

テラヘルツ干渉計
南極からスペースへ
-超高角度分解能テラヘルツ天文学-

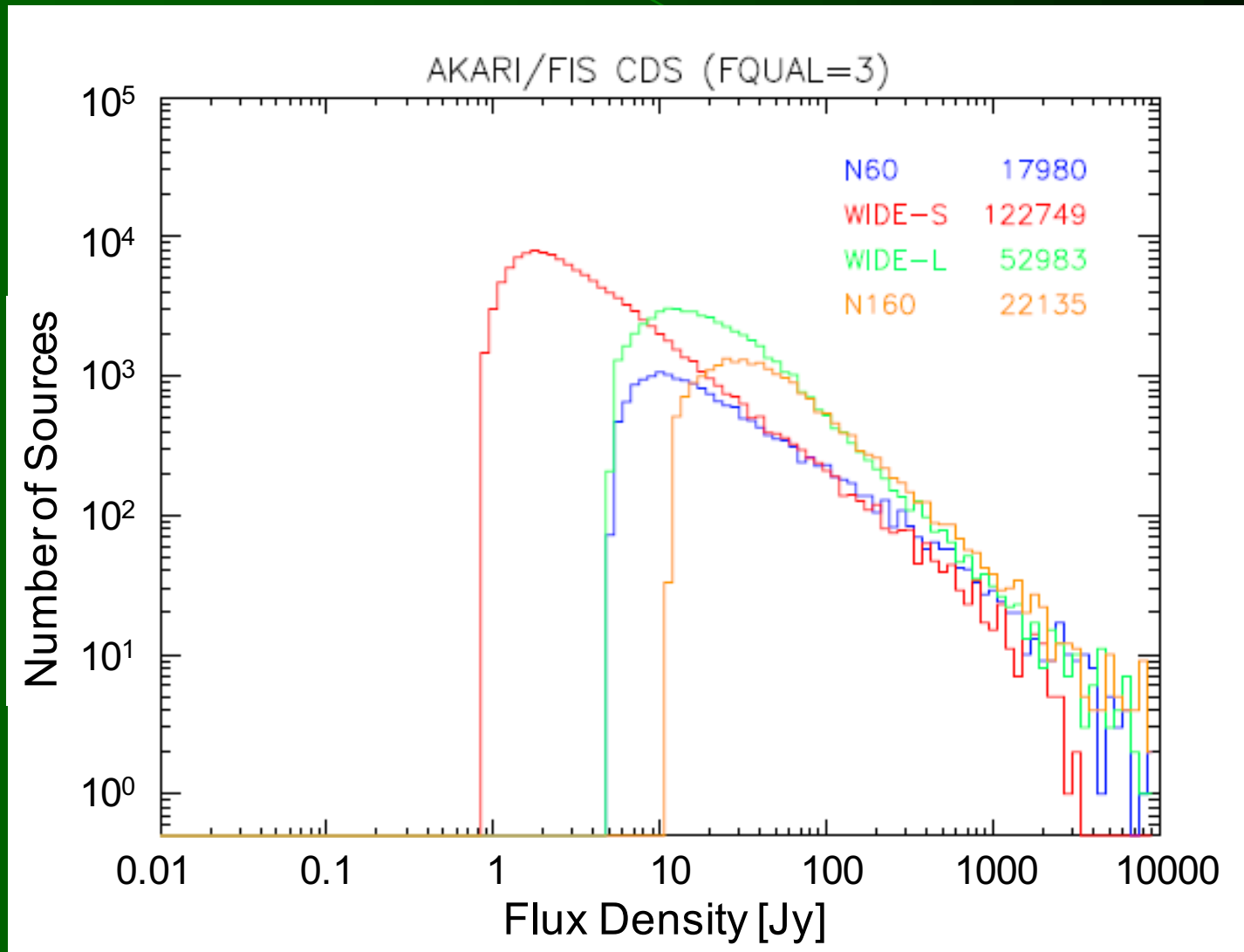
松尾 宏

国立天文台・先端技術センター

IRAS, ISO, AKARI, HSO

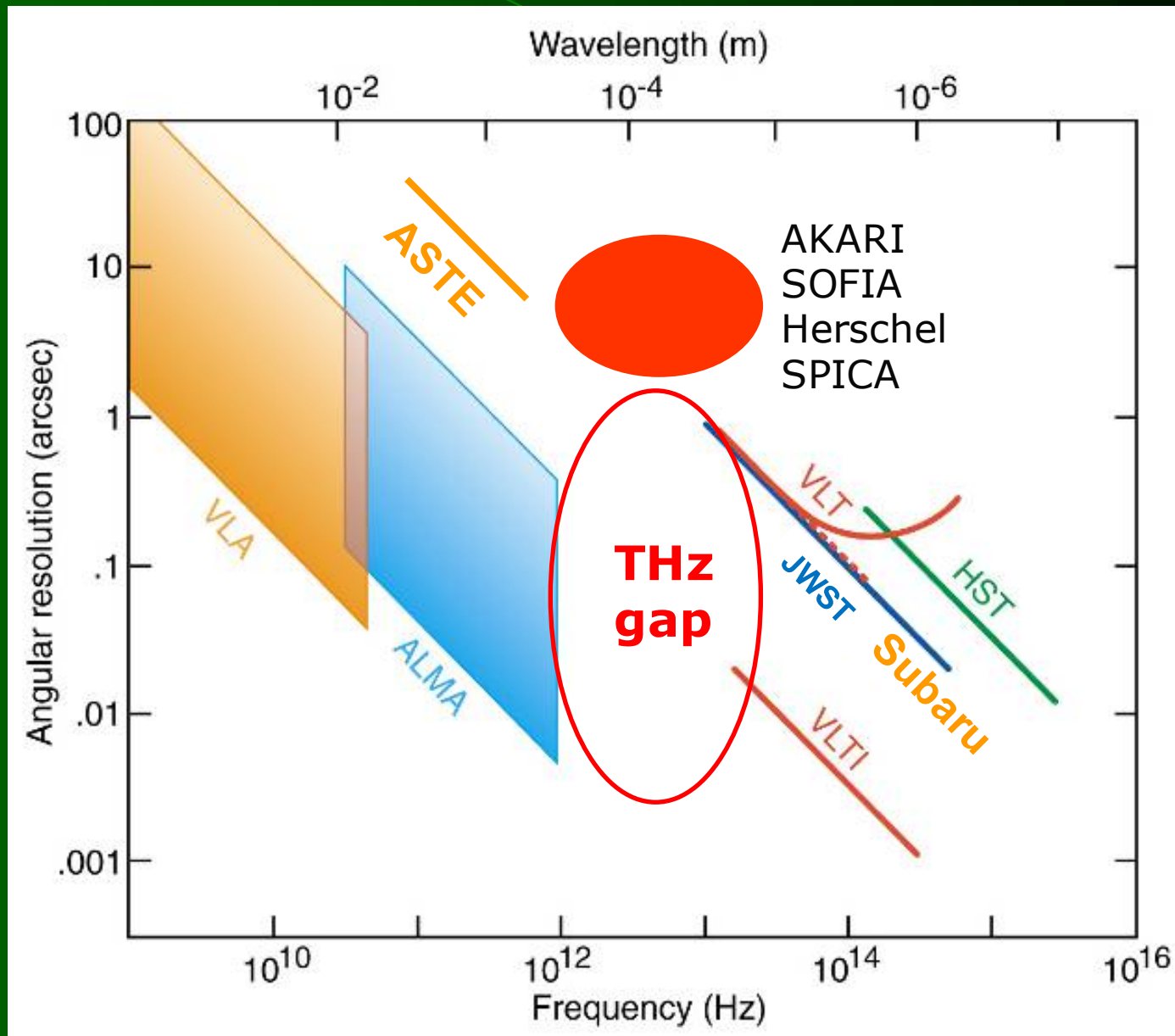
- All sky survey by **IRAS**
 - Debris disk of α Lyr
 - Ultra Luminous IR Galaxies
- FIR spectroscopy by **ISO**
 - PDR by [CII] and [OI]
 - PAH feature
- All sky survey by **AKARI**
 - Deeper, finer, wider than IRAS
- Deep survey and spectroscopy by **HSO**

