

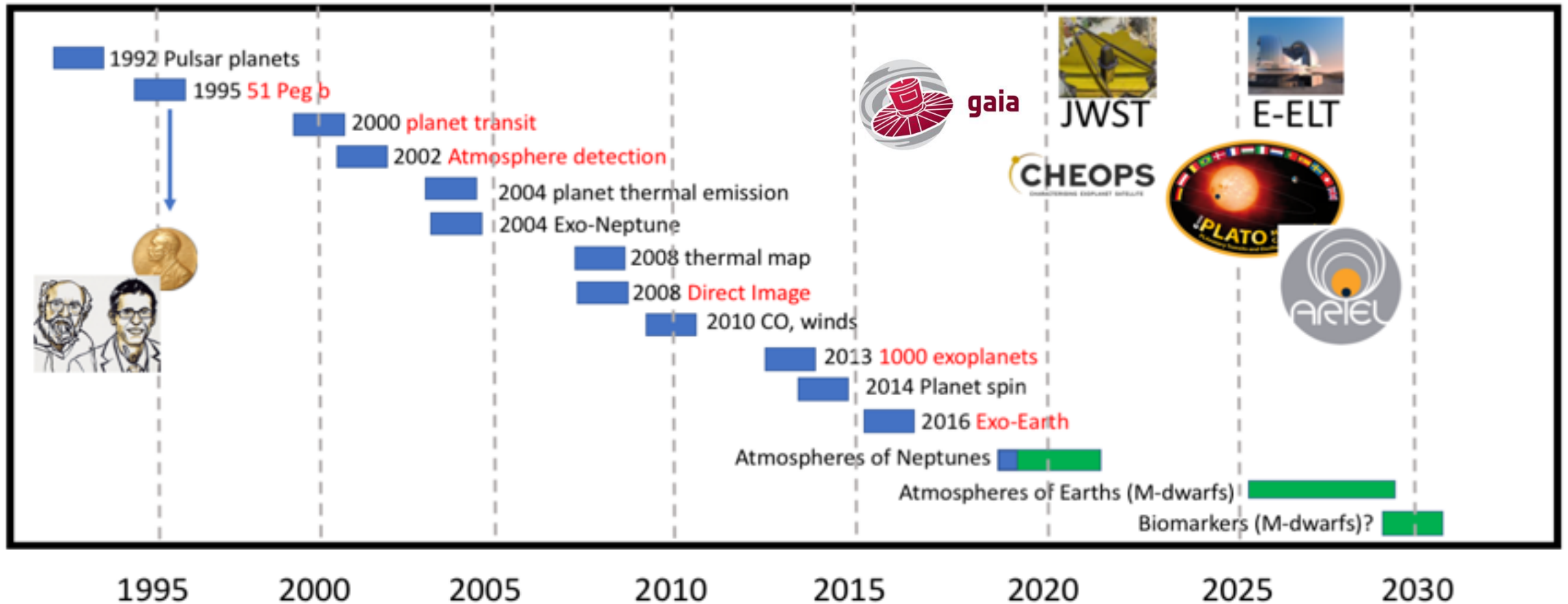
Exoplaneten en de diversiteit van andere werelden

Ignas Snellen

Sterrewacht Leiden, Universiteit Leiden



Een revolutie in exoplaneetonderzoek



De plaats van de Aarde en ons zonnestelsel in het heelal

- Hoe ontstaan planeten?
- Wat voor soorten planetenstelsels bestaan er?
- Hoe speciaal is ons zonnestelsel?
- Zijn er andere planeten met leven?



Planeten in ons zonnestelsel zijn enorm complex en divers



Venus



Aarde



June 26, 2001
Hubble Space Telescope • WFPC2
September 4, 2001
NASA, J. Bell (Cornell), M. Wolff (SSI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • STScI-PRC01-31

Mars



Titan

**Super-rotatie, CO₂,
dikke wolken van
zwavelzuur**

**Gedeeltelijk helder,
N₂
Biologisch zuurstof**

Dun, CO₂

**Heel koud, N₂, opaque
Dikke wolken van
methaan en ethaan**

Zonnestelsel:



Copyright © 1995 by The Natural History Museum, London

Charles Darwin (colourized B&W print)

Zoals het ontdekken van de
evolutietheorie met maar drie diersoorten

30 jaar exoplaneten

- duizenden exoplaneten gevonden
- diversiteit nog groter dan in ons eigen zonnestelsel
- 1:10 sterren hebben gasreuzen zoals Jupiter
- 1:5 sterren hebben Neptunus-achtige planeten
- Meeste sterren hebben planeten zo groot als Aarde



Mijlpaal: eerste Aardachtige planeten

August 2016



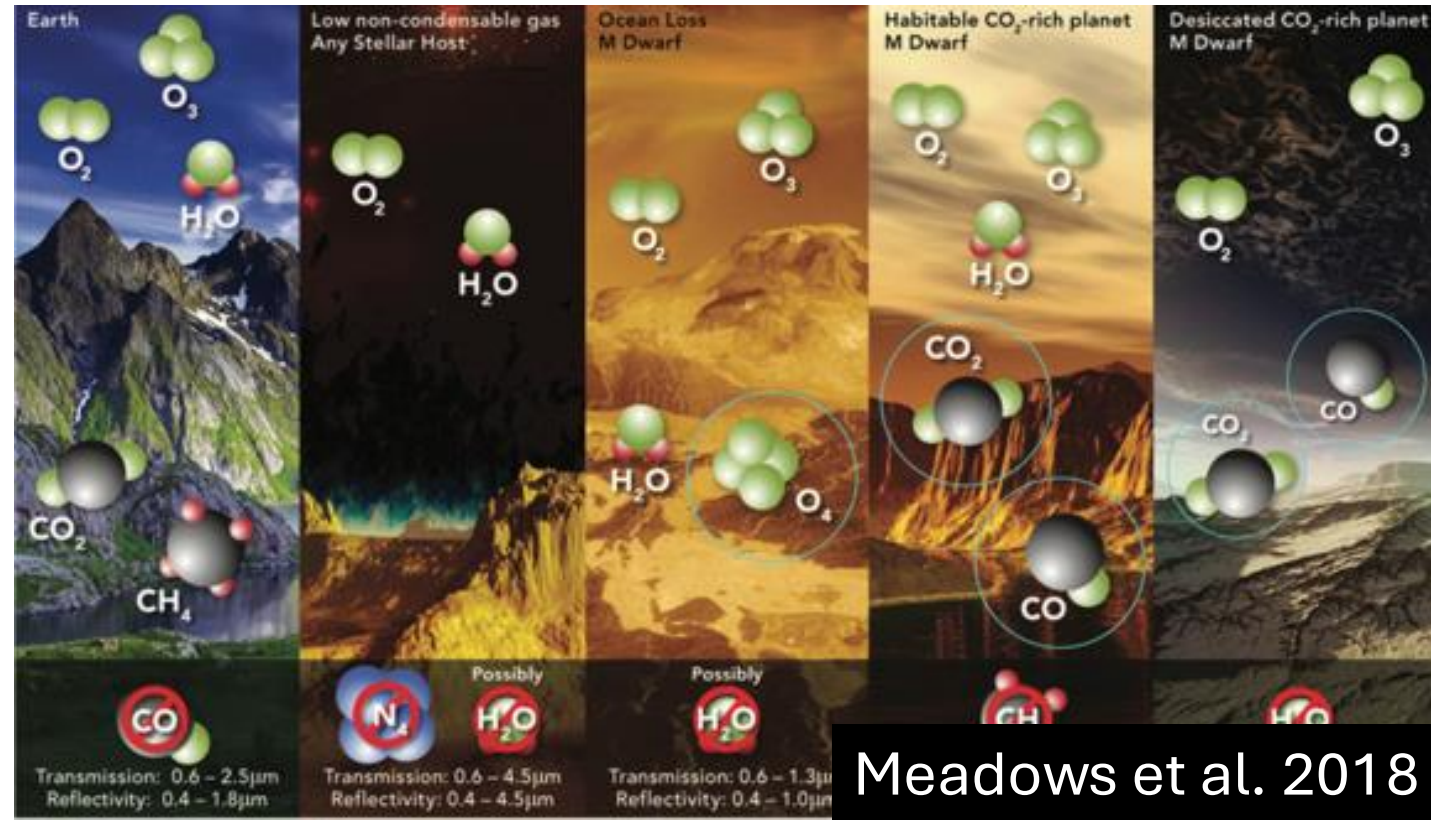
February 2017



Proxima b (Anglada-Escudé et al. 2016); TRAPPIST-1 system (Gillon et al. 2017)

Wat willen we meer weten over een exoplaneet?

- Heeft het een atmosfeer, en zo ja, uit welke gassen is deze opgebouwd?
- Wat is het klimaat?
- Begrijpen we hoe de planeet is ontstaan en geëvolueerd?
- Begrijpen we alle chemische en fysische processen; geologie?
- Is er water?
- Bio-gassen?
Bijv. O_2 , O_3 , CH_4 ?
- *Zijn deze biogassen er door biologische activiteit?*



Instrumentatie:

Waarom willen Sterrenkundigen een zo groot mogelijke telescoop? [D = spiegel-Diameter]

Instrumentatie:

Waarom willen Sterrenkundigen een zo groot mogelijke telescoop? [D = spiegel-Diameter]

- Om meer licht te kunnen opvangen [$\sim D^2$]
- Om scherper te kunnen kijken [$\sim \lambda/D$]

Wat is het voordeel van een telescoop in de ruimte?

Instrumentatie:

Waarom willen Sterrenkundigen een zo groot mogelijke telescoop? [D = spiegel-Diameter]

- Om meer licht te kunnen opvangen [$\sim D^2$]
- Om scherper te kunnen kijken [$\sim \lambda/D$]

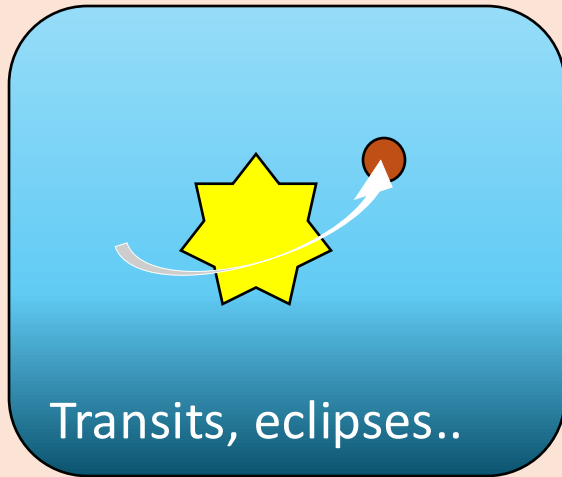
Wat is het voordeel van een telescoop in de ruimte?

- Geen last van seeing
- Geen last van absorptie door atmosfeer
- Geen thermische achtergrondstraling (gekoeld)
- Hele stabiele omgeving (L2)

Hoe meten we een exoplaneet atmosfeer?

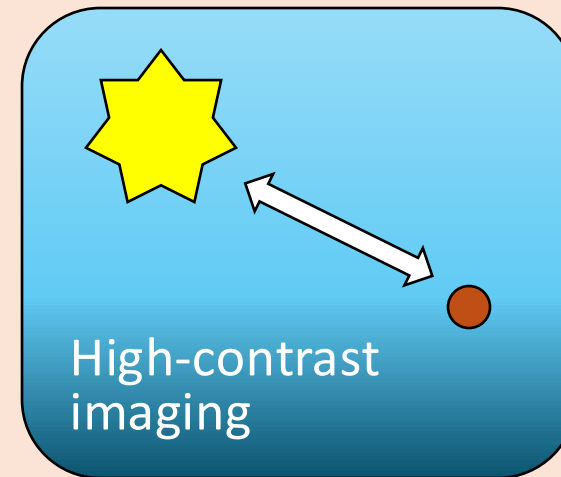
Time Differential:

Transits, eclipses, phase curves



Angular Differential:

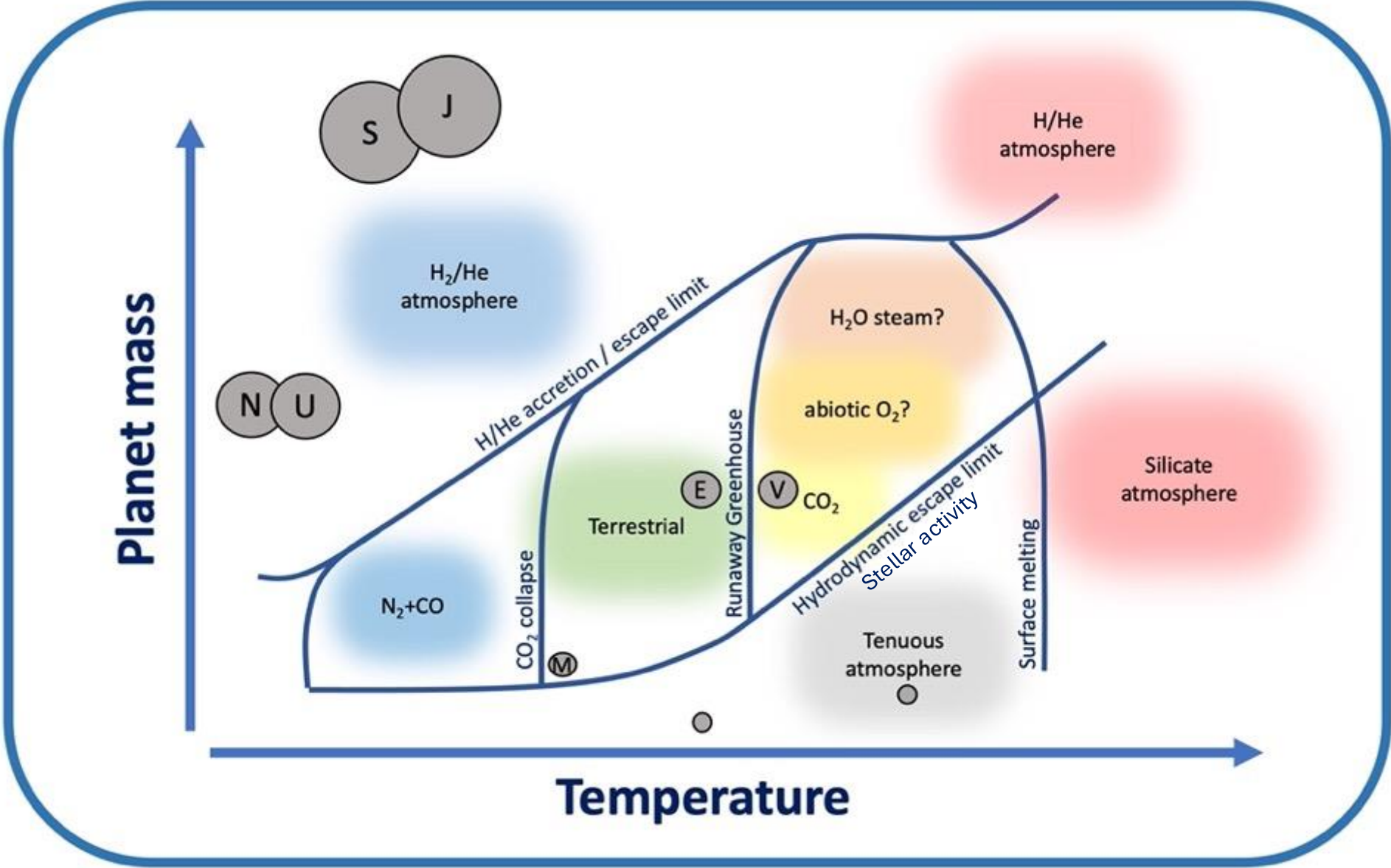
*High-Contrast Imaging /
Interferometry*



Successen pre-JWST: karakterisering van hete gasreuzen (hot Jupiters & Super-Jupiters)

