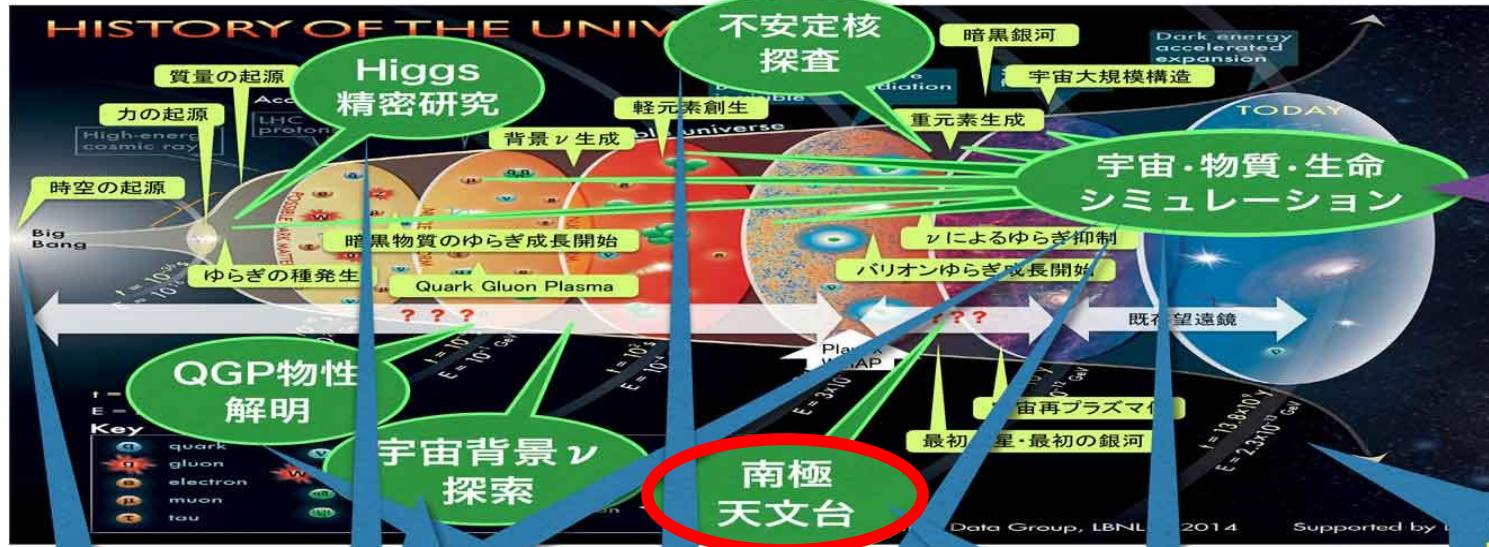


# 南極テラヘルツ干渉計に向けた開発

## Development for Antarctic THz Interferometry

宇宙観測研究室 D1 小関知宏

共同研究者: 松尾宏(国立天文台)、江澤元(国立天文台)、  
丹羽綾子(筑波大学)



計算科学  
研究センター

## 素粒子構造 研究部門

質量の起源であるヒッグス粒子の精査、新粒子探索／宇宙年齢数秒からの宇宙背景ニュートリノの発見に向けたロケット・衛星実験／超弦理論による時空の起源の解明

## クォーク・核物質 研究部門

宇宙初期や中性子星内部のクォーク・グルーオン・プラズマを探求／不安定核の質量測定による重元素の起源とRプロセスの解明

## 南極天文学 研究部門

南極天文学による暗黒銀河探索／銀河、銀河系、宇宙構造の観測的研究／宇宙の構造と進化、生命の起源に至る物質進化の理論的研究

## 光量子計測器 開発部門

TIA-ACCELERATEと協働し、超伝導検出器・光量子計測器を開発

エネルギー物質科学  
研究センター  
TIA-ACCELERATE



# 電波天文における観測



出典:NASA



Ishii et al. (2014)

天体による電磁波の放射  
原子 or 分子のエネルギー構造

- 分子雲の場合
- ✓ 分子の振動・回転
- ✓ 黒体放射
- ✓ 準位間の遷移
- ✓ ゼーマン効果等

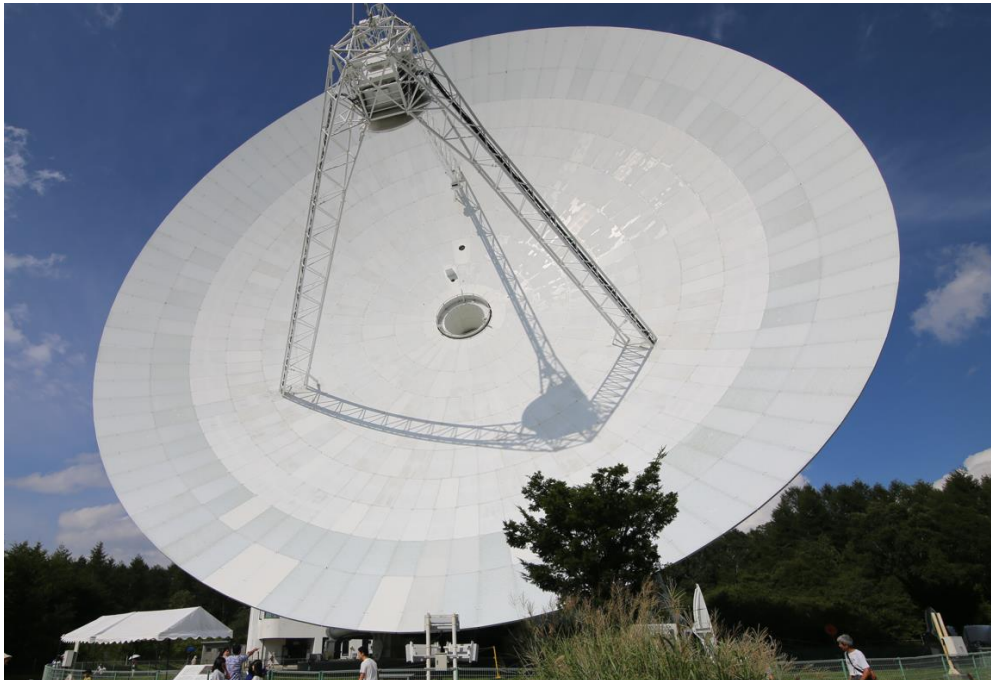
輝線・連続波の観測

星や銀河誕生の仕組みを探る  
星、銀河の進化の過程を探る

# 電波天文における観測

## 単一鏡

### 野辺山45m望遠鏡



## 干渉計

ALMA(口径12m × 54台、口径7m × 12台)

Credit: X-CAM / ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



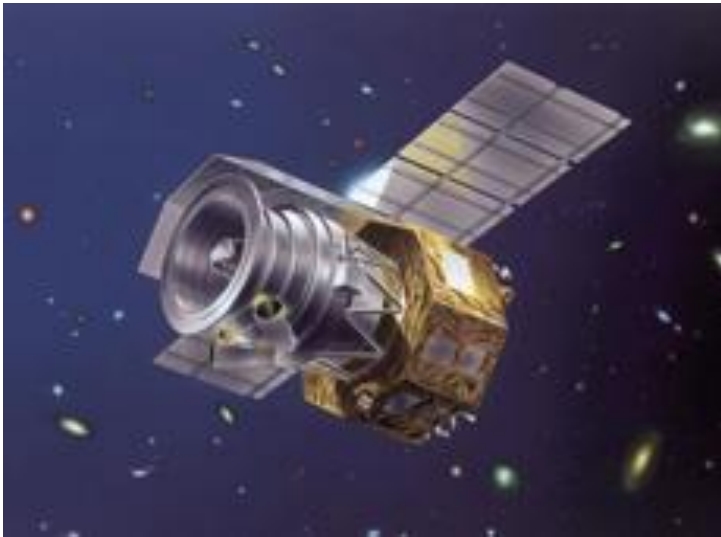
Credit:

