

ロケット実験CIBER-2による宇宙赤外線背景放射の観測

松浦 周二 (関西学院大学)

CIBER collaboration

Japan (関学, 九工大, 東京都市大, ABC, JAXA)

US (RIT, Caltech, UC Irvine)

Korea (KASI), Taiwan (ASIAA)

自己紹介

1999年より15年間JAXA宇宙科学研究所に勤務

- あかり衛星, はやぶさ2, ロケット実験CIBERなど宇宙機搭載機器の開発

2015年より関学着任, 2021年より理学部 物理・宇宙学科

- CIBER-2, COBANDロケット実験ほか, 衛星や探査機による宇宙赤外線背景放射観測プロジェクトを推進



宇宙史の概観

宇宙創成
ビッグバン

宇宙の晴れ
あがり

初代天体の誕生・宇宙再電離

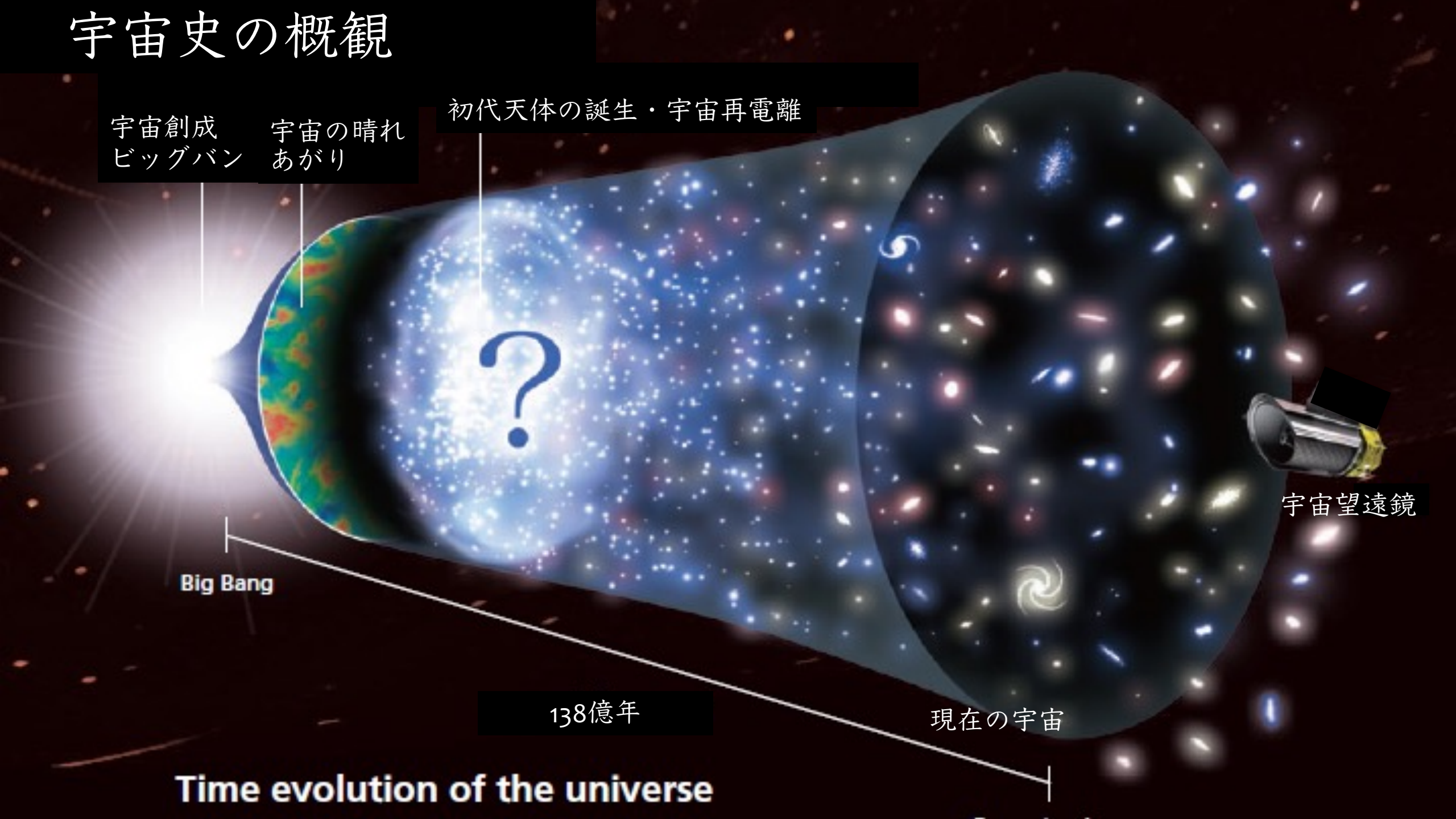
Big Bang

138億年

現在の宇宙

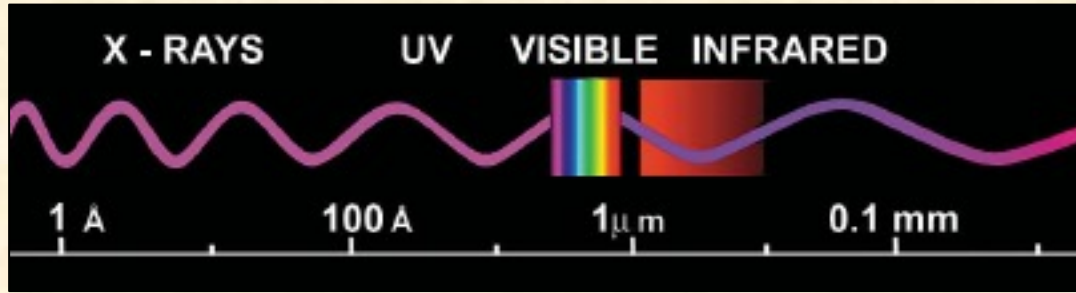
宇宙望遠鏡

Time evolution of the universe



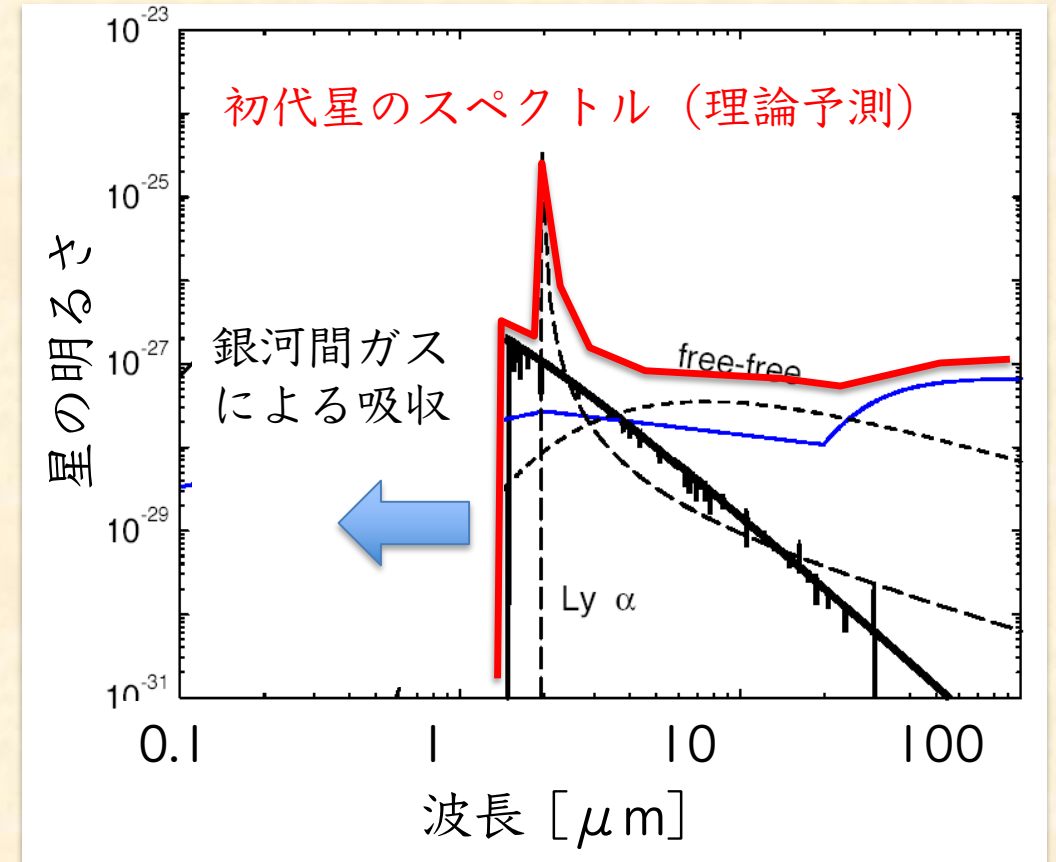
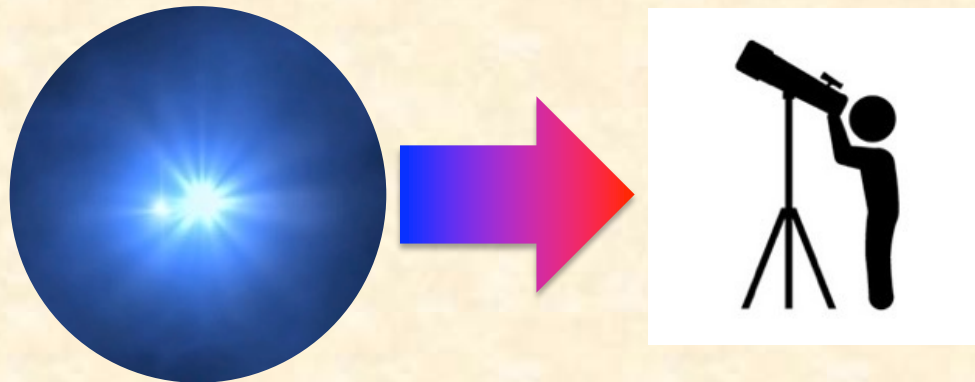
宇宙初期の天体を赤外線で見つける

- $z > 10$ の初期天体による紫外線は赤外線として観測される
- 銀河間ガス(水素ライマン端)吸収による 急峻なスペクトル



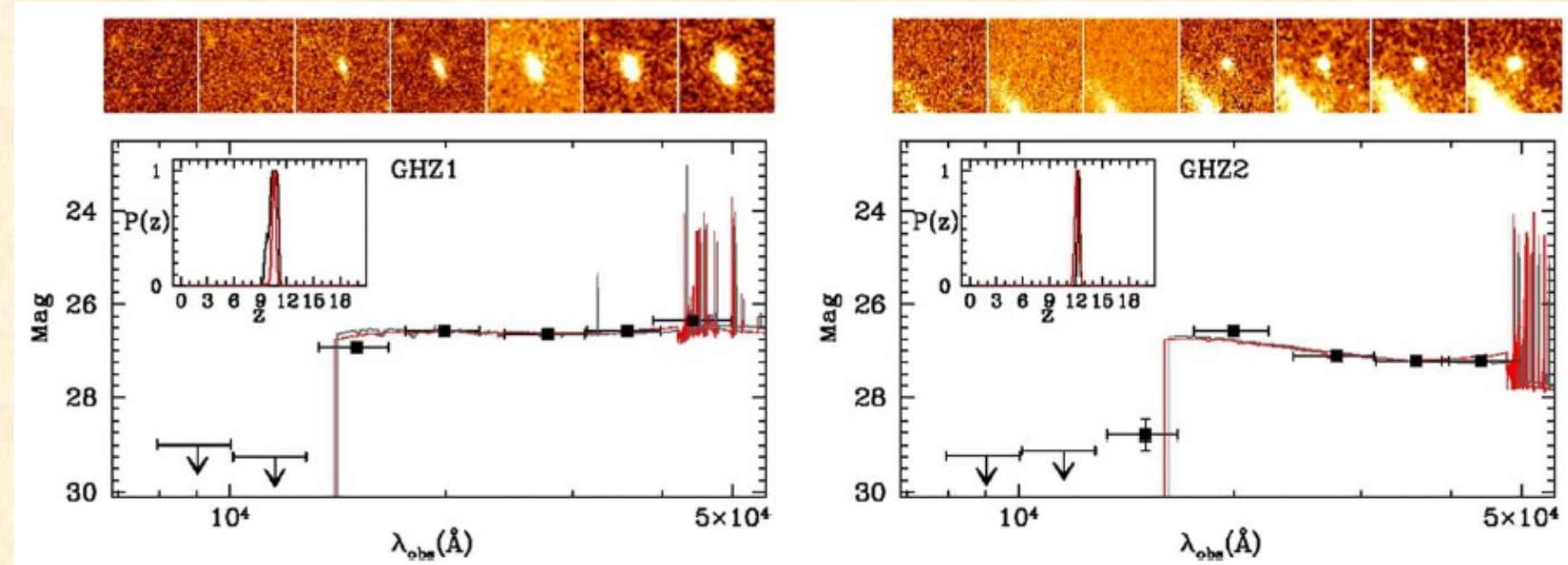
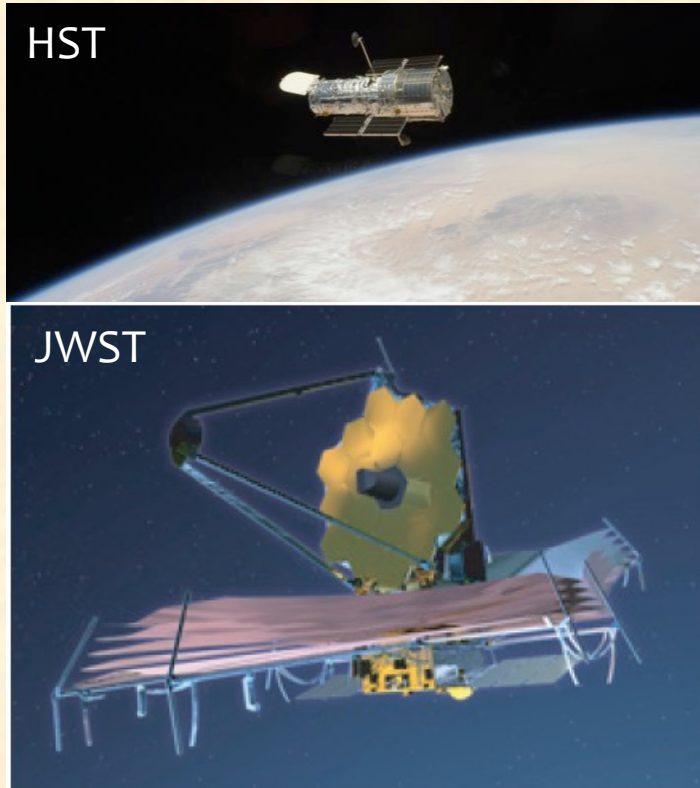
初期天体
紫外線

現在
赤外線



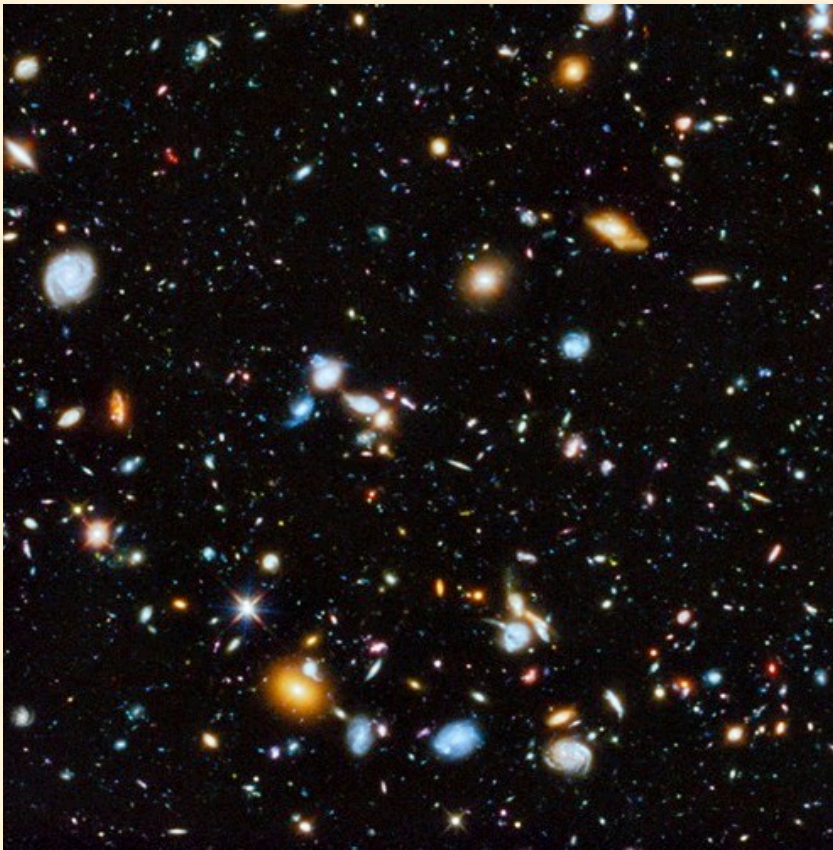
初代星の個別検出は今のところ難しい

- $z > 10$ の銀河(近赤外Ly break)は HST+Spitzer, JWST により発見された
- 橋本拓也さんらにより ALMAで $z > 10$ 銀河の [OIII]輝線が検出された
- ただし初代星 (AB > 35 mag) の個別検出はHSTやJWSTでも難しい



JWSTにより発見された $z > 10$ 銀河の赤外線スペクトル
Castellano et al., ApJ 938, L15 (2022)

点源に分解できない天体を背景光としてとらえる



Hubble Deep Field

$$I = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{0.007c^2 \rho_b \Delta X}{1 + z_e}$$

