

光赤天連シンポジウム

2030年代の中型計画をどうするか

惑星間宇宙望遠鏡

IPST – Interplanetary Space Telescope

松浦 周二 (関西学院大学)

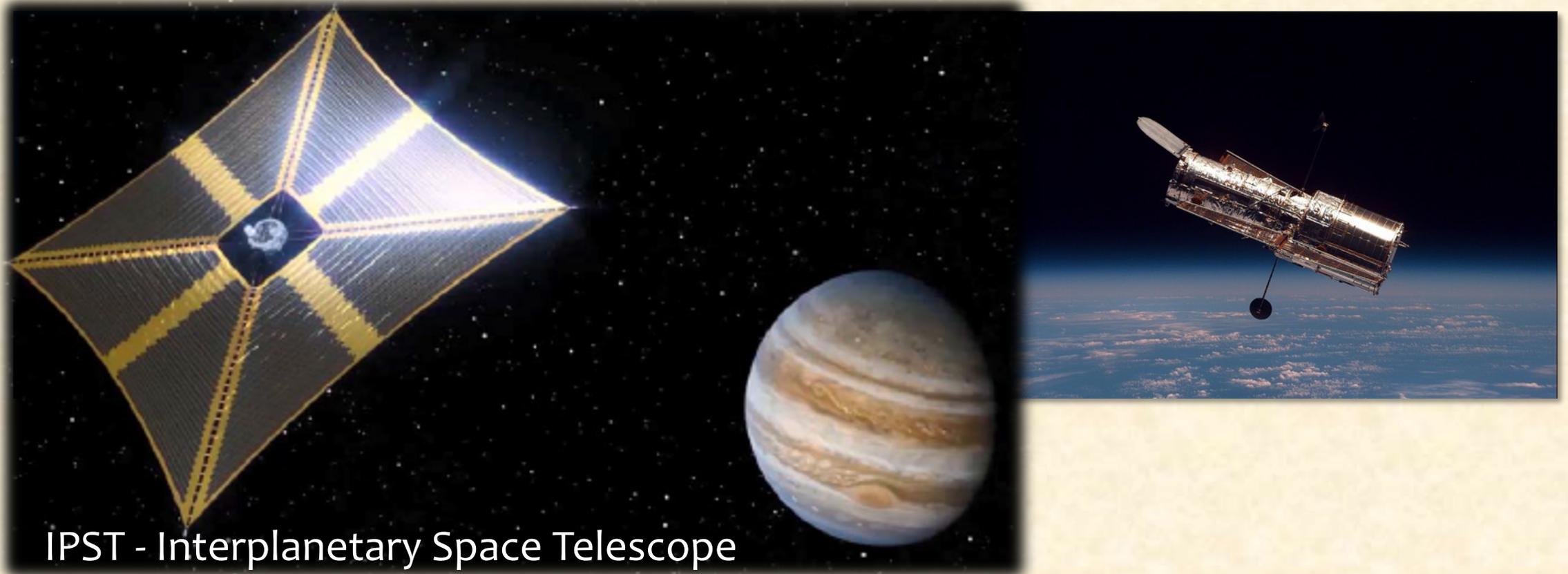
EXZIT & IPST study group

CIBER & COBAND collaboration



IPSTのコンセプト

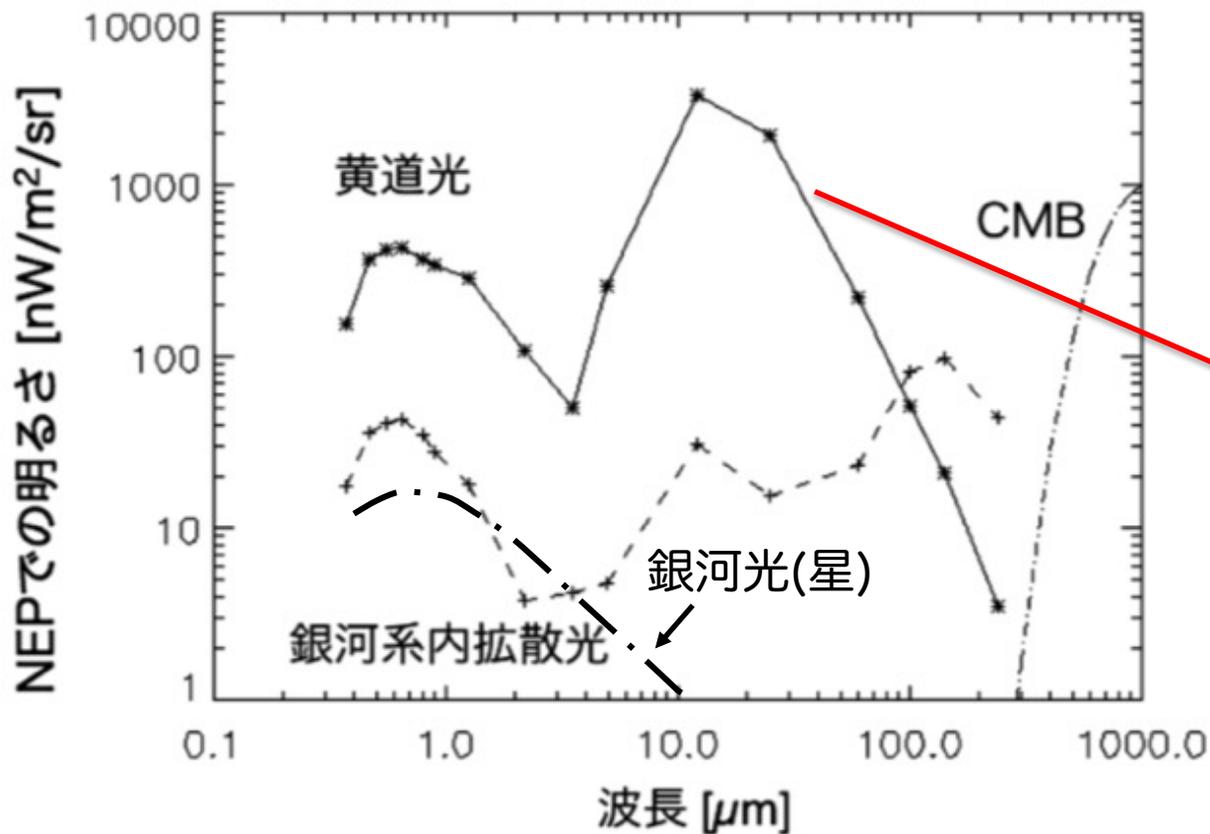
天文学はより良い観測サイトを求め高地へ，そして宇宙空間へ。
さらに将来の宇宙望遠鏡は惑星間空間へ。



