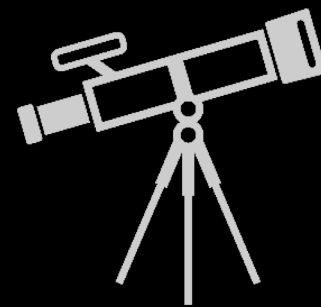




紫外線宇宙望遠鏡による
氷衛星プリューム観測
ーリモートセンシングから衛星本体の物理を紐解くー



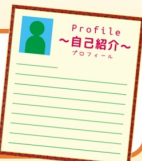
村上 豪 (JAXA/ISAS)

本研究会の趣旨 = マッチングに沿って考えてみる

活動の流れ

①ご紹介

当社からお客様の条件に合いそうな方をご紹介します。プロフィールをご覧になり、お会いしてみたい場合は「マッチングメイク」へ



②マッチングメイク

喫茶店などで1時間程度お話しします。お聞きになりたいことなどをしっかりとお話ししましょう。



③仮交際スタート

1ヶ月間お友だちとしてのお付き合い。直接連絡を取り合ったり、何度かデートを重ねてお互いの距離を縮めていきましょう。



④本交際スタート

結婚を前提とした3ヶ月間のお付き合い。真剣に今後のことを話し始める時期です。いよいよゴール間近です!



⑤卒業

本交際から3ヶ月経過し、お互いにお付き合いを継続する気持ちがあれば卒業です。ご結婚に向けて歩んでいきます。

①研究紹介（本日）

②雑談を通じて共通の興味、研究領域を探り合う（コーヒースタイル、夜の部?）

③別途、打ち合わせを設定してブレスト

④共同研究スタート、科研費獲得

⑤論文出版、新規ミッション提案

自己紹介：紫外線（・可視光）を使ったリモートセンシングが専門

これまでに開発してきた観測装置：

- ①月周回衛星「かぐや」 紫外線カメラ
2007年9月打ち上げ(2009年6月運用終了)
- ②国際宇宙ステーション「きぼう」 紫外線カメラ
2012年7月打ち上げ(2015年8月運用終了)
- ③惑星分光観測衛星「ひさき」 紫外線分光器
2013年9月イプシロンロケットで打ち上げ(運用中)

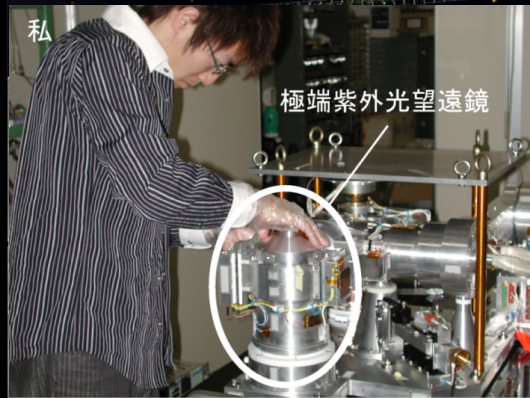
現在取り組んでいるプロジェクト：

- ④水星探査計画「ベピ・コロンボ」 紫外線分光器、
ナトリウム大気カメラ
2018年10月打ち上げ、2025年12月水星到着

月周回衛星「かぐや」搭載 紫外線カメラ

可視光カメラ

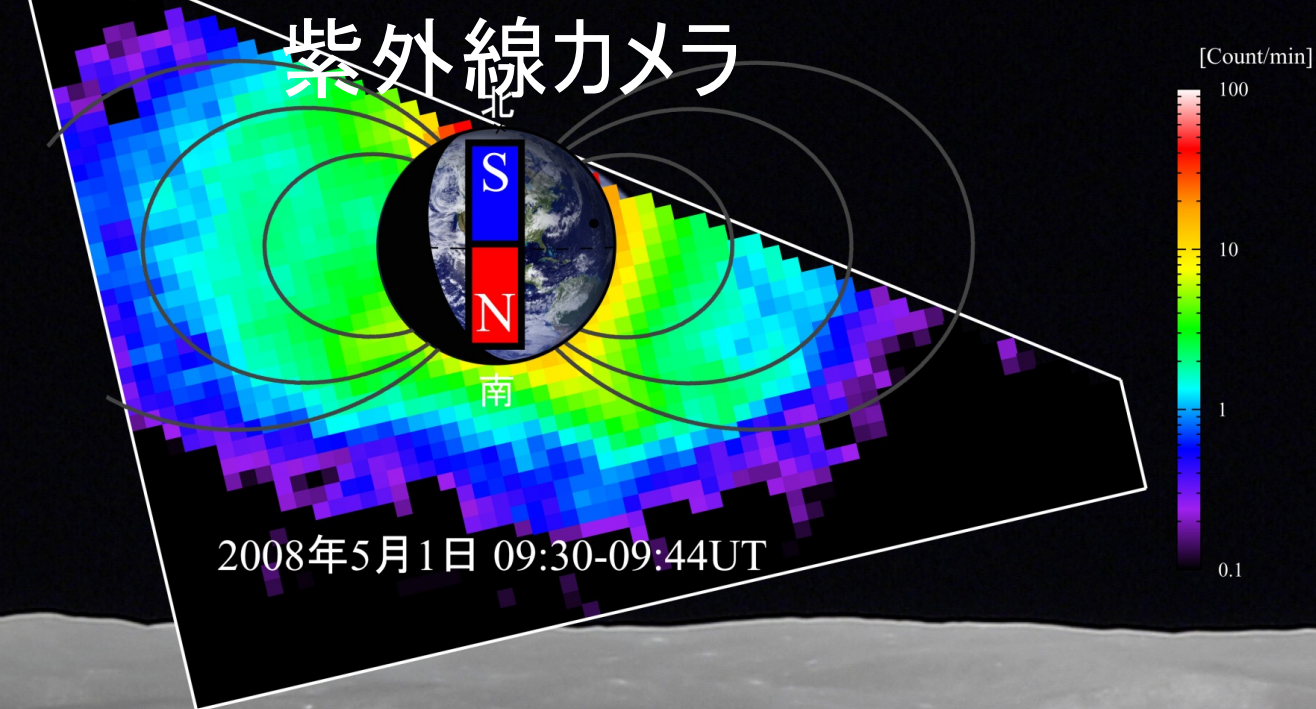
紫外線カメラ



- ・2007年9月打ち上げ
- ・月から地球の上層大気を撮像

月周回衛星「かぐや」搭載 紫外線カメラ

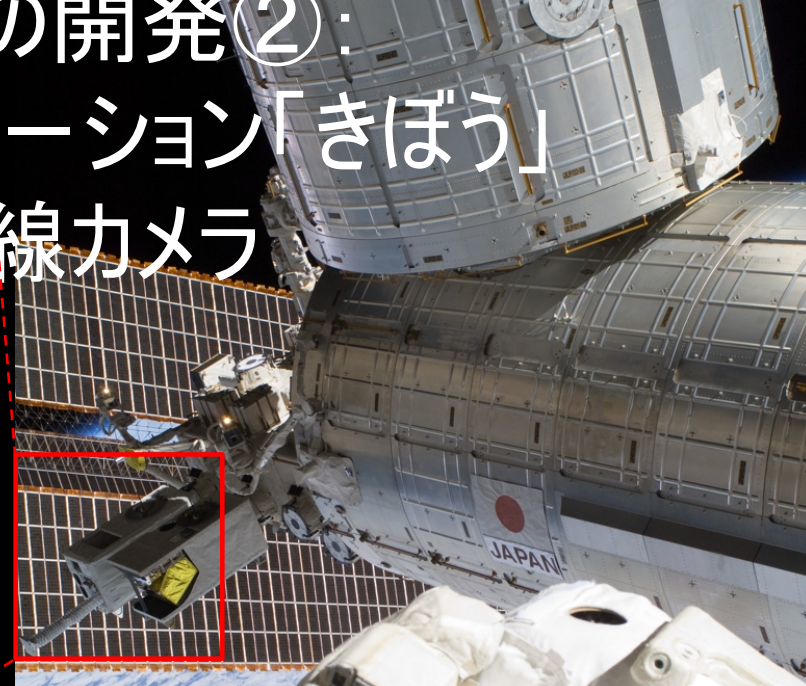
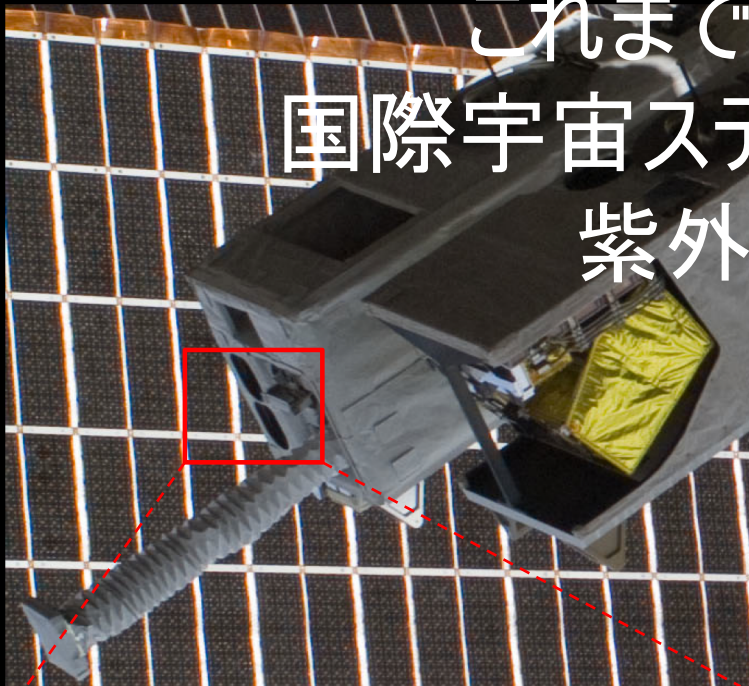
極端紫外光



世界で初めて地球から広がる大気を横から撮像することに成功

紫外線で見た地球

これまでの開発②：
国際宇宙ステーション「きぼう」
紫外線カメラ



2012年7月打ち上げ
(2015年に運用終了
→油井さんが廃棄)

これまでの開発③： 惑星分光観測衛星「ひさき」 紫外線カメラ

世界初！

惑星専用の宇宙望遠鏡



2013年9月イプシロンロケット試験機で打ち上げ
(現在も絶賛観測中！)

木星のオーロラやイオ火山ガス、火
星・金星の大気などを観測

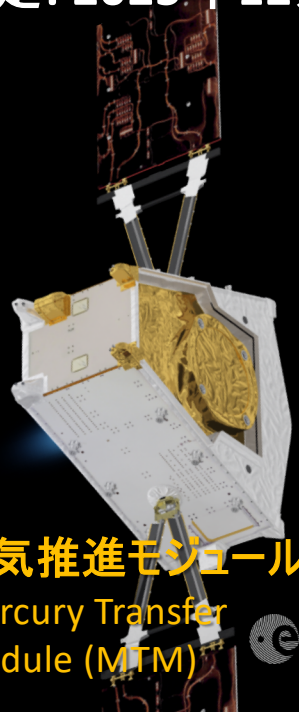




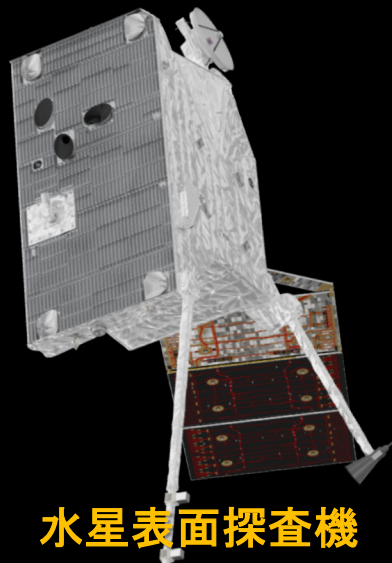
ベピコロンボ (BepiColombo) 水星探査計画



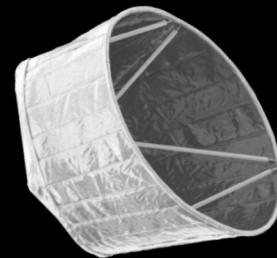
- 日本 (JAXA) とヨーロッパ (ESA) の大規模な国際共同ミッション
- 2機の探査機を水星へ
- 打ち上げ: 2018年10月20日 (日本時間)
- 水星到着予定: 2025年12月



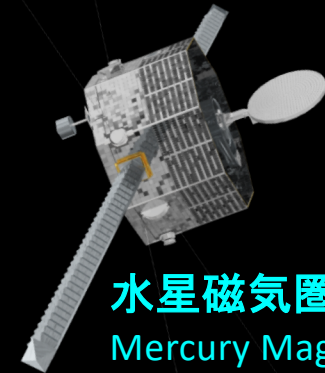
電気推進モジュール
Mercury Transfer
Module (MTM)



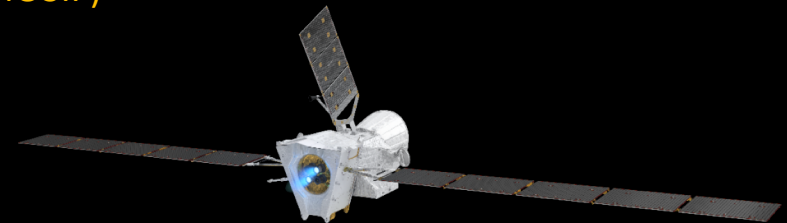
水星表面探査機
Mercury Planetary
Orbiter (MPO)



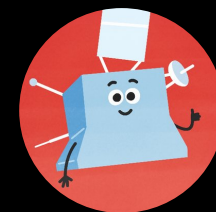
MMOサンシールド
Magnetospheric Orbiter
Sunshield and Interface
Structure (MOSIF)



水星磁気圏探査機「みお」
Mercury Magnetospheric
Orbiter (MMO)



2つの探査機で水星を丸裸に



水星磁気圏探査機「みお」(MMO)

日本 (JAXA) 担当のスピン衛星 (約280kg)
水星の周りの環境 (磁場、プラズマ、
ダスト、大気) を精密に計測する

水星表層探査機 (MPO)

欧州 (ESA) 担当の3軸制御衛星 (約1150kg)
水星の表面や内部 (地形、鉱物・化学組成、
重力場、磁場) を精密に計測する

惑星探査機の2機同時
投入は世界初!