$\rho_b \Delta X$: total metal production

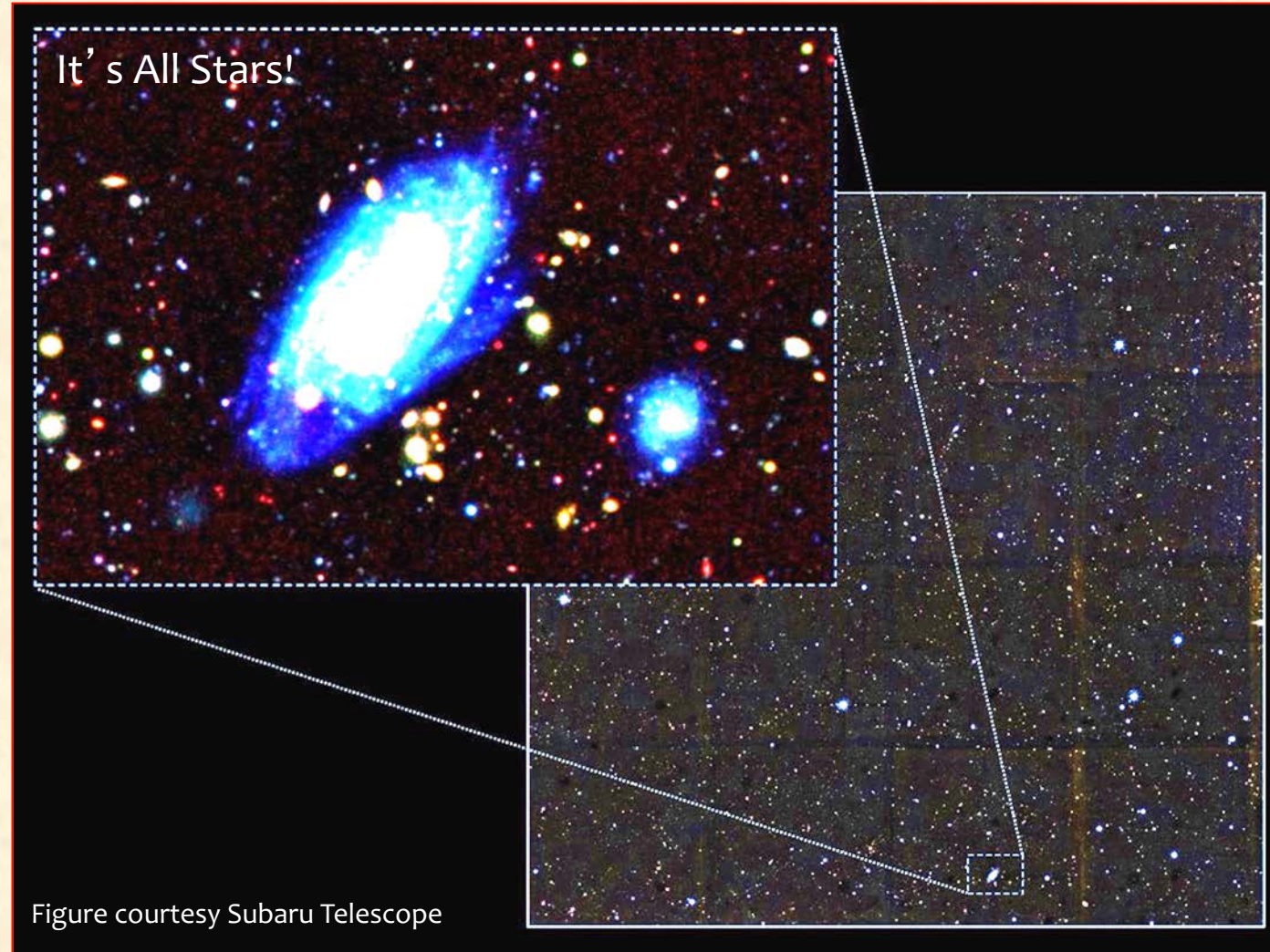


個別の天体として暗くても多数あつまれば見える

宇宙背景放射の観測

可視近赤外域のEBL (Extragalactic Background Light)

基本的には銀河(点源)の宇宙初期までの足し合わせ (銀河積算光)による



点源分解できない拡散光源があれば銀河積算光からの輝度超過が観測される

近赤外域の宇宙背景放射 - 超過成分の存在

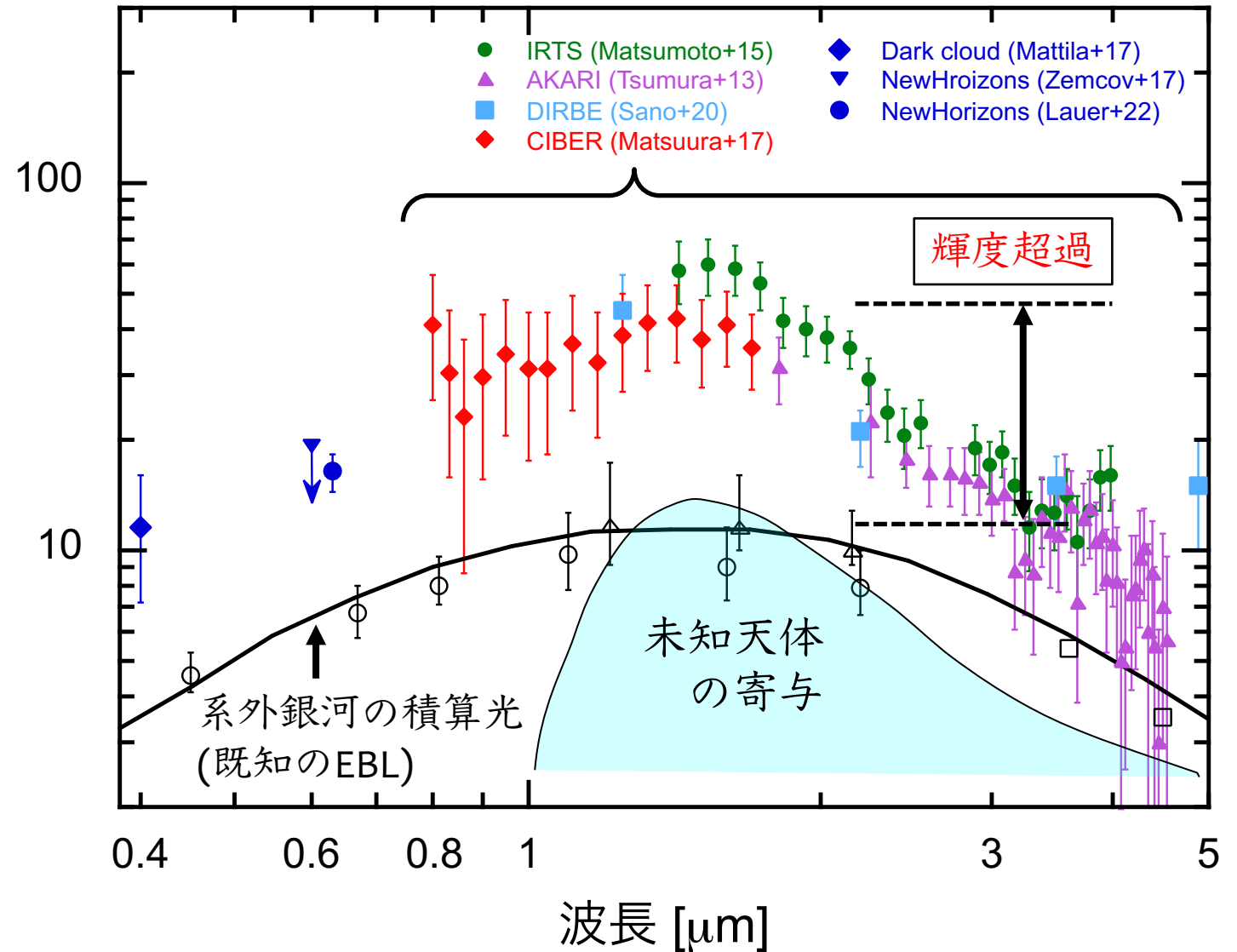
これまでの近赤外EBL観測は日本が主導してきた

銀河積算光より明るい
(輝度超過)



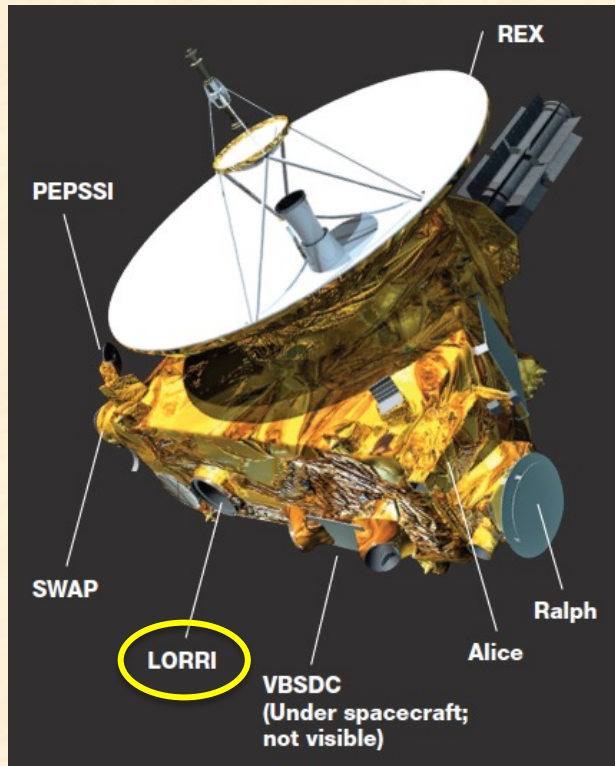
- 等方な黄道光・銀河光
- 銀河ハロー星(IHL)
- 未発見の矮小銀河
- 再電離期(EoR)

背景放射の明るさ [$\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]

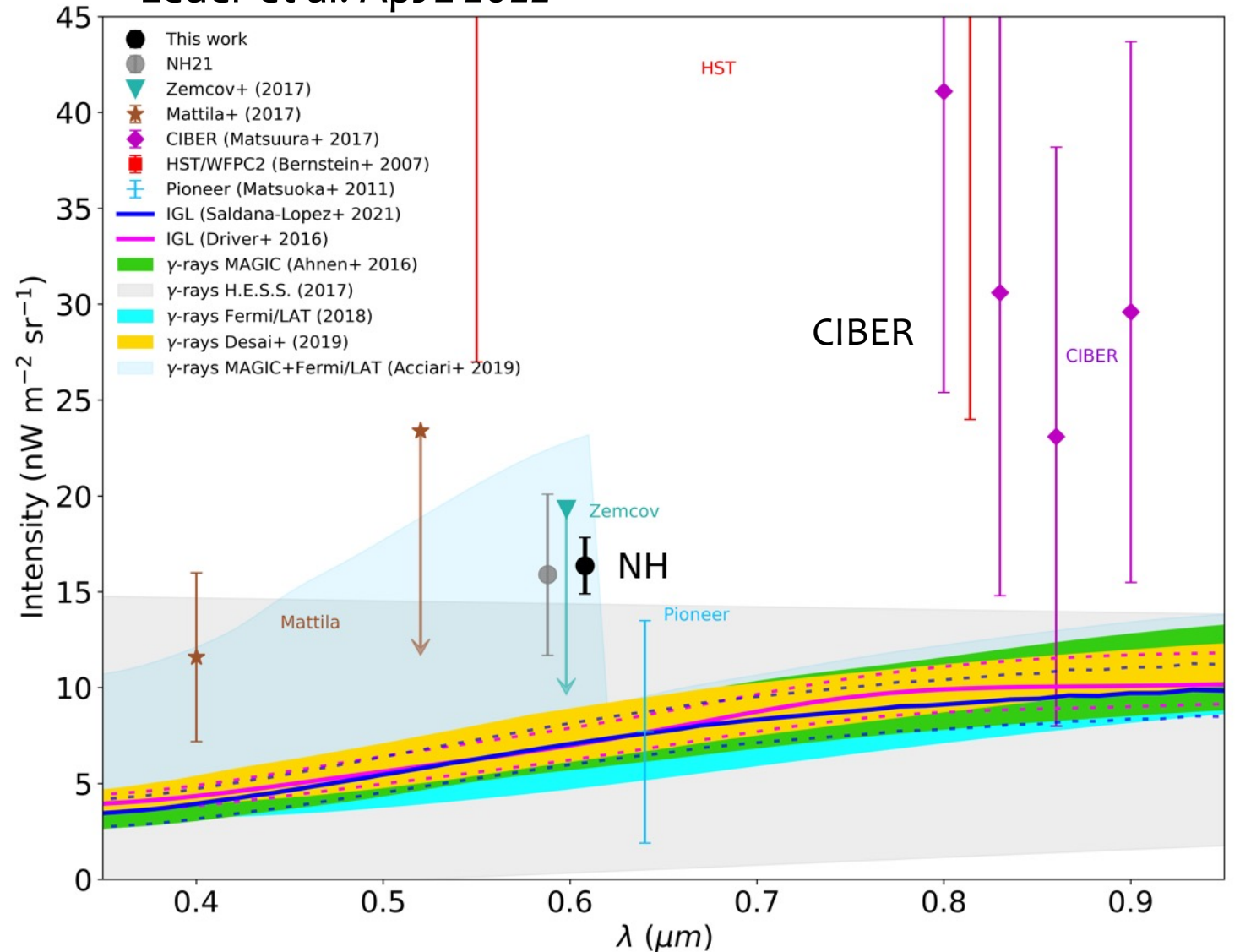


可視光のEBLにも超過が見つかった

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



Leuer et al. ApJL 2022

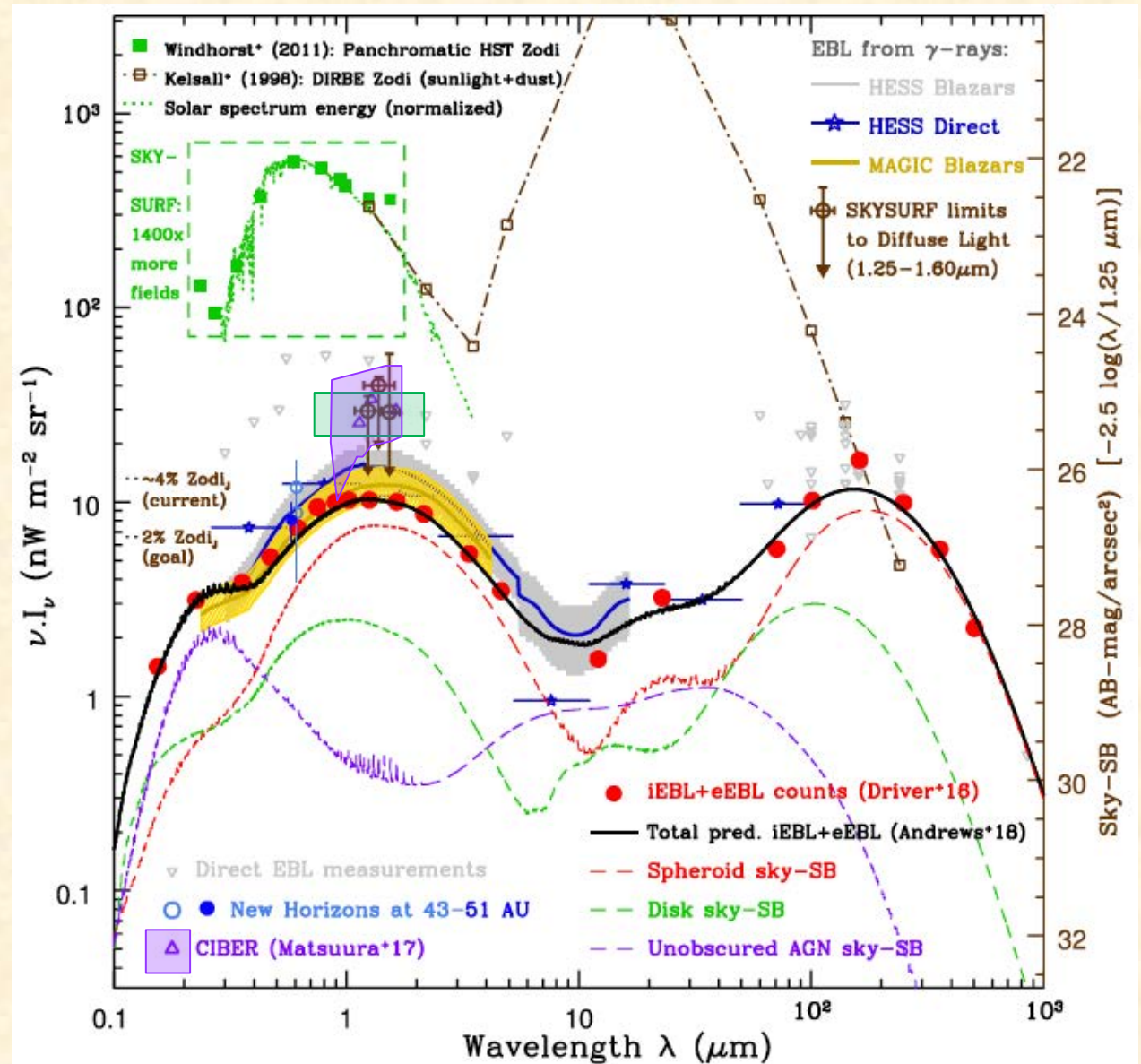


HSTアーカイブデータによるEBL測定

- SKYSURF project
(PI: R. Wondhorst, U. Arizona)
- HST F125W, F140W, F160W
7年間のデータ面輝度測定
- 銀河積算光の寄与が小さい
(AB < 26magの星や銀河を除去)
- **大きなEBL輝度超過**
– CIBERと矛盾がない結果

