

電波干渉計入門

高橋智子

(国立天文台 アルマ・プロジェクト)

データ解析講習会用テキストの
第3章に相当 (一部2章の情報も含む)





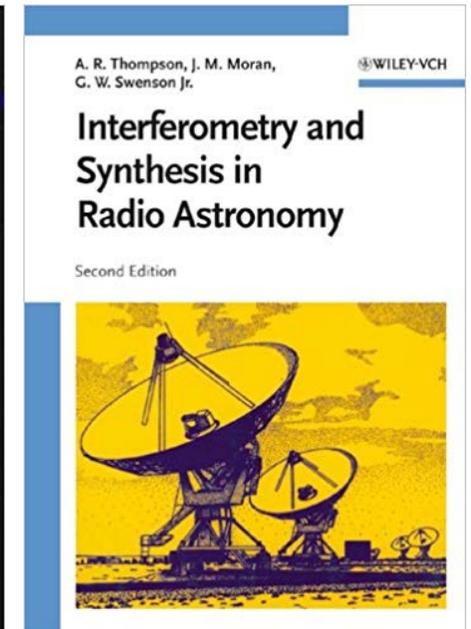
参考文献

- データ解析講習会用教科書
 - https://www2.nao.ac.jp/~eaarc/DATARED/textbook/alma_lecture_beginning_guide_20211026.pdf
- 日本評論社: シリーズ現代の天文学 第16巻
 - 宇宙の観測 II – 電波天文学
- Interferometry and synthesis in radio astronomy
 - <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-44431-4> (オープン・アクセス)

- 本日の30分の講義で全てをカバーすることは容易ではありません
- 必要に応じてデータ解析講習会や他出版の教科書で詳細を確認して下さい



日本評論社



<https://link.springer.com/>



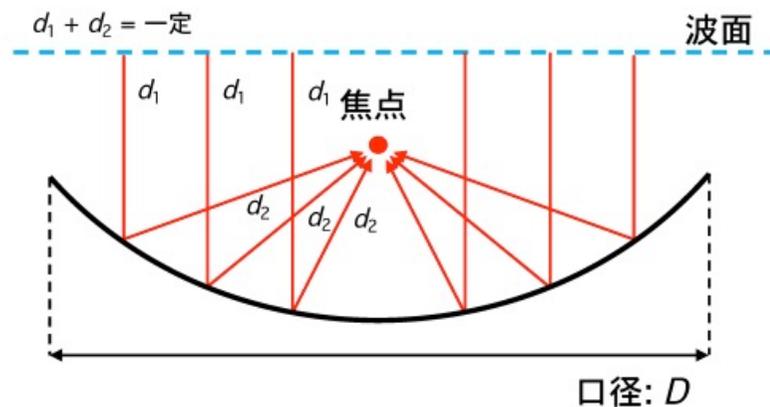


電波望遠鏡

- 多くのアンテナは回転放物面(パラボラ)を利用し、正面から入射した波面が**等位相**で焦点に集まるよう設計されている。
- 電波望遠鏡の空間分解能 (解像度) \doteq 回折限界

$$\theta \sim 1.22 \lambda / D$$

(θ : 空間分解能、 λ : 観測波長、 D : アンテナの直径)



野辺山宇宙電波観測所
45m電波望遠鏡

© NAOJ

観測周波数 20-115 GHz で運用
(波長 2.6 mm - 1.5 cm)





世界の単一電波望遠鏡

[参考] 1度 (1°) = 60分(60') = 3600秒 (3600")

FAST (中国)



© NAO/FAST

据え置き式

$D = 500 \text{ m}$

$\lambda = 10 \text{ cm} - 4 \text{ m}$

$\theta_{\text{highest}} \sim 2.5 \text{ arcsec}$

GBT (アメリカ)



© GREEN BANK OBSERVATORY

可動式

$D = 100 \text{ m}$

$\lambda = 3 \text{ mm} - 1 \text{ m}$

$\theta_{\text{highest}} \sim 3.8 \text{ arcsec}$

LMT (メキシコ)



© LARGE MILLIMETER TELESCOPE

可動式

$D = 50 \text{ m}$

$\lambda = 1.2 - 5.6 \text{ mm}$

$\theta_{\text{highest}} \sim 6 \text{ arcsec}$

野辺山 45m鏡 (日本)



© NAOJ

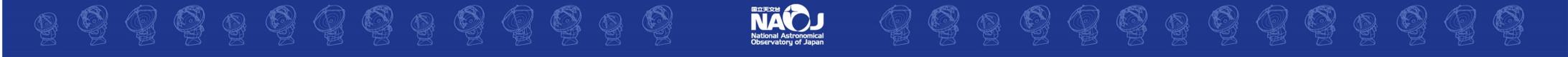
可動式

$D = 45 \text{ m}$

$\lambda = 2.6 \text{ mm} - 1.5 \text{ cm}$

$\theta_{\text{highest}} \sim 7.2 \text{ arcsec}$

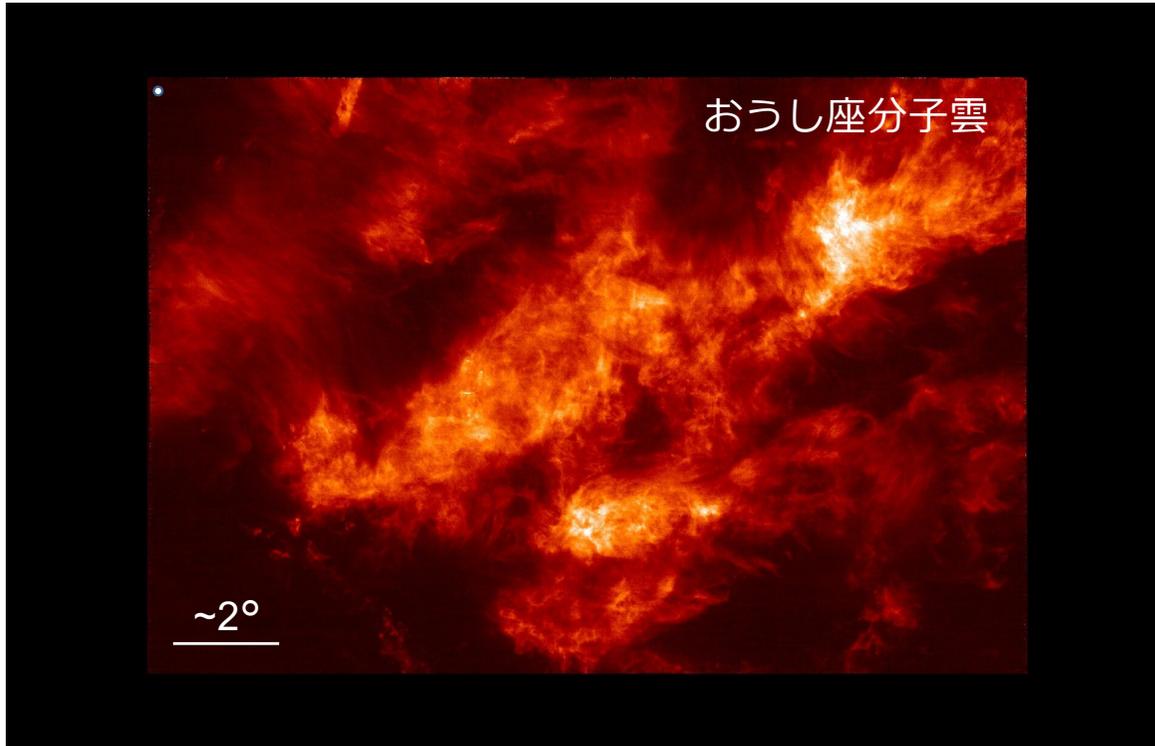
- アンテナの鏡面精度を高く保ちつつ(観測波長のおよそ1/20)、天体を追尾する能力が必要
- 可動式望遠鏡では、100m鏡が現存する中で最大





