

# F7514 Exoplanety

## 9-Vlastnosti exoplanet a jejich atmosféry

Marek Skarka

# Vlastnosti exoplanet

Metoda tranzitu => poloměr planety  
Metoda radiálních rychlostí => hmotnost



Hustota, chemické složení u tranzitujících  
exoplanet

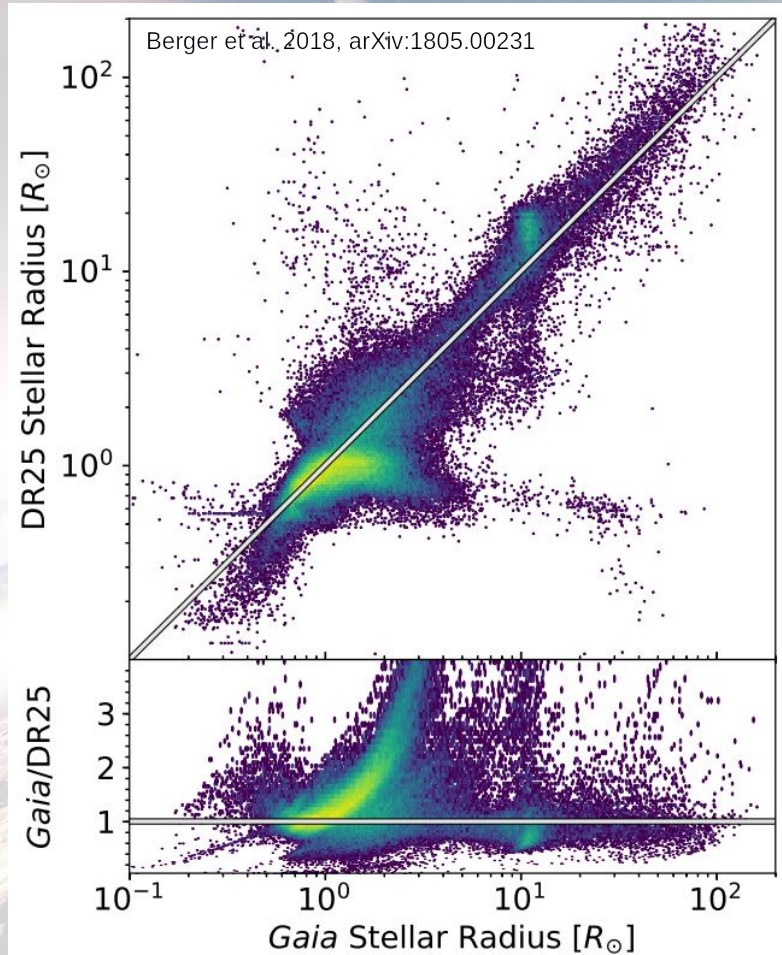
# Vlastnosti exoplanet

Metoda tranzitu => poloměr planety  
Metoda radiálních rychlostí => hmotnost



Hustota, chemické složení u tranzitujících  
exoplanet

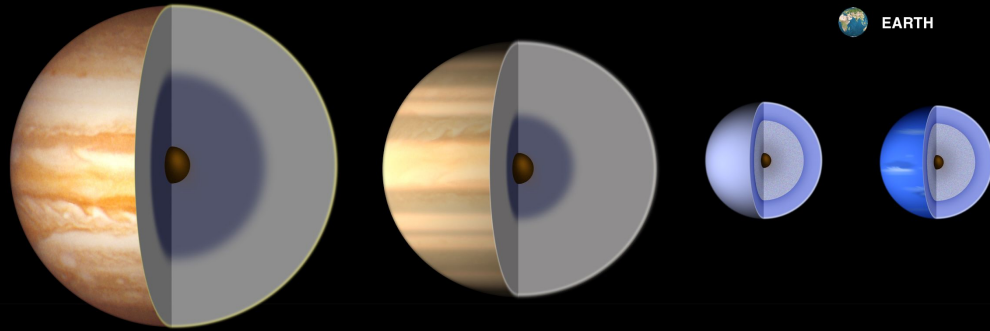
Je potřeba dobře znát vlastnosti hvězdy



GAIA DR2  
Vs  
KIC DR25



# Sluneční soustava



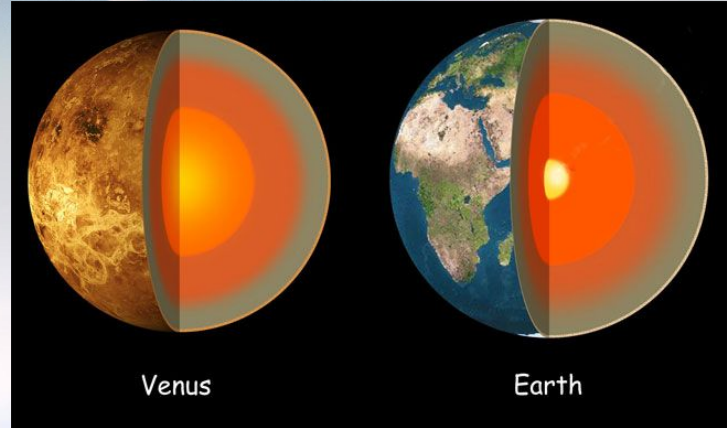
JUPITER

SATURN

URANUS

NEPTUNE

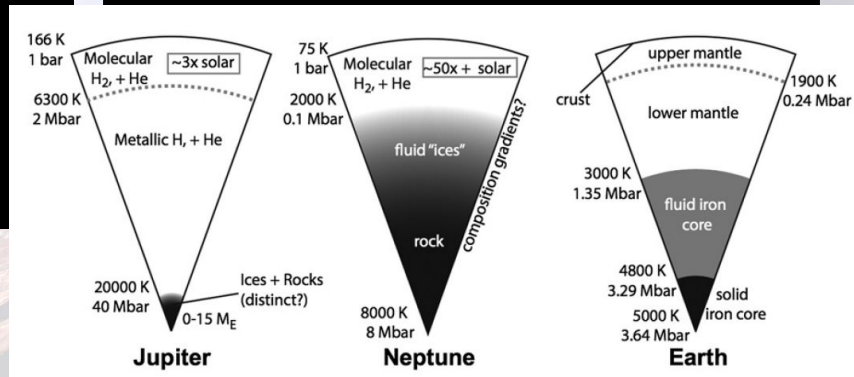
- Molecular hydrogen
- Hydrogen, helium, methane gas
- Metallic hydrogen
- Mantle (water, ammonia, methane ices)
- Core (rock, ice)



Venus

Earth

Kamenné jádro velikosti terestrických planet  
+ obal z lehčích sloučenin a plynů (H, He, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>)



Jupiter

Neptune

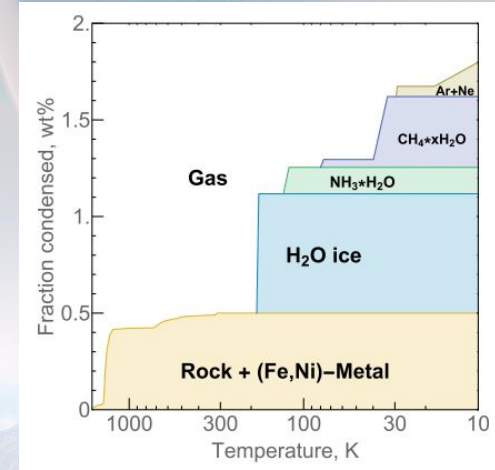
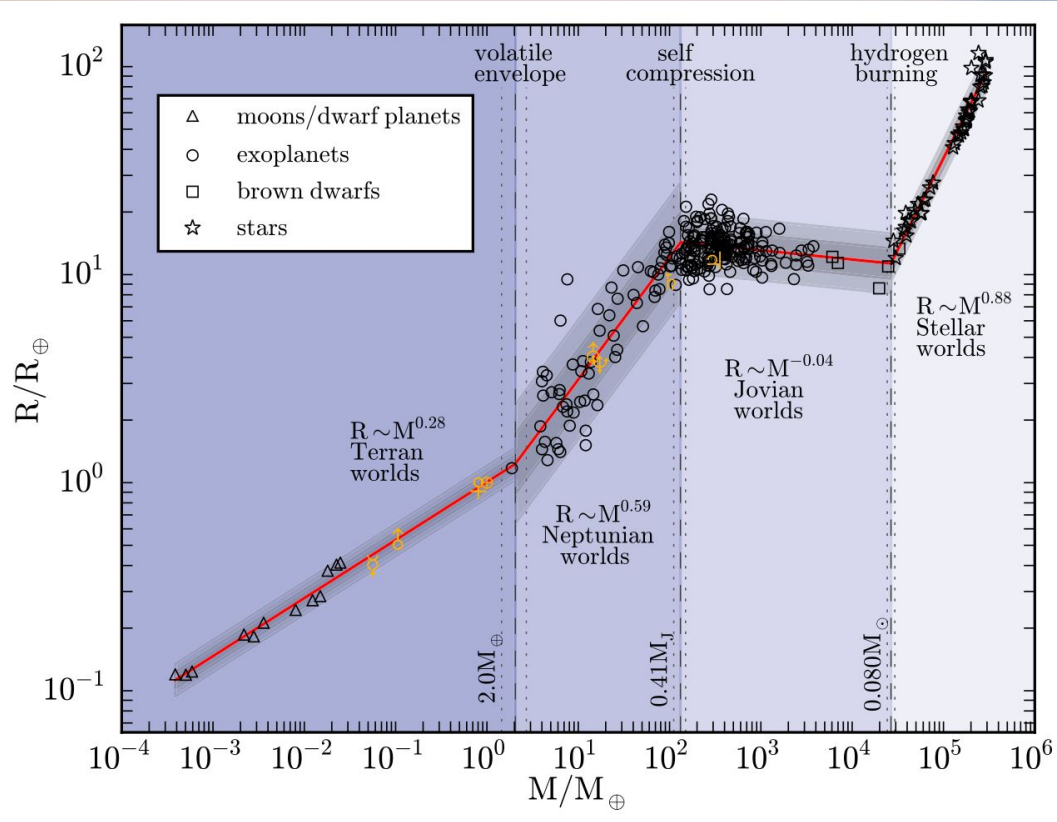
Earth

Jádro z prvků skupiny železa (Fe, Ni, Mn)  
+ obal z těžších sloučenin (Si, Mg)

Kromě Země se vždy jedná o teoretické modely



# Vlastnosti exoplanet



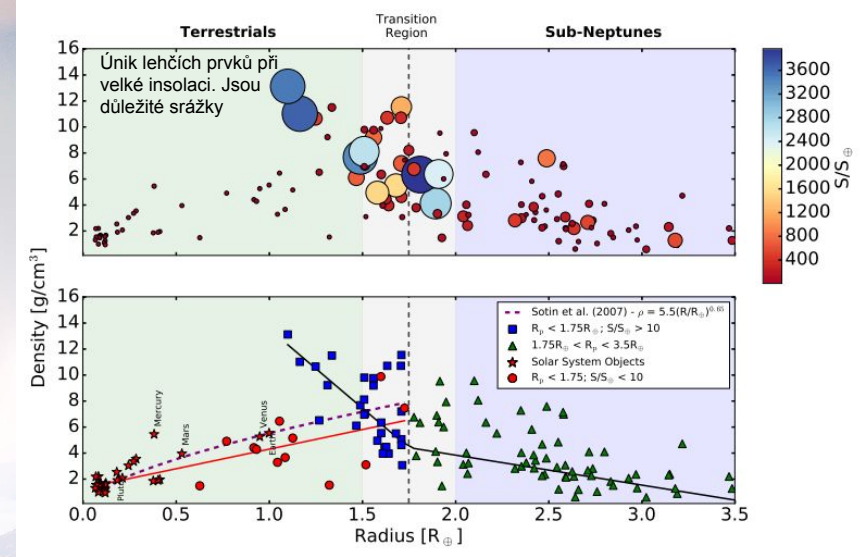
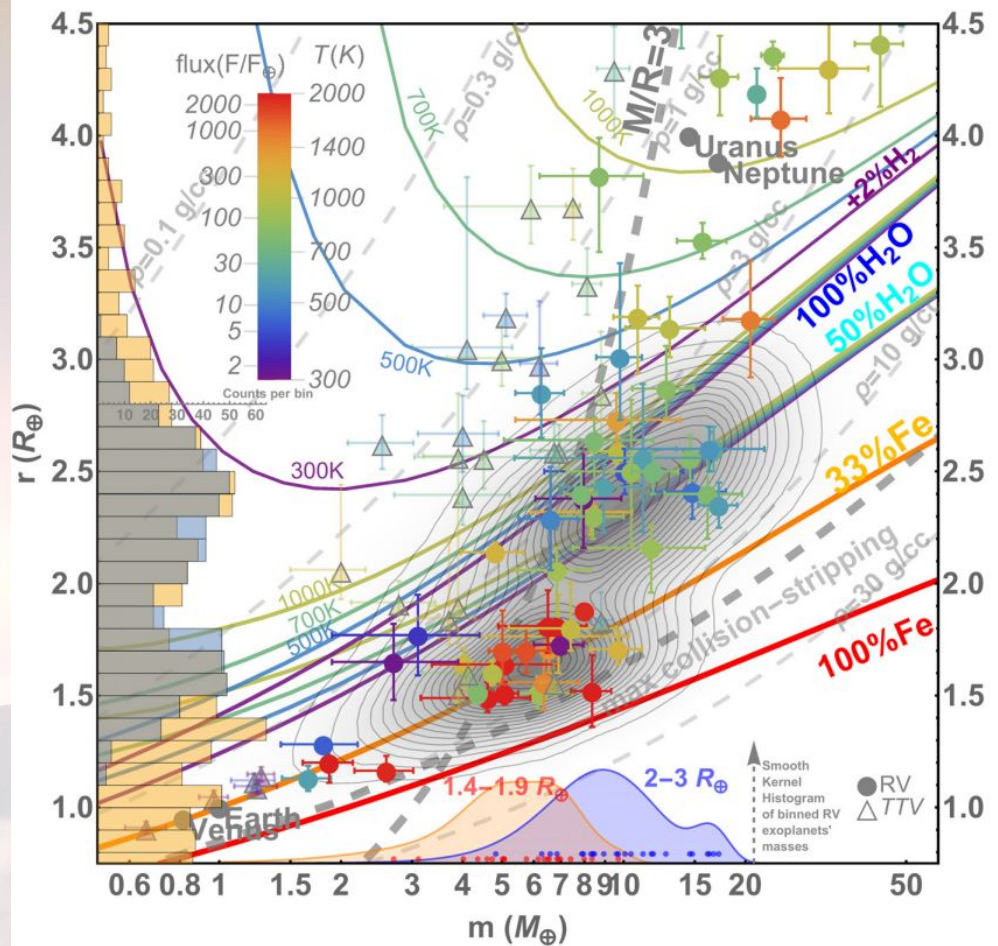
- Většina známých exoplanet mají  $R_p < 4 R_Z$
- Složení a struktura vychází z ze složení a podmínek v zárodečném disku

1. Kamenné planety ( $R_p < 2 R_Z$ , Mg, Si, Fe, Ni)
2. Vodní světy (2-4  $R_Z$ , až ½ vodního ledu)
3. Přečtové planety (4-10  $R_Z$ , velký obsah vody + plynné obálky)
4. Plynní obři ( $R_p > 10 R_Z$ , dominuje H a He)

