

Exoplanet observation by ultraviolet telescope for the DESTINY mission

(紫外望遠鏡による太陽系外惑星観測ミッション)

Go Murakami¹, Shingo Kameda², Norio Narita³, Masahiro Ikoma⁴,
Yasuto Sekine⁵, and Seiji Sugita⁴

¹ Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

² Department of Physics, Rikkyo University

3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo, 171-8501 Japan

³ National Astronomical Observatory of Japan

2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, JAPAN

⁴ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The
University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-0033 Japan

⁵ Department of Complexity Science and Engineering, Graduate School of Frontier
Sciences, The University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8561 Japan

ABSTRACT

Terrestrial exoplanets are likely to be discovered in the habitable zone around nearby stars in the next ten years. Hydrogen Lyman-alpha line emission from the host stars would be the dominant UV irradiation source for the atmospheres of such planets. One new mission concept is to observe Lyman-alpha emission from stars that may host exoplanets and its temporal variability from outside the geocorona. This paper discusses a new mission science instrument to observe UV emission from exoplanetary systems for DESTINY and its successor.

(DESTINY/DESTINY応用ミッション
に向けた)
紫外望遠鏡による太陽系外惑星
観測ミッション

○村上豪(宇宙研)、亀田真吾(立教大)、成田憲保
(天文台)、生駒大洋、杉田精司、関根康人(東大)

系外惑星のトランジット測光観測

近年のトランジット観測により、系外惑星の発見数は飛躍的に増加

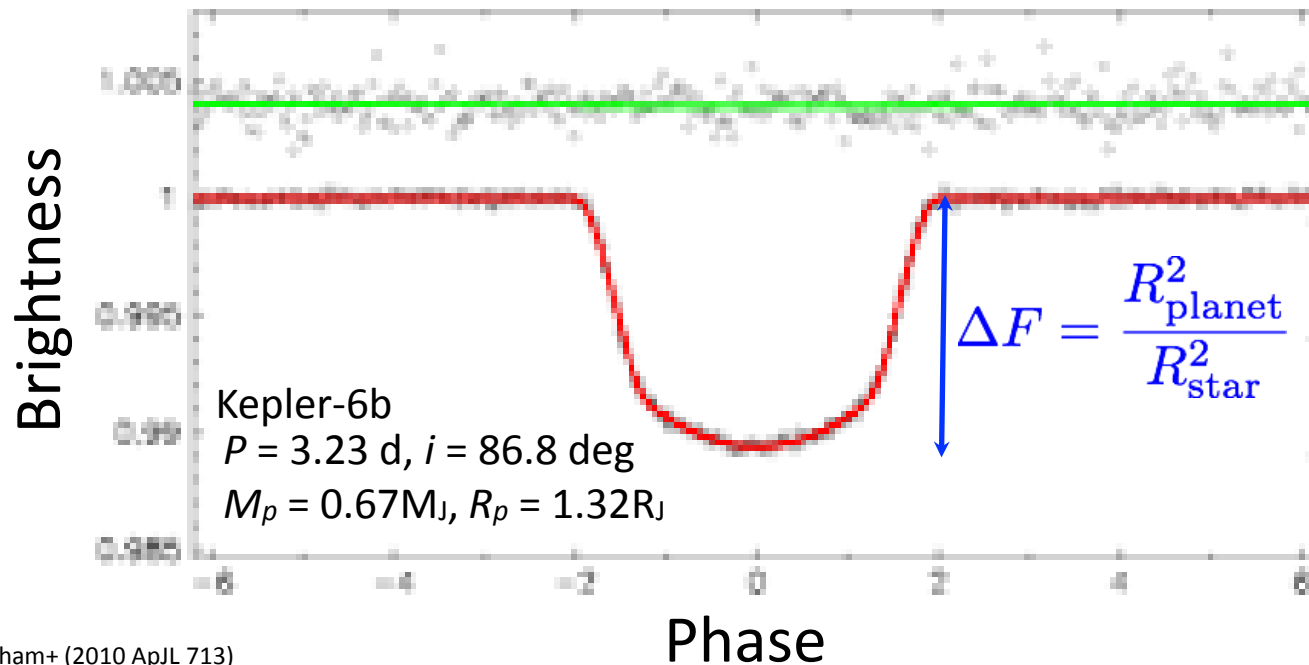
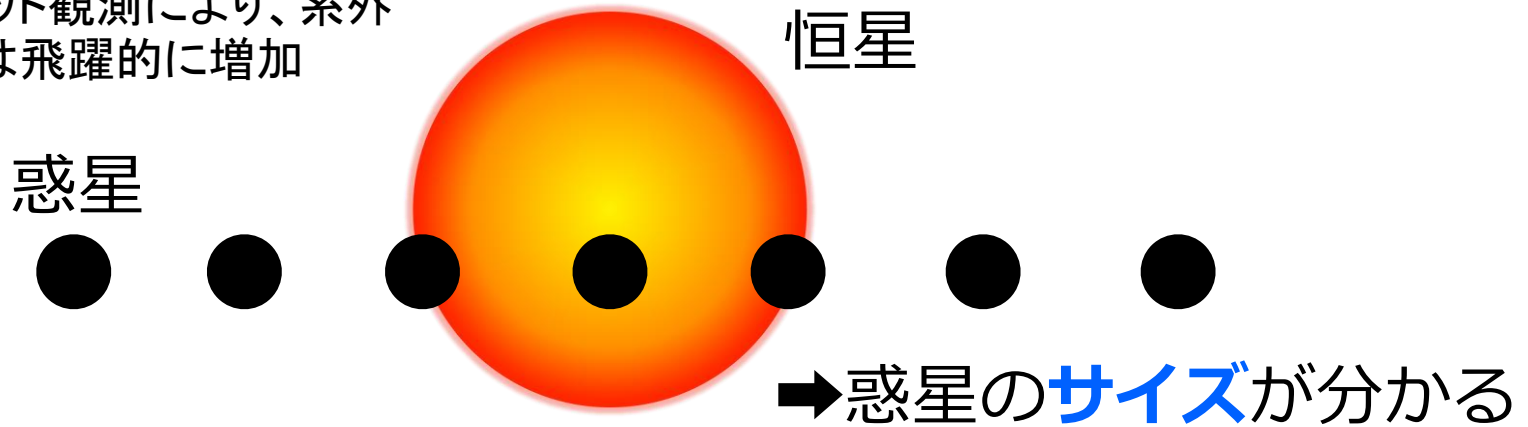
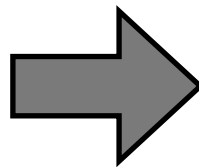


