

## 複数衛星で、集合・離脱が自由な ワイヤレス干渉計を実現する技術

川口淳一郎 (JAXA)

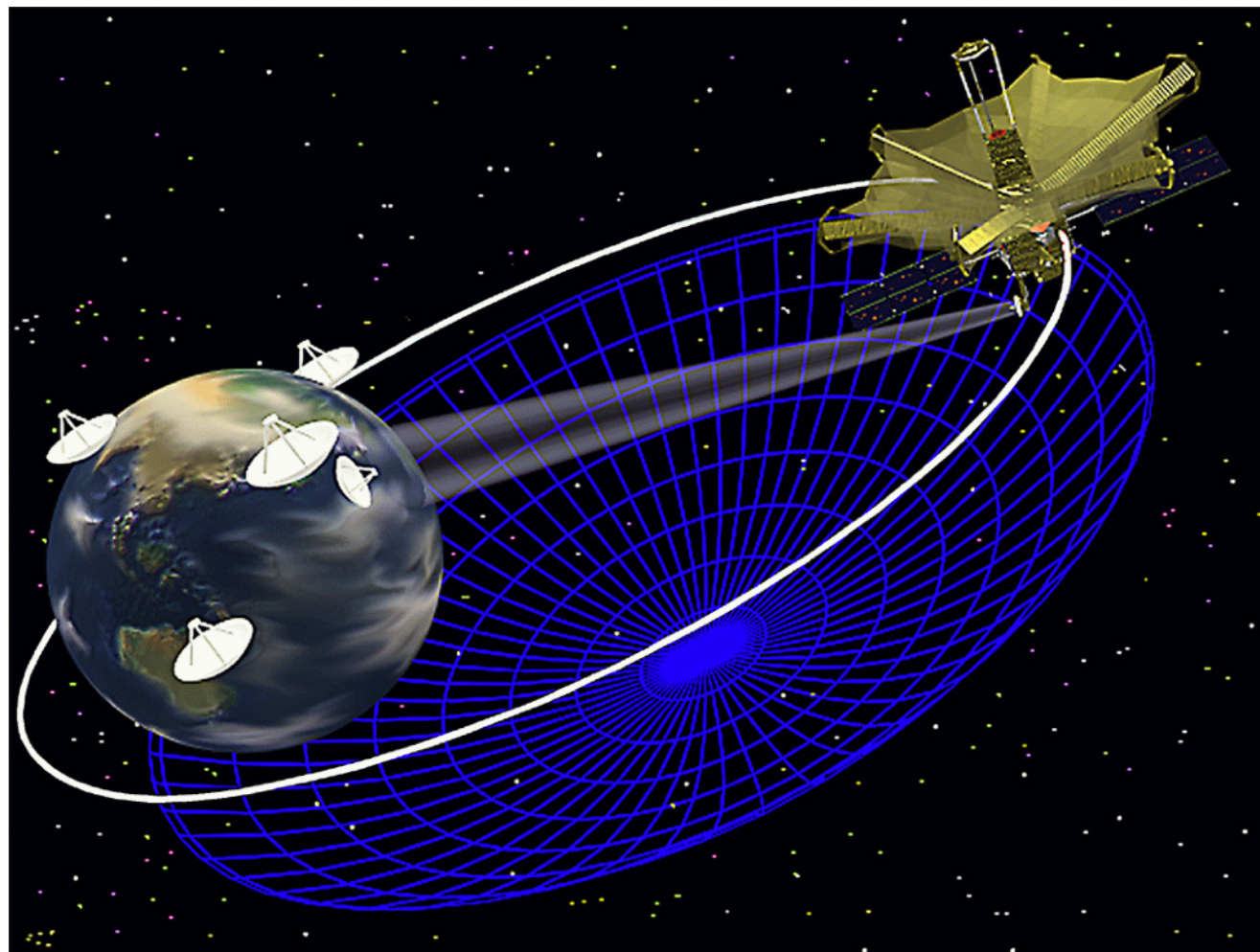
○名田悠一郎 (東大)

藤田雅大 (東大)

# 背景

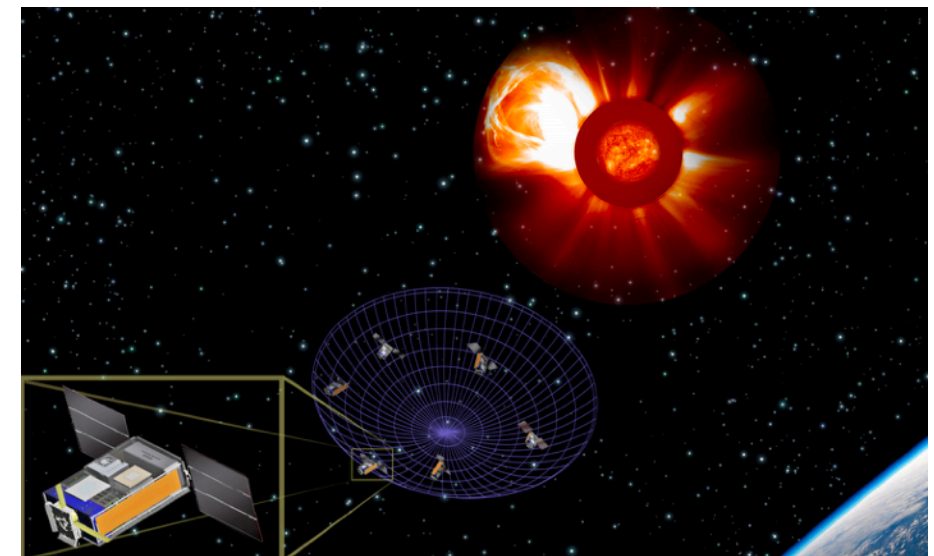
## 衛星を用いた電波干渉計ミッション

これまでに、複数衛星による電波干渉計ミッションは実現例がない。



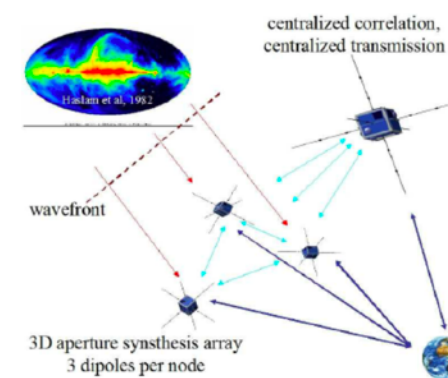
**VSOP(HALCA), ISAS, 1997**

Hirabayashi et al., 2000.



