

光赤天連シンポジウム
2022/2/22

惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた
紫外線宇宙望遠鏡計画

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary
Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA)

土屋史紀（東北大学大学院理学研究科）・村上豪（JAXA宇宙科学研究所）

LAPYUTAワーキンググループ

LAPYUTA計画概要

2

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly
惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画

2021年1月 宇宙科学研究所 公募型小型計画検討ワーキンググループ設立

公募型小型規模で口径60cm・空間分解能0.1"の高感度・高空間分解能紫外線宇宙望遠鏡を目指す

科学目標

I. 太陽系科学

- ・氷衛星 水プルームの噴出機構・地下海の存在証明
- ・木星・土星系における磁気圏—衛星間物質・エネルギー輸送過程の解明
- ・金星・火星散逸大気の定量から地球型惑星大気の持続性・進化過程を解明

II. 太陽系外惑星

高層大気の観測を通じた地球類似惑星の発見および惑星進化過程の解明

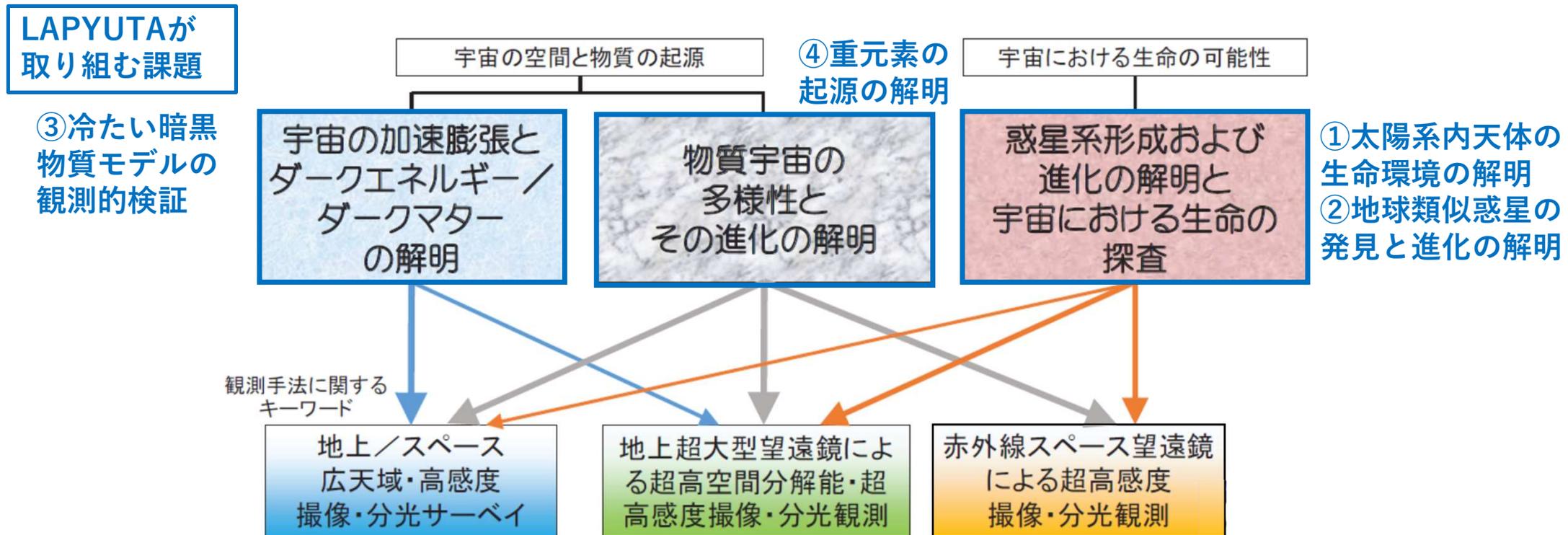
III. 銀河・宇宙論研究

近傍宇宙における冷たい暗黒物質モデルの観測的検証など

IV. マルチメッセンジャー・時間領域天文学

中性子星合体による重元素合成の検証

光赤外天文学の将来計画との位置づけ



2020年代に**光赤外天文学が取り組むべき優先課題**と、各サイエンステーマ毎の主要課題との関係、および主要な観測手法に関するキーワードとの関係（**2020年代の光赤外天文学－将来計画報告書－より抜粋**）

太陽系内における生命存在可能環境とその進化の解明

氷衛星のプルーム活動と地球型惑星大気を高感度・高解像度の紫外線分光撮像で長期モニタ

氷衛星の表層から噴出するプルームの物理特性
(発生条件・頻度・場所)



地下海の存在証明と衛星内部構造・生命存在可能環境の形態

木星・土星系における磁気圏プラズマ環境の時間変動



氷衛星地下海の生命圏維持に必要なエネルギー供給

金星・火星外圏大気の広がり
大気散逸の太陽風応答

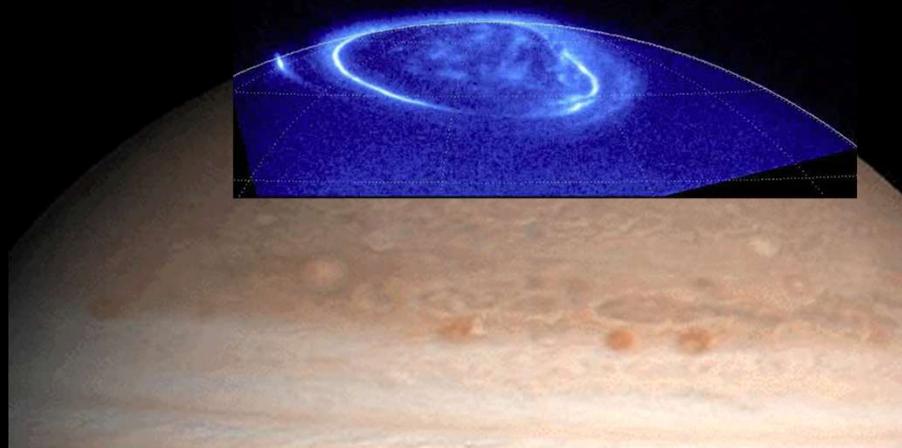


過去に大量に存在した水の行方
・惑星大気の持続性・進化過程
・系外惑星大気への知見の拡張

エウロパの水プルーム



(Roth et al. 2014)