AKARI FIR Bright Source Catalogue

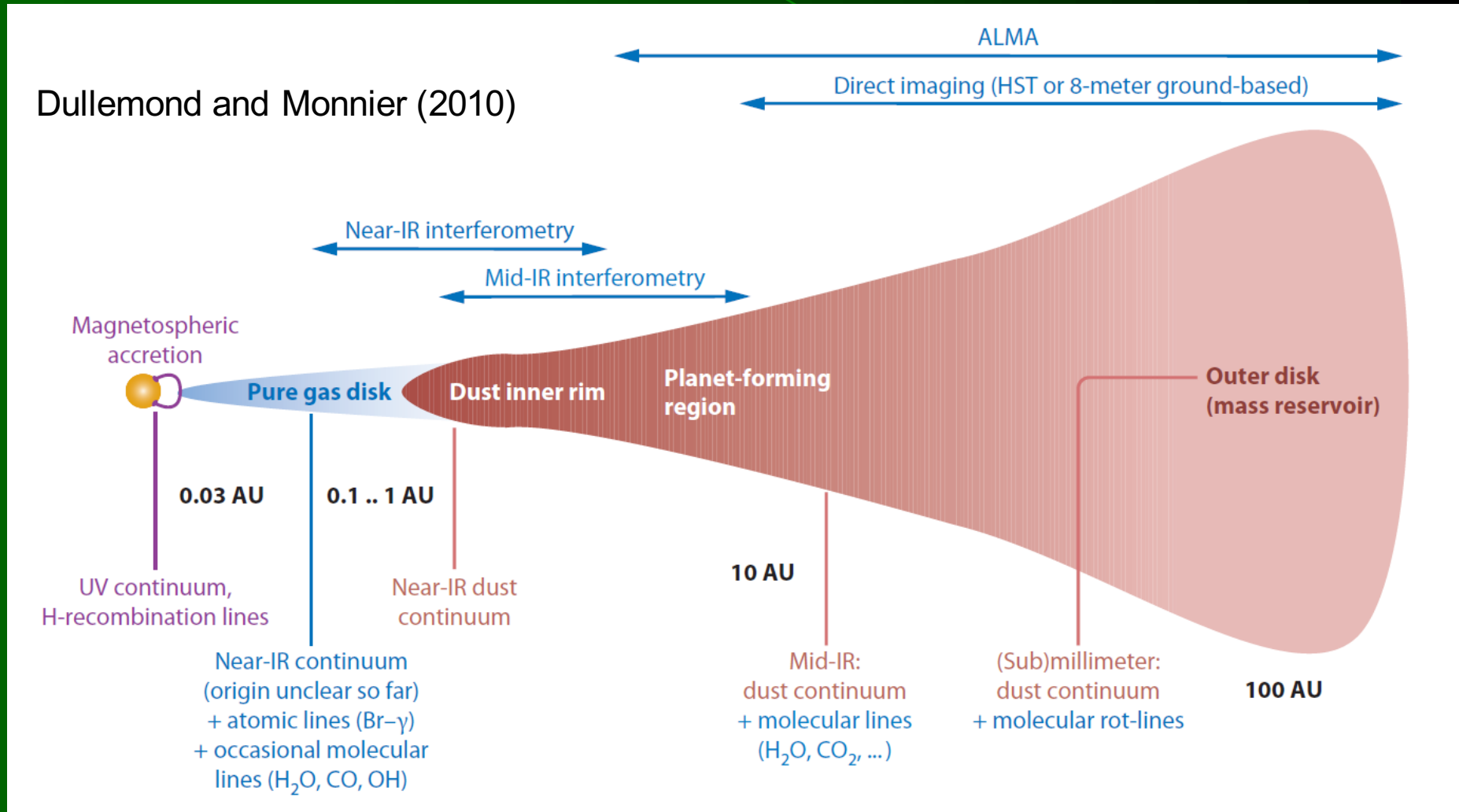


AKARI-FIS Bright Source Catalogue
Yamamura et al. (2010)

