

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

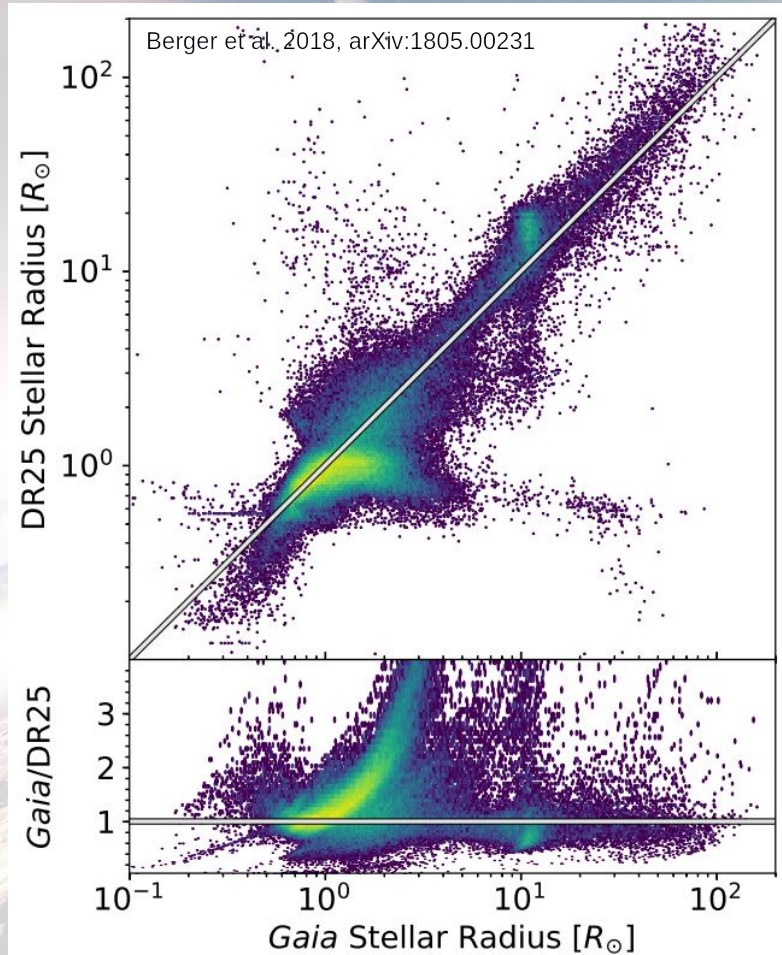
Vlastnosti exoplanet

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



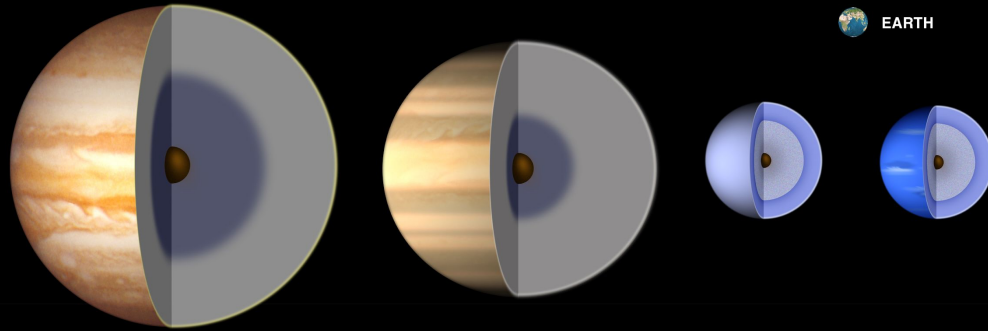
Hustota, chemické složení u tranzitujících
exoplanet

Je potřeba dobře znát vlastnosti hvězdy



GAIA DR2
Vs
KIC DR25

Sluneční soustava



JUPITER

SATURN

URANUS

NEPTUNE

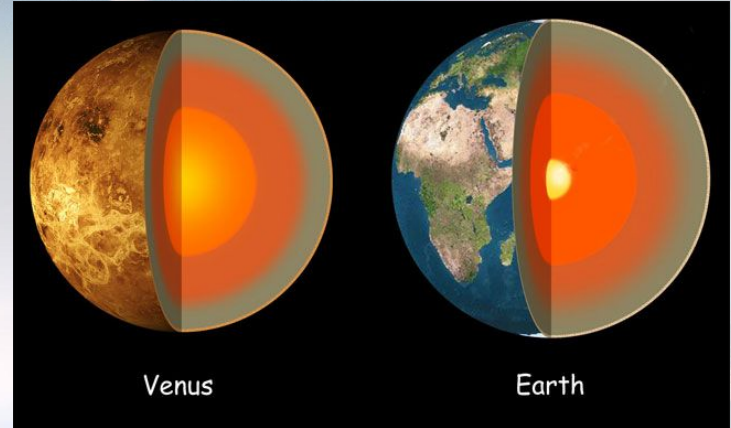
■ Molecular hydrogen

■ Hydrogen, helium, methane gas

■ Metallic hydrogen

■ Mantle (water, ammonia, methane ices)

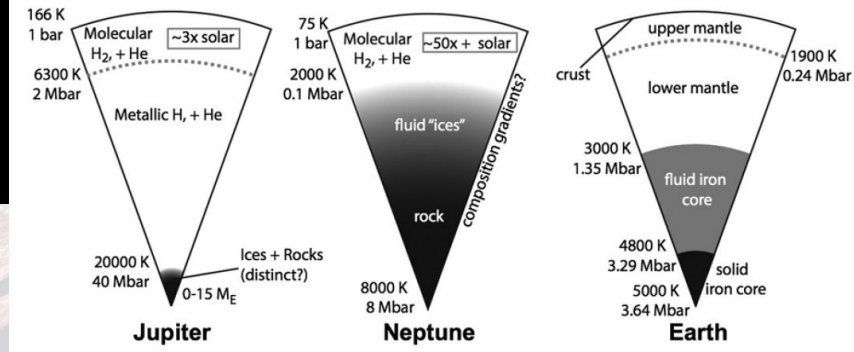
■ Core (rock, ice)



Venus

Earth

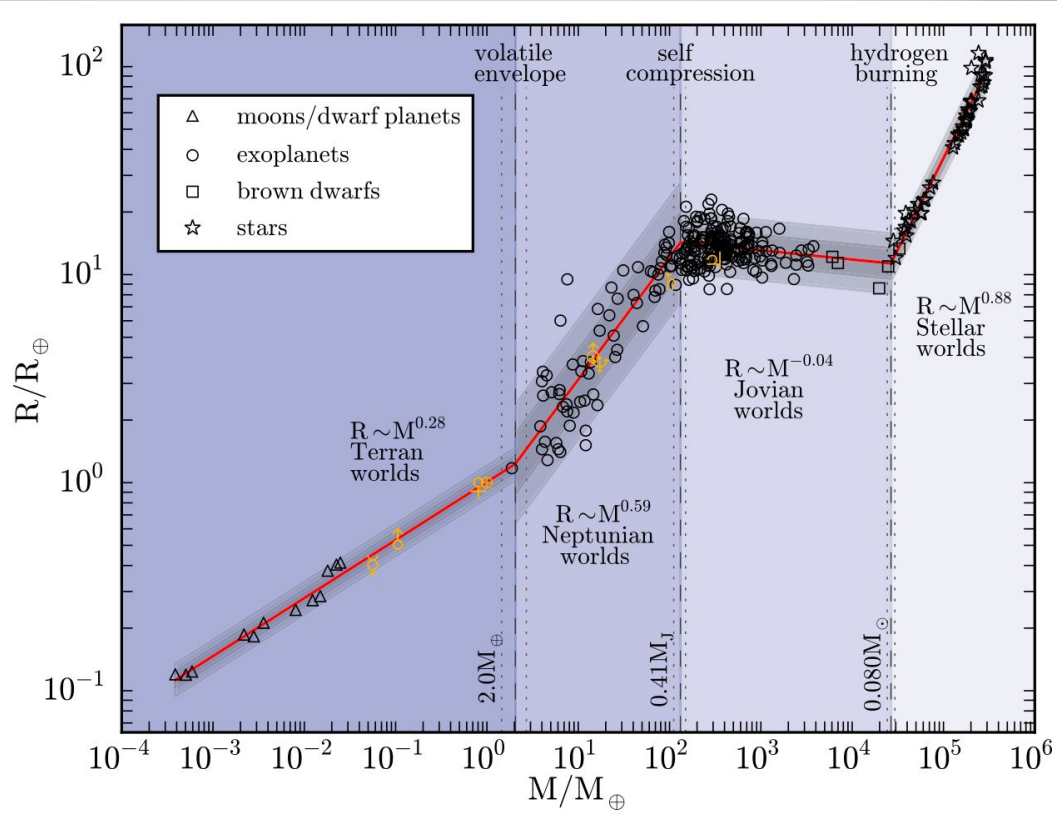
Kamenné jádro velikosti terestrických planet
+ obal z lehčích sloučenin a plynů (H, He, H₂O, CH₄, NH₃)



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

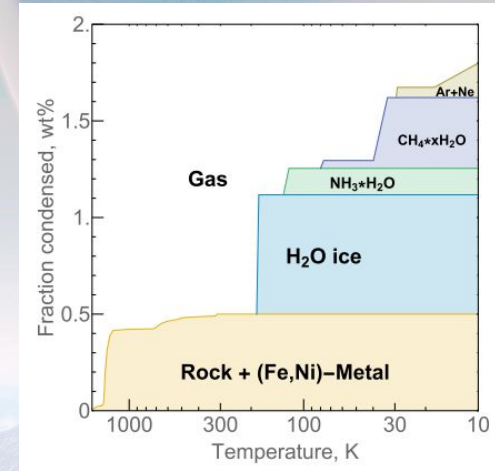
Kromě Země se vždy jedná o teoretické modely

Vlastnosti exoplanet



Chen&Kipping 2017, ApJ, 834, 17

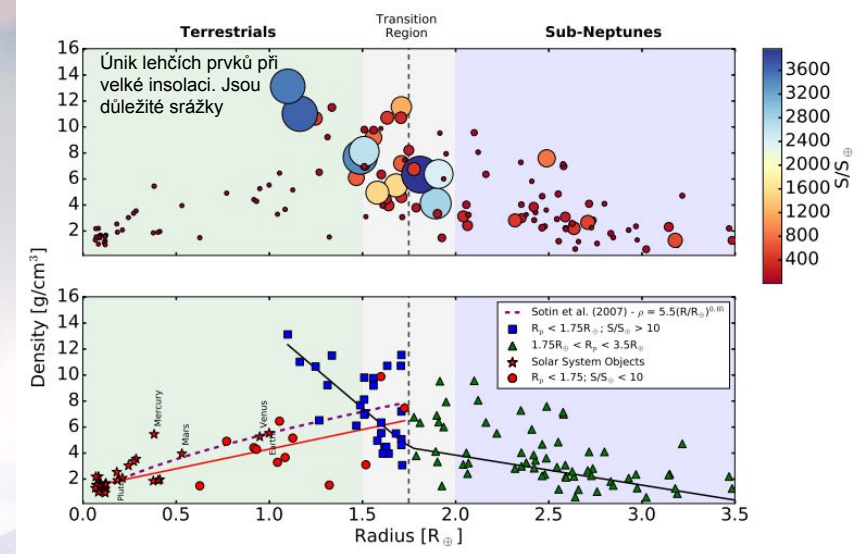
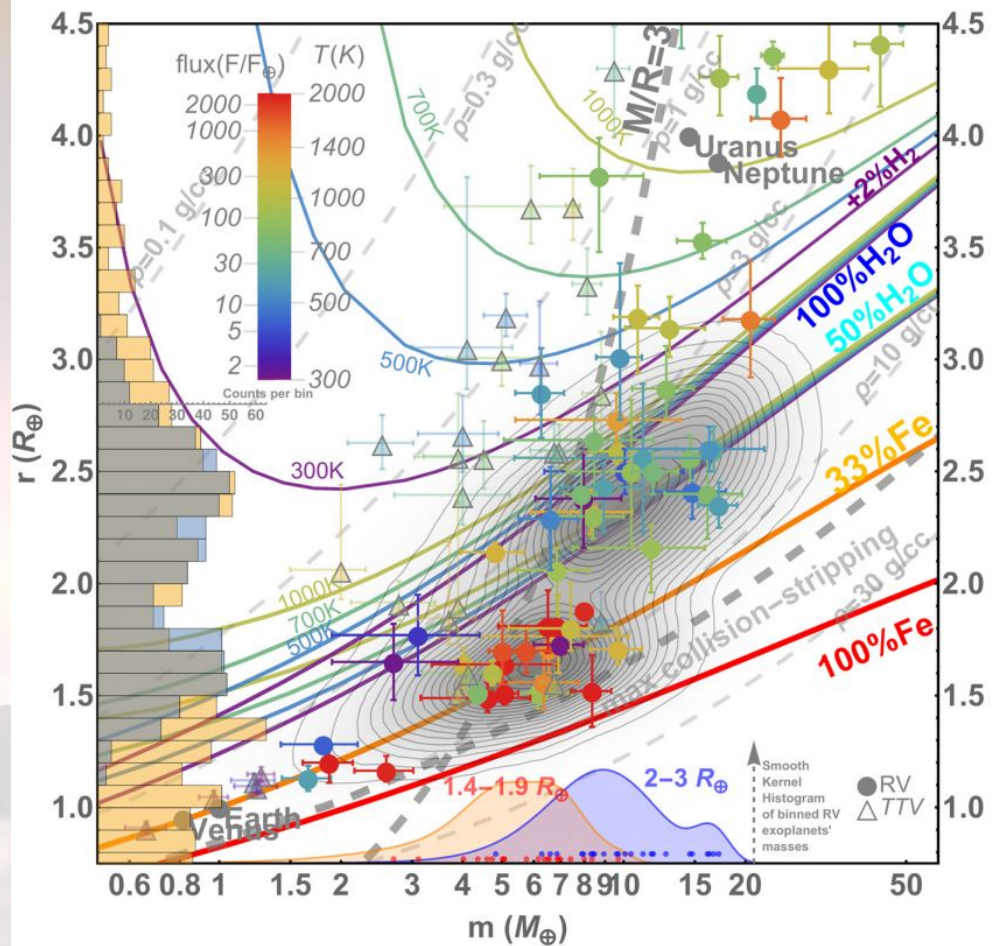
<https://web.cfa.harvard.edu/~lzeng/planetmodels.html>



- 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 $\frac{1}{2}$ 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)