Chen&Kipping 2017, ApJ, 834, 17

<https://web.cfa.harvard.edu/~lzeng/planetmodels.html>

# Vlastnosti exoplanet

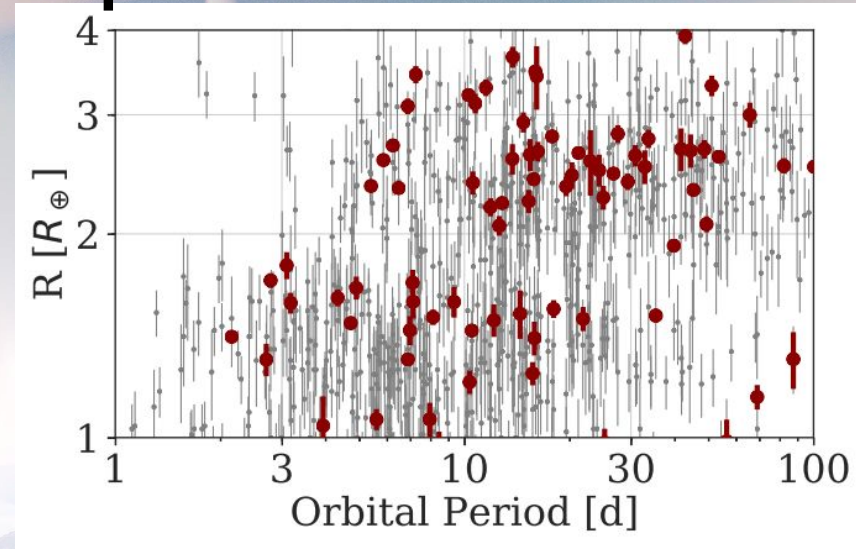
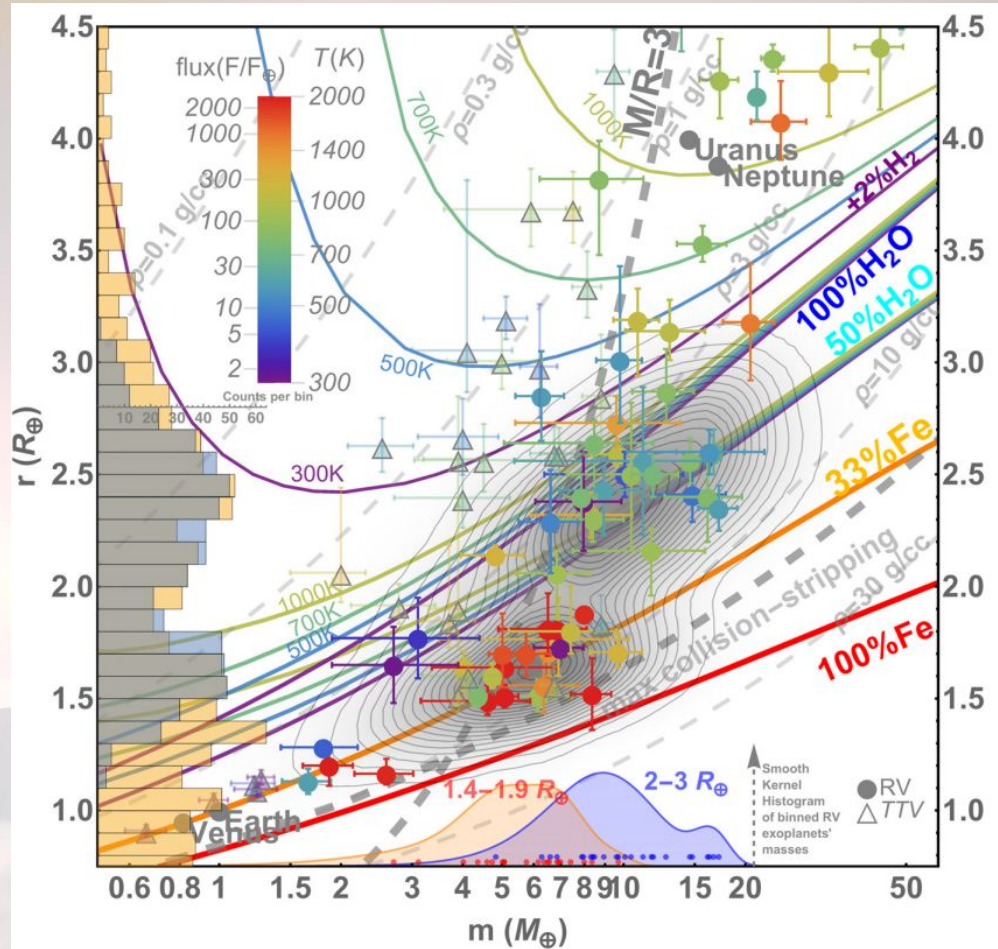


Swain et al. 2019, ApJ, 881, 117

Atmosféry mohou být odfouknuty zářením hvězdy - vznik sub-Neptunů?  
Gravitace vs. fotoevaporace



# Vlastnosti exoplanet

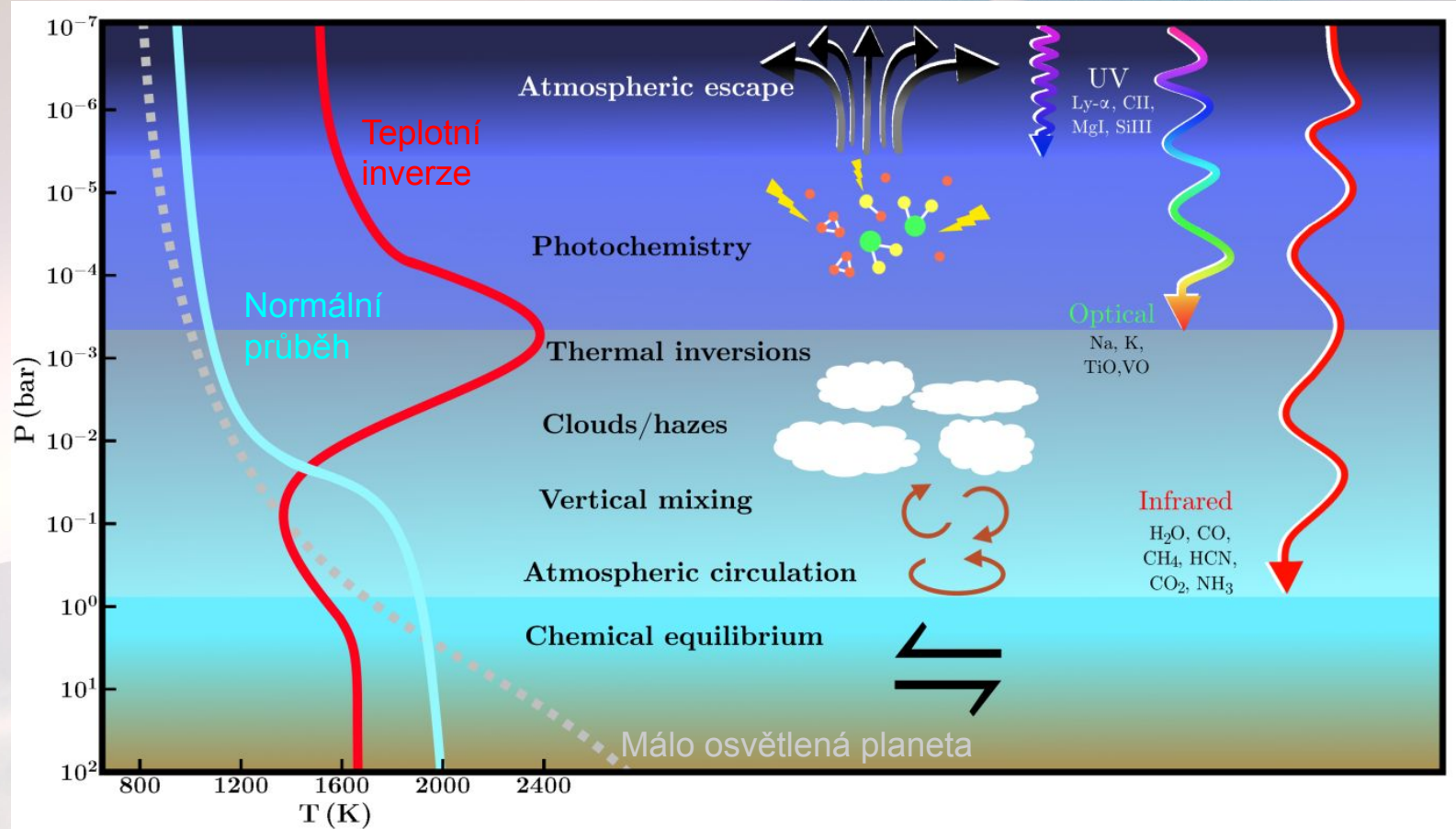


van Eylen et al. 2018, MNRAS, 479, 4786

Atmosféry mohou být odfouknuty zářením hvězdy - vznik sub-Neptunů?  
Gravitace vs. fotoevaporace

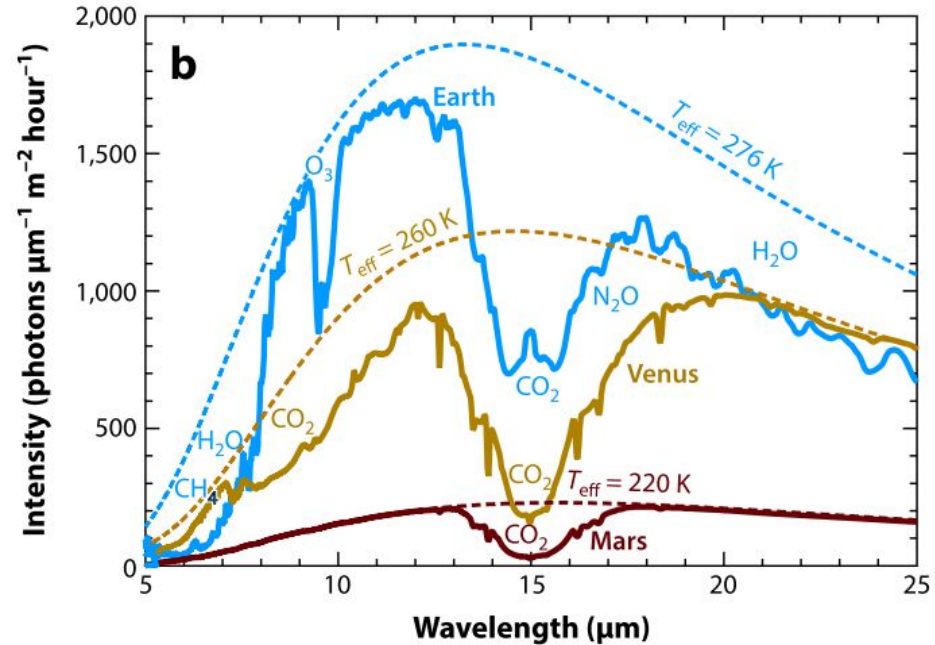
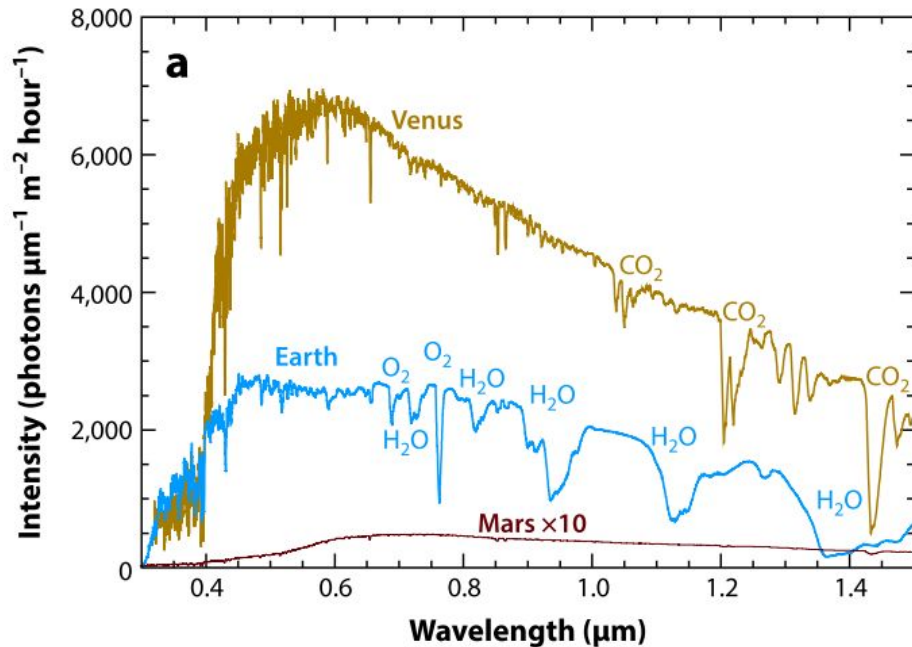


# Atmosféry exoplanet



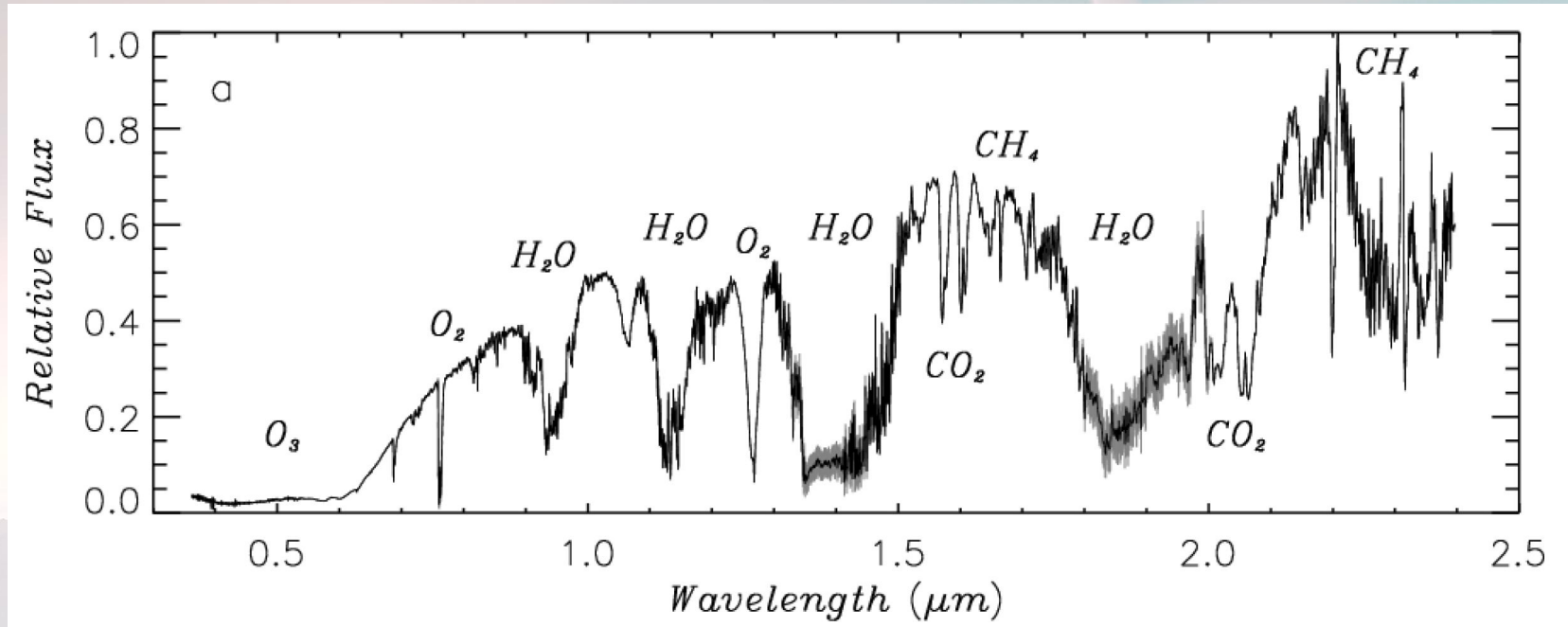
# Atmosféry exoplanet

Spektra Terestrických planet Sluneční soustavy



# Atmosféry exoplanet

Transmisní spektrum Země - během zatmění Měsíce

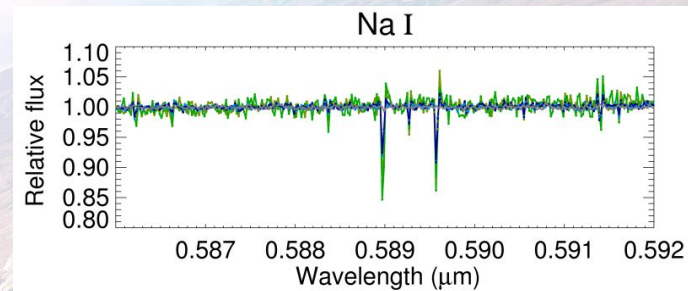
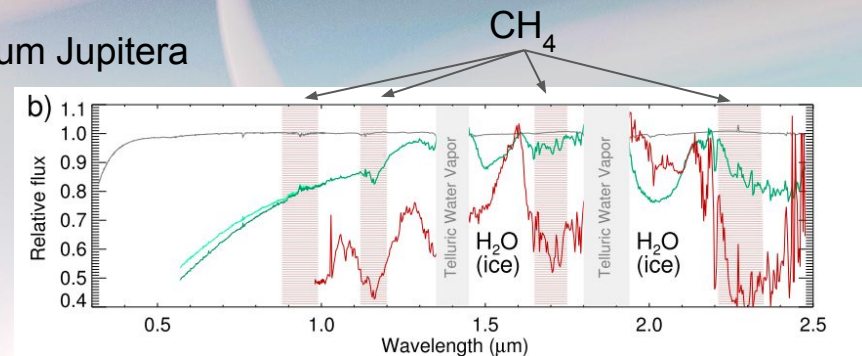
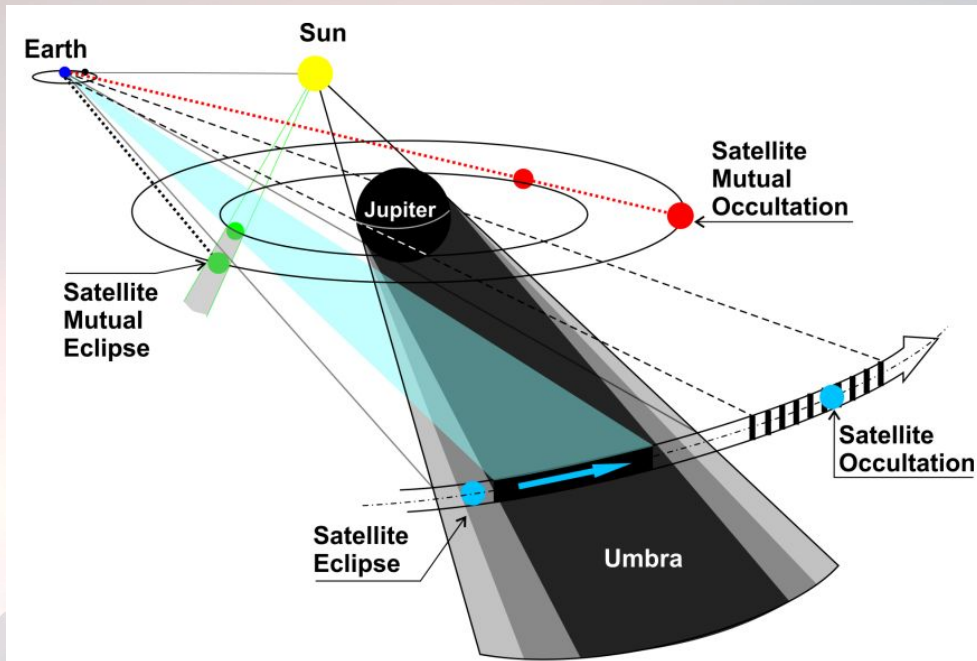