AN Tao et al./Nature Astronomy

# 電波天文における観測

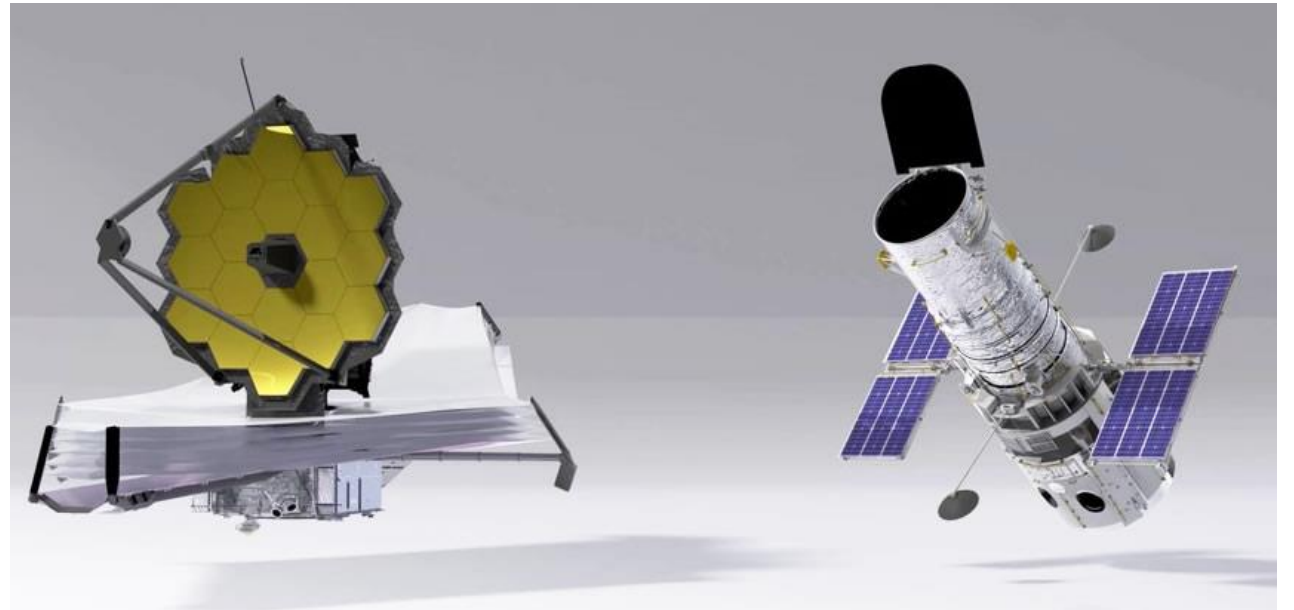
## スペース望遠鏡

### 赤外線天文衛星「あかり」



Credit: JAXA

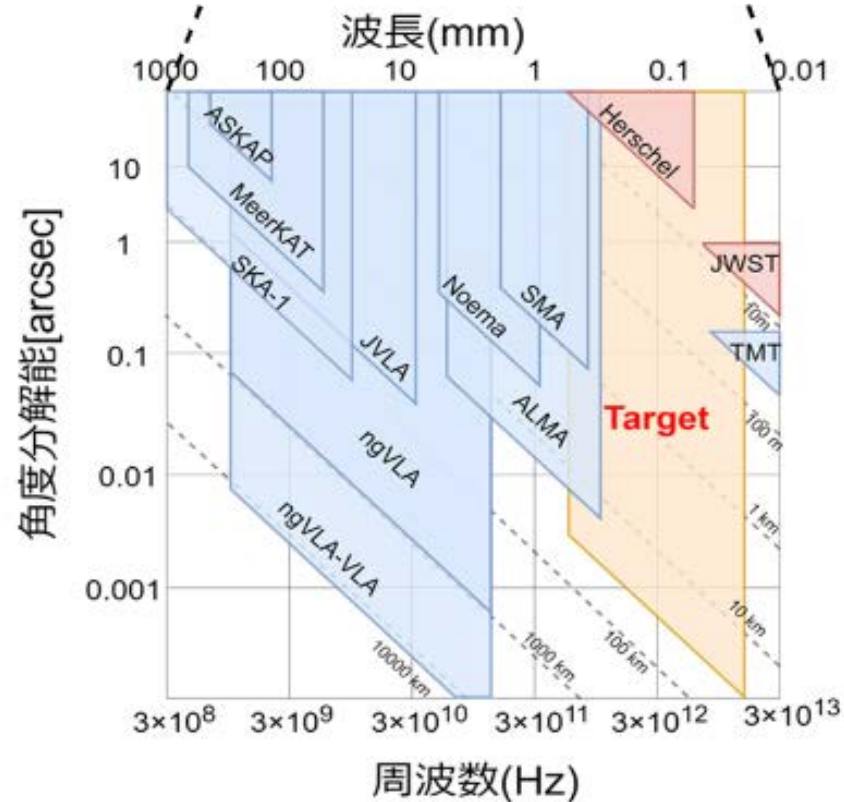
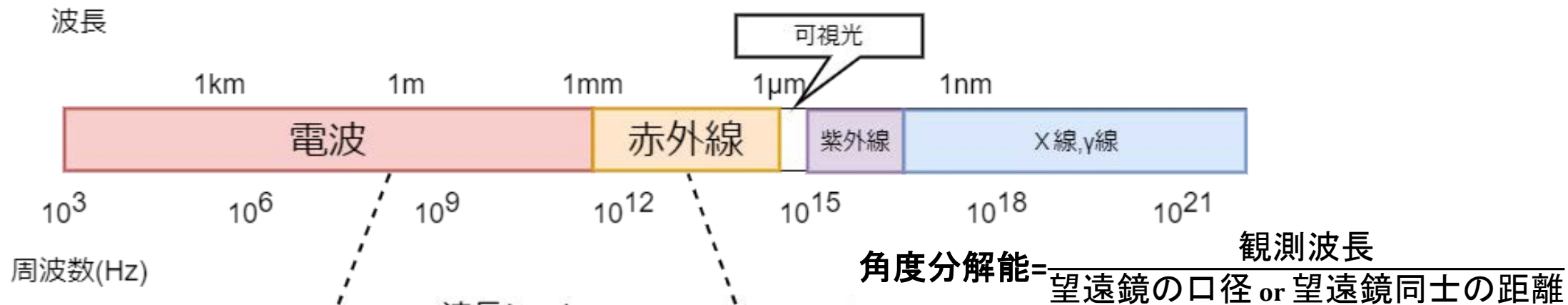
### JWSTとハッブル宇宙望遠鏡