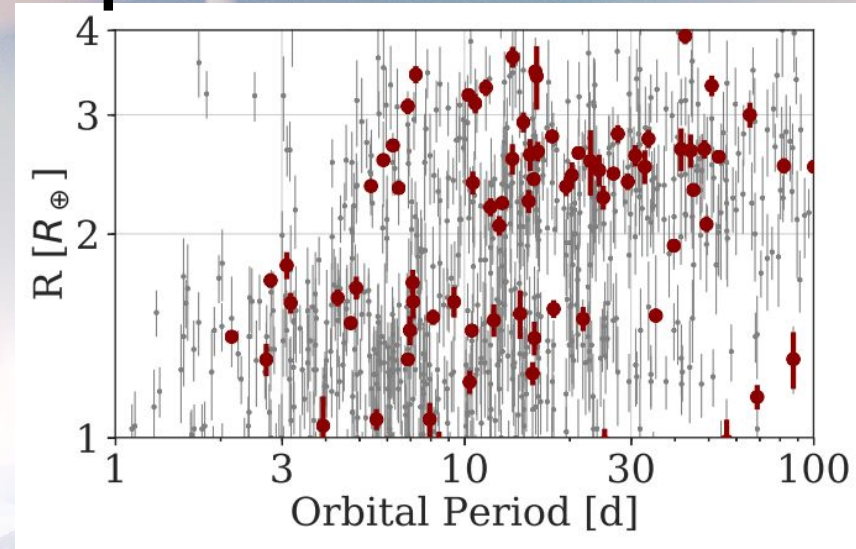
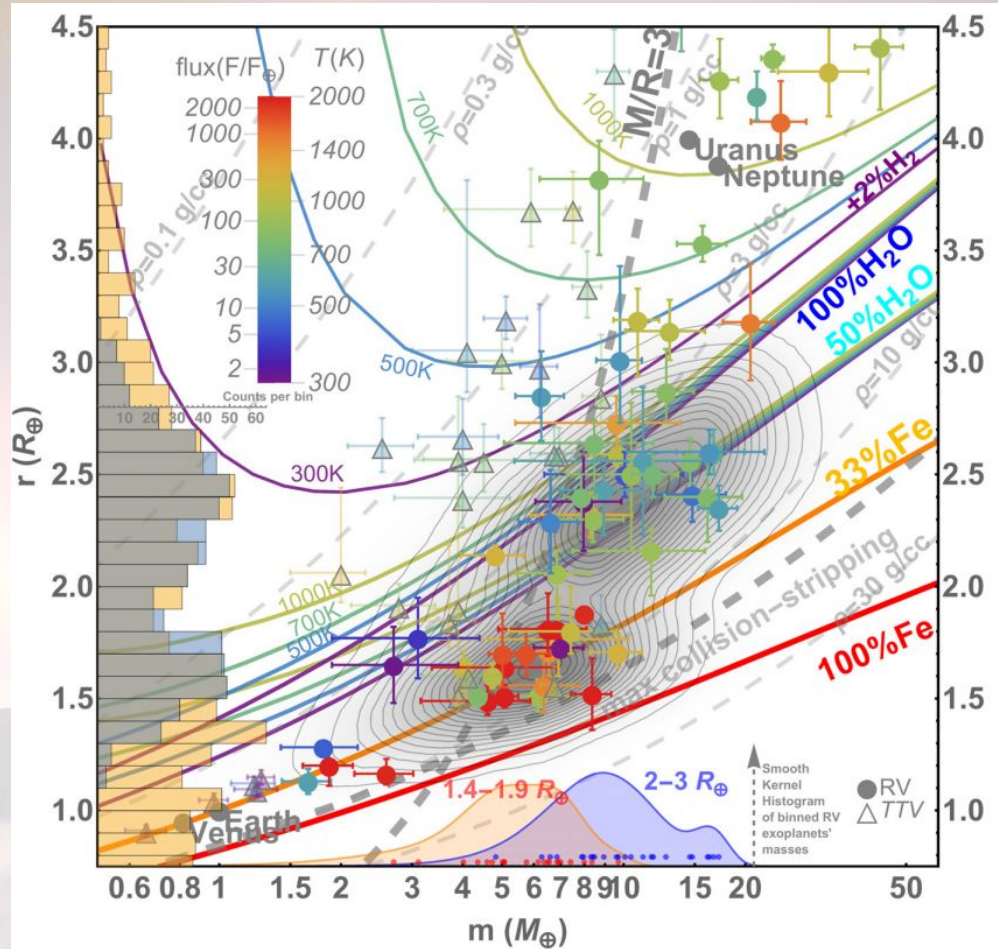
Vlastnosti exoplanet



Swain et al. 2019, ApJ, 881, 117

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

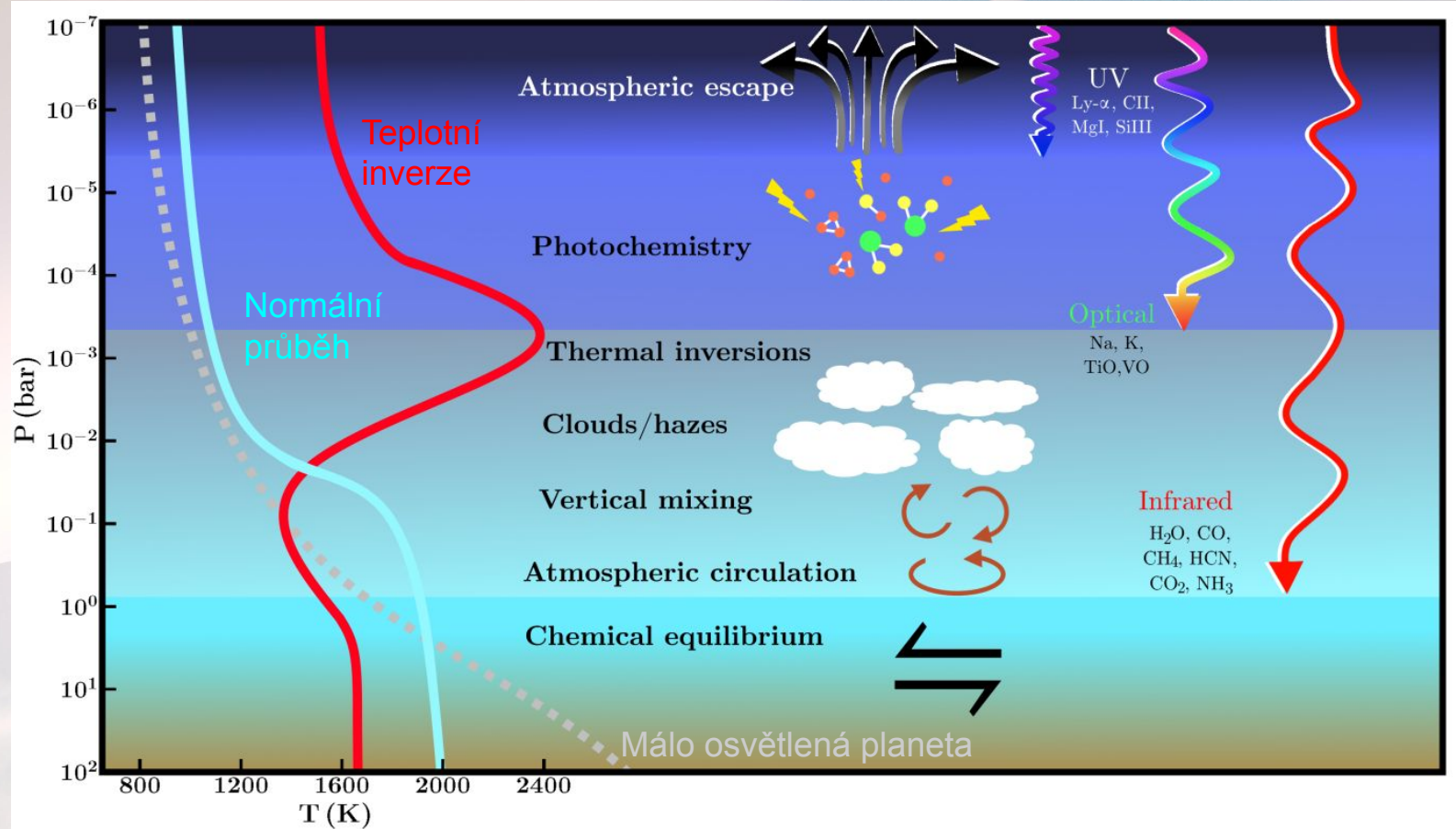
Vlastnosti exoplanet



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

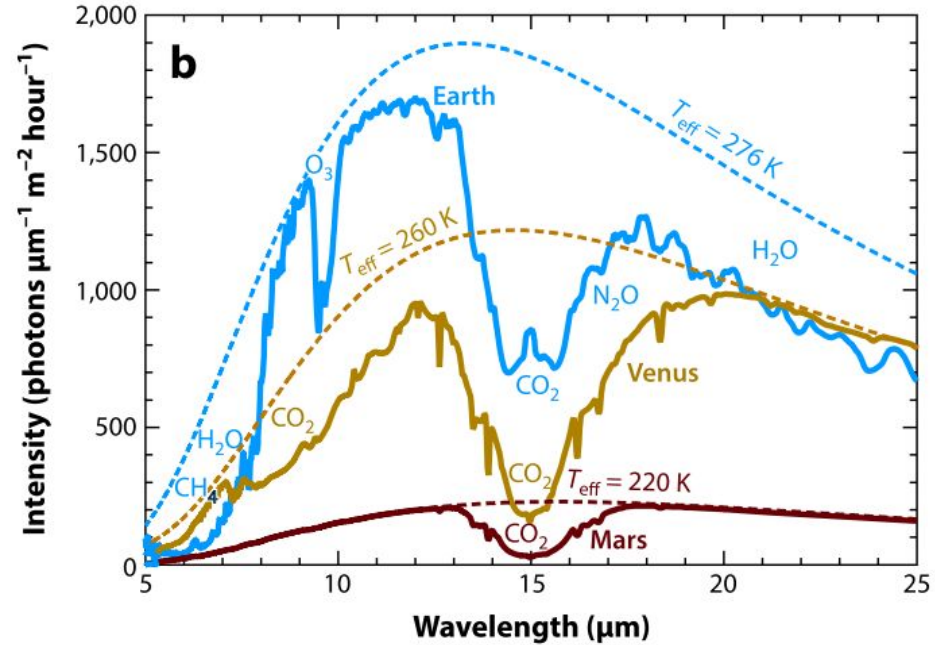
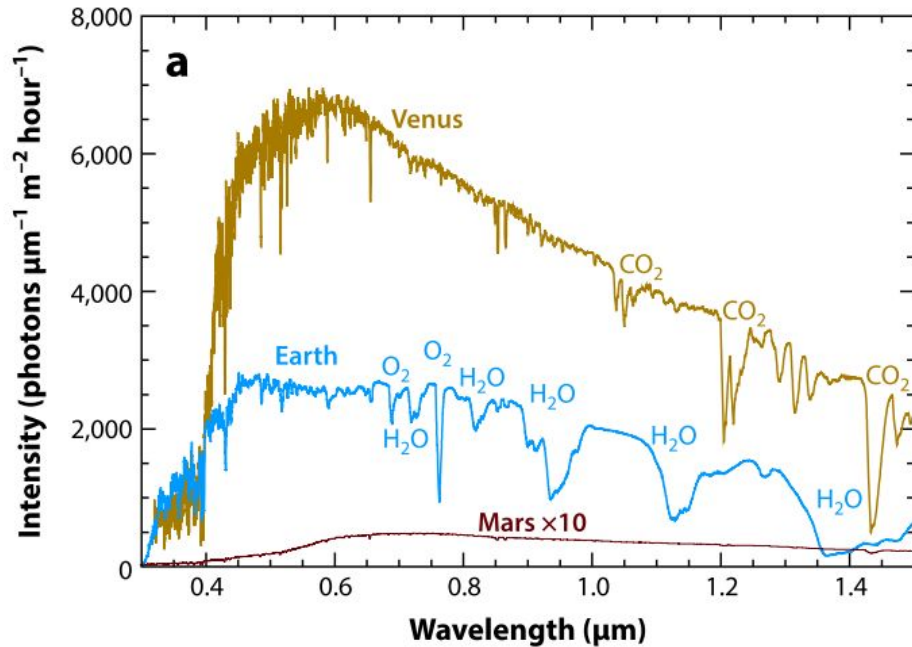
Atmosféry mohou být odfouknuty zářením hvězdy - vznik sub-Neptunů?
Gravitace vs. fotoevaporace