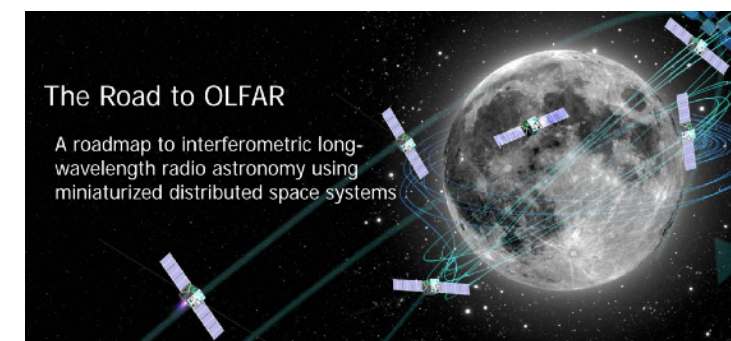
**SunRISE, NASA**

Kasper et al., 2020.



**DARIS, ESA**

Saks et al., 2010.



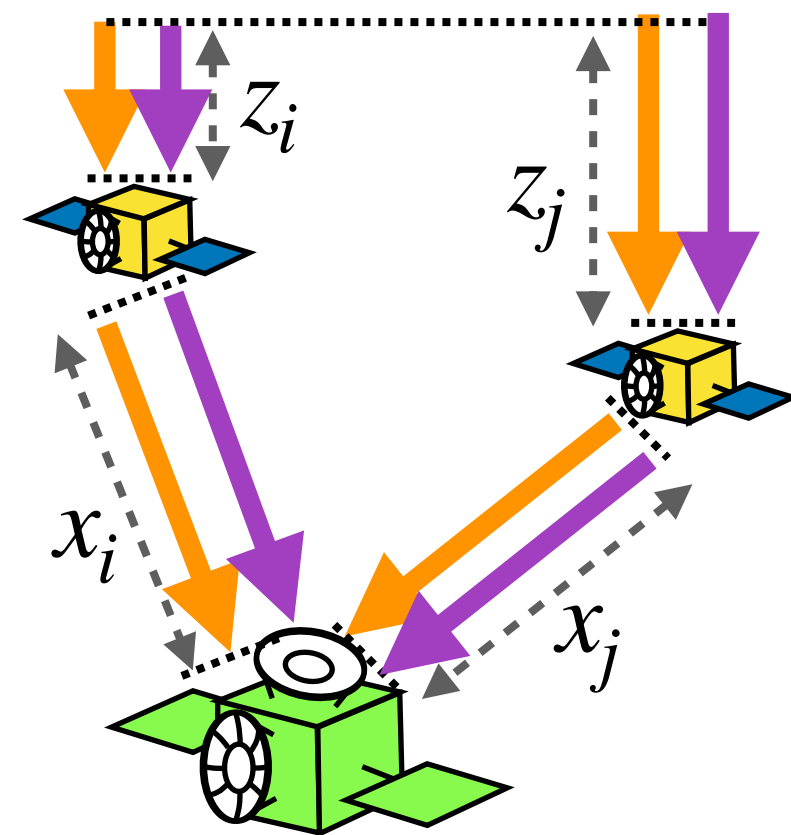
**OLFAR, Delft I. U.**

Bentum et al., 2020.

## 解決すべき問題・研究目的

## 解決すべき問題

宇宙機干渉計構築において、観測対象と子機、子機と集約点の間の**2種の距離**は、基本的に不明で**不確定性**があり、本来得たい観測位相情報を乱す要因である。子機ごとに異なるそれらをすべて把握・管理することには大きな困難さがある。



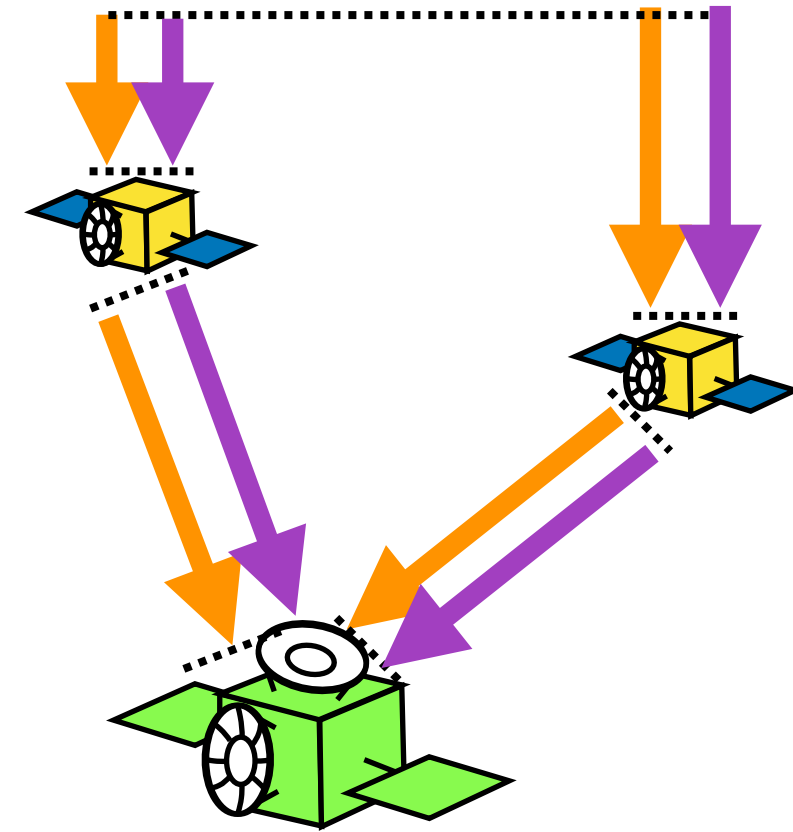
## 研究目的

複数衛星による干渉計のための  
相対距離の不確定性を補償する  
通信スキームを構築すること

## 提案手法

## ● 回線の二重化

- 子機において、**観測信号**のほかに、クェーサーや遠方にある宇宙機などから**参照信号**を受信する。
- 子機上の局所発振器で二波それぞれダウンコンバート処理を行い、**親機**へ中継する。