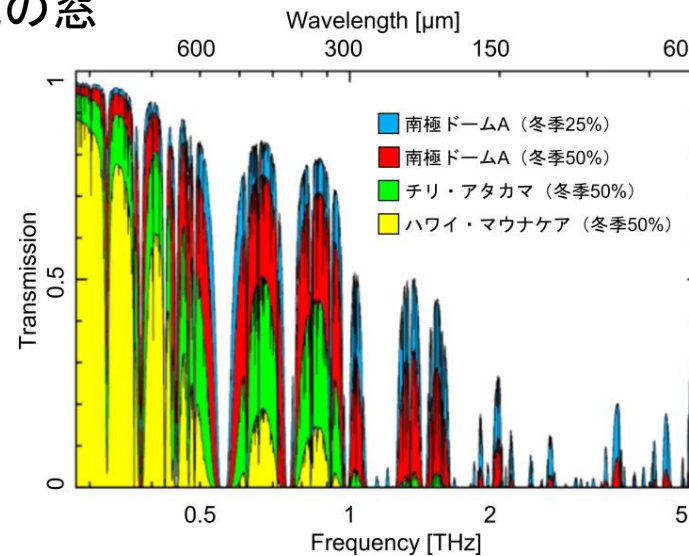
Credit: GSFC



# 電波望遠鏡の現状



## 大気の窓



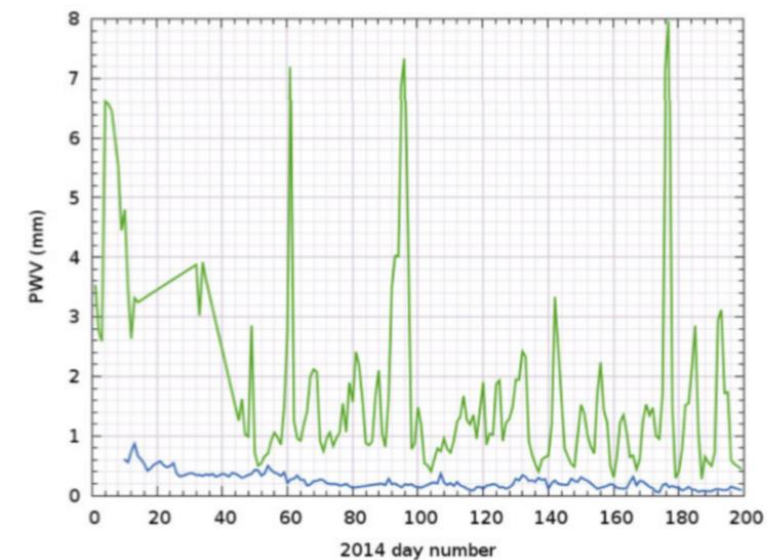
地球上の大気の透過率 (H. Yang et al.2010)

テラヘルツ領域で高角度分解能の観測が実現されていない  
→南極テラヘルツ干渉計

# 南極の観測条件

- 標高が高い
- 気温が低い  
-20°C以下

水蒸気量が低く安定している



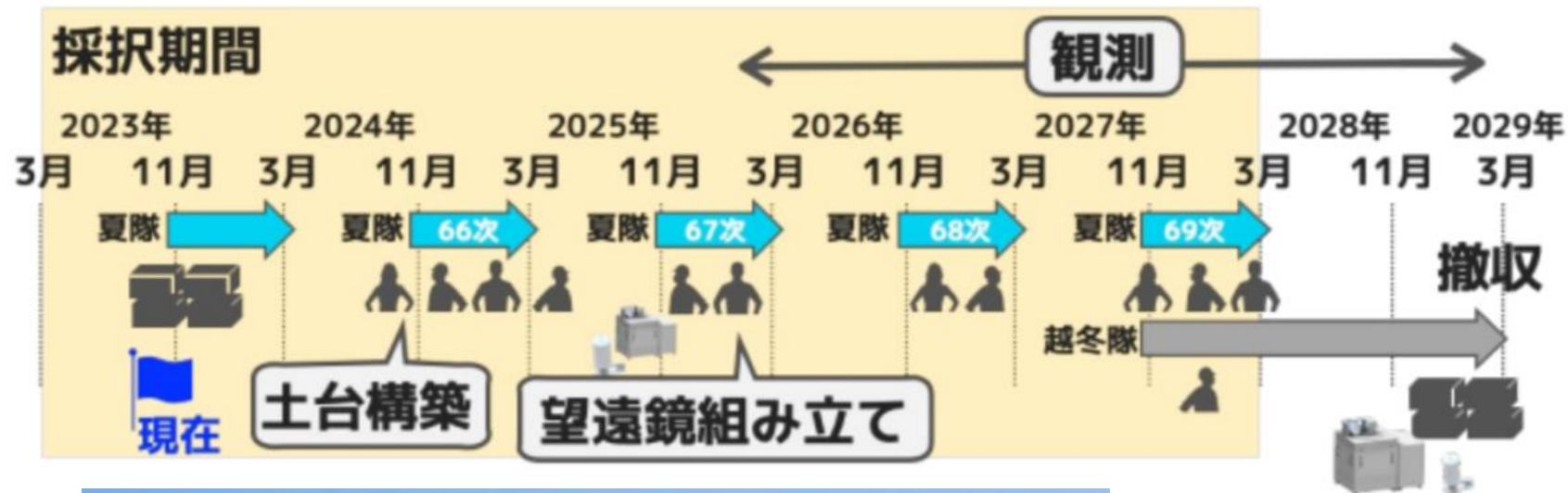
アタカマ (緑) と南極高地 (青) の水蒸気量の変化  
(Michael G. et al. 2015)





# 南極での観測-単一鏡観測-

南極地域観測第X期6か年計画(2022年度-2027年度)



Honda et al.受信機ワークショップ2023



南極30 cm 望遠鏡(Ishii et al. (2014) )

## 観測対象

- CO(J=4-3) 461 GHz
- [CI]( $^3P_1$ - $^3P_0$ ) 492 GHz



# 南極での観測-干渉計観測-

30 cm望遠鏡2台で観測を行う

周波数:500 GHz

2台目の製作:2024年度~

輸送等:2026年

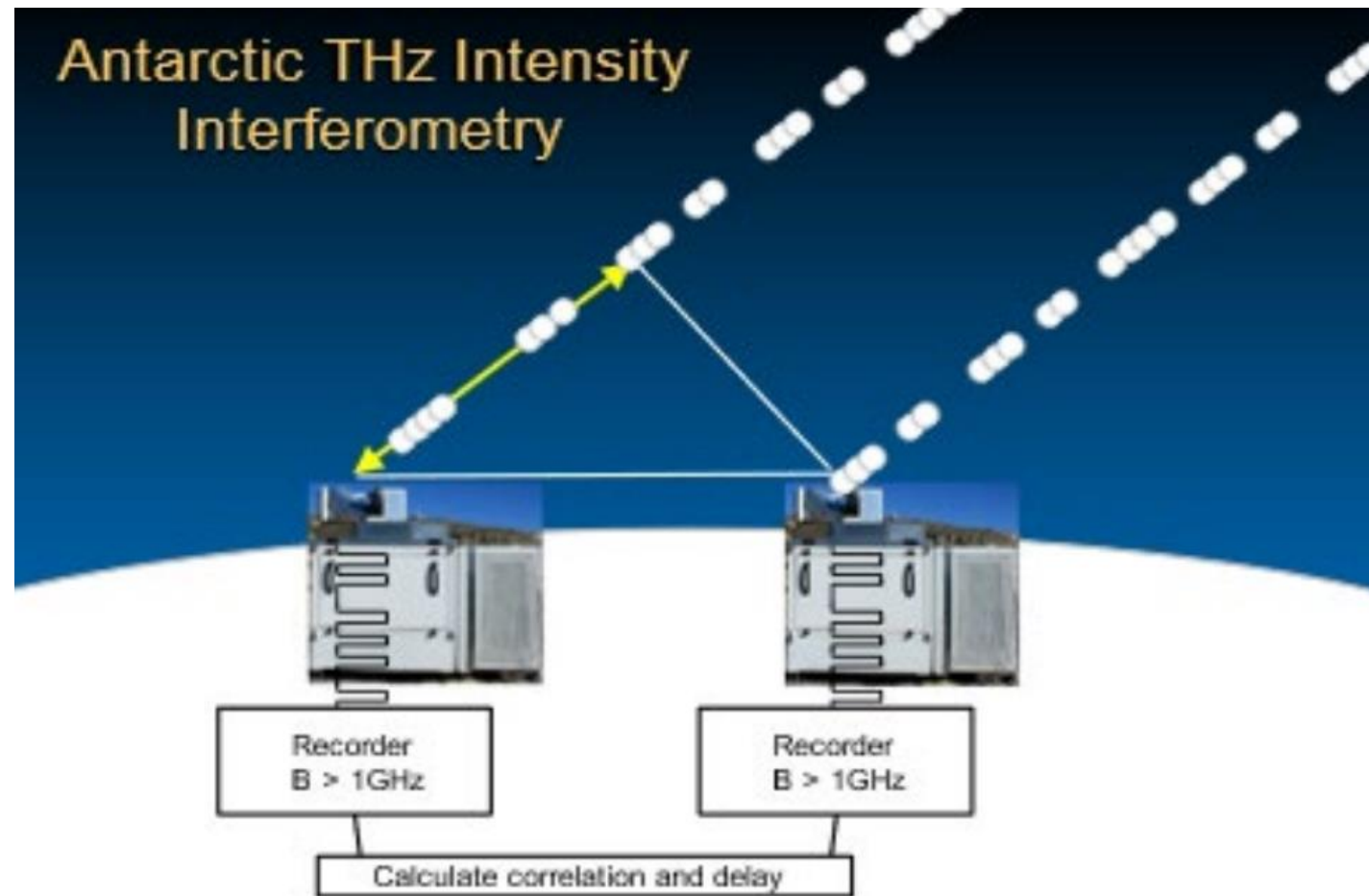
観測:2027年~

## 観測方法

- 電波干渉計
- **強度干渉計**(後述)