IPST - Interplanetary Space Telescope

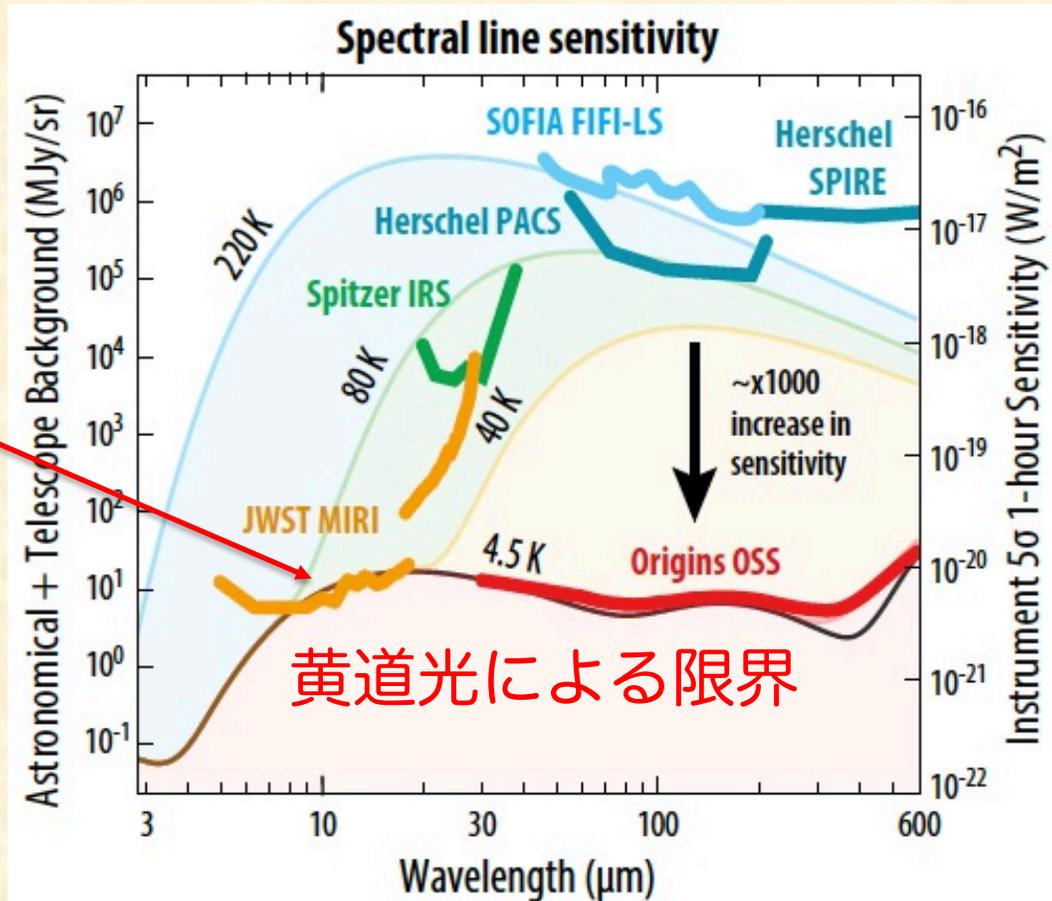
地球近傍軌道望遠鏡の限界 - 黄道光による感度制限

地球から見た空の明るさ



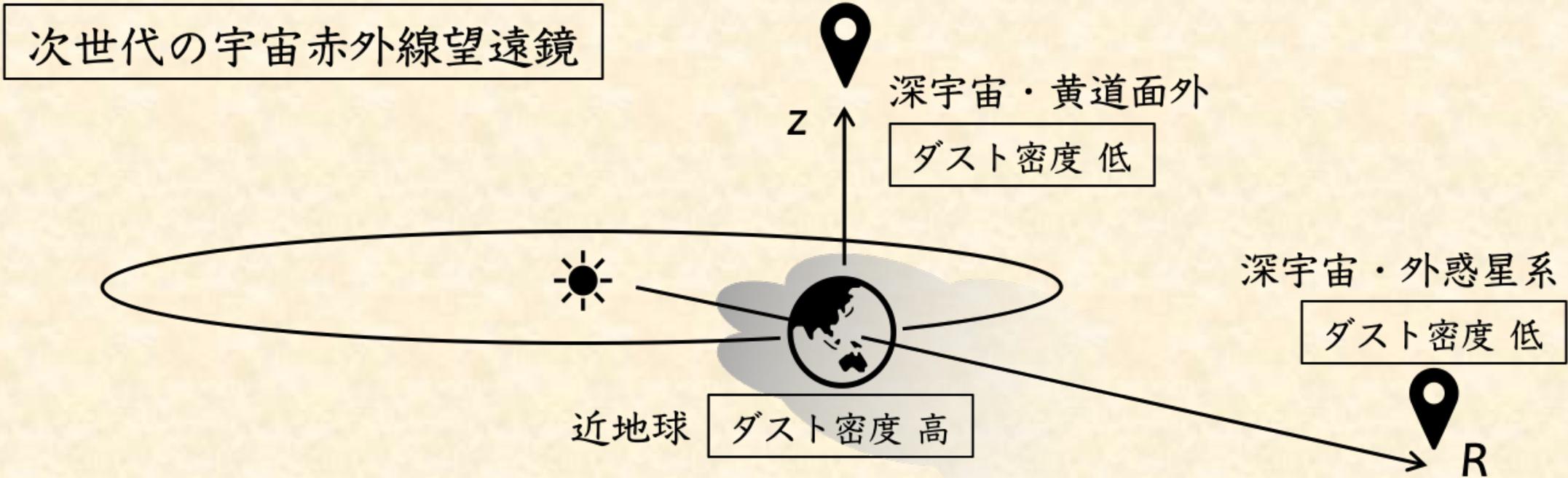
天文月報 2019年5月号 津村 & 松浦

将来の近地球赤外望遠鏡の感度



from OST mission concept study report

限界突破 - 深宇宙軌道での黄道光の低減



$R > 3\text{au}$ / $z > 1\text{au}$ の惑星間空間では黄道光が地球近傍の 1%以下 @MIR



- 点源のBackground-limited sensitivityを10倍以上改善
- 拡散放射はかつてない高い測光精度が得られる

IPSTの科学目的 – 宇宙赤外線背景放射