Atmosféry exoplanet



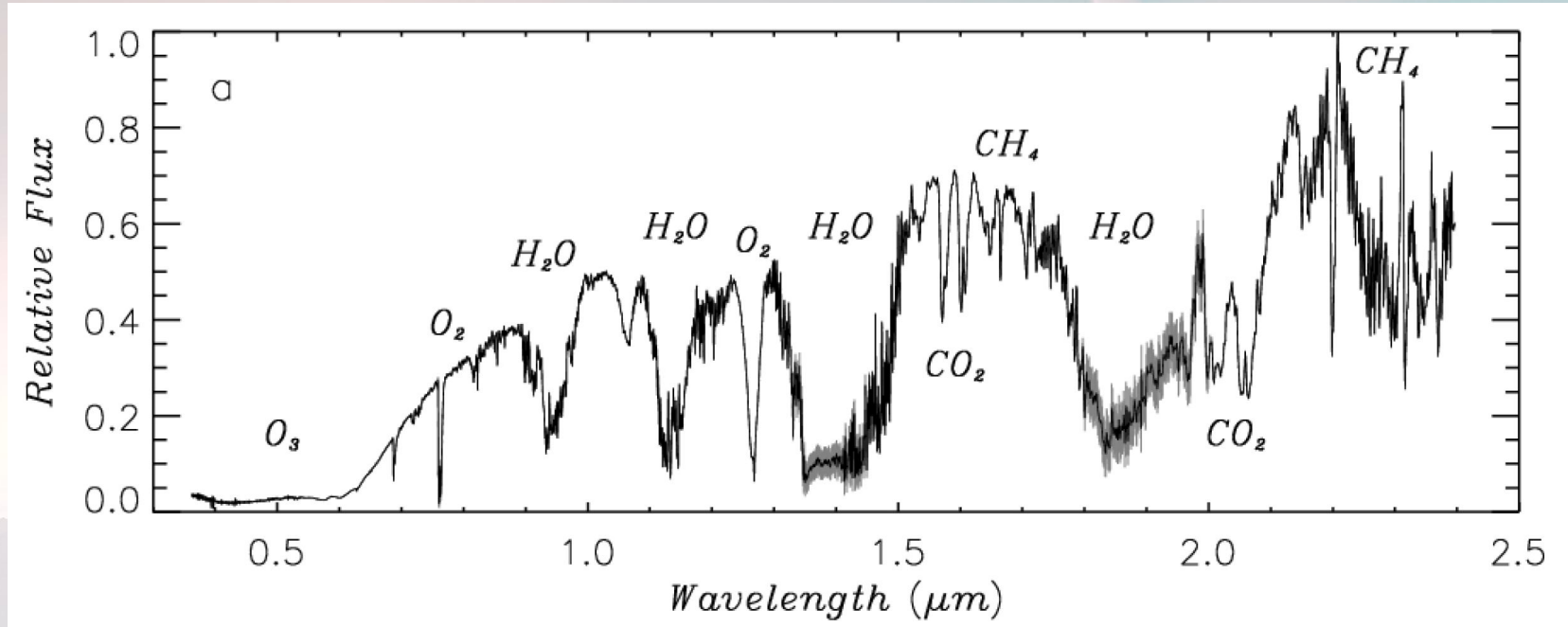
Atmosféry exoplanet

Spektra Terestrických planet Sluneční soustavy



Atmosféry exoplanet

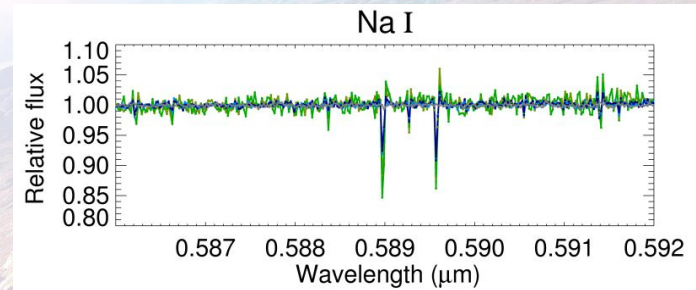
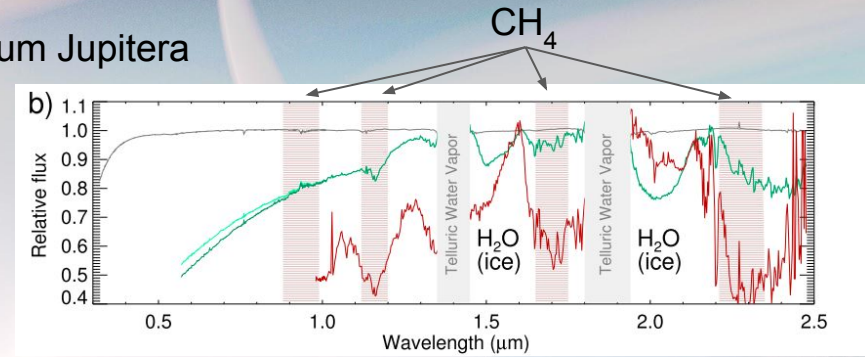
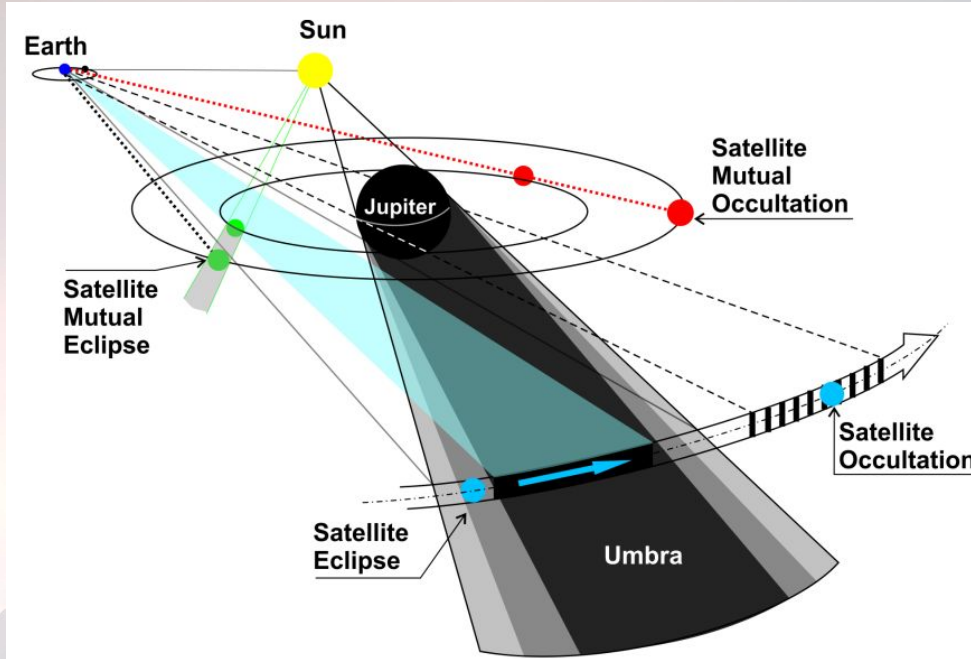
Transmisní spektrum Země - během zatmění Měsíce



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

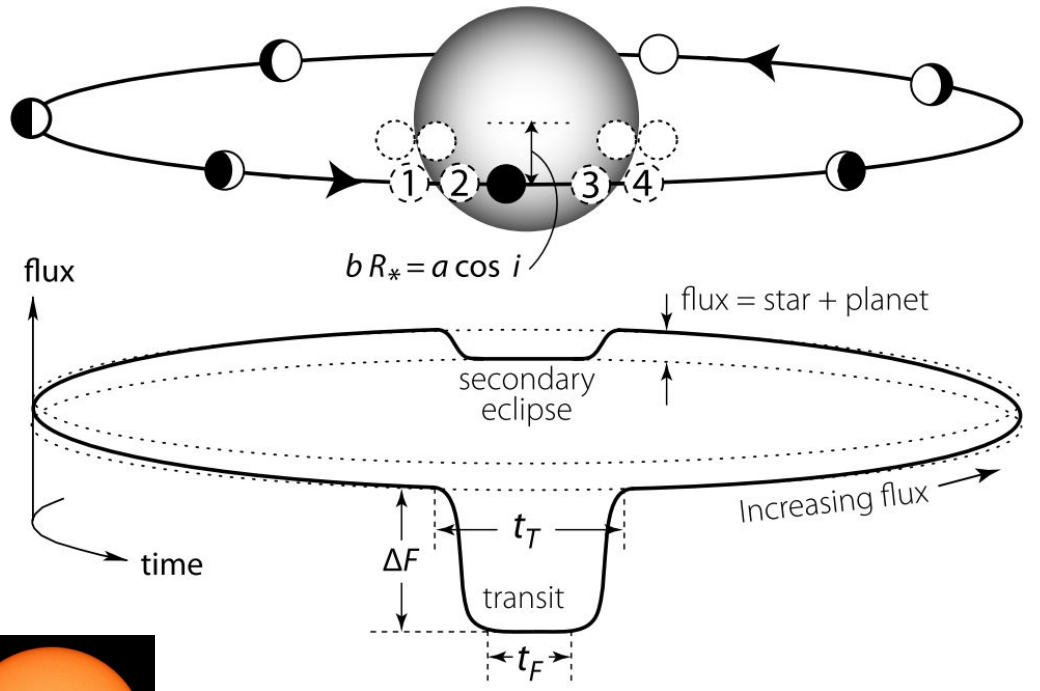
Atmosféry exoplanet

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

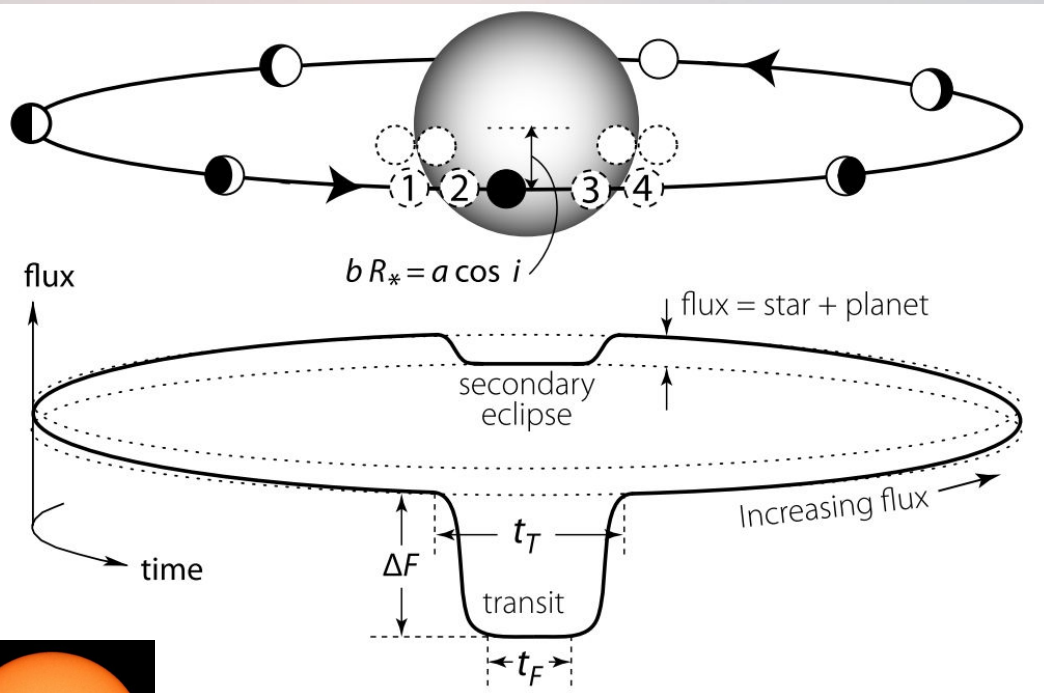


Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

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



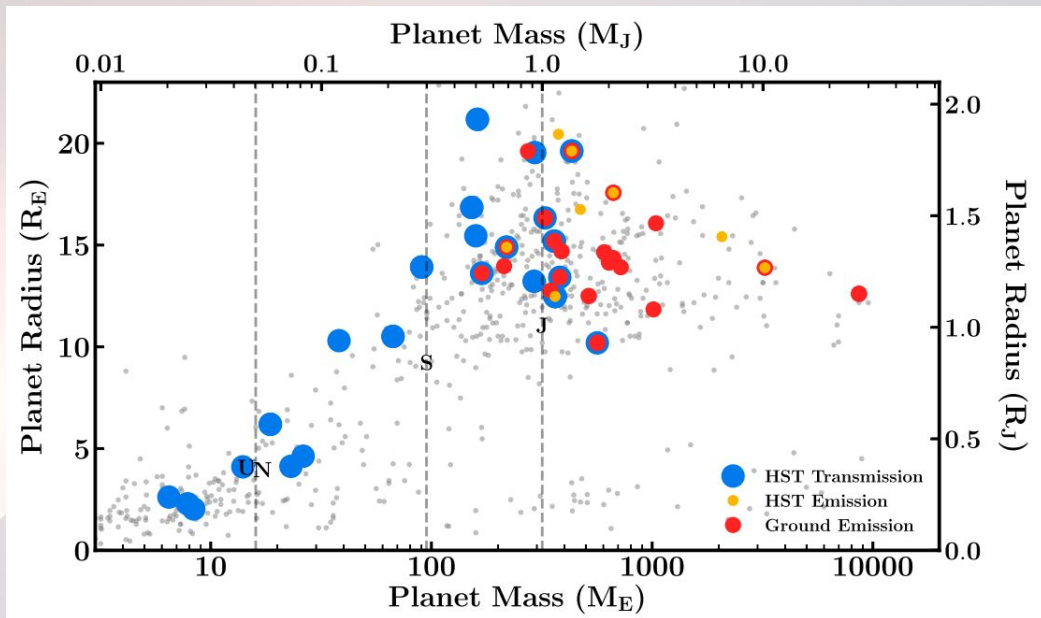
Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

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

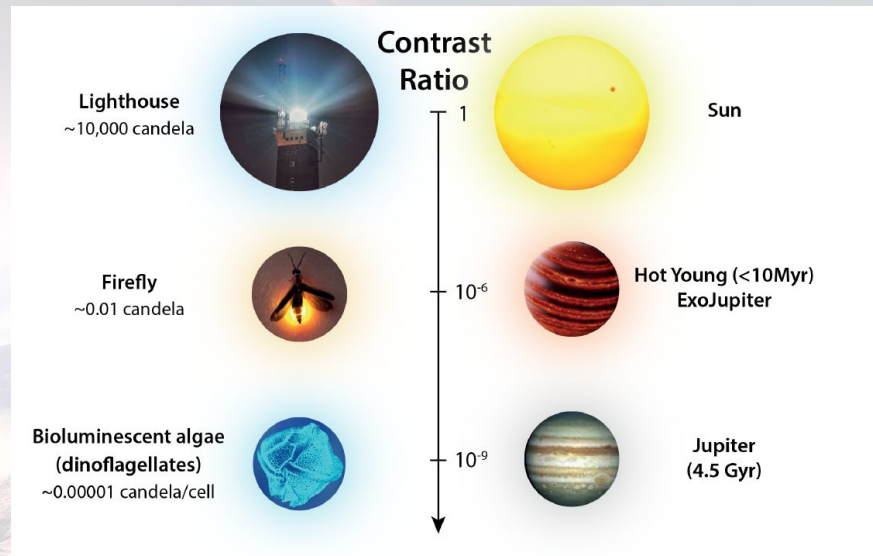
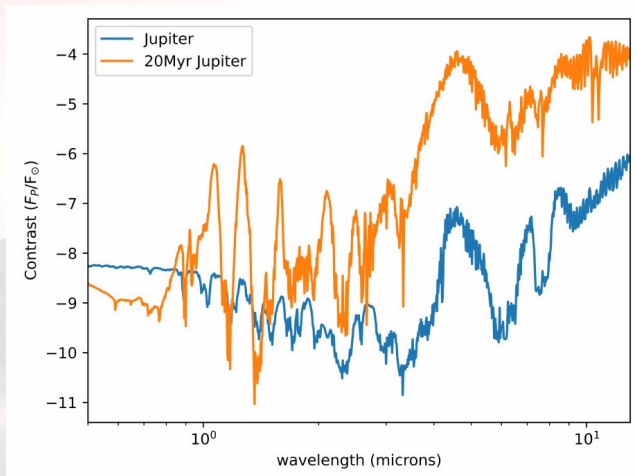
Atmosféry exoplanet

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 $4.5 \mu\text{m}$)



Follette 2023, PASP, 135i3001 - přímé zobrazování exoplanet - mladé planety září více díky reziduálnímu teplu

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 μm vs 1000 ppm na 4.5 μm)

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

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 výrazněji v infračervené oblasti (např. HD 209458: $F_P/F_* \sim 50$ ppm na $1 \mu\text{m}$ vs 1000 ppm na $4.5 \mu\text{m}$)

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

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



Tvar a průběh celkové fázové světelné křivky

Atmosféry můžeme zkoumat:

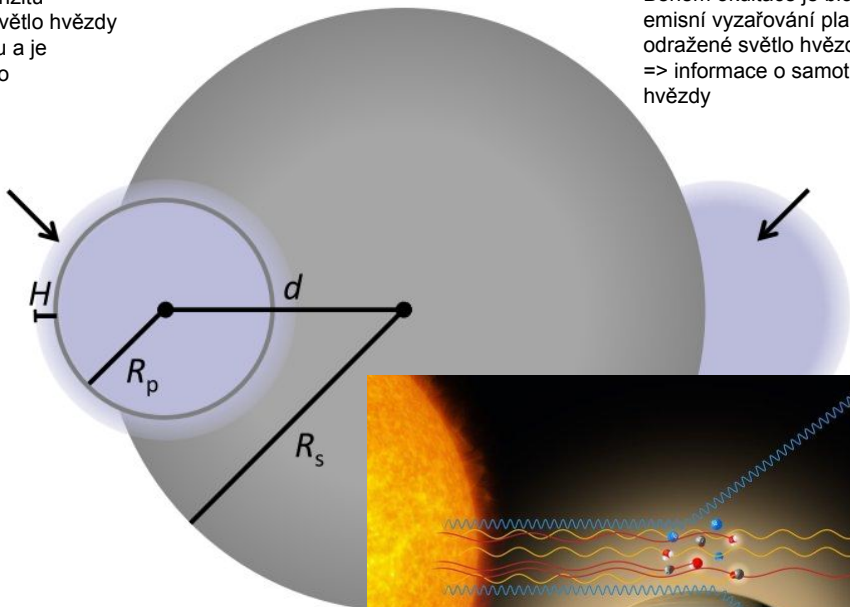
1. Při tranzitu (transmisní spektroskopie - složení, struktura)
2. Při okultaci (emisní spektroskopie - složení, teplotní rozložení)
3. Mapováním okultace a tranzitu (struktura, teplotní rozložení)
4. Studium během celého oběhu (struktura, teplotní rozložení, rozdíl mezi denní a noční stranou, proudění)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

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

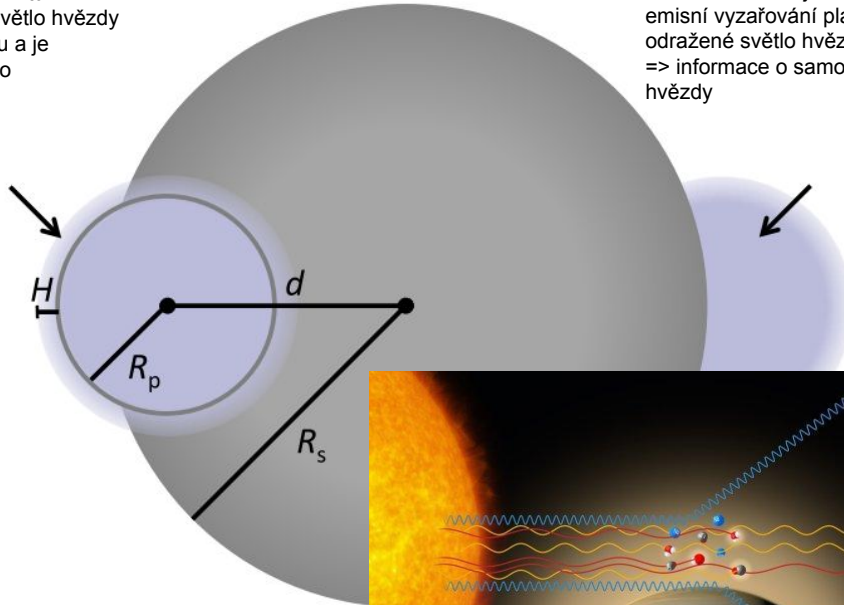
Gravitační zrychlení

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:

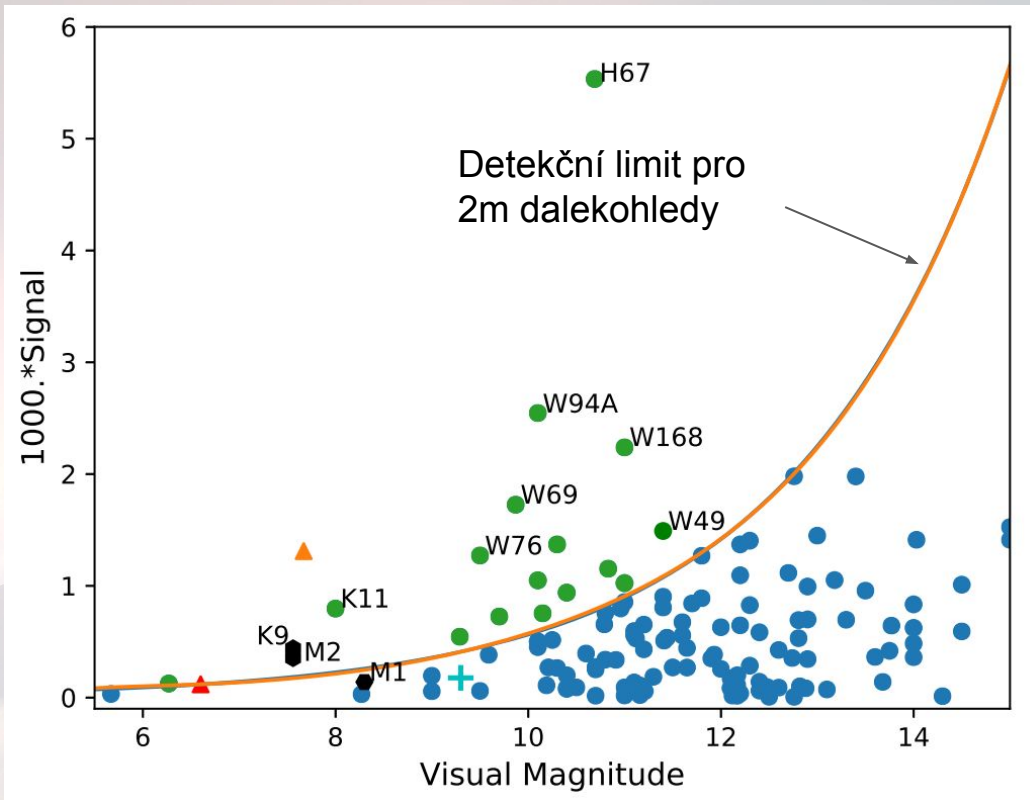
$$\delta_{\lambda} = \frac{(R_P + nH)^2}{R_*^2} - \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \approx \frac{2nR_P H}{R_*^2}$$

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:

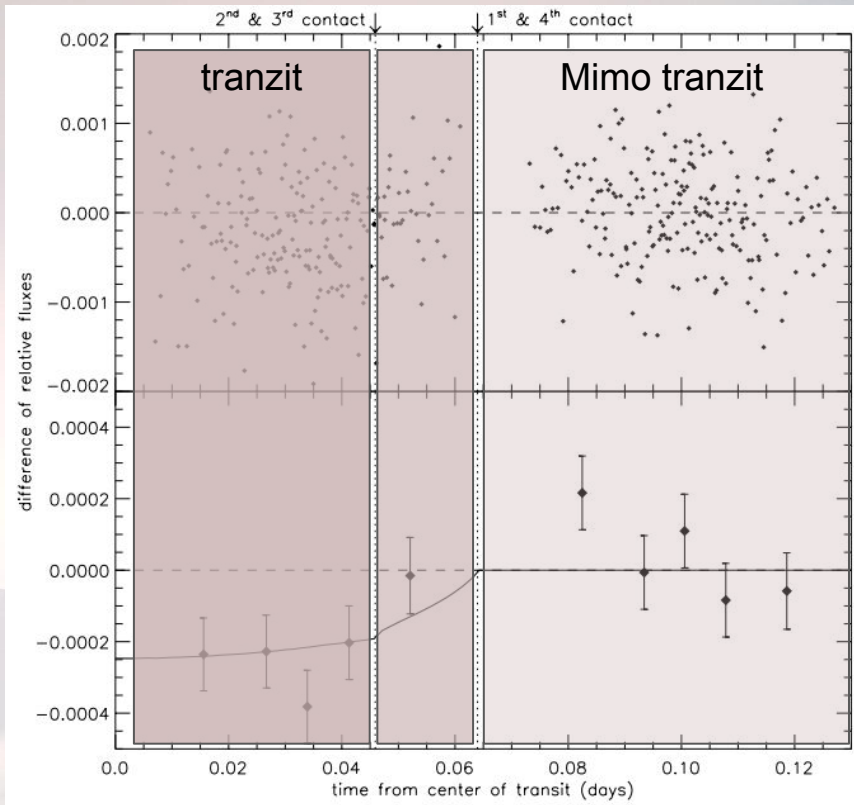
$$\delta_{\lambda} = \frac{(R_P + nH)^2}{R_*^2} - \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2 \approx \frac{2nR_P H}{R_*^2}$$

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

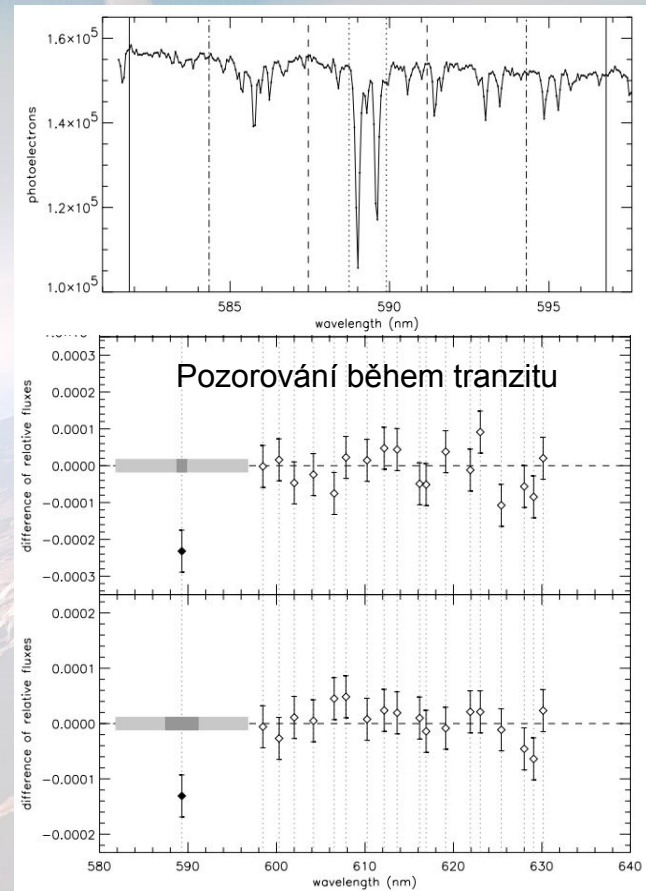
Pro horké Jupitery $\delta \sim 0.1\%$, pro planety podobné Zemi $\delta \sim 10^{-3-4}\%$

Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách

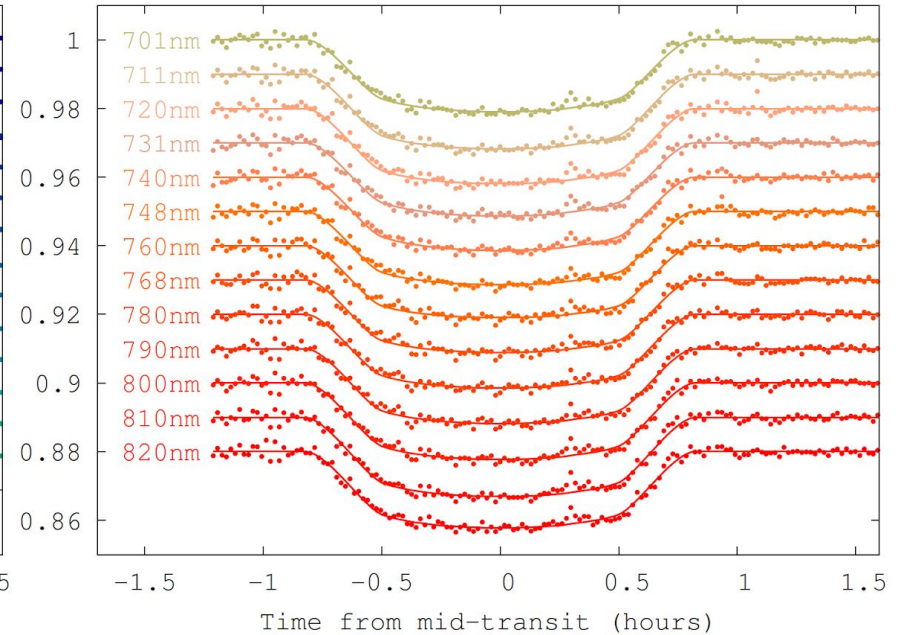
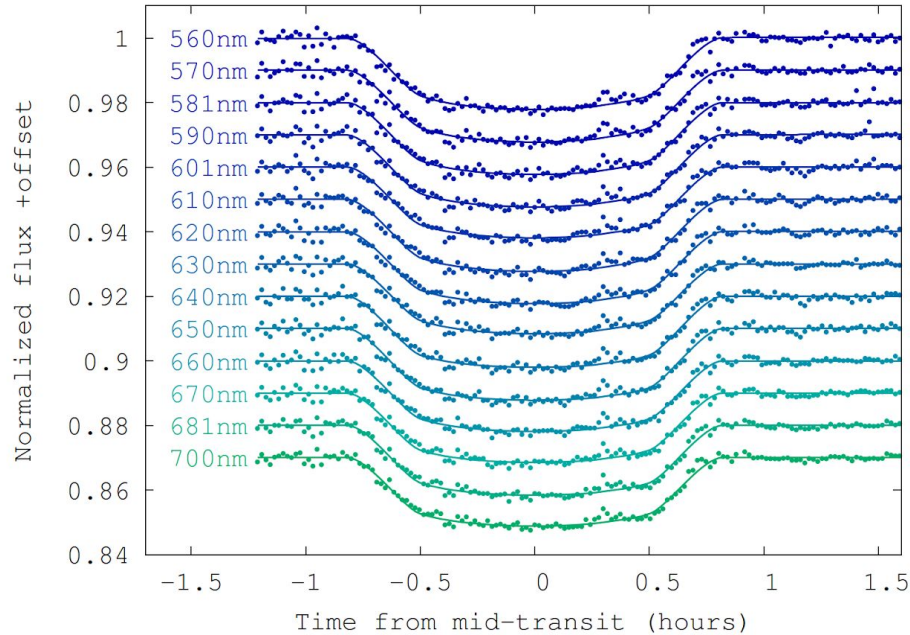


Charbonneau et al. 2002, ApJ, 568, 377 (sodík u HD 209458, HST STIS)



Transmisní spektroskopie

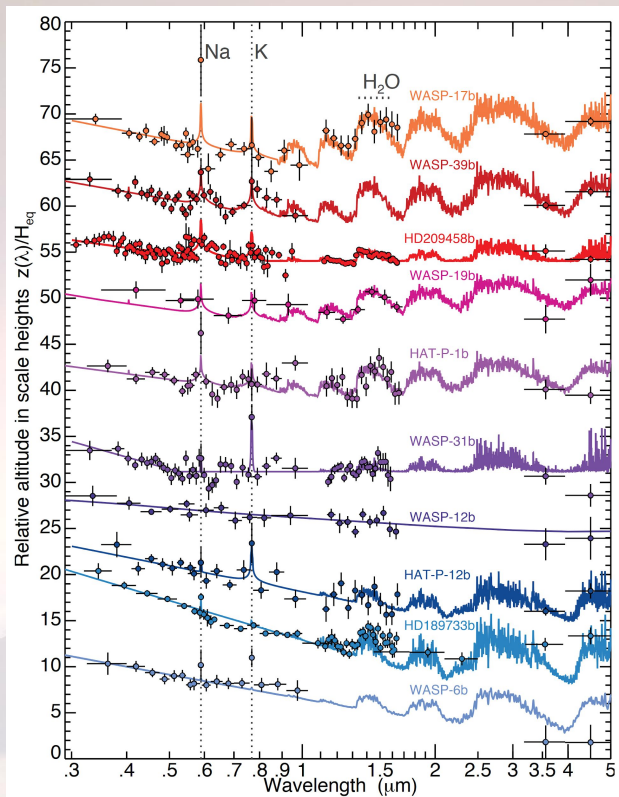
Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



