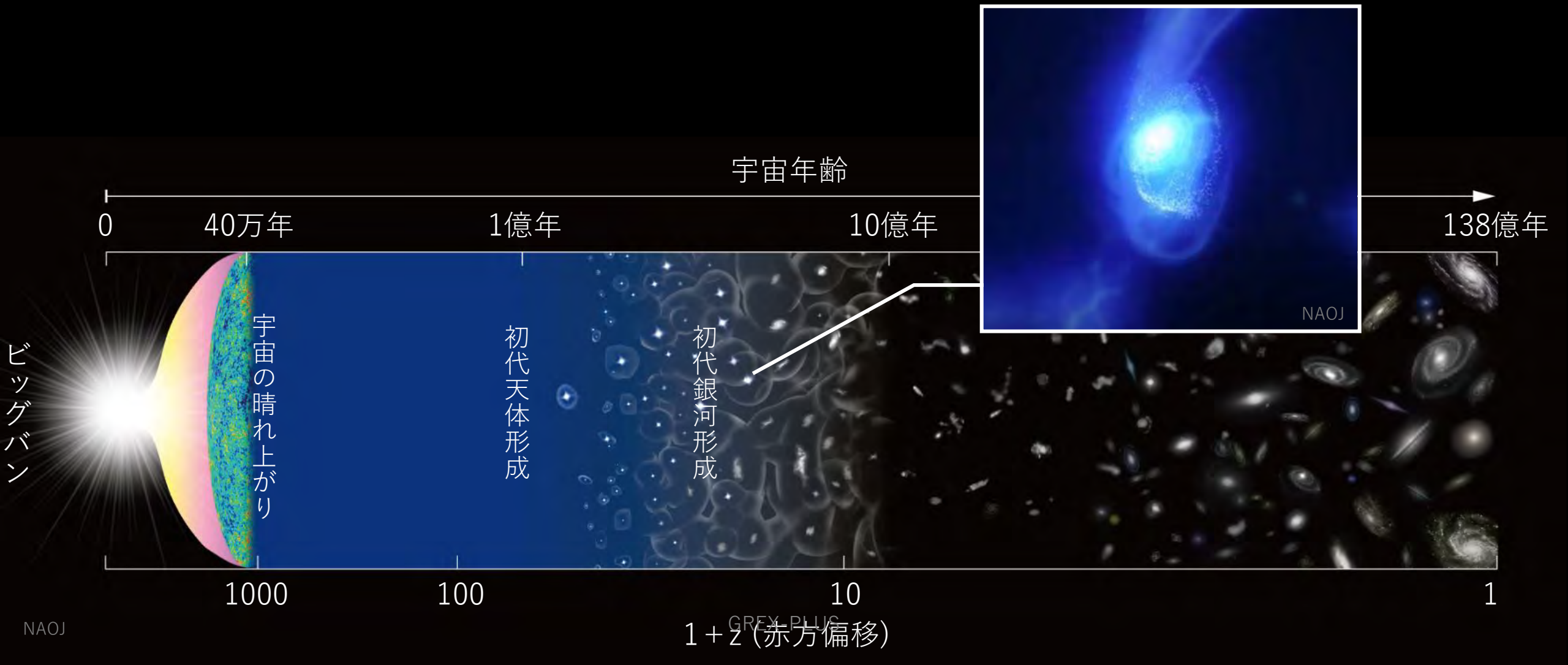
GREX-PLUSの概要と進捗状況

Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer

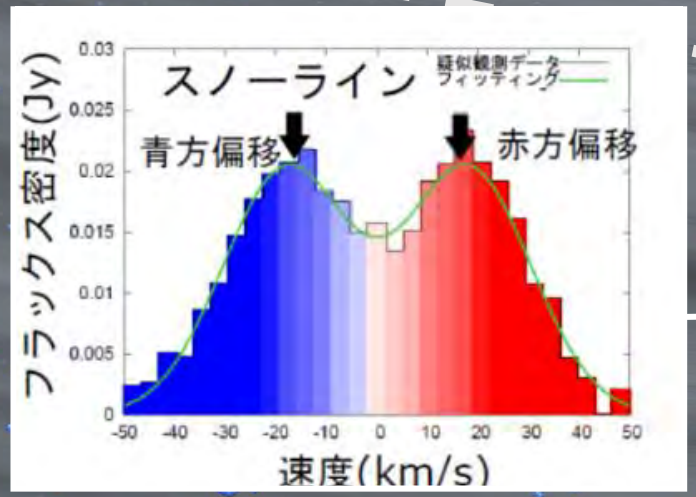
GREX-PLUS 検討会

井上昭雄（早稲田大学）

宇宙で最初の天体と銀河の誕生過程を知りたい



惑星、海、生命の起源を知りたい



水蒸気

氷

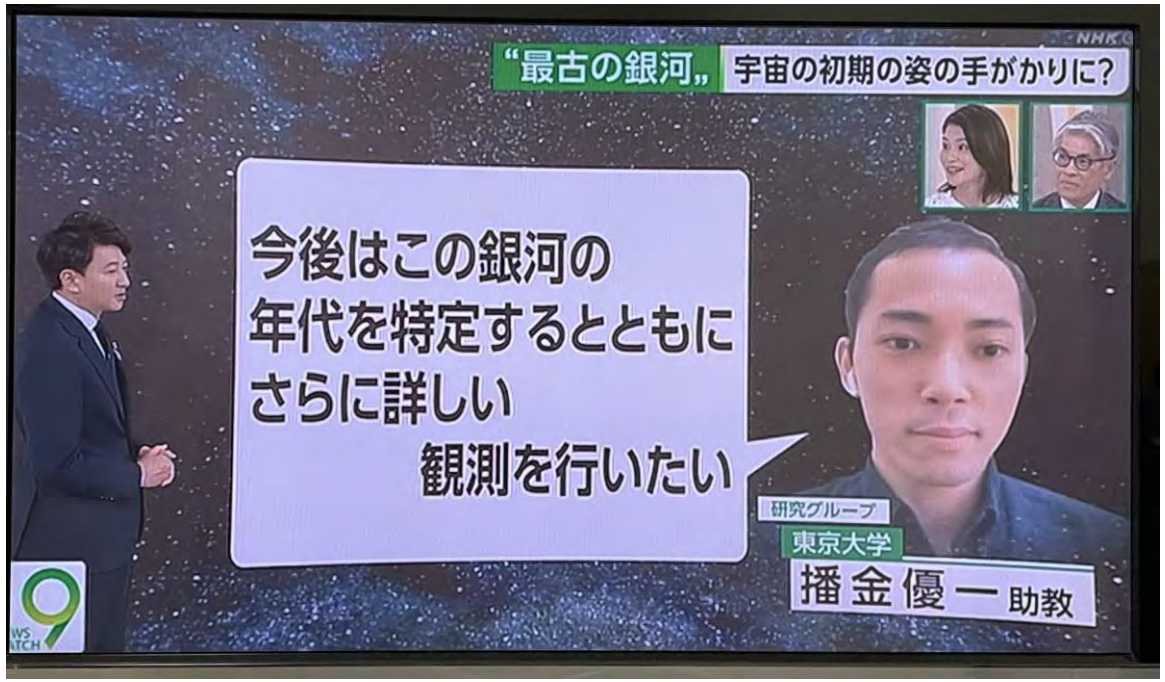
ESA/Hubble, M. Kornmesser

A. Inoue & M. Honda

GREX-PLUS

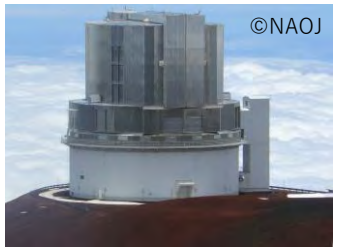
国民へのアピール力

- 「最遠方銀河」
  - NHKコズミックフロント☆Next (2019/3/21) 番組時間の3分の1を使って紹介
  - NHKニュースウォッチ9 (2022/4/7) 約5分間にわたり大きく取り上げられる
- 「水(海)」
  - NHKコズミックフロント (2021/10/21) 「海の起源をめぐるミステリー」



提供：NHK, 播金さん

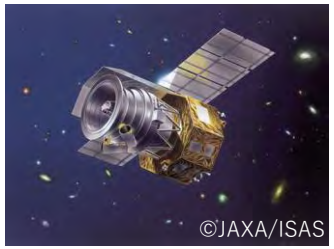
光赤外線天文学



すばる望遠鏡
可視光広視野撮像 S-Cam, HSC
多様な装置

TMT
高解像度
高分散分光

あかり
全天探査
近-中間赤外線
遠赤外線



WISH/G-REX
近赤外線広視野撮像

波長2μm以下

Roman

HiZ-GUNDAM

22世紀
世界で1つの
望遠鏡に参加

戦略的な技術
の蓄積で実現

JASMINE
LiteBIRD
赤外線アレイ回路
冷凍機

LAPYUTA

波長2μm以上

Euclid/Romanに無い波長帯
JWSTに無い高分散分光機能

GREX-PLUS

冷却性外線望遠鏡
広視野撮像
高分散分光

LUVEx

IPST

「宇宙すばる」※

高分散分光

SPICA
冷凍機技術
中間赤外線(SMI)
遠赤外線(SAFARI)