## 観測周波数

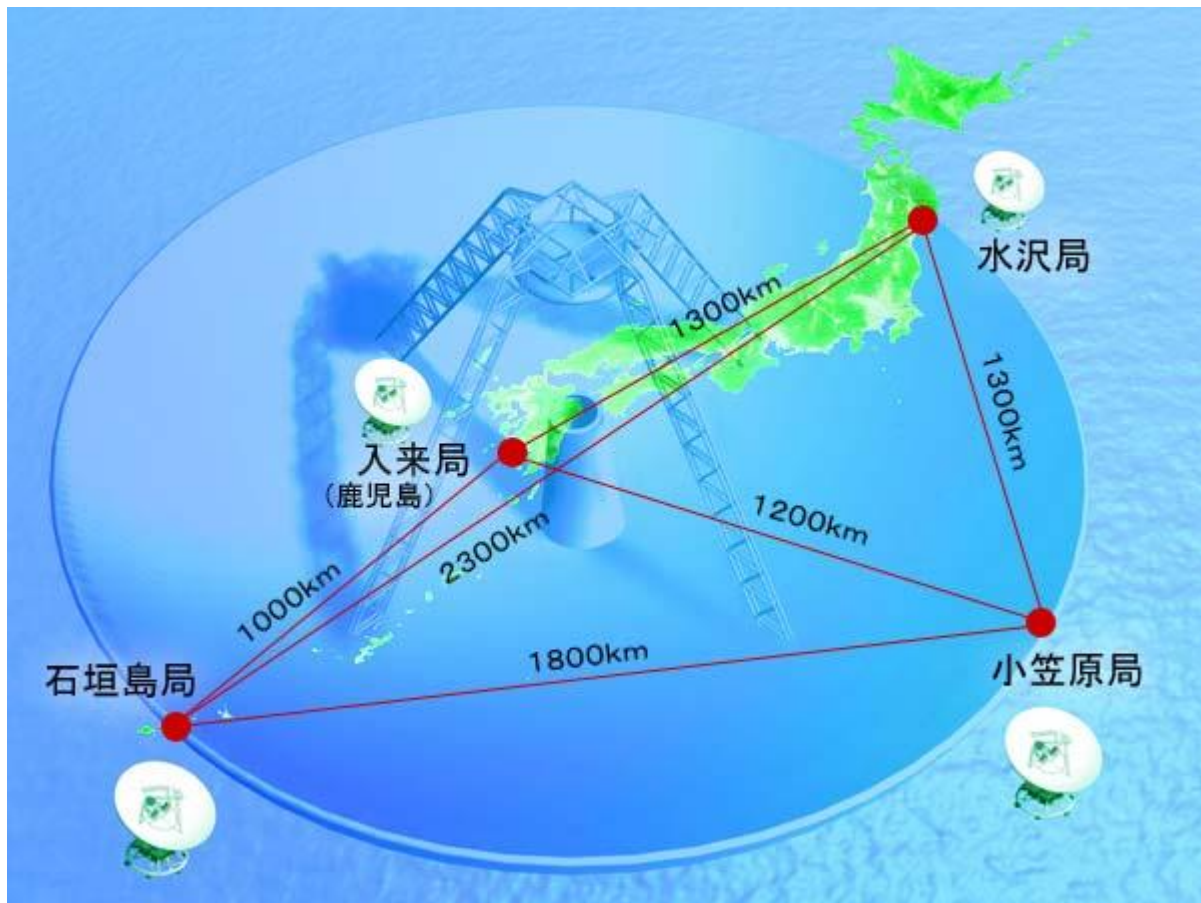
- 500 GHz帯
- 将来的に1.5THzへでも観測予定



# 電波干渉計について

## 干渉計の特徴

距離の離れた複数の望遠鏡を1つの大きな望遠鏡できる

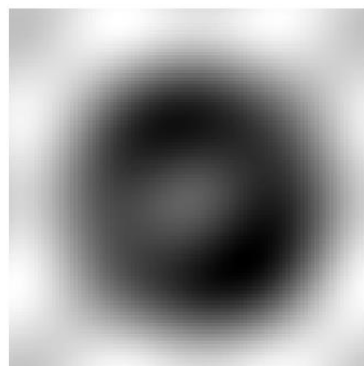


Credit:NAOJ

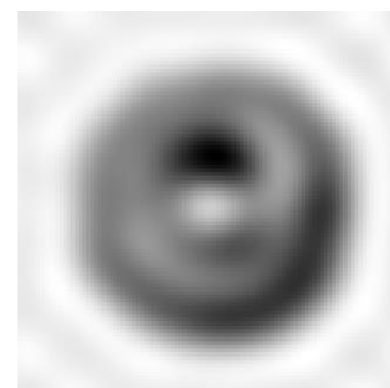
干渉計でイメージングするために必要な情報

- 相互相関関数
- 遅延時間
- 基線長

分解能が低いとき  
( $D$ が小さいとき)



分解能が高いとき  
( $D$ が大きいとき)