Fig. from Dunham+ (2010 ApJL 713)

系外惑星のトランジット観測の動向

発見

Detection



特徴付け

Characterization

第1世代サーベイ

第2世代サーベイ

2006.12.27–2013.6.24
CoRoT
COnvection ROtation et
Transits planétaires

2009.3.7–
Kepler

2014–
Kepler 2

2024
PLATO
PLAnetary Transits and
Oscillations of stars

2017
TESS
Transiting Exoplanet
Survey Satellite

2018.10–

JWST

James Webb Space Telescope

... 0.6–28 μ m

2017

CHEOPS

CHaracterising ExOPlanets
Satellite

... 0.4–1.1 μ m

2017

FINESSE

Fast INfrared Exoplanet
Spectroscopic Survey Explorer

... 0.7–5 μ m

SPICA

SPace Infrared telescope
for Cosmology & Astrophysics

... Near-to-mid IR

1990.4.24–

Hubble

2003.8.25–

Spitzer

近赤外～中赤外の計画多数

- ・ここ10年のうちに全天をサーベイ
- ・ハビタブルゾーンが恒星に近い(=公転周期が短い)低温星(M型)を重点的にサーベイ

系外惑星大気の観測 (HST)

質量・軌道情報だけでなく、大気観測が数多く行われるようになってきている。惑星遮蔽による減光率は1.5%程度に対し、水素による遮蔽は15%程度→惑星半径の3倍程度に広がっている。

【大気散逸する hot Jupiter の間接的証拠】

4例のみ (すべて **UV** 観測 by HST)

HD209458b

HI Ly α , OI, CII, Si III

(Vidal-Madjar+03;04;08;
Ballester+07;Linsky+10)

HD189733b

HI Ly α , Si III, N V

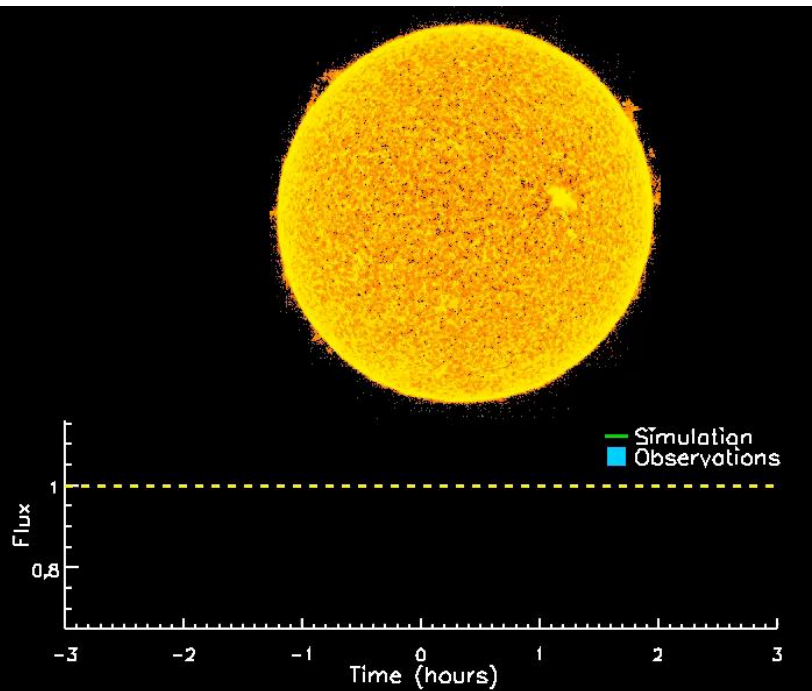
(Lecavelier des Estang+10;Bourrier+13)

55 Cnc.b

HI Ly α (Ehrenreich+12)

WASP-12b

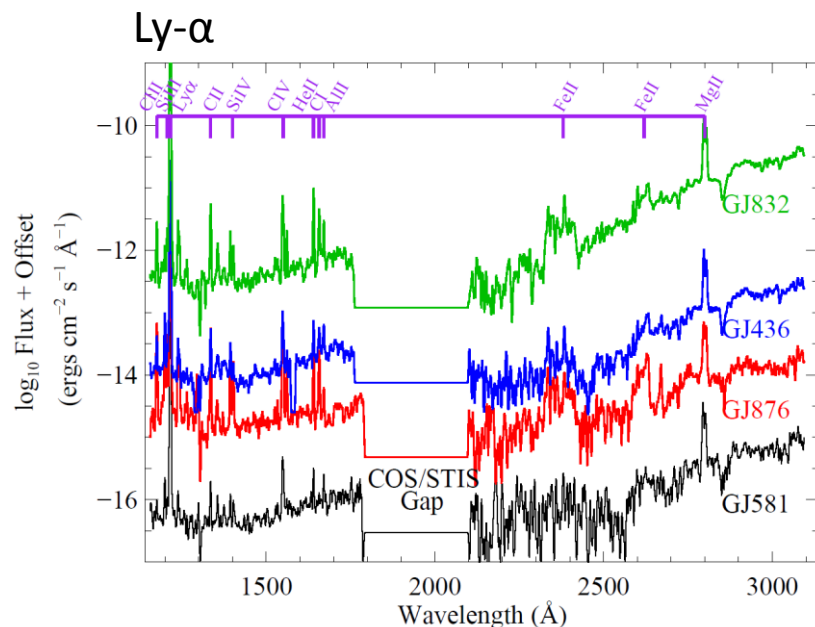
Mg II (NUVA,B,C~2500-2800 Å)
(Fossati+10)



