

L'atmosphère des exoplanètes à l'ère de James Webb



STScI | SPACE TELESCOPE
SCIENCE INSTITUTE

Amélie Gressier –Space Telescope Science Institute

agressier@stsci.edu

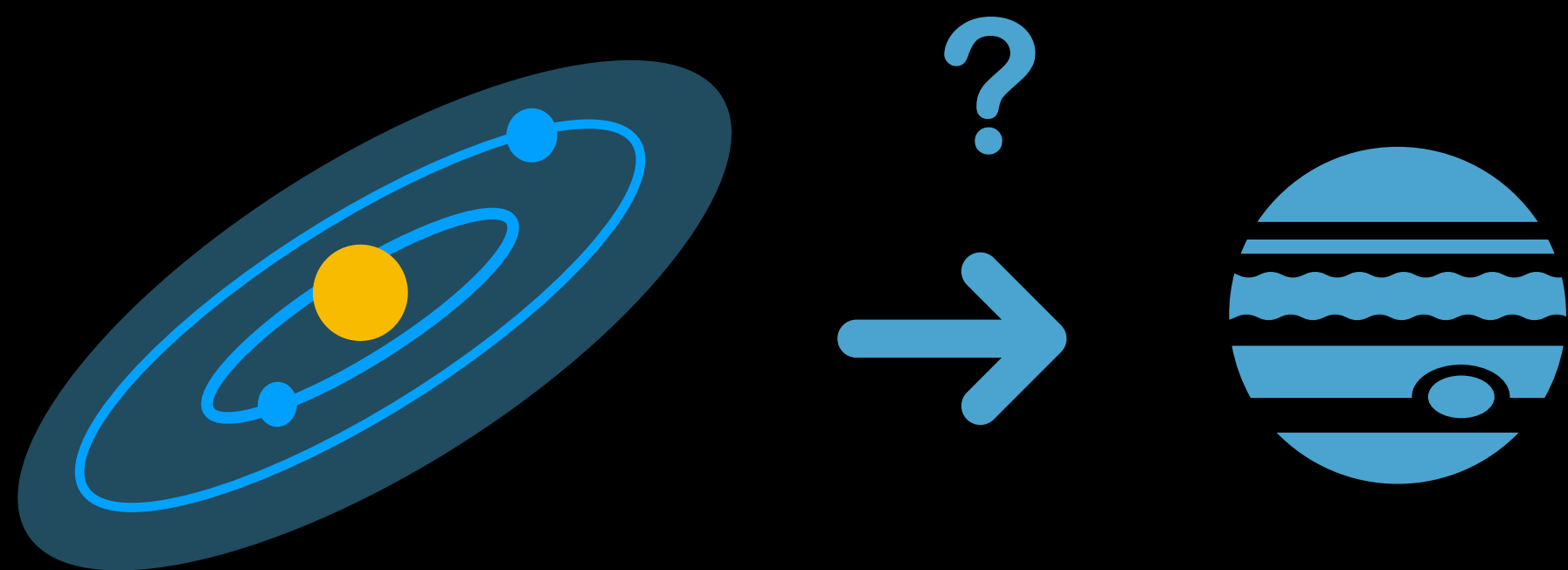
1 – La promesse des exoplanètes



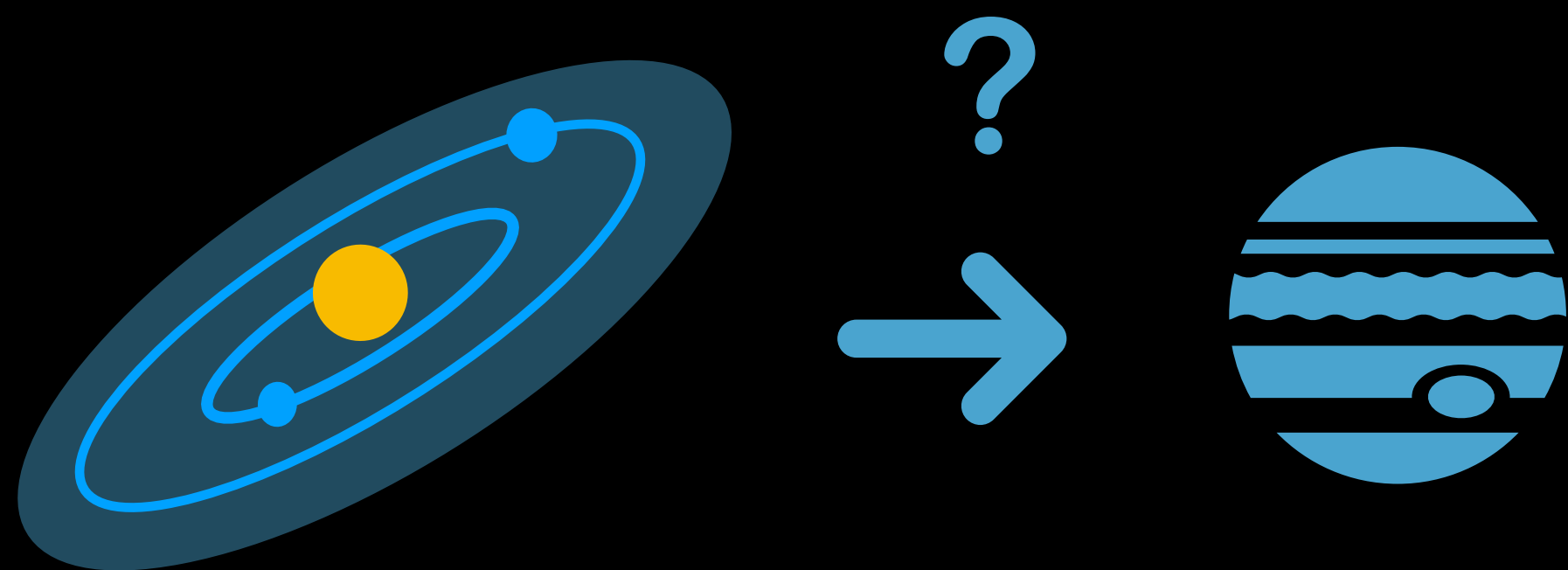
5800+

EXOPLANÈTES CONNUES EN DEHORS DE NOTRE SYSTÈME SOLAIRE

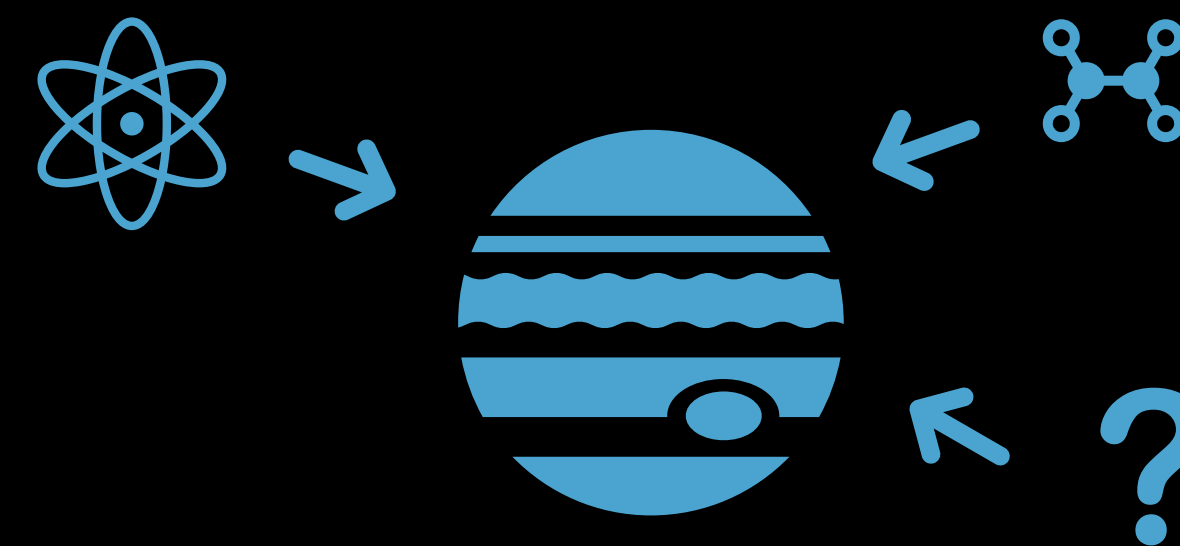




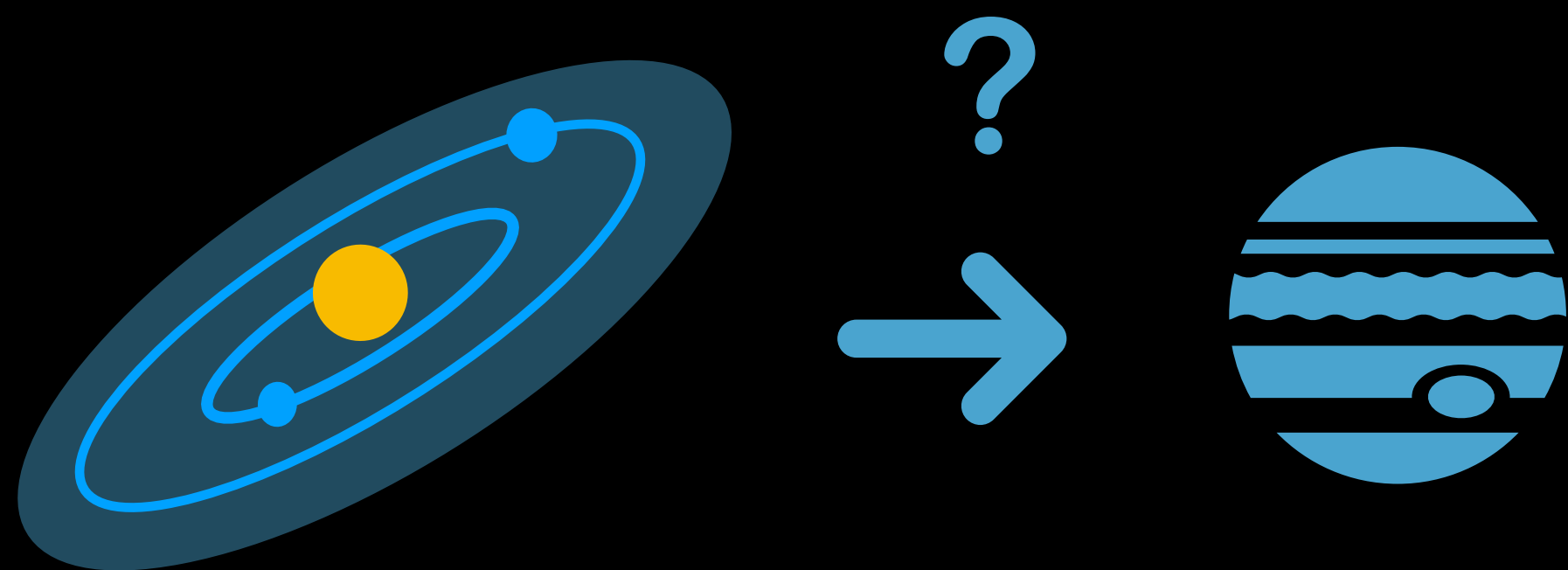
Comment les planètes se forment ?



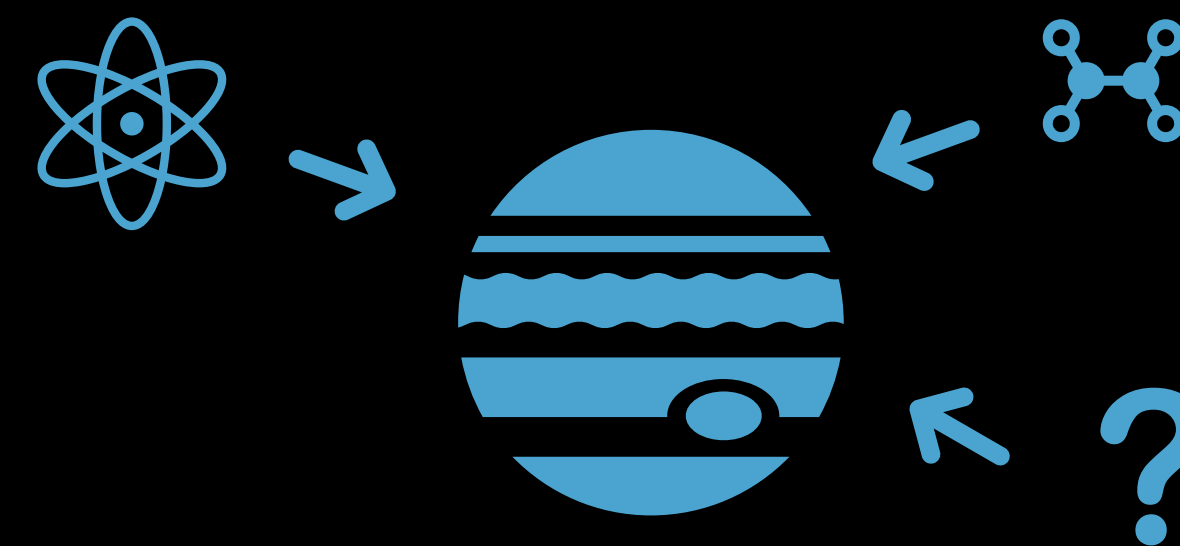
Comment les planètes se forment ?



De quoi sont-elles composées ?



Comment les planètes se forment ?



De quoi sont-elles composées ?



Quelle est la place de notre système solaire ?

Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique

STAND UP
FOR
SCIENCE

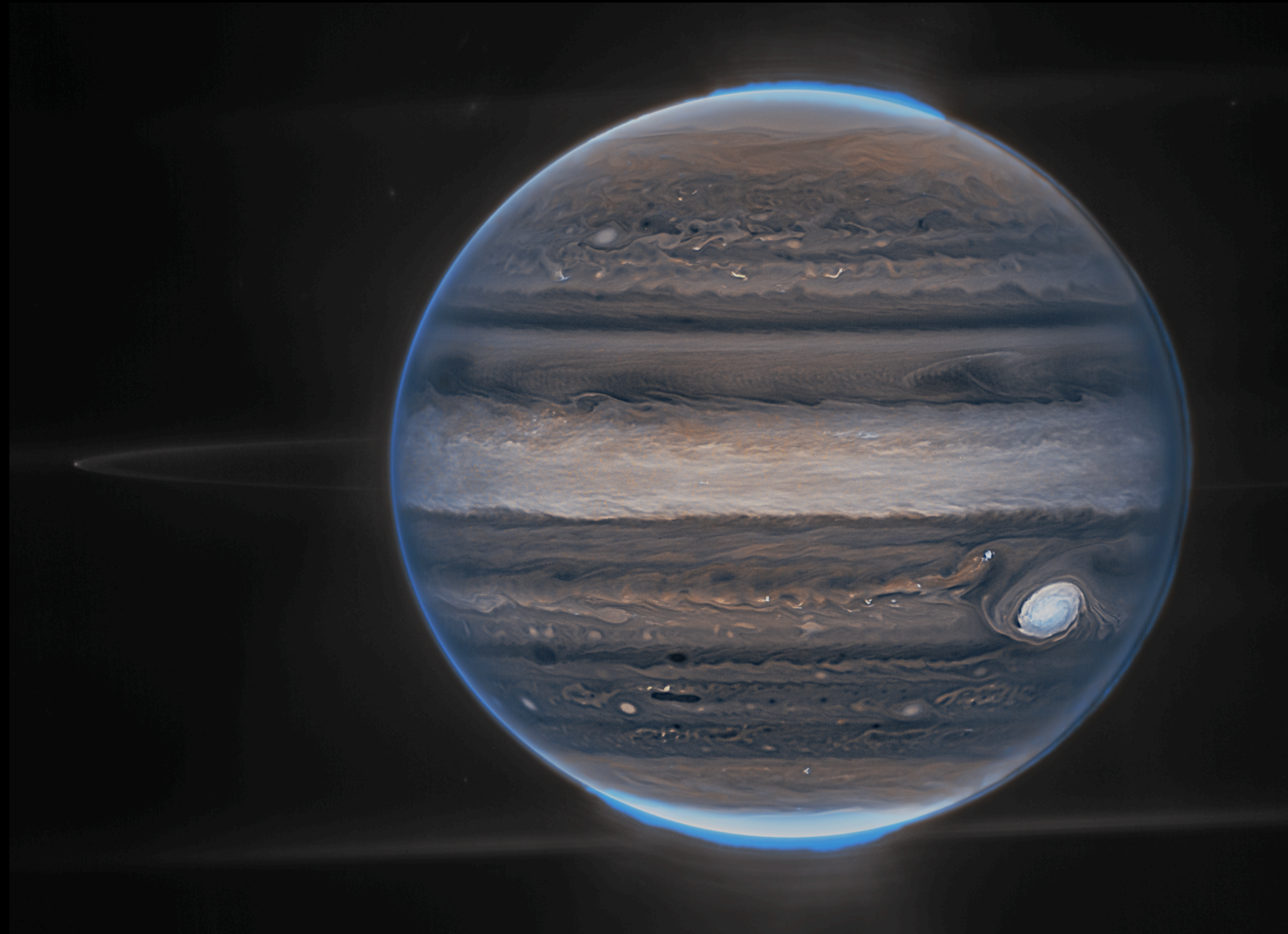


Image credits: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt



Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique

STAND UP
FOR
SCIENCE

CHIMIE

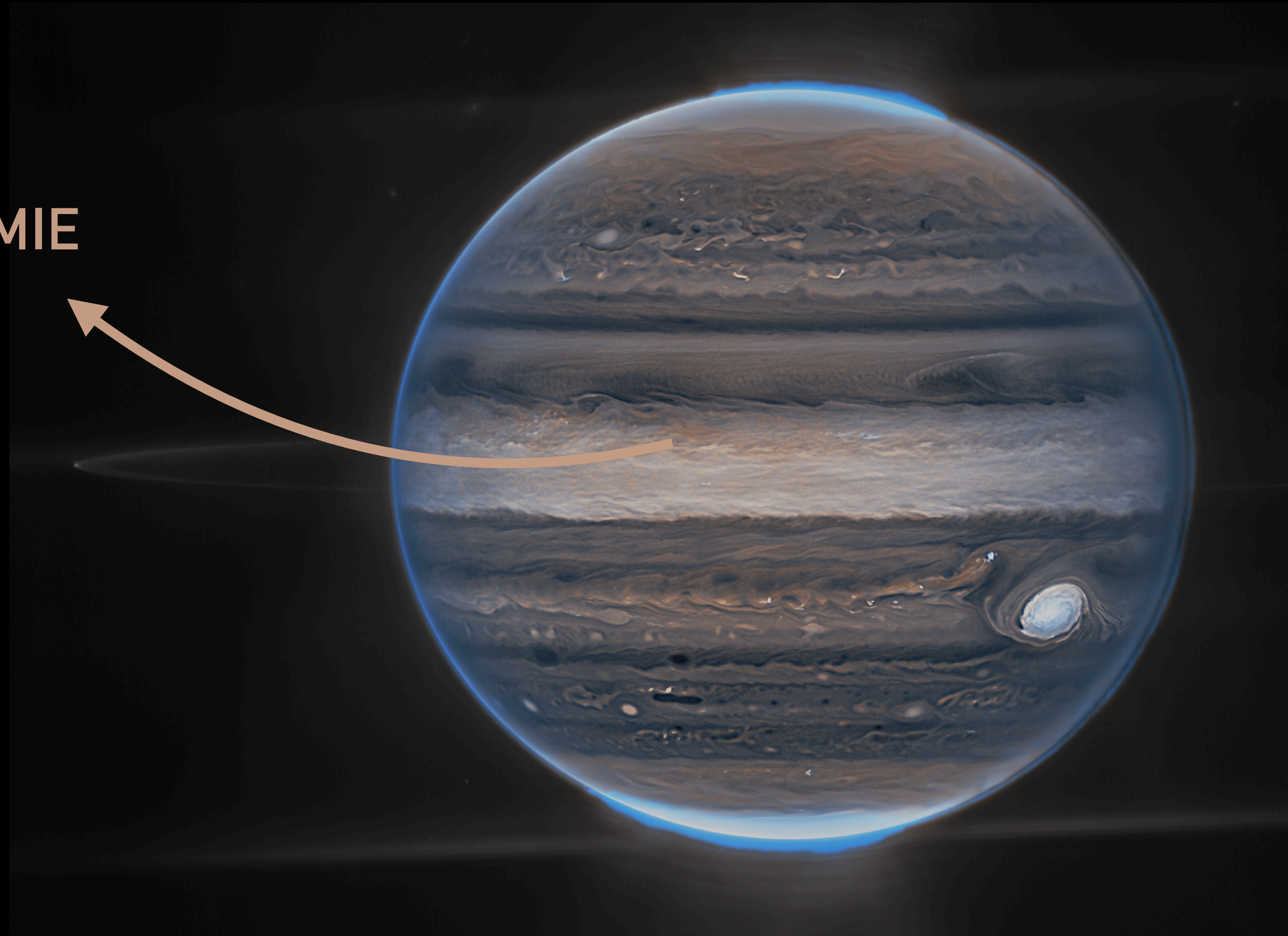


Image credits: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt



Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique

STAND UP
FOR
SCIENCE

CHIMIE
FORMATION PLANÉTAIRE

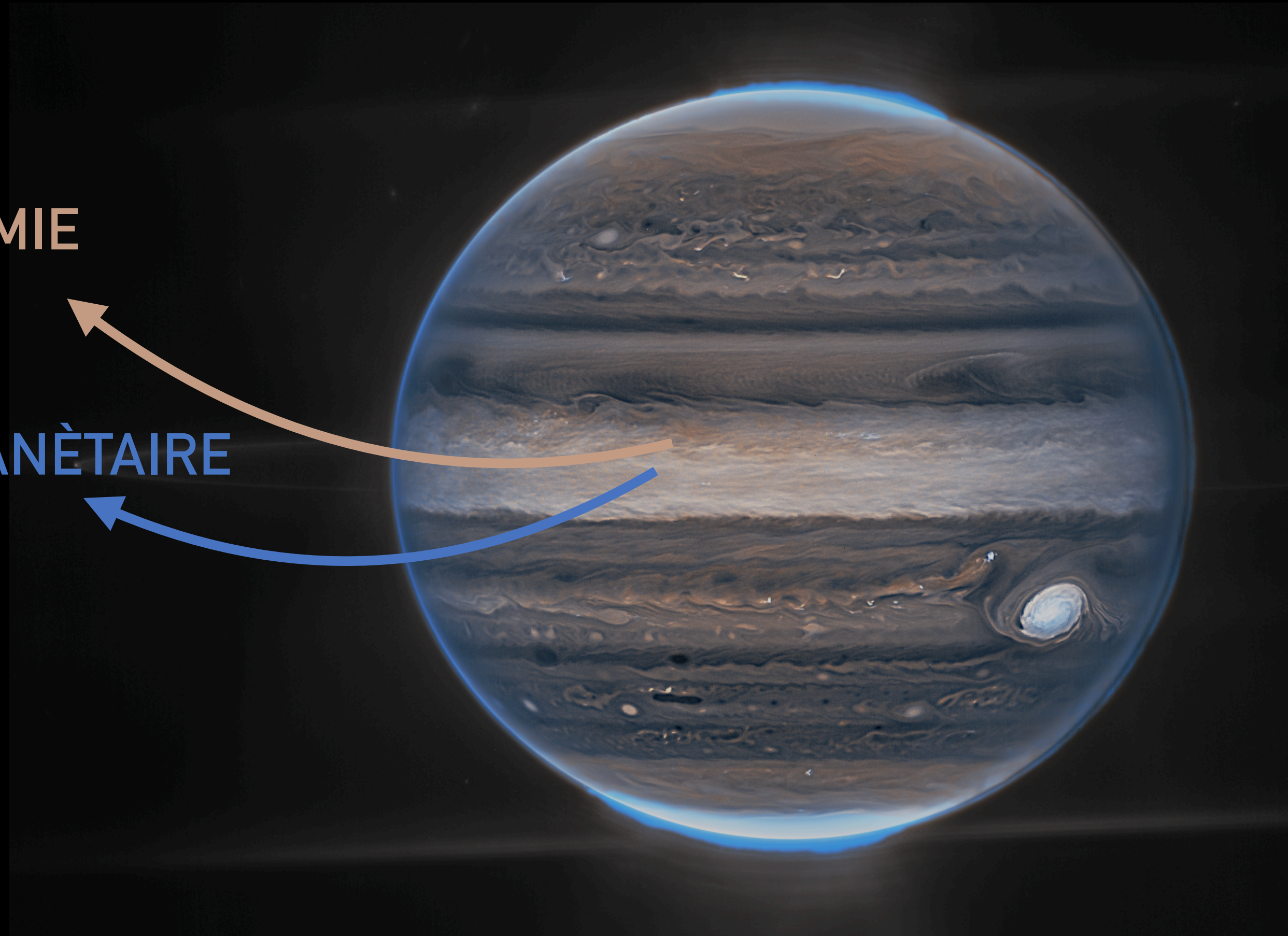


Image credits: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt



Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique

STAND UP
FOR
SCIENCE

CHIMIE

FORMATION PLANÉTAIRE

DYNAMIQUE ATMOSPHÉRIQUE

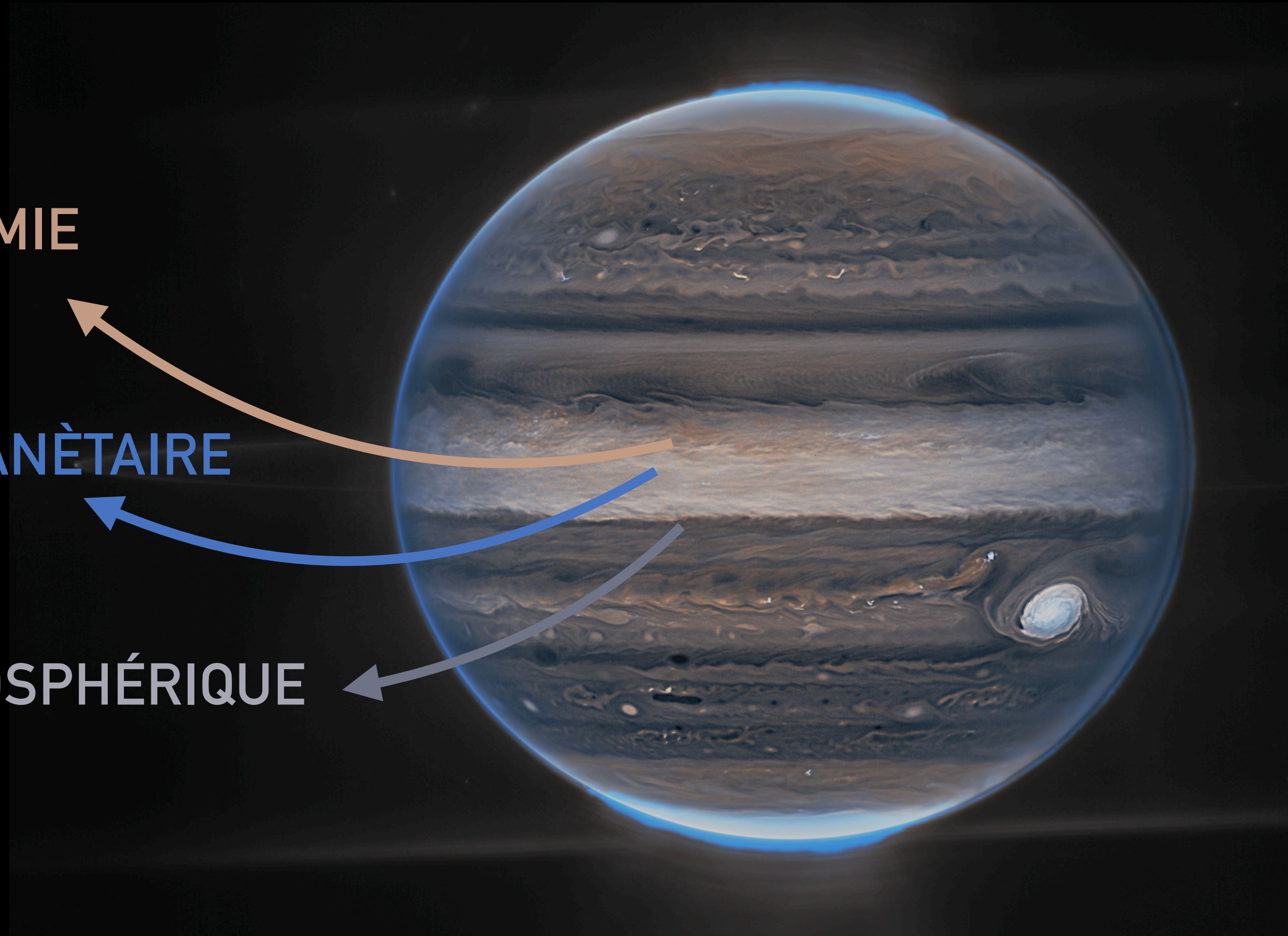


Image credits: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt



Les atmosphères d'exoplanètes : **nos laboratoires de physique**

STAND UP
FOR
2025
SCIENCE



Image credits: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_cow



Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique



Image credits: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_cow

Les atmosphères d'exoplanètes : nos laboratoires de physique

STAND UP
FOR
2025
SCIENCE

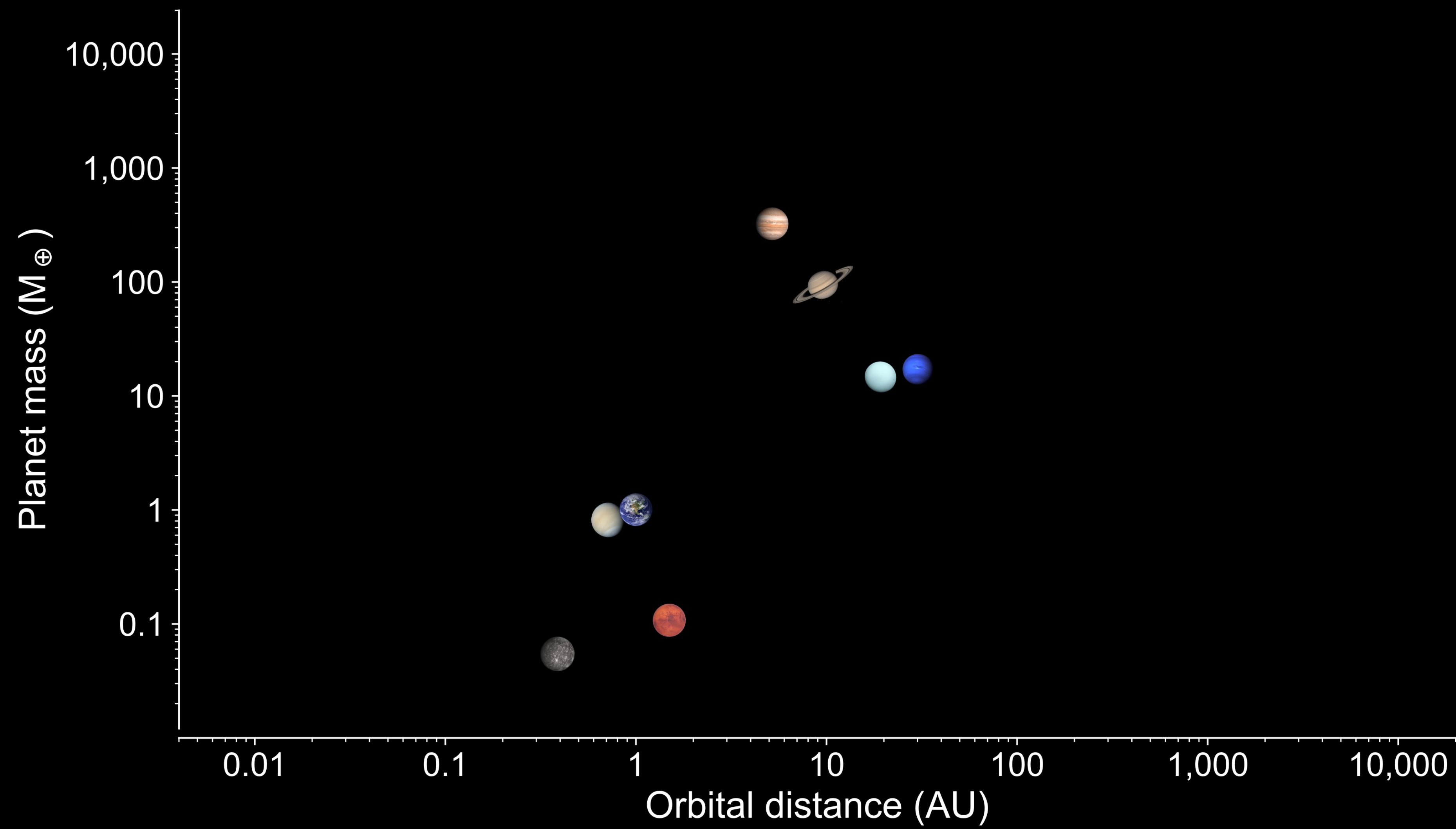


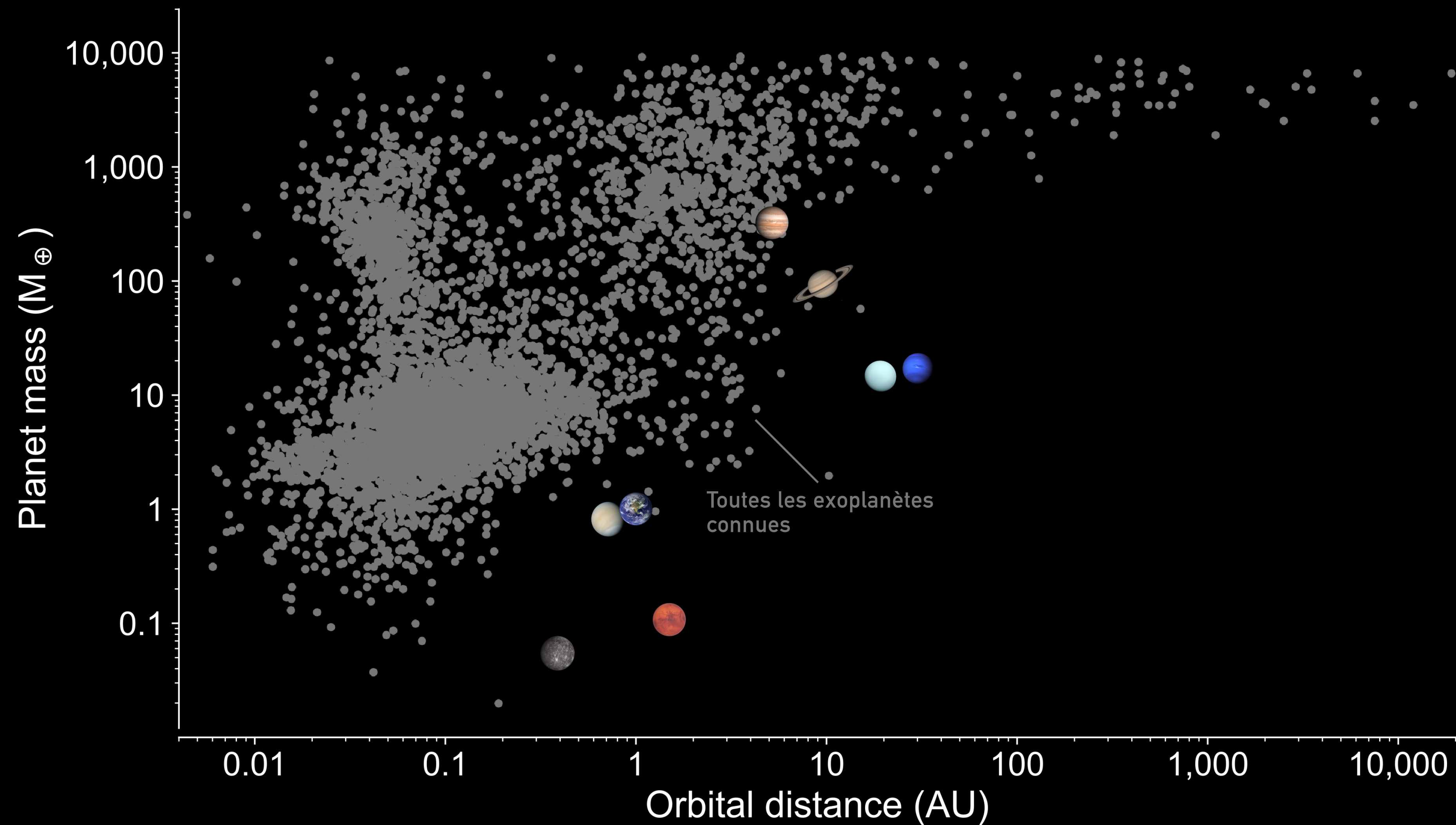
Image credits: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_cow