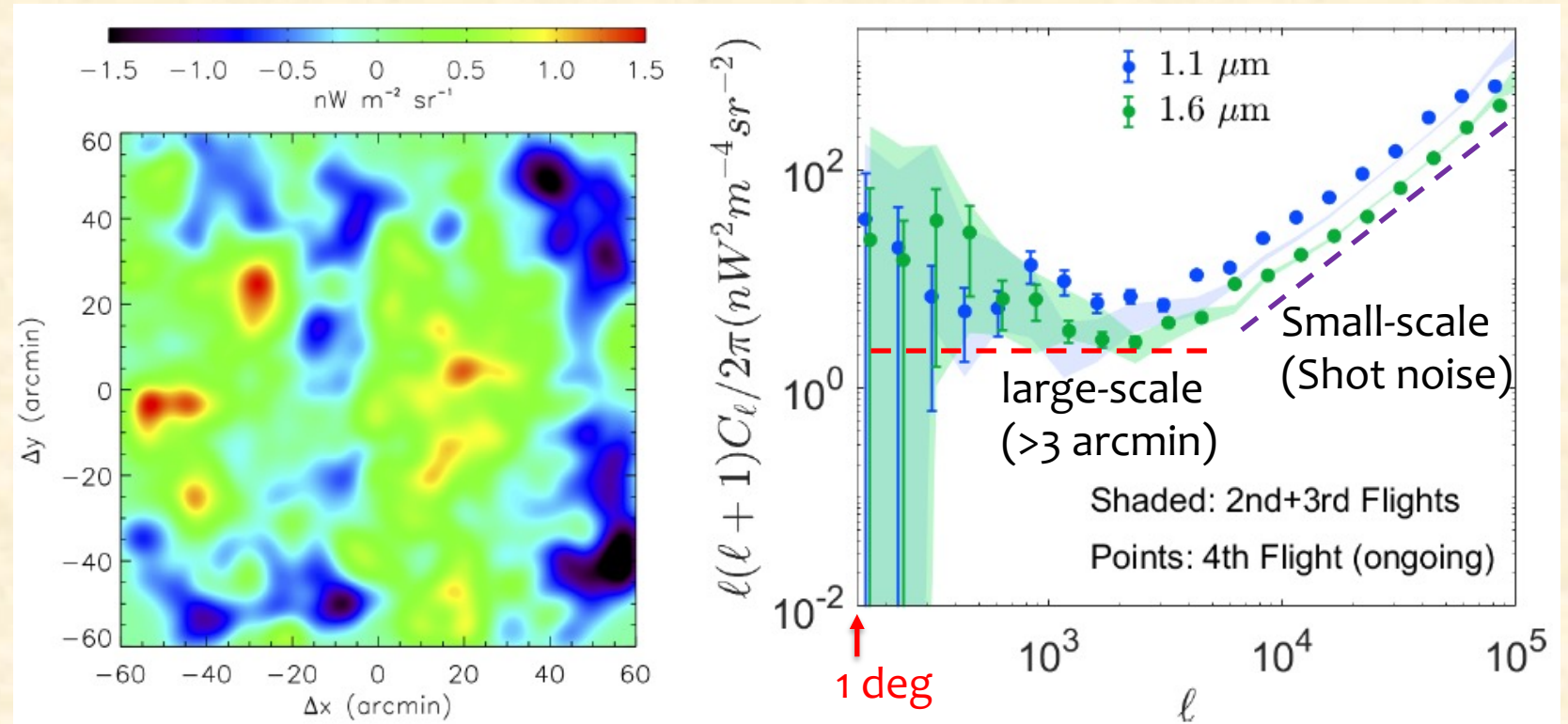
○ SKYSURF-2
Carleton et al. 2022, AJ 164, 170

■ SKYSURF-4
O'Brien et al. 2022, [arXiv:2210.08010](https://arxiv.org/abs/2210.08010)



EBLの非等方性にも超過あり

- CIBER実験によるEBLの非等方性（空間的な強度ゆらぎ）の観測
- 星や銀河を除去後の強度マップのゆらぎパワースペクトル
- 系外銀河によるゆらぎに対して大角度スケールで超過

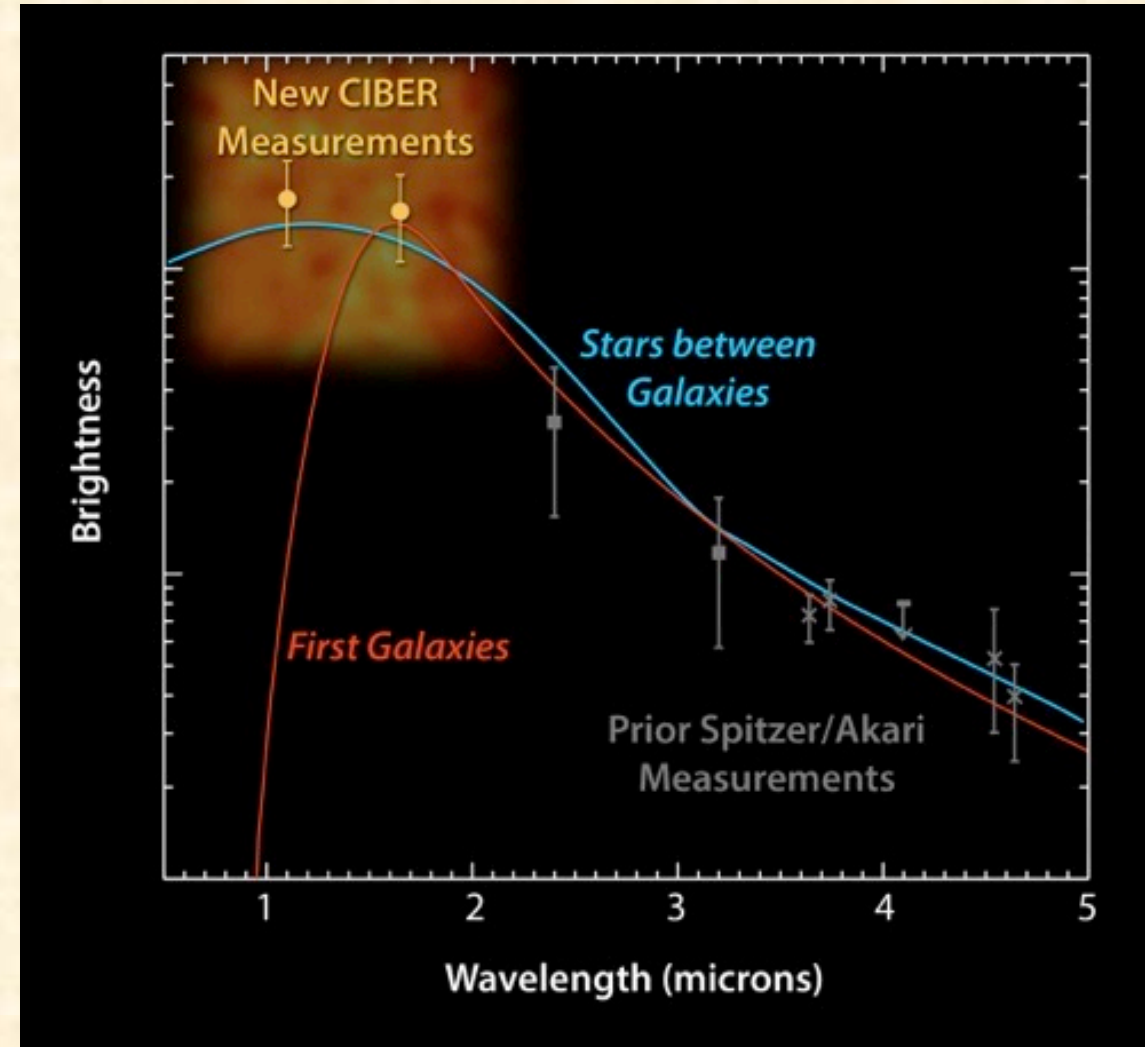
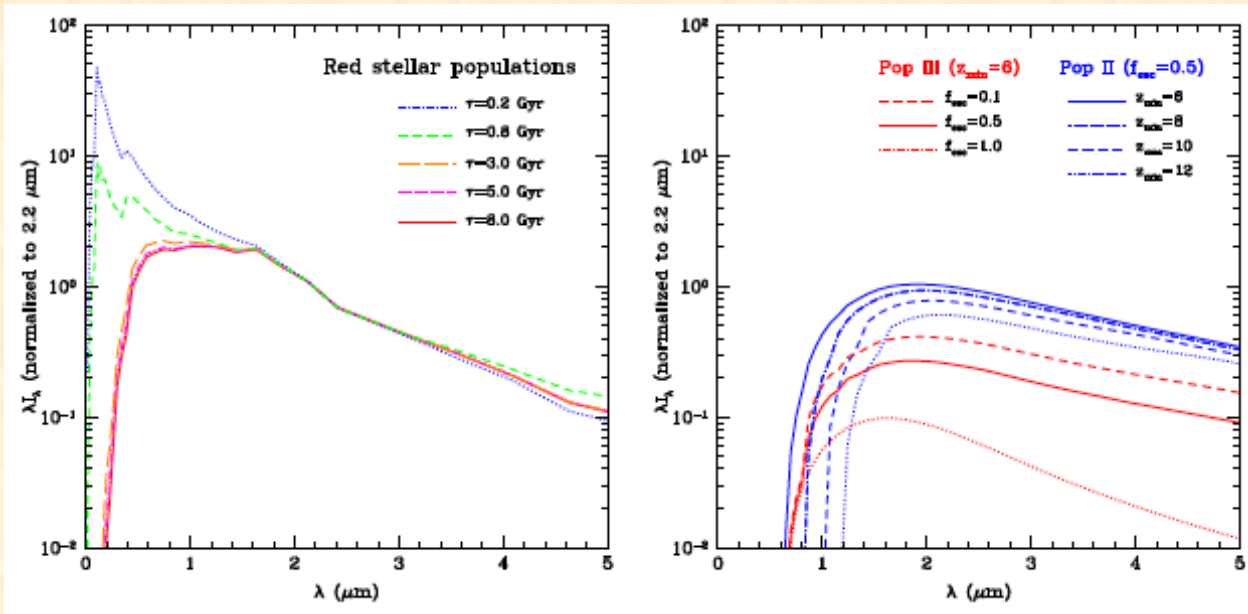


大角度成分のみ抽出したマップ

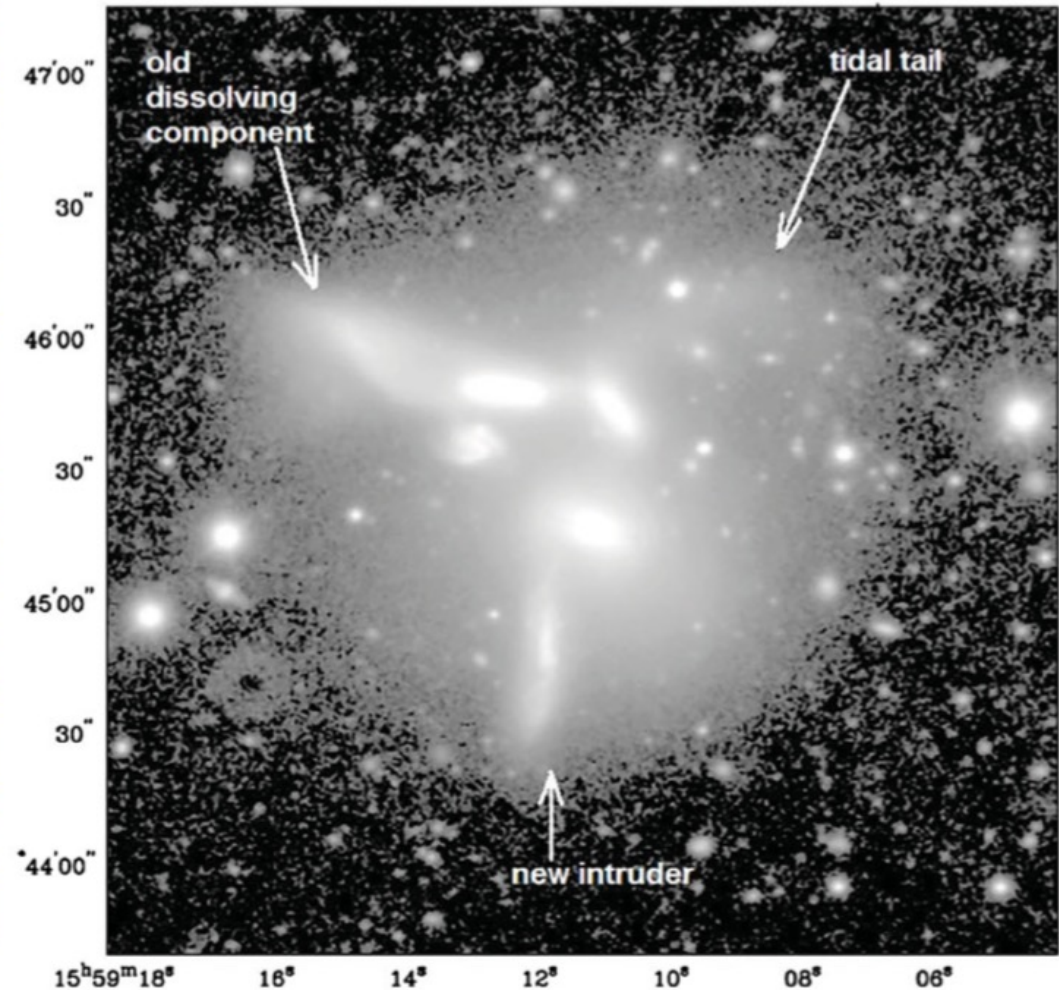
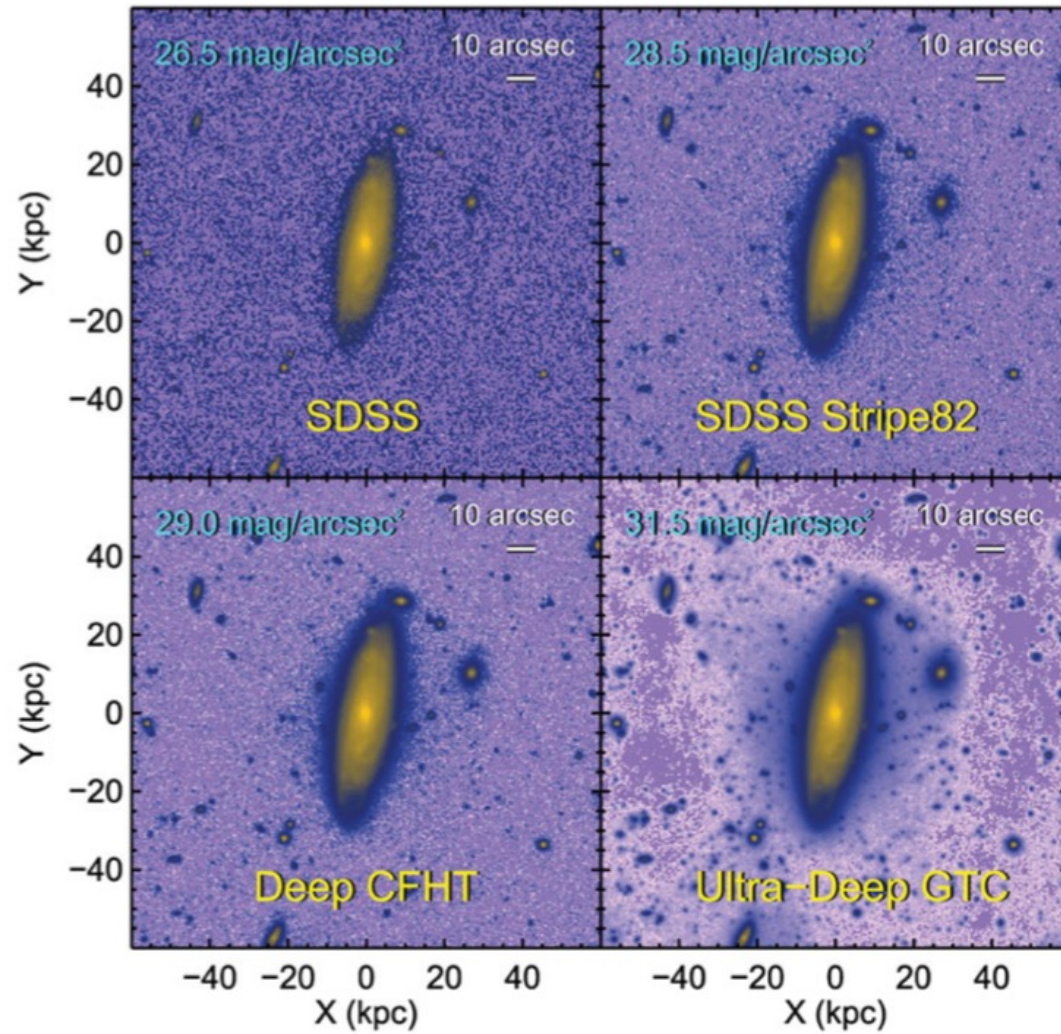
EBL 非等方性の波長依存性

Results from Spitzer, AKARI & CIBER

- Rayleigh-Jeans like spectrum
- No significant Lyman break of early objects
- Similar to red (old) stellar populations
→ Intrahalo light ?