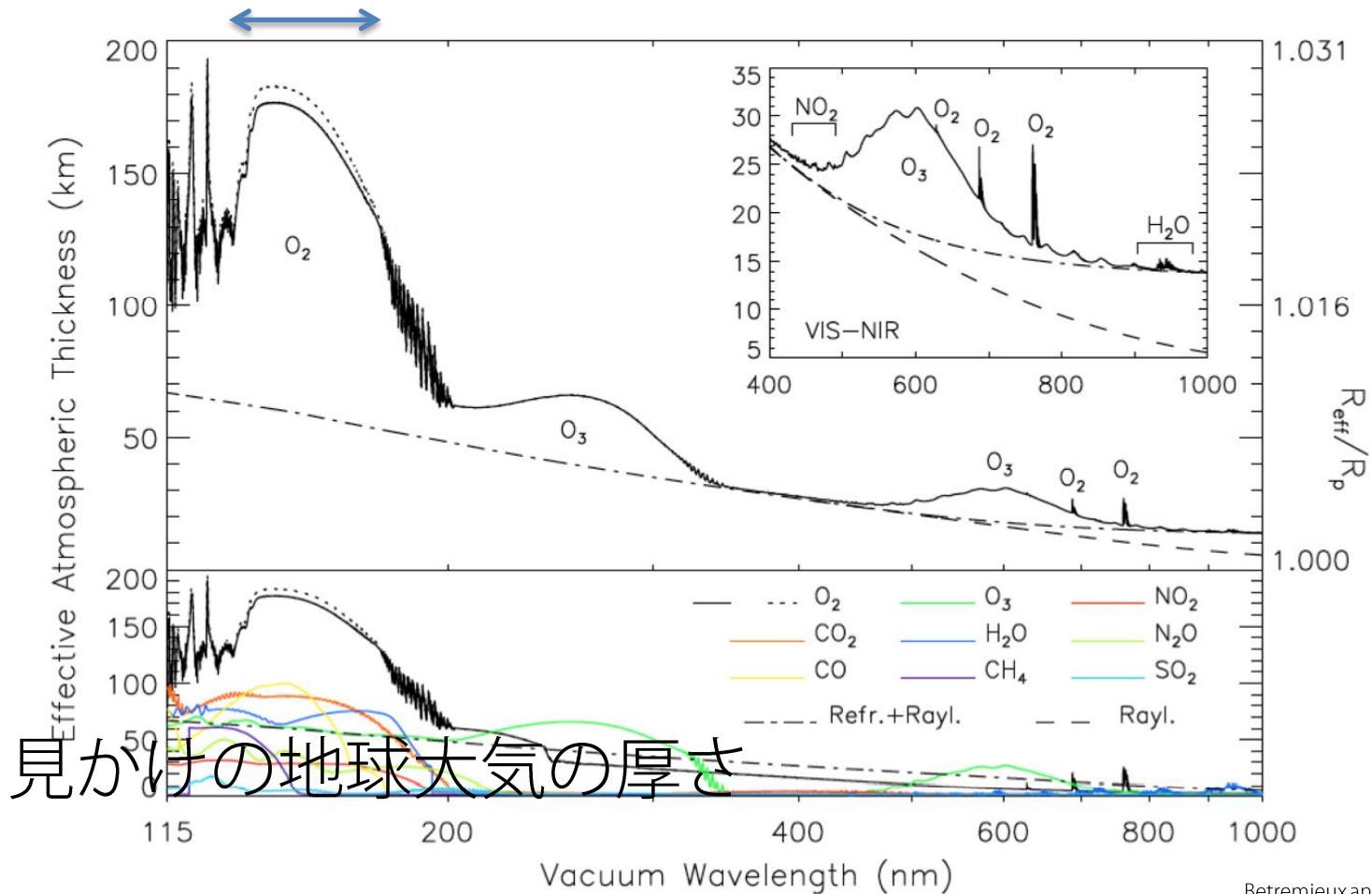
恒星紫外線の惑星進化への影響

- 大気分子種は200nm以下の紫外線で解離
→ 惑星大気の進化および現在の環境（大気散逸）を知るうえで主星のUV強度が重要
- 5pcまでの恒星63個中50個は低温星(~3000K)

低温星では水素Ly α 線の強度が支配的
→ Ly α 線(121.6nm)の測光観測が重要
(ハッブル以降は予定なし)



酸素分子の観測 (小型探査シンポジウム資料)