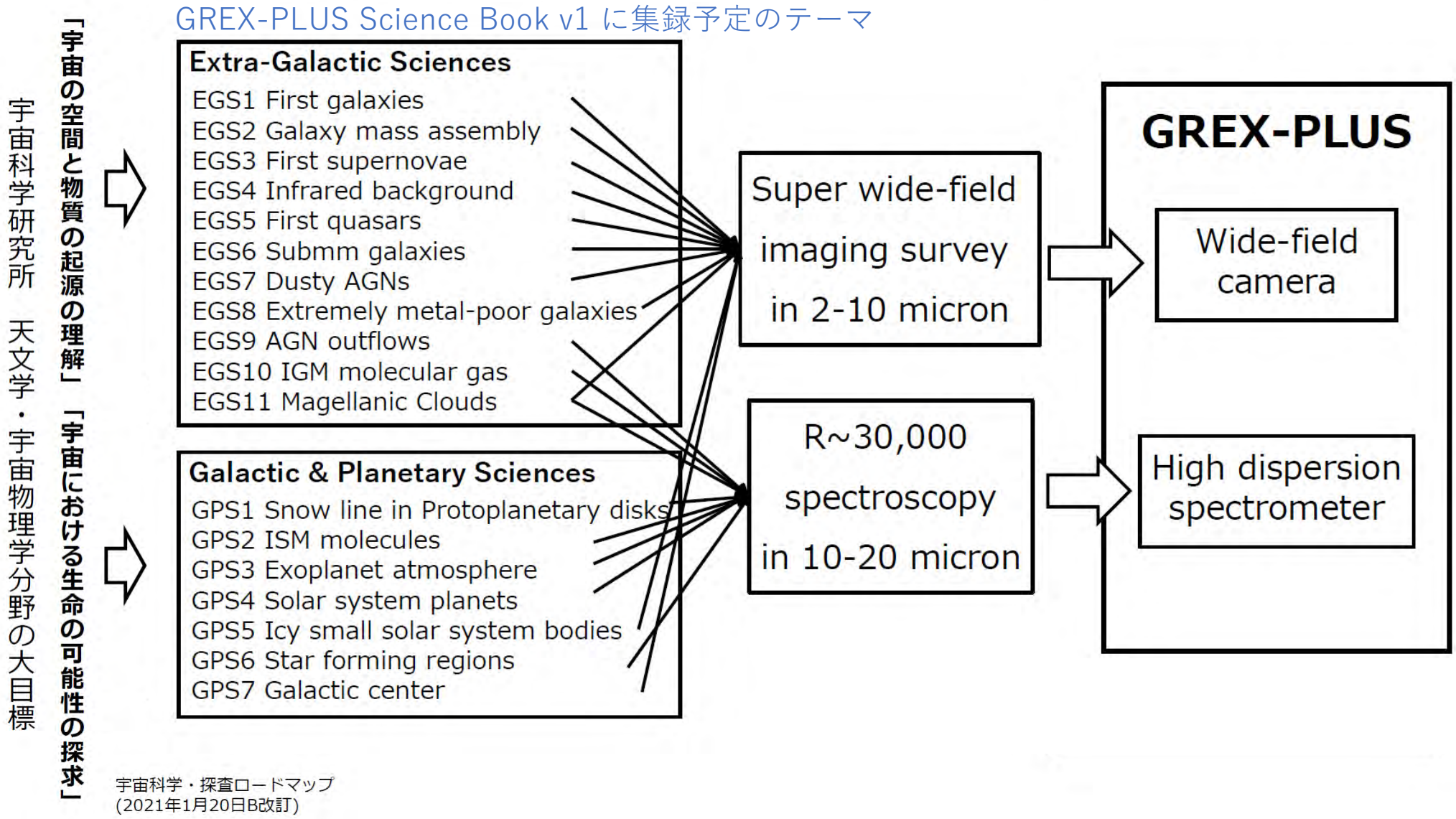
遠赤外撮像分光

US IR-Probe

冷却望遠鏡
赤外線
大口径
広視野
汎用性

※松田有一さんの言葉

ISAS/JAXAの天文学・宇宙物理学の大目標とGREX-PLUSが目指すサイエンステーマの関係



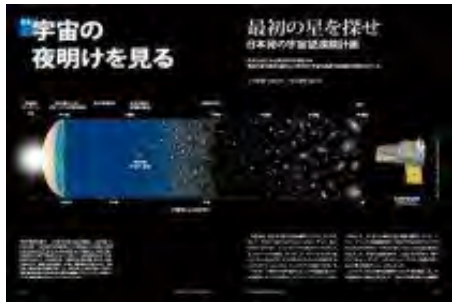
GREX-PLUS in a nutshell

- 冷却宇宙望遠鏡(温度50K)
- 口径1.2m
- 広視野カメラ
  - 総視野：>0.4平方度
    - 6バンド分割
  - 2-5ミクロン帯：3バンド
  - 5-10ミクロン帯：3バンド
- 高分散分光器
  - 10-20ミクロン帯
  - R=30,000 (Δv=10 km/s)

- 運用期間：5年（+5年以上目標）
- 経費：400億円未満
  - JAXA/ISAS 戦略的中型規模
- 2030年代の打ち上げ

- 2021年10月中型WG設立提案書
  (133ページ)
- 2022年7月～　宇宙物理学GDIとの議論開始

一般向け紹介記事：
日経サイエンス2021年10月号
特集：宇宙の夜明けを見る
「最初の星を探せ　日本発の宇宙望遠鏡計画」

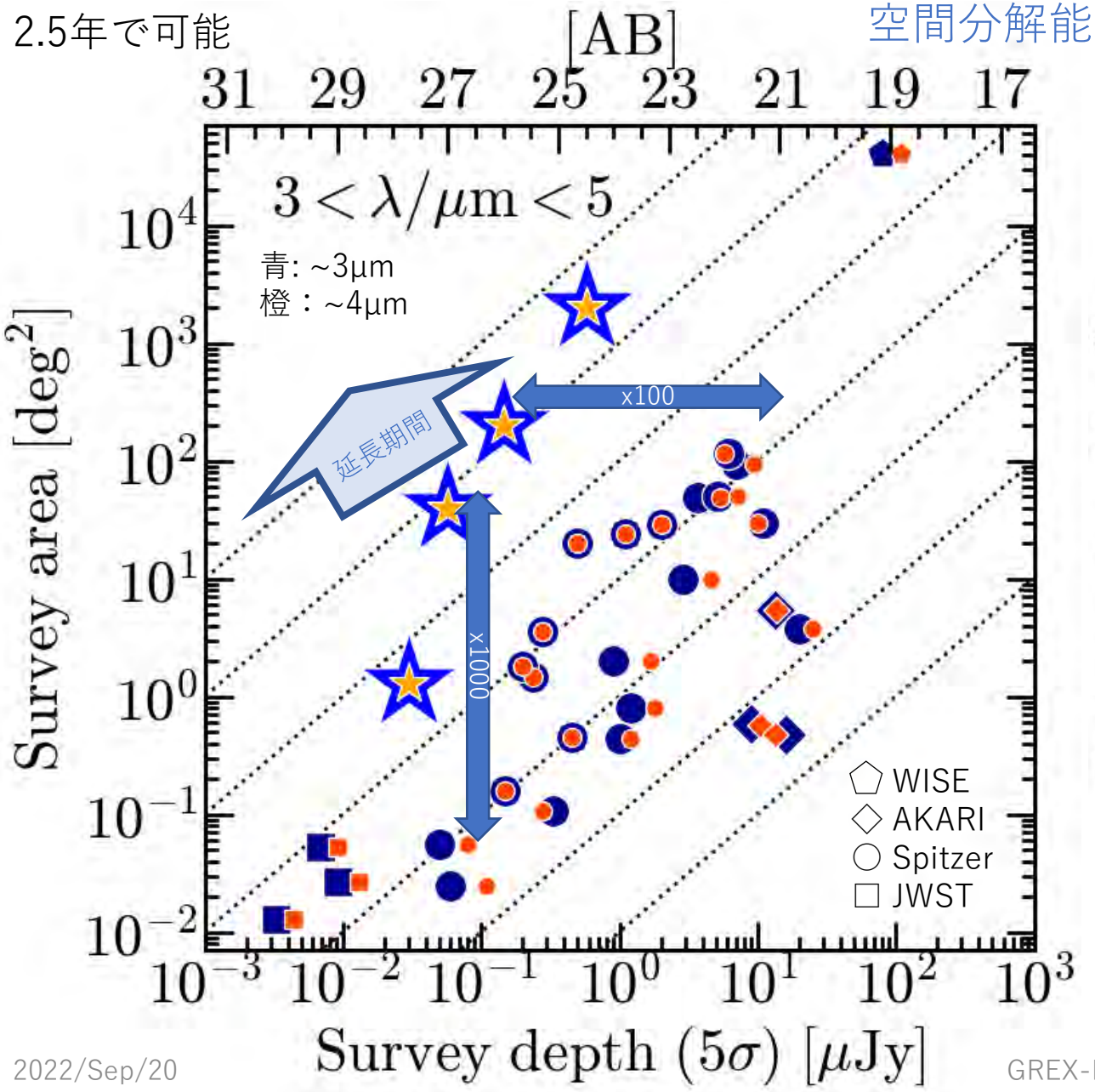


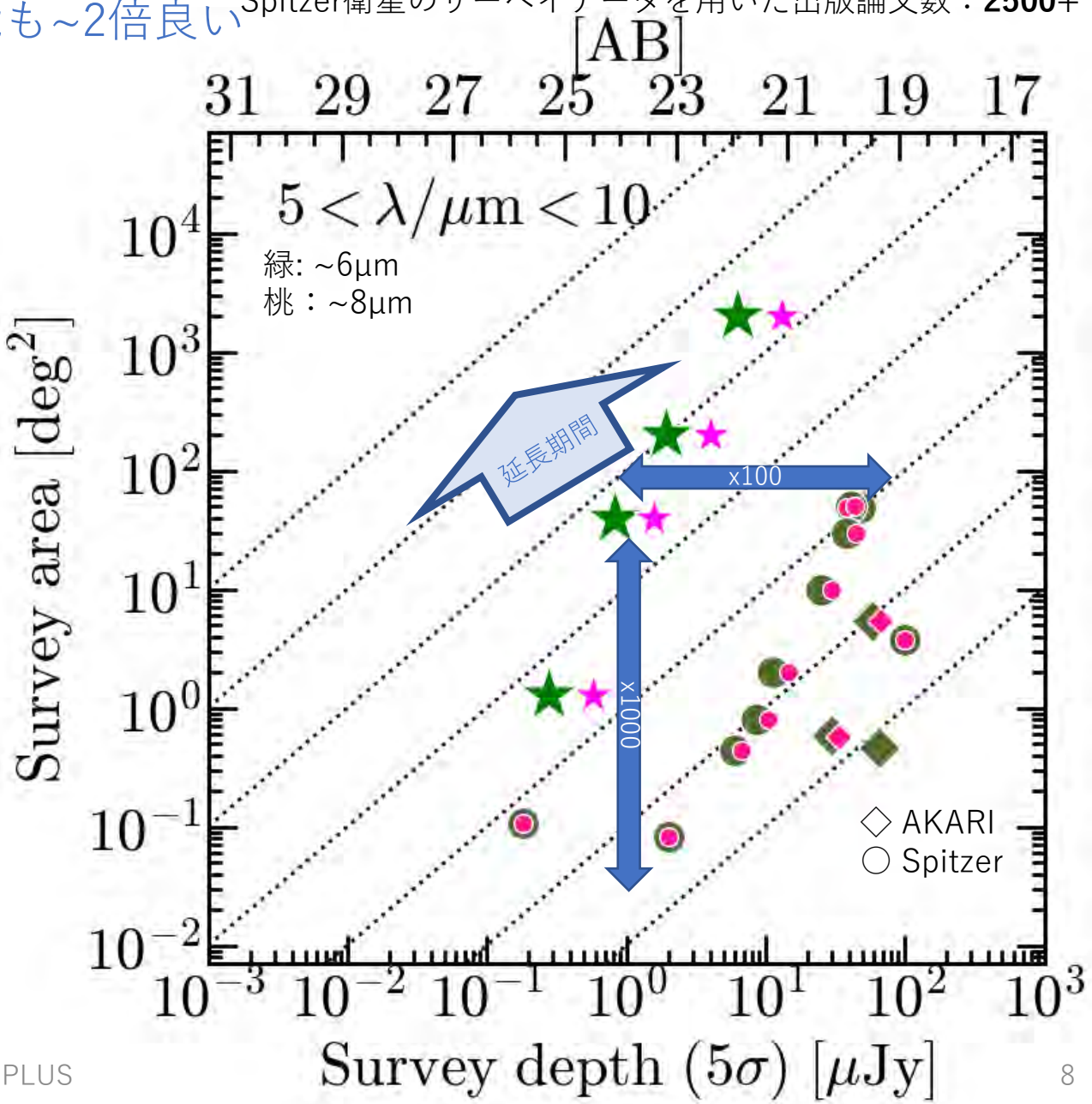
GREX-PLUS Surveys: Spitzerより~100倍深い、~1000倍広い