Intra-halo Light (Stars between galaxies)



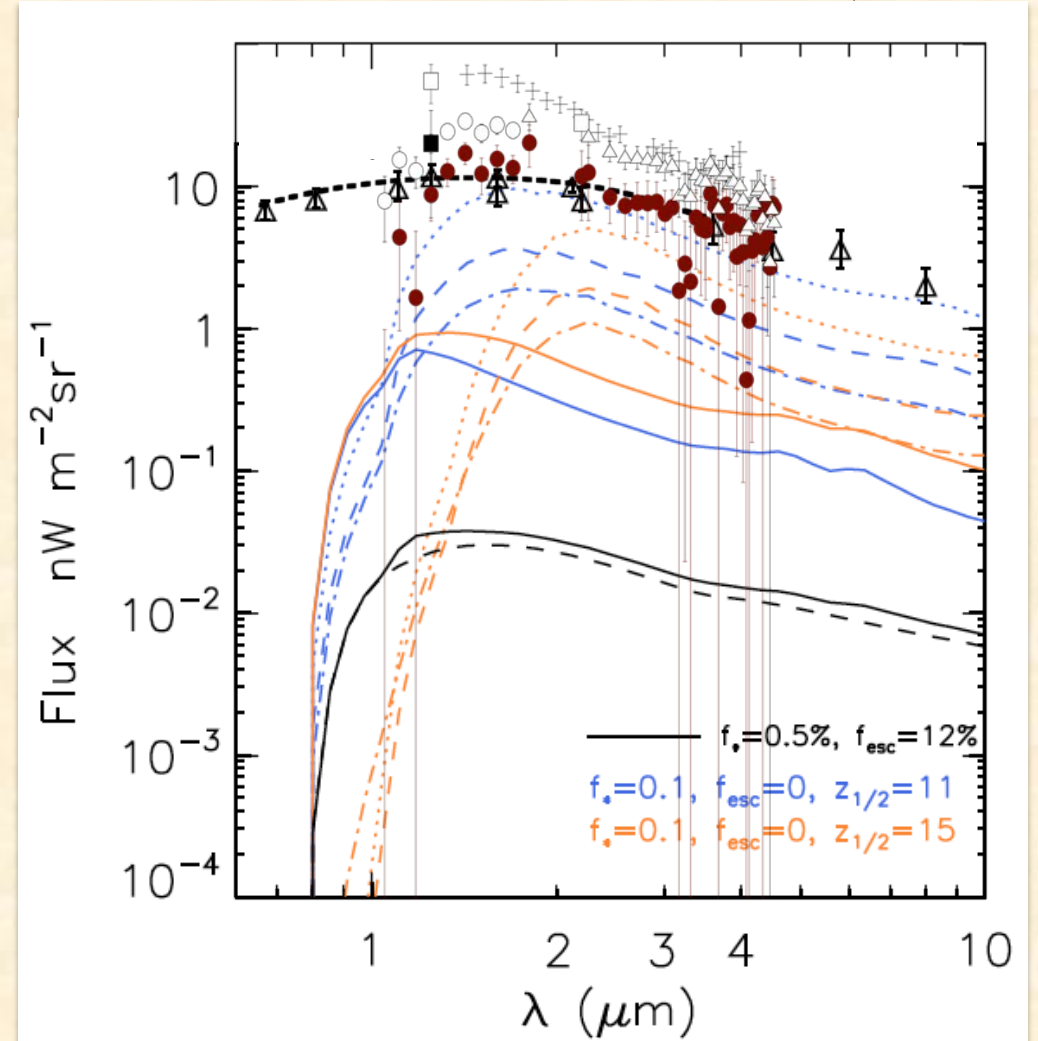
初代星なのか？

CIBERほかで見つかった近赤外EBL 超過スペクトルのモデル比較

- Ly breakと似たスペクトル形状
- 初代星による説明は難しい高輝度
 - バリオン・重元素過剰の問題

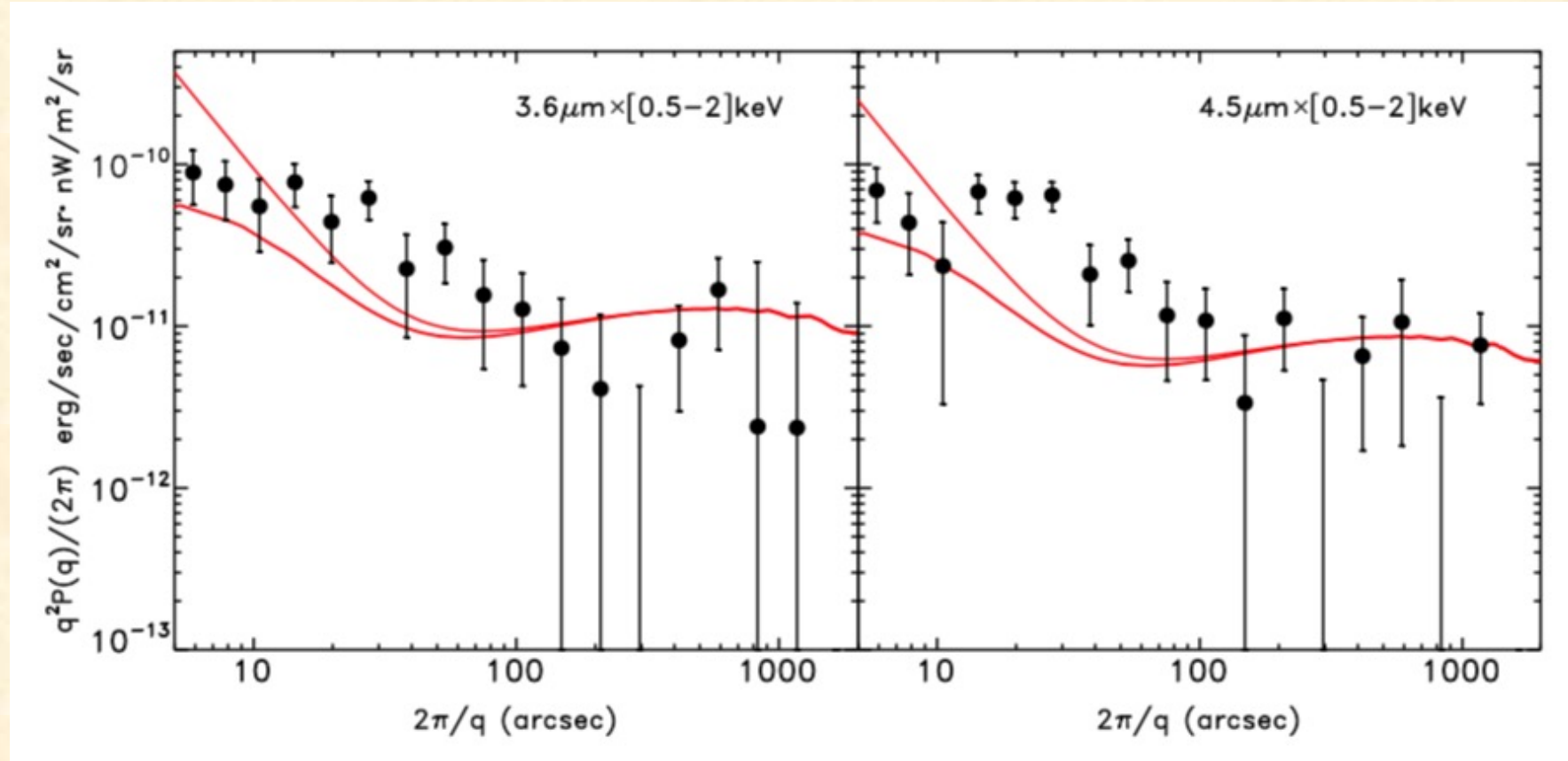
■ エネルギー効率の高いブラックホールならば可能

さまざまな理論モデルとの比較



初期のブラックホール？

- CIB-CXB 相関パワースペクトル (Spitzer x Chandra)
- 宇宙初期の直接崩壊型ブラックホールならば説明可能とする説
- 重力波源として考えられている原始ブラックホールも寄与する可能性



近傍に大量のBH (mini-quasars)が存在?

Fluctuation of the background sky in the Hubble Extremely Deep Field (XDF) and its origin

Toshio MATSUMOTO^{1,*} and Kohji TSUMURA^{2,3}

¹Department of Space Astronomy and Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

²Department of Natural Science, Faculty of Knowledge Engineering, Tokyo City University, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo 158-8557, Japan

³Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

*E-mail: matsumo@ir.isas.jaxa.jp

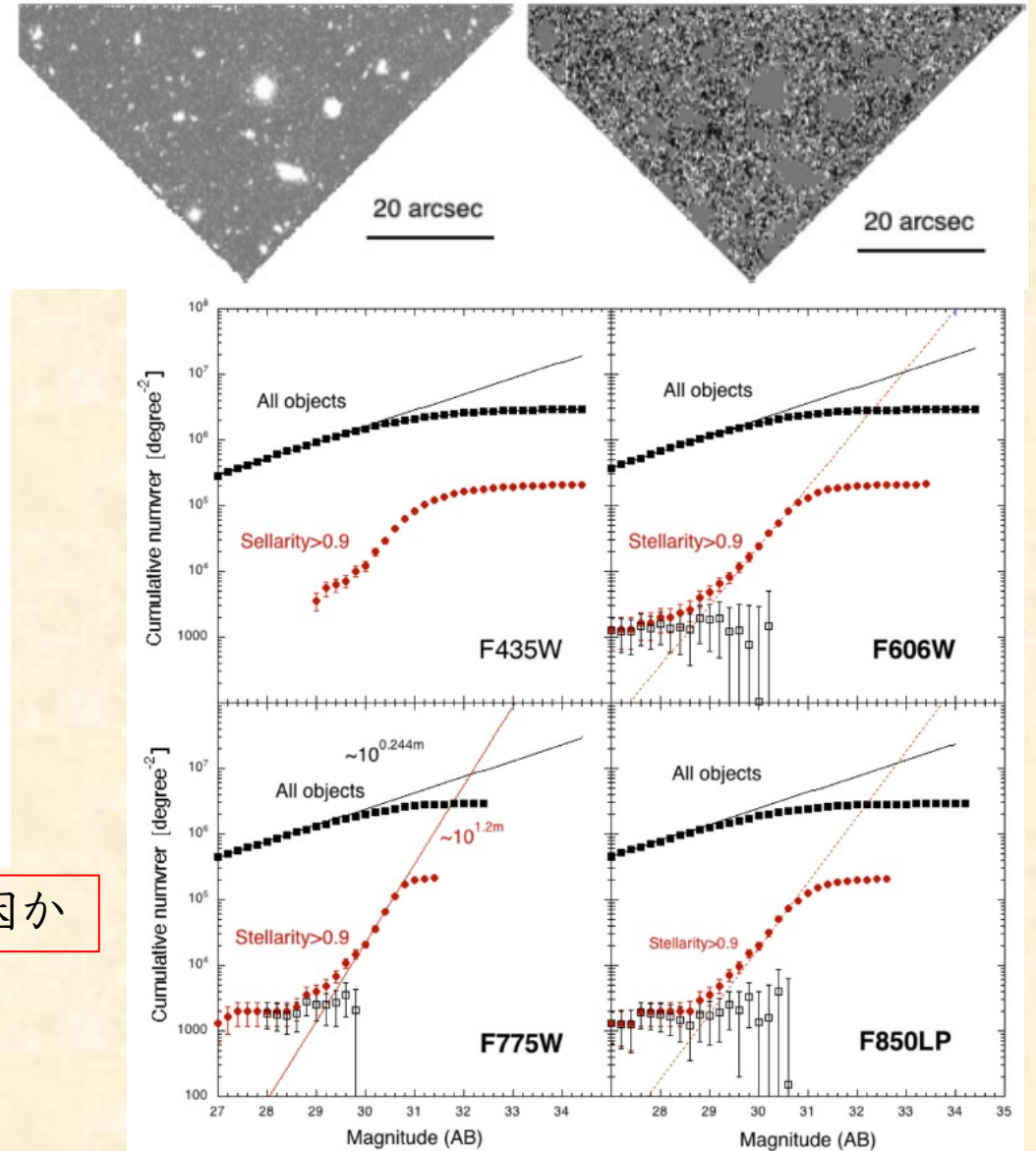
Received 2019 February 17; Accepted 2019 May 30

Abstract

We performed a fluctuation analysis of the Hubble Extremely Deep Field (XDF) at four optical wavelength bands and found large fluctuations that are significantly brighter than those expected for ordinary galaxies. Good cross-correlations with flat spectra are found down to $0''.2$, indicating the existence of a spatial structure even at the $0''.2$ scale. The detected auto- and cross-correlations provide a lower limit of $24 \text{ nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ for the absolute sky brightness at 700–800 nm, which is consistent with previous observations.