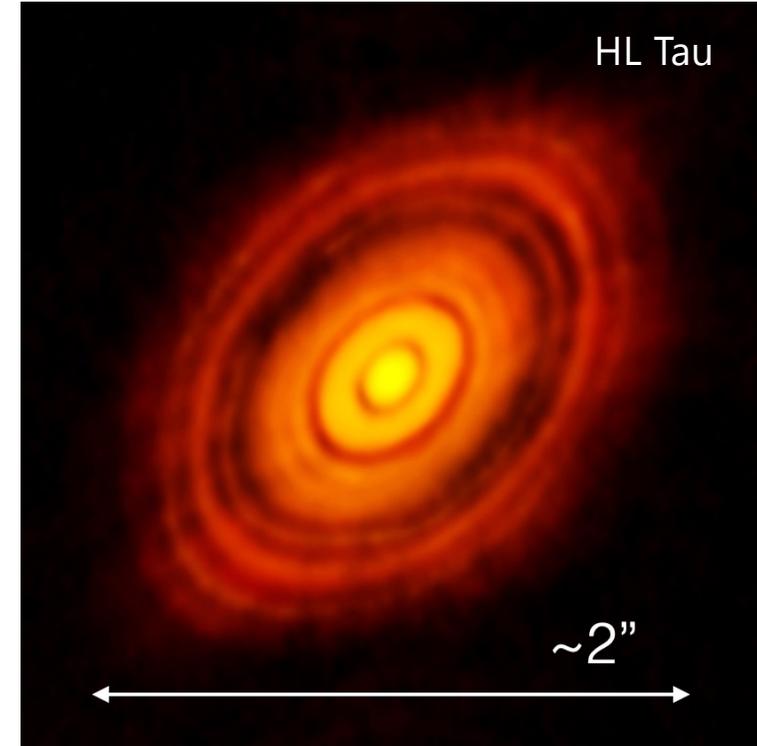
空間分解能と観測天体のサイズ比較

単一鏡(FCRAO)で得られた分子雲のイメージ

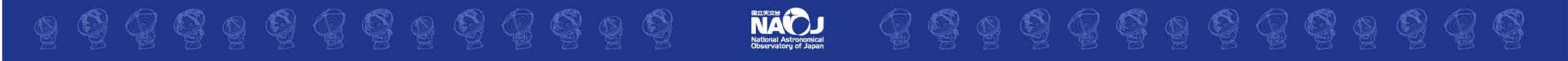


Credit: Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO),
Gopal Narayanan / Mark Heyer

アルマ望遠鏡で得られた原始惑星系円盤



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



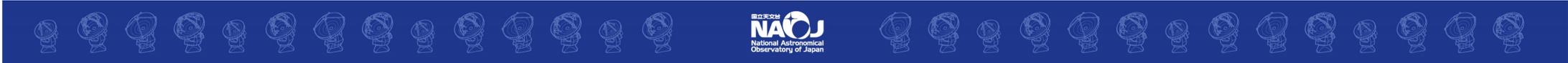
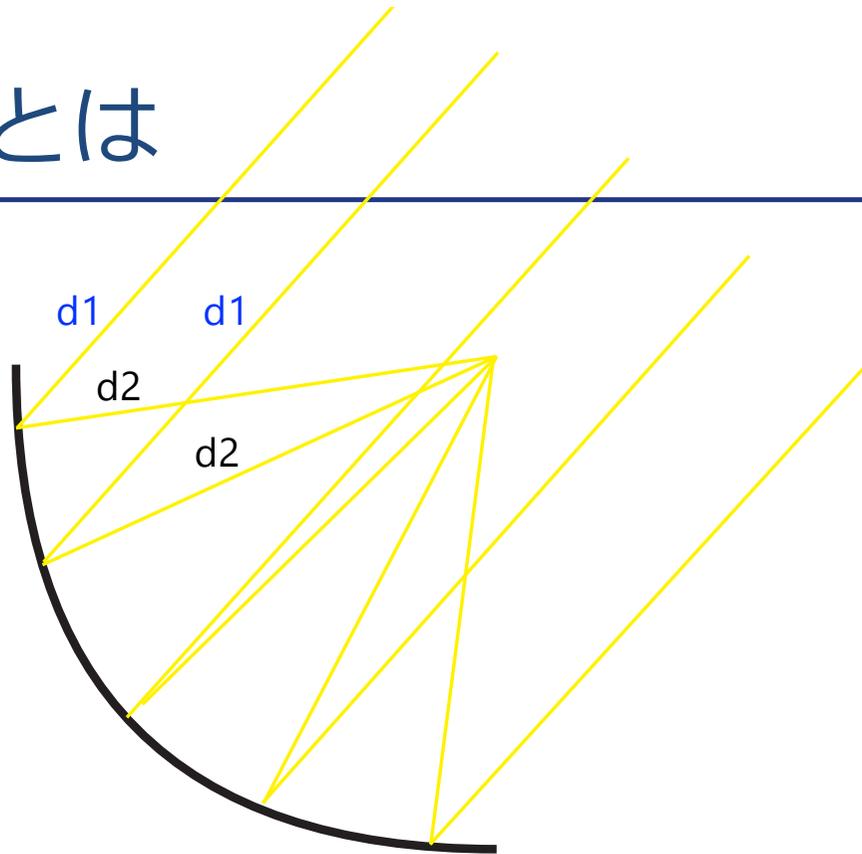