- 究極精度での全赤外域の背景放射(CIB)の分光・マッピング
- 点源分解できない宇宙初期放射をCIBとして検出

□ 近赤外域 NIR

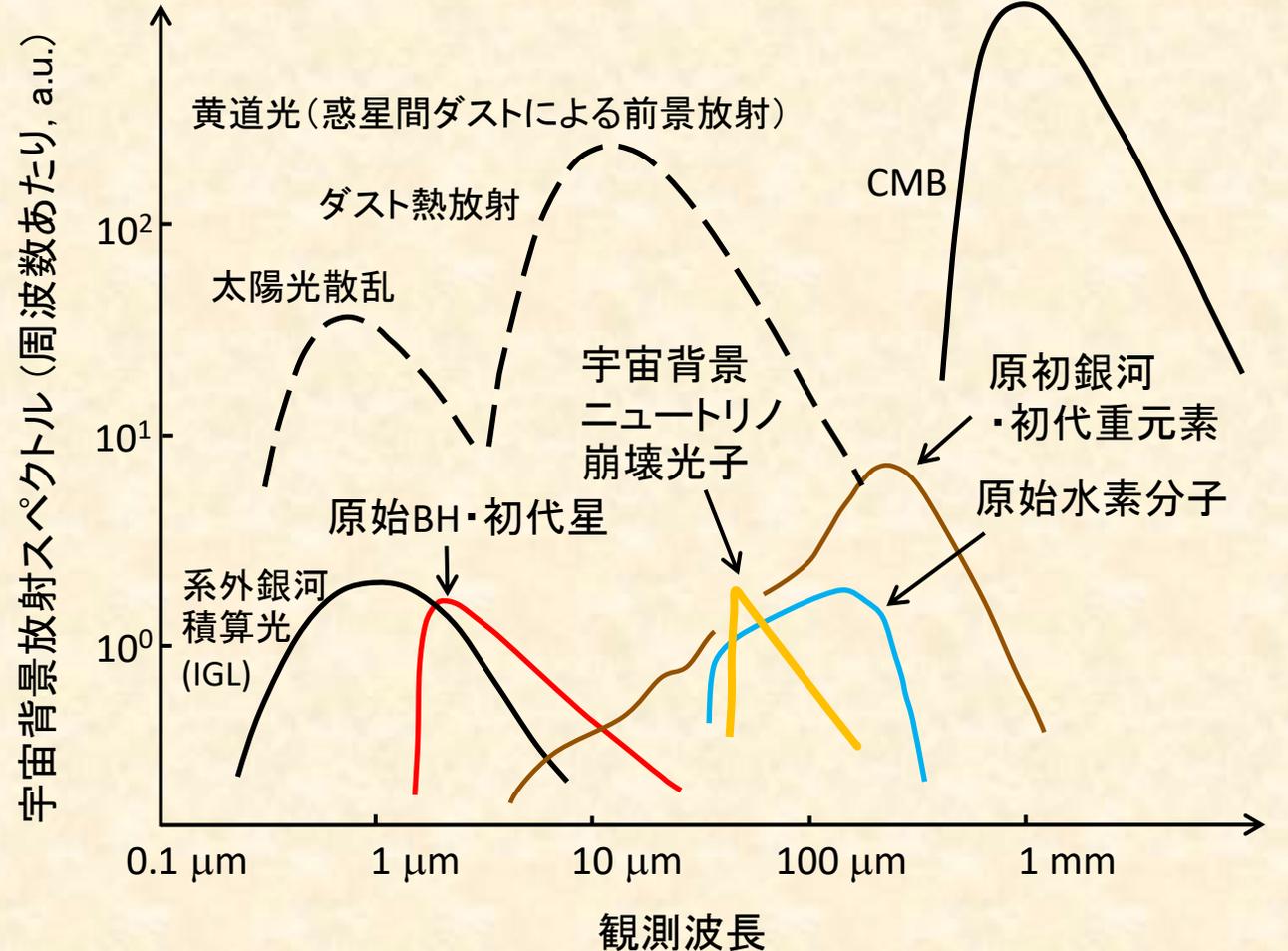
- CIB超過問題の解明
- 初代星/PBH

□ 中赤外域 MIR

- 背景放射の初検出
- 原初 銀河/AGN

□ 遠赤外域 FIR

- 背景ニュートリノ崩壊光子
- 原始水素分子収縮
- 初代重元素



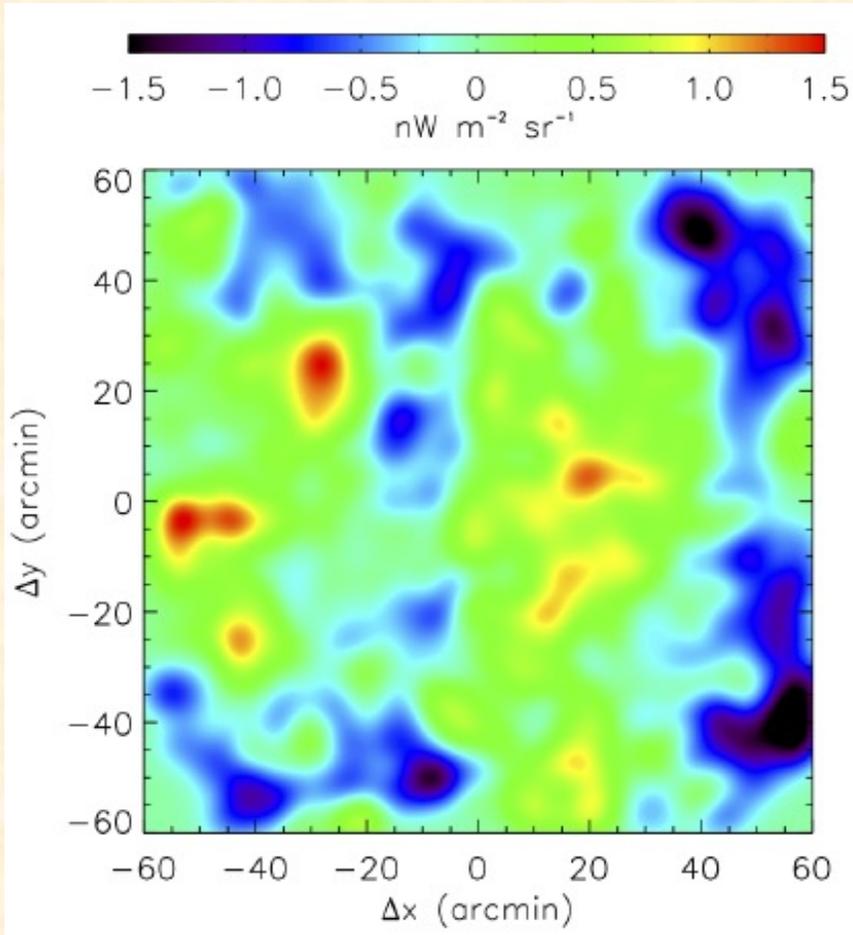
近赤外CIB – 再電離期の探査可能性

これまでの近赤外CIB観測

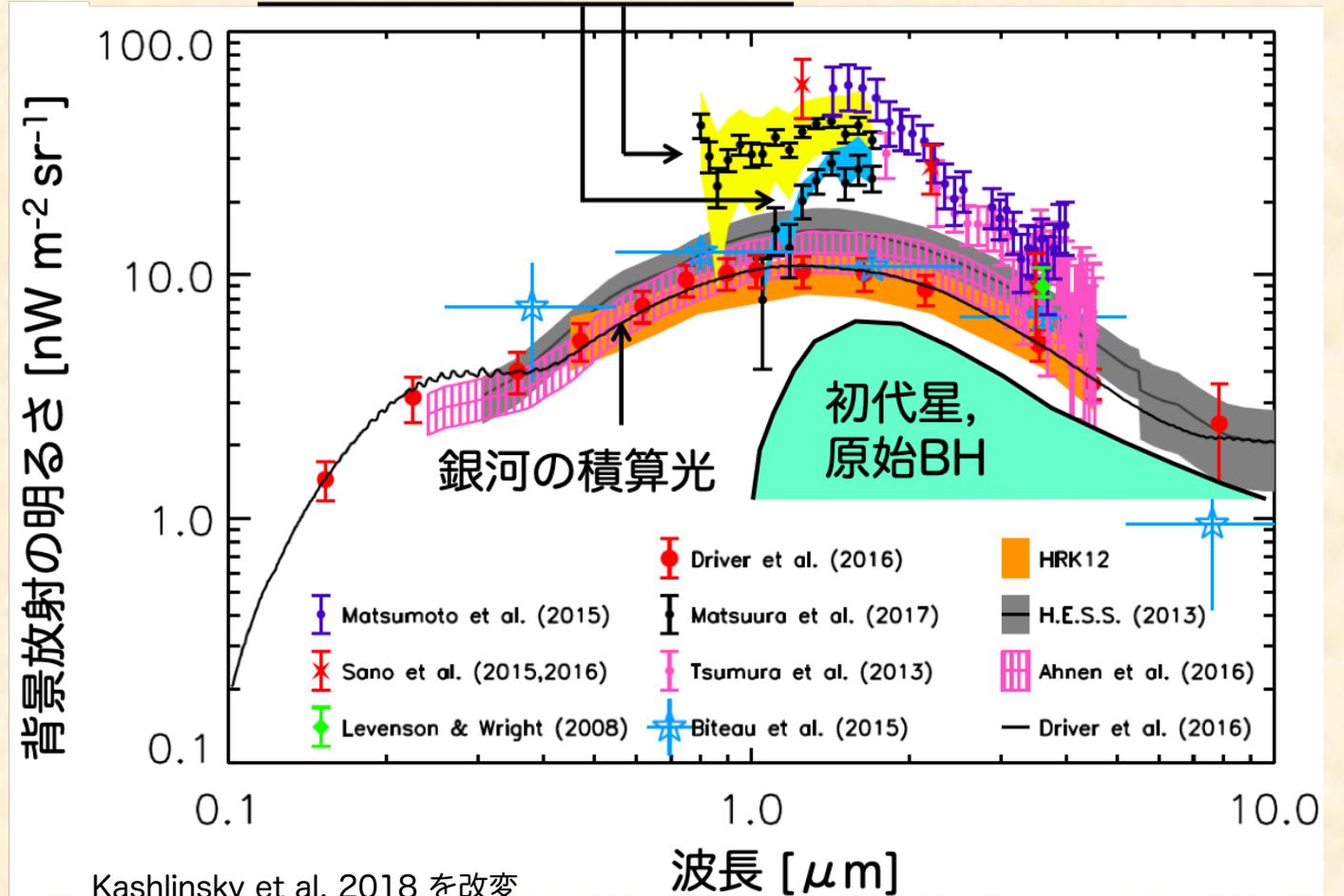
黄道光等方成分(Sano+ 2020, Korngut+ 2022)を考慮しても銀河積算光より2倍程度明るい

- 銀河ハロ一星(IHL)
- 未発見の矮小銀河
- 再電離期(EoR)