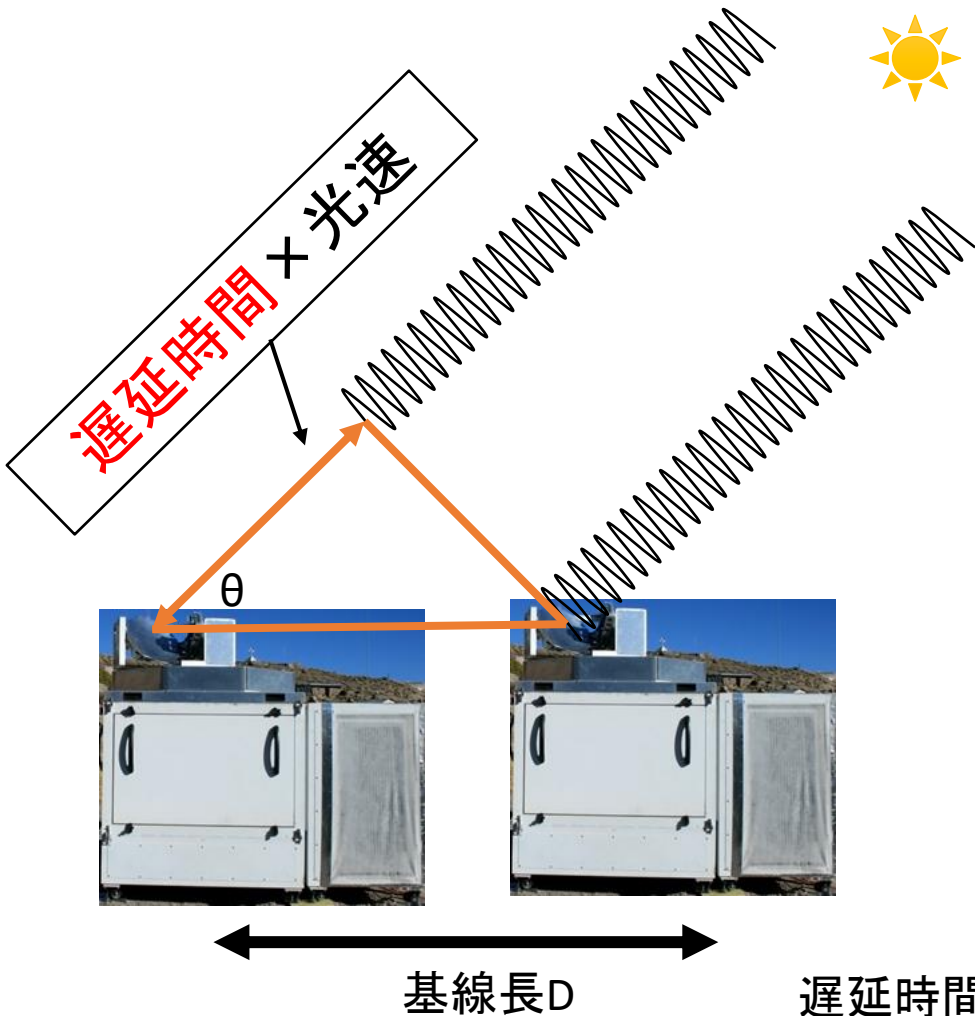




# 電波干渉計について

## 干渉計の特徴

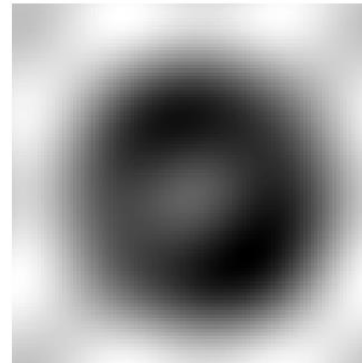
距離の離れた複数の望遠鏡を1つの大きな望遠鏡できる



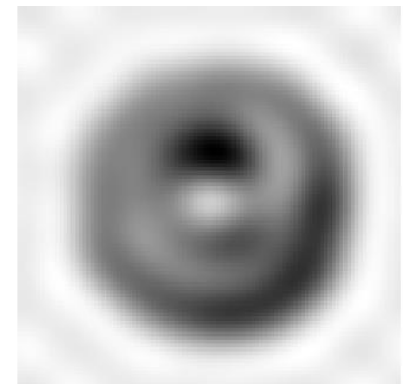
干渉計でイメージングするために必要な情報

- 相互相関関数
- 遅延時間
- 基線長

分解能が低いとき  
( $D$ が小さいとき)



分解能が高いとき  
( $D$ が大きいとき)



# 強度干渉計

Intensity  $\propto$  (Amplitude)<sup>2</sup>

- 大気の位相変動に強い  
⇒ 長い基線長で有利
- 直接検出器を使える  
⇒ 量子雑音によらない高感度の観測が可能  
⇒ SIS 光子検出器

遅延時間の決定

先行研究例(右図:ezawa et al.2015)

- 野辺山(ヘリオグラフ)での実験 (17GHz)
- 朝、昼、夕の3回実施

→(b):測定から得られた遅延時間

→(c):地球の自転から計算された遅延時間との差

➡ 実験室でSIS光子検出器を用いて遅延時間を測定する



Hanbury-Brown et.al (1974)



# 強度干渉計

Intensity  $\propto$  (Amplitude)<sup>2</sup>

- 大気の位相変動に強い  
⇒ 長い基線長で有利
- 直接検出器を使える  
⇒ 量子雑音によらない高感度の観測が可能  
⇒ SIS 光子検出器

遅延時間の決定

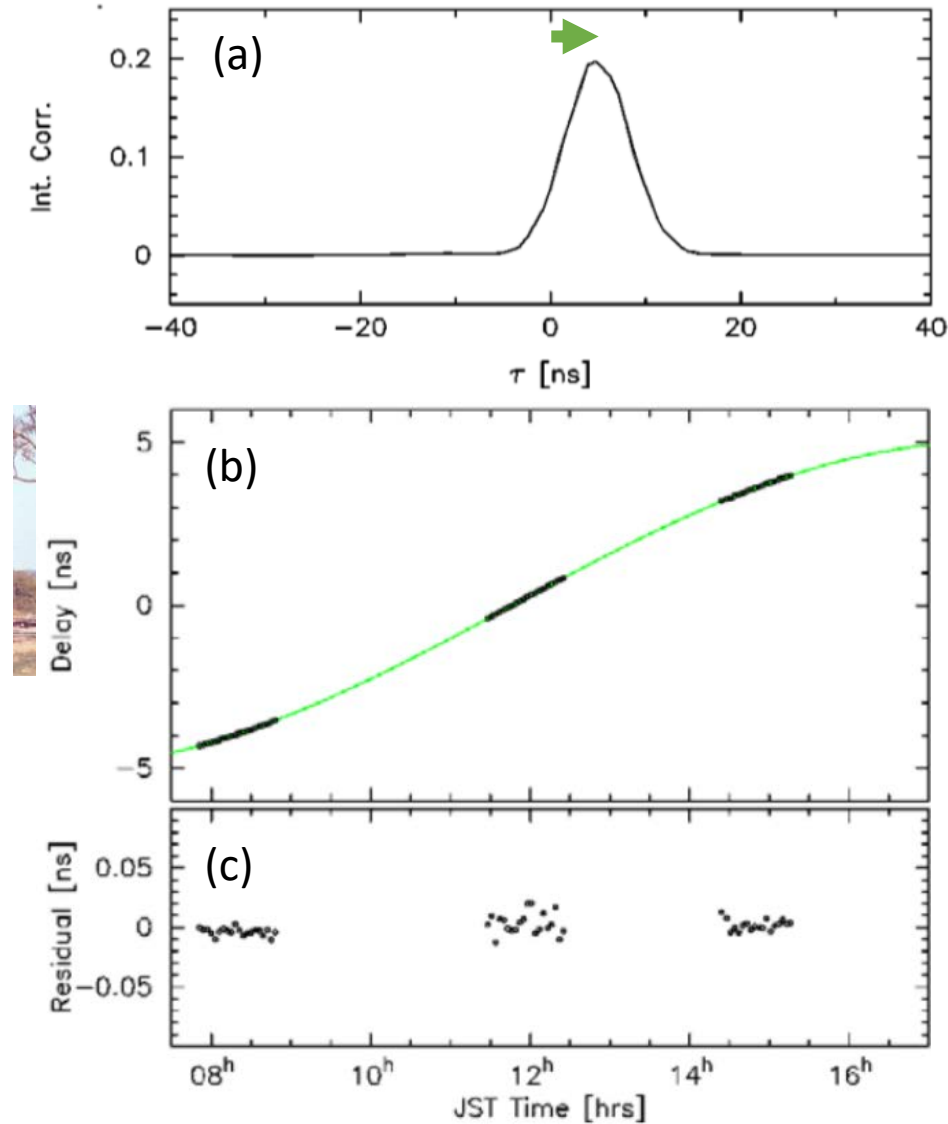
先行研究例(右図:ezawa et al.2015)