THz Gap of Spatial Resolution

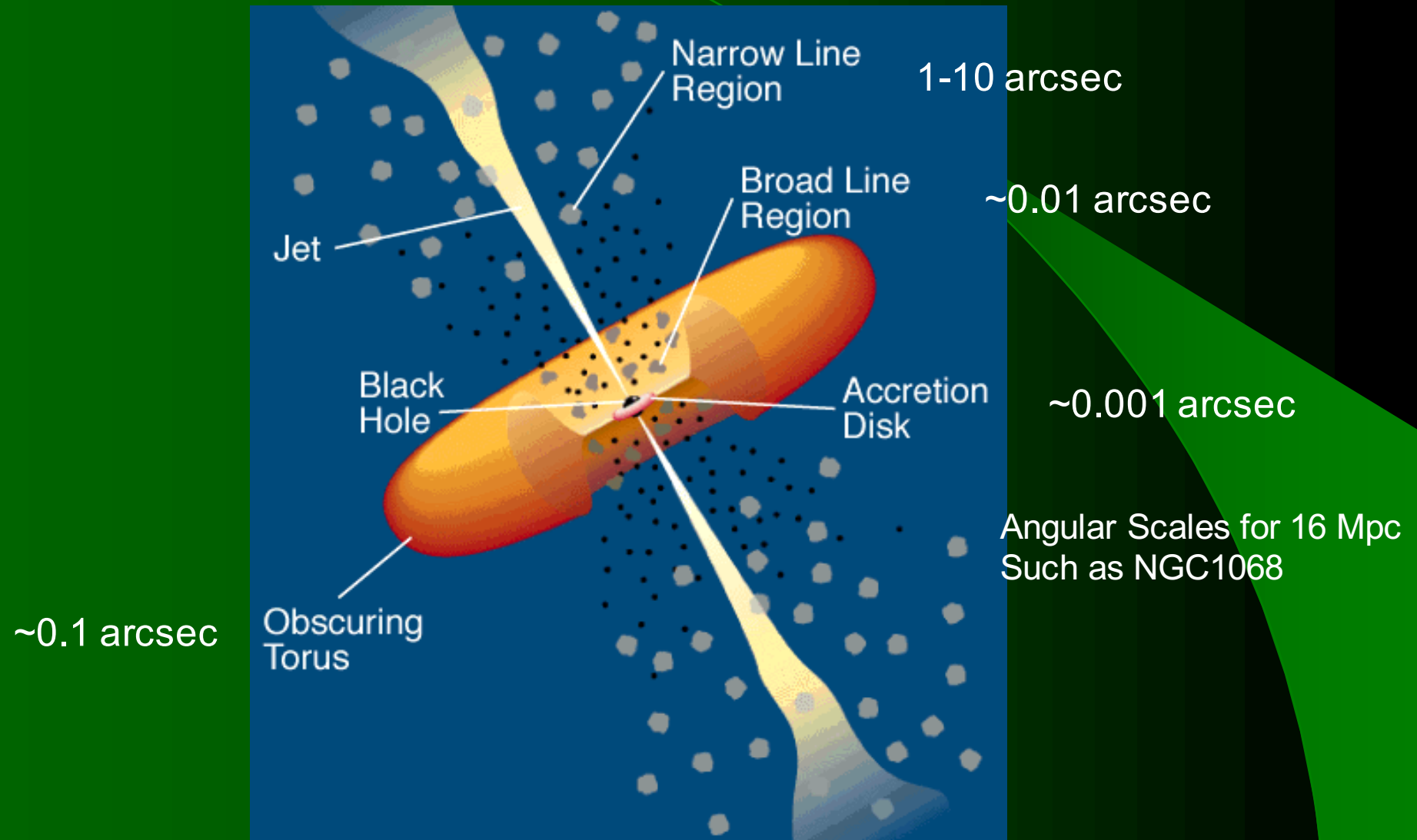


Structure of a protoplanetary disk



Scales are for Taurus and Auriga region

Structure of an AGN



Urry and Padovani (1995)

テラヘルツ干渉計を宇宙へ！

- 大気の制限なし
- 基線長の制限なし
- 直接検出器による超高感度干渉計

- 雑音温度 10 mK、帯域幅 1 THz の干渉計
- テラヘルツ波で 1000 km 以上の基線

周波数 2 THz 帯域幅 1 THz で感度比較

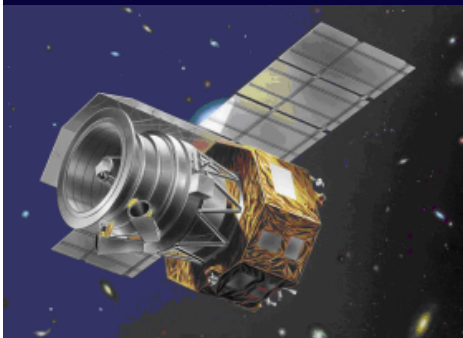
- ヘテロダイン受信機の量子限界

$$\begin{aligned} \text{NEP}_{\text{coherent}} &> h\nu\sqrt{B} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}}] \\ &\approx 1 \times 10^{-15} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}}] \end{aligned}$$

- 直接検出器の限界（背景放射限界）

$$\begin{aligned} \text{NEP}_{\text{direct}} &> h\nu\sqrt{n} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}}] \\ &\approx 5 \times 10^{-19} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}}] \end{aligned}$$

