

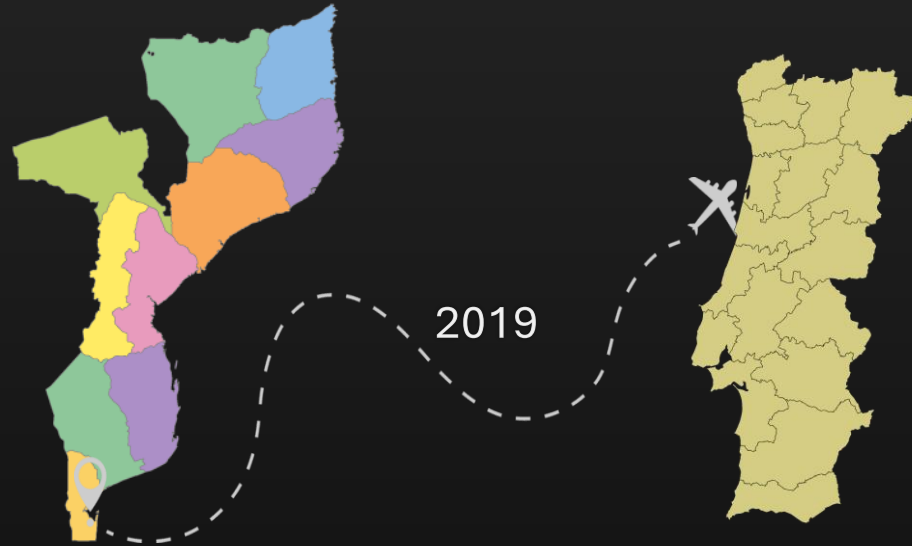
Atmosferas de exoplanetas: da teoria à observação, desafios atuais e novas abordagens

Yuri C. Damasceno

Supervisores: Olivier Demangeon, Nuno Santos, João Mendonça



Quem sou



- **MSc** (2022 - 2024): Atmosfera no planeta ultra-quente WASP-178 b
- **PhD** (2024 - Agora): Atmosferas de exoplanetas amenos

Estrutura

Parte I – Montar o cenário

- Contexto
- O papel das atmosferas
- Espectroscopia de transmissão
- Populações de planetas
- O enigma dos sub-Neptunos

Estrutura

Parte II – Desafios atuais

- Observação: terrestre vs espacial
- Recuperações
- Telescópios de próxima geração
- WASP-178 b
- HIP 41378 f



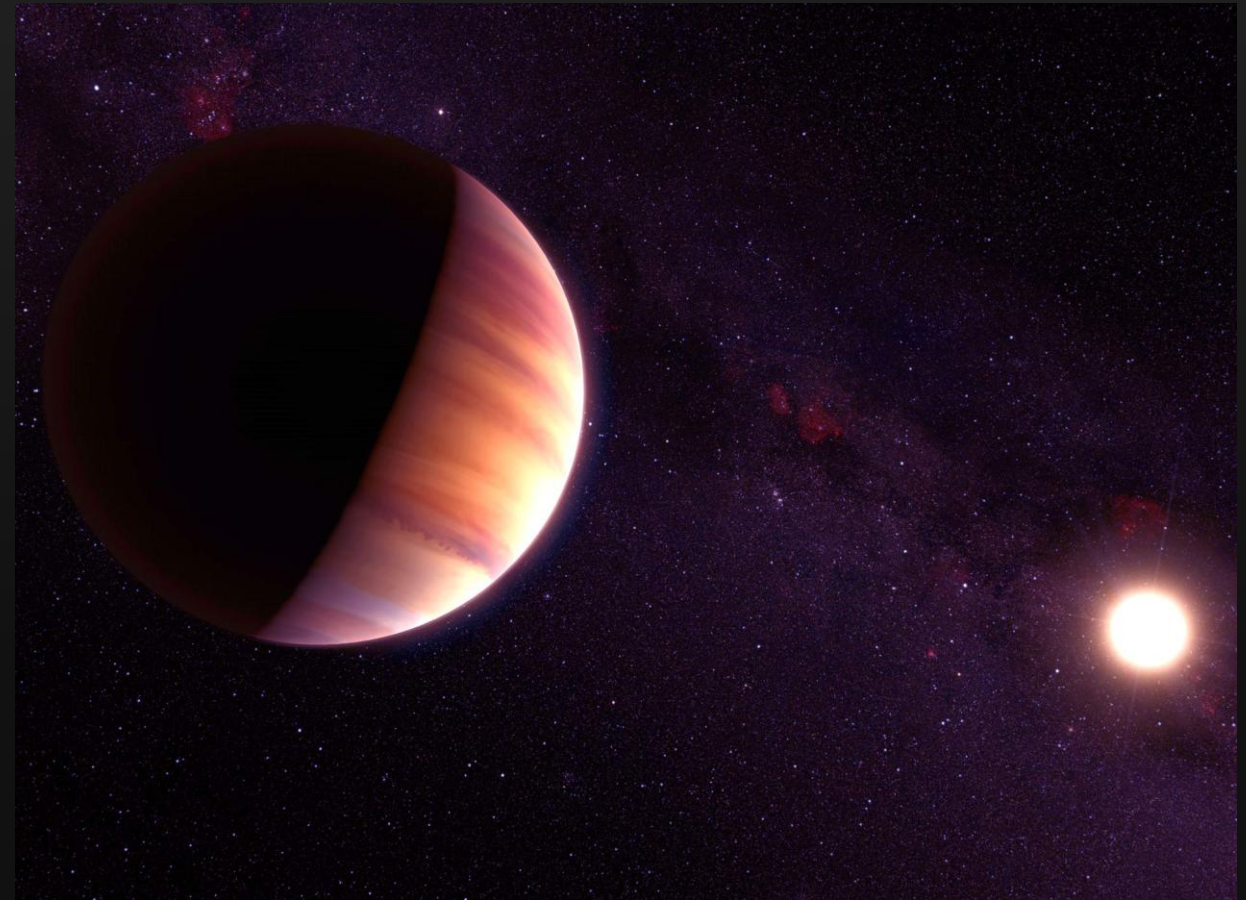
App.sli.do

Código: 3301775

Parte I

Revolução em exoplanetas

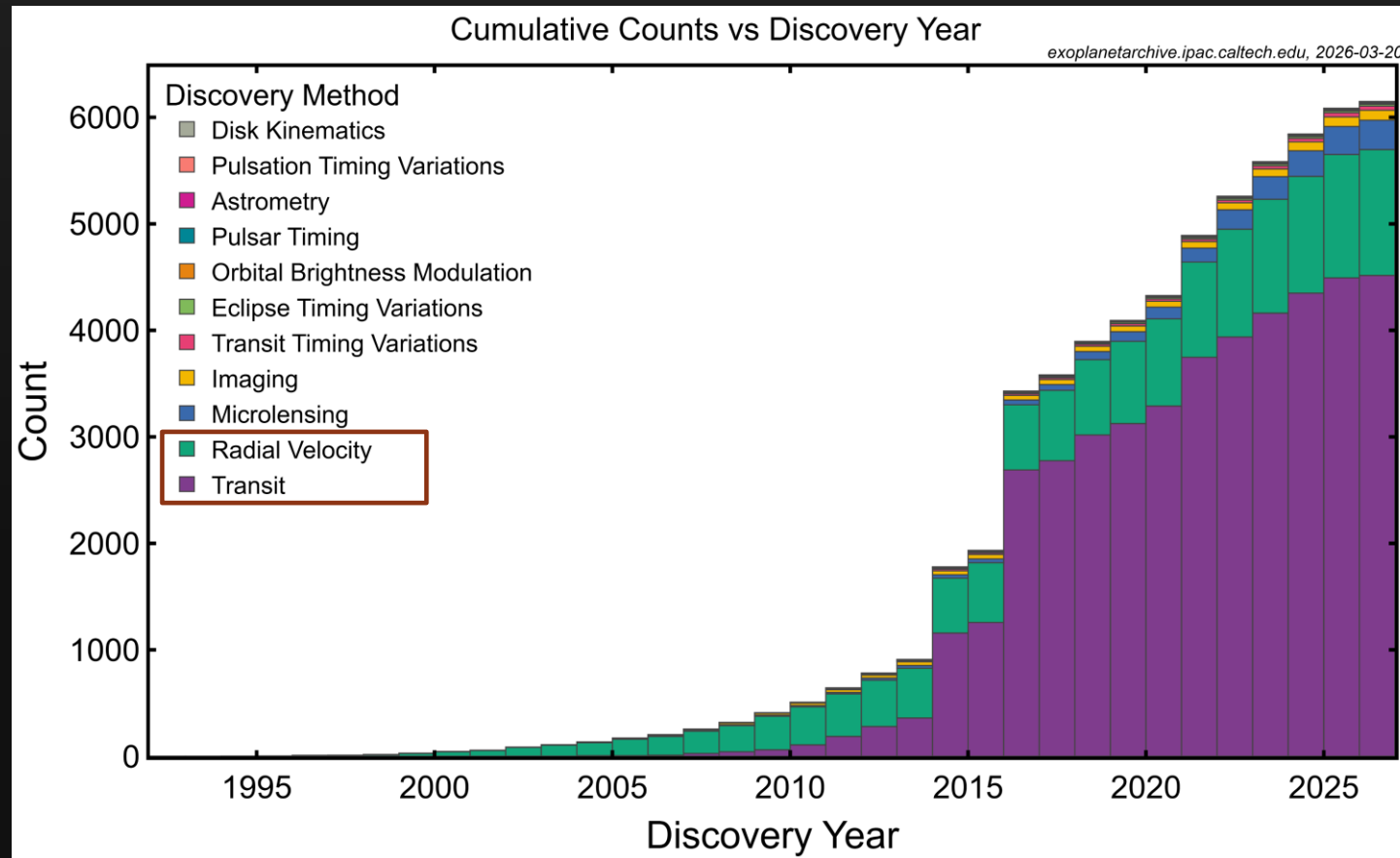
Primeiro exoplaneta – 1995, 51 Peg b



Parte I

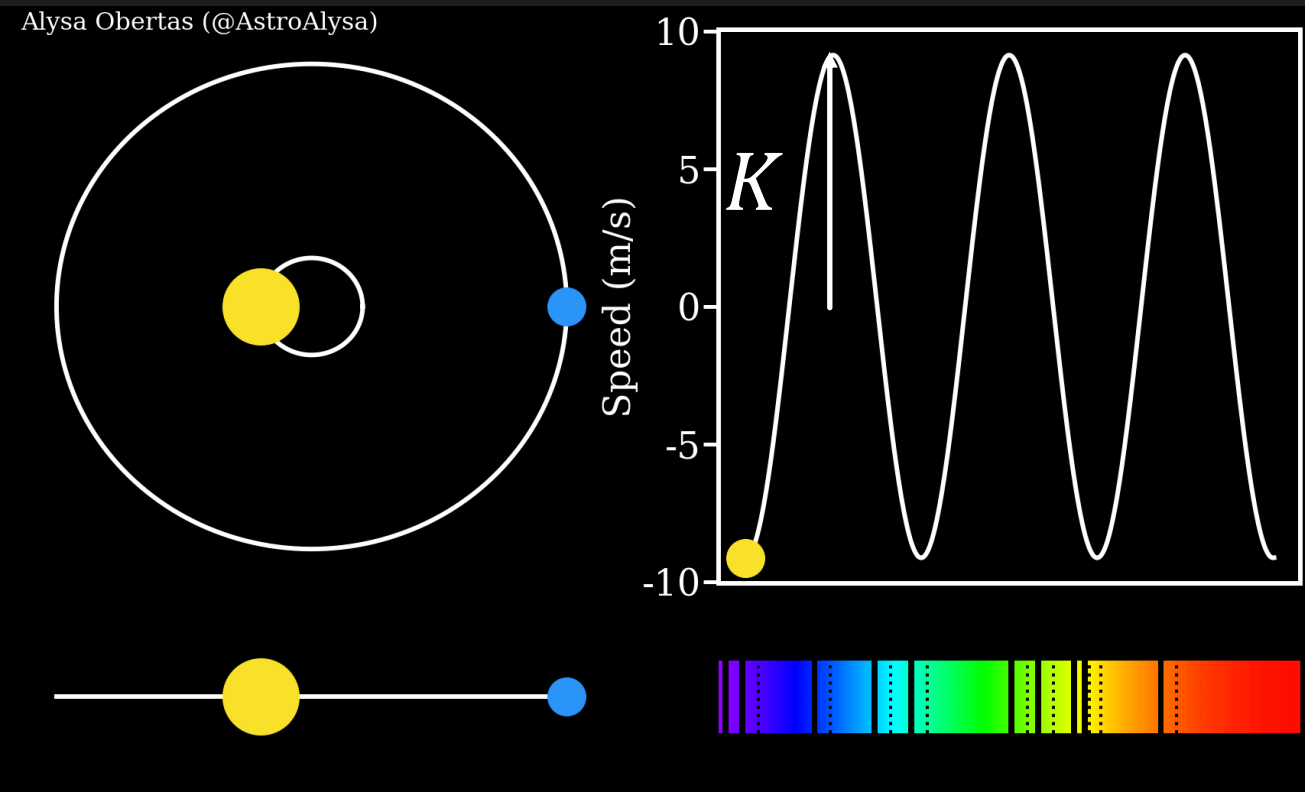
Revolução em exoplanetas

Mais de 6000 descobertos!



Parte I

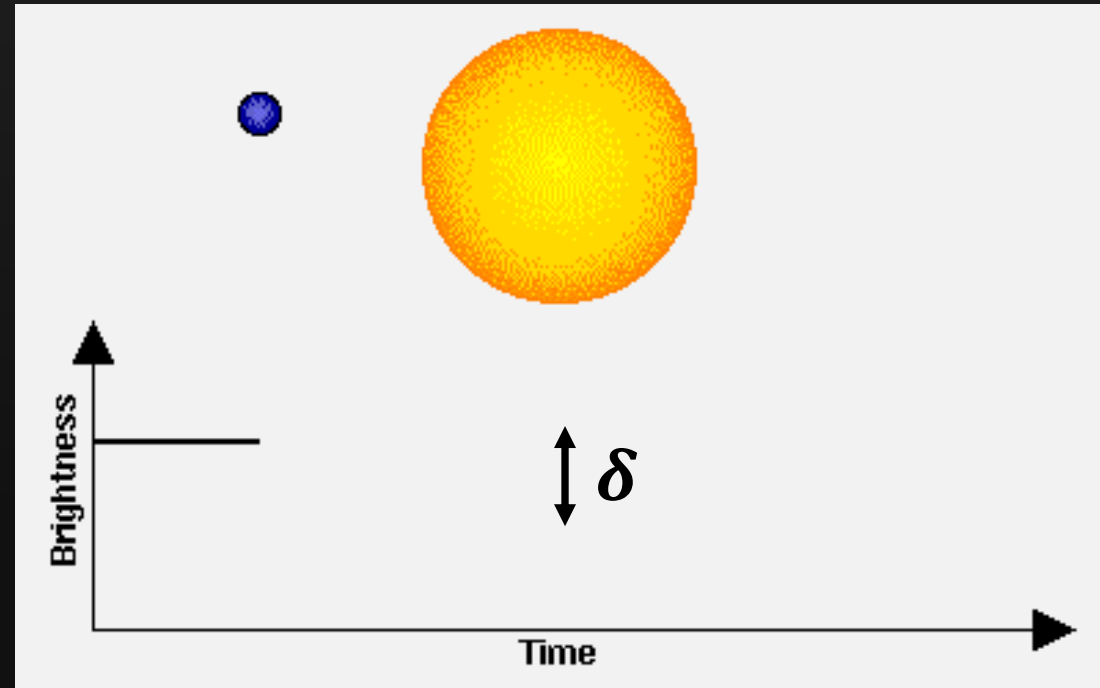
Velocidades Radiais



$$K \propto M_p \sin(i)$$

Parte I

Trânsitos



$$\delta \sim \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Parte I


Métodos de mãos dadas

Trânsitos

Velocidades Radiais

Raio

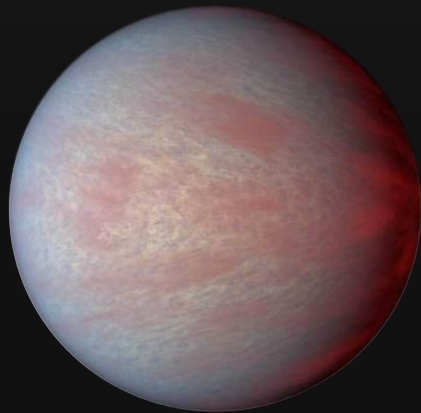
Massa*



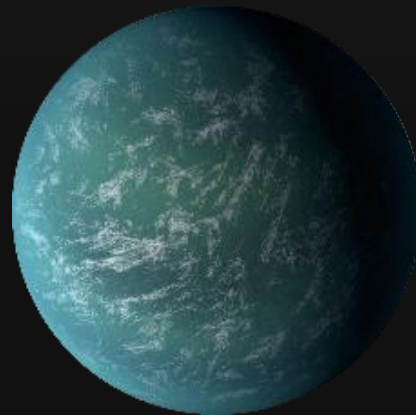
Densidade média

Parte I

Métodos de mãos dadas

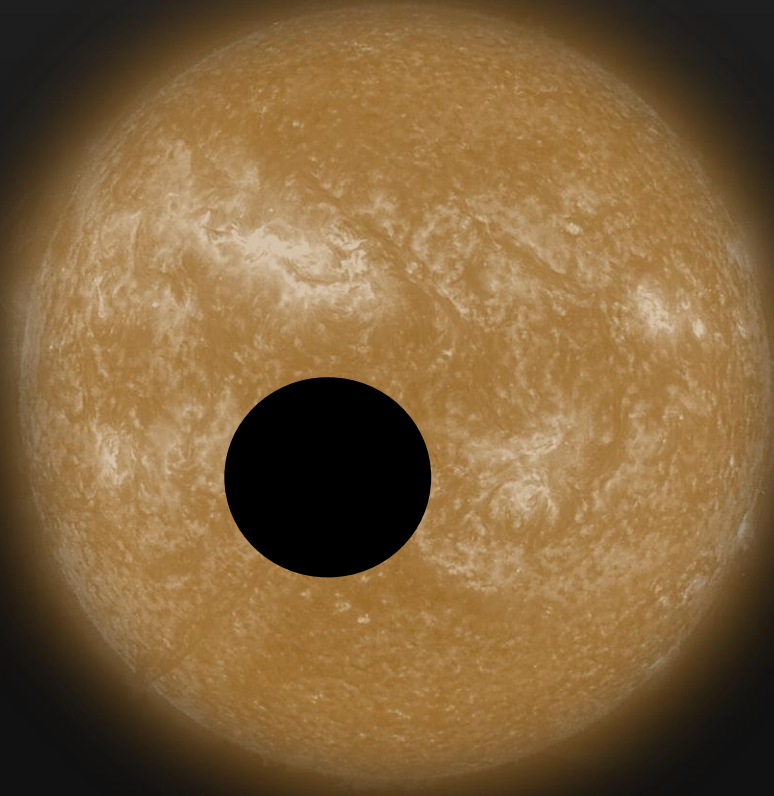
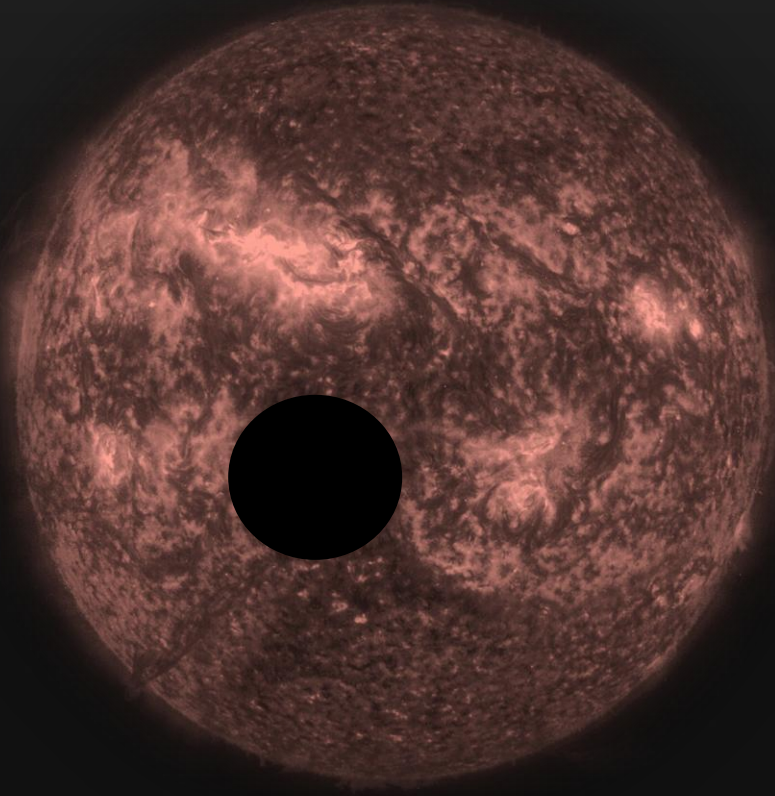


?



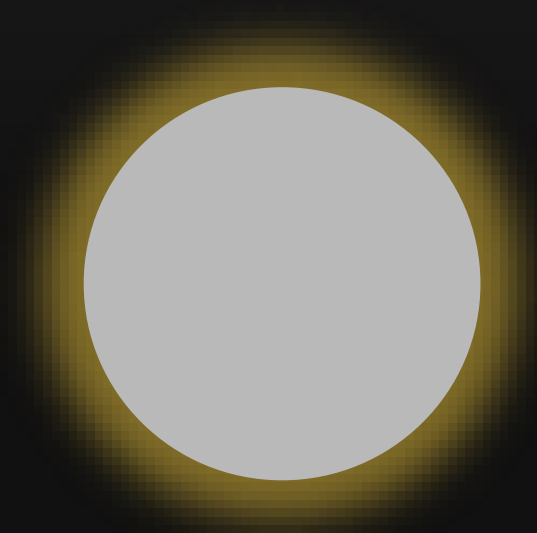
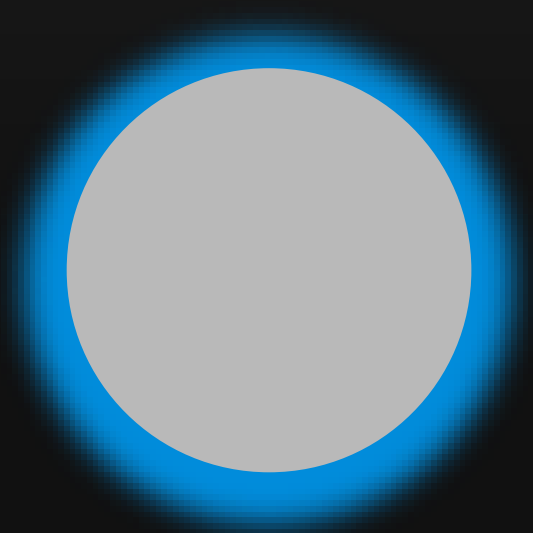
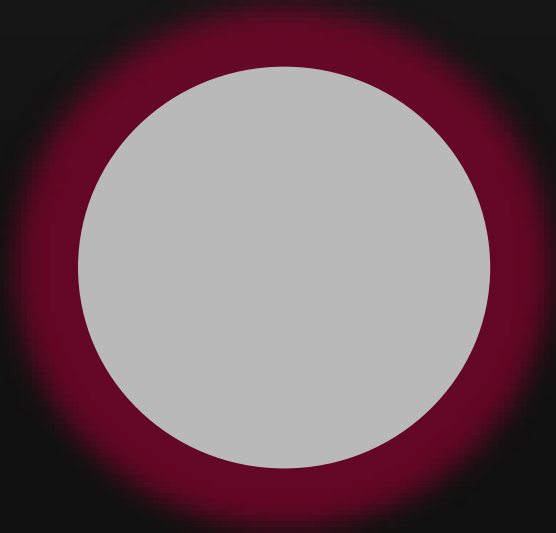
Parte I

Atmosferas distantes



Parte I

Atmosferas distantes



Parte I

Focos atuais

- Estrutura Interna
- Formação
- Habitabilidade
- Sinais de vida

Parte I

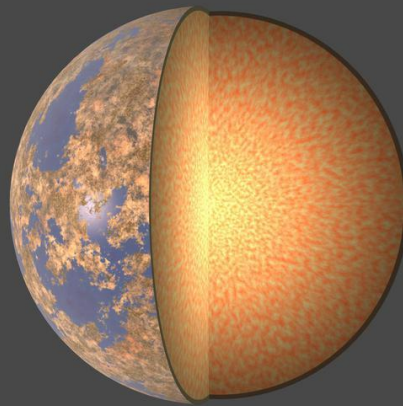
Focos atuais

- **Estrutura Interna**
- Formação
- Habitabilidade
- Sinais de vida

Possible Interiors of TRAPPIST-1 Exoplanets

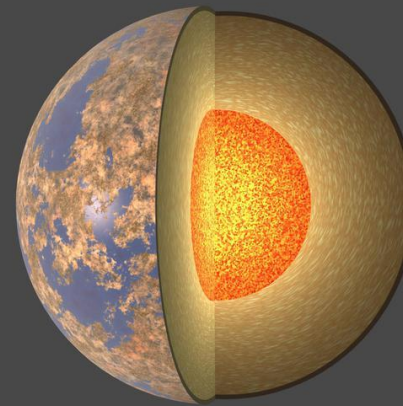
Based on precise measurements of the planet densities

No Core



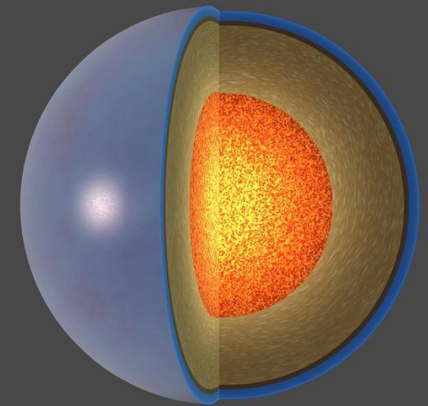
Rocky surface, iron mixed uniformly with other elements throughout the interior

Mantle + Core



Rocky surface, with an iron-rich core that is proportionally smaller than Earth's

Ocean + Mantle + Large Core



Deep ocean layer on surface with larger iron-rich core; This is only possible for the cooler, outer 4 planets