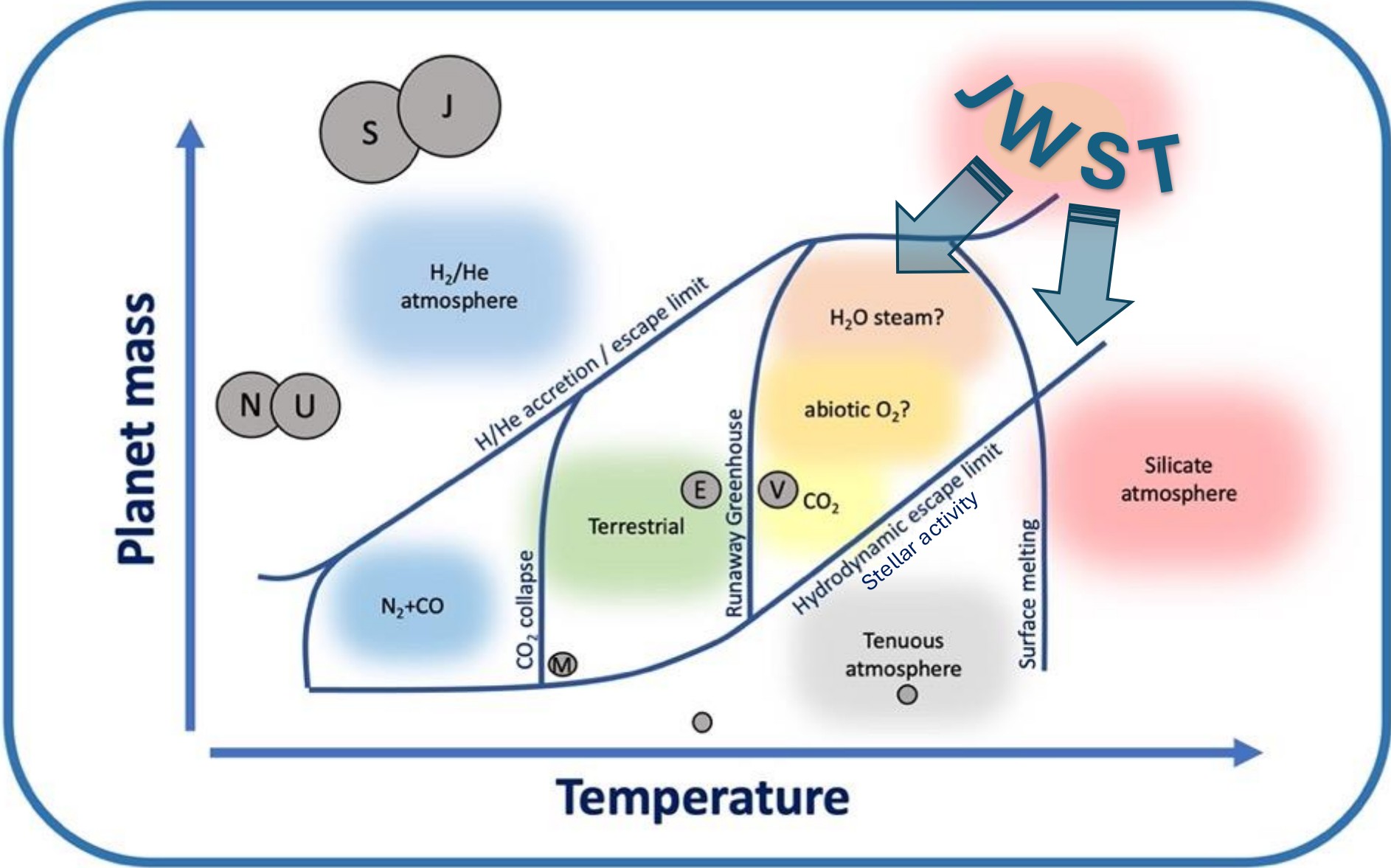
- Detectie van Moleculen, Atomen, and Ionen; temperatuursopbouw (vertikaal en longitudinaal); Exosferische verliezen; Raleigh verstrooiing; wolken; deeltjes-massa; globale circulatie; globale atmosferische winden, planeet-omwentelingen

Atmospheric Characterisation



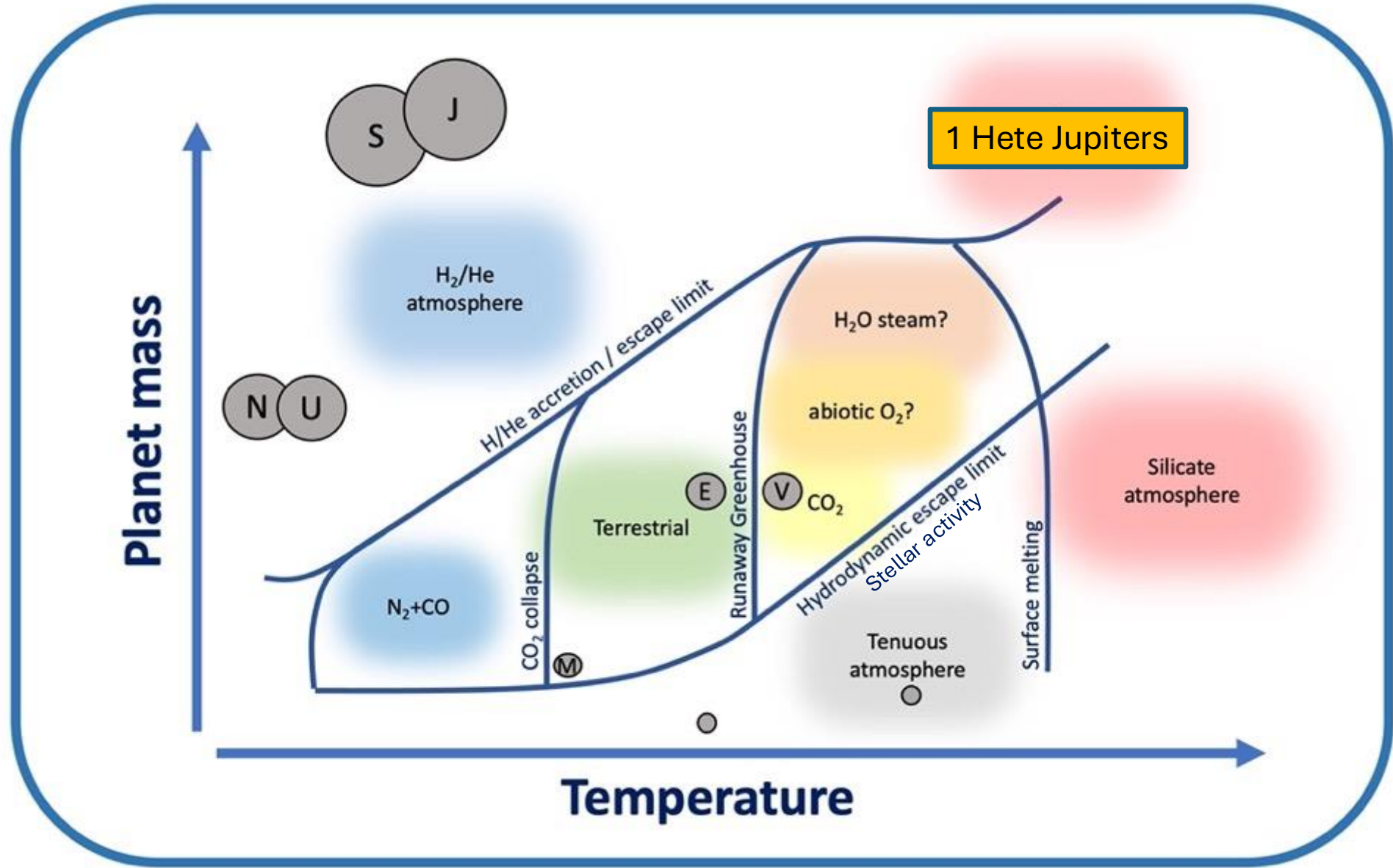
After Forget & Leconte (2014)

Atmospheric Characterisation



After Forget & Leconte (2014)

Atmospheric Characterisation

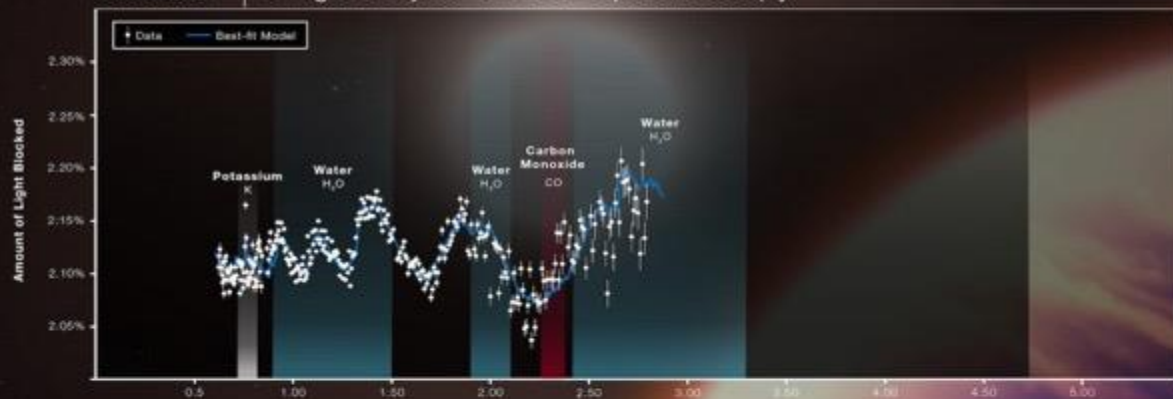


After Forget & Leconte (2014)

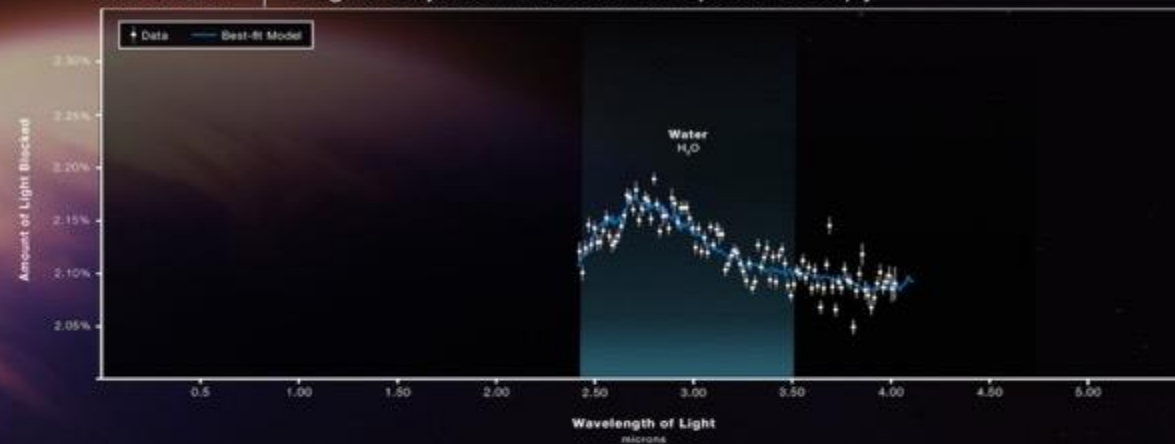
HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-39 b

ATMOSPHERE COMPOSITION

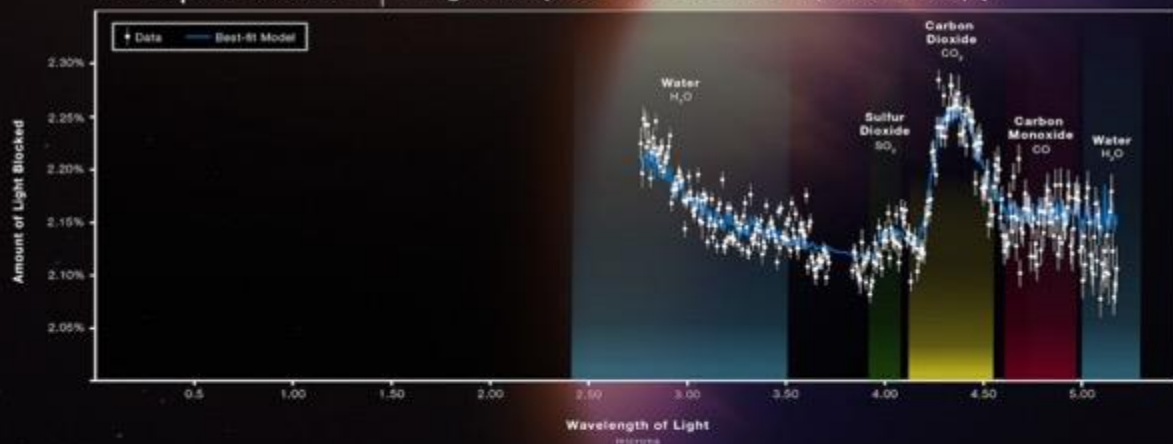
NIRISS | Single-Object Slitless Spectroscopy



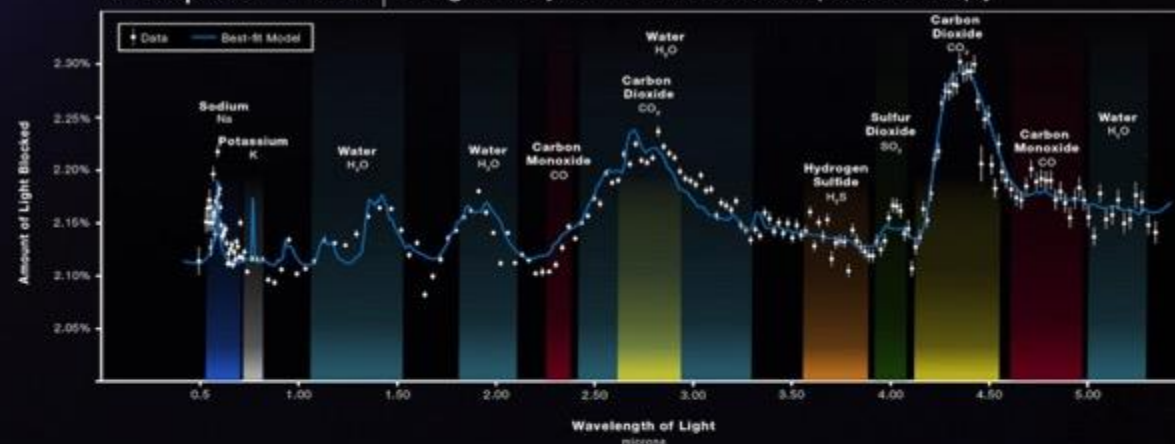
NIRcam | Bright Object Time-Series Spectroscopy