2- La révolution JWST



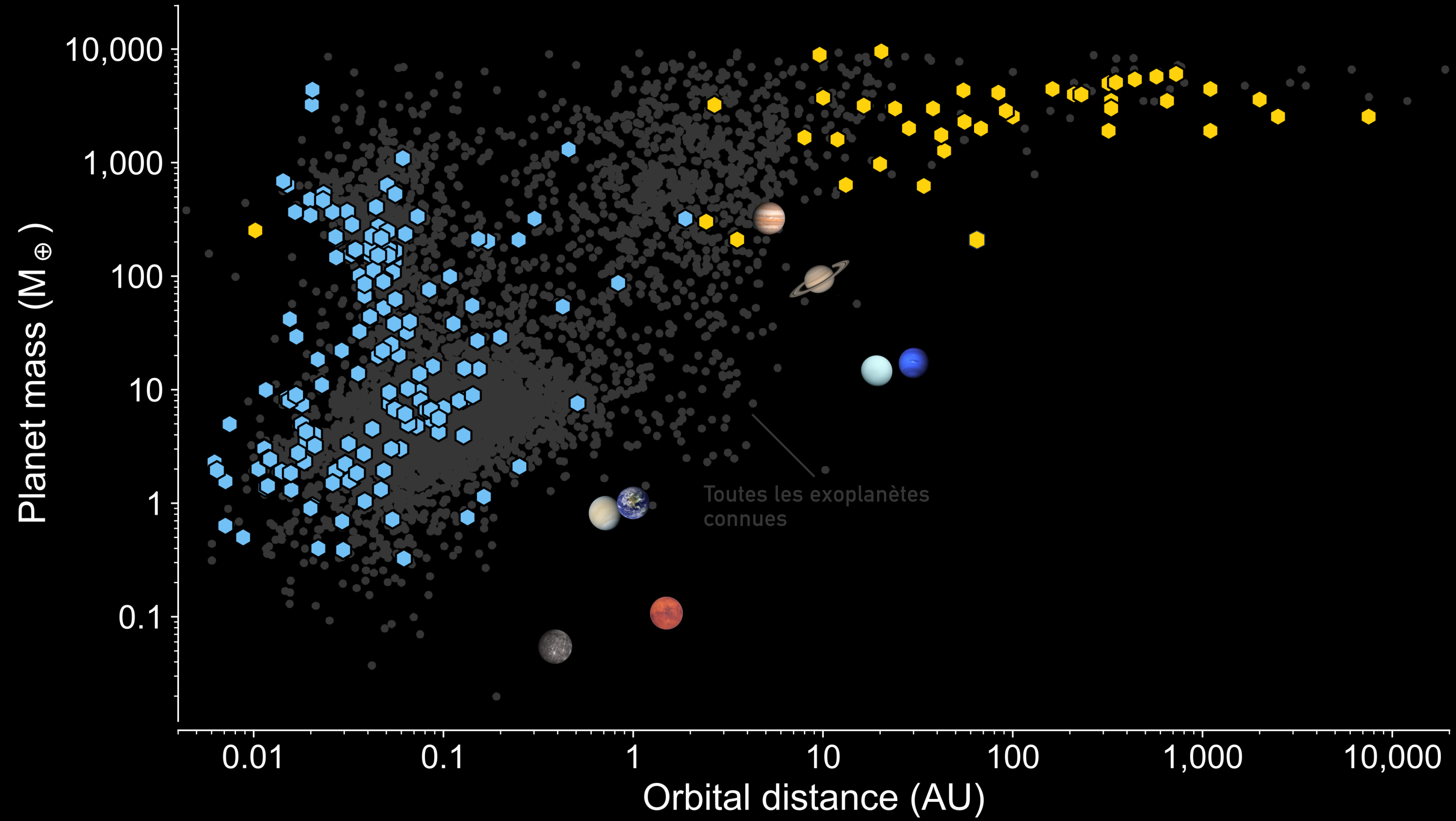






EXOPLANÈTES AVEC JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE



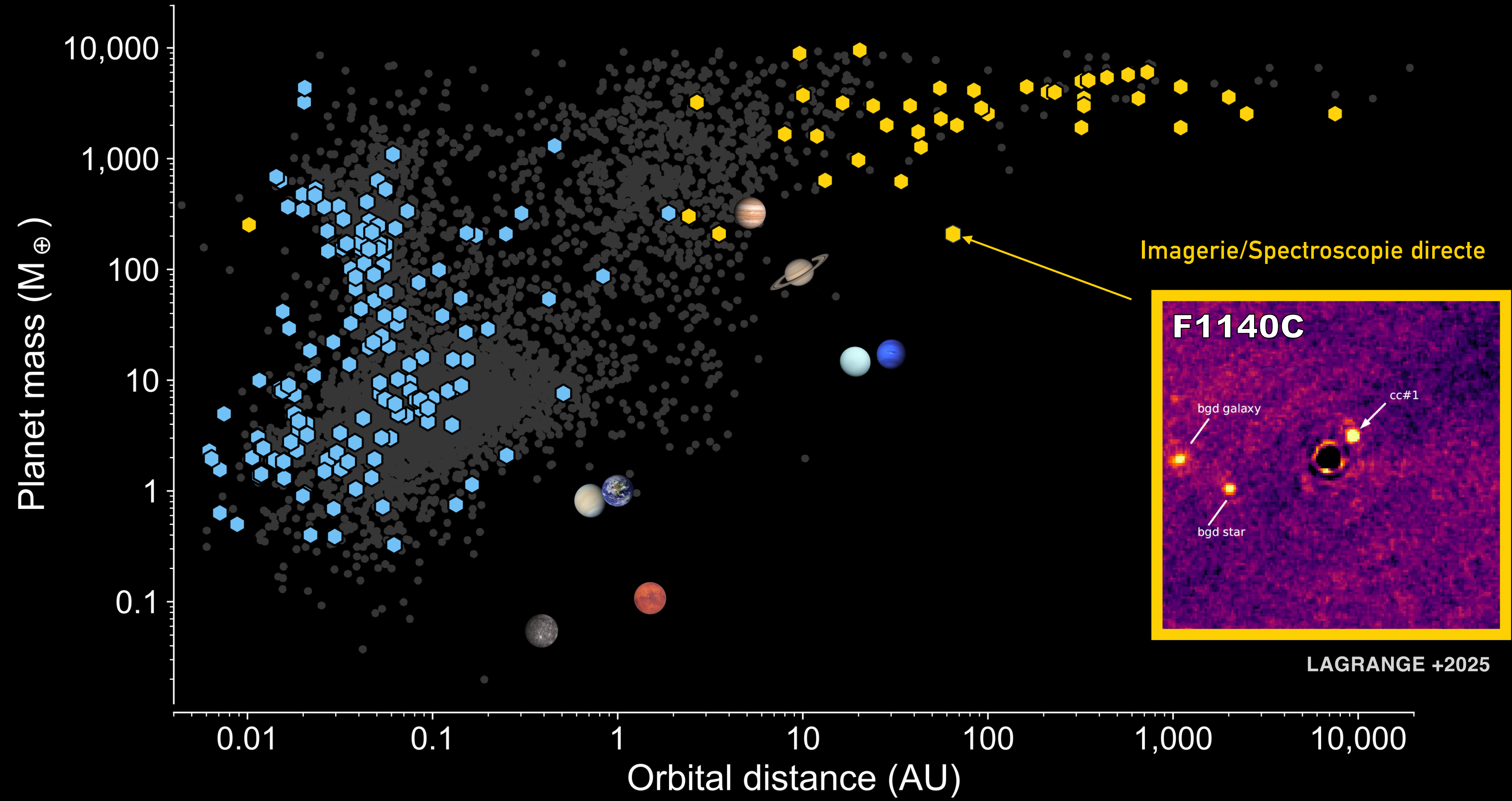
PLOT CREDITS: ESPINOZA & PERRIN (2025)





EXOPLANÈTES AVEC JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE



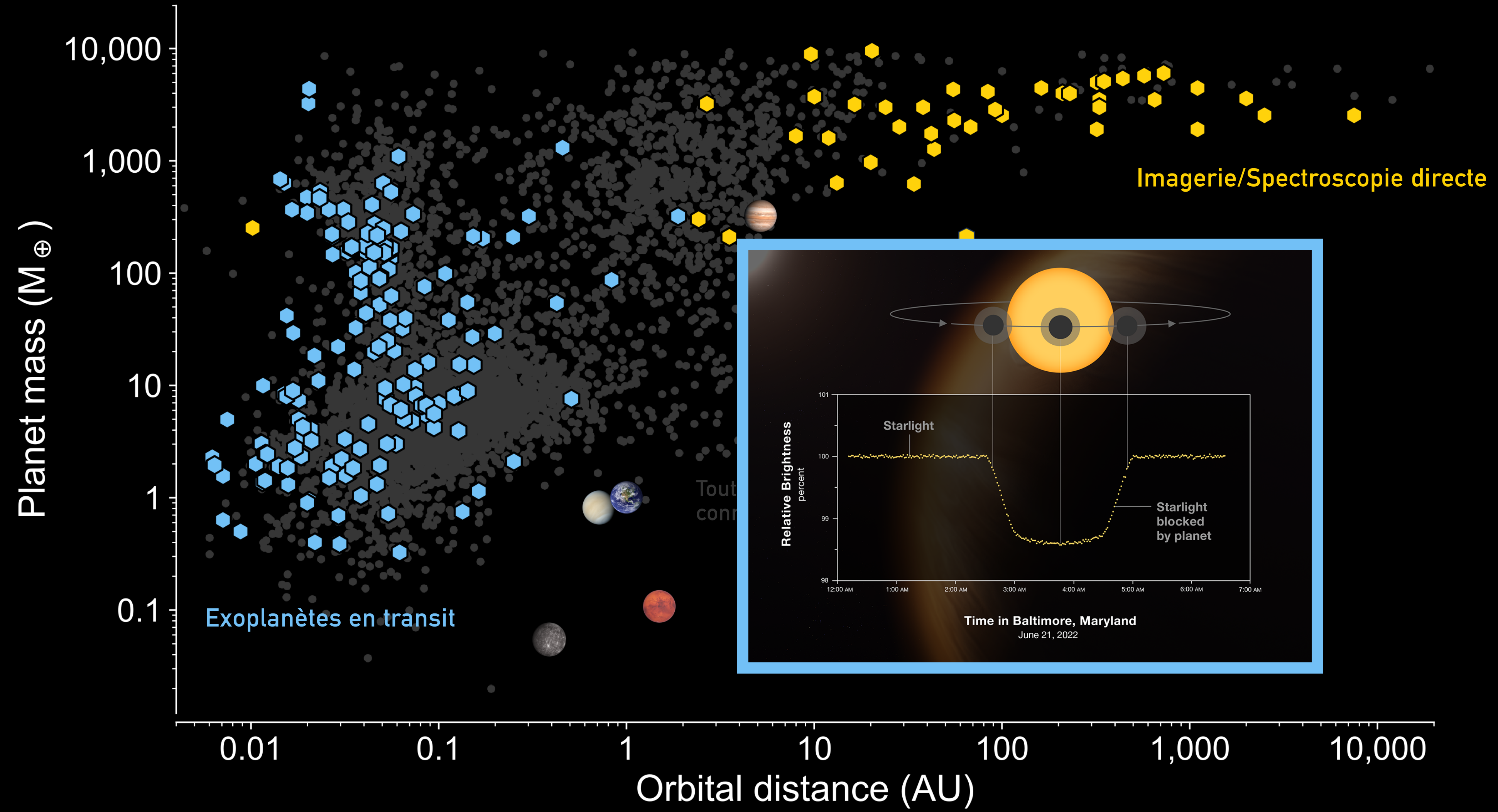
PLOT CREDITS: ESPINOZA & PERRIN (2025)





EXOPLANÈTES AVEC JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE



PLOT CREDITS: ESPINOZA & PERRIN (2025)



2- La révolution JWST : les exoplanètes en transit



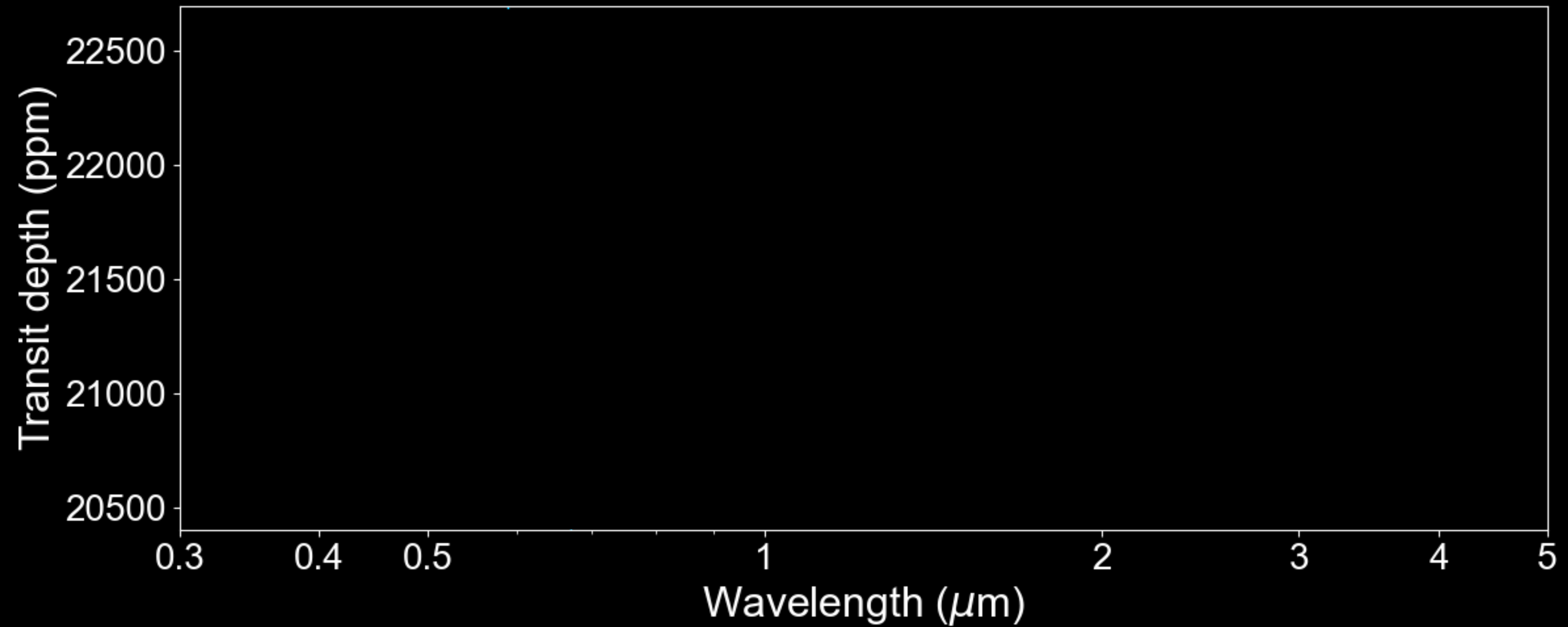
WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”



WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
2025
SCIENCE

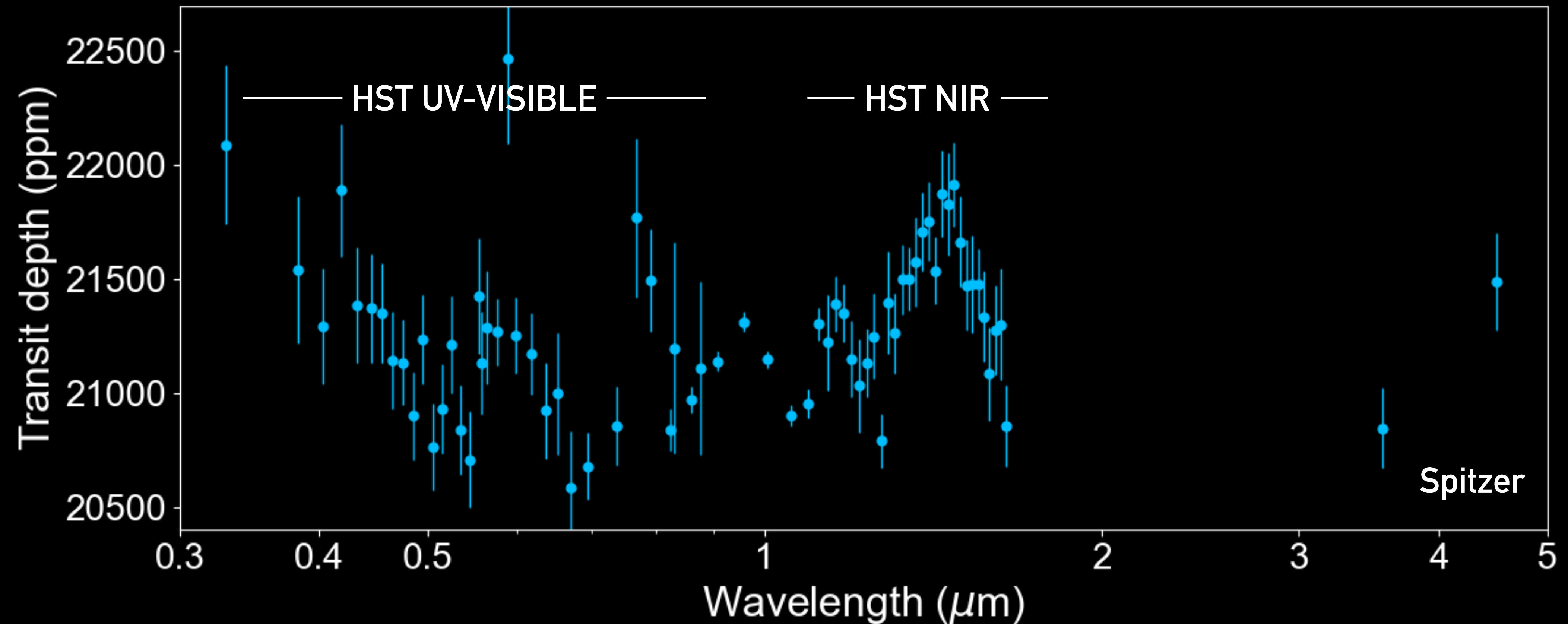


WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

Avant JWST

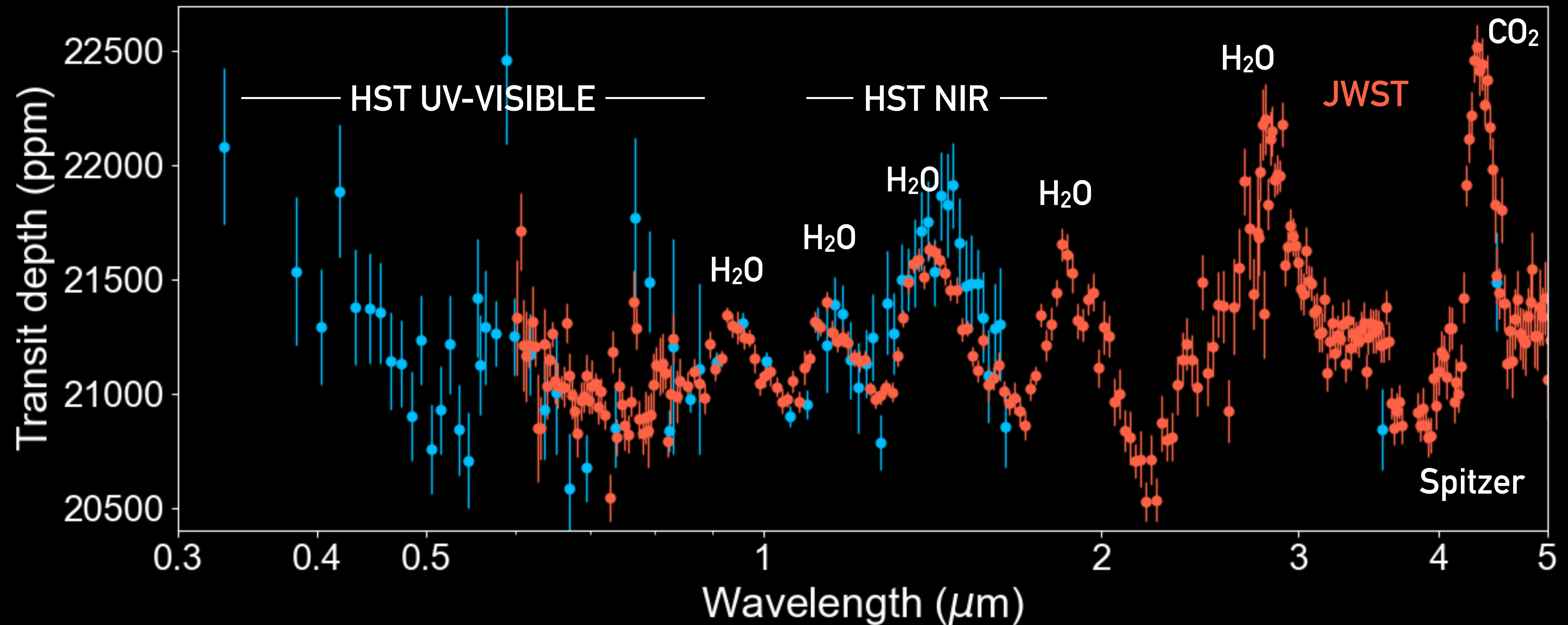


WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

JWST TRANSITING EXOPLANET ERS TEAM (2023, NATURE, 614, 649)

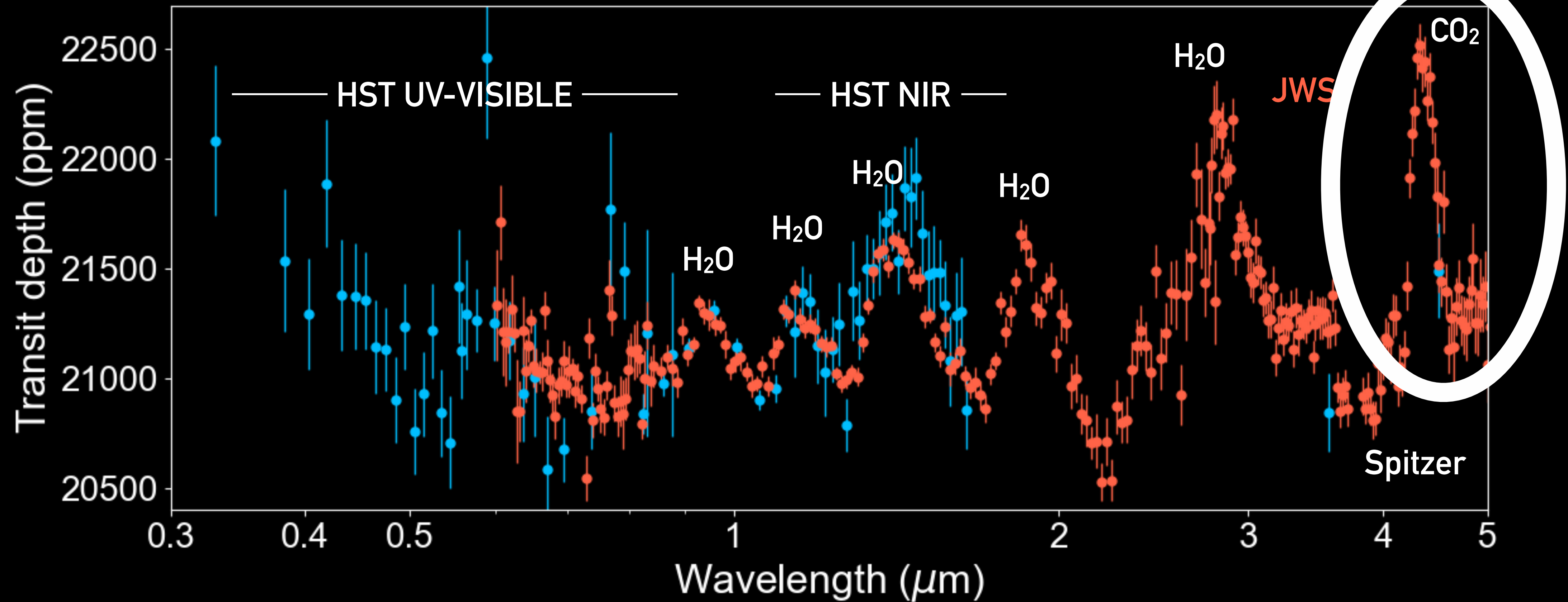


WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

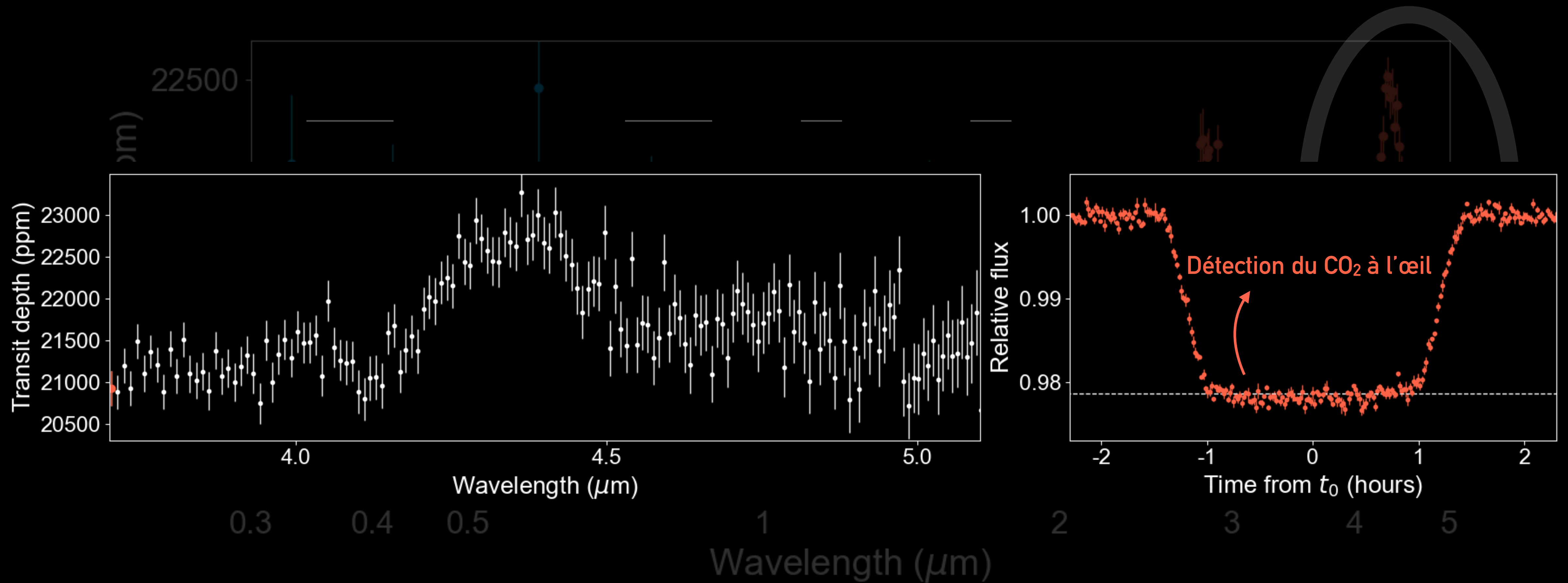
JWST TRANSITING EXOPLANET ERS TEAM (2023, NATURE, 614, 649)



WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

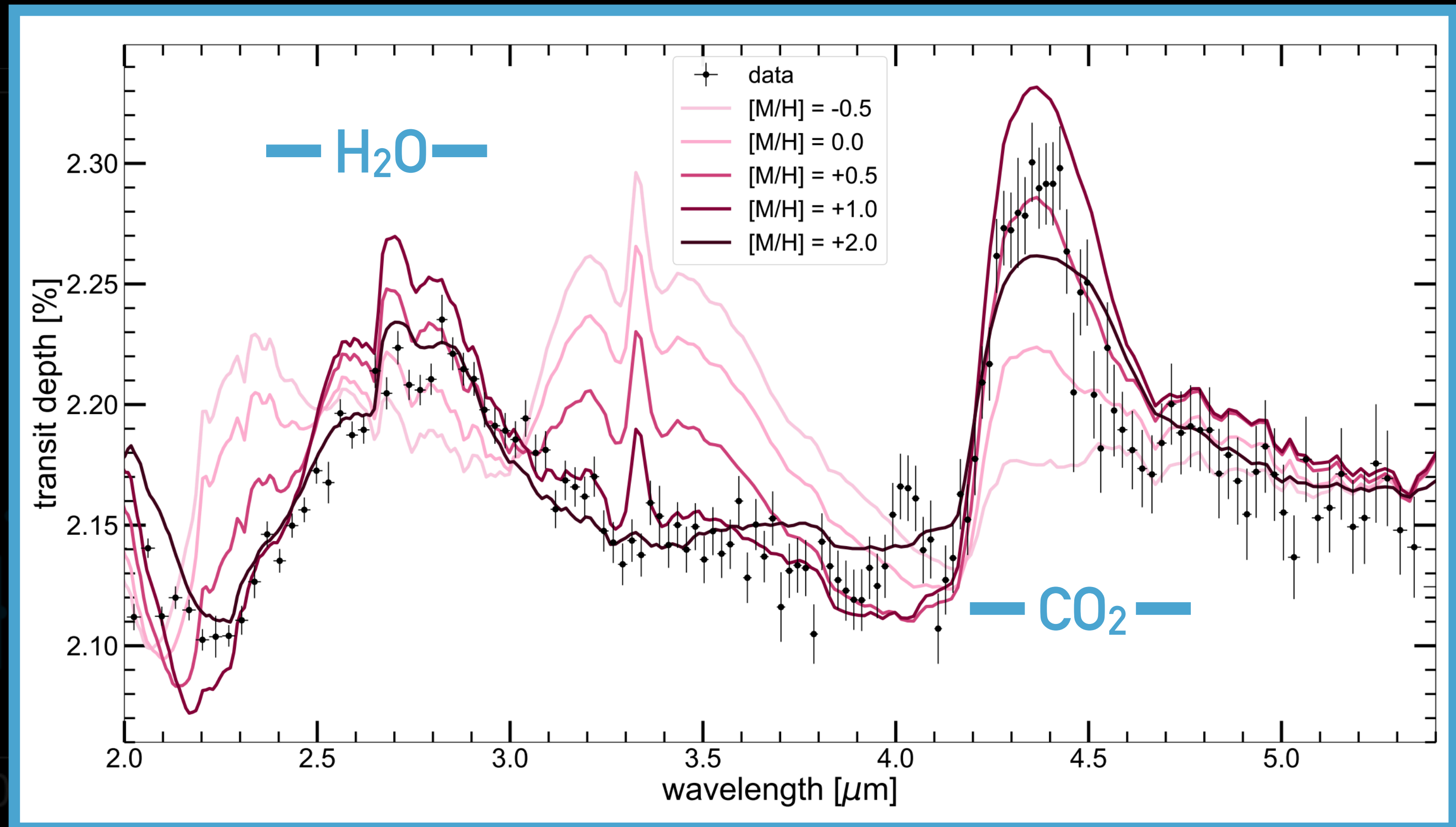


WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

Contraindre la métallicité
et le C/O ratio



RUSTAMKULOV ET AL (2023, NATURE, 614, 659)

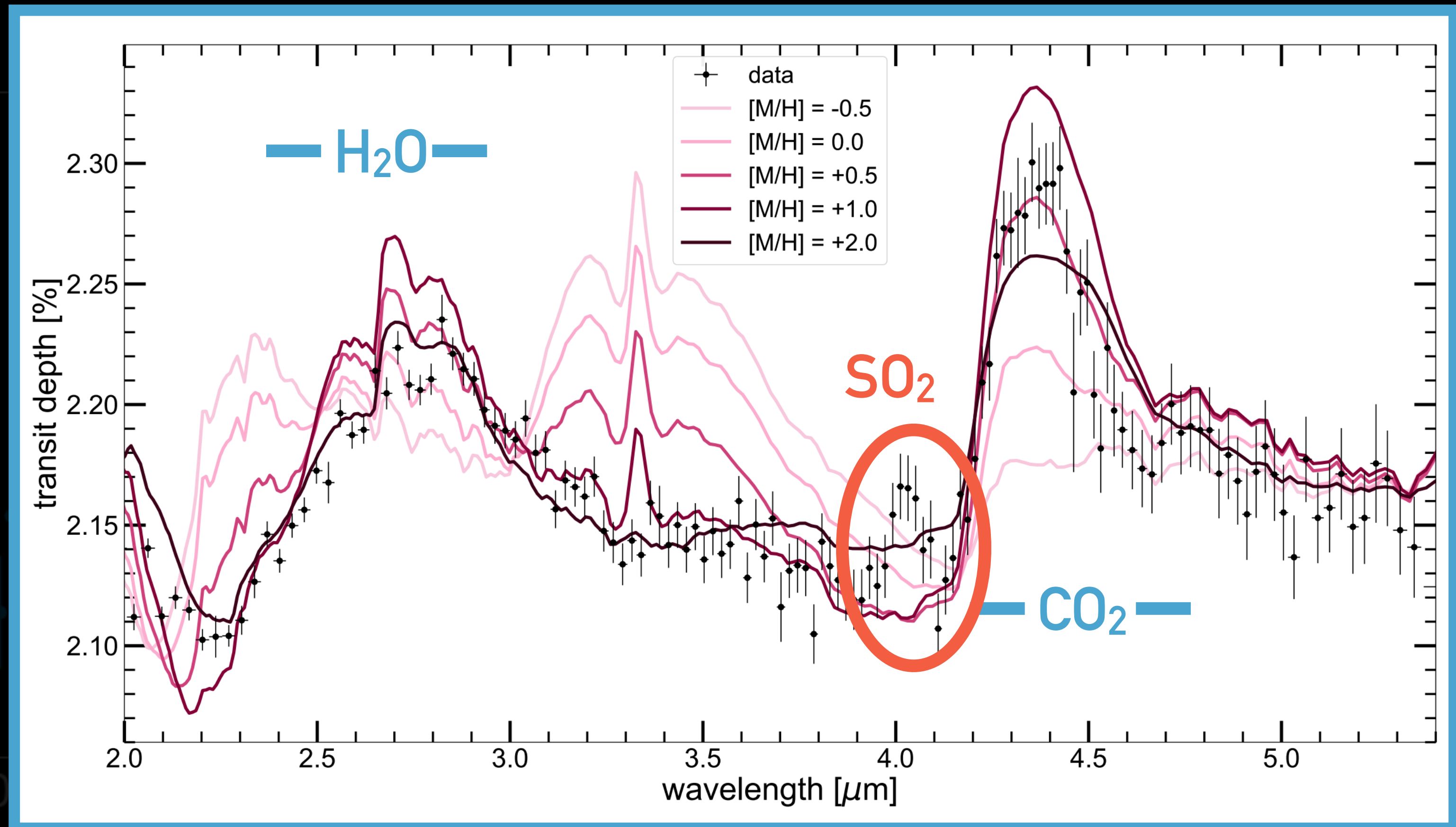


WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

SO₂ est produit par
photochimie
Première détection !