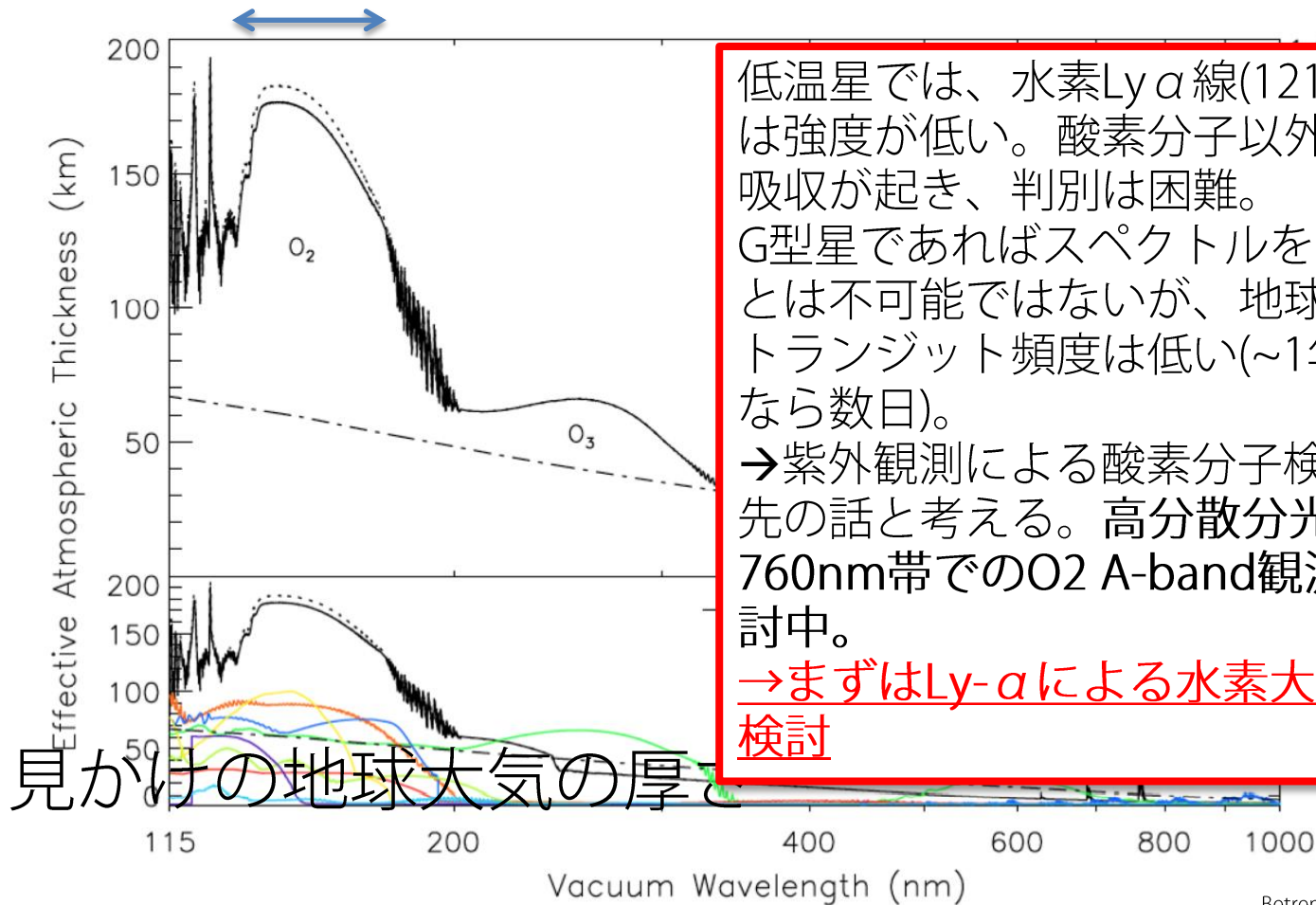


見かけの地球大気の厚さ

Betremieux and Kaltenecker, 2013

- FUV領域ではO₂の吸収により、地球は2.6%大きく見える(トランジット深さは~7%)。
- 赤外領域の吸収断面積は非常に小さい。

酸素分子の観測 (小型探査シンポジウム資料)



- FUV領域ではO₂の吸収により、地球は2.6%大きく見える(トランジット深さは~7%)。
- 赤外領域の吸収断面積は非常に小さい。

ジオコロナ

外気圏：地球大気層のうち最も外側の領域(高度>400km)

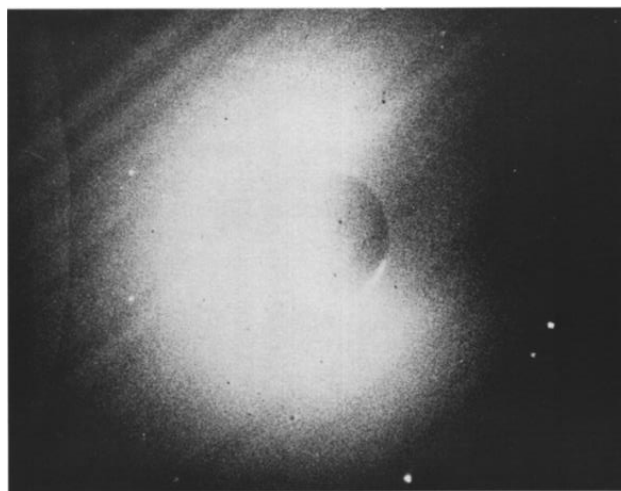
- 主な構成原子：水素、ヘリウム

特定の太陽紫外放射を選択的に共鳴散乱

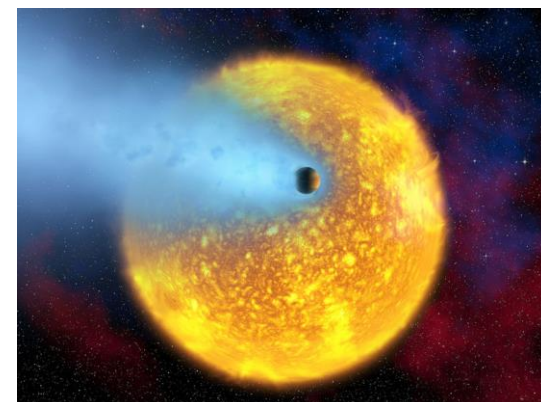
⇒地球全体を包む紫外グロー：ジオコロナ

- 水素Ly- α 線(121.6nm)が最も明るい
- 20 Re程度まで広がっている

→Ly- α の混入を避けるには高高度 or 深宇宙へ出る必要がある



Apollo 16で得られたジオコロナ分布 [Carruthers et al., 1976]



