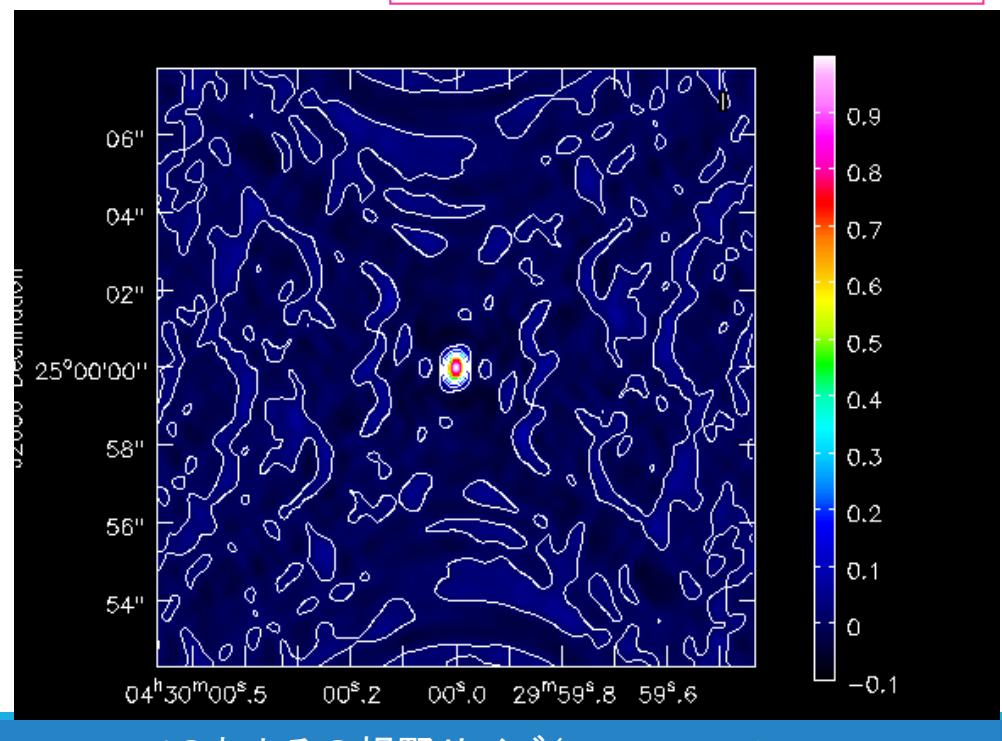
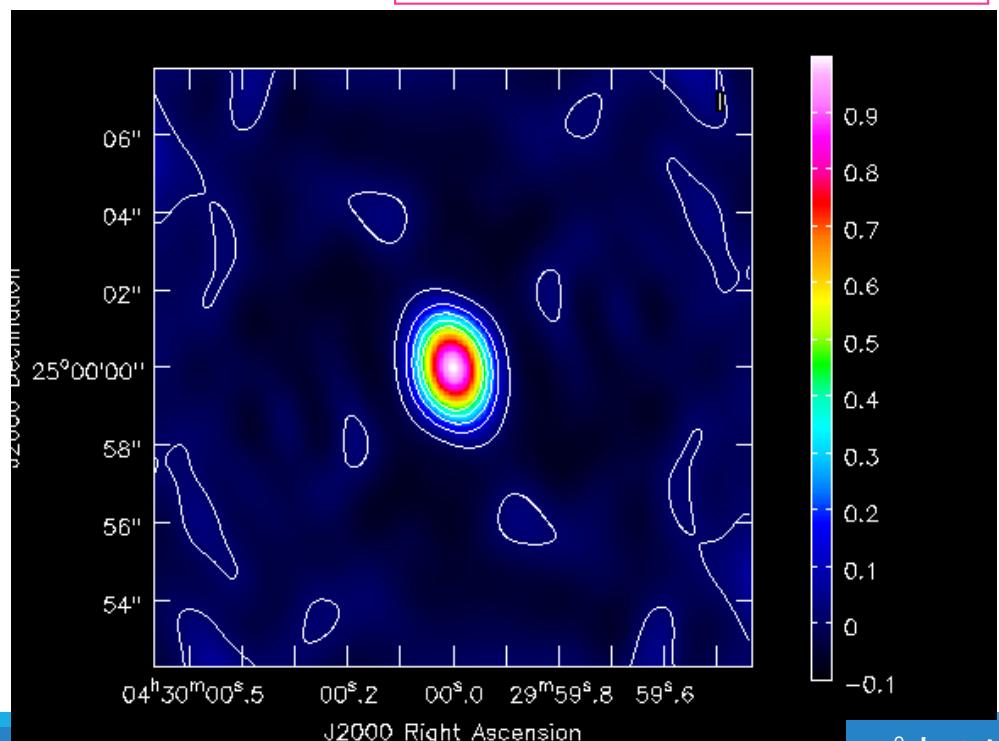


- beam
FWHM(2.3",1.5")
PA \sim -10deg
- side-lobe
 $<\sim$ 9%
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.07mJy (0.21mK)

Extended



- beam
FWHM(0.60",0.43")
PA \sim 0deg
- side-lobe
 $<\sim$ 8%
- 1 σ sensitivity (2GHz BW)
0.07mJy (2.7mK)



パネルは345GHzでのおよその視野サイズ(~ 18 arcsec)
コントアは、下から0%,10%, 20%, 30% ,40%,50%のノイズレベル。³²

太陽観測では、地球回転を使った uv力バレッジの向上は使えない 😭

地球の自転によって、天体に対する基線ベクトルが回る。



一つのアンテナのペアでも、時間によって基線ベクトルが変わる。



uv平面上のデータが増える。

ただし、

地球自転の時間スケールで

観測対象が大きく変化しないことが前提

秒スケールで動く太陽への応用は基本不可 😭

uv カバレッジを良くするための ALMAの戦略

1. 大きいアンテナ(12m x 44: 12m array)と小さいアンテナ(7m x 12: 7m array)を組み合わせる。さらに単一鏡観測
- ✗ アンテナの配置を変えていく。
- ✗ 地球の自転を使う。



