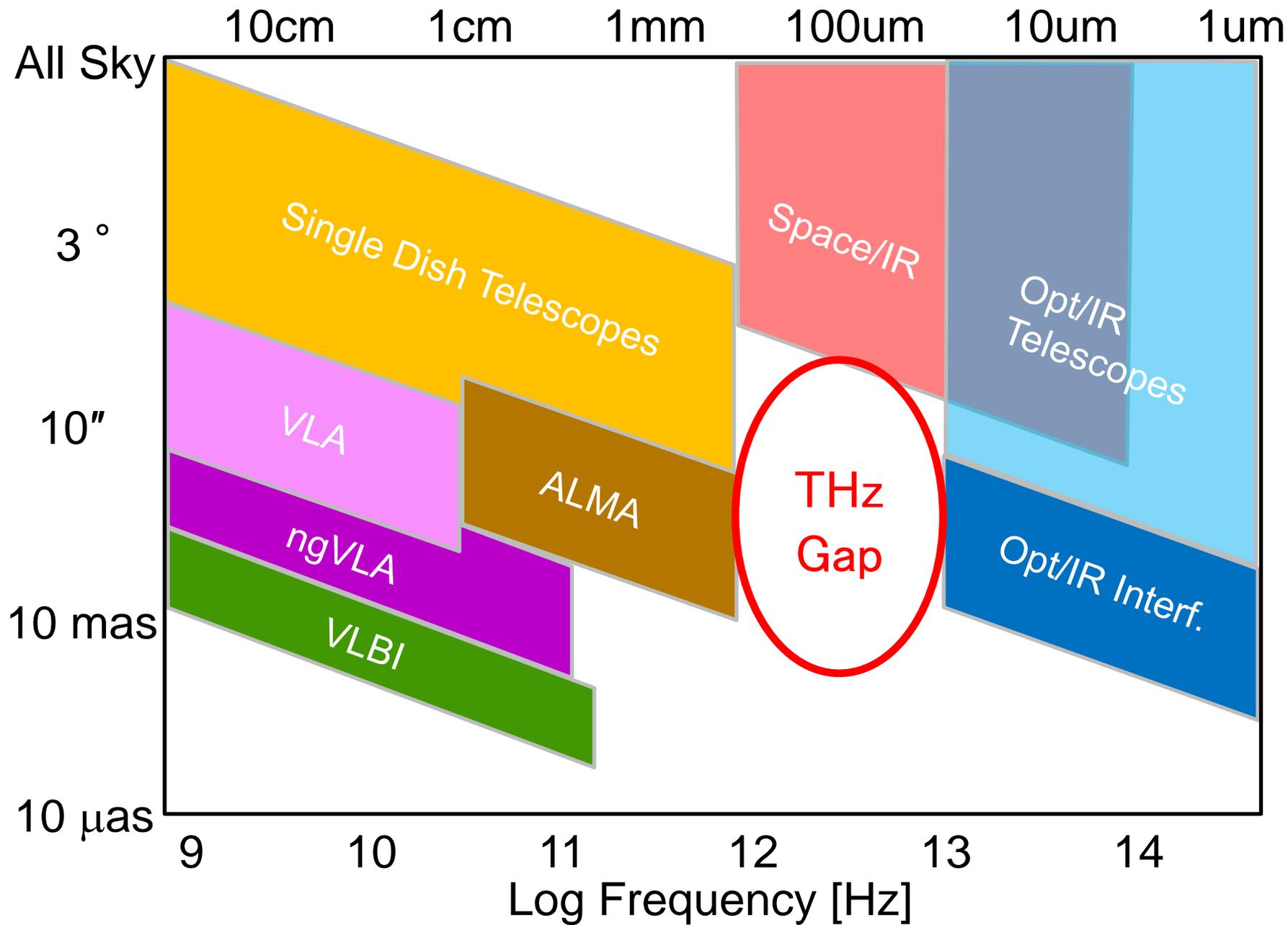


# Space Infrared Intensity Interferometry スペース赤外線強度干渉計

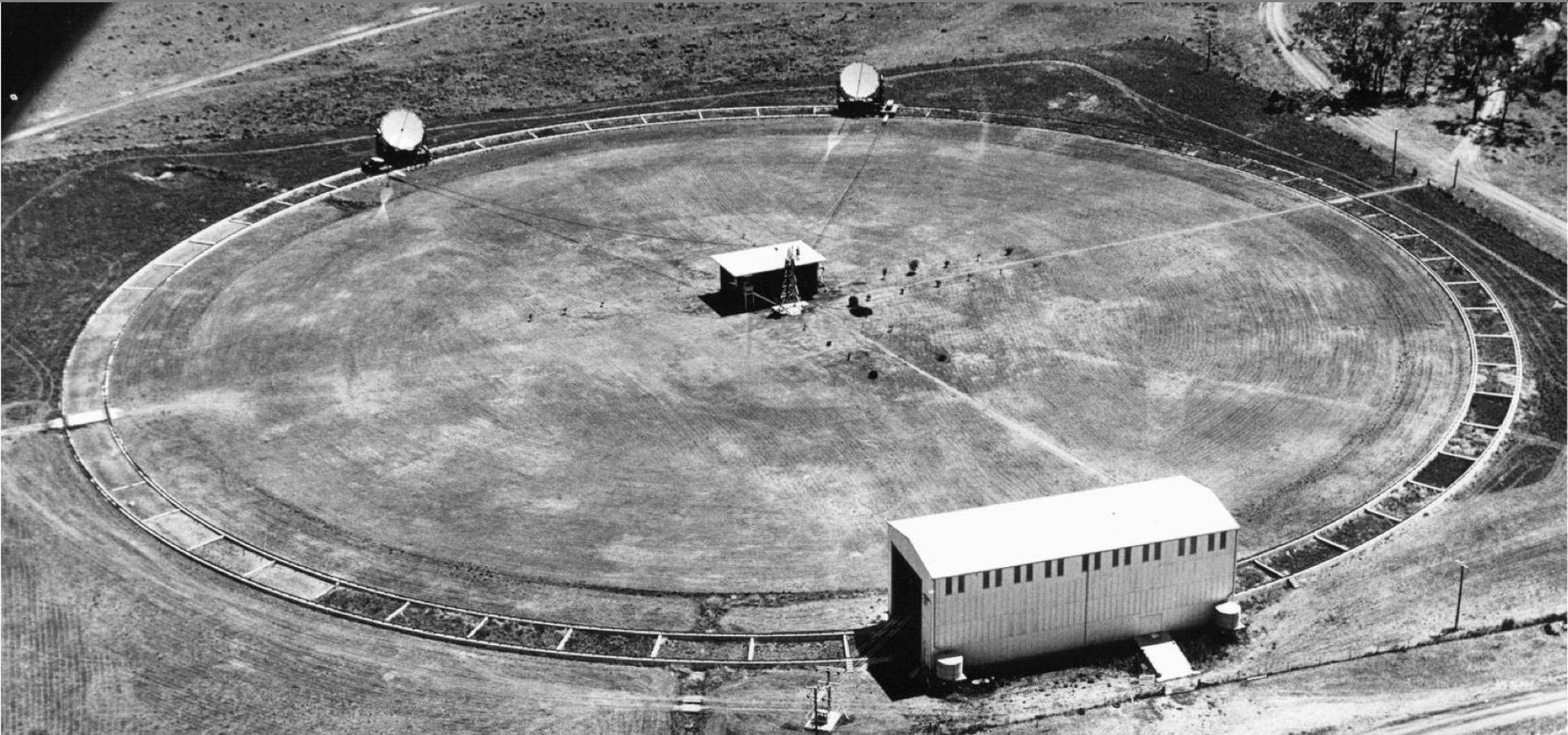
Hiroshi Matsuo (ATC/NAOJ)

松尾 宏(国立天文台・先端技術センター)