Zemcov et al. Science 2014



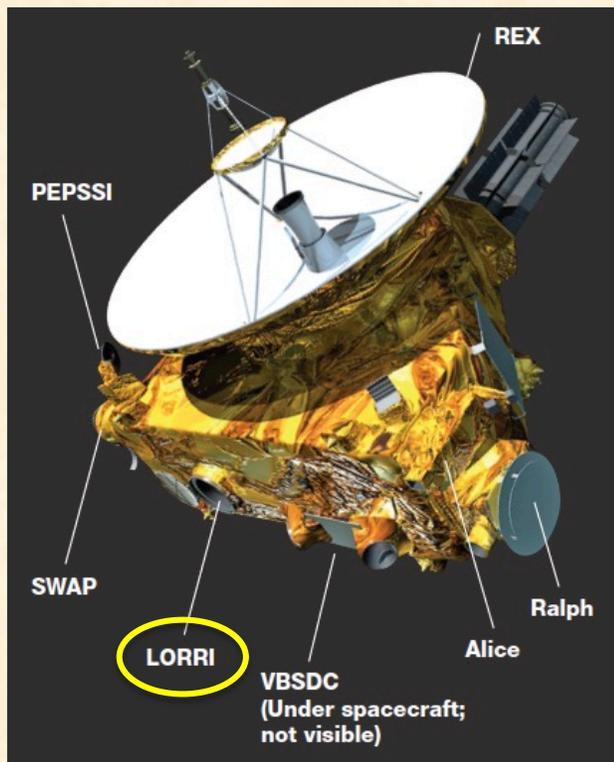
Matsuura et al. ApJ 2017



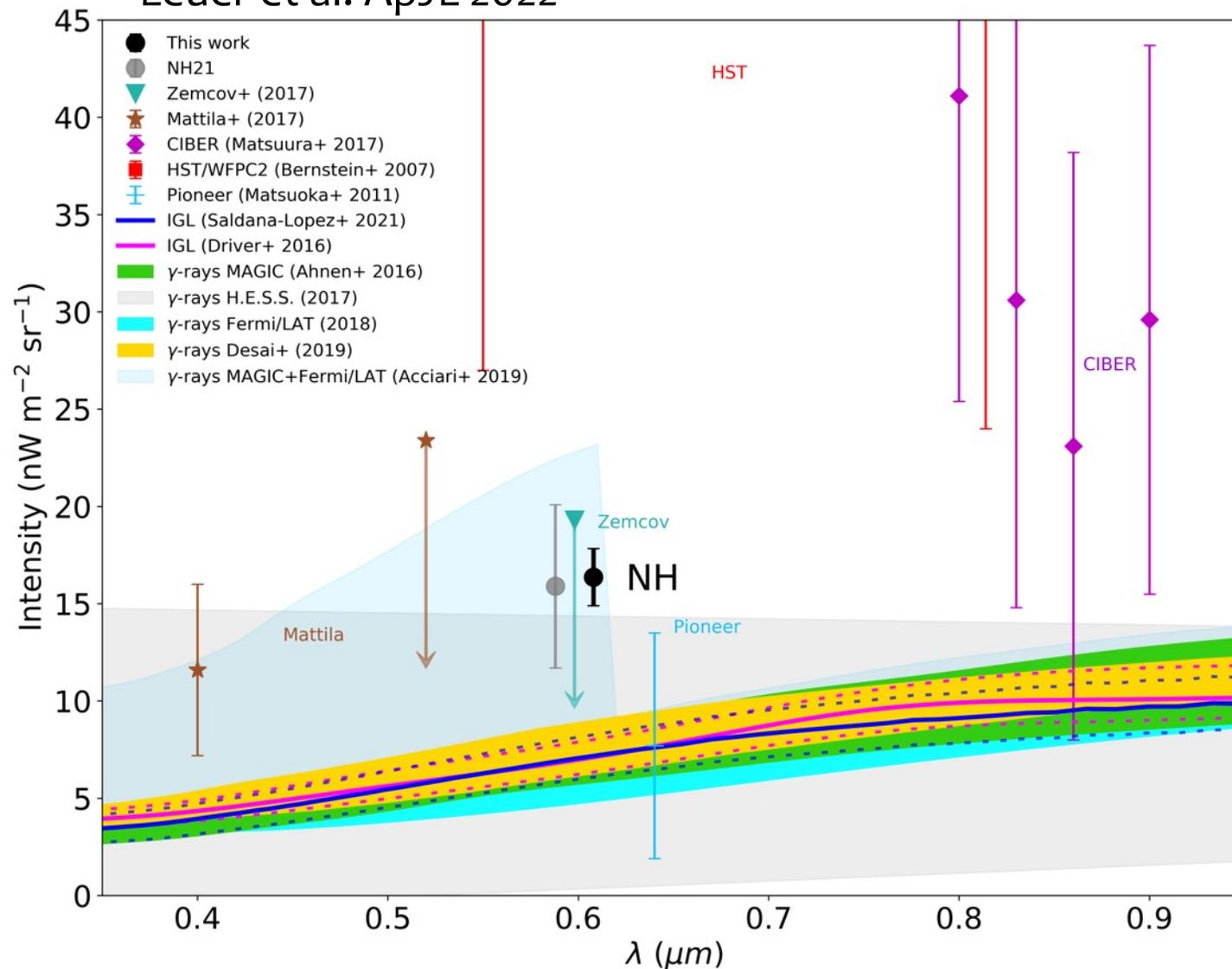
Kashlinsky et al. 2018 を改変

可視光背景放射(COB)にも超過が見つかった

- New Horizons (R = 51.3 AU)
- 黄道光寄与がないCOB観測
- 銀河積算光の >2 倍明るい
 - NIRの結果と同様



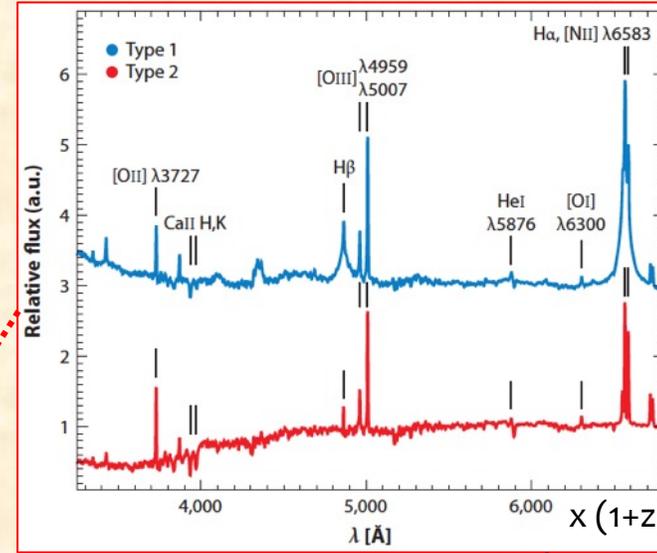
Leuer et al. ApJL 2022



中赤外CIBによる再電離天体の検証

近・中赤外SEDからPBH説を検証

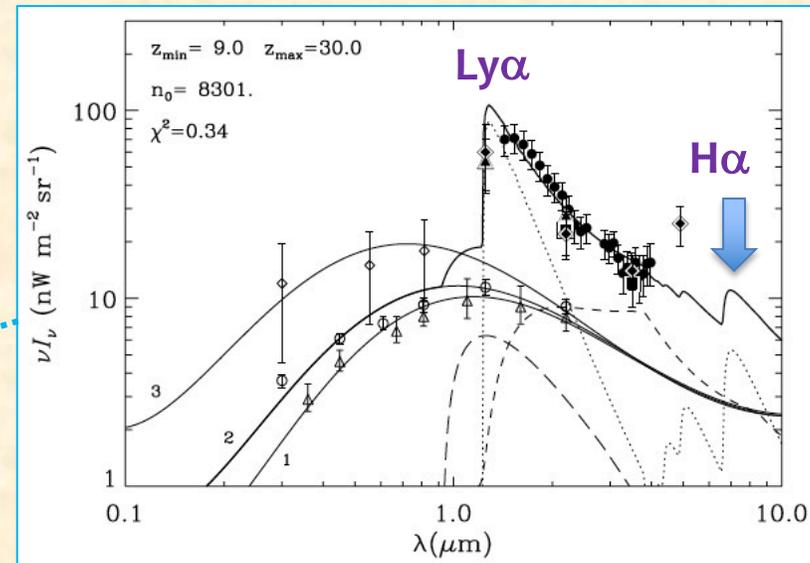
➤ CIBER-MIRによる試行(2021年6月CIBER-2打上げ)



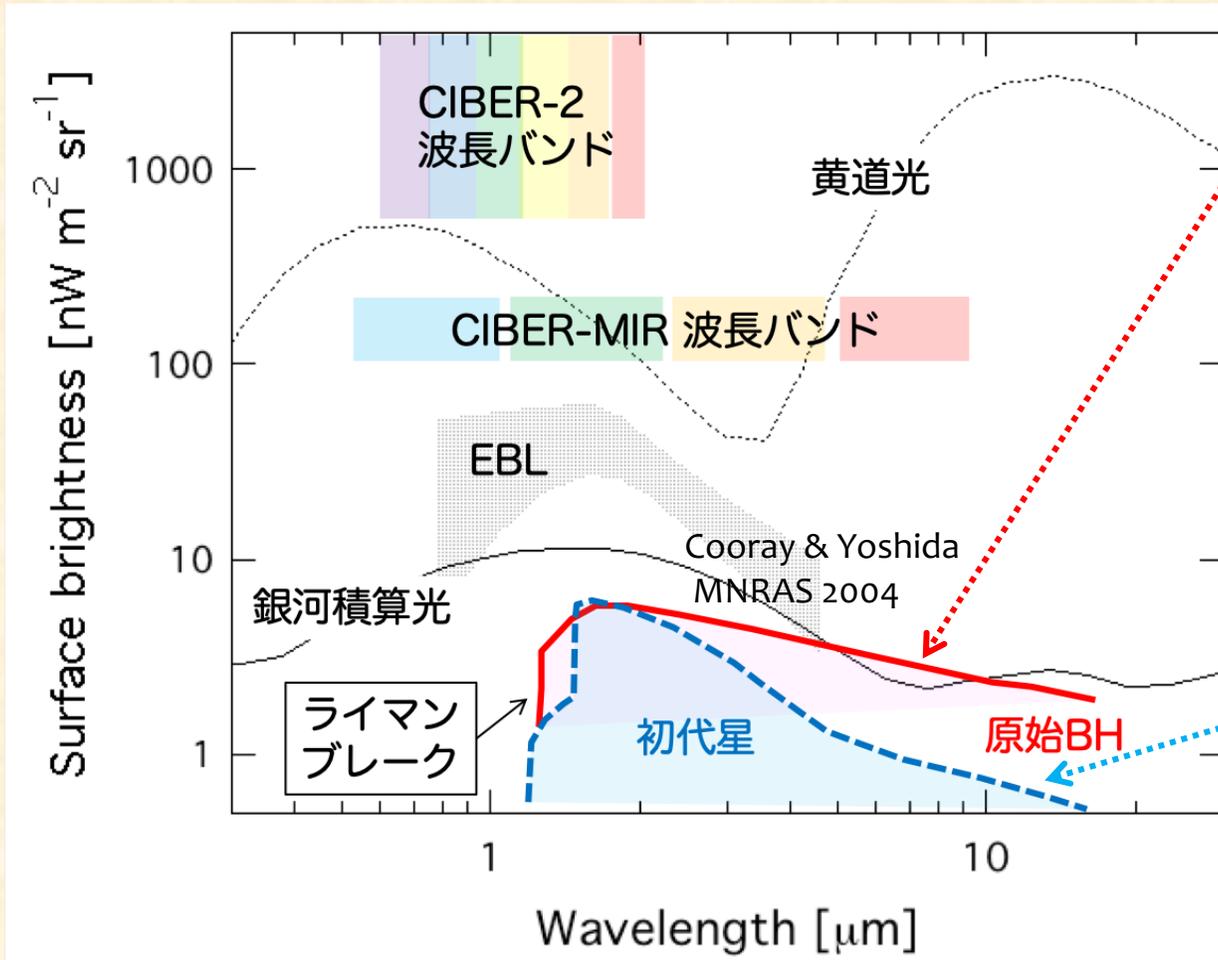
Hα, [OIII], [NII]