2.5年で可能

空間分解能も~2倍良い

Spitzer衛星のサーベイデータを用いた出版論文数：**2500+**

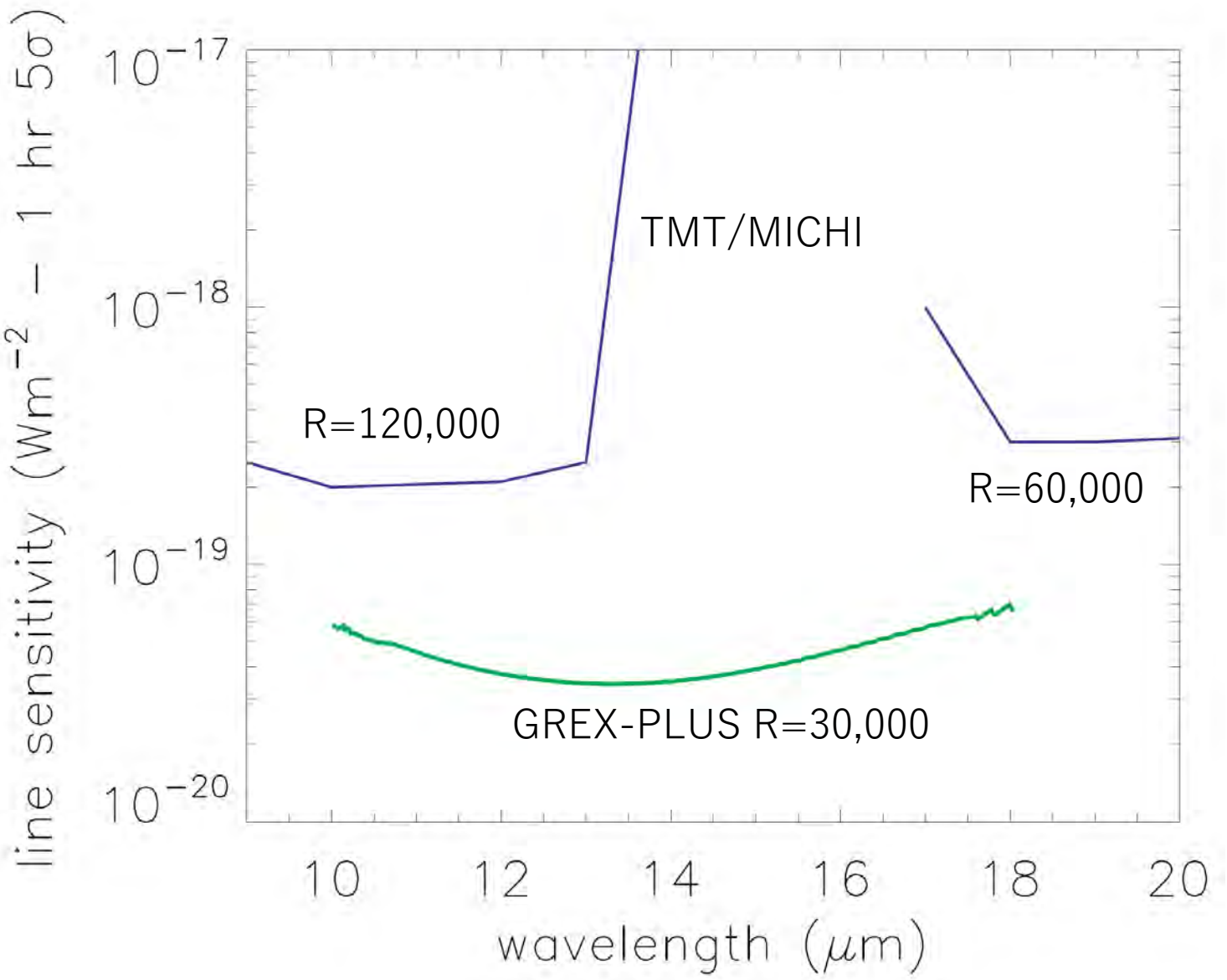




GREX-PLUS High-Resolution Spectrometer

- **波長分解能: 30,000**

- JWST R~3,000 より一桁高い
- TMTより数倍以上高感度
  - 波長も連続的にカバー



広視野カメラの科学

なんでもできるデータセット(赤外線背景放射、銀河系、太陽系、など)
全波長、マルチメッセンジャー対応天体探しの基盤画像データ

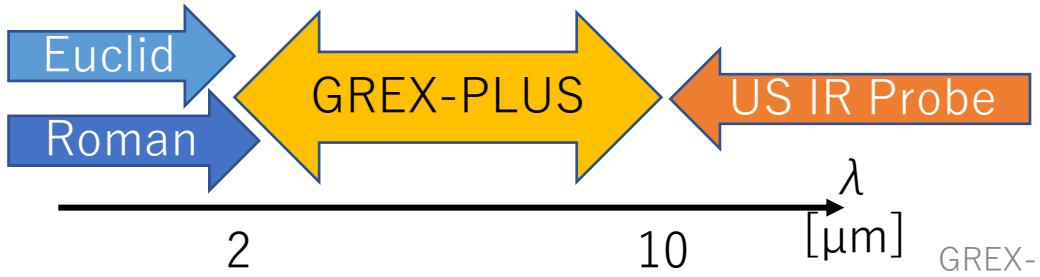
- **極めて汎用な2-10μm画像データ**

より大きな赤方偏移

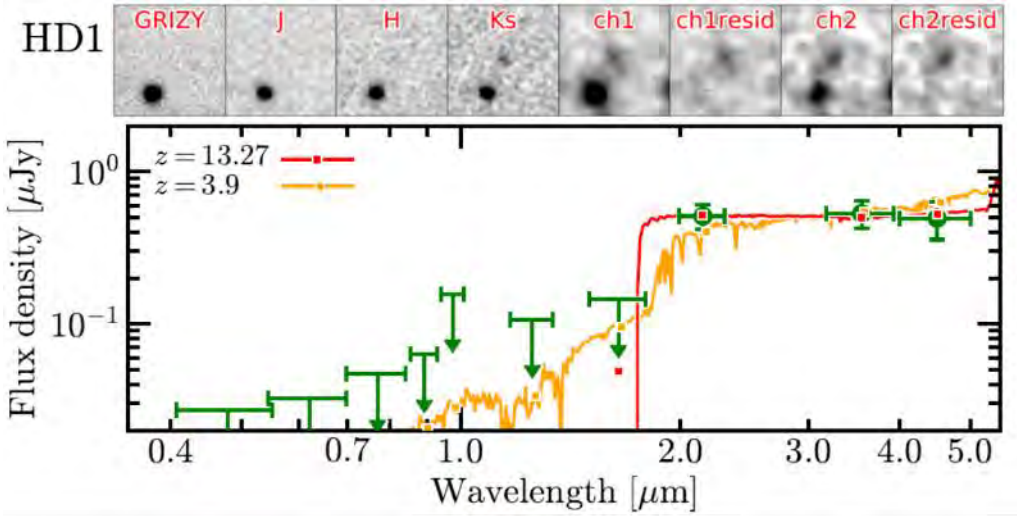
- GREX-PLUSで初めて見える“Roman-drop”天体が必ず存在 [波長帯の違い]
  - z>15 初代銀河(および大質量ブラックホール) ~10個か場合によってはそれ以上 (Harikane+22)
  - z>6 成熟した大質量銀河 (バルマーブレイク・パッシブ銀河) ~10k (Mawatari+20)
  - ダストで隠された銀河(および大質量ブラックホール) z>3-4 DOGs ~400-100 (Toba+)
  - z>8 遠方超新星爆発(SLSNe, PISNe) ~10個 (Moriya+)
  - などなど(新種の天体も含まれる)
  - ALMA, JWST, ELTsによる分光ターゲット

見つける（広視野撮像）→ 調べる（分光）

- 世界の広視野将来計画に無い**ユニークネス**



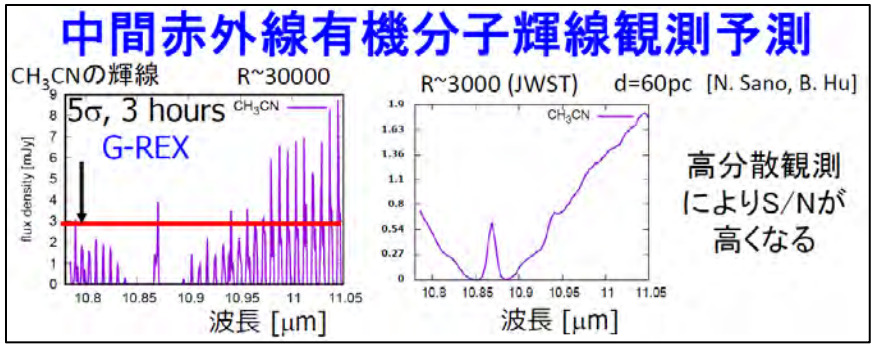
z~13 銀河候補 (Harikane+AKI+22) → ALMA, JWST