NIRSpec G395H | Bright Object Time-Series Spectroscopy



NIRSpec PRISM | Bright Object Time-Series Spectroscopy

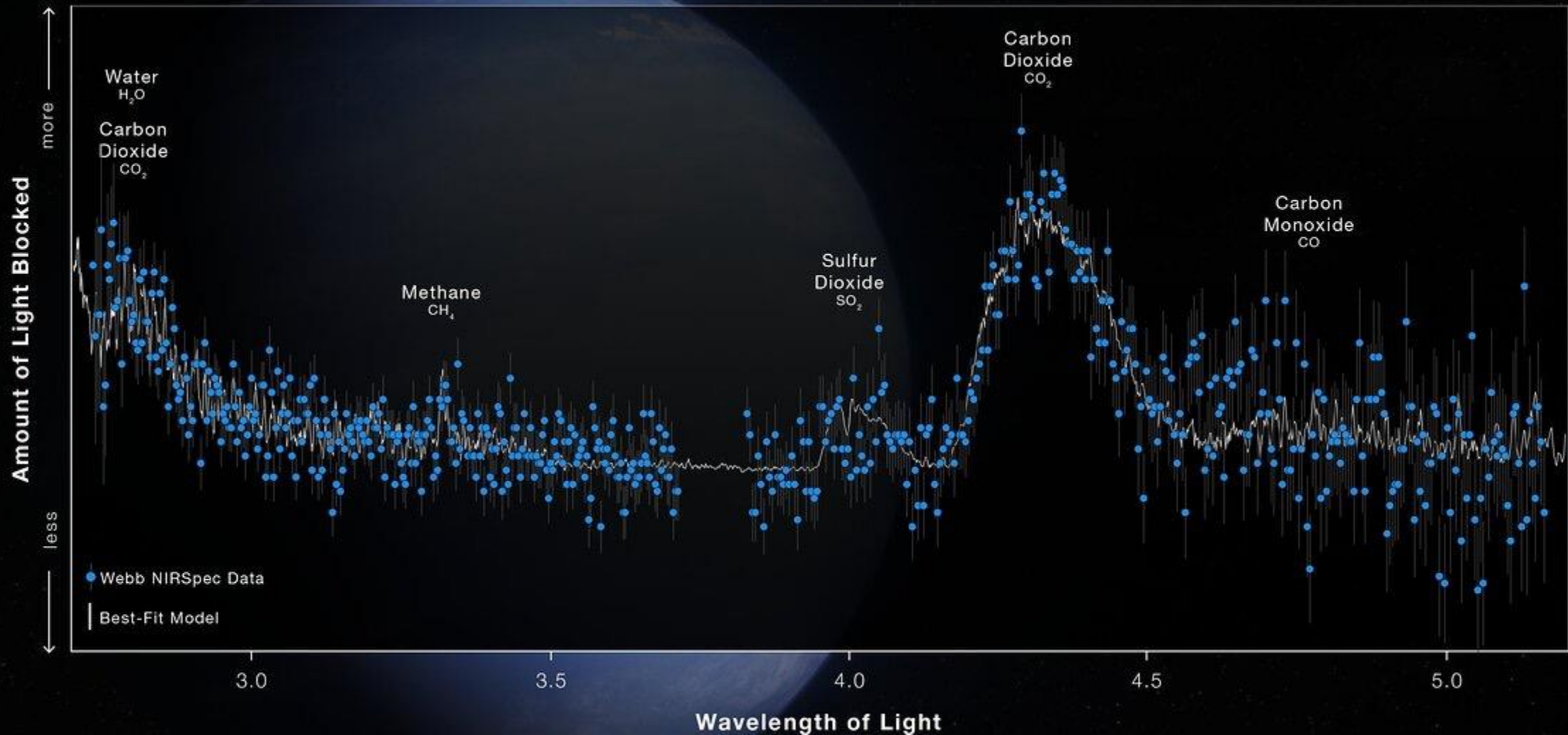


GAS-GIANT EXOPLANET WASP-107 b

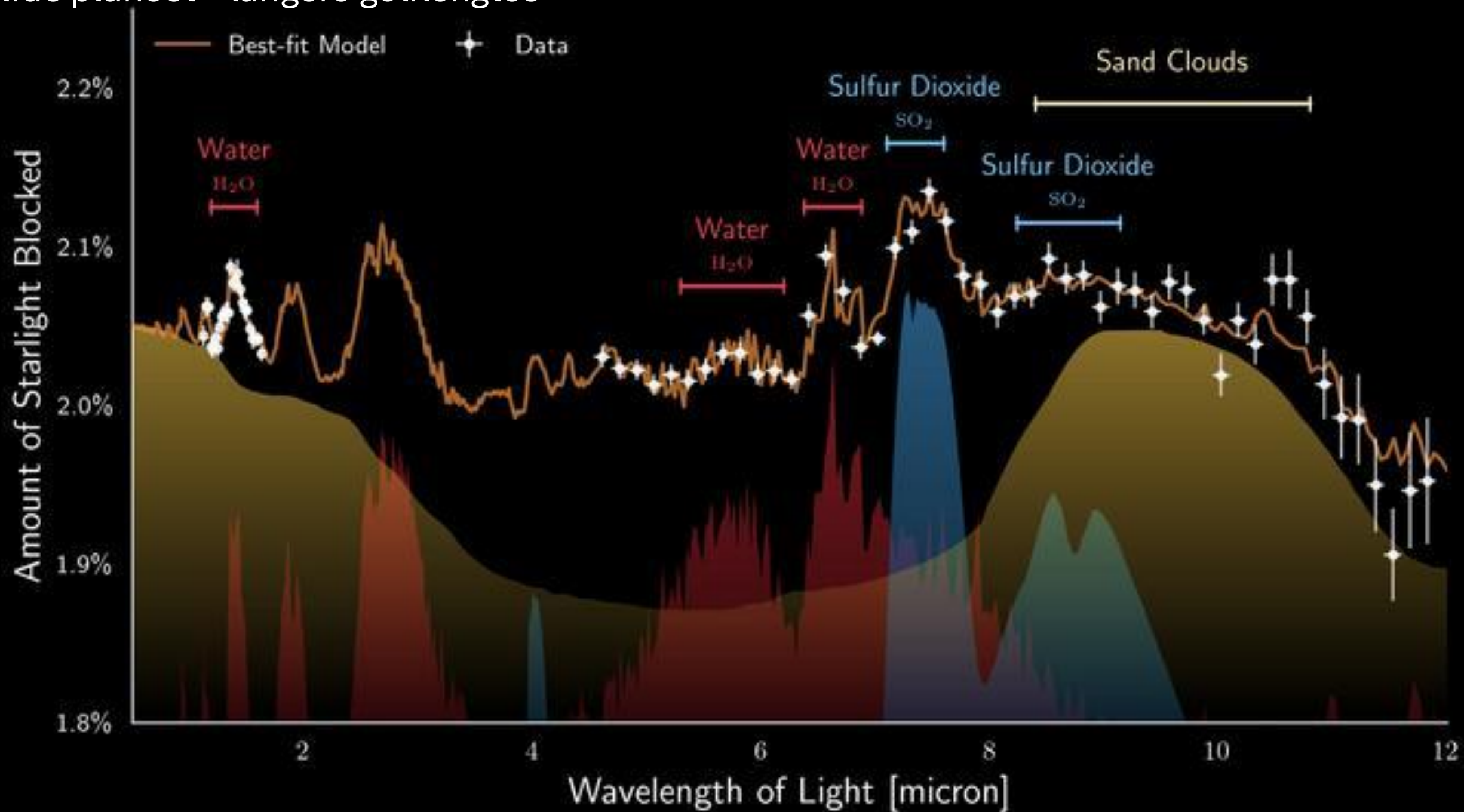
TRANSMISSION SPECTRUM

Warm Neptune

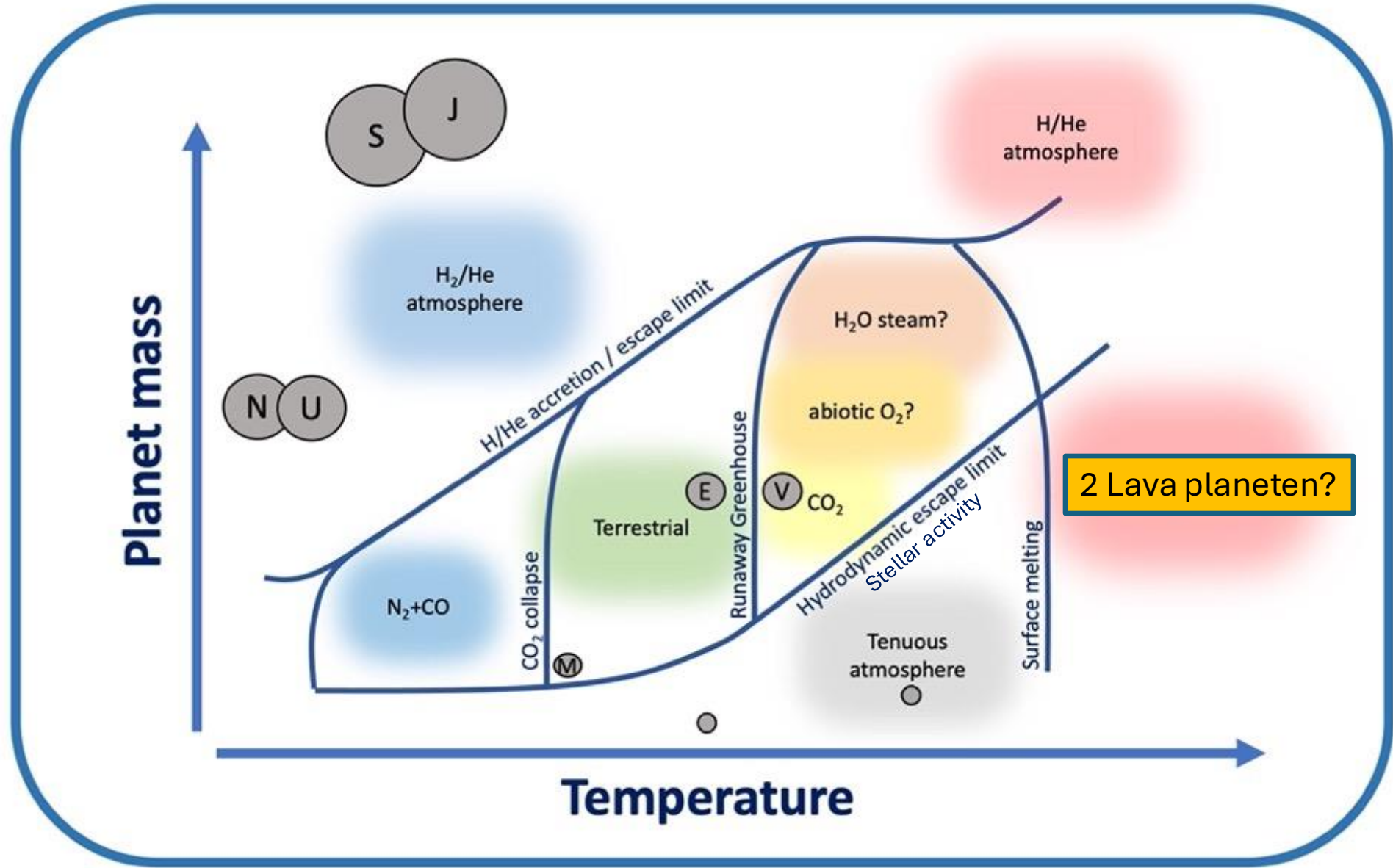
NIRSpec | Bright Object Time-Series Spectroscopy



Zelfde planeet – langere golflengtes



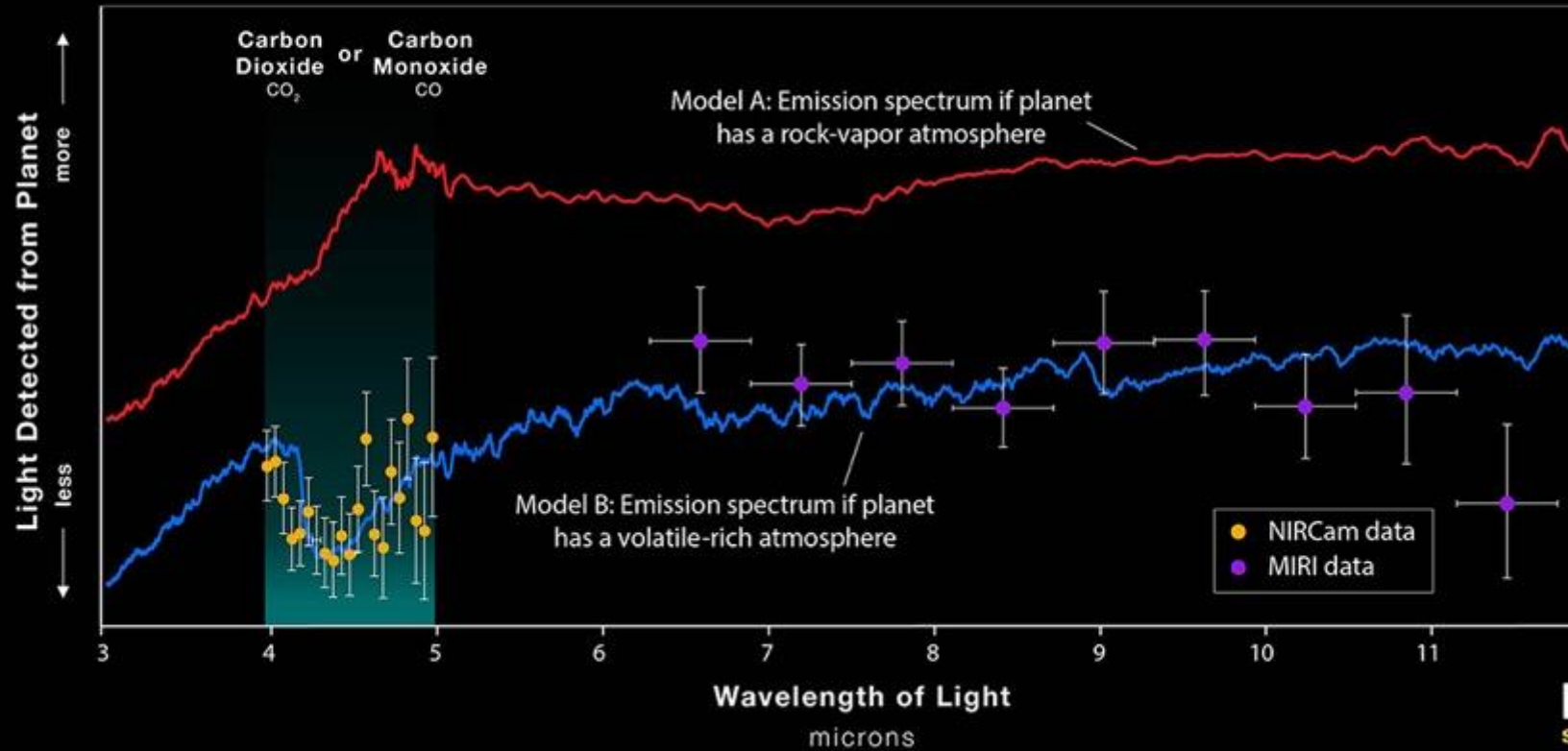
Atmospheric Characterisation



After Forget & Leconte (2014)

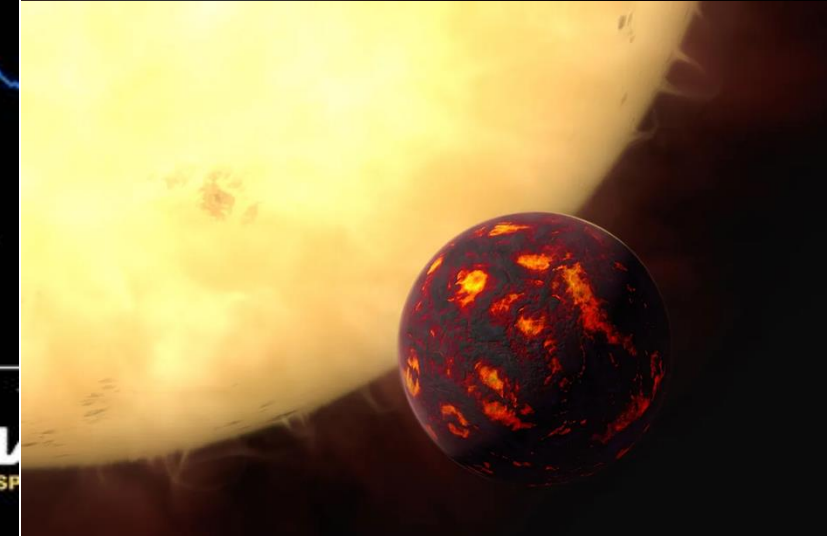
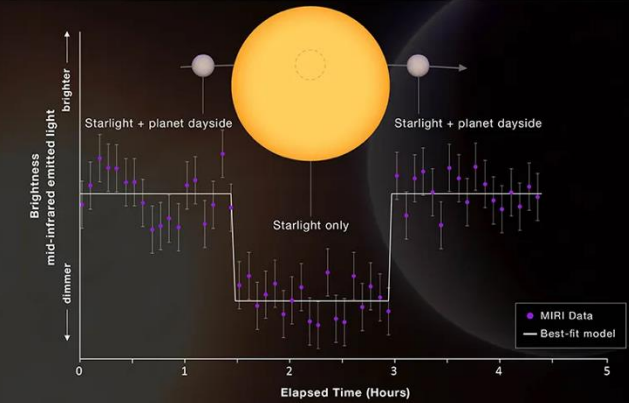
SUPER-EARTH EXOPLANET 55 CANCRI e EMISSION SPECTRUM