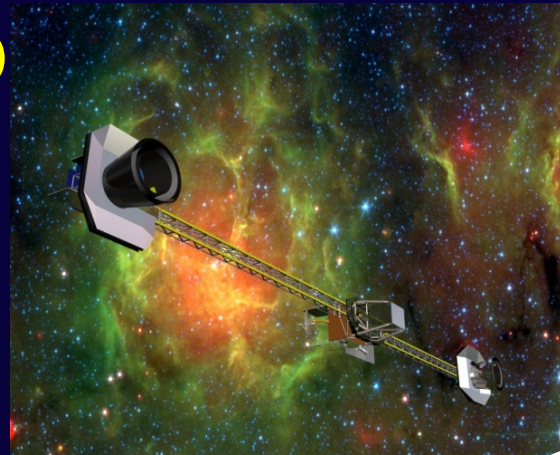
Space THz Interferometer The Road Map



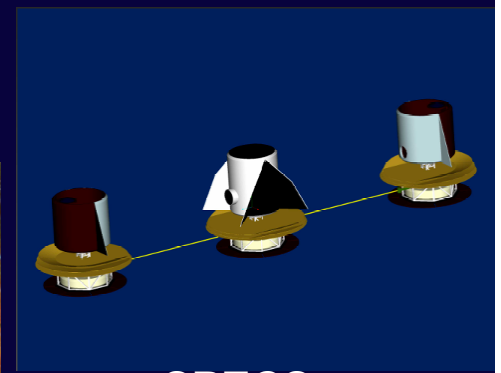
AKARI



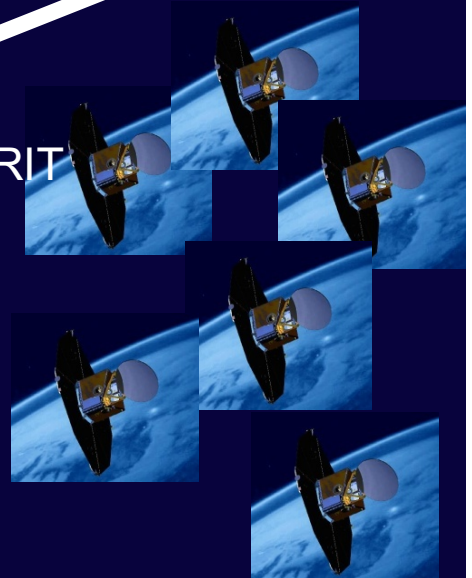
SPICA



SPIRIT



SPECS

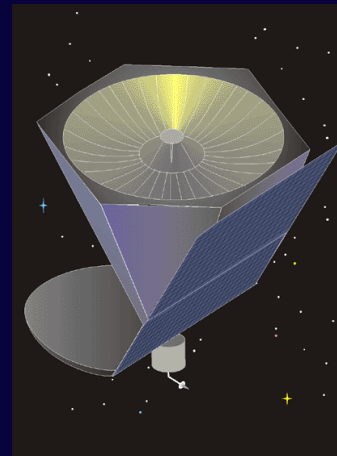


FIRI/ESPRIT

Spitzer
Herschel

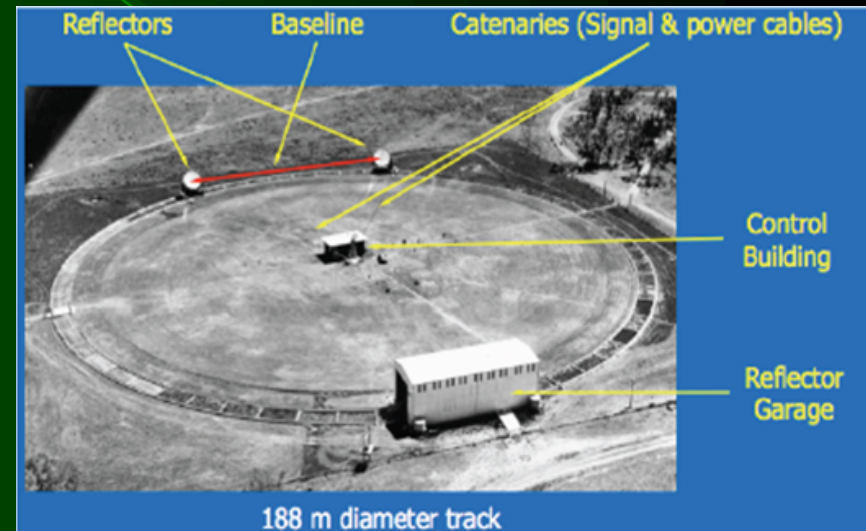


Millimetron



Hanbury-Brown and Twiss 強度干渉計

- 直接検出器
 - 高電子増倍管
- 位相揺らぎに強い
 - 安定な相互相関
- 超長基線が可能
 - 高角度分解能



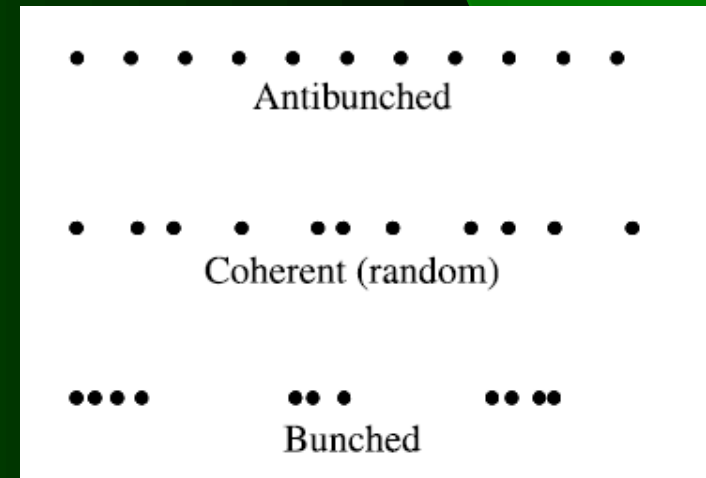
Hanbury-Brown et al. (1974)

光子計数型テラヘルツ干渉計 Photon Counting THz Interferometry

Matsuo, JLTP (2012)

- テラヘルツ帯での光子バンチ測定
 - 高い干渉効率 (輝度温度100 K以上)
- 光子バンチを用いた遅延時間測定
 - 複素ビジビリティーの取得

THz Photons are bunched !



太陽電波による強度干渉計実験

Ezawa, Matsuo et al. (2015)