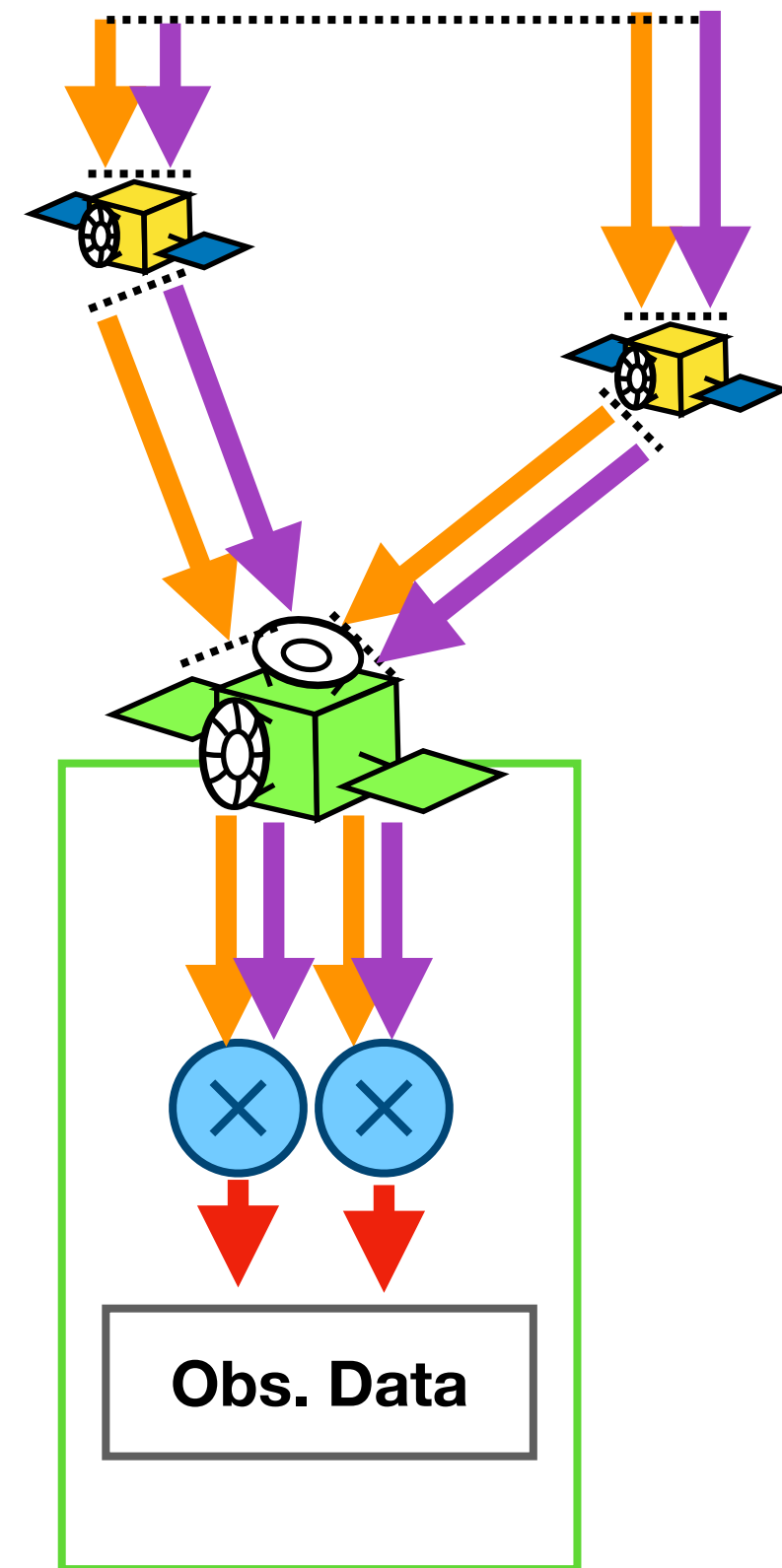
## 提案手法

## ● 回線の二重化

- 子機において、**観測信号**のほかに、クェーサーや遠方にある宇宙機などから**参照信号**を受信する。
- 子機上の局所発振器で二波それぞれダウンコンバート処理を行い、**親機**へ中継する。
- 親機において、混合処理で、子機ごとに異なる**観測情報を乱す位相変動を相殺する**。各子機で得られるはずの位相情報をすべて再生・取得する。

片方向通信・独立分散処理

= 参加や離脱が自由なシステム





## 提案手法

- 回線の二重化

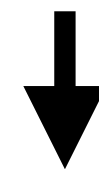
- 子機において、**観測信号**のほかに、クエーサーや遠方にある宇宙機などから**参照信号**を受信する。
- 子機上の局所発振器で二波それぞれダウンコンバート処理を行い、**親機**へ中継する。
- 親機において、混合処理で、子機ごとに異なる**観測情報を乱す位相変動を相殺する**。各子機で得られるはずの位相情報をすべて再生・取得する。

- 信号強度分布の推定

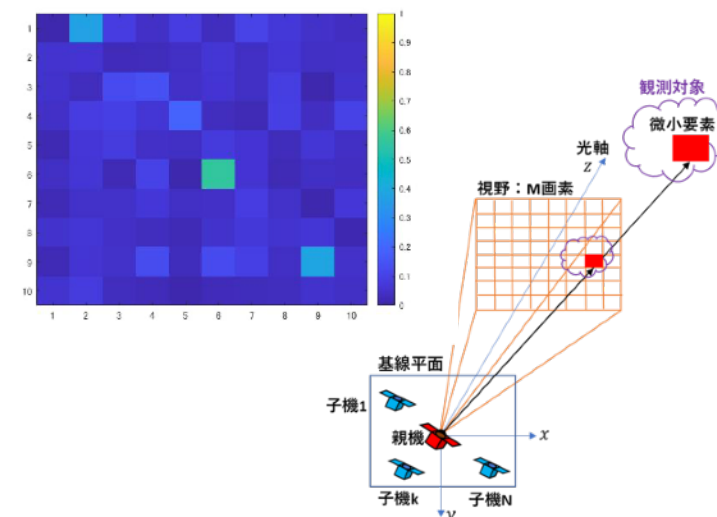
- 受信位相情報と信号強度分布との関係を線形化。
- **受信位相情報のみ**で、**信号強度分布を推定**する。