# Angular Scale of Observation

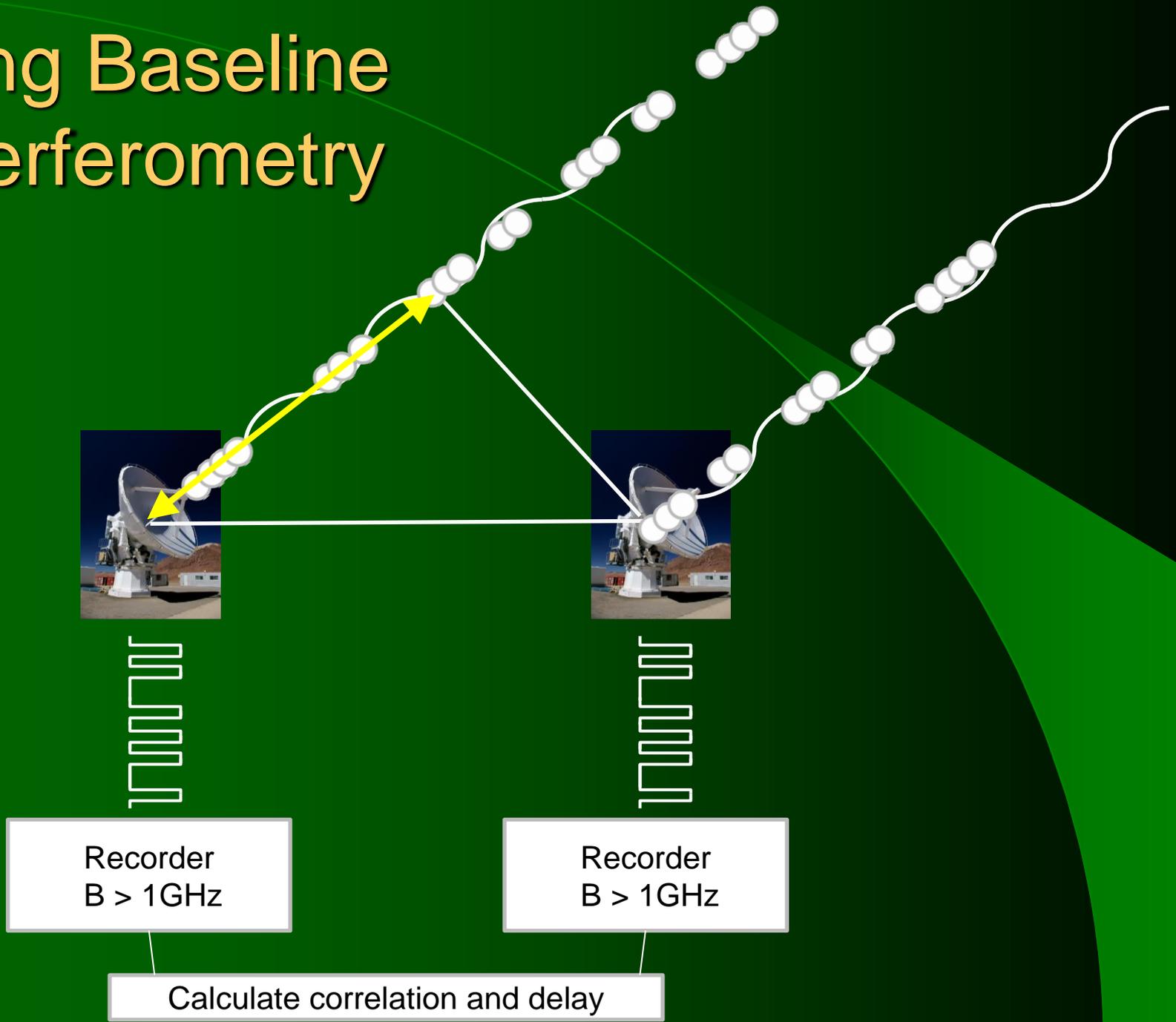


# Narrabri Stellar Intensity