© ESA, C. Carreau

高層大気の観測を通じた地球類似惑星の発見および惑星進化過程の解明

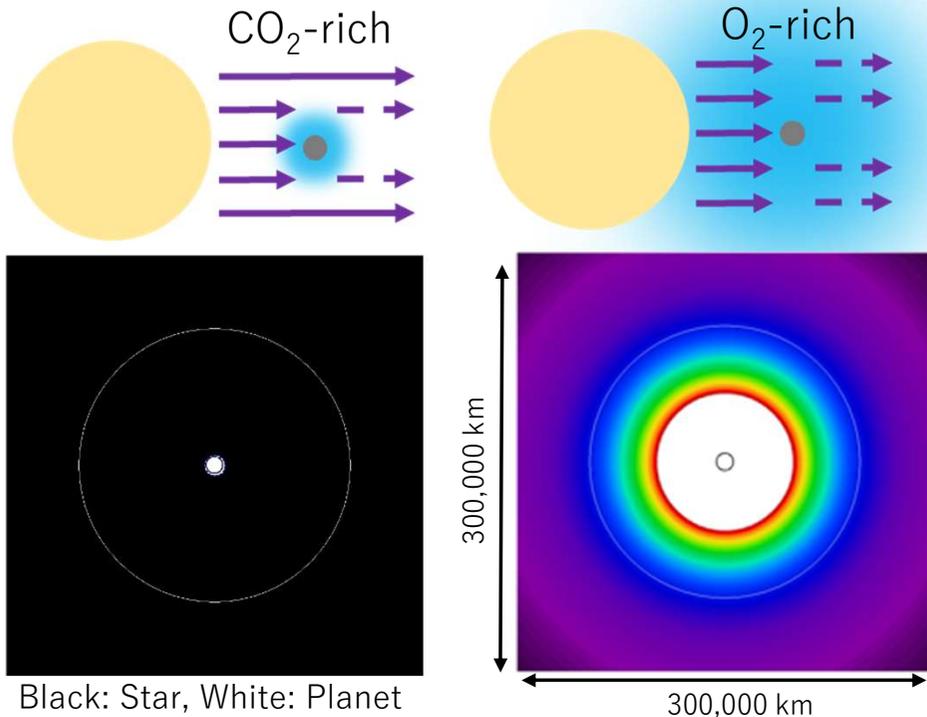
系外惑星の紫外線トランジット観測による外圏大気と惑星風（水素・酸素）の検出および特徴づけ

- (1) 地球型惑星と金星・火星型惑星の区別 → 温暖な気候を持つ惑星（ハビタブル惑星）候補の発見
- (2) 大規模に流出する地球型惑星大気の発見・詳細観測 → 惑星進化の系統的理解

HZ of cool star: close to star -> High UV irradiation (> x10)

金星型惑星の大気

地球型惑星の大気

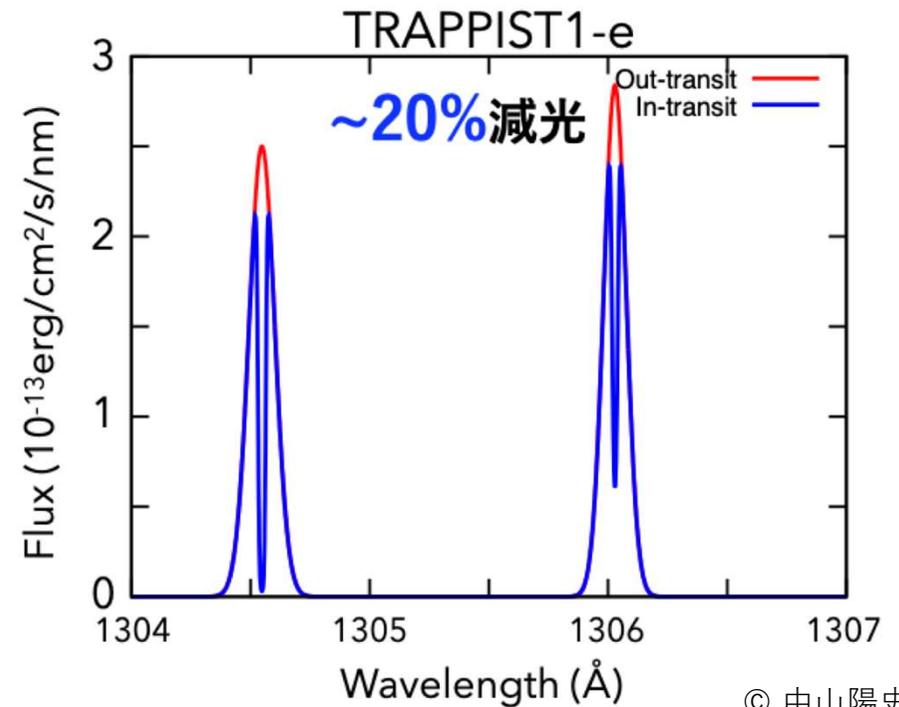


Black: Star, White: Planet

300,000 km

The Earth-like planet has extended oxygen corona

- ・ 2020年代後半に発見が期待される最適ターゲットを対象
- ・ 30-40m地上望遠鏡との連携



科学的価値III. 銀河・宇宙論研究

目標 銀河・宇宙論研究

- 1) Λ CDM宇宙論の構造形成から予言される暗黒銀河の初検出[分光]
- 2) 銀河が駆動する宇宙再電離の基礎パラメータの獲得[分光・撮像]
- 3) 銀河の星初期質量関数の決定[分光]