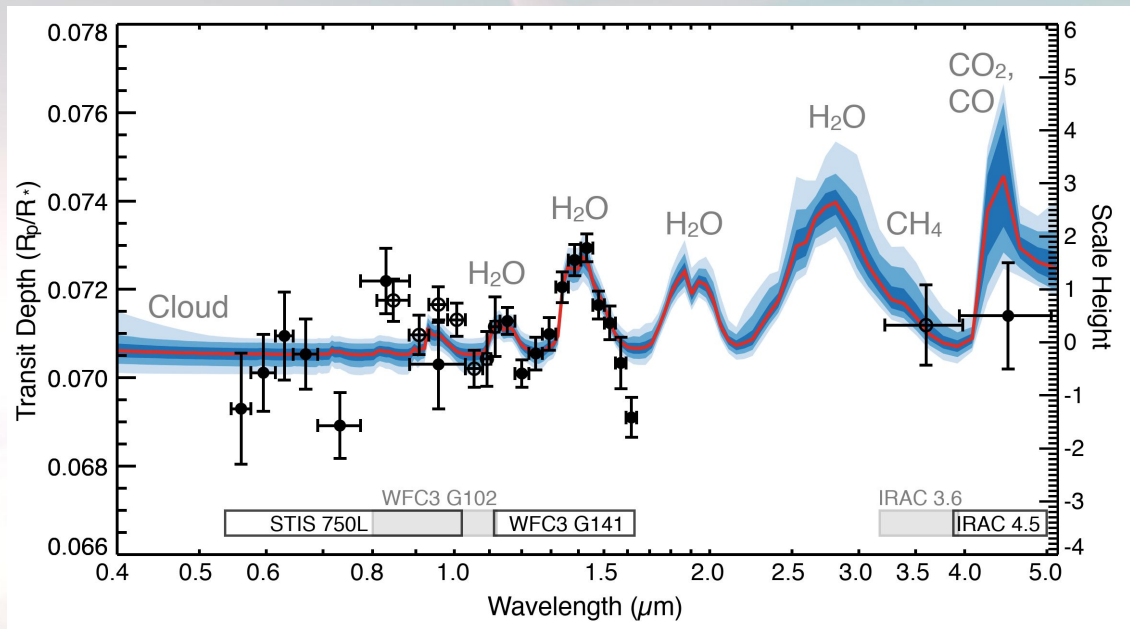
Sedaghati et al. 2015, A&A, 576, 11 - WASP-19 b, VLT

Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



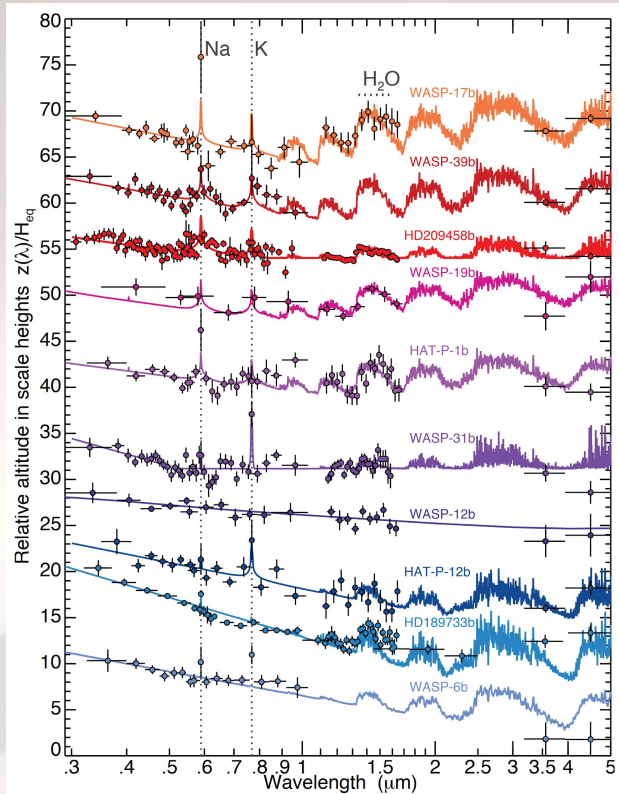
Singh et al. 2016, Nature, 529, 59
detekce atmosféry z HST a Spitzer



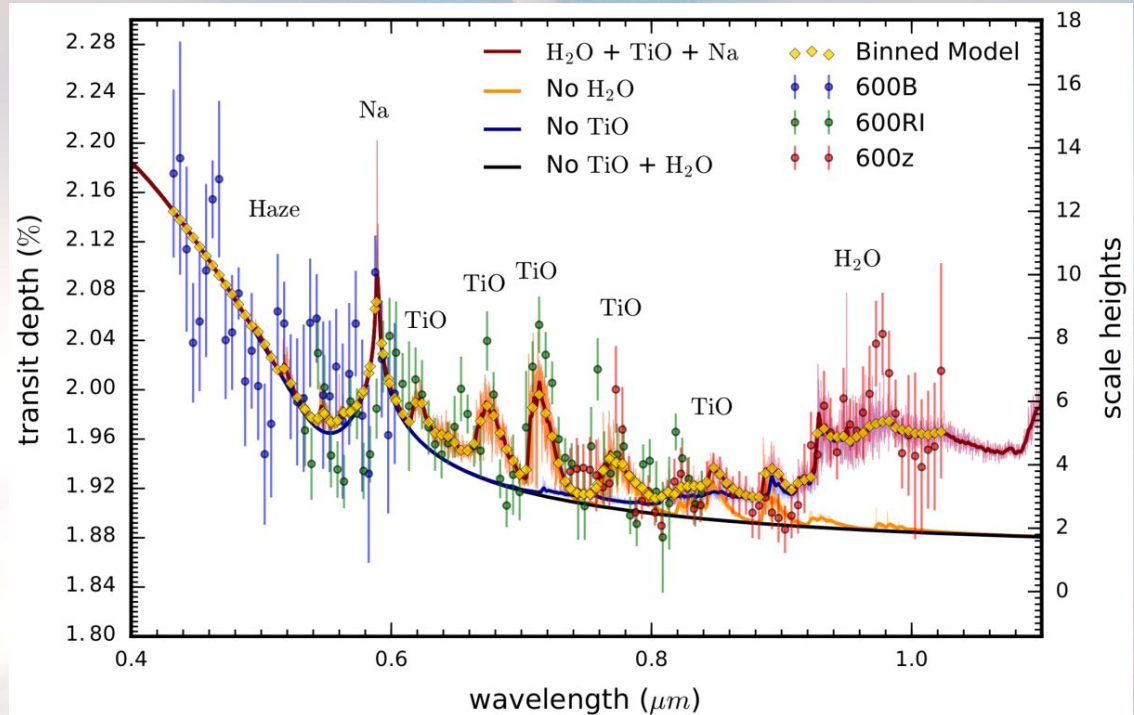
Wakeford et al. 2017, Science, 356, 628
detekce vody v atmosféře HAT-P-26 b, HST+Spitzer

Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



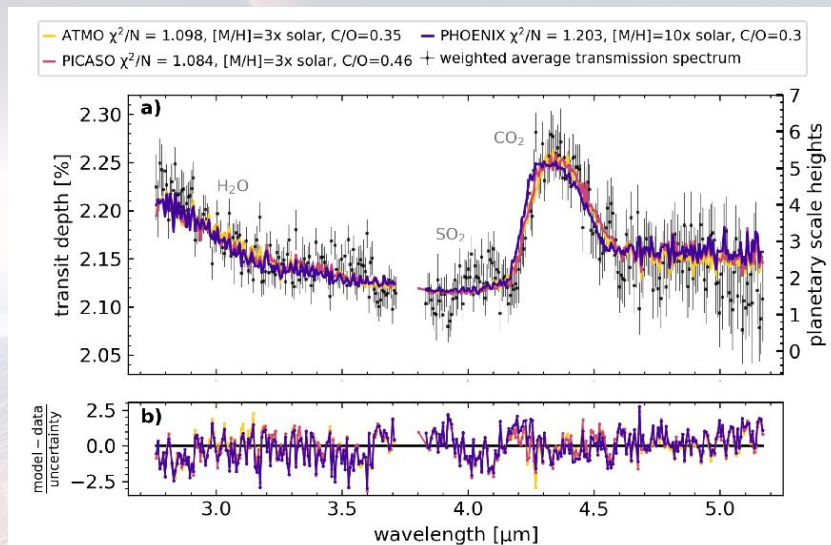
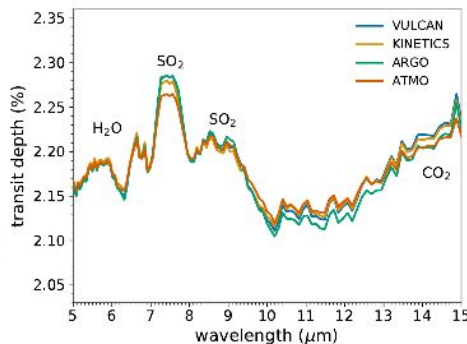
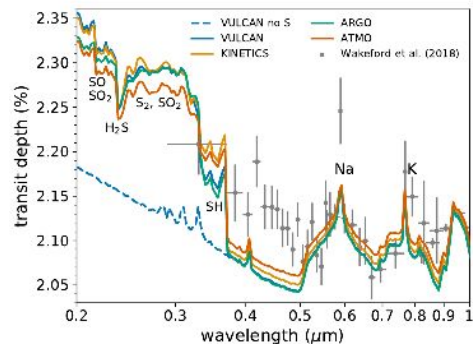
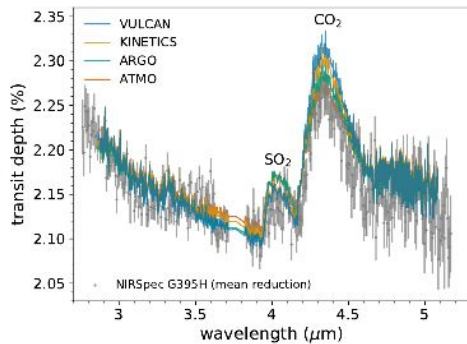
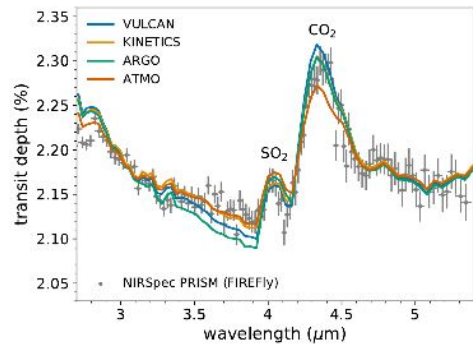
Singh et al. 2016, Nature, 529, 59
detekce atmosfér z HST a Spitzer



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

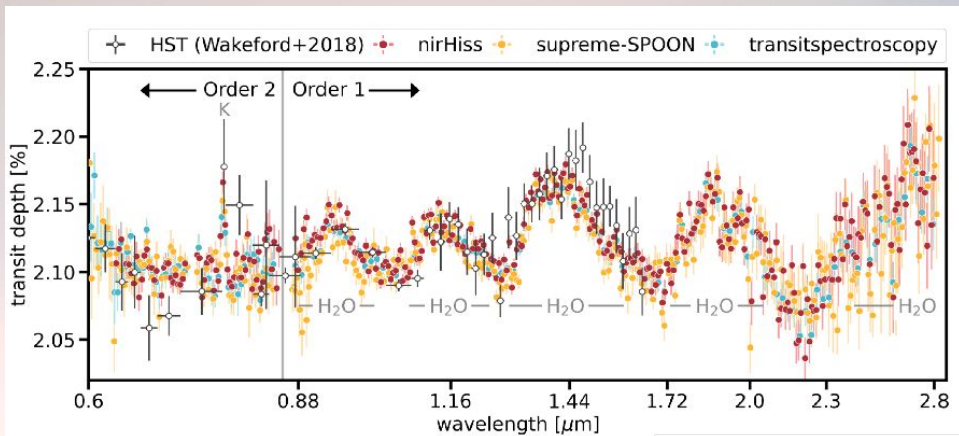


Alderson et al. 2022, arXiv:2211.10488, WASP-39 b, NIRSpect@JWST

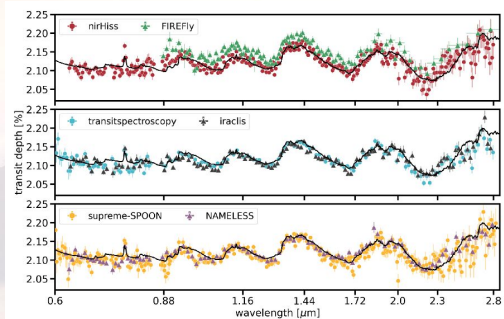
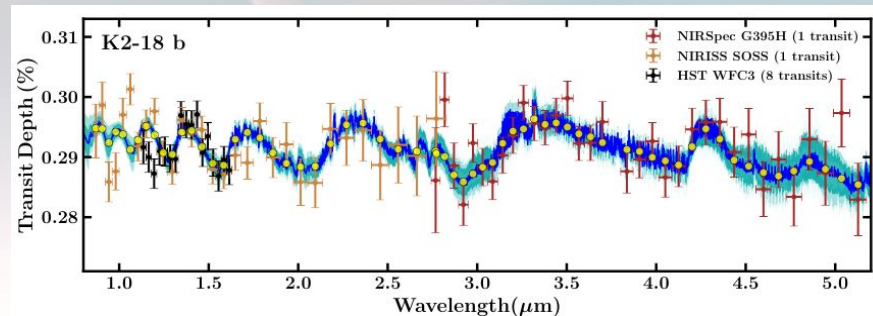
Tsai et al. 2022, arXiv:2211.10490, fotochemie v atmosféře WASP-39 b, NIRSpect@JWST