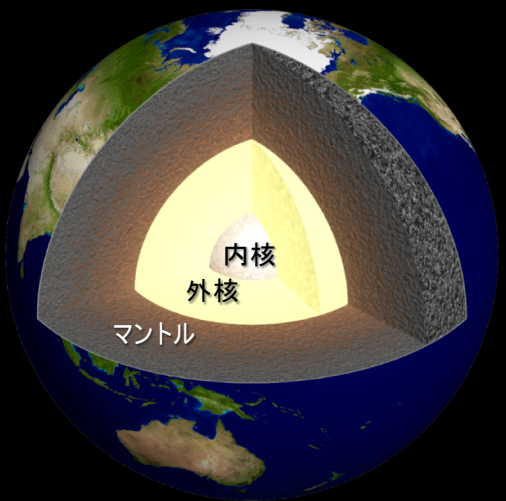
本題に入る前に、ここでちょっとブレスト

- (衛星ではないけど、似てるので)水星をテーマに本研究会の趣旨と照らし合わせてみる

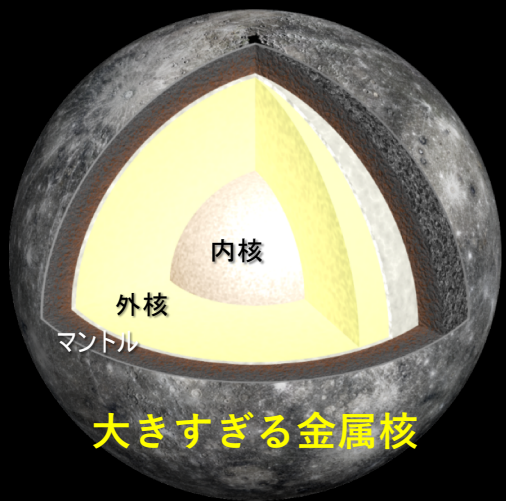
水星探査の3大テーマ

①形成

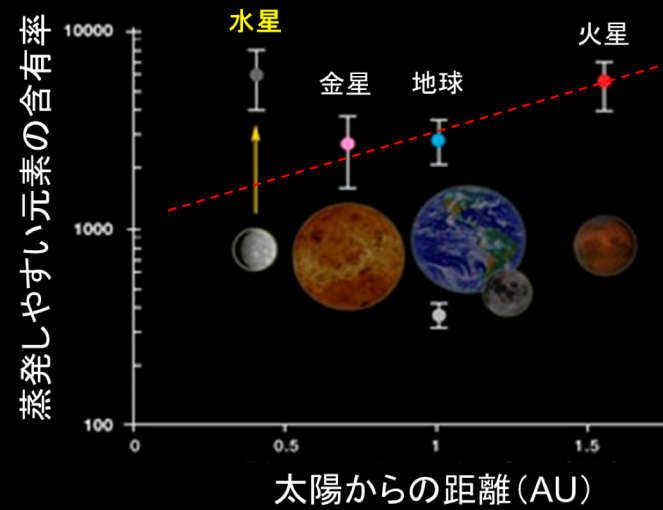
地球



水星



大きすぎる金属核



多すぎる揮発性元素

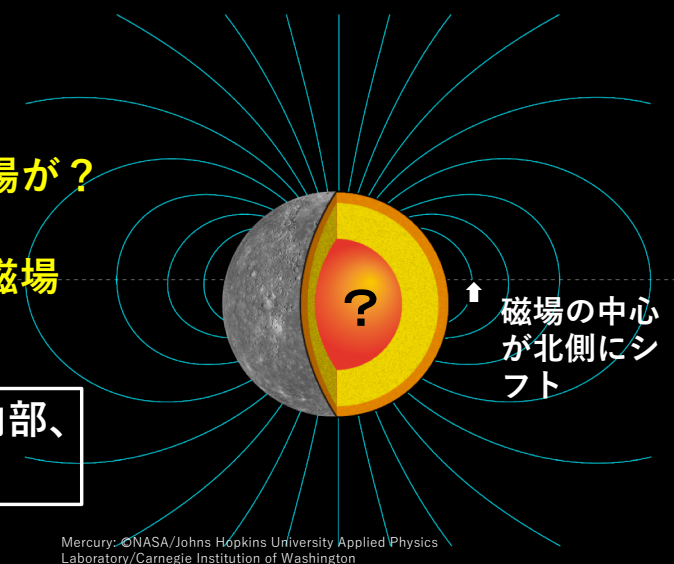
地球型惑星の材料・形成のカギ

②進化

なぜ水星にまだ磁場が？

大きくズレた変な磁場

磁場から水星の内部、進化を読み解く



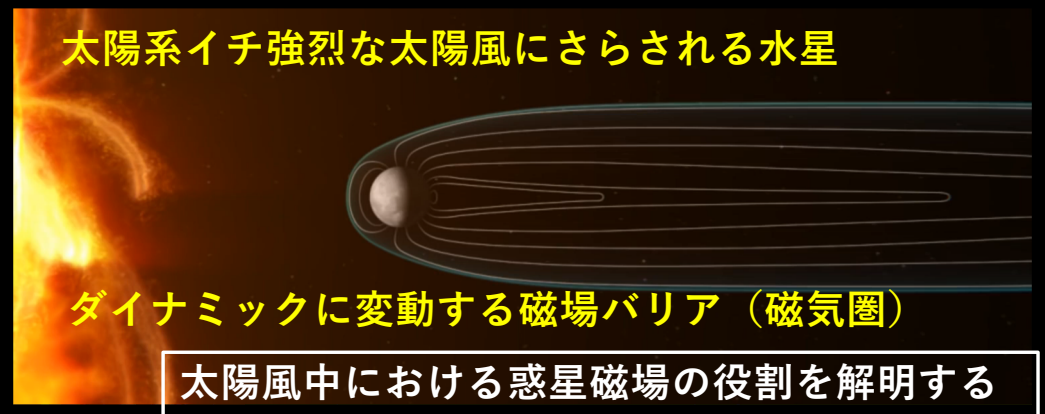
Mercury: ©NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington

③環境

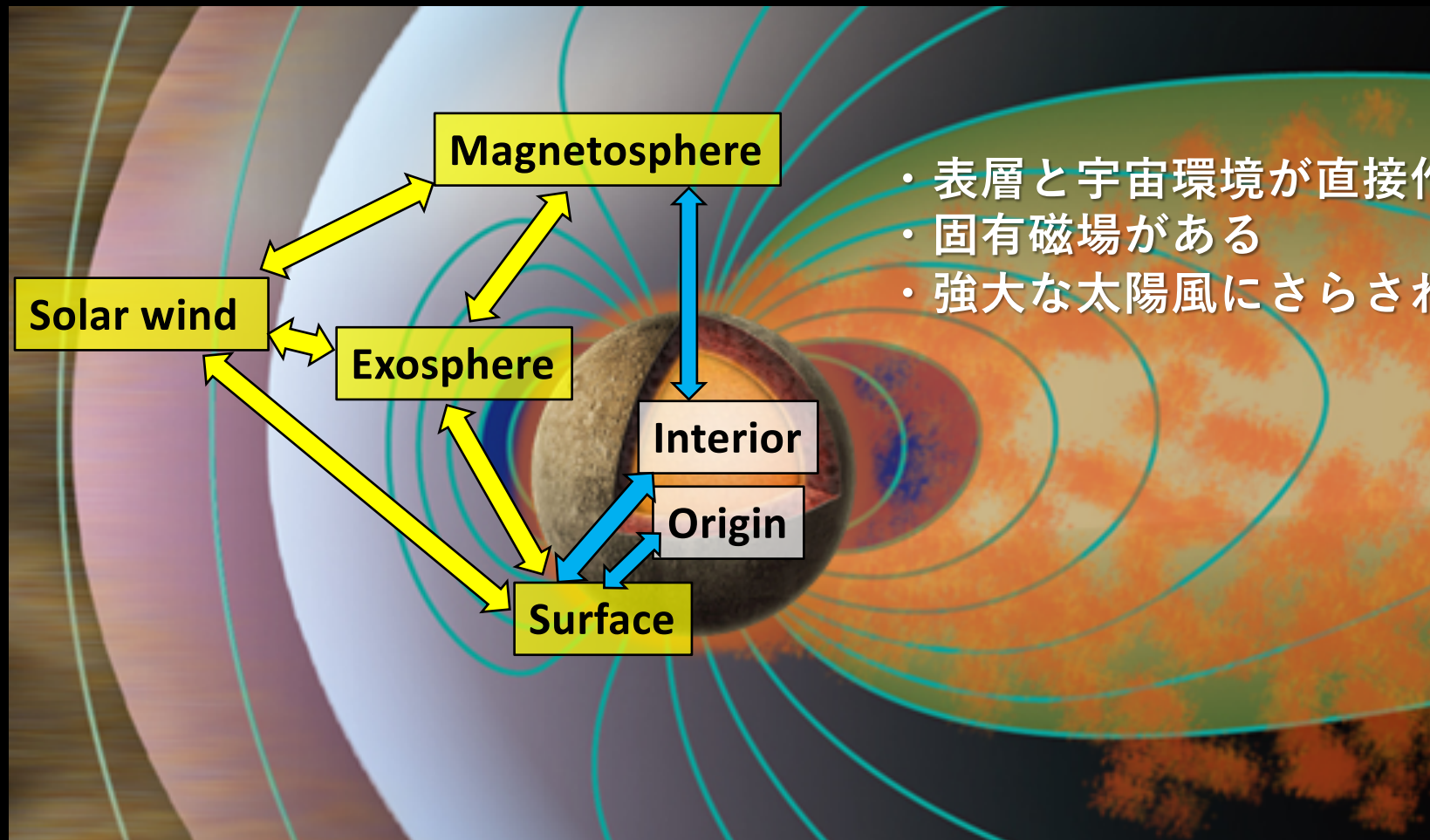
太陽系イチ強烈な太陽風にさらされる水星

ダイナミックに変動する磁場バリア (磁気圏)

太陽風中における惑星磁場の役割を解明する

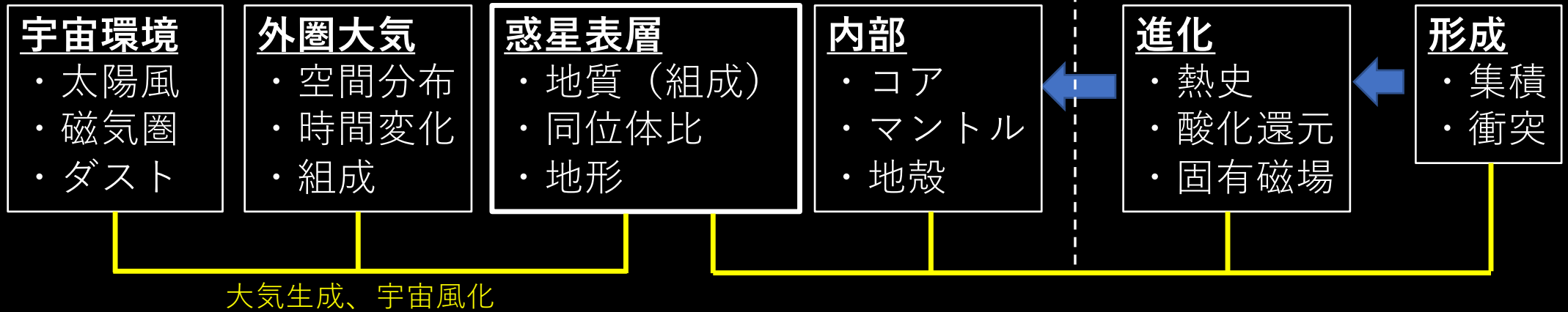


水星を取り巻く複雑かつユニークな系



融合研究をブレストしてみる…が途中で力尽く

(現在) (過去)



手法

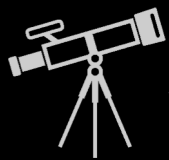
- ・ プラズマ粒子
- ・ 中性粒子
- ・ X線～赤外分光
- ・ 磁場
- ・ 重力場
- ・ 電場
- ・ UV・可視分光
- ・ 太陽X線分光
- ・ カメラ
- ・ 高度計
- ・ サンプル分析
- ・ 磁場
- ・ 重力場 (・地震計)
- ・ 火山ガス、プリューム

制約を与える

- ・ モデル
- ・ シミュレーション
- ・ 隕石分析?
- ・ ダスト分布観測?

ここから本題

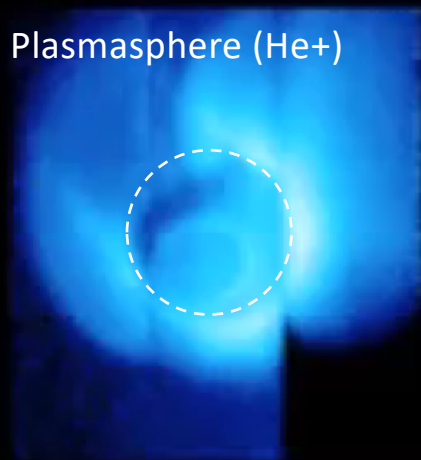
紫外線観測チュートリアル



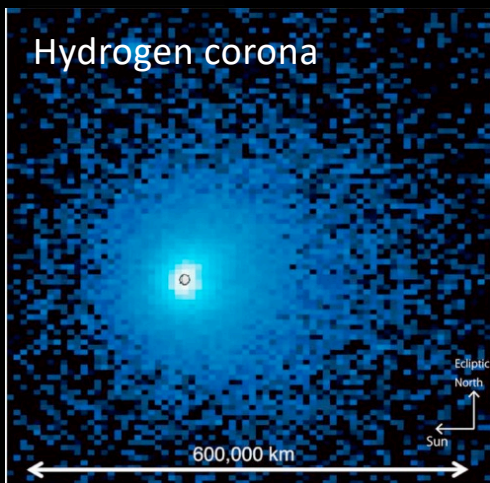
紫外線リモートセンシングでわかること

Earth

Plasmasphere (He+)

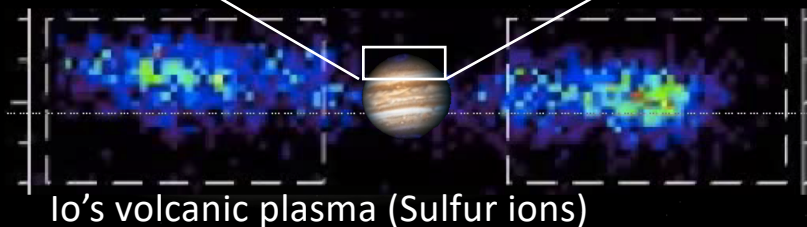
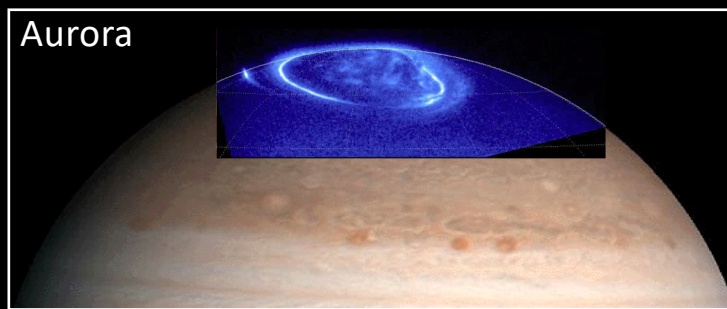


Hydrogen corona



Jupiter

Aurora



Why UV?

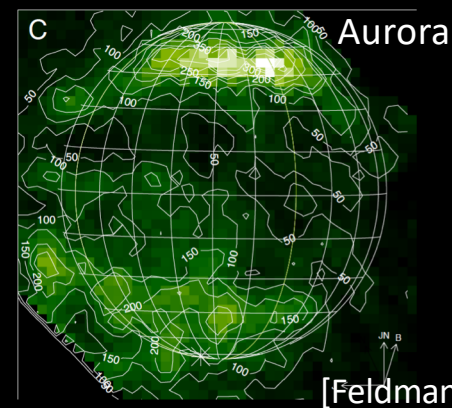
- Photon counting capability
- Many emission lines from atoms/plasmas
- Space mission advantages

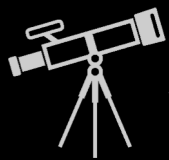
Europa



H2O plume

Ganymede





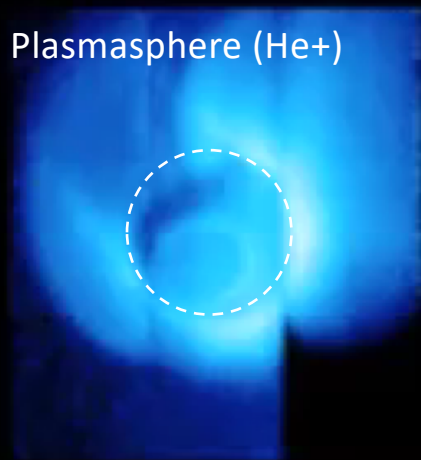
紫外線リモートセンシングでわかること

主な発光プロセス

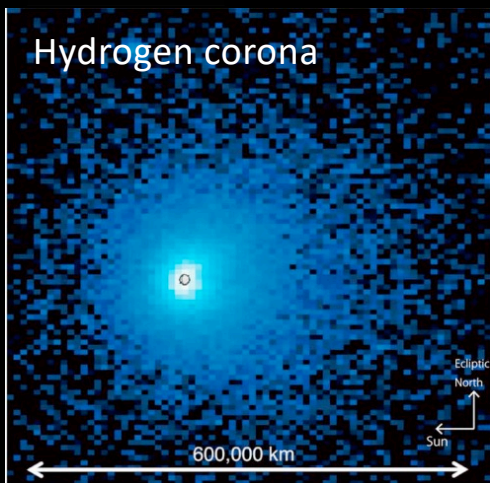
- ・太陽光共鳴散乱
- ・電子衝突励起
- ・解離励起

Earth

Plasmasphere (He+)

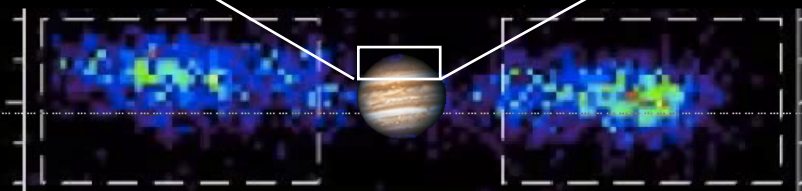


Hydrogen corona



Jupiter

Aurora



Io's volcanic plasma (Sulfur ions)

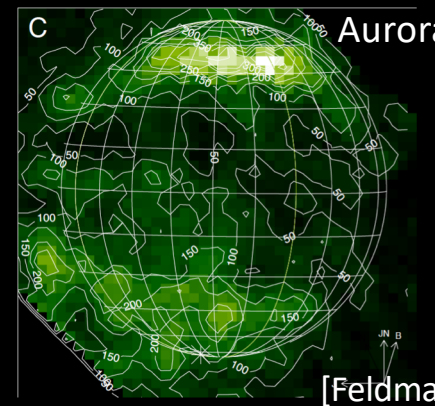
- ・外圏(無衝突)大気
- ・天体周辺プラズマ
- ・オーロラ
- ・噴出物(イオ火山ガス、エウロパリウム)の組成、密度、(温度)、これらの時間変動