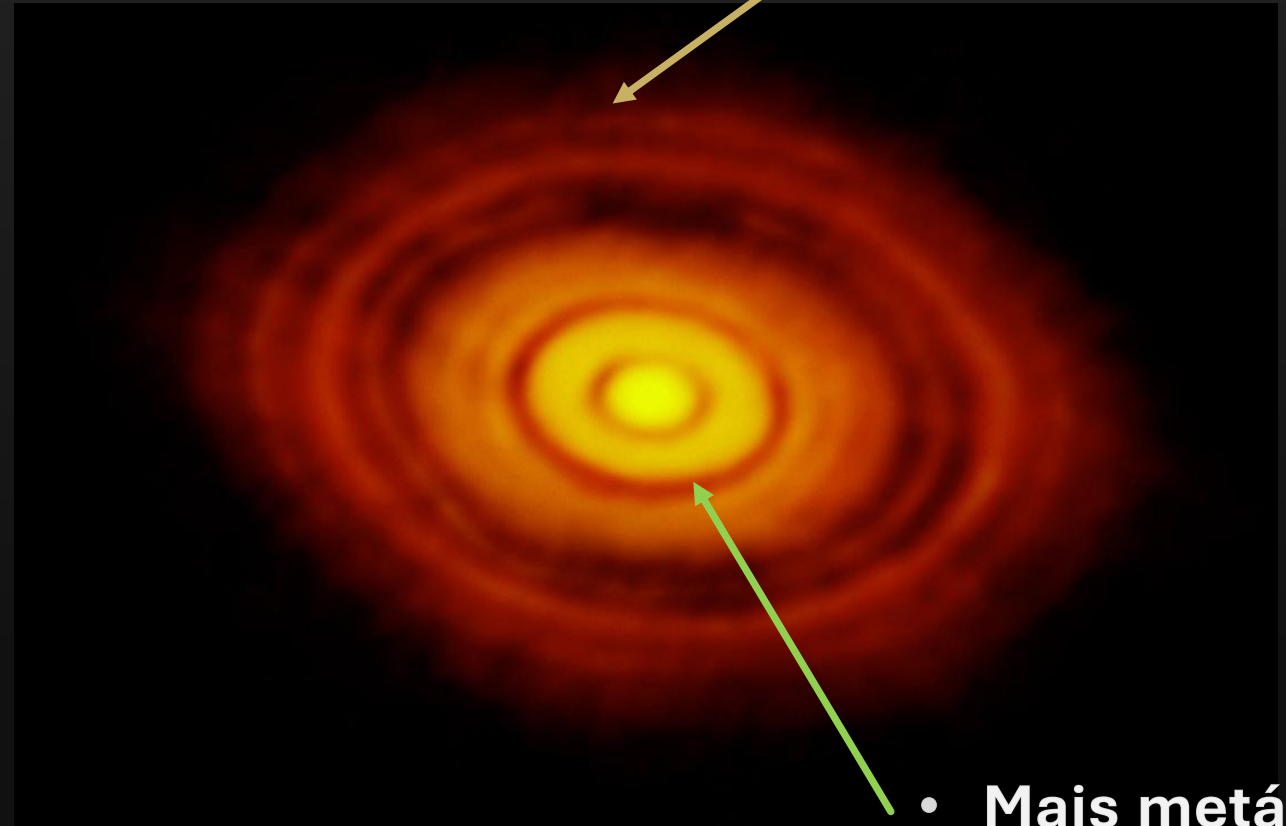
Fonte: NASA

Parte I

Focos atuais

- Estrutura Interna
- **Formação**
- Habitabilidade
- Sinais de vida

- Rico em gás
- Rico em carbono
C/O ~ 1



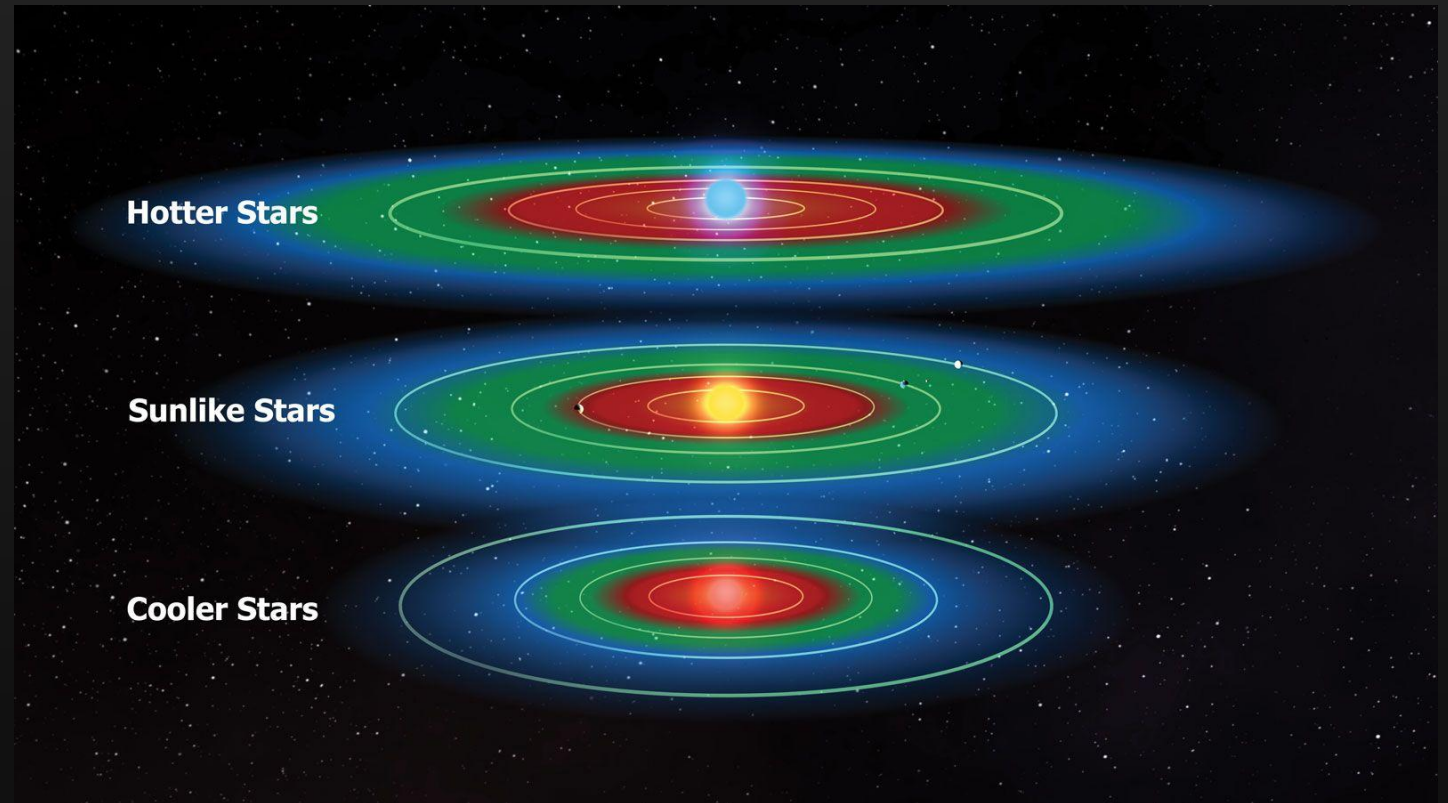
Fonte: ALMA

- **Mais metálico,
rochoso**

Parte I

Focos atuais

- Estrutura Interna
- Formação
- **Habitabilidade**
- Sinais de vida



Fonte: NASA

Parte I

Focos atuais

- Estrutura Interna
- Formação
- Habitabilidade
- **Sinais de vida**

CHNOPS

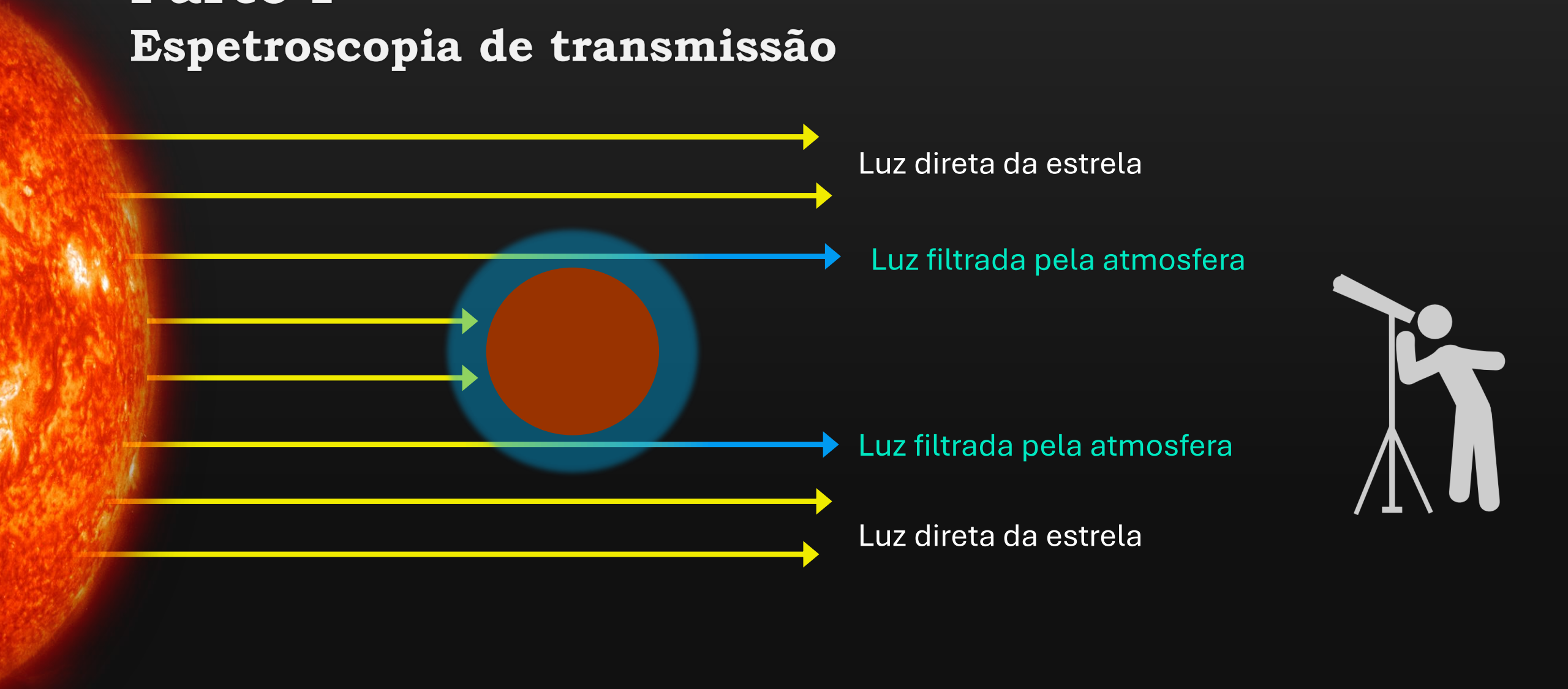
DMS / DMDS

CH₄ + CO₂

Pigmentos

Parte I

Espetroscopia de transmissão



Luz direta da estrela

Luz filtrada pela atmosfera

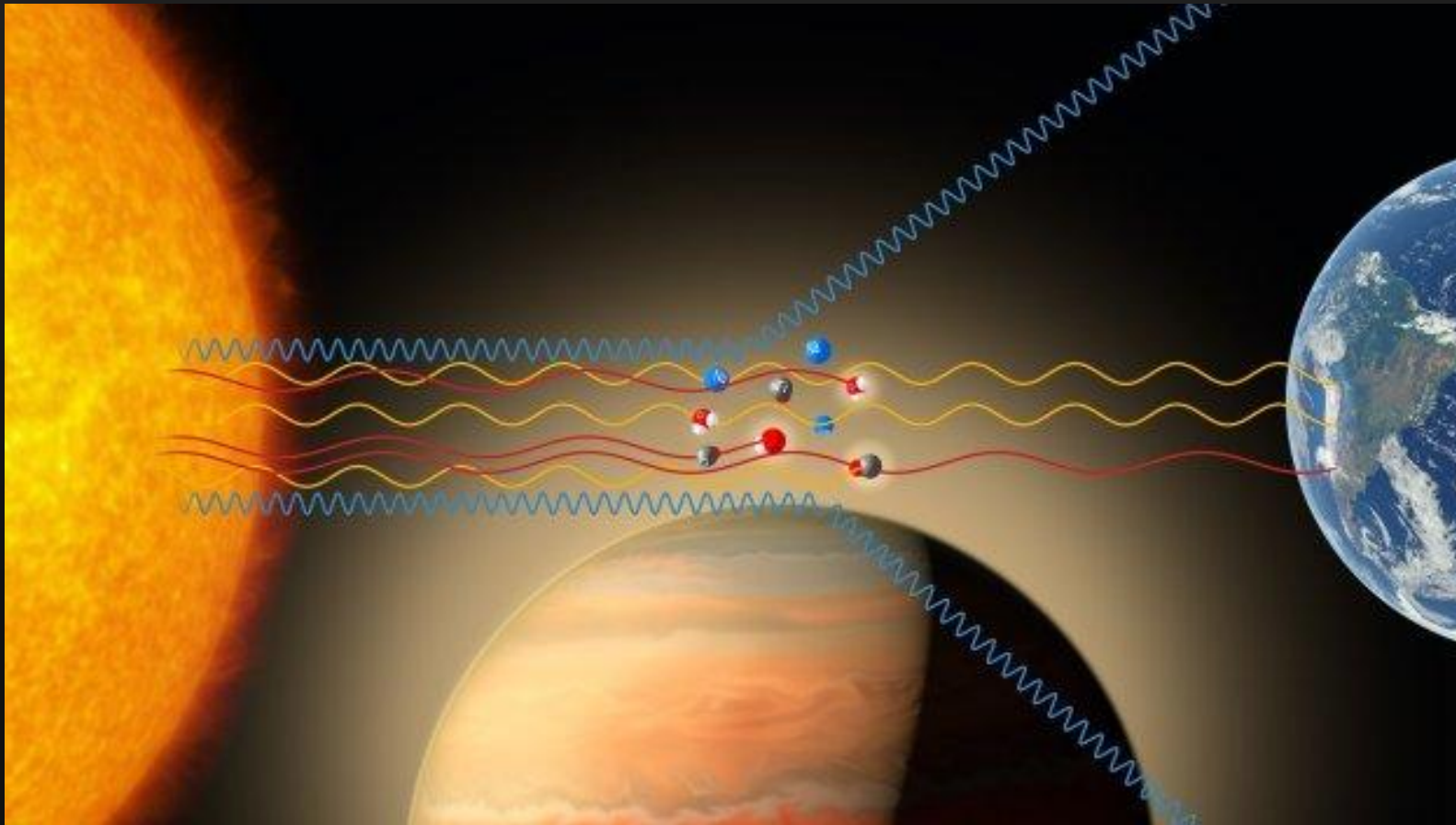
Luz filtrada pela atmosfera

Luz direta da estrela



Parte I

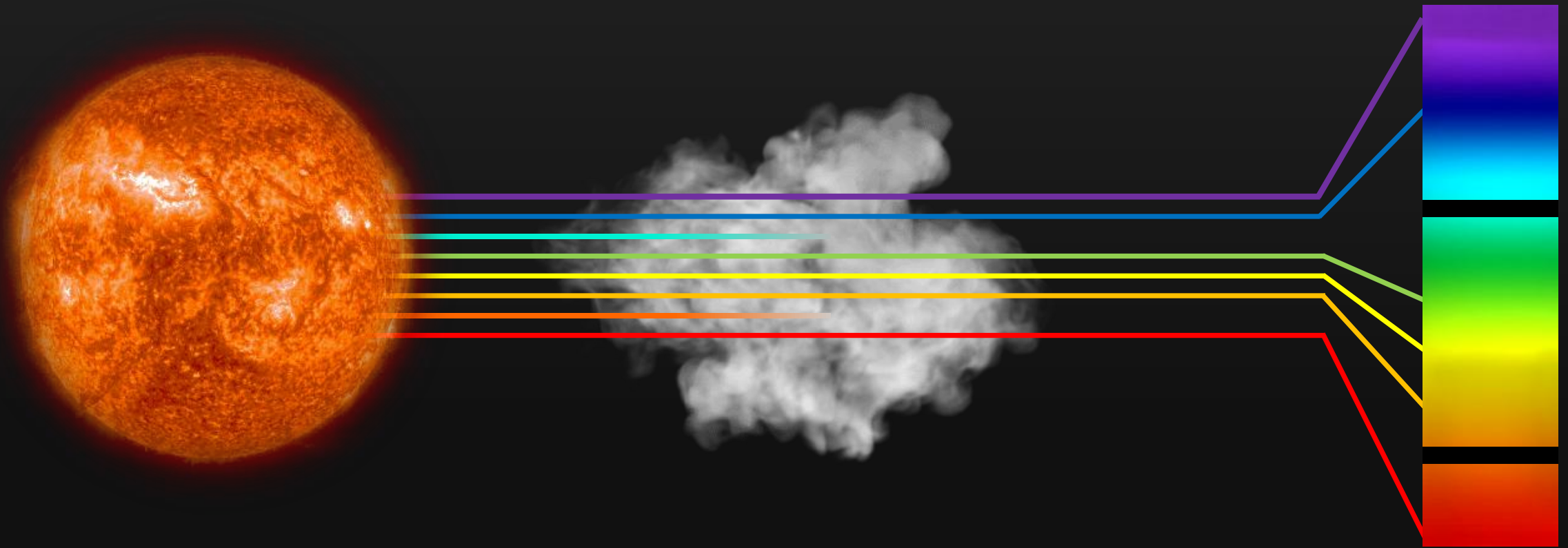
Espetroscopia de transmissão



Fonte: <https://wasp-planets.net/>

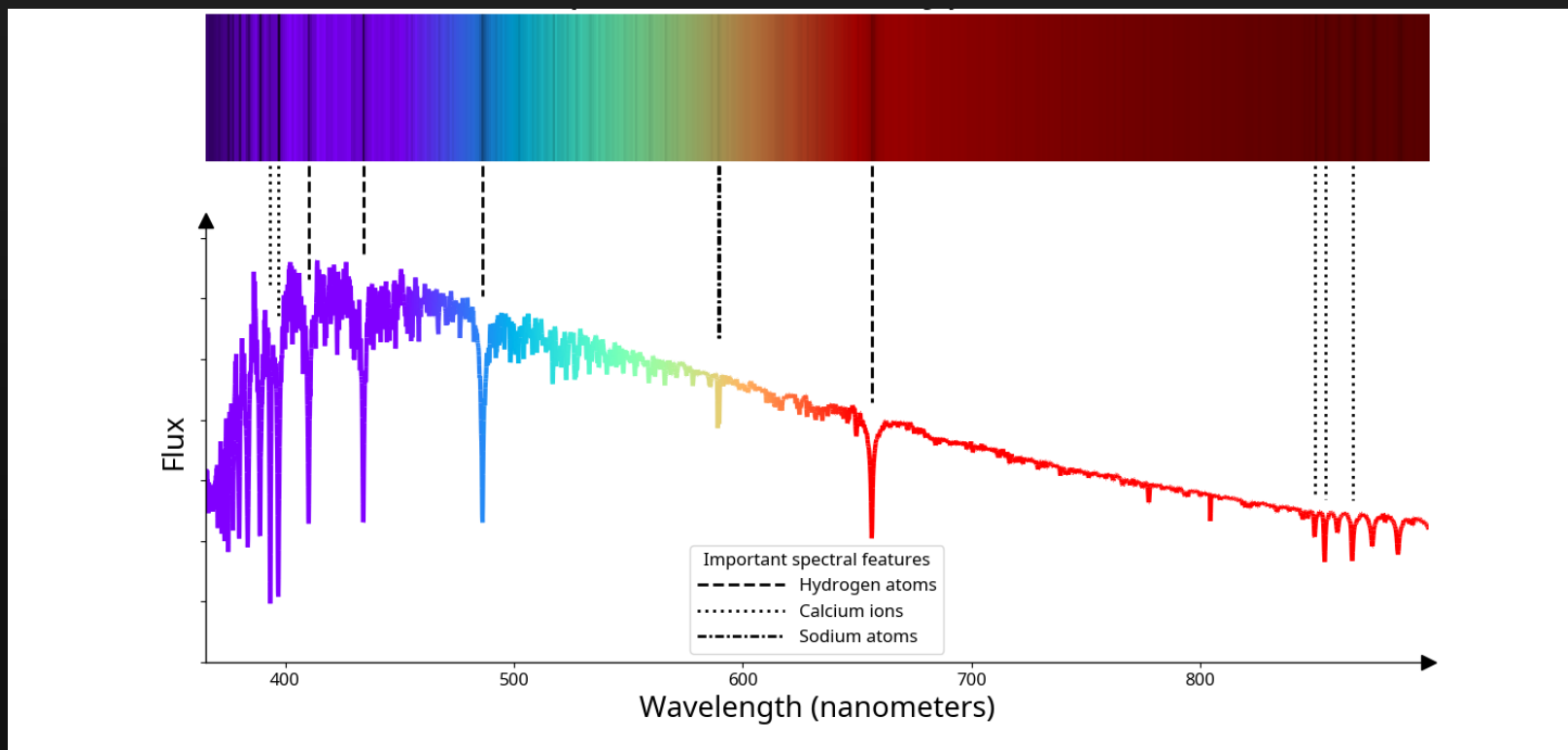
Parte I

Espetroscopia de transmissão



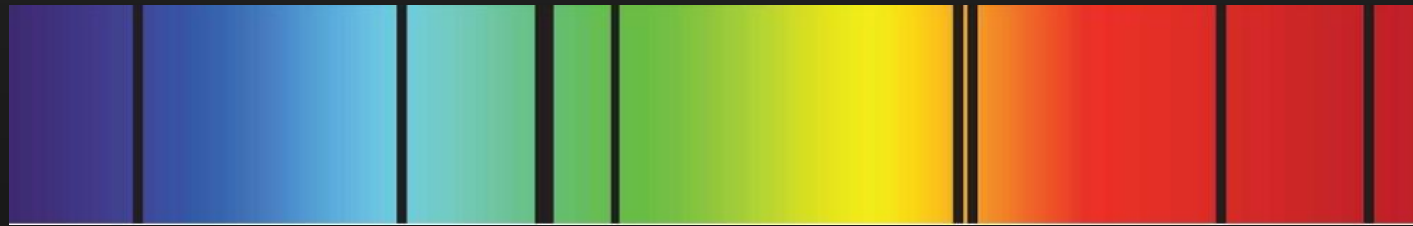
Parte I

Espetroscopia de transmissão

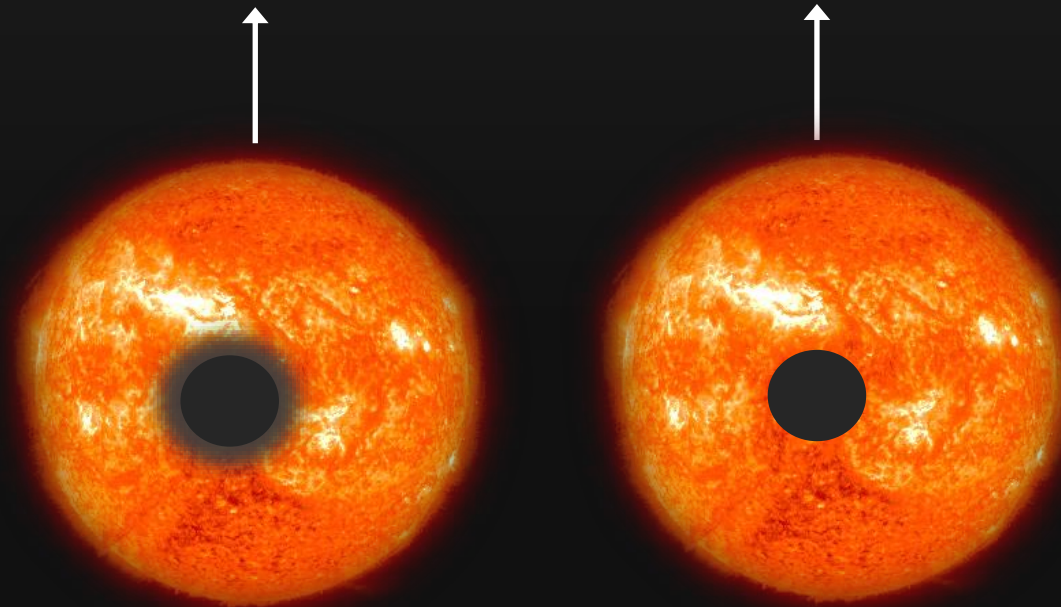


Parte I

Espetroscopia de transmissão

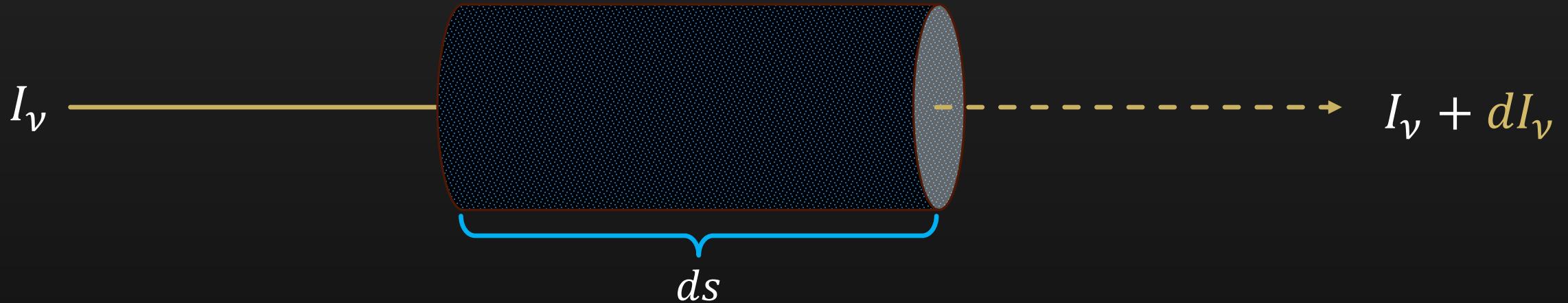


Medida de $\frac{R_p}{R_*}$



Parte I

Transferência radiativa



Varição por
“profundidade”

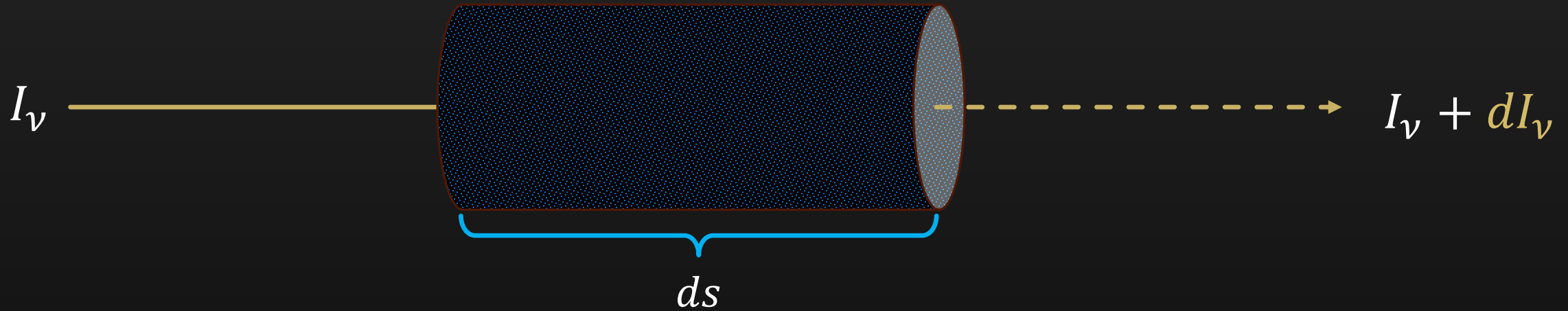
$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - S_\nu$$

Intensidade incidente

Função fonte

Parte I

Transferência radiativa



$$d\tau_\nu = \kappa_\nu ds$$

Propriedades dos constituintes (labs, tabelas)