Interferometer



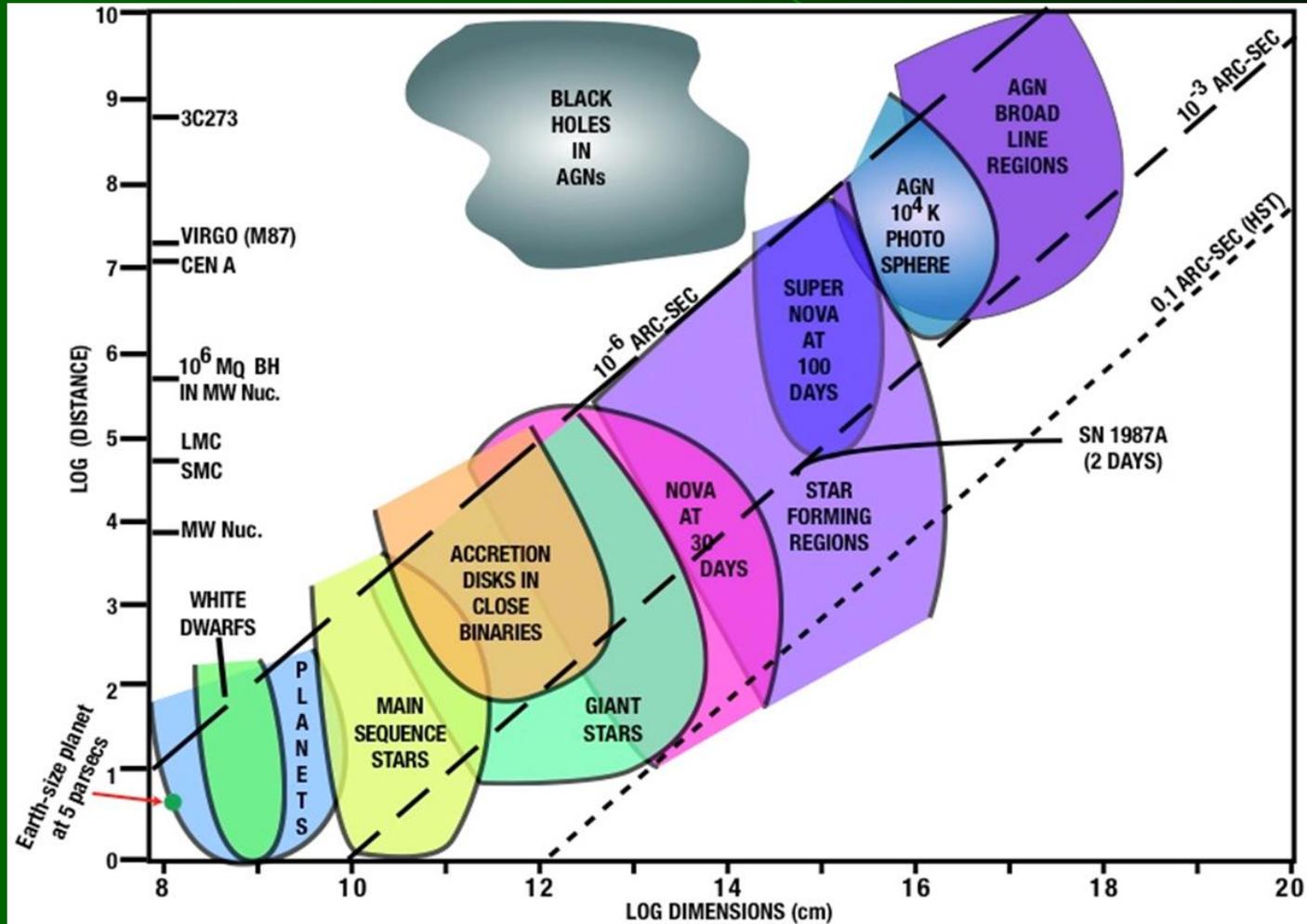
ATNF Daily Astronomy Picture  
17th of August 2015