野辺山電波ヘリオグラフ

80 cm antennas 16台を用いる

HEMT受信機 $T_{rx} = 360$ K

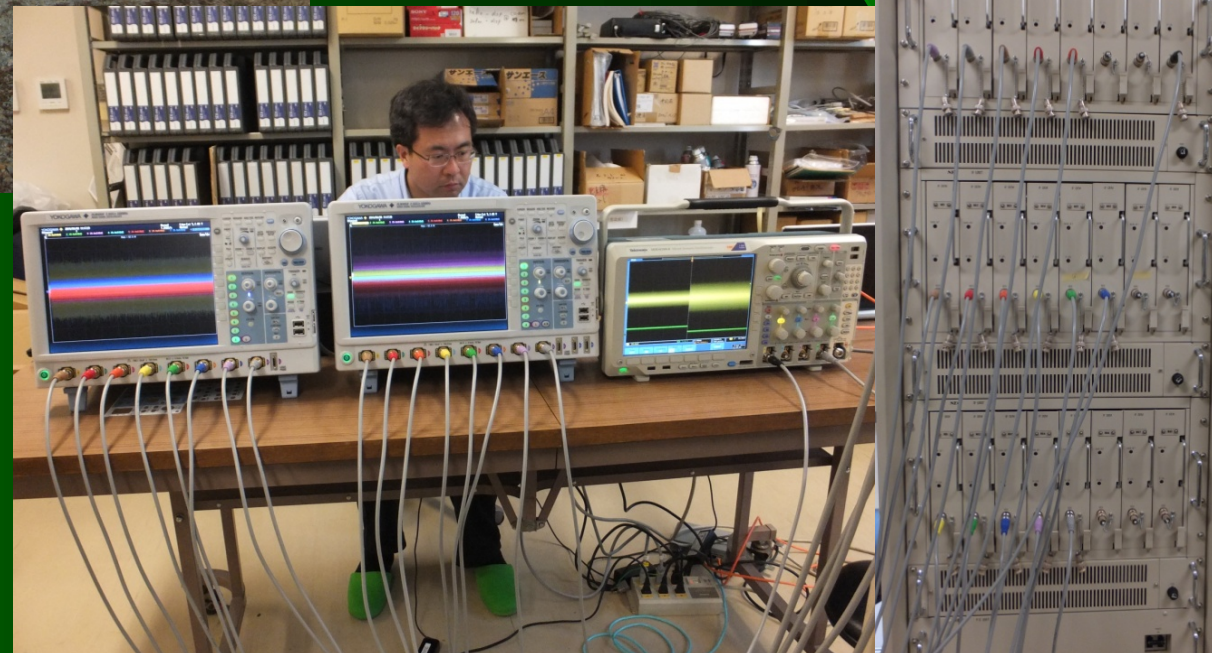
RF 17 GHz

IF 200 MHz

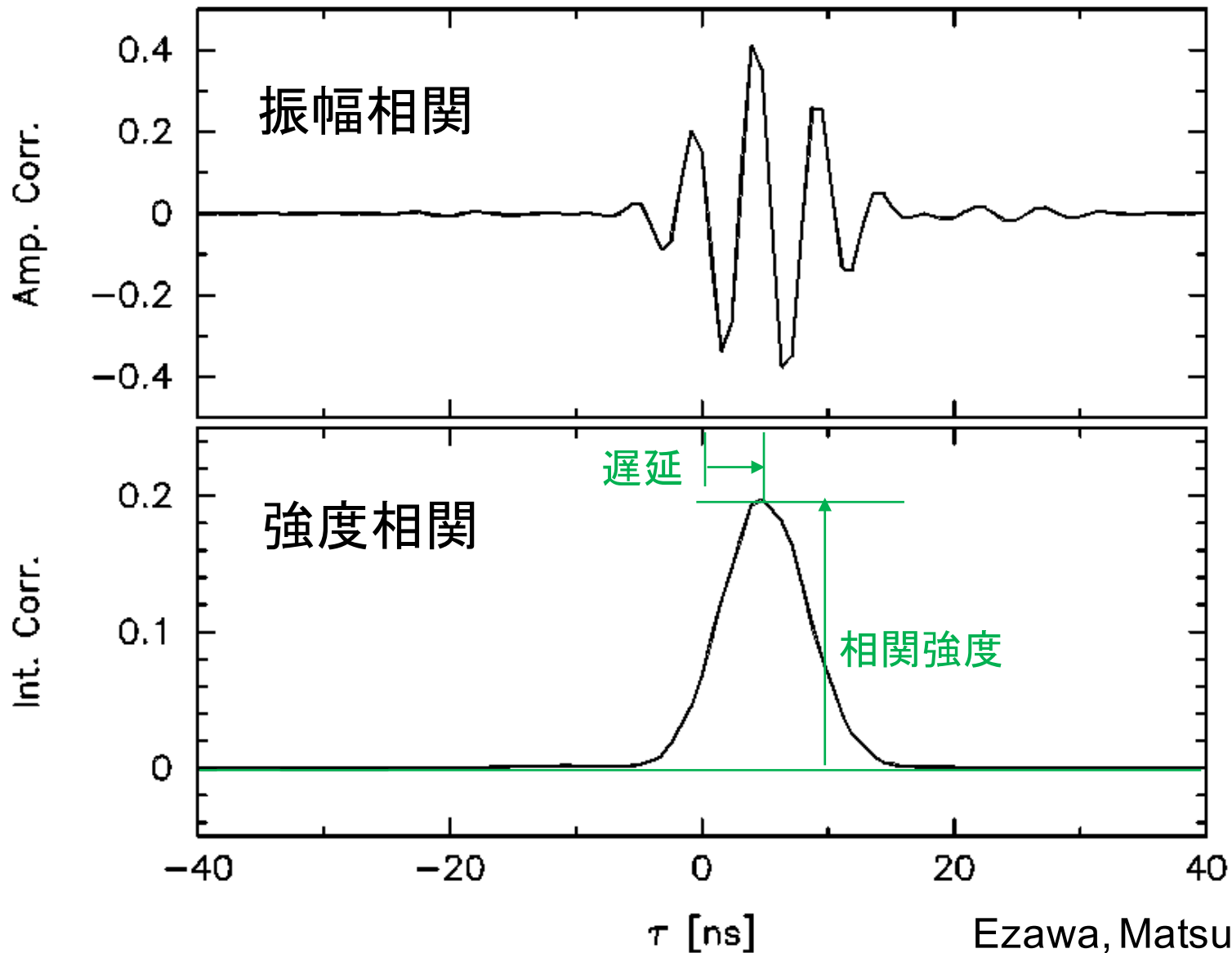
BW 100 MHz



横河電機DLM4000
2x 8ch 1.25 G sample/sec
帯域幅 500 MHz
16chの中間周波信号
50 msecの連続データ記録

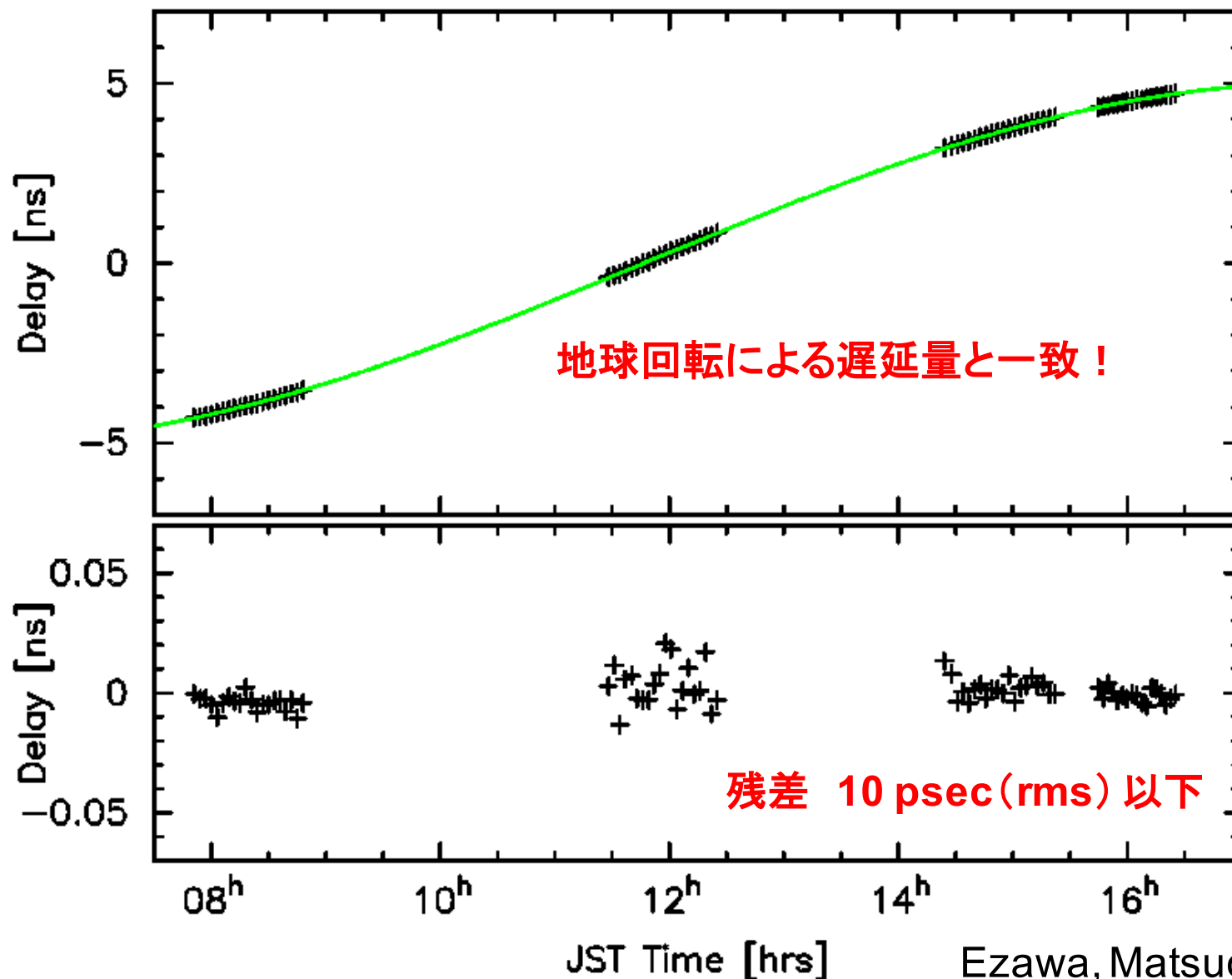