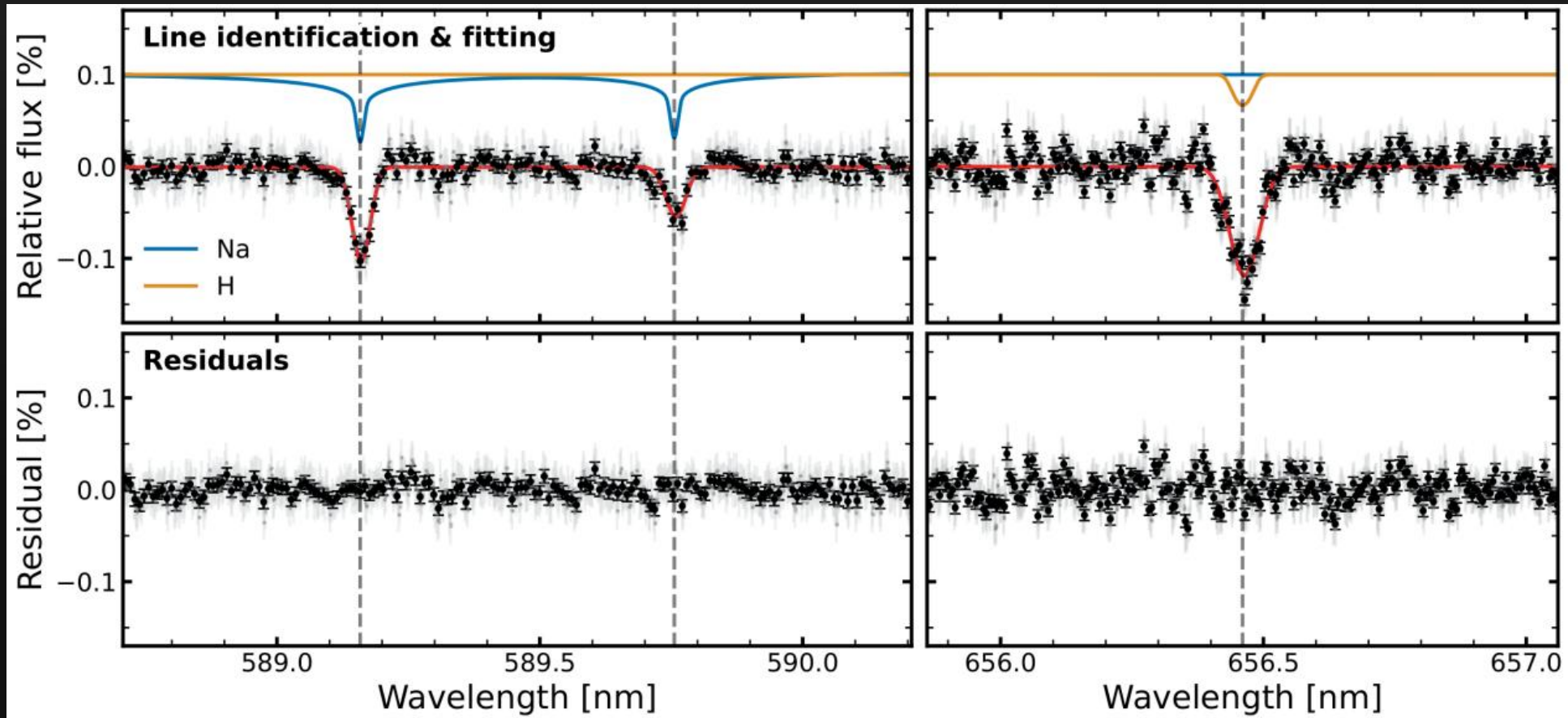


Propriedades físicas do meio

Parte I

Como caçar atmosferas

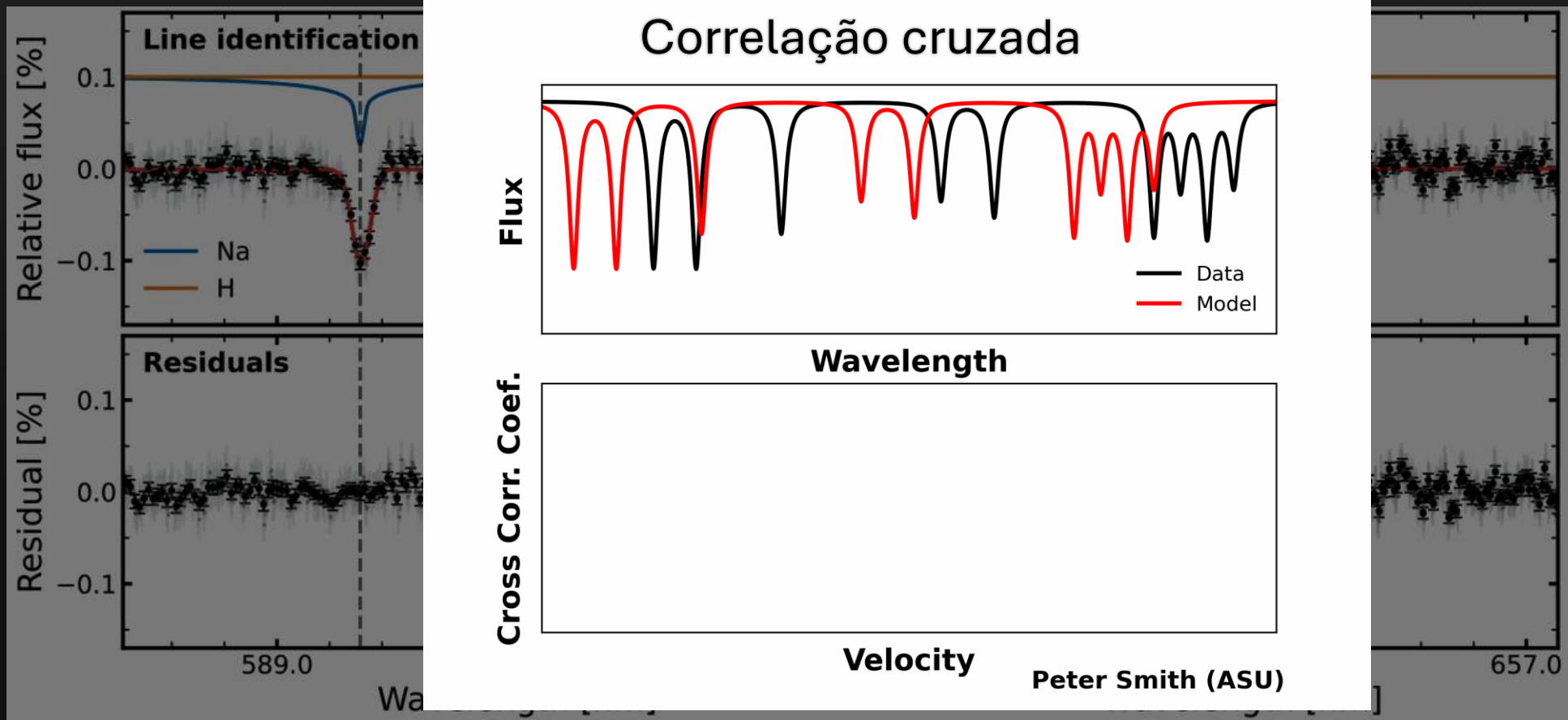
WASP-189 b



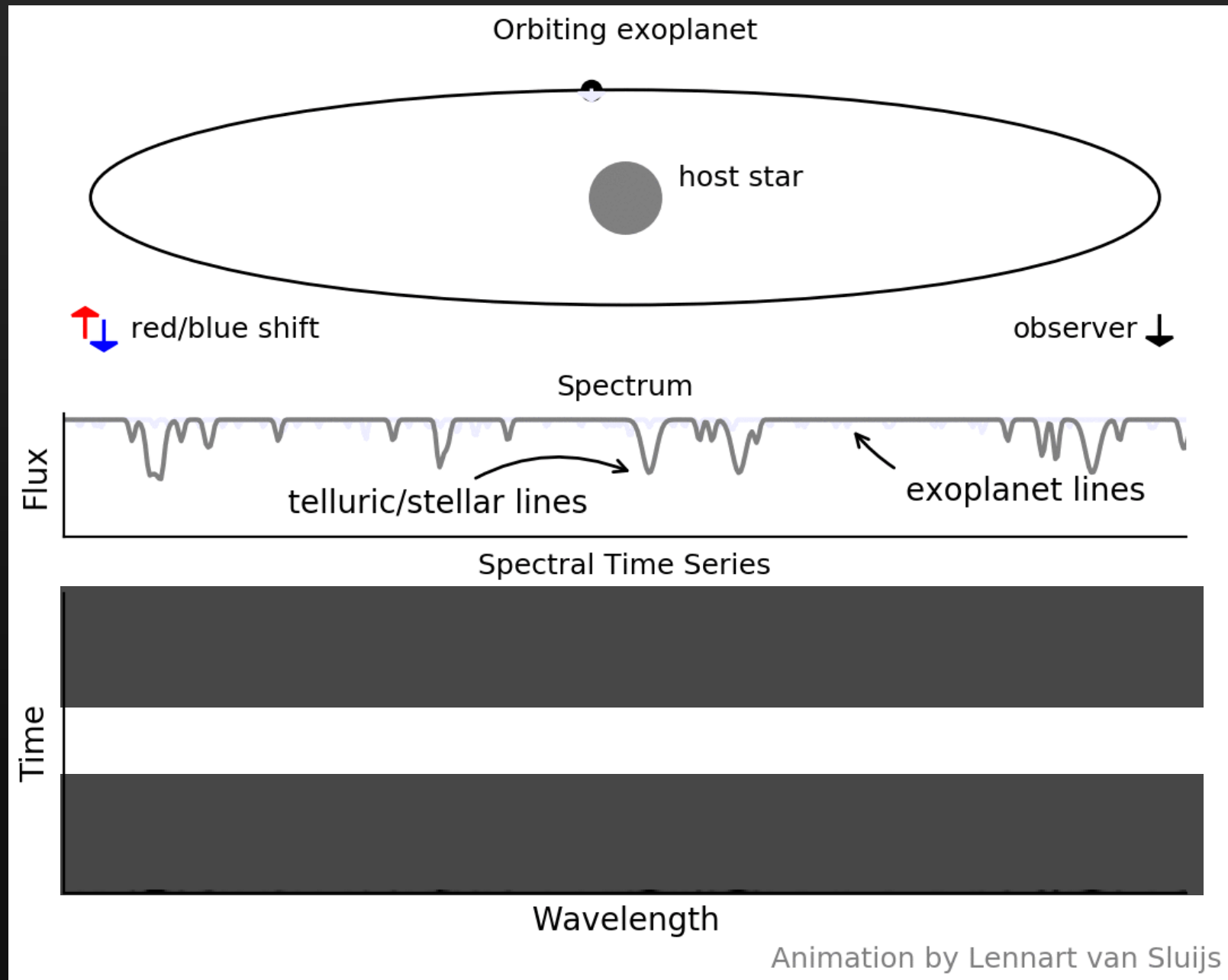
Fonte: Prinoth et al. 2024

Parte I

Como caçar atmosferas



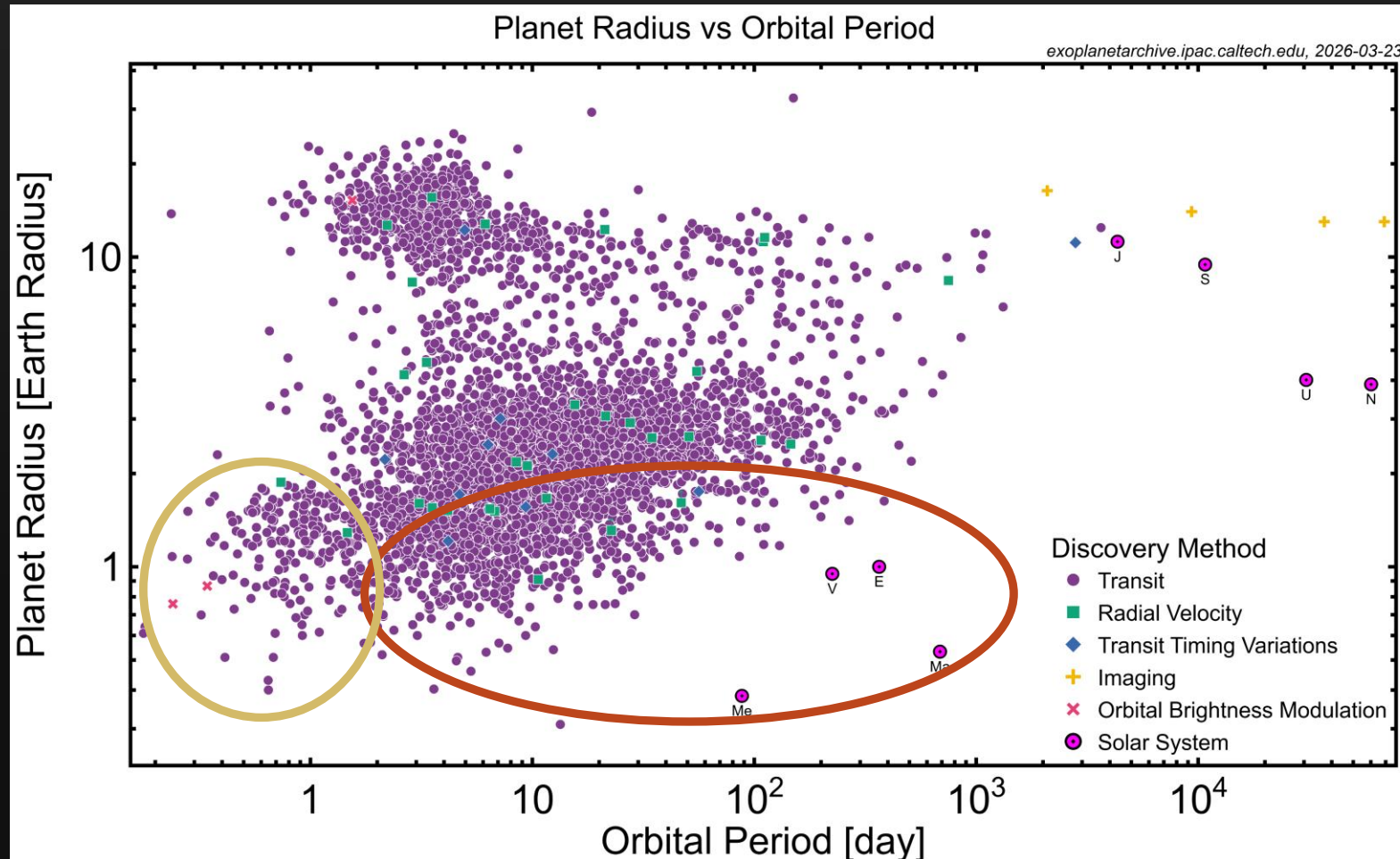
Parte I



Animation by Lennart van Sluijs

Parte I

Populações de planetas

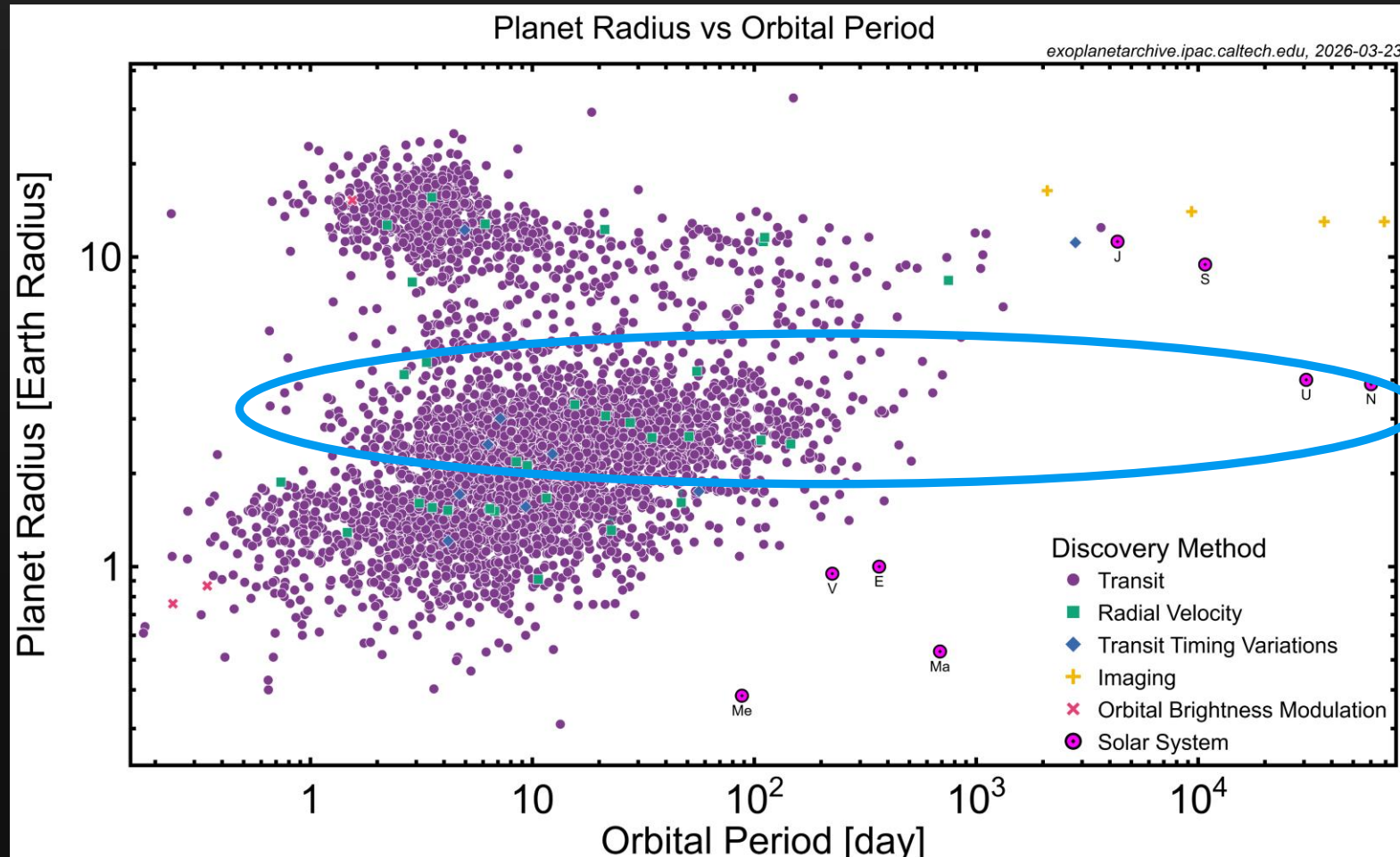


Mundos de magma

Rochosos

Parte I

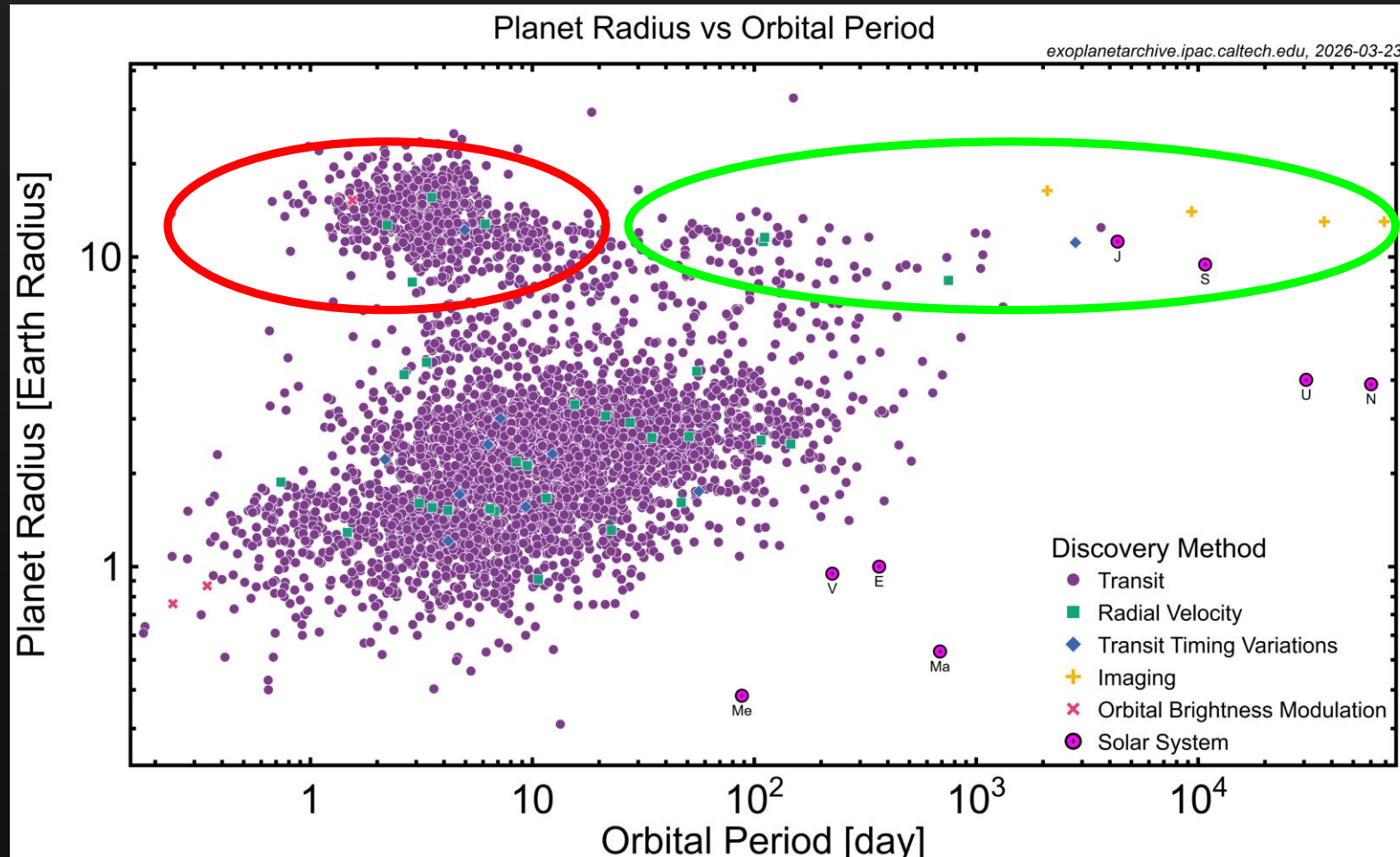
Populações de planetas



Mundos oceano
Gigantes de gelo

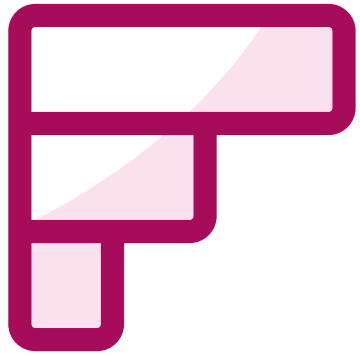
Parte I

Populações de planetas



Jupiters quentes e
ultra-quentes

Gigantes de gás frios



População favorita

Parte I

Os “filhos” favoritos



População favorita

Ranking Poll

17 votes

17 participants



Parte I

Os “filhos” favoritos

Favorecimento natural:

- Planetas grandes e estrelas pequenas
- Órbitas curtas e próximas
- Atmosferas quentes e leves

Interesse público e científico:

- Planetas terrestres
- Atmosferas amenas

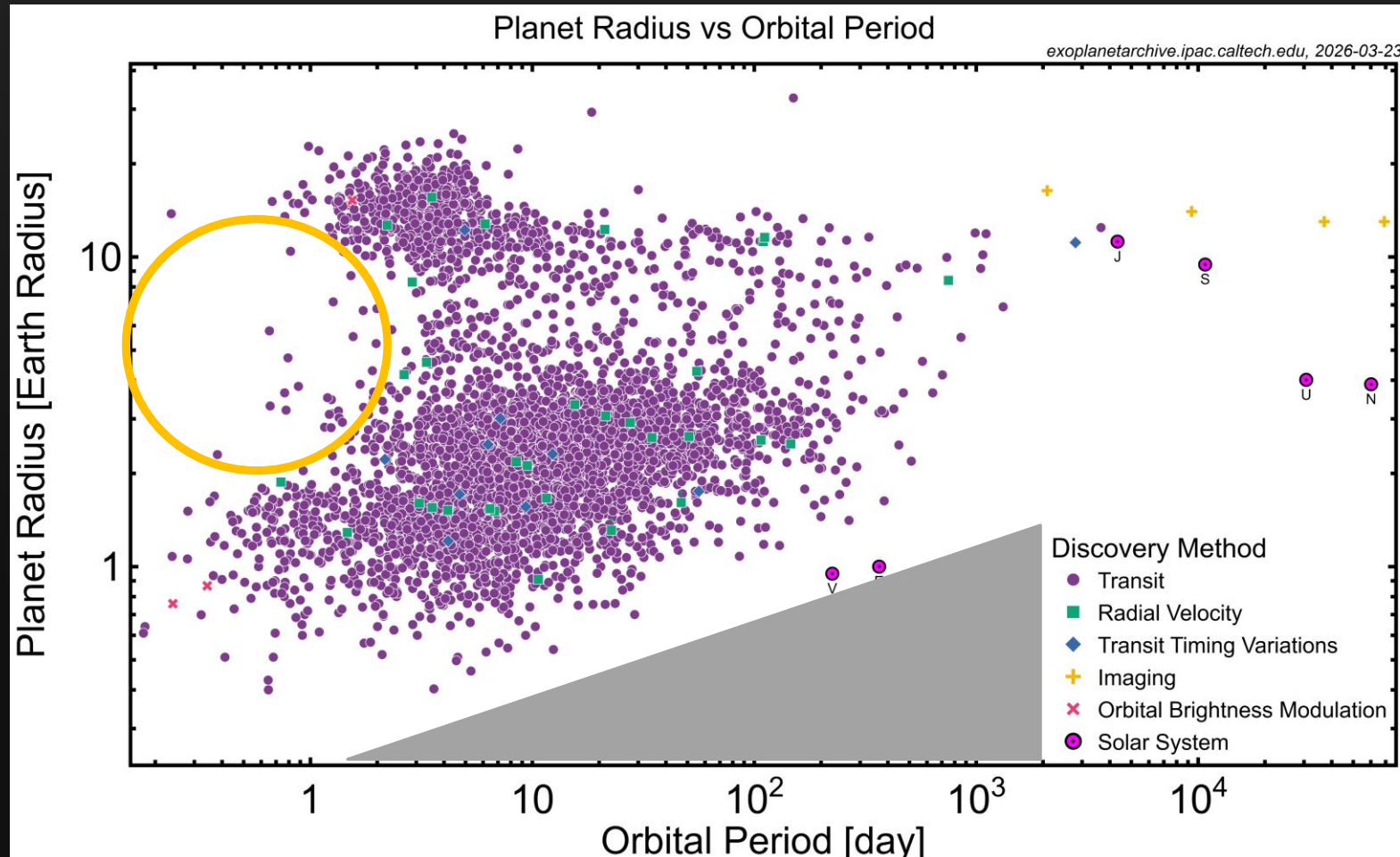
$$\delta \sim \left(\frac{R_p + h}{R_*} \right)^2$$

$$P(\text{transito}) \sim \frac{R_*}{a}$$

$$H = \frac{k_B T}{g \mu}$$

Parte I

Populações de planetas

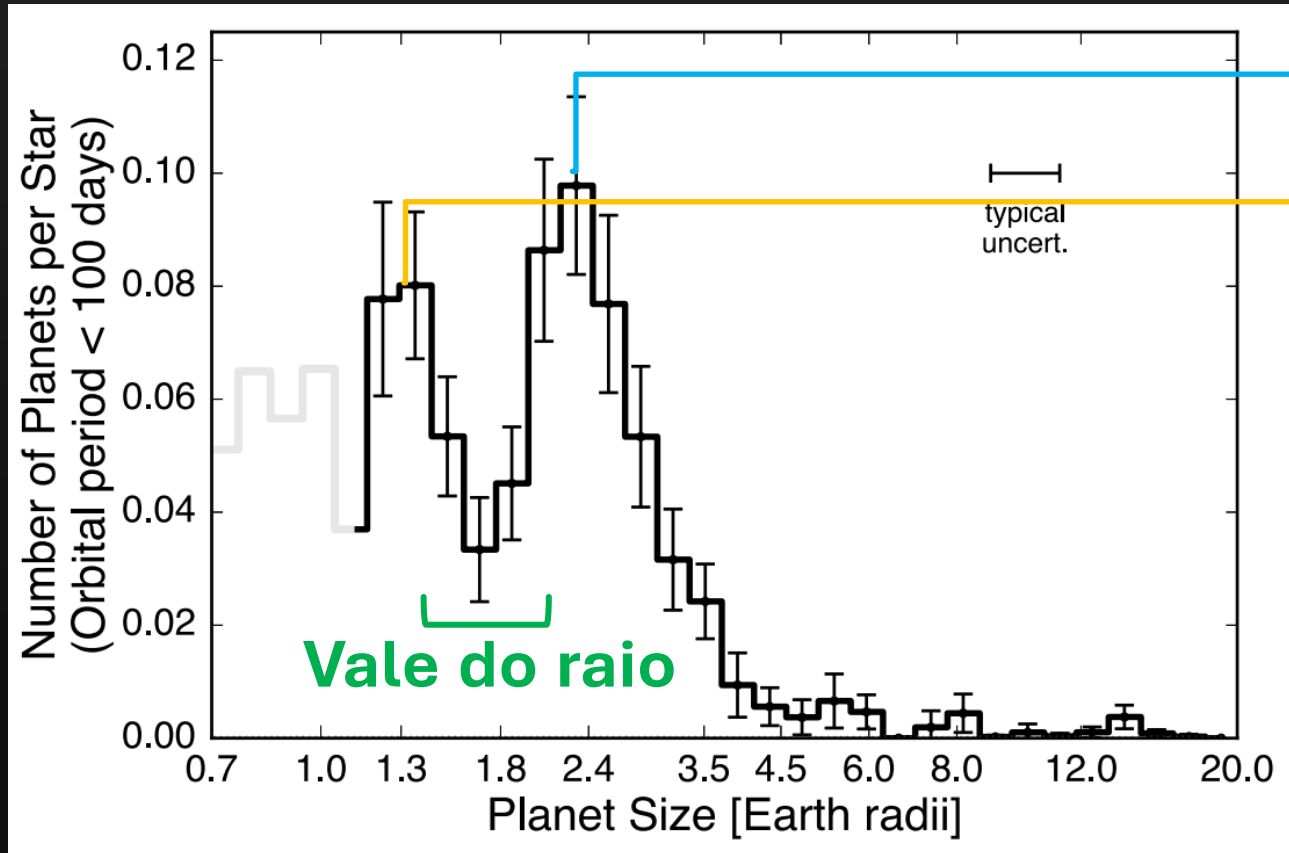


Fronteira
observacional

Deserto Neptuniano

Parte I

Populações de planetas



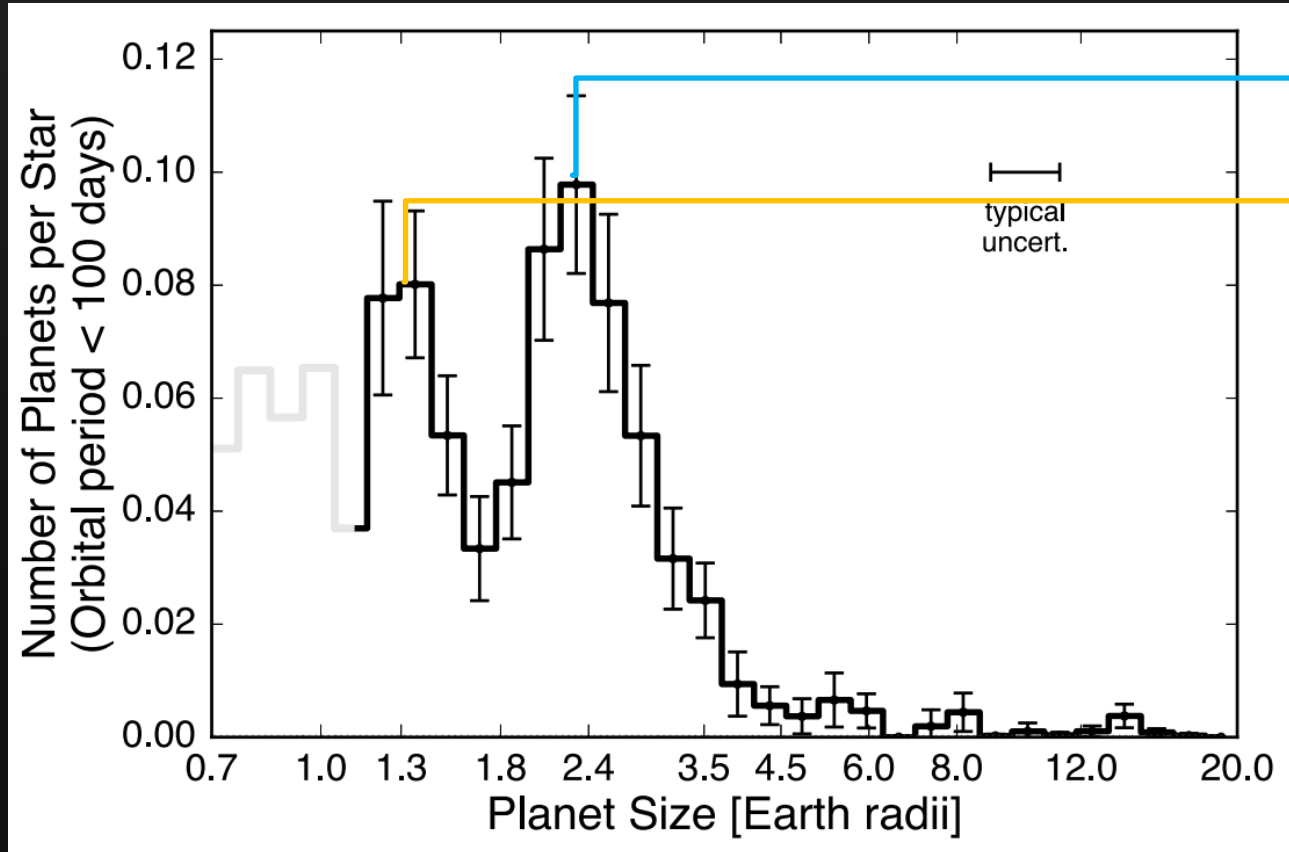
Sub-Neptunos

Super-Terras

Fonte: Fulton et al. 2017

Parte I

Populações de planetas



Formação comum com perda de atmosfera por:

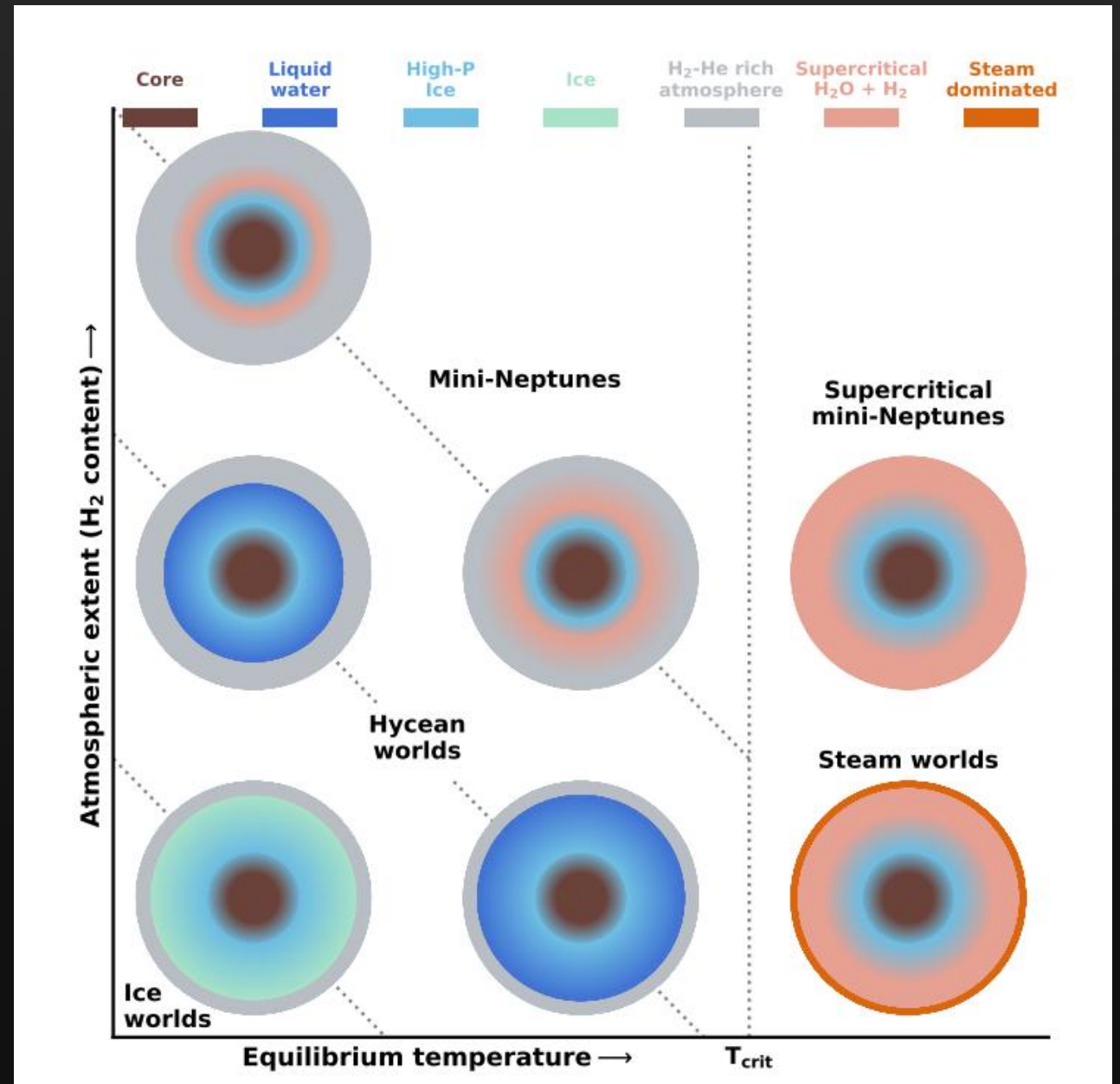
- Fotoevaporação
- Calor interno (“core-powered”)
- Local de formação

Fonte: Fulton et al. 2017

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...



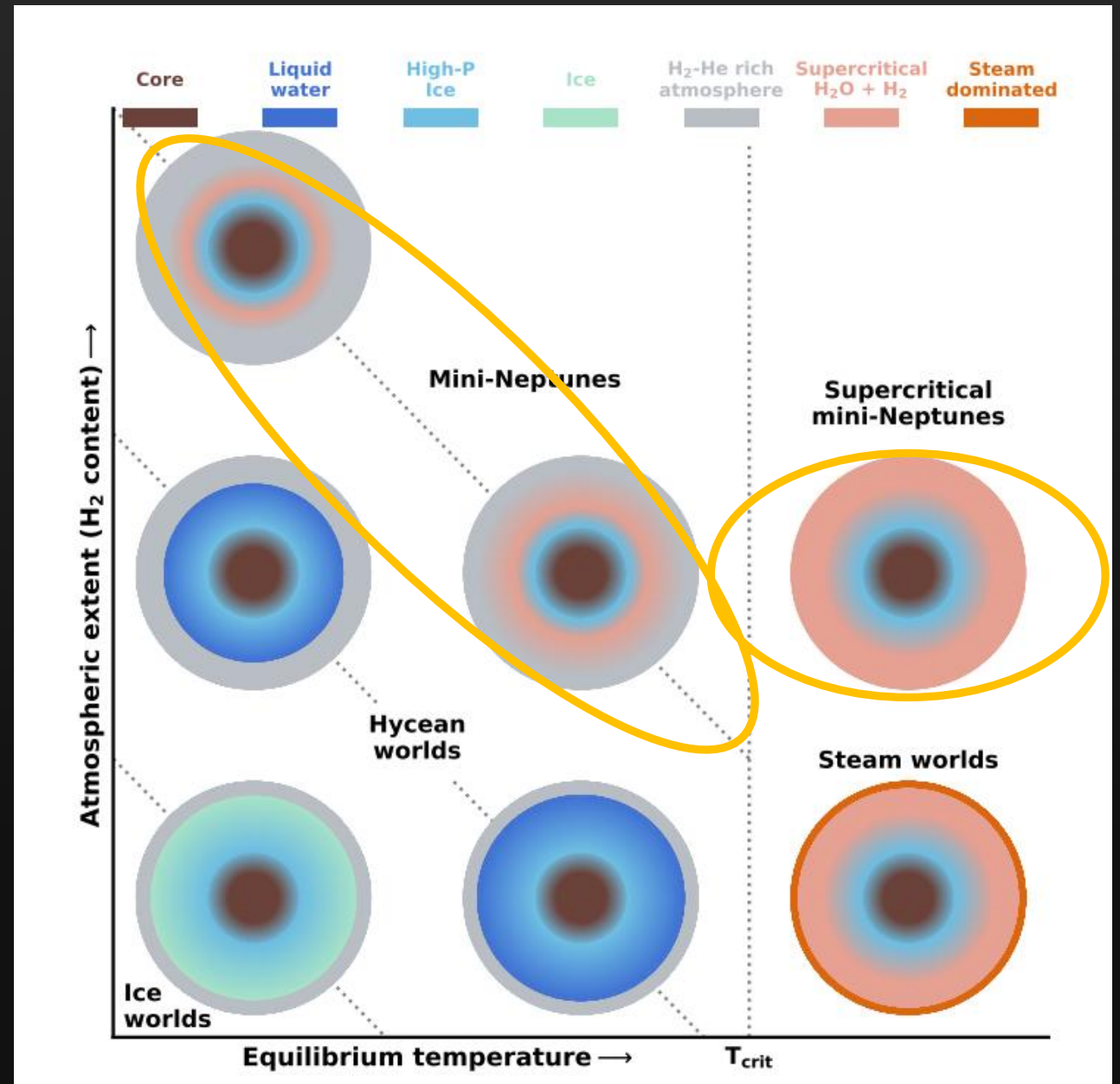
Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...

- Mini Neptunos
 - Imiscíveis
 - Miscíveis/supercríticos



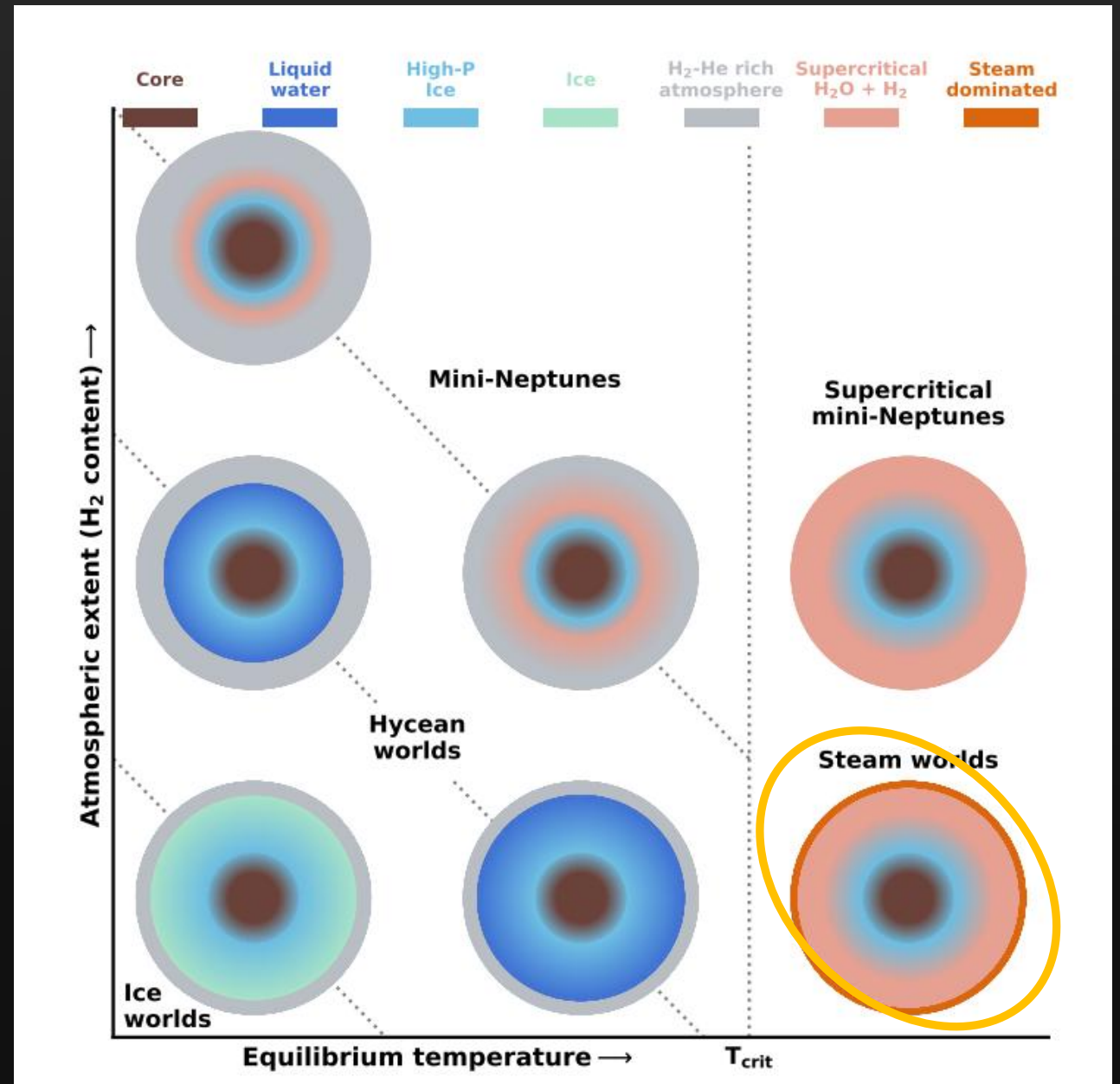
Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...

- Mini Neptunos
 - Imiscíveis
 - Miscíveis/supercríticos
- **Mundos vapor**



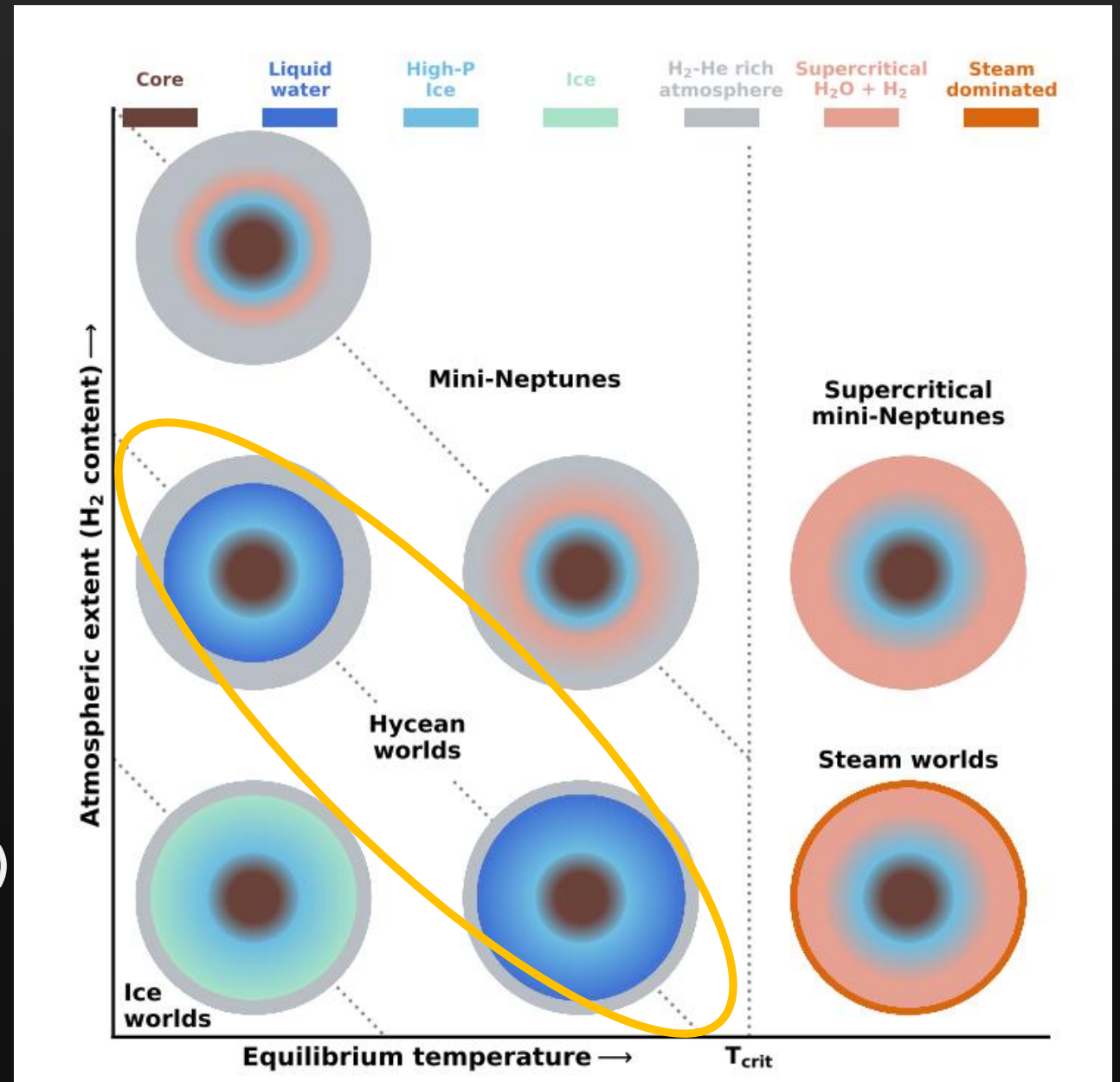
Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...

- Mini Neptunos
 - Imiscíveis
 - Miscíveis/supercríticos
- Mundos vapor
- **Mundos “Hycean” (Hydrogen + Ocean)**

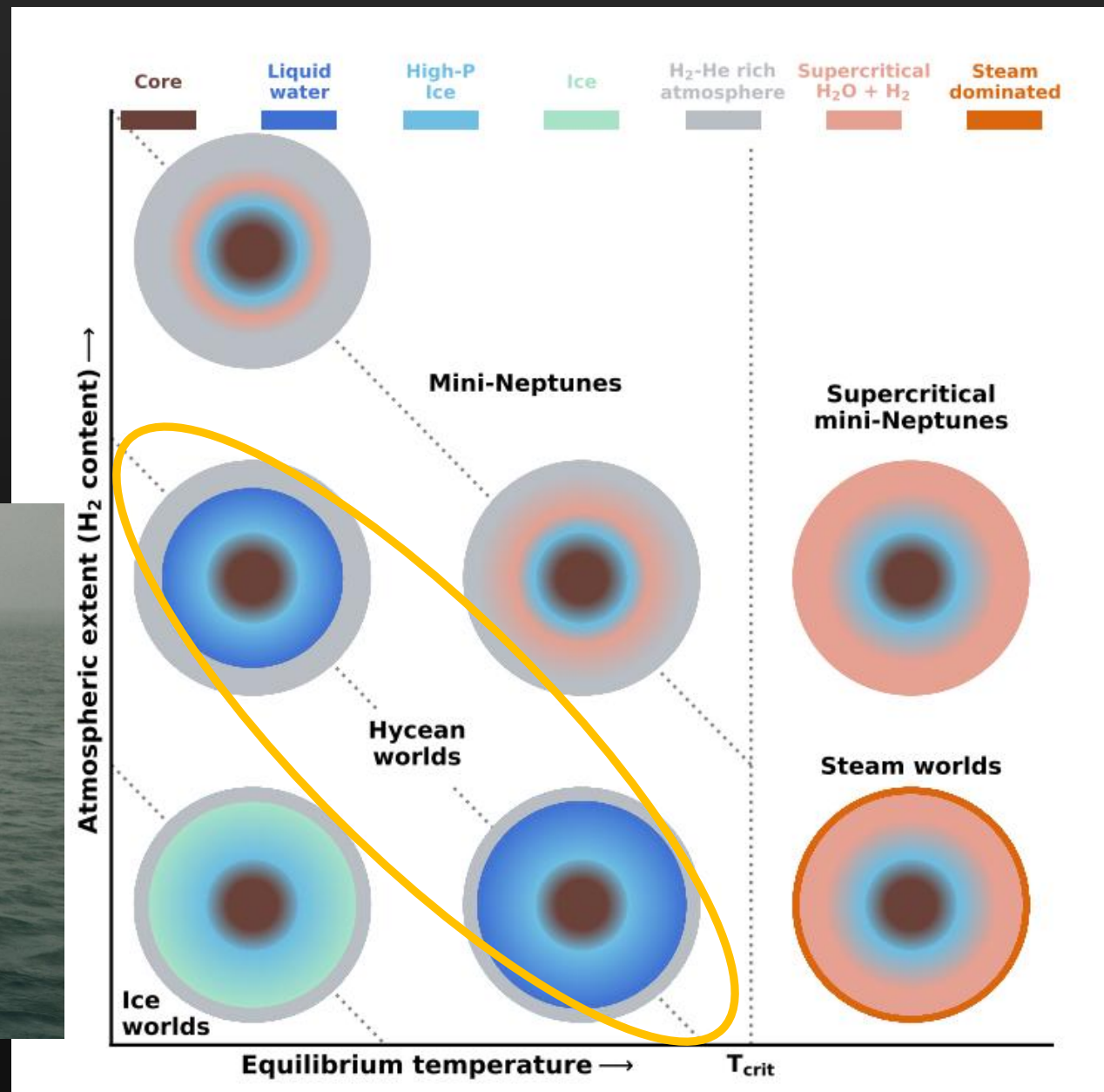


Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...



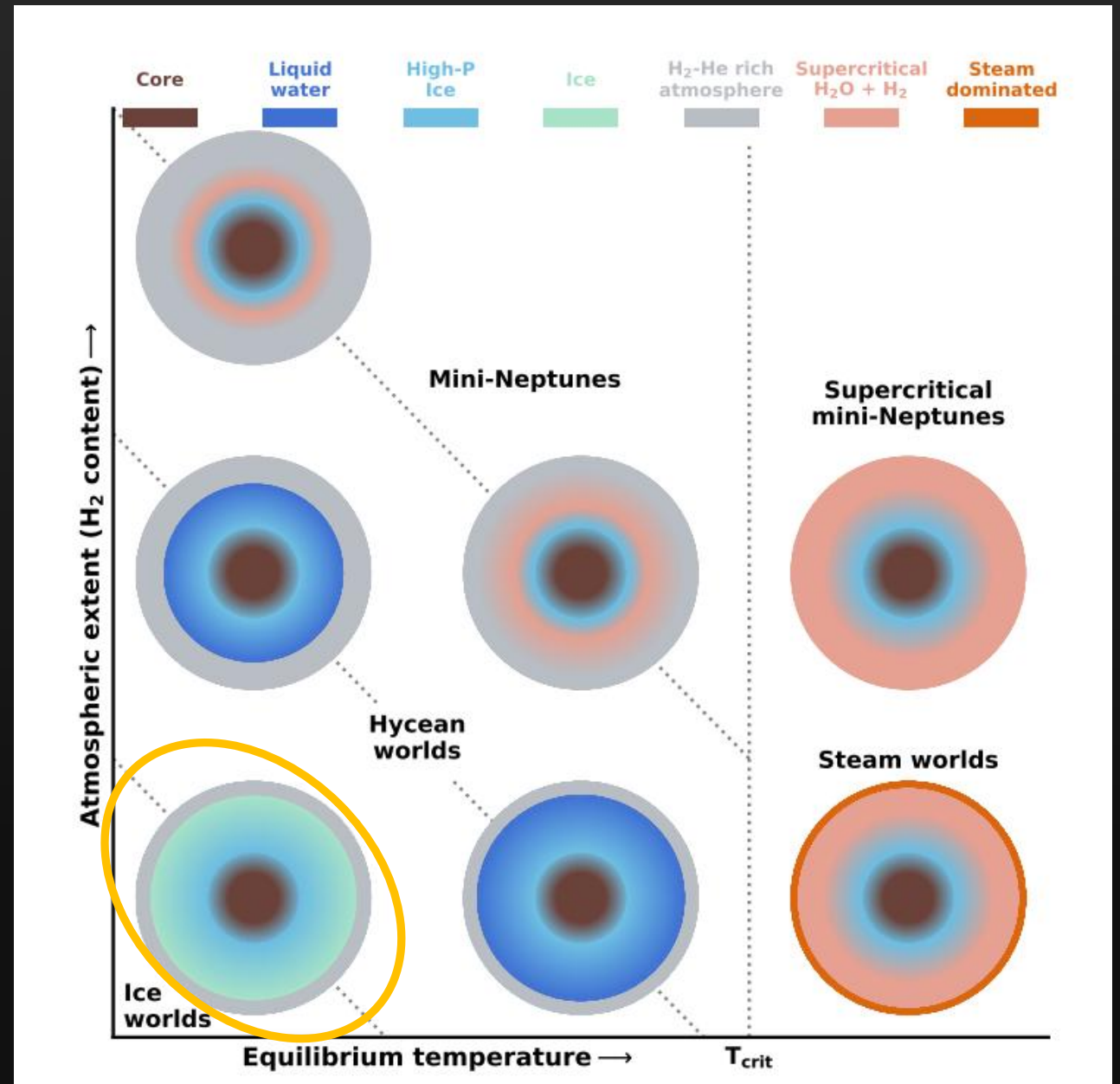
Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Sub-Neptunos amenos

Estrutura interna incerta...

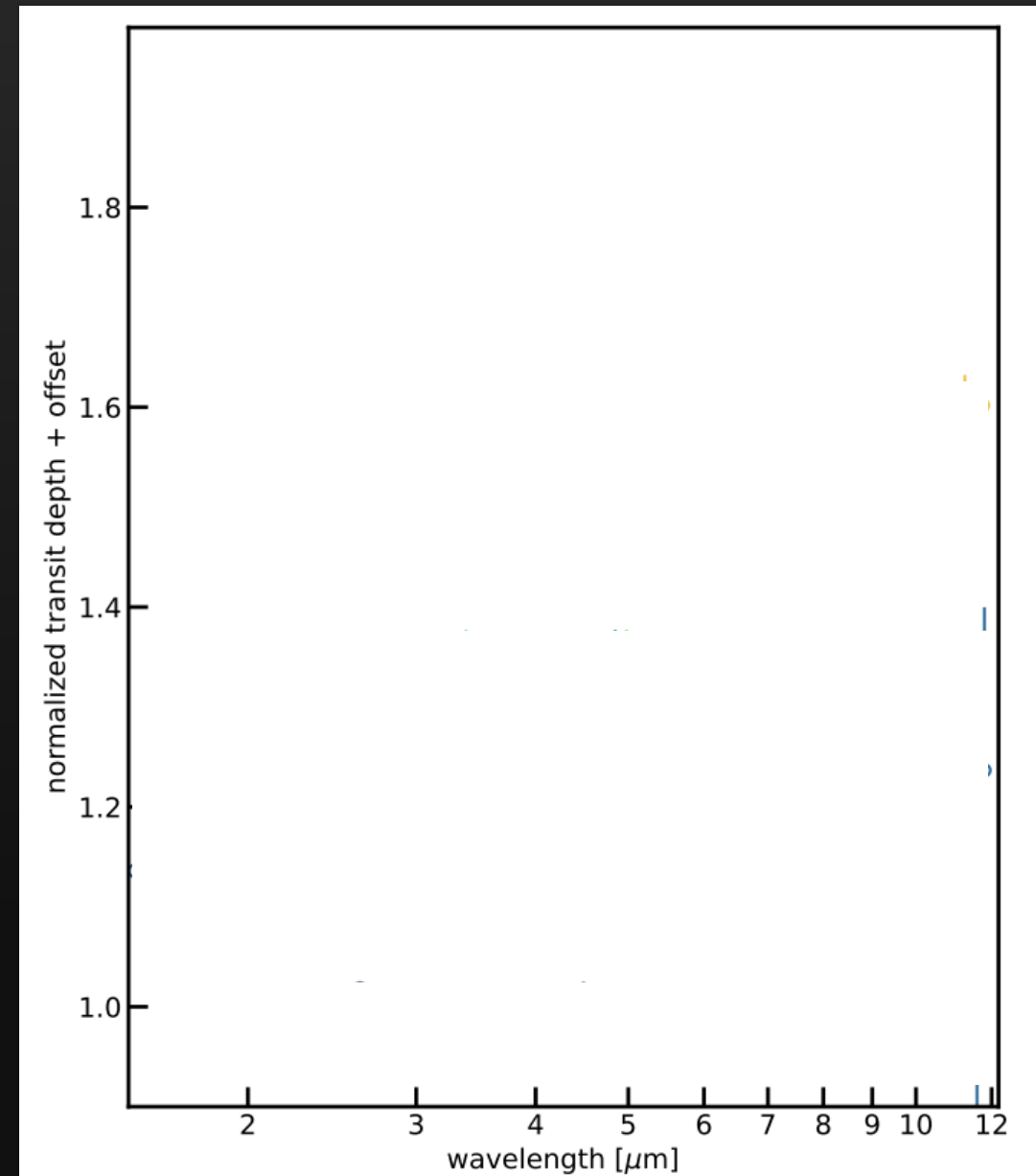
- Mini Neptunos
 - Imiscíveis
 - Miscíveis/supercríticos
- Mundos vapor
- Mundos “Hycean” (Hydrogen + Ocean)
- **Mundos gelados**



Fonte: Madhusudhan et al. 2025

Parte I

Uma busca...