目標1)の詳細

• 獲得目標

暗黒銀河（暗黒物質とガスのみで星を持たない銀河）の存在を初めて明らかにし、標準理論の構造形成を検証

目標1)の詳細（つづき）

• 手法

$z=0$ を紫外線で探りLy α forestを避ける銀河系周囲のHIガスをQSOスペクトルのLy吸収で探索

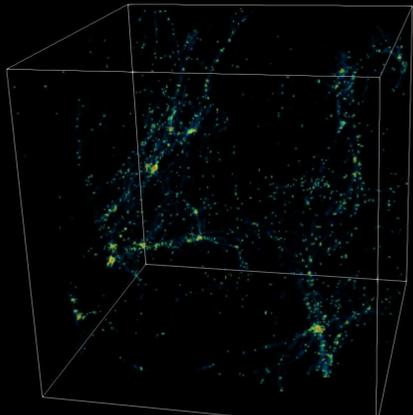
• 実現性

シミュレーション→被覆率 $\Delta\Omega/4\pi\sim 0.01$
LAPYUTAで分光可能なQSO数:200個
→暗黒銀河検出の期待値：数個

• 結果がもたらす影響

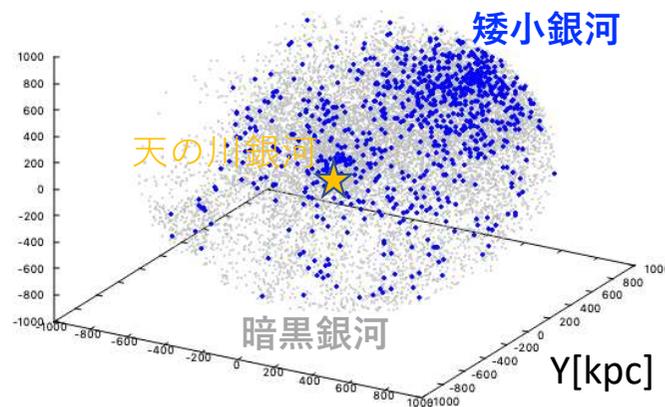
標準理論 (Λ CDM) の検証
矮小銀河形成メカニズム
ミッシングサテライト問題
天の川銀河周囲の再電離史

数値シミュレーション (Yajima+22)



天の川銀河周囲のHIガス分布

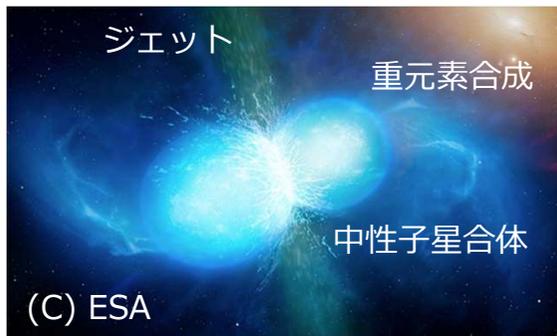
天の川銀河周辺の暗黒銀河の分布
(illustris-TNGシミュレーション)



(筑波大:矢島秀伸, 東大:小野宜昭, 北見工大:渋谷らの協力)

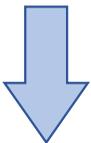
学術的価値IV. マルチメッセンジャー・時間領域天文学 中性子星合体による重元素合成の検証

宇宙における重元素の起源：50年以上続く宇宙物理学の問題
マルチメッセンジャー天文学で直接検証可能な時代に

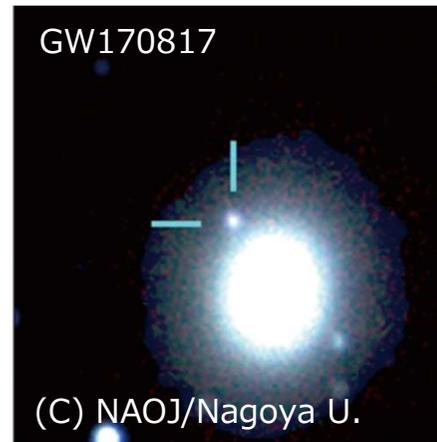
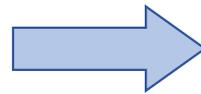


紫外線：
時間領域天文学のフロンティア
(多くの爆発現象の最初期放射)

重力波



電磁波



2020年台後半の
マルチメッセンジャー天文学
LIGO/Virgo/KAGRA/LIGO Indiaによる
ネットワーク観測
→ 10 deg² 以下の位置決定精度
→ 1時間以内に
紫外線で撮像・分光観測
→ **重元素合成の証拠**
(元素の種類、量と分布)

2020年台後半の時間領域天文学
紫外線の時間領域サーベイ
→ 1時間以内に
紫外線で撮像・分光観測
→ **超新星爆発や恒星フレアの**
メカニズム
(高エネルギー物理への波及)

LAPYUTA：概念設計

主要諸元

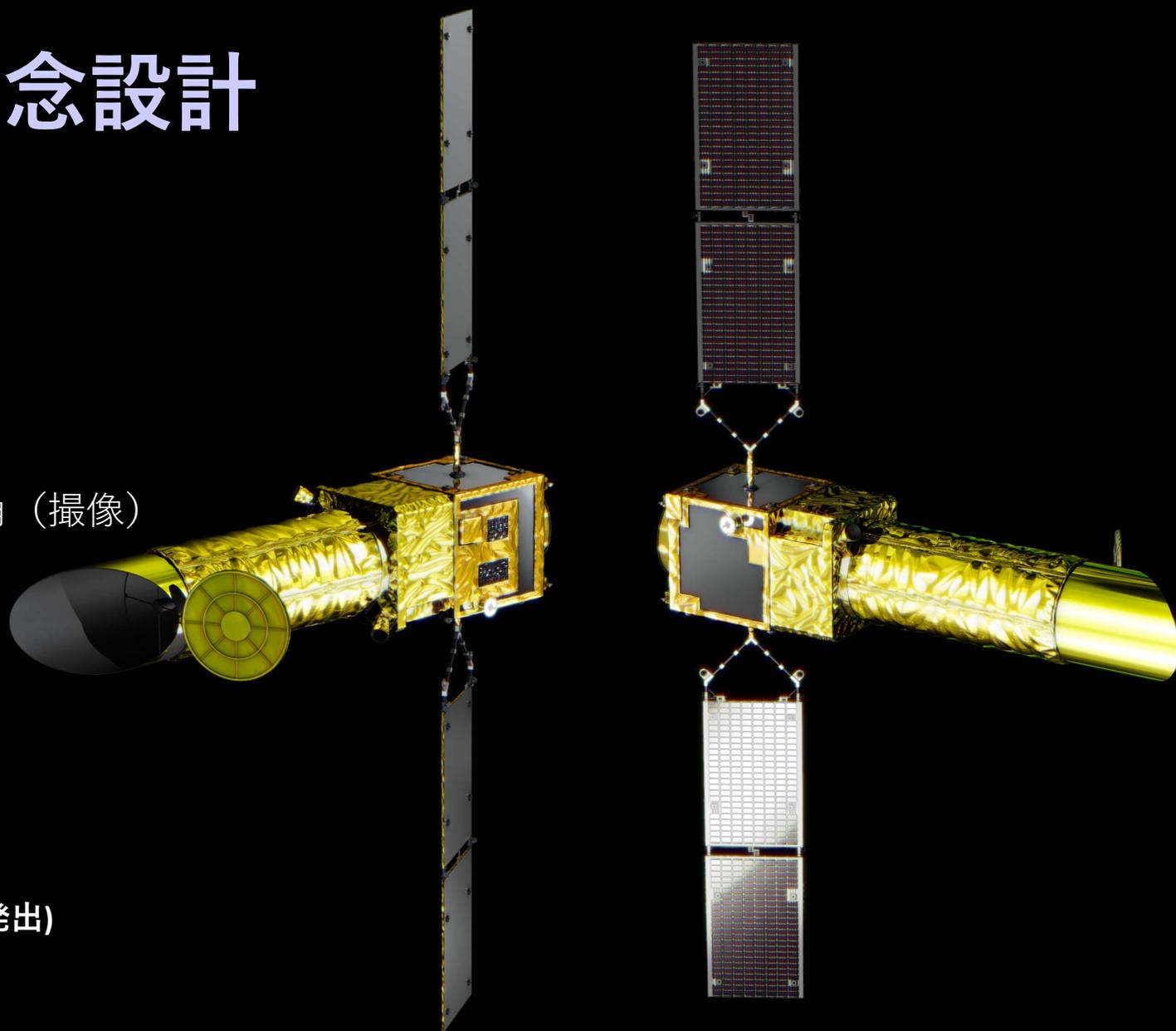
- ・主鏡口径：60 cm
- ・有効面積：>350 cm²
- ・空間分解能：0.1秒角
- ・波長範囲：110-190 nm
- ・波長分解能：0.01 nm
- ・視野：>100秒角（分光）、
10分x 10分角→3分x 3分角（撮像）
- ・衛星バス：SPRINTバス
- ・軌道：500km - 10,000 km