MIR band
z > 10 Balmer
z > 40 Lyman

Hickox & Alexander ARAA 2018

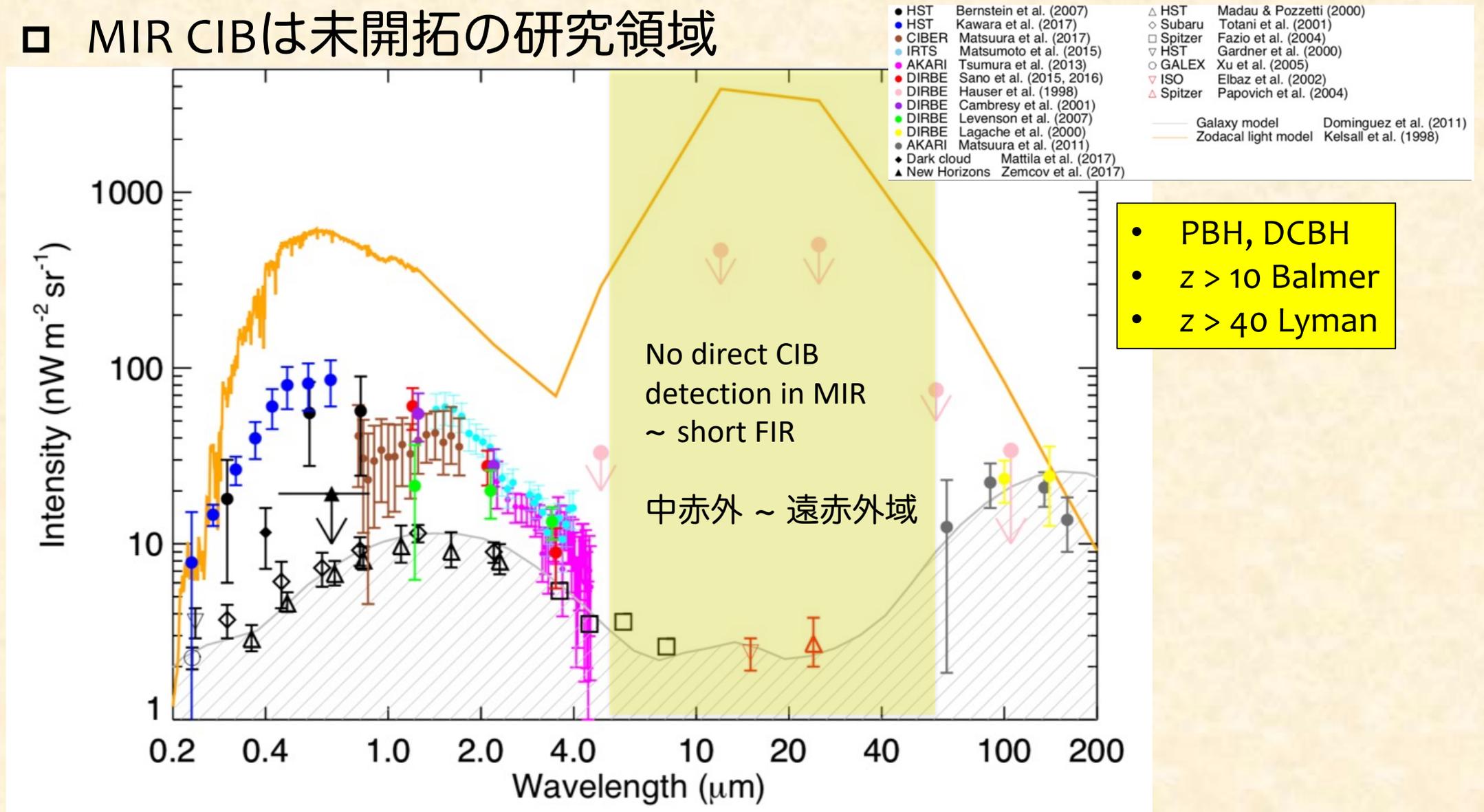


Dwek et al. ApJ 2005



世界初の中赤外CIB検出を目指す

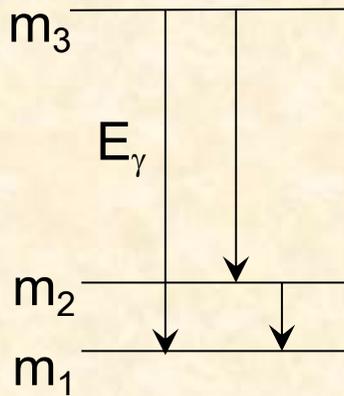
□ MIR CIBは未開拓の研究領域



- PBH, DCBH
- $z > 10$ Balmer
- $z > 40$ Lyman

中・遠赤外CIBによる背景ニュートリノ崩壊光子の探索

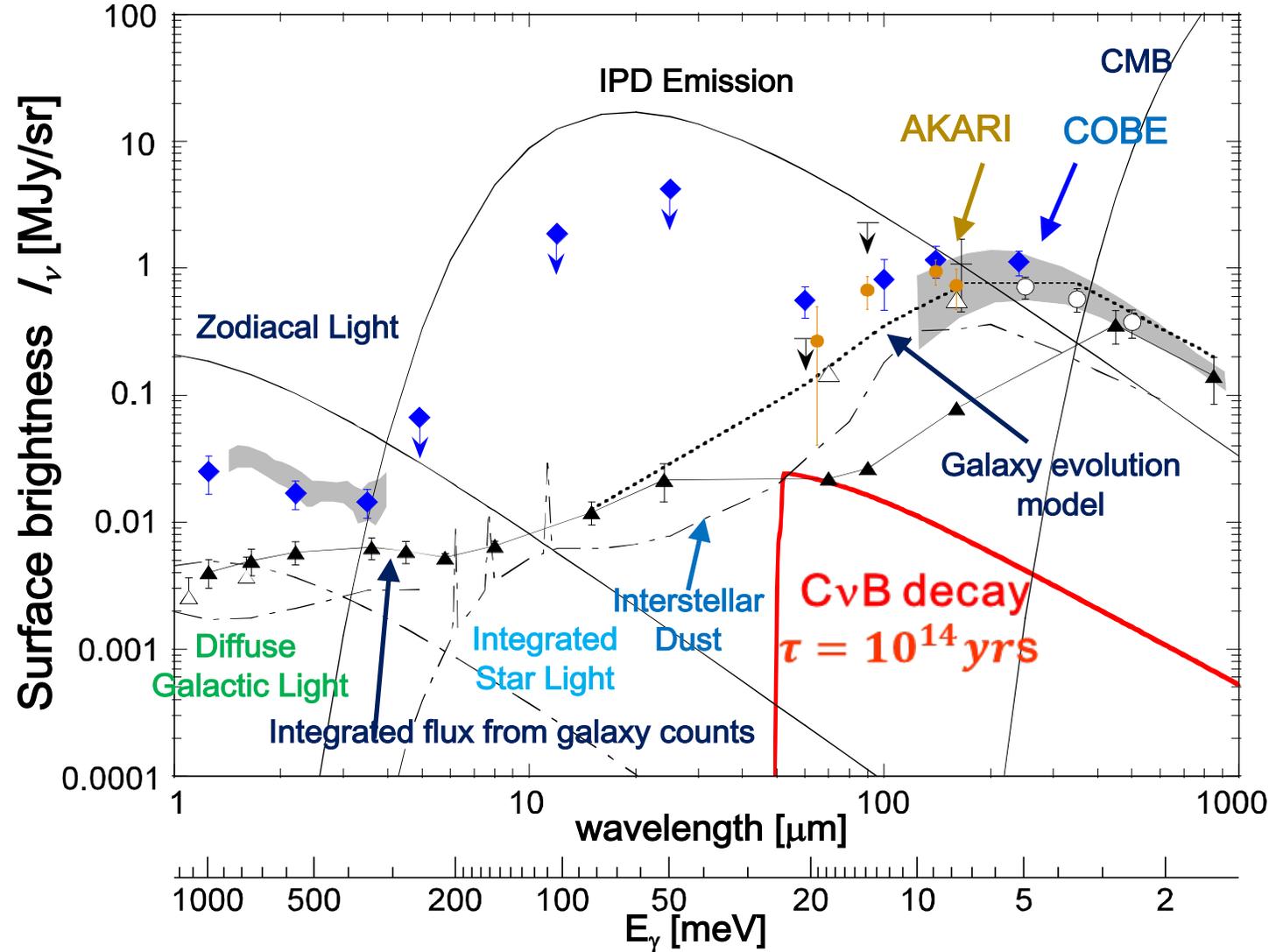
- 非標準理論
- 重い→軽いニュートリノ光子モードで崩壊



$$E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV} \quad (\lambda_\gamma = 51 \sim 89 \mu\text{m})$$

世界初の検出

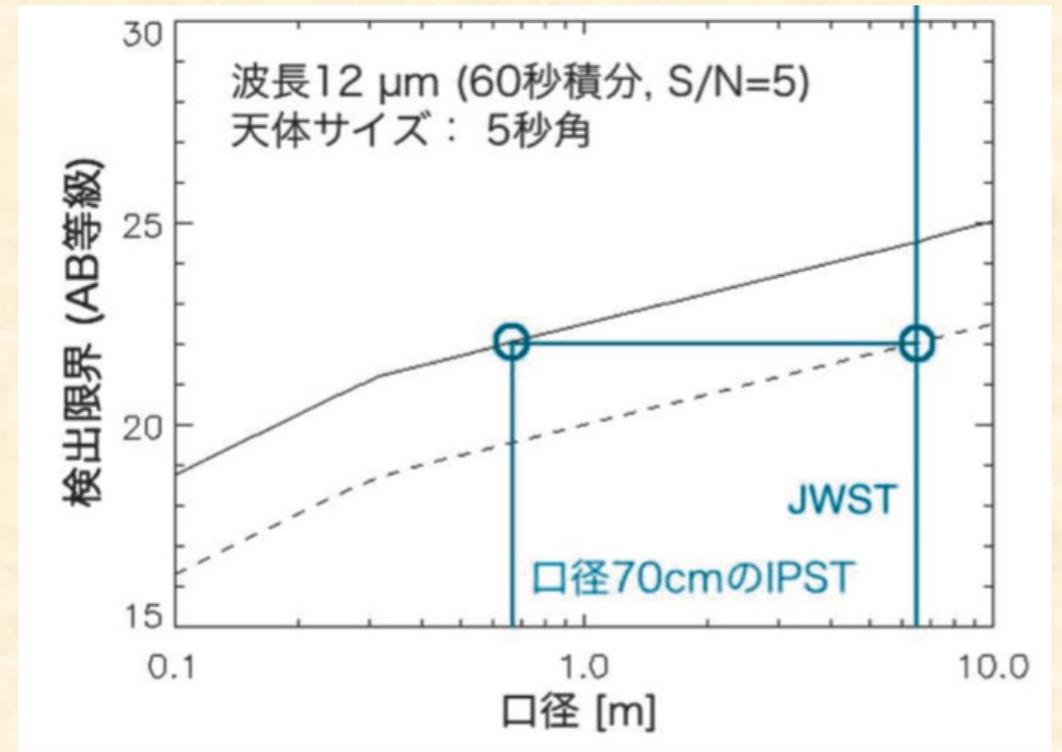
- 宇宙背景ニュートリノ
- ニュートリノ光子崩壊



将来へとつながる 中赤外の究極的な高感度観測

黄道光による感度の制限により未開拓な中赤外(MIR)波長域
 1-m IPST は空間的に拡がりを持つあらゆる階層の天体に対して
 JWSTやOSTをしのぐ感度を有する

- 宇宙初期・高赤方偏移天体
- 銀河
 - Ultra-Diffuse Galaxies, Intrahalo Light
 - 星間および銀河間 ガス・ダスト
- 系外惑星系
 - デブリ円盤, Exo-zodiacal light
- 太陽系
 - 惑星間/星間ダスト
 - EKBO, TNO, オールト雲天体・ダスト



Zodiacal-background-limited sensitivity
 (天文月報 2019年5月号 津村 & 松浦)