Obs. Data

$$F = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]^T$$

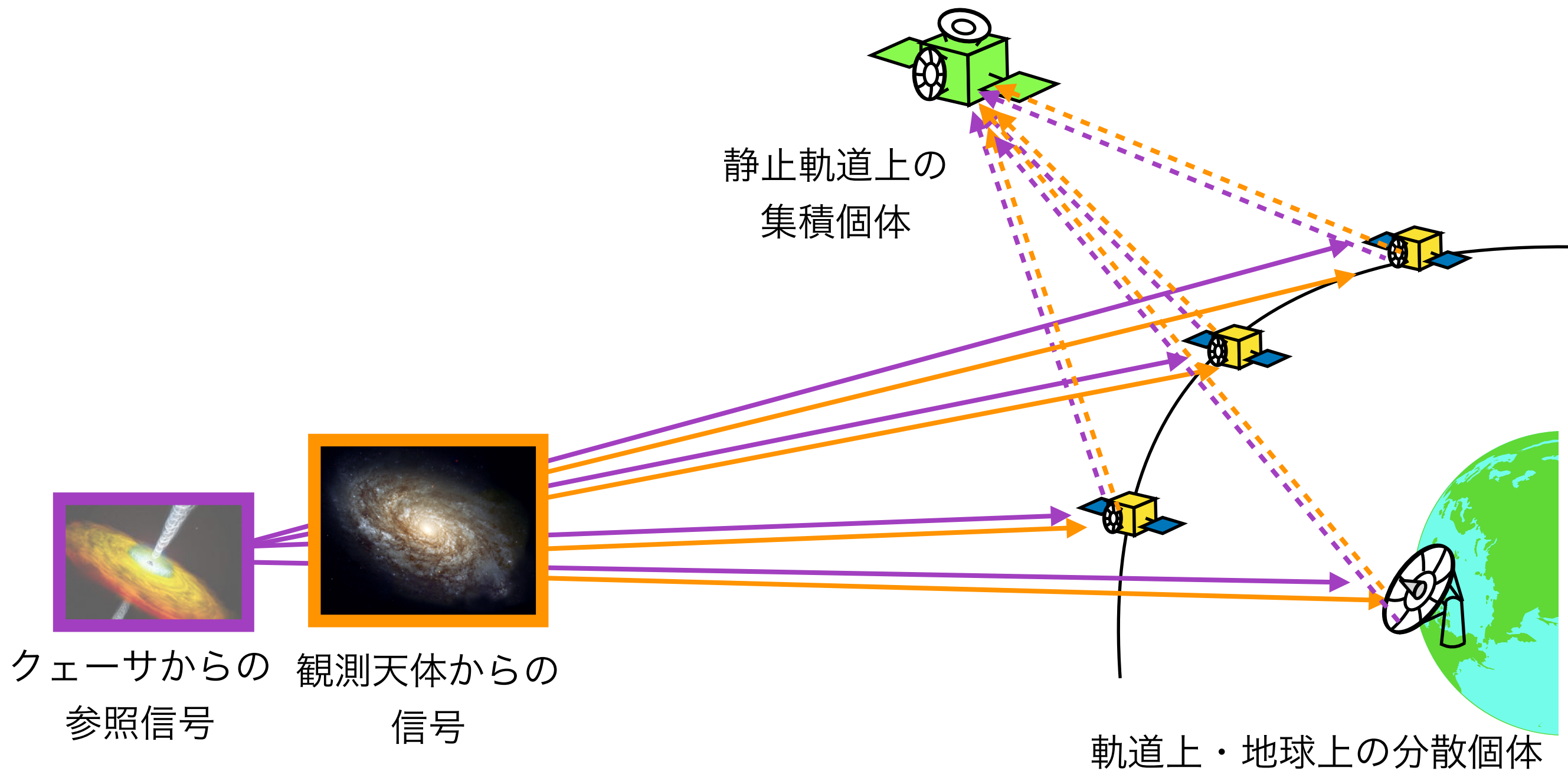


$$F = SG\mu$$



## 具体的な応用の一例

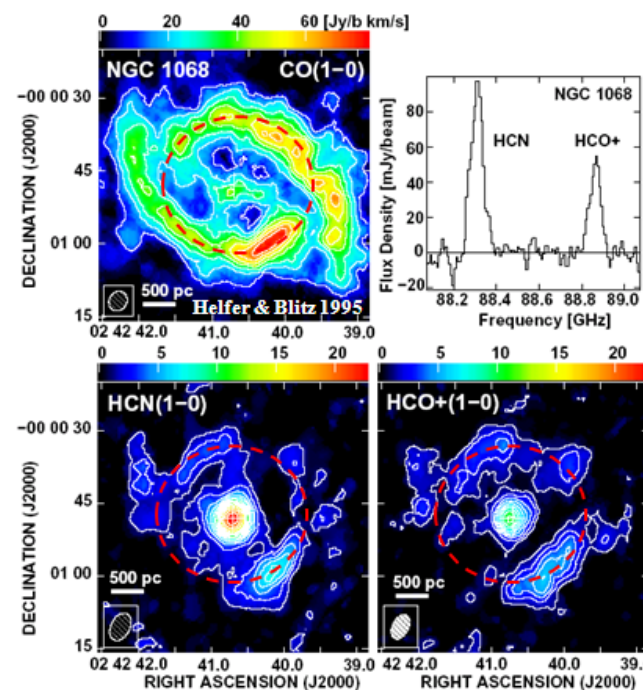
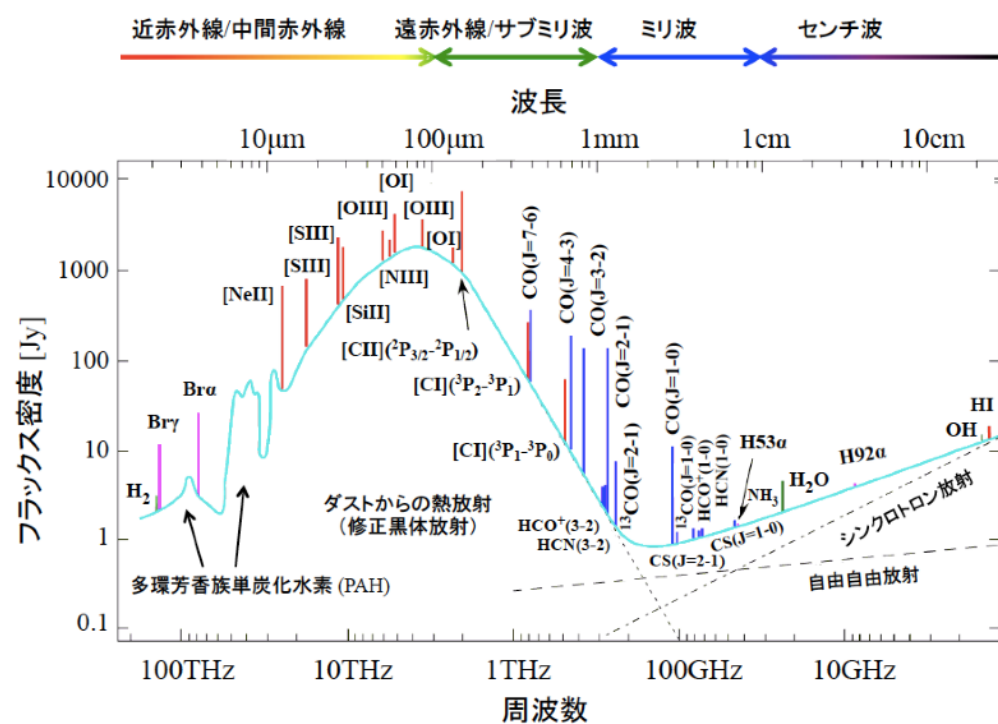
### 観測天体の信号を、静止軌道上の集積個体に集積するケース