電波干渉計とは

単一鏡の焦点

〔非常に遠方にある天体の電磁波は
平面波として扱うことができる〕

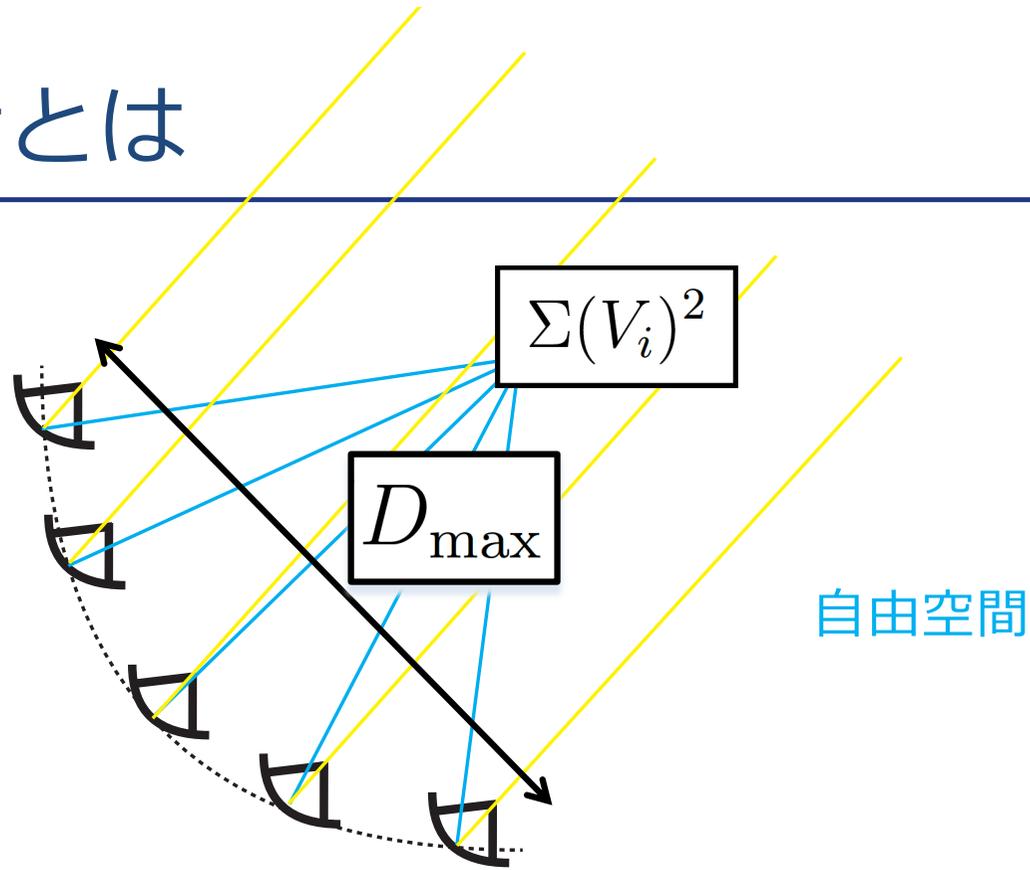
$$d1 + d2 = \text{constant}$$





電波干渉計とは

鏡を分割



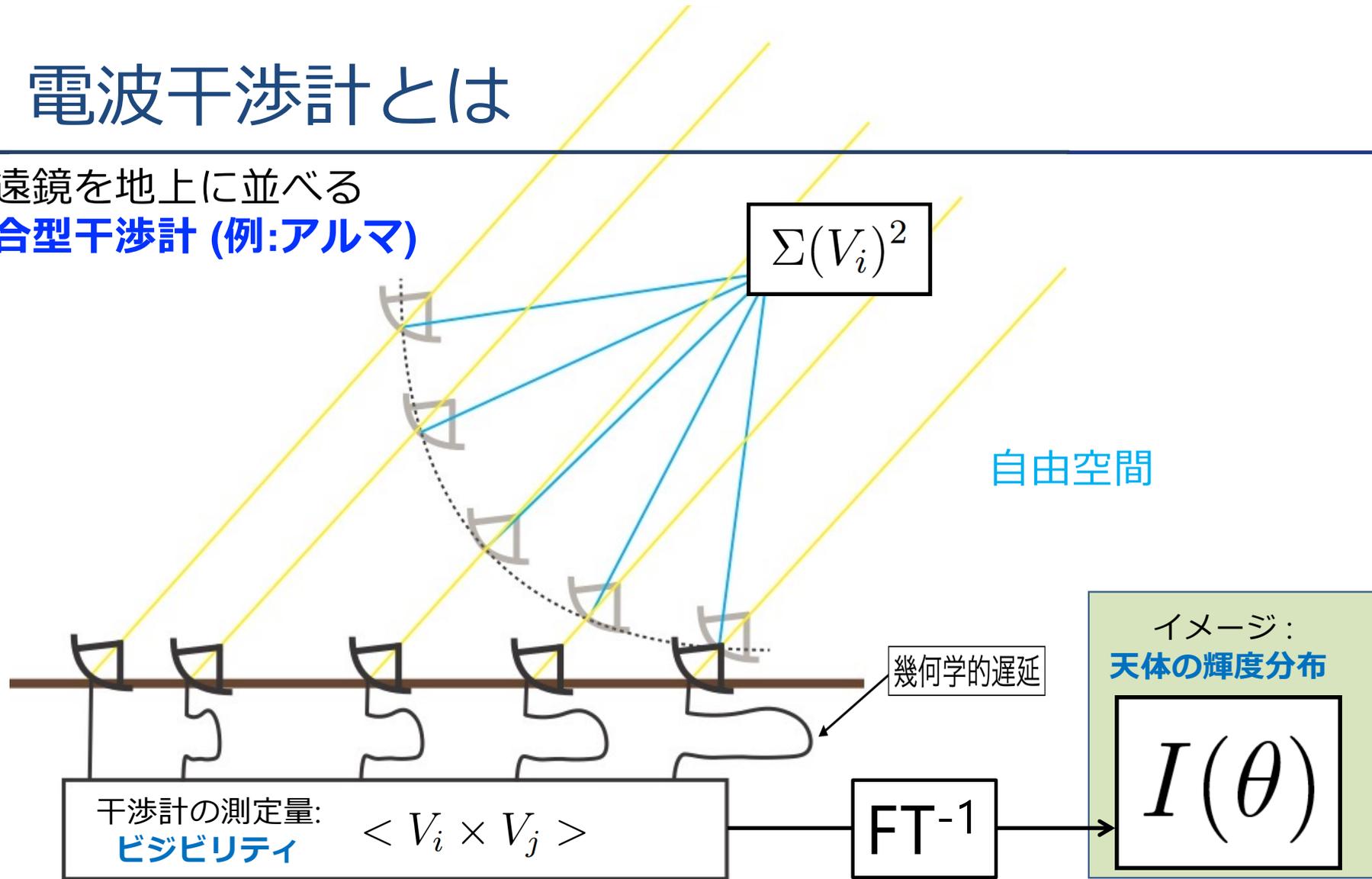