ALMA太陽観測の制限

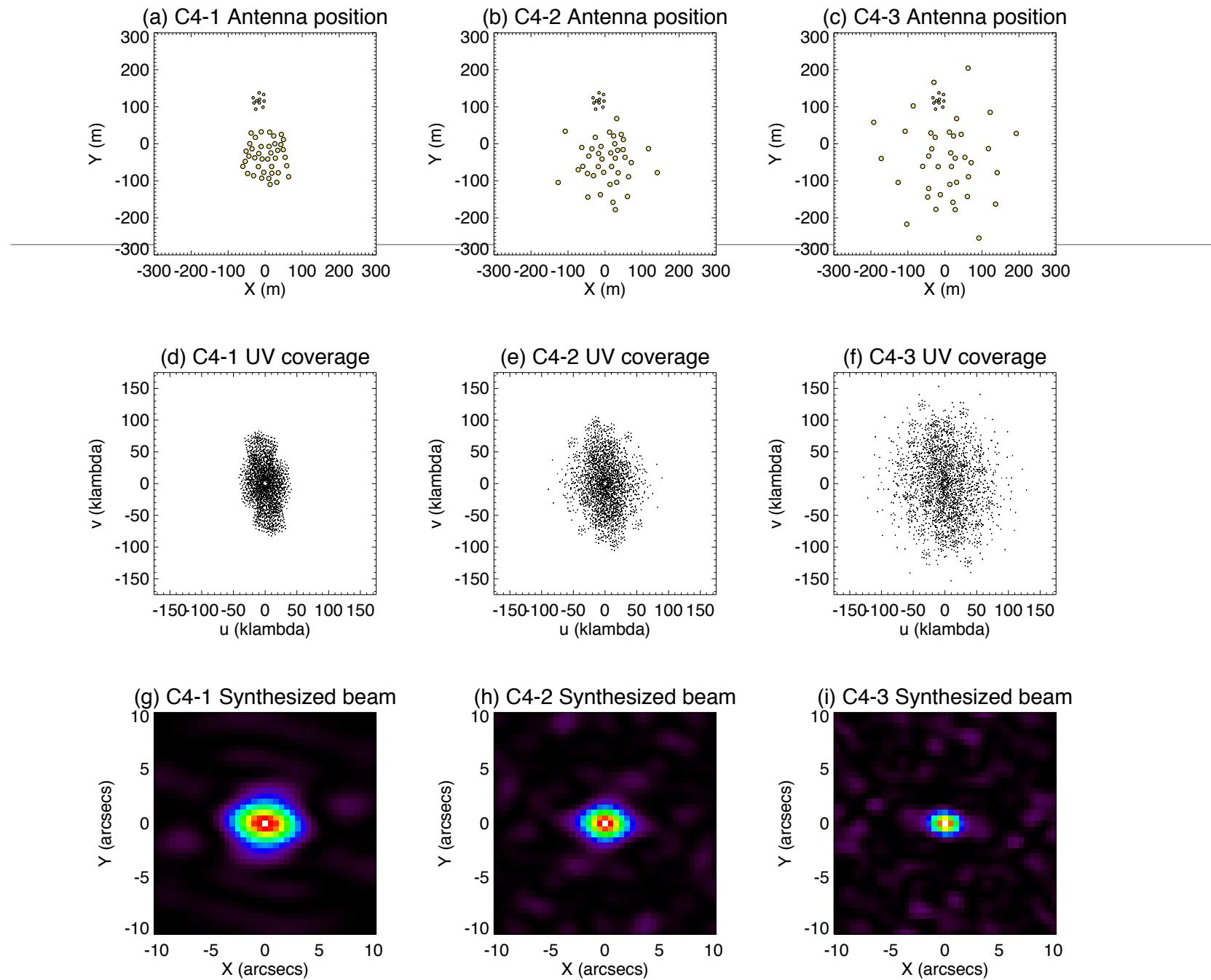
uv力バレッジ編

1. 12mアンテナ+7mアンテナ+単一鏡での観測を”同時”に行う必要がある。
2. 一つのアンテナ配置しか使えない。
3. 低空間周波数から連続的にuv空間をデータ点で、瞬間ごとになるべく埋めなければならぬので、低空間周波数成分を観測できない、広がったアンテナ配置は使えない(C??-1 ~ C??-3まで)。

よって、太陽観測の最高空間分解能は、

Cycle4において1.5”@100GHz, 0.6”@239GHzに制限された。

解決方法は、アンテナの数を増やすしかない……。

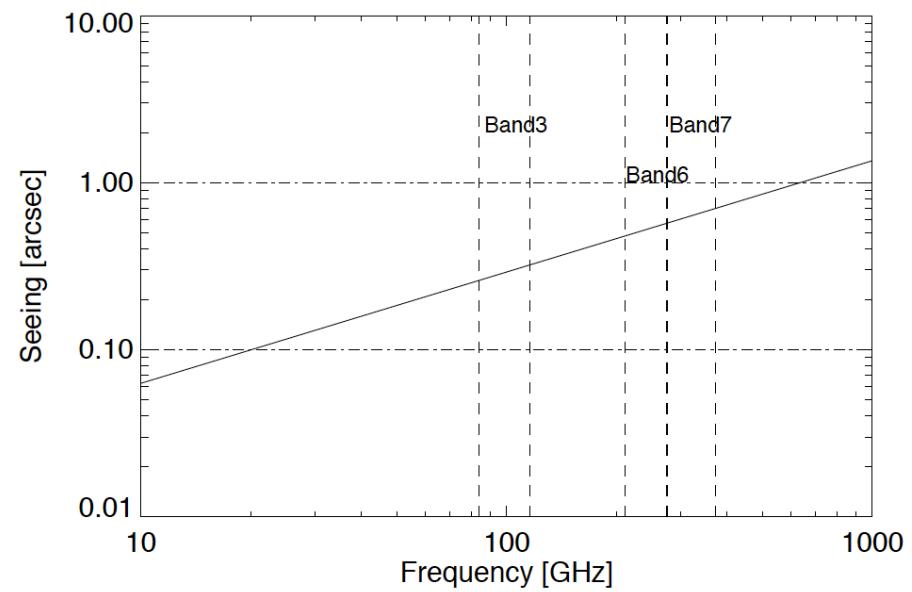
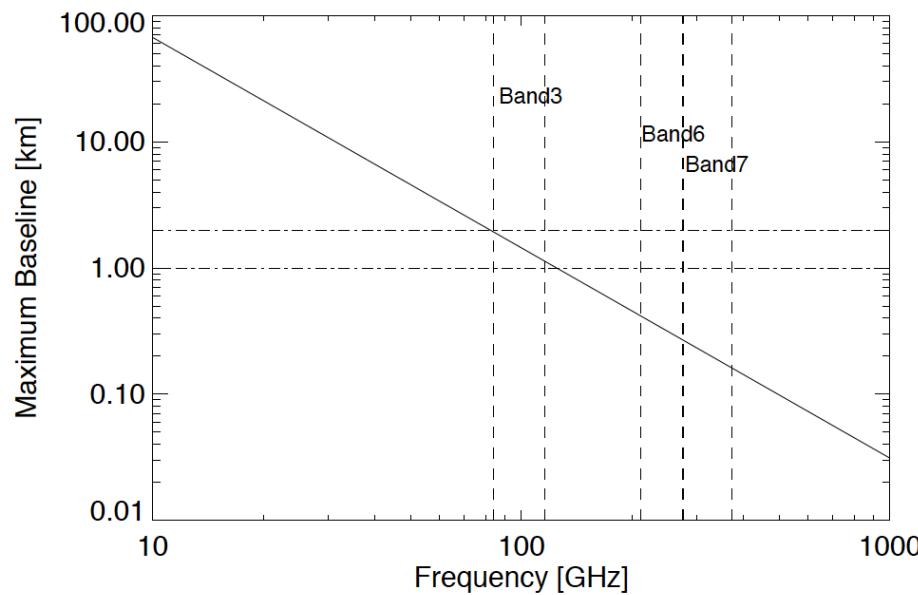