HD209458bの想像図 [NASA]

DESTINYによるLy- α 系外惑星観測

- ここ10年の間に全天でトランジット惑星探査が実施される
- 紫外トランジット観測により系外惑星大気(水素)の散逸を捉えられる
- 惑星の大気進化には主星の紫外線強度が重要
- 海外では計画されていない、現在ではHST、ひさきのみ
→新規宇宙望遠鏡によるLy- α 観測が必要

DESTINY応用ミッションにおける利点

- 地球近傍ジオコロナからのLy- α 混入を回避できる(高度 > 30 Re)
- 地球周回に比べ、長時間観測・安定した温度環境に期待できる



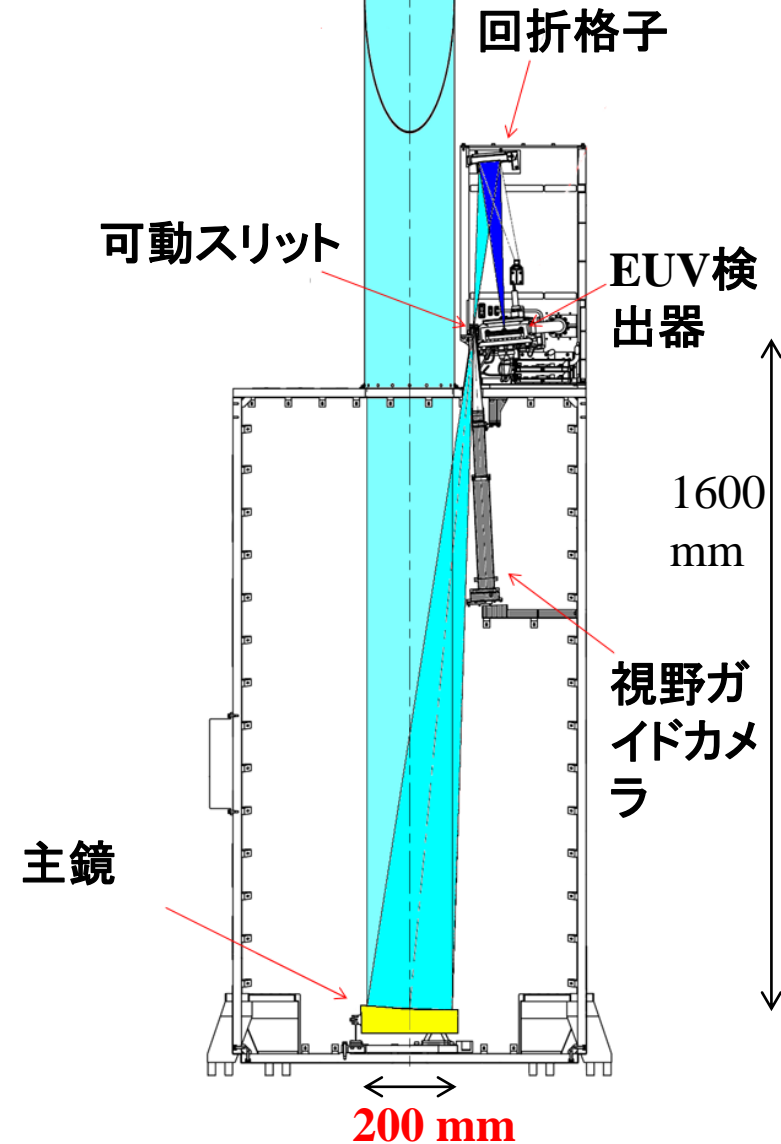
**DESTINY搭載および応用ミッションとしてFUV (Ly- α)
望遠鏡を検討**



EUV宇宙望遠鏡：ひさき/EXCEED

Final specifications

Parameters	Values	Remarks
Weight	348 kg (99 kg)	SPRINT-A (EXCEED)
Power	562 W	Maximum
Launch date	22 Aug. 2013	(Not fixed)
Orbit	LEO	950 – 1150 km Inc. 31 deg. Period: 105 min.
Pointing accuracy	+/- 2"	With the help of FOV guide camera.
Spectral range	52–148 nm	
Effective area	1 – 3 cm²	Depends on WL
Spectral resolution	0.3 – 1 nm	Depends on WL and slit shape
Spatial resolution	17"	
Mission life	> 1 year	To be extended



Optical layout of EXCEED

EUV宇宙望遠鏡：ひさき/EXCEED

ひさきによる恒星・系外惑星観測

①近傍M型星(系外惑星の有無に関わらず)で過去にEUV観測されていないもの

→主星のスペクトル(Ly- α)を取得

②系外惑星をもつ恒星のうち、UVで明るいもの(絶対等級、スペクトル型で選別)

→主星のスペクトル(連続)を取得、あわよくば系外惑星トランジット観測

ひさきによる観測の制約

- 黄道面 $\pm 10^\circ$ 以内
- 太陽離角 $> 20^\circ$
- ジオコロナの混入(高度950-1150 km)
- 検出器のLy- α 感度をわざと低下させている(1/10程度)
→有効面積0.1 cm²程度