# 参照信号に用いる電波天体について

受信電力に関する簡易な概算

	輝線 信号強度	帯域	アンテナ 面積	アンテナ 開口効率	LNA 雑音温度	積分時間	元の 信号強度	積分後 受信電力	S/N
Stardust 銀河	200mJy	100MHz	100m <sup>2</sup>	0.5	15K	1 sec	$1.00 \times 10^{-17}$ W	$2.07 \times 10^{-18}$ W	~5
	1Jy	200MHz	1m <sup>2</sup>	0.5	15K	100 sec	$1.00 \times 10^{-18}$ W	$3.00 \times 10^{-19}$ W	~3
NGC1068	100m	200MHz	-	-	10K	3600 sec	$1.00 \times 10^{-19}$ W	$3.00 \times 10^{-20}$ W	3



河野孝太郎, ミリ波サブミリ波天文学への招待 (Web)

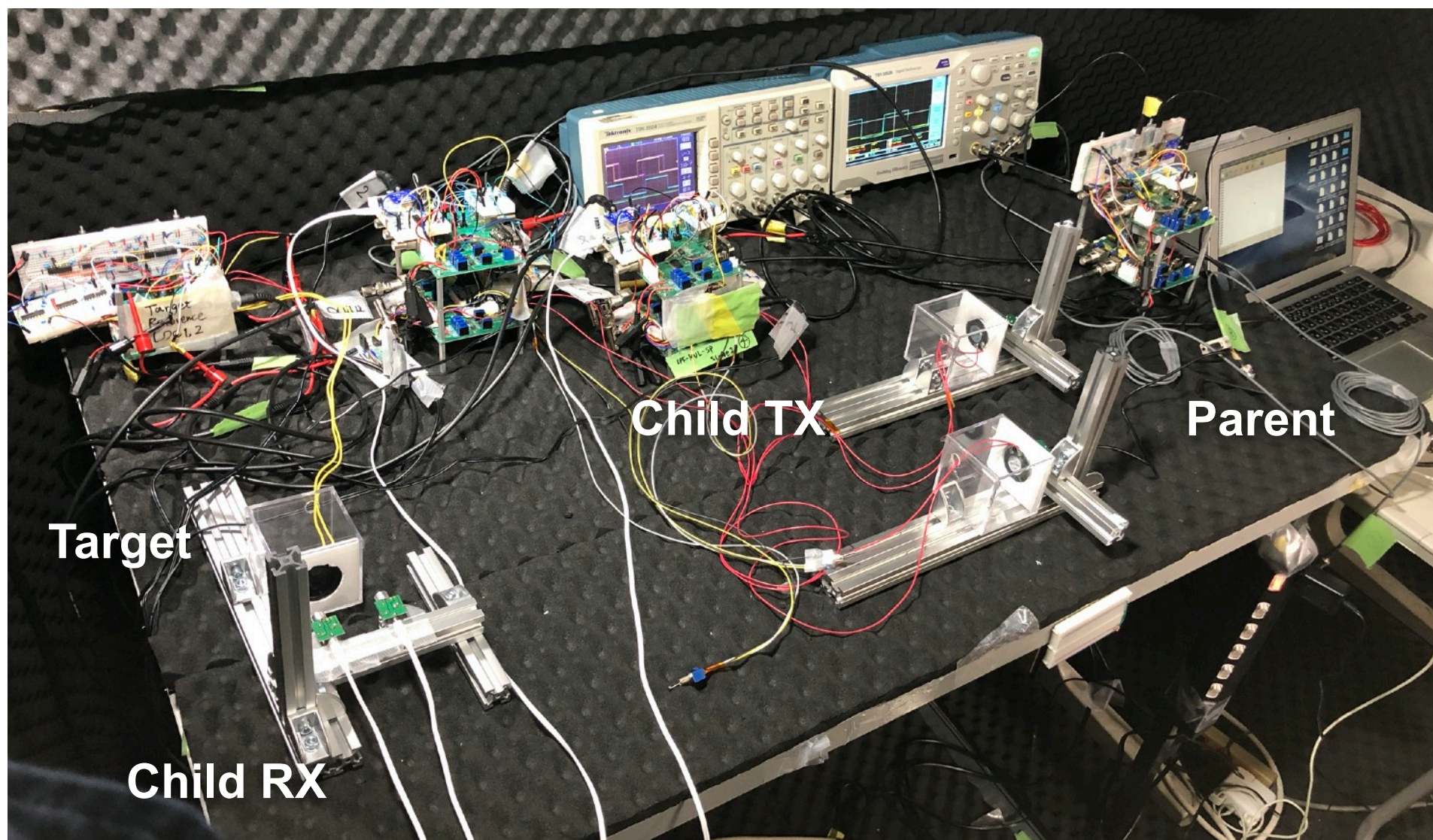
Stardust銀河などからの信号を用いて、位相同期することが可能。



## 実験目的・実験系

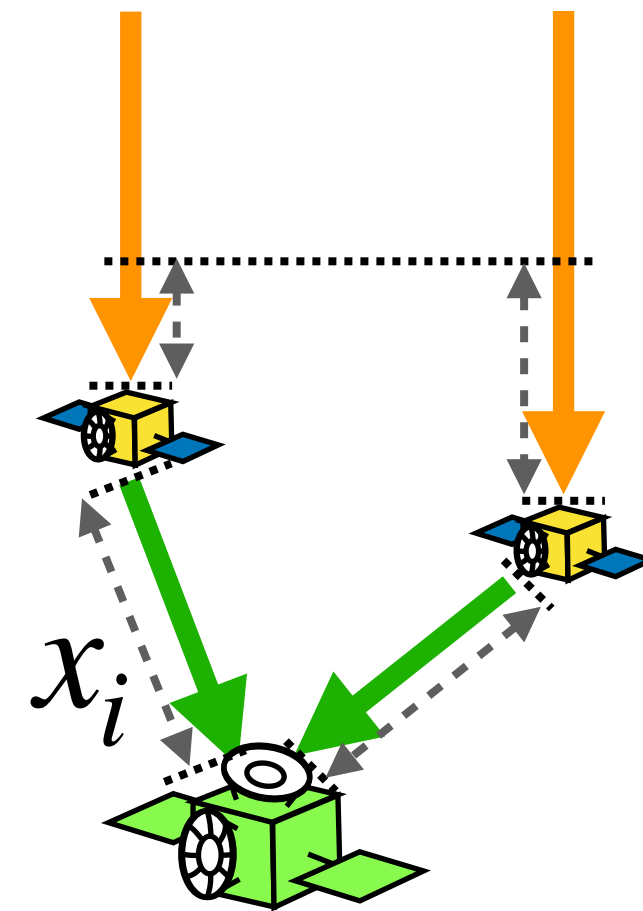
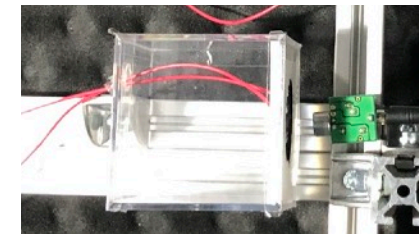
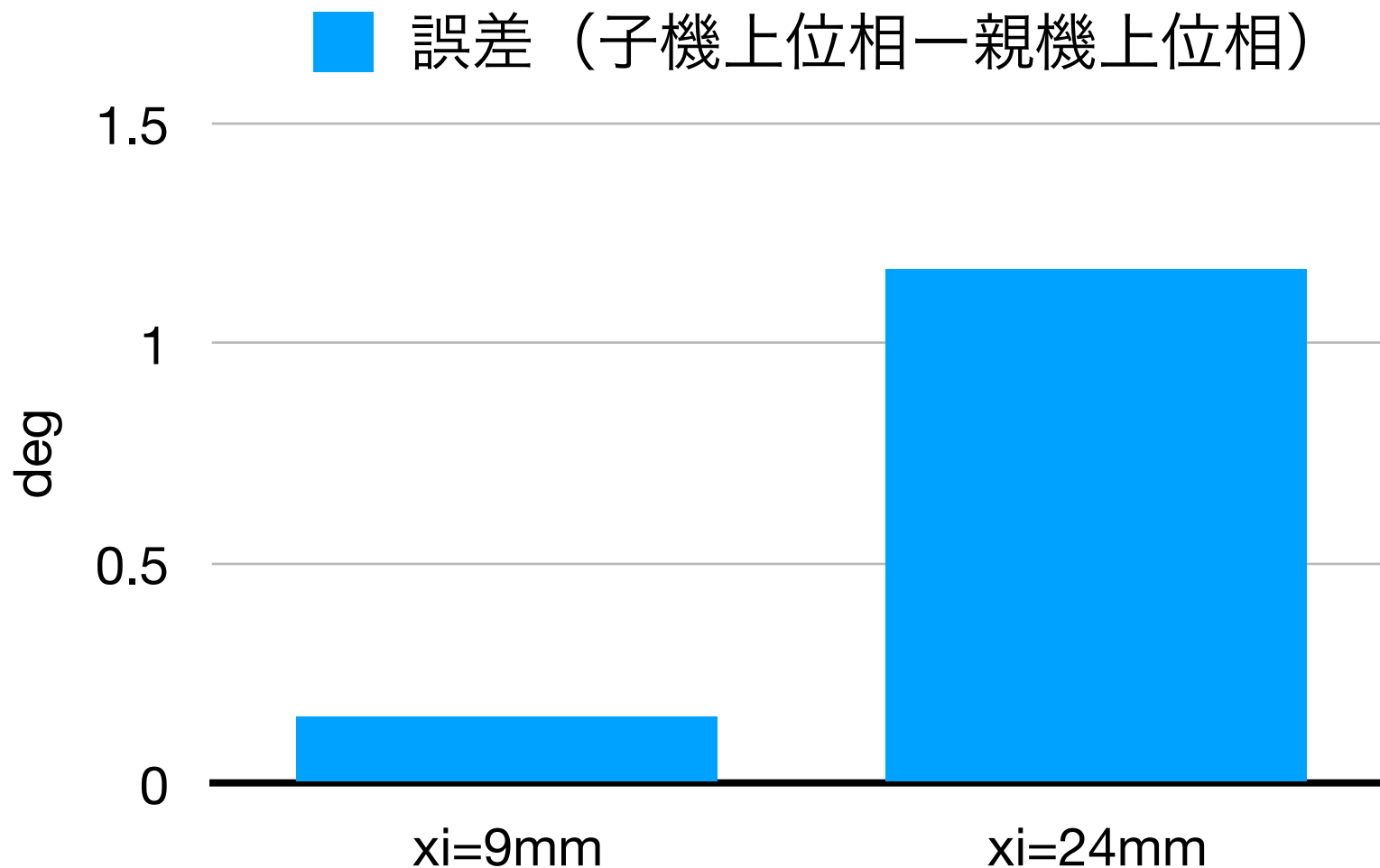
- 音波の伝播のもと、提案手法の原理を検証する。
  - 位相保存性（子機で得られるはずの情報を親機で再生する）