NIRCam | GRISM Spectroscopy
MIRI | Low-Resolution Spectros



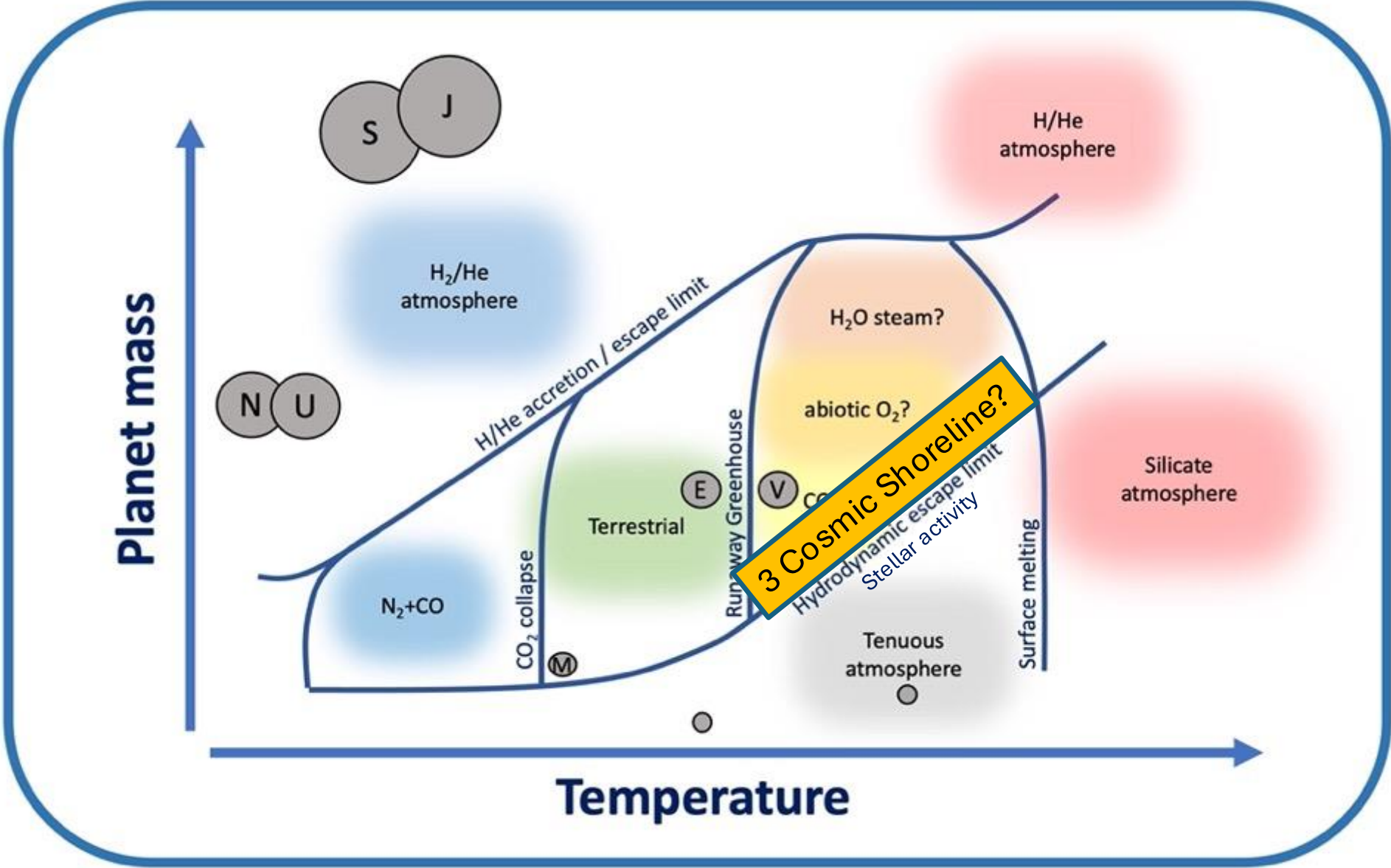
SUPER-EARTH EXOPLANET 55 CANCRI e SECONDARY ECLIPSE LIGHT CURVE

MIRI | Low-Resolution

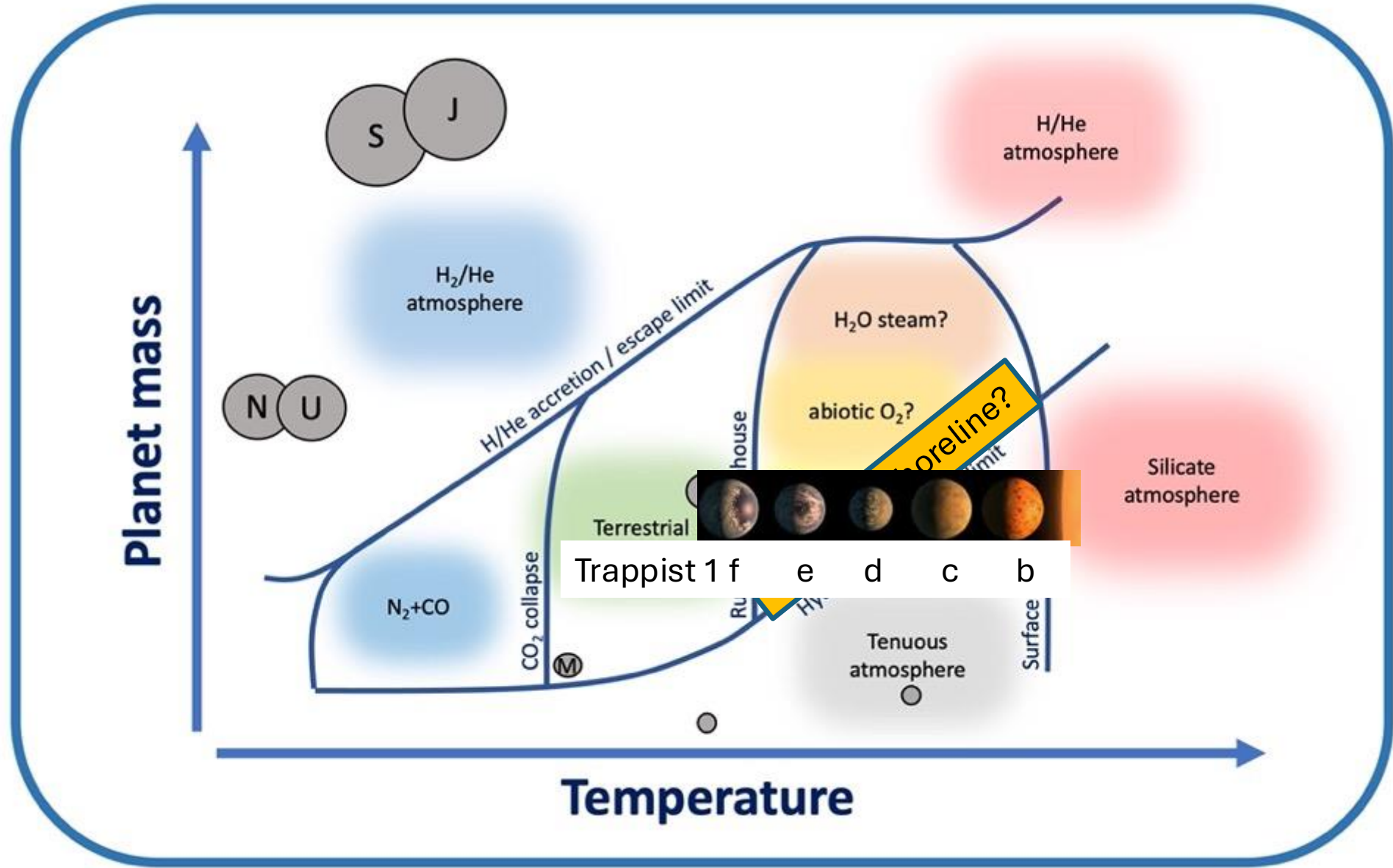


Lava Planet? 55 Cnc e
eclipse spectroscopie → *variabel?*

Atmospheric Characterisation

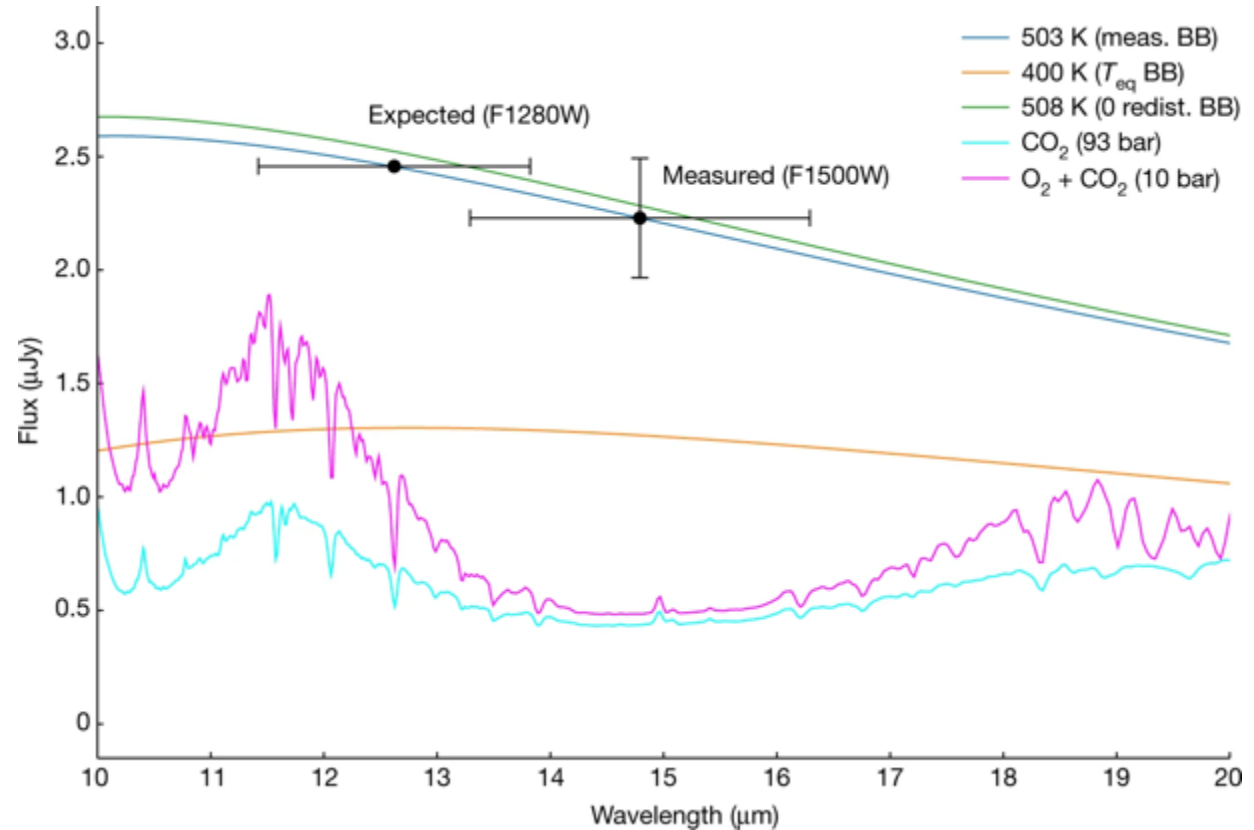
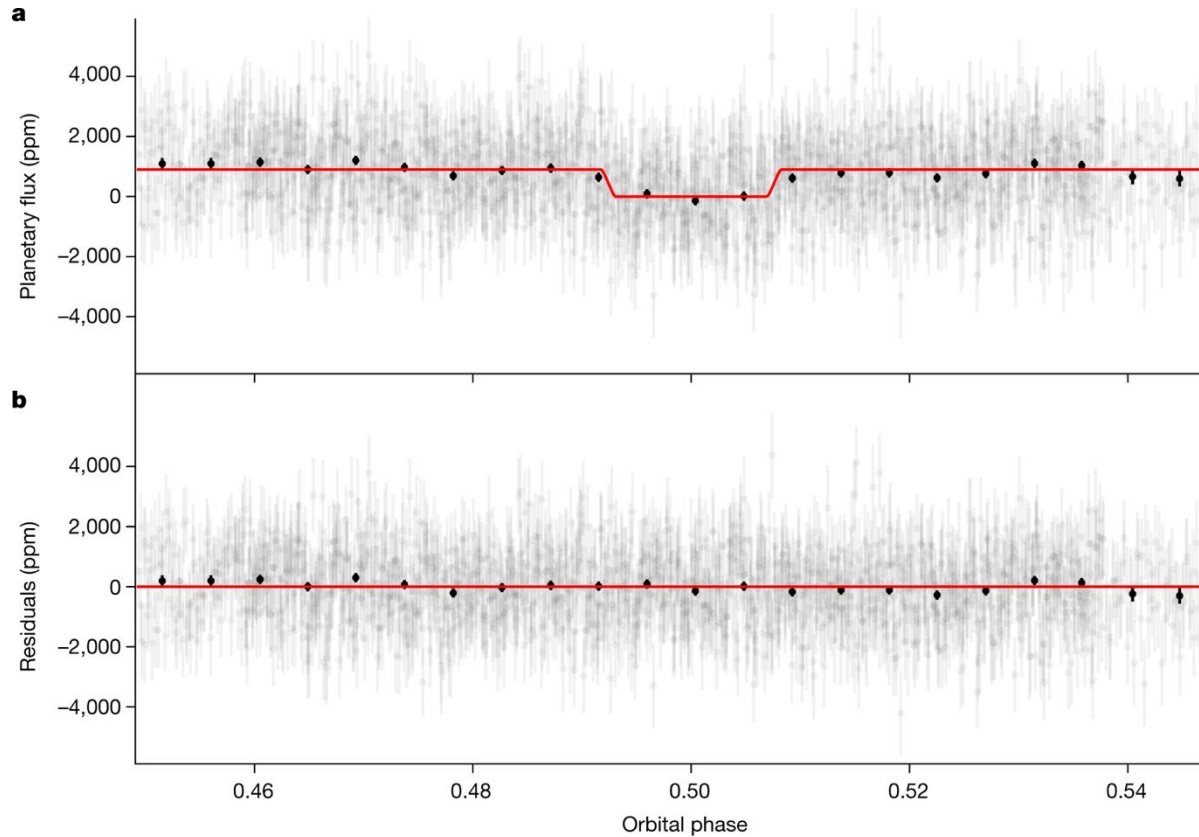


Atmospheric Characterisation



After Forget & Leconte (2014)

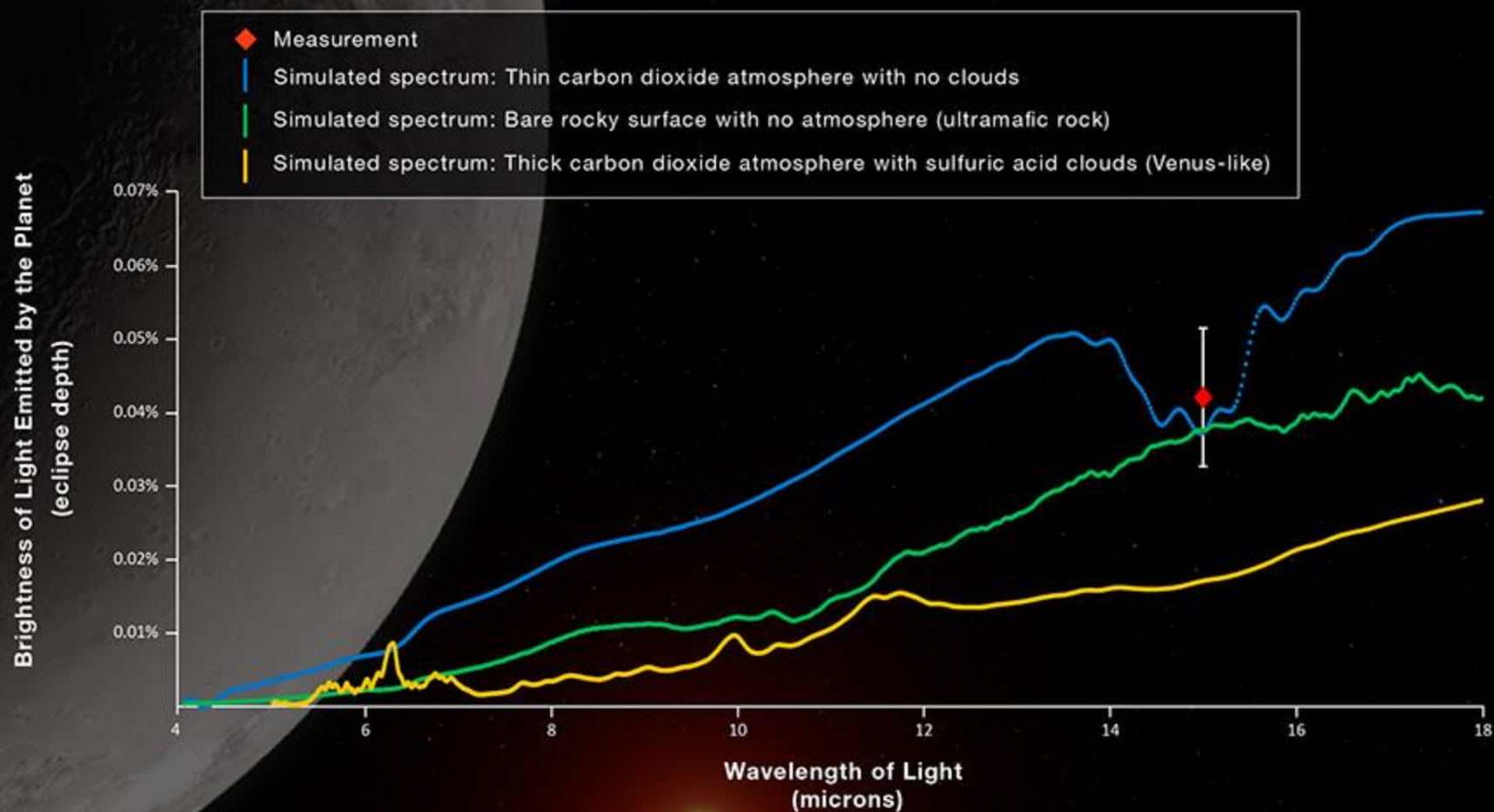
Trappist 1 b (500 K - Greene et al. 2023)