Palle et al. 2009, Nature, 459, 814, WHT+NOT



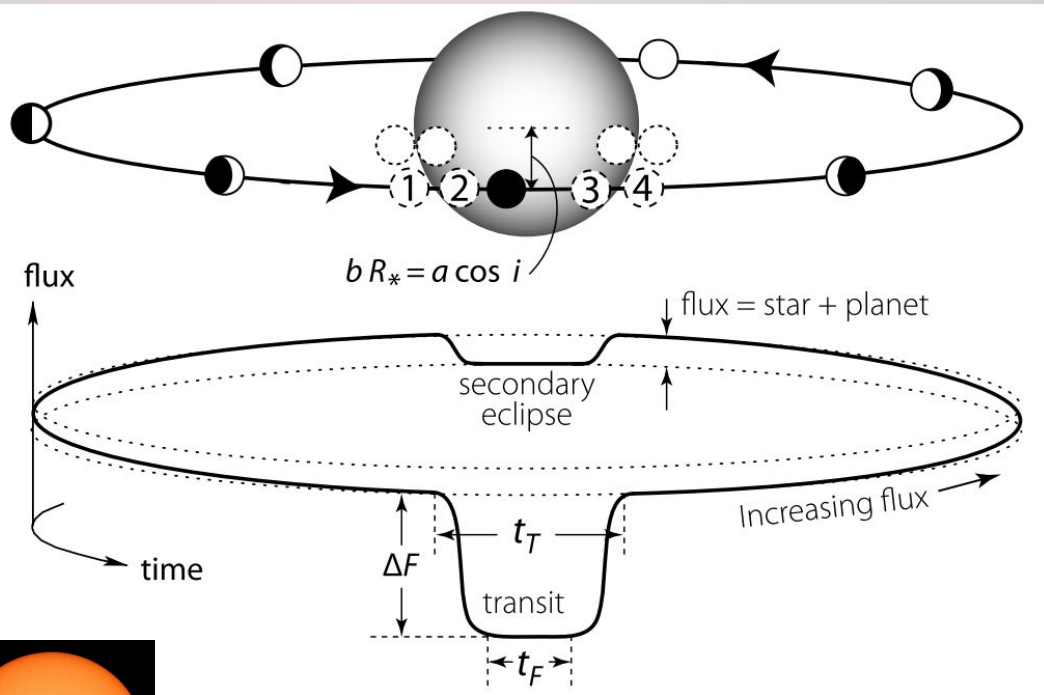
# Atmosféry exoplanet

Transmisní spektrum Jupitera



# Atmosféry exoplanet

Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě



Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety

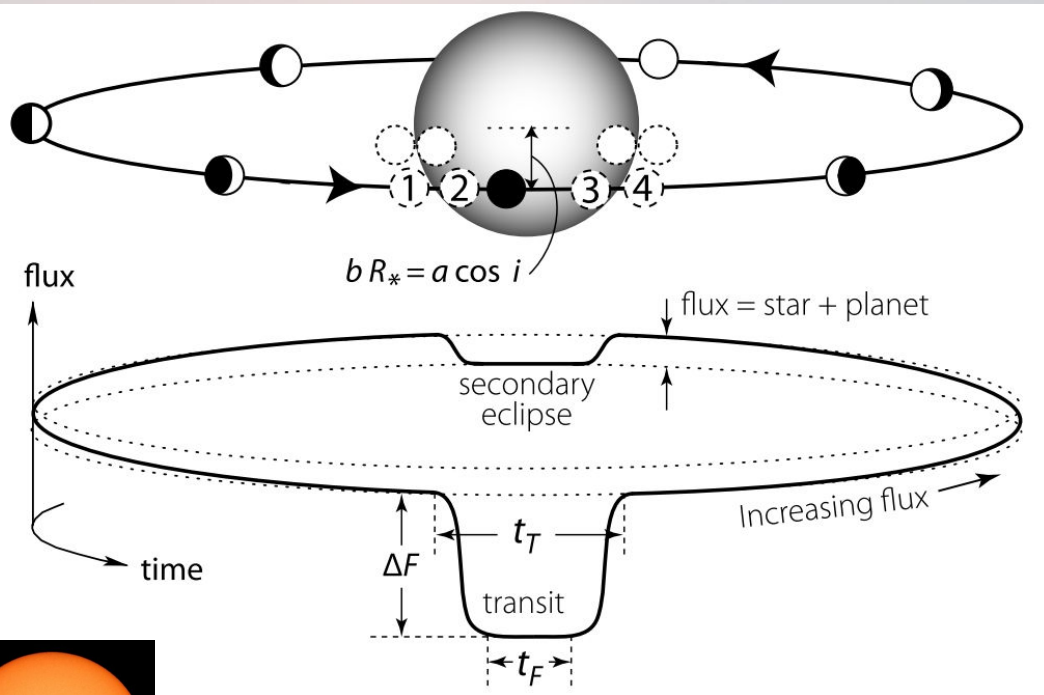


Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Je důležité dobře znát vyzařovací charakteristiky mateřské hvězdy

# Atmosféry exoplanet

Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě



Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

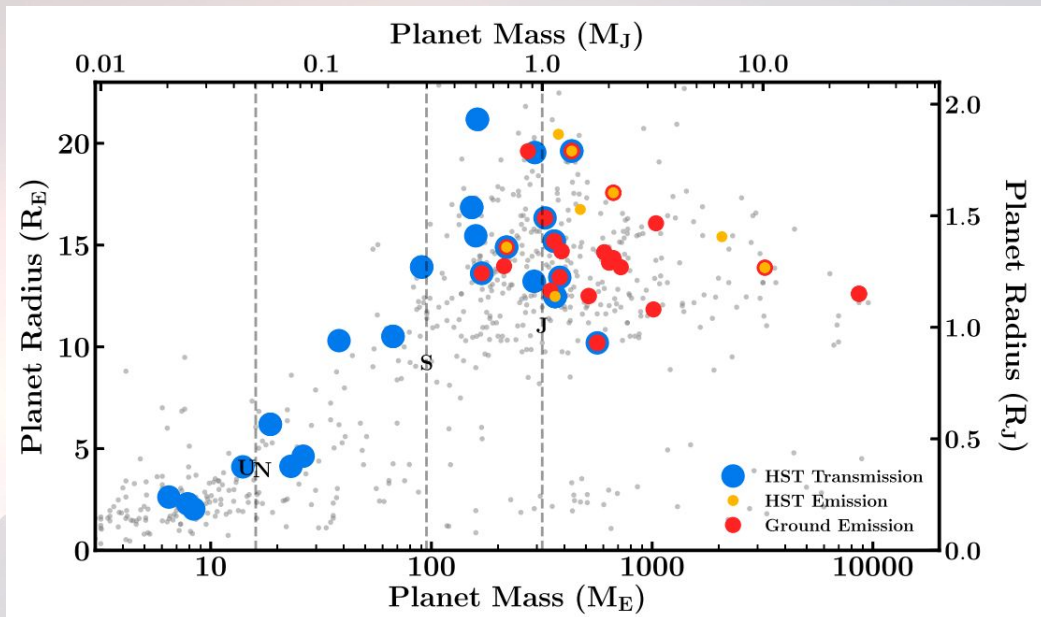
Atmosféry můžeme zkoumat:

1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)
5. Přímé pozorování



# Atmosféry exoplanet

Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě



Madhusudhan 2019, ARA&A, 57, 617

Atmosféry jsme zatím schopni měřit pouze u větších planet

Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Atmosféry můžeme zkoumat:

1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)
5. Přímé pozorování

# Atmosféry exoplanet

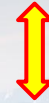
Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě

Termální emise:

$$\frac{F_P}{F_*} = \frac{B(\lambda, T_{P,eq})}{B(\lambda, T_*)} \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Planeta chladnější než hvězda => poměr toků výraznější v infračervené oblasti (např. HD 209458:  $F_P/F_* \sim 50$  ppm na  $1 \mu\text{m}$  vs  $1000$  ppm na  $4.5 \mu\text{m}$ )

Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Atmosféry můžeme zkoumat:

1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)
5. Přímé pozorování

# Atmosféry exoplanet

Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě

Termální emise:

$$\frac{F_P}{F_*} = \frac{B(\lambda, T_{P,eq})}{B(\lambda, T_*)} \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Planeta chladnější než hvězda => poměr toků výraznější v infračervené oblasti (např. HD 209458:  $F_P/F_*$  ~50 ppm na 1  $\mu\text{m}$  vs 1000 ppm na 4.5  $\mu\text{m}$ )

Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Odražené světlo:

Dominuje ve vizuální oblasti

$$F_{\text{reflected}} = A_g \left(\frac{R_P}{a}\right)^2 \Phi(\alpha)$$

Geometrické albedo = poměr přijatého a odraženého světla, závislé na vlnové délce. U horkých Jupiterů  $A_g < \sim 0.5$ , typicky ale mnohem nižší

Fázová funkce definuje jak velká část kotoučku planety je nasvětlená

Atmosféry můžeme zkoumat:

1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)
5. Přímé pozorování



# Atmosféry exoplanet

Výzkum chemického složení a teplotní struktury atmosféry nám může říct něco o historii formování, klimatu či habitabilitě

Termální emise:

$$\frac{F_P}{F_*} = \frac{B(\lambda, T_{P,eq})}{B(\lambda, T_*)} \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

Planeta chladnější než hvězda => poměr toků výrazněji v infračervené oblasti (např. HD 209458:  $F_P/F_*$  ~50 ppm na 1  $\mu\text{m}$  vs 1000 ppm na 4.5  $\mu\text{m}$ )

Složení atmosféry a její struktura definují odrazivost a vlastní tepelné záření planety



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Odražené světlo:

Dominuje ve vizuální oblasti

$$F_{\text{reflected}} = A_g \left(\frac{R_P}{a}\right)^2 \Phi(\alpha)$$

Geometrické albedo = poměr přijatého a odraženého světla, závislé na vlnové délce. U horkých Jupiterů  $A_g < \sim 0.5$ , typicky ale mnohem nižší

Fázová funkce definuje jak velká část kotoučku planety je nasvětlená

Rozklíčovat příspěvky vlastního záření a odraženého světla může být velmi složité => nejistota v odhadu parametrů atmosféry

Atmosféry můžeme zkoumat:

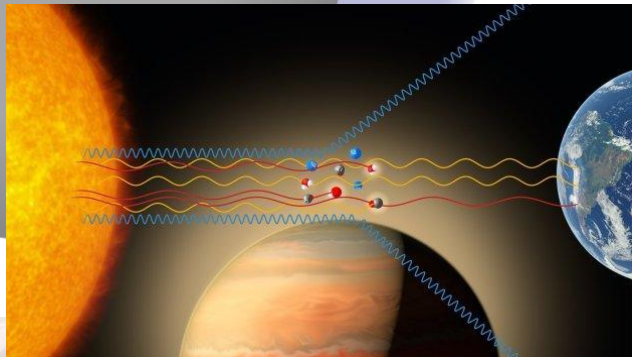
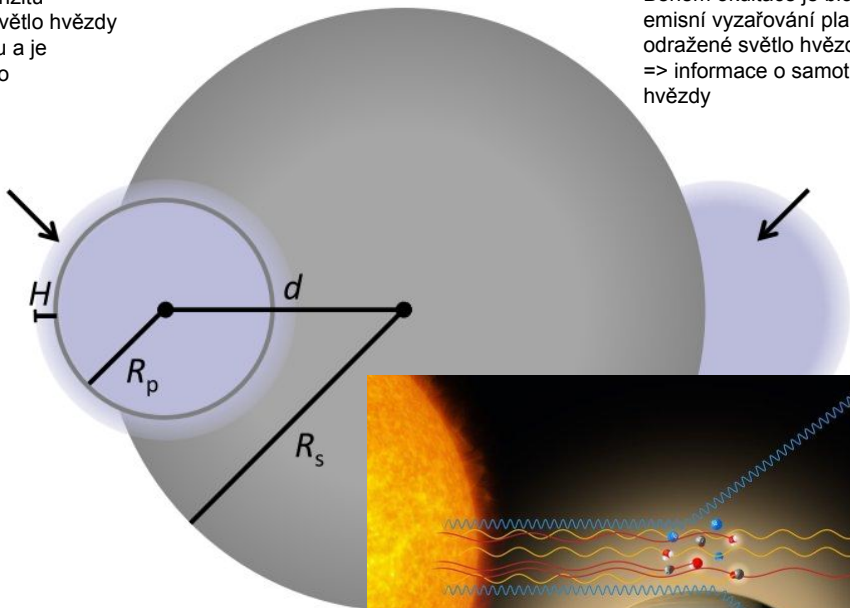
1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)
5. Přímé pozorování

# Transmisní spektroskopie

Přímé modelování transmisního spektra náročné => hrubý odhad vlastností atmosféry (=> hloubky tranzitu) může být udělán s pomocí škálové výšky  $H$  (výška, na které se sníží tlak o faktor  $e=2.718$ )

Během tranzitu prochází světlo hvězdy atmosférou a je pohlcováno

Během okultace je blokováno emisní vyzařování planety a odražené světlo hvězdy => informace o samotném světle hvězdy



Boltzmannova konstanta

$$H = \frac{k T_{P,eq}}{\mu g}$$

Střední molekulová hmotnost

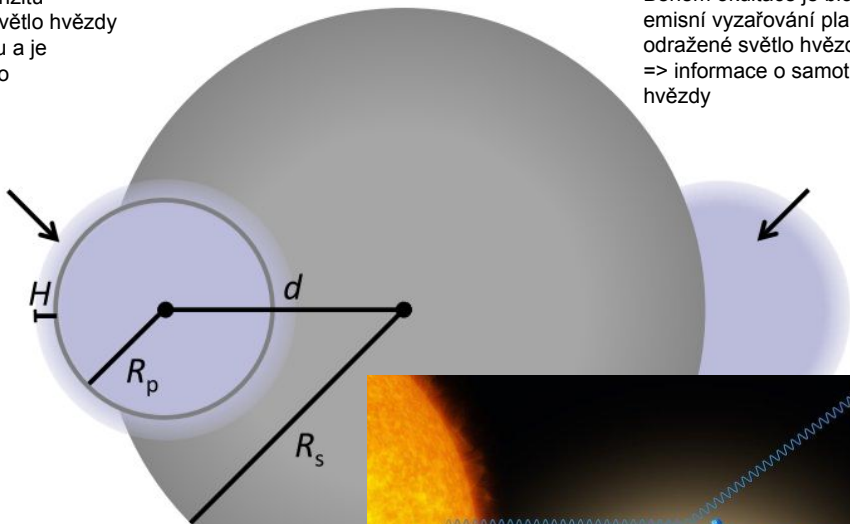
Gravitační zrychlení

# Transmisní spektroskopie

Přímé modelování transmisního spektra náročné => hrubý odhad vlastností atmosféry (=> hloubky tranzitu) může být udělán s pomocí škálové výšky  $H$  (výška, na které se sníží tlak o faktor  $e=2.718$ )