# Long Baseline Interferometry



# Requirements for High Angular Resolution

1 milli-arcsecond resolution changes our view !



From "Interferometry from Space" 2018/12/11-12 (2018)

# 評価結果（総評）

- 宇宙望遠鏡の大型化を世界的にも目指す中で、小さい望遠鏡を複数台打ち上げて干渉させるアイデアは、超大型宇宙望遠鏡と一線を画す、新しい方向性として期待されます。また、従来の天体干渉計のような2光束の電場を検出器で結合させるのではなく、各望遠鏡において測定された強度の相関（高次のコヒーレンス）を計測することによって超基線を実現することが可能となります。技術が確立されれば、**破壊的なブレークスルー**をもたらすことが期待されます。
- 一方、複数の評価者が指摘されているように、本提案を次のステージに進めるためにも**ミッションの具体化**が重要な課題だと考えています。特に、科学目標や本提案の強みを明確化していただきたいと思います。本方式によってのみ実現される重要なサイエンスは、本提案の独自性・強みを高めると思います。また、技術的な検討においても、強度干渉方式の**他の干渉方式に対する強み**を示すことが必要です。例えば、本提案の類似のアイデアとして、将来、L2に打ち上げる単一望遠鏡でヘテロダイン方式の計測を行い、L2と地上との間で超長基線の宇宙干渉計を構築するという提案（<https://arxiv.org/abs/1909.01408>）がされています。この方法は、電場での干渉（2次のコヒーレンス）によるため、本提案の方式に比べて、感度は高いことが予想されます。今後、科学目標から要求される空間分解能および感度と、それらを達成するための干渉方式の技術的可能性の**トレードオフの定量的な評価**は重要な検討の一つになると考えられます。

# 評価結果(総評)つづき

- 複数の評価者が**コミュニティの規模が不明**であることも問題点として指摘しています。**基礎的な技術開発の段階**にあるため、コミュニティを広げることは難しいかもしれませんが、将来のミッションの提案につなげるためにも段階的にコミュニティを拡大していくことは不可欠です。幸い、日本においては、将来の重力波干渉計や赤外線宇宙干渉計の実現を目指す、**編隊飛行型の宇宙干渉計**が公募型小型計画のコンセプトとして採択され、2030年頃の打ち上げを目指して本格的な検討が加速しつつあります。本提案は、編隊飛行技術を必須とするものであり、このようなグループと協力して進めることが期待されます。また、高速読み出し**検出器の開発**や強度干渉計の**地上での実証実験**は比較的小規模な予算で推進することができる基礎開発であり、このような開発を通じて段階的に技術的成熟度を上げていく計画も示されると良いと考えます。
- 科学目標やミッションコンセプトを明確にしつつ、コミュニティを広げながら、是非、提案をブラッシュアップしていただきたいと思います。

# 評価者コメントより

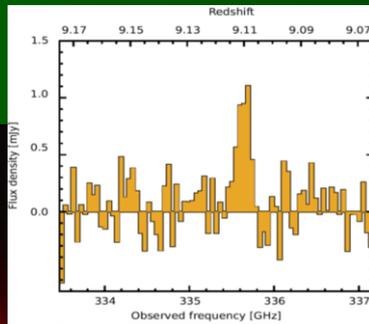
- 具体的に提案できる段階まで達していない
- 科学的な目標で要求されるものがマッチしているかどうか
- コミュニティ規模が不明
- “technology is still immature”, “if there is a strong killer science”
- 「破壊的イノベーション」を生み出す可能性
- 一個のプロジェクトとしてはまだ成立していない
- フォーメーションフライトによる干渉計は模索すべき技術の一つ
- 全体像および規模、フィジビリティが不明瞭
- SIII の実現するパラメタスペースが、真に必要な未踏の領域であるのか
- 編隊飛行における現在達成されているレベルからのジャンプが必要
- 目指すサイエンスが曖昧

- 科学目標
  - 1ミリ秒角でよい？ 観測波長は？
- 強度干渉計の強み
  - 基線長と感度
- 検出器開発
  - 赤外線検出器の開発が課題
- 編隊飛行
  - 軌道条件など
- コミュニティの規模
  - 光赤天連に期待