FUV宇宙望遠鏡：PROCYON/LAICA

LAICA：(Geocoronal Hydrogen) Lyman Alpha Imaging CAmera

Ly- α 線でジオコロナの広視野分布を撮像する

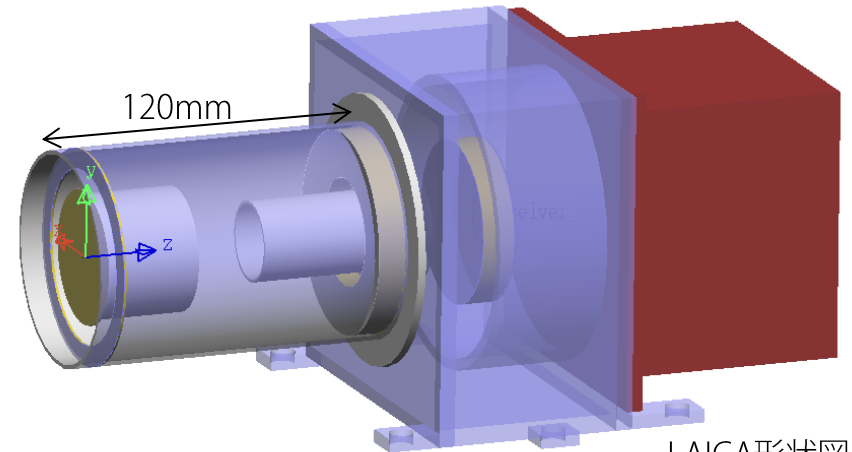
- 焦点距離 400mm
- 視野 3度
- 角度分解能 0.024度
- 波長範囲 122 ± 10 nm
- 感度 3.4×10^{-3} [cts/s/pix/R]
- 主鏡有効径：71mm
- 副鏡有効径：32mm
- 質量：2.14kg
- 消費電力：max 5W
- 300mm x 160 mm x 130 mm

検出器：Bepicolombo/MPOに搭載されるPHEBUS/FUVと同型

光学系：カセグレン望遠鏡

主鏡・副鏡ともに球面(Al+MgF₂)

バンドパスフィルタによるイメージング



LAICA形状図

PROCYON

質量：約59kg

寸法：H630×W550×D550mm

2014年12月打ち上げ予定



FUV宇宙望遠鏡：PROCYON/LAICA

LAICA：(Geocoronal Hydrogen) Lyman Alpha Imaging CAmera

Ly- α 線でジオコロナの広視野分布を撮像する

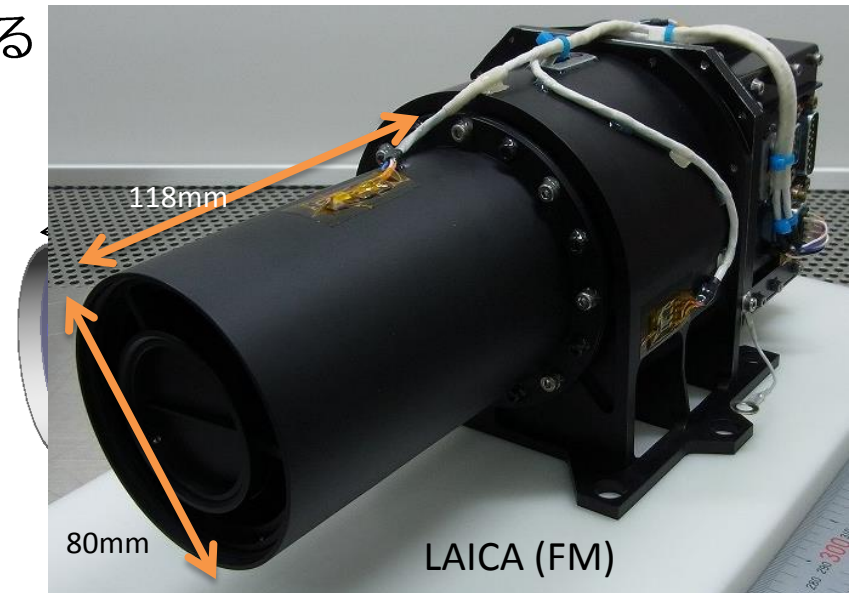
- ・ 焦点距離 400mm
- ・ 視野 3度
- ・ 角度分解能 0.024度
- ・ 波長範囲 122 ± 10 nm
- ・ 感度 3.4×10^{-3} [cts/s/pix/R]
- ・ 主鏡有効径：71mm
- ・ 副鏡有効径：32mm
- ・ 質量：2.14kg
- ・ 消費電力： max 5W
- ・ 300mm x 160 mm x 130 mm

検出器：Bepicolombo/MPOに搭載されるPHEBUS/FUVと同型

光学系：カセグレン望遠鏡

主鏡・副鏡ともに球面(Al+MgF₂)

バンドパスフィルタによるイメージング



PROCYON

質量：約59kg

寸法：H630×W550×D550mm

2014年12月打ち上げ予定



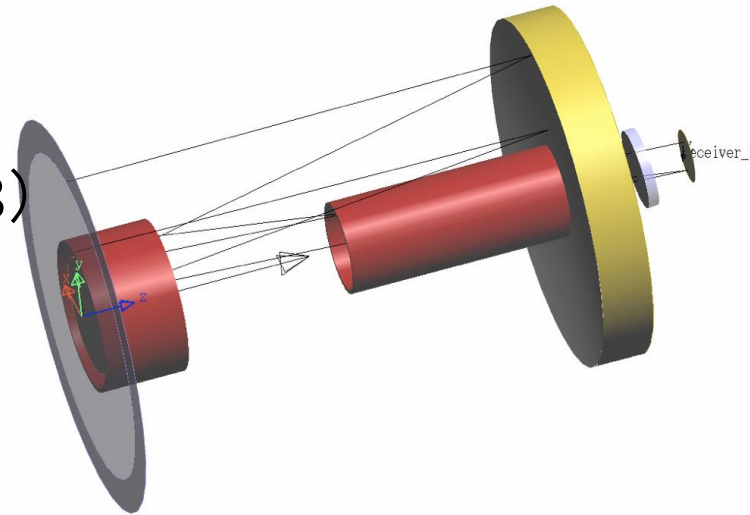
DESTINYに向けたLy- α 望遠鏡

基本的にはPROCYON/LAICAと同じデザイン

→バンドパスフィルタによるイメージング観測

光学設計

- ・クラシカルカセグレン式
- ・主鏡: Al+MgF₂ (口径: 10 cm/ 30 cm、F/8)
→LAICAで使用
- ・バンドパスフィルタ
→のぞみ、LAICAで使用
- ・EUV検出器: CsI付マイクロチャンネルプレート
→ひさき、BepiColombo、LAICAで使用