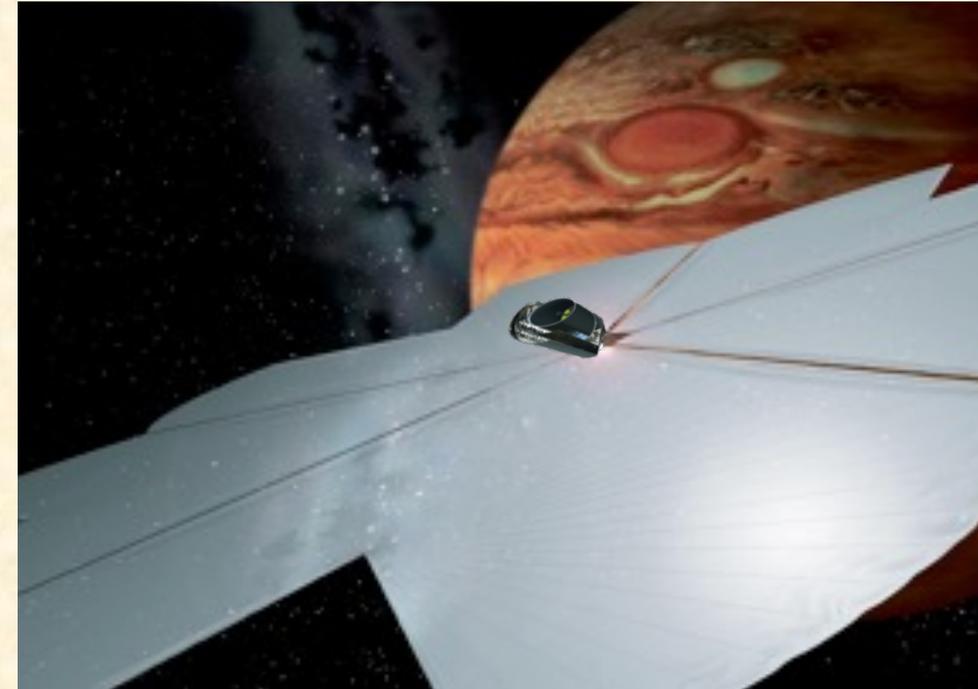
新たな深宇宙機システムの必要性

IPSTが必要とする深宇宙機システムの課題

- 深宇宙での電力確保
- 長期にわたる惑星間航行 (燃料消費)
- 大容量の観測データ通信

ソーラーセイルによる限界突破

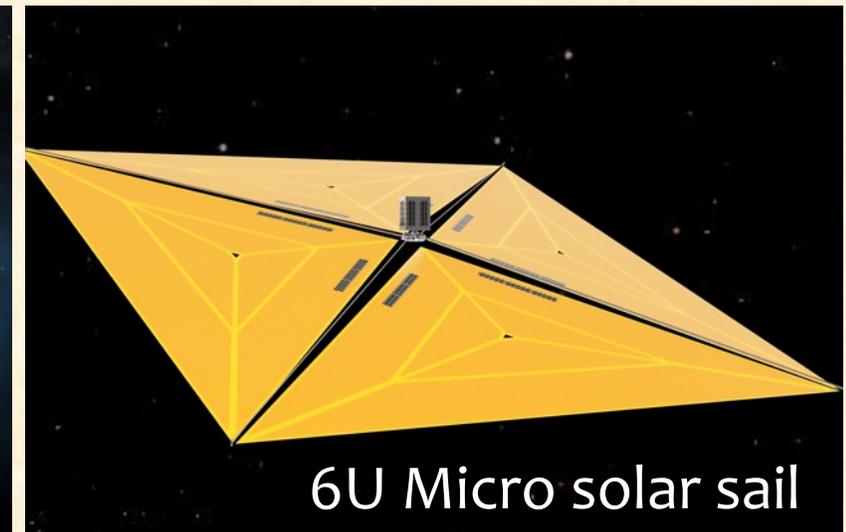
- ✓ 薄膜太陽電池を装備 (電力セイル)
 - ✓ イオンエンジン+太陽光圧の高効率推進
 - ✓ セイル膜を利用した超高ゲインアンテナ
- c.f. New Horizons ~40kbps @5 AU



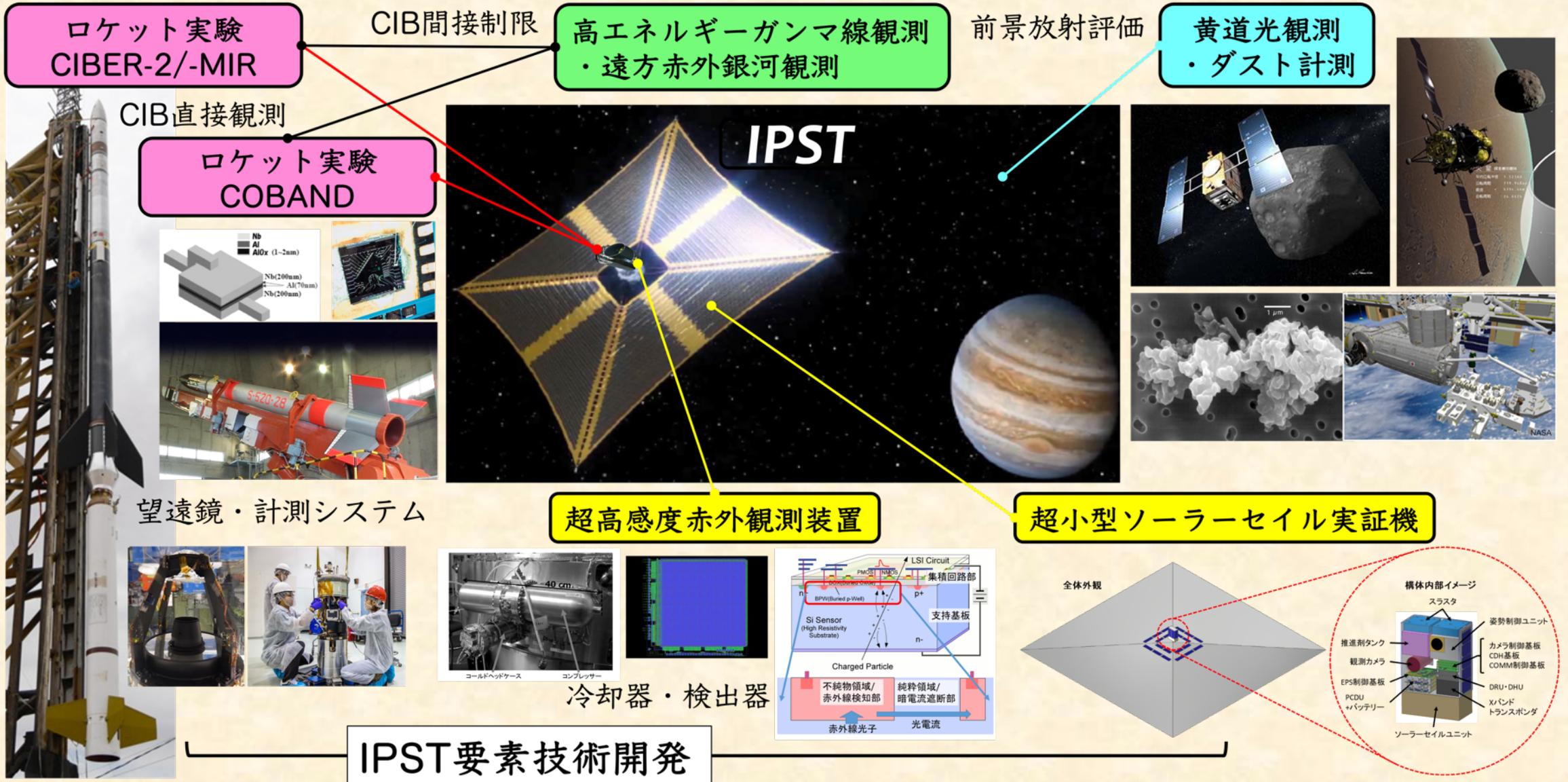
100m級ソーラーセイルによるIPSTの概念図

IPSTシリーズ探査機

	IPST	IPST pathfinder	Mini Solar Sail	Micro Solar Sail
望遠鏡口径	1 m	20 cm	10 cm	<5 cm
観測波長	1 - 100 μm (近赤外~遠赤外)	0.4 - 20 μm / 70 μm (可視~中赤外 / 遠赤外)	0.4 - 2.5 μm (可視~近赤外)	0.4 - 0.9 μm (可視光)
探査機 (機器)	1,000 kg (200 kg)	200 - 300 kg (50 kg)	50 kg (10 kg)	5 kg (1 kg)
軌道	R >3au / 黄道面外	R >3au / 黄道面外	R ~2au	SEL2
規模	中型以上	小型~中型	超小型~小型	6U / 12U
打上げ期	2040年以降	2030年~2040年	2025~2030年	~2025年

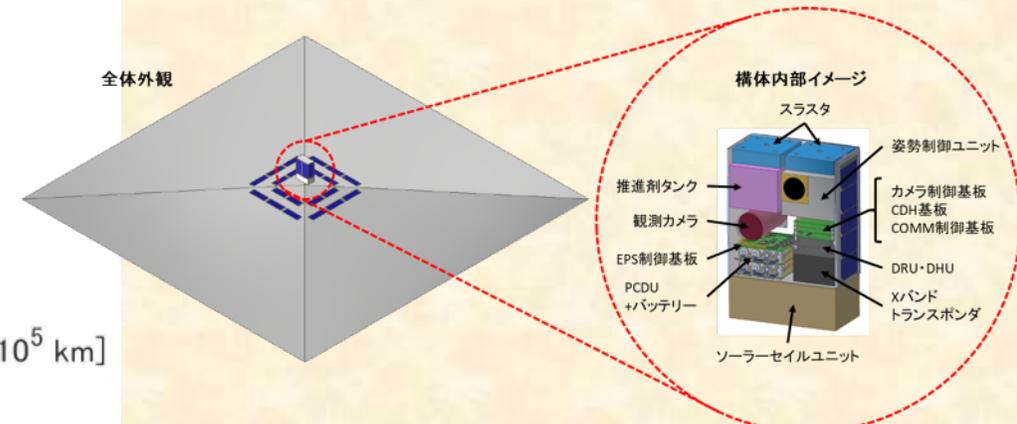
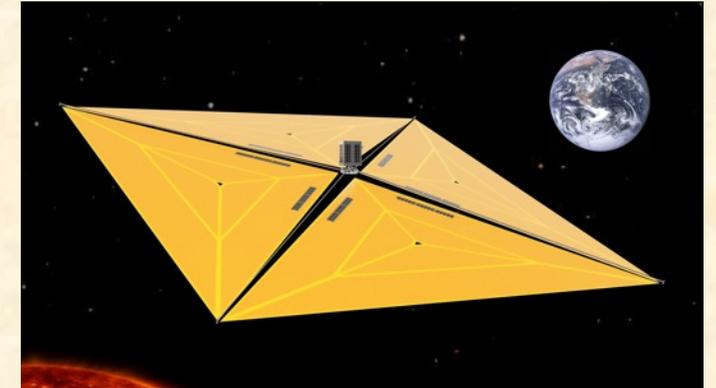
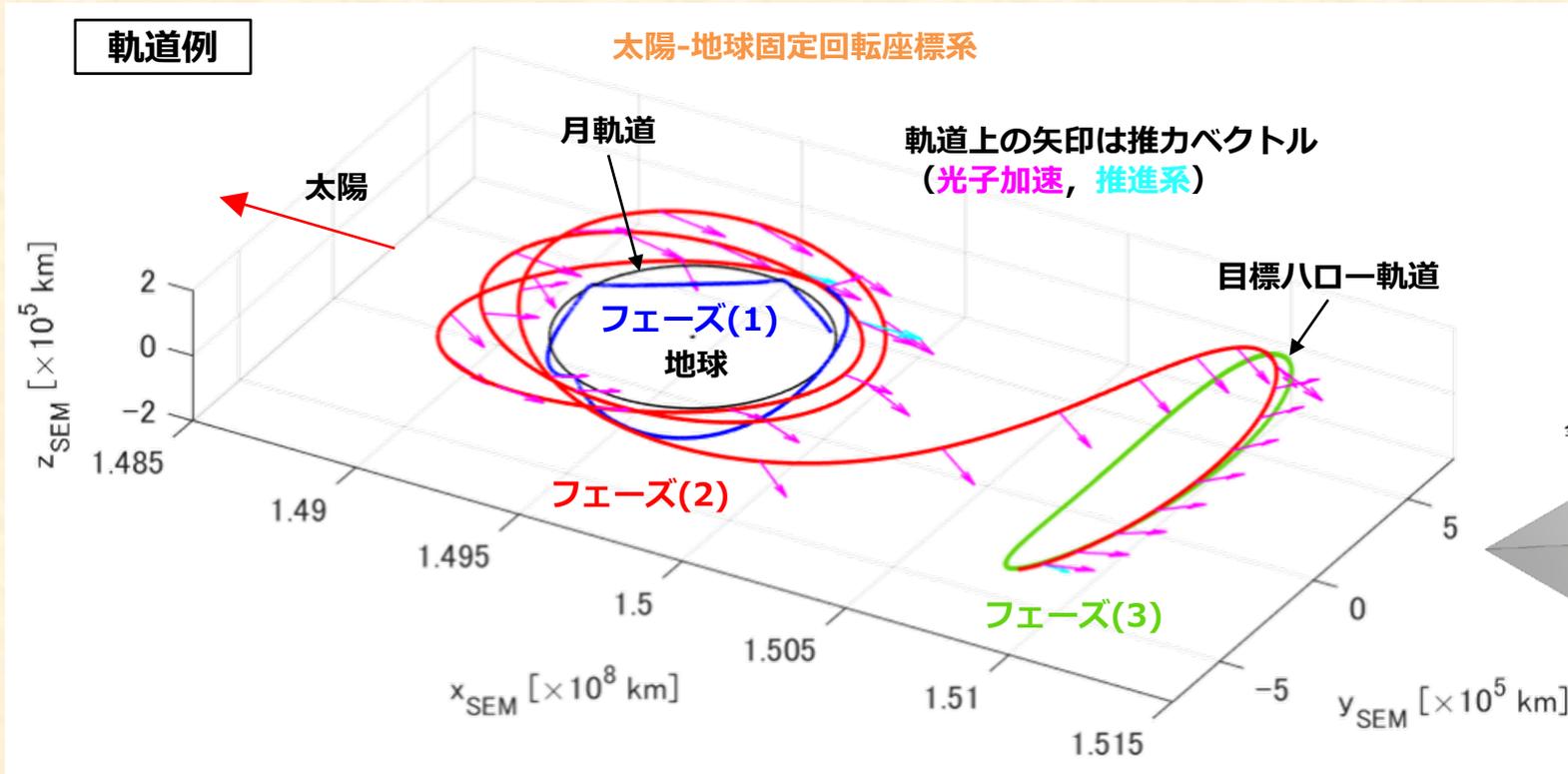