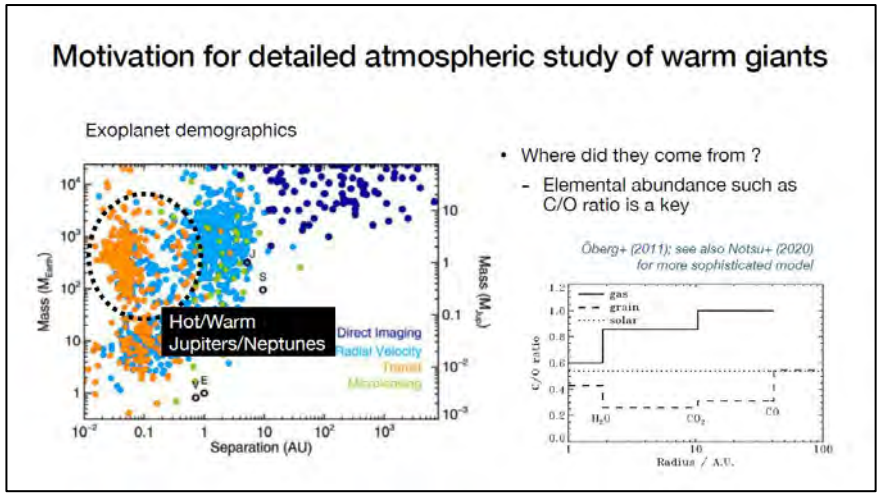
高分散分光の科学

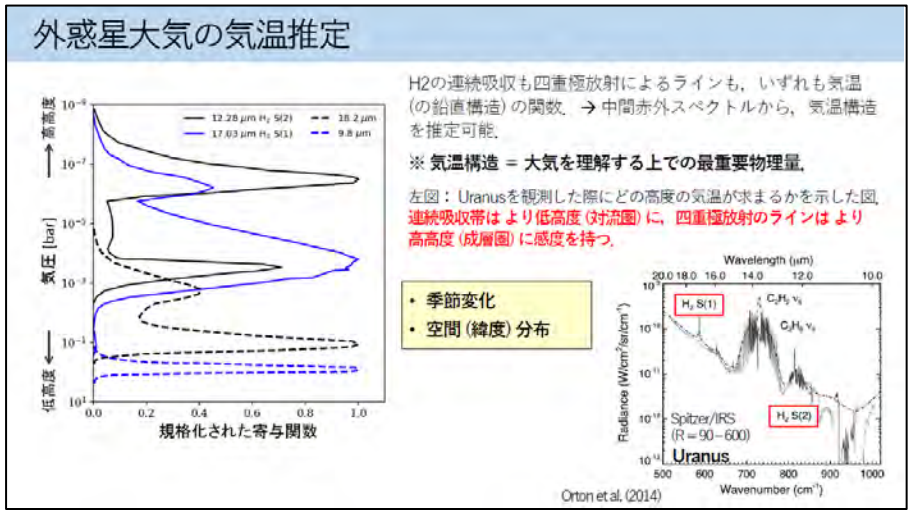
野村英子 (2021/3/24)

- **スペースR=30,000は真にユニーク**　JWSTはR~3,000
- 波長10-20ミクロン帯＝分子分光の「**指紋領域**」
  - 原始惑星系円盤H_2Oスノーライン、ケプラー運動分解
  - 原始惑星系円盤内縁における有機分子生成過程の解明
  - ホットジュピターの起源：どこで形成されたのか？migration / in-situ
    - トランジット大気の透過光分光：H_2O, NH_3, HCN, C_2H_2などからのC/O比がカギ
  - 星間化学反応の分岐点: $C_2H_3^+$ 11.8 μm vs C_3H_3 13.2 μm
  - 外惑星の気温構造(大気を理解するための最重要物理量)
    - H_2 S(1) 17.03 μm, H_2 S(2) 12.28 μm, H_2 連続吸収帯 9.8, 18.2 μm

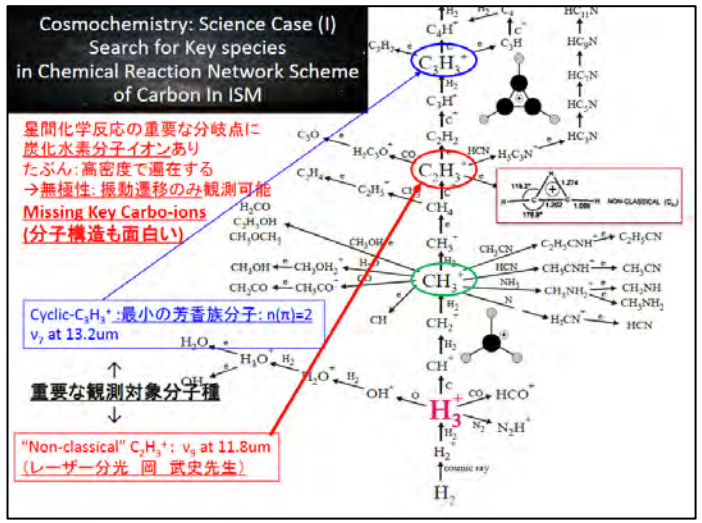


藤井友香 (2021/3/25)





佐川英夫 (2021/3/25)



平原靖大 (2021/3/24)

実施体制

2022年9月16日現在

中核メンバー（14名）

井上昭雄(早稲田大)：代表、科学検討
金田英宏(名古屋大)：技術検討、分光器
山田亨(宇宙研)：光学系、広視野カメラ
本原顕太郎(国立天文台)：広視野カメラ
小宮山裕(法政大)：広視野カメラ
大薮進喜(徳島大)：光学系、分光器
和田武彦(宇宙研)：検出器、電気系
鈴木仁研(宇宙研)：熱設計
山村一誠(宇宙研)：運用計画
播金優一(東京大)：サーベイ計画

一般メンバー（63名）

科学検討メンバー（19名）

銀河科学

児玉忠恭(東北大)
大内正己(国立天文台)

鳥羽儀樹(京都大)
松岡良樹(愛媛大)
馬場俊介(国立天文台)
松浦周二(関学大)
但木謙一(国立天文台)
中島王彦(国立天文台)
三澤透(信州大)

超新星・時間軸・銀河面科学

守屋尭(国立天文台)

鈴木尚孝(東京大)
高田昌広(東京大)

星形成・惑星科学

野村英子(国立天文台)

下西隆(新潟大)
安井千香子(国立天文台)
野津翔太(理研)
藤井友香(国立天文台)
松尾太郎(名古屋大)
川島由衣(理研)
佐川英夫(京産大)
平原靖大(名古屋大)
中川貴雄(宇宙研)
黒川宏之(東京工業大)

井上昭雄	早稲田大学	
大内正己	国立天文台	東京大学
大薮進喜	徳島大学	
金田英宏	名古屋大学	
児玉忠恭	東北大学	
小宮山裕	法政大学	
鈴木仁研	宇宙科学研究所	
野村英子	国立天文台	
播金優一	東京大学	
本原顕太郎	国立天文台	
守屋尭	国立天文台	
山田亨	宇宙科学研究所	
山村一誠	宇宙科学研究所	
和田武彦	宇宙科学研究所	
川島由衣	理化学研究所	
黒川宏之	東京工業大学	
佐川英夫	京都産業大学	
下西隆	新潟大学	
鈴木尚孝	東京大学	
高田昌広	東京大学	
但木謙一	国立天文台	
鳥羽儀樹	国立天文台	
中川貴雄	宇宙科学研究所	
中島王彦	国立天文台	
野津翔太	理化学研究所	
馬場俊介	鹿児島大学	
平原靖大	名古屋大学	
藤井友香	国立天文台	
松浦周二	関西学院大学	
松尾太郎	名古屋大学	
松岡良樹	愛媛大学	
三澤透	信州大学	
安井千香子	国立天文台	
江上英一	アリゾナ大学	
柏川伸成	東京大学	
河野孝太郎	東京大学	
田村直之	東京大学	
田村陽一	名古屋大学	
吉田直紀	東京大学	
谷口義明	放送大学	
札本佳伸	国立天文台	早稲田大学
泉拓磨	国立天文台	
竹内努	名古屋大学	
馬渡健	国立天文台	
山下拓時	国立天文台	
寺居剛	国立天文台	
斎藤智樹	兵庫県立大学	

伊藤慧	総合研究大学院大学	国立天文台
長尾透	愛媛大学	
菅原悠馬	国立天文台	早稲田大学
橋本拓也	筑波大学	
嶋作一大	東京大学	
上野宗孝	宇宙科学研究所	神戸大学
梅畑豪紀	理化学研究所	
嶋川里澄	国立天文台	
CHENXIAOYANG	国立天文台	
久保真理子	愛媛大学	
尾上匡房	北京大学	
日下部晴香	ジュネーブ大学	
市川幸平	東北大学	
松原英雄	宇宙科学研究所	
HuangTing-Chi	総合研究大学院大学	宇宙科学研究所
小山佑世	国立天文台	
矢島秀伸	筑波大学	
栗田光樹夫	京都大学	
大塚雅昭	京都大学	
國生拓摩	名古屋大学	
白崎裕治	国立天文台	
山中郷史	鳥羽商船高等専門学校	
池田遼太	総合研究大学院大学	国立天文台
森下貴弘	STScI	
百瀬莉恵子	東京大学	
田中壱	国立天文台	
長峯健太郎	大阪大学	
榎木谷海	総合研究大学院大学	
LauRyan	宇宙科学研究所	
中西康一郎	国立天文台	
百瀬宗武	茨城大学	
笠羽康正	東北大学	
田崎亮	アムステルダム大学	
柏野大地	名古屋大学	
武藤恭之	工学院大学	
藤本征史	DAWN	
小倉和幸	呉工業高等専門学校	
岩室史英	京都大学	
橋ケ谷武志	京都大学	
近藤翼	名古屋大学	
鈴木大介	大阪大学	
尾崎忍夫	国立天文台	
本田充彦	岡山理科大学	
山響	大阪大学	
平尾優樹	大阪大学	
住貴宏	大阪大学	
森谷友由希	国立天文台	
空華智子	国立天文台	
石原大助	JAXA	

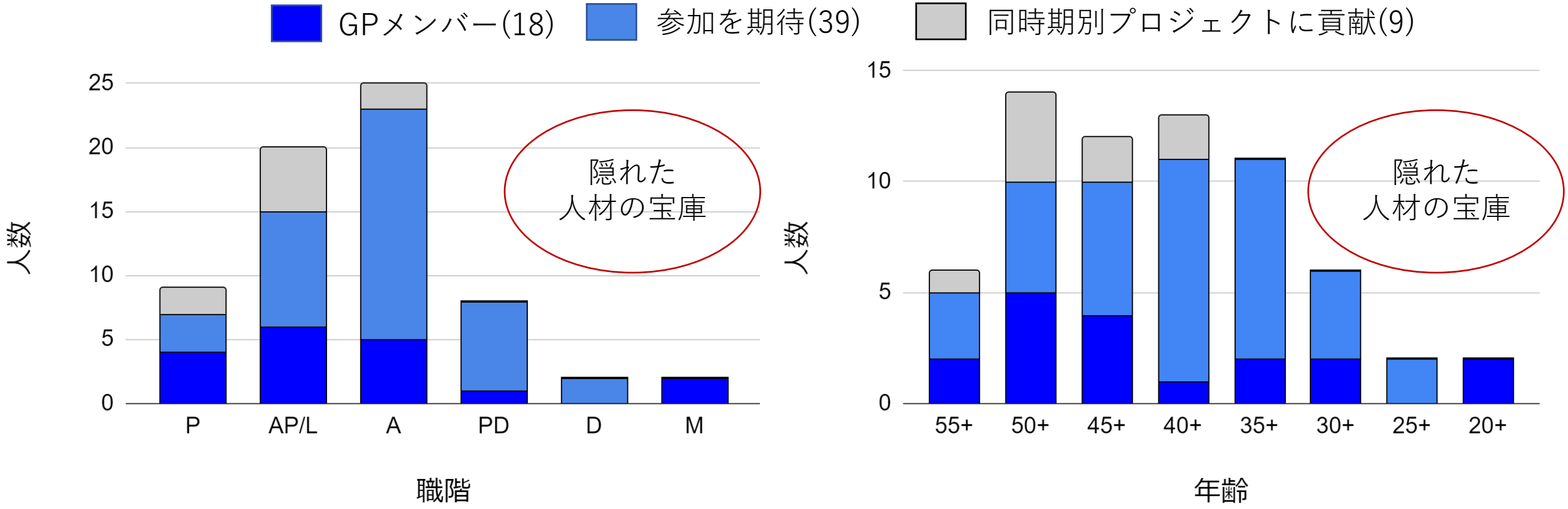
合計96名

参加者募集中です！

登録フォーム

光赤天連の力：装置開発人材

- 光赤プロジェクト、大学等からリストアップ（宇宙研除く）：**66名**
  - 2020年代後半から2030年代前半に～50名規模の開発体制構築は十分に可能
  - 若手人材のさらなる供給も期待できる