WVR無しでの最大基線長

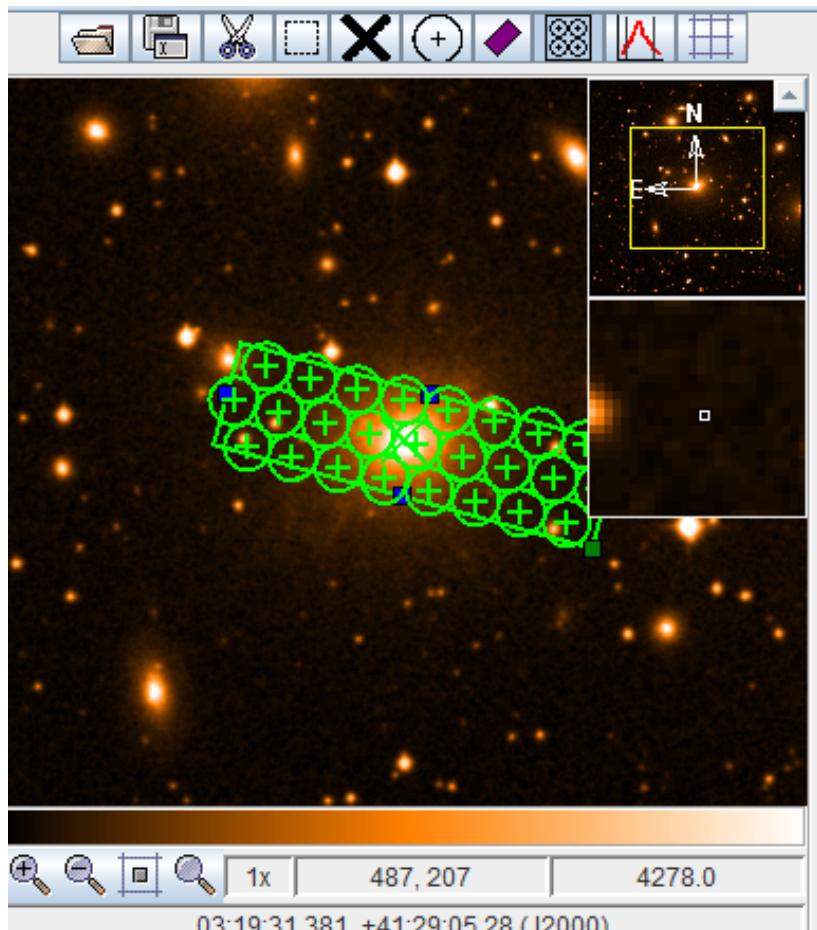
大気による位相変動の大きさによる評価。

- 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)



視野を広げる ”モザイク観測/MOSAIC”



合成ビームサイズ以上の視野にわたって天体をイメージングしたい場合、ビームのポインティング方向を変えて、イメージングを行う

ALMAでは1観測あたり150ポインティングまで可能。正方形の視野を考えると

$300'' \times 300'' @ 100\text{GHz}$

$120'' \times 120'' @ 239\text{GHz}$

の大きさ。左図のように長方形も可。

ケーデンスは、ポインティング数に逆比例。
太陽観測では1ポインティングあたり約7秒必要。

ちょっとひと息 質問タイム

次は受信機(=観測周波数)のお話。

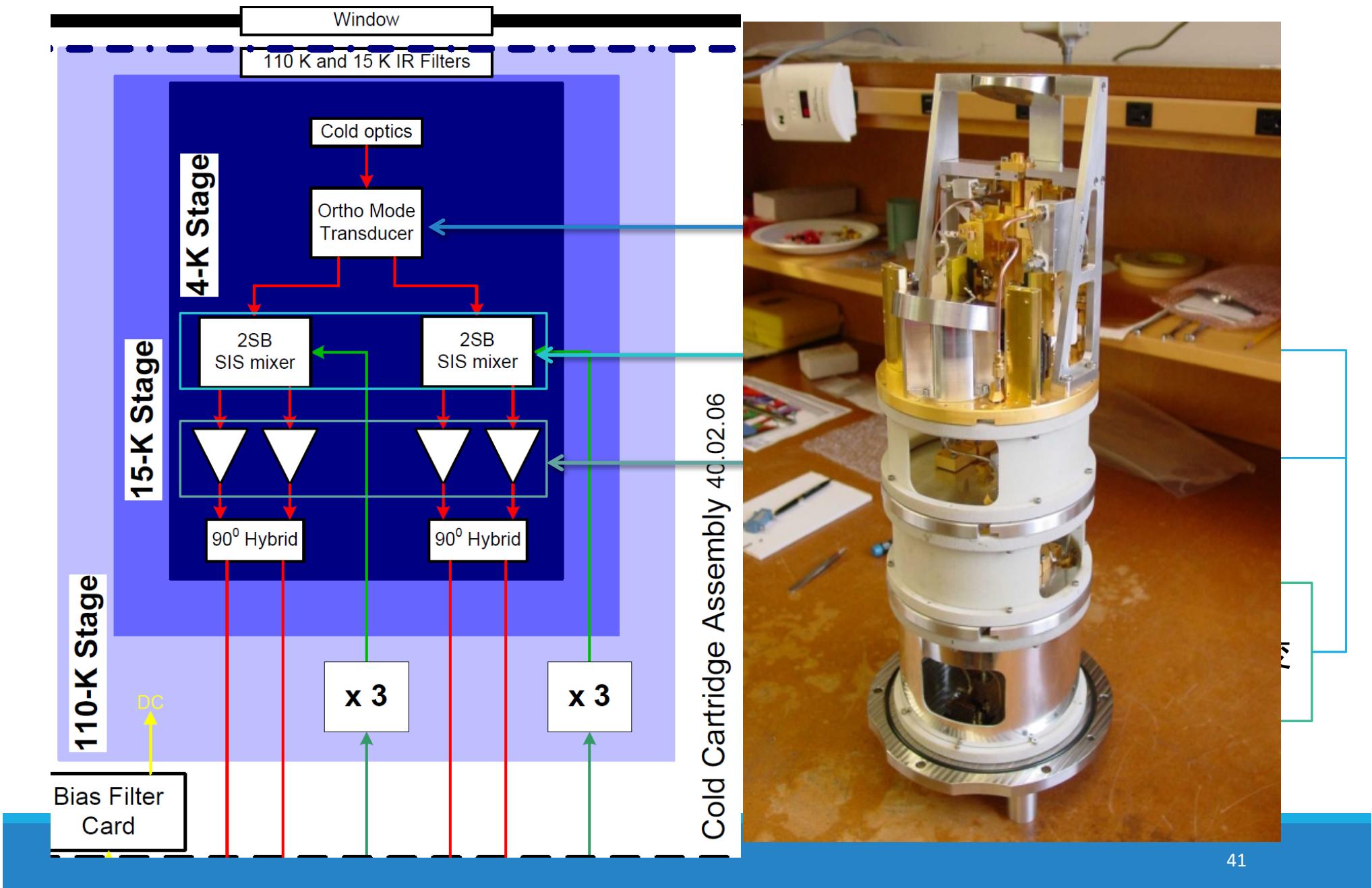
ALMA搭載の受信機群

- Band 3: **84 – 116 GHz**
- Band 4: 125 – 163 GHz
- Band 6: **211 – 275 GHz**
- Band 7: **274 – 373 GHz**
- Band 8: 385 – 500 GHz
- Band 9: **602 – 720 GHz**
- Band 10: 787 – 950 GHz