- 野辺山(ヘリオグラフ)での実験 (17GHz)
- 朝、昼、夕の3回実施

→(b):測定から得られた遅延時間

→(c):地球の自転から計算された遅延時間との差

➡ 実験室でSIS光子検出器を用いて遅延時間を測定する



# SIS光子検出器 VS ヘテロダイン受信機

## ● ヘテロダインの量子雑音

$$T_{QL} = hv/k [K] = 150 \text{ K @ 3THz}$$

$$- n = kT_{QL}B/hv = B [\text{photons/s}]$$

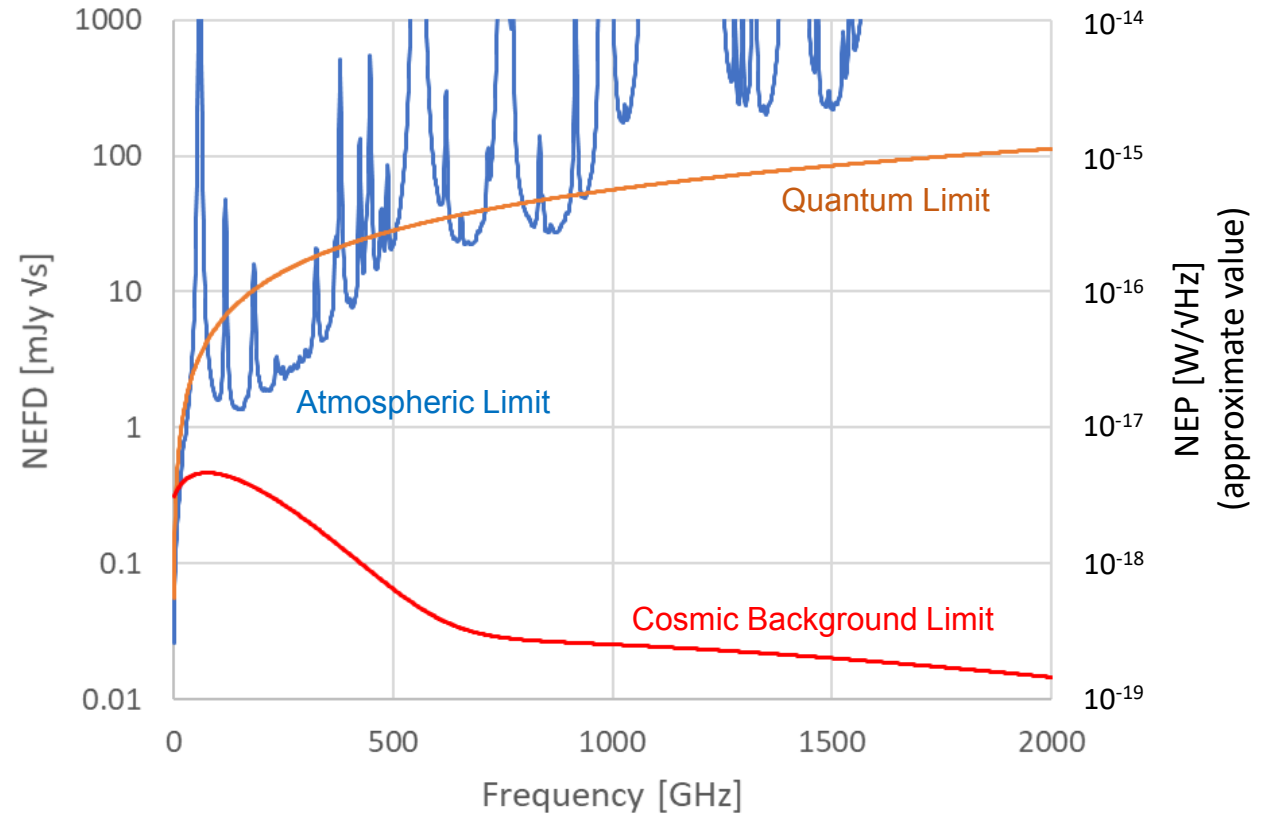
## ● 直接検出器のリミット

$$\text{NEP} = 10^{-19} \text{ W/Hz}^{0.5}, B = 100 \text{ GHz}$$

$$- T_{RX} = \text{NEP} / (2k B^{0.5}) = 10 \text{ mK}$$

- Background vs. Quantum limit

~ 4 orders

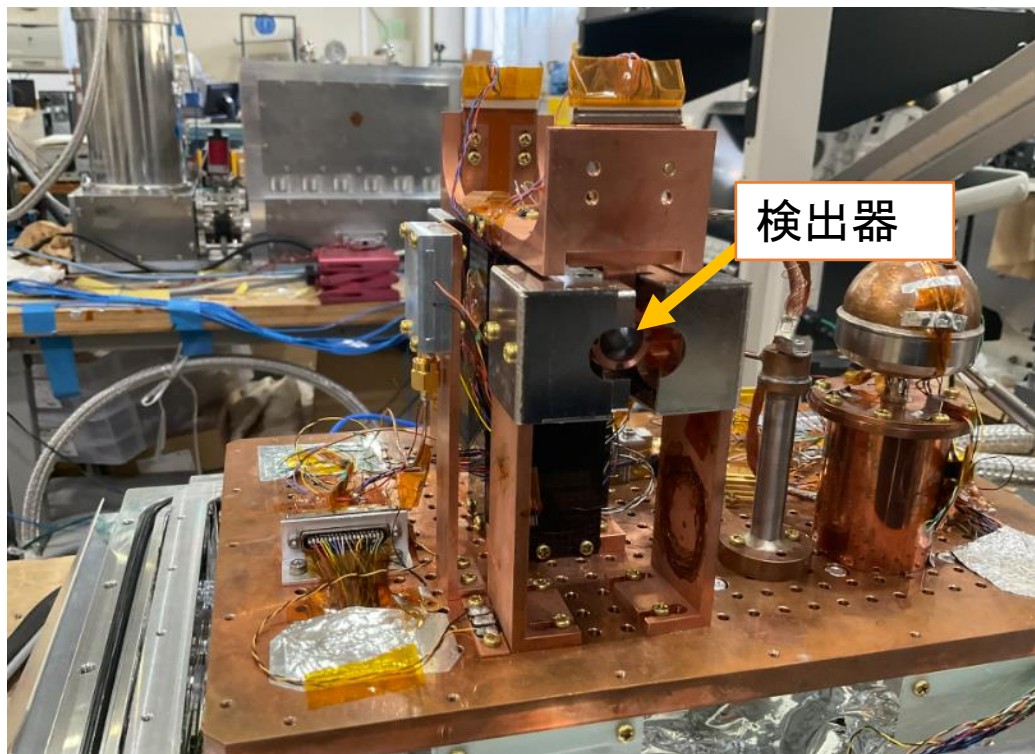


大気による雑音:実線  
破線:3倍の量子雑音  
点線:CMB  
(宇宙観測II.2020)