RUSTAMKULOV ET AL (2023, NATURE, 614, 659)



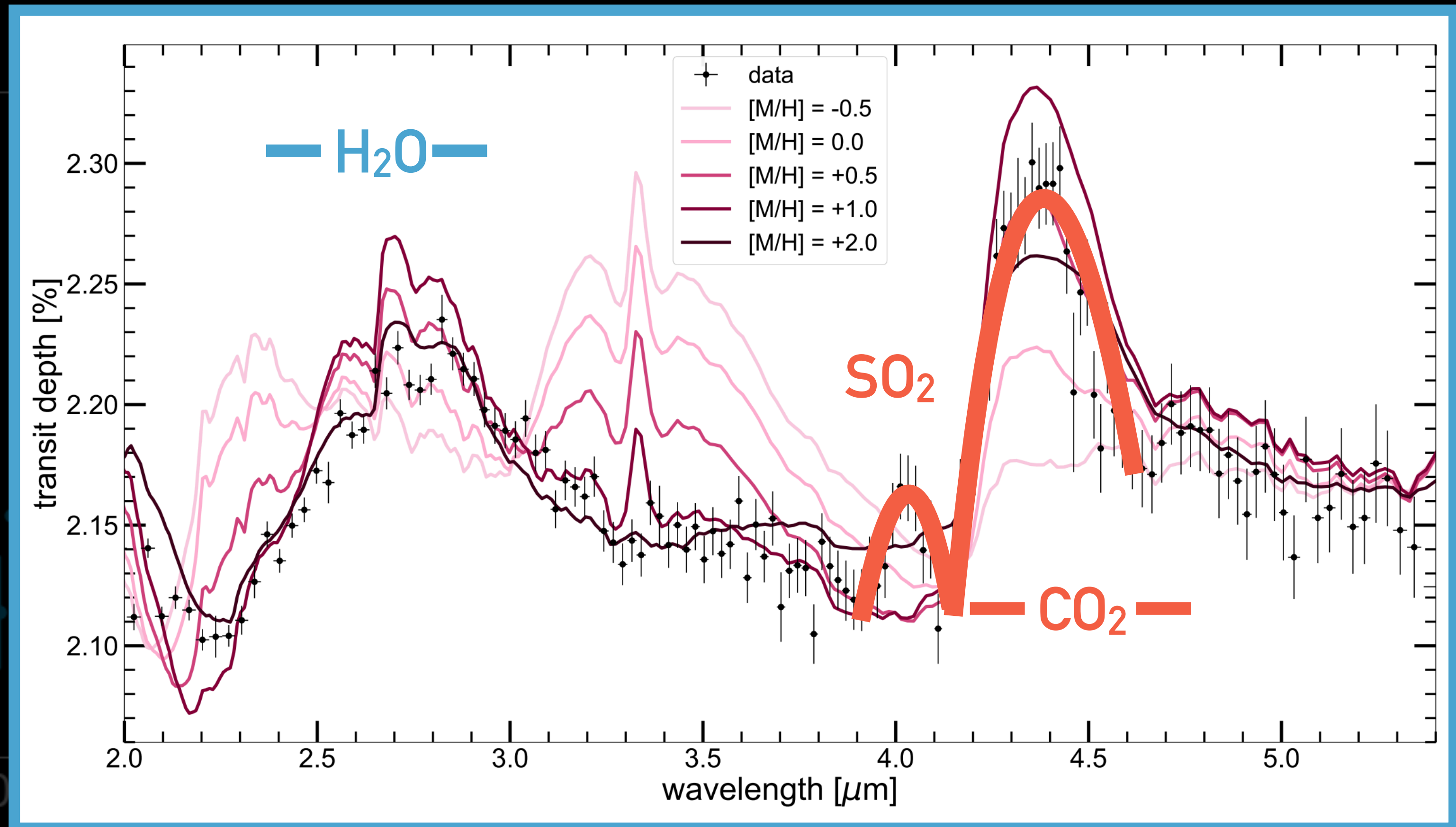
WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

89.3M_{TERRE}; 14.3R_{TERRE}; 1200 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

WASP-39b

(JUPITER CHAUD)

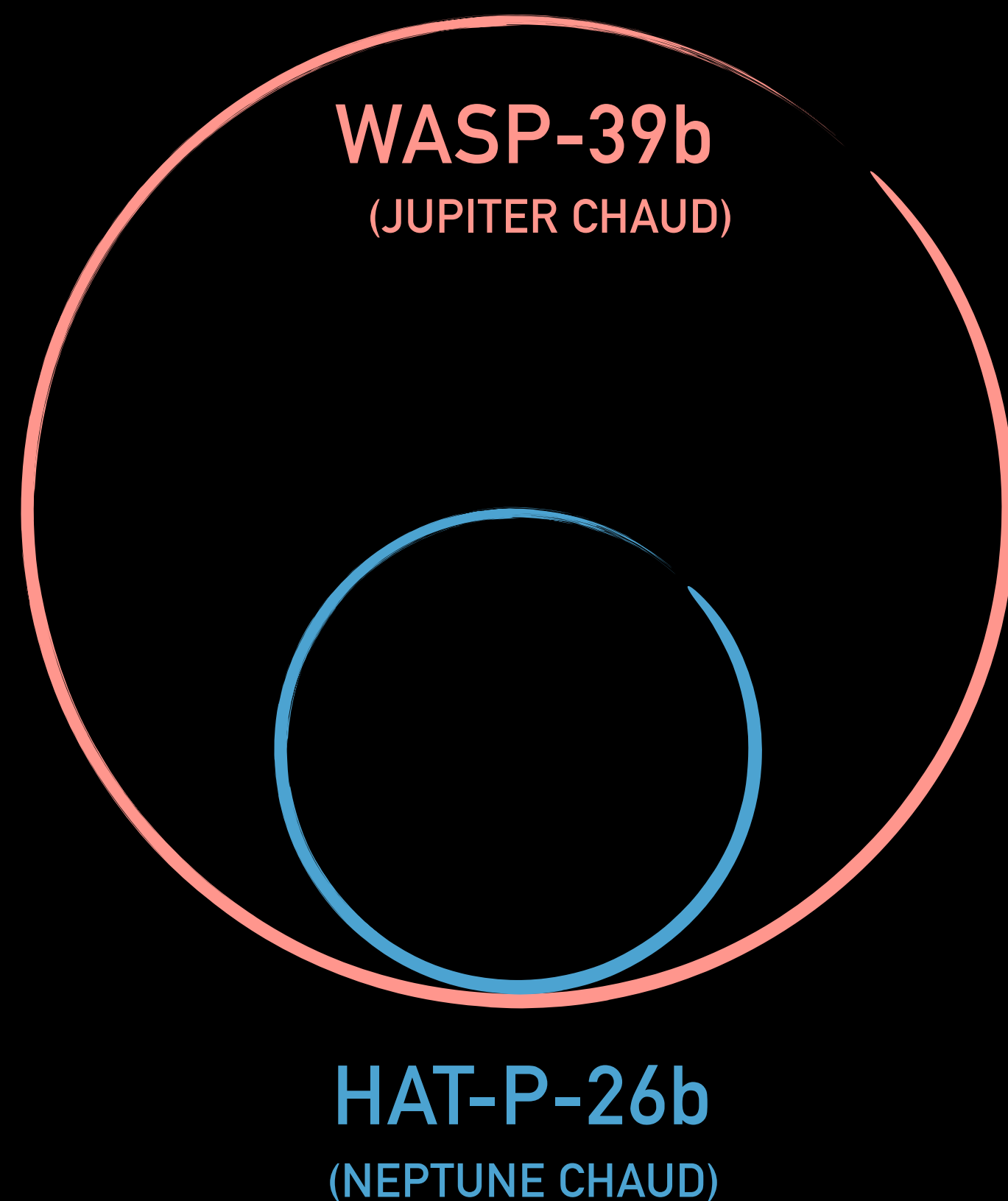


RUSTAMKULOV ET AL (2023, NATURE, 614, 659)



WASP-39 b cible du “Early Release Science Program”

$89.3M_{\text{TERRE}}$; $14.3R_{\text{TERRE}}$; 1200 K



HAT-P-26 b Gressier et “the GTO TST DREAMS team” (PI N. Lewis)

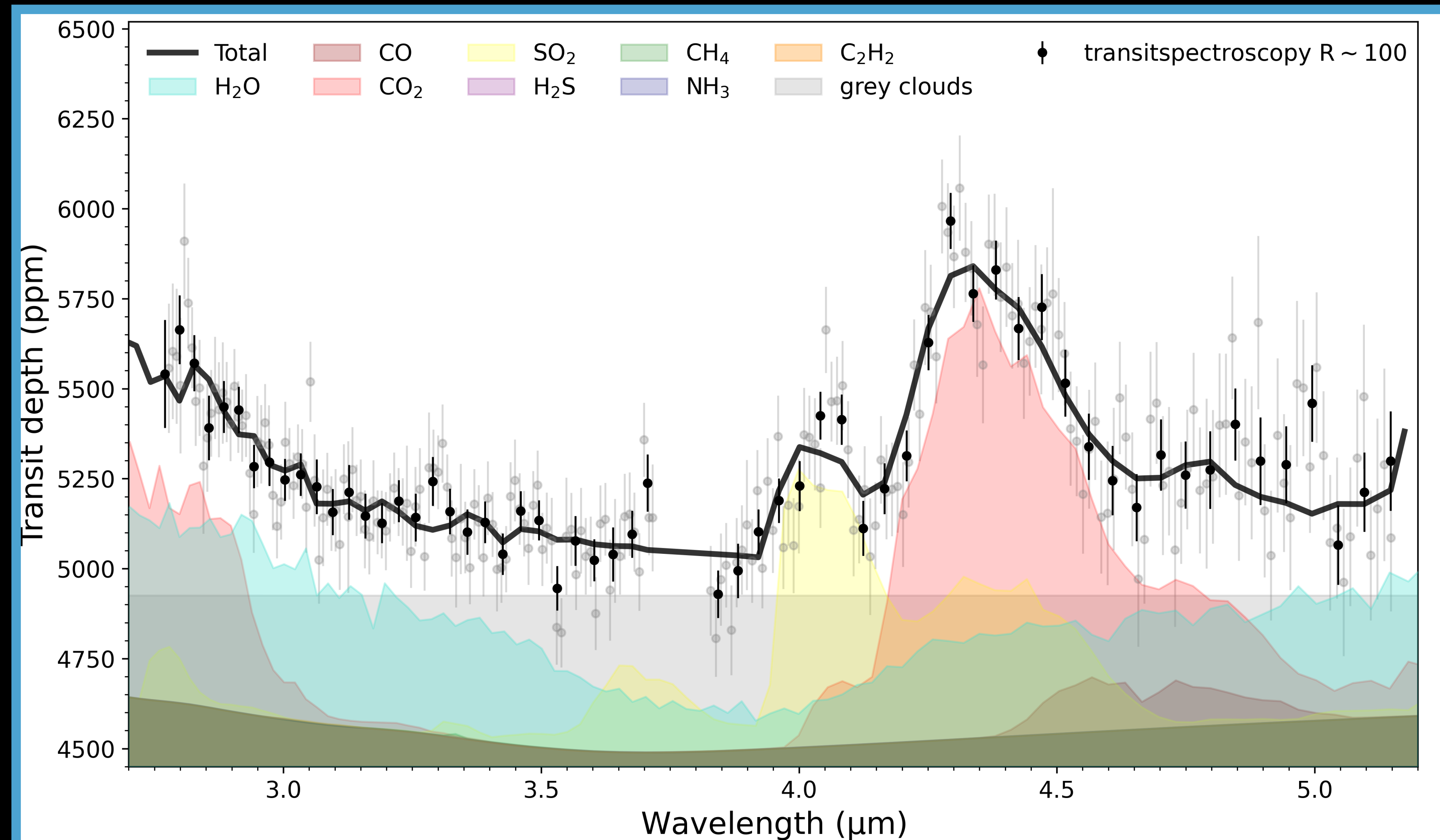
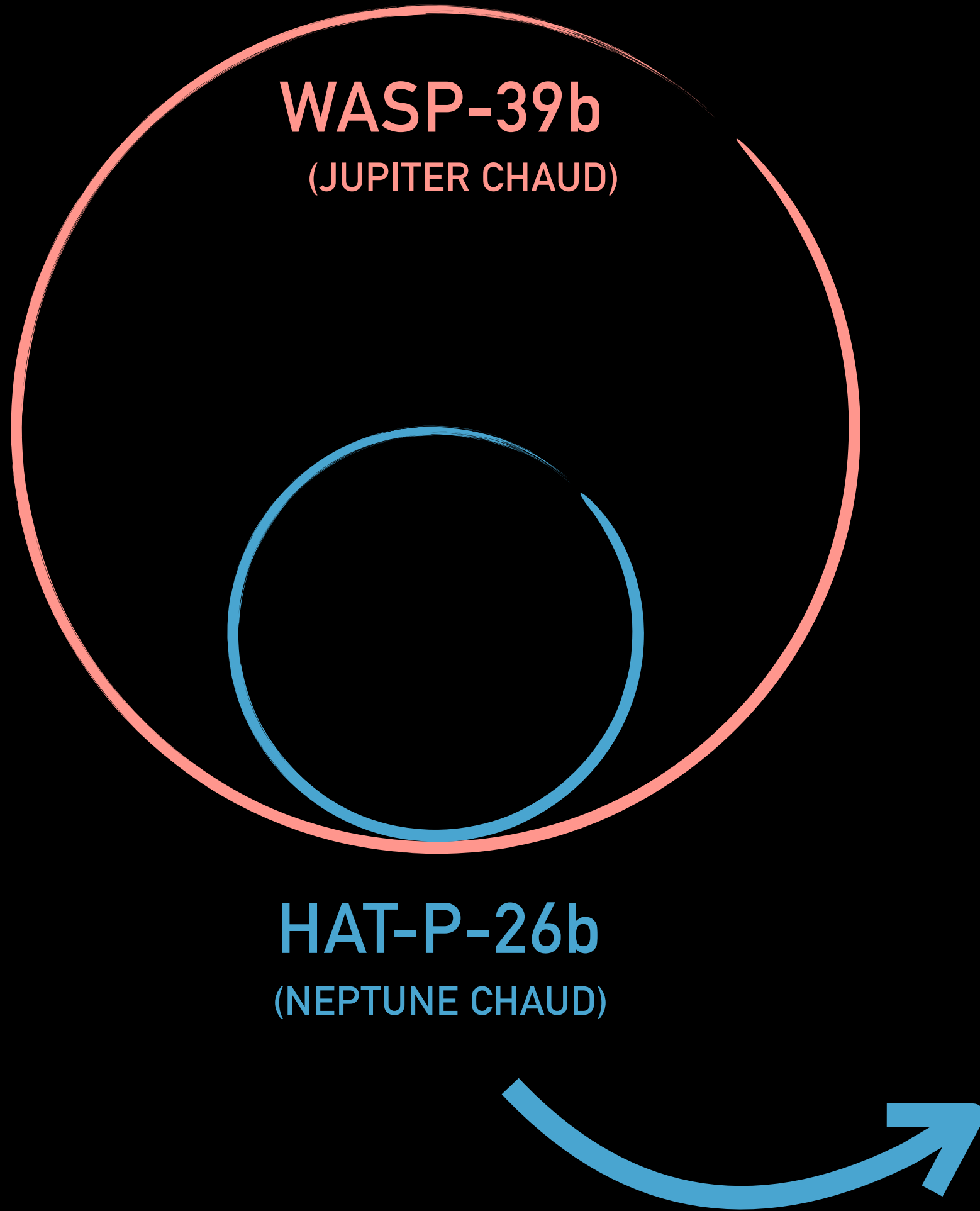


HAT-P-26 b Gressier et “the GTO TST DREAMS team”

18.7M_{TERRE}; 6.0R_{TERRE}; 1000 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

GRESSIER ET AL. IN REVIEW

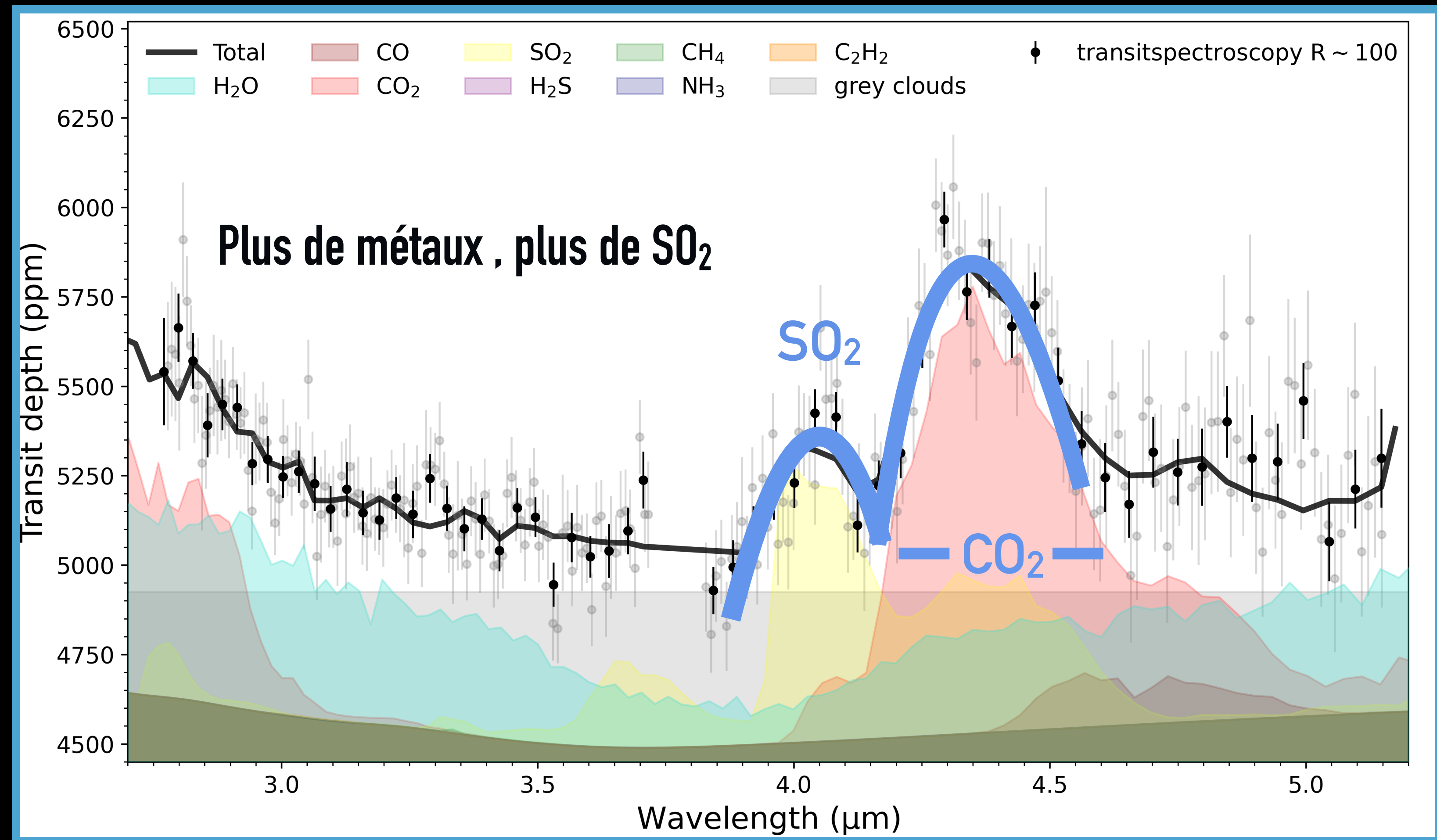
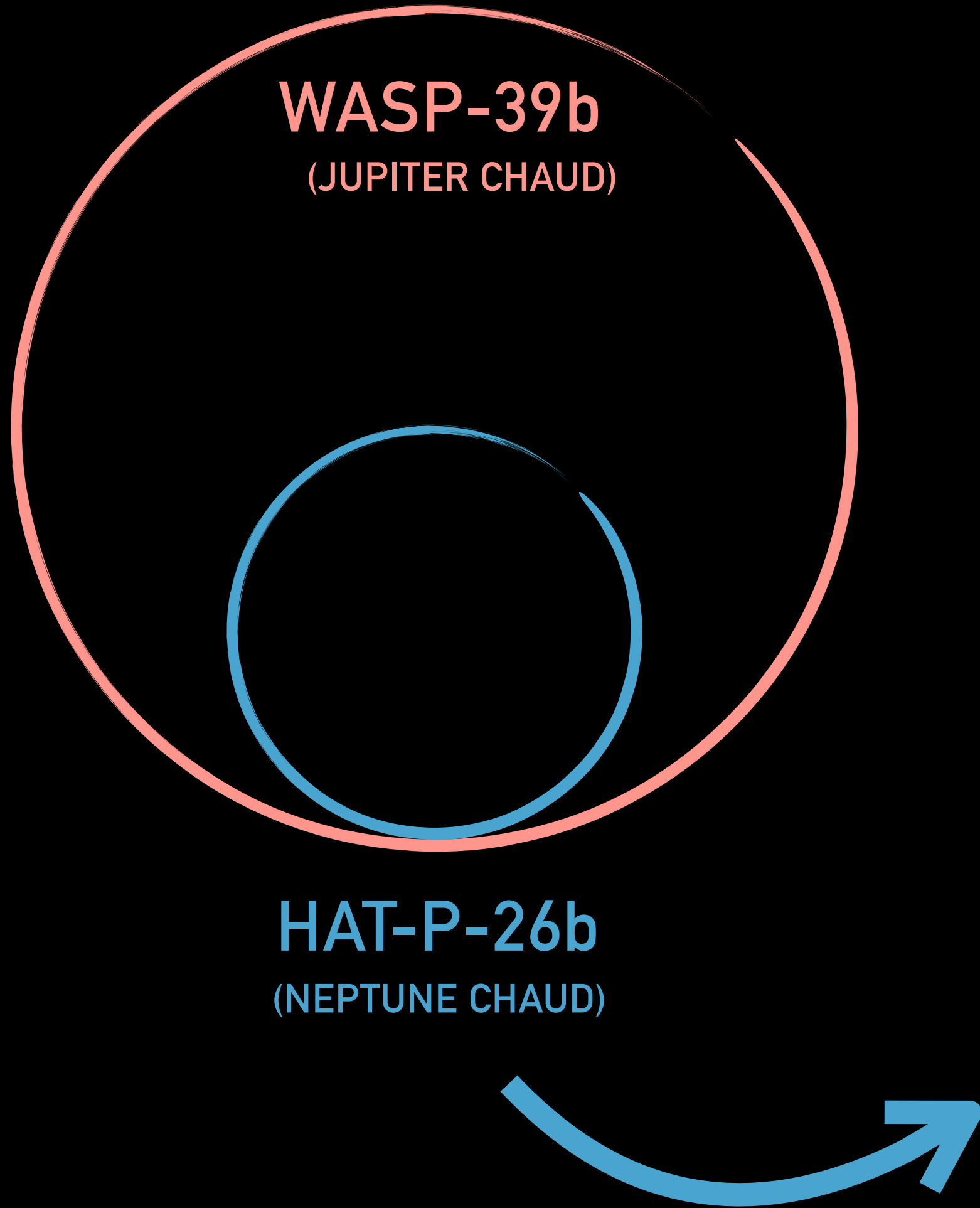


HAT-P-26 b Gressier et "the GTO TST DREAMS team"

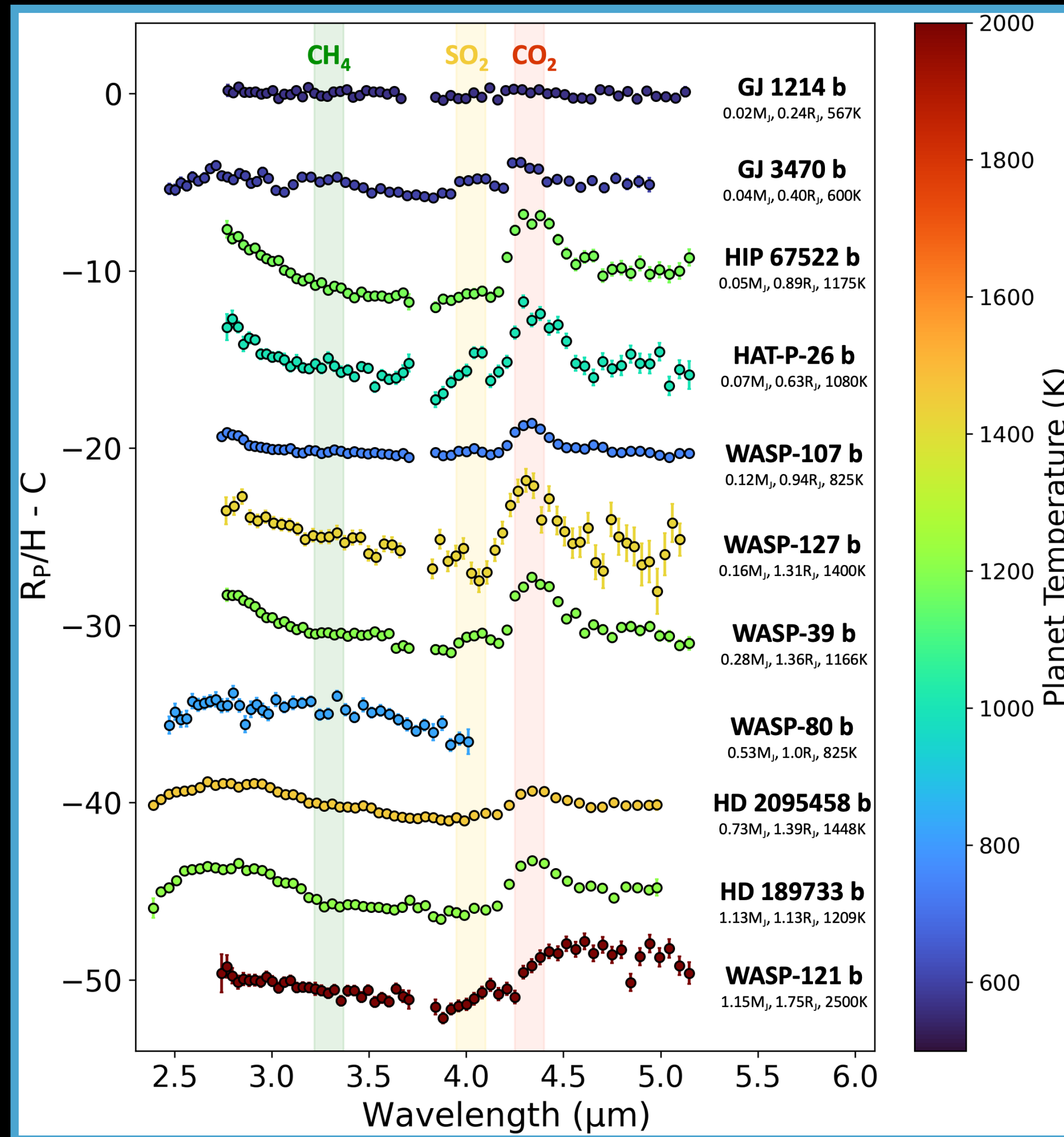
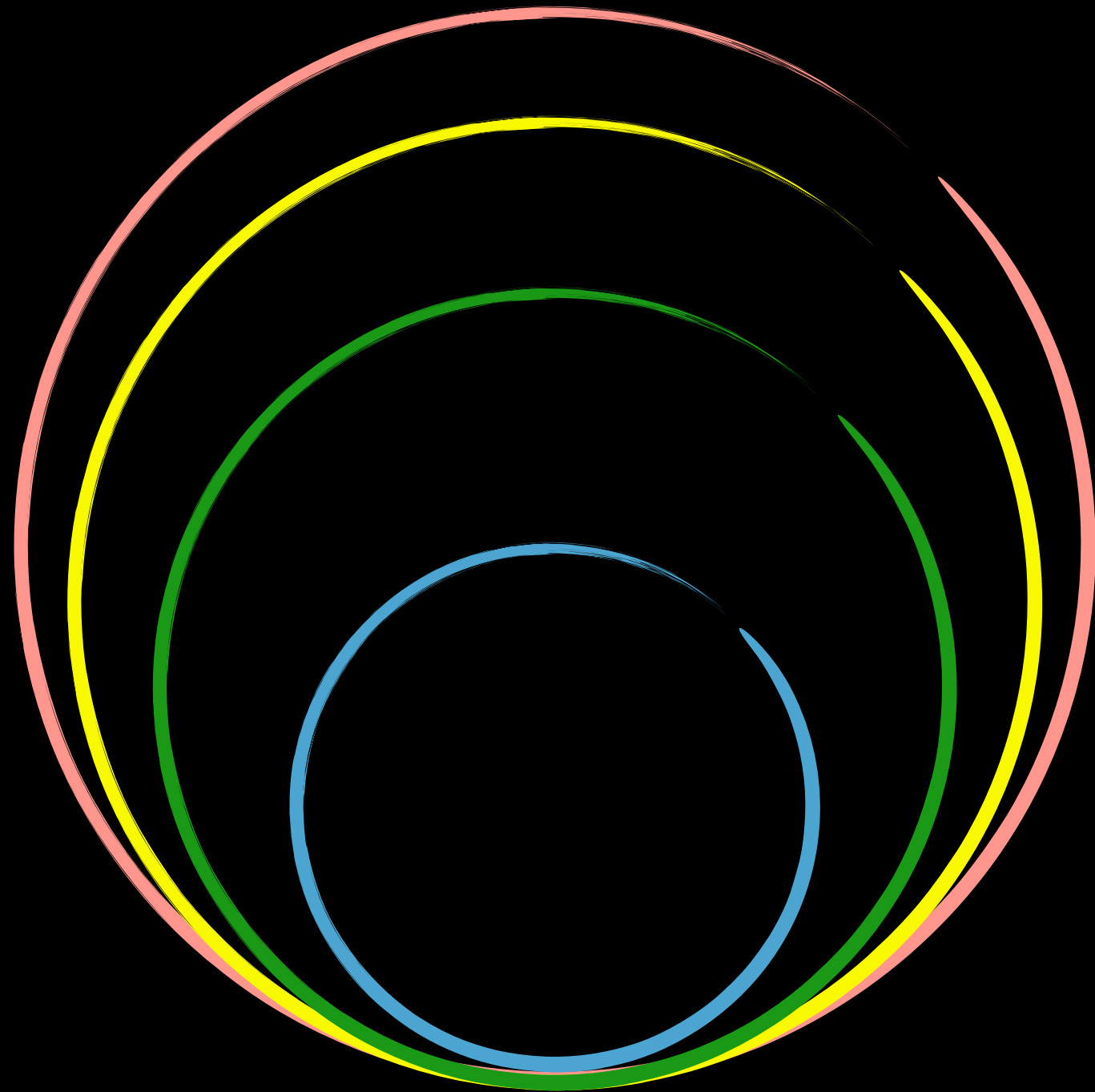
18.7M_{TERRE}; 6.0R_{TERRE}; 1000 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