電波干渉計の空間分解能

$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\max}$$



電波干渉計とは

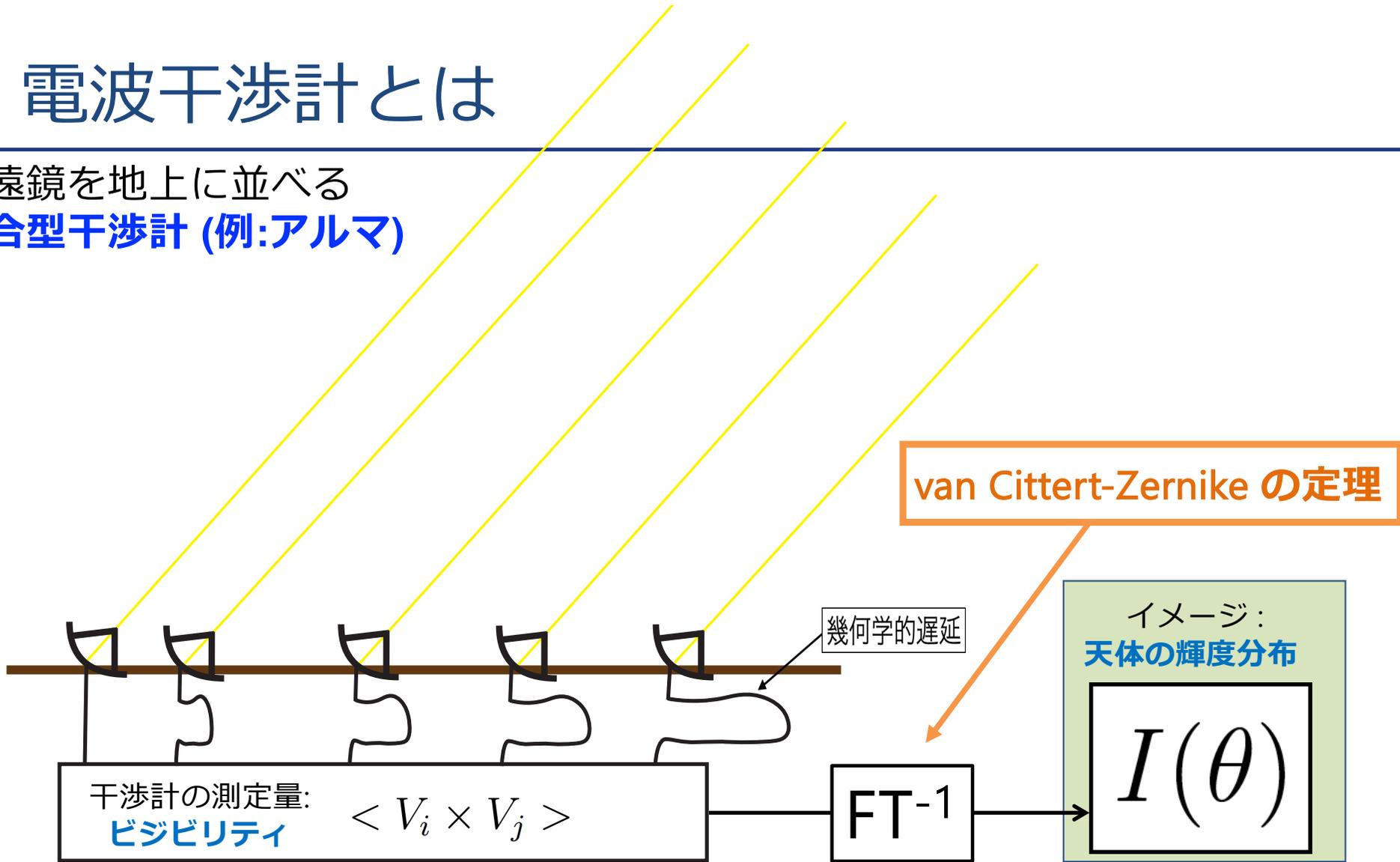
望遠鏡を地上に並べる
結合型干渉計 (例:アルマ)





電波干渉計とは

望遠鏡を地上に並べる
結合型干渉計 (例:アルマ)