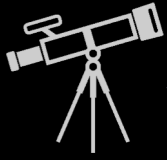
Europa



H2O plume

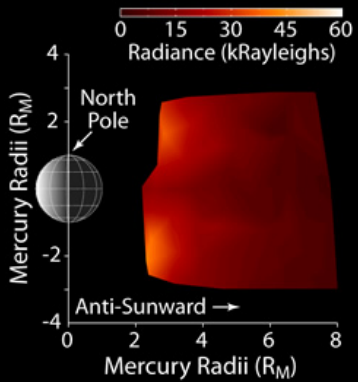
Ganymede



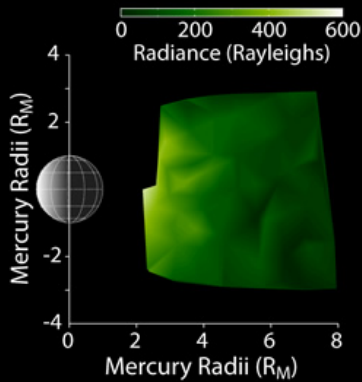


紫外線リモートセンシングでわかること

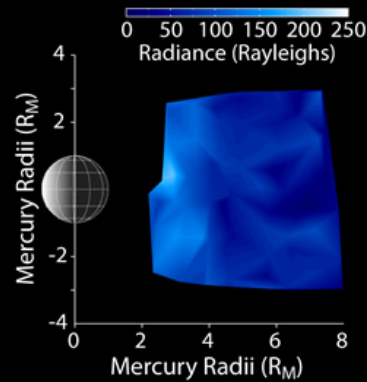
Mercury



Sodium



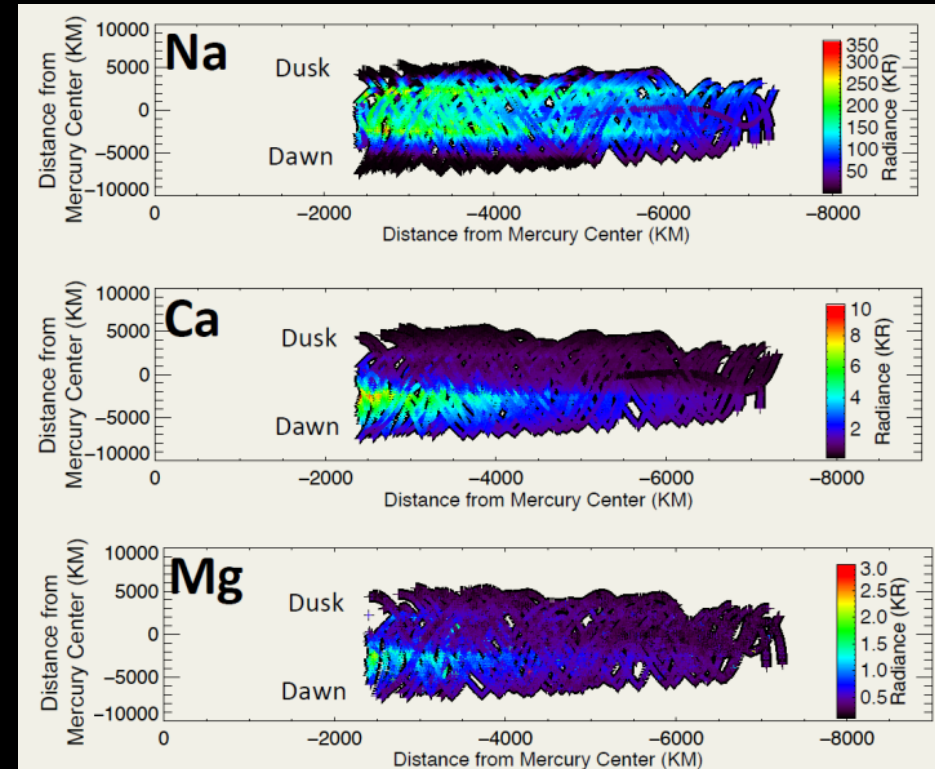
Calcium

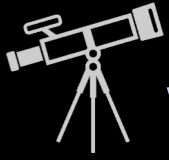


Magnesium

表層物質(レゴリス)から放出され外圏大気を形成

→惑星周辺の環境を観測するだけで天体表層の情報を得られる





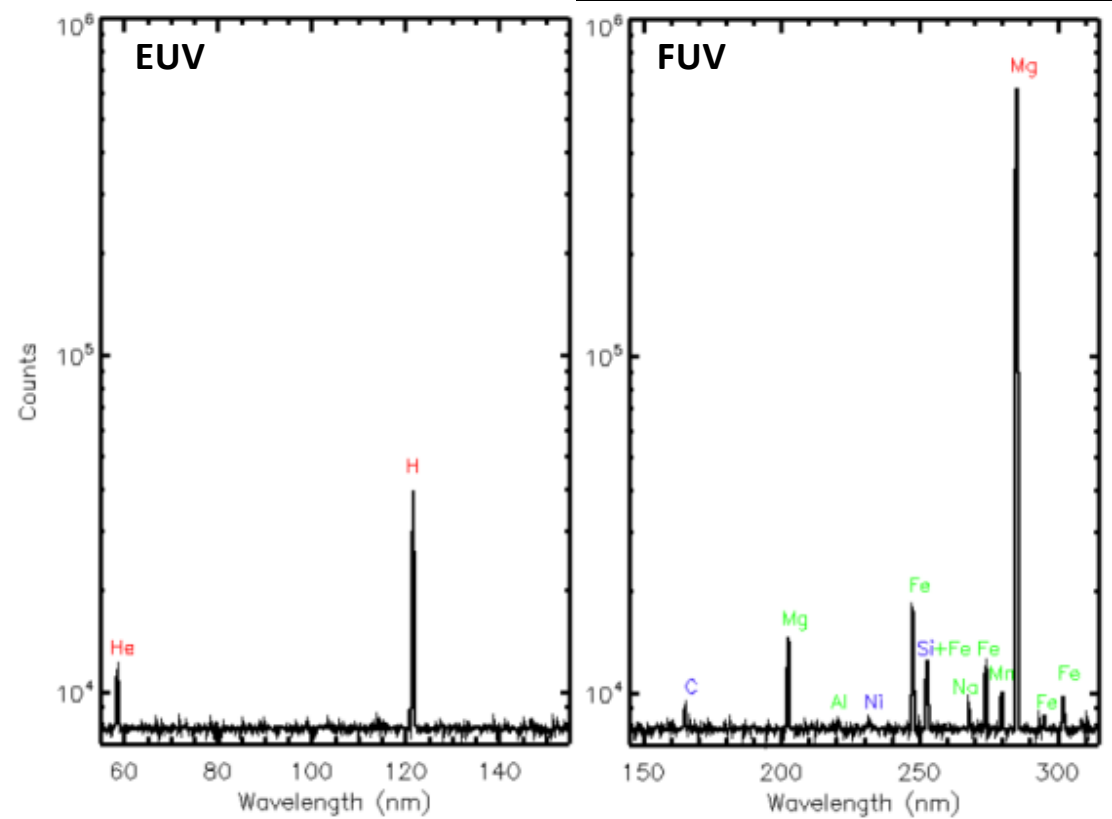
紫外線リモートセンシングでわかること

-Limb scan (normally)

-H, He, Mg, Ca, Mn, etc... are expected

Model spectrum (dayside, 450km, 10⁴ sec exp)

EUV		FUV		NUV	
Wavelength	Brightness	Wavelength	Brightness	Wavelength	Brightness
H 121.6 nm	10 – 300 R	C 156.1 nm	0.1 - 6R	K 404 nm	< 2R
H 102.5 nm	0.03 – 1 R	C 165.7 nm	0.4 – 28 R	Mn 403 nm	50 – 100 R
H 97.2 nm	0.003 – 0.1R	S 180.7 nm	0.05 R	Ca 422 nm	100 – 1000R
He 58.4 nm	10 – 100R	Al 220.9 nm	0.5 – 1.2 R		
O 130.4 nm	< 2R	Fe 248.4 nm	10-50 R		
		Fe 252.9 nm	8-30 R		
		Si 251.9 nm	0.1 – 6R		
		Na 268.1 nm	0.5 – 8R		
		Mn 279.9 nm	10 – 30 R		
		Mg 285.2 nm	200 – 5000R		
		Al 309.3 nm	2 – 4 R		



[Quemerais et al., in prep.]

UV technique in solar system science: our heritages

UV remote sensing is one of
key techniques in Japan



Kaguya/UPI-TEX (2007-2009)



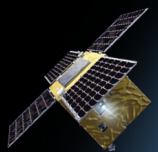
Nozomi/UVS (1998-2003)



Hisaki/EXCEED (2013-)



BepiColombo-MPO/PHEBUS (2018-)



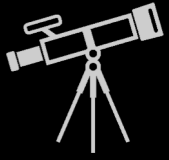
PROCYON/LAICA (2014-2015)



EQUULEUS/PHOENIX (2021-)



ISS-JEM/IMAP-EUVI (2012-2015)



Hisaki: Japan's S-class mission

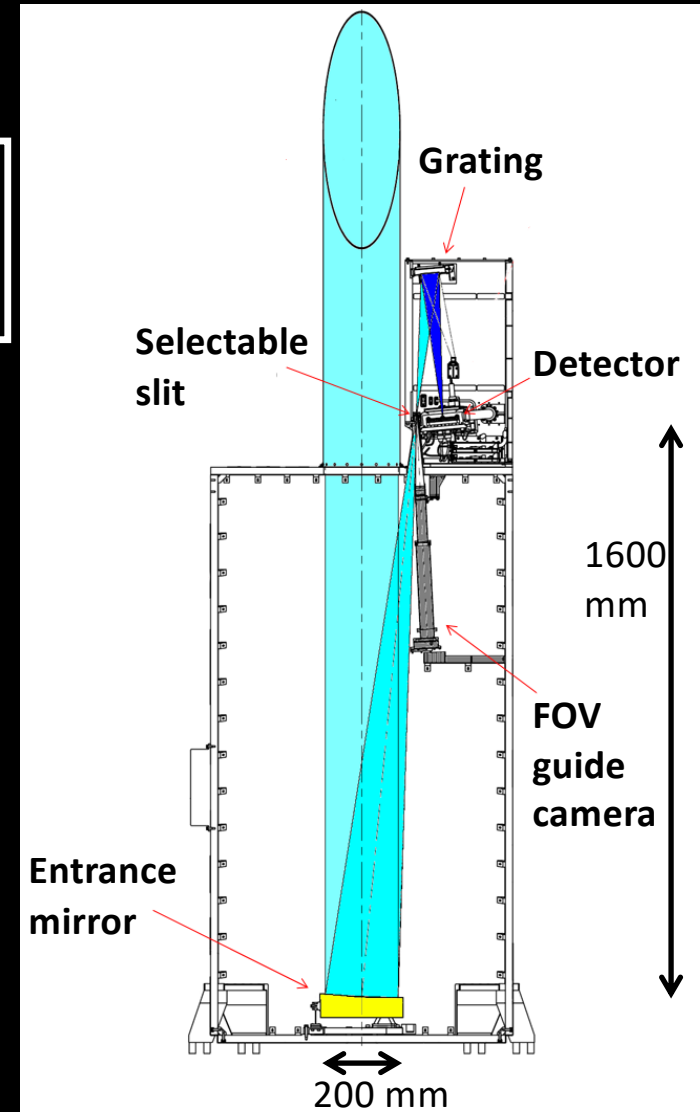
- Hisaki is the first space telescope dedicated for planetary science
- The first mission of the ISAS/JAXA S-class category
- Hisaki was launched in 2013 and is still working (~2020 or extension)

Specifications

Wavelength range	52 – 148 nm
Effective area	1-3 cm ²
Spatial resolution	17 arc-sec
Field of view	360 arc-sec.
Spectral resolution (FWHM)	0.4 – 1.0 nm (depends on slit)
Mirror diameter	20 cm
Pointing accuracy	±2 arc-sec
Orbit	950 x 1150 km

Simple optical design

1. Primary mirror (CVD-SiC coating)
2. Selectable slit
3. Grating (CVD-SiC coating)
4. Detector (microchannel plates with CsI photocathode)

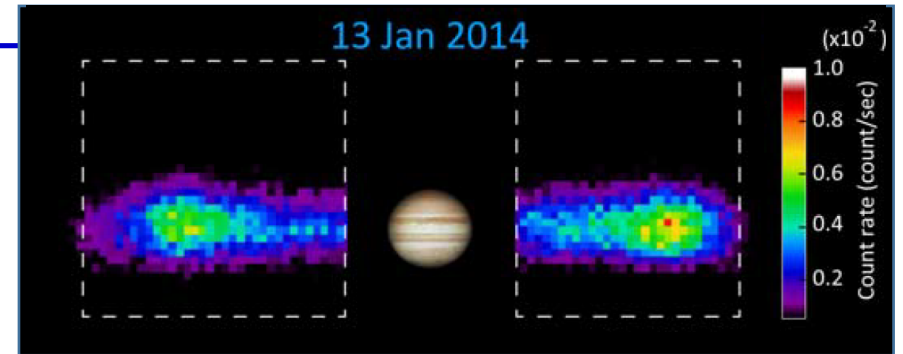


Optical layout of Hisaki/EXCEED

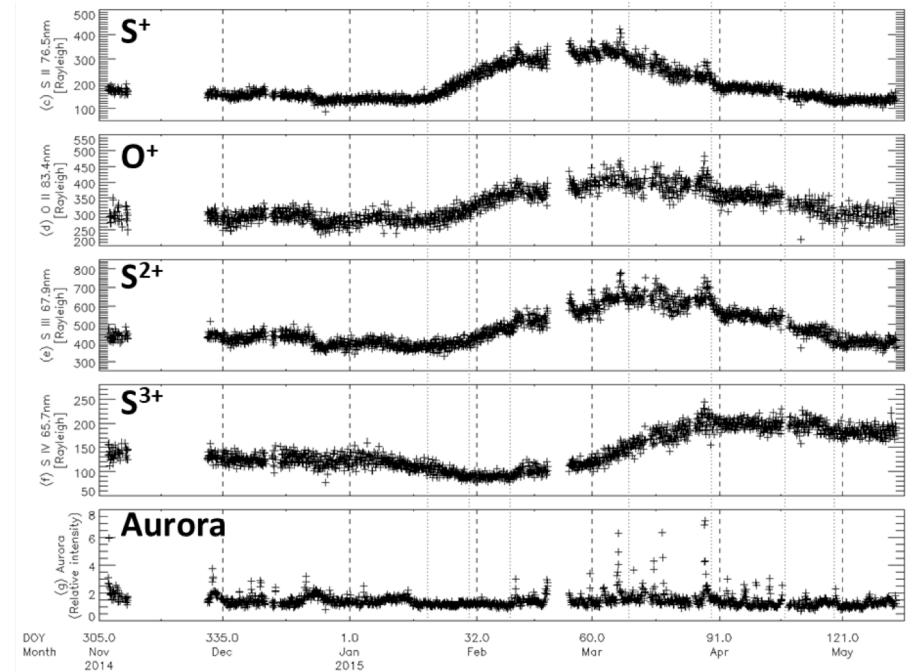
HISAKI (2013/12-)

- HISAKI: 惑星専用望遠鏡
- 極端紫外線分光観測による太陽系惑星の長期連続観測
 - 木星・土星磁気圏(オーロラ)・衛星からのガス散逸の変動 (Koga et al., Hikida et al.)
 - 金星電離圏 (Nara et al.)
 - 火星外圏
- 残された課題
 - **氷衛星**・小惑星・彗星
 - 惑星大気散逸
 - 惑星大気(金星・火星)・オーロラの空間構造

Io plasma torus observed by Hisaki (Murakami+2016)

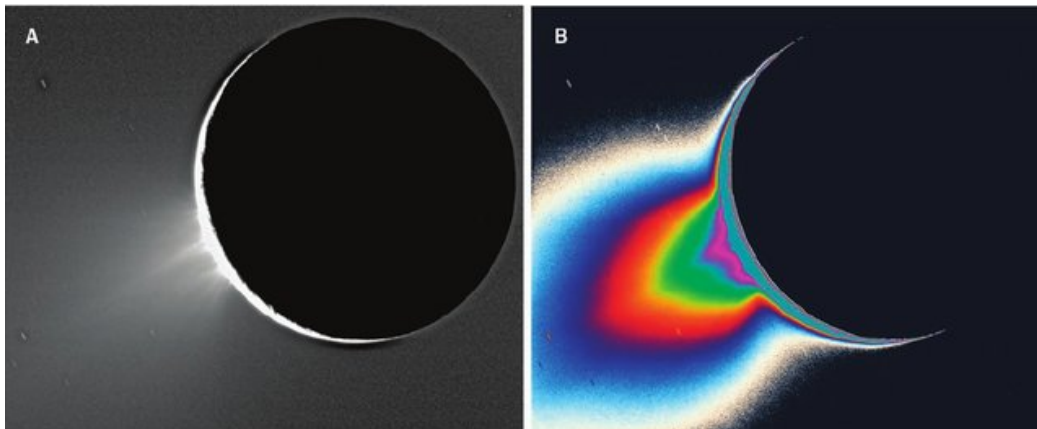


Io's volcanic activity detected by Hisaki (Tsuchiya+2018)