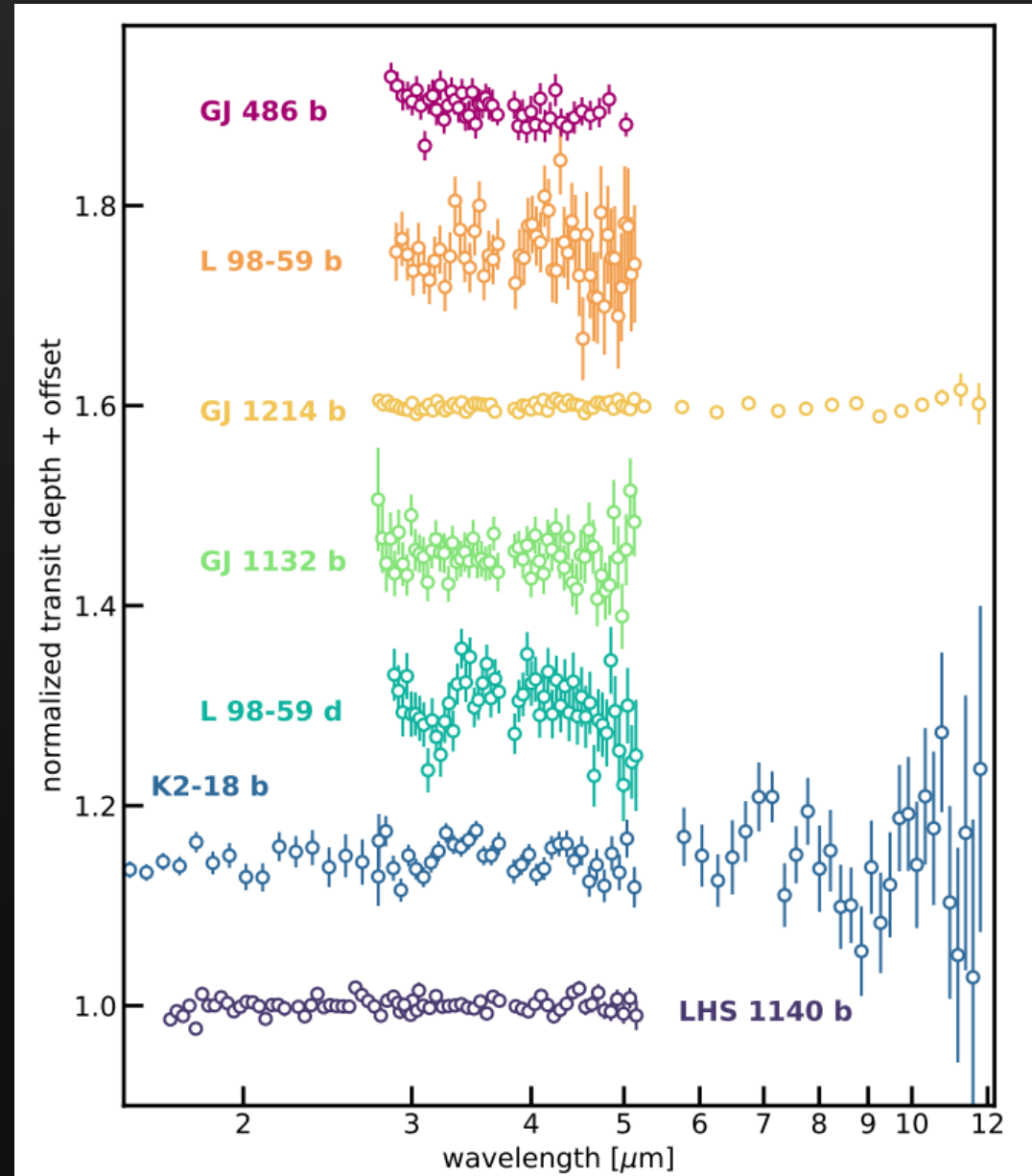
Fonte: Welbanks et al. 2025

Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “lisos” → atmosferas opacas ou pouco extensas

- Camada de aerossóis
- Atmosferas pesadas



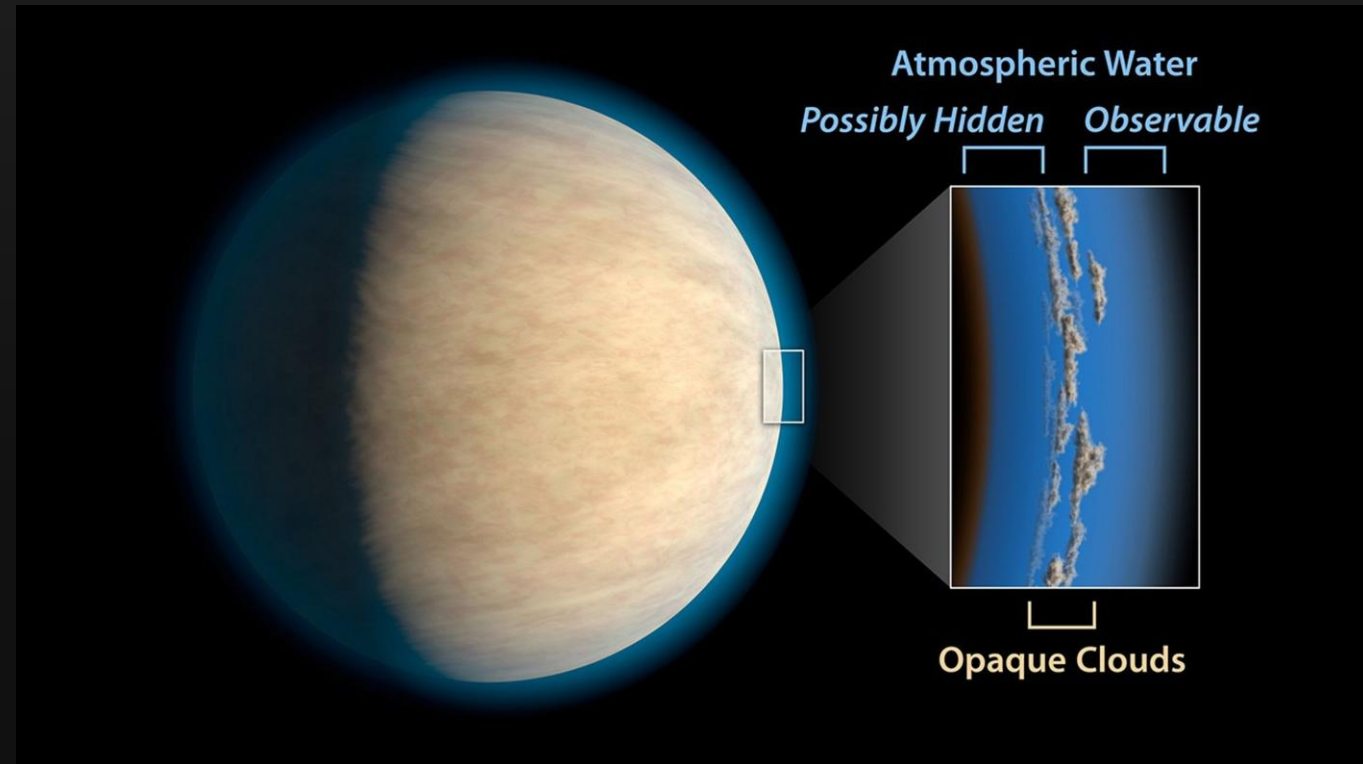
Fonte: Welbanks et al. 2025

Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “lisos” → atmosferas opacas ou pouco extensas

- **Camada de aerossóis (nuvens, neblina)**
- Atmosferas pesadas



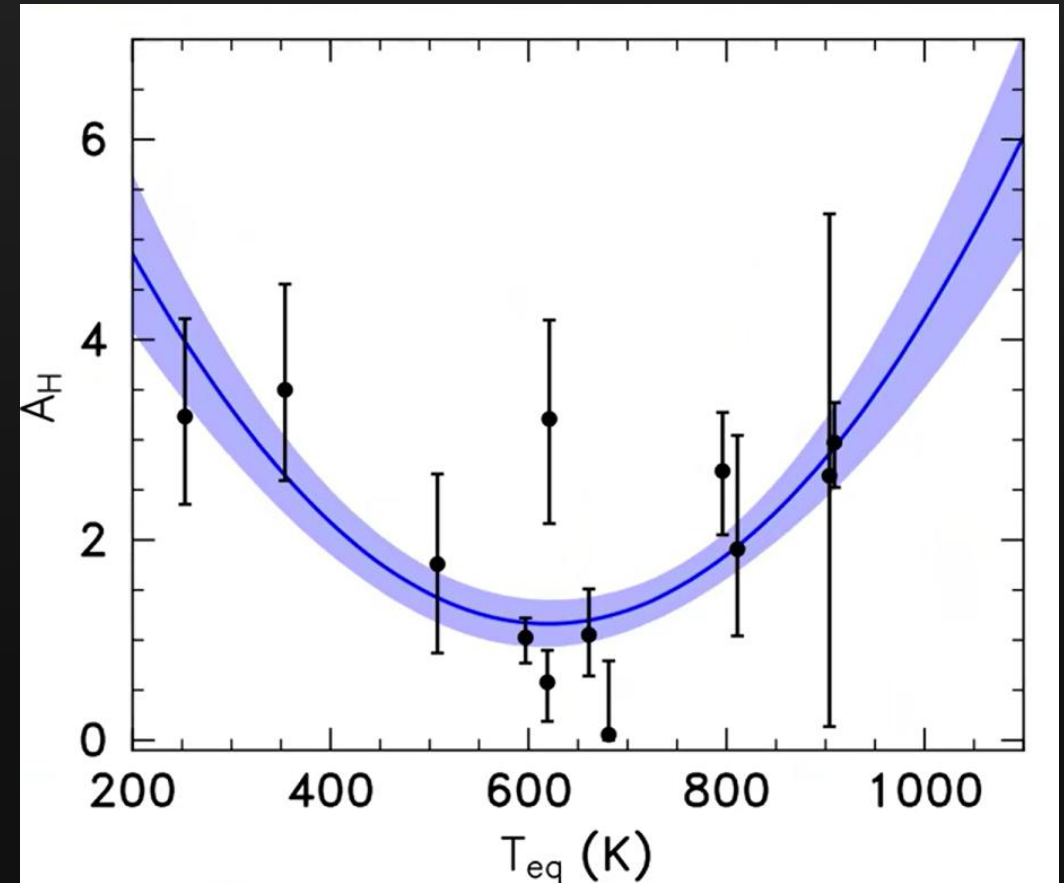
Fonte: NASA

Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “lisos” → atmosferas opacas ou pouco extensas

- **Camada de aerossóis (nuvens, neblina)**
- Atmosferas pesadas



Fonte: Brande et al. 2023, adaptado por Eliza Kempton

Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “lisos” → atmosferas opacas
ou pouco extensas

- Camada de aerossóis
- **Atmosferas pesadas**

$$H = \frac{k_B T}{g \mu}$$

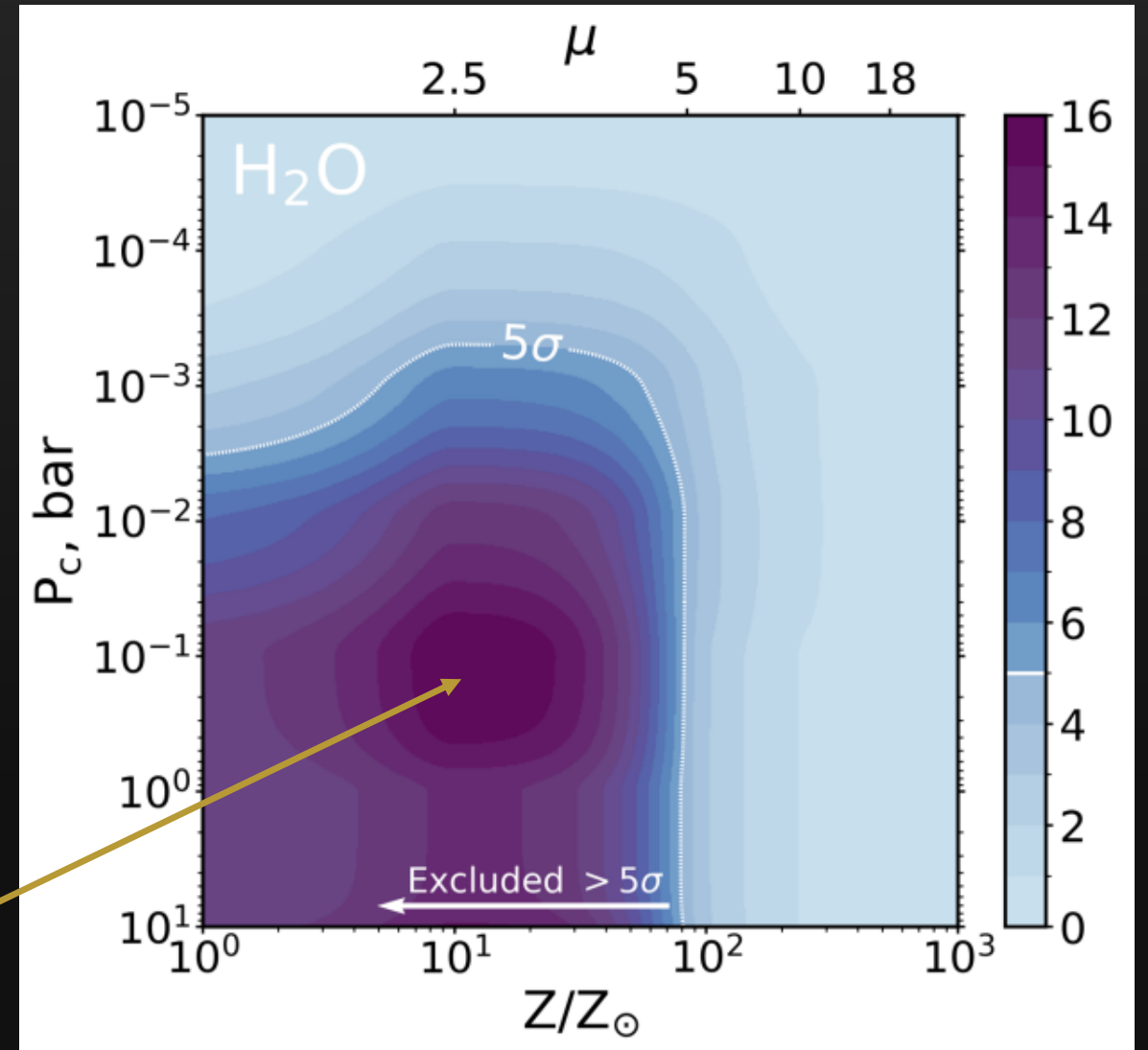
Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “lisos” → atmosferas opacas ou pouco extensas

- Camada de aerossóis
- **Atmosferas pesadas**

Atmosferas com nuvens de baixa altitude e baixa metalicidade (menos pesadas) deveriam ser detetáveis

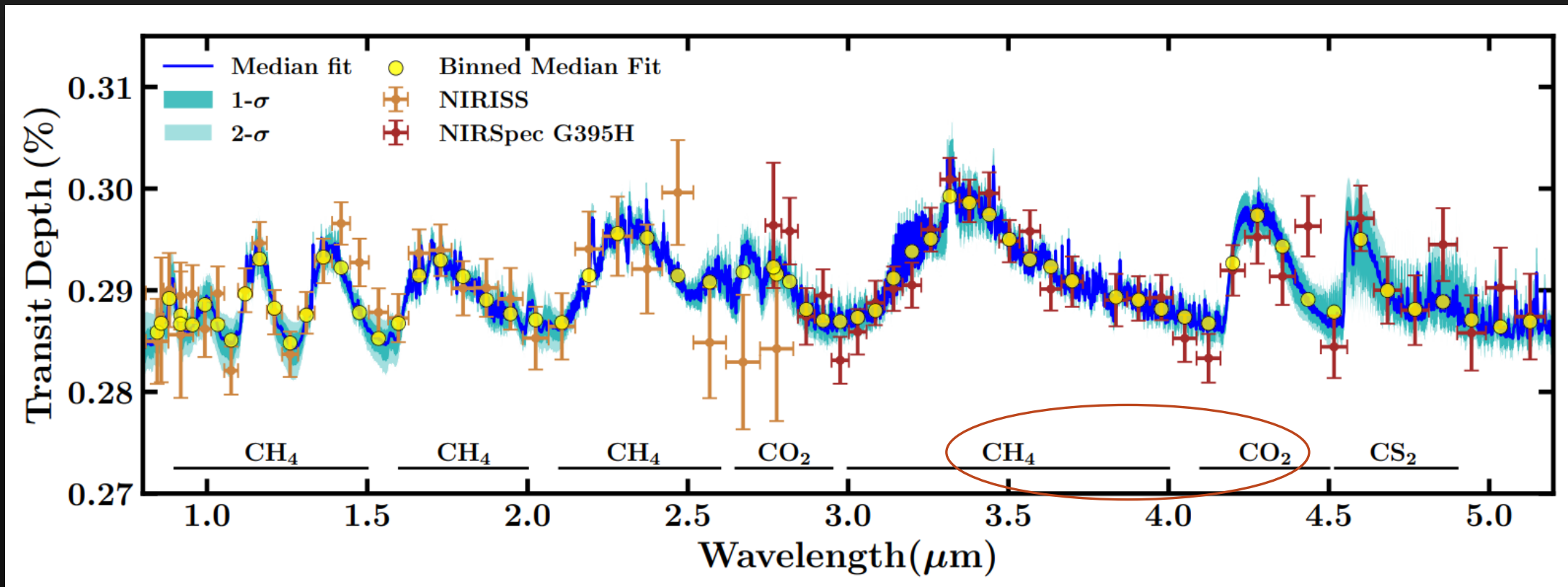


Fonte: Parker et al. 2025

Parte I

Uma busca anticlimática

TOI-270 d



Fonte: Constantinou et al. 2025

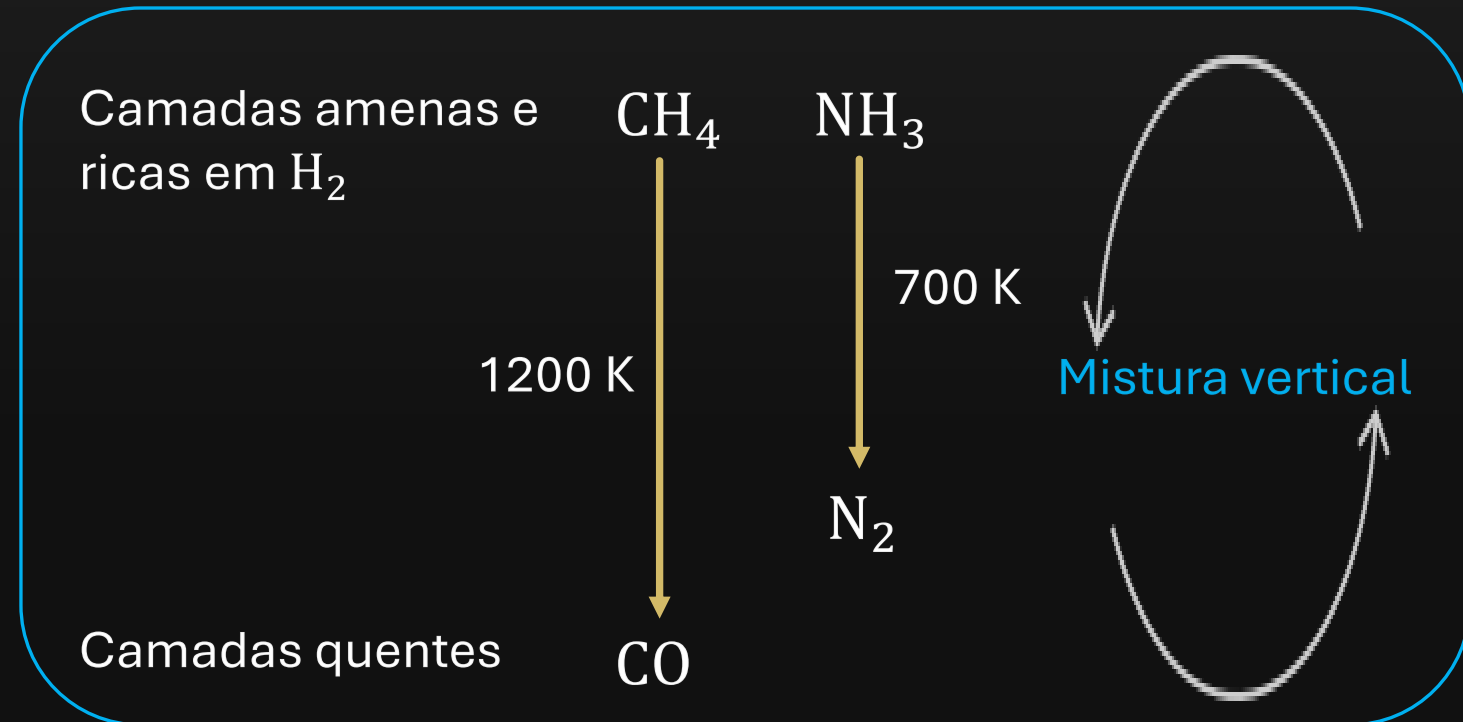
Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “contraditórios”

- **Fora de equilíbrio**

Em desenvolvimento...

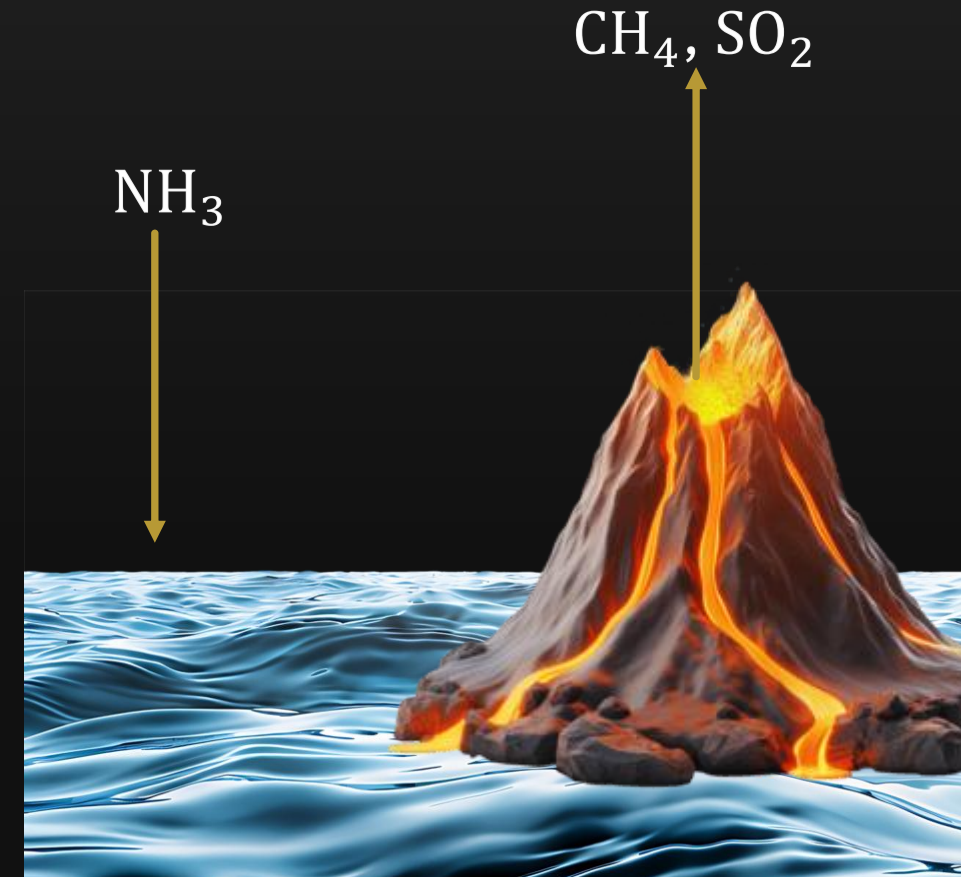


Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “contraditórios”

- Fora de equilíbrio
- **Interação com interior e superfície**



Parte I

Uma busca anticlimática

Espectros “contraditórios”

- Fora de equilíbrio
- Interação com interior e superfície
- **Vida?**

Mecanismo de combate ao equilíbrio

Coexistência de gases reduzidos (CH_4) e oxidados (CO_2 , O_2)

Parte I

Resumo

- Atmosferas: Janelas para origem, evolução e estrutura de exoplanetas
- Espectroscopia de transmissão: Ver como a atmosfera filtra a luz estelar
- Populações muito distintas
- Atmosferas quentes e leves + estrelas pequenas são as mais visíveis
- Sub-Neptunos são importantes: estrutura e formação por descobrir
- Nuvens e atmosferas pesadas dificultam as detecções
- Processos de desequilíbrio dificultam a interpretação

Como lidar com os desafios e que abordagens tomar?

Pausa...