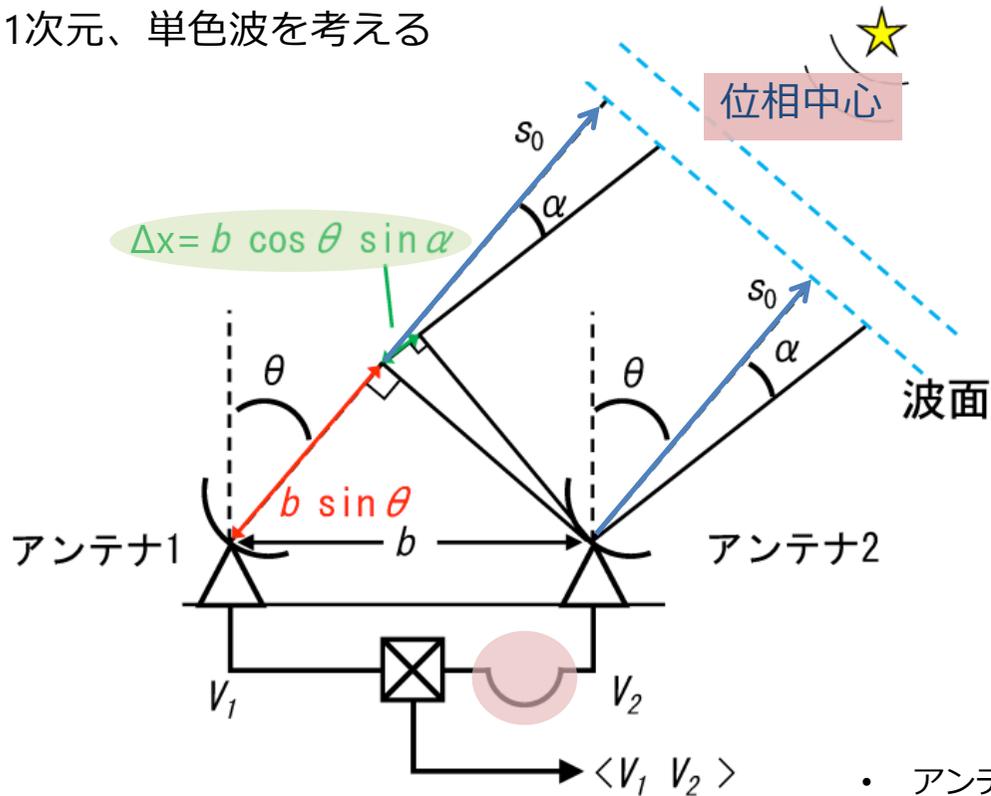


2022/7/5



結合型電波干渉計の基本原理

- 2つのアンテナで構成される干渉計
- 1次元、単色波を考える



$$V(t) = \sum_i \Delta V_i(t)$$

($\Delta V_i(t)$ 各素子アンテナの電圧)

$$\langle P \rangle \propto \langle (\sum \Delta V_i)^2 \rangle = \sum \sum \langle (\Delta V_i \Delta V_k) \rangle$$

自己相関 相互相関

$$\Rightarrow \sum \langle \Delta V_i^2 \rangle + \sum_{i \neq k} \langle \Delta V_i \Delta V_k \rangle$$

位相中心 s_0 の方向から α ($l = \sin \alpha$) ずれている信号の アンテナ2のアンテナ1に対する電圧応答

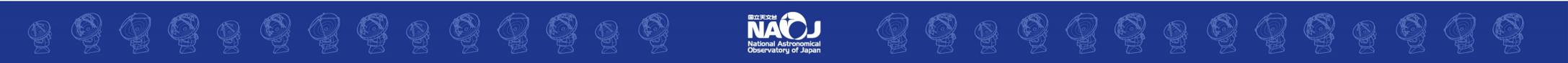
$$V_2 = V_1 \exp(2\pi i \Delta x / \lambda)$$

$$= V_1 \exp(2\pi i (ul))$$

位相差 = $2\pi \Delta x / \lambda$
= $2\pi b \cdot \cos \theta \cdot l / \lambda$

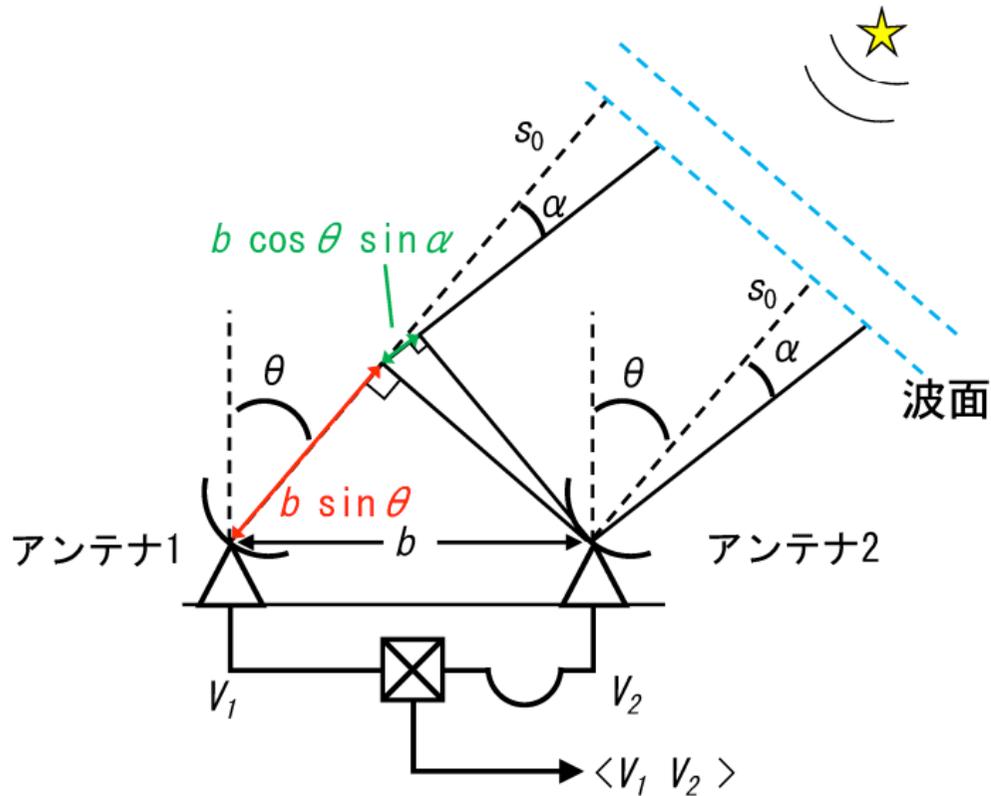
ここで $u = b \cos \theta / \lambda$
(空間周波数)

- アンテナ1とアンテナ2の干渉計出力は空間周波数 u の逆数の周期で強め合う
- 周期 $1/u$ ($= \lambda / (b \cos \theta)$) を **フリッジ間隔** という





結合型電波干渉計の基本原理



アンテナ1とアンテナ2で受信した天体信号
(2次元: $I(l, m)$) の時間平均出力

$$\begin{aligned} \langle V_1 V_2 \rangle &\equiv \mathcal{V}(u, v) \\ &= \iint I(l, m) \exp(2\pi i(ul + vm)) dl dm \\ \mathcal{V}(u, v) &: \text{ビジビリティ} \end{aligned}$$