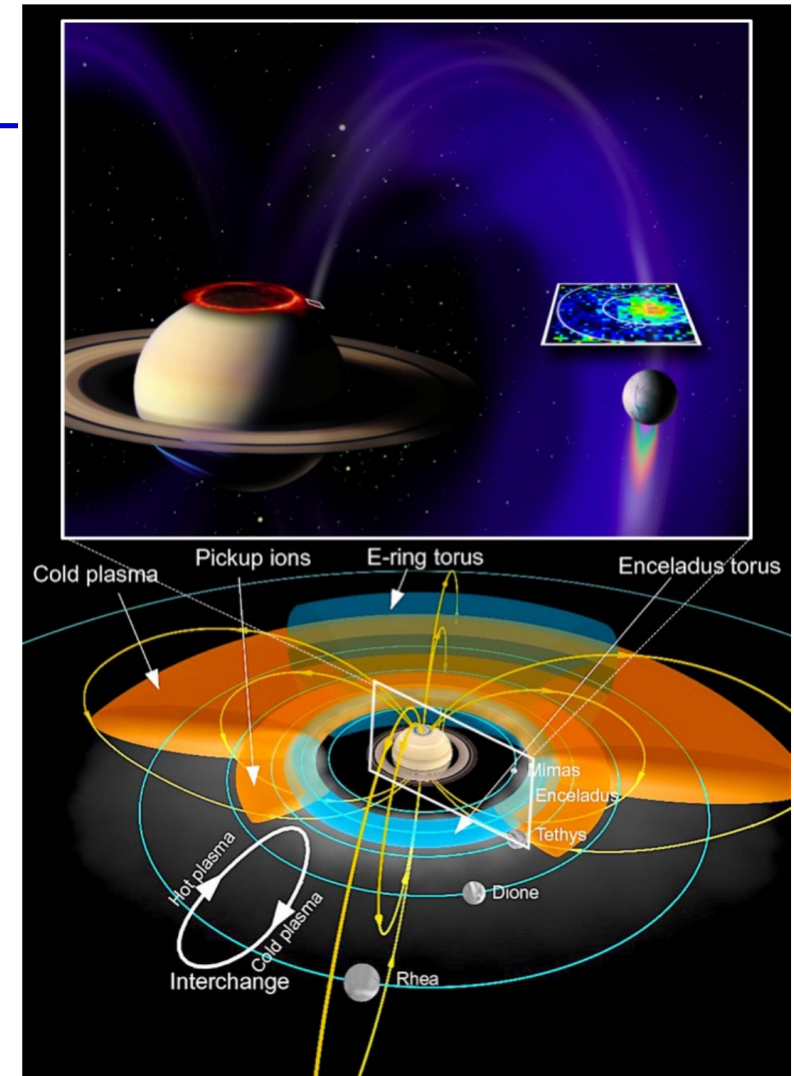


Icy moon plume (Active Cryovolcanism)

- Plume
 - Access to subsurface ocean
 - Satellite interior
 - Source of satellite atmosphere
 - Source of dust & ring
 - Source and sink of magnetospheric plasma

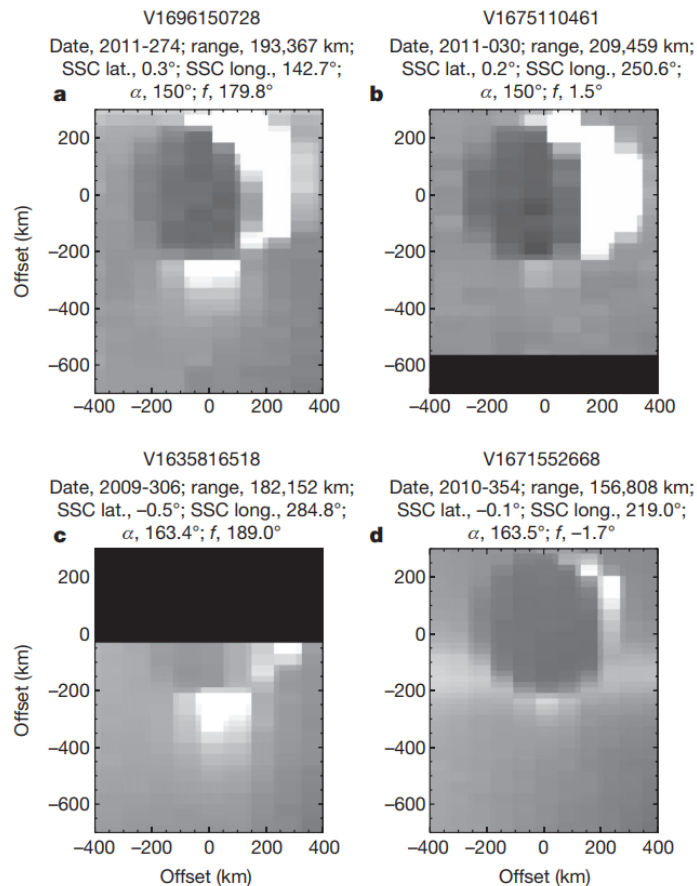


An ISS NAC clear-filter image of Enceladus' near-surface plumes taken on 27 November 2005 at a phase angle of 161.4.

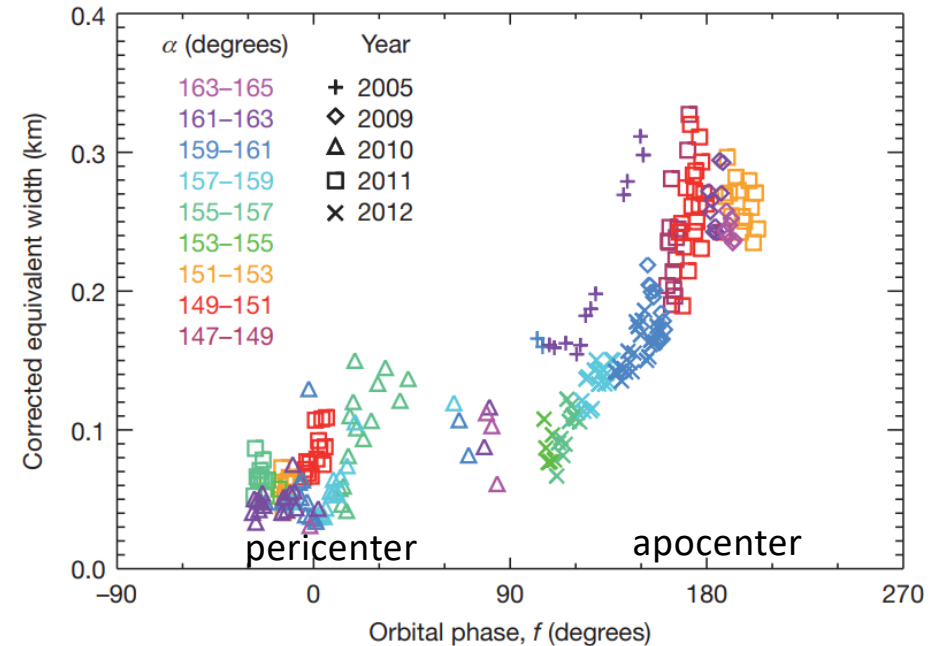


Schematic illustration of Enceladus' interactions with Saturn's complex magnetosphere (Pryor et al. 2011)

Enceladus plume activity vs. Orbital phase (Hedman et al. 2013)



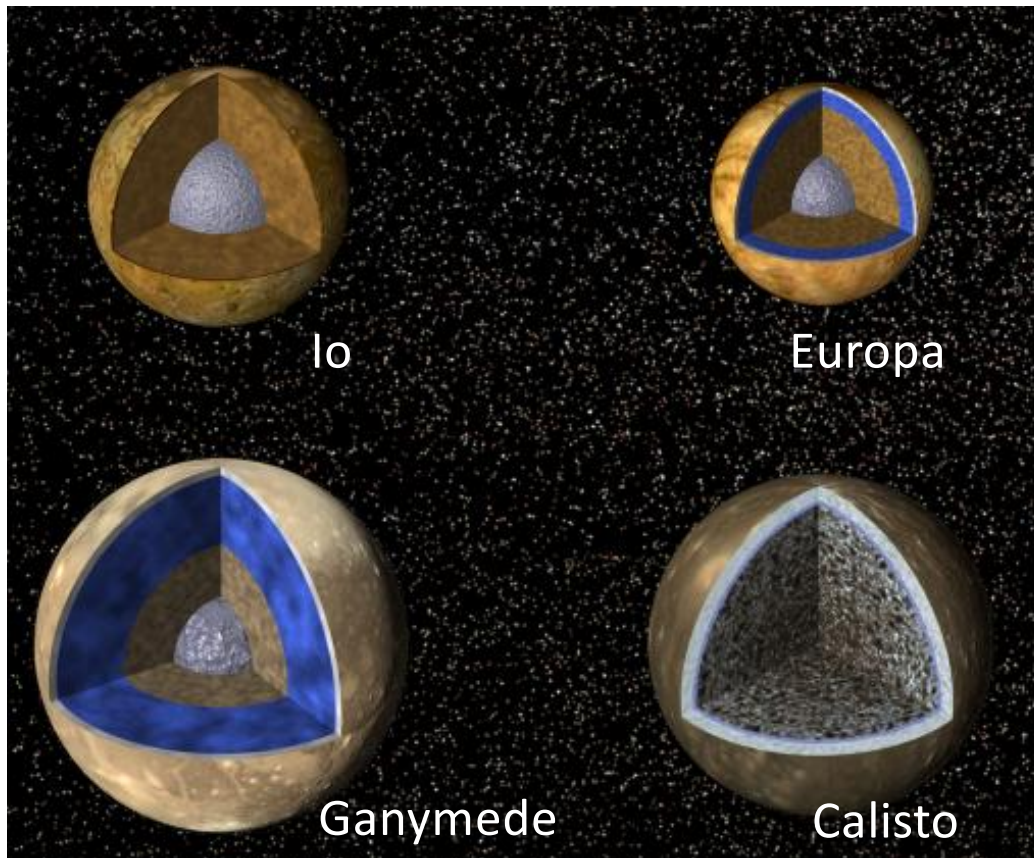
Sample VIMS observations of Enceladus and its plume (wavelengths of 0.88–1.56 μm)



Variations in the plume's corrected brightness with Enceladus' orbital position. The position of Enceladus is given by the 'orbital phase', f : that is, the difference between the moon's orbital longitude and the longitude of its pericentre.

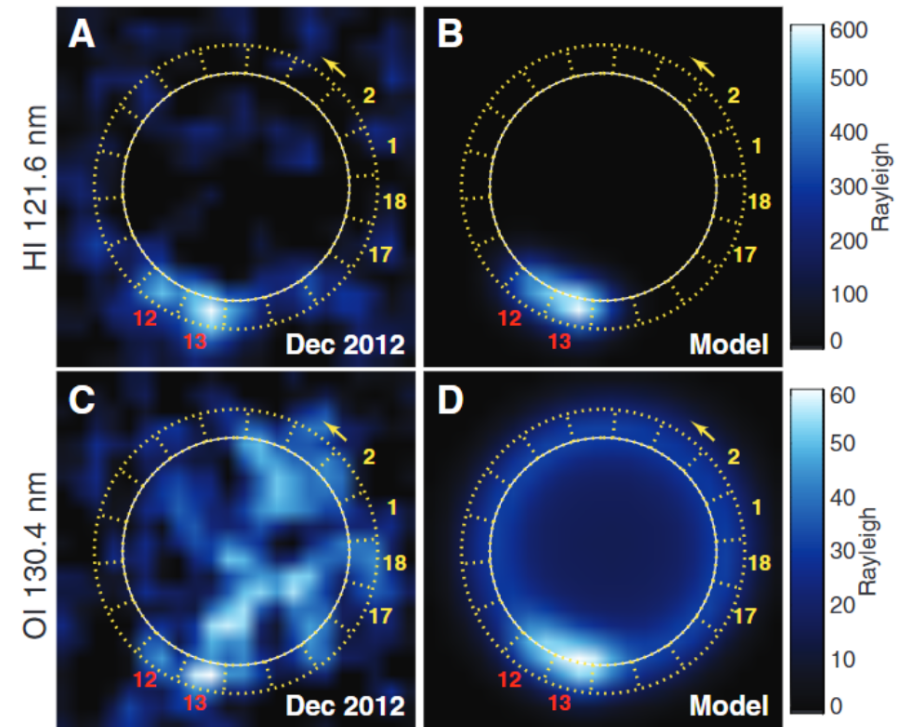
Polar surface fractures are principally expected to experience tension during the apocenter phase (Hurford et al. 2007).

First (presumed) detection of Europa H₂O plume



Europa H₂O plume (HST)

- Emissions from H and O atoms (Roth et al. 2014ab)
- H₂O Absorption features (Sparks et al. 2016, 2017)

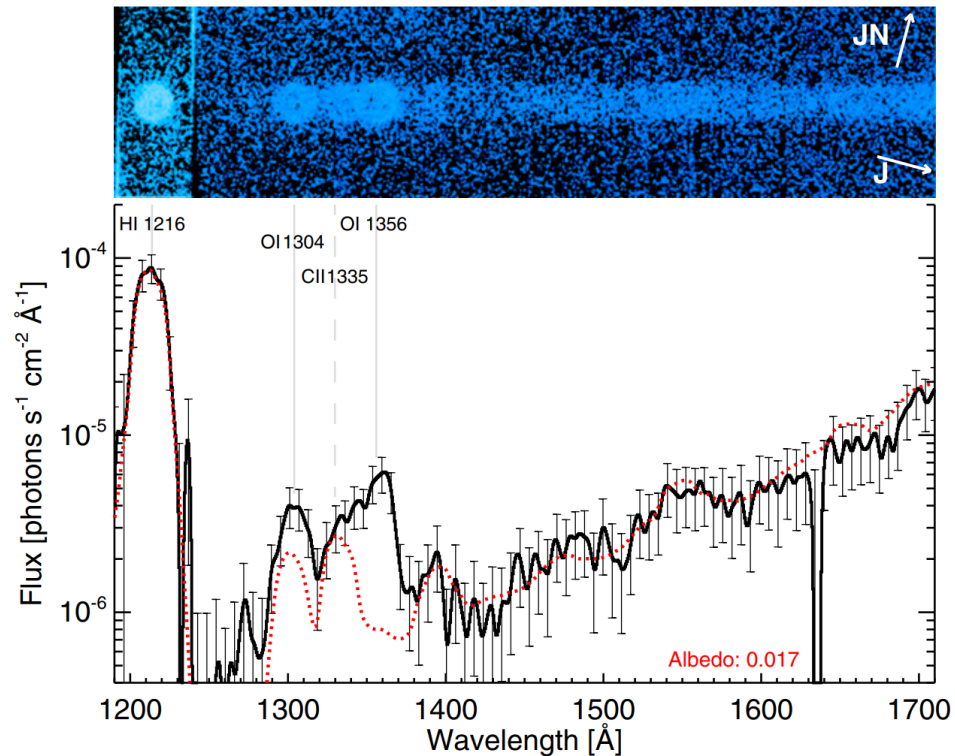


Lyman-a and OI 130.4-nm STIS images from a global atmosphere with two H₂O plumes. (Roth et al. 2014b)

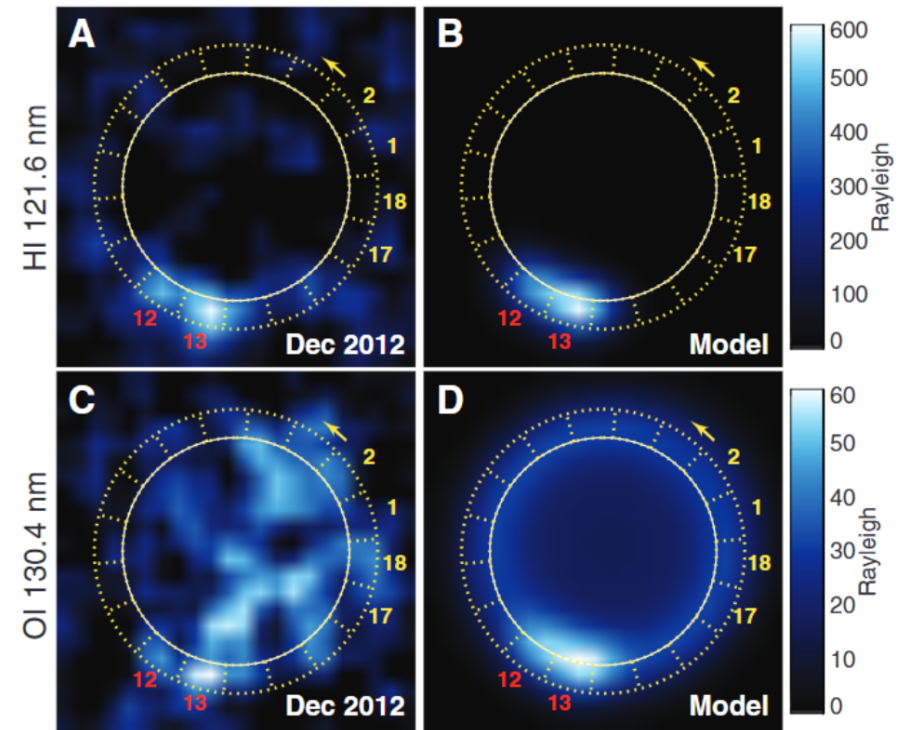
OI 130.4nm, 135.6nm

- Electron impact excitation
- Solar resonant scattering
- Electron impact dissociation of H₂O or O₂