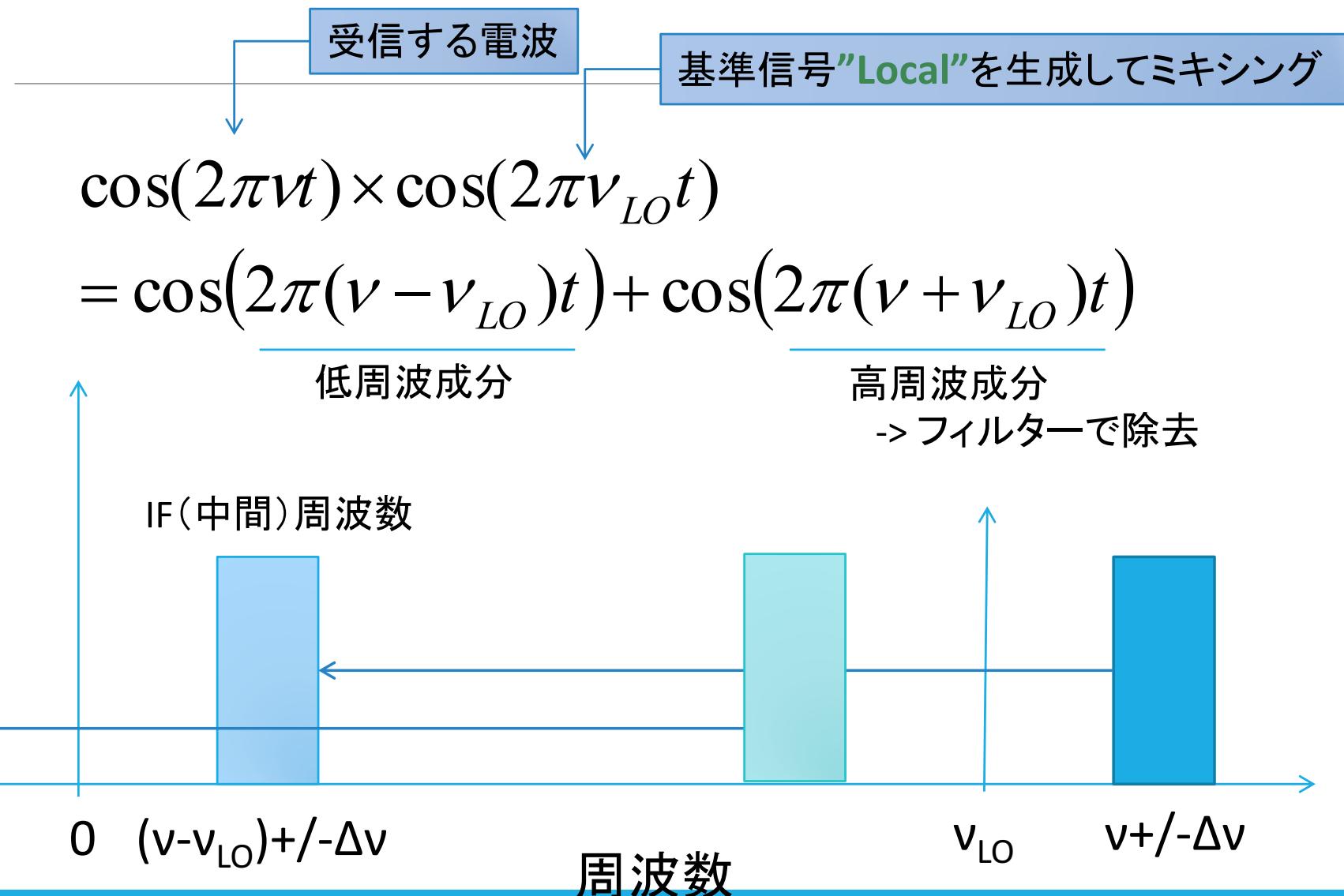
一回の観測につき、一つの受信機
(Band)しか使えない。



信号の流れ(フロントエンド部)