ROCKY EXOPLANET TRAPPIST-1 c

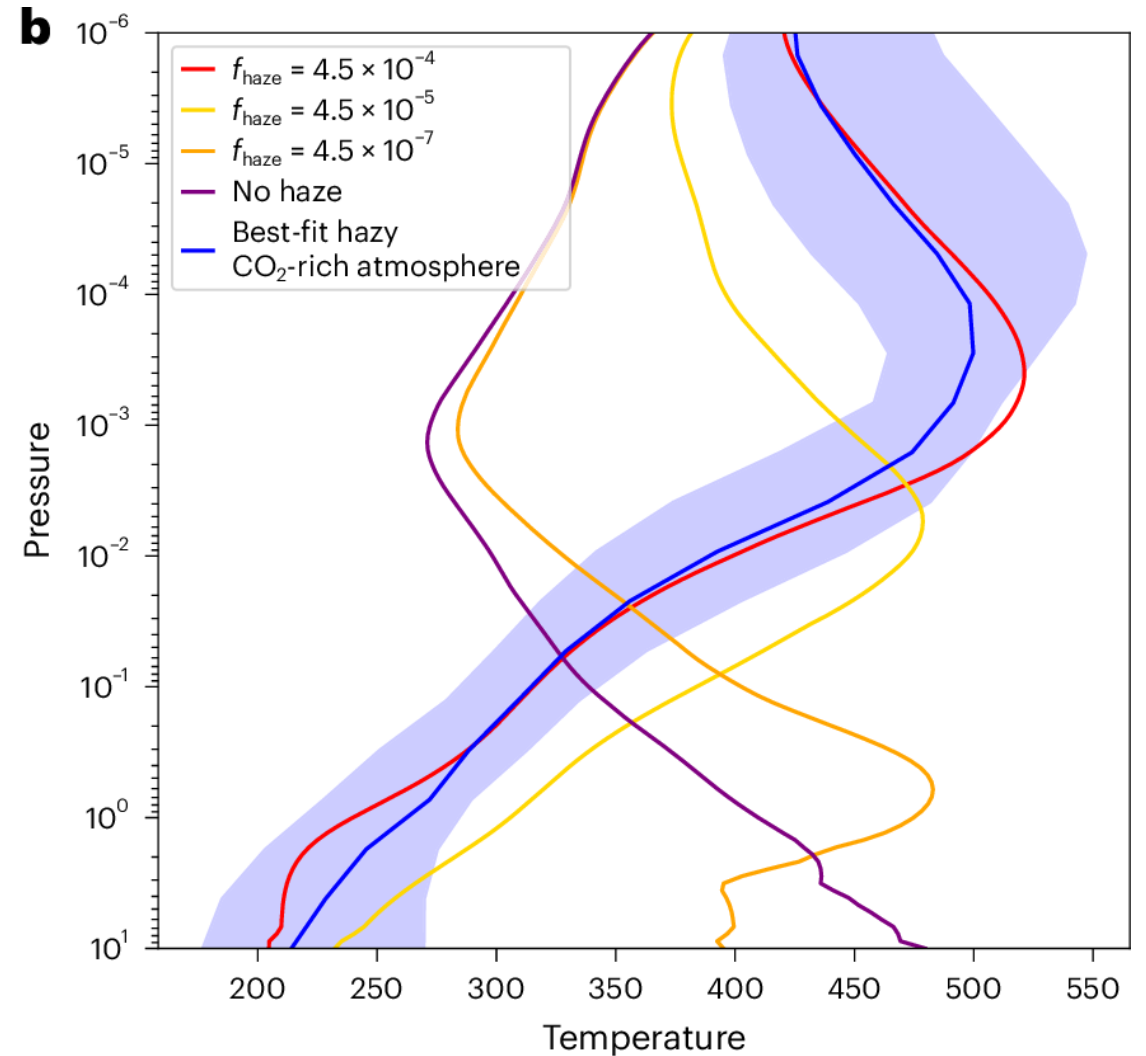
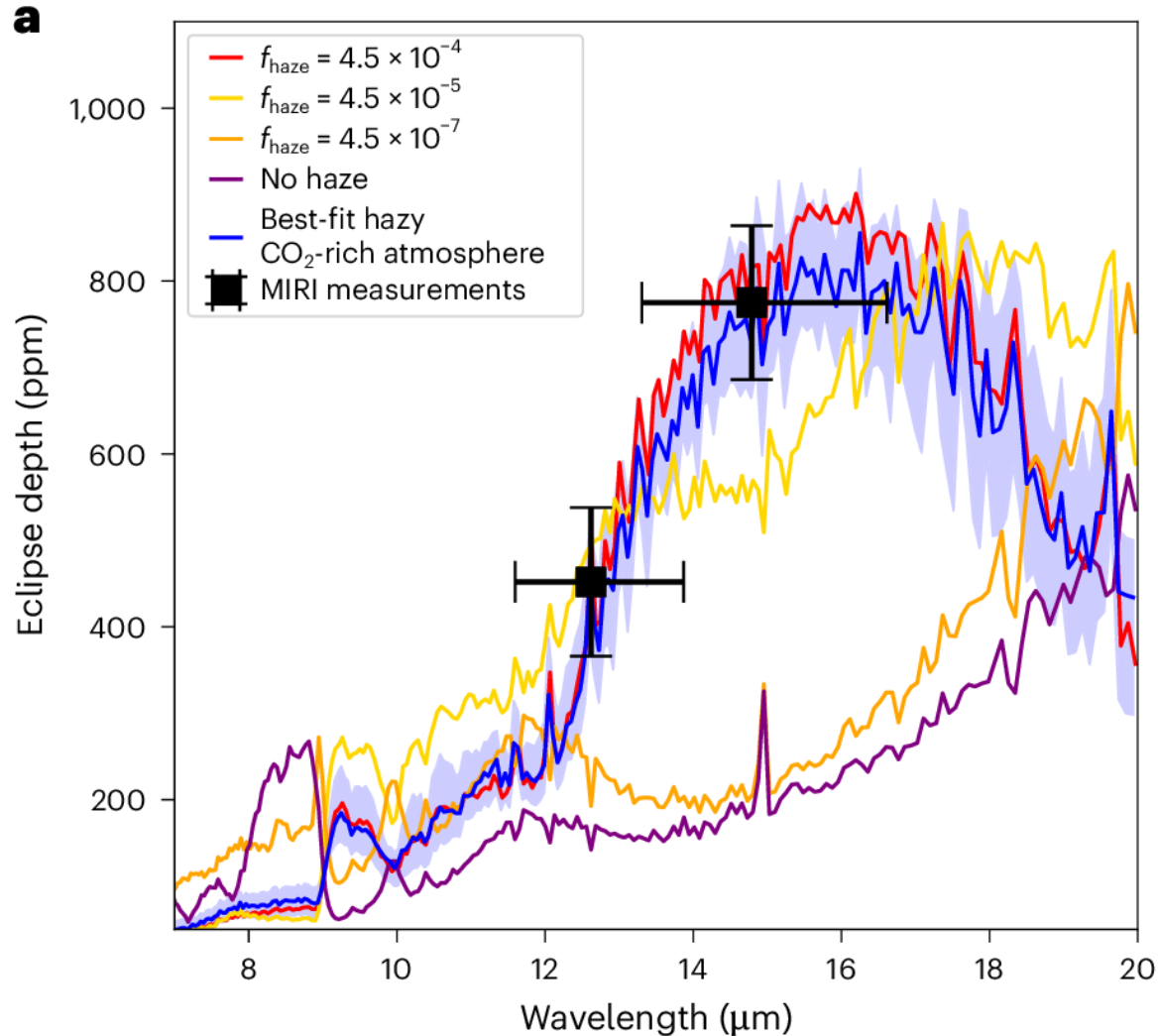
EMISSION SPECTRA

MIRI | Time-Series Photometry (F1500W)



Trappist 1b – Ducrot et al. 2024

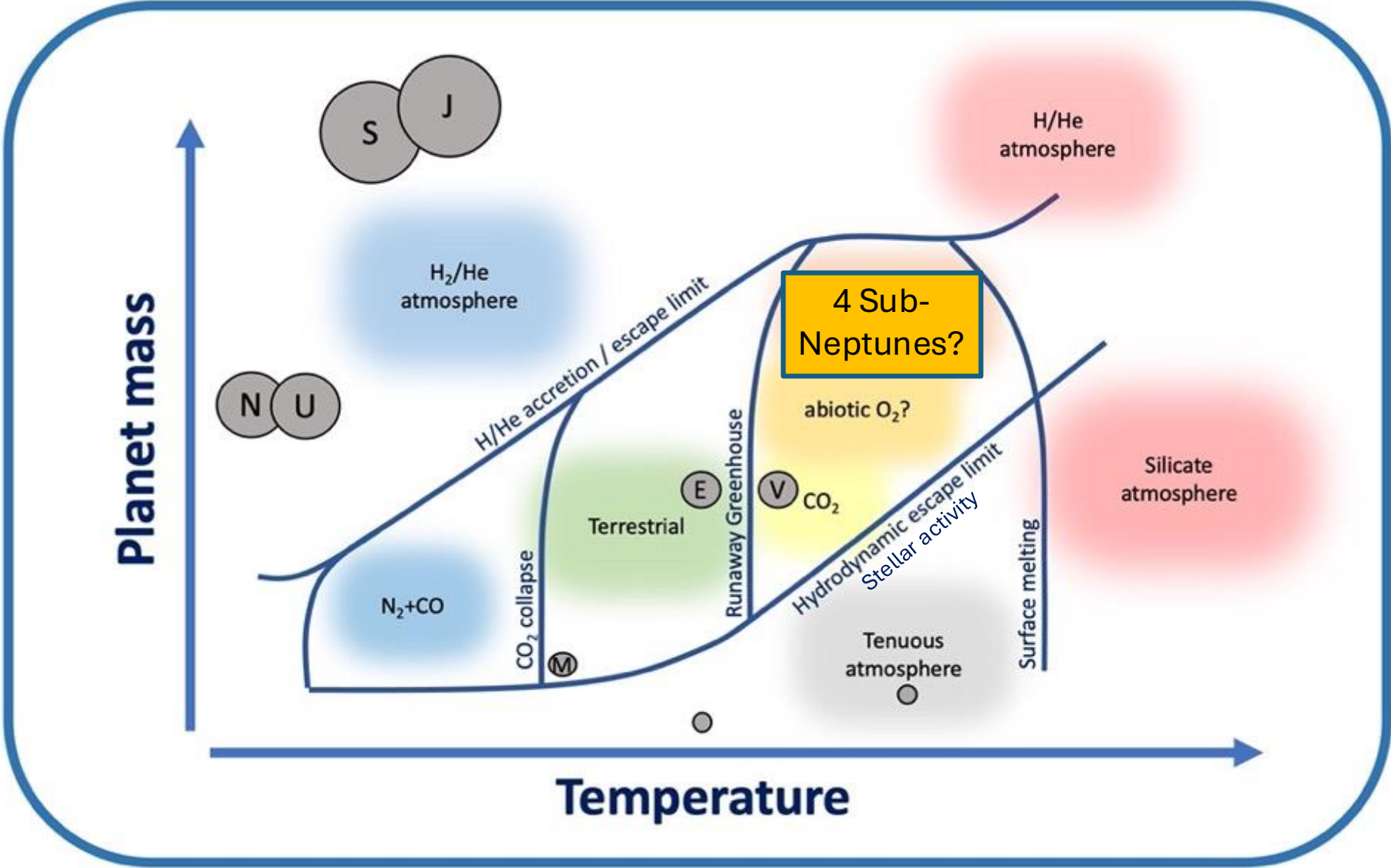
Hazes + inversie-laag fit de data ook



Conclusie

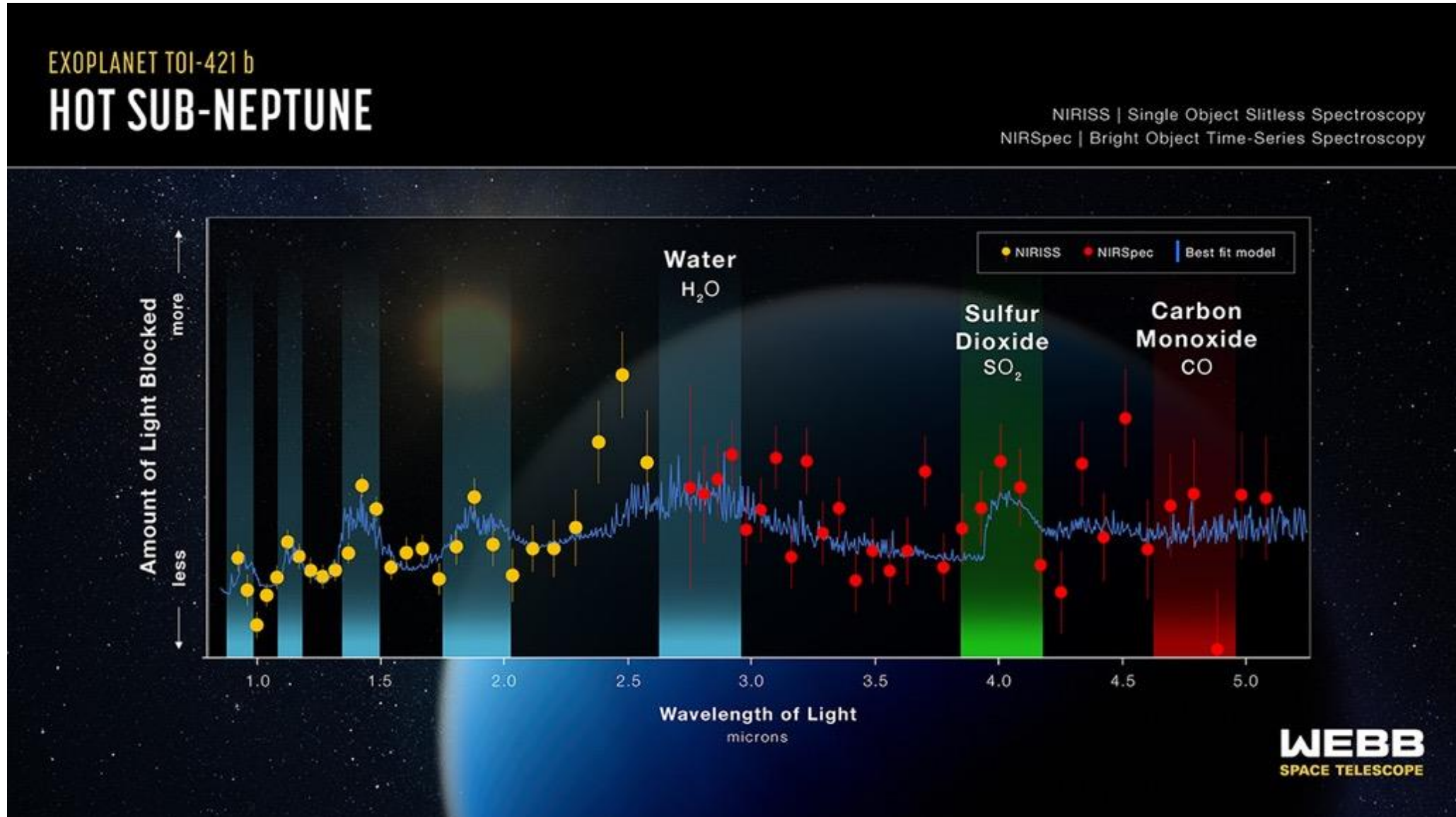
Nog geen duidelijk bewijs dat warme (400— 500 K) aardachtige planeten rond rode dwergsterren een atmosfeer hebben

Atmospheric Characterisation



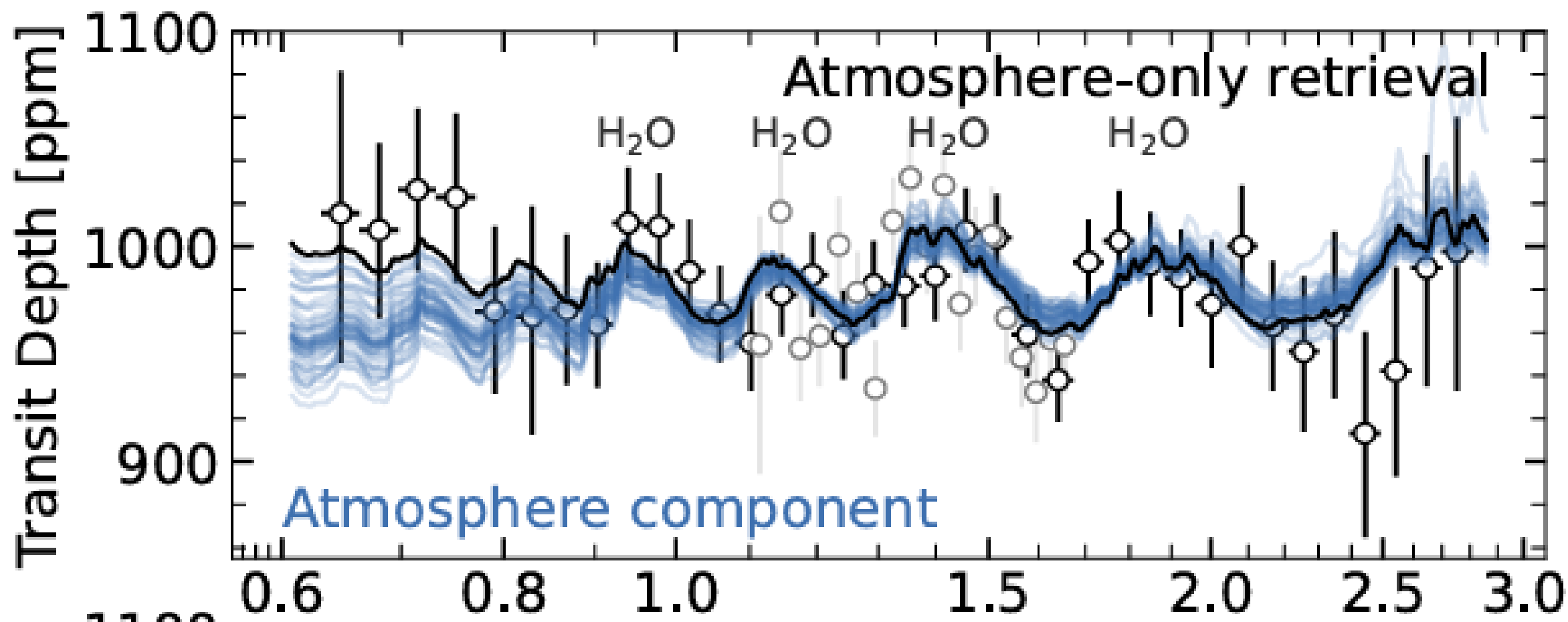
After Forget & Leconte (2014)