# 何が観測できるのか？

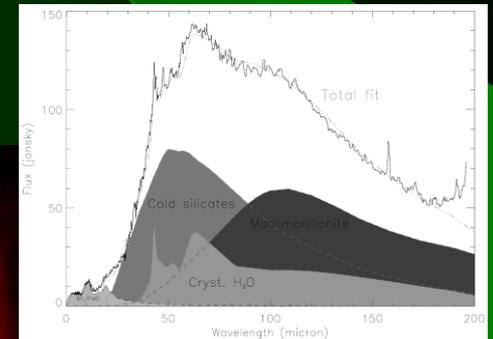
- 活動銀河核を電離酸素で分光イメージング
- 原始惑星系円盤をアイスフィーチャーでイメージング
- 恒星、系外惑星のイメージング

[OIII] 88 $\mu$ m



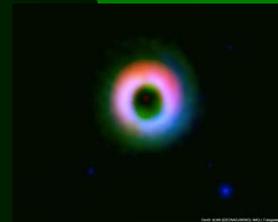
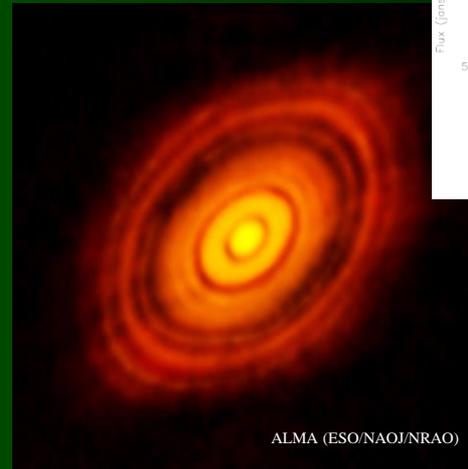
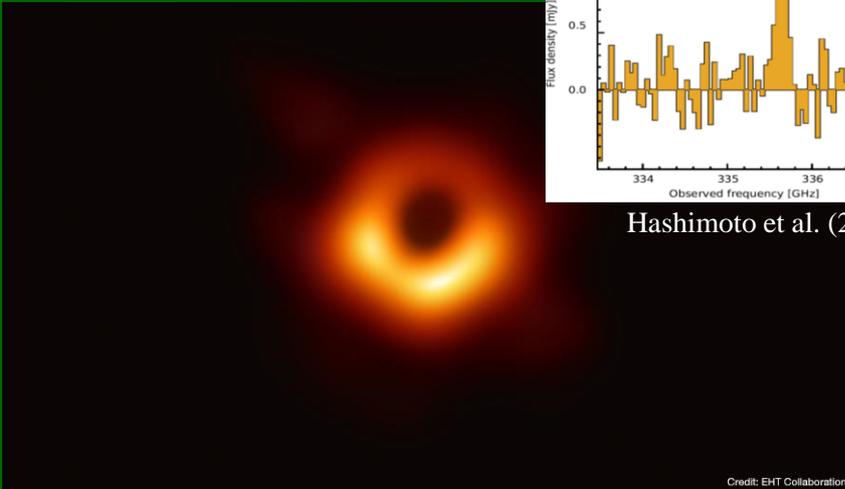
Hashimoto et al. (2018)

Water ice feature at 43 $\mu$ m



HD142527

Malfait et al. (1999)



# ヘテロダイン干渉計との感度比較

- 受信機量子雑音→雑音光子の数

- $T_n = h\nu/k$  [K] = 500 K @ 10 THz

- $n = kTB/h\nu = B$  [photons/s] = 0.7 nW (B=100GHz@10THz)