Během tranzitu prochází světlo hvězdy atmosférou a je pohlcováno

Během okultace je blokováno emisní vyzařování planety a odražené světlo hvězdy => informace o samotném světě hvězdy



Boltzmannova konstanta

$$H = \frac{k T_{P,eq}}{\mu g}$$

Střední molekulová hmotnost

Gravitační zrychlení

Počet škálových výšek, přes které prochází světlo, typicky 2-5

Očekávané prohloubení tranzitu:

$$\delta_{\lambda} = \frac{(R_P + nH)^2}{R_*^2} - \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \approx \frac{2nR_P H}{R_*^2}$$

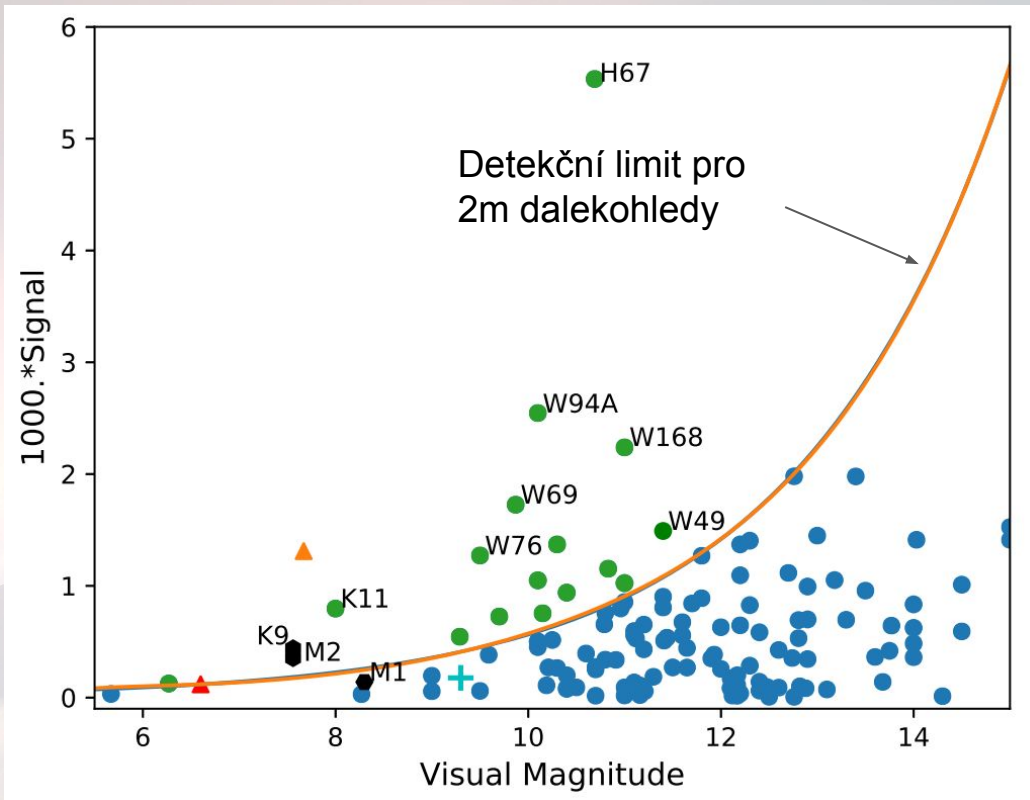
Pokles bude větší pro teplejší a velké planety, které mají vodíkové atmosféry a obíhají okolo malých hvězd.

Pro horké Jupitery  $\delta \sim 0.1\%$ , pro planety podobné Zemi  $\delta \sim 10^{-3-4}\%$



# Transmisní spektroskopie

Přímé modelování transmisního spektra náročné => hrubý odhad vlastností atmosféry (=> hloubky tranzitu) může být udělán s pomocí škálové výšky  $H$  (výška, na které se sníží tlak o faktor  $e=2.718$ )



Boltzmannova konstanta

$$H = \frac{k T_{P,eq}}{\mu g}$$

Střední molekulová hmotnost

Gravitační zrychlení

Počet škálových výšek, přes které prochází světlo, typicky 2-5

Očekávané prohloubení tranzitu:

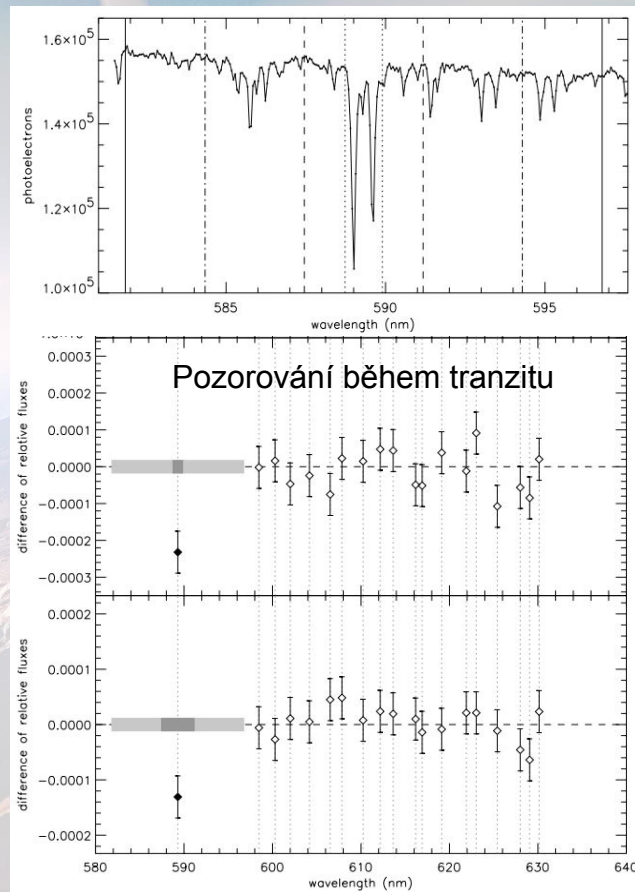
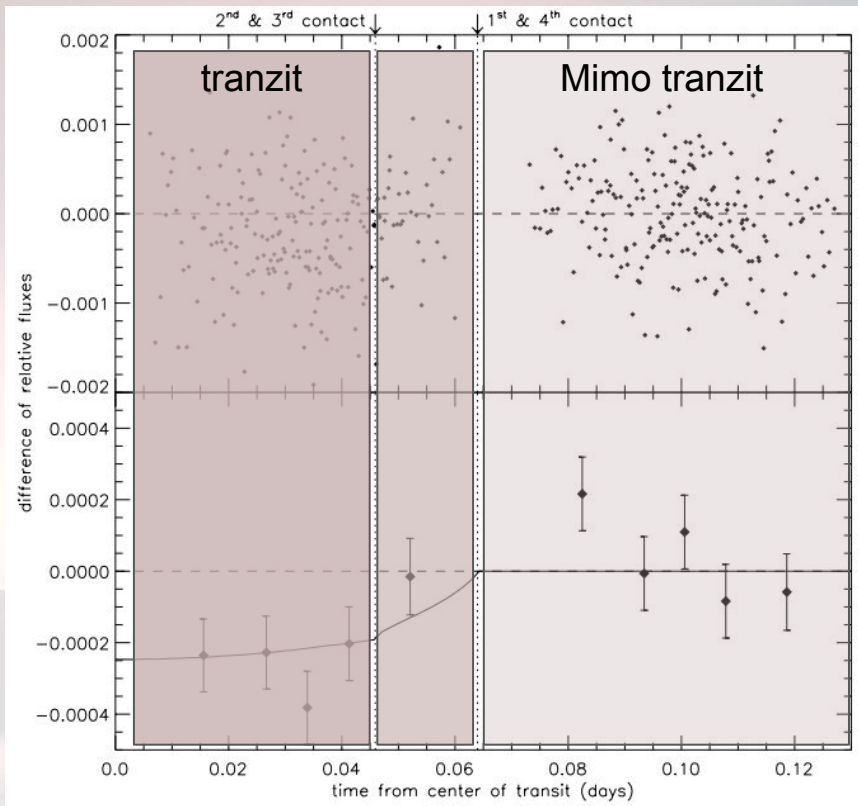
$$\delta_{\lambda} = \frac{(R_P + nH)^2}{R_*^2} - \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \approx \frac{2nR_P H}{R_*^2}$$

Pokles bude větší pro teplejší a velké planety, které mají vodíkové atmosféry a obíhají okolo malých hvězd.

Pro horké Jupitery  $\delta \sim 0.1\%$ , pro planety podobné Zemi  $\delta \sim 10^{-3-4}\%$

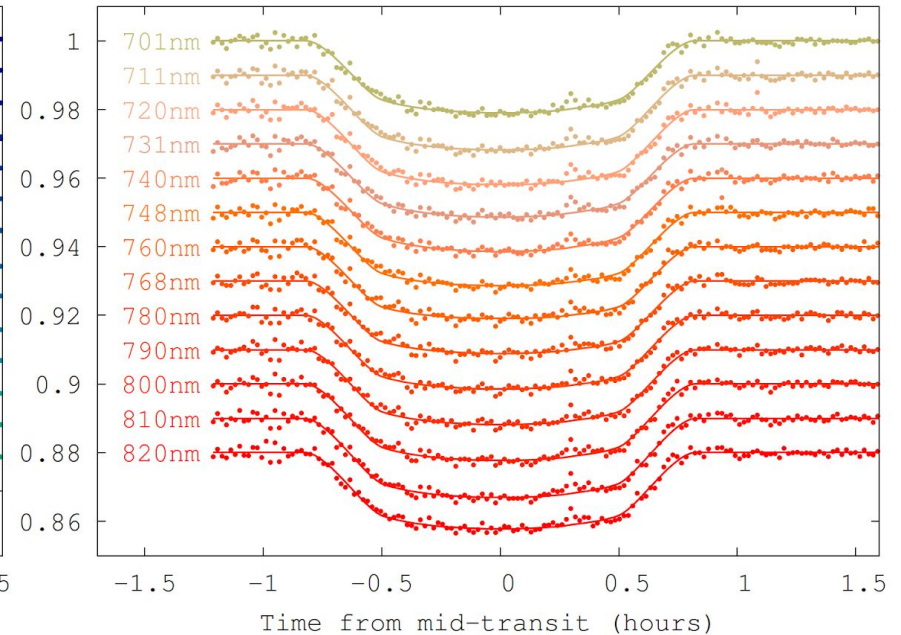
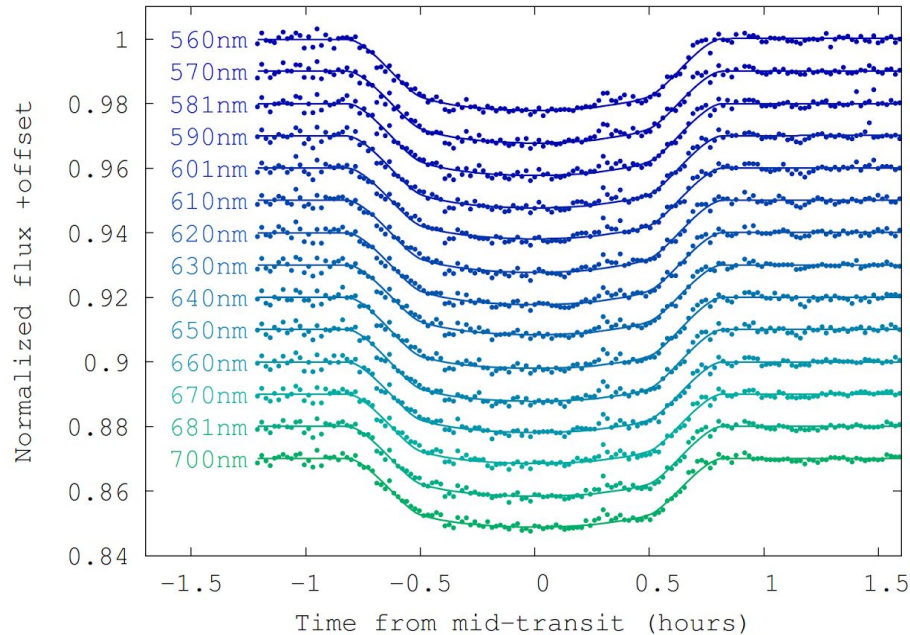
# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách

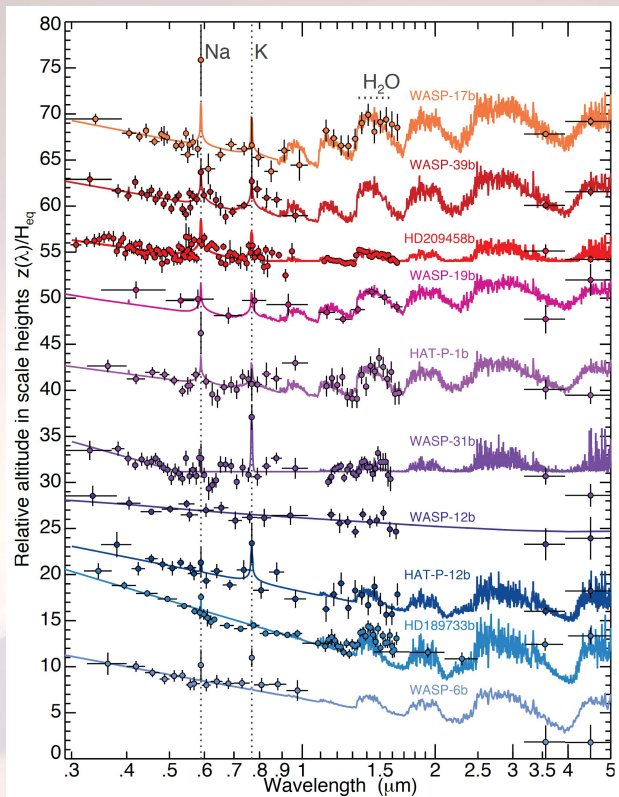


Sedaghati et al. 2015, A&A, 576, 11 - WASP-19 b, VLT

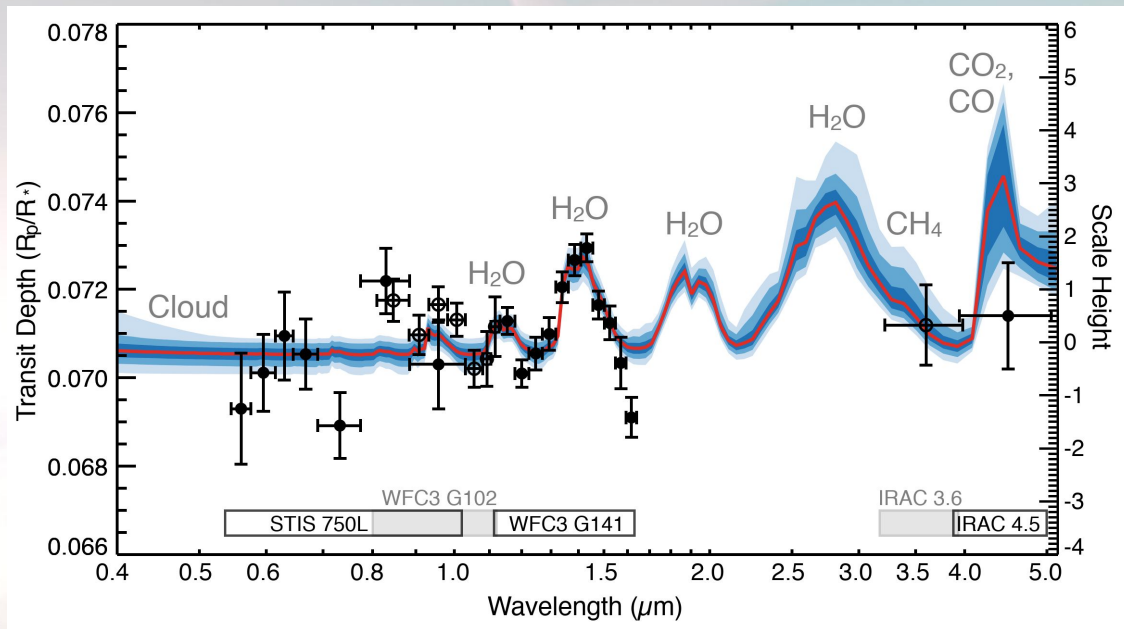


# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



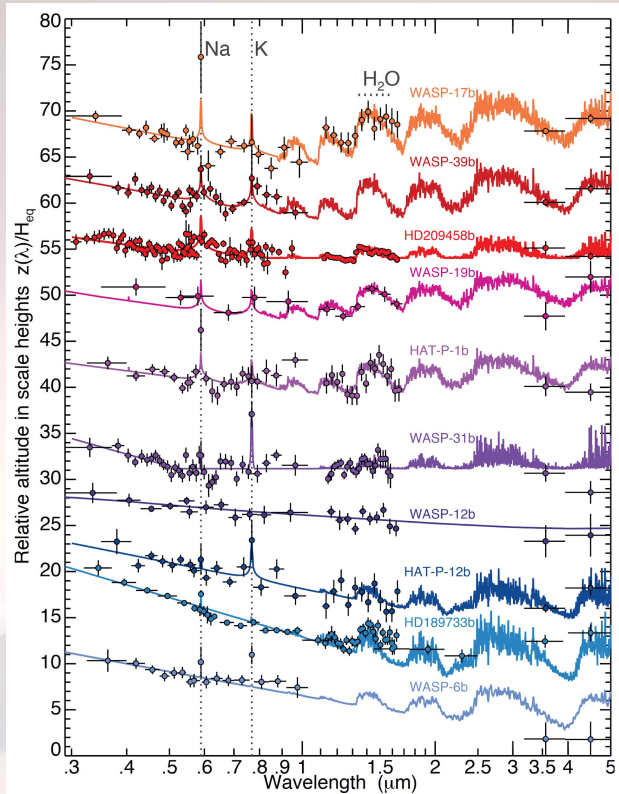
Singh et al. 2016, Nature, 529, 59  
detekce atmosféry z HST a Spitzer