野辺山電波ヘリオグラフ(17GHz)を用いた 相互相関の例



遅延時間の時間変化

最短基線での平均値

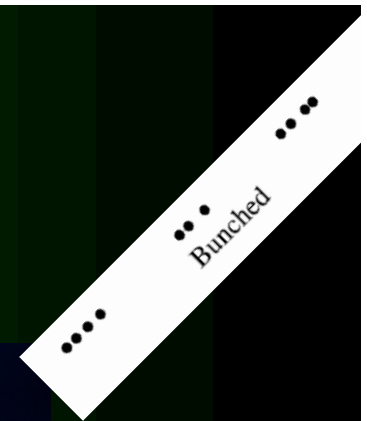
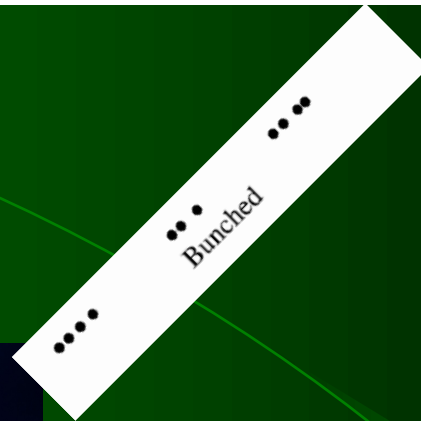


強度相関型干渉計の特徴

- 直接検出器による高感度観測
 - 受信機量子雑音がない広帯域検出器
- 位相揺らぎの影響を受けない
 - 相関時間は帯域幅で決まる ($\tau \sim 1/\Delta\nu$)
- 独立した望遠鏡による干渉計観測
 - VLBIと同様に超長基線観測が可能