- 直接検出器の感度

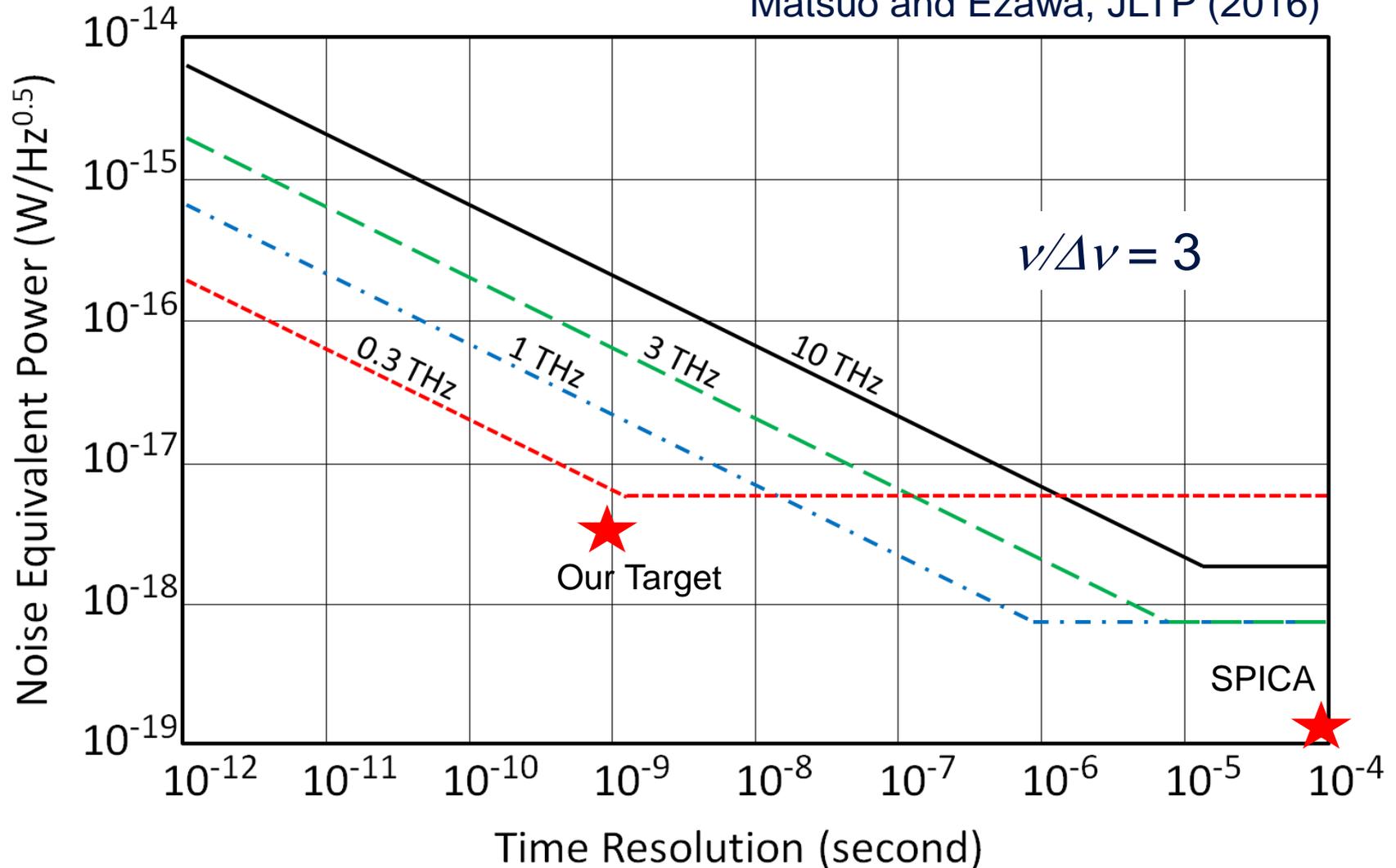
- NEP =  $10^{-19}$  W/Hz<sup>0.5</sup> B=100 GHz

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

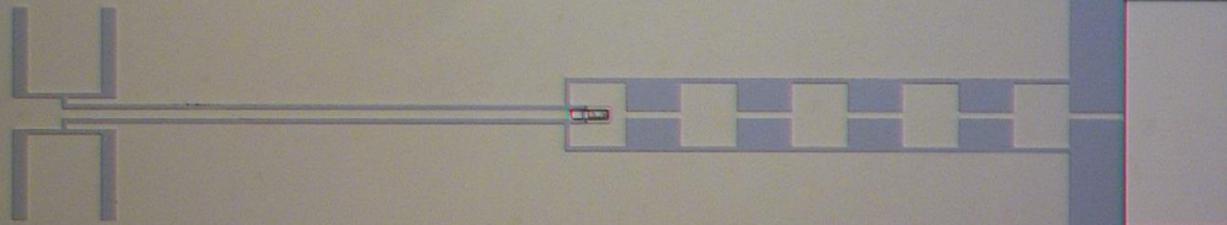
# NEP for photon counting vs. time resolution

$$\text{NEP} = h\nu/\sqrt{\tau}$$

Matsuo and Ezawa, JLTP (2016)