AB > 30 mag の未同定点源(FCO)が可視近赤外EBL超過の原因か

JWSTほかによる点源ディープサーベイとIPSTによるEBLの精密測定の両面から解明する



新ロケット実験 CIBER-2 の仕様

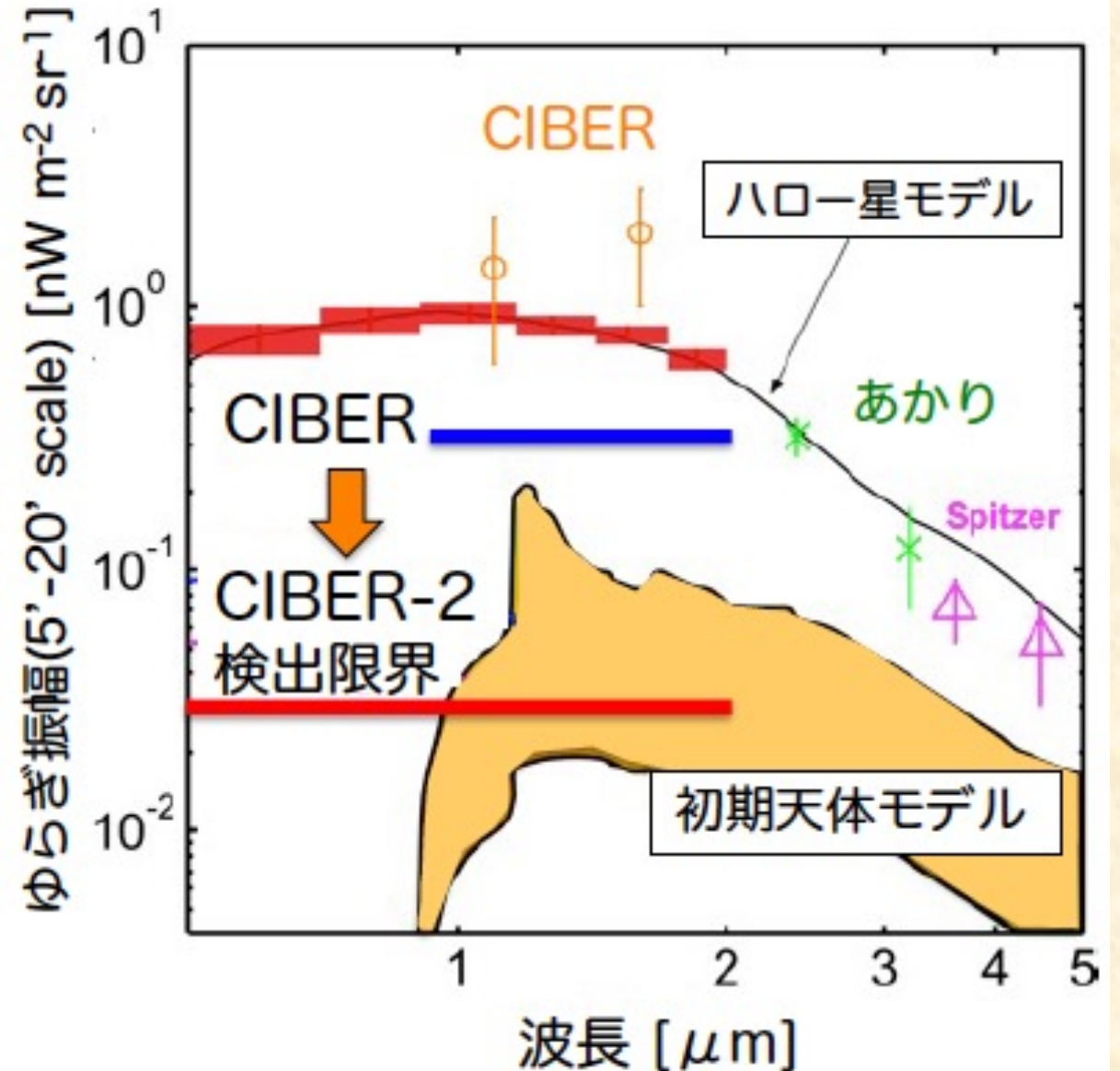
近赤外超過の起源解明

- 可視域波長拡大 (0.5 - 2 μm)
- ゆらぎ撮像観測 (6 bands)
- 粗い分光観測 (LVF)
- CIBERより10倍高い感度

upgrade

10 cm 望遠鏡
2バンド撮像
プリズム分光
FoV 2 deg sq.
分解能 7" /pix

30 cm 望遠鏡
6バンド撮像
LVF分光
FoV 2.3 deg sq.
分解能 4" /pix



CIBER-2 観測装置

HAWAII-2RG
2k x 2k HgCdTe
赤外検出器



15m



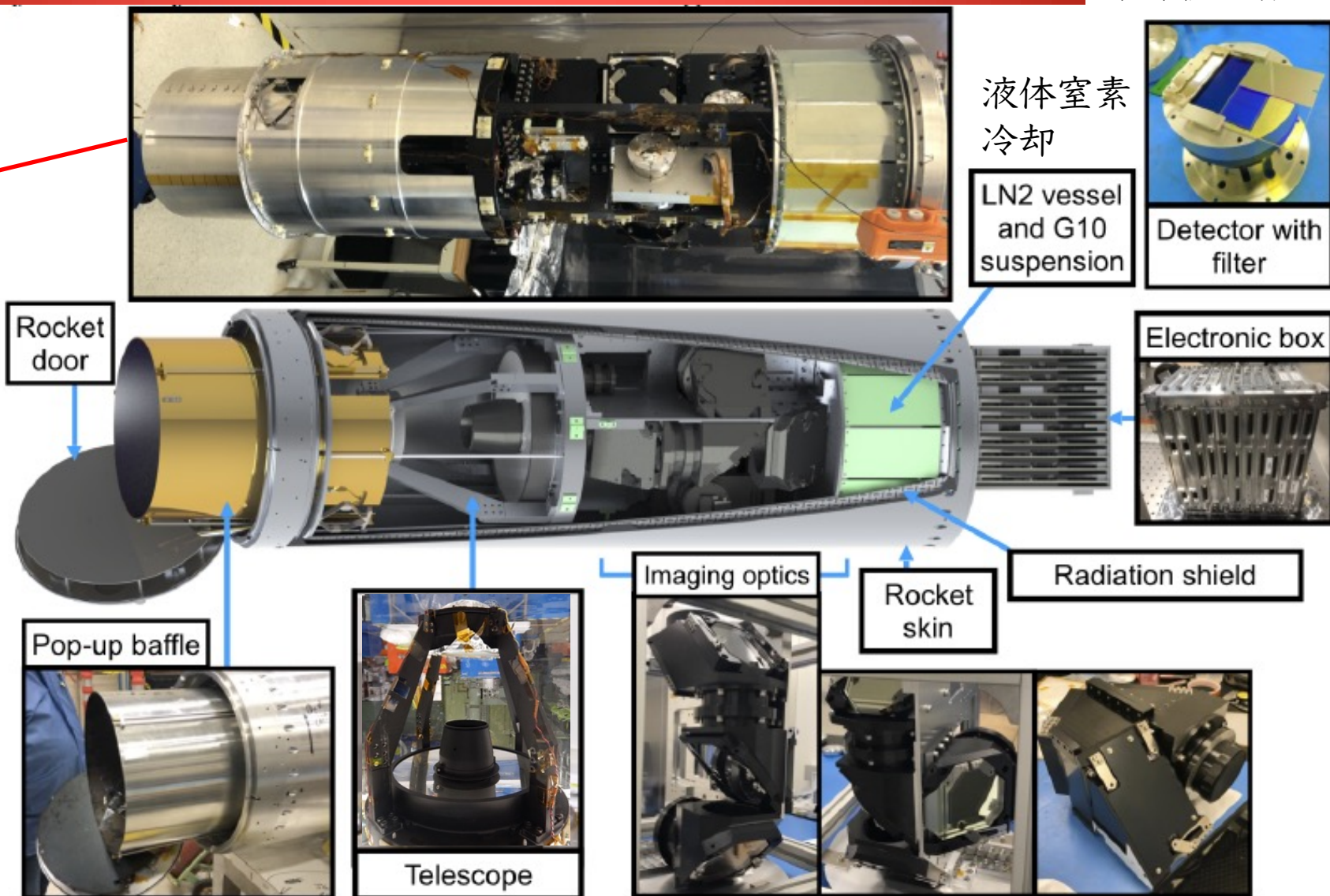
ペイロード

観測機器

1.2m

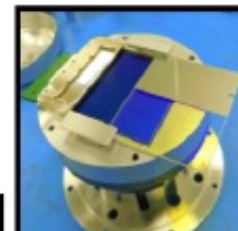
Black Brant
VC MK1

Terrier MK70



液体窒素
冷却

LN2 vessel
and G10
suspension



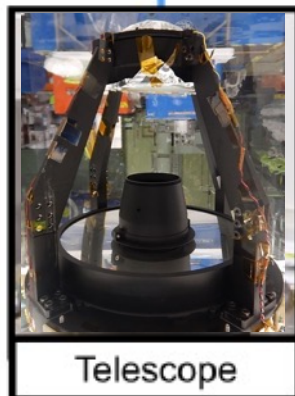
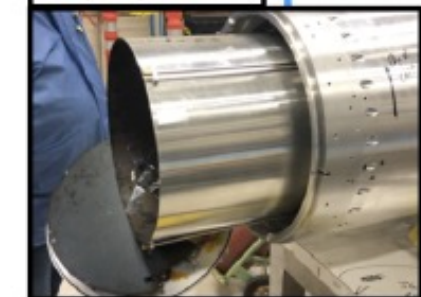
Detector with
filter

Electronic box



Rocket
door

Pop-up baffle



Telescope

Imaging optics



Rocket
skin



Radiation shield

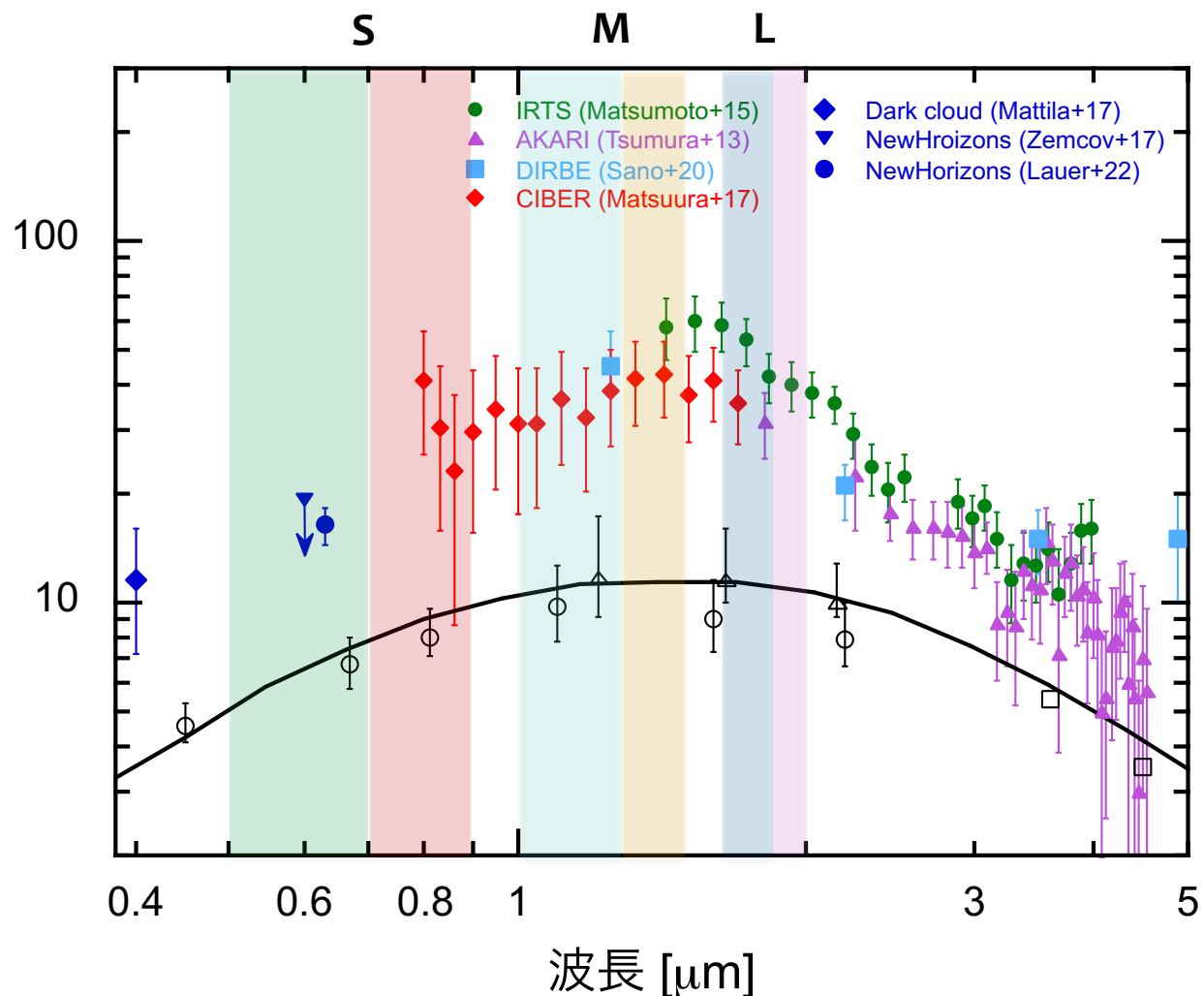


アルミ合金製 30cm RC 望遠鏡

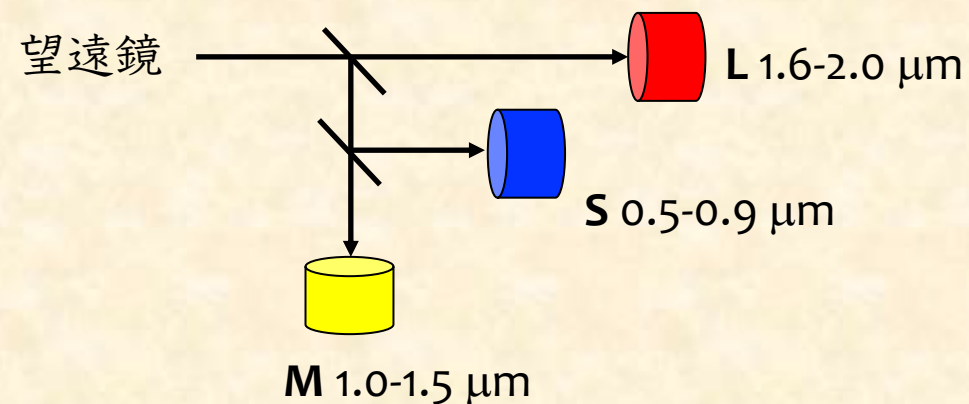
広視野 (FoV 2.3度) カメラ光学系

CIBER-2の測光バンド

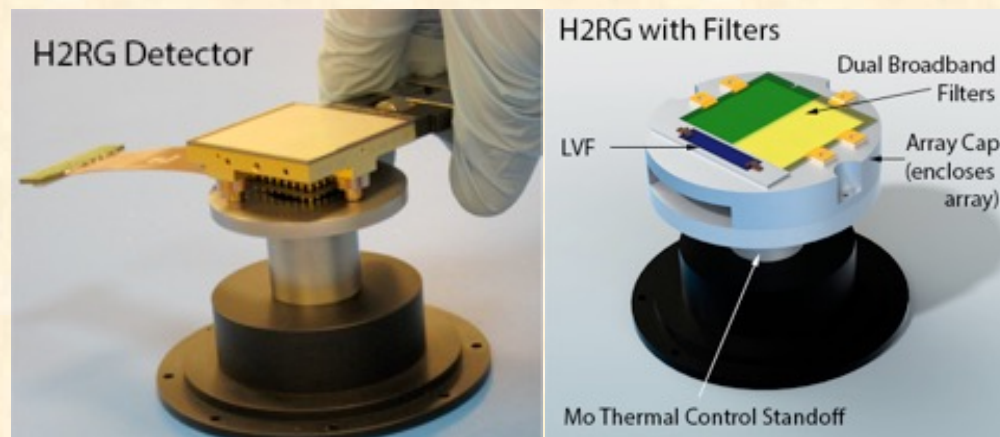
背景放射の明るさ [$\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]



ダイクロイック・ビームスプリッターにより
3つの波長域に分割



検出器面のフィルターで波長をさらに2分割し
計6波長バンドを構成



打上げまでの経過

2019年

装置完成, ペイロードの振動試験 @NASA Wallops Flight Facility

不具合発生 → 拠点をCaltechからRITへ移設, 振動対策・改修

2020年

振動試験で再度の不具合と改修を経て合格, 打上げ承認

3月 打上げ基地 (WSMR - White Sands Missile Range) へ輸送したが
COVID-19により基地閉鎖, 装置は基地で1年以上の塩漬け状態

2021年

基地の再開, 打上げ承認

5月 打上げ作業のためWSMRへ展開

2021年6月7日 0:25 (US MDT) 第1回打上げ成功

問題の振動試験

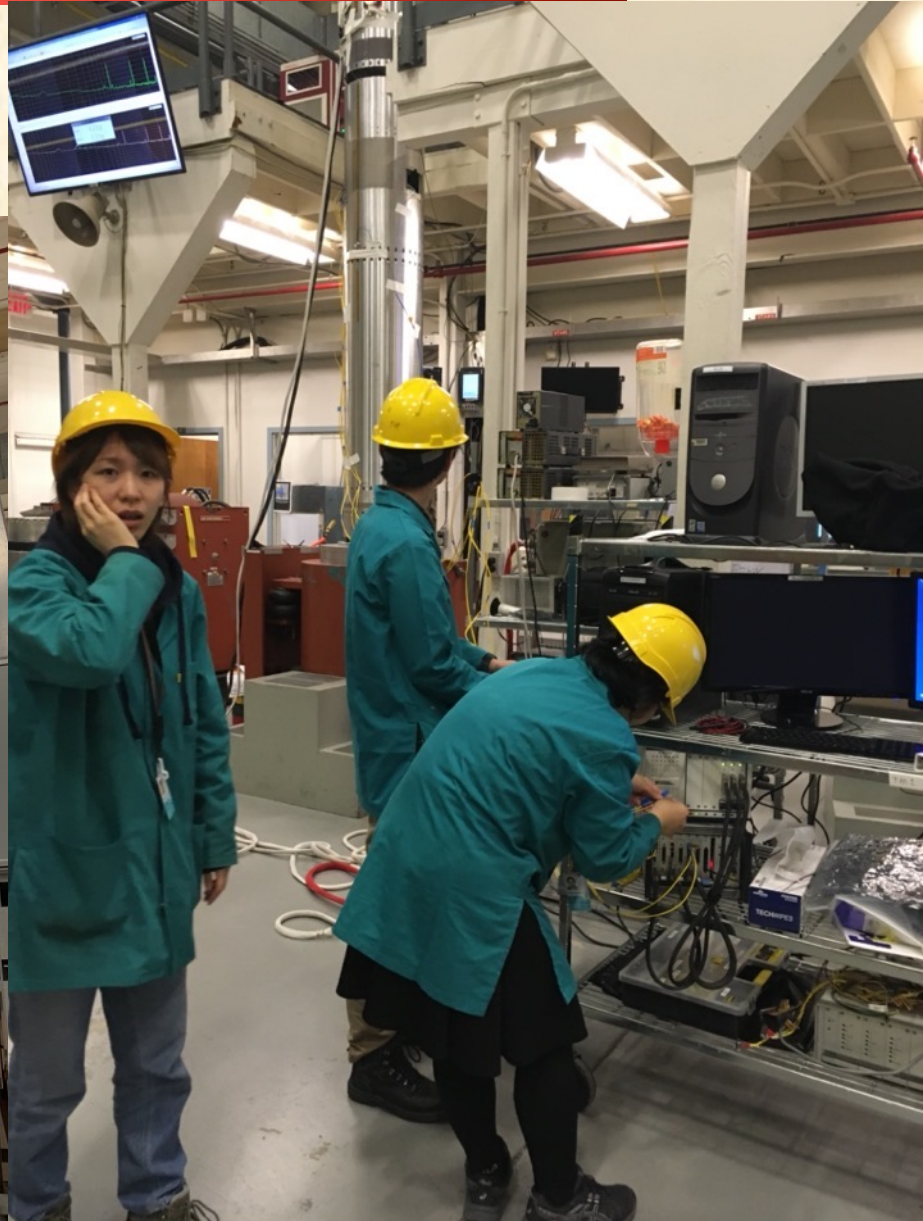
CIBER-2 V-test at NASA/WFF

クライオハーネスの破損による不具合

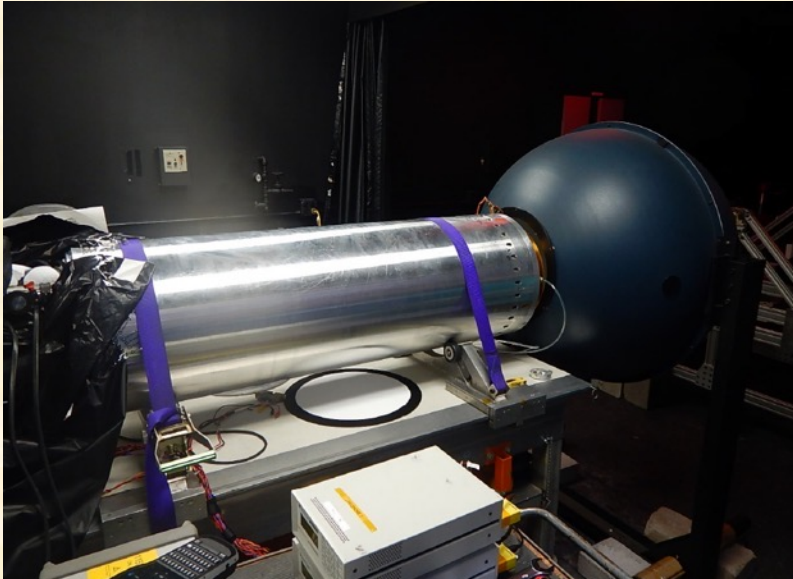
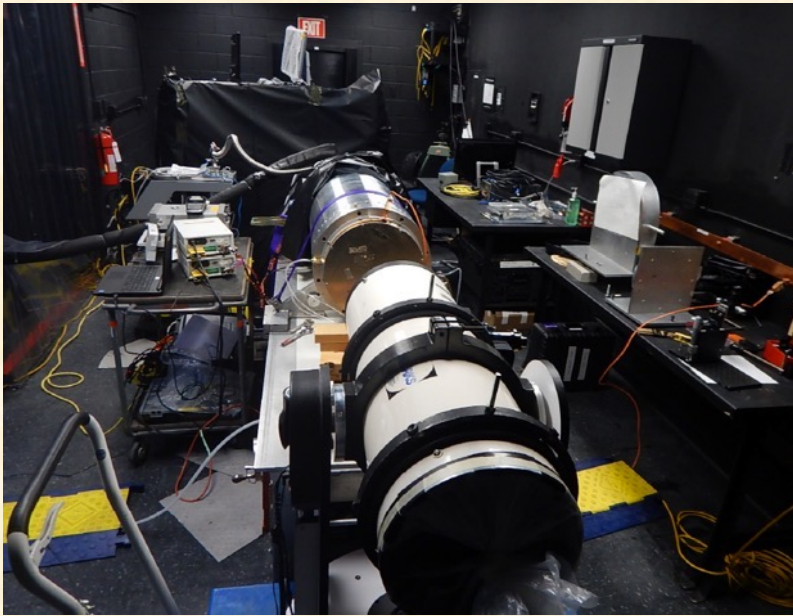
XYZ 13 G_{rms}

加振機搭載

フライト
モード組立



最終光学試験・感度較正



- 感度較正を担当する日本チームは現地参加できず
- Slackによる日本～現地の徹夜やりとりで対応

#ciber2_hardware ▾ 19

Matsuura 1:37 AM Tuesday, May 25th ▾
Sorry, we had to use different filter combinations for each arm to minimize the thermal emission through the blocker leak.
Please be careful when you switch the filters. They are very hot!