口径10 cm、30 cmの場合に分け、それぞれの場合における観測S/Nを見積もった

DESTINYに向けたLy- α 望遠鏡

方針

- ・軌道: ジオコロナ外 → 地球周回 (> 30 Re)、L2など
- ・小型 (口径10 cm) と中型 (口径30 cm) でそれぞれ検討

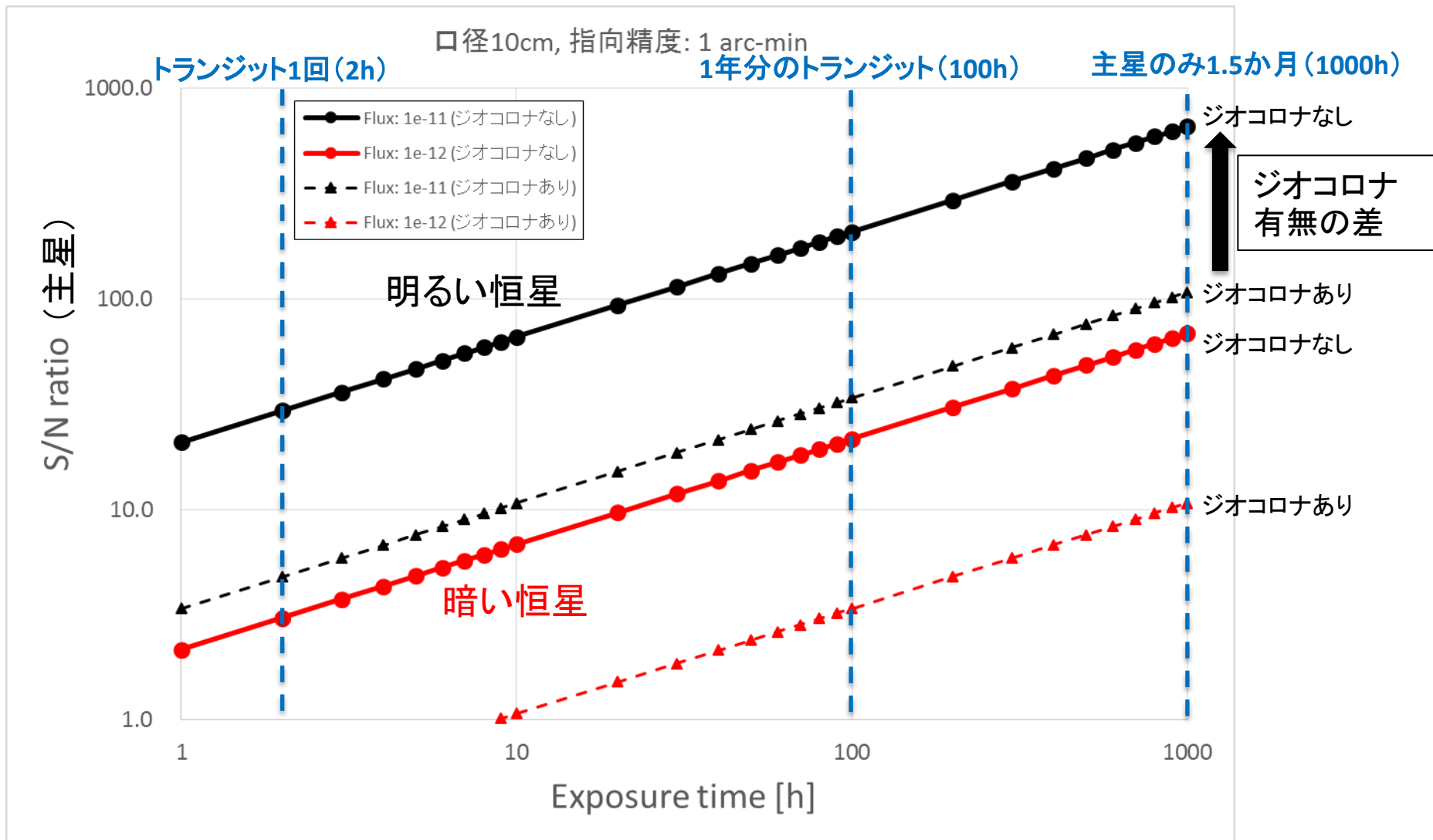
	小型 (DESTINY向け)	中型 (応用ミッション向け)
主鏡口径 (F/8)	10 cm (有効面積: 2.4 cm ²)	30 cm (有効面積: 21.2 cm ²)
重量	< 10 kg	45 kg
指向精度	1 分角	3 秒角 (チップチルト or FOVカメラ)