First (presumed) detection of Europa H₂O plume (Roth et al. 2014ab)



(Top) Spatial STIS image of the combined exposures from January 22, 2014 after background correction.
(Bottom) Corresponding integrated spectrum (black) and modeled spectrum of surface-reflected sunlight (red). (Roth et al. 2014a)

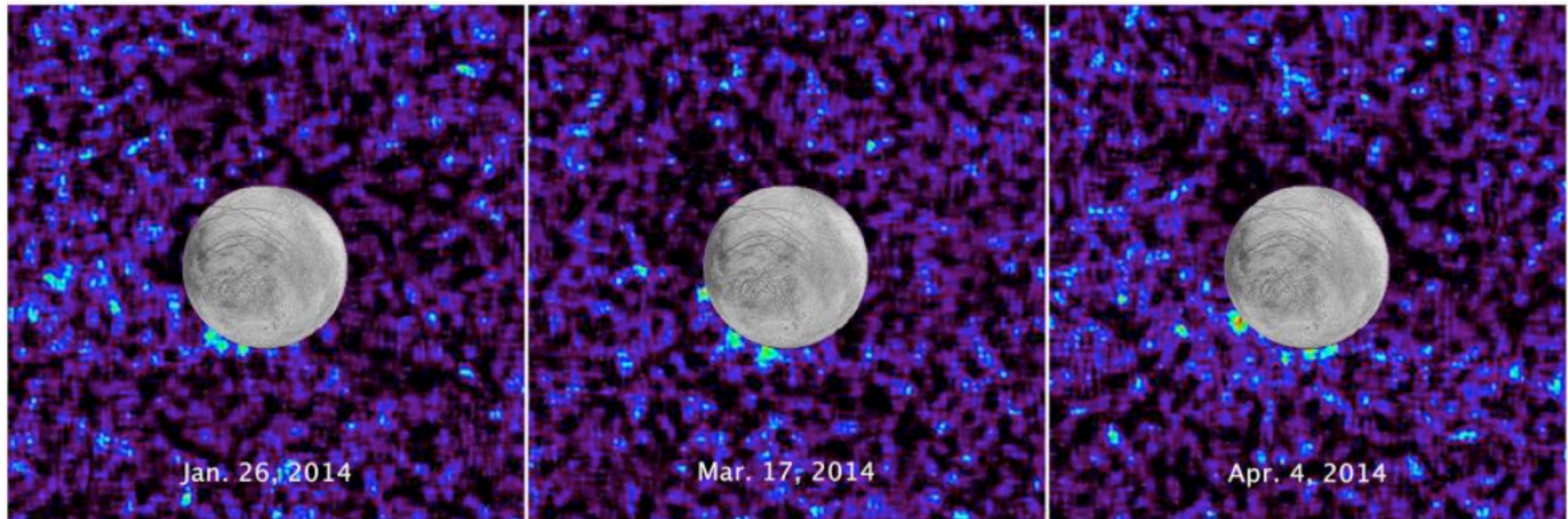


Comparison of December 2012 observations and atmosphere plume model results. Lyman- α and OI 130.4-nm STIS images and model aurora images from a global atmosphere with two H₂O plumes. (Roth et al. 2014b)

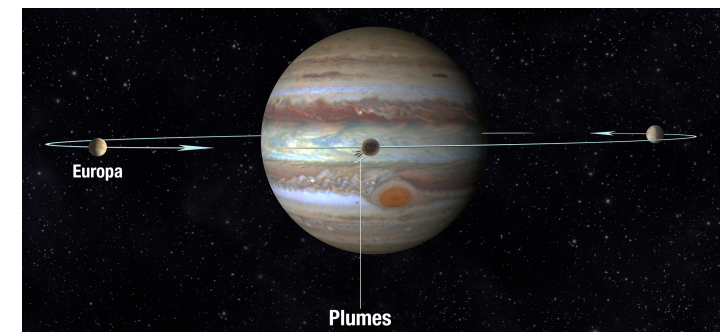
Detection of Europa plume (absorption in 125 to 185nm) (Sparks et al. 2016)

Probability images for Europa transits

Credit: NASA, ESA, W. Sparks (STScI)

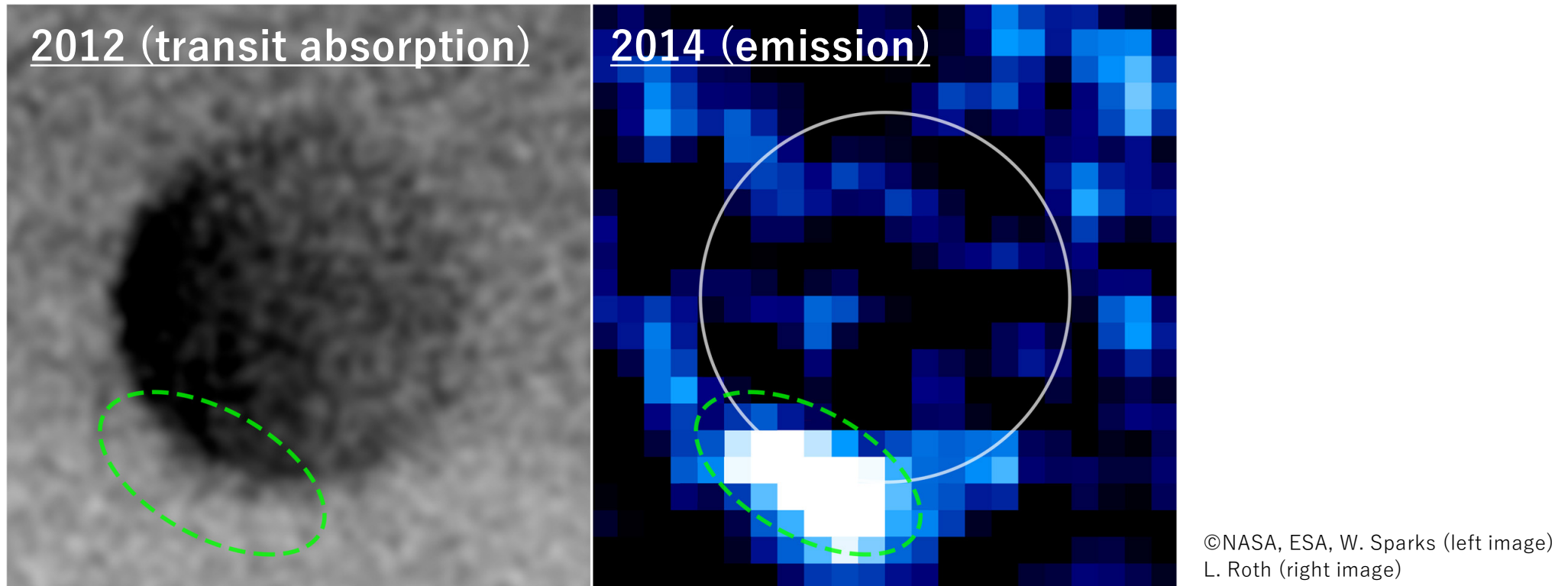


- 10観測中3観測でプルームを検出 [Sparks et al., 2016]
- 2回はRoth et al. [2014]と同じような緯度領域、残る1回は赤道付近で検出
- すべてH₂Oによる吸収だと仮定すると、円柱密度： $\approx 1.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-2}$ 、質量： $\approx 5.4 \times 10^6 \text{ kg}$ に相当



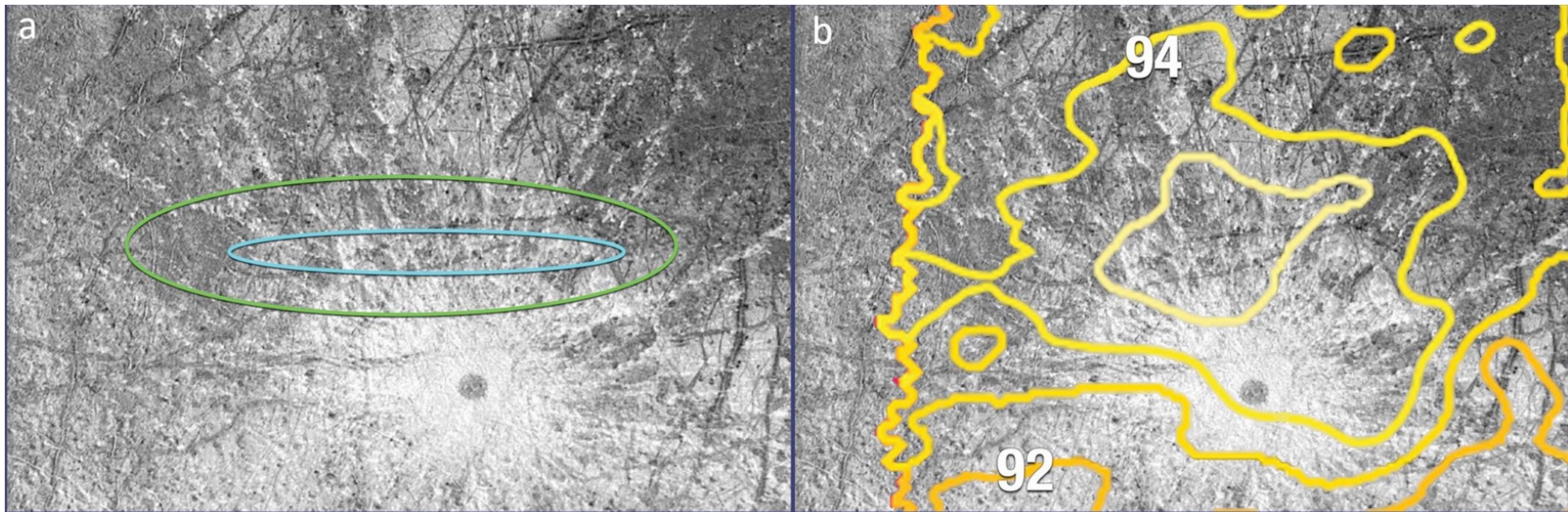
©A. Field (STScI)

Roth et al. [2014] と Sparks et al. [2016]の比較



異なる時期、異なる観測手法で同じ領域からプリューム検出

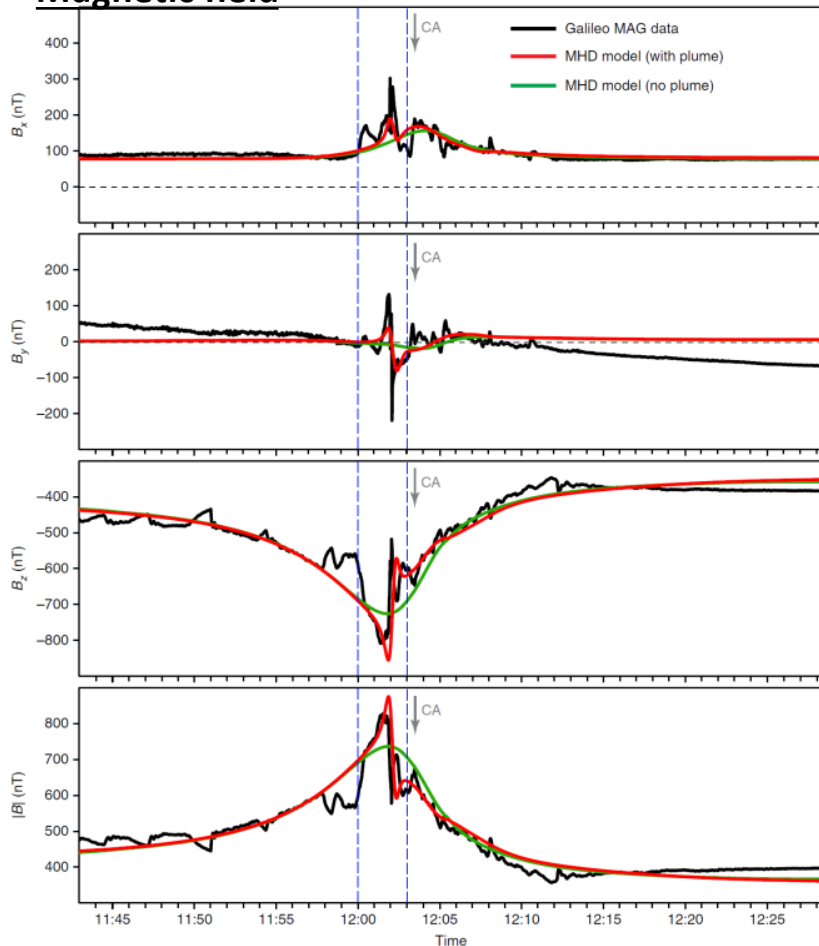
Thermal anomaly



(a) The region near Pwyll, with the green (cyan) ellipse outlining the position of the candidate plumes of 2014 March 17 (2016 February 22). (b) Nighttime brightness temperature contours, in kelvins, from the Galileo PPR, from Spencer et al. (1999) showing a thermal anomaly with peak temperature at the same location as the plume candidates. (Sparks et al. 2017)

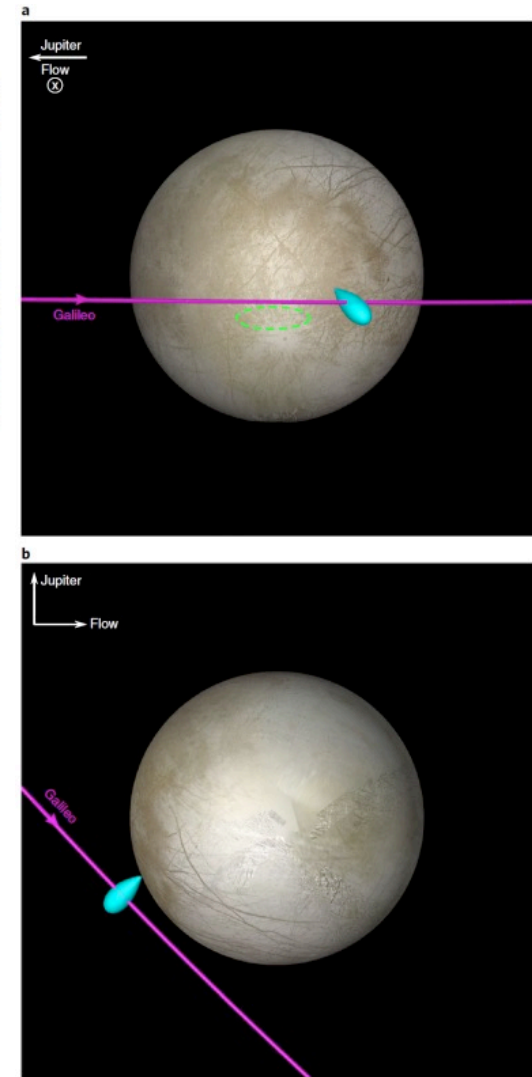
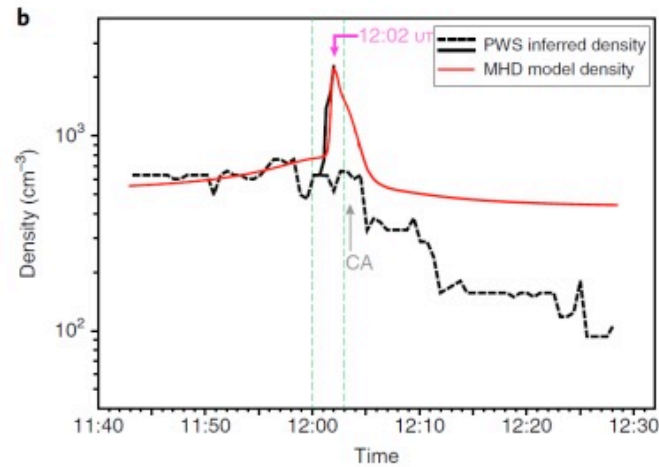
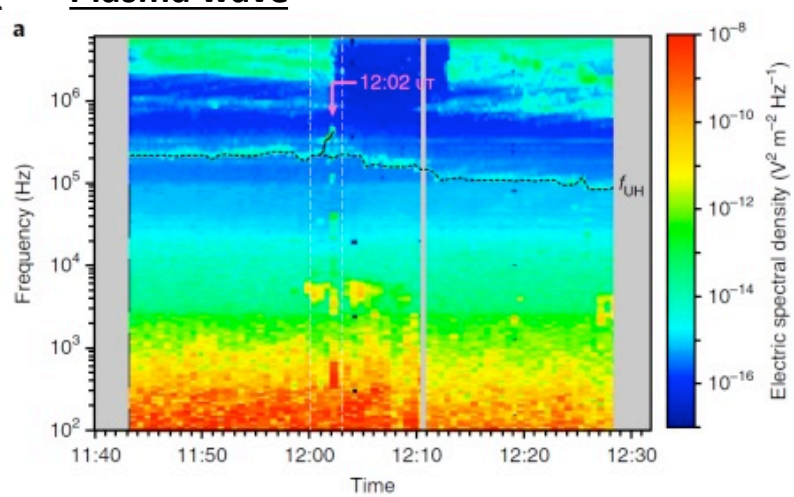
Detection of Europa plume by Galileo Magnetometer and Plasma Wave Spectrometer [Jia et al., 2018]