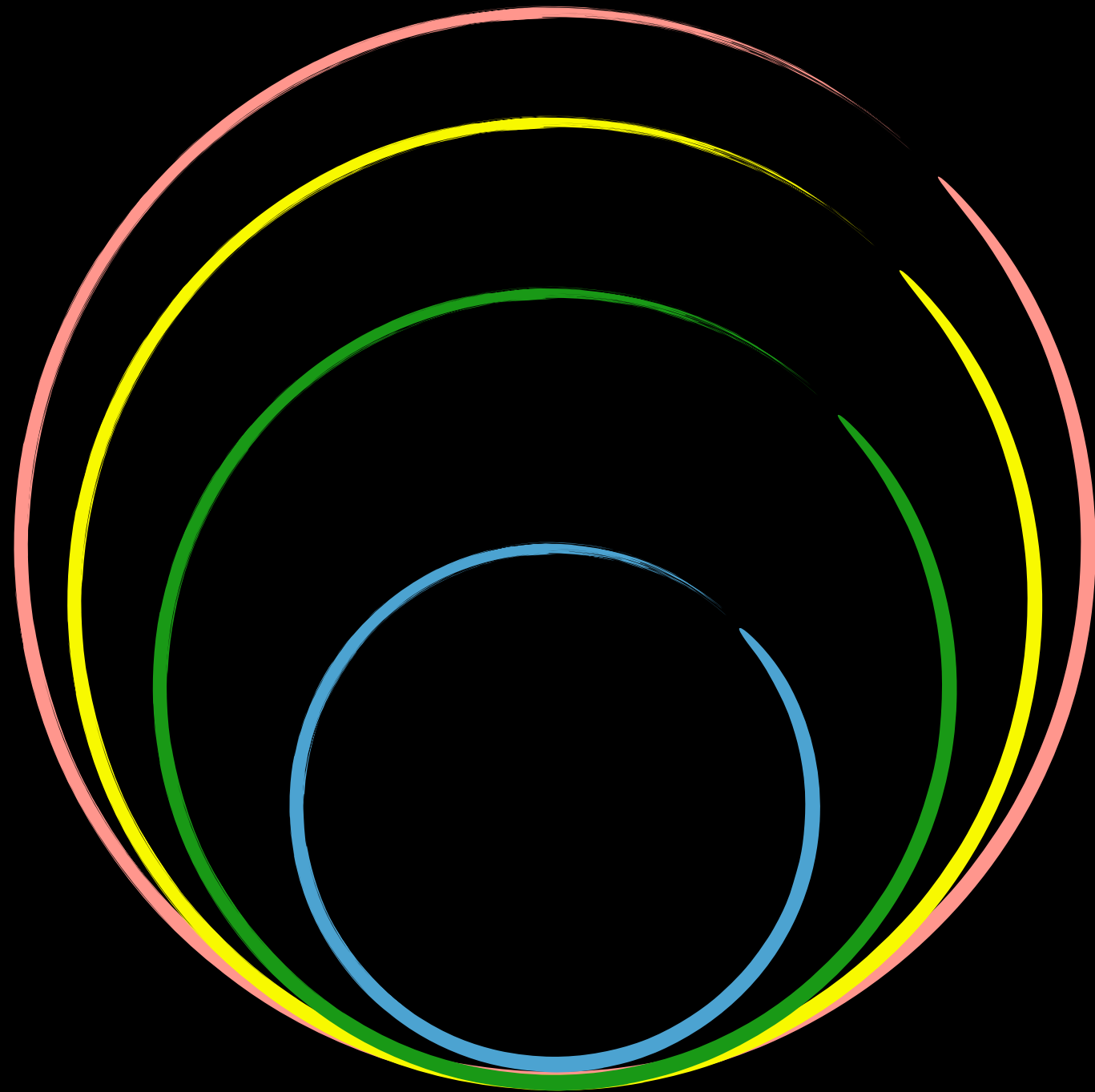
GRESSIER ET AL. IN REVIEW



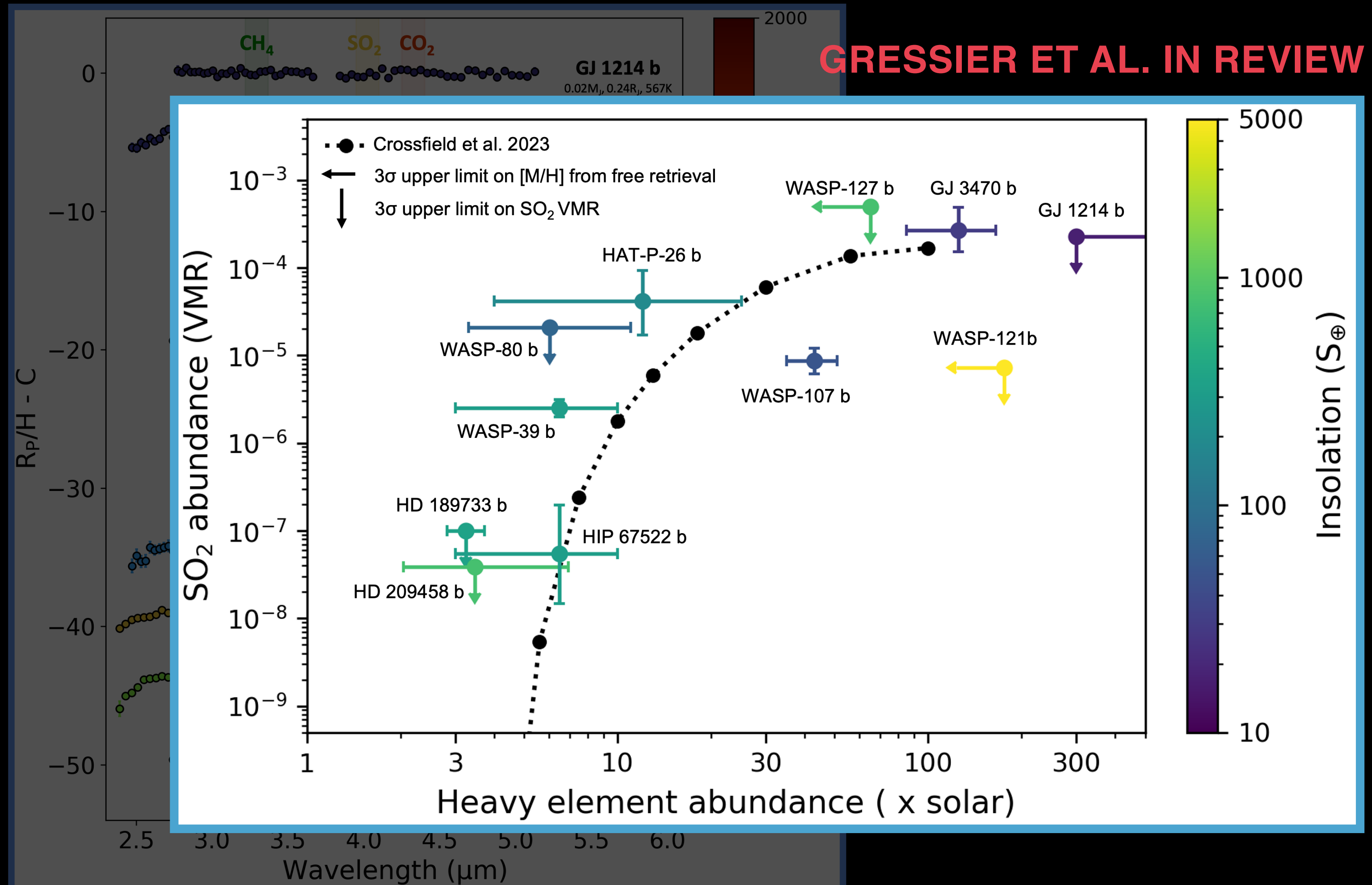
HAT-P-26 b Gressier et “the GTO TST DREAMS team”



HAT-P-26 b Gressier et “the GTO TST DREAMS team”



GRESSIER ET AL. IN REVIEW



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

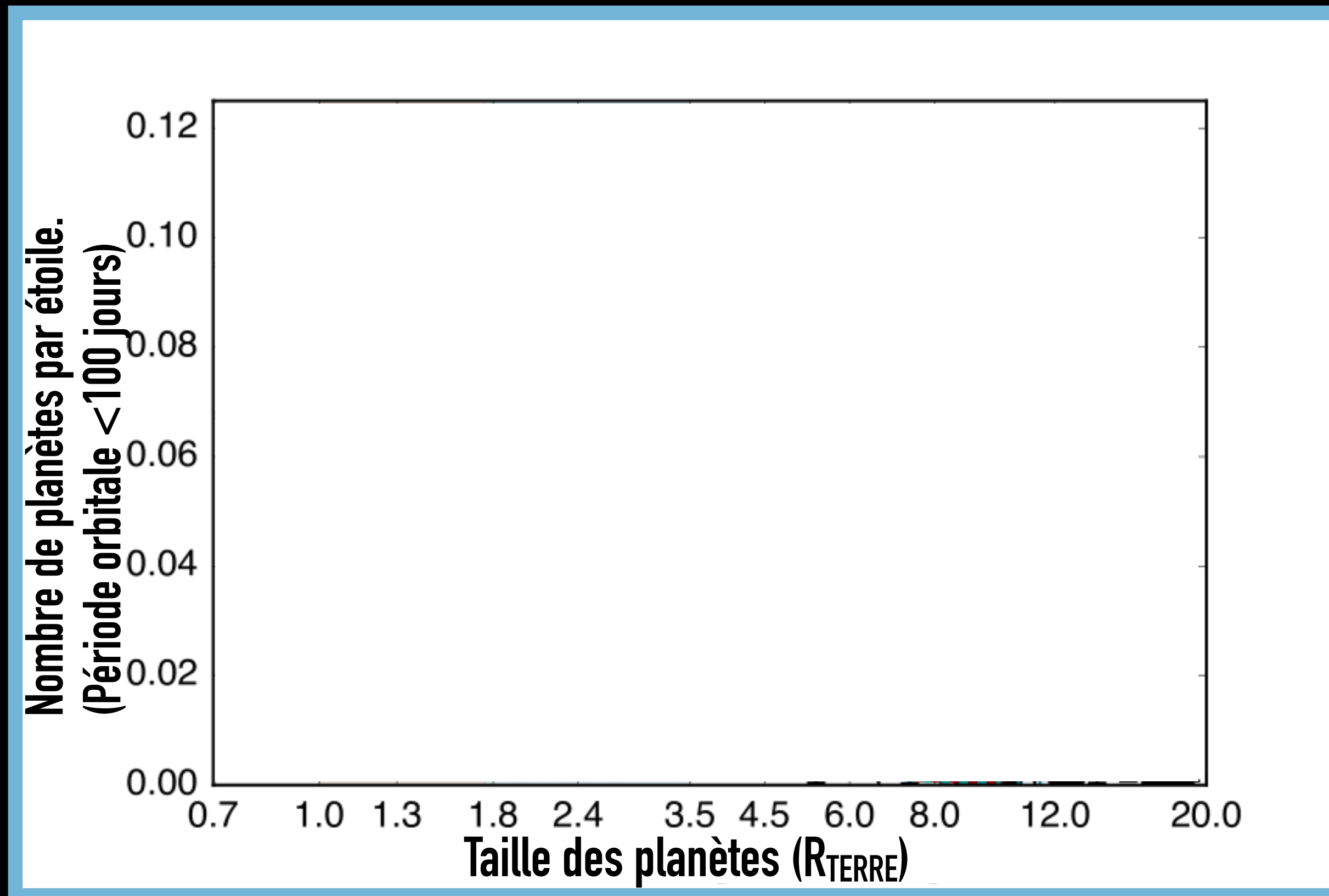
Le monde fou des Sub-Neptune



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

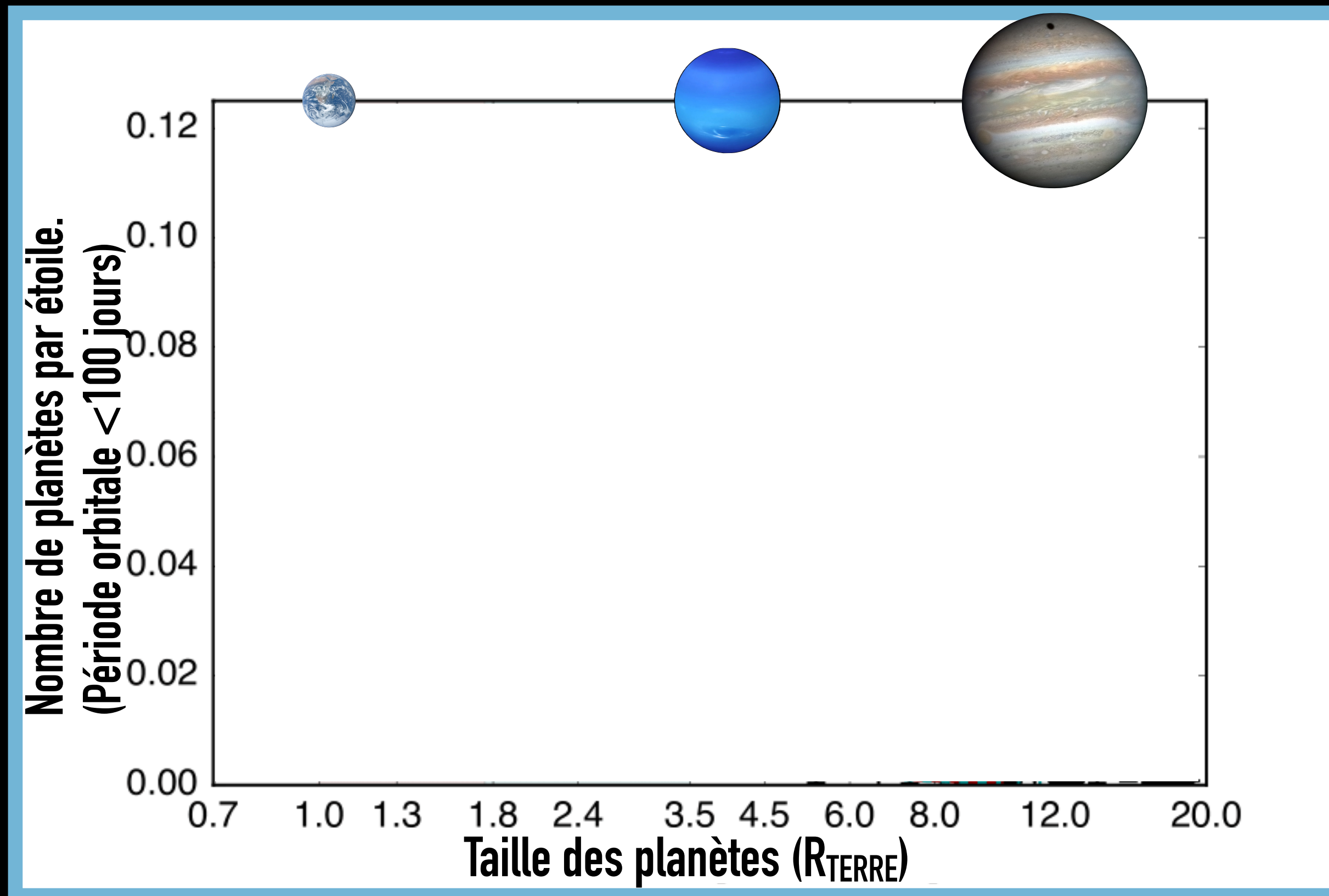
FULTON & PETIGURA (2017)



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

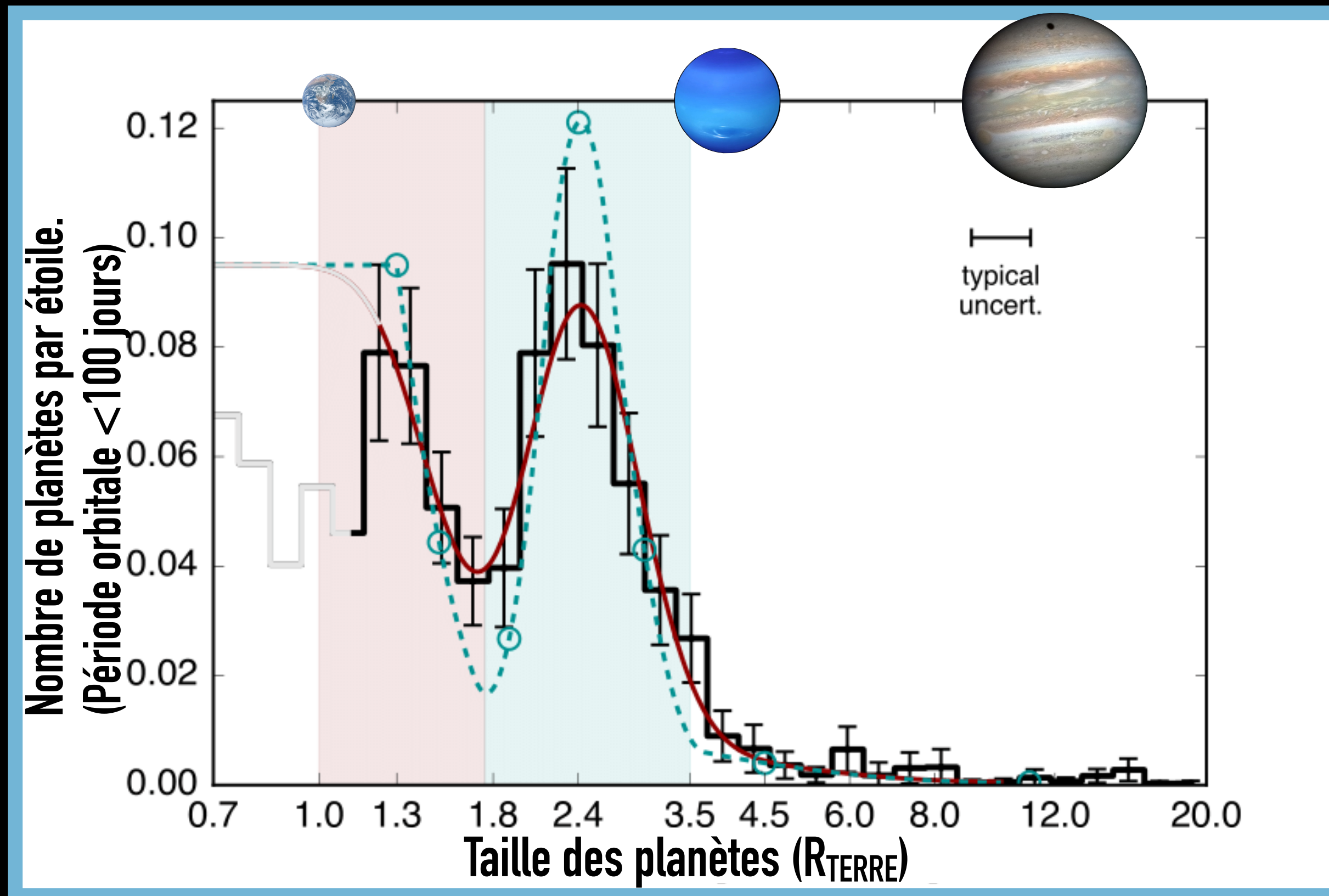
FULTON & PETIGURA (2017)



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

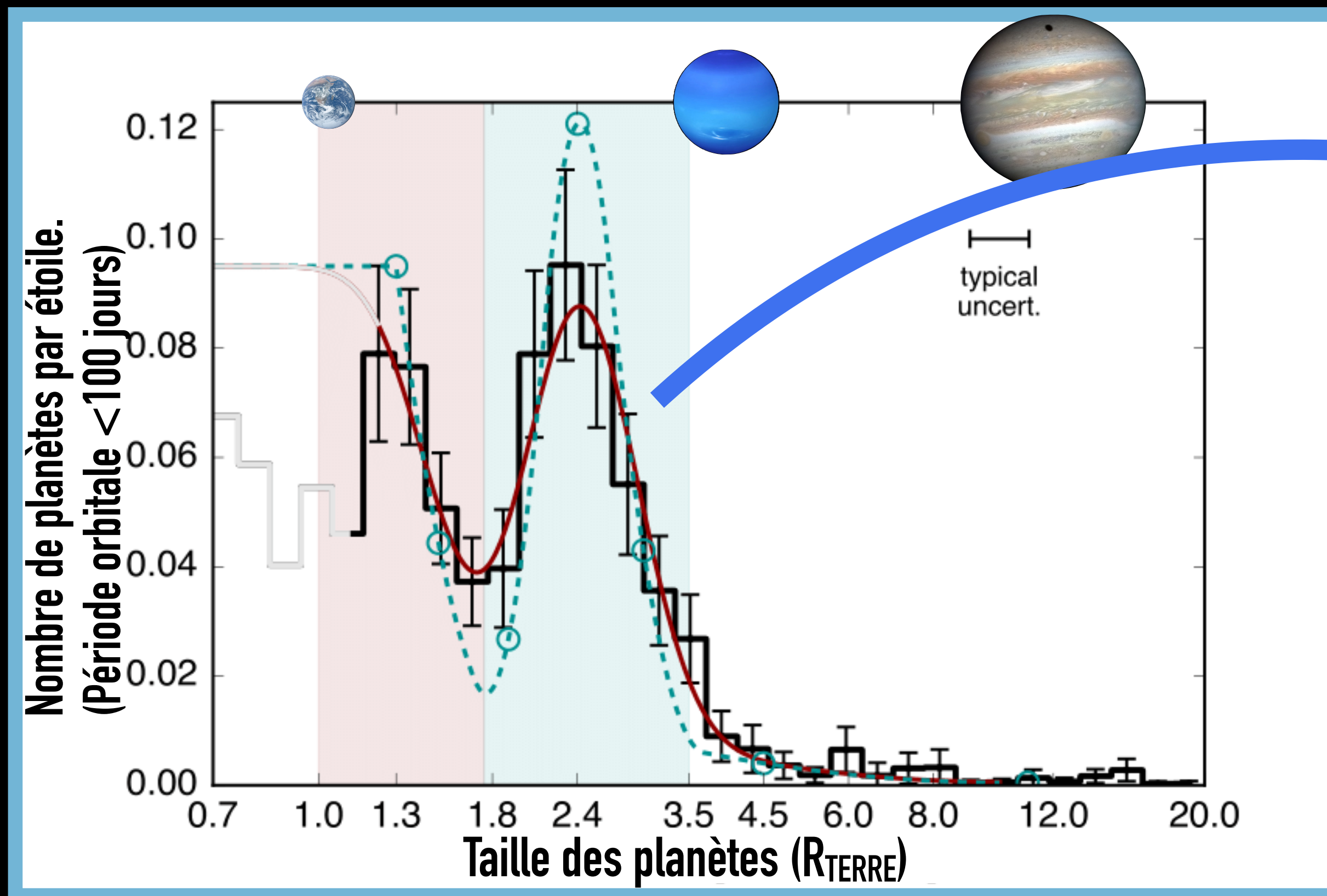
FULTON & PETIGURA (2017)



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

FULTON & PETIGURA (2017)

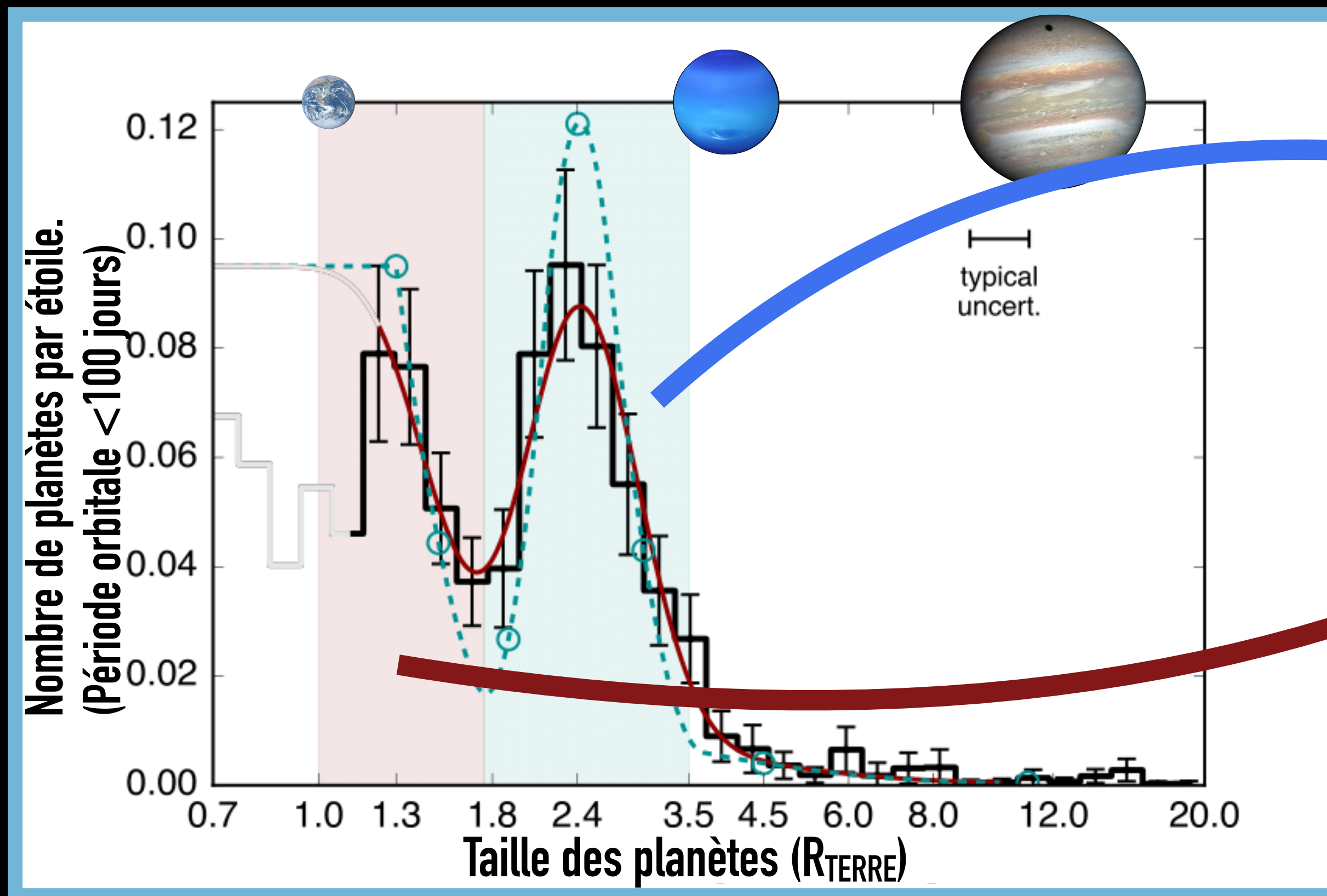


Peut-être des Mini-Neptune
(Dominée par H_2)

Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

FULTON & PETIGURA (2017)



Peut-être des Mini-Neptune
(Dominée par H_2)

Peut-être des Super-Terre
(Rocheuses)

Qu'en est-il des plus petites planètes ? Le monde fou des Sub-Neptune

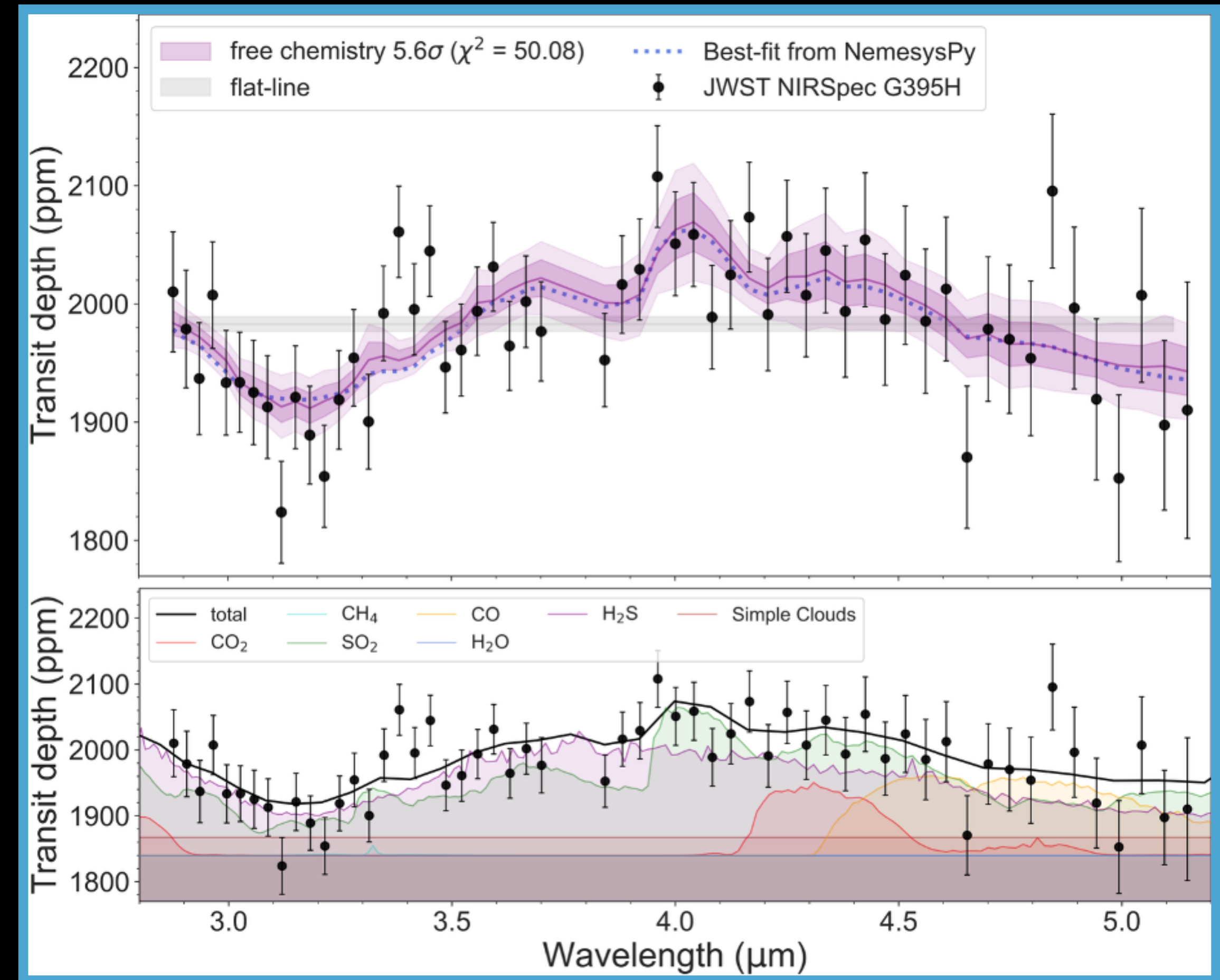
STAND UP
FOR
SCIENCE

Gressier et "the GTO NIRSPEC team" (PI : S. Birkmann)