※光学系効率: 60%、フィルタ透過率: 20%、検出器量子効率: 25%として計算

観測S/N検討

- ・バックグラウンド: 惑星間空間Ly- α のみ考慮、500Rと仮定 [Ajello et al., 1994] → 高度1000 kmにおけるジオコロナ (20 kR) の1/40
- ・指向精度角 × 指向精度角が見込む立体角からやってくる背景光量から計算
- ・過去の観測 (IUE、HST) における低温星の典型的なLy- α 強度: $1 \sim 10 \times 10^{-12}$ erg/cm²/s [Landsman et al., 1993; Wood et al., 2005]
- ・仮に10%のトランジット深さをS/N = 30で検出することを目標とすると、恒星フラックスをS/N = 300で観測する必要がある

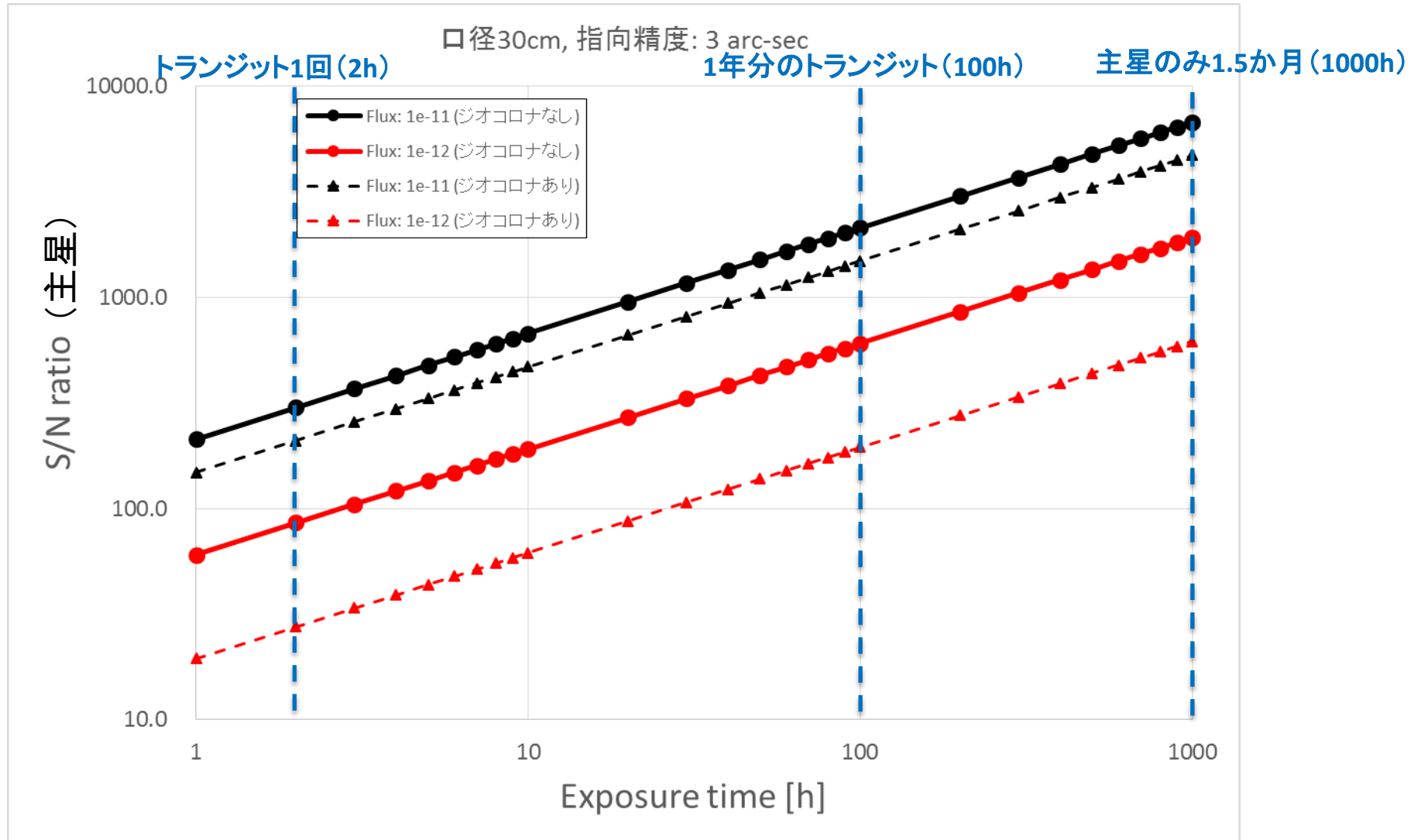
S/N検討(口径10 cm、指向精度1分角)



・主星フラックス: 数時間~100 h程度でS/N = 30を達成できる

・惑星トランジット(深さ10%): 明るい恒星であれば1年間の観測でS/N = 20まで達成可能

S/N検討(口径30 cm、指向精度3秒角)



- ・主星フラックス: 数時間の観測で $S/N = 100 \sim 300$ 程度を達成できる
- ・惑星トランジット(深さ10%): 明るい恒星であれば1回のトランジットで $S/N = 30$ を達成可能

まとめ

- ここ10年の間に全天でトランジット惑星探査が実施される
- 紫外トランジット観測により系外惑星大気(水素)の散逸を捉えられる
- 惑星の大気進化には主星の紫外線強度が重要
- 海外では計画されていない、現在ではHST、ひさきのみ
→新規宇宙望遠鏡によるLy- α 観測が必要
- Ly- α 観測ではジオコロナ外に出られるDESTINYはプラットフォームとして有利

- 小型(10cm鏡):主に主星のUV強度測定(S/N = 30)、明るい恒星ならば1年間で惑星大気散逸をS/N = 20程度で検出可能
- →2017年～のTESSサーベイ観測に合わせて2018年～にDESTINYで紫外観測を実施したい
- 中型(30cm鏡):明るい恒星ならば1回のトランジットでも惑星大気散逸をS/N = 30で検出可能
- →応用ミッションとして～2025年頃の実現を目指す