Kleinere planeten zijn moeilijker waar te nemen

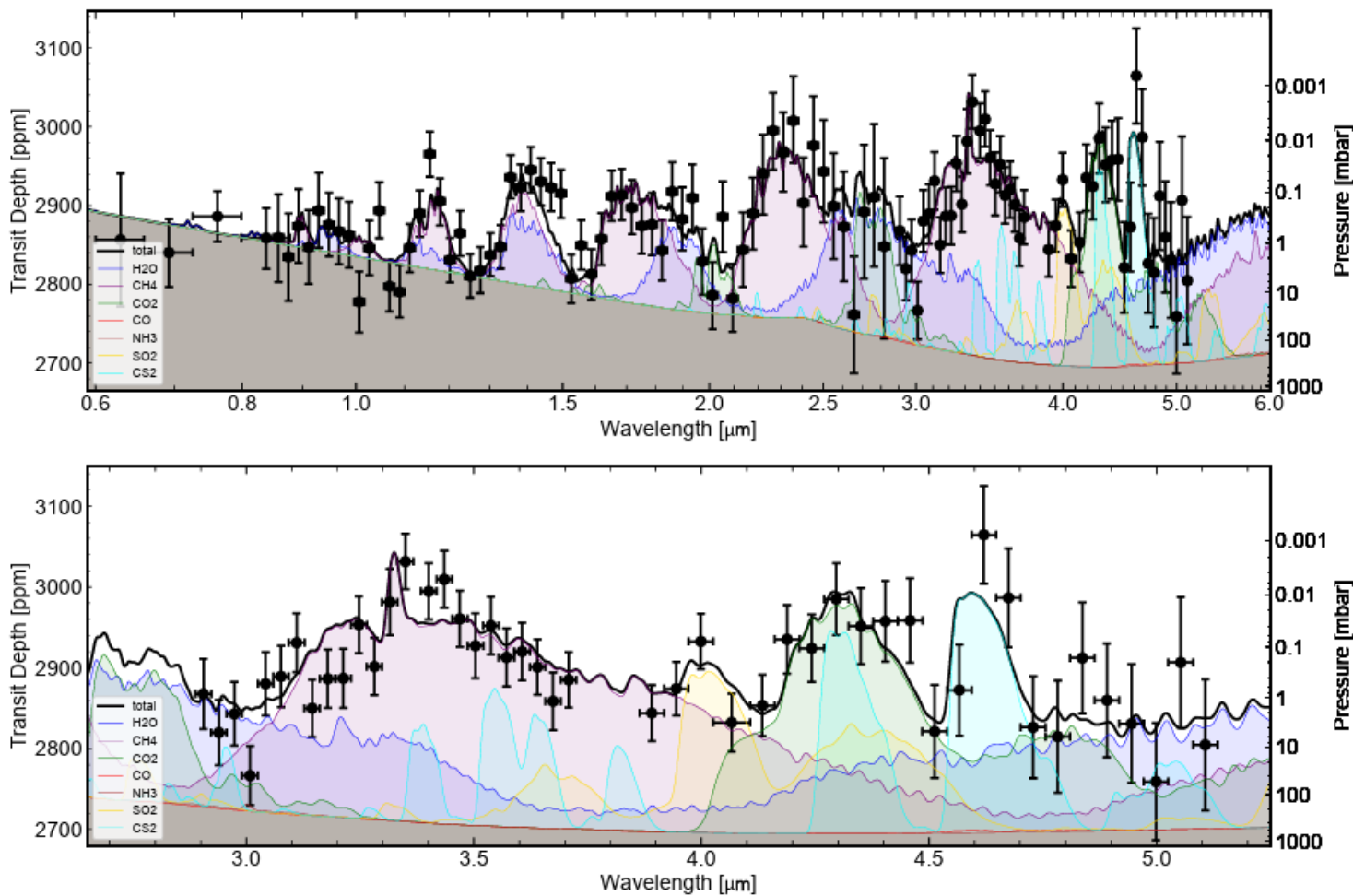


GJ 9827 d – steam world? >30% waterdamp

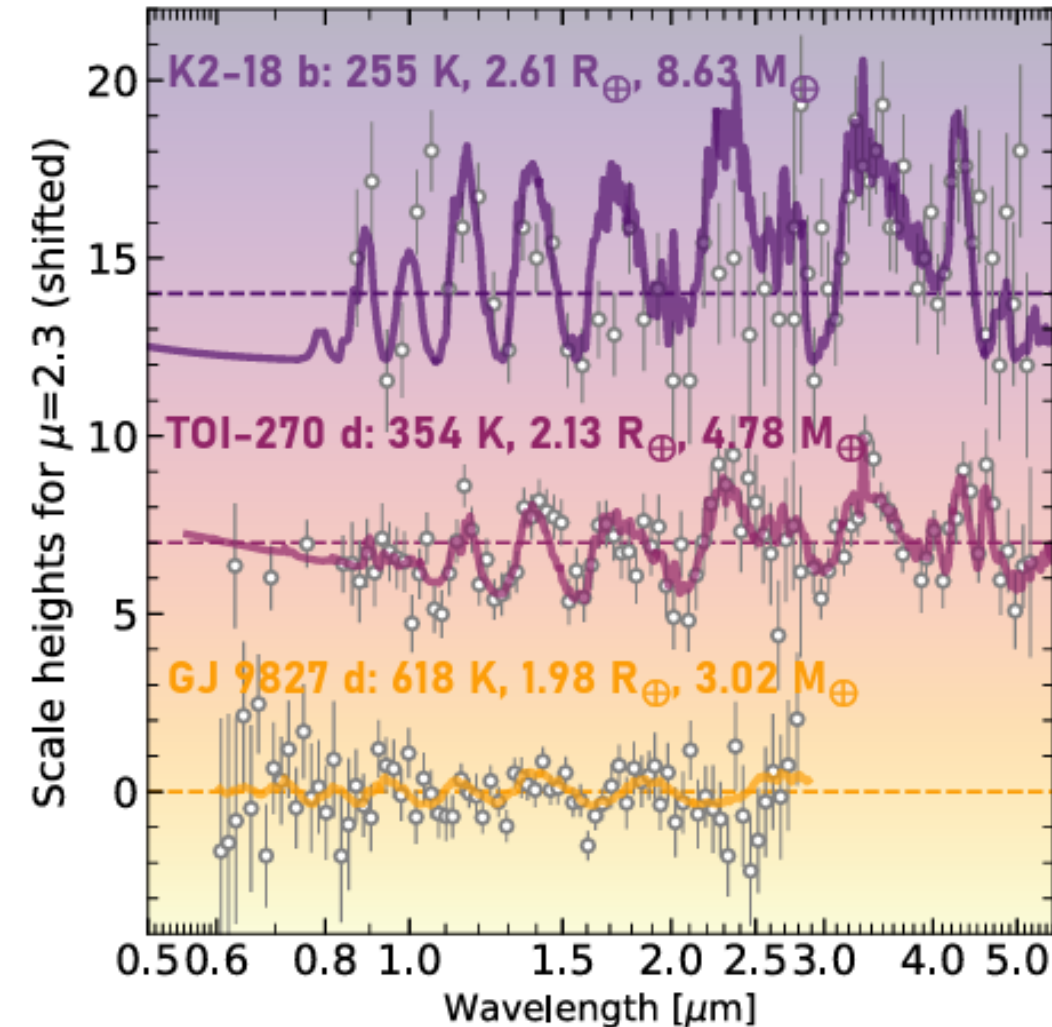
PIAULET-GHORAYEB ET AL. 2024; PREPRINT



TOI-270d – Benneke et al. 2024; preprint



Sterkte van transmissie-signalen vertelt iets over de “omvang” van de atmosfeer



Hoe hoger de temperatuur
Hoe lichter de deeltjes
Hoe lager de zwaartekracht

Hoe groter de atmosfeer

Atmosferische
schaalhoogte

$$H = \frac{kT}{\mu g}$$

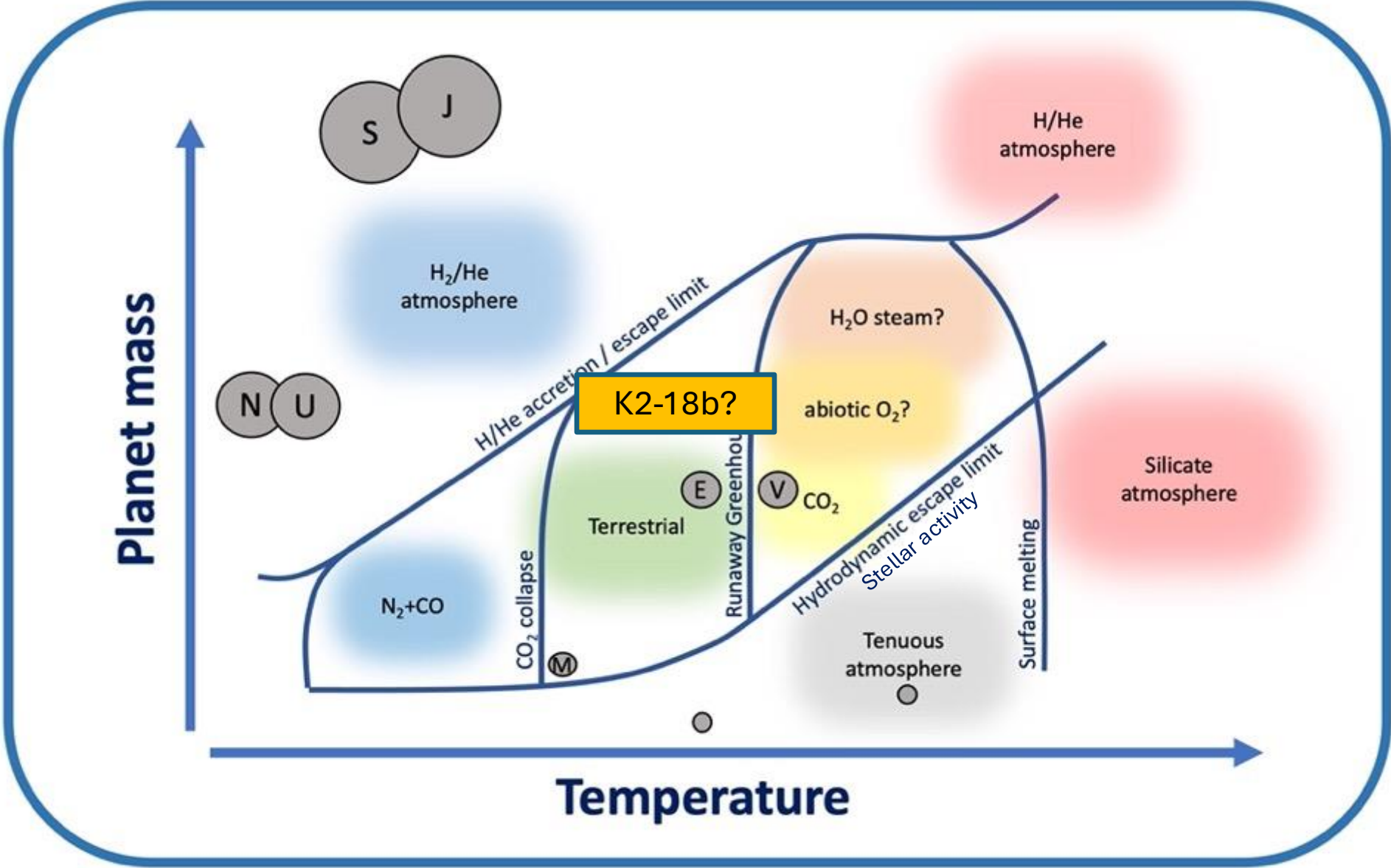
Gemiddelde
deeltjes-massa

Temperatuur

Opp. zwaartekracht

Wolken kunnen dit beeld verstoren

Atmospheric Characterisation

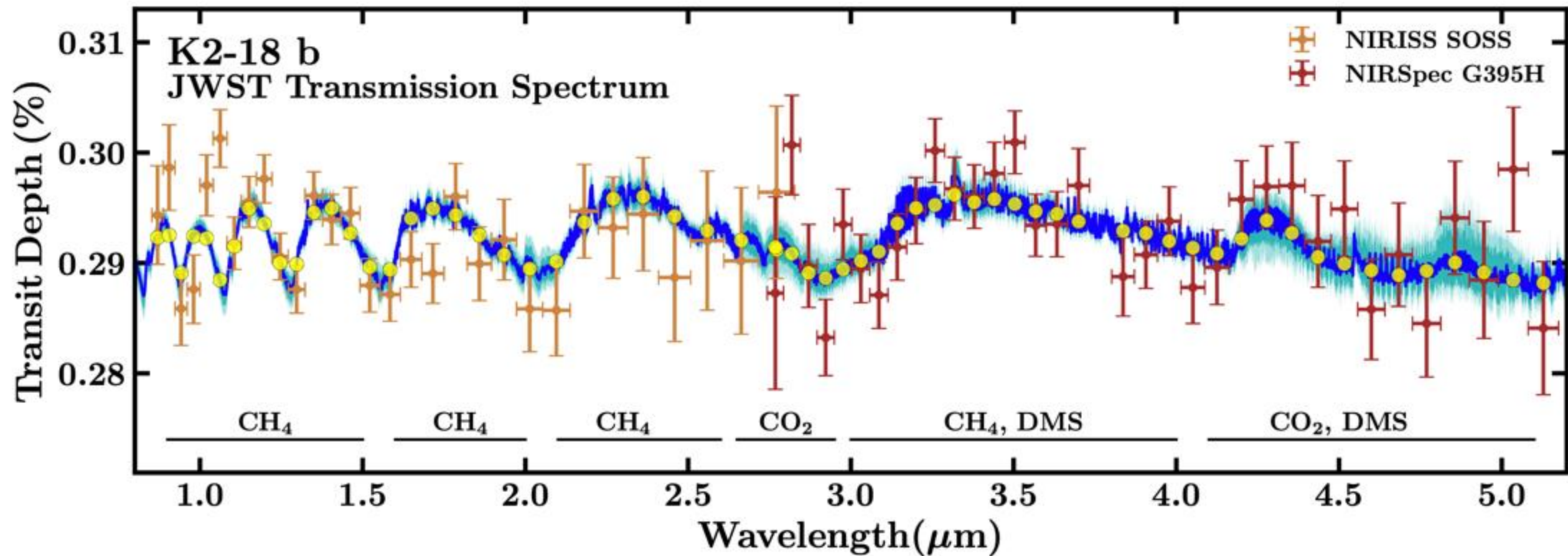


After Forget & Leconte (2014)

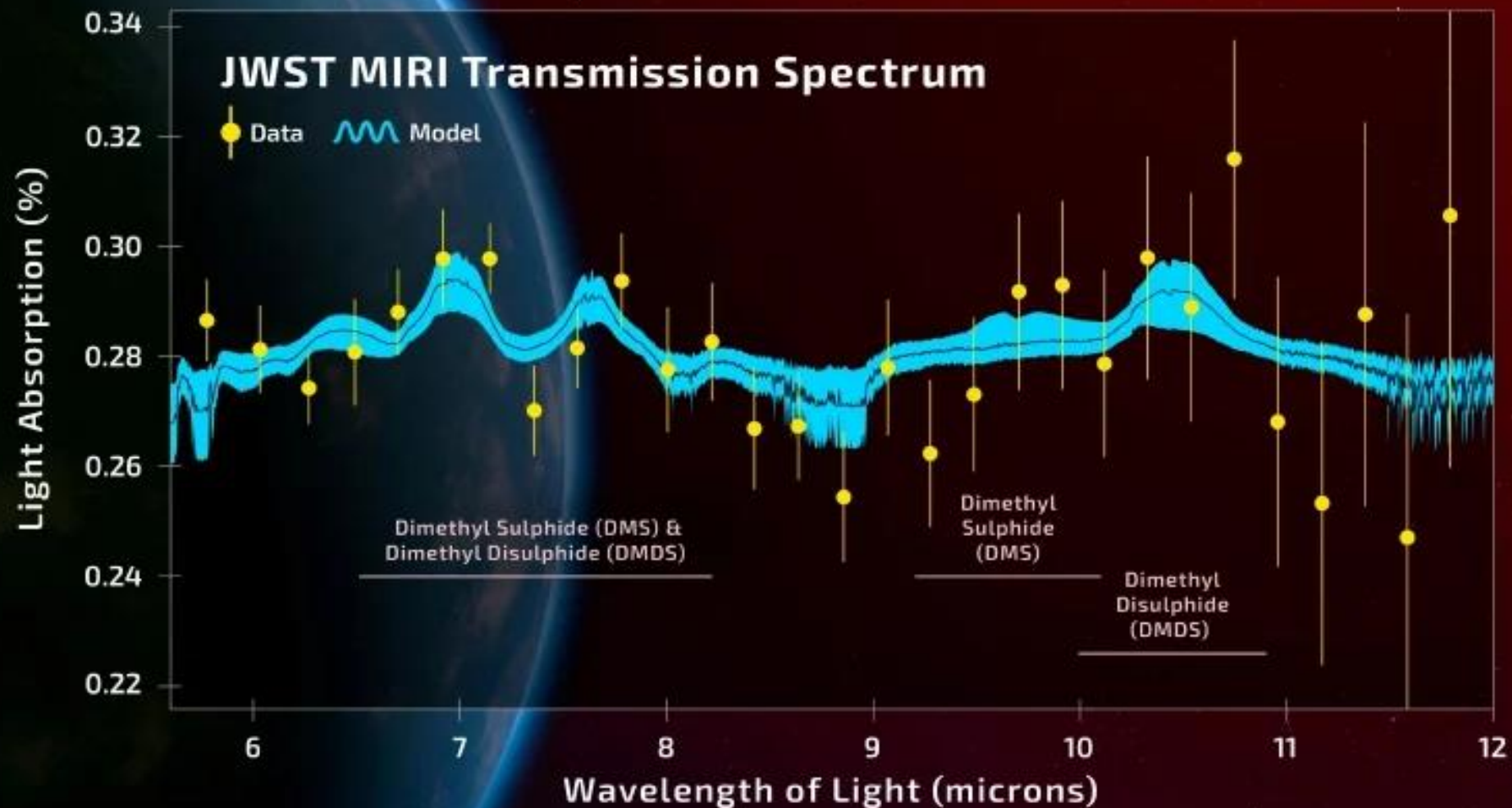
K2-18b “Hycean world” of iets anders, toch?

18

MADHUSUDHAN ET AL.



Habitable-zone Exoplanet **K2-18 b**



Keep the story close. [Download the app](#)

Astronomers Detect a Possible Signature of Life on a Distant Planet

Further studies are needed to determine whether K2-18b, which orbits a star 120 light-years away, is inhabited, or even habitable.