〔受信電力は天体の強度分布 $I(l, m)$ に比例〕



van Cittert-Zernike定理

- ビジビリティと天体の輝度分布はフーリエ変換の関係にある

Fourier 空間

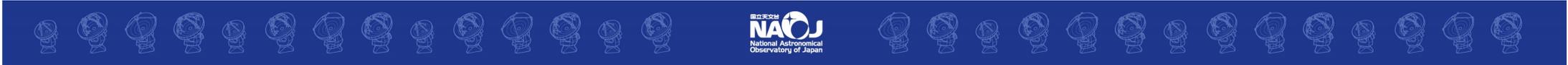
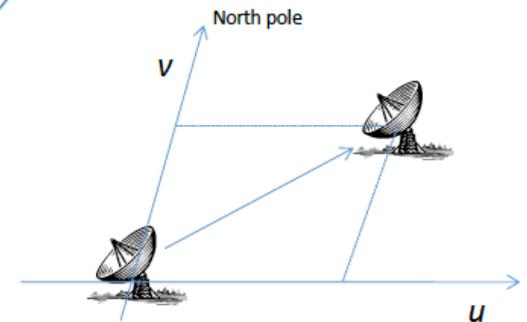
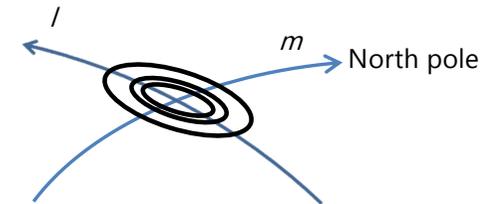
$$V(u, v) = \iint I(l, m) \exp(2\pi i(ul + vm)) dl dm$$

Image 空間

$$I(l, m) = \iint V(u, v) \exp(-2\pi i(ul + vm)) du dv$$

- イメージ空間
 - 天球の直交座標
 - l : 東-西
 - m : 北-南

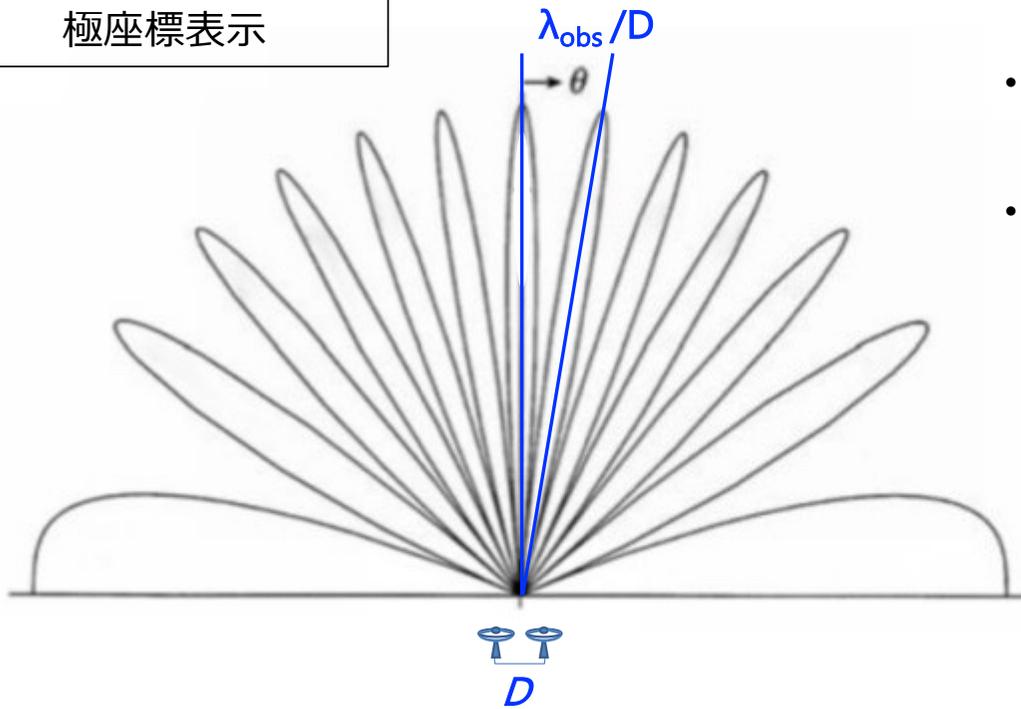
- uv 空間
 - アンテナ座標 (空間周波数)
 - u : 東-西
 - v : 北-南





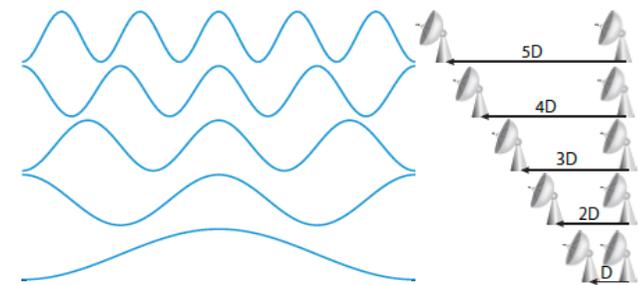
干渉縞(フリンジ) パターン

干渉計の出力パターン
極座標表示



Thompson, Moran and Swenson Jr.
Interferometry and synthesis in radio astronomy

- アンテナ間距離(基線長: D)で決まるフリンジ間隔 (λ_{obs}/D) が存在する
- アンテナが N 台あると、 $N(N-1)/2$ 通りの基線長を持つアンテナ間からのデータが取得可能
- 異なるアンテナ間距離を持つアンテナペアからのデータを集める程、より多くの空間周波数成分が取得可能
⇨ より正確な天体イメージを再現