周波数変換

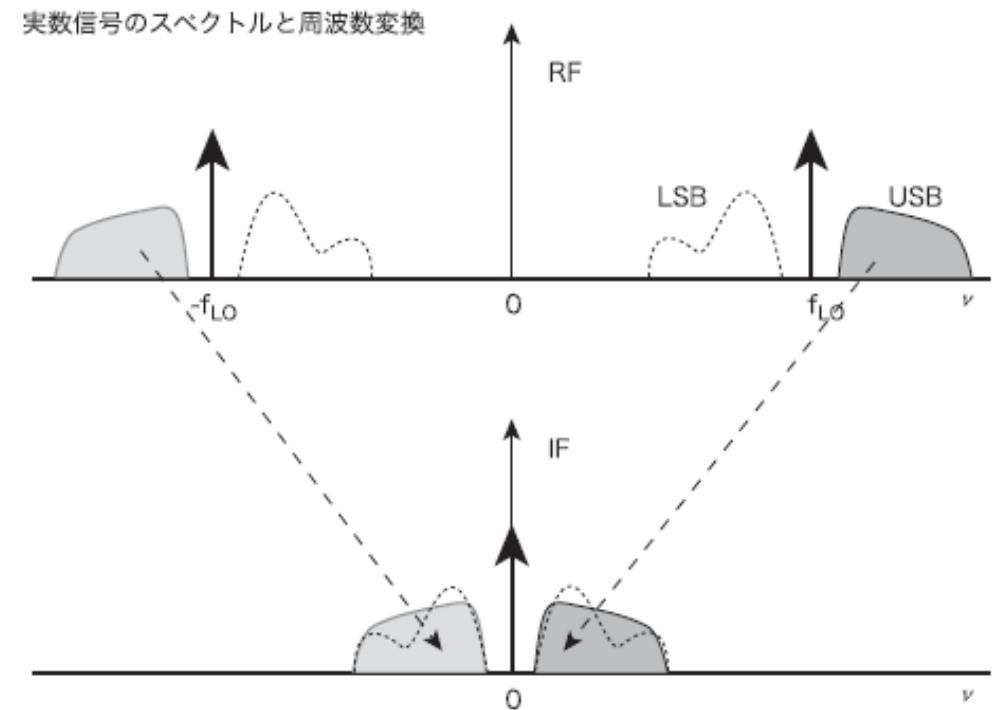


周波数変換

実信号では負の周波数成分も存在する

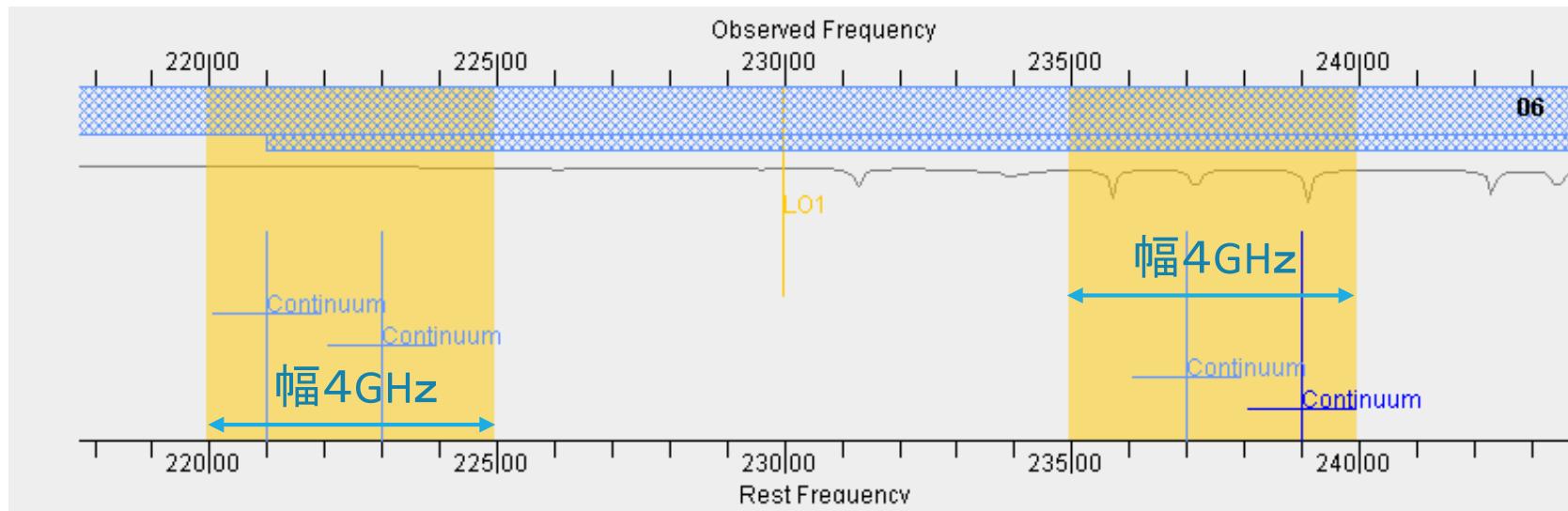
“USB(Upper sideband)”と”LSB(Lower sideband)”の2つがIF帯で重なり合う

干渉計の90° 位相スイッチという
手法を用いて、正負両方の周波
数成分を独立に取得している



受信帯域(バンド)

前頁の理由により一つの周波数チューニングに対して、2つの受信帯域(USB、LSB)が存在する



USB、LSBの帯域幅・間隔は固定

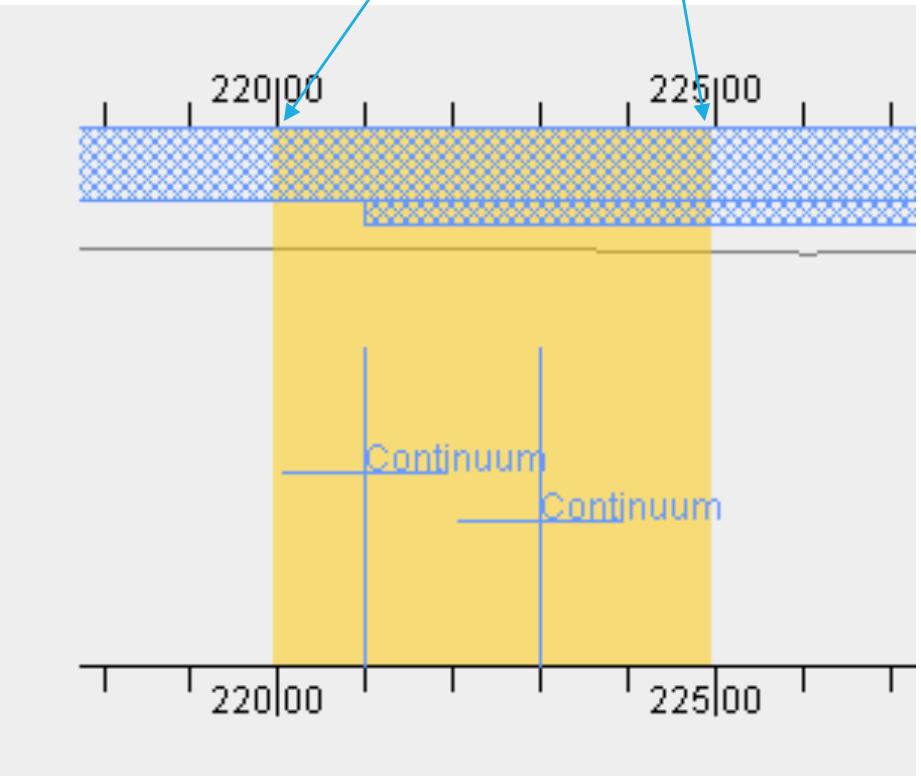
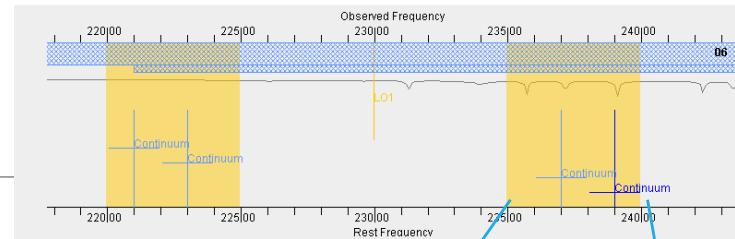
Spectral window

USB, LSBにそれぞれ”spectral window (spw)”という窓を設置(フィルター)

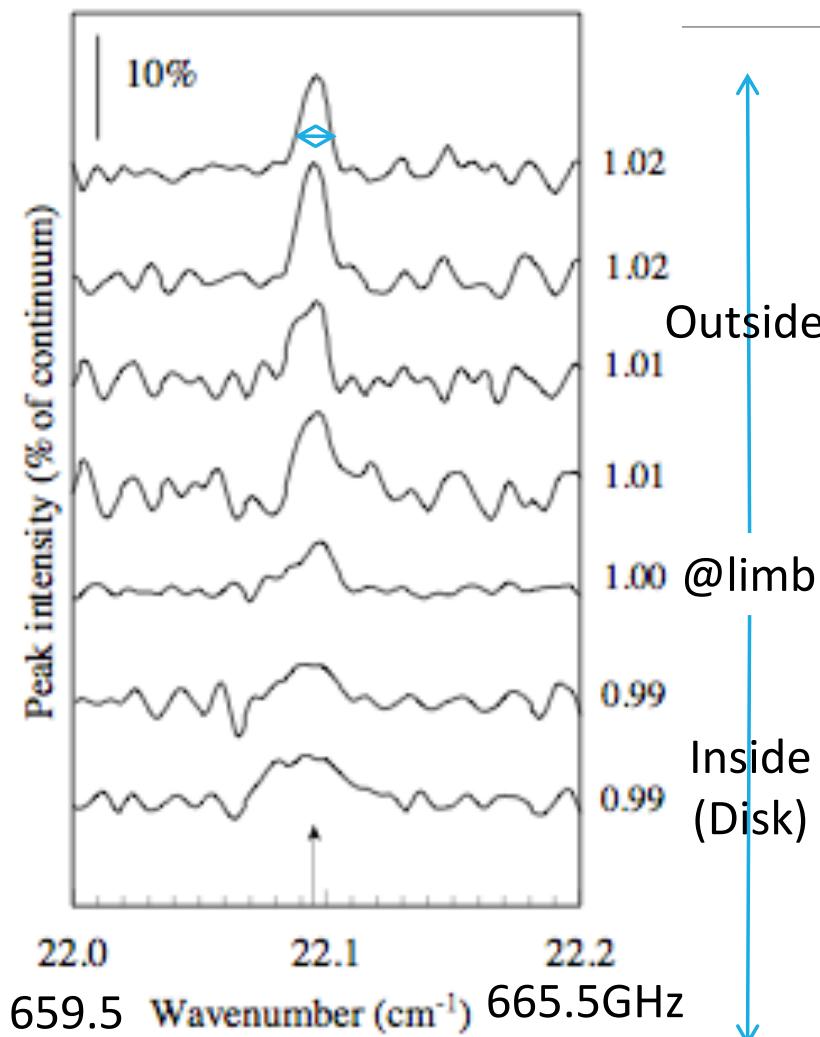
Spwの中を最大8192点で分光可能

Spwの幅は6段階変化させることができ、目的に応じて異なる速度分解能が得られる。

連続波観測用モード(“Time Domain Mode(TDM)”)は、Spwの幅2GHz、1Spwあたり256/128点での分光が可能。



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 : $\sim 1\text{GHz}$
 - Pressure broadening occurs in chromosphere.