※スピーカー・マイク間の距離が近いが本質的に問題でない。



## 位相保存性

：子機での位相情報を親機で再生できるか（位相保存性）



子機－親機間の距離  $x_i$  を変えて2ケース実施

各子機と親機間の距離にかかわらず、  
1.5 deg以内の精度で位相情報を再生できた。

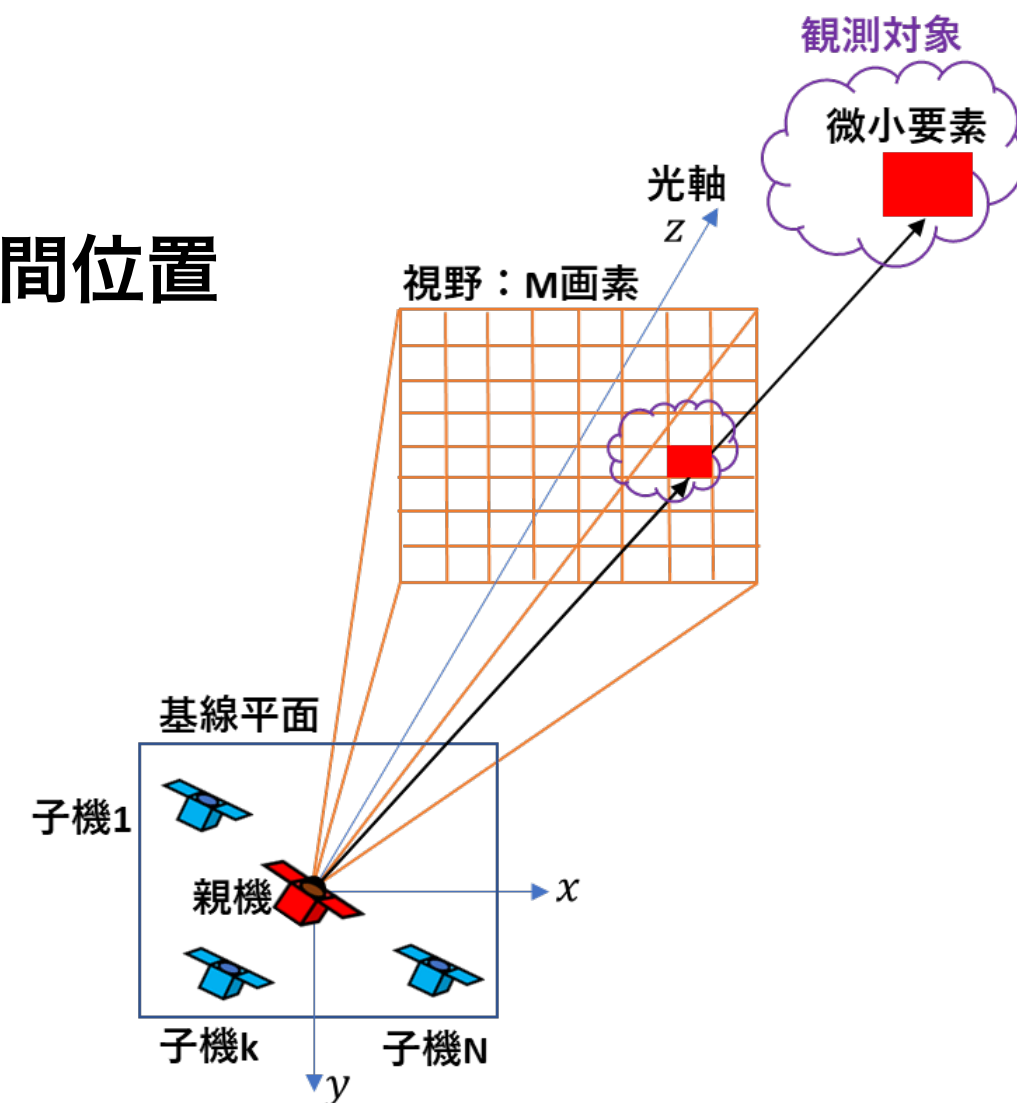


## 信号強度分布の推定手法

- 受信位相情報と推定すべき信号強度分布の関係を線形化

$$F = SG\mu \quad s.t. \quad \|\mu\|_2 = 1$$

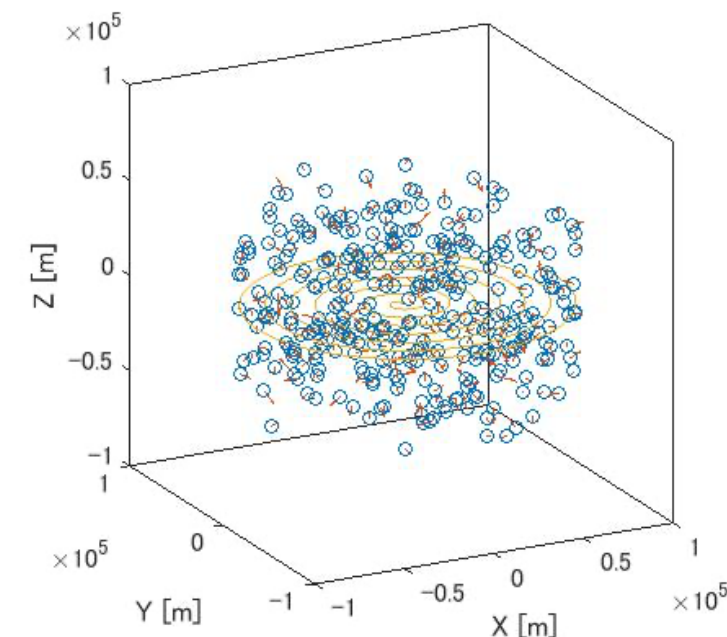
- ✓  $F$  : 受信位相情報に関するベクトル
  - ✓  $S$  : 共通な位相バイアスの行列
  - ✓  $G$  : 子機と観測対象の微小要素の空間位置に関するジオメトリ行列
  - ✓  $\mu$  : 信号強度分布に関するベクトル
- 要求分解能から対象面をメッシュ化
  - 解が無数に存在。
  - 逐次二次計画法 (SQP) で最適化。



## 信号強度分布の推定手法

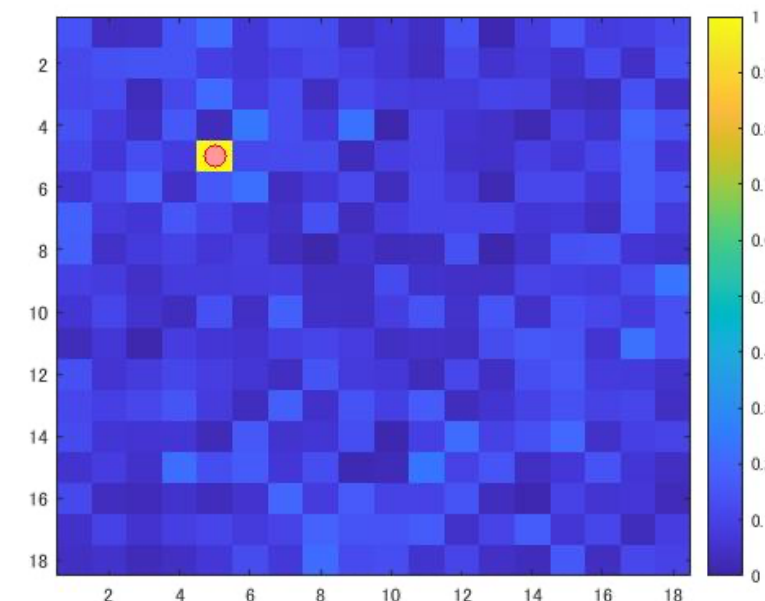
### ➤ 一つの点源での推定

視野	メッシュ	18x18
	視野角	0.1deg. x 0.1deg.
観測対象	周波数	10 MHz
	信号源点数	1
	光軸方向距離	100 AU
子機	最大基線長	200 km x 200 km
	子機数	324



子機位置

- 点源推定が可能であった.
- 子機の基線平面上の位置のみが把握できていれば推定可能である. 光軸方向の位置が不明であっても問題ない.
- 推定側の把握する子機の位置情報が, 最大基線長の5%程度の誤差を含んでいても, 推定可能である.