Chi 1:49 AM
[@Matsuura](#) when we have pinhole+OD1+OD2+arm S the power meter reads 0.176 nA, and when we put a black piece of aluminum to act like the light source's shutter it reads 0.174 nA. Is that ok?
we are seeing pretty low photocurrent.

Matsuura 1:52 AM
You don't have to be worry about that. The NIR power meter is not so sensitive to see the low level radiation, and it could work only for the case of no ND filters.

Chi 1:54 AM
we are looking at pretty identical photo current for shutter/no shutter in this case. Is that ok?

Matsuura 1:56 AM
I think that's ok, if you see the difference at CIBER-2 detector.
[@R.H](#) Is that right?

Chi 1:56 AM
sorry I mean at CIBER-2 detector. To quote Richard, a "modest increase"
since the differences may be pretty small we are taking 36s of data on these. 90 seconds are a bit too long we may not have time to go through all of them.

Richard Feder 1:58 AM
I am not seeing any significant difference visually, it looks like the change between shtter open and shutter closed is < 5%

Matsuura 1:59 AM
Is the signal at Arm-S? Can you see the light from the blackbody source? And, is the temperature setting correct?

打上げ

2021年6月7日 0:25 (US MDT) 第1回打上げ成功

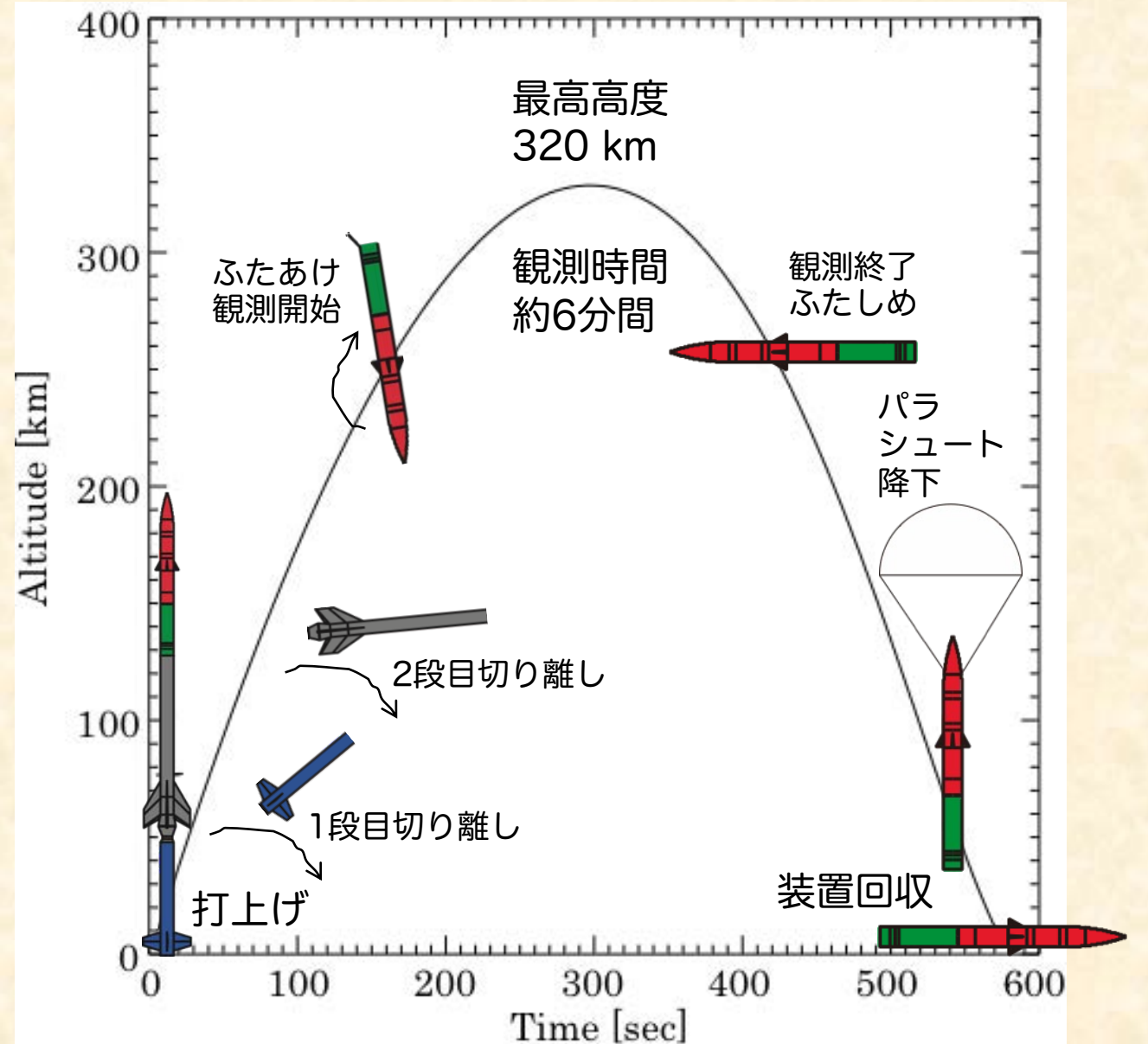


日本から送った
飛行神社の御守り札



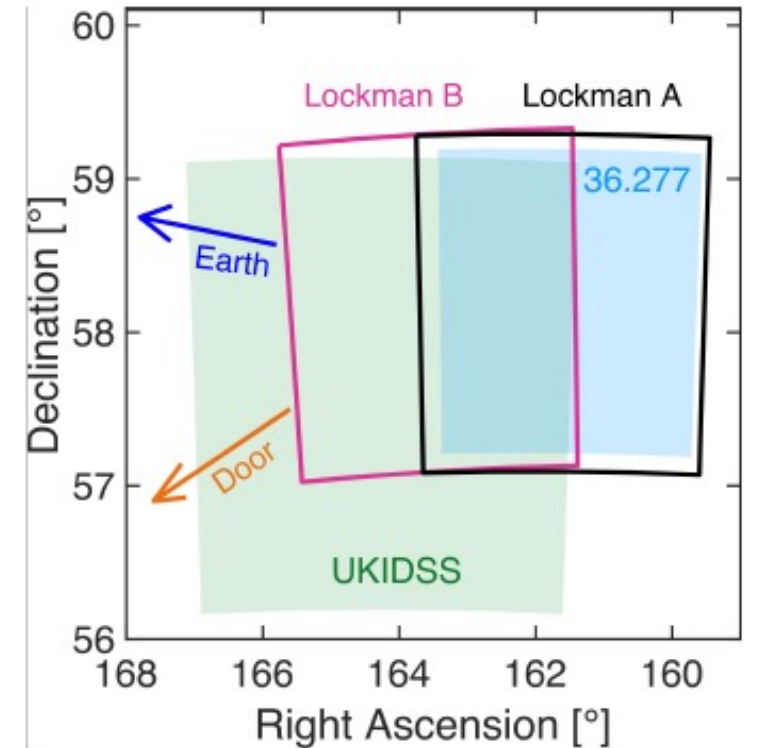
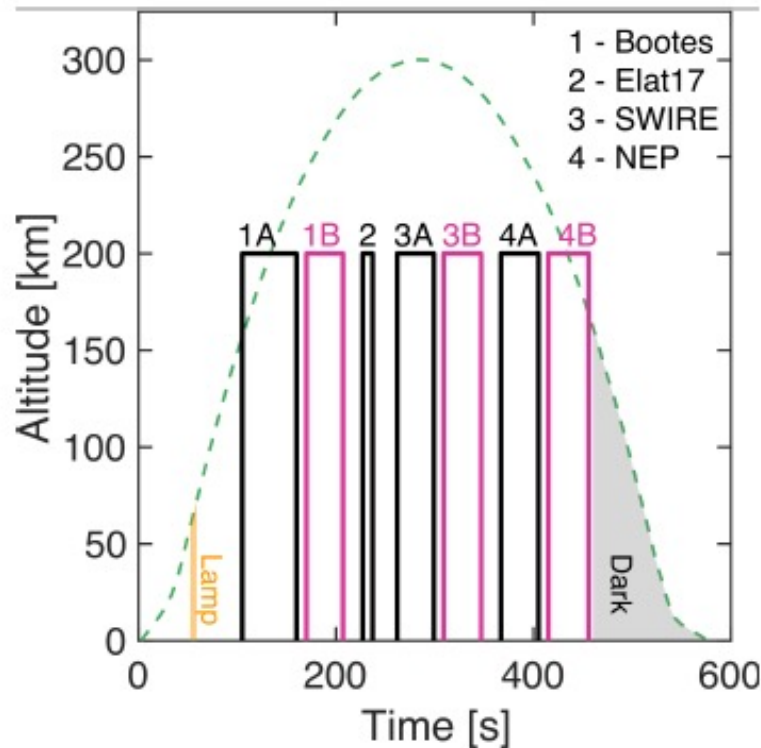
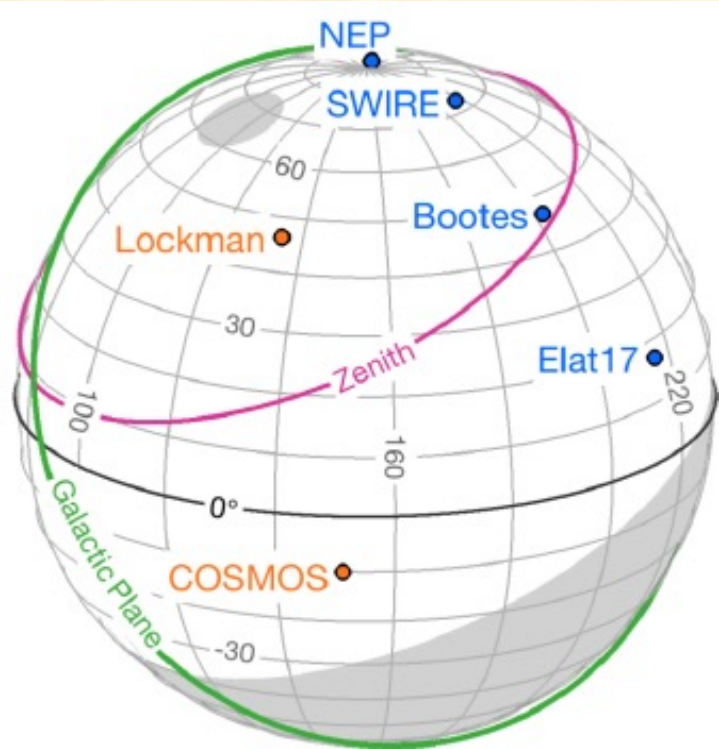
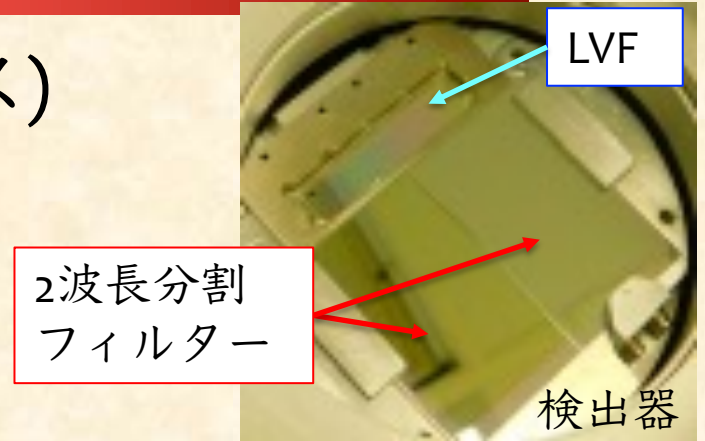
フライトシーケンス

- 打上げ後ペイロード分離
- 蓋開け・観測・蓋閉め
- パラシュート降下・着陸
- 装置ヘリコプター回収



観測天域

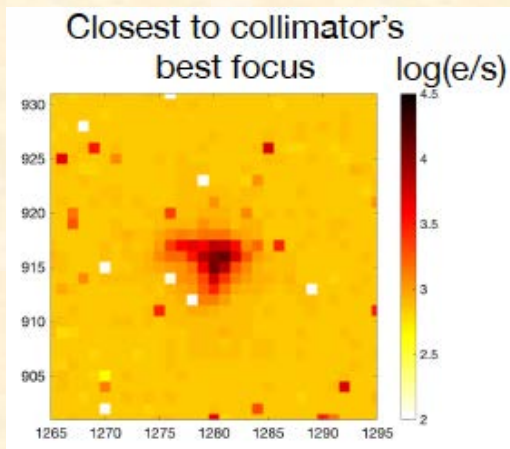
- CIBER観測域を指向観測 (高銀緯, 高黄緯, 低シラス)
- 各検出器に視野分割した2つのバンドフィルタ
→ ディザーにより同一天域を全バンドで観測



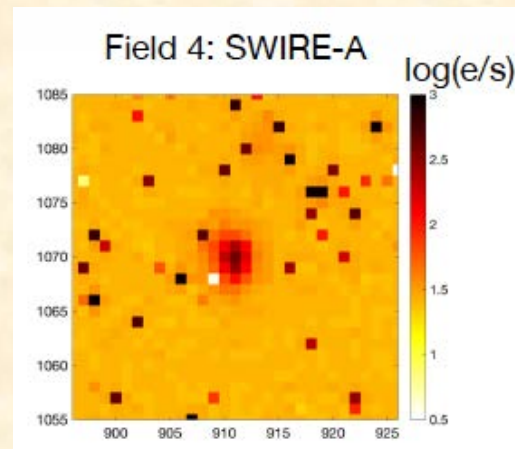
星による結像状態の確認

フライト中に観測された星像サイズから
打上げ前後で性能劣化がないことを確認

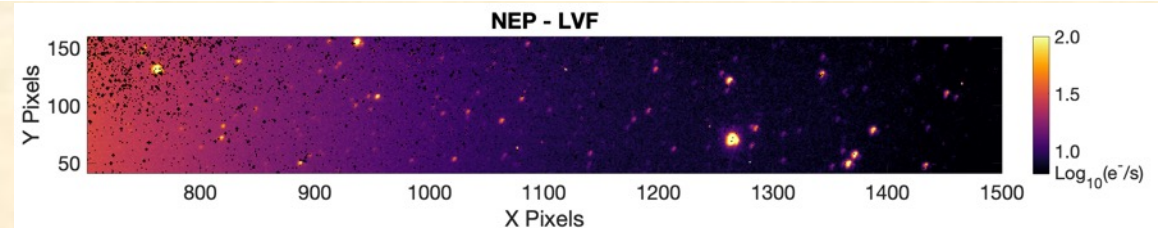
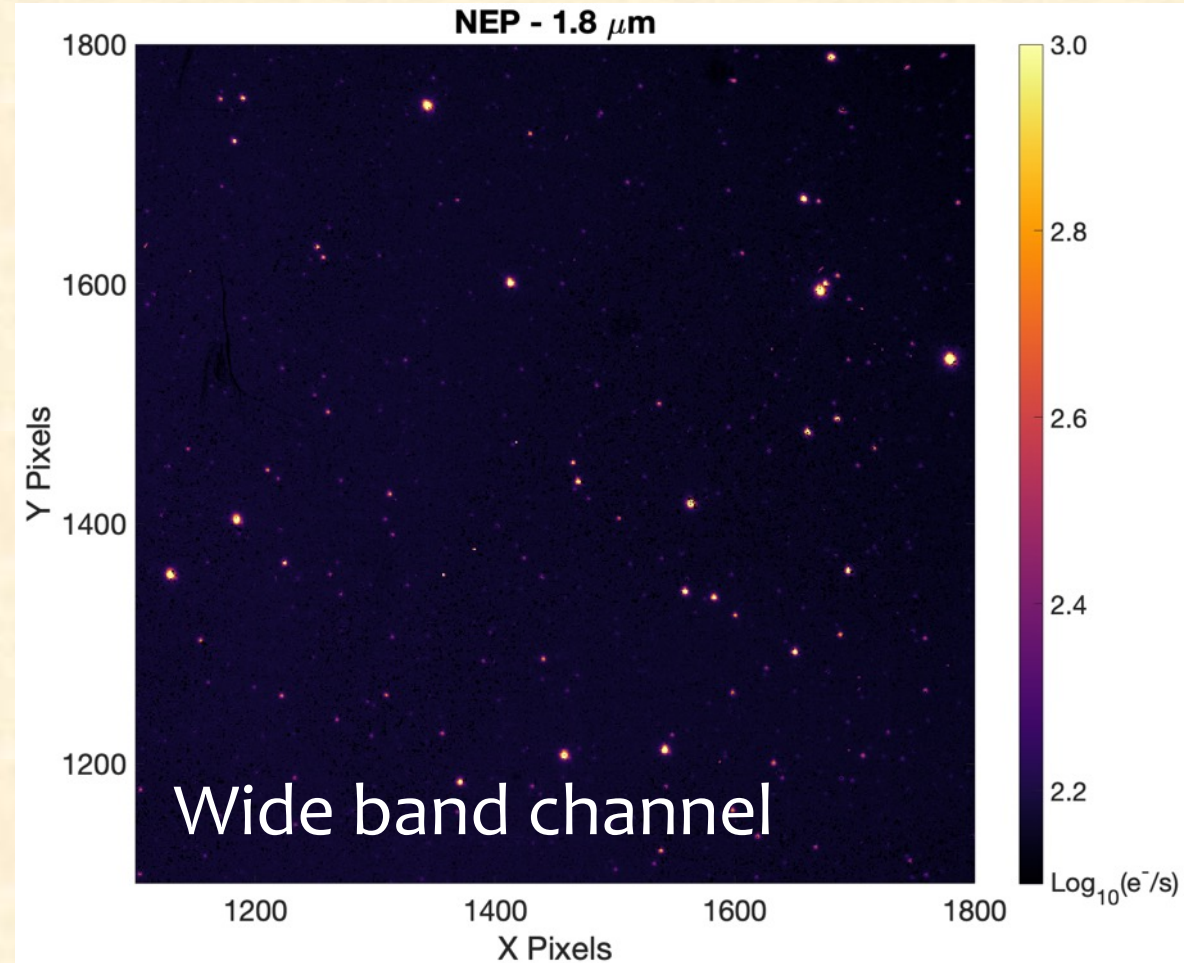
Before launch