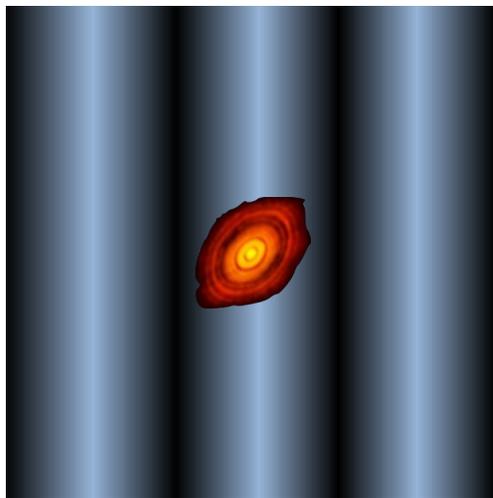




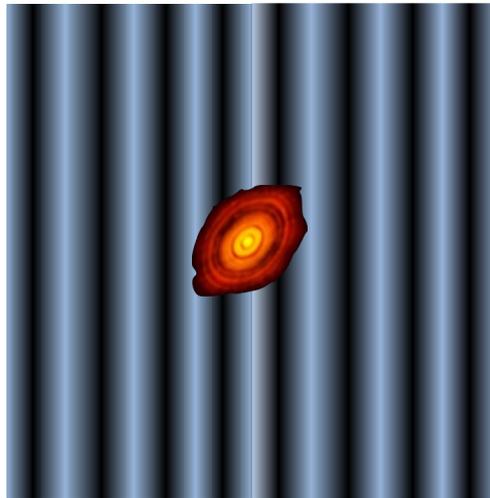
複数アンテナを用いた干渉計観測

(1) コンパクトな天体を観測してみる

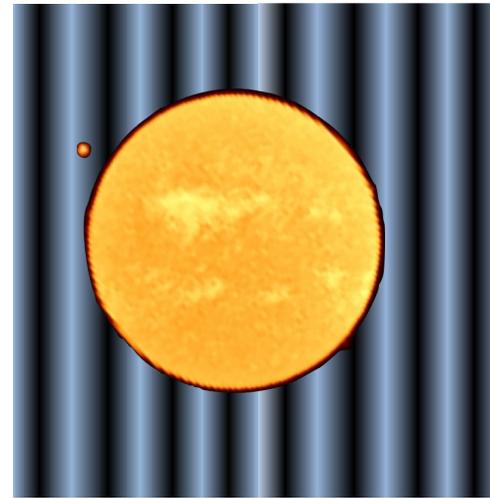
(2) 広がった天体を観測してみる



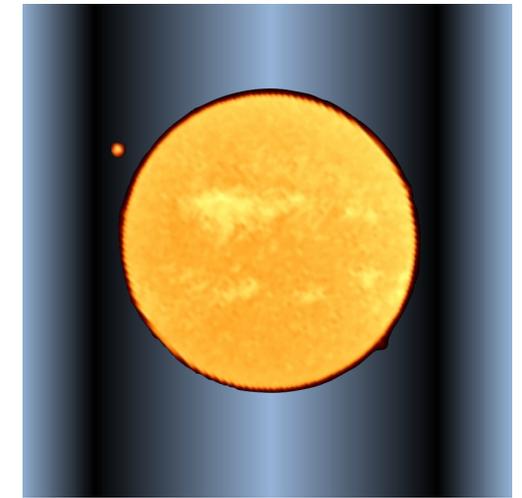
$$\lambda_{obs}/D_1$$



$$\lambda_{obs}/D_2$$



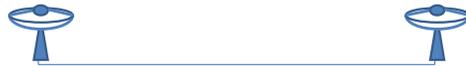
$$\lambda_{obs}/D_2$$



$$\lambda_{obs}/D_3$$



D_1



D_2



D_2



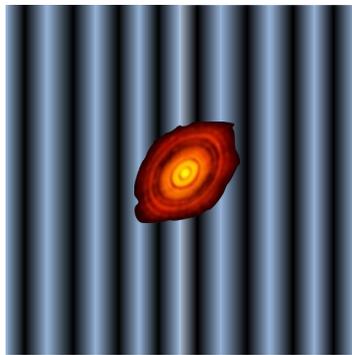
D_3





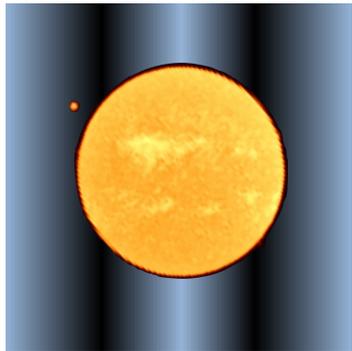
干渉計のイメージングを特徴づける3つのサイズ・スケール

(1) **イメージの空間分解能** ⇔ アンテナ間の**最大基線長**



$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{max}}$$

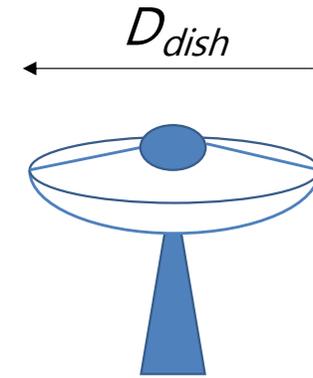
(2) **検出可能な最も広がった構造** ⇔ アンテナ間の**最小基線長**



これより広がった構造は電波干渉計では取得不可能

$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{min}}$$

(3) **電波干渉計の視野** ⇔ アンテナの**口径**



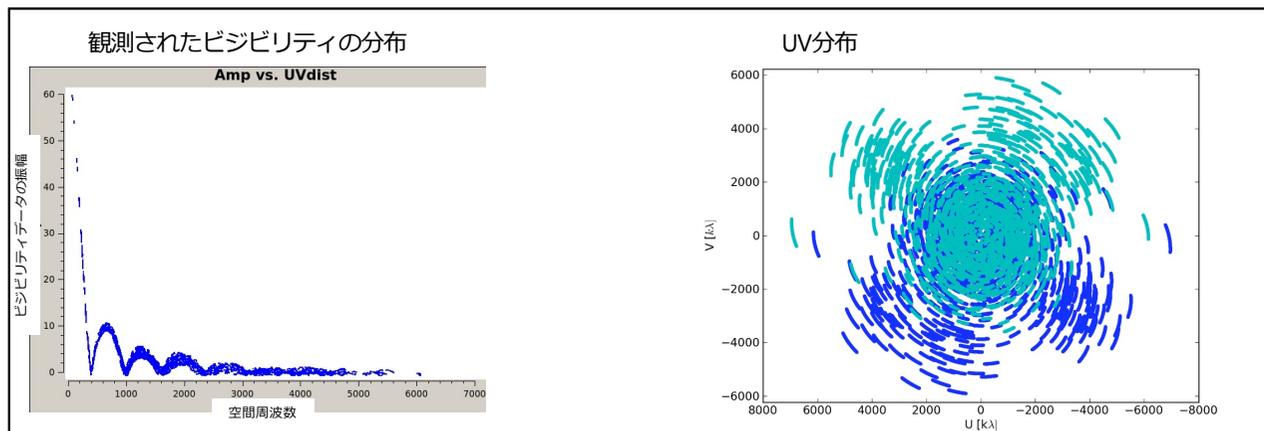
$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{dish}}$$