IPSTに関する技術開発と前駆実験 (~2025年までの実証)



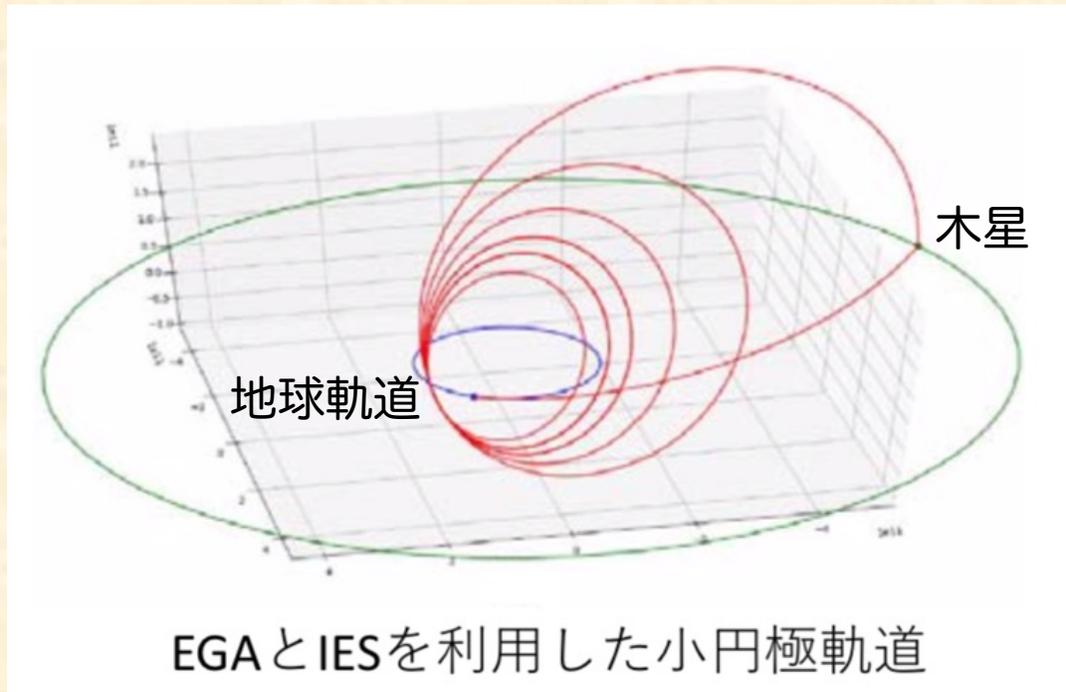
超小型ソーラーセイルによる技術実証

- 6U機を太陽-地球L2ハロー軌道へ投入
- 太陽光圧を利用した無燃料の長期停留
- 安定温度環境下での高精度測光観測 (黄道光, 銀河光, COB)
- 2026 打上げ目標

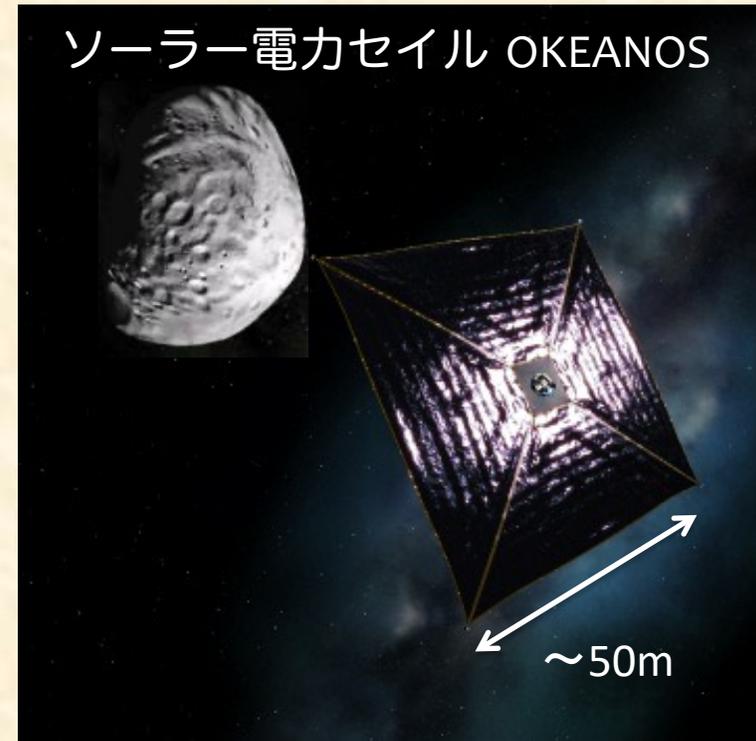


Mini sail・IPST pathfinder の深宇宙 / 黄道面脱出軌道

- 打上げ～ EDVEGA ～ 木星スイングバイで黄道面脱出
- ソーラー電力セイル (太陽光圧+イオンエンジンのハイブリッド推進)による太陽極軌道 ($z = 1 \text{ au}$) への投入
 - $R > 3 \text{ AU}$ 直接投入はイプシロンロケットでは難しく H_3 が必要
 - イオンエンジンとスイングバイを組合せた EDVEGA が有望