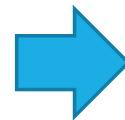
太陽観測での特別措置

ALMAの受信機スペック

”800Kまでの入力に対応すること”



太陽の輝度温度: 5000 ~ 8000 K



普通に観測したら、受信機が”飽和”
もしくは、
入力に対する線形性が保てない。

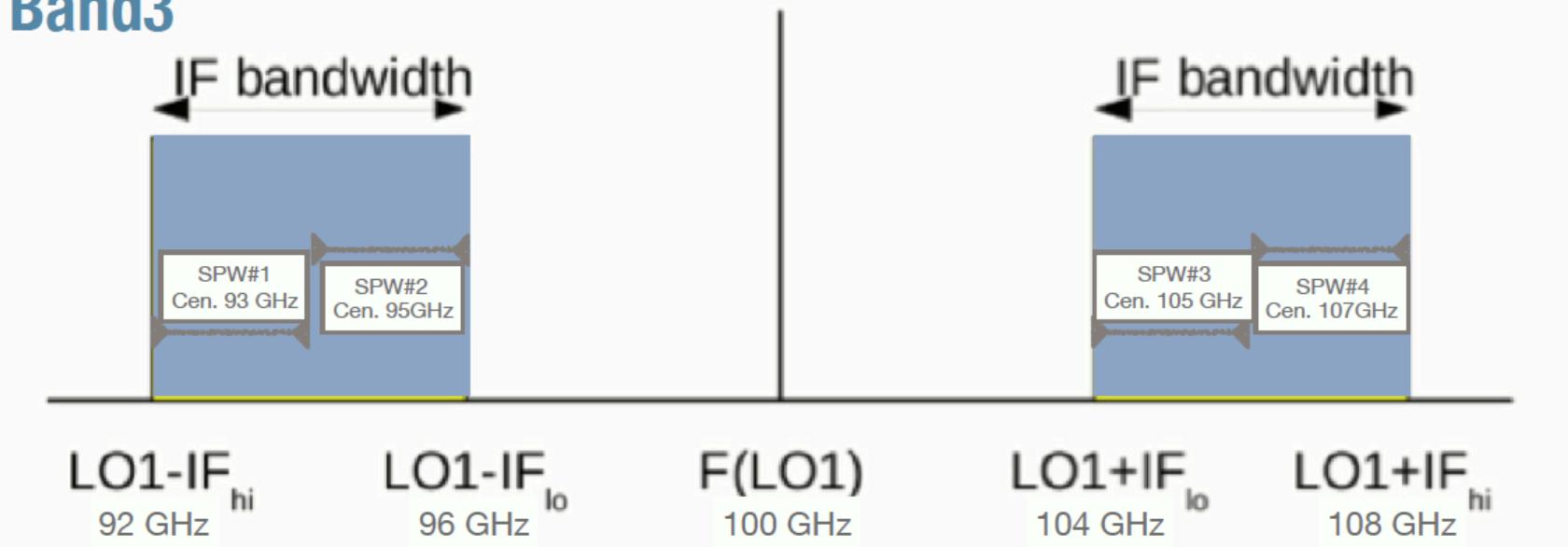
対応策

SIS Mixerの設定をDe-tuningして、感度を落とす。

- Bias電圧を最適力ずらし、感度を落としながらダイナミックレンジを上げる。
- ただし、1/10~1/20程度までしか感度が落ちないので、電波が強いフレアなどは、受信機の非線形性が出てくる可能性がある。
- De-Tuningをすると較正源(クエーサー)観測時の入力がA/Dコンバーターの入力規定値を下回る。→受信機の減衰器のレベルと変化させる。
 - 減衰器のレベル変更による位相のズレの検証が必要。

Receiver & Correlator Setup for solar observations in Cycle4

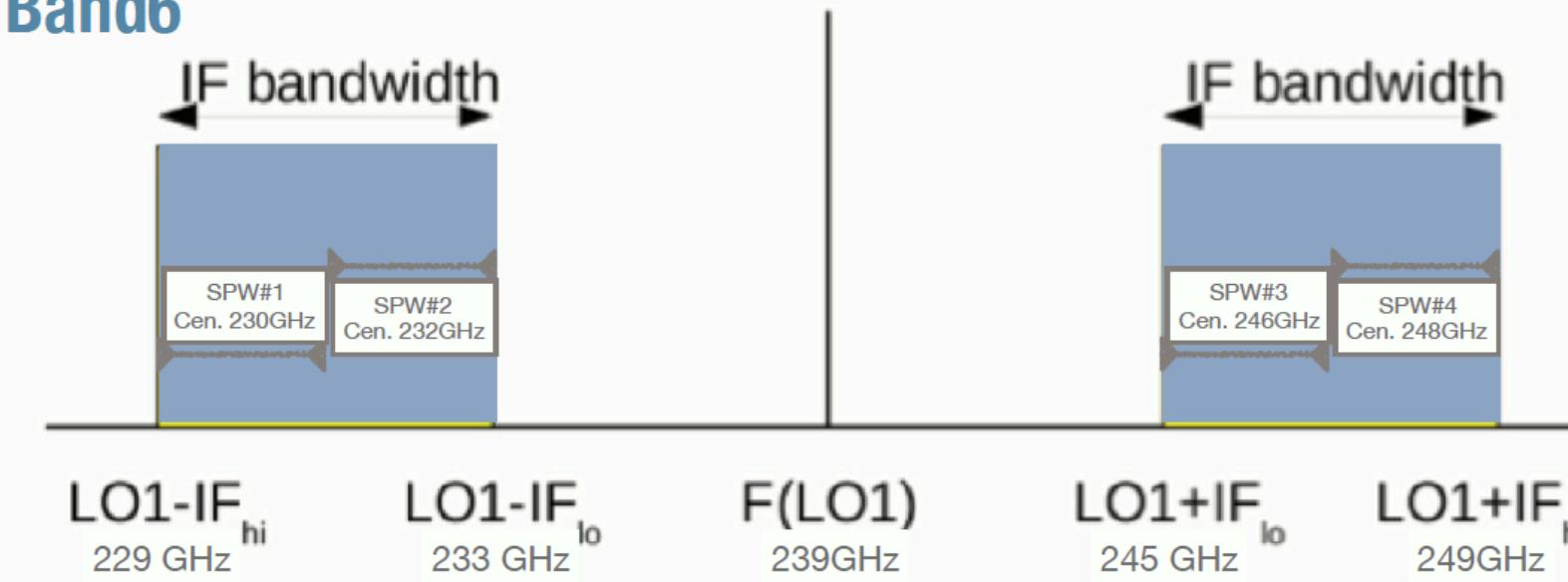
Band3



- * For solar observations in Cycle4, observations with Band3 and Band6 receivers are offered.
- * LO1 is fixed to 100 GHz for Band3, 239 GHz for Band6.
- * Polarization is Stokes-I or XX only
- * The correlator mode is TDM only.
 - * # of ch is 128 ch/spw (Stokes-I), 256ch/spw (XX only)
 - * Spectrum resolution: 15.6 MHz (Stokes-I) / 7.8 MHz (XX only)
- * Integration time is 2 seconds. → Shortest time cadence of images is 2 seconds.