Transmisní spektroskopie

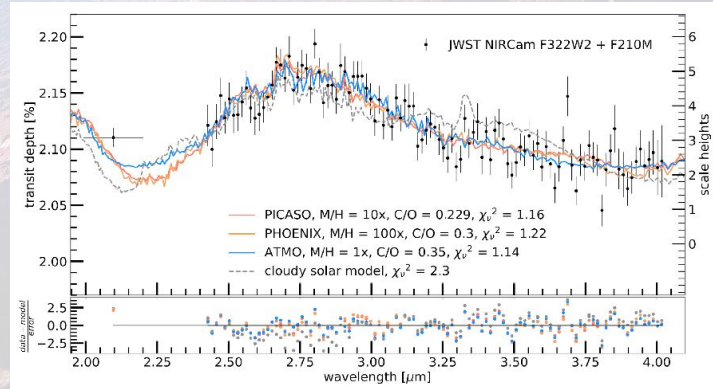
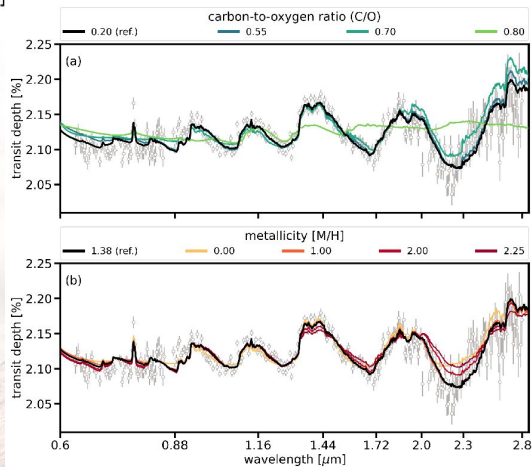
Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách



Madhusudhan et al. 2023, 2023arXiv230905566M



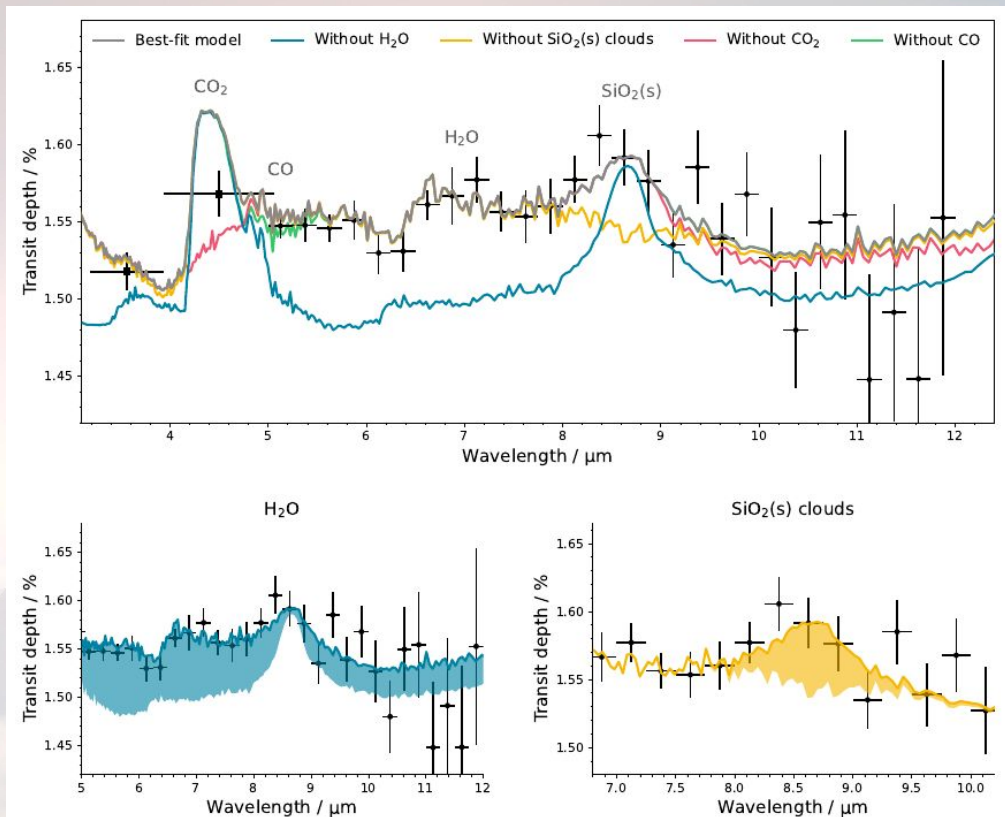
Feinstein et al. 2022, arXiv:2211.10493, WASP-39 b, NIRISS@JWST



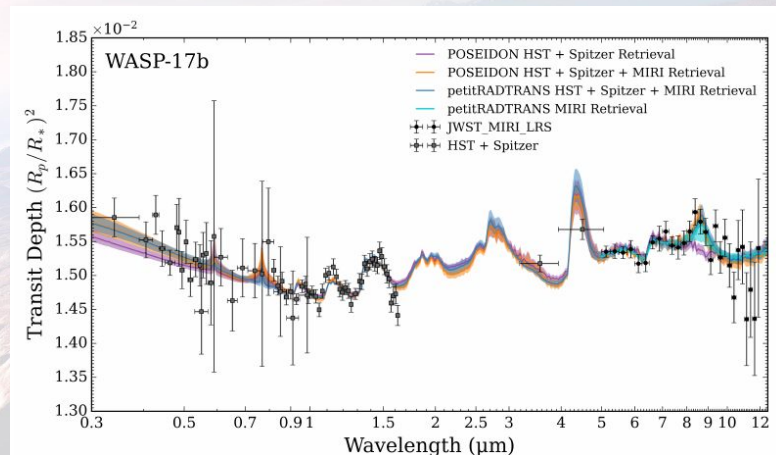
Ahrer et al. 2022, arXiv:2211.10489, WASP-39 b, NIRCams@JWST

Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách

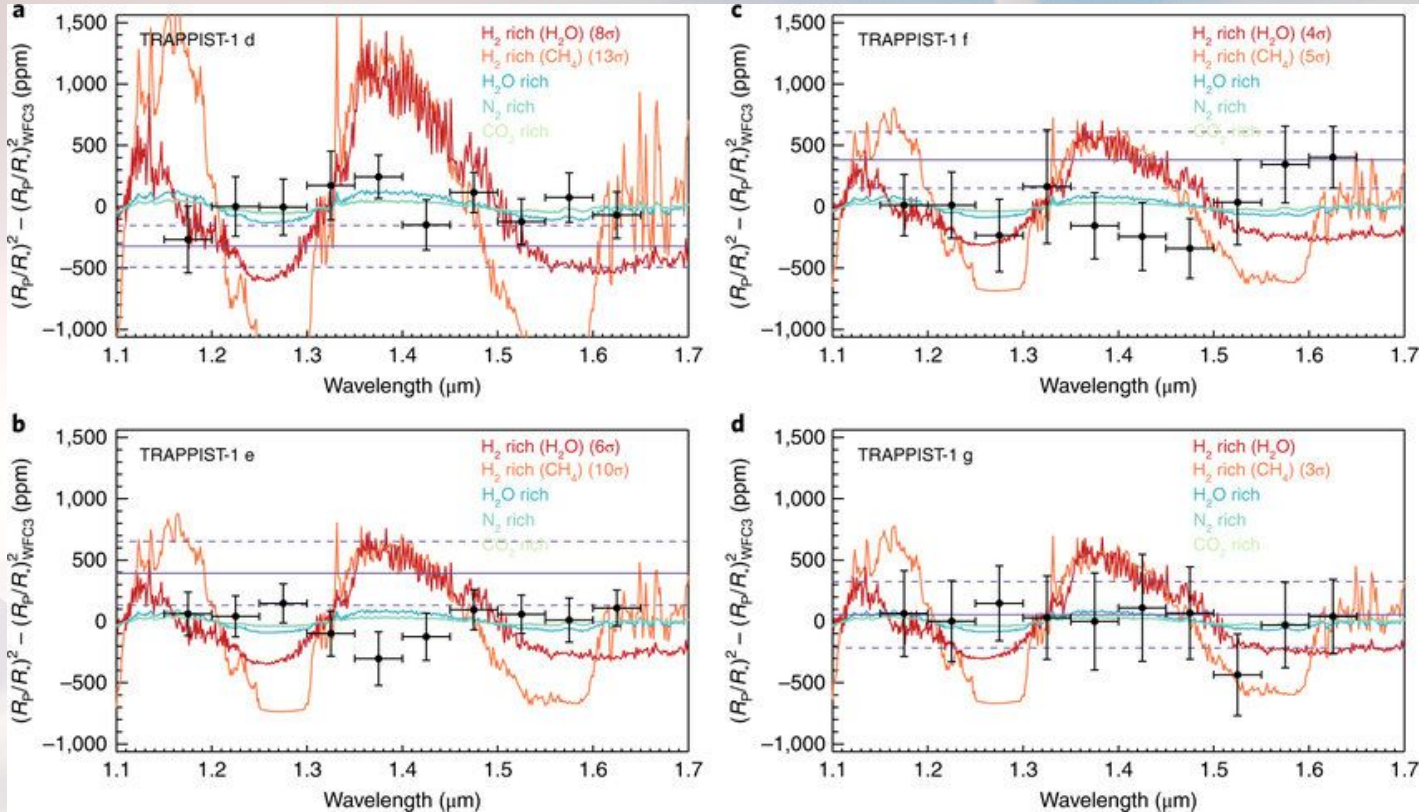


Grant et al. 2023, ApJ, 956, 29 -
křemíková oblaka v atmosféře?
MIRI JWST



Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách

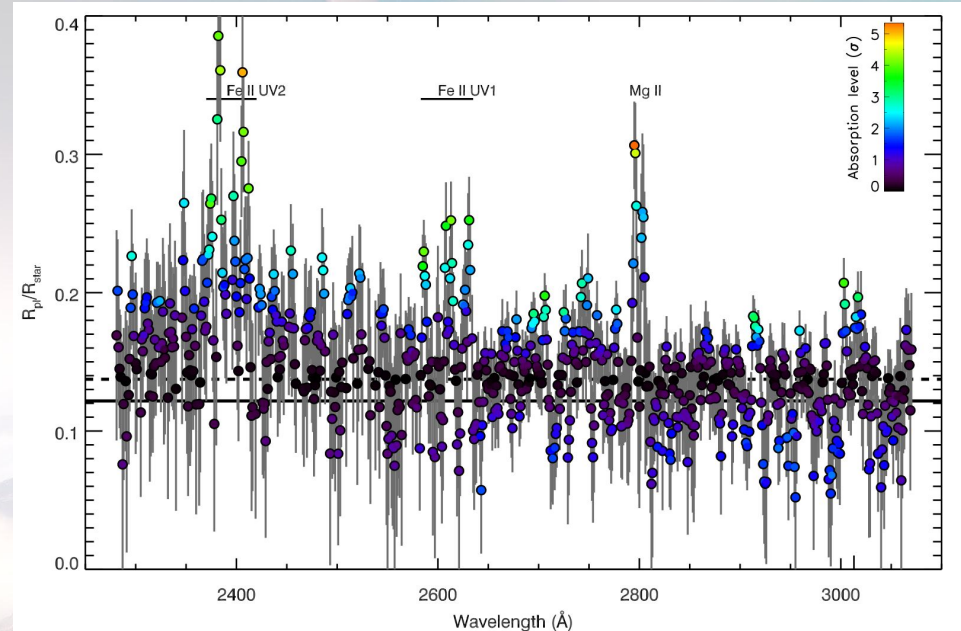
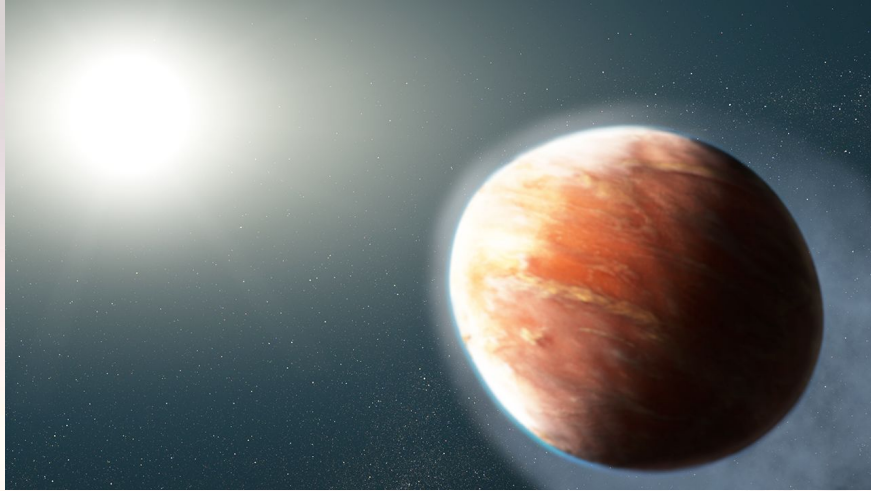


de Wit et al. 2018, Nature, 2, 214

Transmisní spektrum planet systému Trappist-1 dalekohledem Spitzer

Transmisní spektroskopie

Nízkodisperzní spektroskopie => studium hloubky tranzitu na různých vlnových délkách

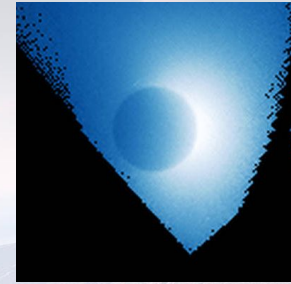
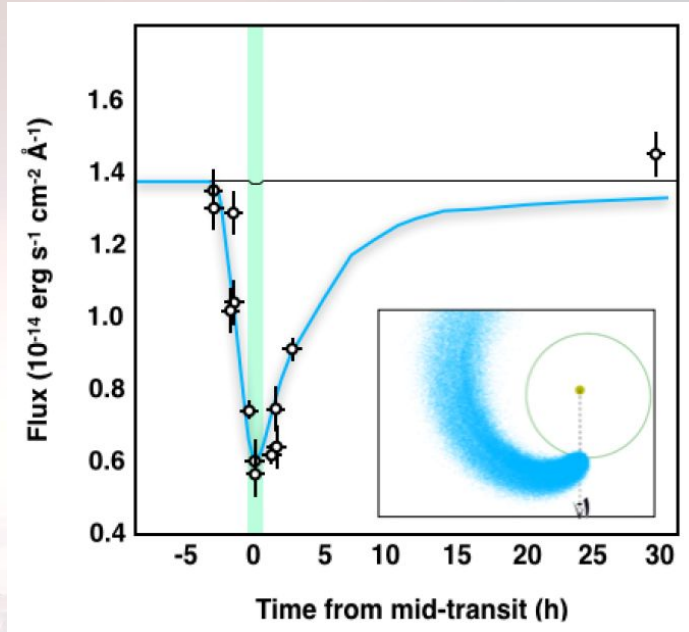