主な技術検討項目

WG提案書より(2021年10月)

	技術検討項目	技術成熟度(TRL)
望遠鏡	望遠鏡光学系	—
	主鏡材	3
	望遠鏡構造	3
	主鏡保持機構の成立性	2—3
	焦点調節機構	3
広視野カメラ	近赤外線検出器	8
	近赤外線検出器読み出し系	8
	中間赤外線検出器	5
	中間赤外線検出器読み出し系	4
	検出器マウント	5
	フィルター	4
	フィルターマウント	3
高分散分光器	イマージョングレーティング	3
	低雑音・低消費電力読み出し回路	3
	自由曲面金属鏡	3
	検出器熱アニーリングに適したモジュール	3
冷却系	GREX-PLUSに対応した熱構造の検討	—
	機械式冷凍機の長寿命化	5
	機械式冷凍機の振動による擾乱影響の検討	—
広視野サーベイプラン	広視野探査タイリングの成立性	—
信号処理系・通信系	十分なデータ伝送量の確保	—
	地上系体制の未確定によるコストの不定性	—
姿勢制御系	焦点面検出器を用いた衛星姿勢制御	2
	突発天体対応要求の策定	—

宇宙物理学GDIとの議論

- 時限WG化を視野に議論を継続中
  - 7月26日 GDI＋GP
  - 8月17日 GDI+GP
  - 8月19日 GDI+GP
  - 9月7日 GDI＋熱専門家＋GP
    - 9月6日 GDI+GP予備ミーティング

  - 科学目標のロス無く、望遠鏡システム要求を緩和する案を検討
    - JWST初期観測結果による超高赤方偏移銀河数密度見積もりの更新
    - 空間分解能要求を緩和、銀河内部構造はULTIMATE, JWST, TMTによるフォローアップで

GREX-PLUS

- 最高級の科学的価値
  - 極めて高いユニークネス
  - 同時に幅広いサイエンスを展開
  - 国民へのアピール力

- 光赤天連の悲願
  - US IR-Probe、Romanと合わせ、SPICAおよびWISHが目指したサイエンスを実現

- 光赤天連の力
  - コミュニティのマンパワーは十分に期待できる

見込みのスケジュール

WG提案書より
(2021年10月)

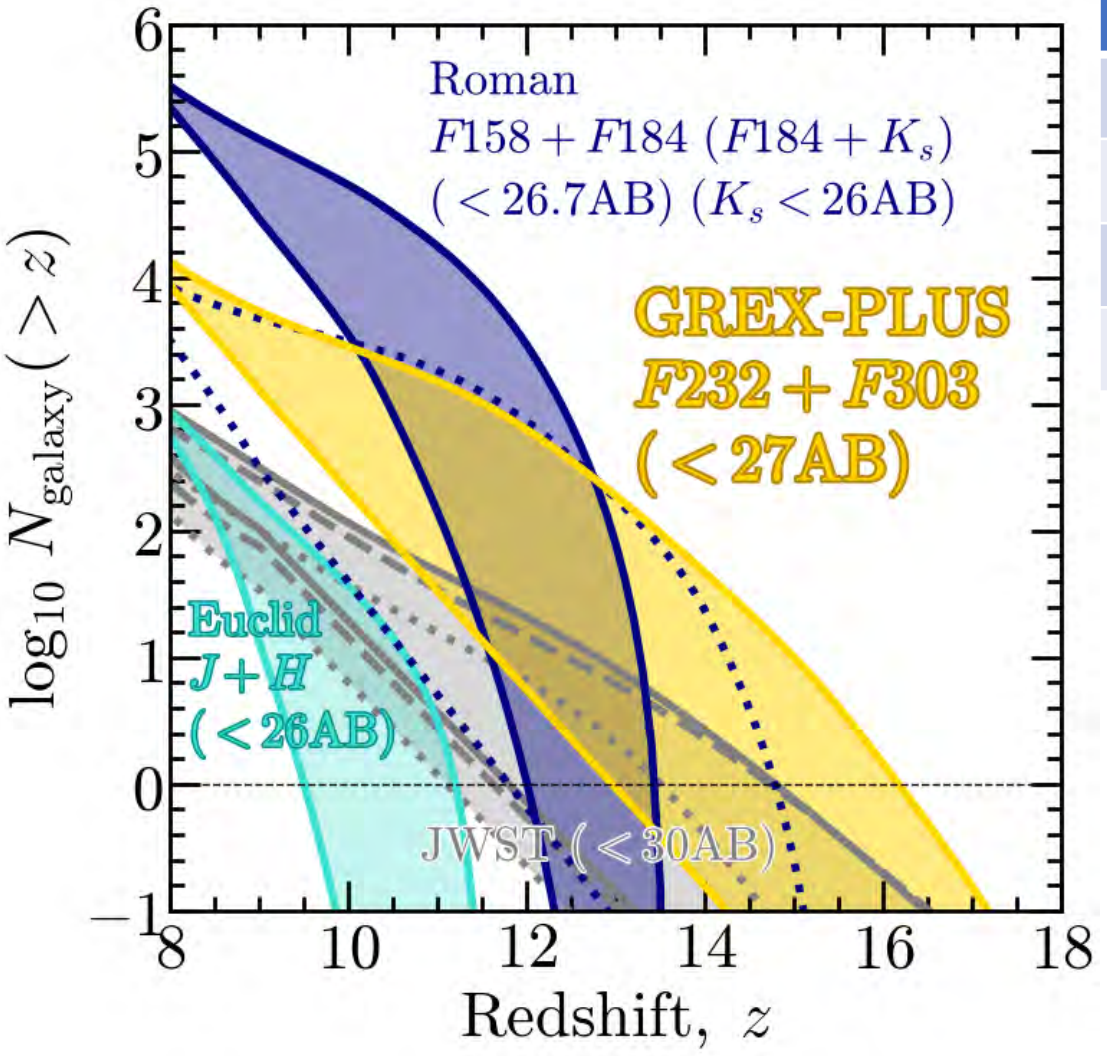
年	月	マイルストーン	組織形態	フェーズ	実施内容
2020	1	RG 発足	RG	Pre-Phase A1a/b	ミッション探求(24 か月)
2022	1	WG 発足	中型 WG		概念検討(21 か月)
2023	10	PP 候補選定審査			PP 候補審査対応(3 か月)
2024	1		PP 準備チーム (ISAS)	Pre-Phase A2	ミッション定義(21 か月)
2025	10	MDR/P 準備審査			MDR 対応(3 か月)
2026	1		プリプロジェクト (JAXA)	Phase A1	概念設計(12 か月)
2027	1	SRR			SRR 対応(3 か月)
	4			Phase A2	プロジェクト定義(18 か月)
2028	10	SDR/P 移行審査			SDR 対応(3 か月)
2029	1		プロジェクト (JAXA)	Phase B	基本設計(18 か月)
2030	7	PDR			PDR 対応(3 か月)
	10			Phase C	詳細設計(18 か月)
2032	4	CDR			CDR 対応(3 か月)
	7			Phase D	FM 製造・試験(24 か月)
2034	7				射場作業(3 か月)
	10	打上		Phase E	当初運用期間(5 年)
2039	10				
2046	10	P 終了			延長運用期間(5 年)およびアーカイブフェーズ(2 年)

2022/04頃 GDI設立
2022/09頃「時限WG」発足
2024/04? コンセプト提案 → GRI

RG: Research Group
WG: Working Group
PP: Pre-Project
P: Project
MDR: Mission Definition Review
SRR: System Requirements Review
SDR: System Definition Review
PDR: Preliminary Design Review
CDR: Critical Design Review
FM: Flight Model

広視野カメラの科学

- 最遠方銀河探査　→　サーベイを完遂すれば確実に達成可能



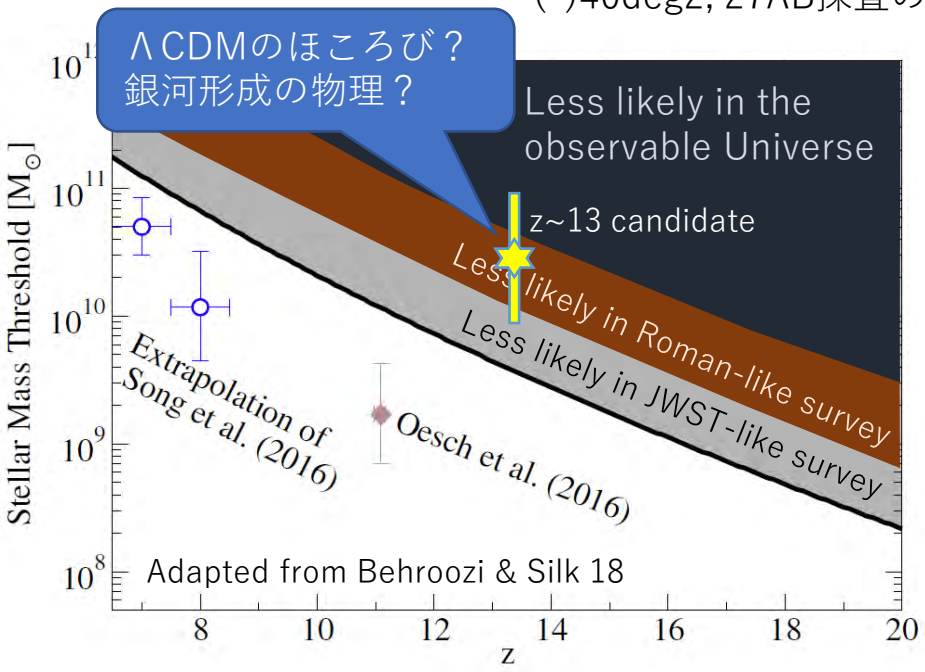
(*)

z	JWST	Euclid	Roman	GREX-PLUS
8-10	100--1k	~1k	~300k	~10k
10-12	30--100	0--500	10k--50k	300--5k
12-15	1--50	0	1--5k	**10**--1k
>15	0--1	0	0	0--**10**