After launch



LVF channel

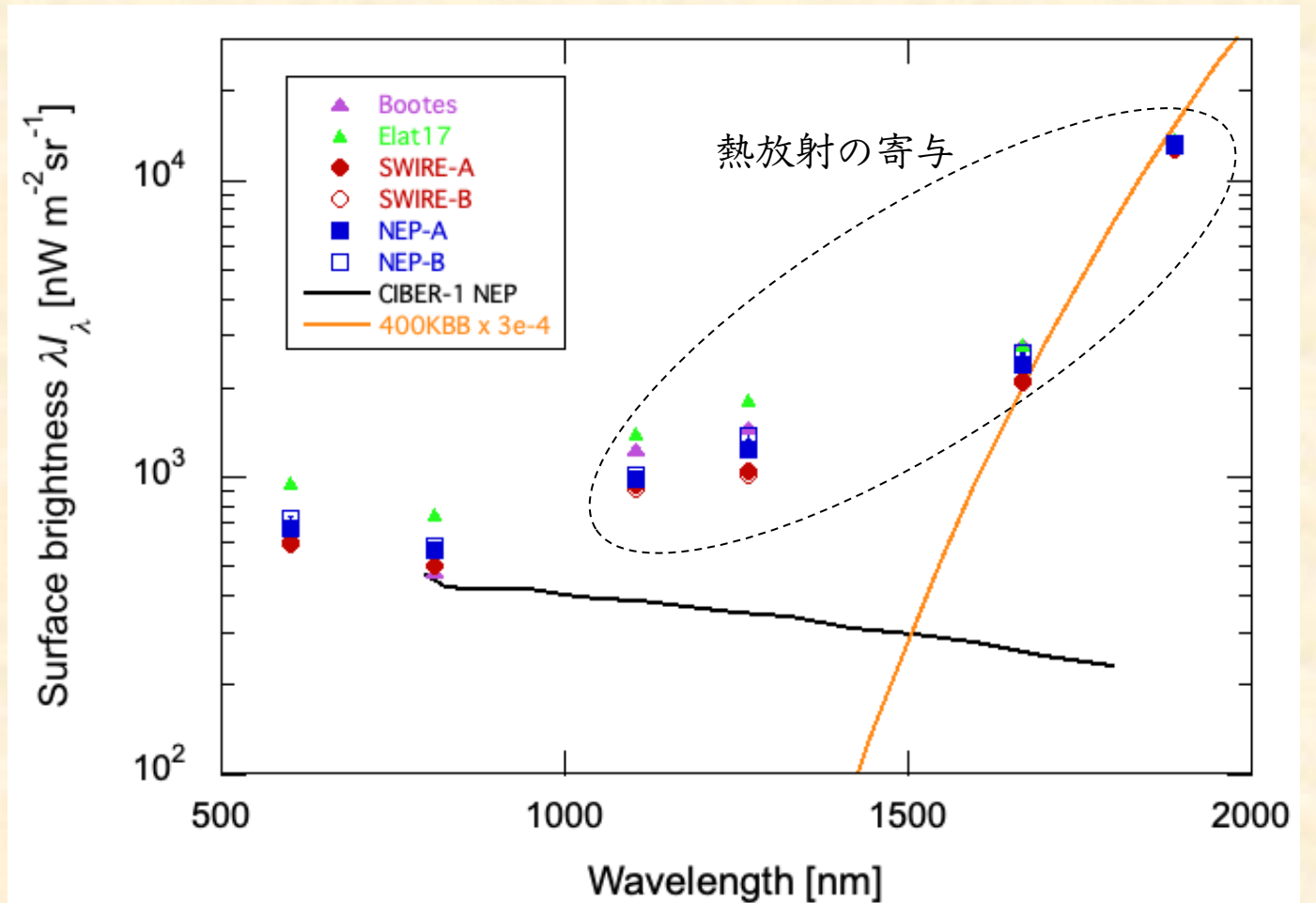
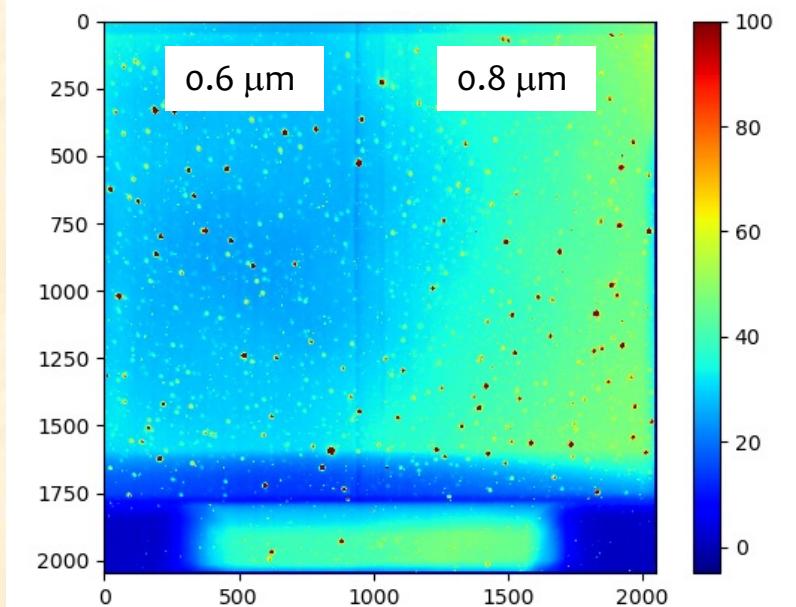


観測データに見られた様々な異常

すべての検出器の正常動作を確認，ただし多くの課題

- ロケット筐体からの熱放射とそれによる迷光・ゴースト
- 多数のバッドピクセル (Arm-L)
- 信号処理回路の電磁干渉ノイズ

光電流画像 @ SWIRE ELAIS-N1 field
Arm-S: 0.5-0.9 μm バンド



観測装置の改修内容

TDで破損した部品は全て再製作済み

主要な改修課題：

1) ロケット筐体からの熱放射とそれによる迷光・ゴースト

✓ $> 2.5 \mu\text{m}$ 熱放射カットフィルタ(OD >4)の追加製作

✓ バッフル周辺の黒色塗装・光学系に遮光シールド追加

2) 多数のバッドピクセル (Arm-L)

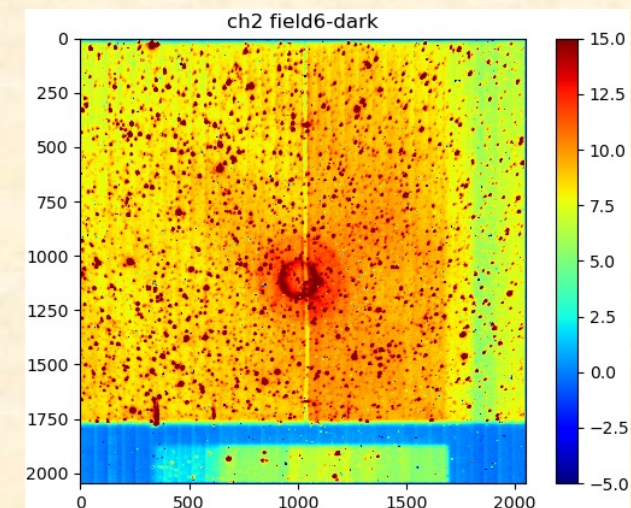
✓ 検出器の交換 (Teledyneによる補償)

3) 信号処理回路の電磁干渉ノイズ

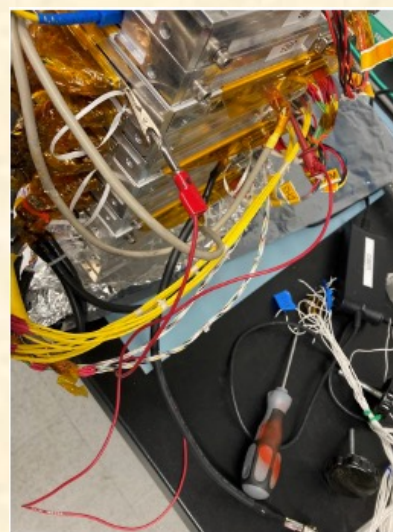
✓ グラウンド見直し・読出し方法改良

4) 望遠鏡ミラーの修理加工

✓ 追加切削・銀合金コート of 施工完了



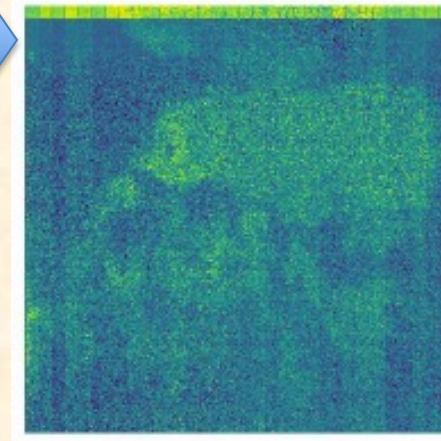
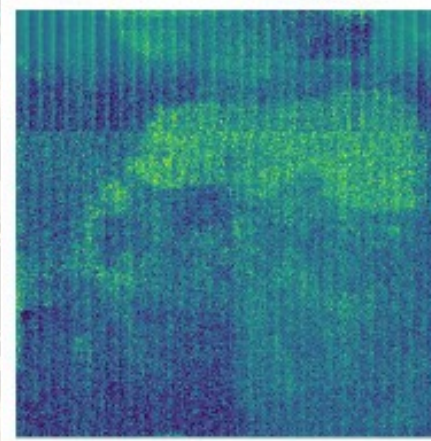
フィルターリークによる熱放射の混入



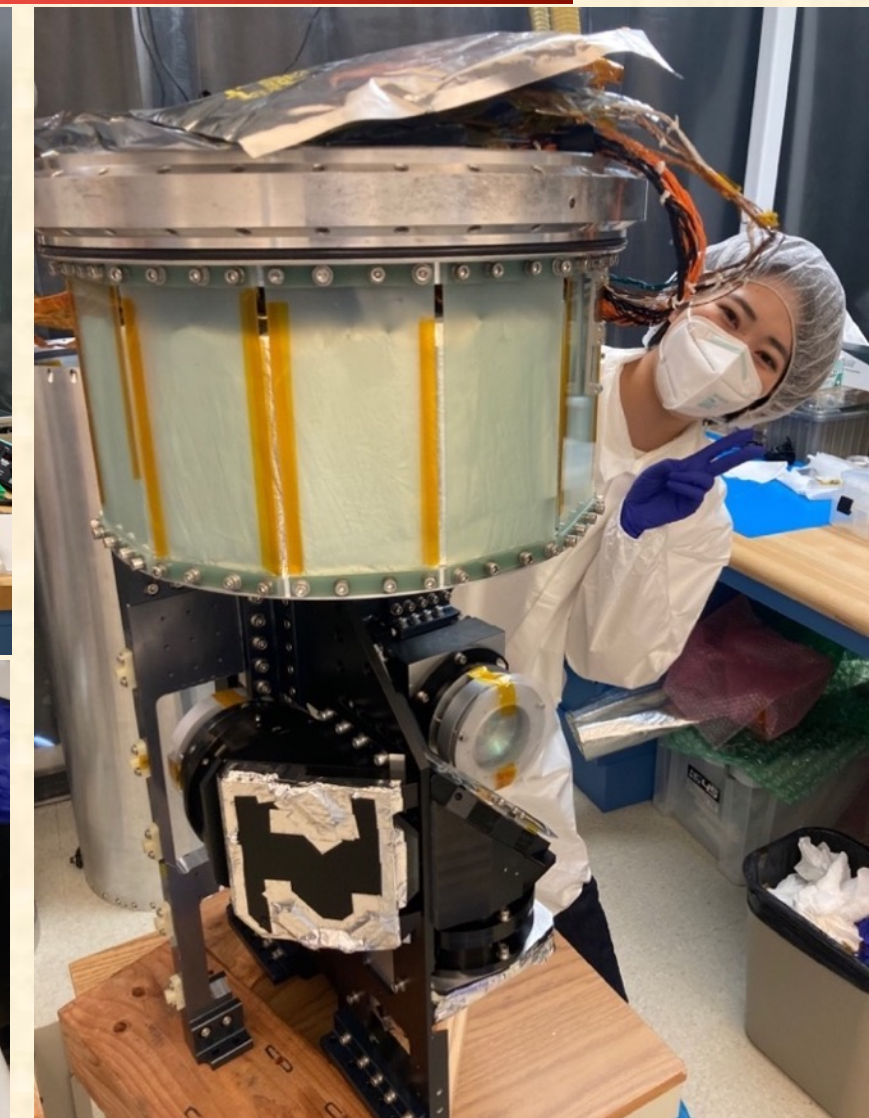
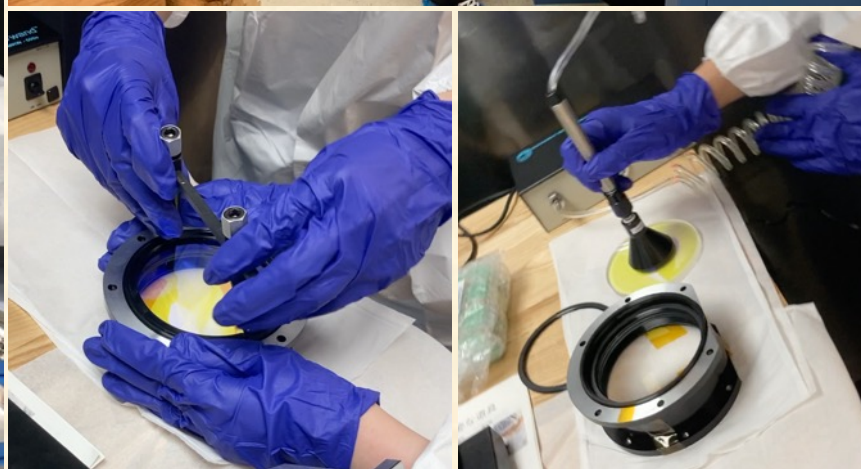
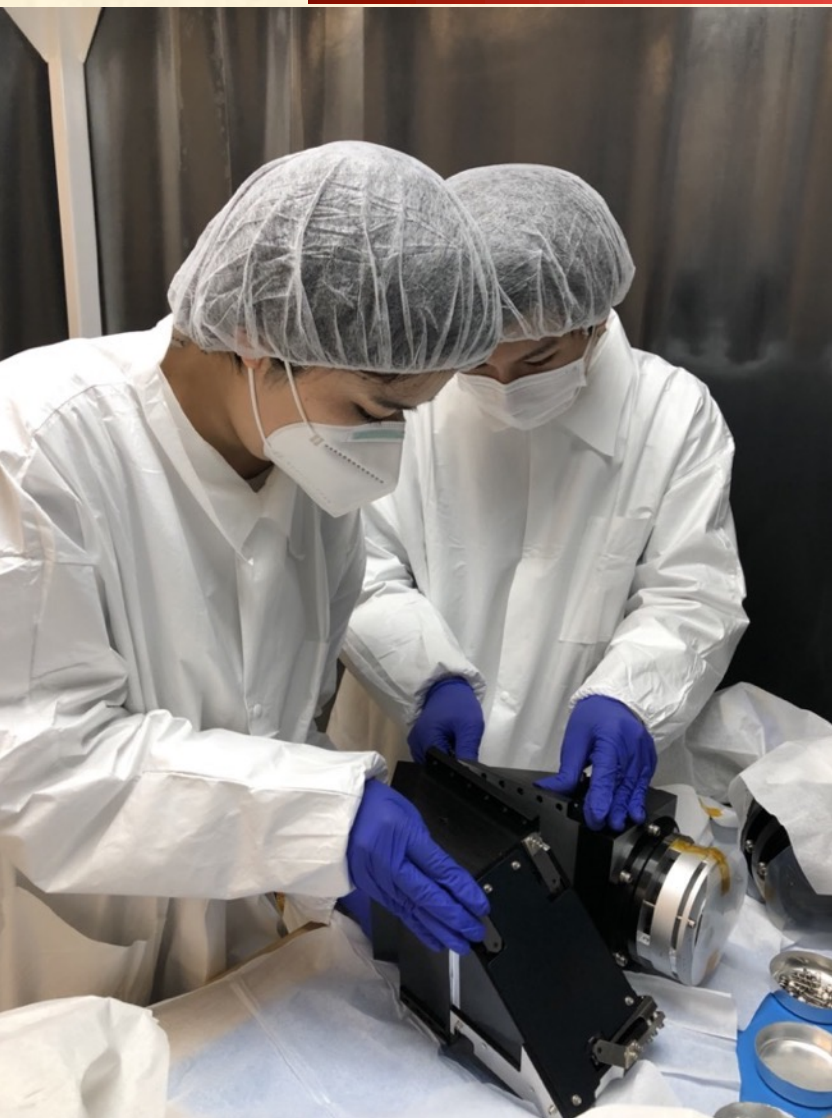
151229-151053