Magnetic field



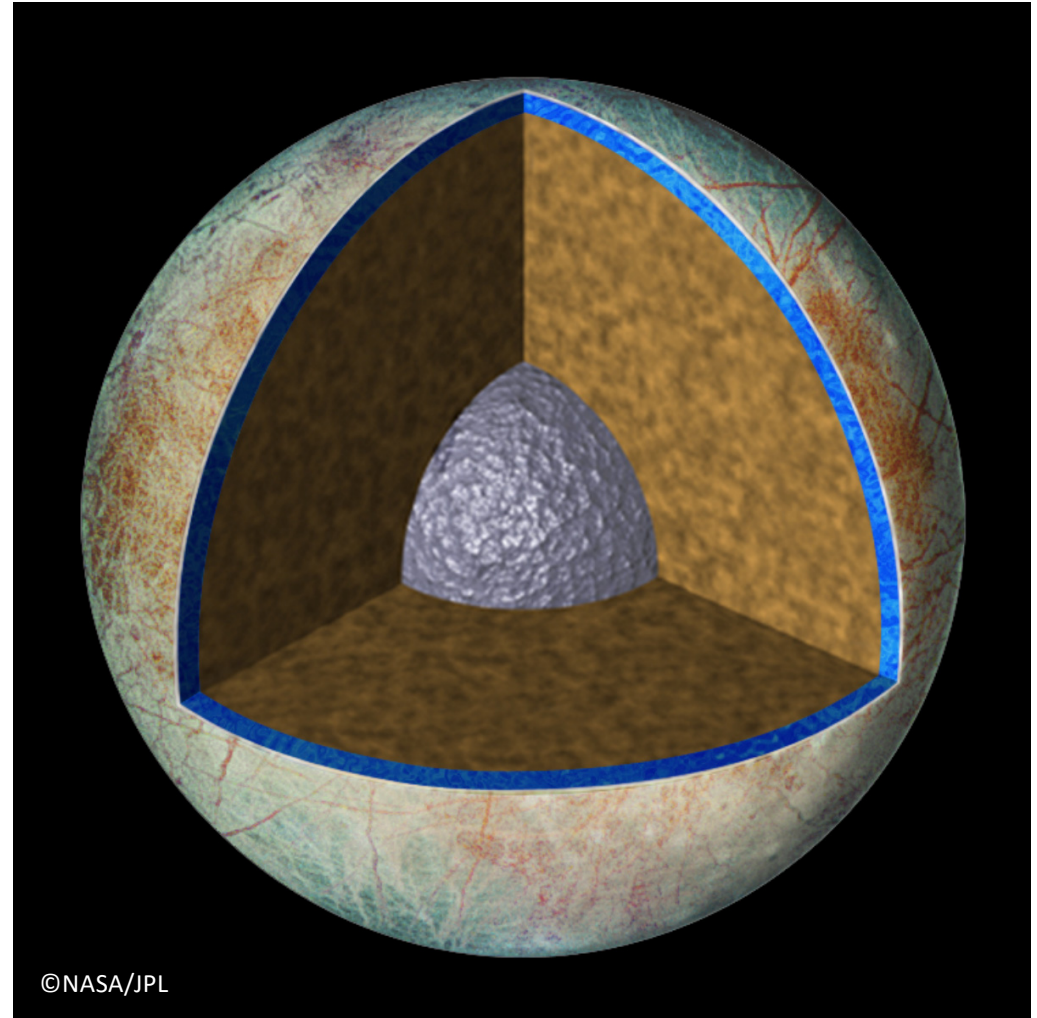
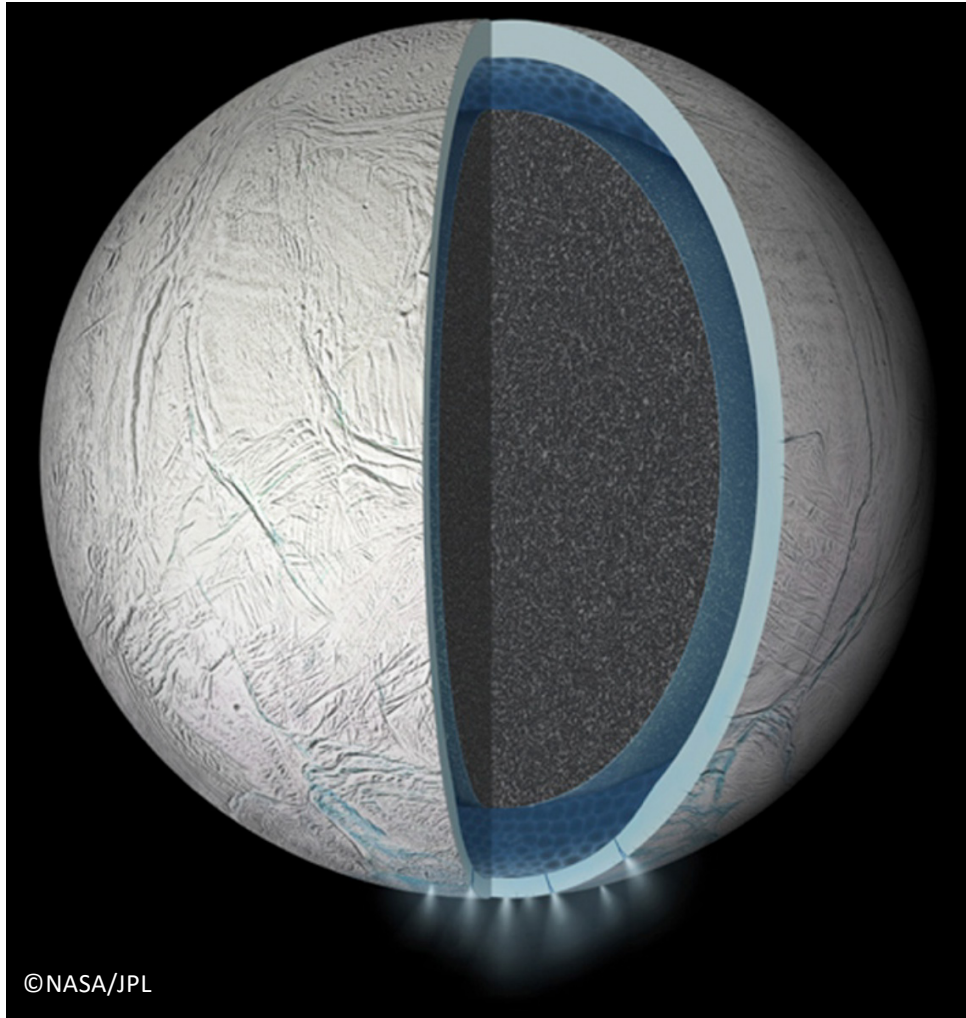
$X (R_E)$	-3.7	-3.0	-2.2	-1.4	-0.5	0.4	1.2	2.1	3.0
$Y (R_E)$	2.4	1.5	0.7	-0.2	-1.1	-1.9	-2.7	-3.5	-4.3
$Z (R_E)$	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
$R (R_E)$	4.5	3.3	2.3	1.4	1.2	1.9	3.0	4.1	5.2

Plasma wave



[Jia et al., 2018]

エウロパはエンセラダスよりも複雑な内部構造



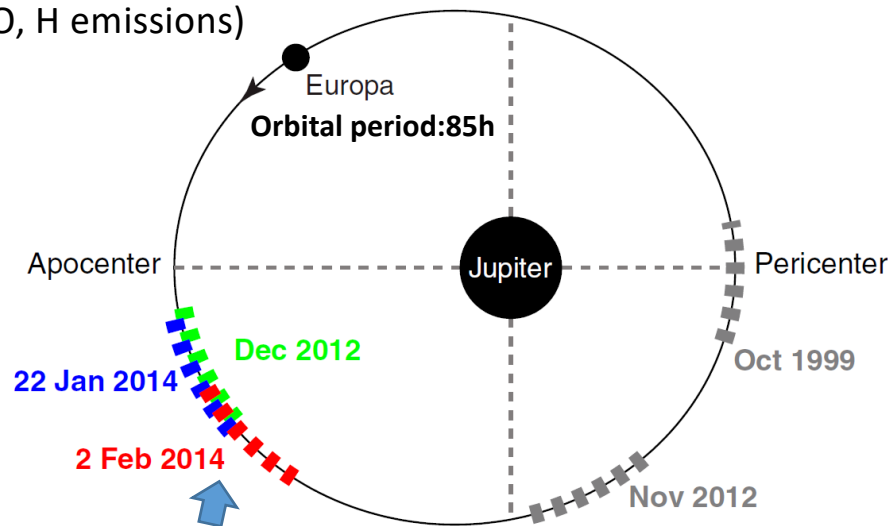
Plumes of Icy moons: Europa & Enceradus (Hansen et al., 2019)

	Europa	Enceradus
Location of Plume	Southern polar region & Equator	Southern polar region
Duty cycle	<u>17% ? or sporadic</u>	Persistent
Orbital phase dependence	<u>Unknown</u>	known
Column density	$0.7-3.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
Vertical scale (gas)	>200km 20 μm particles to be lofted to 200km 2mm particles to be lofted to 2km (Lorenz et al 2016)	~80km
Total eruption mass (assume pure H ₂ O)	$1.4-6.6 \times 10^6 \text{ kg}$ Eruption rate~$1 \times 10^3 \text{ kg/s}$(flight time:$10^3 \text{ s}$)	$3 \times 10^4 \text{ kg}$

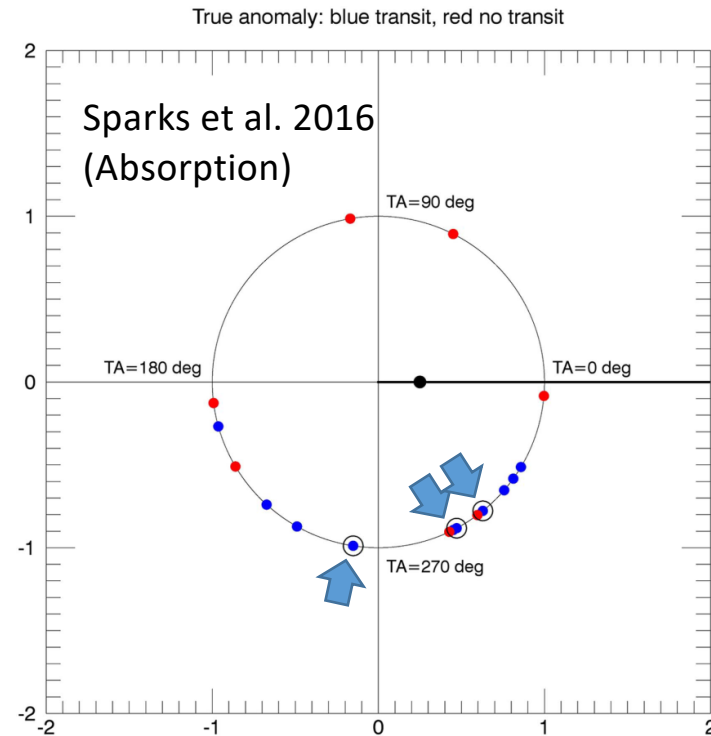
Europa plume activity vs. Orbital phase

Polar surface fractures are principally expected to experience tension during the apocenter phase (Hurford et al. 2007). Appearance of plumes at Europa does not follow the orbital apocenter.

Roth et al. 2014a
(O, H emissions)



Sketch of Europa's positions in its elliptical orbit during the five observation visits of ~7-h duration. The new observations cover almost the identical true anomaly range of the initial detection HST visit from December 2012.



The true anomaly distribution for HST STIS observations. Transits are in blue and out of transits are in red. The transits with evidence of plume activity are circled.

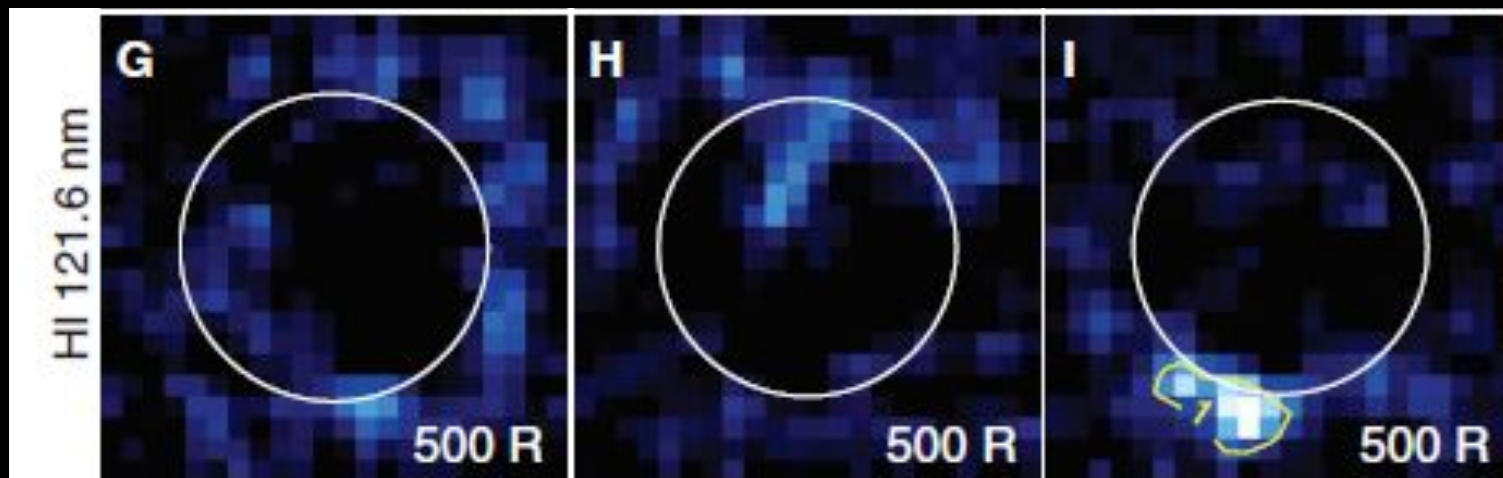


Europa plume: When? How often?

Oct 1999

Nov 2012

Dec 2012

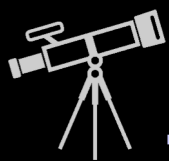


Observed in UV by
Hubble Space Telescope

[Roth et al., 2014]