主要観測装置

- ・分光観測装置
- ・UVスリットイメージャ
- ・(広視野イメージャ)

提案目標：ISAS公募型小型(2022/5公募発出)

打ち上げ目標：2032年



他ミッション(運用中)との比較

	HST/ACS SBC	HST/WFC3 UVIS	HST/STIS	HST/COS	GALEX	Swift UVOT	Hisaki	LAPUTA/ Spectrometer	LAPUTA/ Imager
Mirror size	2.5 m				0.5 m	0.3 m	0.2m	0.6m(-1 m)	
Sensitivity		~27 mag*			~22.5 mag*	~21 mag*			
Effective area (cm ²)	~>1000	~>1000	250 @220 nm	2,000 @120 nm 500 @200 nm	36.8 @148 nm 61.7 @220 nm	~20 @200-300 nm	~2	125-350	320-880 (TBD)
FOV	0.57' x 0.5'	2.7' x 2.7'	0.4' x 0.4'	φ2.5"	φ1.2 deg	17' x 17'	2' x 6'	1-50" x 100"	3' x 3' (0.01deg ²)
Spatial resolution	0.06"	0.08"	0.05"	0.06"	4-5" PSF	1" 2.5" PSF	17"	0.1"	0.1-1"
Spectral range (nm)	115-170 (ACS up to 1000 nm)	200 - 1000	115-310 (STIS up to 1000 nm)	90-320	130-280	170-650	50-145	115-190	115-190
Spectral resolution R = λ/Δλ	R ~100 @150 nm prism	R ~ 180 @ 220 nm grism slitless	R ~ 30,000 - 114,000 Echelle	R =3000- 20,000	R = 200 (F) R = 90 (N) grism	R~150 grism	~100	R > 5000	None
Period	2002-	2009-	1997-	2009-	2003-2013	2005-	2013-	2032	

他ミッション(計画中)との比較

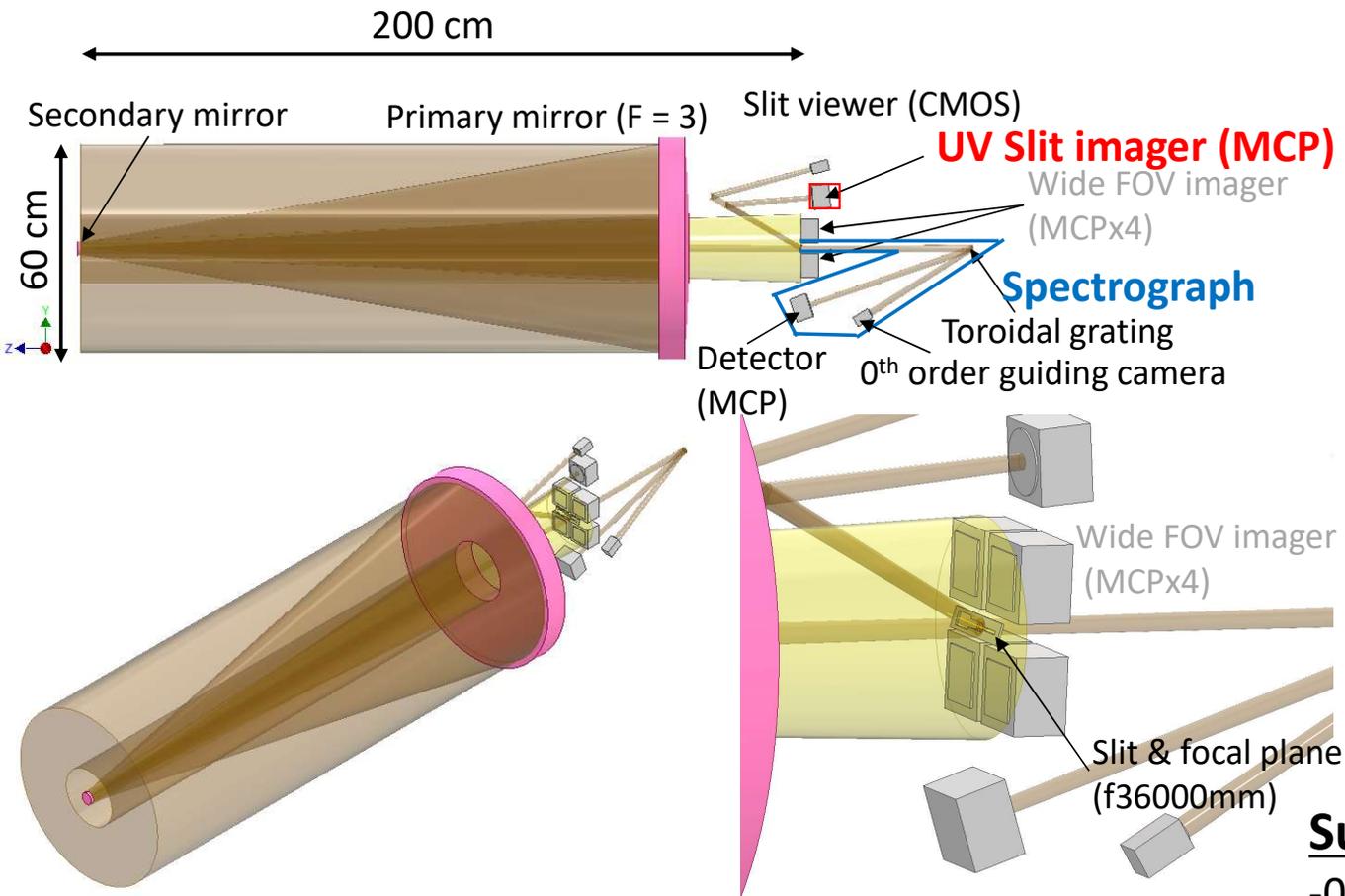
	ULTRASAT	WSO-UV	GUCI	CETUS	CASTOR	(ESCAPE)	CSST	UVEX	LAPUTA/ Spectrometer	LAPUTA/ Imager
Mirror size	0.5 m	1.7 m	0.13 m	1.5 m	1 m	0.35m	2m	0.75m	0.6m(-1 m)	
Sensitivity	22 mag in 900 sec		20-21 mag In 300 sec	26-27 mag in 1 hour	25.8 mag			24.5mag		
Effective area (cm ²)		680(F) 270(N)	50	1000-2000		20-100		825	125-350	320-880 (TBD)
FOV	210 deg ²	2' x 2' (F) 6' x 6' (N)	50 deg ²	17' x 17'	0.25 deg ²	0.01 deg ²	1.1deg 2	3.5deg x 3.5deg (imager)	1-50" x 100"	3' x 3' (0.01deg ²)
Spatial resolution	40"	0.5" (0.1" as the best)	40" PSF	0.55" (F) 0.33" (N) PSF	0.15" FWHM	<5"?	0.15"	2.25" (imager)	0.1"	0.1-1"
Spectral range (nm)	220-280	115-170(F) 174-310(N)	190-220 260-290	125-180 (F) 180-400 (N)	150-550	7-180	255- 1,000	139-270	115-190	115-190
Spectral resolution R = $\lambda/\Delta\lambda$	None	R = 1,000 & 50,000	None	R = 12,000 -40,000	None			1600- 3500	R > 5000	None
Period	2023?	2025	2025?	2030?	2026?	(2025?)	2024?	2027?	2032	