Receiver & Correlator Setup for solar observations in Cycle4

Band6



- For solar observations in Cycle4, observations with Band3 and Band6 receivers are offered.
- LO1 is fixed to 100 GHz for Band3, 239 GHz for Band6.
- Polarization is Stokes-I or XX only
- The correlator mode is TDM only.
 - # of ch is 128 ch/spw (Stokes-I), 256ch/spw (XX only)
 - Spectrum resolution: 15.6 MHz (Stokes-I) / 7.8 MHz (XX only)
- Integration time is 2 seconds. → Shortest time cadence of images is 2 seconds.

太陽観測における ALMA観測周波数の現状と今後

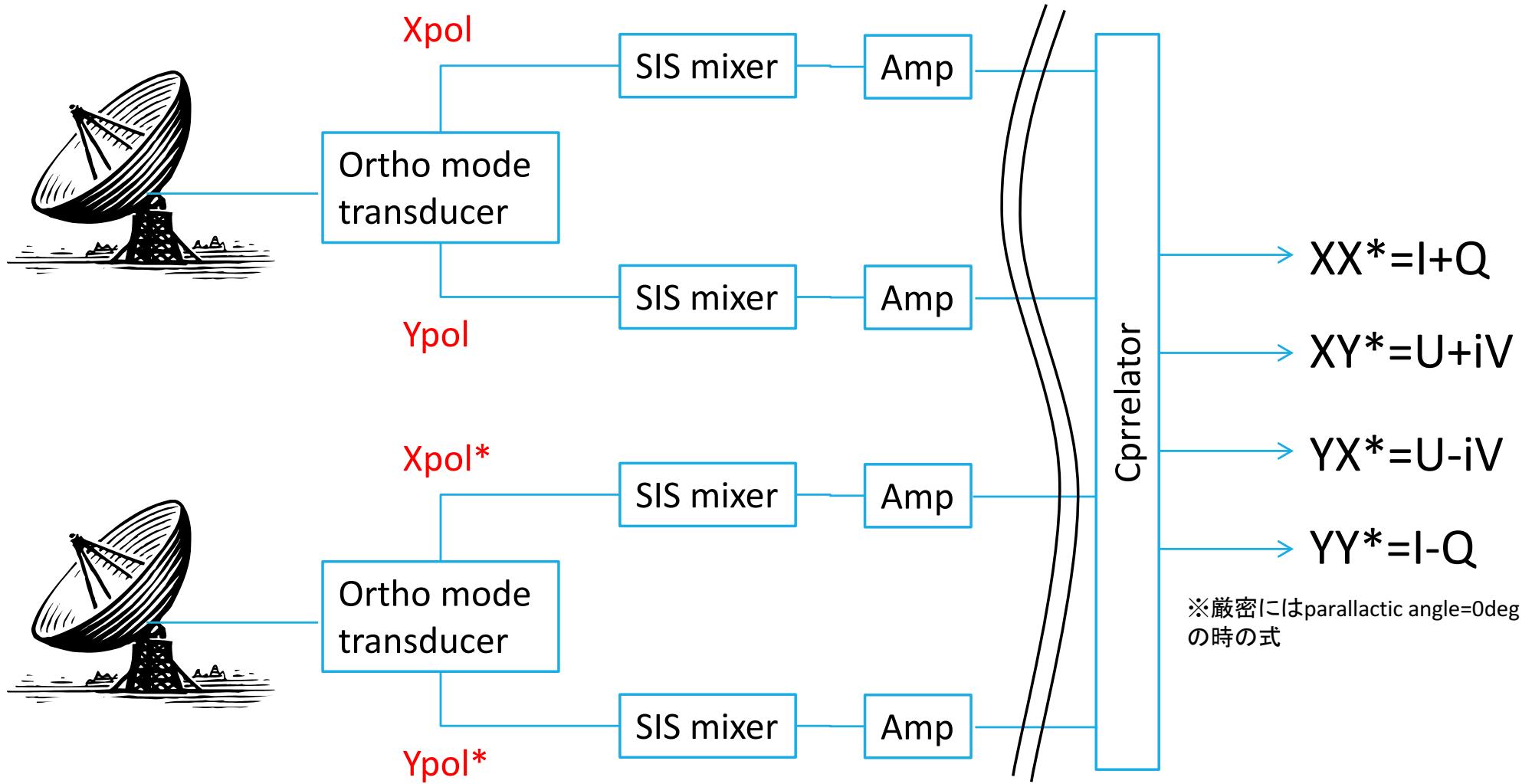
現状(Cycle4)

- Band3とband6のみ利用可能。ただし、Local周波数は、100GHz@Band3, 239GHz@Band6に固定。

将来

1. 高周波バンド (Band7 [~300 GHz]/ Band9 [~700GHz])が利用可能へ。
2. バンド内でのLocal周波数の変更可能へ。
 - TDM以外のスペクトルモードの優先度は低い。

偏光測定の仕組み



4つの相関を使って、4つのStokes parameterを分離

偏光測定の仕組み

XX, YY, XY, YX の4つの相関から、 I, Q, U, V を独立に得る

- 偏波分離が不完全なために、装置固有の偏波応答が加わる
- ALMAアンテナは経緯台式のため、天体の偏波角は観測中に変化していくが、装置偏波は変化しない。これを利用して、解析の段階で較正を行う
- 明るく、直線偏波が強い天体(概してクエーサー)を、約3時間観測することを推奨している
 - ただしStokes V は現時点では保証対象外
 - 太陽観測は、 XX のみまたは XX, YY のペアのみ取得可能。 XY, YX の取得はなし。

なぜ“Calibration”が必要か？

観測量Visibility $V(u, v) = \iint I(x, y) \exp(i(ux + vy)) dx dy$

理想的には、

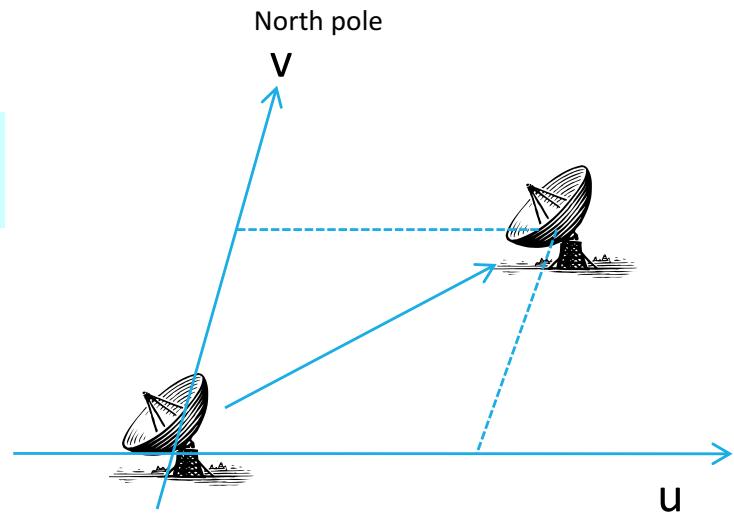
$$V_{obs} = V_{real}$$

実際には、

$$V_{obs} \neq V_{real}, V_{obs} = GV_{real}$$

- 大気・装置起因で”G”(ゲイン)が加わる
- Gは複素量(振幅と位相)