Still missing about plumes due to small number of observations

→ Key: Japan's powerful technique, UV long-term monitoring

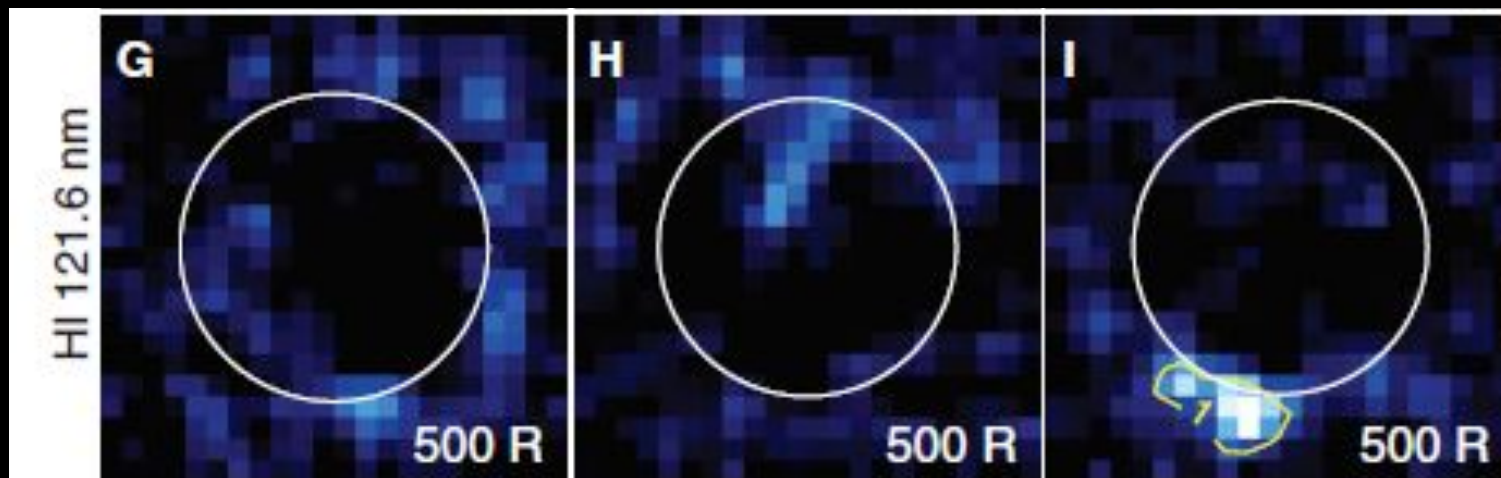


エウロパプルーム観測から理解したいこと

Oct 1999

Nov 2012

Dec 2012



Observed in UV by
Hubble Space Telescope

観測するもの：水素・酸素の密度、その時間変化＝噴出タイミング、周期性

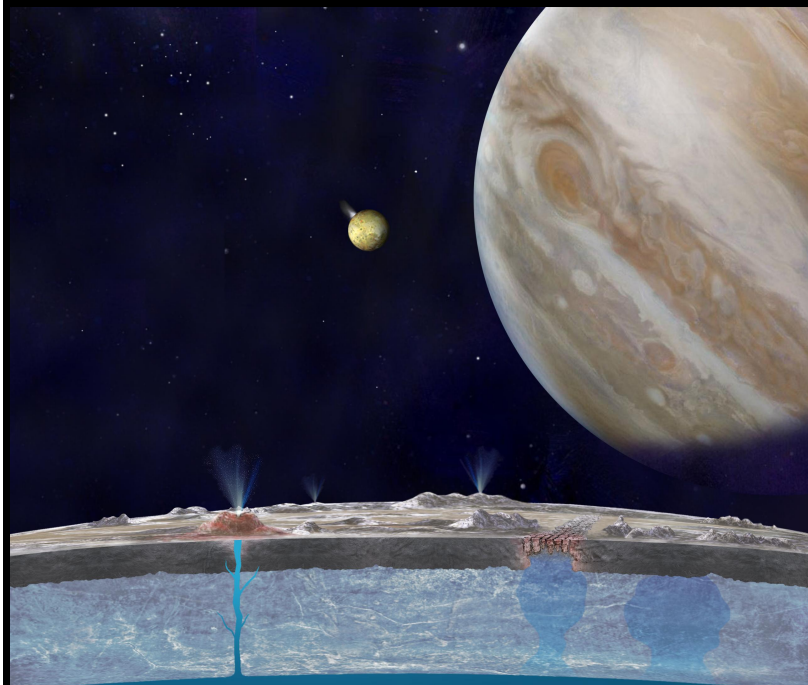


- ・プルーム駆動メカニズム、エネルギー源
- ・(間接的に)氷の厚さ、地下海の量など？
- ・ほかに...？【主にジュンキムさんへの質問】

噴出物を観測することで天
体内部を探る

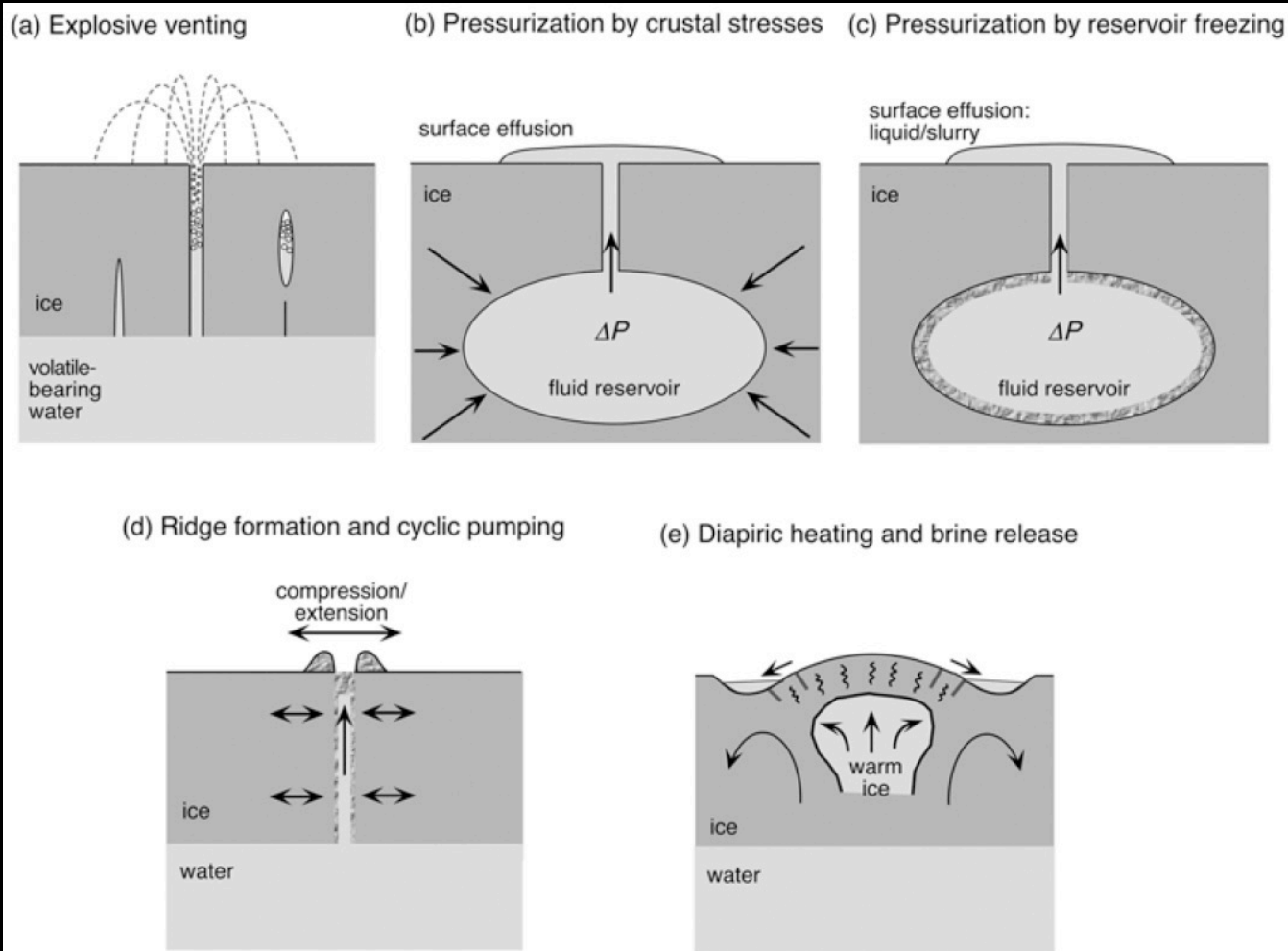


エウロパリユーム観測から理解したいこと

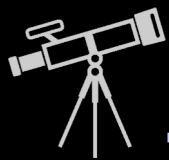


どうやって地下海の水がエウロパ表面に到達するのか？

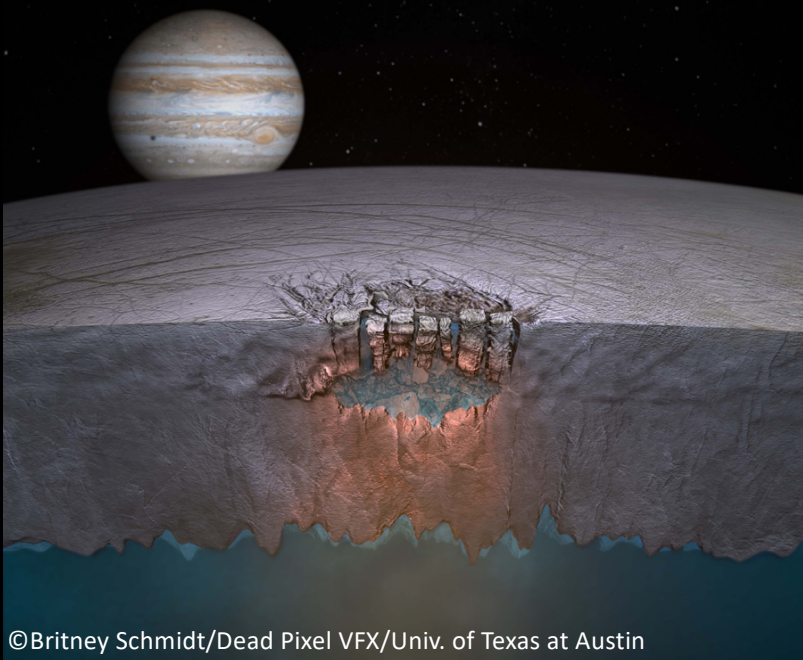
©NASA/JPL-Caltech



[Fagents, 2003]



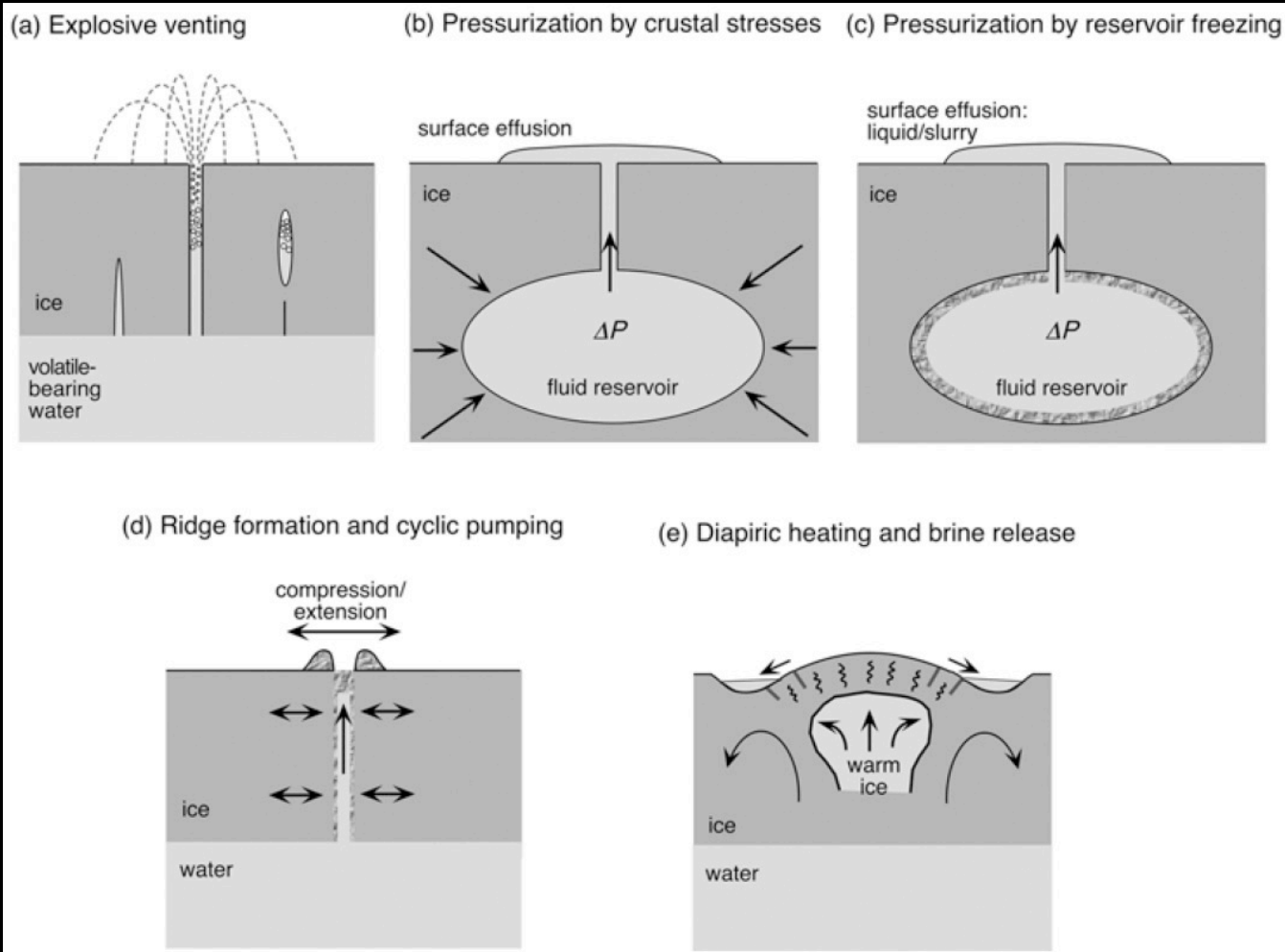
エウロパリューム観測から理解したいこと



©Britney Schmidt/Dead Pixel VFX/Univ. of Texas at Austin

どうやって地下海の水がエウロパ表面に到達するのか？

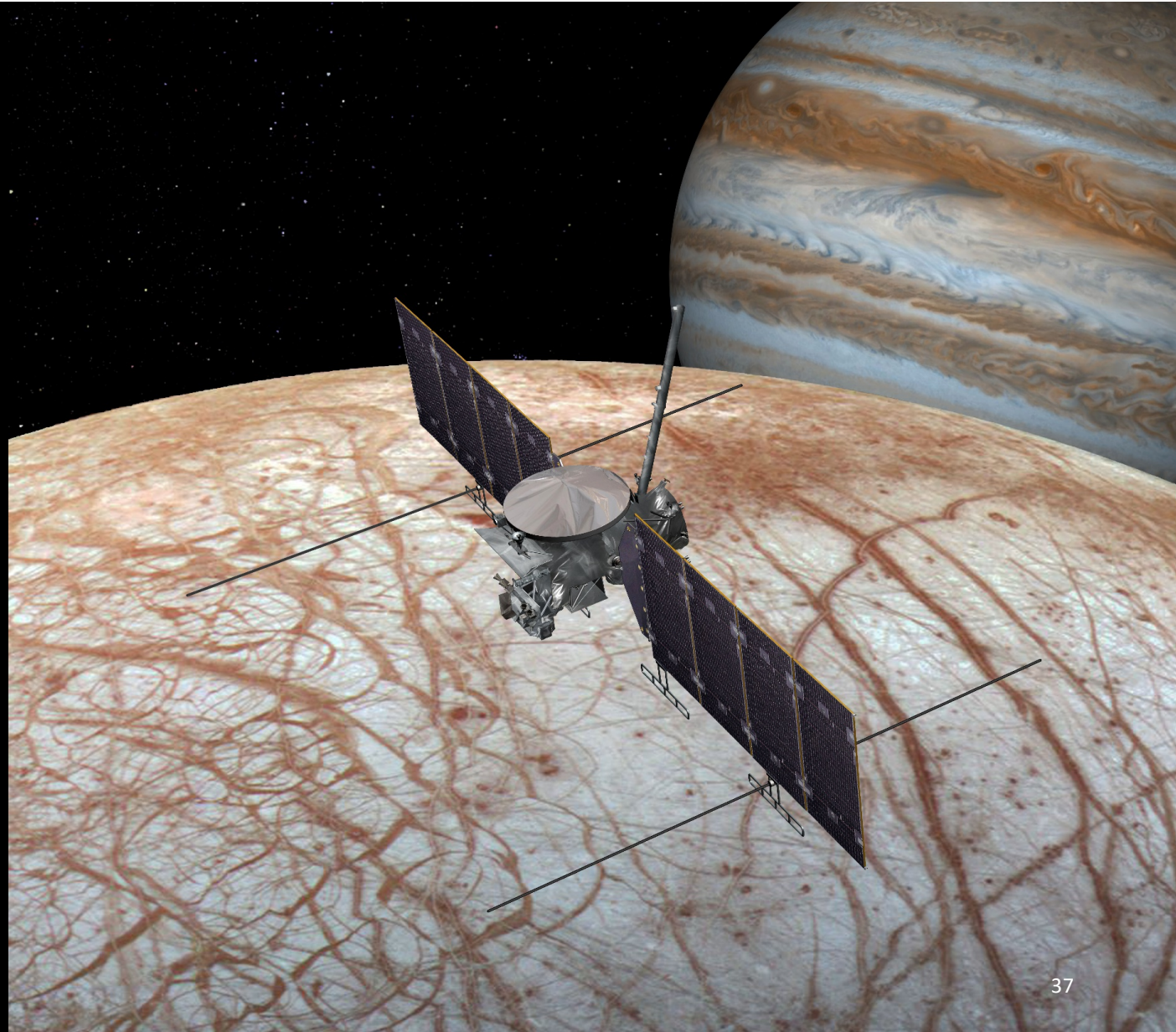
©NASA/JPL-Caltech



[Fagents, 2003]

Europa Clipper

- ・NASAによるエウロパ探査計画
- ・2020年代の打ち上げを目指す
- ・木星を周回しつつ、エウロパフライバイを45回程度実施
- ・運がよければプリューム中に突入して分析



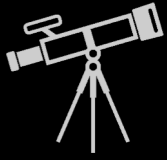
木星氷衛星探査計画 JUICE



欧州主導による国際協力探査計画
木星系の氷衛星における生命存在可能性に迫る

2022年6月 打ち上げ予定
2029年1月 木星周回軌道投入
 カリスト、エウロパフライバイ
2032年9月 ガニメデ周回軌道投入
2033年6月 ミッション終了予定