(*)40deg2, 27AB探査のみ

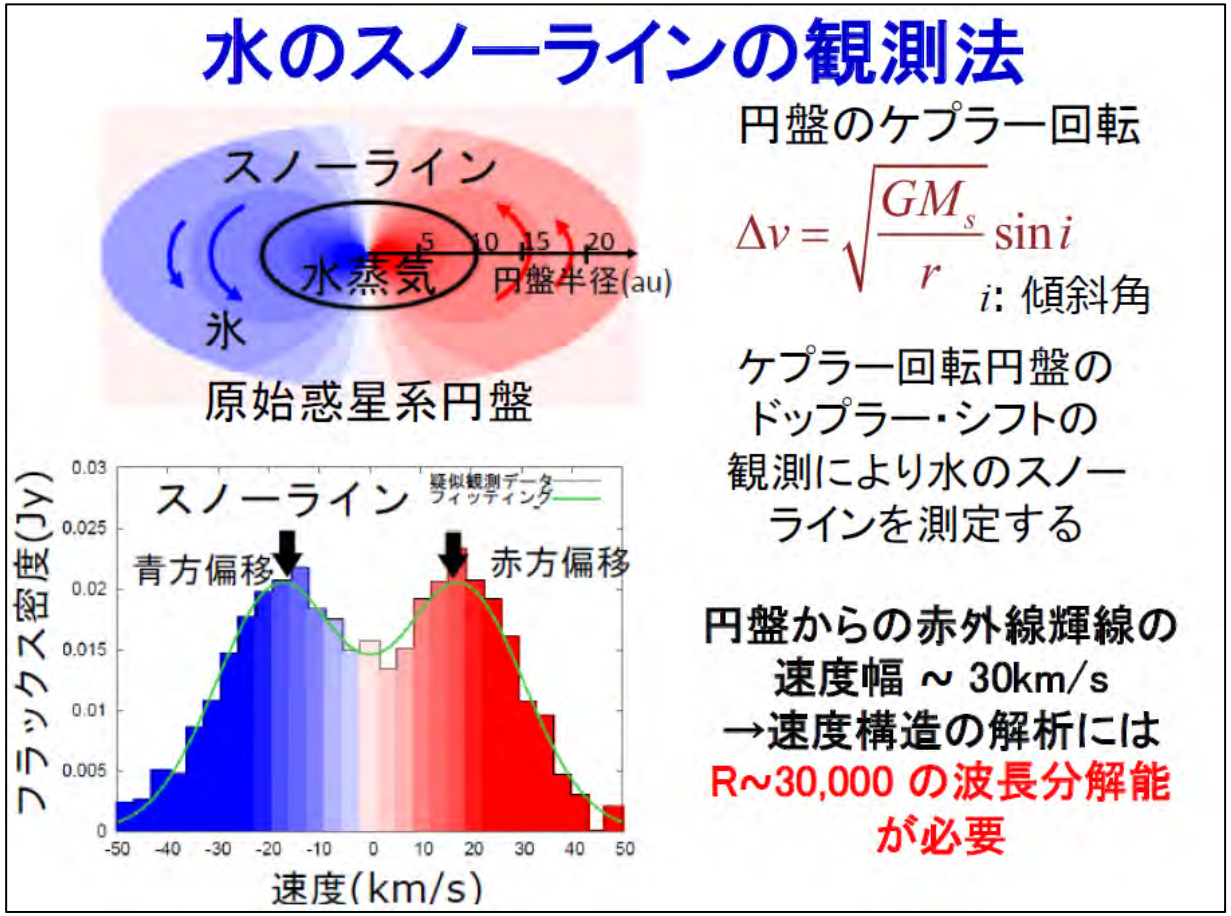
	宇宙年齢	z=20からの時間
z	Myr	Δt
9	535	360
11	407	232
13	323	148
15	264	89
20	175	-

(737-cosmology)

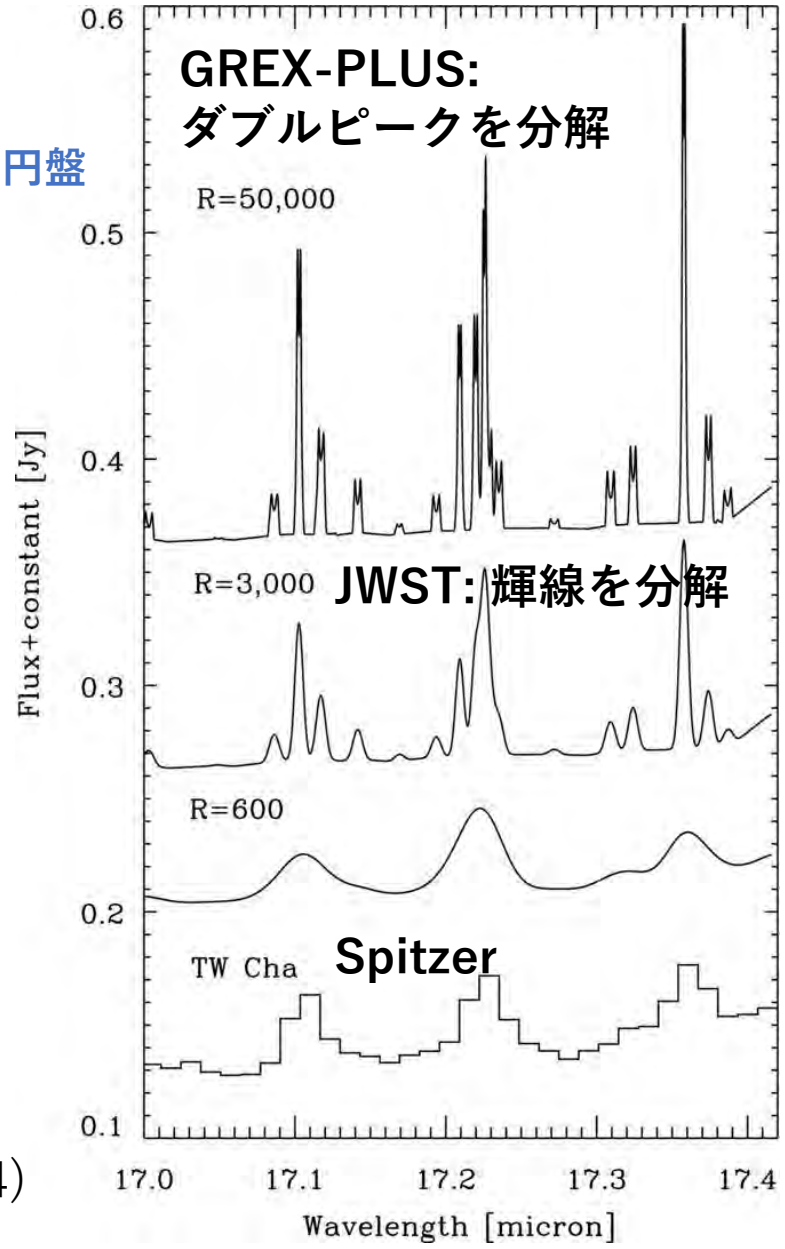


高分散分光の科学

- 原始惑星系円盤H_2Oスノーラインの位置特定
  - 岩石惑星/ガス惑星の棲み分け　**>100 HAe/BeやTタウリ型星の円盤**
  - 岩石惑星への水と有機物の供給 (海と生命の起源)



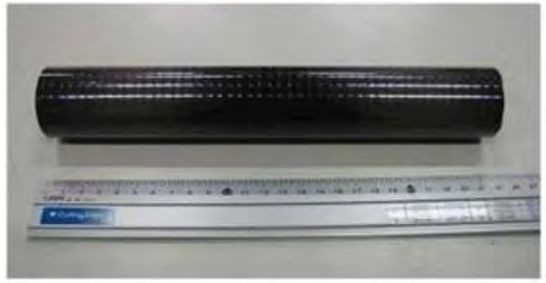
Pontoppidan+10: H_2O

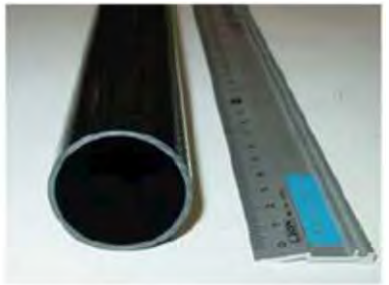


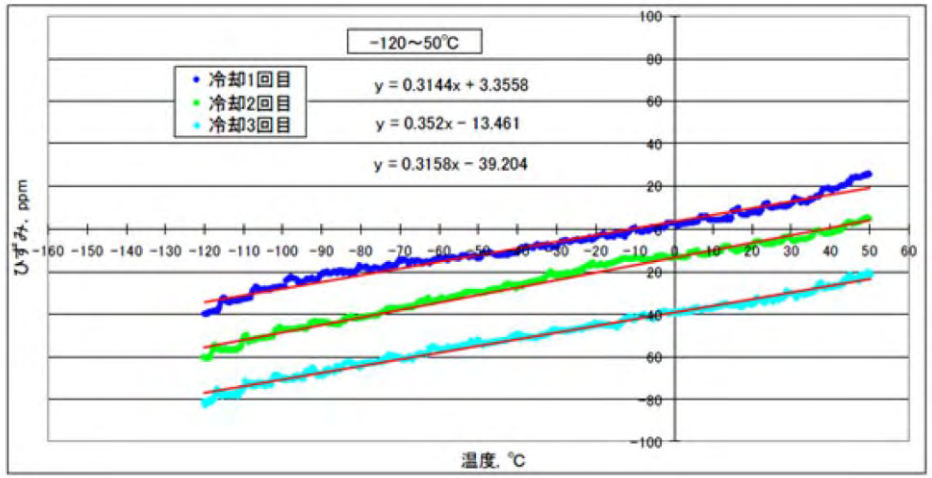
野村英子
(2021/3/24)

望遠鏡

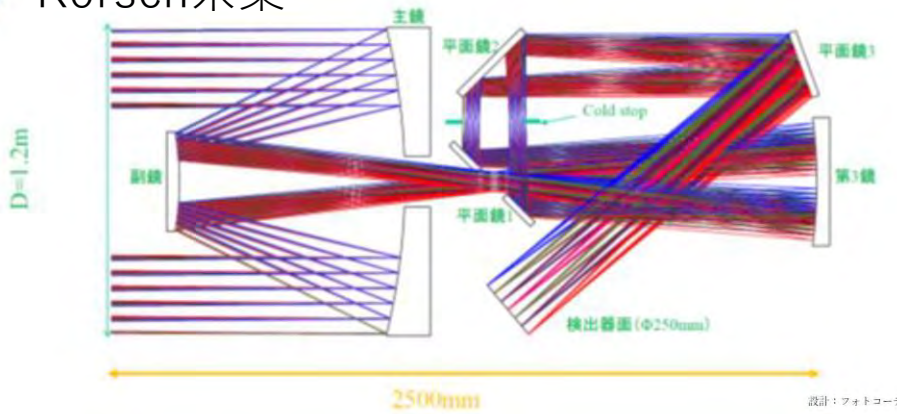
- 改良Korsch3枚鏡 / RC2枚鏡＋補正レンズ
  - 直径1度角全面にわたり極めて良好な結像性能
- 超低熱膨張CFRP素材による静定トラス構造
  - WISH検討へリテージ
- 主鏡保持機構BBM
  - WISH検討へリテージ