Application of VLBI technology

Photon Counters
Atomic clocks
Recorders



Recorder
B > 1GHz

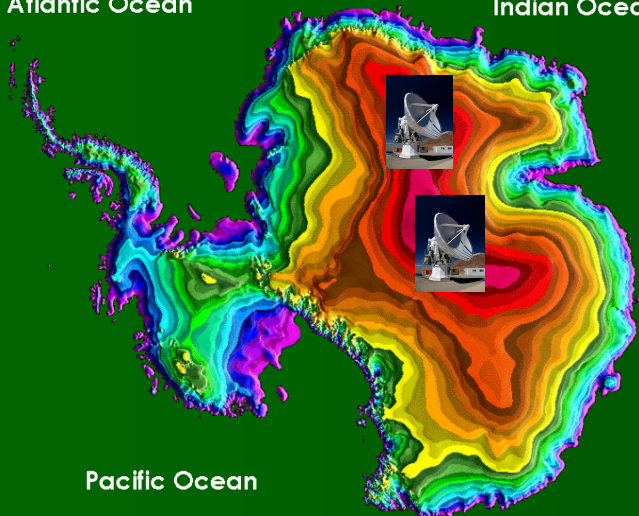
Recorder
B > 1GHz

Calculate correlation and delay

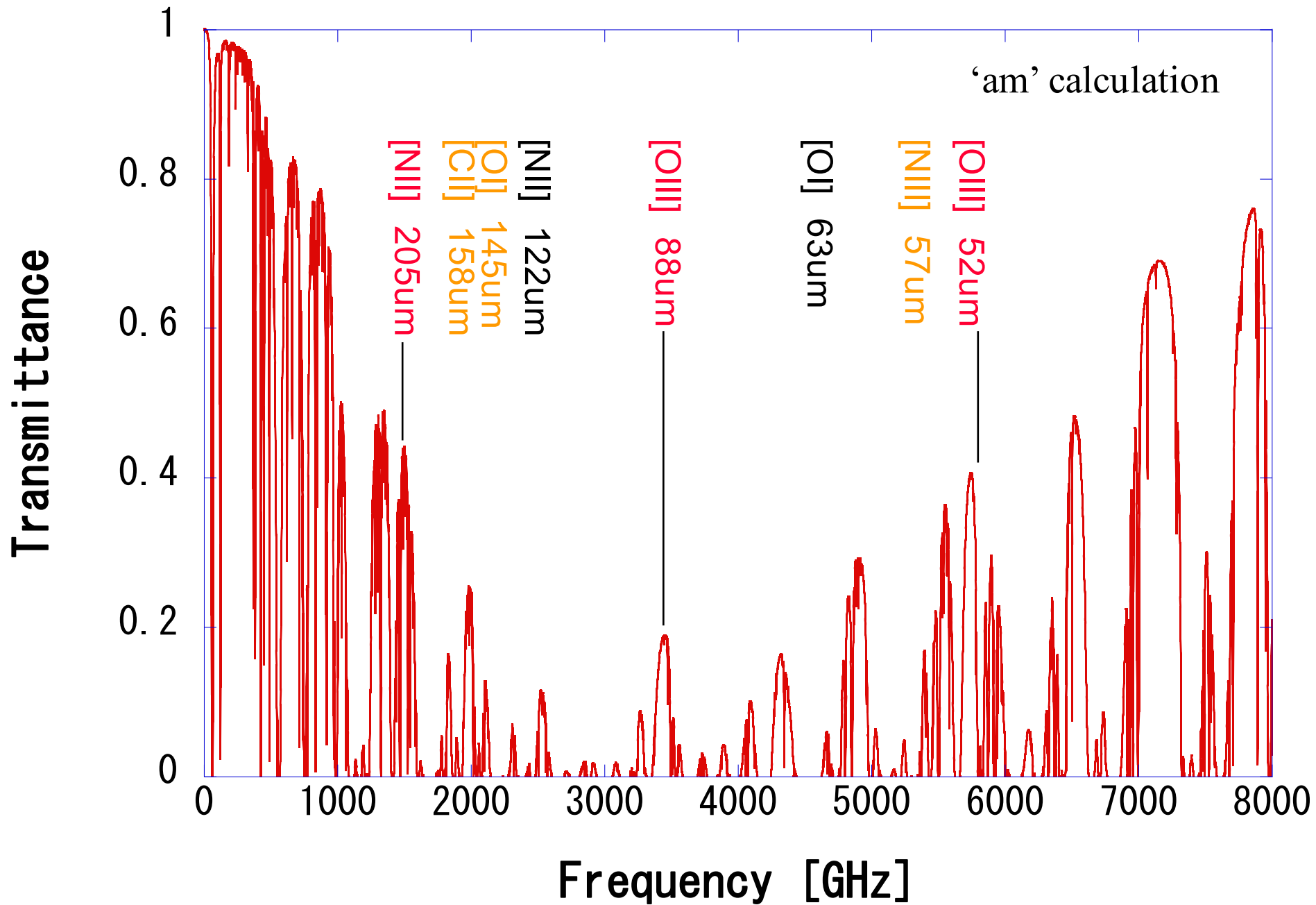
Atlantic Ocean

Indian Ocean

Pacific Ocean



Dome_A_winter_75um



南極テラヘルツ干渉計の感度 口径50cm 2素子での見積もり

- [OIII] 88 μm , 52 μm 大質量星形成領域
 - アンテナ温度 100K, $B = 30 \text{ MHz} \rightarrow 2 \times 10^{-14} \text{ W}$
 - NEP $\sim 1 \times 10^{-17} \text{ W/Hz}^{0.5}$
 - 約 1 photon/bunch, $S/N \sim \eta \cdot 0.3$ ($t = 30 \text{ nsec}$)
- 200 μm 連続波観測
 - 100 Jy source, $B = 100 \text{ GHz} \rightarrow 2 \times 10^{-14} \text{ W}$
 - NEP $\sim 1 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$
- 40 μm 連続波観測
 - 100 Jy source, $B = 1 \text{ THz} \rightarrow 2 \times 10^{-13} \text{ W}$
 - NEP $\sim 2 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$

南極テラヘルツ干涉計

- ヘテロダイン干涉計
- ボロメータ干涉計
- 強度相関干涉計

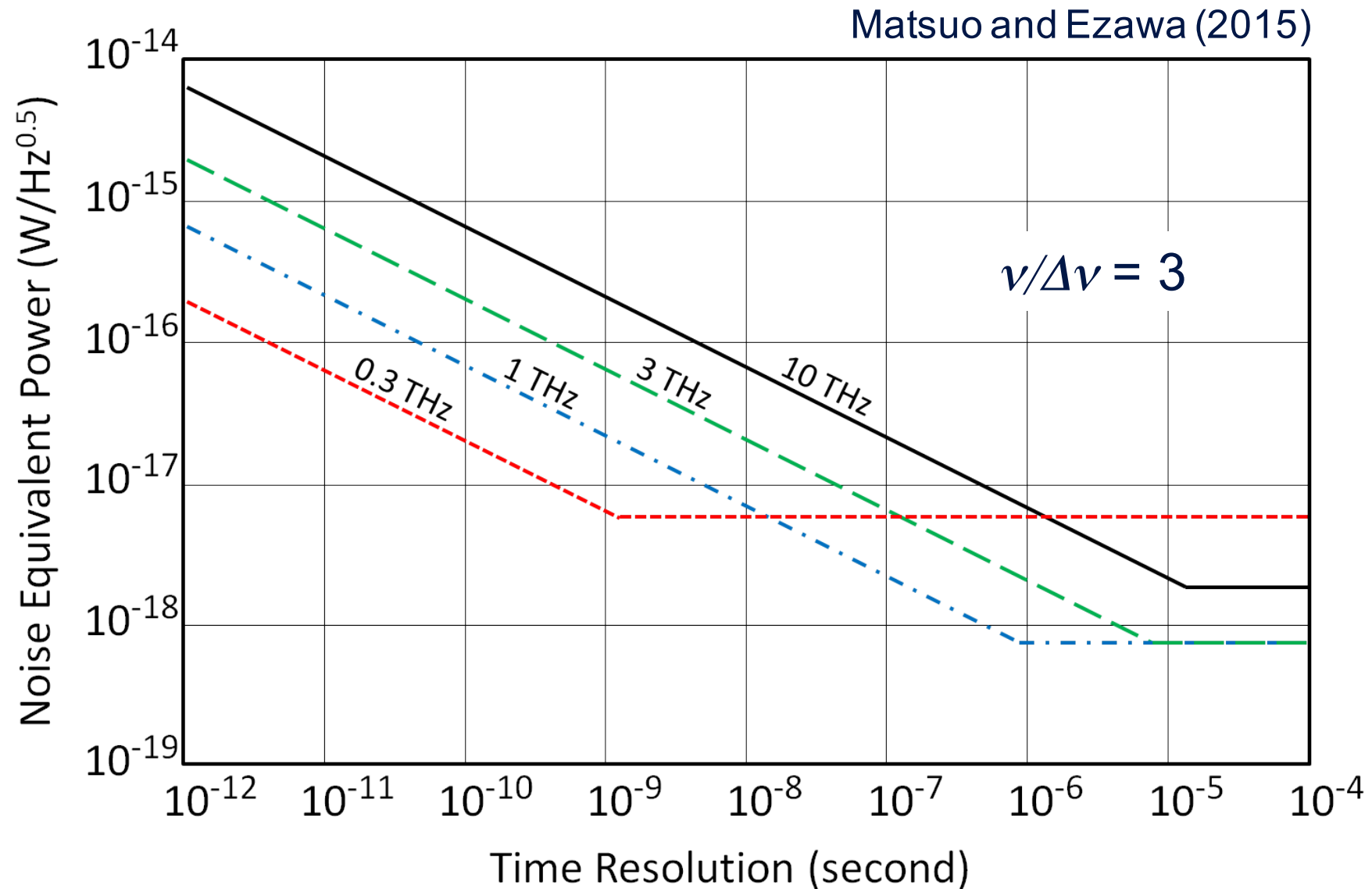
いずれも、
感度は大気雑音で
制限される

検出器の帯域幅と基線長に制限がある。

テラヘルツ強度干渉計を宇宙へ！

- 大気の制限なし
- 基線長の制限なし
- 光子計数による超高感度干渉計
- 雑音温度 **10 mK**、帯域幅 **1 THz** の干渉計
- テラヘルツ波で **1000 km** 以上の基線
- マイクロ秒角で **300 K** の天体画像合成