LA "SUPER-TERRE" L98-59d

$2.0M_{\text{TERRE}}$; $1.6R_{\text{TERRE}}$; 400 K

GRESSIER, ET AL. (2024, APJL, 975, 10) GTO NIRSPEC



Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

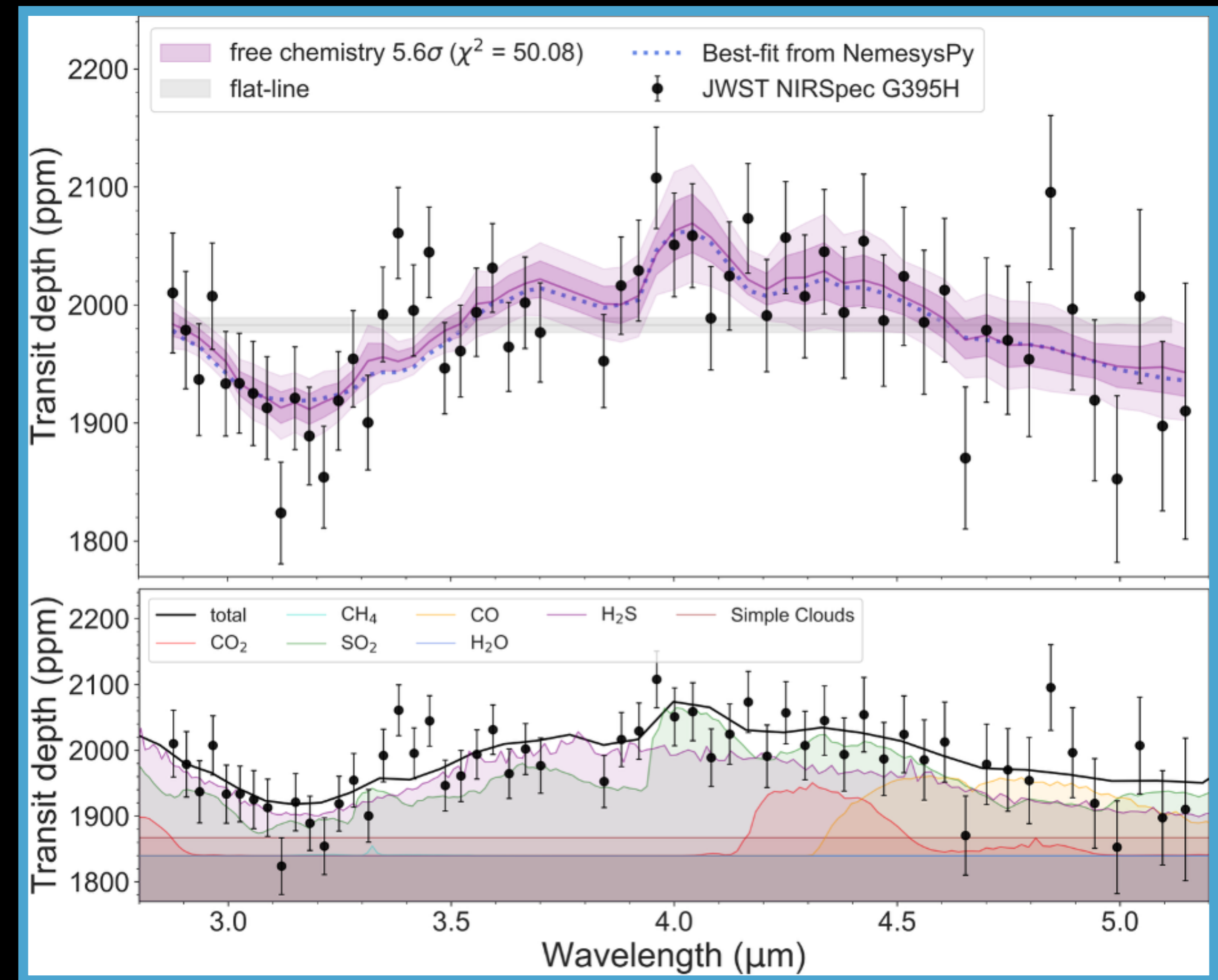
Gressier et “the GTO NIRSPEC team” (PI : S. Birkmann)

LA “**SUPER-TERRE**” **L98-59d**

$2.0M_{\text{TERRE}}$; $1.6R_{\text{TERRE}}$; 400 K

- Le spectre semble dominé par l'absorption de H_2S
- Rien de “terrestre” dans cette planète

GRESSIER, ET AL. (2024, APJL, 975, 10) GTO NIRSPEC



Qu'en est-il des plus petites planètes ? Le monde fou des Sub-Neptune

STAND UP
FOR
2025
SCIENCE

LA “SUB-NEPTUNE” K2-18b

$8.6M_{\text{TERRE}}$; $2.6R_{\text{TERRE}}$; 300 K



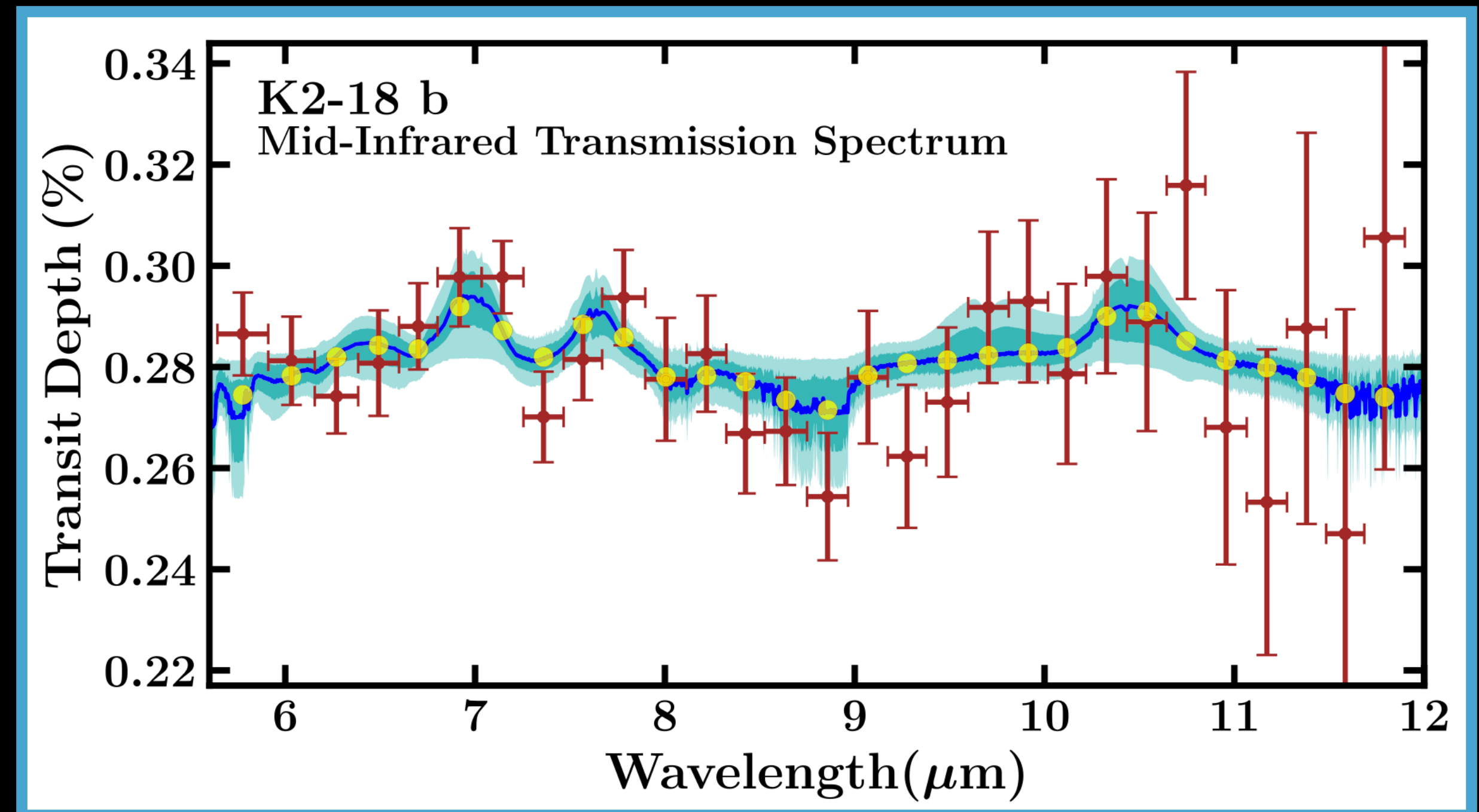
Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

LA "SUB-NEPTUNE" K2-18b

$8.6M_{\text{TERRE}}$; $2.6R_{\text{TERRE}}$; 300 K

- Spectre 0.6 - 12 microns
- Signatures spectrales détectées en infrarouge



MADHUSUDHAN ET AL (2025, APJL, 983, 2)

Qu'en est-il des plus petites planètes ?

Le monde fou des Sub-Neptune

LA "SUB-NEPTUNE" K2-18b

8.6M_{TERRE}; 2.6R_{TERRE}; 300 K

- Spectre 0.6 - 12 microns
- Signatures spectrales détectées en infrarouge

Prometteur pour les sub-Neptune tempérées

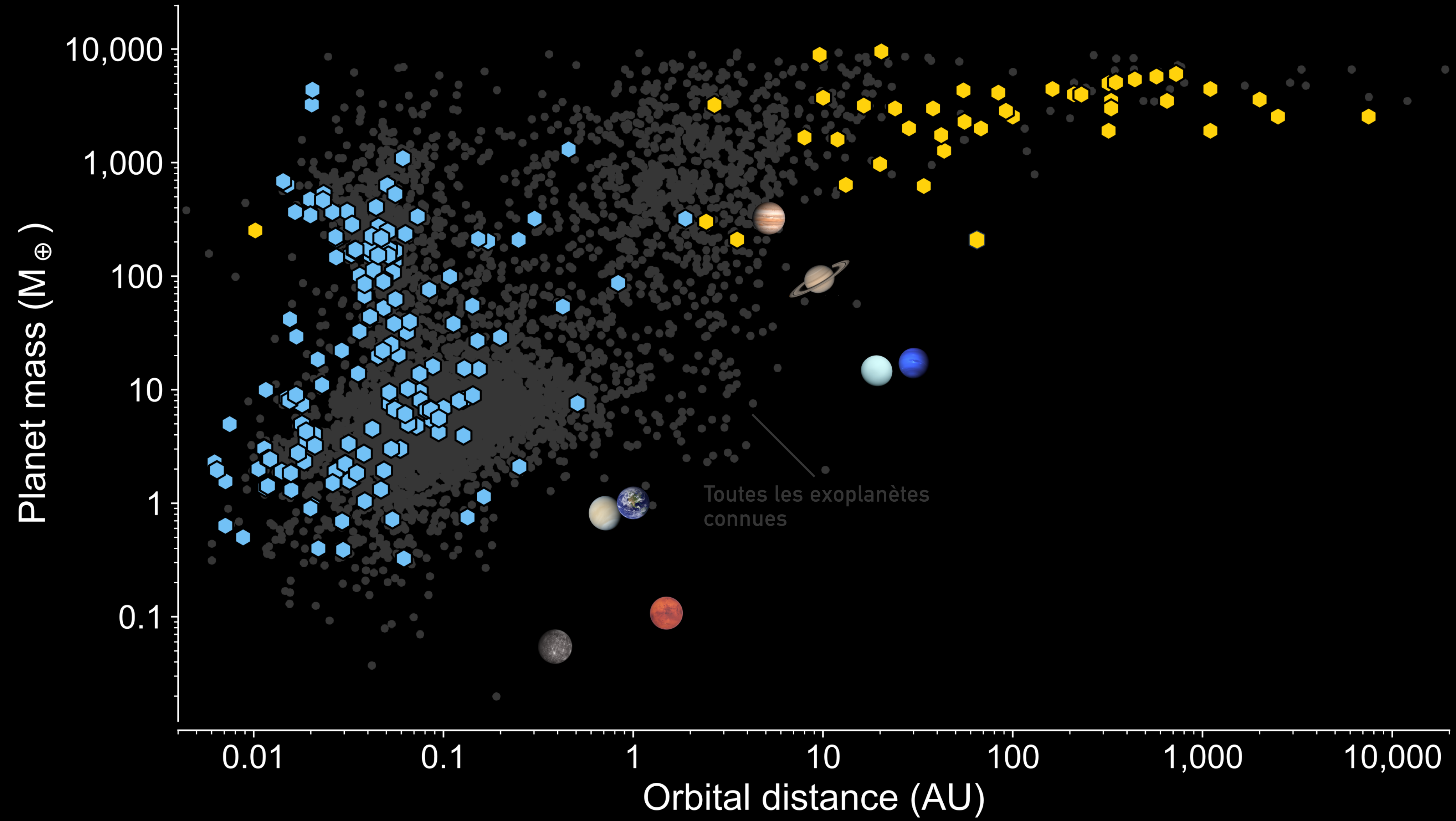


MADHUSUDHAN ET AL (2025, APJL, 983, 2)



EXOPLANÈTES AVEC JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE



PLOT CREDITS: ESPINOZA & PERRIN (2025)



2- bis La révolution JWST : les exoplanètes en imagerie directe



Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

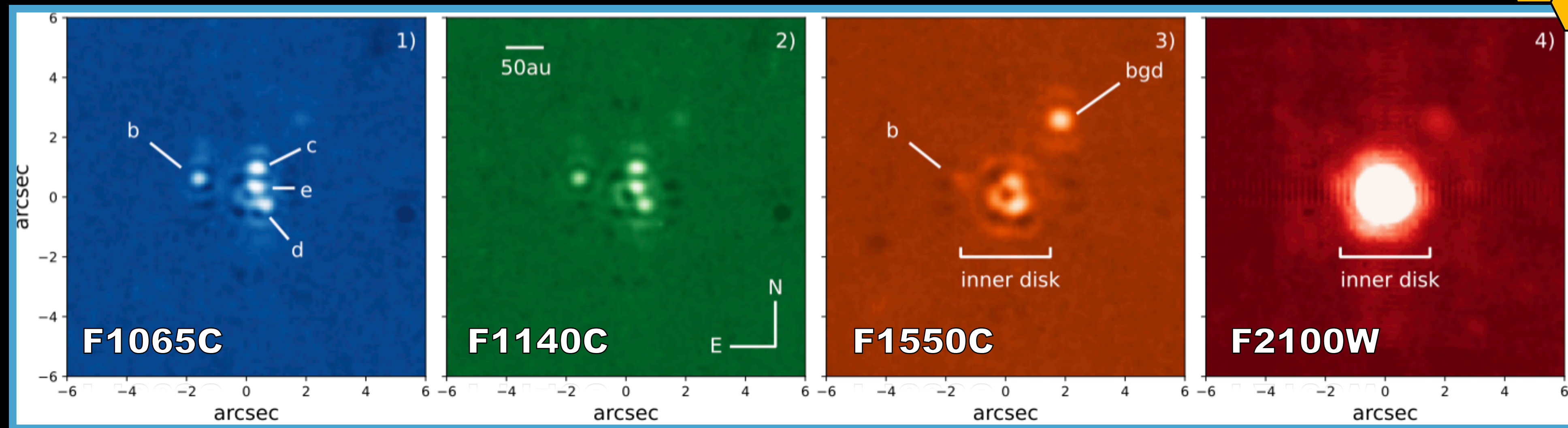
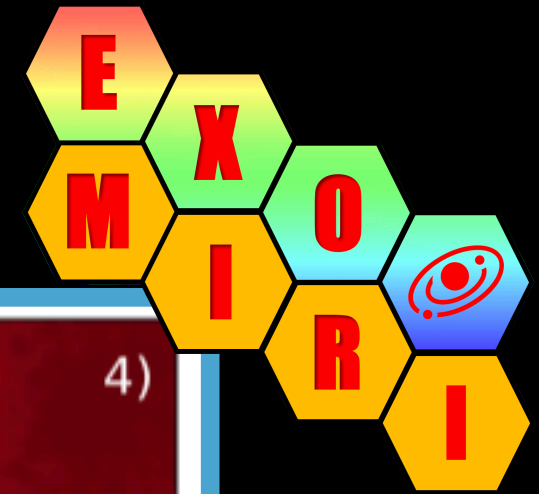


Mathilde Mâlin (STScI, mmalin@stsci.edu)



Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

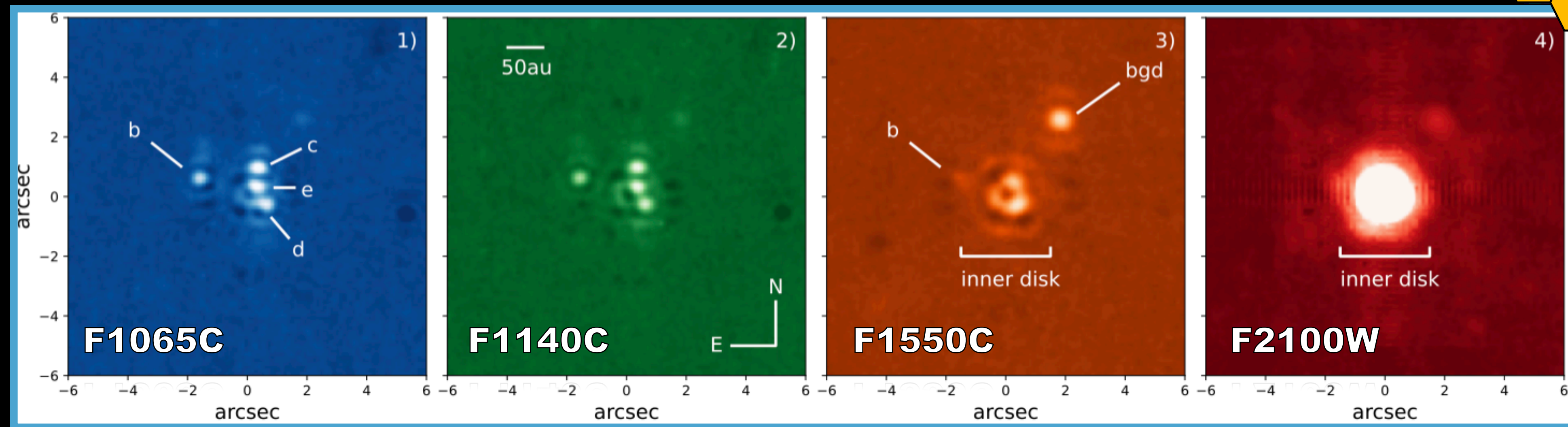
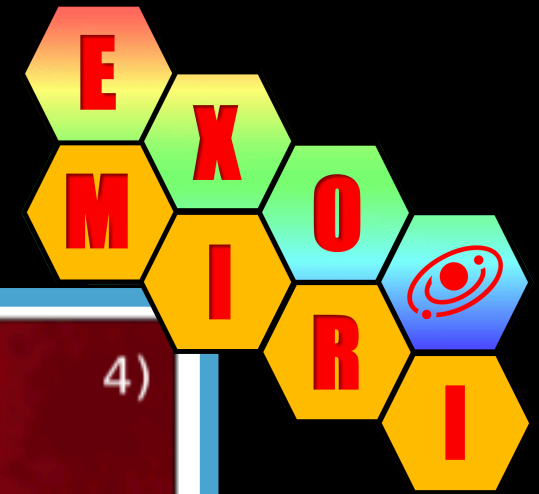
HR 8799 Boccaletti, Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”



BOCCALETTI, MÂLIN ET AL (2024, A&A, V686, A33,) GTO MIRI

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

HR 8799 Boccaletti, Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”

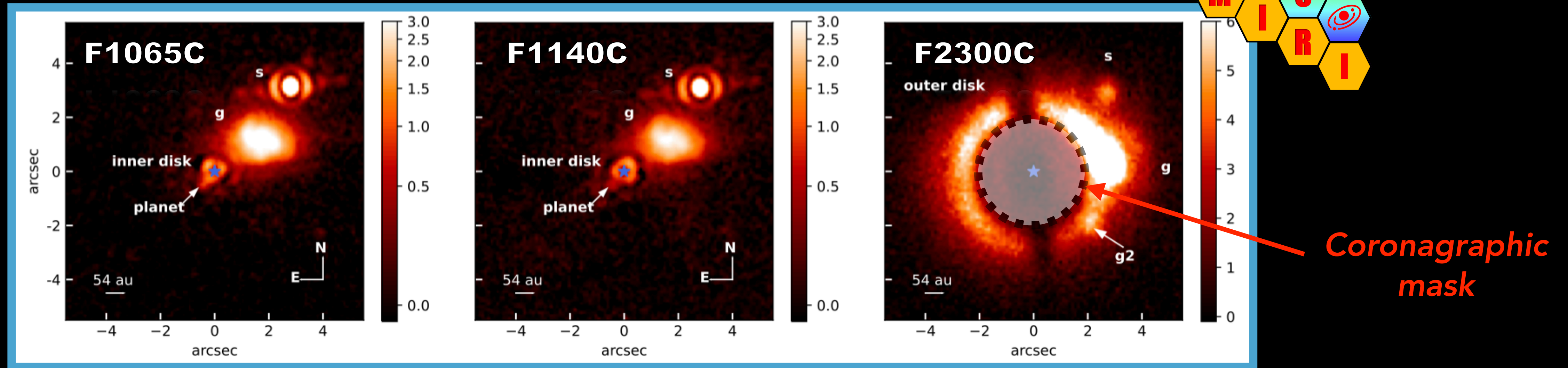


BOCCALETTI, MÂLIN ET AL (2024, A&A, V686, A33,) GTO MIRI

Premières images d'exoplanètes > 4 μm

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

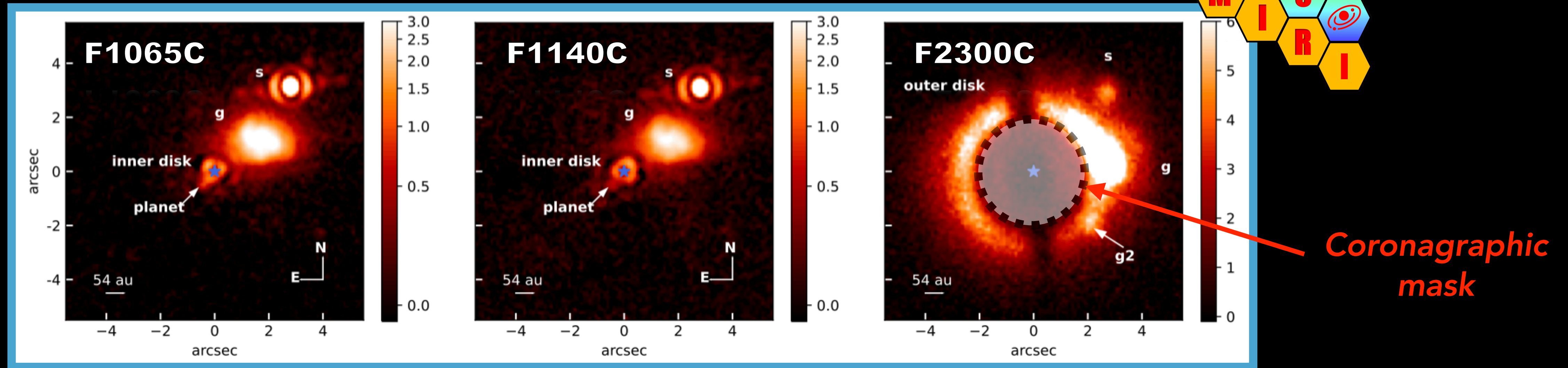
HD 95086 Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”



MÂLIN, ET AL (2024, A&A, V690, A316,) GTO MIRI

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

HD 95086 Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”



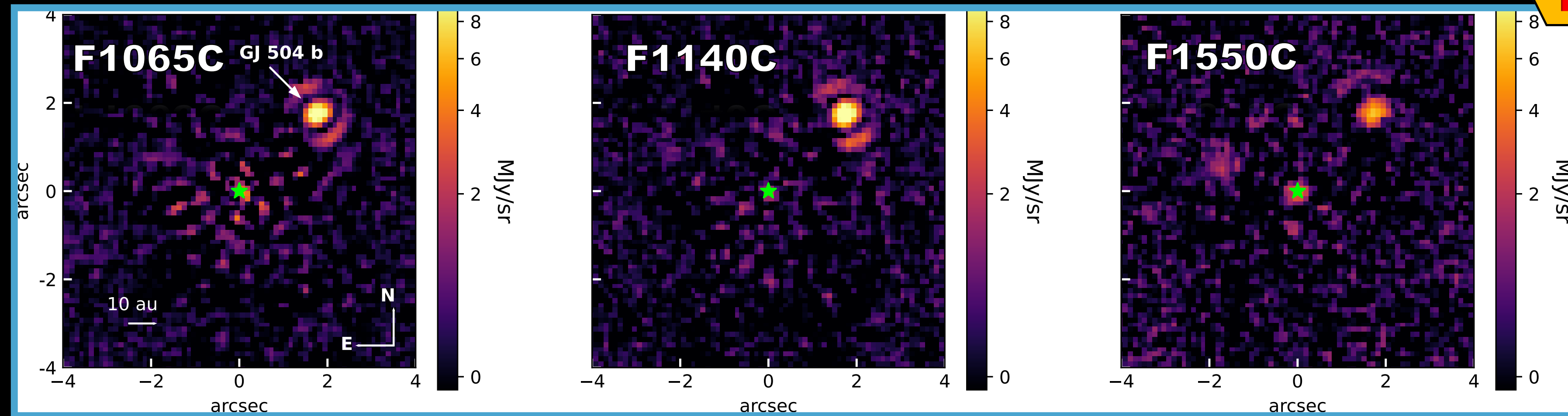
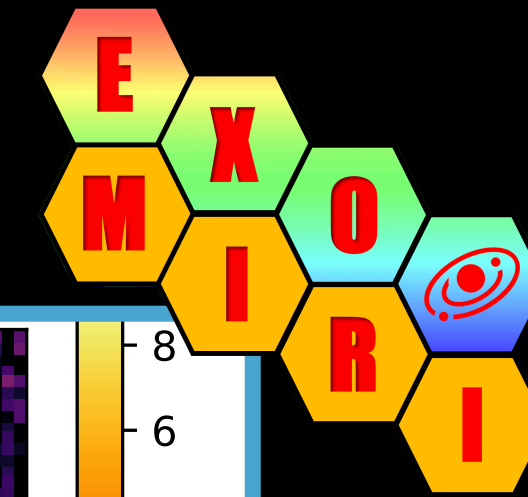
MÂLIN, ET AL (2024, A&A, V690, A316,) GTO MIRI

Détection des disques analogue de la ceinture d'astéroïde et de Kuiper dans le système solaire

Nombreuses galaxies d'arrière plan visibles

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

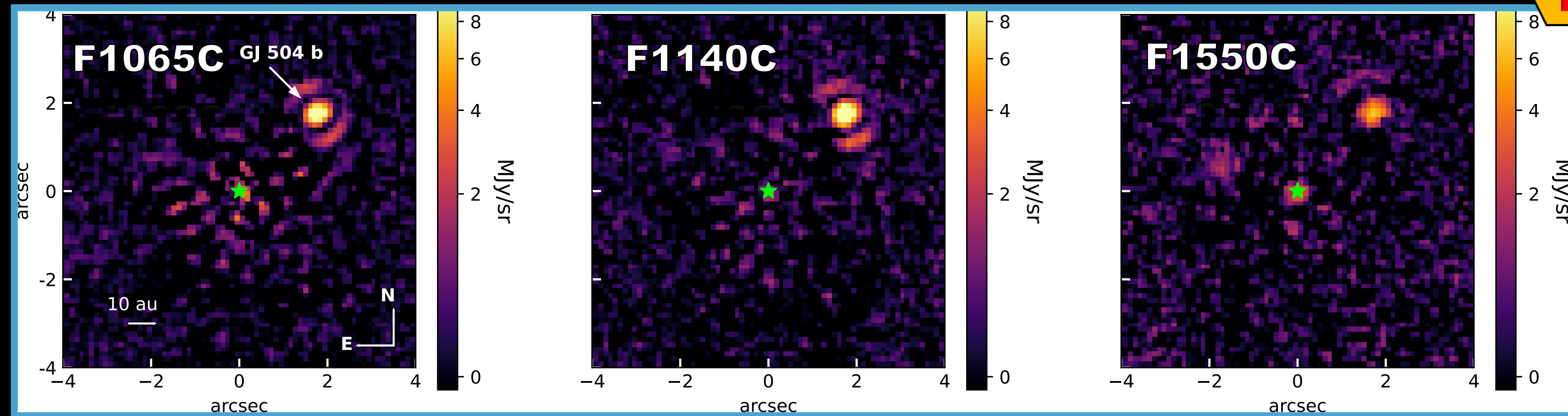
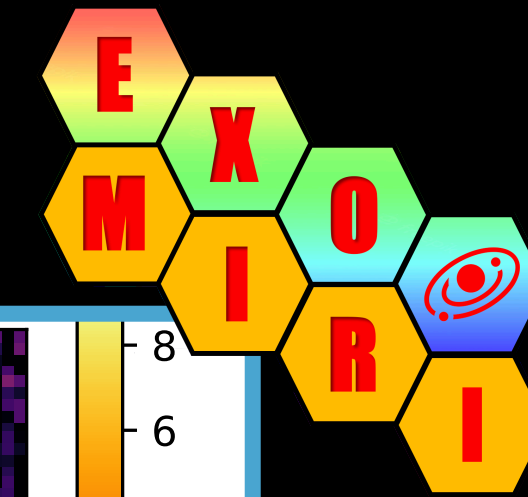
GJ 504 Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”



MÂLIN, ET AL (2025, A&A, V693, A315,) GTO MIRI

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

GJ 504 Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”

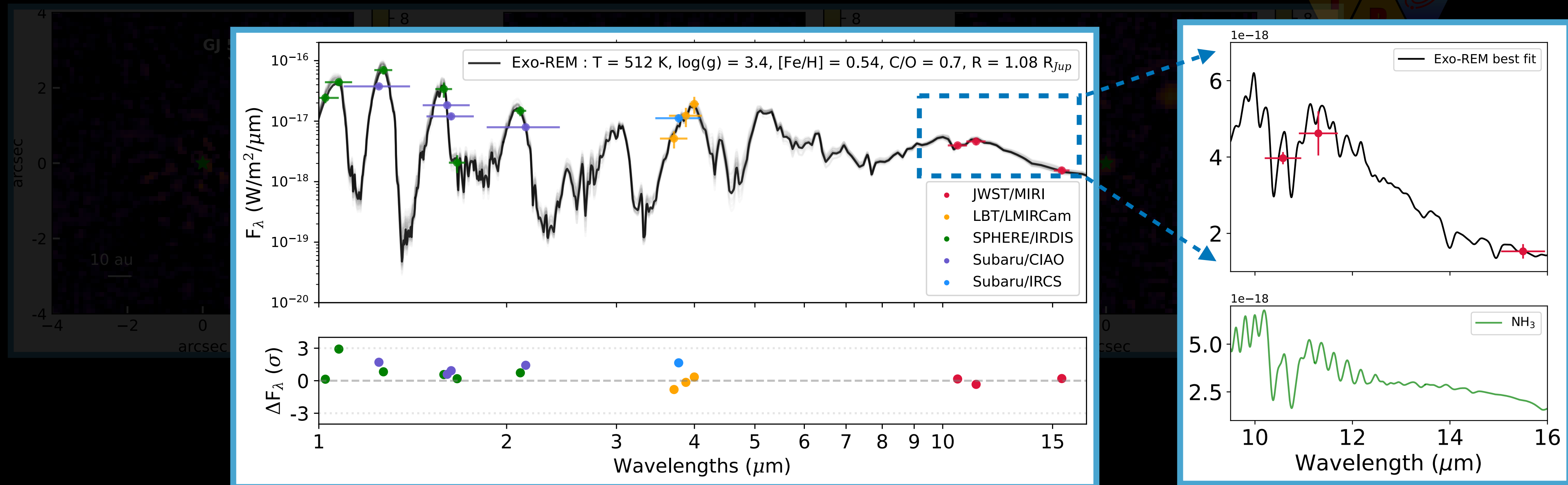


MÂLIN, ET AL (2025, A&A, V693, A315,) GTO MIRI

Mesures précises de la luminosité, température et rayon, en accord avec les prédictions des modèles d'évolution planétaires

Premiers systèmes exoplanétaires imagés avec JWST

GJ 504 Mâlin et “the ExoMIRI GTO team”



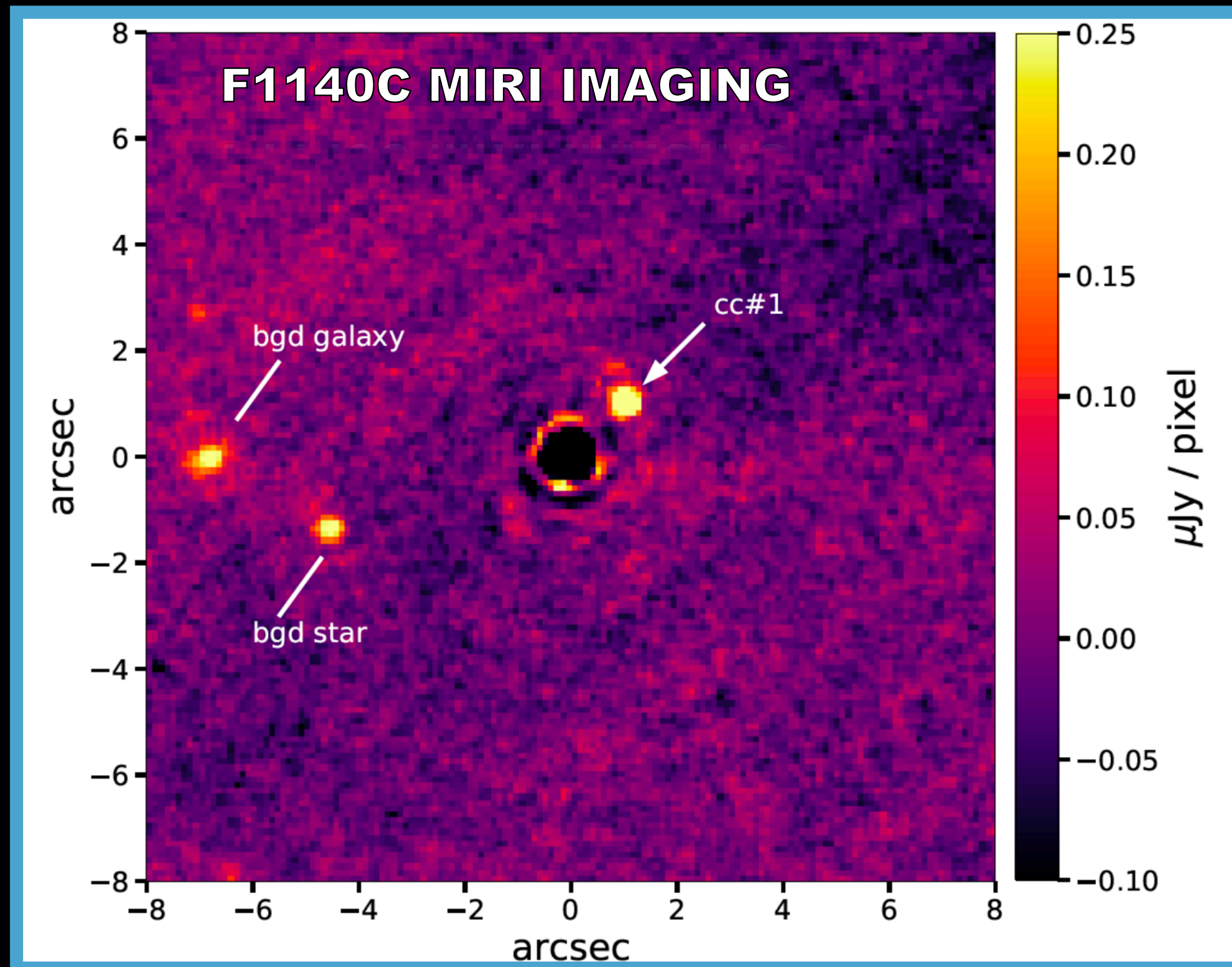
Premières detection de NH₃ : observations d'exoplanètes froides <500K