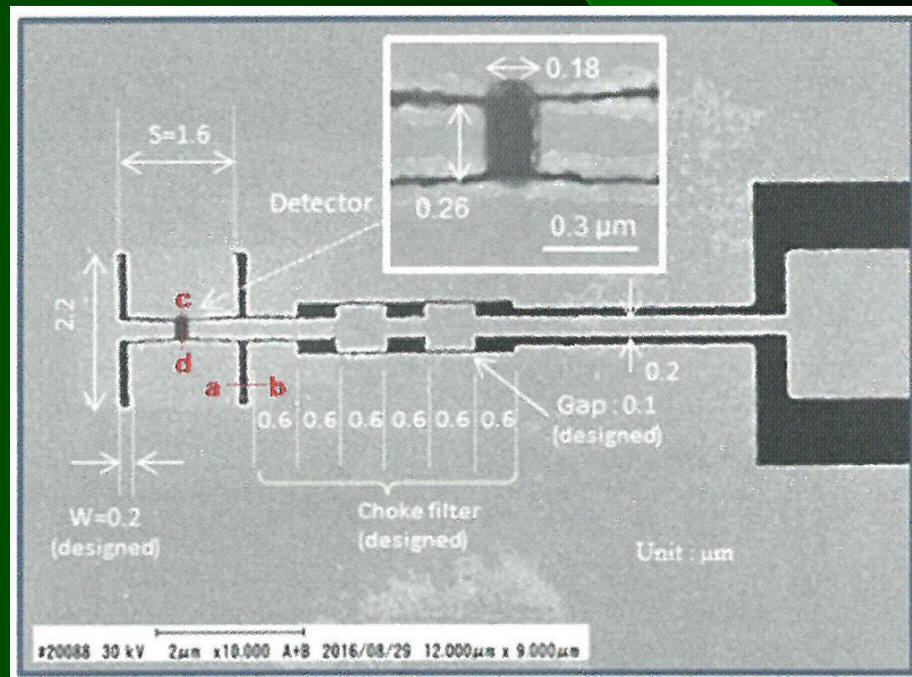


# 超伝導検出器の開発

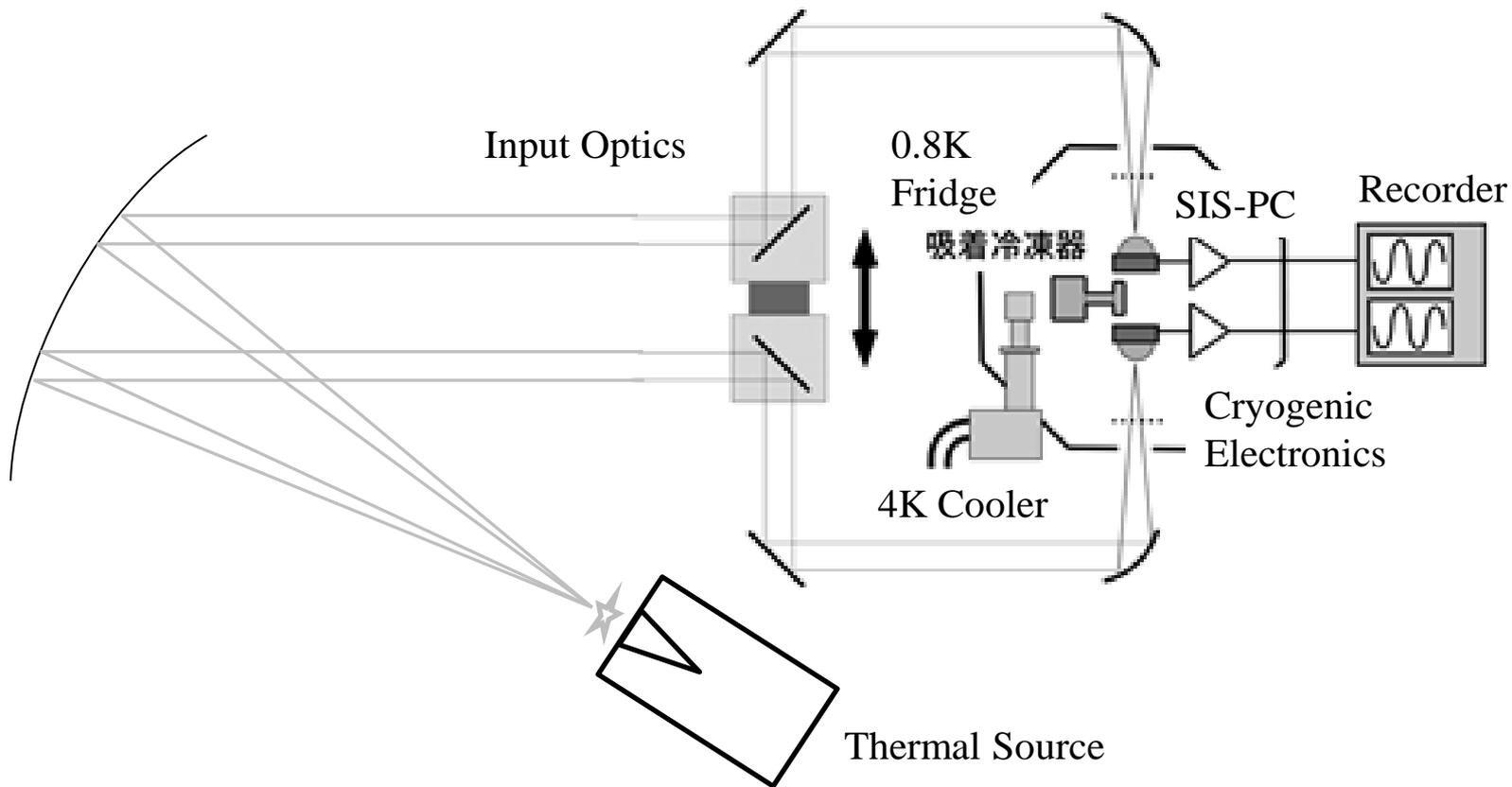


開発中のサブミリ波帯SIS光子検出器  
Ezawa et al. JLTP (2020)