WSO-UVとの関係

- 科学観測
 - 系外惑星大気はWSO-UV/UVSPEXの主目的
 - LOPYUTAの役割
WSO-UVで検出兆候が得られた系外惑星のフォローアップ観測
2030年代に同定されるハビタブル系外惑星の大気の特徴づけ
 - LOPYUTAで検討している太陽系科学の科学課題（WSO-UVでは検討が手薄）
WSO-UVでの実施検討
太陽系内ターゲットに対する観測フィジビリティ（追尾など）も確認
- 技術ヘリテージ
 - LOPYUTAは分光器・検出器の技術ヘリテージ使う
 - WSO-UVの日本側開発チームはLOPYUTAの検討に参画
 - LOPYUTAのヘリテージ → 次世代の大型宇宙望遠鏡への接続

Specifications and preliminary design

Cassegrain telescope: $D = 60$ cm, effective $f = 3600$ cm



Science instruments

1. Spectrograph

Slit + Toroidal grating + MCP detector

Data type	2D spectral image (λ vs. space)
Effective area	125-350 cm ² (at 130 nm)
Spectral range	113-190 nm
Spectral resolution	<0.02 nm (at the slit center)
Field of view	100" x 1-50"
Spatial resolution	0.1" (at the slit center)

2. UV slit imager

Filter wheel + MCP detector

Data type	2D image
Effective area	320-880 cm ² (TBD)
Spectral range	120-190 nm
Field of view	3' x 3'
Spatial resolution	0.1"-1"

Supporting/option instruments

- 0th order guiding camera (VIS), Slit viewer (VIS)
- Wide FOV camera, H/D absorption cell

検討状況

FY2021にISAS戦略的開発研究費で着手

科学要求に基づく性能

- ・ **主鏡口径：60 cm**
- ・ **有効面積：>350 cm²**
- ・ **空間分解能：0.1秒角**
- ・ 波長範囲：110-190 nm
- ・ 波長分解能：0.01 nm
- ・ 視野：100秒角（分光装置）
3分角（撮像装置）

主要観測装置

- ・ 分光観測装置
- ・ スリットイメージャ
- ・ (広視野イメージャ)

望遠鏡概念設計

- ・ 空間分解能0.1"を達成する光学設計解
- ・ 望遠鏡支持機構・焦点調整機構の検討
- ・ 擾乱・熱ひずみ解析

システム検討

- ・ 「ひさき」衛星の実績をベースに、
公募型小型規模での成立性を検討
- ・ 軌道

キー技術

- ・ 高解像度を達成する姿勢擾乱補正機能
- ・ 高感度・広視野を実現する検出器
- ・ 軽量鏡

日本のヘリテージ

火星探査機のぞみ

(検出器・イメージャ)

月探査機かぐや

(検出器・イメージャ)

国際宇宙ステーション

(検出器・イメージャ)

惑星分光観測衛星ひさき

(望遠鏡・検出器・分光器)

水星探査機 BepiColombo

(検出器・分光器)

太陽観測衛星ひので

(望遠鏡・姿勢制御技術)

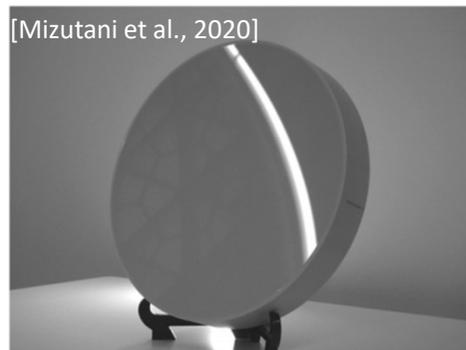
小型衛星へのUV機器搭載

PROCYON/LAICA

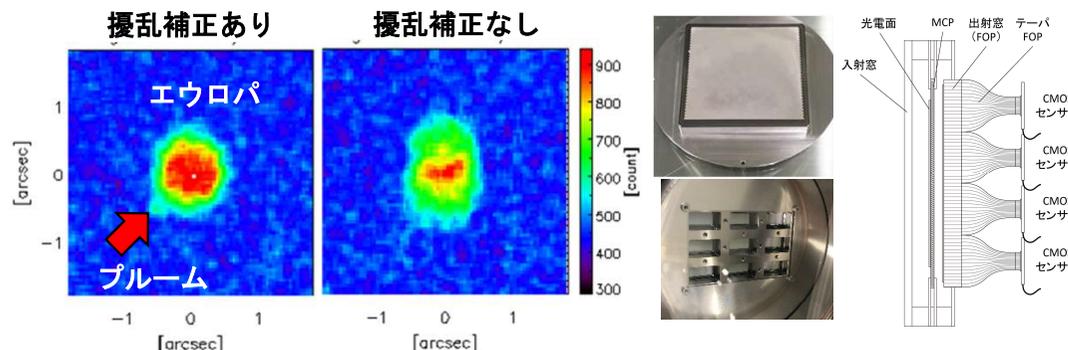
EQUULEUS/PHENIX

WSOUV(ロシア宇宙望遠鏡)