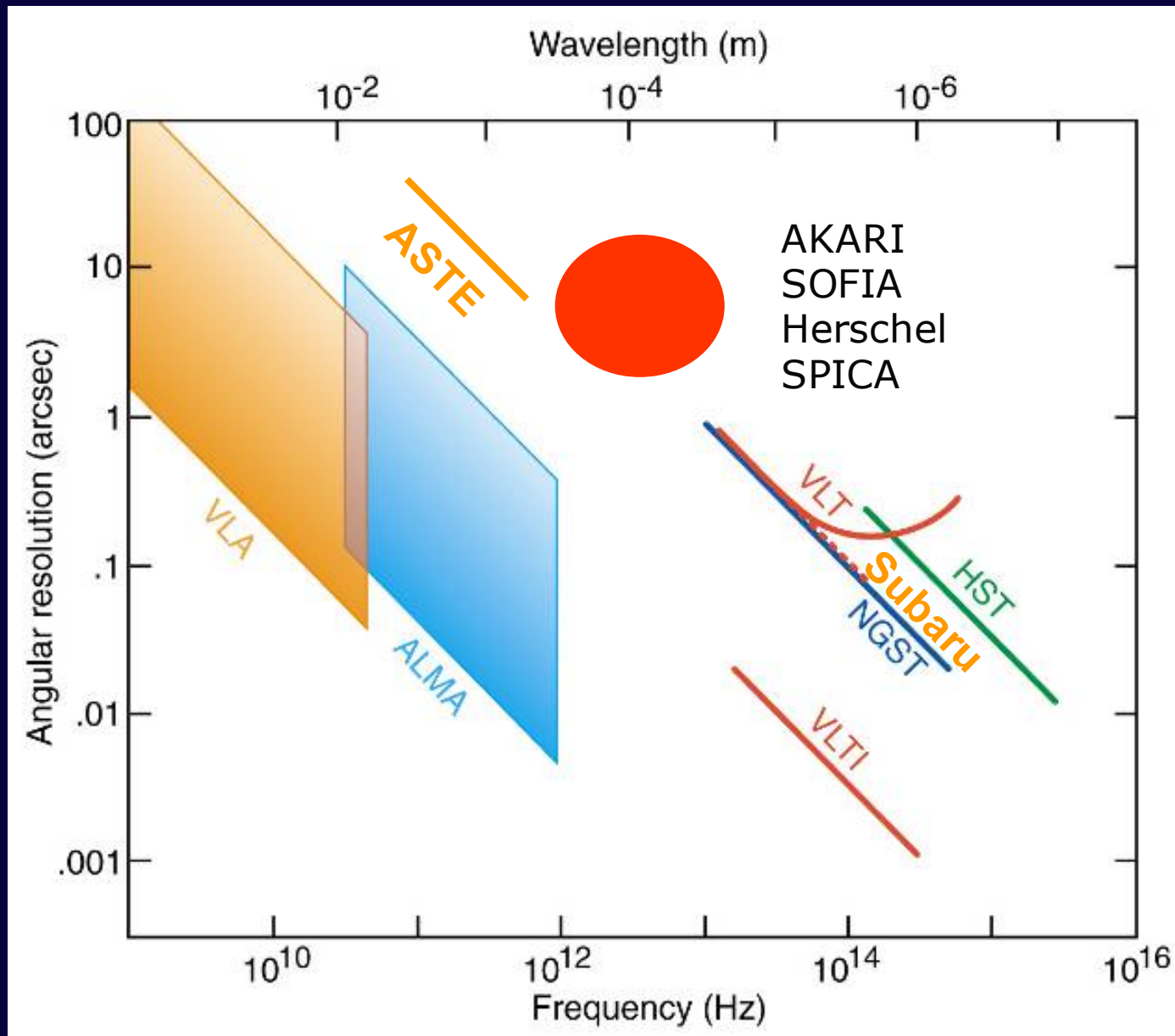
NEP for photon counting vs. time resolution



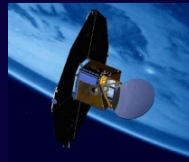
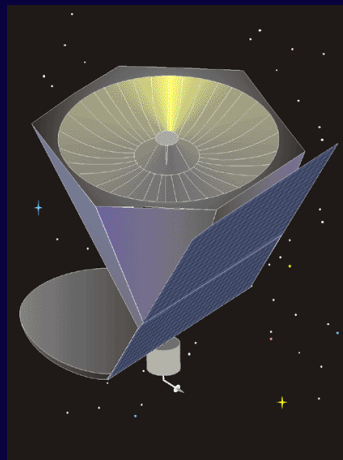
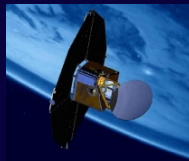
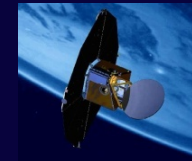
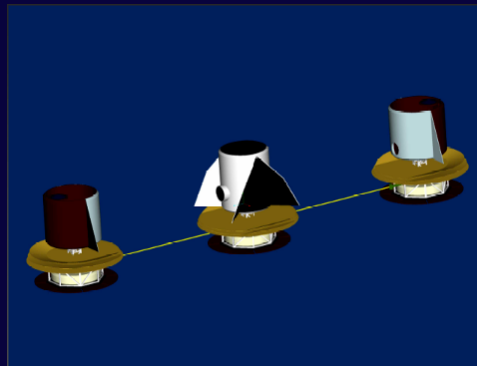
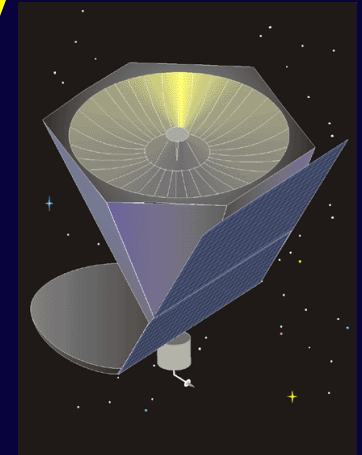
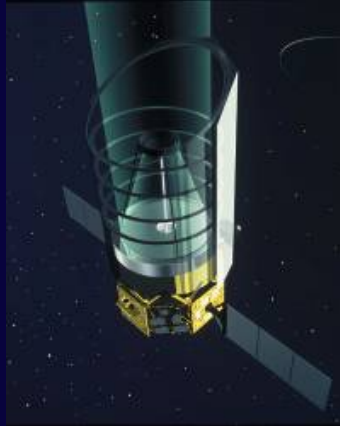
テラヘルツ波を用いた 超高空間分解能観測

- 「あかり」天体の高空分解能観測
 - 30-60秒角からミリ秒角、マイクロ秒角へ
- 活動銀河核の超解像度観測
 - 非熱放射、原子微細構造線の観測
- 恒星の観測
 - 熱放射、原子微細構造線の観測
- 原始惑星系円盤の超解像度観測
 - 1 AU以内の円盤構造

THz Gap of Spatial Resolution



A Concept of Large Space Terahertz Interferometry



Acknowledgements to

江澤 元, 柴崎清登, 岩井一正, 下条圭美,
篠原徳之, 本間希樹, 木内 等(国立天文台)
村田泰宏, 土居明広, 和田武彦(宇宙研)
松下聡樹(ASIAA)