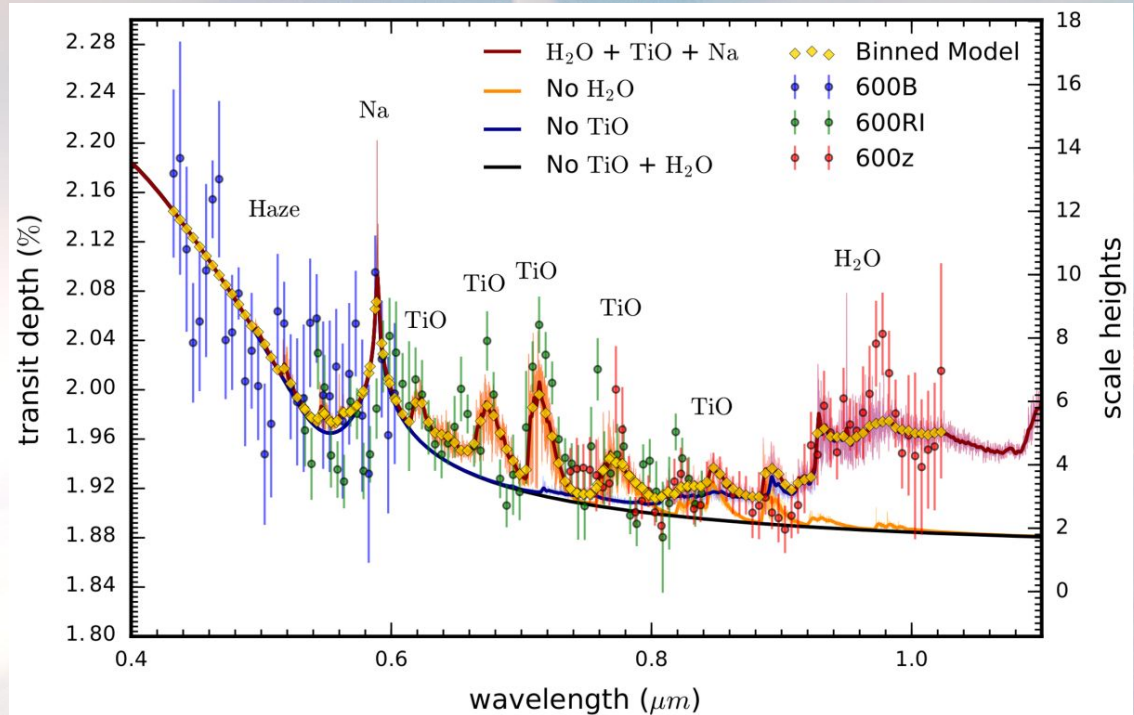
Wakeford et al. 2017, Science, 356, 628  
detekce vody v atmosféře HAT-P-26 b, HST+Spitzer

# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



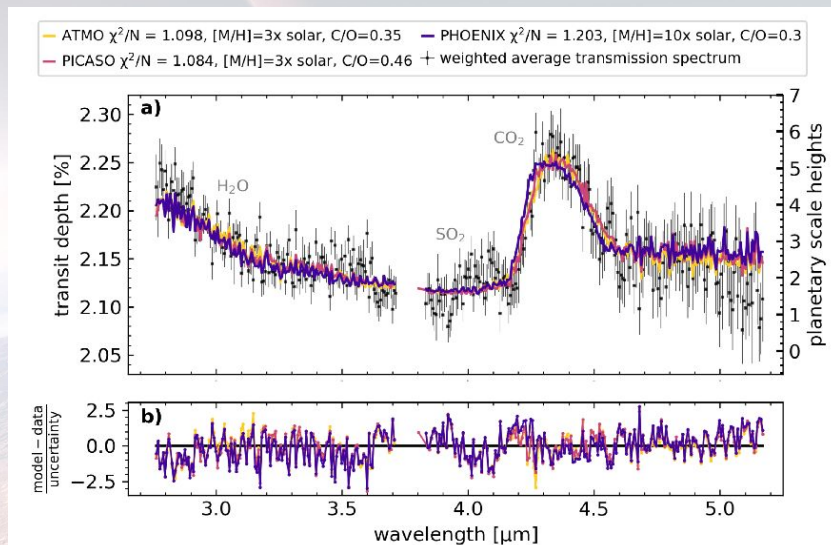
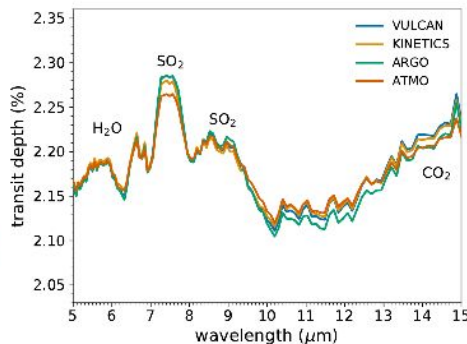
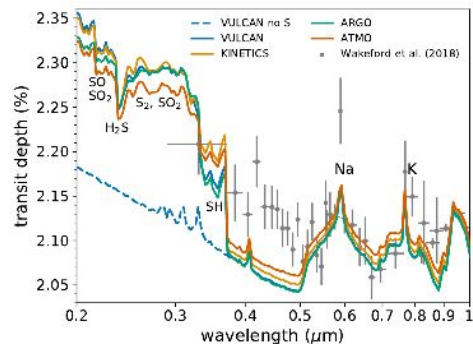
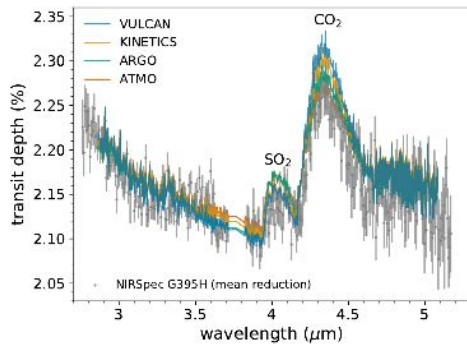
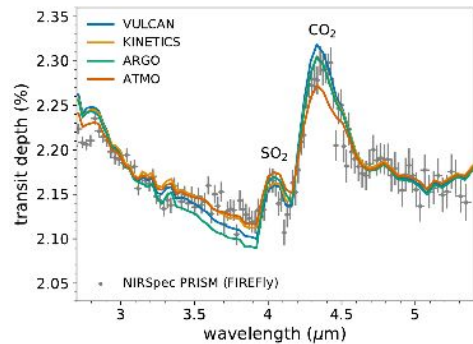
Singh et al. 2016, Nature, 529, 59  
detekce atmosfér z HST a Spitzer



Sedaghati et al. 2017, Nature, 549, 238  
detekce TiO a vody v atmosféře WASP-19 b

# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



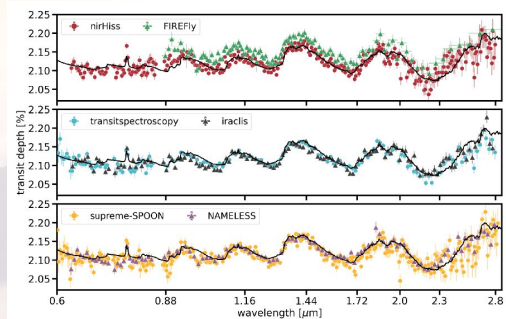
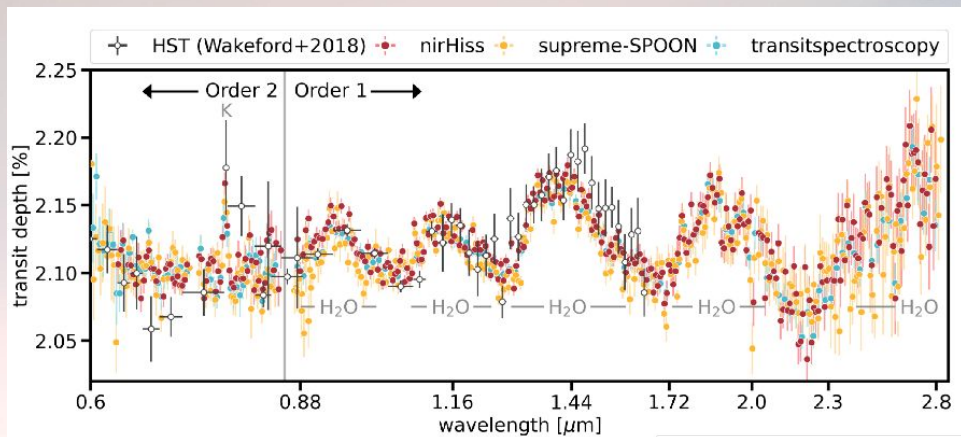
Alderson et al. 2022, arXiv:2211.10488, WASP-39 b, NIRSPEC@JWST

Tsai et al. 2022, arXiv:2211.10490, fotochemie v atmosféře WASP-39 b, NIRSPEC@JWST

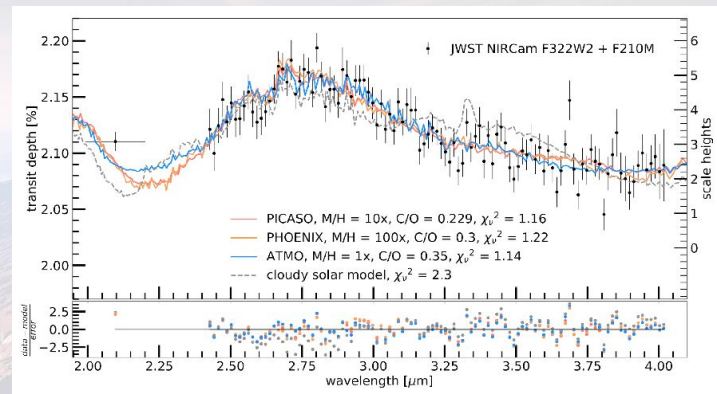
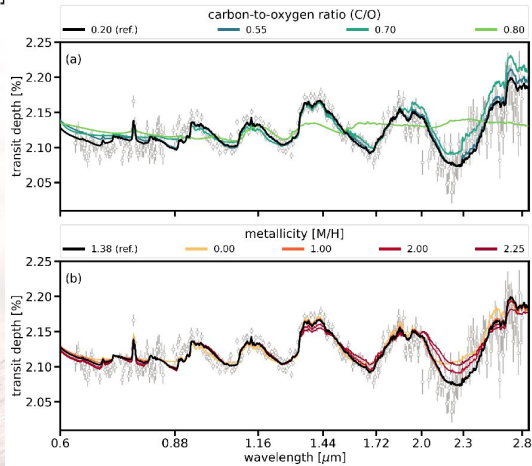


# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



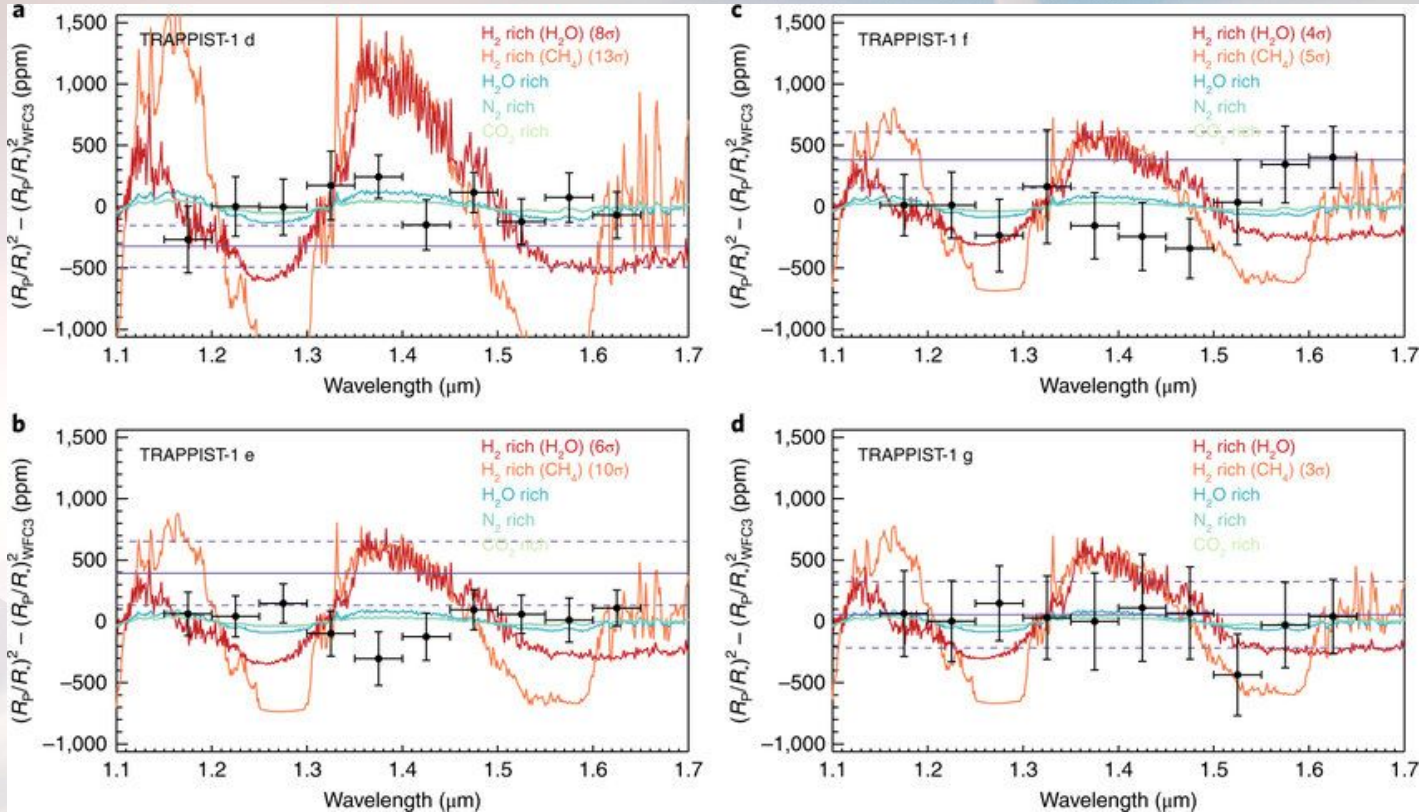
Feinstein et al. 2022, arXiv:2211.10493, WASP-39 b, NIRISS@JWST