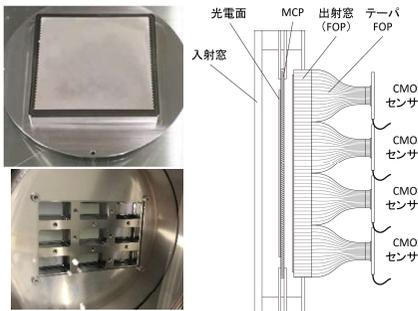
UVSPEX (検出器・分光器)



軽量望遠鏡技術



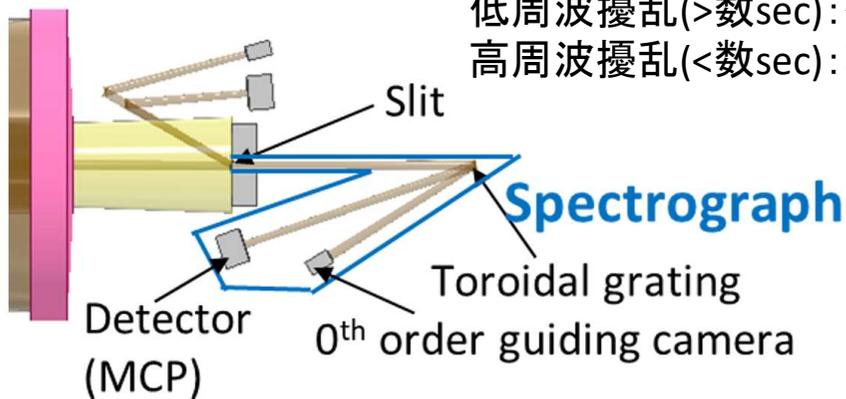
高速撮像による"手振れ補正"機能



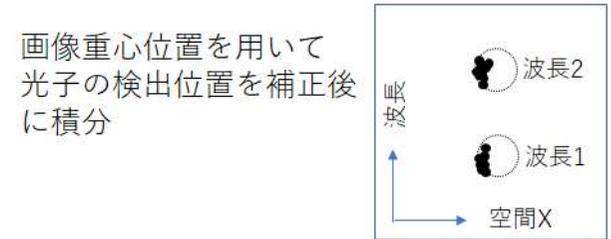
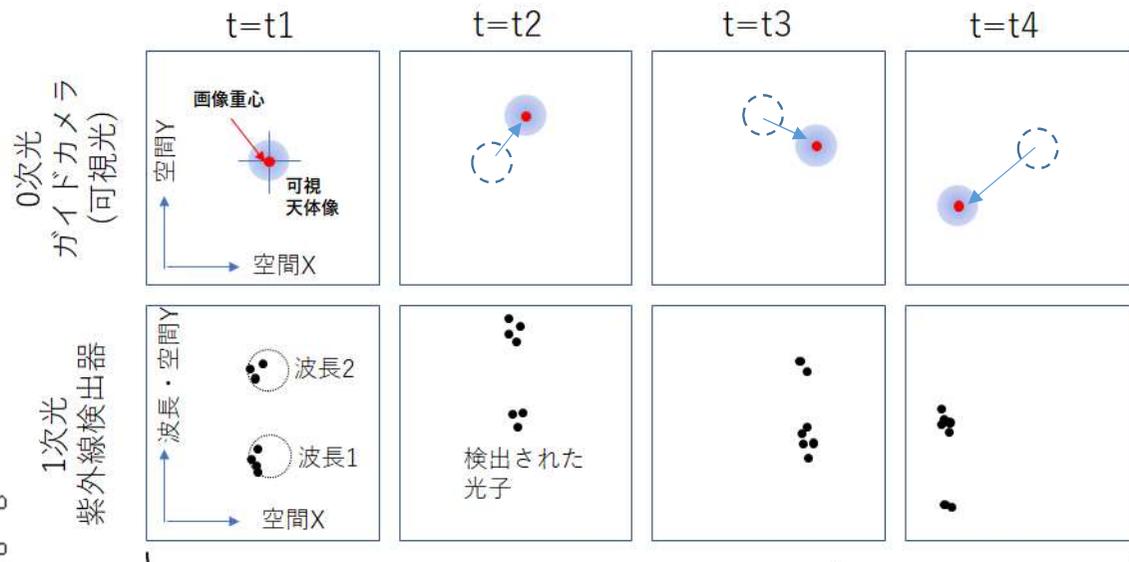
高感度・大型検出器

高空間分解能を達成するための姿勢擾乱補正機能

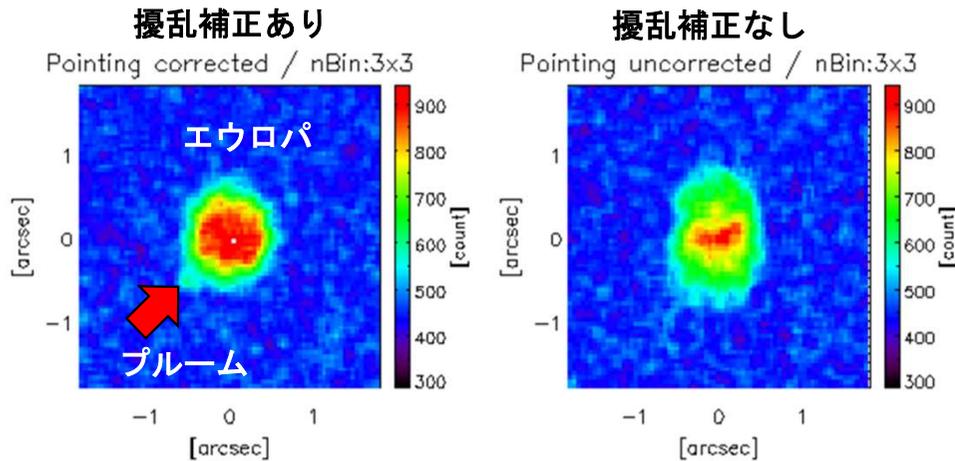
低周波擾乱(>数sec): 観測ターゲットの重心位置→バス部姿勢系にフィードバック(ひさき方式)
 高周波擾乱(<数sec): ミッション部に「電子式手振れ補正機能」を実装(新規)