3– Le future des exoplanètes en imagerie directe avec JWST



Etendre l'espace des exoplanètes connues :
détection d'exoplanètes froides, de faibles
masses, dans des **systèmes plus matures**

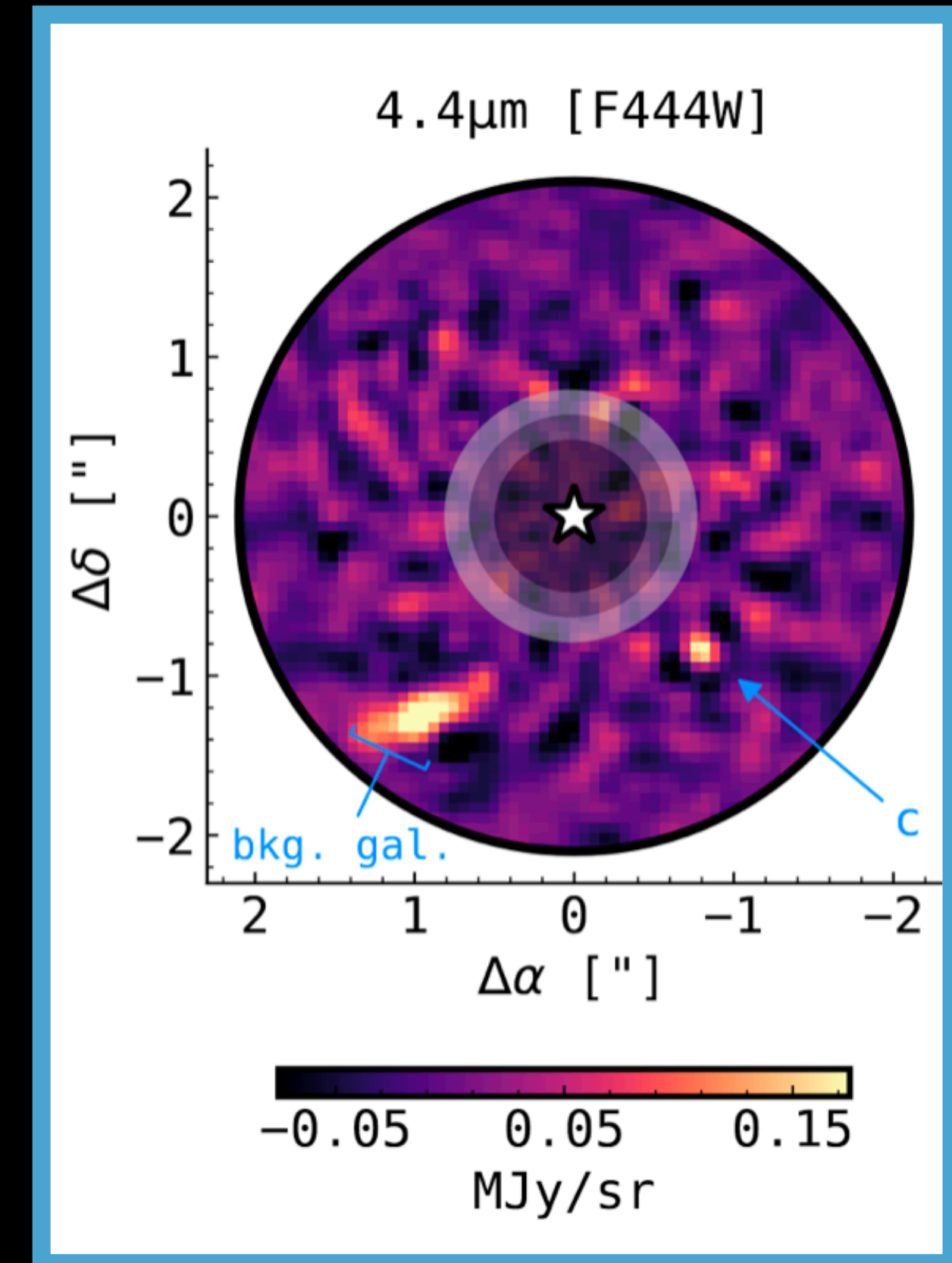
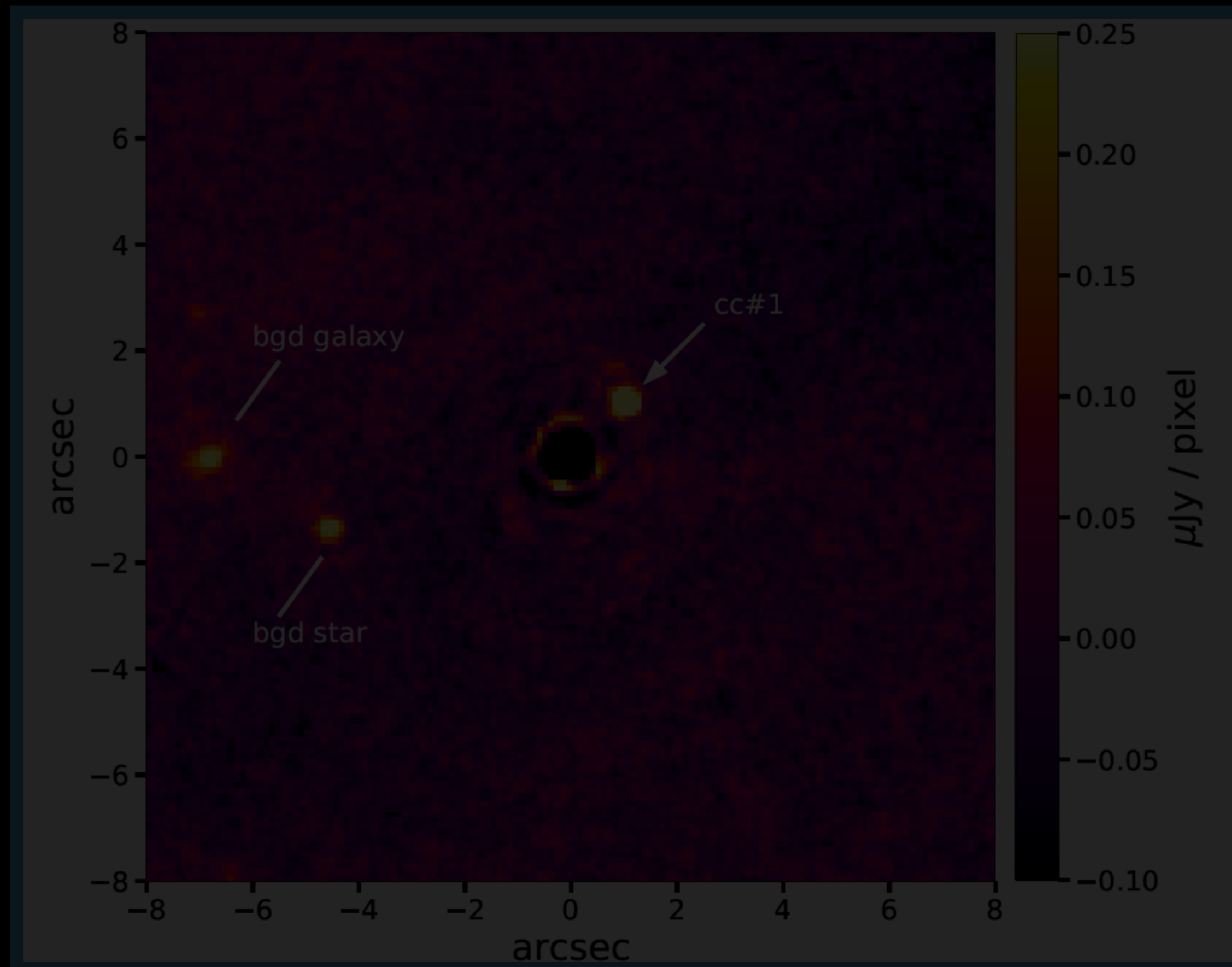




Planète la **moins massive** imagée
 $M = 0.3 M_{\text{Jup}}$ ($300 M_{\text{Earth}}$), située à 52 ua de l'étoile hôte

14 Her c

GAGLIUFFI, BALMER ET AL (2025, SUB APJL)



Planète détectée en vitesses radiales
Imagée avec JWST plus froide et plus âgée

- 
- 1 - De nombreux programmes NIRCam sont en cours pour **détecter des planètes**
 - 2 - Programmes MIRI ciblent **les disques jeunes** pour identifier d'éventuels **protoplanètes**
 - 3 - Développement de nouvelles méthodes **en spectro-imagerie haute résolution** avec NIRSpect (IR proche) et MIRI (IR moyen) **pour caractériser les atmosphères**

3– Le future des exoplanètes en transit avec JWST

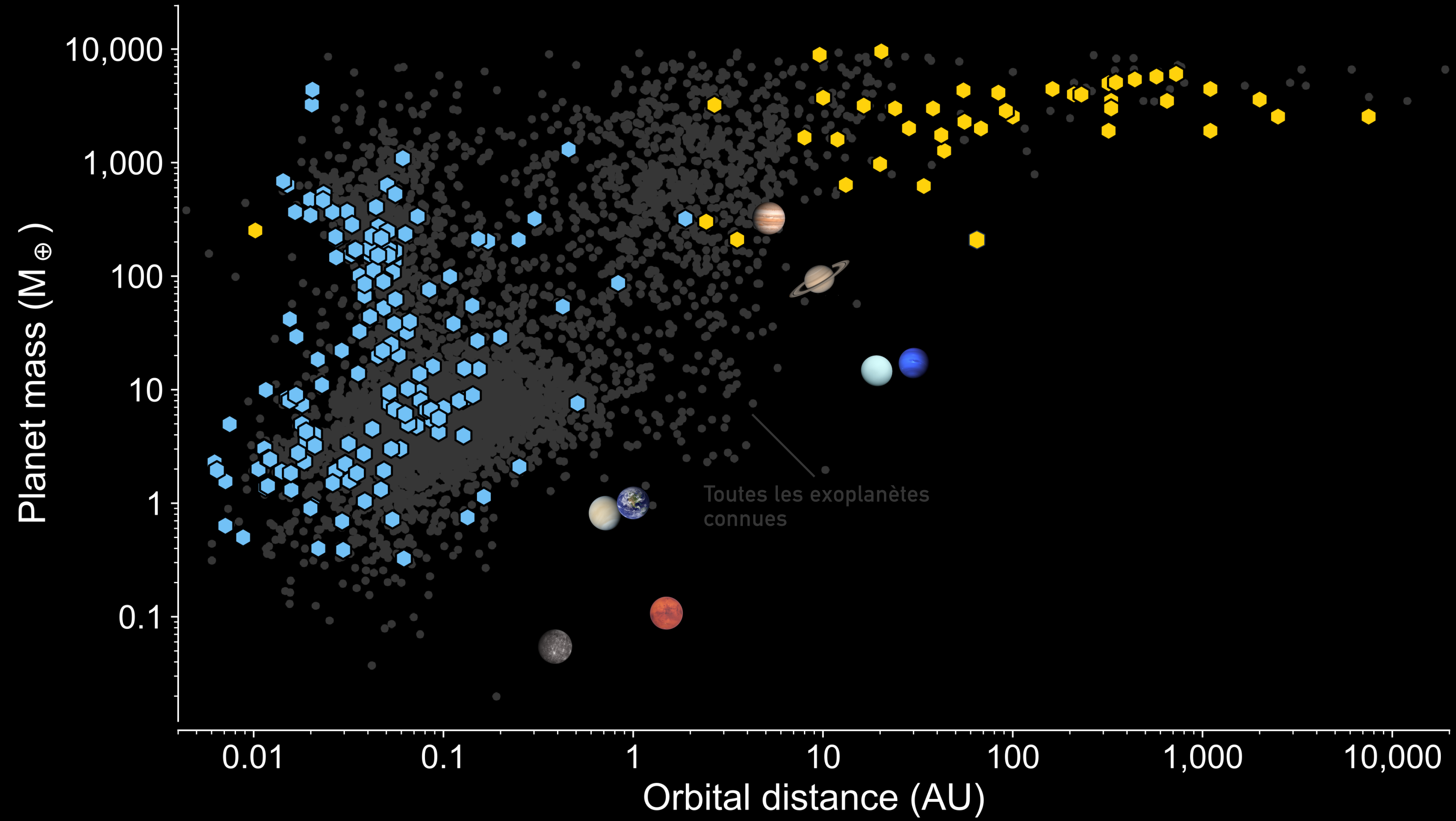




EXOPLANÈTES AVEC JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE

Février 2025



PLOT CREDITS: ESPINOZA & PERRIN (2025)



Est ce que l'atmosphère des exoplanètes
rocheuses survivent autour des étoiles naines M ?



Est ce que l'atmosphère des exoplanètes rocheuses survivent autour des étoiles naines M ?

Explorer cette question avec le “Rocky World DDT”



The Rocky World DDT program

MAXIMISER LES RETOMBÉES SCIENTIFIQUES DES OBSERVATIONS DE HST ET JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE

Report of the Working Group on Strategic Exoplanet Initiatives with HST and JWST

Seth Redfield, Wesleyan University (Chair)
Natasha Batalha, NASA Ames
Björn Benneke, University of Montréal
Beth Biller, University of Edinburgh (STUC Chair)
Nestor Espinoza, Space Telescope Science Institute
Kevin France, University of Colorado
Quinn Konopacky, University of California, San Diego
Laura Kreidberg, Max Planck Institute for Astronomy
Emily Rauscher, University of Michigan
David Sing, Johns Hopkins University

Neill Reid, Space Telescope Science Institute (ex officio)
Elena Sabbi, Space Telescope Science Institute (ex officio)

REDFIELD ET AL (2024)



The Rocky World DDT program

Report of the Working Group on Strategic Exoplanet Initiatives with HST and JWST

Seth Redfield, Wesleyan University (Chair)
Natasha Batalha, NASA Ames
Björn Benneke, University of Montréal
Beth Biller, University of Edinburgh (STUC Chair)
Nestor Espinoza, Space Telescope Science Institute
Kevin France, University of Colorado
Quinn Konopacky, University of California, San Diego
Laura Kreidberg, Max Planck Institute for Astronomy
Emily Rauscher, University of Michigan
David Sing, Johns Hopkins University

Neill Reid, Space Telescope Science Institute (ex officio)
Elena Sabbi, Space Telescope Science Institute (ex officio)

REDFIELD ET AL (2024)

MAXIMISER LES RETOMBÉES SCIENTIFIQUES DES OBSERVATIONS DE HST ET JWST

STAND UP
FOR
SCIENCE

OBJECTIF : Rechercher la présence d'atmosphères autour d'exoplanètes rocheuses en orbite autour d'étoiles naines M

AVEC QUOI ? 500 heures de JWST pour la caractérisation planétaire/atmosphérique + 250 orbites HST/UV pour la caractérisation stellaire

COMMENT ? Core implementation team (STScI) et Science Advisory Council

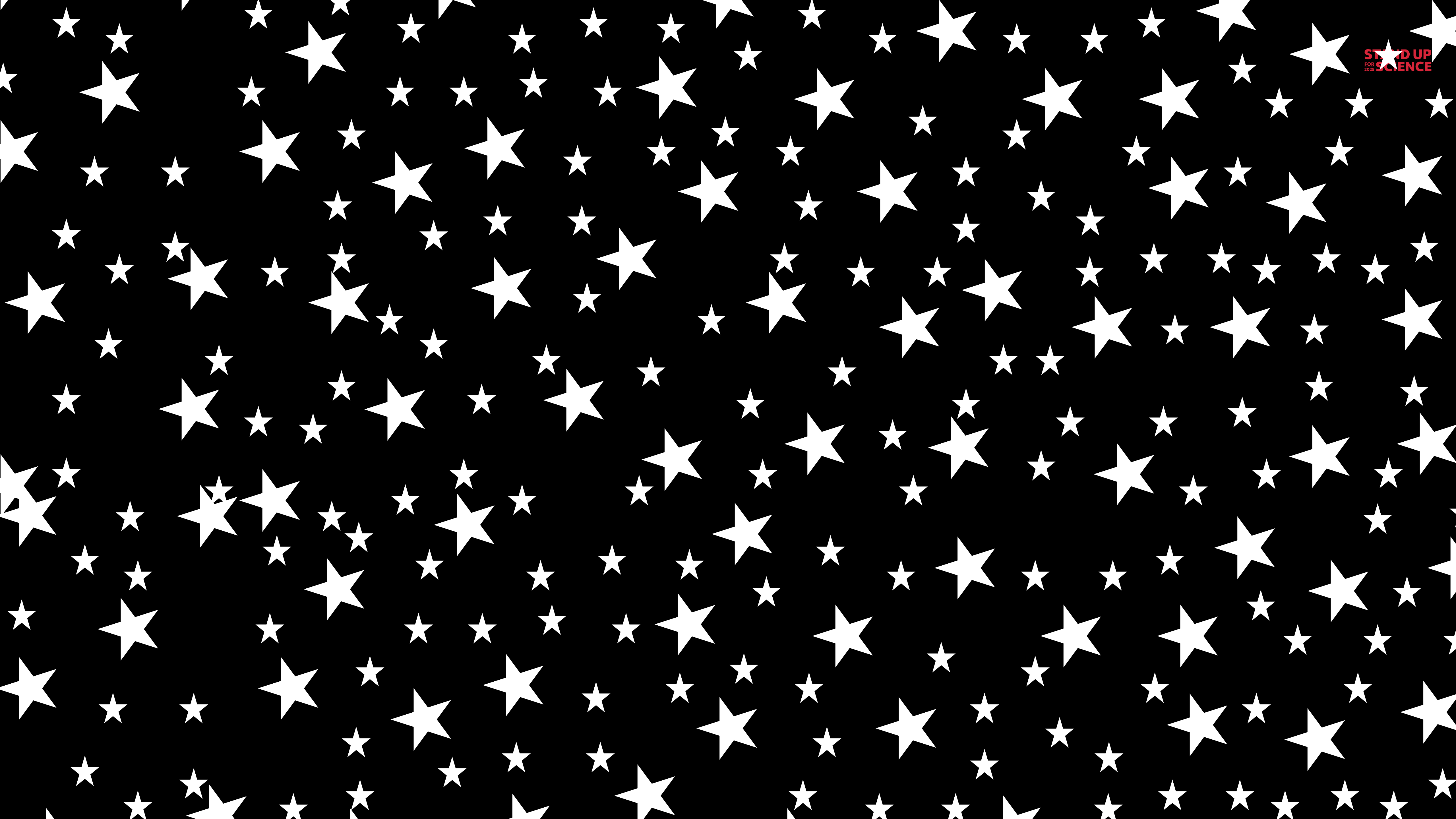


LEAD: ESPINOZA
DEPUTY: DIAMOND-LOWE



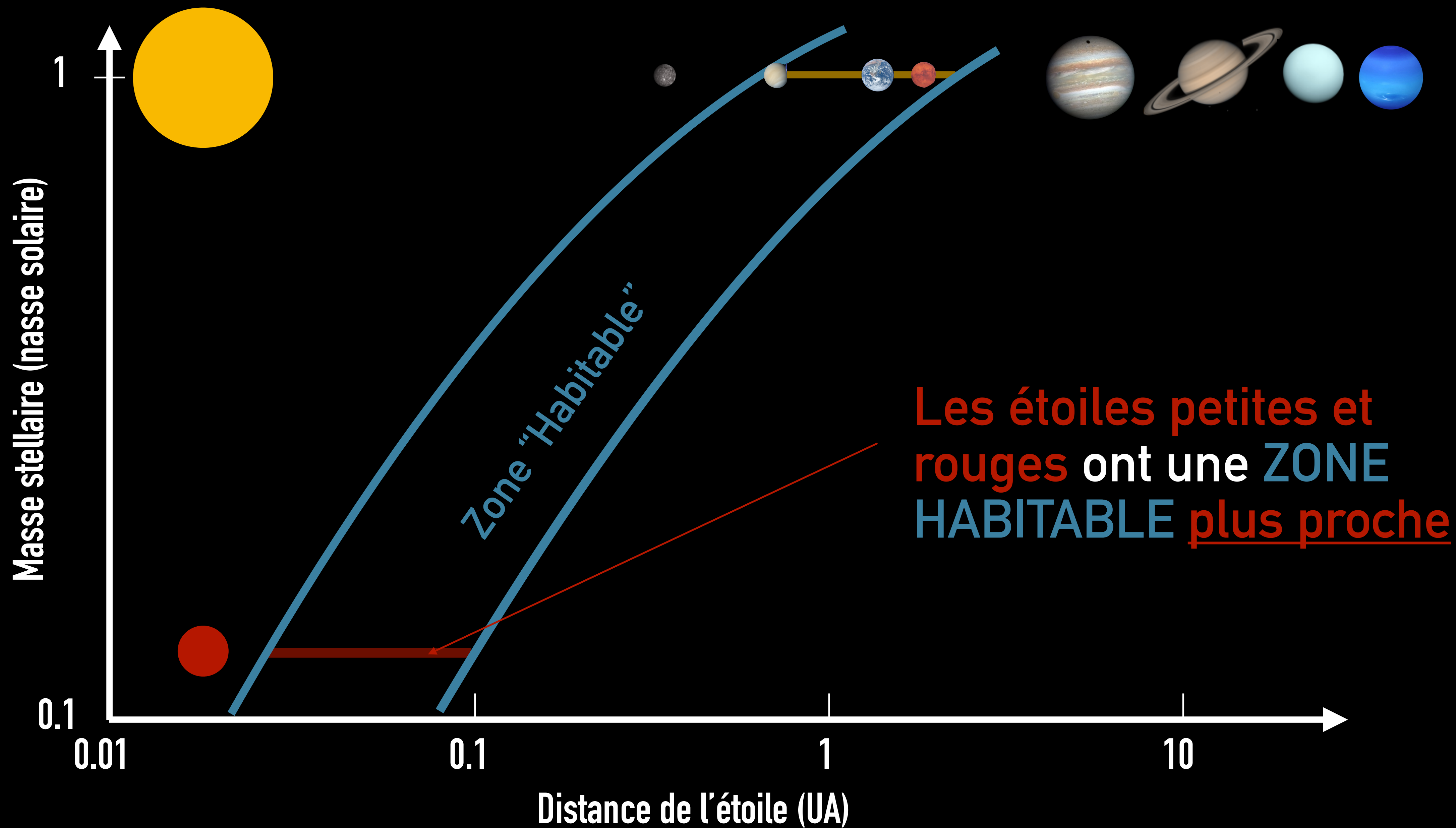
POURQUOI ?





La plupart des étoiles sont petites et rouges !

Environ 70% des étoiles à 10 pc sont des naines M, un nombre qui s'étend sûrement au reste de la Galaxie!

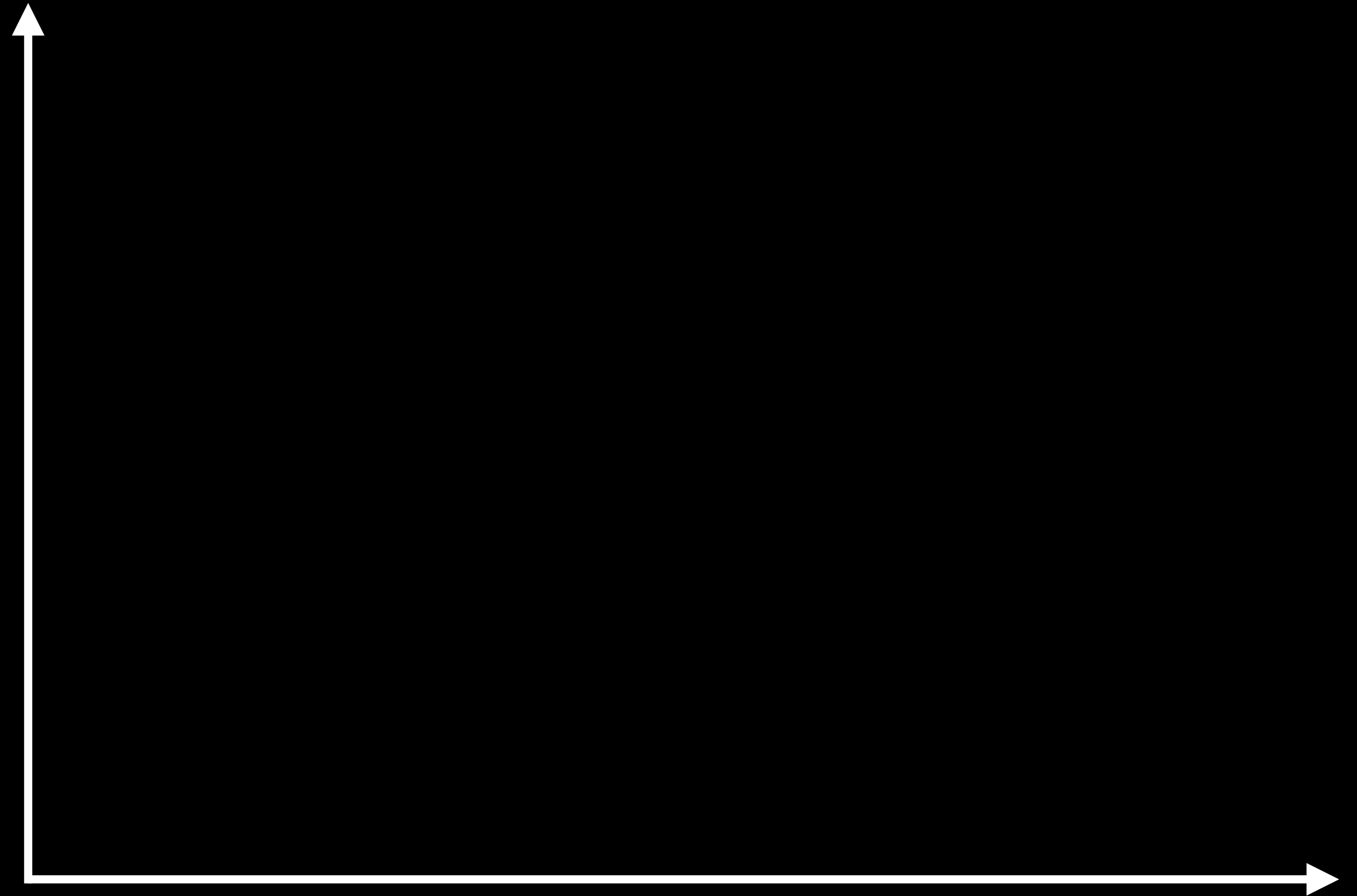


QUELLES CIBLES?



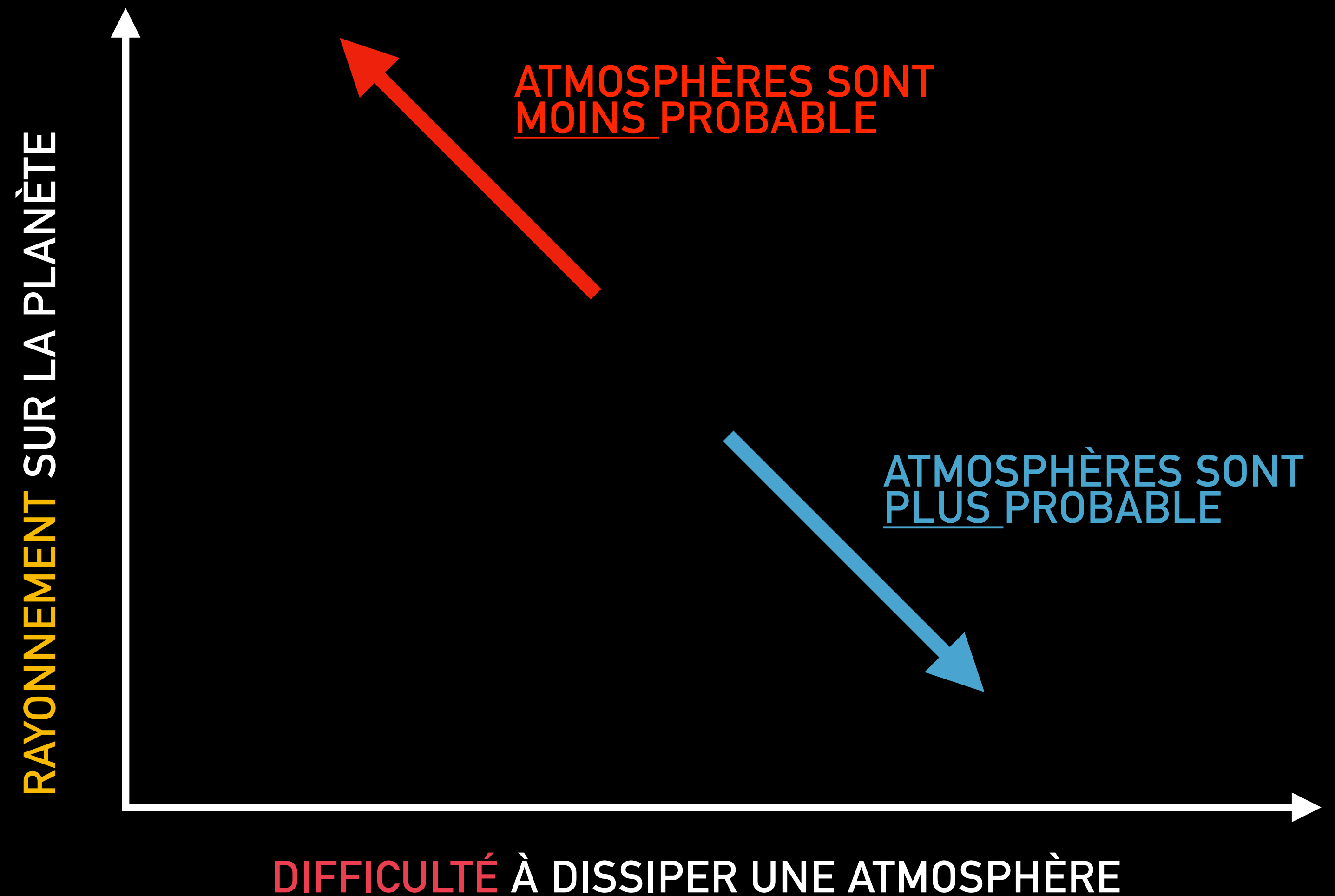
The Rocky World DDT program

Explorer la “Cosmic shoreline” Zanhle & Catling (2017)