▶ Listen to this article · 6:39 min [Learn more](#)



Share full article



628



NOS Nieuws · Donderdag 17 april, 02:29 · Aangepast donderdag 17 april, 07:14



Wetenschappers vinden 'sterkste tekenen tot nu toe' van mogelijk buitenaards leven

BBC

[Home](#) [News](#) [Sport](#) [Business](#) [Innovation](#) [Culture](#) [Arts](#) [Travel](#) [Earth](#) [Audio](#) [Video](#) [Live](#)

Scientists find 'strongest evidence yet' of life on distant planet

17 April 2025

Share  Save 



Pallab Ghosh
Science Correspondent · @BBCPallab

Waarom dit onverantwoordelijke onzin is....

Een les in statistiek

“signaal” is gevonden met een significantie van $\sim 3\sigma$. Dit is een maat voor de sterkte van het signaal tov ruis.

“statistische kans” dat dit toeval is = 0.3%. Echter, 0.3% is alleen voor de willekeurige onzekerheden, niet voor **systematische onzekerheden**. Astronomen geloven niet in 3σ resultaten. Afhankelijk van keuzes in data-analyse

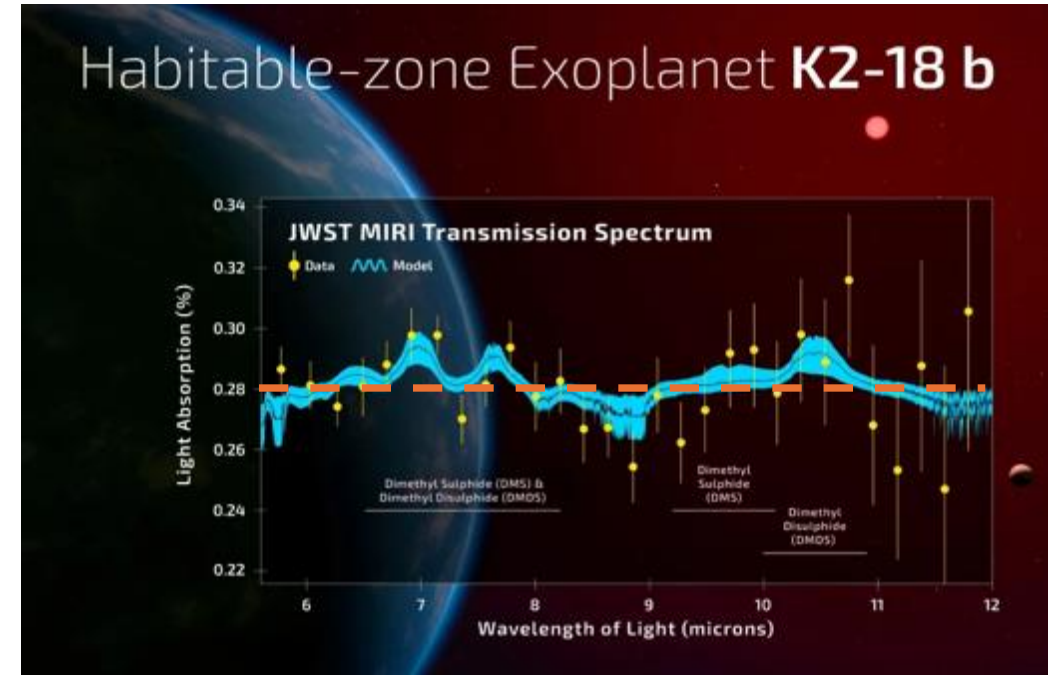
Stel, we geloven het 3σ resultaat wel: De statistische test die is uitgevoerd is:

nul-hypothese: er is geen signaal

alternatieve hypothese: DMS/DMDS signaal

nul-hypothese wordt statistisch verworpen met 99.7% zekerheid. Dat betekent **niet** dat de alternatieve hypothese voor 99.7% zeker is! Daarvoor zou je ook andere moleculen moeten testen en kijken of ze de data “fitten”.

De wobbles, als ze echt zijn, kunnen door vanalles worden veroorzaakt



“...99.7% kans dat er DMS/DMDS is...”

Welbanks et al
(<https://arxiv.org/pdf/2504.21788>)

Statistische analyse is gewoon verkeerd

Molecule (Formula)	$\ln(\mathcal{Z})$	χ^2/N	$\ln(\mathcal{L}_{\max})$	Preference (σ)
Propyne (C ₃ H ₄)	215.67	0.68	220.08	3.09
Cyclohexane (C ₆ H ₁₂)	215.49	0.68	220.17	3.03
2-Butene (C ₄ H ₈)	215.40	0.62	221.09	2.99
trans-2-Pentene (C ₅ H ₁₀)	215.22	0.63	220.92	2.92
Butane (C ₄ H ₁₀)	215.20	0.71	219.68	2.92
Cyclopentane (C ₅ H ₁₀)	215.02	0.67	220.25	2.85
n-Tetradecane (C ₁₄ H ₃₀)	214.51	0.78	218.67	2.64
Isobutene (C ₄ H ₈)	214.27	0.76	219.03	2.54
cis-2-Pentene (C ₅ H ₁₀)	214.19	0.74	219.26	2.50
Propene (C ₃ H ₆)	214.14	0.75	219.19	2.48
2,2-Dimethylbutane (C ₆ H ₁₄)	214.04	0.82	218.05	2.43
Ethylene (C ₂ H ₄)	214.03	0.82	218.14	2.43
1-Pentene (C ₅ H ₁₀)	214.01	0.77	218.85	2.42
Cycloheptane (C ₇ H ₁₄)	213.99	0.82	218.18	2.41
Cyclopropane (C ₃ H ₆)	213.95	0.75	219.15	2.39
1-Heptene (C ₇ H ₁₄)	213.91	0.78	218.67	2.37
2-Methyl-1-pentene (C ₆ H ₁₂)	213.87	0.83	218.00	2.35
Ethane (C ₂ H ₆)	213.87	0.82	218.10	2.34
3-Methylpentane (C ₆ H ₁₄)	213.85	0.82	218.15	2.33
1-Butene (C ₄ H ₈)	213.84	0.81	218.23	2.33
4-Methyl-2-pentene (C ₆ H ₁₂)	213.82	0.83	217.93	2.32
Isopentane (C ₅ H ₁₂)	213.82	0.85	217.67	2.32
2-Methyl-1-butene (C ₅ H ₁₀)	213.80	0.82	218.12	2.31
Styrene (C ₈ H ₈)	213.80	0.78	218.69	2.31
n-Heptane (C ₇ H ₁₆)	213.75	0.83	218.02	2.28
1-Hexene (C ₆ H ₁₂)	213.73	0.77	218.78	2.27
n-Heptane (C ₇ H ₁₆)	213.72	0.84	217.85	2.27
Pentane (C ₅ H ₁₂)	213.69	0.85	217.72	2.26
n-Hexane (C ₆ H ₁₄)	213.63	0.87	217.46	2.22
1-Octene (C ₈ H ₁₆)	213.58	0.84	217.77	2.20
Benzene (C ₆ H ₆)	213.57	0.85	217.63	2.19
1,3-Butadiene (C ₄ H ₆)	213.51	0.78	218.69	2.15
1-Undecene (C ₁₁ H ₂₂)	213.51	0.82	218.10	2.15
Vinyl toluene (C ₉ H ₁₀)	213.50	0.85	217.73	2.15
Isoprene (C ₅ H ₈)	213.47	0.87	217.39	2.13
1-Nonene (C ₉ H ₁₈)	213.46	0.84	217.83	2.13
(-)- β -Pinene (C ₁₀ H ₁₆)	213.46	0.90	216.92	2.13
n-Decane (C ₁₀ H ₂₂)	213.46	0.87	217.42	2.13
4-Methyl-1-pentene (C ₆ H ₁₂)	213.44	0.85	217.66	2.12
Octane (C ₈ H ₁₈)	213.44	0.84	217.82	2.12
1-Decene (C ₁₀ H ₂₀)	213.43	0.82	218.06	2.11
n-Nonane (C ₉ H ₂₀)	213.42	0.87	217.36	2.10
1,2,3-Trimethylbenzene (C ₉ H ₁₂)	213.38	0.89	217.05	2.08
2,4,4-Trimethyl-1-pentene (C ₈ H ₁₆)	213.38	0.89	217.14	2.08
sec-Butylbenzene (C ₁₀ H ₁₄)	213.38	0.89	217.03	2.08

Molecule (Formula)	$\ln(\mathcal{Z})$	χ^2/N	$\ln(\mathcal{L}_{\max})$	Preference (σ)
Isooctane (C ₈ H ₁₈)	213.37	0.91	216.81	2.07
3-Carene (C ₁₀ H ₁₆)	213.34	0.89	217.06	2.06
Cyclodecane (C ₁₀ H ₂₀)	213.34	0.90	217.00	2.06
2-Methyl-2-butene (C ₅ H ₁₀)	213.32	0.88	217.18	2.04
DL-Limonene (C ₁₀ H ₁₆)	213.31	0.88	217.21	2.04
4-Ethyltoluene (C ₉ H ₁₂)	213.31	0.92	216.74	2.04
n-Undecane (C ₁₁ H ₂₄)	213.30	0.90	216.91	2.03
Isodurene (C ₁₀ H ₁₄)	213.29	0.91	216.86	2.03
Isohexane (C ₆ H ₁₄)	213.28	0.92	216.73	2.02
n-Tridecane (C ₁₃ H ₂₈)	213.28	0.90	217.00	2.02
3-Methyl-1-butene (C ₅ H ₁₀)	213.27	0.87	217.41	2.02
Mesitylene (C ₉ H ₁₂)	213.26	0.89	217.06	2.01
1,2,3,4-Tetramethylbenzene (C ₁₀ H ₁₄)	213.24	0.90	217.02	2.00
Ethylbenzene (C ₈ H ₁₀)	213.24	0.92	216.62	2.00
2-Methyl-2-pentene (C ₆ H ₁₂)	213.21	0.88	217.21	1.98
tert-Butylbenzene (C ₁₀ H ₁₄)	213.16	0.92	216.65	1.95
D-Limonene (C ₁₀ H ₁₆)	213.16	0.93	216.50	1.95
2,3-Dimethylbutane (C ₆ H ₁₄)	213.15	0.93	216.45	1.94
2-Ethyltoluene (C ₉ H ₁₂)	213.10	0.94	216.37	1.91
2,4,4-Trimethyl-2-pentene (C ₈ H ₁₆)	213.09	0.93	216.49	1.90
Cycloheptene (C ₇ H ₁₂)	213.05	0.93	216.46	1.88
o-Xylene (C ₈ H ₁₀)	213.02	0.95	216.25	1.85
Myrcene (C ₁₀ H ₁₆)	213.02	0.95	216.29	1.85
Isobutane (C ₄ H ₁₀)	213.01	0.93	216.58	1.85
L- α -pinene (C ₁₀ H ₁₆)	213.01	0.95	216.23	1.84
Isocumene (C ₉ H ₁₂)	212.99	0.90	217.02	1.83
Propane (C ₃ H ₈)	212.98	0.88	217.30	1.82
1-Butyne (C ₄ H ₆)	212.96	0.86	217.55	1.81
2,4-Dimethylpentane (C ₇ H ₁₆)	212.96	0.95	216.25	1.81
p-Xylene (C ₈ H ₁₀)	212.92	0.96	216.14	1.78
n-Pentadecane (C ₁₅ H ₃₂)	212.92	0.91	216.79	1.78
Cumene (C ₉ H ₁₂)	212.91	0.94	216.41	1.77
Toluene (C ₇ H ₈)	212.89	0.95	216.23	1.75
Cyclooctane (C ₈ H ₁₆)	212.88	0.94	216.41	1.75
Tetralin (C ₁₀ H ₁₂)	212.86	0.98	215.83	1.73
m-Xylene (C ₈ H ₁₀)	212.86	0.98	215.76	1.73
Acetylene (C ₂ H ₂)	212.83	0.96	216.12	1.71
2-Carene (C ₁₀ H ₁₆)	212.82	0.89	217.16	1.70
3-Ethyltoluene (C ₉ H ₁₂)	212.81	0.97	215.91	1.69
Allene (C ₃ H ₄)	212.80	0.96	216.14	1.69
n-Hexadecane (C ₁₆ H ₃₄)	212.79	0.94	216.38	1.68
Naphthalene (C ₁₀ H ₈)	212.76	0.98	215.83	1.65
4-Vinylcyclohexene (C ₈ H ₁₂)	212.75	0.96	216.02	1.65
Cyclopentene (C ₅ H ₈)	212.74	0.99	215.67	1.63
Cyclohexene (C ₆ H ₁₀)	212.65	0.98	215.76	1.55

Met JWST bereiken we de limiet van transmissie-spectroscopie

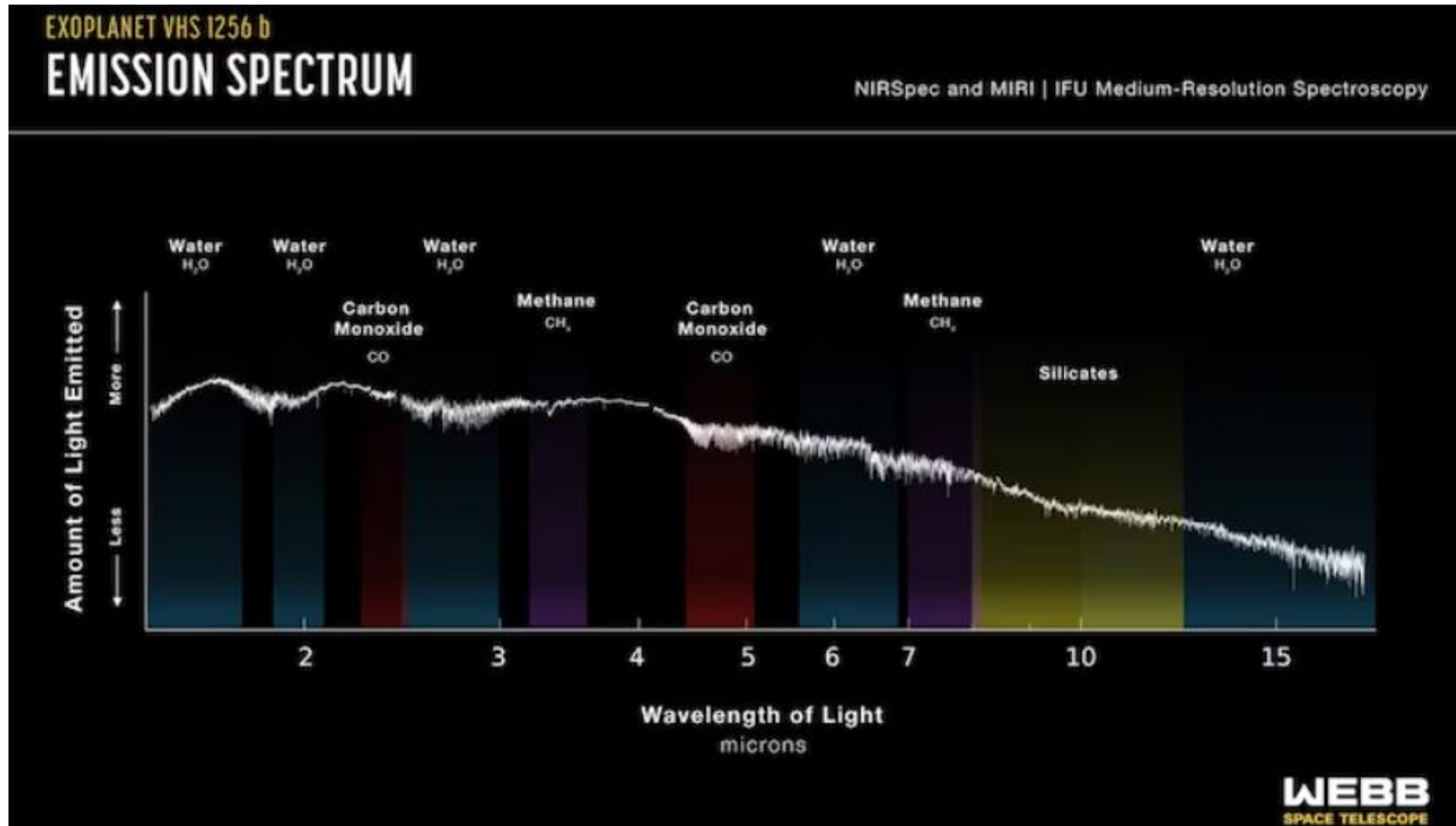
- Voor kleine planeten is het licht van de ster overweldigend
- Transmissie-spectroscopie is heel gevoelig voor wolken, welke waarschijnlijk veel voorkomen op koelere planeten
- Steroppervlak is niet homogeen – veel last van stervlekken die op atmosfeer-signalen kunnen lijken

De volgende stap in exoplaneetonderzoek is **direct imaging!**

JWST niet de ideale telescoop (klein)