Gを解く作業が“Calibration”



投影基線長を波長で規格化したもの

Gの主要なファクター

大気の影響、特に水蒸気

- 水蒸気による吸収: 電波強度が変化
- 水蒸気量の変化: 電波の位相が変化

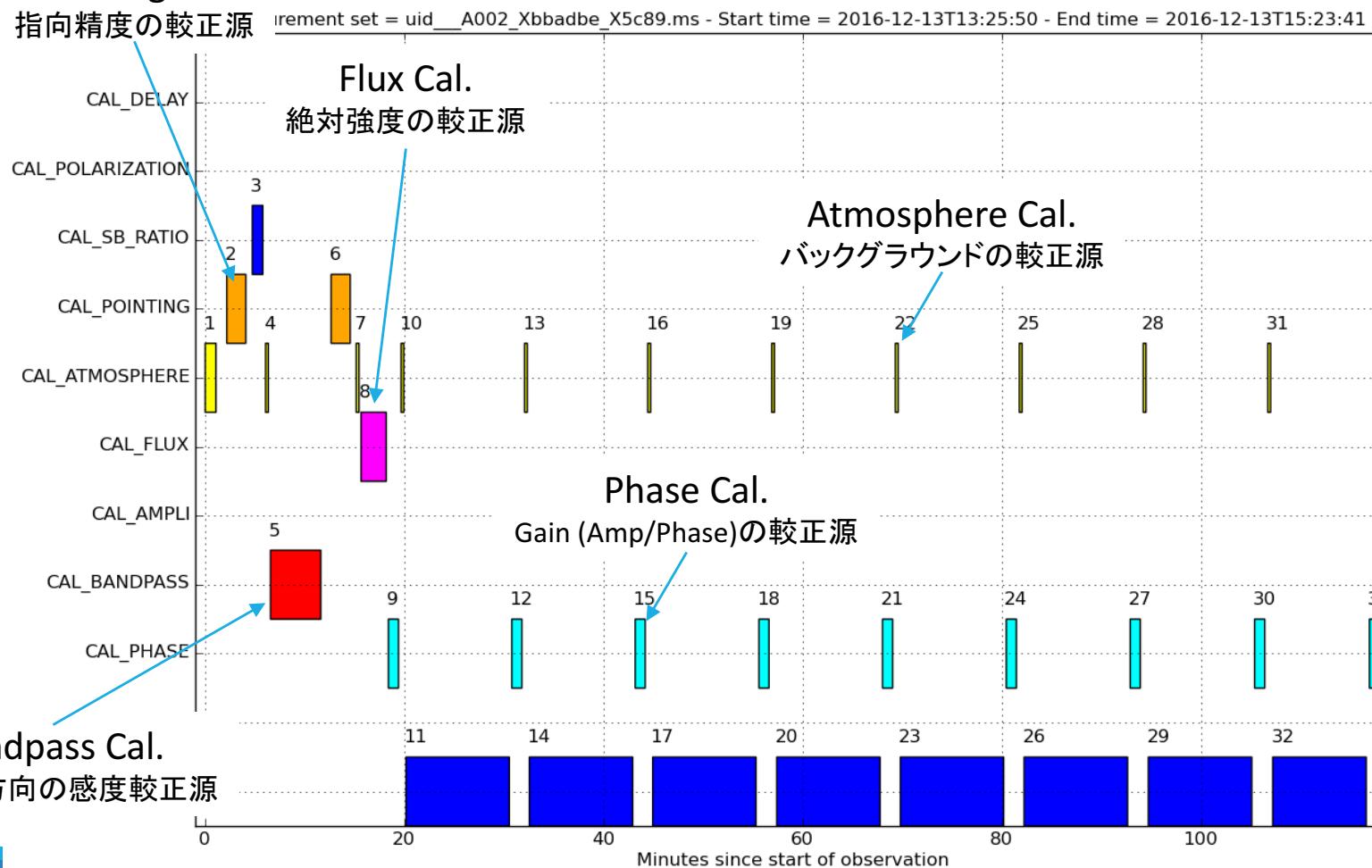
装置の影響

- 装置のimperfection/stability: 強度・位相が変化(e.g., アンテナの熱変形・重力変形)
- 基線長測定エラーによる位相変動
- 受信帯域全体の応答は必ずしもフラットではない: 帯域特性を生む
- etc

実際の観測シーケンス

Pointing Cal.

指向精度の較正源



太陽観測におけるALMAの利点・欠点

利点

- 高空間分解能($0.6''$ @239GHz)
- 高時間ケーデンス(2sec/img)
- 多周波同時観測
 - ただし、中心周波数±10GHz
 - (偏光観測)
- 非フレア時においては、LTEを満たす熱的連続光の観測
 - データの解釈が比較的容易。
- フレア時は、MeV電子ジャイロシンクロトロン放射の観測

欠点

- 太陽専用望遠鏡ではない。
- 狹視野($60''\phi$ @100GHz+Single-Pointing)
- 較正源観測による太陽観測中断
- 多波長同時観測(>幅20GHz)
 - いち観測いちBand
- (Radio loudな)フレア時における受信機の非線形性
- ライン検出は高周波(>600GHz)でないと非現実的。
- 速度場情報取得に難あり。

まとめ

uvカバレッジ(アンテナ配置)が取得データの性質を決める。

- 空間分解能と画質はトレードオフ
 - 広がったアンテナ配置(高空間分解能) ⇔ コンパクトなアンテナ配置(画質向上)
- 太陽観測の場合
 - 12mアレイ, 7mアレイと単一鏡観測が同時に行われる。
 - 12mアレイの配置を組み合わせることはできない。
 - 12mアレイの配置は、低空間周波数成分をカバーするため、コンパクトな配置しか使えない
 - 最大基線長: ~500m → 1.5" @ 100GHz, 0.6" @ 239GHz

視野と時間ケーデンスはトレードオフ

- Single-Pointing : 2sec/image for 60"Ø @ 100GHz, 25"Ø @ 239GHz
- MOSAIC: 視野に依存し(1point/7sec)、最大(150points) 300" x 300" @ 100GHz, 120" x 120" @ 239GHz map / ~20min

1つの観測に対して複数の受信機(Band)は使えない。(いち観測いちBand)

Local周波数周辺の4Spwが同時観測できる。

- 太陽観測の場合(Cycle4)
 - 各Spwの中心周波数は、Band3: 93, 95, 105, 107GHz (LO: 100GHz), Band6: 230, 232, 246, 248GHz (LO: 239GHz)
 - スペクトルを出すには少し狭すぎる(14/100, 18/239)。
 - 分光は、連続光モード(TDM: 128 or 256ch/2GHz/1Spw)のみ。(高分散は太陽観測に必要ないかも。)
 - 今後利用可能受信機は増え、周波数選択ができるようになる予定。

観測時間の最初の20~25分は較正源観測に使われ、太陽観測中も10~5分に一回較正源観測(2分)が行われる。



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 and the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI). 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.