Ahrer et al. 2022, arXiv:2211.10489, WASP-39 b, NIRCcam@JWST

# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



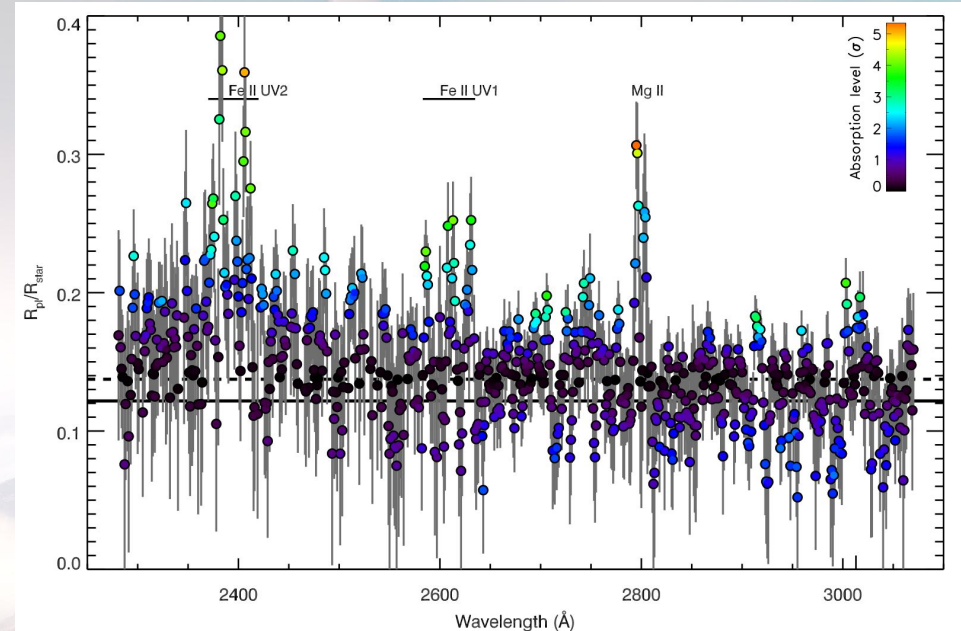
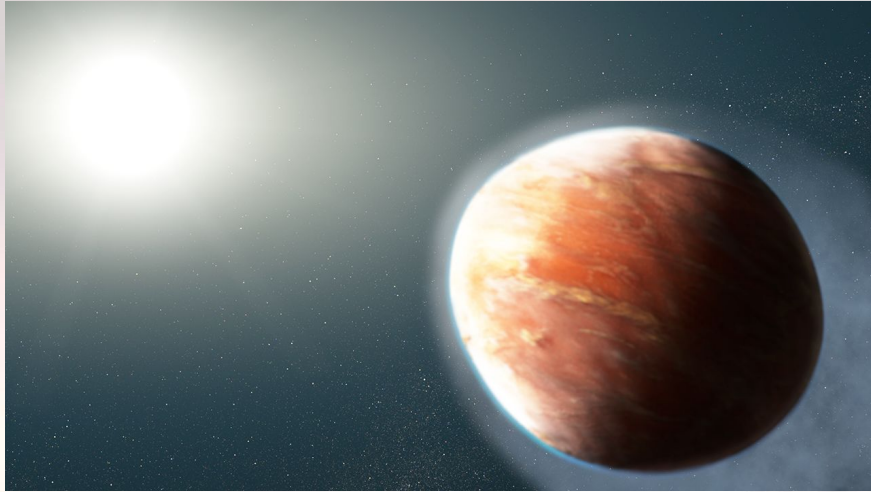
de Wit et al. 2018, Nature, 2, 214

Transmisní spektrum planet systému Trappist-1 dalekohledem Spitzer



# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



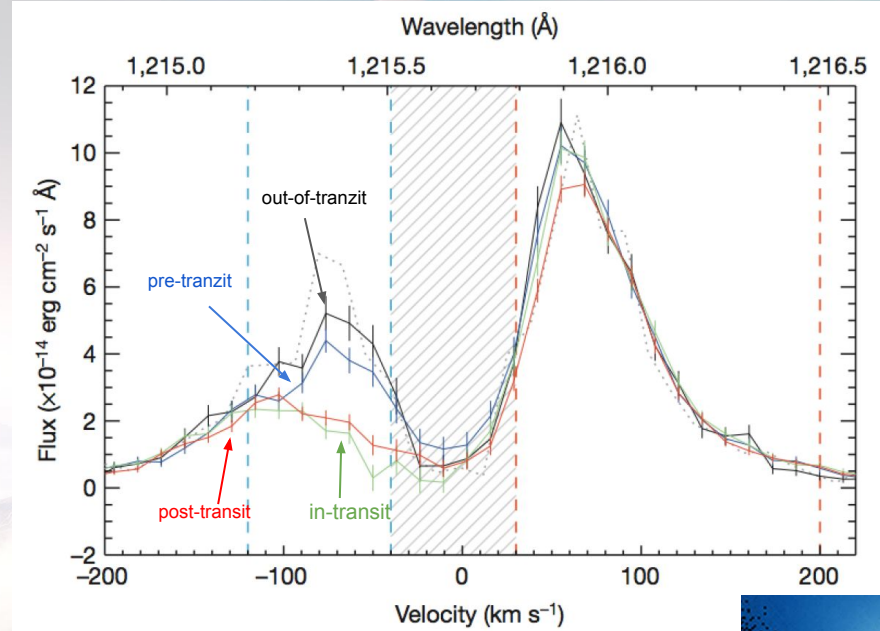
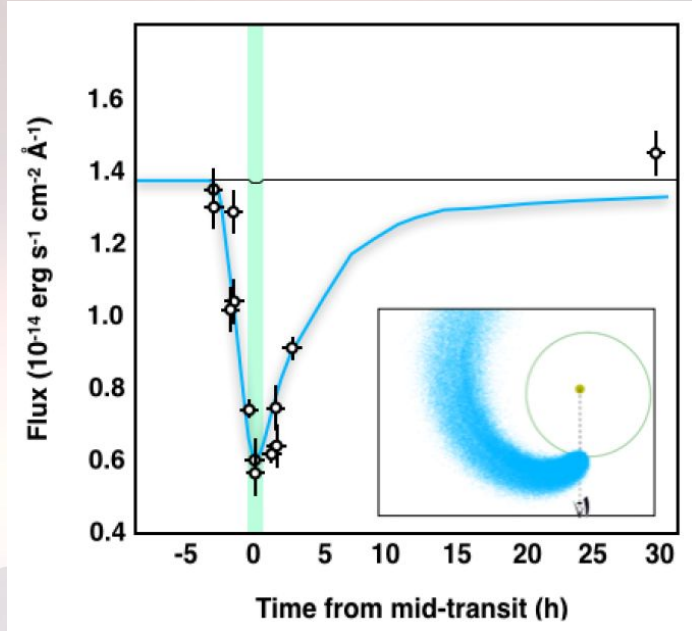
Sing et al. 2019, AJ, 158, 91

WASP-121 b - HST - Planeta o teplotě 4600 K, únik železa a hořčíku z její atmosféry



# Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



Ehrenreich et al. 2015, Nature, 522, 7557

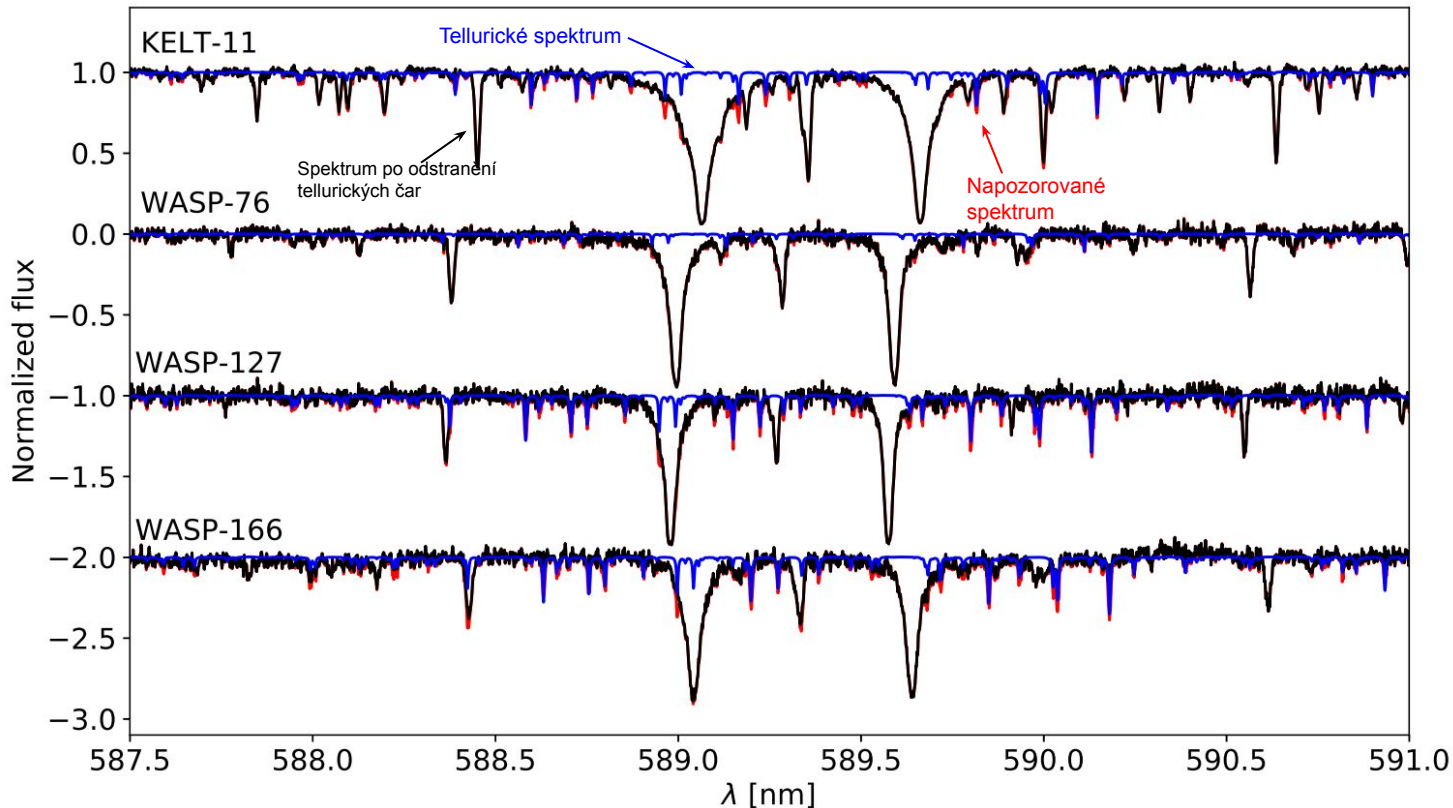
GJ 436 b - HST - únik vodíku z její atmosféry ( $10^{8-9}$  g/s) - studium Ly $\alpha$



# Transmisní spektroskopie

Vysokodisperzní spektroskopie => studium hloubky konkrétních spektrálních čar, srovnání spekter během a mimo tranzit

- Je potřeba dobře znát světelné elementy, odstranit telurické čáry, sesadit spektra, vyloučit zdroj z hvězdy



1. Posunutí spekter do barycentra soustavy
2. Tellurická korekce (model->posun->škálování ->odečtení)
1. Sesazení spekter
2. Odečtení in- a out-of-transit spekter
3. Posunutí spekter do soustavy planety
4. Sesazení

Spektra z HARPS

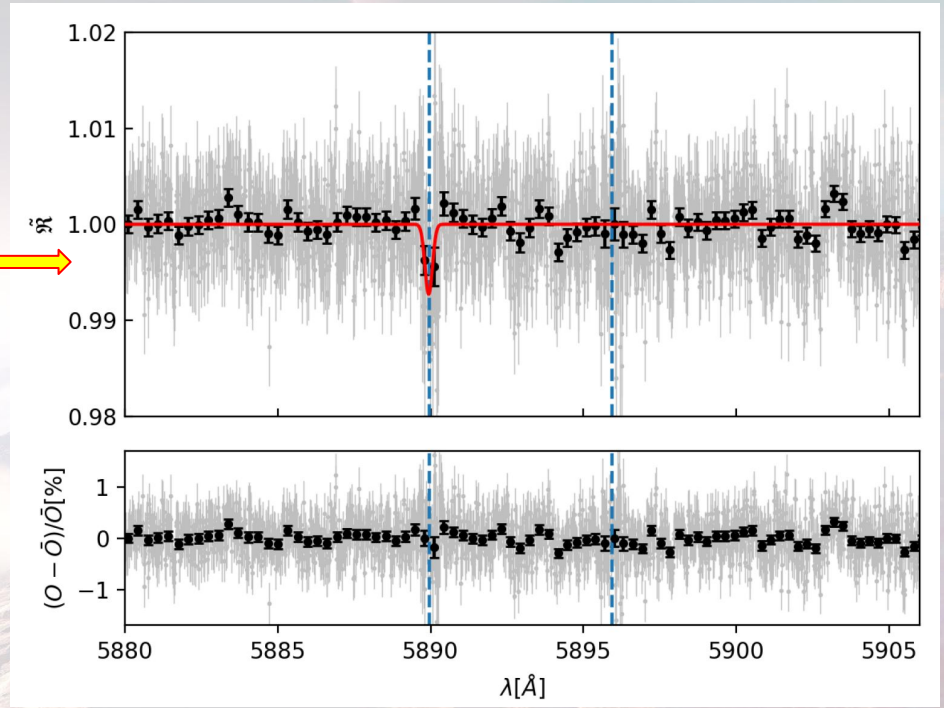
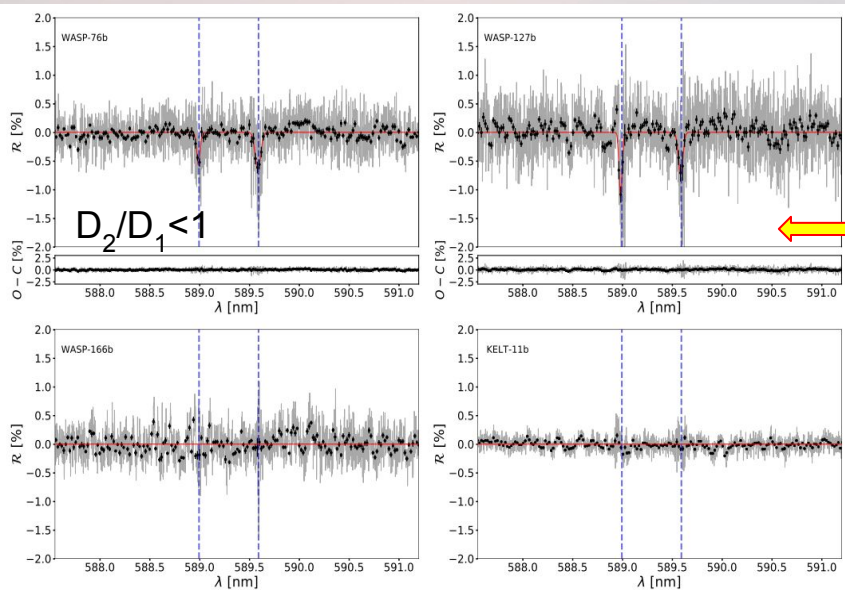




# Transmisní spektroskopie

Vysokodisperzní spektroskopie => studium hloubky konkrétních spektrálních čar, srovnání spekter během a mimo tranzit

- Je potřeba dobře znát světelné elementy, odstranit telurické čáry, sesadit spektra, vyloučit zdroj z hvězdy



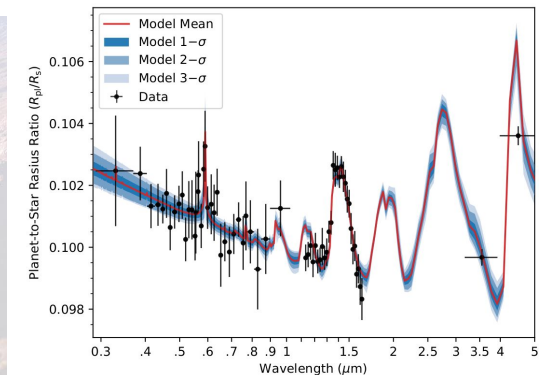
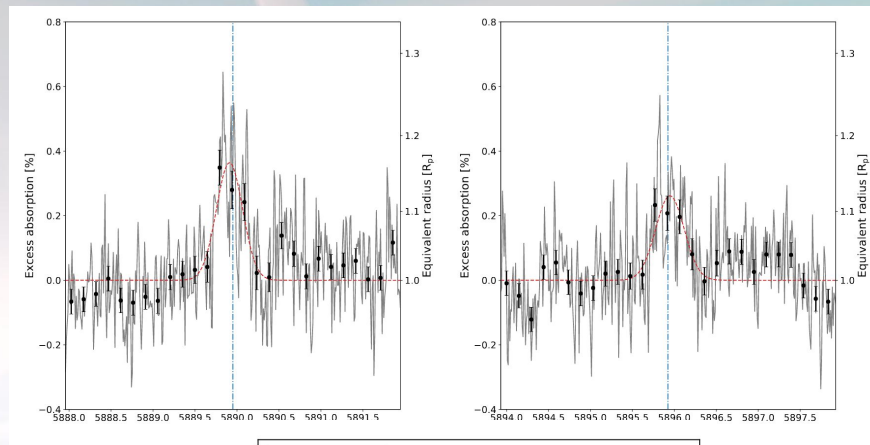
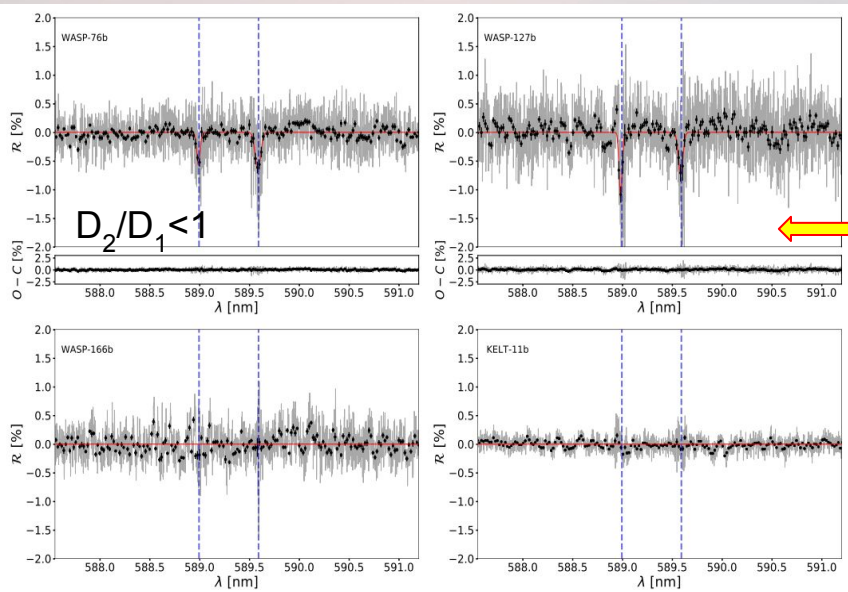
Žák et al. 2019, AJ, 158, 120 - Detekce sodíku u dvou horkých Jupiterů

Seidel et al. 2020, A&A, 643, 45 - další 2 tranzity WASP-127 b, detekce Na má původ v telurických čarách - falešný signál?