Parte II

Atmosferas complexas

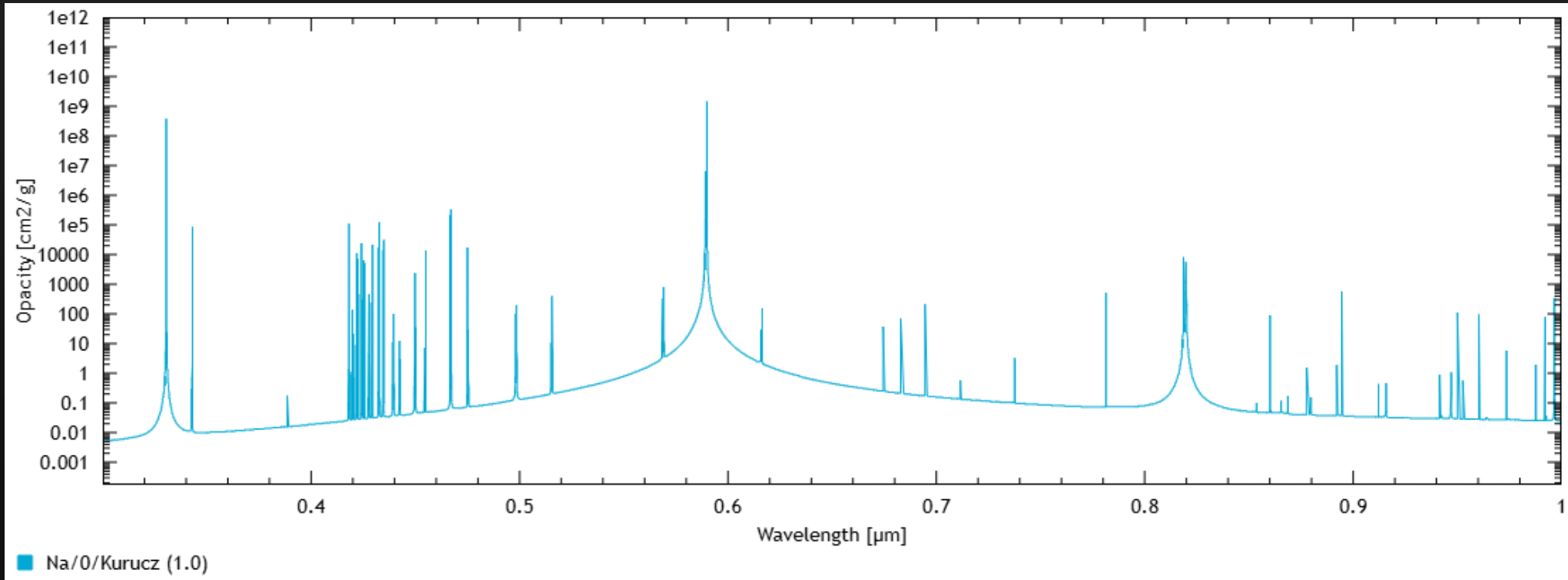
Observação

Análise

Interpretação

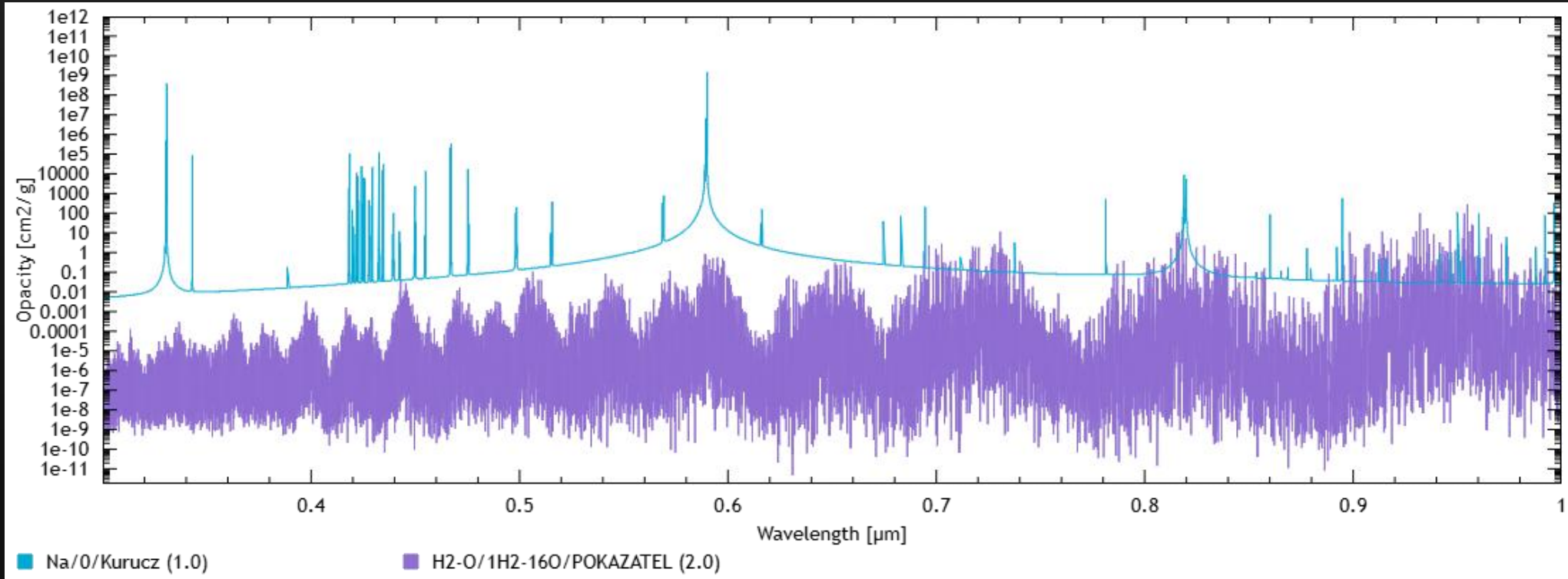
Parte II

Atmosferas complexas



Parte II

Atmosferas complexas

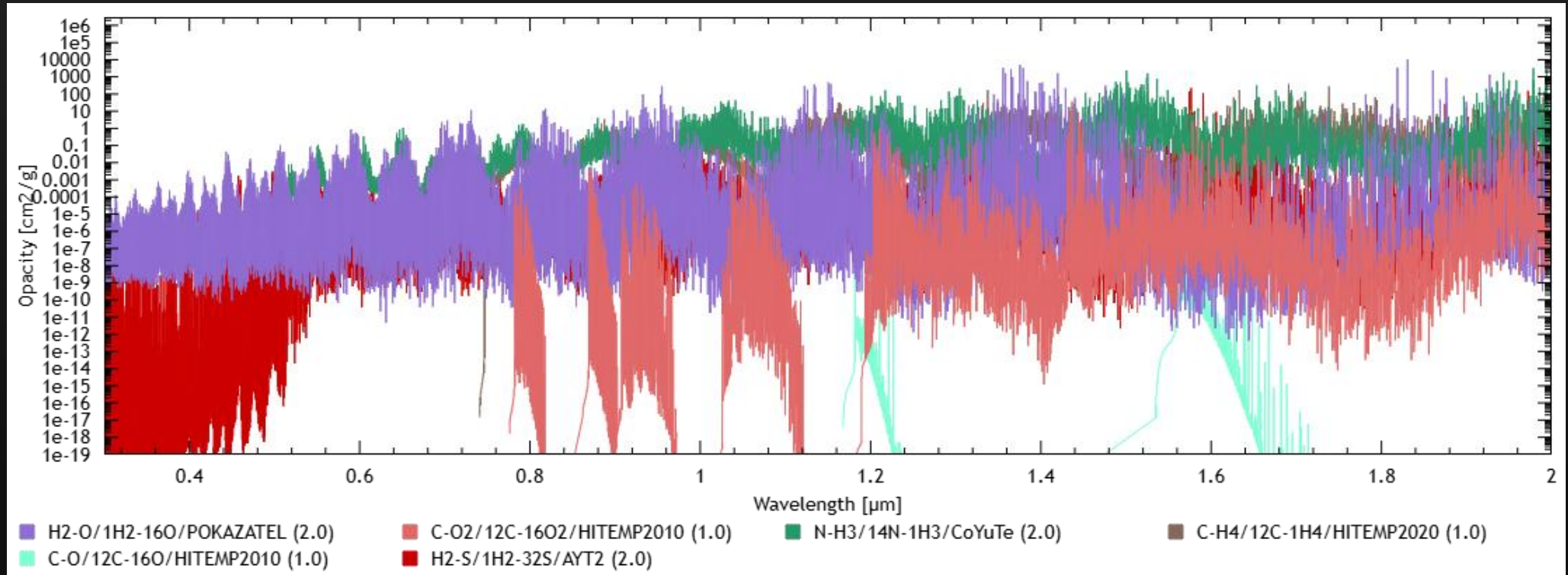


Átomos: Riscas estreitas, fortes e pontuais

Moléculas: Florestas de riscas com estrutura em larga escala

Parte II

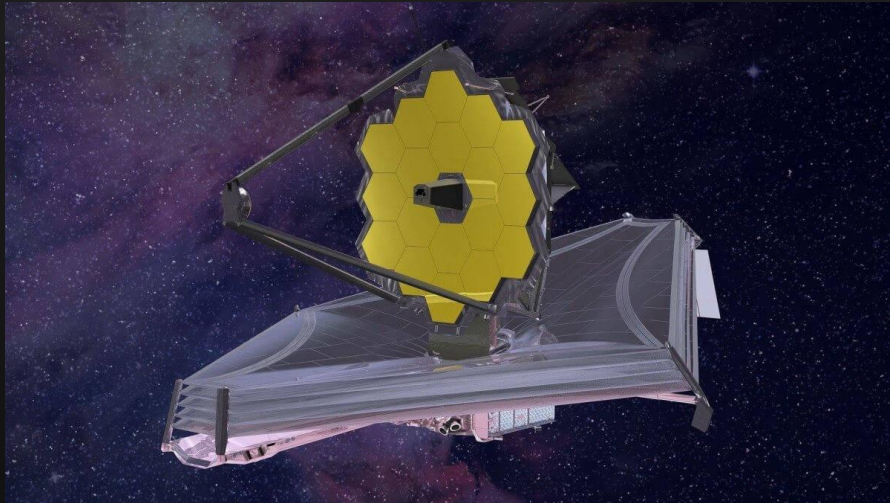
Atmosferas complexas



Parte II

Observação: espacial vs terrestre

JWST



Sem poluição luminosa humana

Sem atmosfera da Terra

Observa a qualquer hora

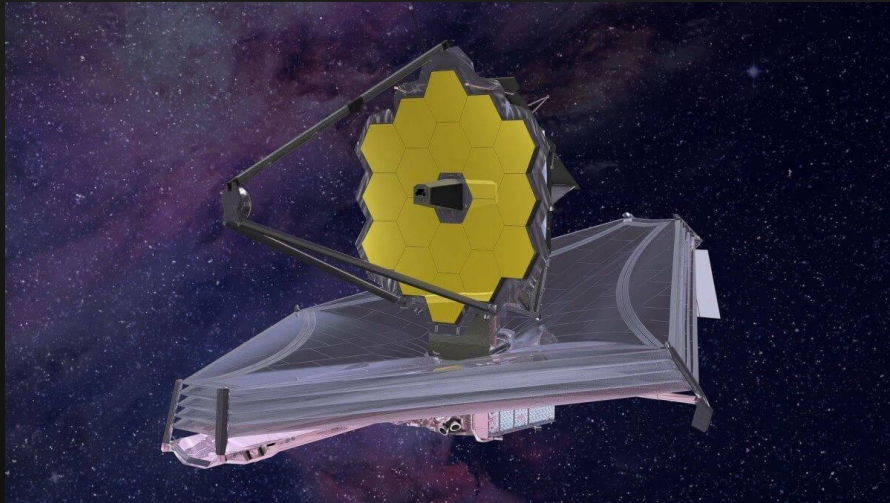
VLT



Parte II

Observação: espacial vs terrestre

JWST



Sem poluição luminosa humana

Sem atmosfera da Terra

Observa a qualquer hora

Permite medir fluxos **absolutos**

Terrestres: Medem fluxo relativo / normalizado

Para quê gastar mais em telescópios terrestres?

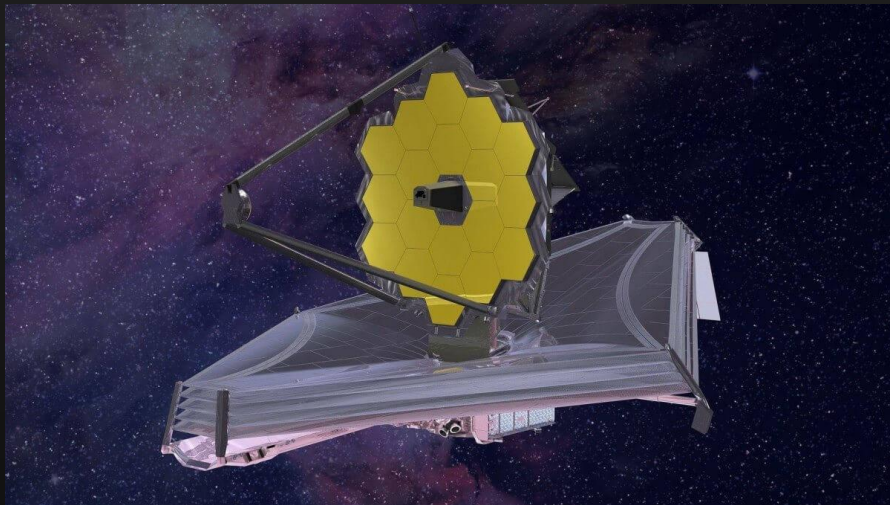
Tanta preocupação com poluição luminosa para quê?



Parte II

Observação: espacial vs terrestre

JWST



VLT



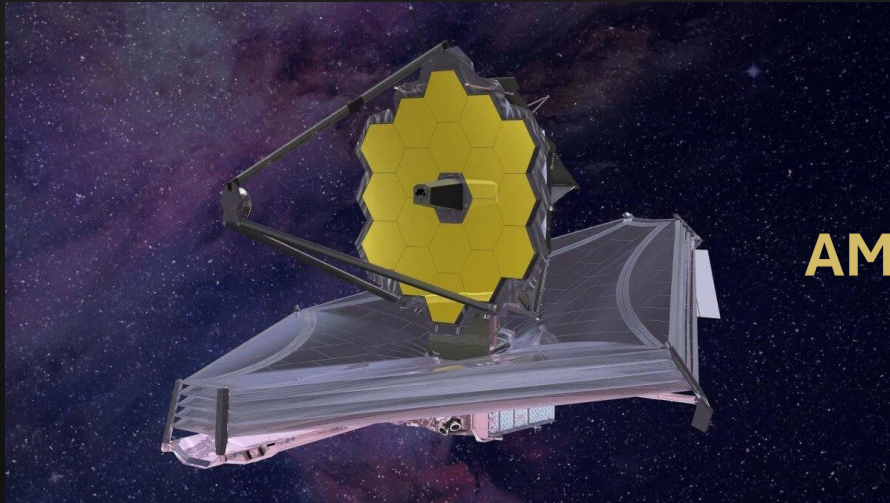
Alta resolução

Telescópios gigantes

Parte II

Observação: espacial vs terrestre

JWST



NIRSpec: $R = 2700$

Bandas largas (moleculares, dispersão, etc.)

AMBOS NECESSÁRIOS

VLT



ESPRESSO: $R = 120000$

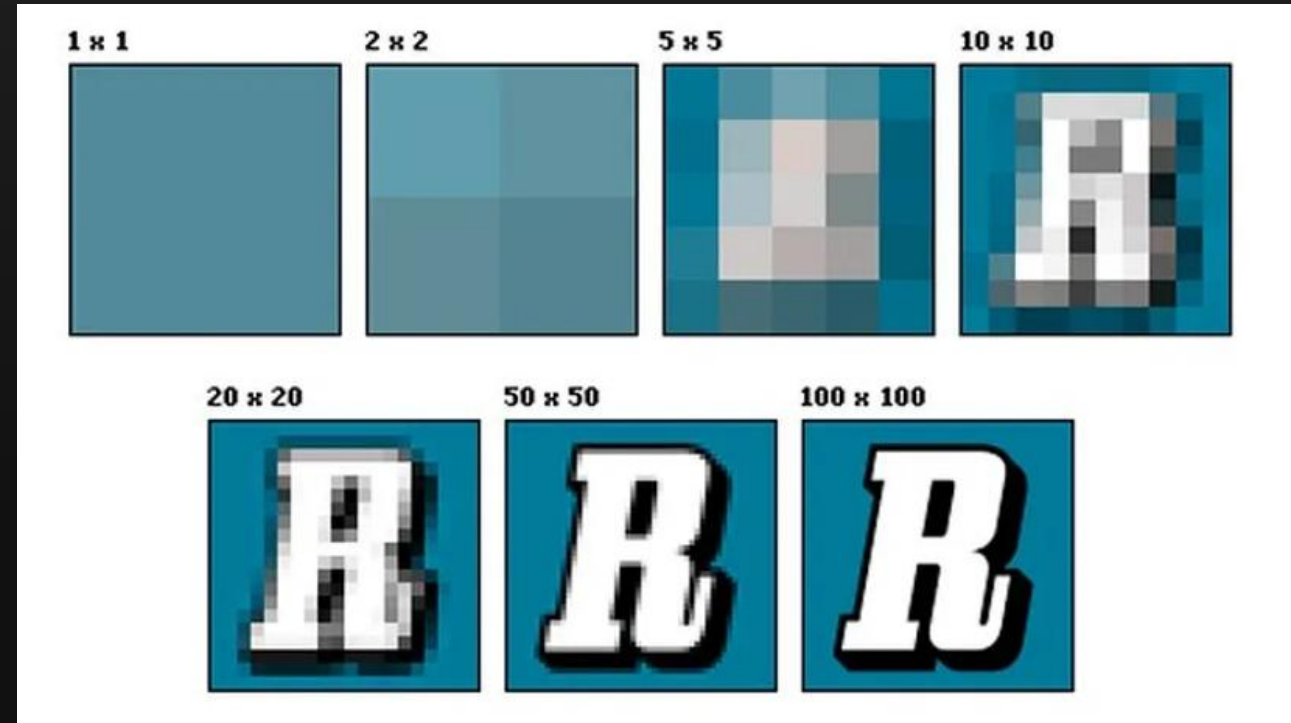
Distingue riscas individuais!

Parte II

Observação: resolução

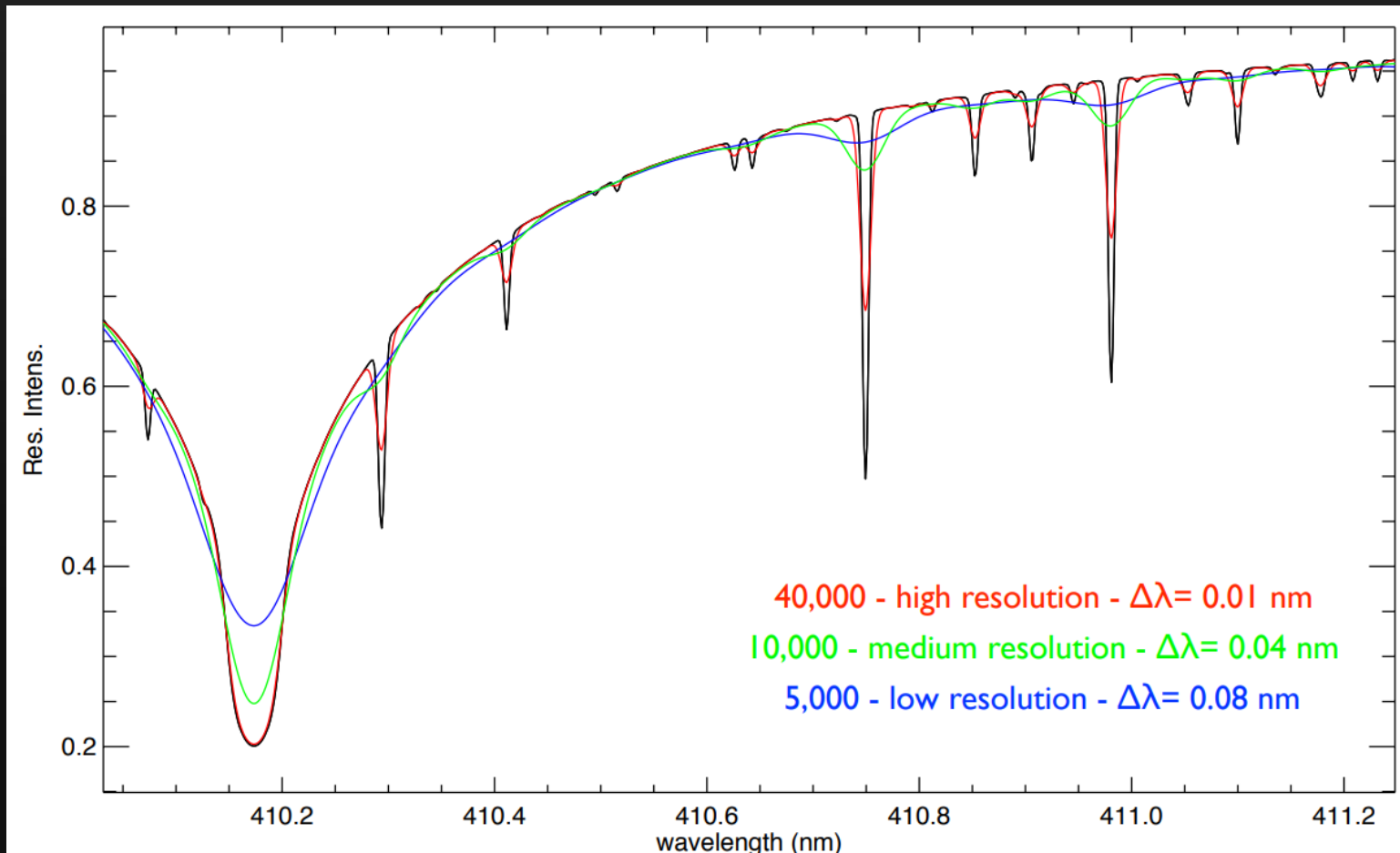
Resolução: detalhe, distância entre medições consecutivas

Reduzir resolução – desfocar



Parte II

Observação: resolução



Riscas: estreitas, pontuais

Dispersão e nuvens: larga escala

+ Resolução = - Intervalo espectral

Fonte: Luca Sbordone


Parte II

Observação de sub-Neptunos

Observação espacial à frente no estudo de sub-Neptunos

- Historicamente (2001 vs 2008)
- Mais simples metodologicamente
- JWST

Alta resolução da Terra:

Jupiters quentes 

Sub-Neptunos amenos 

Parte II

Observação de sub-Neptunos

Baixa resolução do Espaço:

- Estudar aerossóis
- Abundâncias absolutas
- Estrutura da atmosfera

Alta resolução da Terra:

- Propriedades físicas
- Distinguir moléculas
- Dinâmica da atmosfera

Altamente complementar!

Parte II

Recuperações (*retrievals*)

Sinais da atmosfera!



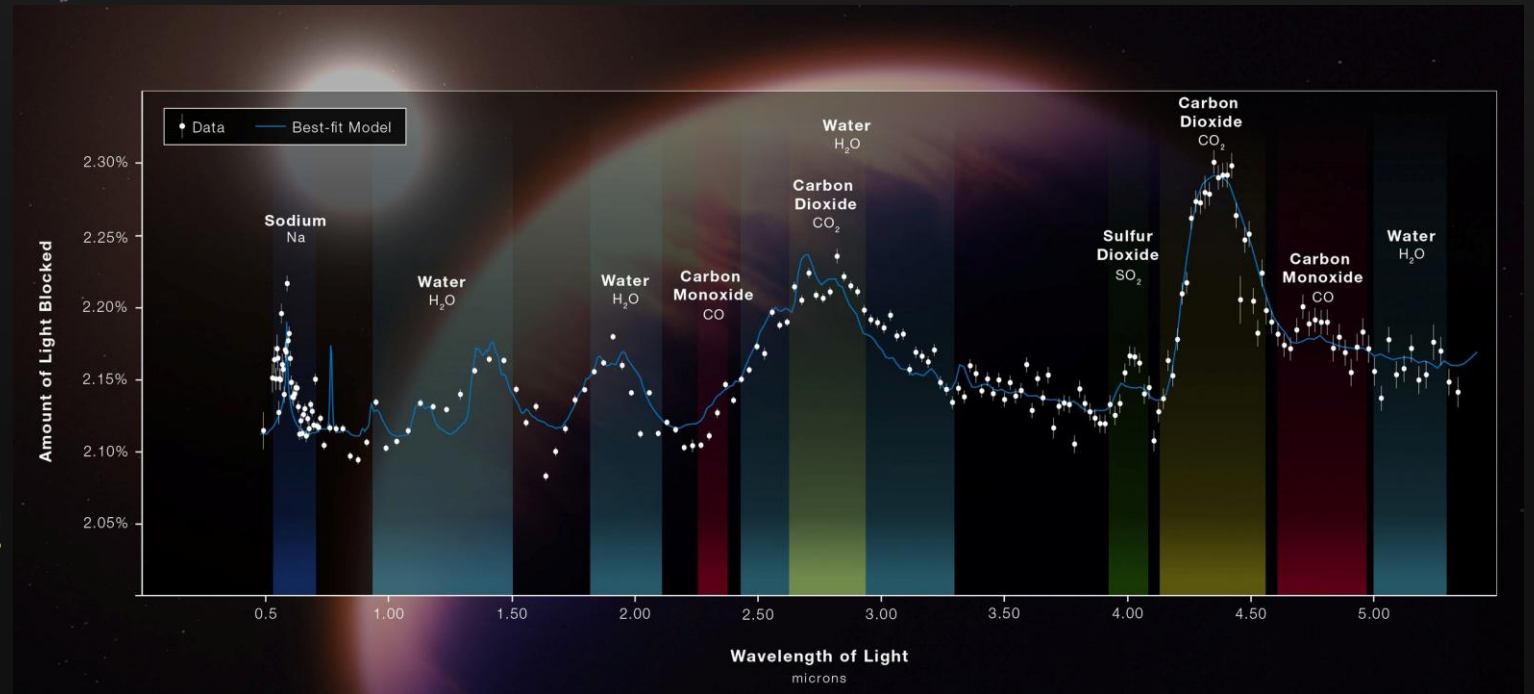
Temperatura?

Distribuição?

Abundância?

Recuperações atmosféricas!

WASP-39 b



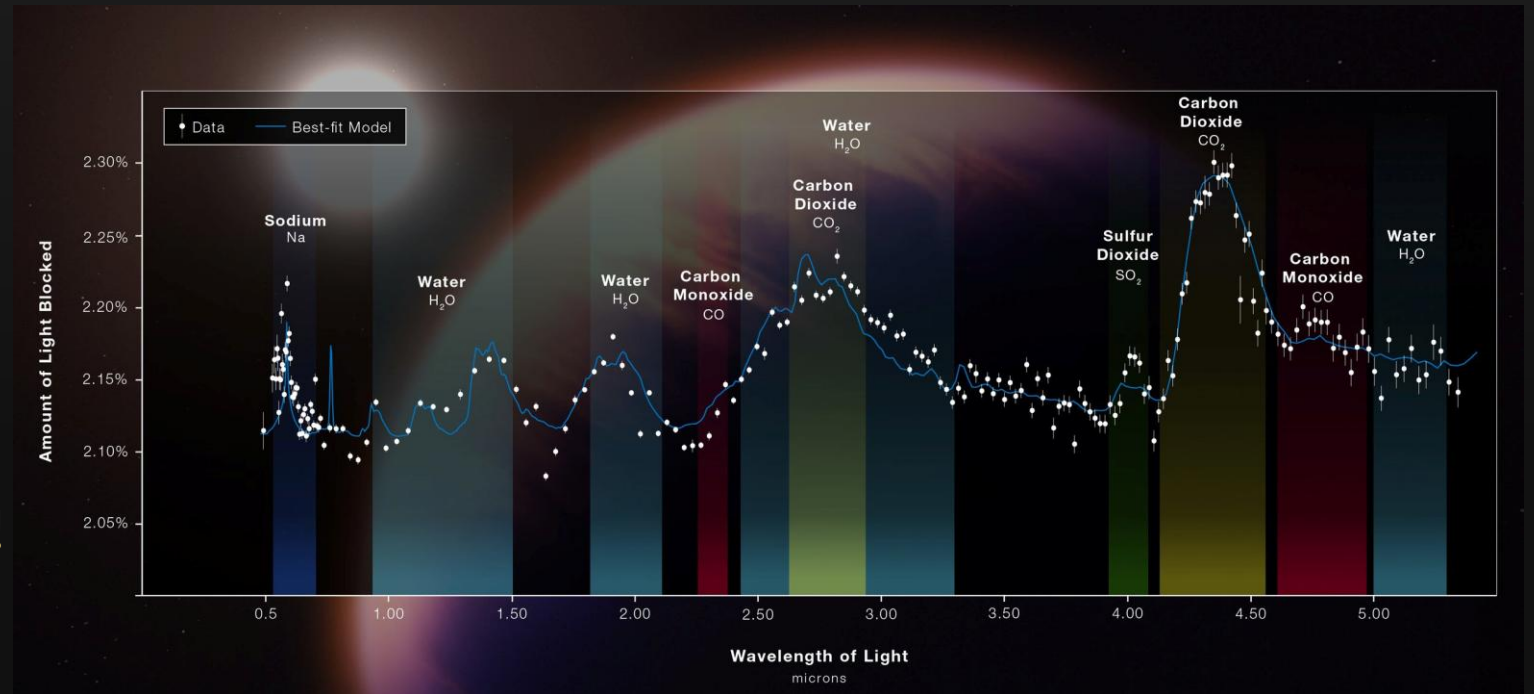
Parte II

Recuperações (*retrievals*)

WASP-39 b

Comparar os dados com
uma previsão teórica

Recuperações atmosféricas!