The Rocky World DDT program

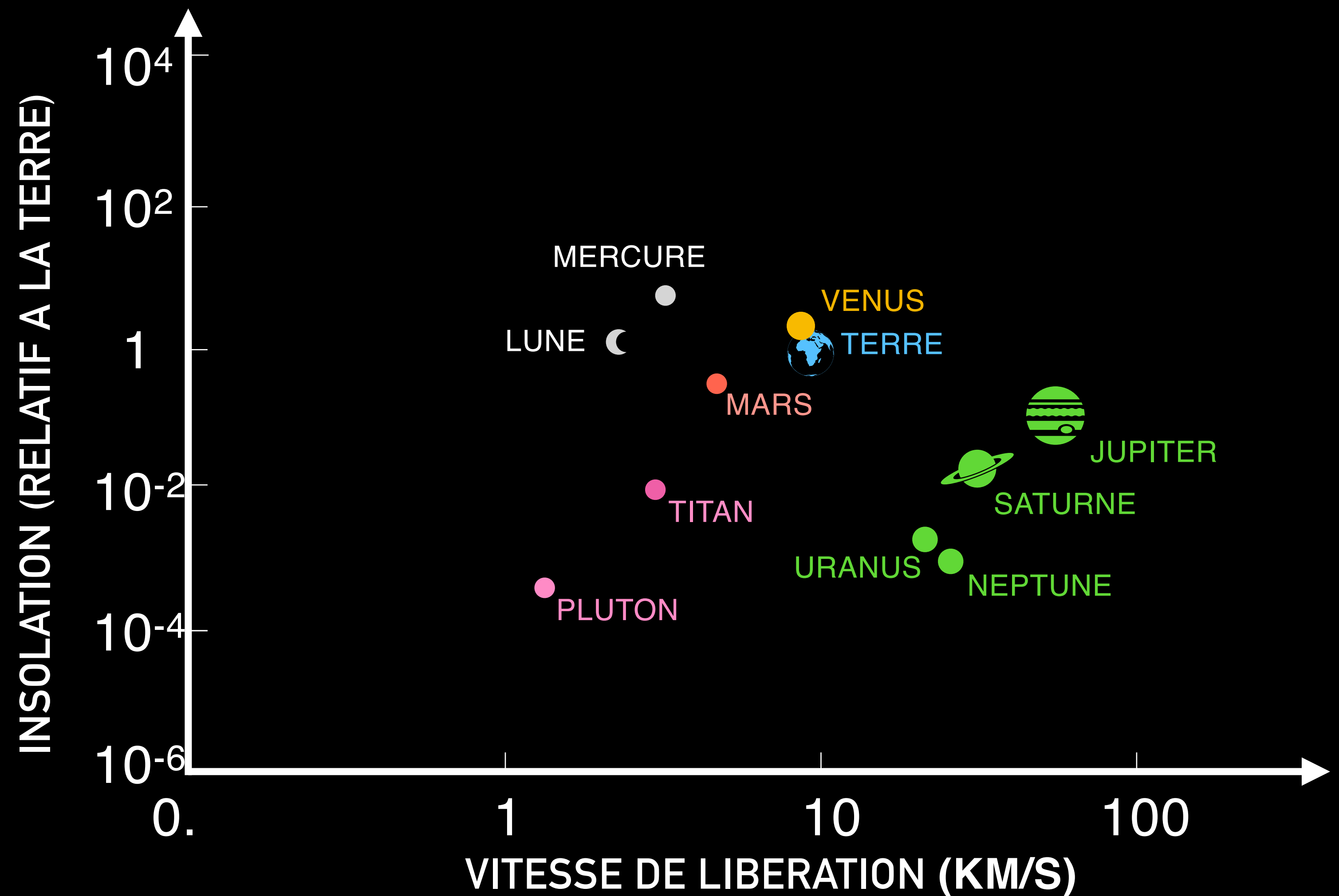
Explorer la "Cosmic shoreline" Zahnle & Catling (2017)



The Rocky World DDT program

Explorer la "Cosmic shoreline" Zanhle & Catling (2017)

STAND UP
FOR
SCIENCE

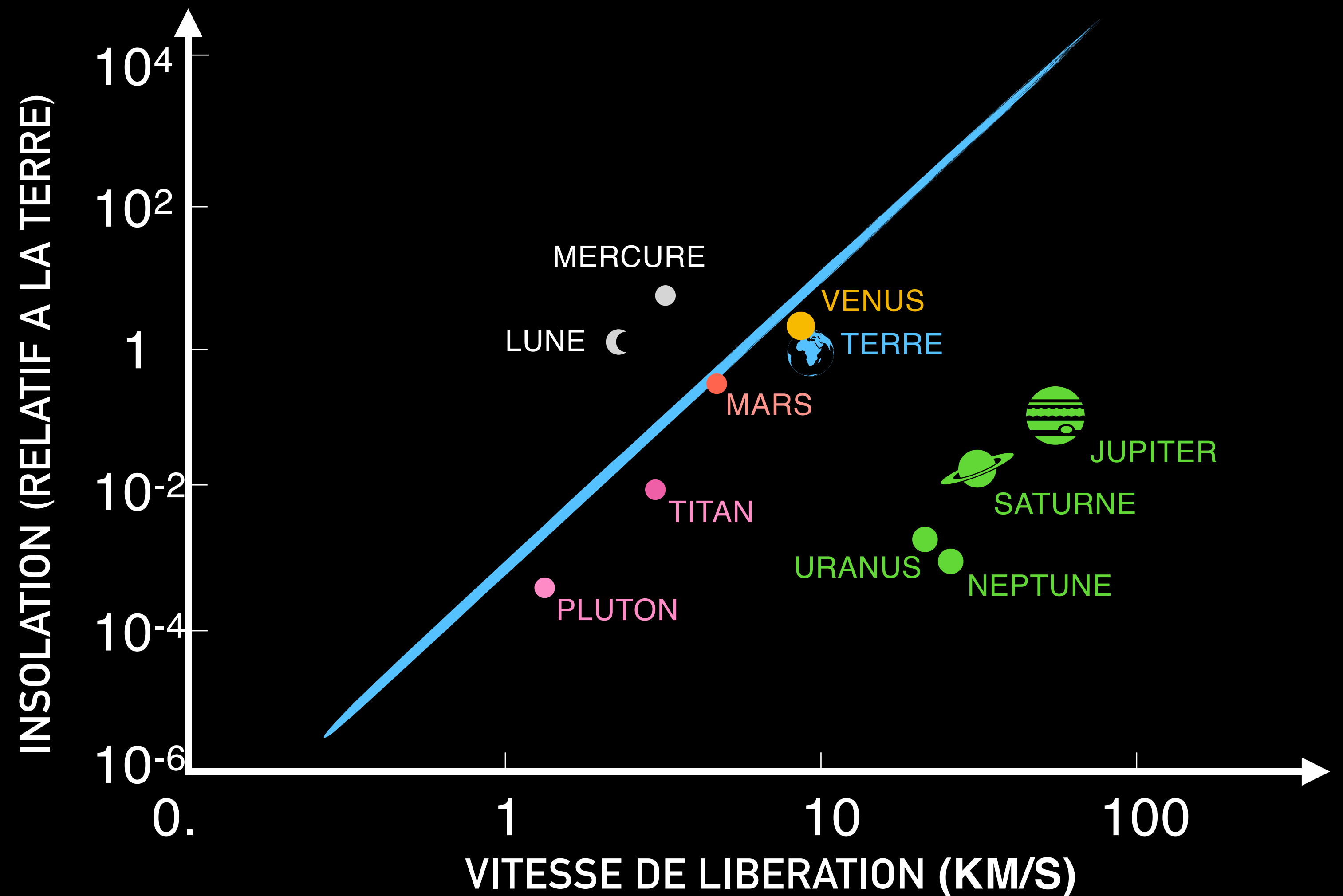


The Rocky World DDT program

Explorer la "Cosmic shoreline" Zanhle & Catling (2017)

STAND UP
FOR
SCIENCE

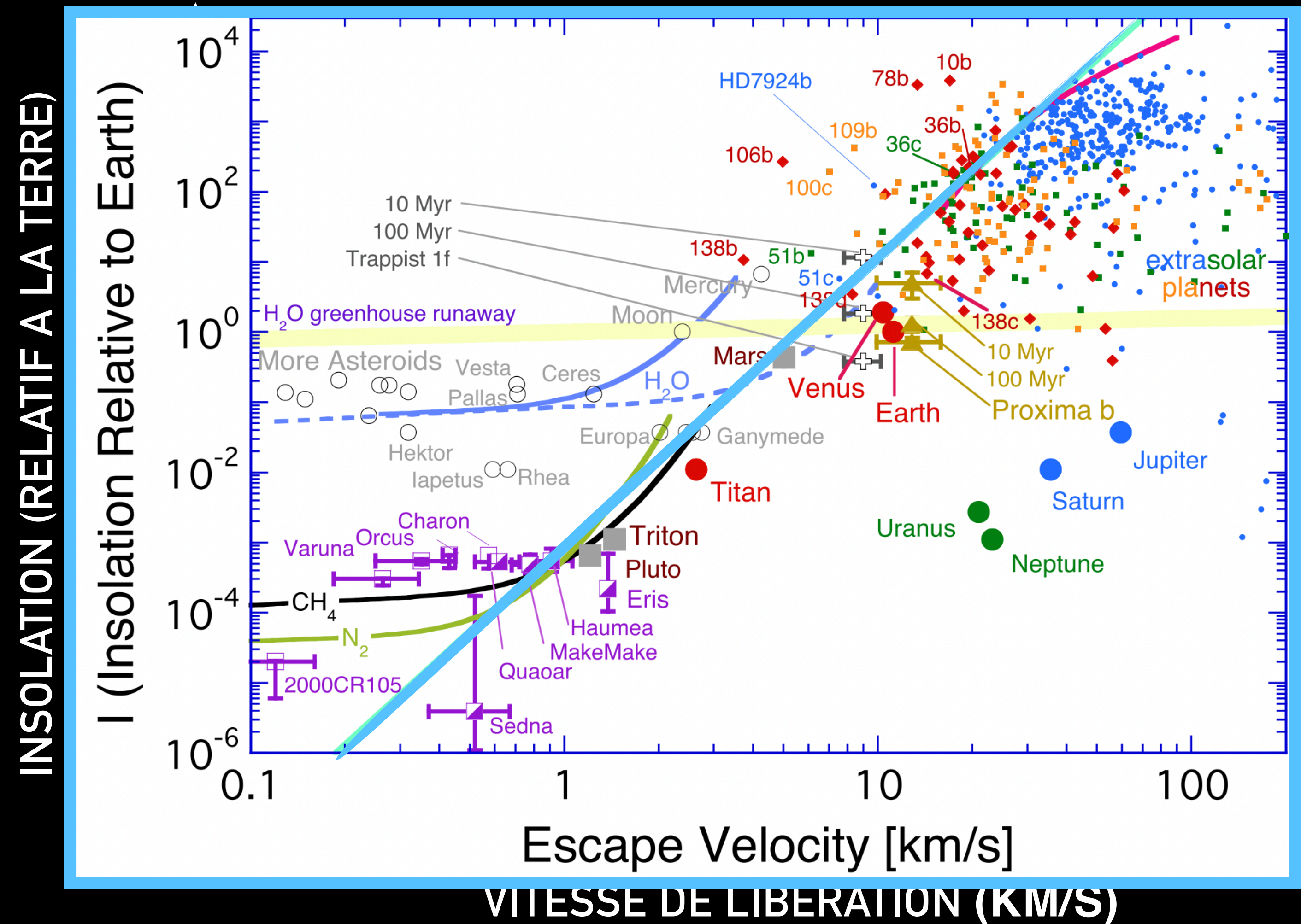
Pour le système solaire



Explorer la "Cosmic shoreline" Zanhle & Catling (2017)

STAND UP FOR SCIENCE

Pour le système solaire



The Rocky World DDT program

Explorer la “Cosmic shoreline” Zanhle & Catling (2017)

EST-CE QUE LES
EXOPLANÈTES
SUIVENT AUSSI LA CS ?

EST CE QUE LA CS EST
DIFFÉRENTE SELON LE
TYPE DE L'ÉTOILE ?

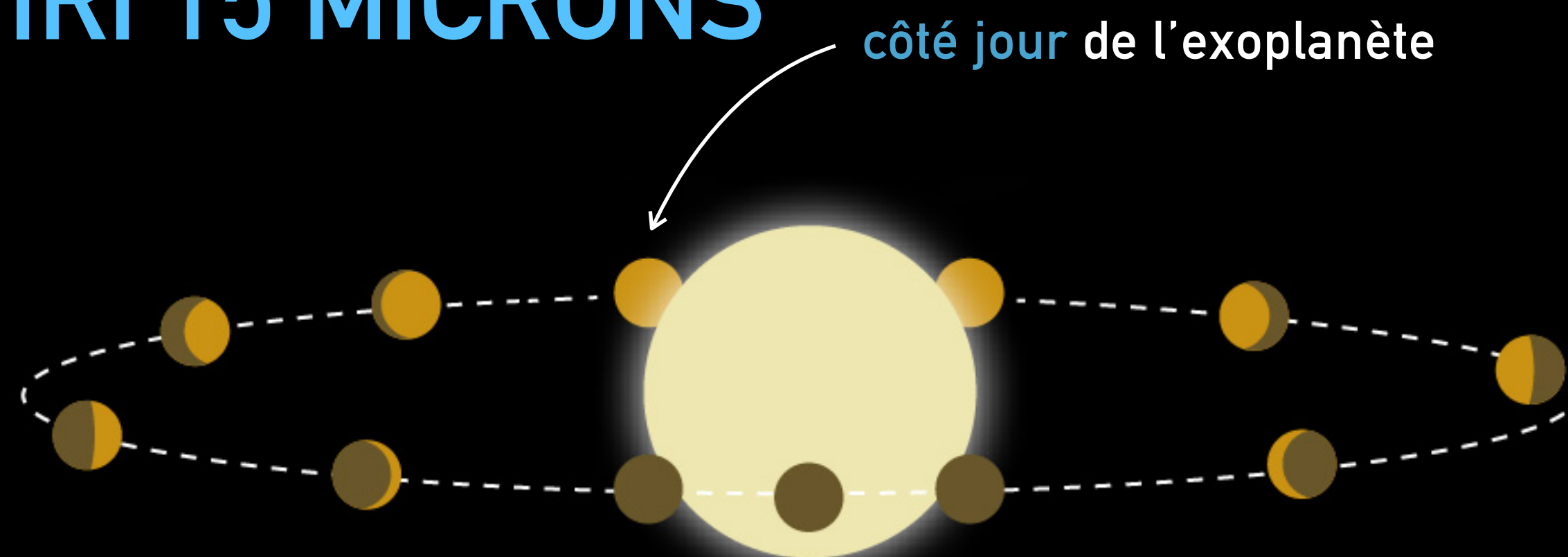
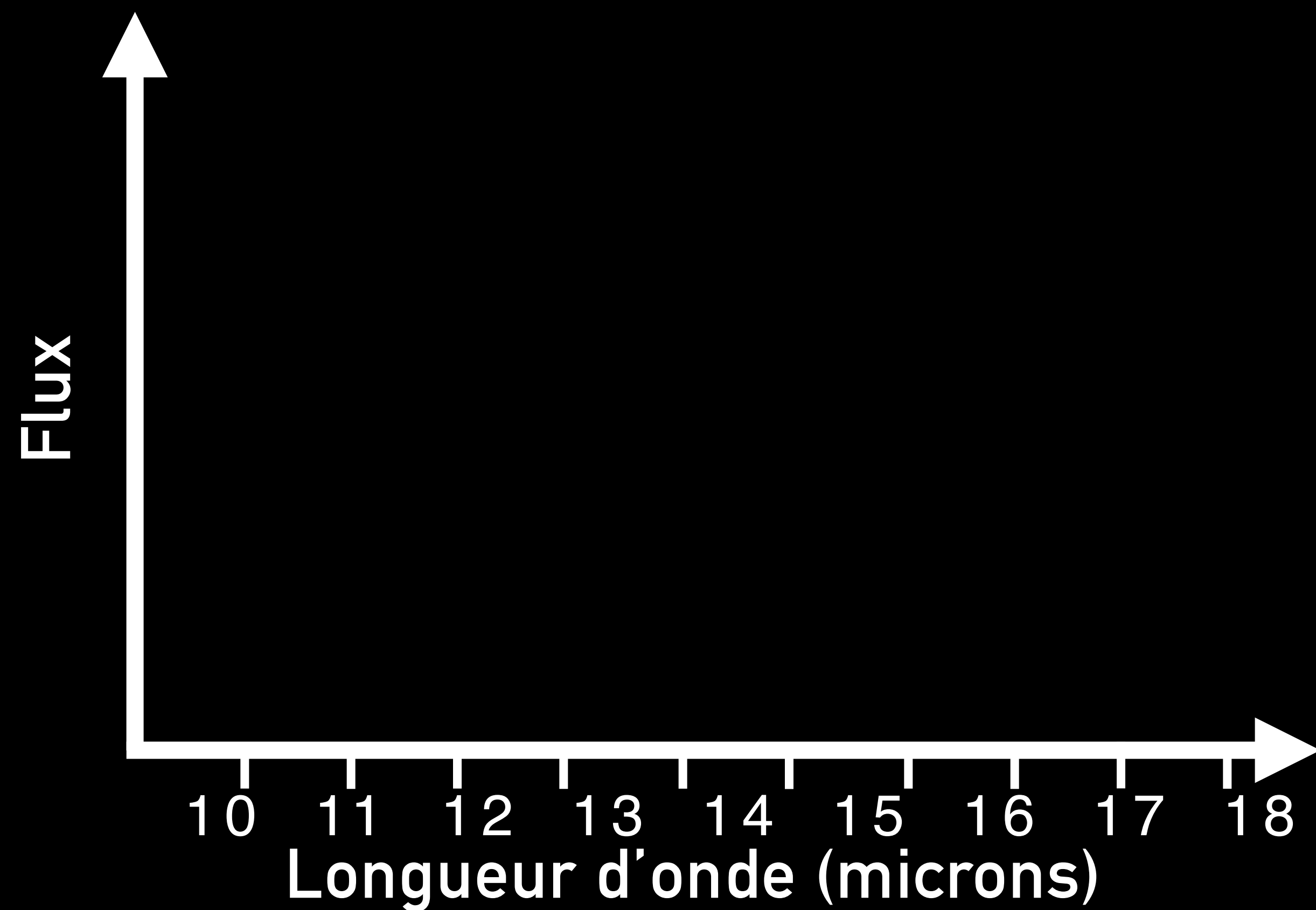


COMMENT ?



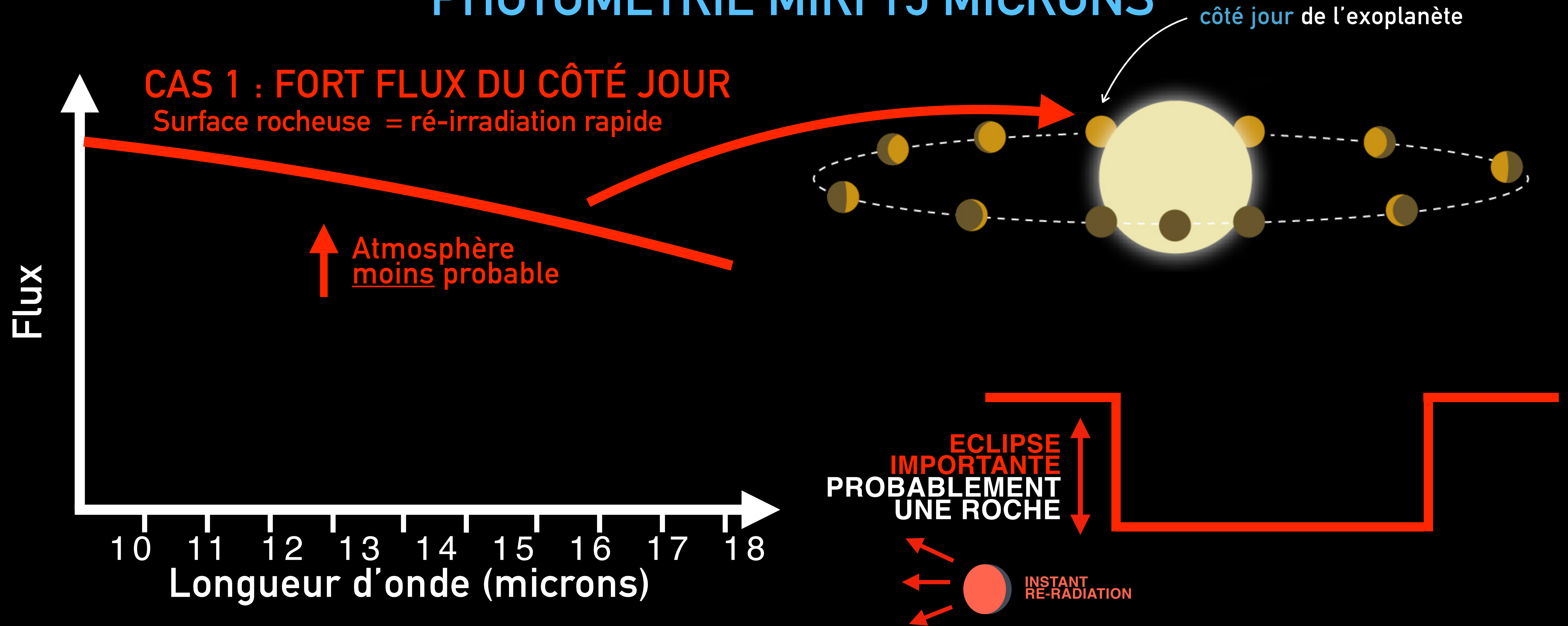
The Rocky World DDT program

PHOTOMETRIE MIRI 15 MICRONS



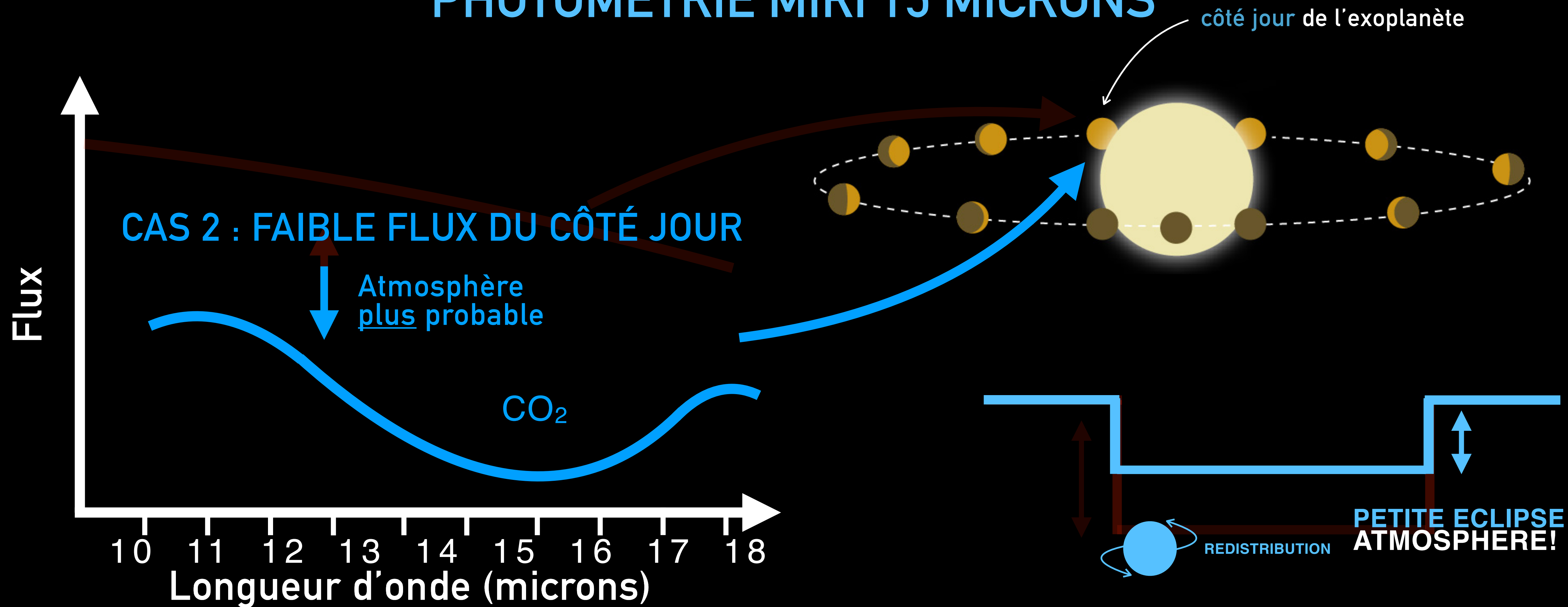
The Rocky World DDT program

PHOTOMETRIE MIRI 15 MICRONS



The Rocky World DDT program

PHOTOMETRIE MIRI 15 MICRONS



The Rocky World DDT program

- 1- Le Rocky World n'a pas de temps propriétaire : les données sont **publiques** directement
 - 2- Premières cibles déjà sélectionnées :
GJ 3929 b, LTT 1445 A c, LTT 1445 A b, et LHS 1140 b
 - 3- Le CIT fournira des **données réduites**
 - 4 - Rôle complémentaire des GO : transmission, emission, spectroscopie
- Pour tout suivre et contribuer : <https://rockyworlds.stsci.edu>**

The Rocky World DDT program

- 1- Le Rocky World n'a pas de temps propriétaire : les données sont **publiques** directement
 - 2- Premières cibles déjà sélectionnées :
GJ 3929 b, LTT 1445 A c, LTT 1445 A b, et LHS 1140 b
 - 3- Le CIT fournira des **données réduites**
 - 4 - Rôle complémentaire des GO : transmission, emission, spectroscopie
- Pour tout suivre et contribuer : <https://rockyworlds.stsci.edu>**



Achrène Dyrek (STScI, CIT adyrek@stsci.edu)



Hot-Rocks Survey



The Hot Rocks Survey: Testing 9 Irradiated Terrestrial Exoplanets For Atmospheres

Terrestrial exoplanets orbiting M dwarfs are currently the most promising sample of targets for detecting and characterizing rocky world atmospheres outside of the Solar System. However, M dwarf systems are very different from our own, and it may be that these worlds are airless bare rocks.

The Hot Rocks Survey is a large programme with the James Webb Space Telescope to investigate nine irradiated terrestrial exoplanets orbiting nearby M dwarfs for the presence of atmospheres. We will probe the hot exteriors of these worlds for atmospheric signatures or rocky surface compositions, and look at the ensemble sample to figure out what underlying physical processes are at play.

[Program](#) 

Hot-rocks Team

Hannah Diamond-Lowe, João Mendça, (PIs)

Natalie Allen, Prune August, Mark Fortune, **Amélie Gressier**, Måns, Holmberg, Jegug Ih, Kathryn Jones, Erik Meier Valdés, Merlin Zraggen Laars Bucchave, Adam Burgasser, Brice-Olivier Demory, Néstor Espinoza, Chloe Fisher, Neale Gibson, Kevin Heng, Jens Hoeijmakers, Matthew Hooton, Daniel Kitzmann, Anna Lueber, Bibiana Prinoth, Alexander Rathcke

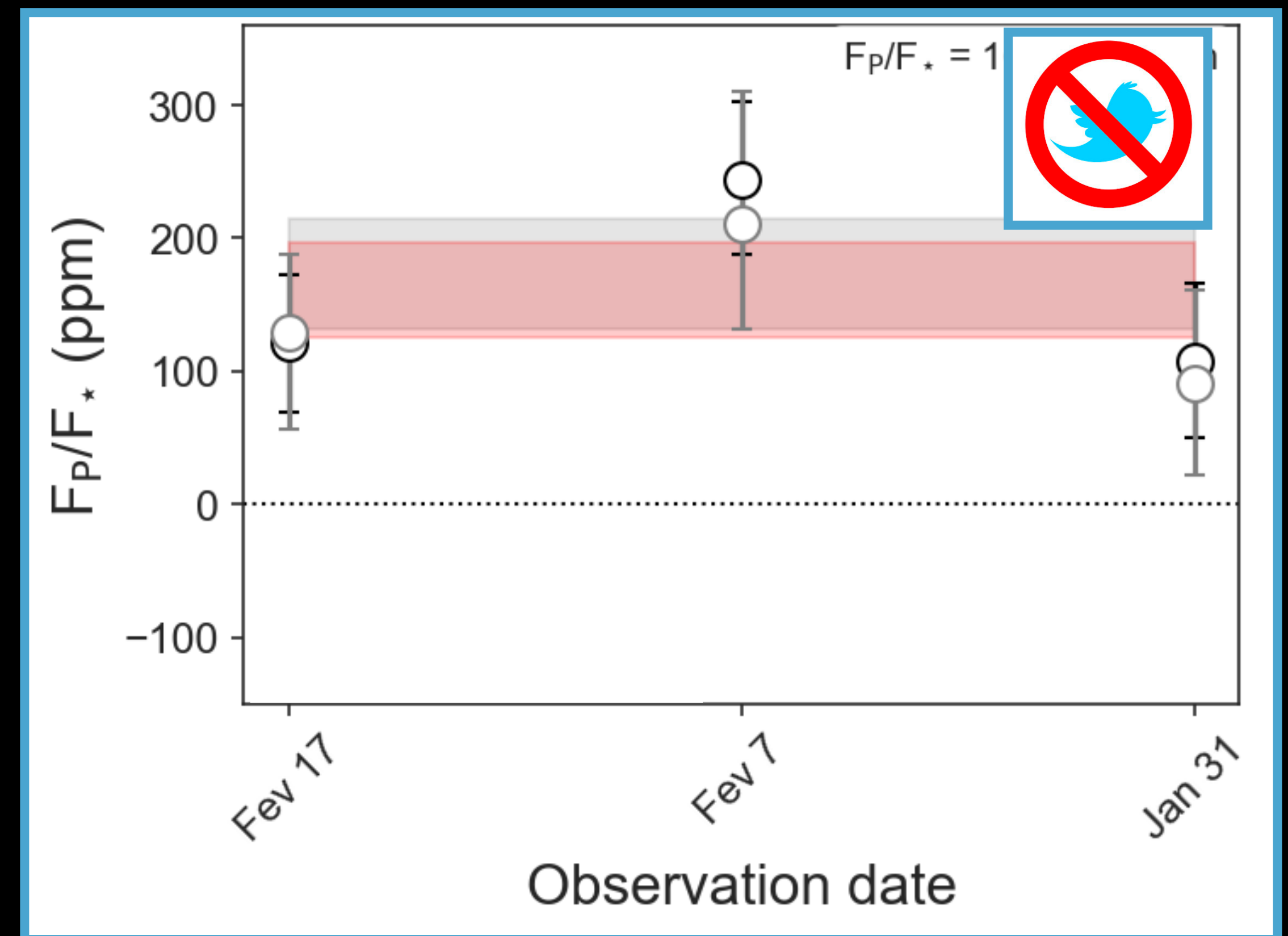
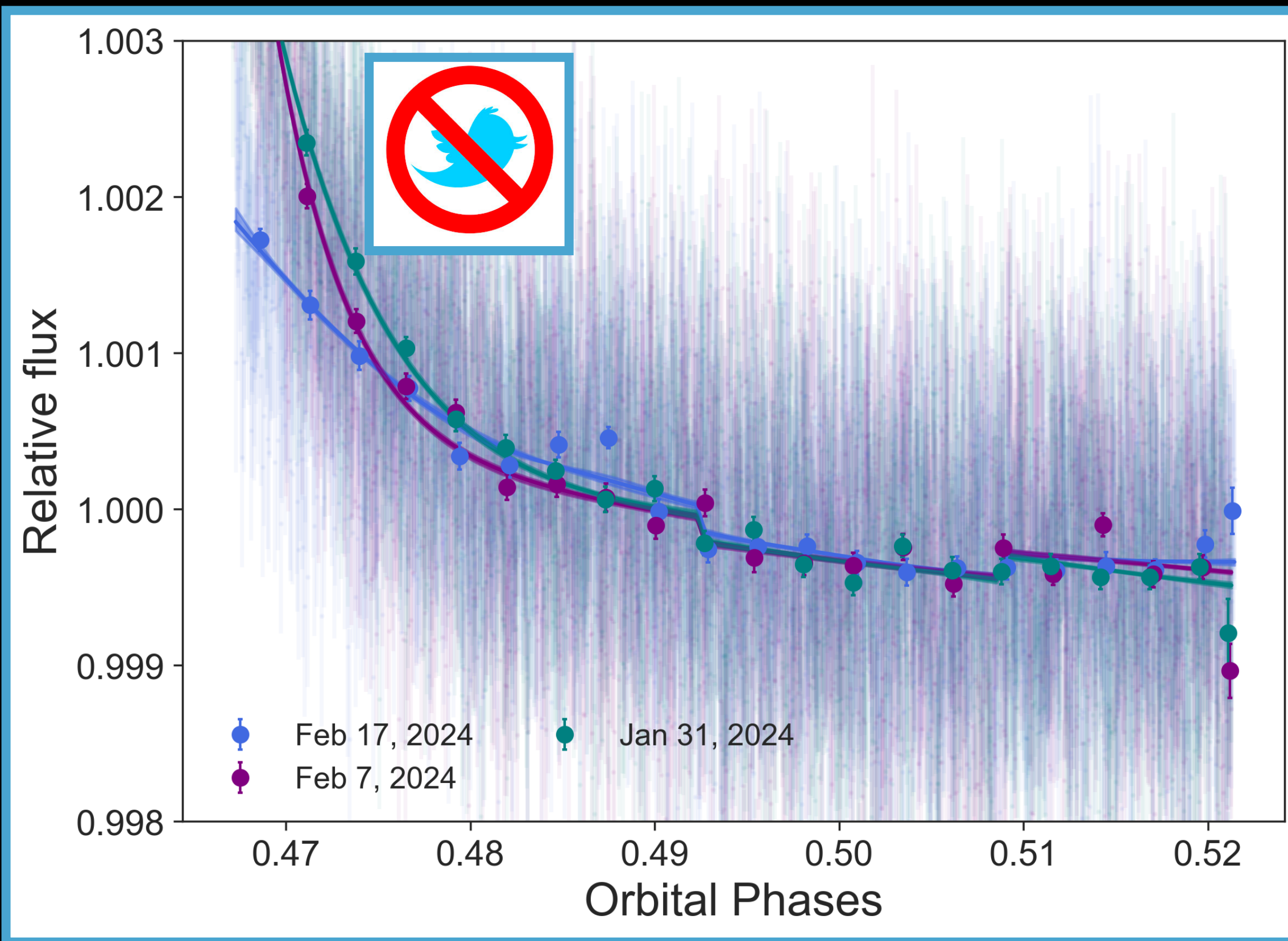
TOI-270 b Gressier et “the Hot-Rocks team”

1.58M_{TERRE}; 1.2R_{TERRE}; 580 K

STAND UP
FOR
SCIENCE

3 eclipses à 15 microns avec MIRI imaging

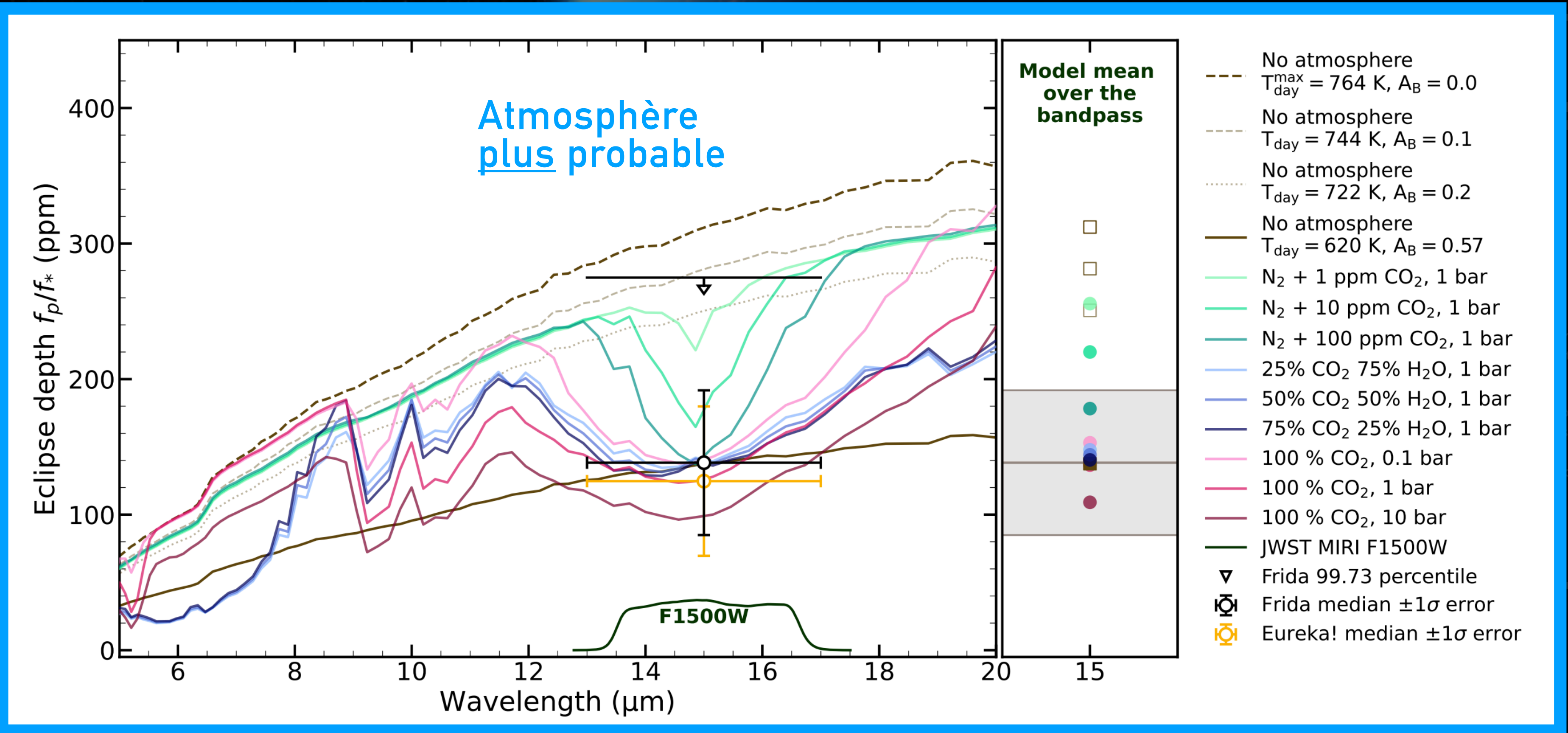
GRESSIER ET AL. IN PREP



LHS 1478 b

2.33M_{TERRE}; 1.2R_{TERRE}; 595 K

STAND UP
FOR
SCIENCE



AUGUST+2025, A&A, IN PRESS



TRAPPIST-1

Likely little to
no atmosphere

Lim +2023
Greene+2023
Ducrot +2025

TRAPPIST-1b

TRAPPIST-1d
NEAT+ in prep.