Sing et al. 2019, AJ, 158, 91

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



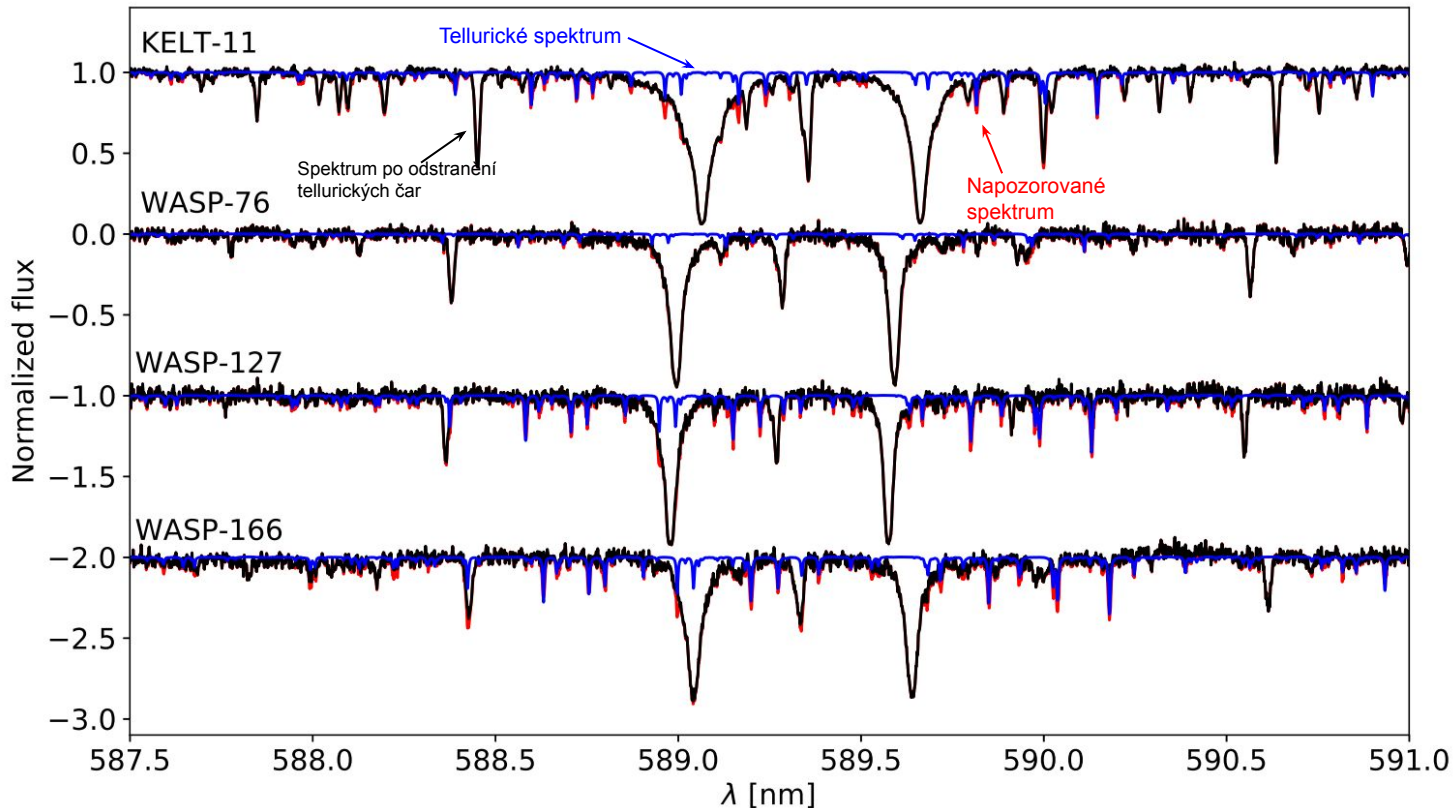
Ehrenreich et al. 2015, Nature, 522, 7557

GJ 436 b - HST - únik vodíku z její atmosféry (10⁸⁻⁹ g/s) - studium Ly α

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



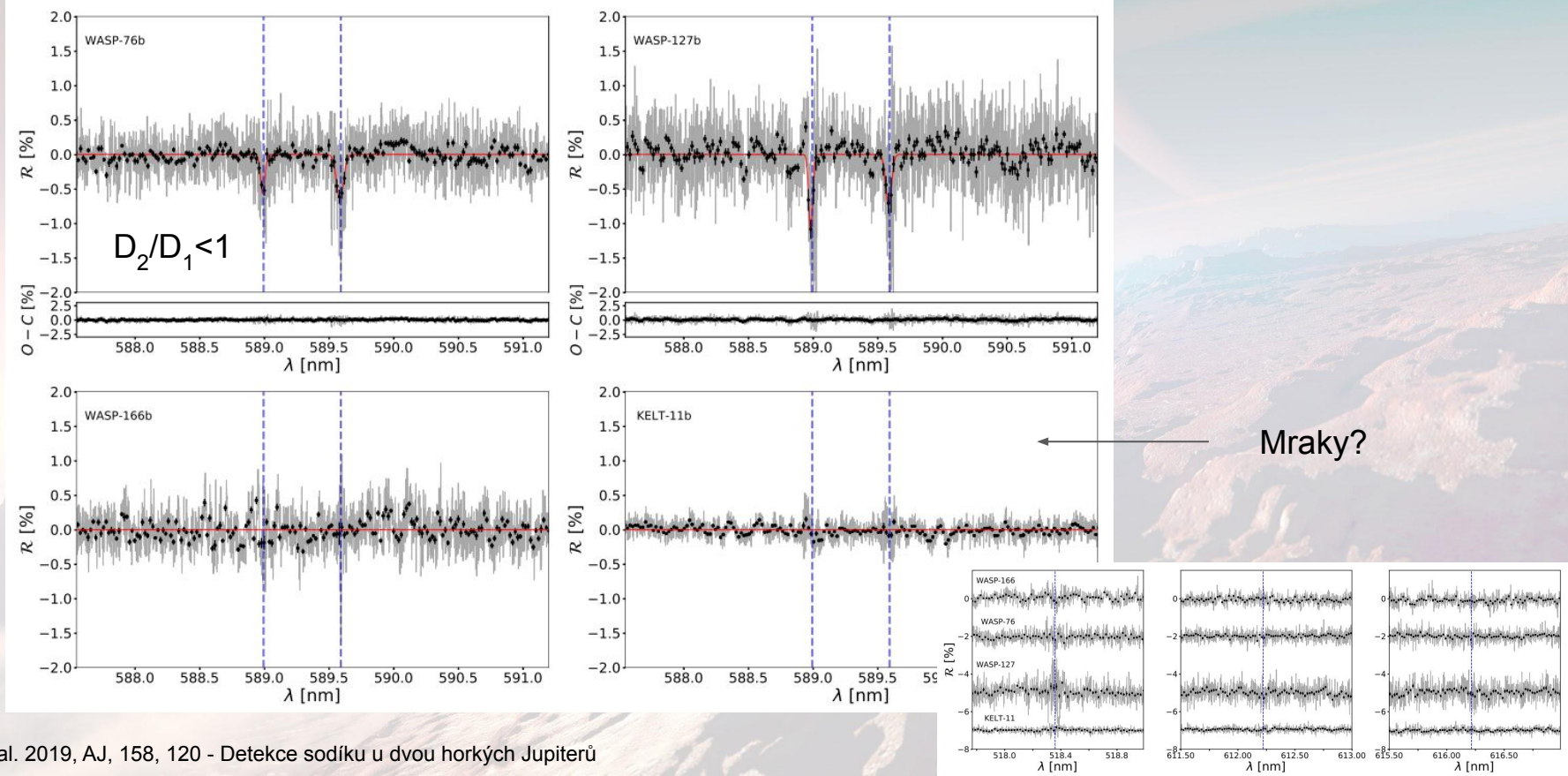
1. Posunutí spekter do barycentra Sluneční soustavy
2. Tellurická korekce (model->posun->škálování ->odečtení)
1. Sesazení spekter
2. Odečtení in- a out-of-transit spekter
3. Posunutí spekter do soustavy planety
4. Sesazení

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

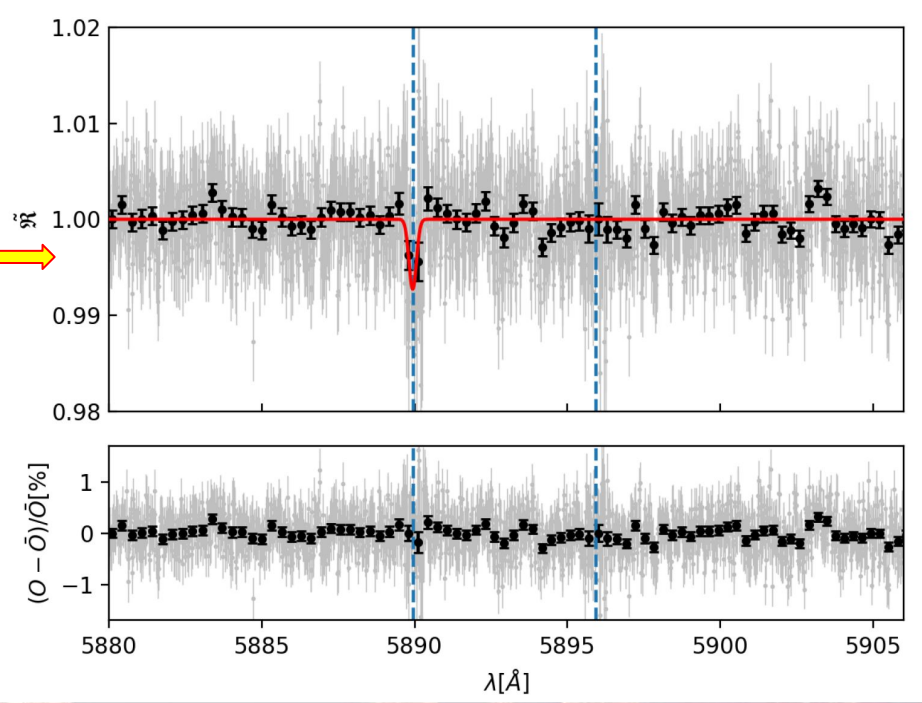
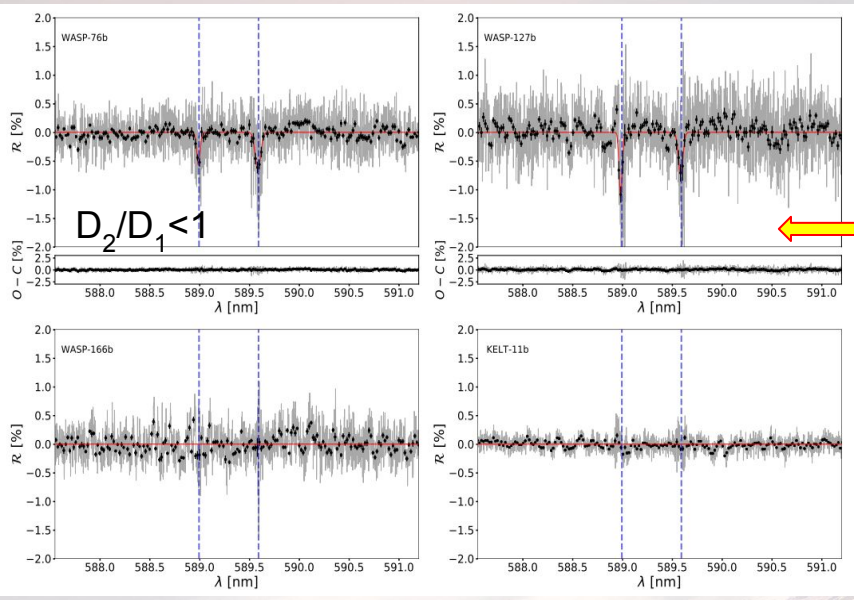


Mraky?

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



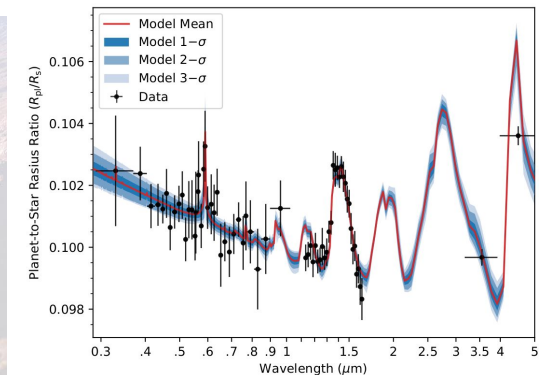
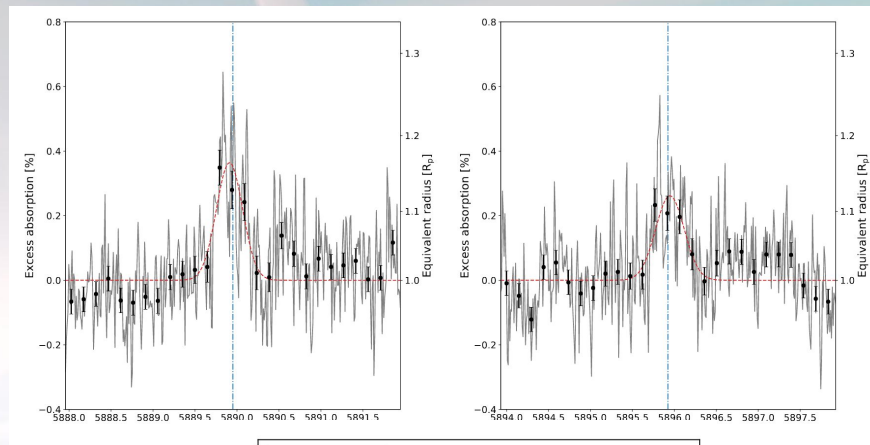
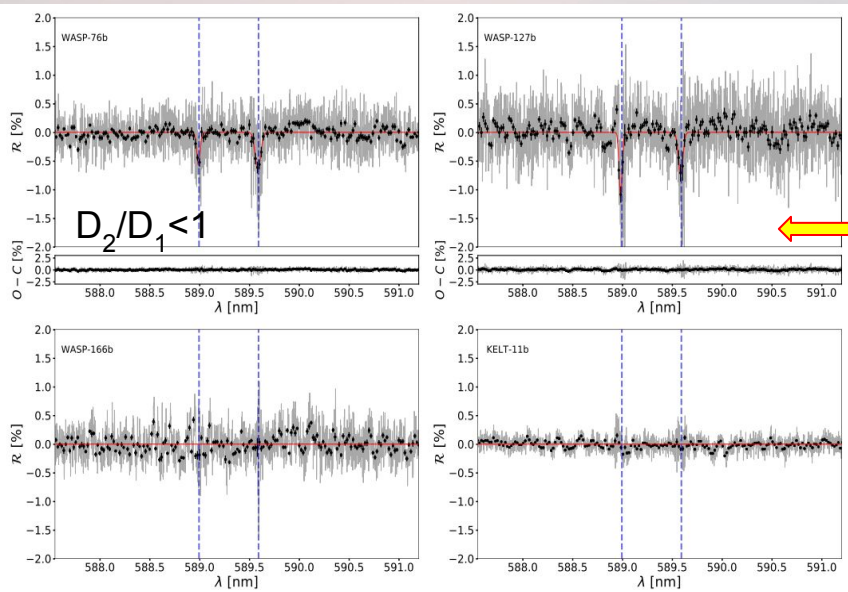
Žák et al. 2019, AJ, 158, 120 - Detekce sodíku u dvou horkých Jupiterů