修正後の推定結果

## 信号強度分布の推定手法

### ➤ 線形近似を用いた手法

-> 解像度以上の観測数が必要

### ➤ スパースモデリング

- ブラックホールの直接撮像でも利用されている手法

✓ 推定対象の解の非零成分が少ないと仮定できる場合（天体画像など），観測数が少なくても解を推定することが可能。

- LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operators)

$$\boldsymbol{\mu} = \underset{\boldsymbol{\mu}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| \boldsymbol{F} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu} \right\|_2^2 + \lambda_1 \left\| \boldsymbol{\mu} \right\|_1 \right\} \quad s.t. \quad \left\| \boldsymbol{\mu} \right\|_2 = 1$$

✓  $\left\| \boldsymbol{F} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{G}\boldsymbol{\mu} \right\|_2^2$ : 適合度

✓  $\left\| \boldsymbol{\mu} \right\|_1 = \left| \mu_1 \right| + \left| \mu_2 \right| + \dots + \left| \mu_n \right|$ : L1ノルム

✓  $\lambda_1$ : 正規化パラメータ



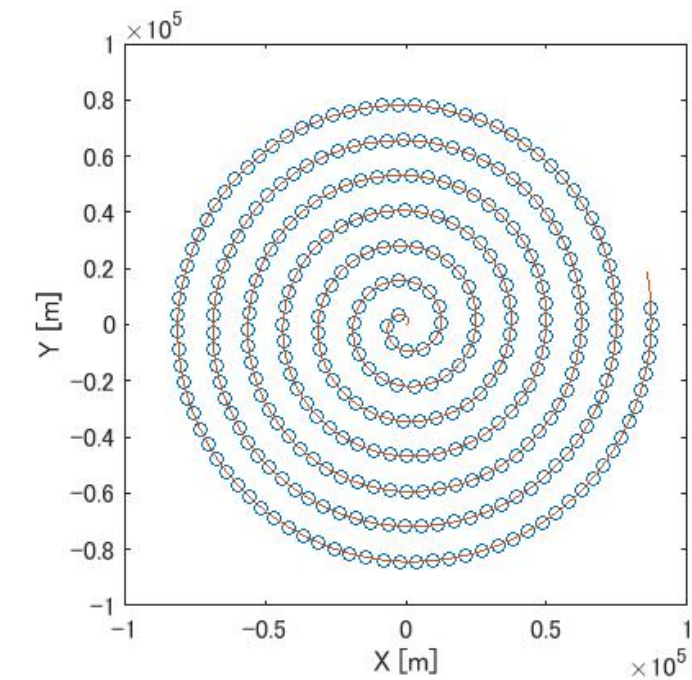
ブラックホールの直接撮像  
(EHT Collaboration)



# 信号強度分布の推定手法：高分解能化

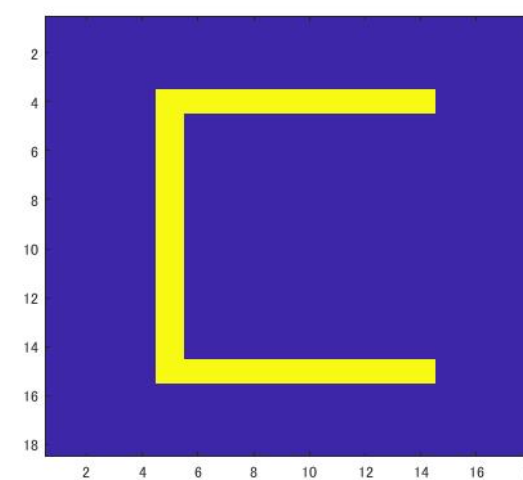
## ➤ LASSOによる推定結果

視野	メッシュ	18x18
	視野角	0.1deg. x 0.1deg.
観測対象	周波数	10 MHz
	信号源点数	1
	光軸方向距離	100 AU
子機	最大基線長	200 km x 200 km
	子機数	324

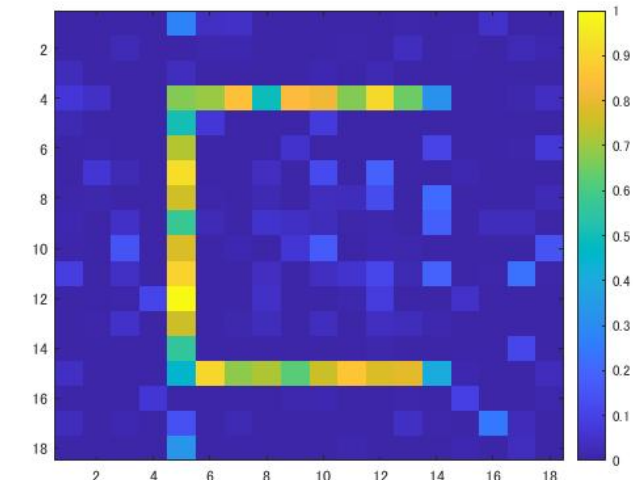


子機位置

LASSOによりノイズが除去された



真の分布



推定結果

**Problem**

宇宙機群による干渉計実現の課題：  
2種の相対距離の不確定性

**Method**

参照信号を用いた回線の二重化と  
混合処理による子機ごとに異なる位相差の相殺  
受信位相情報のみで、信号強度分布を推定（画像化）

**Result**

音波実験による原理確認の試験を実施  
位相保存性を確認  
信号強度分布推定シミュレーションの実施  
位相情報から強度分布を復元することができた。

**Conclusion**

提案手法による干渉観測システムの  
一定程度の実現性・有効性を確認した。

ありがとうございました