TRAPPIST-1c

Likely little to
no atmosphere

Zieba+2023
Radica+2025

TRAPPIST-1e

Espinoza+ in review
Gliden+ in review
Allen in prep.

TRAPPIST-1f
NEAT+ in prep.

TRAPPIST-1g
Benneke+ in review

TRAPPIST-1h
No-air+ in prep.





+400 HEURES

TRAPPIST-1



Résumé

1 - Nous vivons une période exceptionnelle pour l'étude des atmosphères d'exoplanètes

2 - JWST observe actuellement les spectres les plus précis d'atmosphères exoplanétaires.
La science réalisée couvre les géantes gazeuses aux petites planètes rocheuses.

3 - L'avenir de la science des exoplanètes est prometteur. En un peu plus de deux ans seulement, JWST explore déjà de nouvelles frontières du domaine :

- a) Chimie atmosphérique et mesures d'abondances
- b) Chimie hors équilibre (ex. : photochimie)
- c) Science des sub-Neptunes
- d) La grande question : les exoplanètes rocheuses autour des naines M ont-elles une atmosphère ?

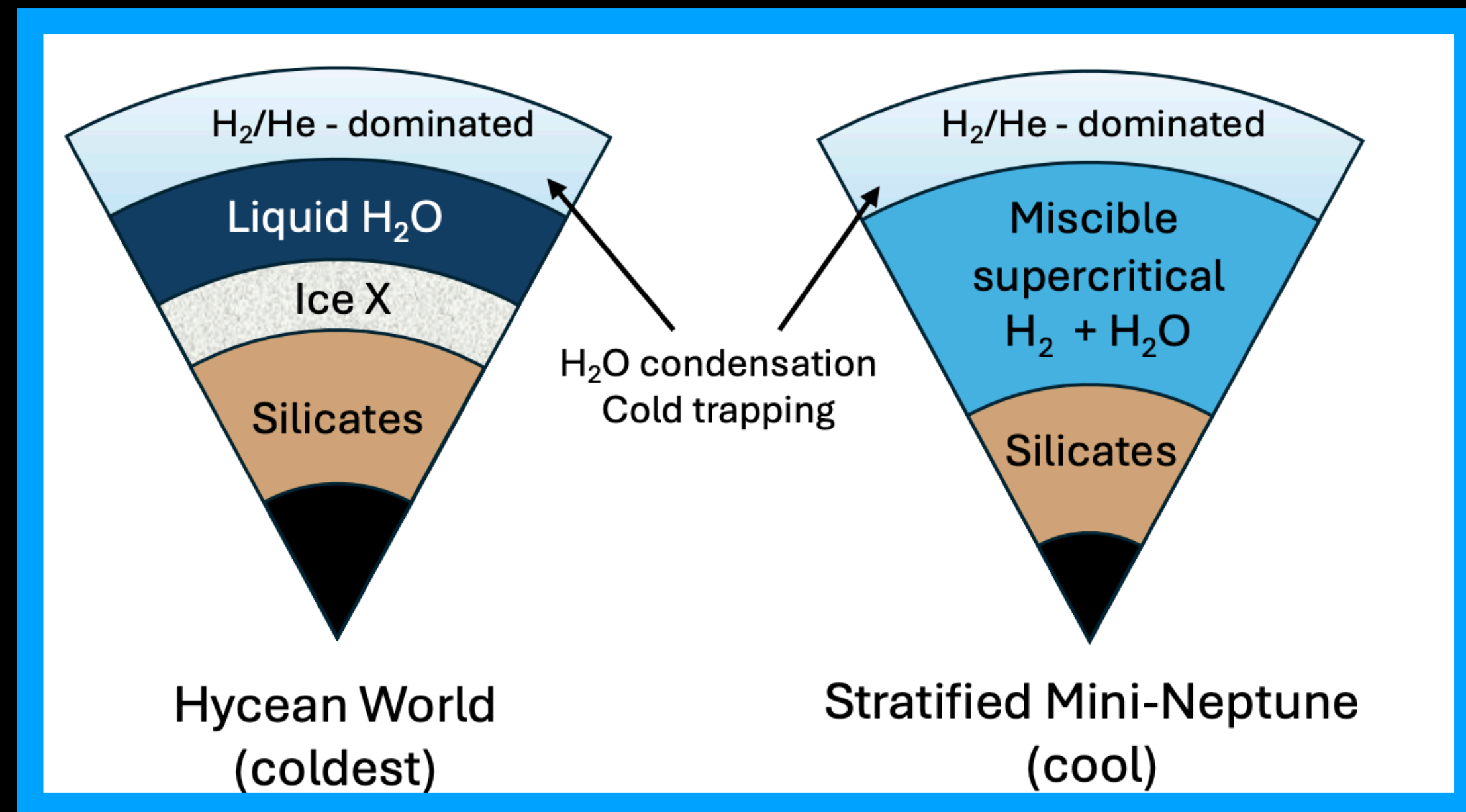
Extra slides



The sub-Neptune T01-270 d

4.78M_{TERRE}; 2.13R_{TERRE}; 387 K

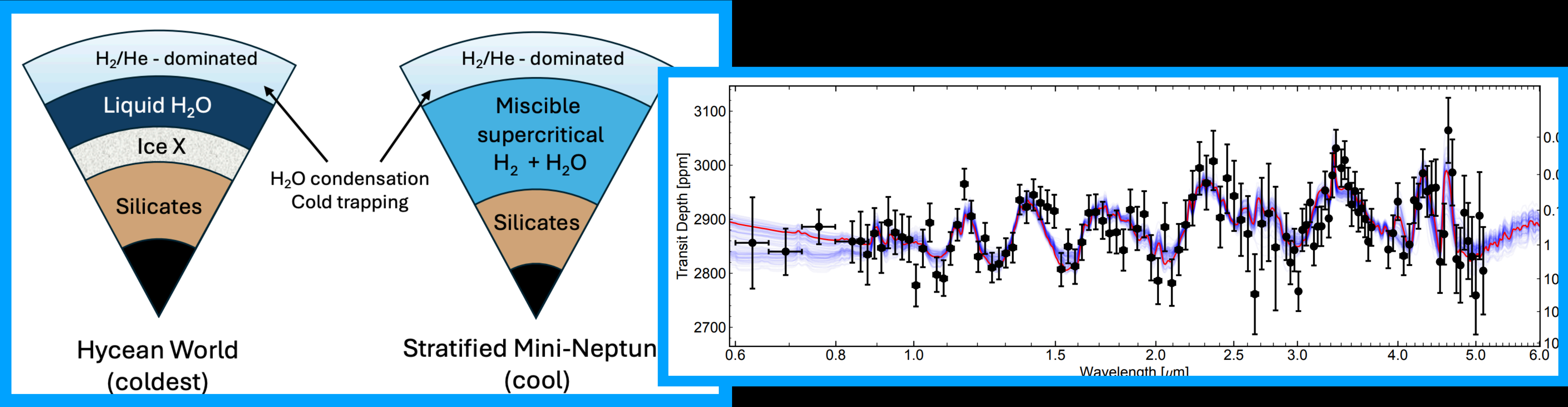
BENNEKE ET AL. (2024); HOLMBERG & MADHUSUDHAN (2024)



The sub-Neptune T01-270 d

4.78M_{TERRE}; 2.13R_{TERRE}; 387 K

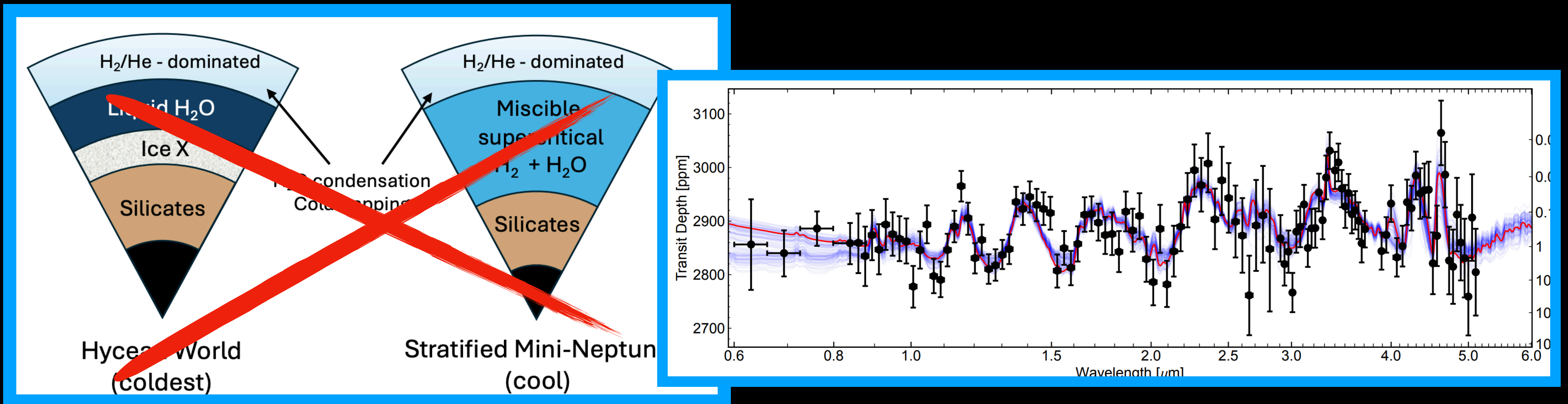
BENNEKE ET AL. (2024); HOLMBERG & MADHUSUDHAN (2024)



The sub-Neptune TOI-270 d

4.78M_{TERRE}; 2.13R_{TERRE}; 387 K

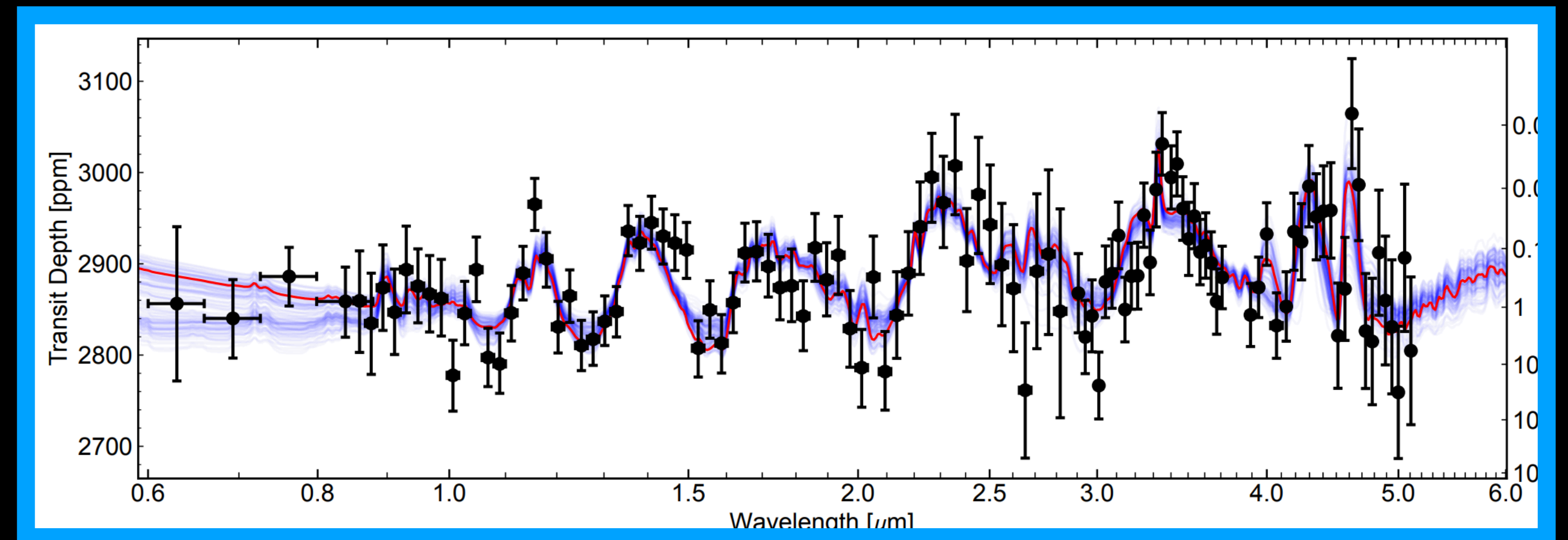
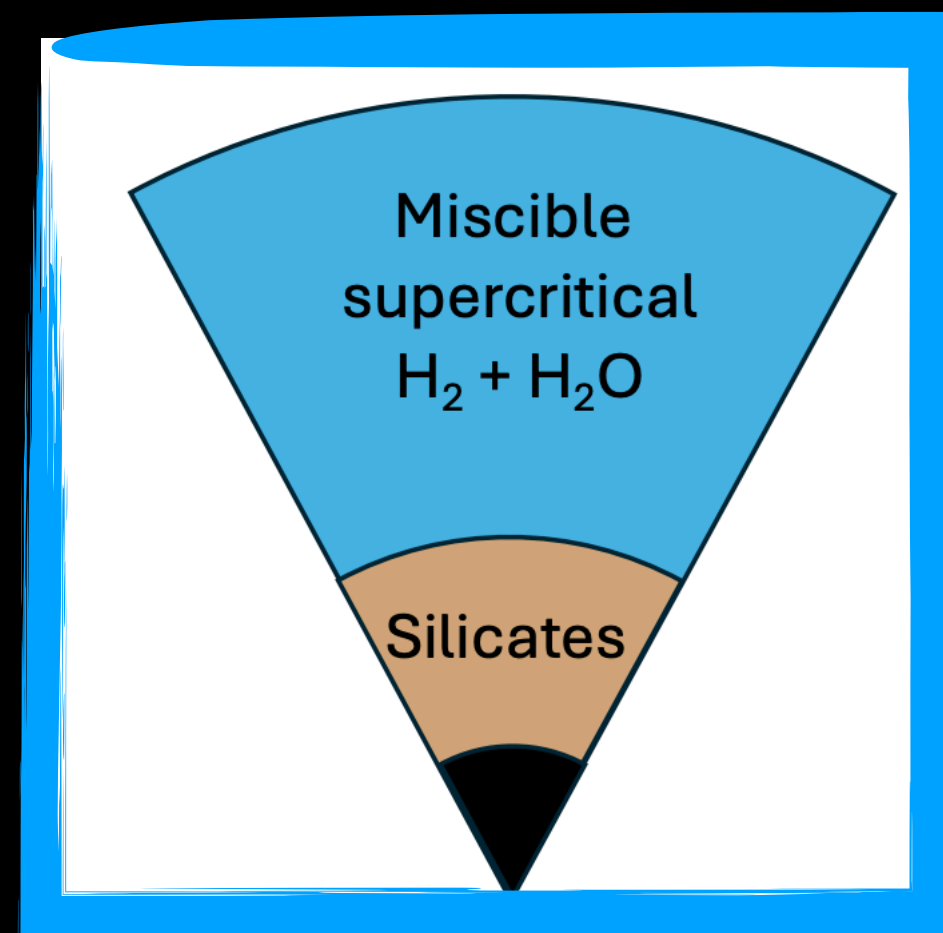
BENNEKE ET AL. (2024); HOLMBERG & MADHUSUDHAN (2024)



The sub-Neptune TOI-270 d

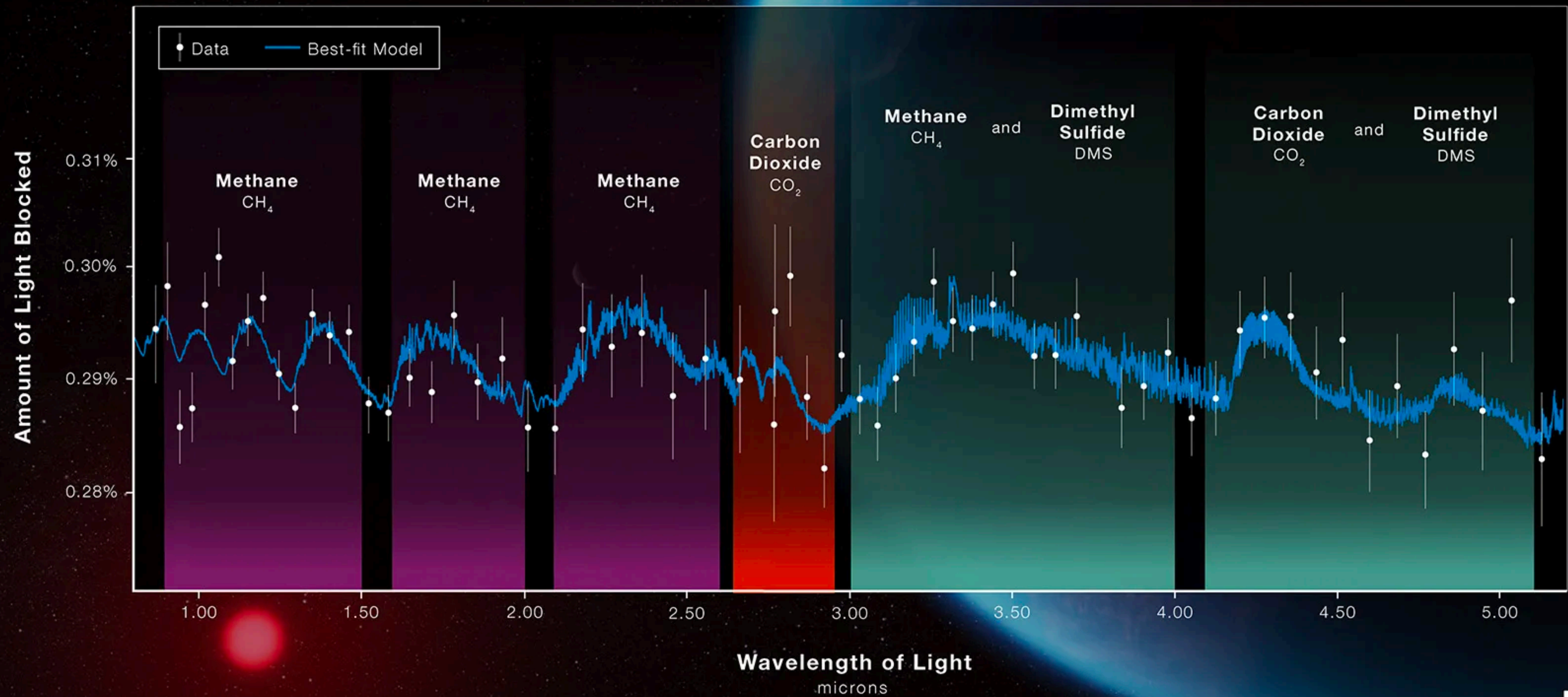
4.78M_{TERRE}; 2.13R_{TERRE}; 387 K

BENNEKE ET AL. (2024); HOLMBERG & MADHUSUDHAN (2024)



ATMOSPHERE COMPOSITION

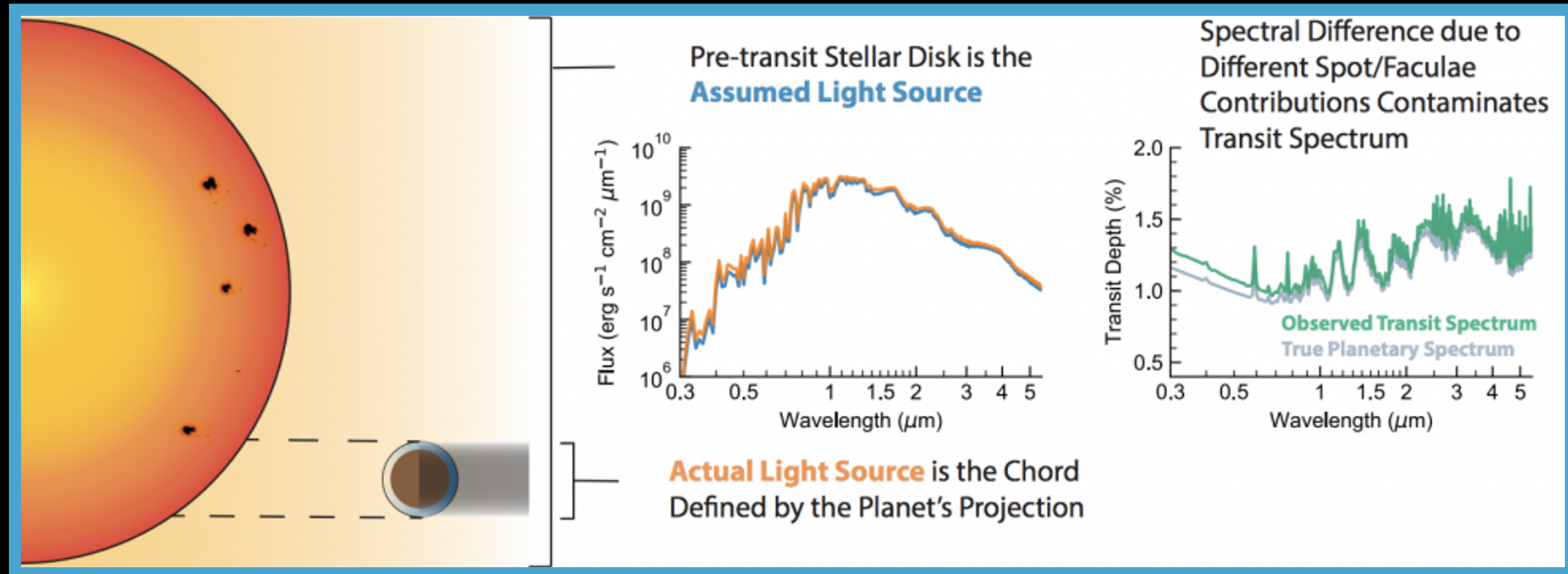
NIRISS and NIRSpec (G395H)



A small TRAPPIST-1 detour

Key challenge for small exoplanet exploration : The Stellar contamination problem

Rackham et al. (2018, ApJ, 853, 122)

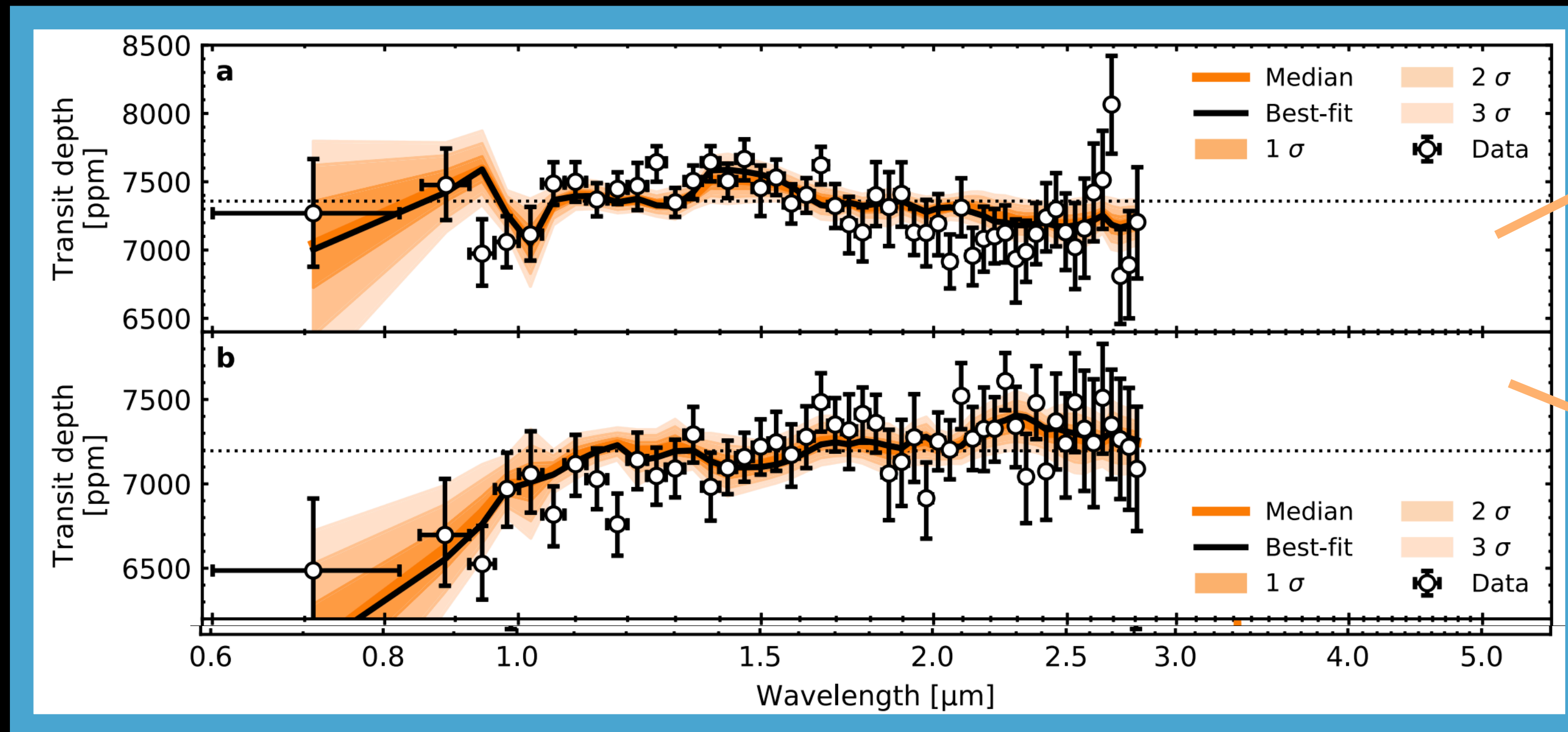


A small TRAPPIST-1 detour

Key challenge for small exoplanet exploration : **The Stellar contamination problem**

Best direct evidence yet: **TRAPPIST1-b**

(Lim et al., 2023, ApJL, 955, L22)



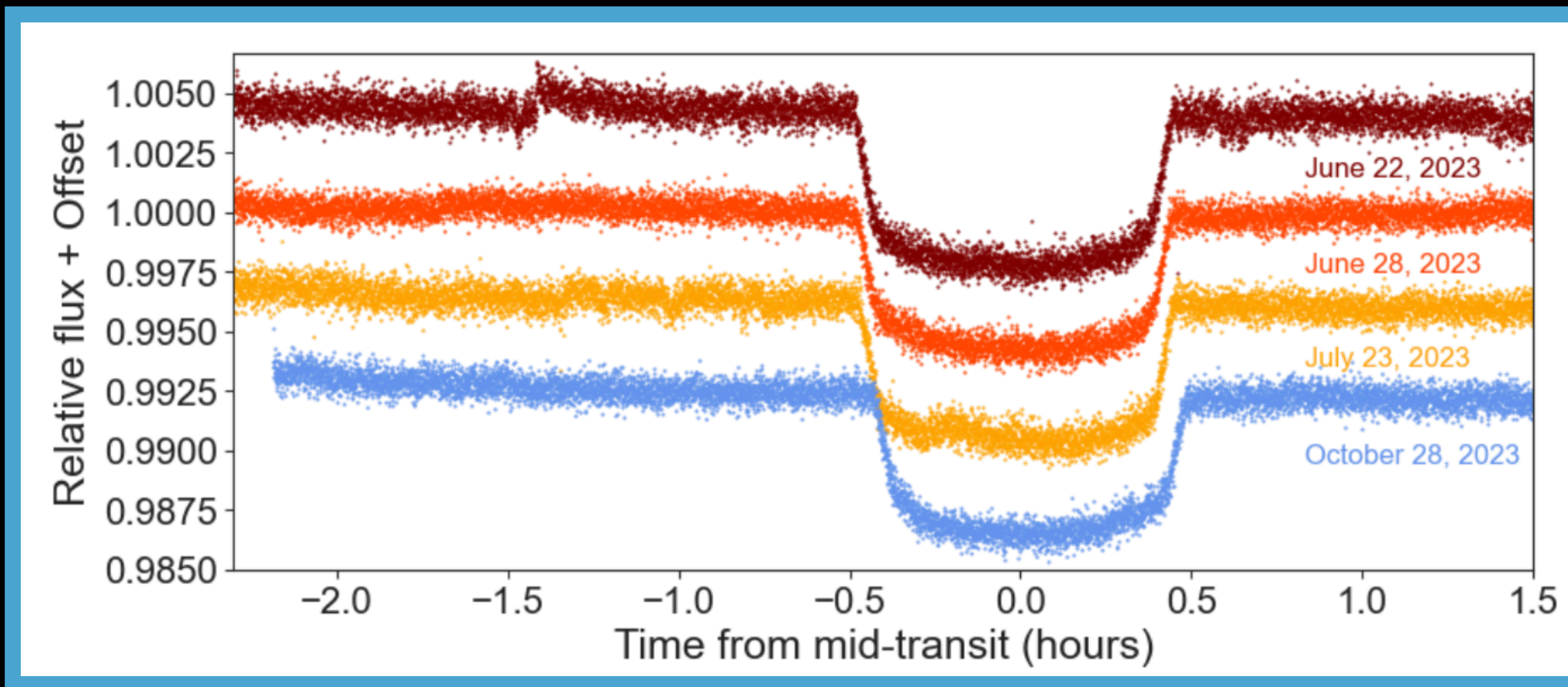
Visit 1 : Spot dominated

Visit 2 : faculae dominated

A small TRAPPIST-1 detour

Key challenge for small exoplanet exploration : **The Stellar contamination problem**

TRAPPIST-1 e (GTO DREAMS PI: Lewis) :
Espinoza+ (in review.; incl. Allen, Glidden, Gressier et al.)



A small TRAPPIST-1 detour

Key challenge for small exoplanet exploration : The Stellar contamination problem



NATALIE ALLEN
JHU GRAD STUDENT

TWO PLANETS TRANSITING AT SIMILAR TIMES
SHOULD SEE SIMILAR STELLAR CONTAMINATION