単一鏡の場合の空間分解能に相当

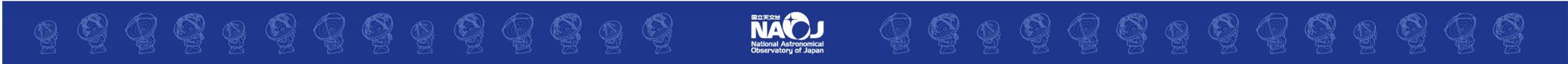
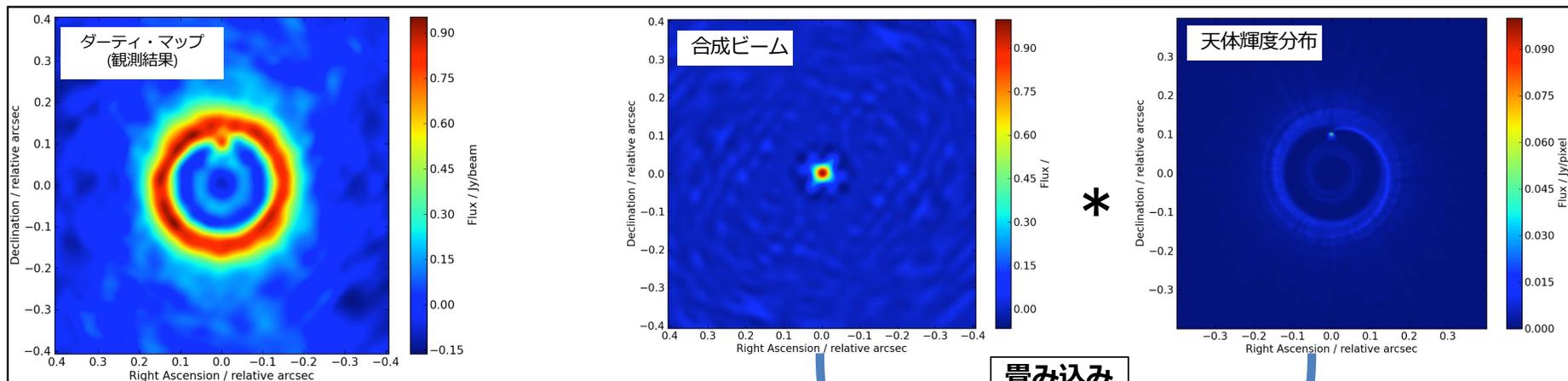


干渉計の像合成

フーリエ変換の関係



UK ARC-node により提供されている
OSTを用いてのシミュレーション
<https://almaost.jb.man.ac.uk/>
(arxiv.org/abs/1106.316)



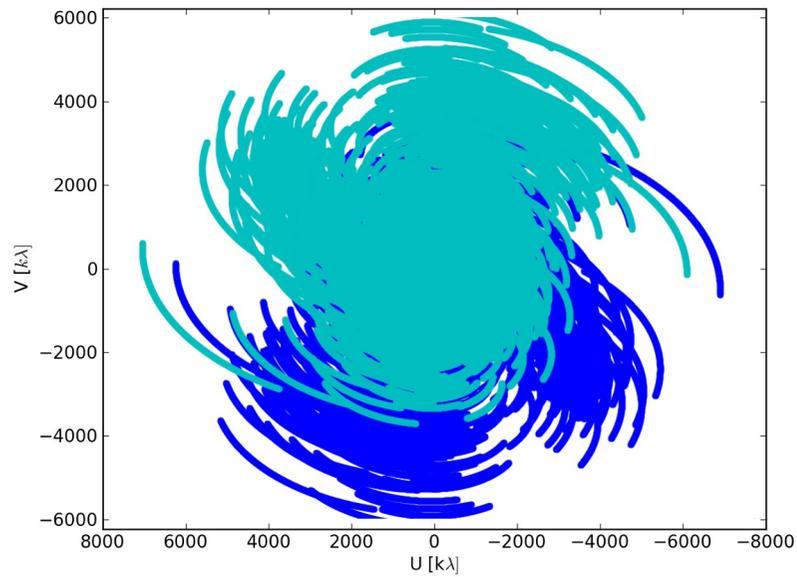


開口合成のキーポイント (まとめ 1)

- 電波望遠鏡を展開し、十分なサンプルでビジビリティ・データ $V(u,v)$ を取得することで、あたかも u_{\max} , v_{\max} のサイズを持つ巨大口径望遠鏡で観測している状況を実現する
 - アルマだと直径16kmの望遠鏡相当の分解能を達成可能
- アンテナN個で得られる相関数 = $N(N-1)/2$ 、それぞれのフリンジ間隔で観測
 - アルマの場合: $43(43-1)/2 = 903$ 基線
- UV面を埋めるため (サンプル点を増やすため) の工夫
 - 地球の回転を利用して uv のカバレッジを拡張する
 - 望遠鏡配列を変えてアンテナを展開する
 - アルマは10配列にわたり望遠鏡を展開
 - 時間変動がある天体は注意が必要

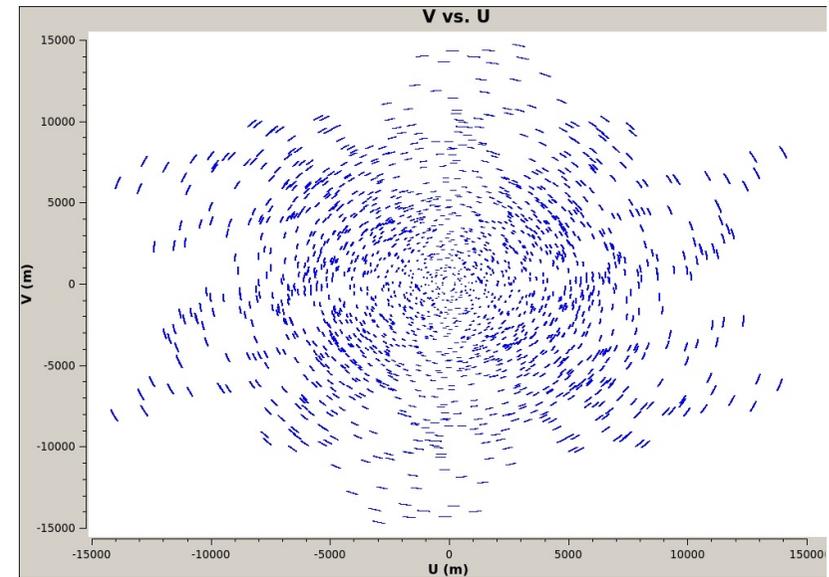


地球の回転を利用



観測時間: 10分 / 1時間 / 4時間

アンテナの配列を変える



アルマのアンテナ配列: C5 / C8 / C10





干渉計の観測のエッセンス (まとめ 2)

- ビジビリティと天体の輝度分布はフーリエ変換の関係にある

Fourier 空間

$$V(u, v) = \iint I(l, m) \exp(2\pi i(ul + vm)) dl dm$$

Image 空間

$$I(l, m) = \iint V(u, v) \exp(-2\pi i(ul + vm)) du dv$$

- 電波干渉計観測を特徴づける 3 つのサイズスケール

空間分解能

$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{max}}$$

取得可能な最大の広がり

$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{min}}$$

干渉計の視野

$$\approx \lambda_{\text{obs}} / D_{\text{dish}}$$

λ_{obs} : 観測波長、 D_{max} : 最大基線長、 D_{min} : 最小基線長、 D_{dish} : アンテナ口径