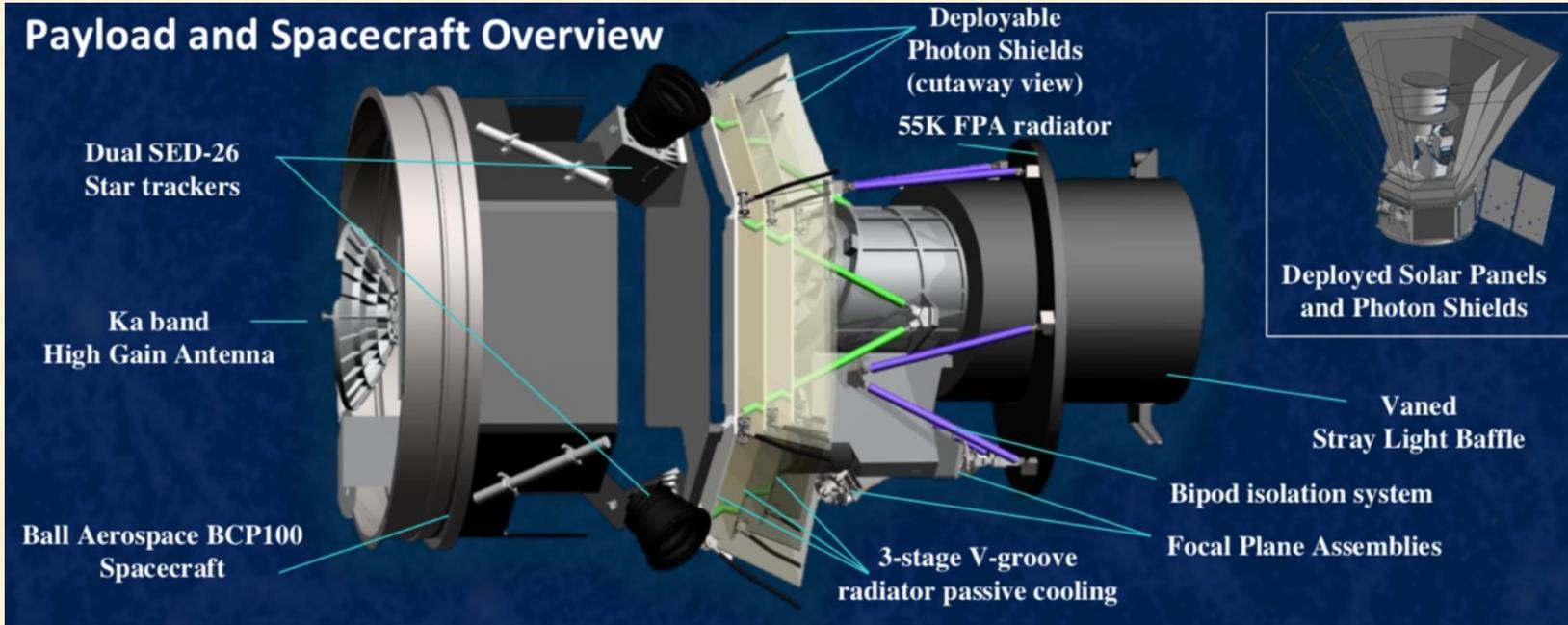
資料元：ISAS 高尾 氏



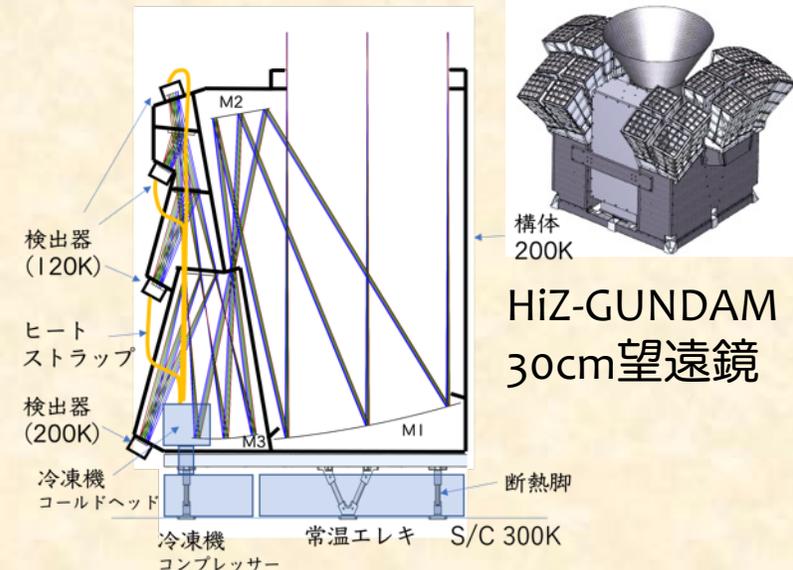
NIR 観測機器

参考例：SPHEREx (NASA) 2024年打上げ

- 望遠鏡口径 20cm, 波長 0.75 - 5 μ m, passive cooling ~55 K
- 地球周回 太陽同期極軌道, payload mass 180kg, Falcon-9



CIBER-2 30cm望遠鏡(2021.6 打上げ)



その他 CIBER-2, HiZ-GUNDAM など

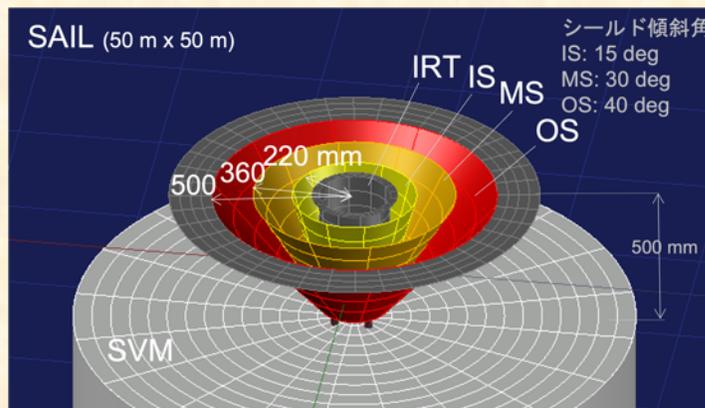
NIR機器に大きな技術的課題はない

MIR機器に必要な技術

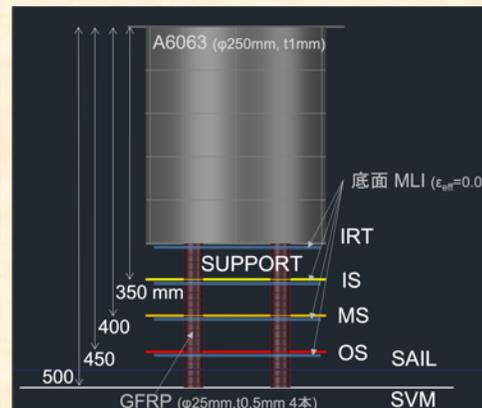
- 極低温冷却システム(望遠鏡 ~30K @5AU, 検出器 ~10K) by ISAS 赤外G
 - 深宇宙用 放射冷却・断熱機構の開発
 - 軽量 10K級 2段ST冷凍機の開発
- MIR検出器 ($\lambda > 20\mu\text{m}$) NEP $< 10^{-18}$ W/√Hz
 - Si BIB (ISAS赤外G), 超格子 (JAXA地球観測技術FL), CSIP (東大, NICT)

LW MIR観測のためには重点的な開発研究が必要

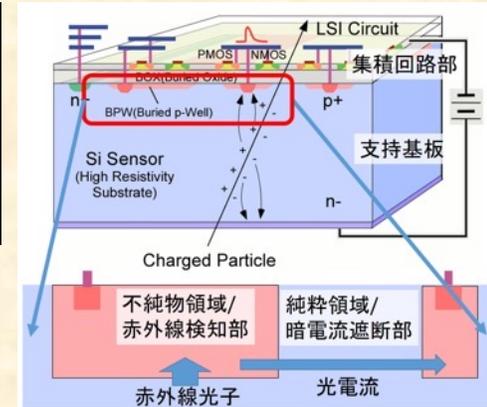
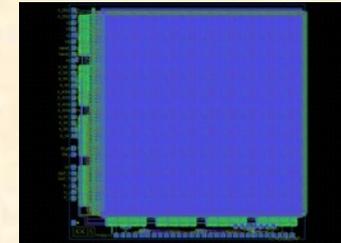
Pathfinder要求 $\lambda < 20\mu\text{m}$ は入手可 (e.g., HgCdTe) + Pipher, Zemcovらと共同



ISAS 鈴木氏による熱検討

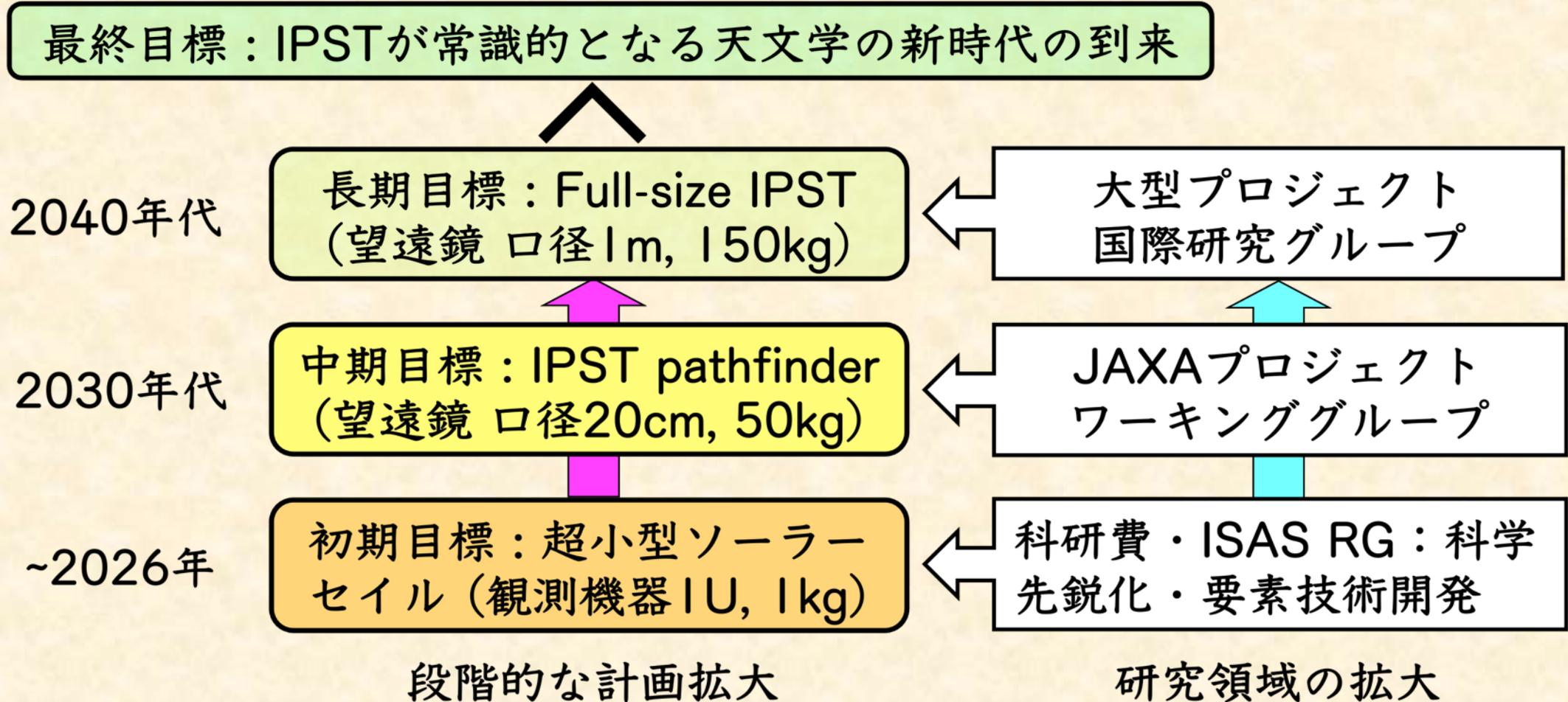


AKARI ST冷凍機



ISAS 和田氏による検出器検討

IPSTの段階的実現



多分野共同ミッション

IPST計画は光赤外天文だけでなく他分野との共同ミッション

例：OKEANOS(木星トロヤ群探査)のクルージング科学

- 探査工学 外惑星系・黄道面外探査
- 太陽系科学 黄道光観測・惑星間ダスト捕獲
 / 太陽物理 小惑星フライバイ観測
 惑星間プラズマ・CME観測
 太陽極域観測（黄道面脱出）
- HI21cm再電離探査（セイルアンテナ）？
- ...

GDI 3 分野の共同で行えるミッション

IPST ~ 惑星間空間からの新しい天文学 ~

- 理工一体で開発する革新的な宇宙機
- CIBを軸とする革新的な天文学
- 日本オリジナルの挑戦的計画