# 実験室での実証試験に向けて

実験装置の外観



クライオスタット内部

## 実験目的

- ✓ 強度相関を観測
- ✓ 遅延時間の測定
- ✓ 開口合成



# 実証実験に向けた光学系

## 干渉計として基線長を変更可能な光学システムの開発

- 対称な光路
- 基線長を変更可能

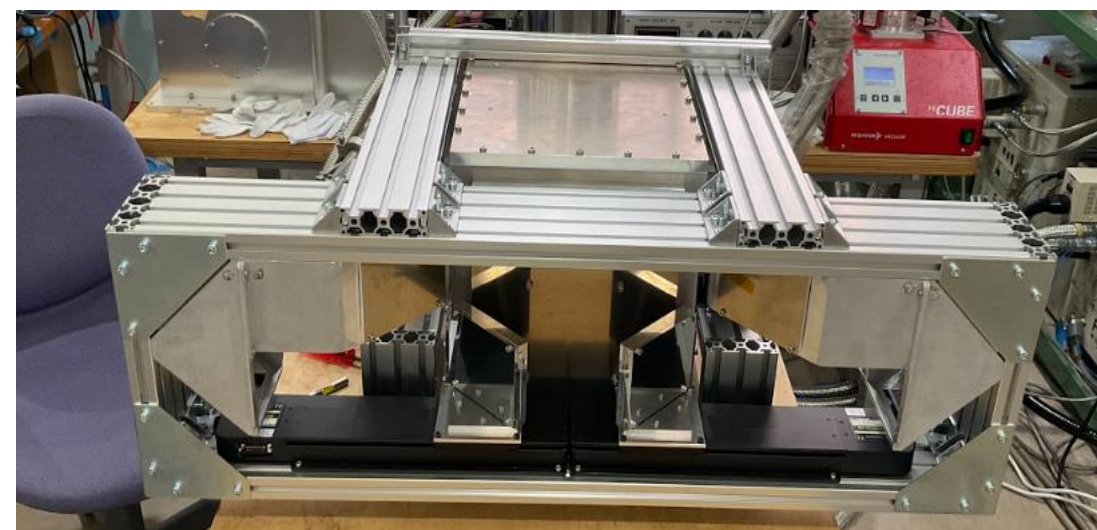
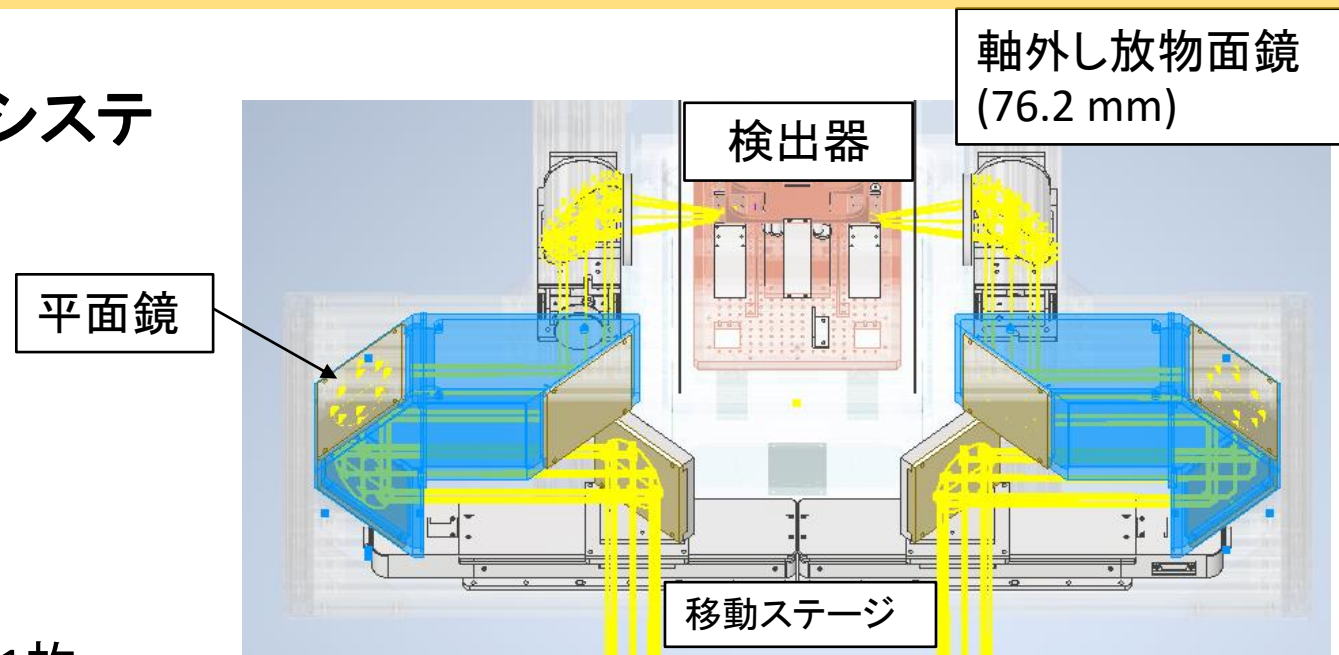
## 設計・製作

光路: 平面鏡8枚、軸外し放物面鏡2枚、球面鏡1枚

最小・最大基線長 → 移動ステージに依存

基線長: 103 mm – 503 mm

分解能: 最大4'





# 開発課題

- アンテナ口径:10m
- 観測周波数:1THz
- 帯域幅:100GHz
- 電波強度:1Jy

と仮定した時、単位時間あたりに受信機に入るエネルギー

$$\rightarrow 7.85 \times 10^{-14} \text{ J/s}$$

光子1つのエネルギー

$$\rightarrow 6.6 \times 10^{-22} \text{ J}$$

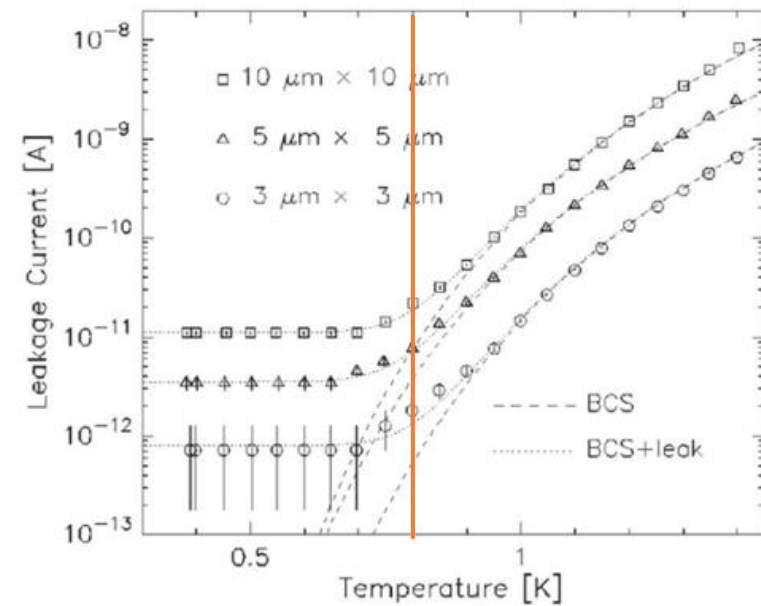
単位時間あたりに入射する光子数は

$$\frac{7.85 \times 10^{-14}}{6.6 \times 10^{-22}} \sim \mathbf{10^8 \text{ photon/sec}}$$

これより、1光子信号を時間分解能できる速度としてSIS光子検出器の動作を $\mathbf{10^9/sec=1GHz}$ として製作している。

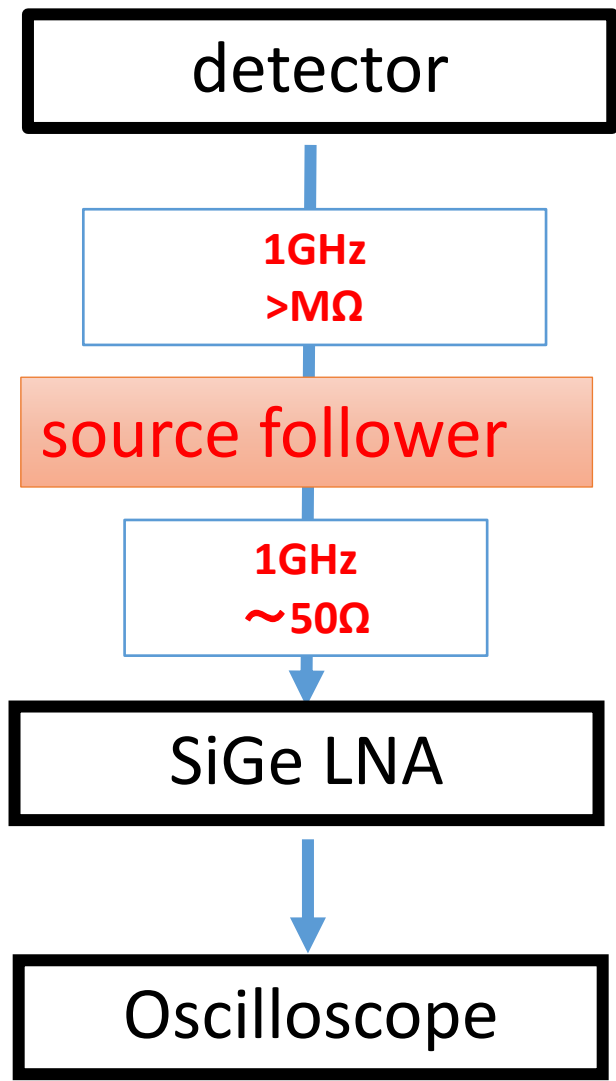
## 課題

- SIS光子検出器は0.8Kで動作させる
- SIS光子検出器の出力インピーダンスが高い



SIS光子検出器のリーク電流 (Ezawa et al. 2019)