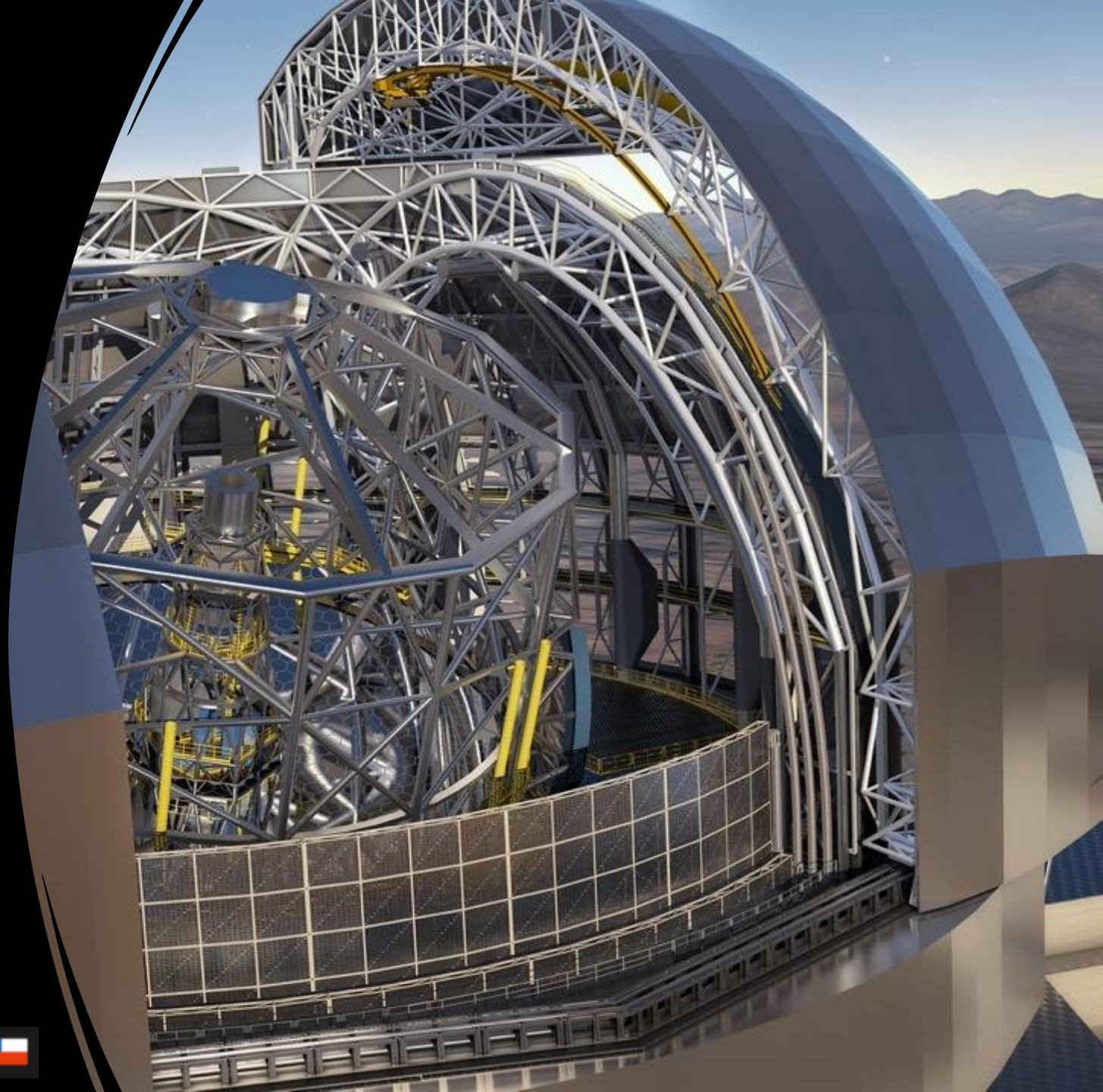
JWST: bruine dwerg, ver genoeg van ster

Kwaliteit spectrum is 1000x beter



ESO Extremely Large Telescope

- **39 meter diameter**
 - 2006: Detailed study
 - 2010: Site Selection
 - 2014: Start construction
 - 2018: Start Dome
 - 2026: Telescope Structure Complete
 - 2029: **Technical First Light**







European
Southern
Observatory

2028+ MICADO **METIS** HARMONI

2032+ **ANDES** MOSAIC

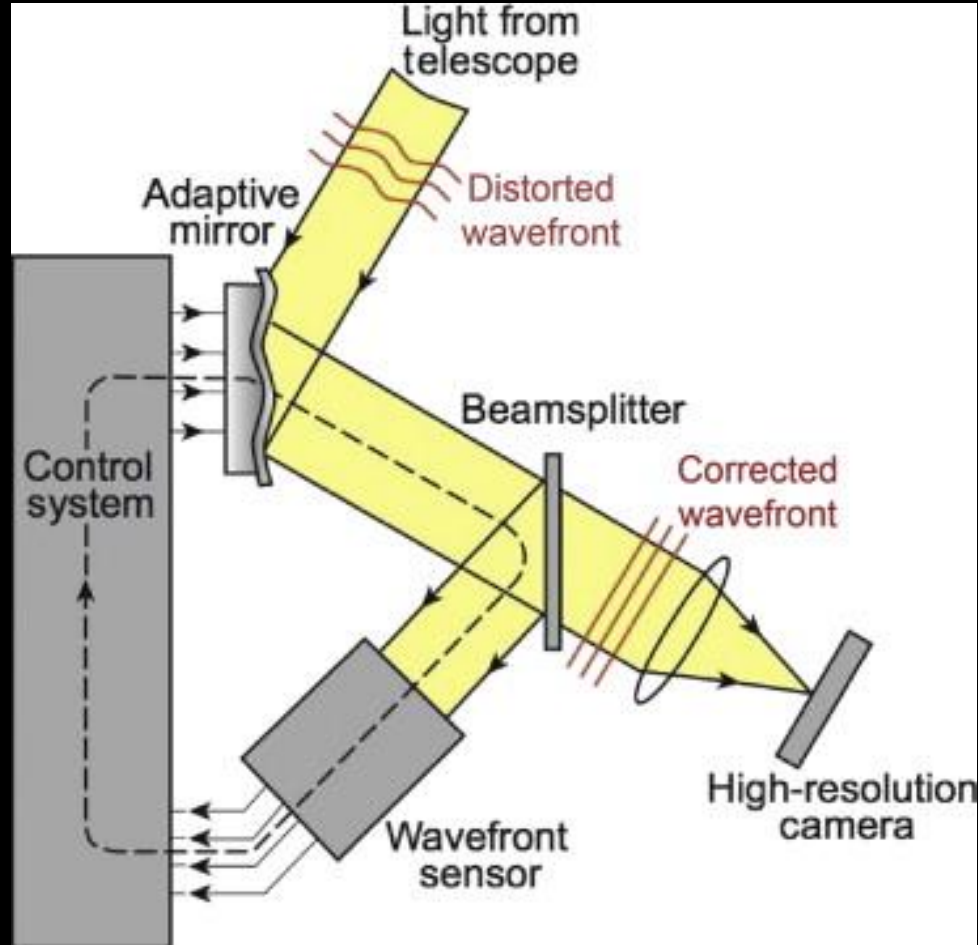
2035+ **PCS**



ELT Instruments

De uitdagingen van Direct Imaging

Adaptieve Optiek (AO) is de sleutel

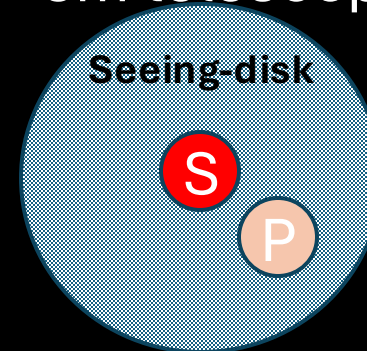


uitdagingen:

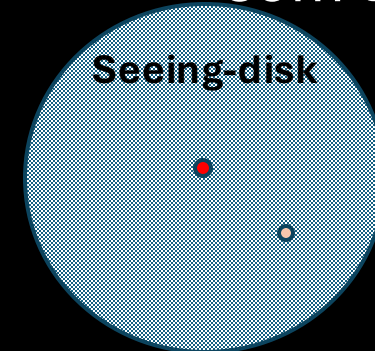
- # actuatoren + snelheid
- Non-common path effecten
- Time lag → voorspelbaar?
- Second Stage AO

$$\Phi \propto \lambda/D$$

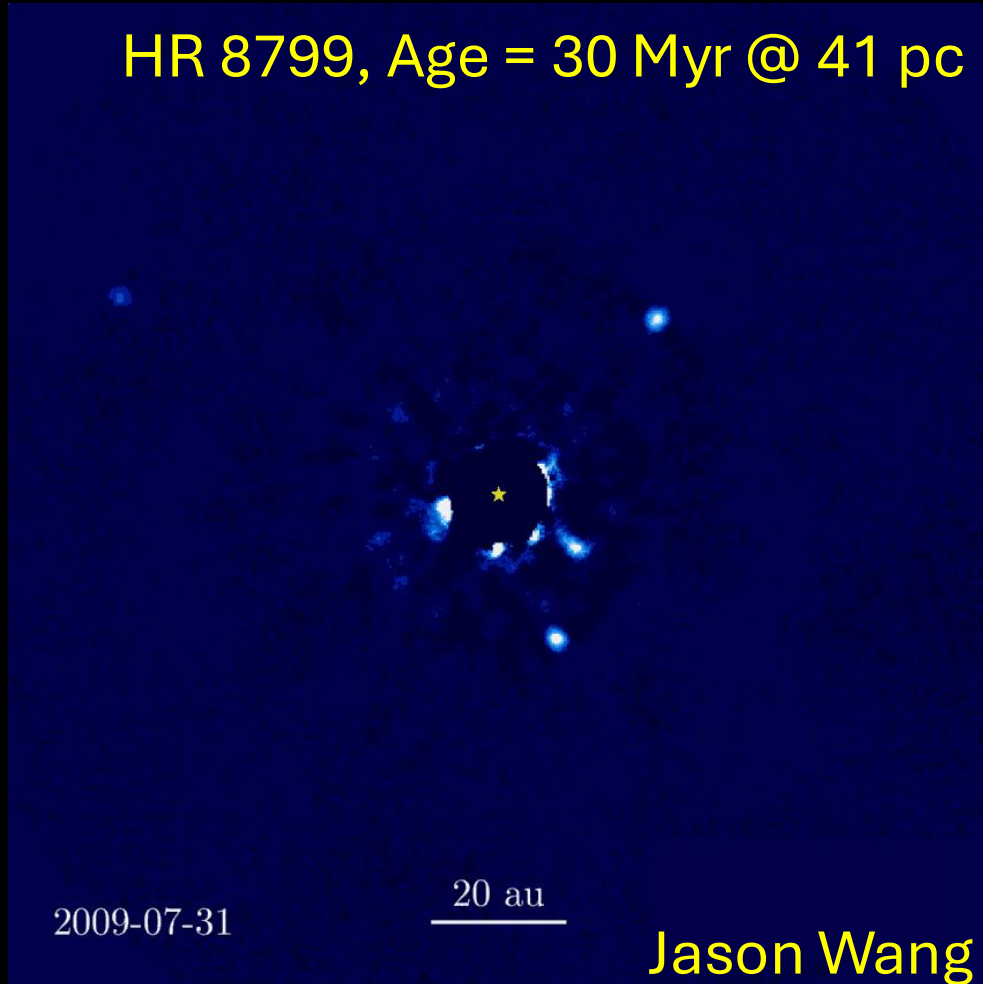
8m telescope



39m telescope



Uitdagingen voor Direct Imaging



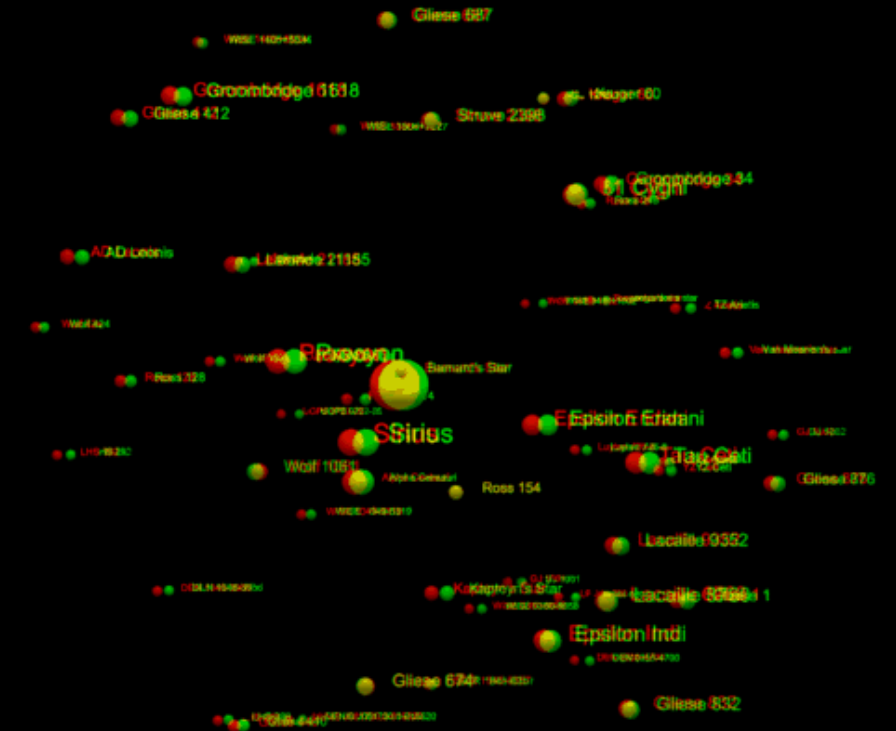
- Contrast limiet op 10^{-6}
- Alleen jonge systemen kunnen worden waargenomen
- Jonge sterren staan ver weg
- Hoekresolutie is niet voldoende voor verre sterren

$$\Phi \propto \lambda/D$$

Kansen voor ELT Direct Imaging

- grotere telescope (D)
- Solid-Angle Resolutie $\propto D^2$
- $S/n \propto D^2 \rightarrow$ snelheid D^4
- Contrast mogelijk 10^{-7-8}
- Planeten rond oude sterren
- Onze directe burens!

$$\Phi \propto \lambda/D$$



The most exciting JWST result

Matthews et al. 2024

Eps Indi A (3.7 pc)

4-6 Gyr

$T_p = 275$ K

15 au - $6 M_{\text{jup}}$



10 & 15 μm

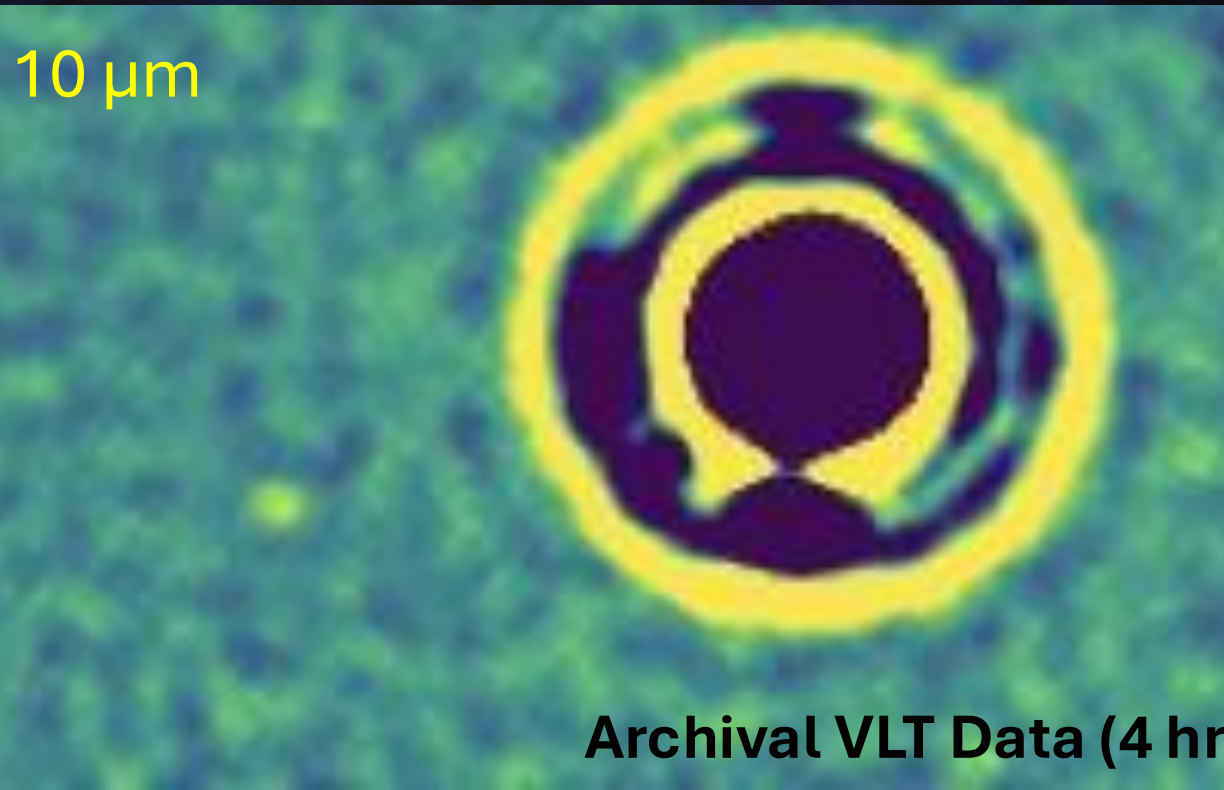
The most exciting JWST result

Eps Indi A (3.7 pc)

4-6 Gyr

$T_p = 275$ K

15 au - $6 M_{\text{jup}}$



Take-Away Points

- Zitten we met transmissie spectroscopie aan de limiet?
- De toekomst van exoplaneetonderzoek is direct imaging
- Met de ELT (2030) gaan we de volgende sprong maken.
Karakterisatie van aardes rond rode dwergsterren
- Een grote telescoop in de ruimte (HWO; interferometer)
gaat pas aardes rond zonachtige sterren mogelijk maken
(2040+)