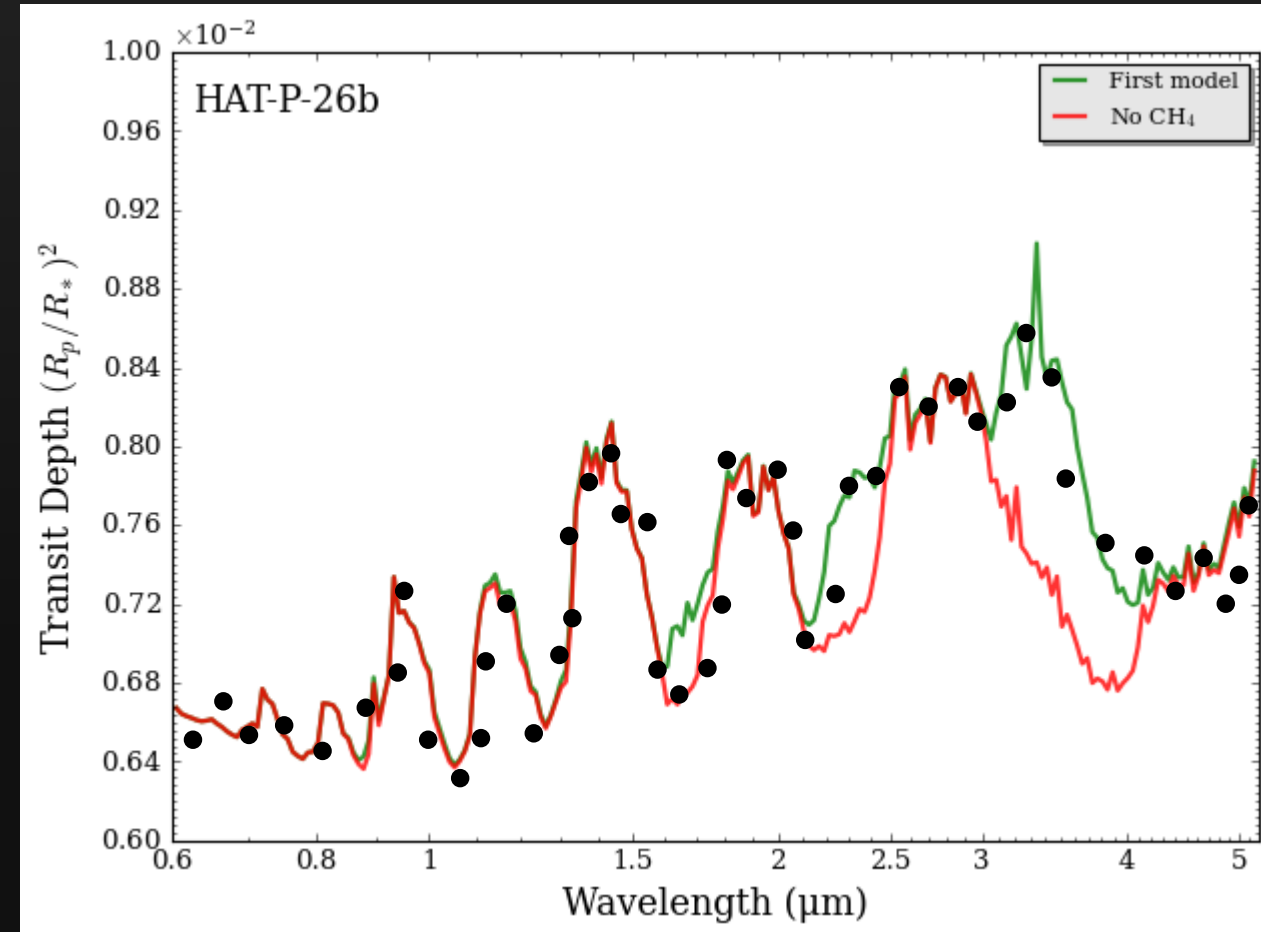


Fonte: NASA

Parte II

Recuperações (*retrievals*)

1. Assumir propriedades do planeta
(Temperatura, Composição, Núvens, ...) $\rightarrow \theta$
2. Gerar um espectro de transmissão
Resolver a transferência radiativa
3. Comparar com os dados
Usar métrica para quantificar $\rightarrow \mathcal{L}(\theta)$



Parte II

Recuperações (*retrievals*)

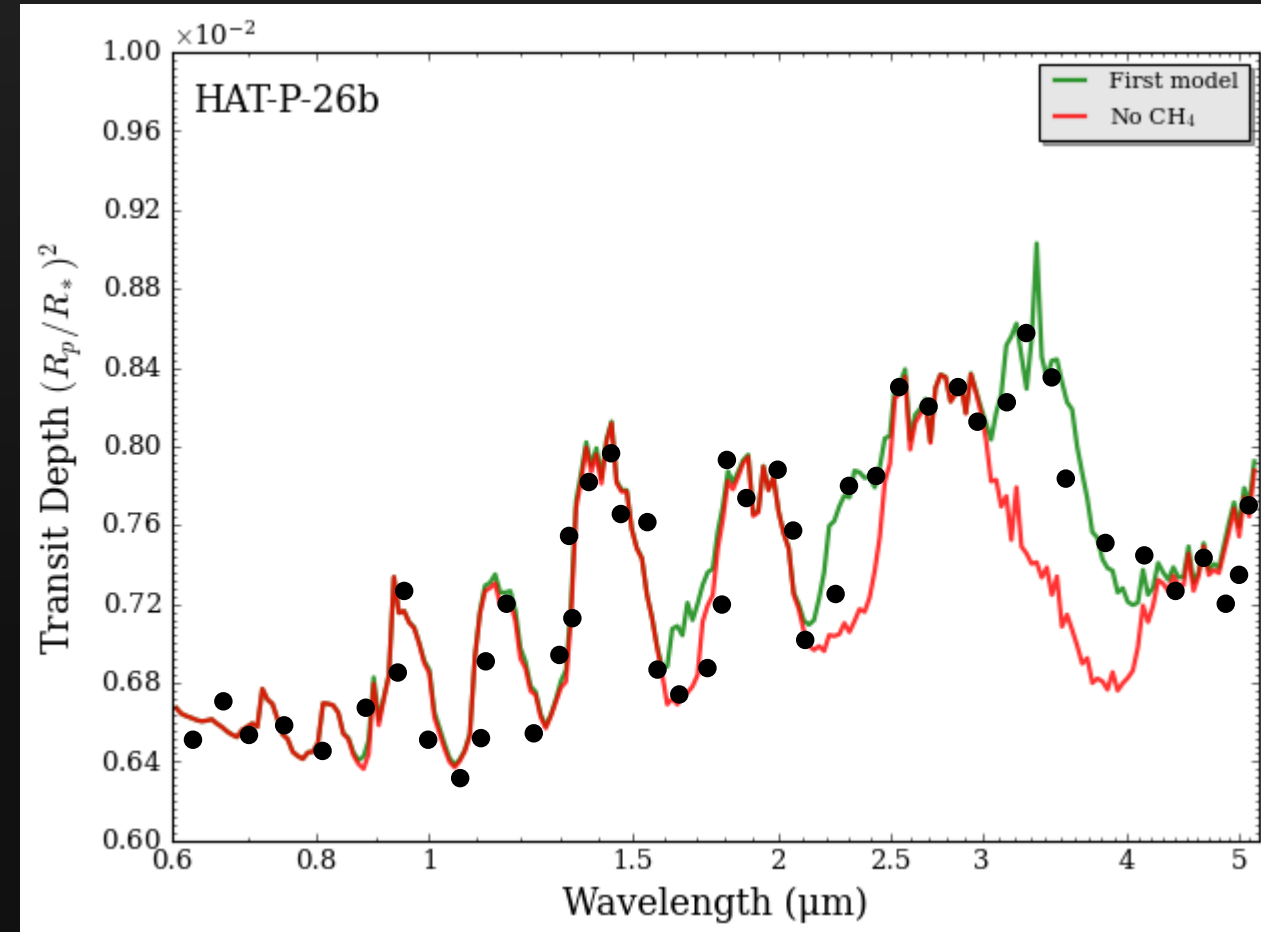
Milhares de modelos depois...

$P(\theta)$ de cada propriedade e modelo

“É 99% mais provável ter $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ do que só ter H_2O .”

≠

“A probabilidade de CH_4 existir é 99%.”



Parte II

Recuperações (*retrievals*)

Falácias de recuperações:

1. Resultados apenas **comparativos!** Não absolutos;
2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo
3. Complexidade extra, real ou não, sempre melhora os resultados

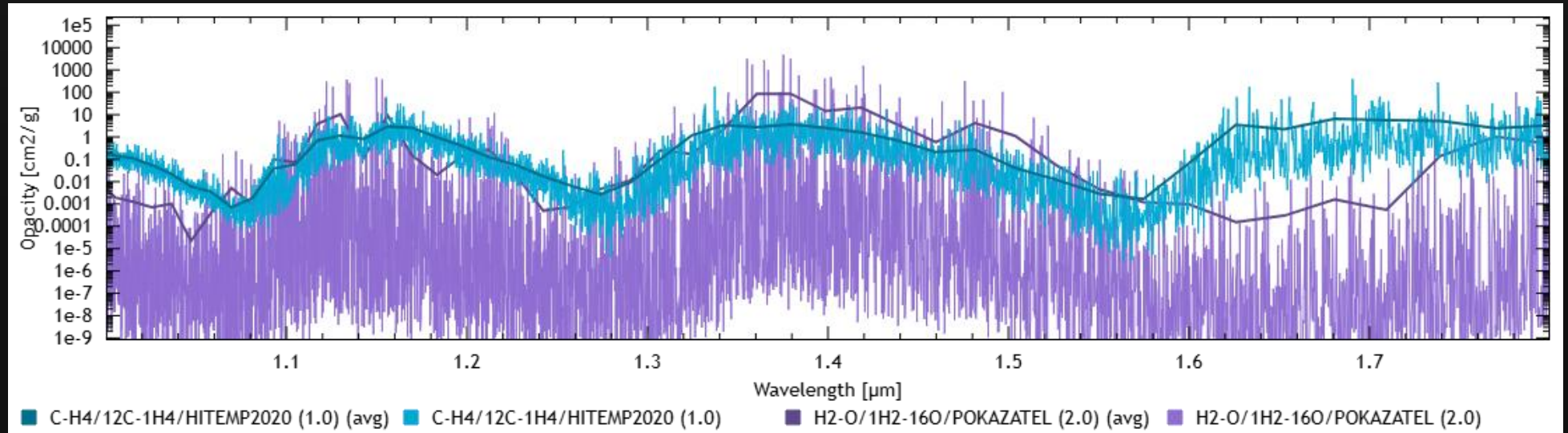
Parte II

União espacial + terrestre

Falácias de recuperações:

1. Resultados apenas **comparativos!** Não absolutos;

Alta resolução permite detecções mais certas



Parte II

União espacial + terrestre

Dados espaciais + terrestres

Brogi 2016; Pino 2018; Brogi+Line 2019;

Gibson 2020, 2022; Gandhi 2024, ...



Ruído instrumental complexo e variável

Contaminações distintas

Métodos/observáveis diferentes

PhD Parte 1

**Como juntá-los de
forma consistente?**



Parte II

União espacial + terrestre

Otimizar todos os passos:

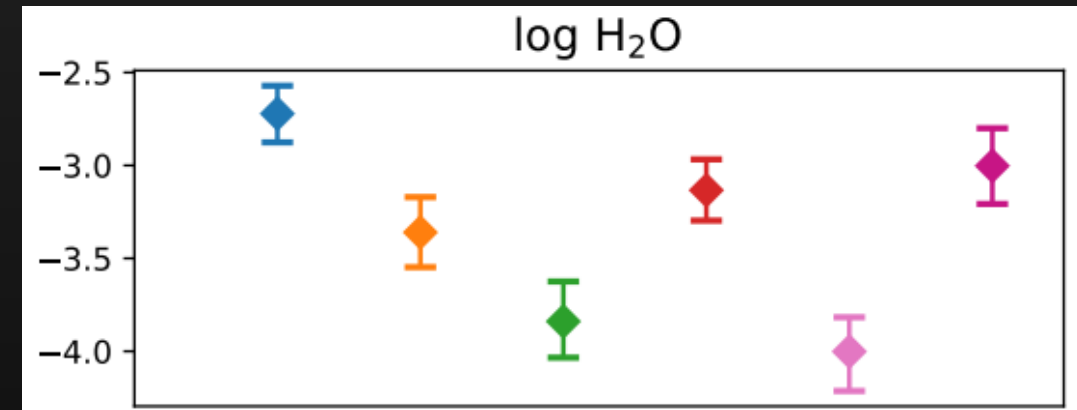
- Como remover ruído instrumental
- Como remover a estrela + atmosfera da Terra

Parte II

União espacial + terrestre

Otimizar todos os passos:

- Como remover ruído instrumental
- Como remover a estrela + atmosfera da Terra



Fonte: Roy-Perez et al. 2026

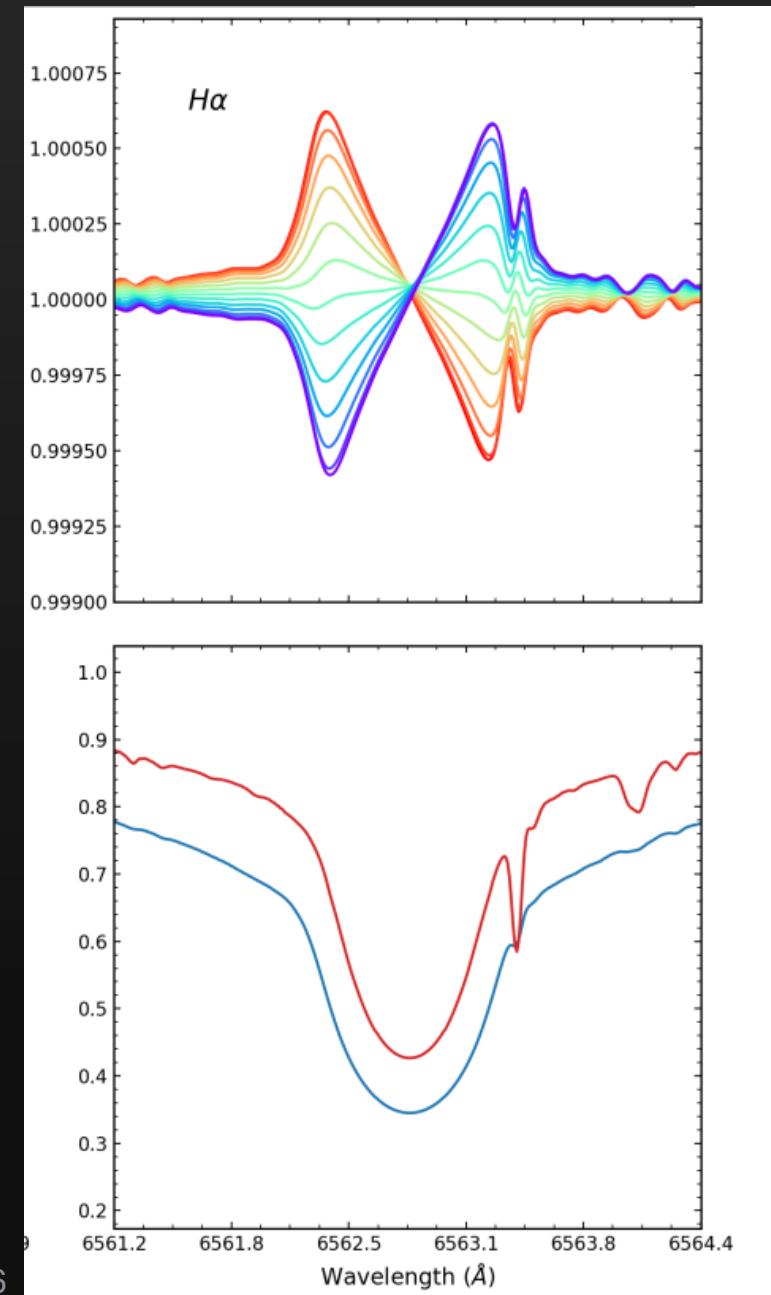
Efeito de diferentes
processamentos nos resultados

Parte II

União espacial + terrestre

Otimizar todos os passos:

- Como remover ruído instrumental
- **Como remover a estrela + atmosfera da Terra**



Fonte: Lucero et al. 2026

Parte II

União espacial + terrestre

Master-out

- Espectro médio da estrela
- Tem interpretação física
- Não capta variabilidade!

SYSREM/PCA

- Método não físico
- Minimiza variabilidade
- Risco de remover o planeta!

Qual é mais adequado para sub-Neptunos amenos?

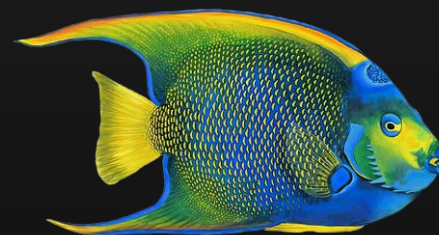
Parte II

Da teoria à prática

Falácias de recuperações:

2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo

Que animal é este



Parte II

Da teoria à prática

Falácias de recuperações:

2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo

Que animal é este





Que animal é este?

Parte II

Da teoria à prática



Que animal é este?

Multiple Choice Poll



17 votes



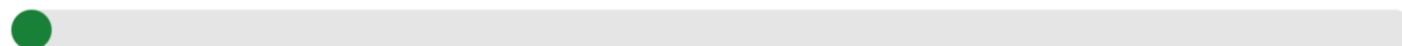
17 participants

Peixe - 14 votes



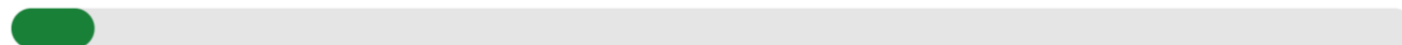
82%

Pássaro - 0 votes



0%

Kuala - 1 vote



6%

Elefante - 2 votes



12%

Parte II

Da teoria à prática

Falácias de recuperações:

2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo

Que animal é este



Parte II

Da teoria à prática

Falácias de recuperações:

2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo

Que animal é este





Que animal é este?

Parte II

Da teoria à prática



Que animal é este?

Multiple Choice Poll



16 votes



16 participants

Peixe - 0 votes



0%

Pássaro - 1 vote



6%

Kuala - 8 votes



50%

Elefante - 7 votes



44%

Parte II

Da teoria à prática

Falácias de recuperações:

2. Recuperação é apenas tão boa quanto o modelo

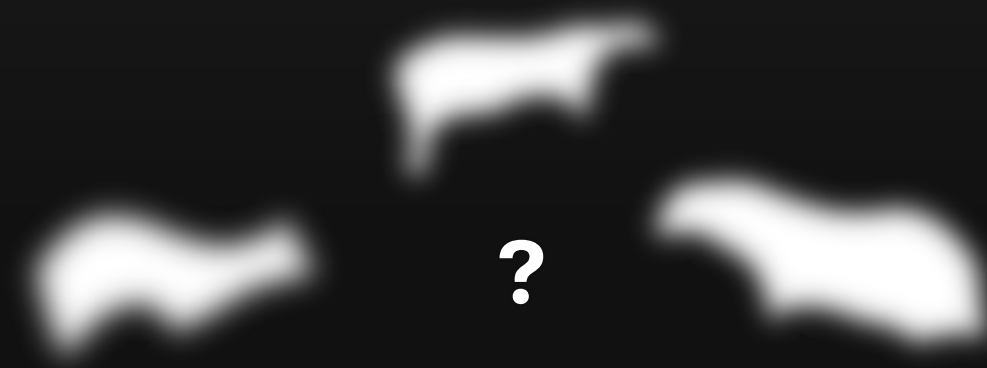
Que animal é este



Parte II

Da teoria à prática

Parâmetros degenerados: Indistinguíveis



Parte II

Da teoria à prática

Desenvolver simulações que sejam:

- Mais completas
- Suficientemente precisas para o custo computacional
- Identificar e resolver degenerescência

Custo computacional elevado...

- Estudar efeito de simplificações
- À base de GPU ao contrário de CPU

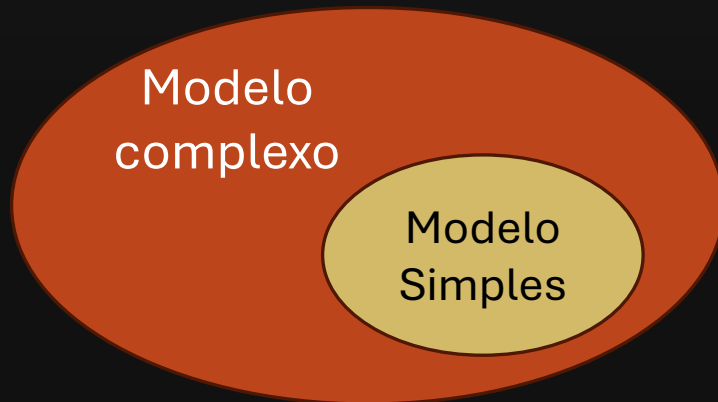
PhD Parte 2...

Parte II

Como medir resultados

Falácias de recuperações:

3. Complexidade extra, real ou não, sempre melhora os resultados



“O ganho é suficiente para justificar o parâmetro?”

Métrica para avaliar qual o modelo mais adaptado

Parte II

Como medir resultados

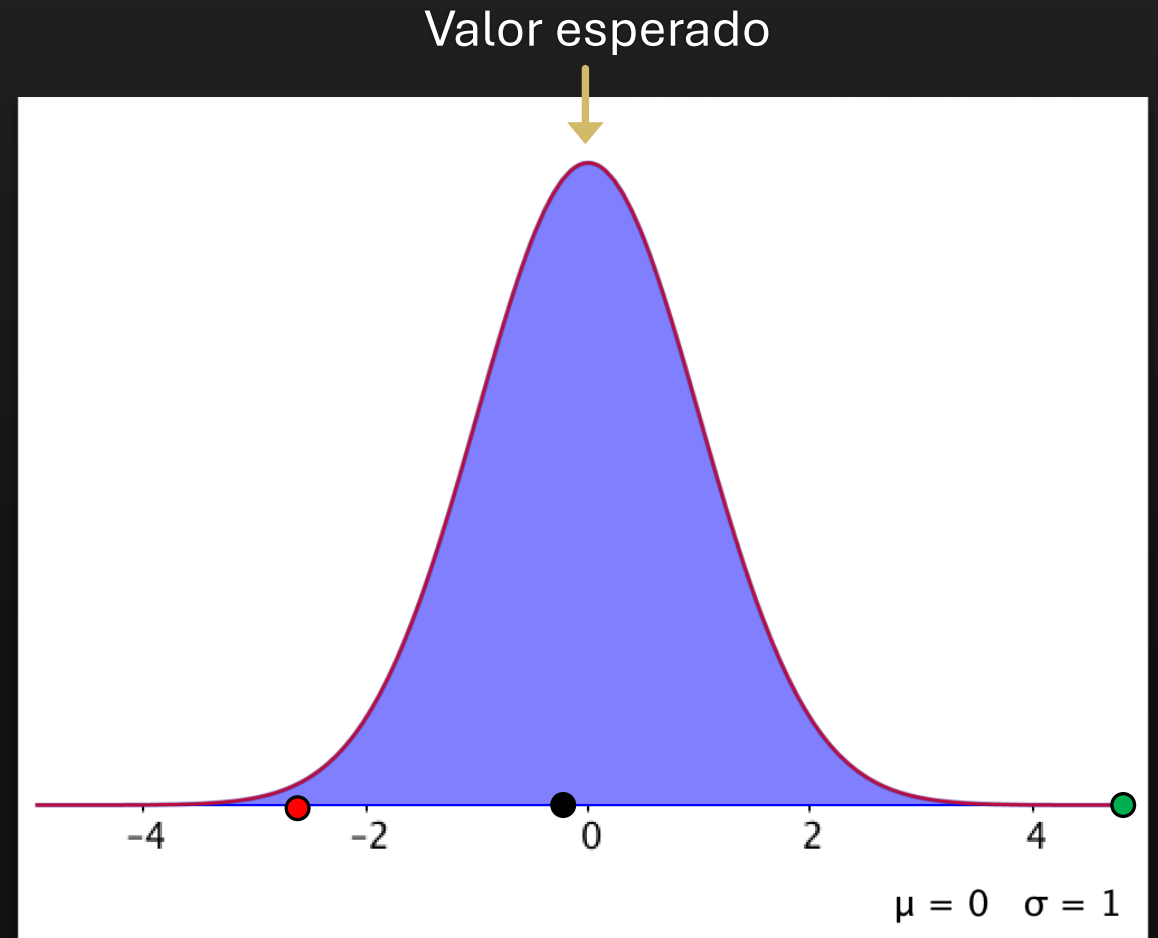
Se adicionarmos uma bioassinatura, esse modelo é preferido em 99%!

Métrica usada: σ

Exatamente onde era esperado!

Um pouco desviado, mas ainda consistente

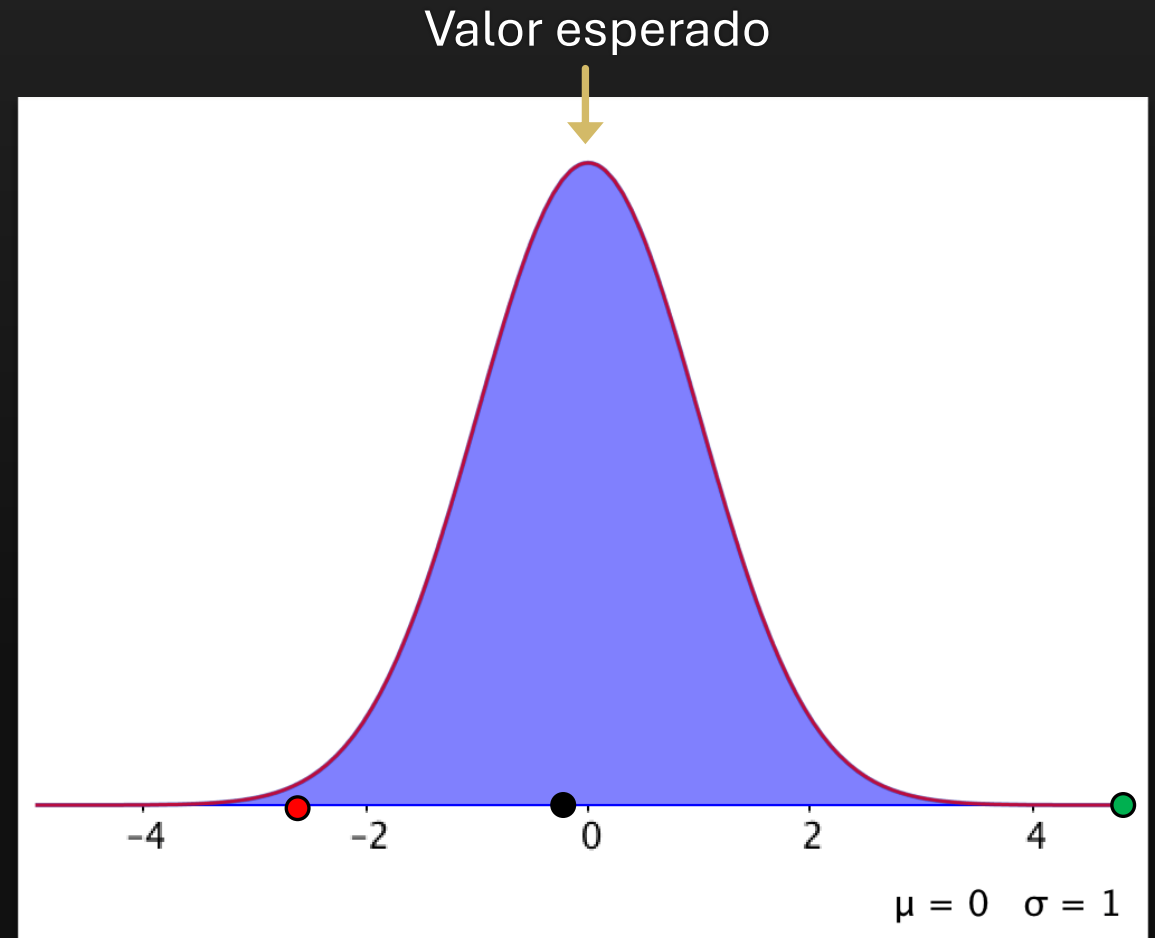
É capaz de estar a acontecer algo...



Parte II

Como medir resultados

$<3 \sigma = < 99.7 \%$	Ruído
$3 \sigma = 99.7 \%$	Sugestivo
$5 \sigma = 99.99994 \%$	Deteção!
$6 \sigma = 99.999998 \%$	Deteção extraordinária!



Parte II

Como medir resultados

Medir expectativas

- Público geral
- Comunidade científica

Parte II

Como medir resultados

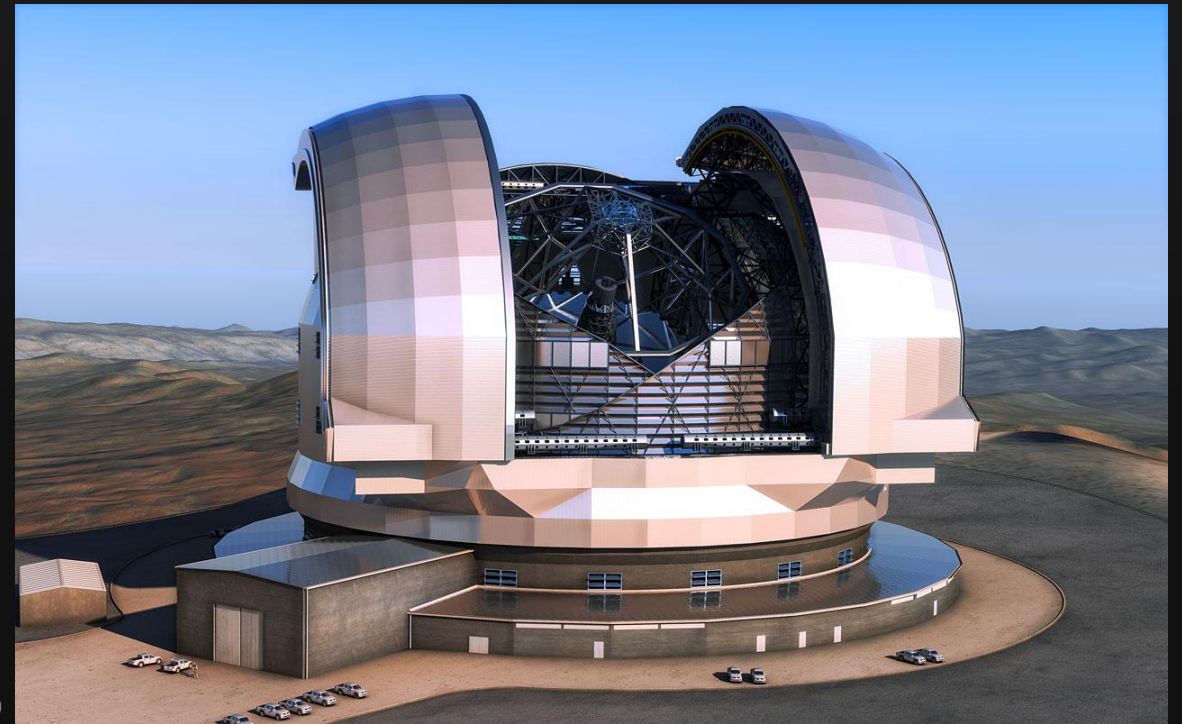
Medir expectativas

- Público geral
- **Comunidade científica**

O que será possível com novos instrumentos

ELT:

Espelho de 40 m, 5x maior que o VLT!