# 開発課題:読み出し回路の高速化



## 手法

2段のソースフォロワ回路を用いてインピーダンス変換を行う

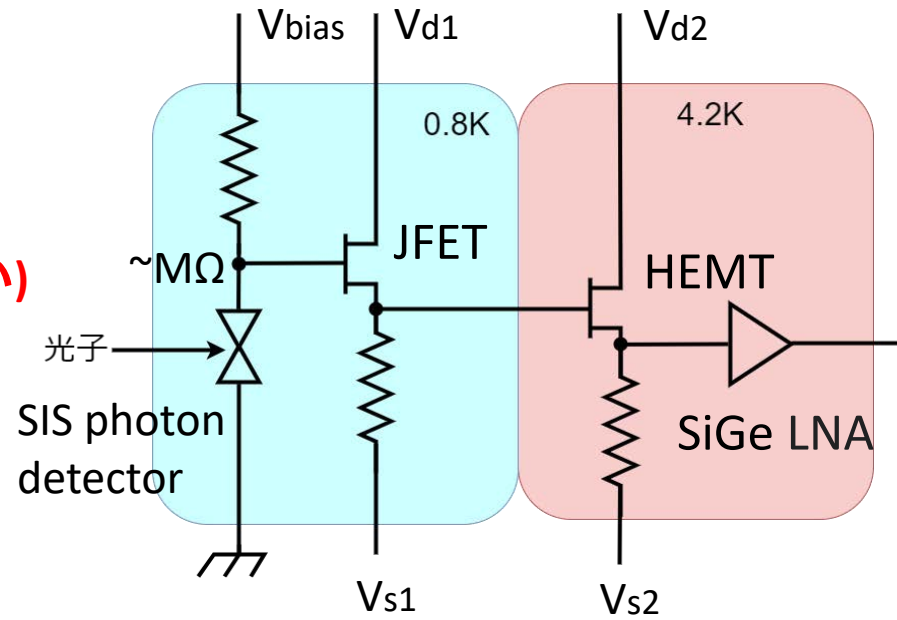
### ソースフォロワ回路の特徴

- 出カインピーダンスが小さい

$$R_{out} \approx \frac{1}{g_m}, \quad g_m = \frac{dI_d}{dV_{gs}}$$

- ゲインがほぼ1(信号の損失が少ない)

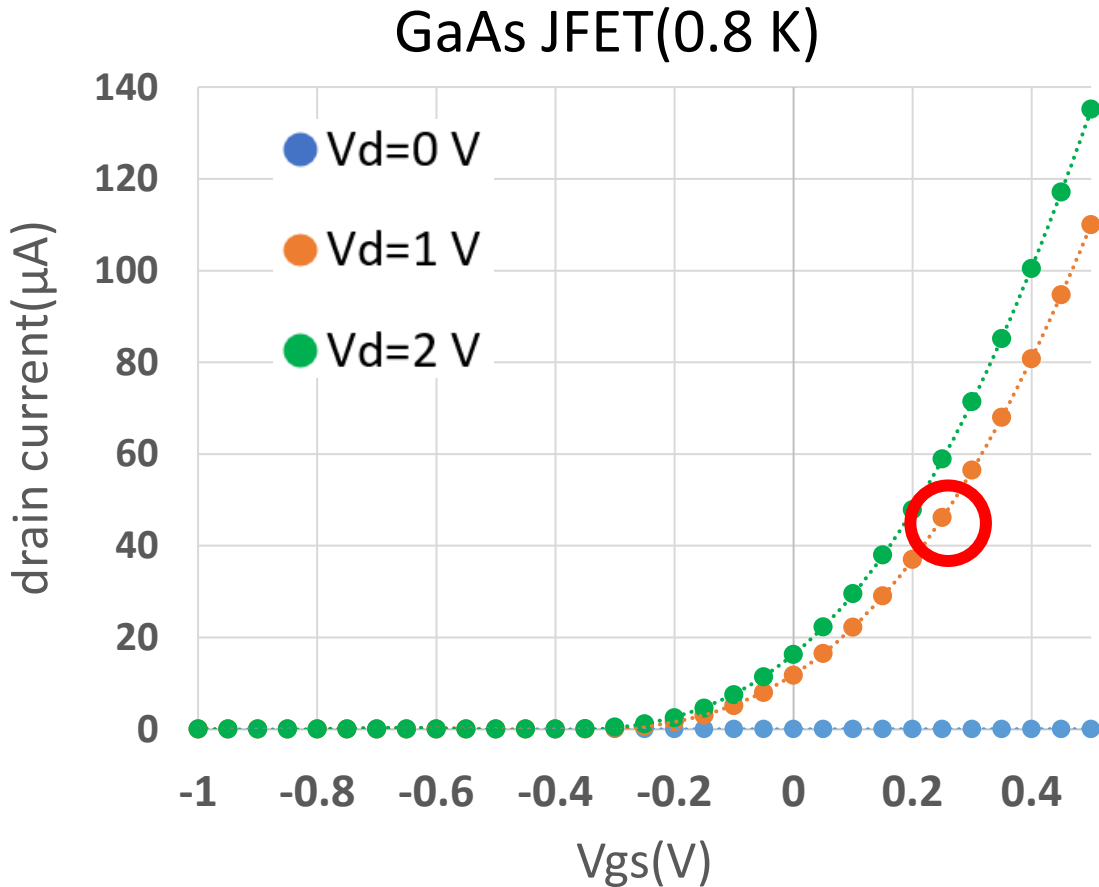
$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Rg_m}{1 + Rg_m} \approx 1$$



### FETの選定・評価

- 低温で動作実績のある2種類を選定  
GaAs JFET(Fujiwara et al.2004), GaAs HEMT (FHX35X)
- FETの $I_d - V_{gs}$ 特性の評価およびゲート容量の測定

# FETの特性



$$R_{\text{out}} \approx \frac{1}{g_m}, \quad g_m = \frac{dI_d}{dV_{gs}}$$

## GaAs JFET

V <sub>d</sub> (V)	V <sub>gs</sub> (V)	R <sub>out</sub> (Ω)	Power (μW)
1.0	0.25	5.1k	46

## GaAs HEMT

V <sub>d</sub> (V)	V <sub>gs</sub> (V)	R <sub>out</sub> (Ω)	Power (mW)
2.0	-0.20	54	5.9

ゲート容量

GaAs JFET : **21 fF**

GaAs HEMT: **380 fF**



# 回路の動作速度

## 回路の動作速度

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times (5.1 \times 10^3) \times (380 \times 10^{-15})} \sim 80 \text{ MHz}$$

光子を個々に観測することは難しい

### 解決策

初段からの出力インピーダンスを下げるFETの実装

HEMTのゲート容量を下げるの実装

光の入射量を制限する

## 遅延時間の決定精度は？

$$\Delta t = \frac{T_{\text{sys}}}{T_A^*} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta\nu \cdot \tau}} \cdot \frac{1}{\Delta\nu} [\text{s}] \quad \longrightarrow \quad 10^{-13} (\text{s})$$

100秒の積分時間では強度干渉計での遅延時間は観測に有効

# まとめ

南極でTHz領域の高角度分解能の干渉計観測を目指す

実験室で**強度干渉計**を用いた遅延時間の測定

手法:SIS光子検出器＋高速の読み出し回路による強度の相互相関を利用

今後の予定

- 実験室で遅延時間の測定
- 2台目の30 cm望遠鏡の製作