# Transmisní spektroskopie

Vysokodisperzní spektroskopie => studium hloubky konkrétních spektrálních čar, srovnání spekter během a mimo tranzit

- Je potřeba dobře znát světelné elementy, odstranit telurické čáry, sesadit spektra, vyloučit zdroj z hvězdy



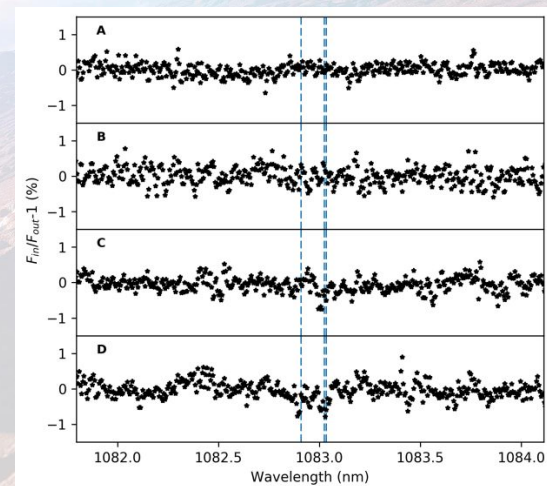
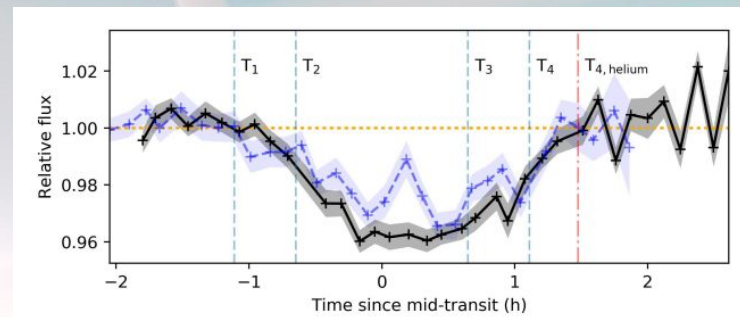
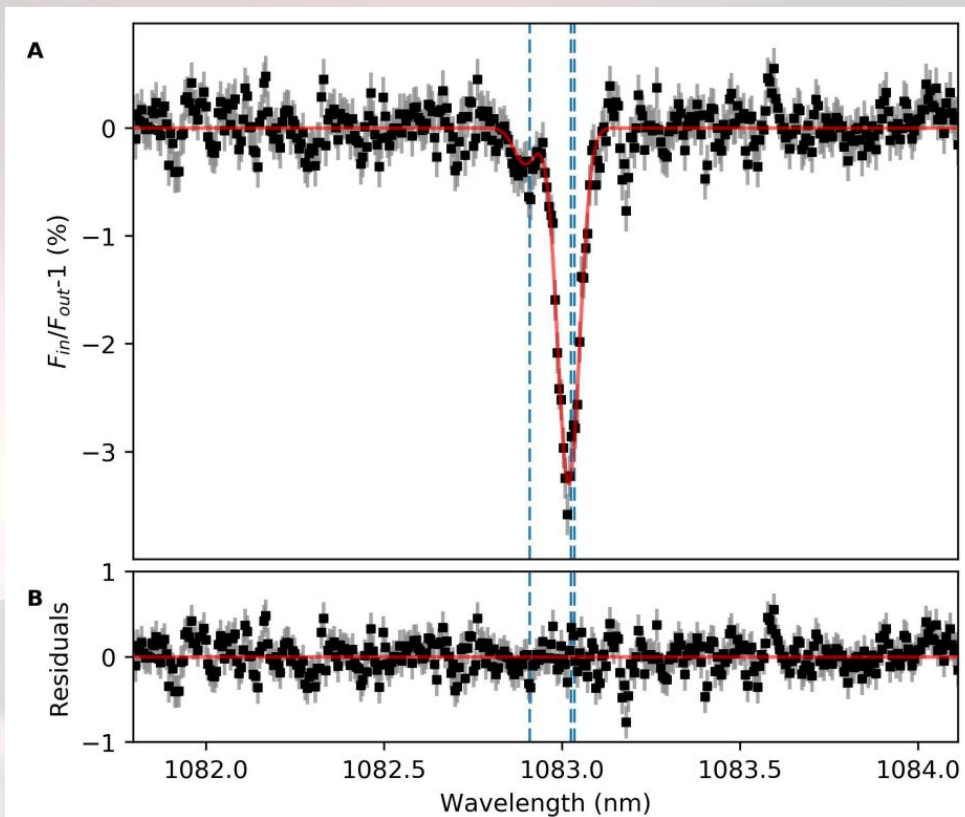
Žák et al. 2019, AJ, 158, 120 - Detekce sodíku u dvou horkých Jupiterů

Allart et al. 2020, A&A, 644, 155 - detekce Na z ESPRESSO

Spake et al. 2021, MNRAS, 500, 4042 - detekce Na z HST

# Transmisní spektroskopie

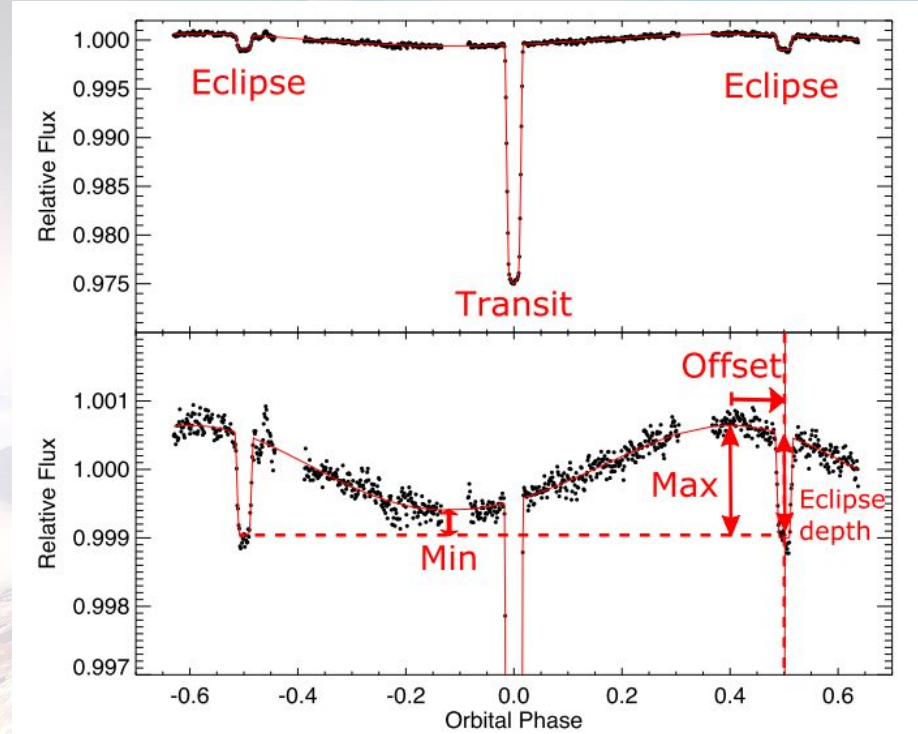
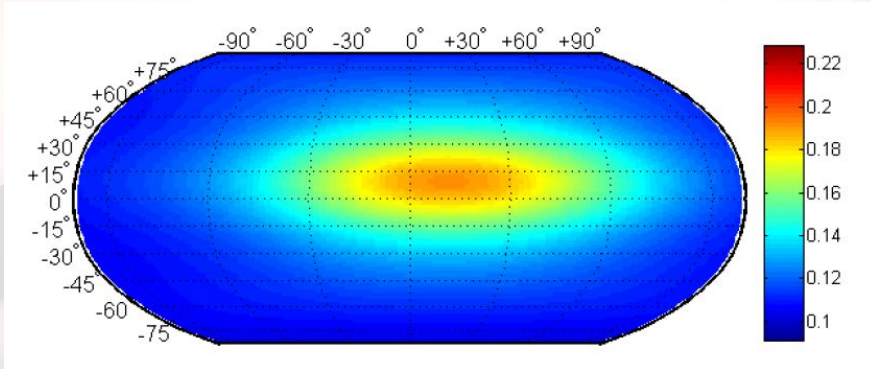
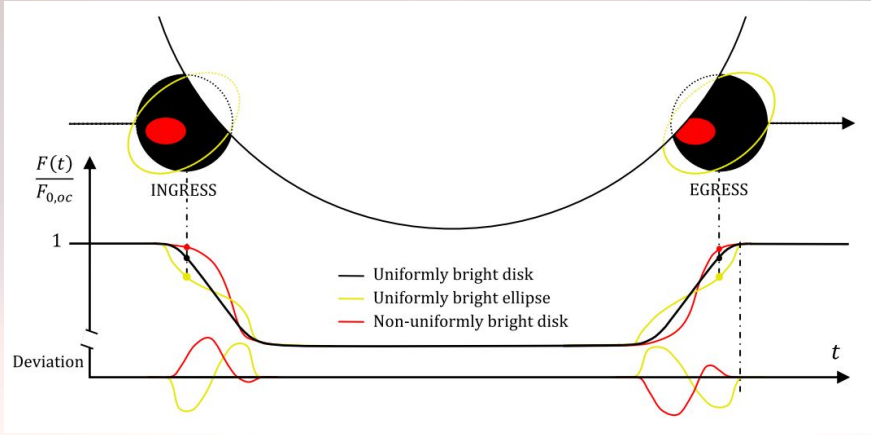
Vysokodisperzní spektroskopie => studium hloubky konkrétních spektrálních čar, srovnání spekter během a mimo tranzit  
- Je potřeba dobře znát světelné elementy, odstranit telurické čáry, sesadit spektra, vyloučit zdroj z hvězdy





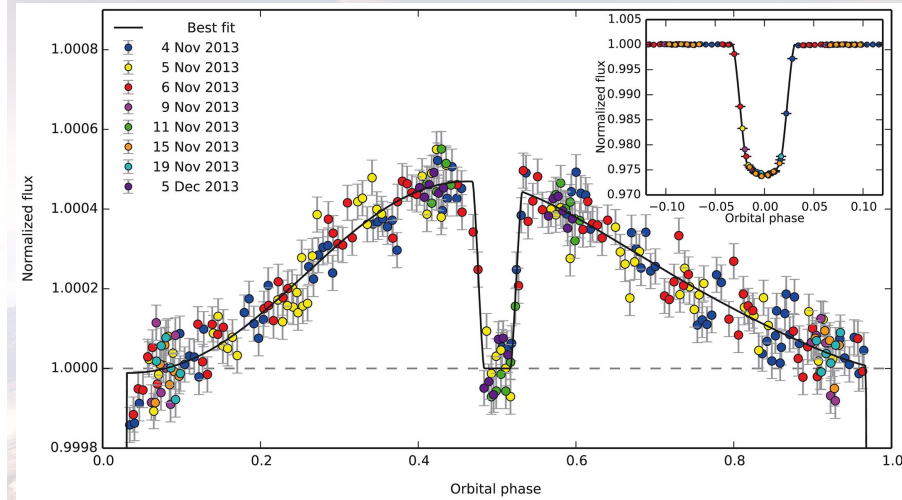
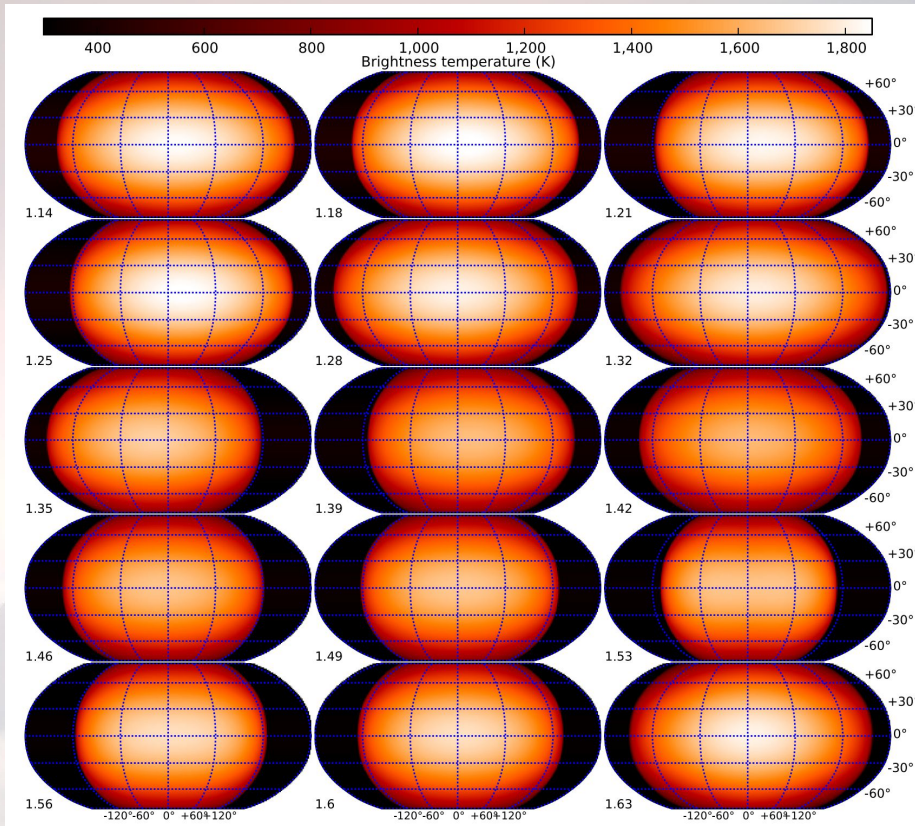
# Sekundární tranzity (okultace)

Z okamžiků a tvaru sekundárních tranzitů lze odhadnout teplotní rozložení atmosféry a tvar planety



# Sekundární tranzity (okultace)

Z okamžiků a tvaru sekundárních tranzitů lze odhadnout teplotní rozložení atmosféry a tvar planety