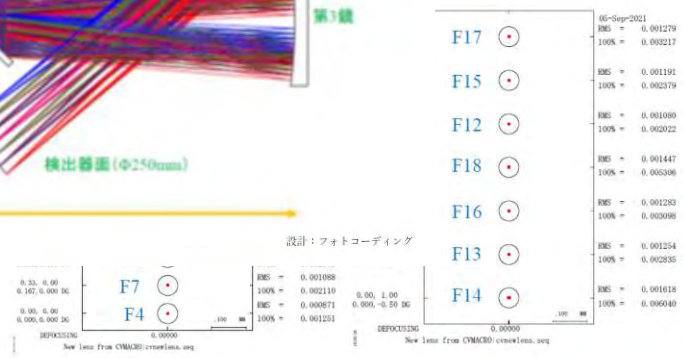


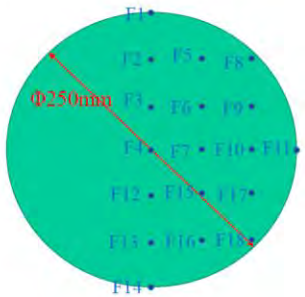




(a) Korsch系案





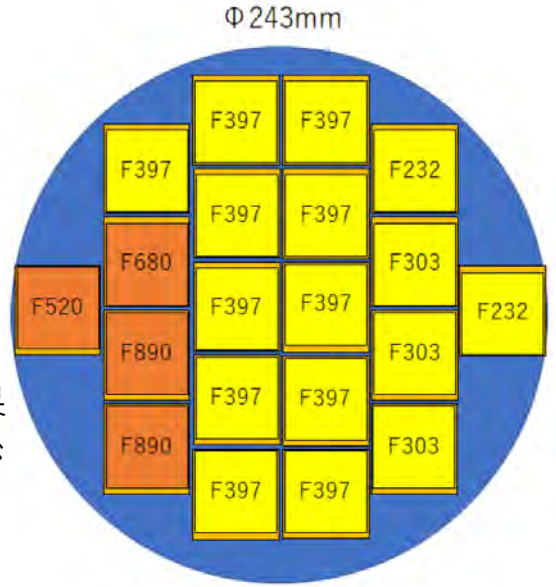


視野の定義

○は、波長2umでのエアリディスク

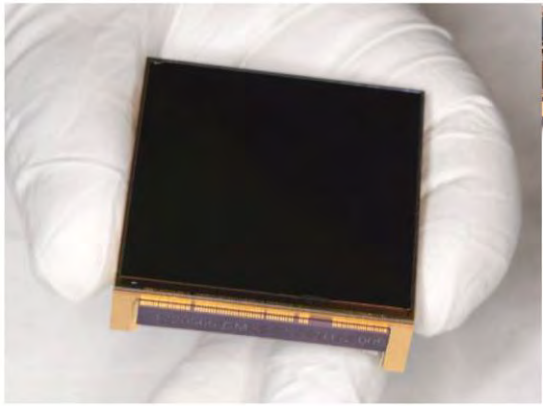
広視野カメラ

- JWSTで実績のあるHgCdTeアレイ検出器＋読み出し回路
- フィルター貼り付け方式で20枚を焦点面に配置
  - 近赤外線3バンドに16枚
    - 感度に反比例させた割り当て検出器枚数
  - 中間赤外線3バンドに4枚



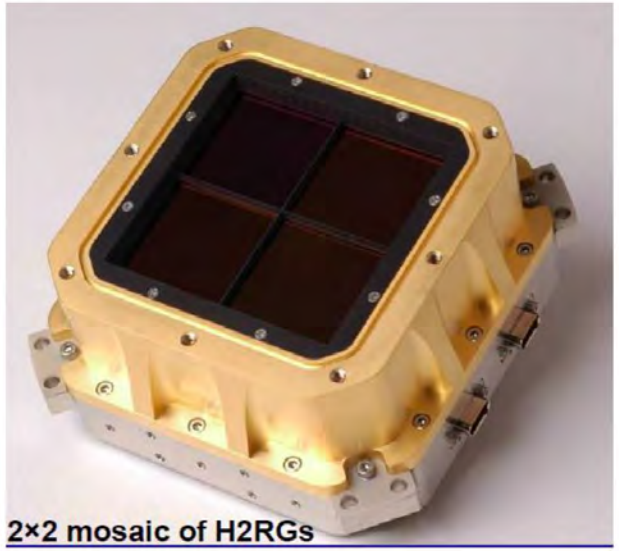
焦点面検出器
配置イメージ

HgCdTe検出器 (HAWAII-2RG)
2000x2000 pix, 約4cm四方

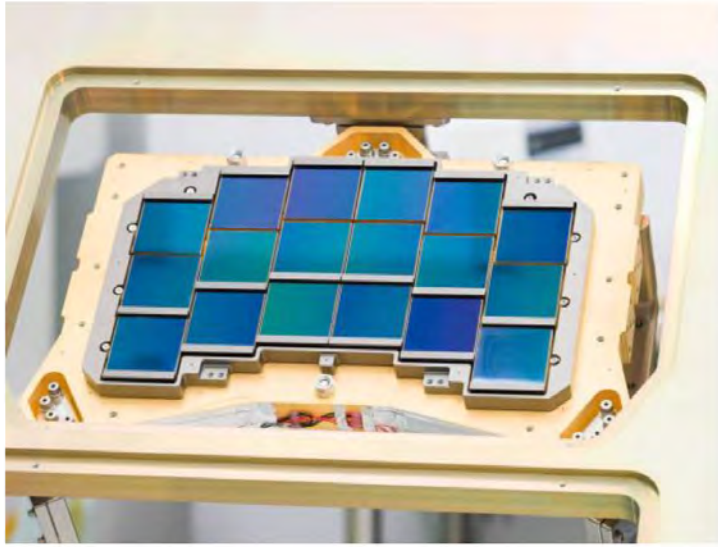


Teledyne社HPより

JWST用に開発された
H2RG 2x2モザイク (Teledyne社)

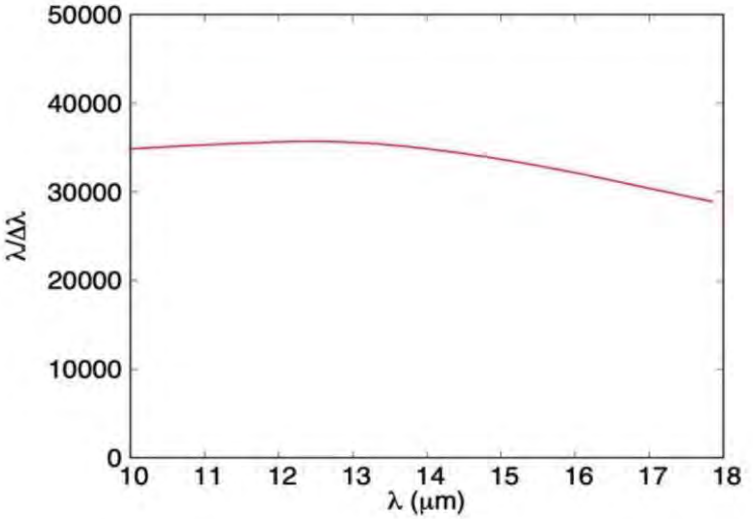


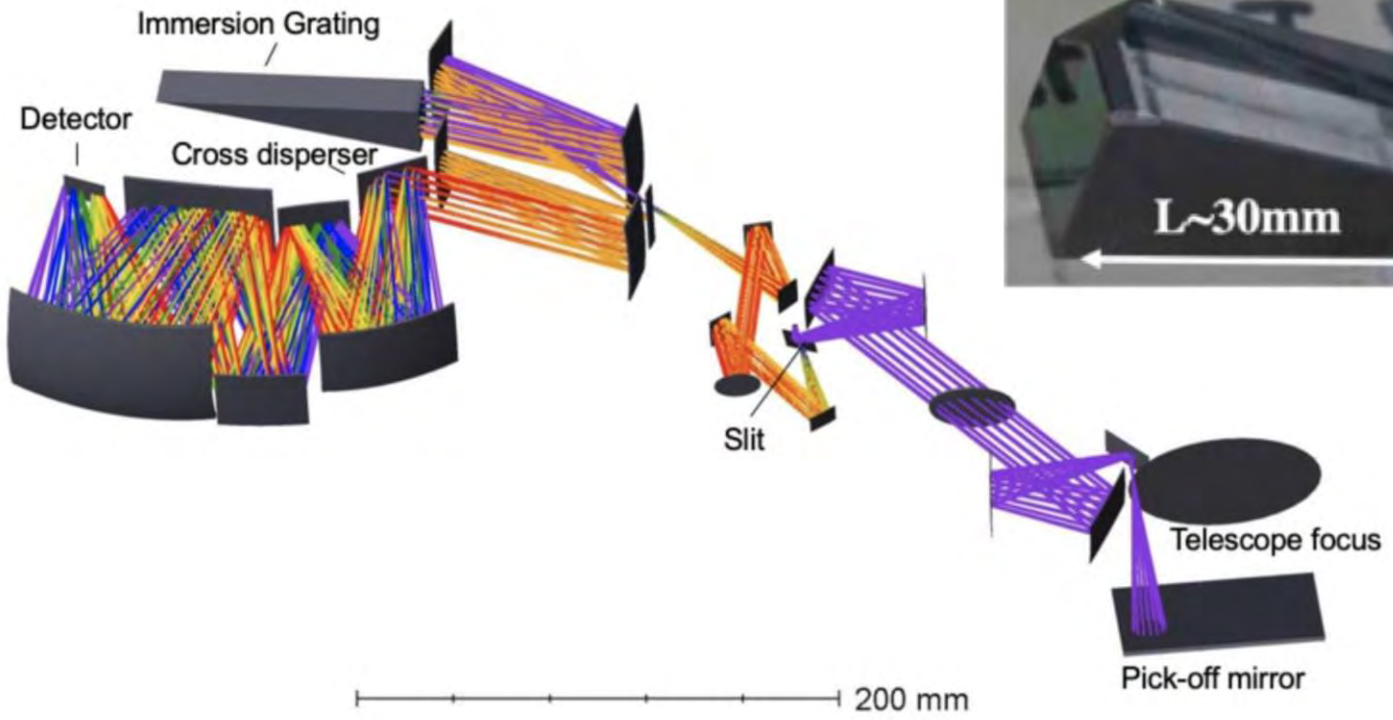
Roman用H4RG 18枚の
モザイクパッケージ(NASA)