Fonte: ESO

Parte II

Como medir resultados



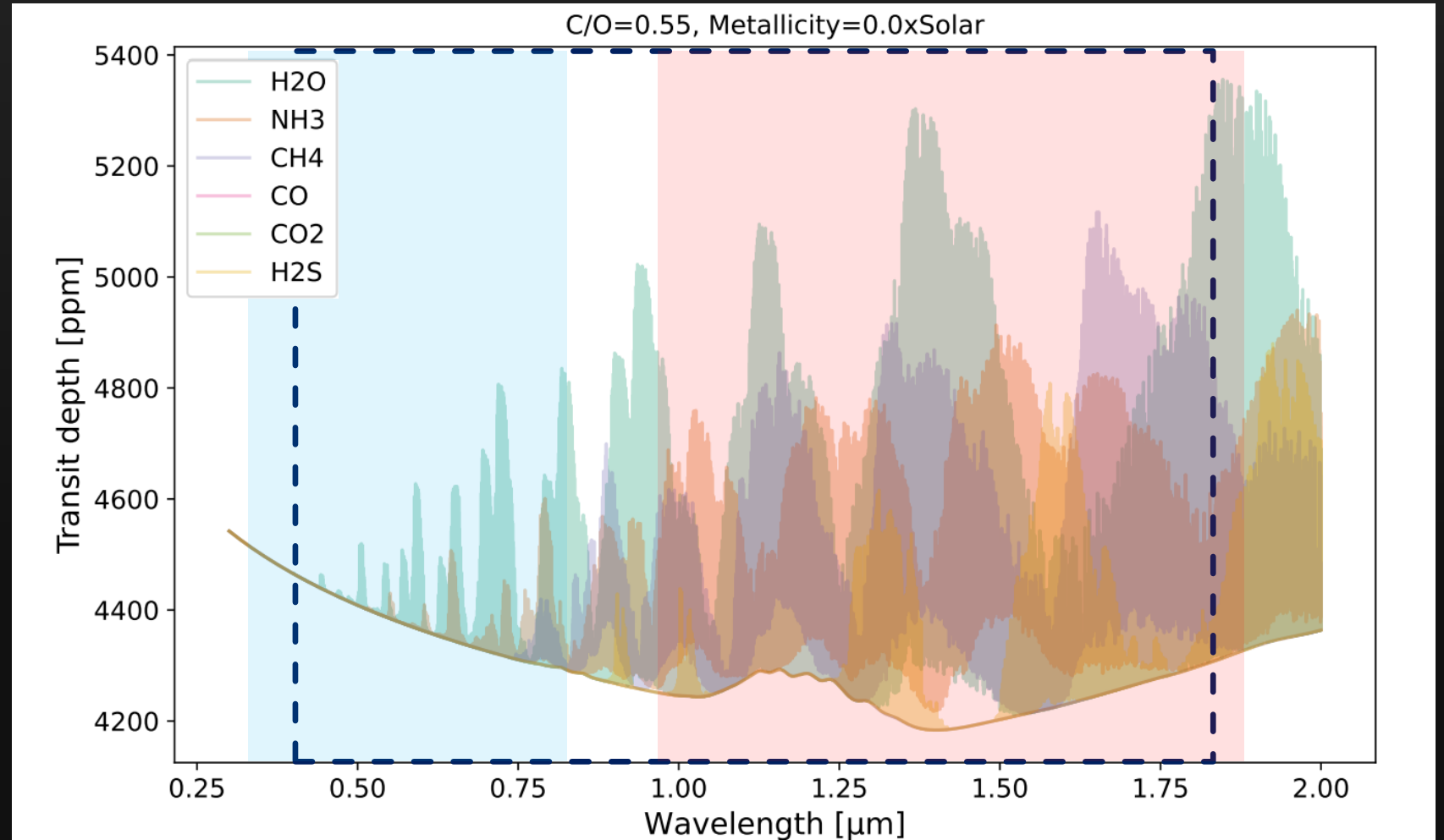
ANDES

ANDES

$R \sim 100\,000$

$0.3 - 1.8\ \mu\text{m}$

Transmissão e Refletância



Parte II

Como medir resultados



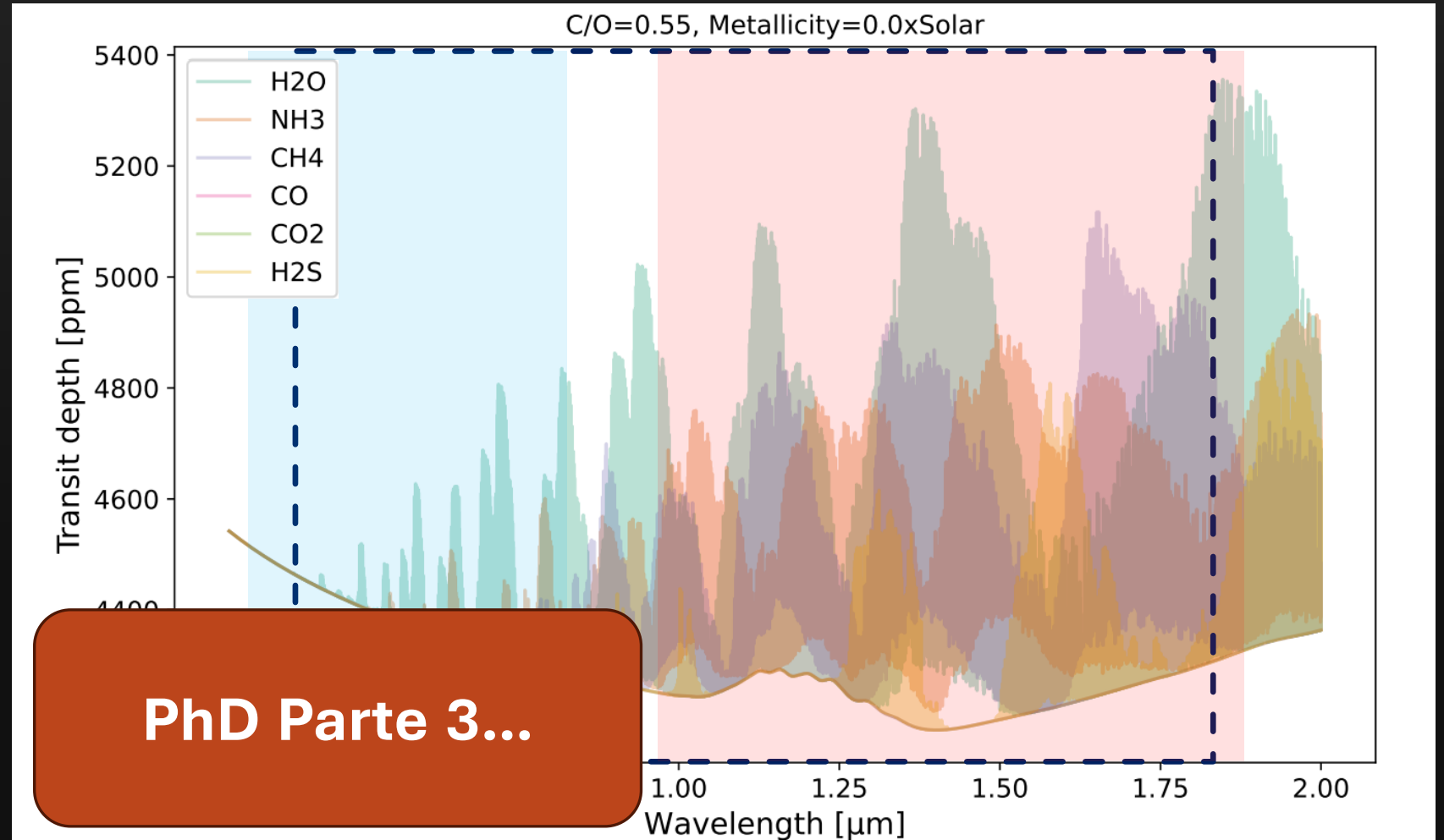
ANDES

ANDES

$R \sim 100\,000$

$0.3 - 1.8\ \mu\text{m}$

Transmissão e Refletância



Parte II

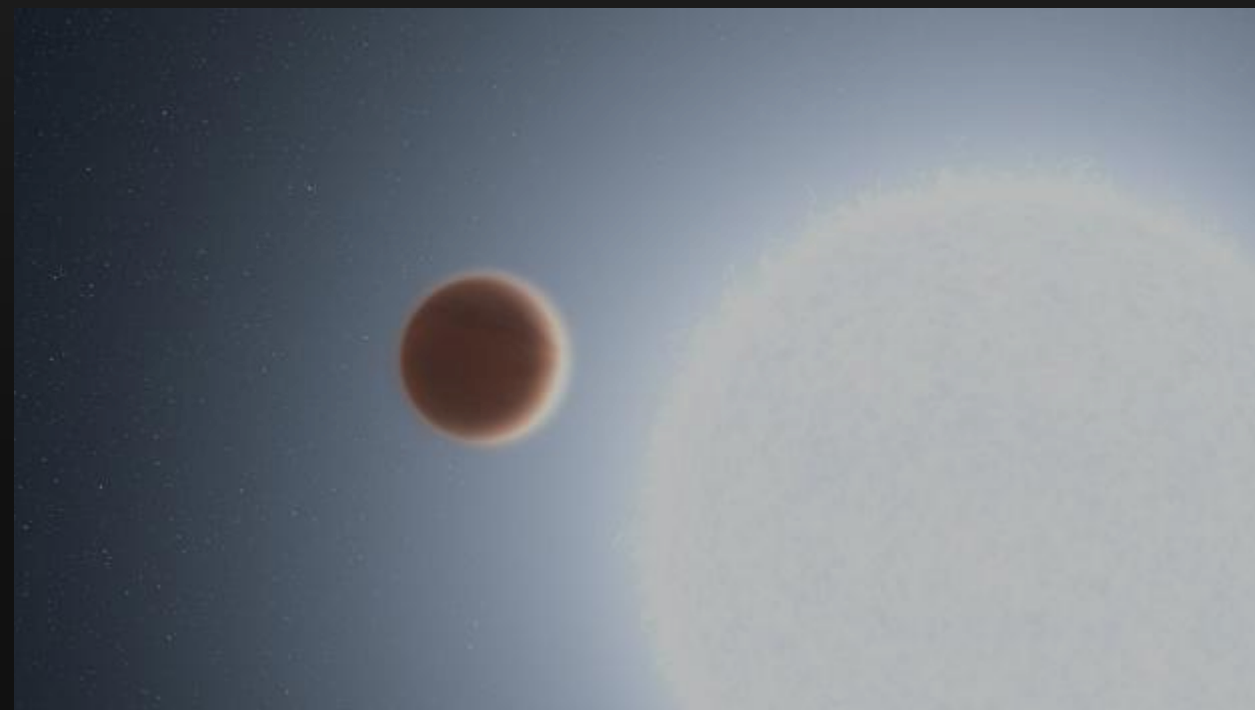
WASP-178 b

$$T_{eq} = 2470 \text{ K}$$

$$P = 3.3 \text{ d}$$

Estrela Tipo A1: $T_{eq} = 9350 \text{ K}$

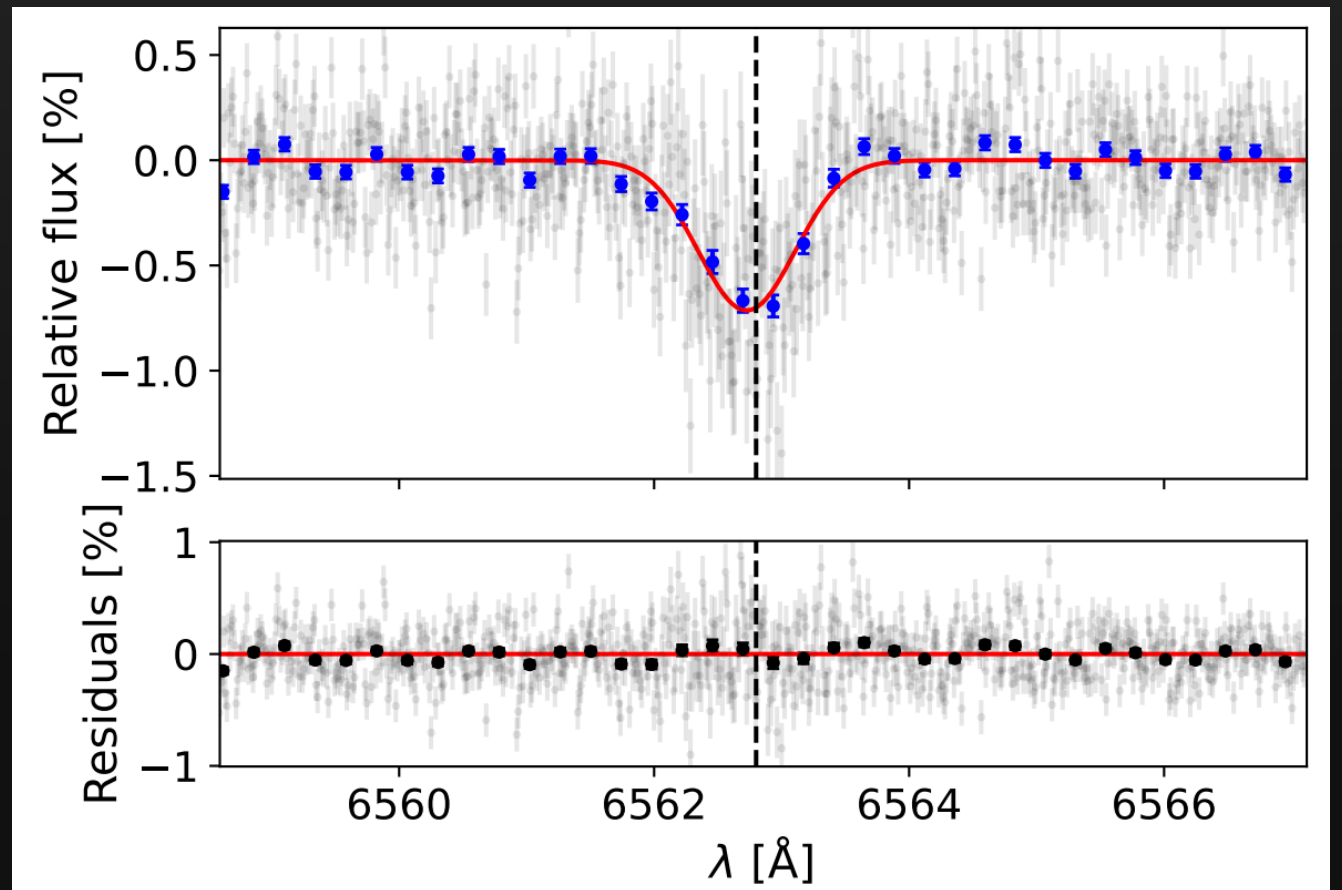
- Rotação sincronizada
- Altamente assimétrico
- Sem nuvens



Parte II

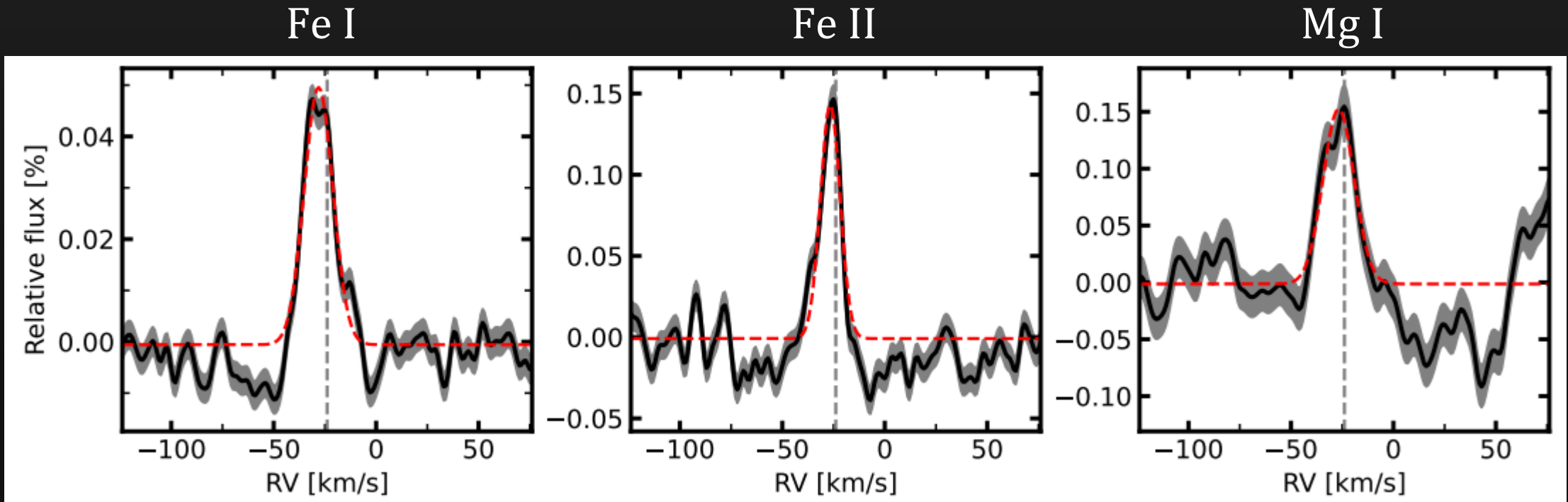
WASP-178 b

Deteção direta: Na I, H α , H β



Parte II

WASP-178 b



Parte II

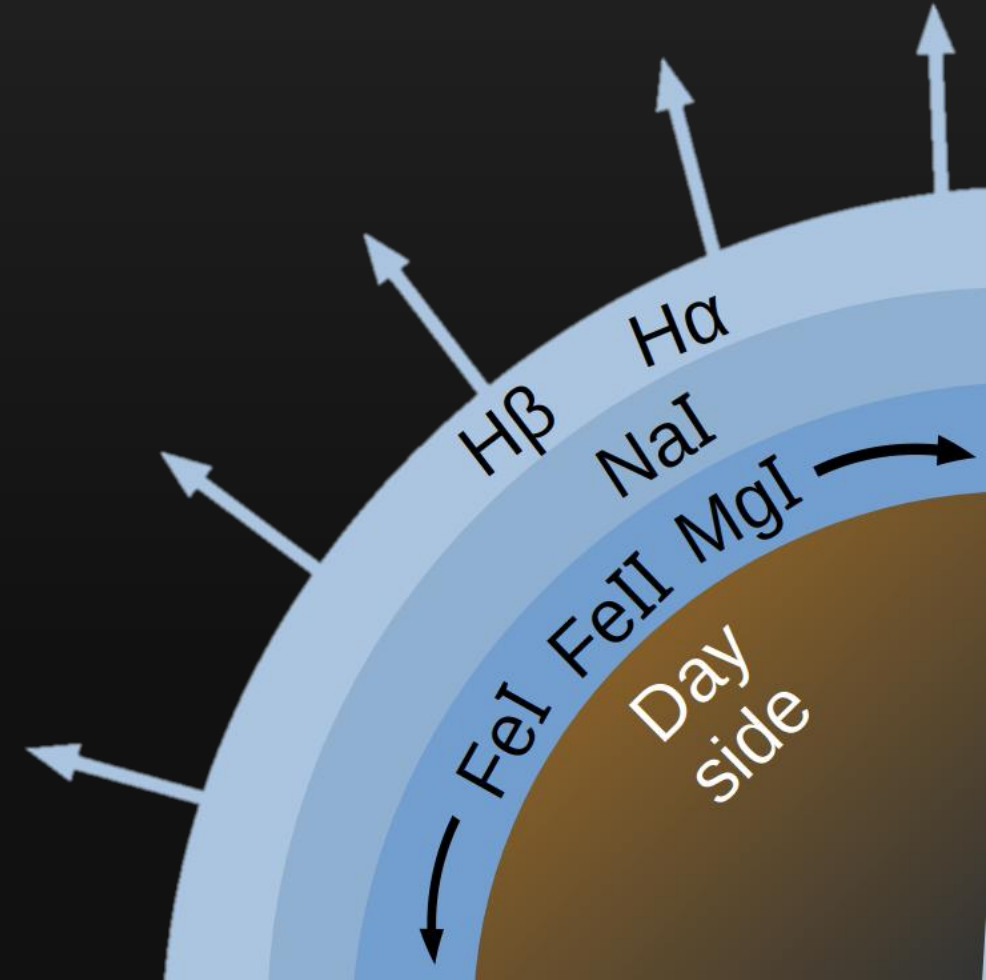
WASP-178 b

Posições e larguras: Padrões de ventos!

$H\alpha$, $H\beta$ – Linhas muito largas (~40 km/s)

$Na I$ – Relativamente estreita e centrada

$Fe I$, $Fe II$, $Mg I$ – Desviadas para o azul (~4 km/s)



Parte II

HIP 41378 f

Densidade de 0.09 g cm^{-3}

Júpiter: 1.33 g cm^{-3}

Neptuno: 1.64 g cm^{-3}

$T_{eq} = 300 \text{ K}$

$P = 542 \text{ d}$

Um planeta algodão doce – “*Super puff*”



Parte II

HIP 41378 f

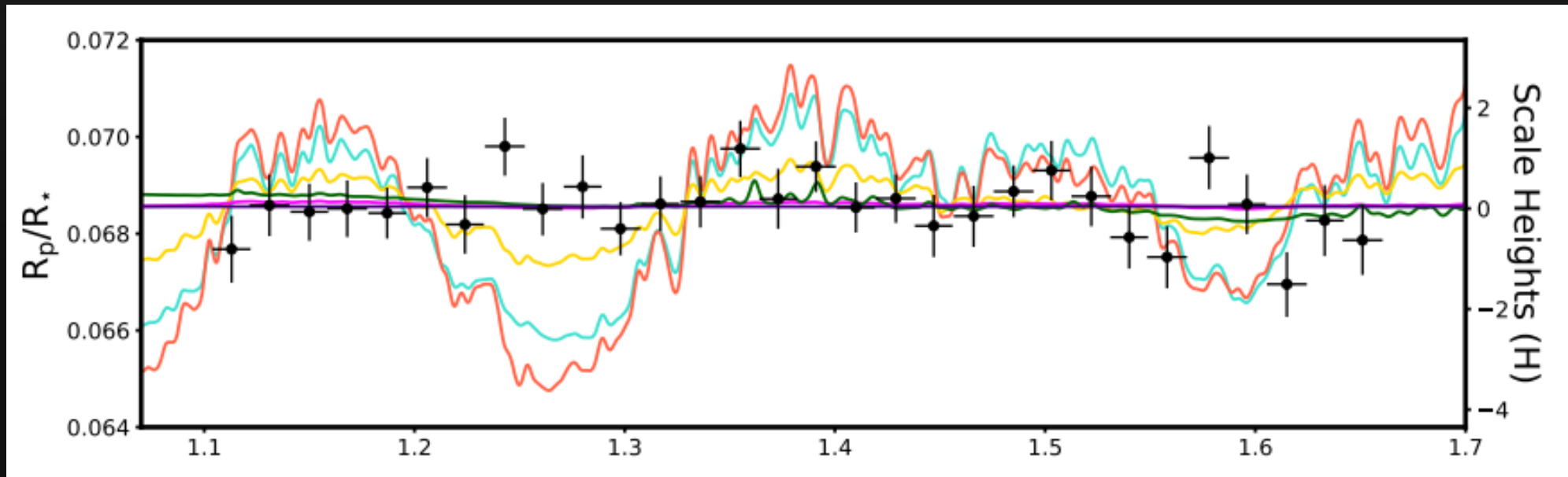
~~Sistemas jovens em formação~~

~~Planetas quentes~~

Atmosfera pesada?

Nuvens?

Anéis?



Fonte: Munazza et al. 2022

Parte II

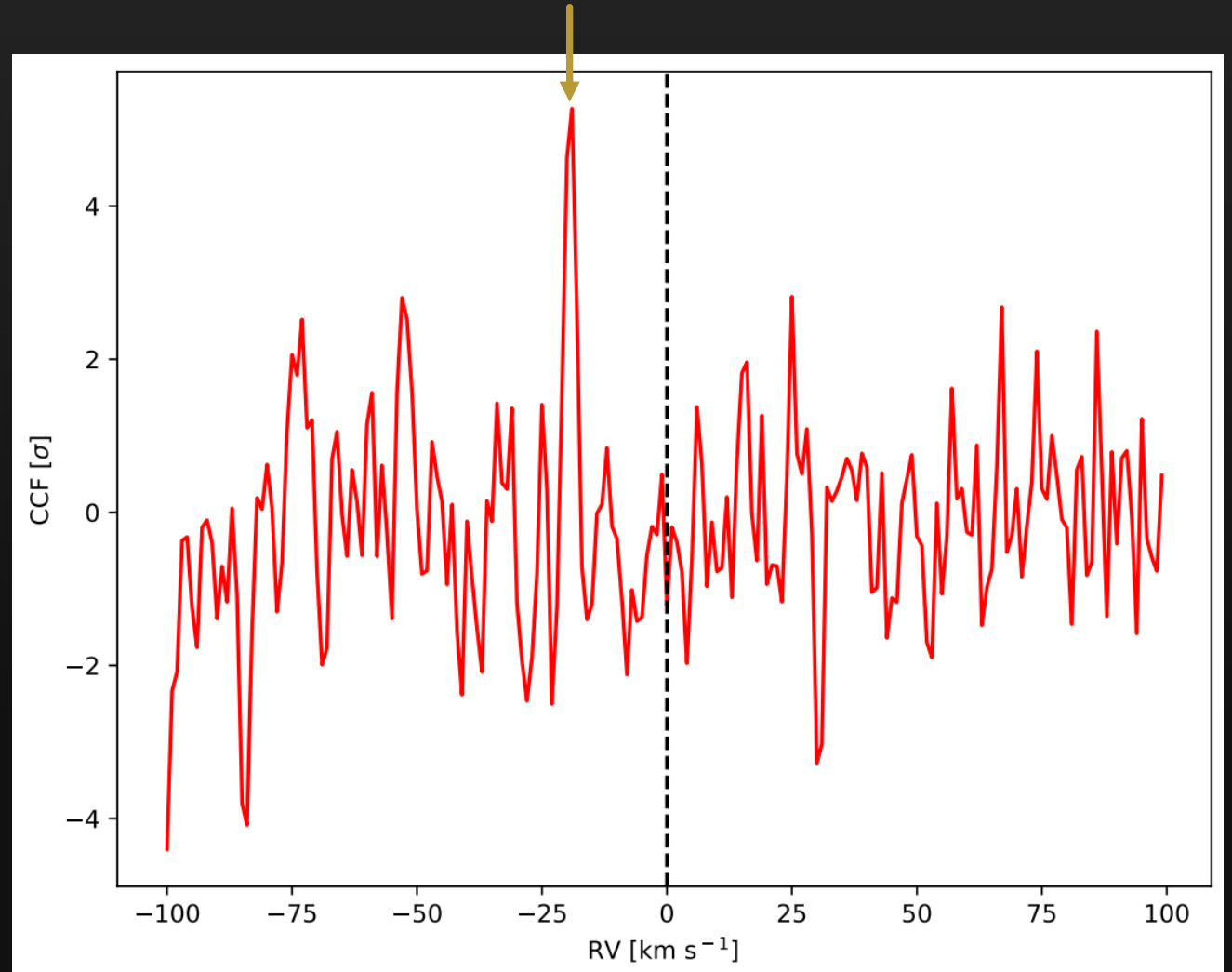
HIP 41378 f

Alta resolução com HARPS-N

Início do trânsito + fora de trânsito

Procurar H₂O e NH₃ com correlação cruzada

Sinal H₂O residual da Terra



Parte II

HIP 41378 f

Que cenários podemos descartar? – Quase nenhum...

Expectativas com **ESPRESSO** e NIRPS:

(Figura ainda não publicada)




Parte II

HIP 41378 f

Que cenários podemos descartar? - Quase nenhum...

Expectativas com ESPRESSO e **NIRPS**:

A atmosfera deve ser detetável com dados do
ESPRESSO ou NIRPS!



(Figura ainda não publicada)

Parte II

Resumo

- Observações espaciais e terrestres complementares
- Recuperações necessitam interpretação cuidada
- **O meu trabalho**
 - Juntar dados E+T de sub-Neptunos em recuperações
 - Previsões de instrumentos futuros
 - WASP-178 b: Ventos metálicos
 - HIP 41378 f, casado ou inchado?