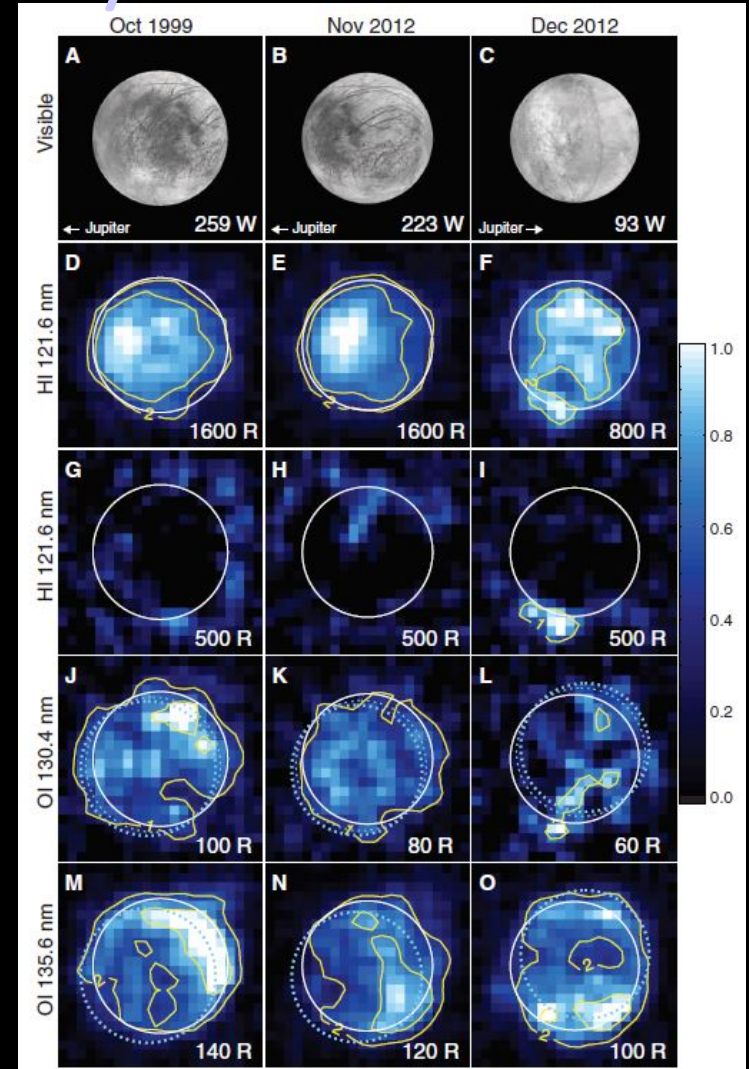
Europa plume detection feasibility

Feasibility analysis

古賀さん発表を参照

- Brightness of plume [Roth+14]
OI 130.4nm: **34 R**, HI 121.6 nm: **506 R**
- Brightness of backgrounds (Ly- α 121.6 nm)
 1. IPM: Average \sim 300 R [Roth+14]
 2. Geocorona: 700 R
 3. Solar reflectance of Europa disk: **1 kR** [Roth+14]
- Brightness of backgrounds (OI 130.4 nm)
 1. Solar reflectance: Average **26 R** [Hall et al., 1995]
 2. Atmospheric emissions (O, O₂): **70 R**

[Roth+14]



Post HISAKIによる可能となる科学観測

UV: 天体近傍の希薄ガス (分子・原子・イオン)

- ・ 外圏大気・電離圏・磁気圏
- ・ 天体の内部構造・表層環境
- ・ 表層-プラズマ相互作用

Europa plume : Enceradus plume x 2桁の規模
出現条件・発生頻度は不明

地球周回軌道からのEuropa plumeの検出可能性:

- ・ 高度30,000km, 60cm鏡, 0.1"分解能, 積分時間10時間
- ・ 高度1,000km, 60cm鏡, 0.1"分解能, 積分時間50時間

空間分解能0.1"のUV望遠鏡

- ・ 太陽系惑星の大気・オーロラの動態
- ・ 小天体: 衛星・彗星・小惑星
- ・ 天文学的対象
系外惑星・銀河大規模構造・突発天体
(光学赤外線天文連絡会White paper)
- ・ 将来直接探査ミッションとの協調観測

サイエンス検討への参加をお願いします

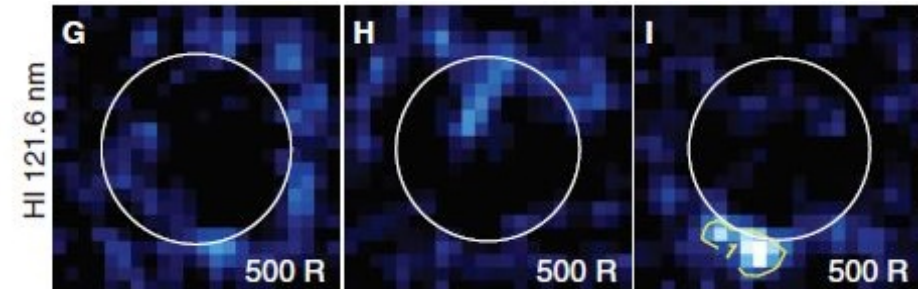
Europa

Water plumes: When? How often?

Oct 1999

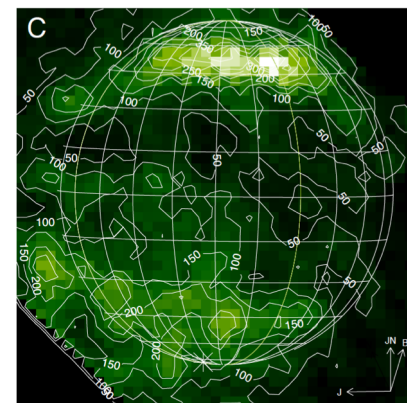
Nov 2012

Dec 2012



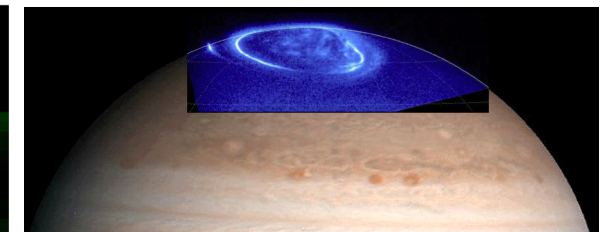
[Roth et al., 2014]

Ganymede



[Feldman et al., 2002]

Jupiter



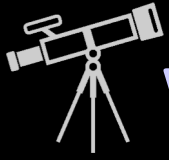
Auroral morphology reflects magnetospheric dynamics
-> Energy flows to icy moons

-Spectral range: 110-220 nm with <1nm resolution

-Spatial resolution: 0.1 arc-sec

-Effective area: >200cm² Field of view: >320 arc-sec(TBD)

-オプション: UVイメージャ, 吸収セル、偏光、可視カメラ



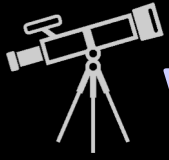
World Space Observatory – Ultraviolet (WSO-UV)

Russian UV space telescope

- Launch: 2023 (-2024)
- Mirror diameter: 1.7m
- Spectral range: 110-320 nm
- Orbit: GSO (6.6 Re, 51.8 deg)
 - > **Much less geocoronal flux than HST**
 - Longer continuous target visibility**
- Pointing accuracy: 0.1 arc-sec
- Two major instruments:
 - WUVS** (High dispersion spectrometer:
R>50,000)
 - FCU** (Field Camera Unit)

Japanese team is proposing to participate:
UV Spectrograph for Exoplanet (UVSPEX)

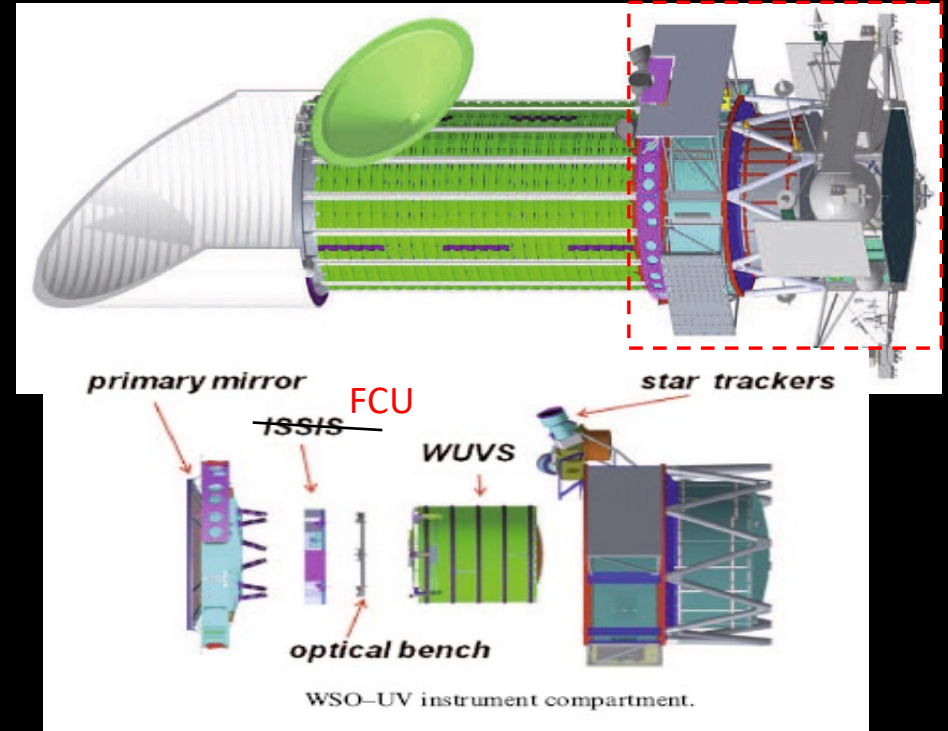




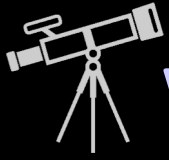
World Space Observatory – Ultraviolet (WSO-UV)

Russian UV space telescope

- Launch: 2023 (-2024)
- Mirror diameter: 1.7m
- Spectral range: 110-320 nm
- Orbit: GSO (6.6 Re, 51.8 deg)
 - > **Much less geocoronal flux than HST**
 - Longer continuous target visibility**
- Pointing accuracy: 0.1 arc-sec
- Two major instruments:
 - WUVS** (High dispersion spectrometer: $R > 50,000$)
 - FCU** (Field Camera Unit)



Japanese team is proposing to participate:
UV Spectrograph for Exoplanet (UVSPEX)

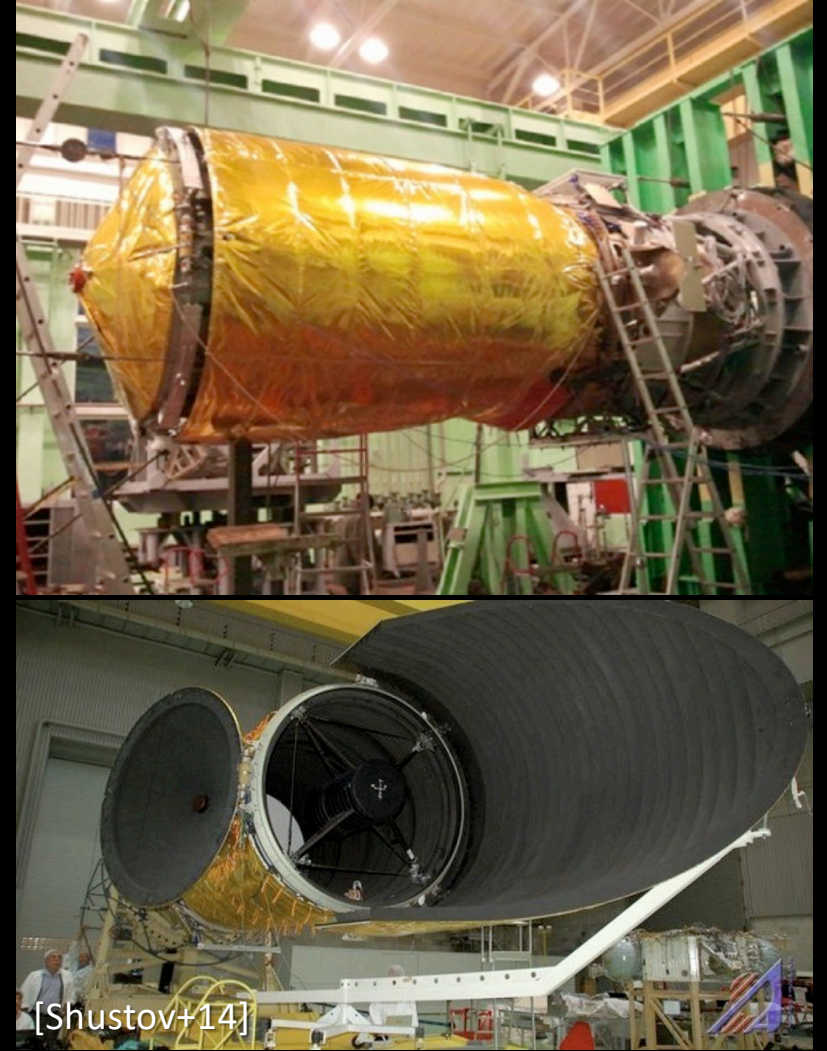


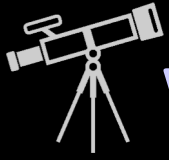
World Space Observatory – Ultraviolet (WSO-UV)

Russian UV space telescope

- Launch: 2023 (-2024)
- Mirror diameter: 1.7m
- Spectral range: 110-320 nm
- Orbit: **GSO** (6.6 Re, 51.8 deg)
 - > **Much less geocoronal flux than HST**
 - Longer continuous target visibility**
- Pointing accuracy: 0.1 arc-sec
- Two major instruments:
 - WUVS** (High dispersion spectrometer: $R > 50,000$)
 - FCU** (Field Camera Unit)

Japanese team is proposing to participate:
UV Spectrograph for Exoplanet (UVSPEX)





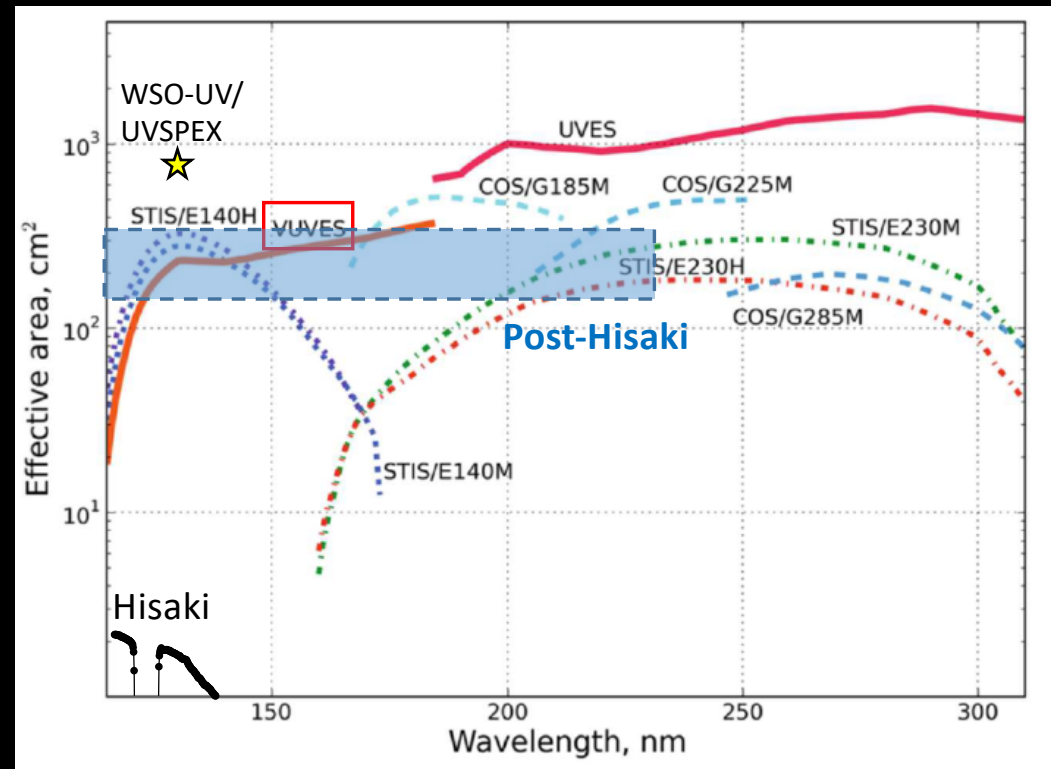
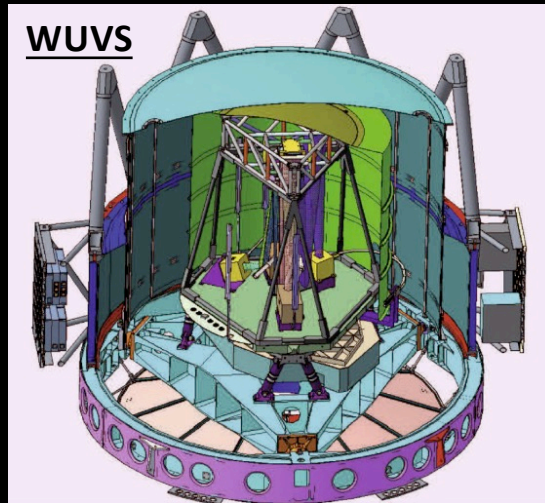
World Space Observatory – Ultraviolet (WSO-UV)

WUVS

- Vacuum Ultraviolet Echelle Spectrograph (VUVES)
R ~ 50000, 115-170 nm
- Ultraviolet Echelle Spectrograph (UVES)
R ~ 50000, 174-310 nm
- Long-slit Spectrograph (LSS)
R ~ 1000, 115-310 nm, 0.1-0.5 arc-sec resolution

UVSPEX

- High sensitivity in 120-140 nm
- Low spectral resolution (R ~ 300)
- Low spatial resolution (~2 arc-sec)



[From Shustov+18]