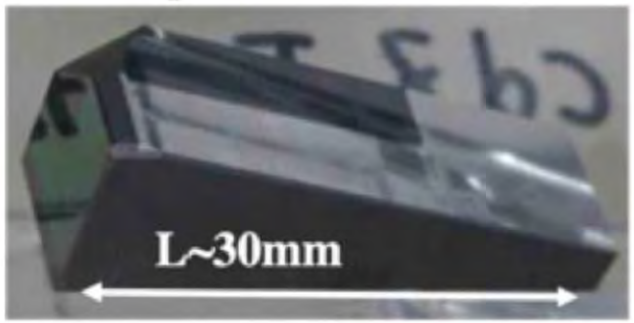


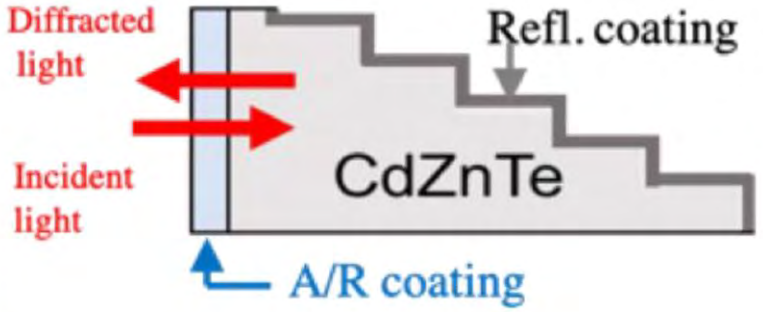
高分散分光器

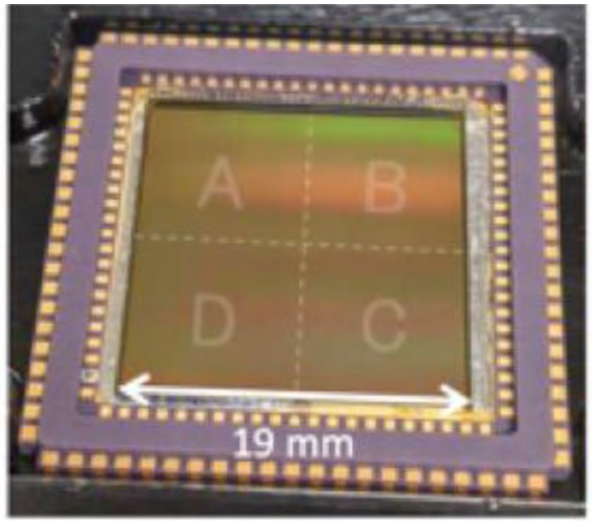
- SPICA/SMIの高分散チャンネルをベースに利用
  - 波長分解能30,000を実現できる光学設計解
  - CdZnTeイマージョングレーティング試作
  - 検出器読み出し回路試作





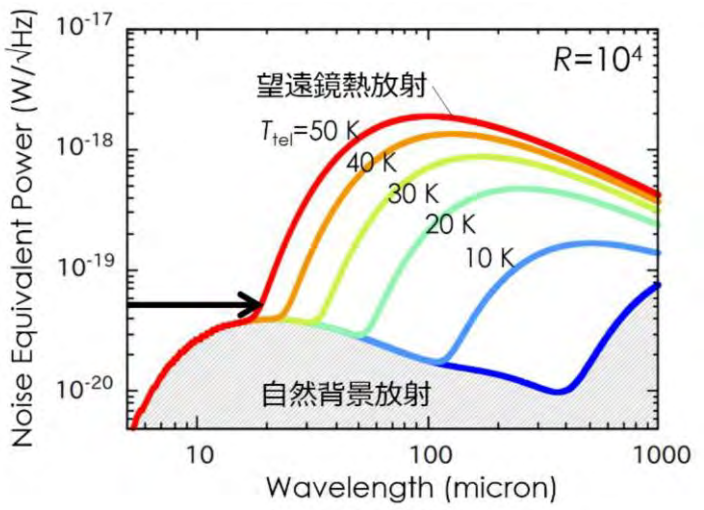


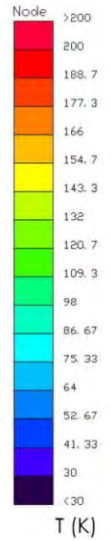


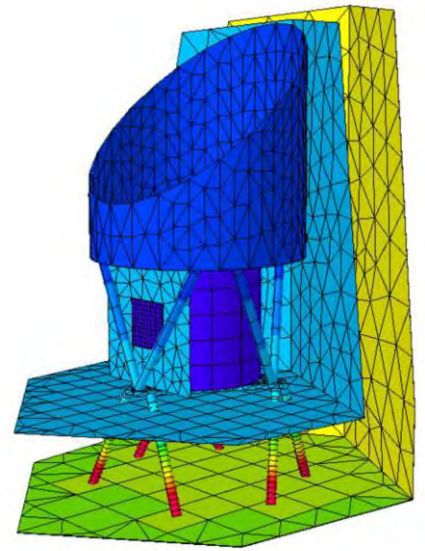


冷却系

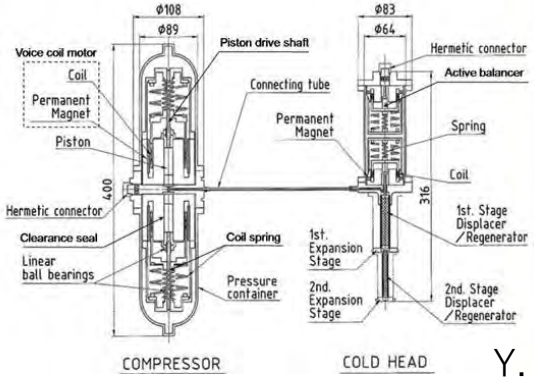
- 望遠鏡<50K(放射冷却)
  - SPICAの大幅簡略版で成立
- 検出器(機械式冷凍機)
  - SPICA検討へリテージ
  - 冗長化で1～2台故障まで対応→長寿命化へ

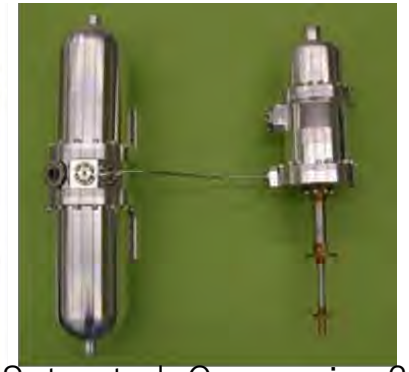


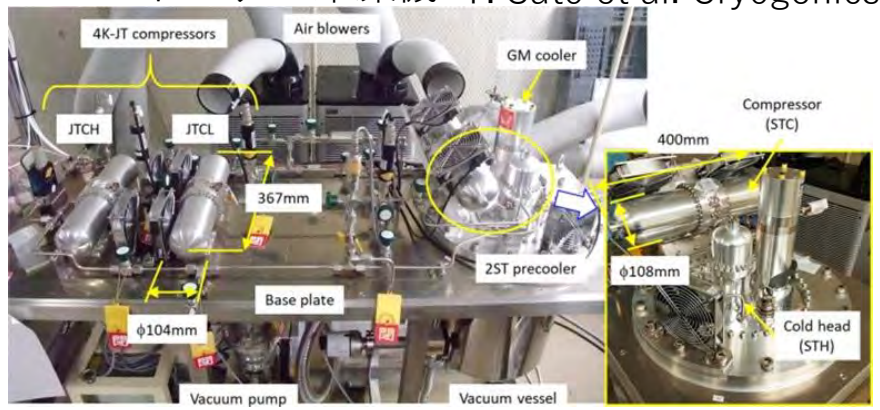
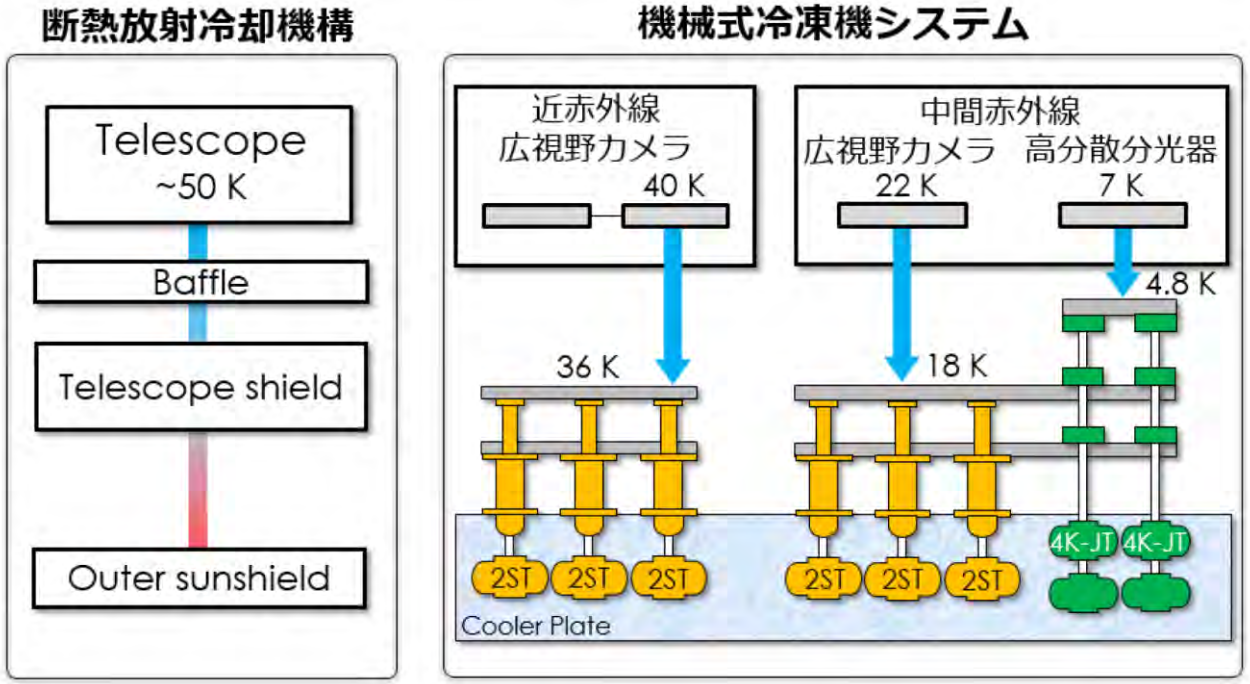




2段式スターリング冷凍機





Y. Sato et al. Cryogenics 2012
Y. Sato et al. Cryogenics 2014

4Kジュールトムソン冷凍機