大きく改善

162525-162353



光学系(日本が開発担当)の改修 @RIT



レンズ光学系の分解・熱赤外カットフィルタの交換完了

液体窒素タンクへ再組み付け

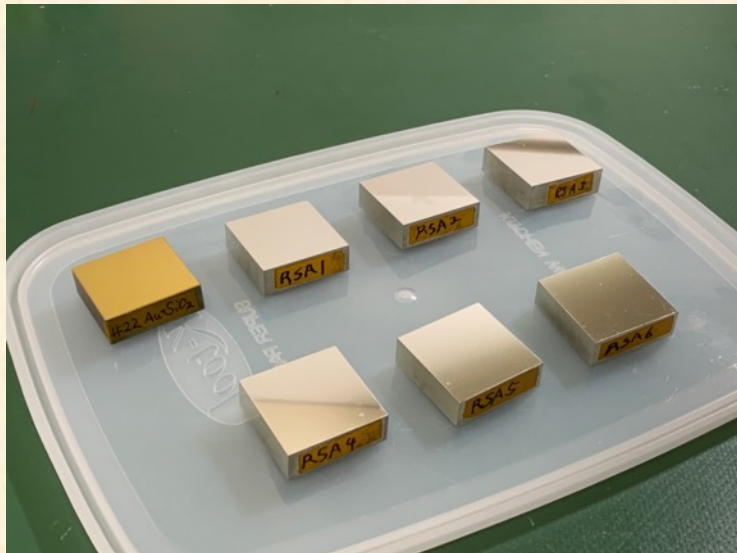
表面劣化した望遠鏡ミラーの修理加工

望遠鏡アルミ合金ミラーの著しい経年劣化

- コート材である銀のガルバニック腐食または銀凝集による面粗化の可能性

改修方法

- 表面の切削加工，コート剥がし
- 耐食性に優れる**銀合金コート** (コベルコ科研) に変更



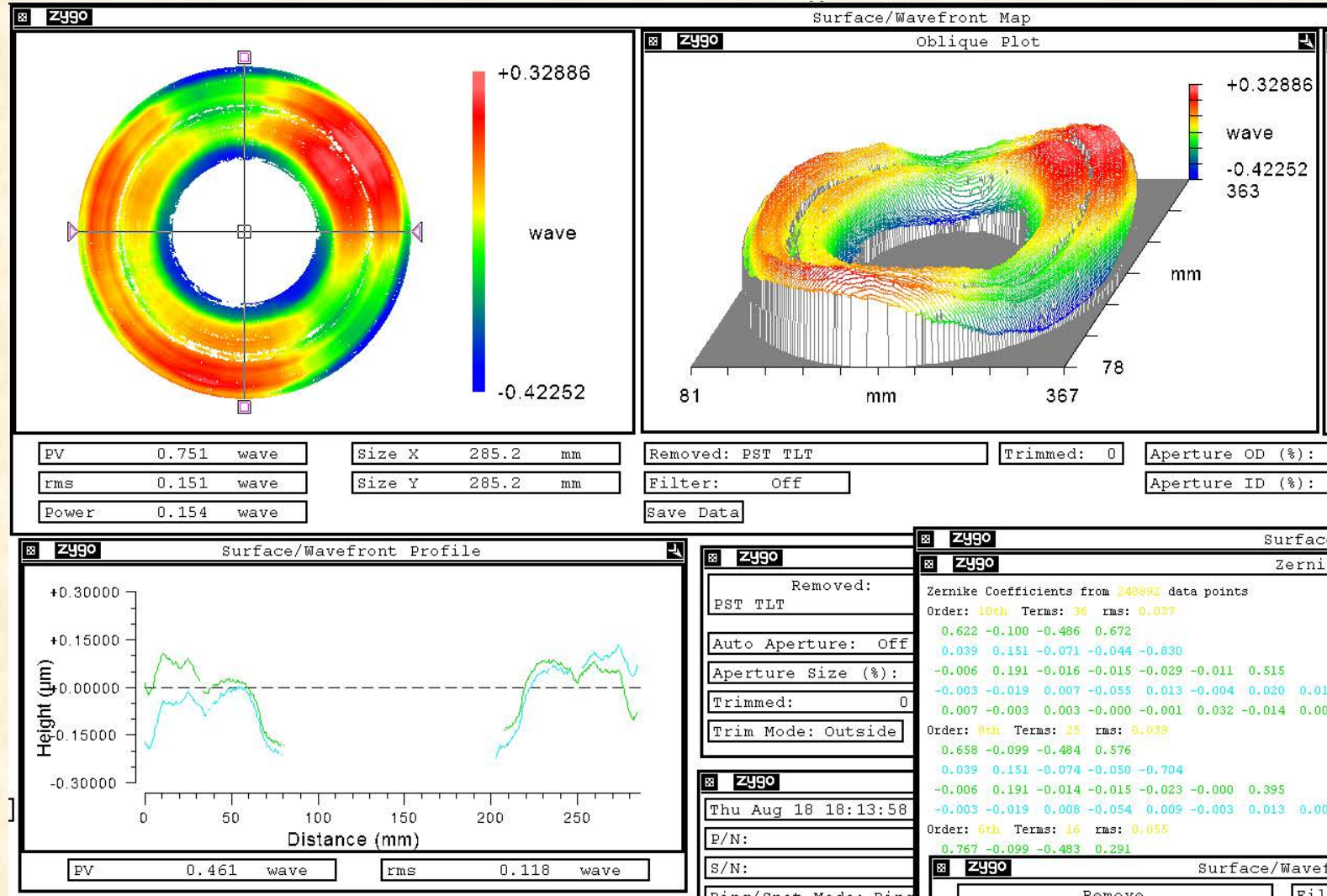
銀合金サンプル

表面のコートが劣化した主鏡



アルミ合金ミラーの切削

- BBM主鏡を用いた切削加工精度の確認
- FM主副鏡の本加工を実施
- 干渉計+CGHによる面精度測定
および3D形状(曲率)測定
- 仕様($< 1\lambda$ p-v)を確認
- 11月に関学へ納品完了

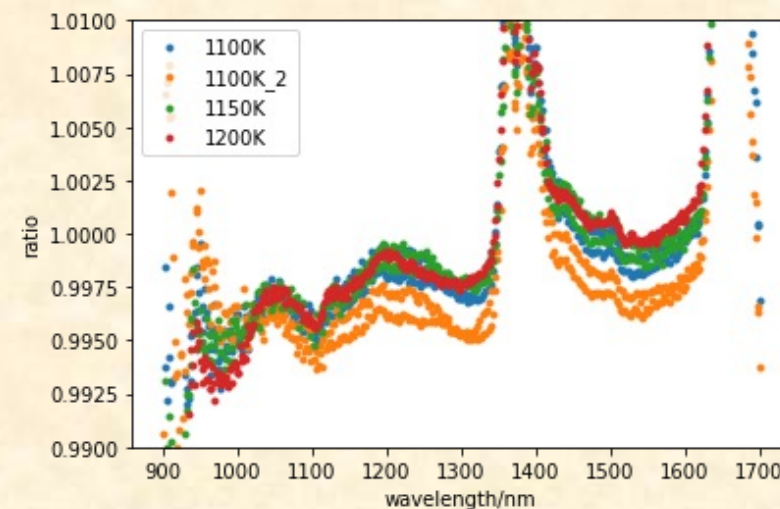


干渉計による
面精度計測

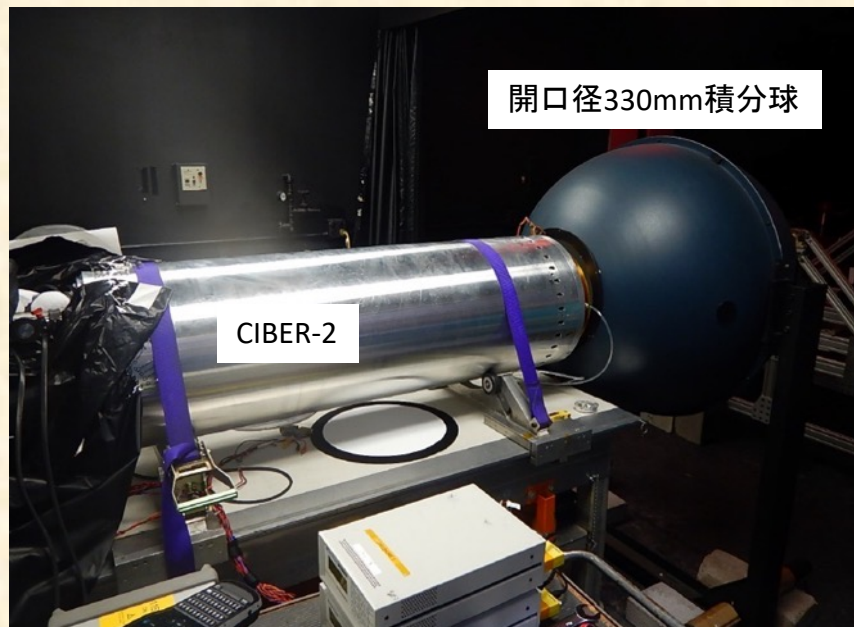
地上感度較正システムの改訂

- ✓ JAXA/ISAS共同利用 高温黒体炉を用いた分光器の絶対感度較正
- ✓ CIBER-2の較正用黒体炉のスペクトルを較正済み分光器で測定
- ✓ 放射強度を1%以内の確度で測定できることを確認
- CIBER-2の較正用積分球の透過率測定値と合わせて再較正
- 系統誤差3%以下の絶対値較正を目指す

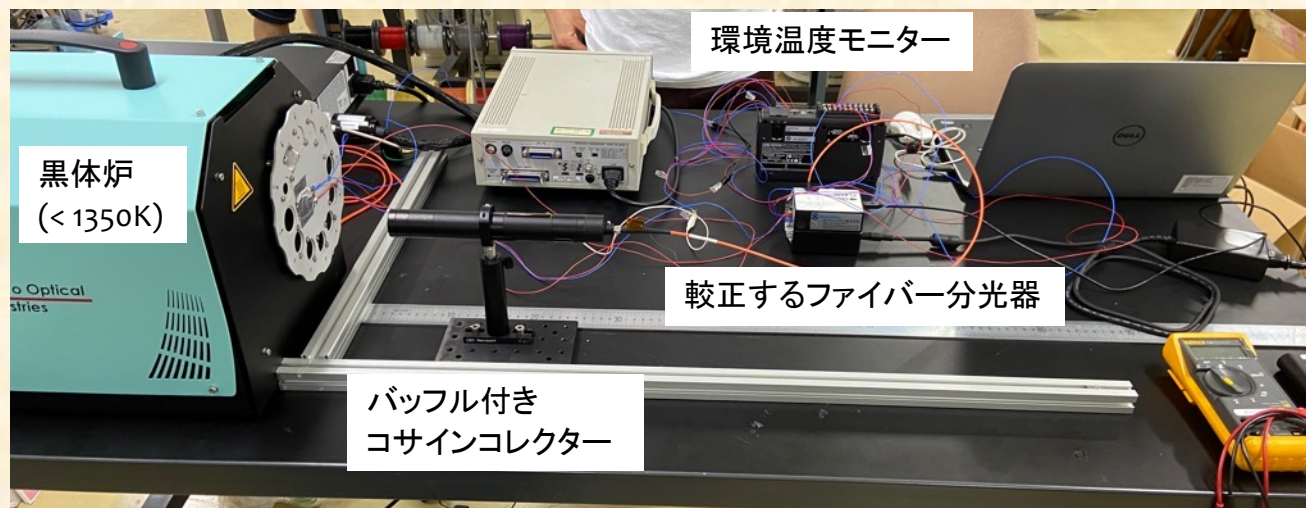
CIBER-2の較正に用いる黒体炉 (関学所有) を較正済み分光器で測定しプランク分布と比較



2021年ホワイトサンズ実験場での較正実験



分光器較正実験のセットアップ @ISAS



プロジェクト予定

第2回実験実施の道のり

- 2022年11月初旬に望遠鏡の改修完了・アメリカへ輸出
 - 日本チームがRITへ出向き、望遠鏡の常温試験・光学調整、観測装置の再組み立て
- 改修した検出器と電気回路を用いた低温光学試験を準備中
 - 焦点調整と光学試験のサイクル
 - 予備感度較正
 - 熱放射評価のダーク試験
- 2023年1月中に装置完成
- 2023年2月～NASA/WFF, WSMRへ展開
 - 振動試験, 感度較正, 搭載試験
- 打上げ(2023年4月予定)

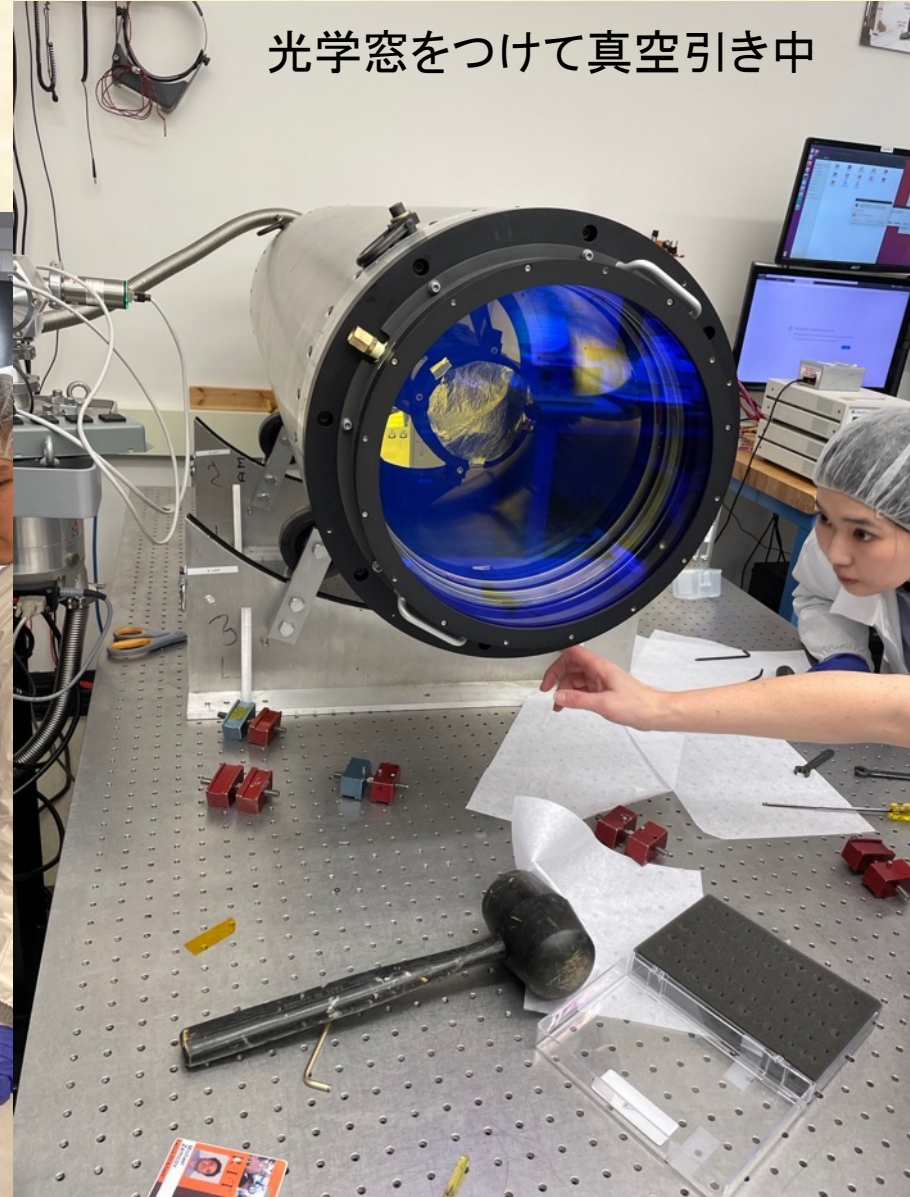
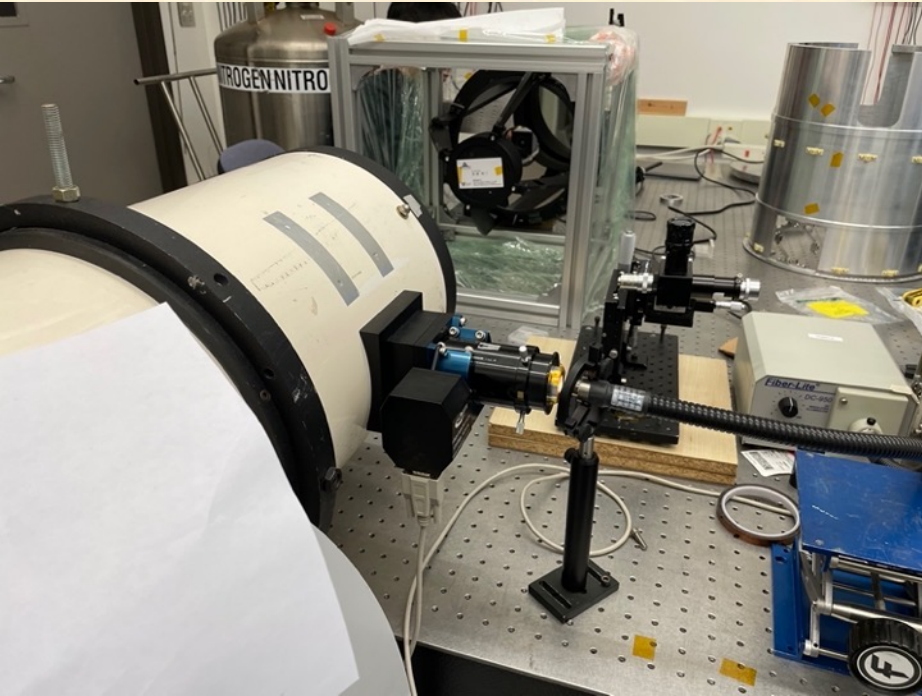
現在の状況

- 関学生4名がRITにて実験作業従事中
- 今週から低温光学試験開始

組み立て

光学窓をつけて真空引き中

望遠鏡単体の常温光学試験(受入れ検査)



CIBER-2 continues ...