10ミクロン帯の超伝導検出器  
Kawakami et al. 赤外線学会誌 (2019)



# Experimental Setup



# Astro2020 APC White Papers

## A Realistic Roadmap to Formation Flying Space Interferometry

**Type of Activity:**                       Ground Based Project     Space Based Project  
 Infrastructure Activity                 Technological Development Activity  
 State of the Profession Consideration    Other \_\_\_\_\_

### Principal Author:

Name: John Monnier

Institution: University of Michigan

Email: monnier@umich.edu

Phone: 734-763-5822

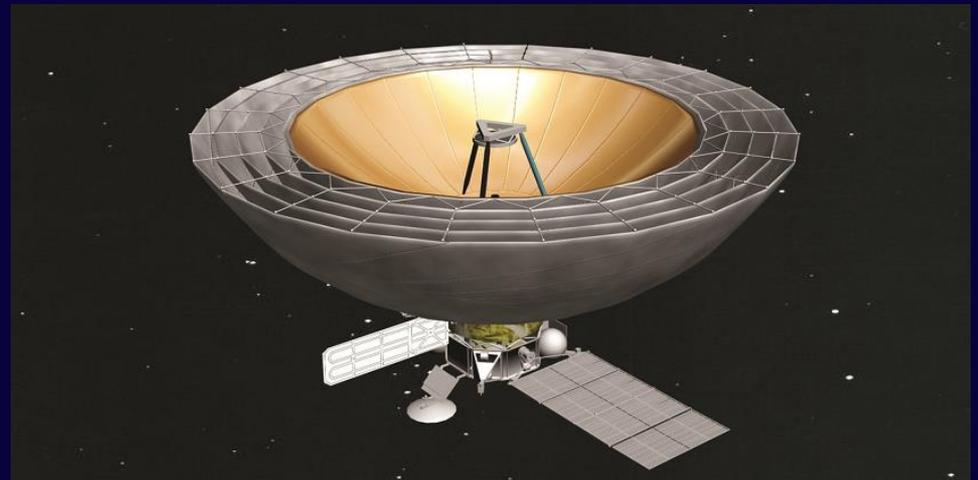
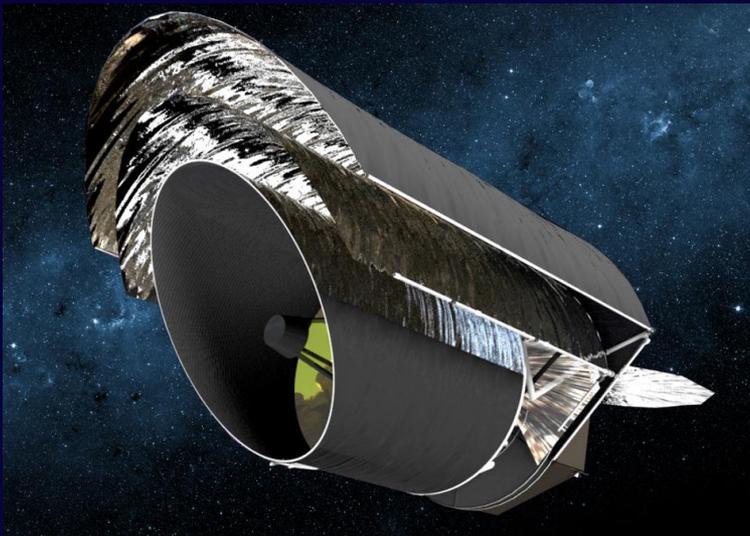
“Proposal of Photon Counting Terahertz Interferometry”  
In *The Cosmic Wheel and the Legacy of the AKARI Archive: From Galaxies and Stars to Planets and Life*, pages 261–264.

maintenance of the destructive null. In the 2000s, the NASA Terrestrial Planet Finder Interferometer (TPFI, Lawson et al., 2007) and ESA DARWIN (Cockell et al., 2009) projects studied the requirements for a mid-IR formation flying nulling space interferometer. The core idea is that an exo-Earth has the best contrast with the host star in the mid-IR ( $1:10^6$ , compared to  $1:10^{10}$  in visible) and nulling will further suppress the host star flux. In mid/late 2000s, these technology projects failed to mature to funded flight missions – see Lawson (2009) and Lawson et al. (2017) for a timeline of events and an overview of technical achievements of the TPFI program.

Additional mission concepts have been developed for nearly all wavelengths ranges and also using unconventional methods such as intensity interferometry (Matsuo et al., 2018). A (nearly) exhaustive list of proposed major space interferometry mission concepts appears in Table 1.

# OST and MSO for SIII

- Large Cryogenic Telescopes in THz
- Direct detectors to be installed.
- Both to situate around S-E L2



# スペース赤外線強度干渉計

## Space Infrared Intensity Interferometry

- 新たなコンセプトの提案
- TRLでなく、CML(Concept Maturity Level)の段階
- 強みは高感度の長基線干渉計
- 弱みは画像合成が実現されていないこと
- 目標とする角度分解能をどこに置くか？
- 将来計画の規模は？