分光観測装置の概要図



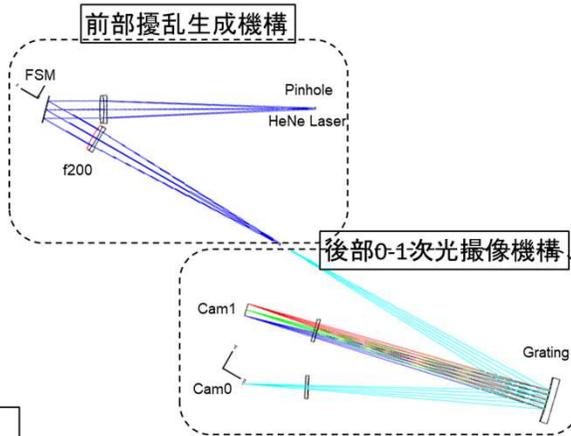
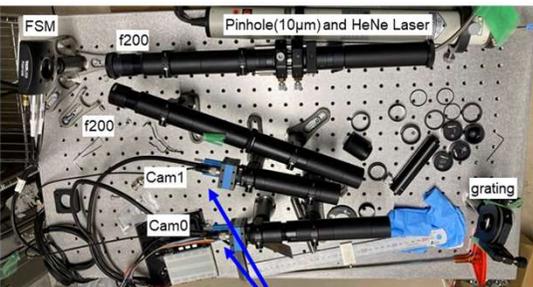
水素原子発光強度分布
(フォトンノイズ考慮)



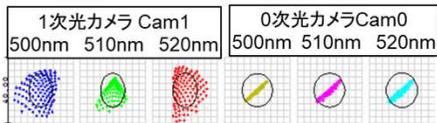
姿勢擾乱補正機能の机上検討 (擾乱: 10Hz, 0.5arcsec)

ガイドカメラを用いたポインティングぶれ補正の概念図

高空間分解能を達成するための姿勢擾乱補正機能



同時外部トリガー入力



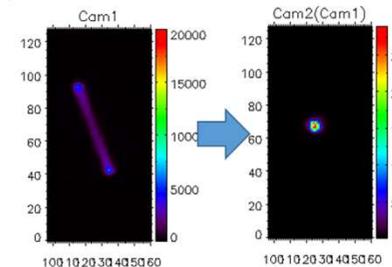
光軸高さ1mm

光軸高さ0mm

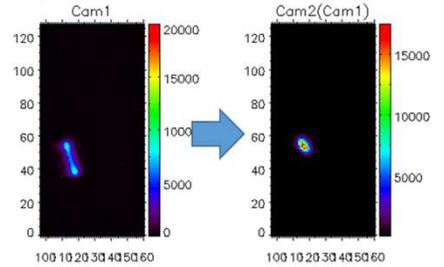
姿勢擾乱補正機能検証光学系の写真、
光学系レイアウトとスポットダイアグラム

次のステップ: FPGAへの実装検討

A) FSR駆動周波数 4Hz, 駆動振幅34pixel

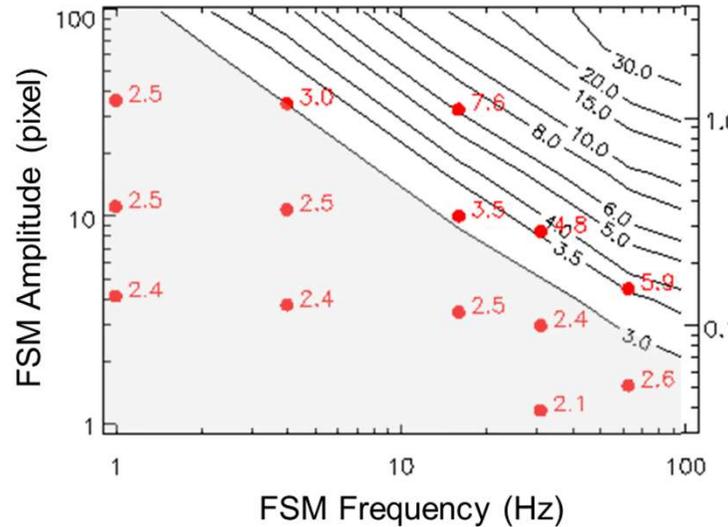


B) FSR駆動周波数 31Hz, 駆動振幅9pixel



位置ずれ補正前 (左) ・ 補正後(右)の1次光カメラ
Cam1の256枚積分画像

RMS-Y of PSF (pixel)