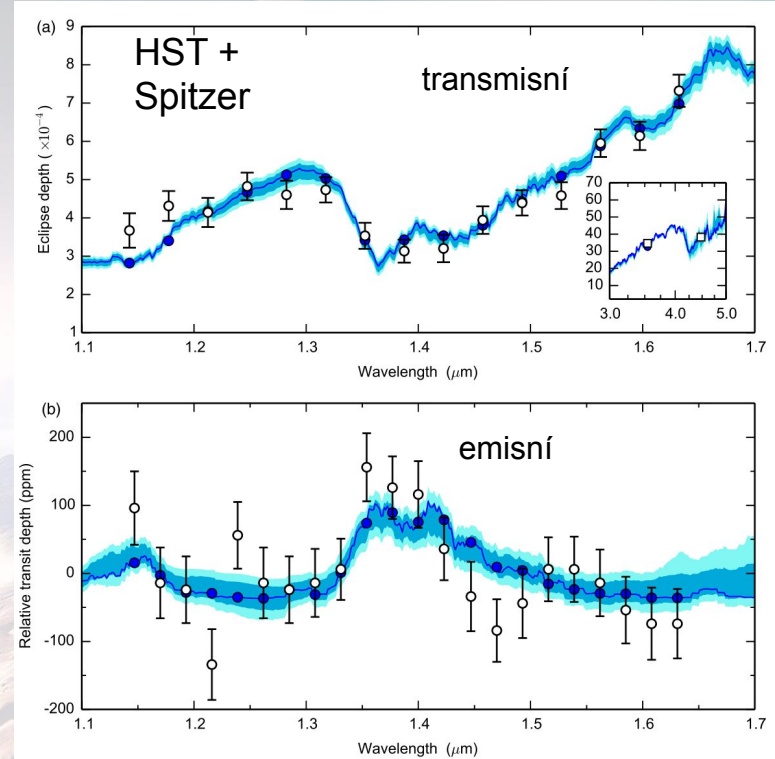
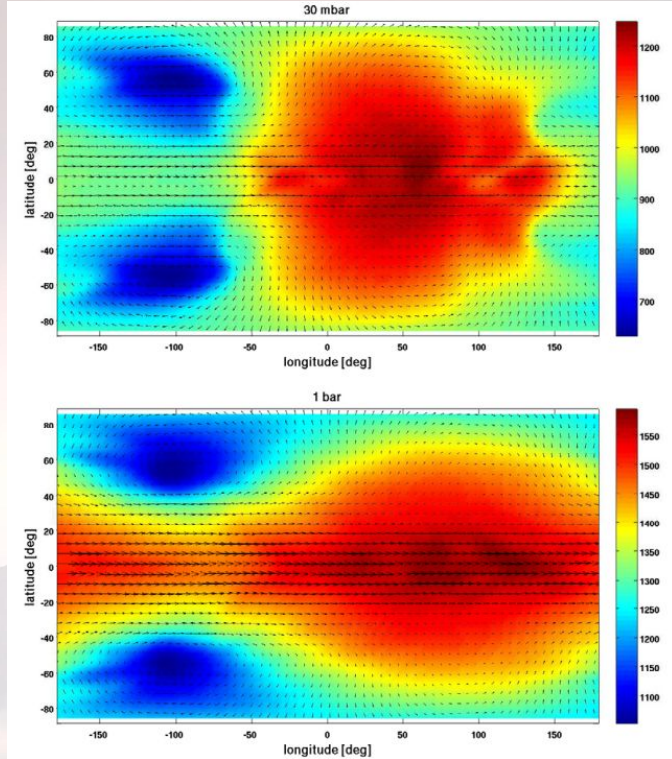


Stevenson et al. 2014, Science, 346, 838: HST, teplotní mapa atmosféry WASP-43 b



# Sekundární tranzity (okultace)

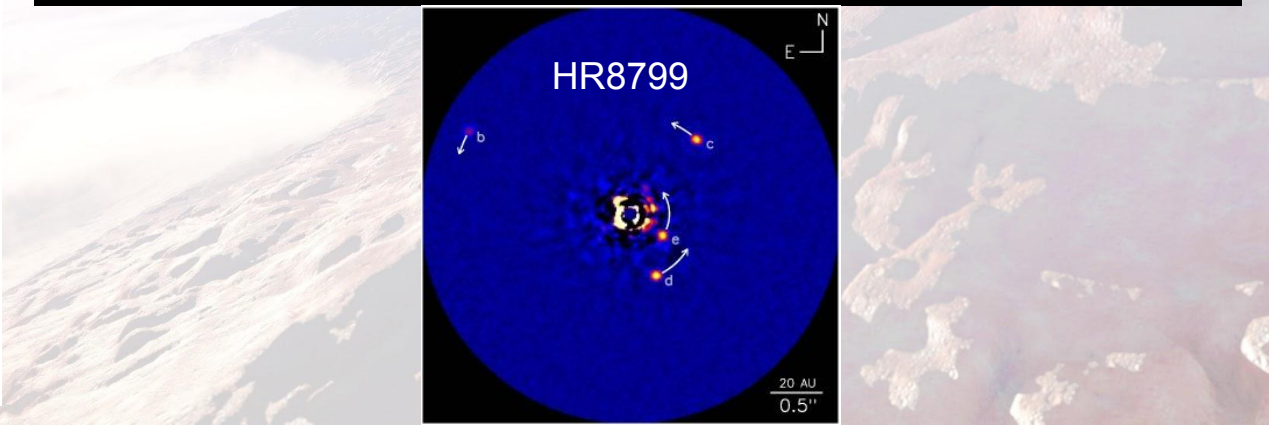
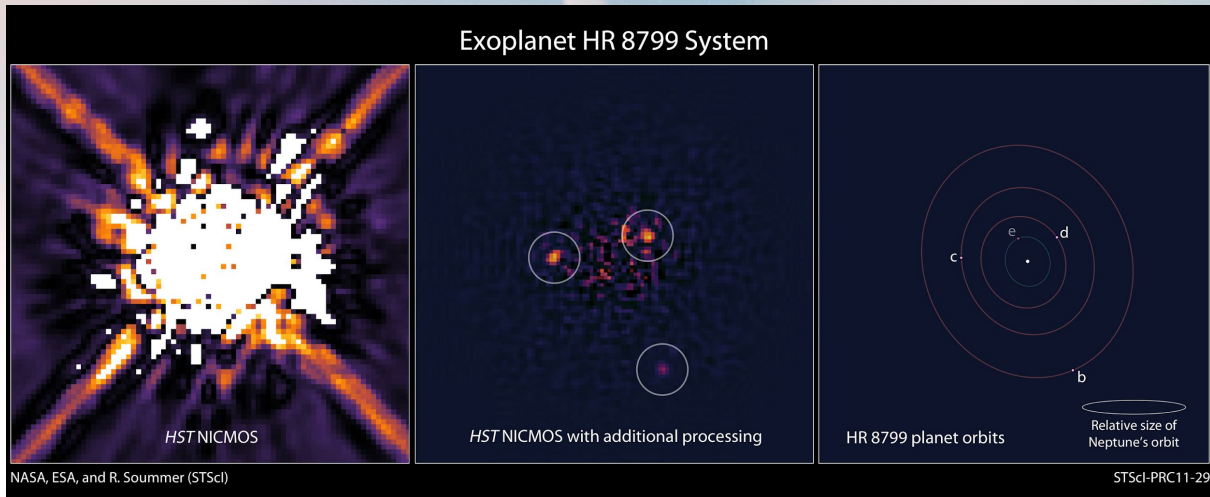
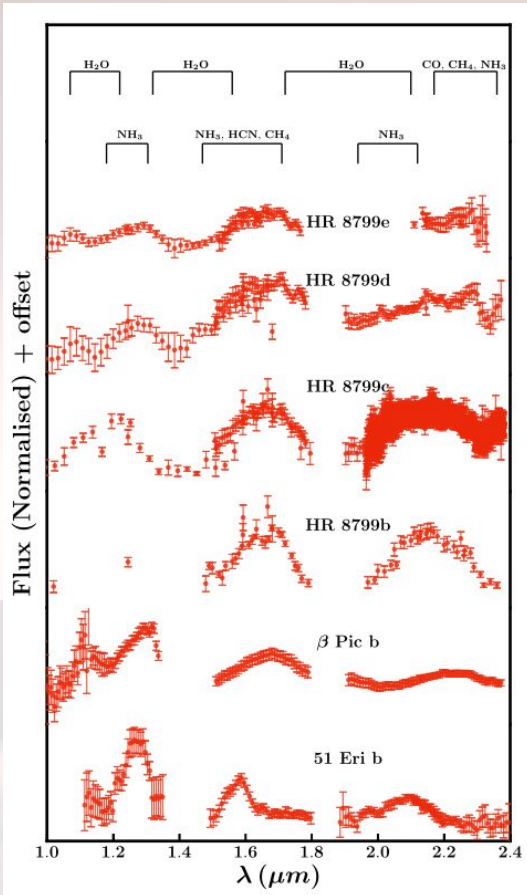
Z okamžiků a tvaru sekundárních tranzitů lze odhadnout teplotní rozložení atmosféry a tvar planety





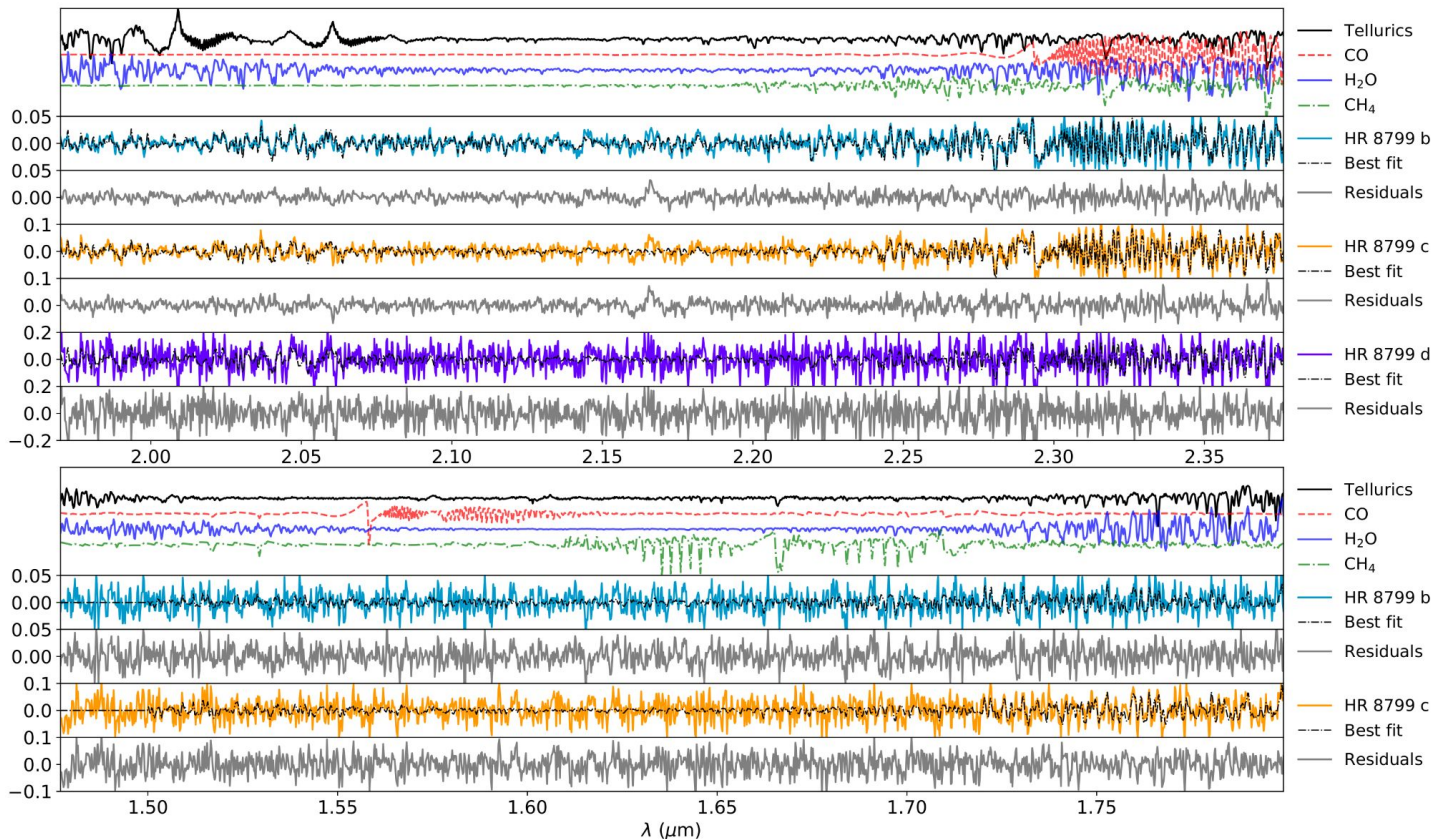
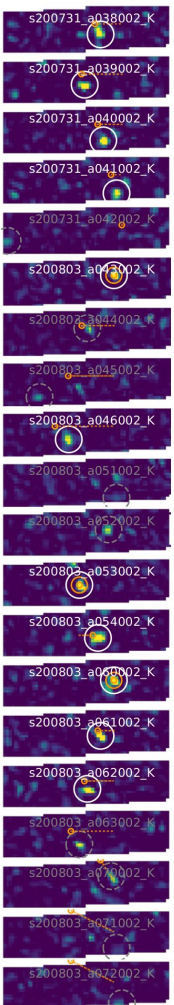
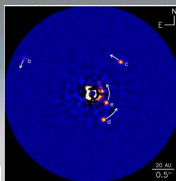
# Přímé pozorování

Odstínění světla mateřské hvězdy - extrémně náročné, potřeba velkého kontrastu mezi planetou a hvězdou



# Přímé pozorování

světla mateřské hvězdy - extrémně náročné, potřeba velkého kontrastu mezi planetou a hvězdou





# Co bylo detekováno

## Direct Imaging

H <sub>2</sub> O	HR 8799b (144), HR 8799c (129), HR 8799d (143), HR 8799e (143), $\kappa$ And b (262), 51 Eri b (222), Gl 570D (152), HD 3651B (152), $\beta$ Pic (54), ULAS 1416 (149)
CH <sub>4</sub>	HR 8799b (14), 51 Eri b (222), GJ 504 (114), GJ 758 B (115), Gl 570D (152), HD 3651B (152), ULAS 1416 (149)
NH <sub>3</sub>	Gl 570D (152), HD 3651B (152), ULAS 1416 (149)
CO	HR 8799b (144), HR 8799c (129)

## High-resolution Doppler Spectroscopy

H <sub>2</sub> O	51 Peg b (25), HD 179949 b (39), HD 189733b (24), HD 209458b (101)
CO	$\tau$ Bootis b (37), HD 209458b (251), 51 Peg b (38), HD 179949 b (39), HD 189733b (219, 40)
TiO	WASP-33b (196)
HCN	HD 209458b (101), HD 189733b (47)
Ti, Fe, Ti+	KELT-9b (106)

## Emission Spectra (Secondary Eclipse)

H <sub>2</sub> O	WASP-43b (132), HD 209458b (151), HD 189733b (59), WASP-121b (76), Kepler-13Ab (20), WASP-33b (102)
CO	WASP-18b (236)
VO	WASP-121b (76)
TiO	WASP-33b (102)
HCN	HD 209458b (101)

## Transmission Spectra (Primary Eclipse)

Chemical Species	Planet (References)
H <sub>2</sub> O	HD 189733b (178), HD 209458b (63), WASP-12b (133), WASP-17b (171), WASP-19b (112), WASP-39b (276), WASP-43b (132), WASP-52b (266), WASP-63b (123), WASP-69b (266), WASP-76b (266), WASP-121b (77), HAT-P-1b (275), HAT-P-11b (84), HAT-P-18b (266), HAT-P-26b (277), HAT-P-32b (60), HAT-P-41b (266), XO-1b (63)
Na	HD 189733b (214), HD 209458b (50), WASP-17b (244), WASP-39b (194), WASP-52b (52), WASP-69b (48), WASP-96b (193), WASP-127b (53), HAT-P-1b (195), XO-2b (245)

**HST:** Hubble Space Telescope  
**Spitzer:** Spitzer Space Telescope  
**JWST:** James Webb Space Telescope  
**VLT:** Very Large Telescope  
**GTC:** Gran Telescopio Canarias  
**E-ELT:** European Extremely Large Telescope  
**GMT:** Giant Magellan Telescope  
**TMT:** Thirty Meter Telescope

K	WASP-6b (192), WASP-31b (247), WASP-39b (244), WASP-127b (53), HAT-P-12b (244), XO-2b (243), HD 80606b (55)
TiO	WASP-19b (232)
AlO	WASP-33b (273)
H	HD 189733b (116, 33), HD 209458b (272, 116), GJ 436b (71)
He	WASP-107b (253)
C	HD 209458b (270)
O	HD 209458b (270)
Li	WASP-127b (53)
Ca	HD 209458b (8)
Sc	HD 209458b (8)
Mg	WASP-107b (271), WASP-12b (83)
Si	HD 209458b (223)

Nejúčinnější je metoda  
transmisní spektroskopie