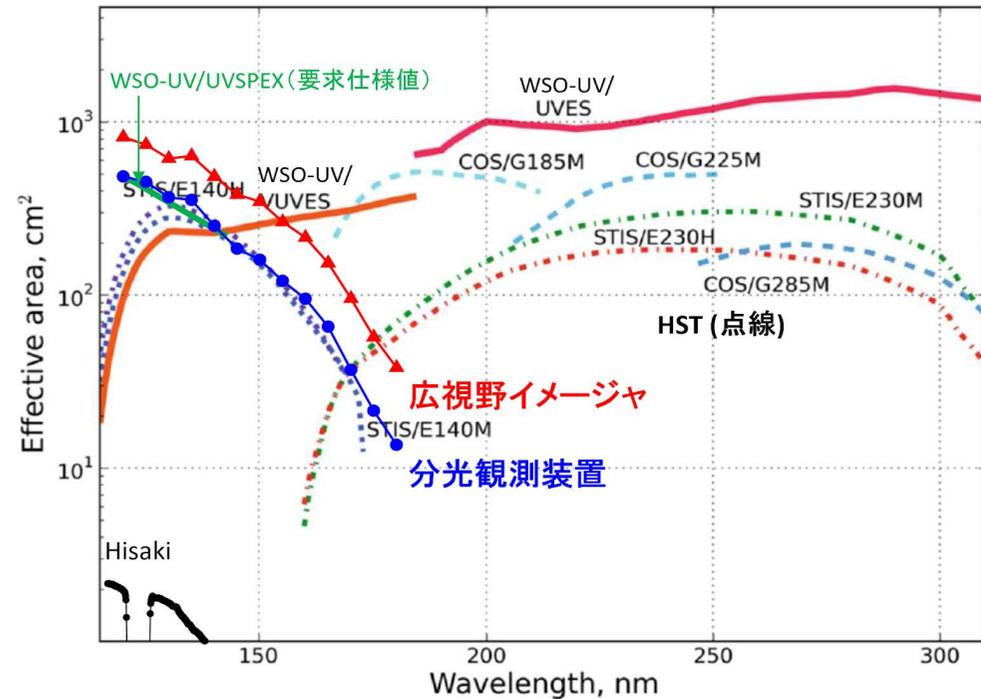
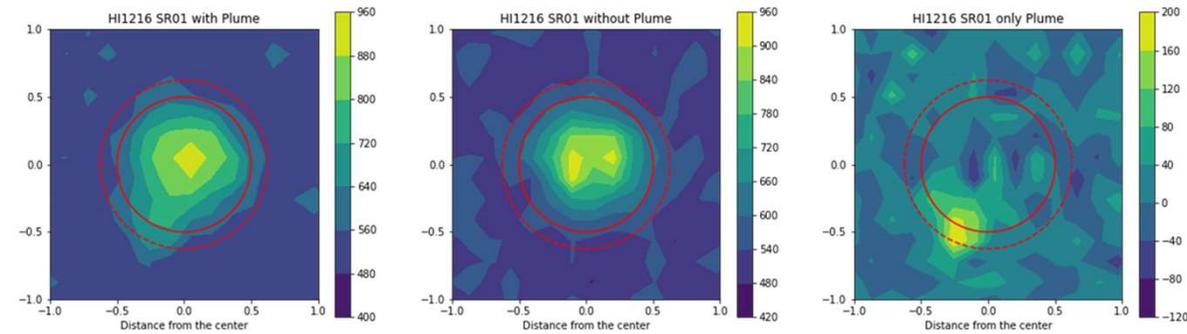


FSM Amplitude on Sky (arcsec)

モデル計算から得られた、積分時間
8.3msのときのFSM
駆動振幅と周波数
に対する擾乱補正
後の点像の広がり。
赤点と数値は検証
光学系で測定され
た結果。灰色の領
域で要求する空間
分解能0.1"を満たす。

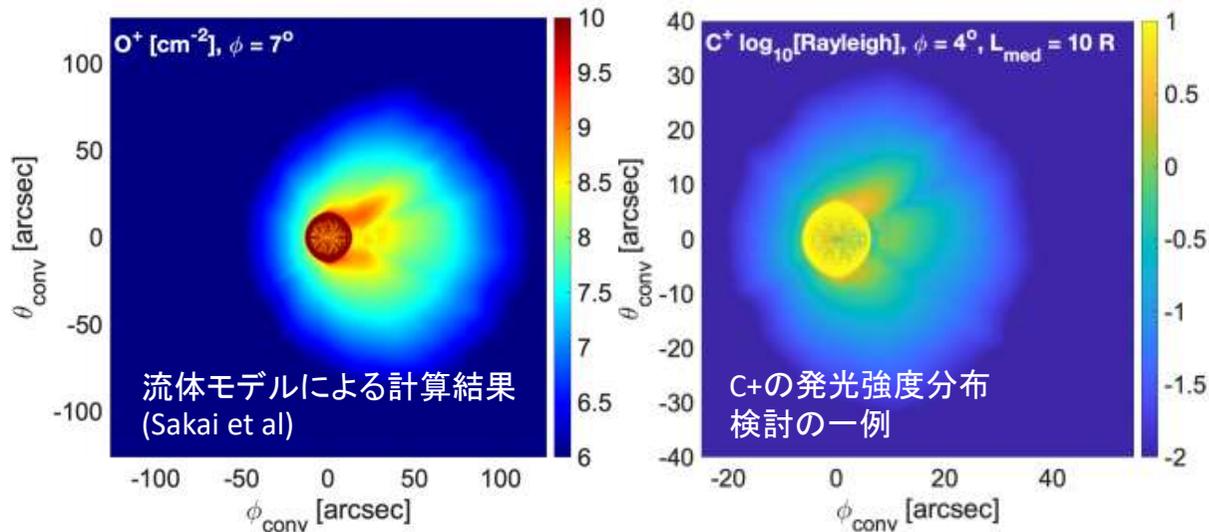
Scientific requirement & Feasibility

エウロパ 水プルームの観測見積
 (HI Ly- α , 積分時間10h, 空間分解能0.1", Aeff:350cm²)



LAPYUTAおよびHST、WSO-UVの有効面積の比較

火星大気からのイオン散逸(C+)



流体モデルによる計算結果
 (Sakai et al)

C+の発光強度分布
 検討の一例

まとめ

- **LAPYUTA計画**: 2020年代末～2030年代の観測を目指す高感度・高解像度の紫外線宇宙望遠鏡計画
JAXA宇宙科学研究所 公募型小型計画での実施を目指し、公募型小型計画検討ワーキンググループで検討を進めている。
- **学術的価値**: 光赤外天文学分野の掲げる3大課題にLAPYUTA計画は横通しで取り組みつつ、その成果は太陽系科学分野、系外惑星分野の特に液体の水の存在形態の知見に波及する。
 - 【太陽系科学】太陽系内における生命存在可能環境とその進化の解明
 - 【系外惑星】高層大気の観測を通じた地球類似惑星の発見および惑星進化過程の解明
 - 【宇宙論】近傍宇宙における冷たい暗黒物質モデルの観測的検証
 - 【マルチメッセンジャー】中性子星合体による重元素合成の検証
- **緊急性**: 各科学目標について、LAPYUTAは世界的にユニークな役割を担い、2030年頃の実現が最適。将来の国際大型計画に向けた日本のキー技術の実証としても必要である。
- **各分野での連携**: 地球・惑星科学分野で培われた紫外線観測技術と、天文学・太陽物理学分野により培われた望遠鏡技術を融合し、広い研究コミュニティに紫外線観測手段を提供する。光赤天連においては2030年代将来計画の一つとして検討を続けている。
- **計画の実現性**: ISAS公募型小型WGとして採択され、2021年度よりシステム検討およびキー技術開発を開始している。過去のヘリテージを最大限に活用しつつ、開発経験のある研究者を中心に公募型小型規模で高精度宇宙望遠鏡の2030年頃打ち上げを目指す。