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



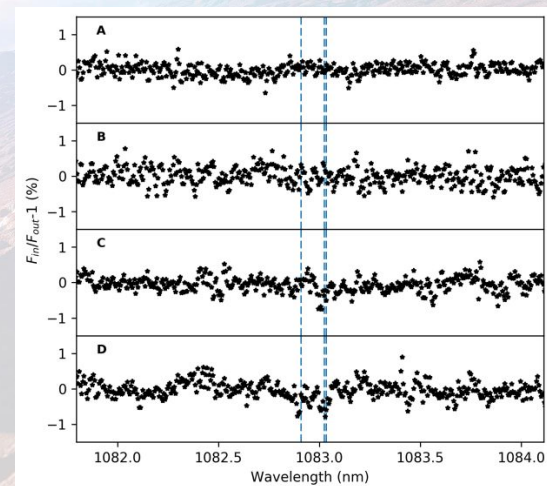
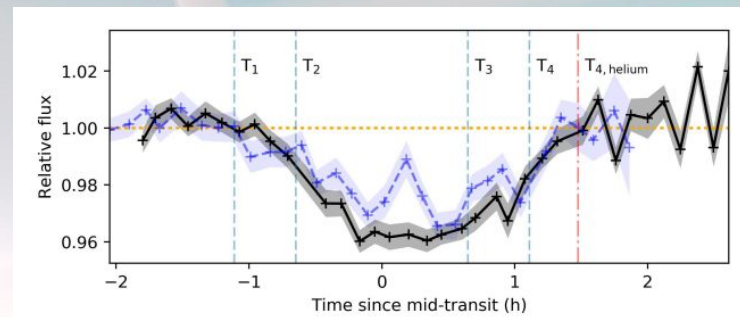
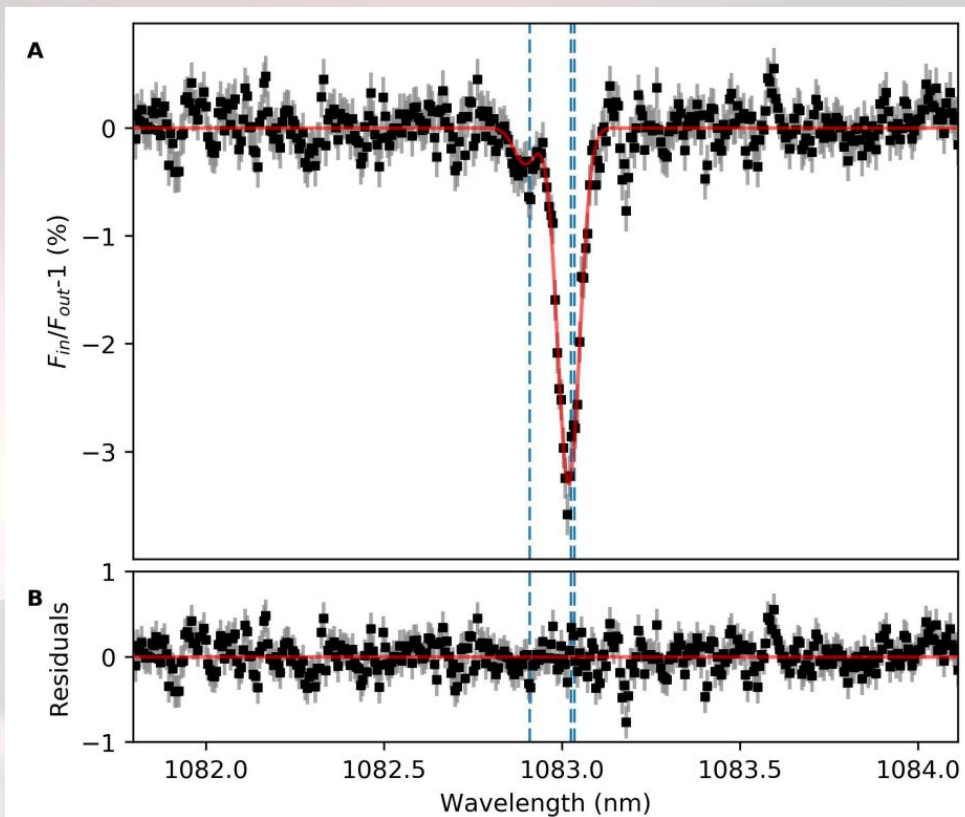
Žák et al. 2019, AJ, 158, 120 - Detekce sodíku u dvou horkých Jupiterů

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

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

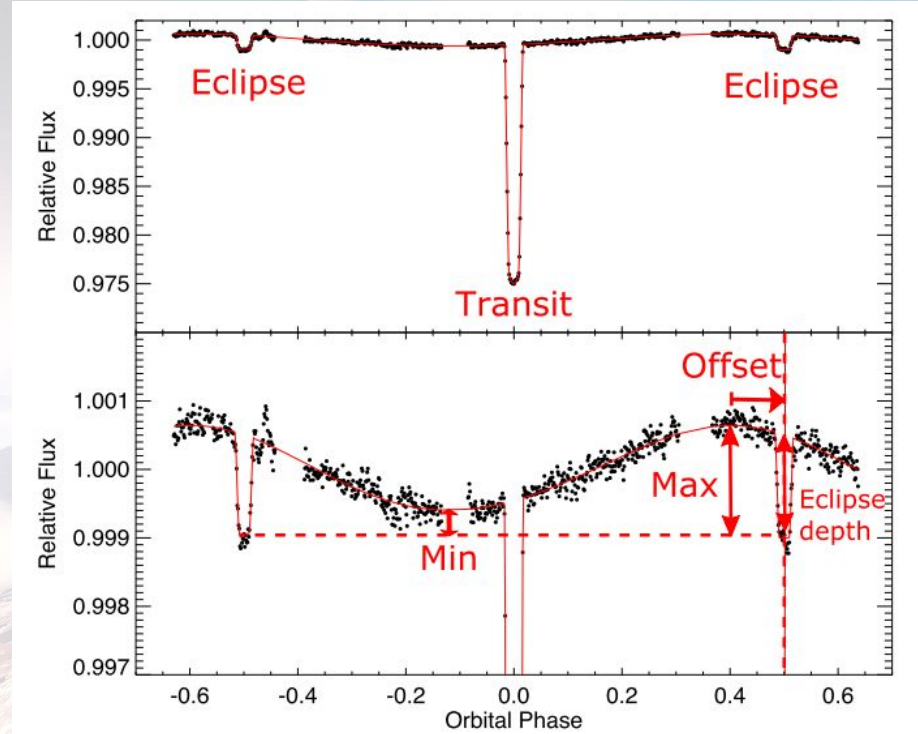
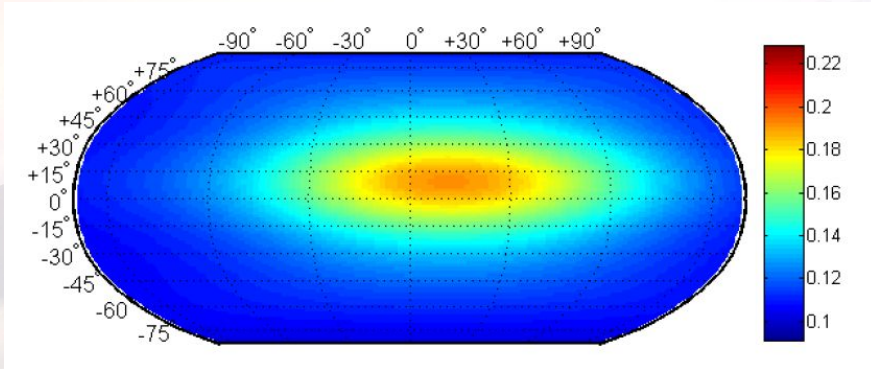
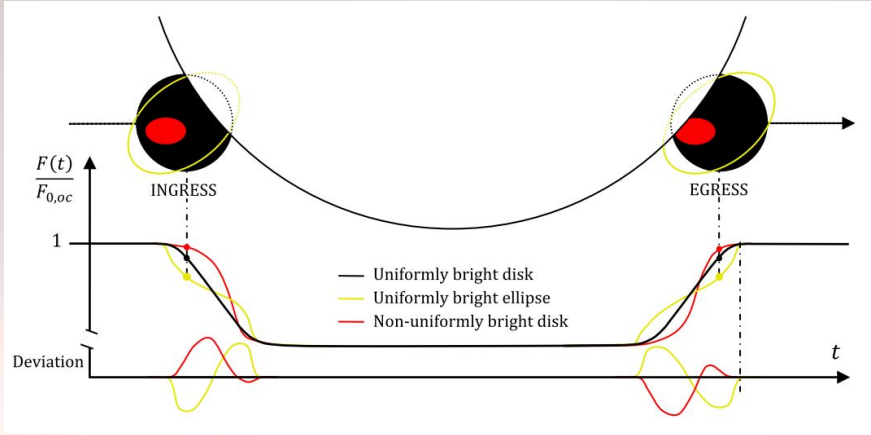
Transmisní spektroskopie

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



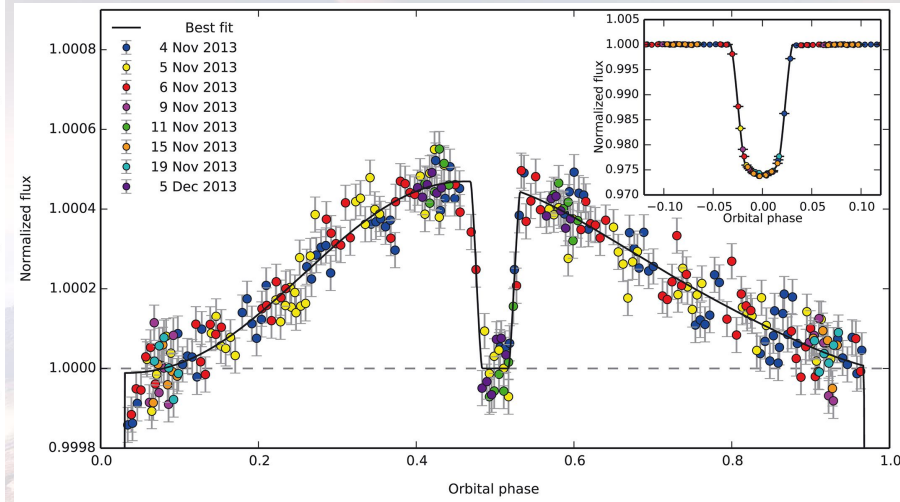
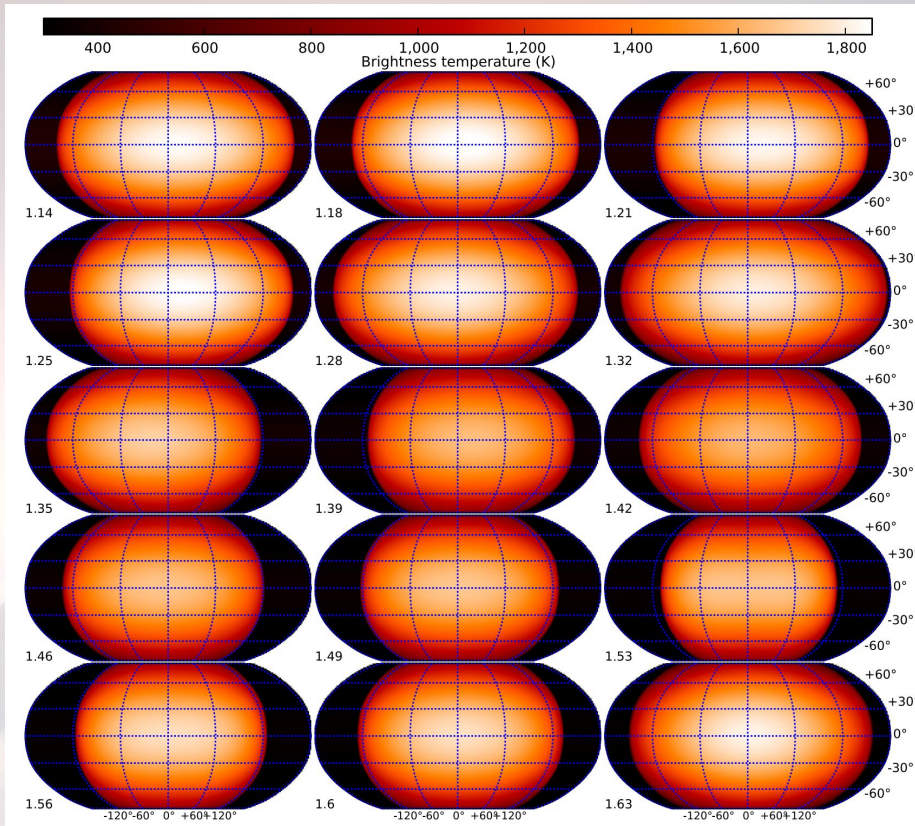
Sekundární tranzity (okultace)

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



Sekundární tranzity (okultace)

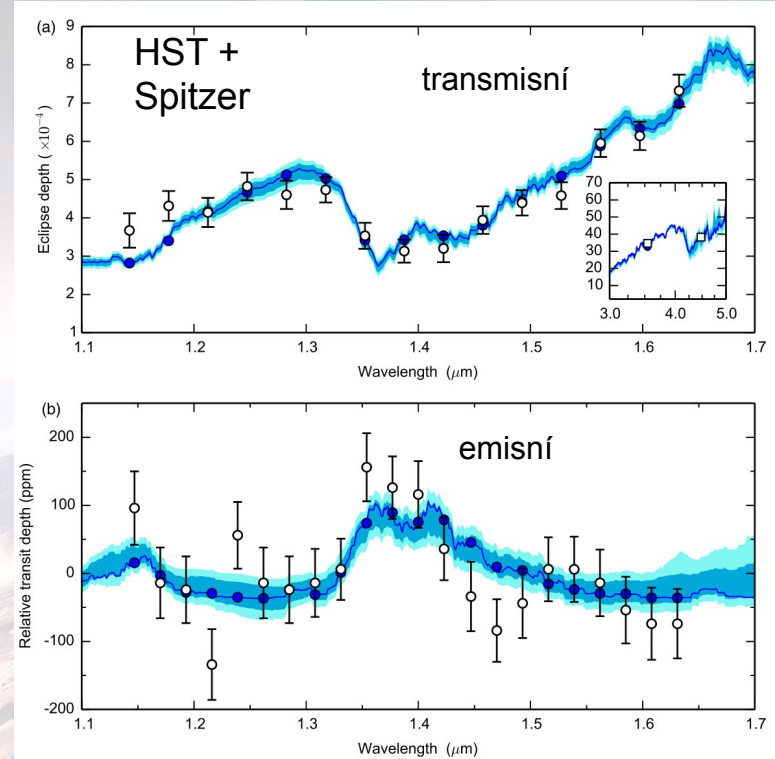
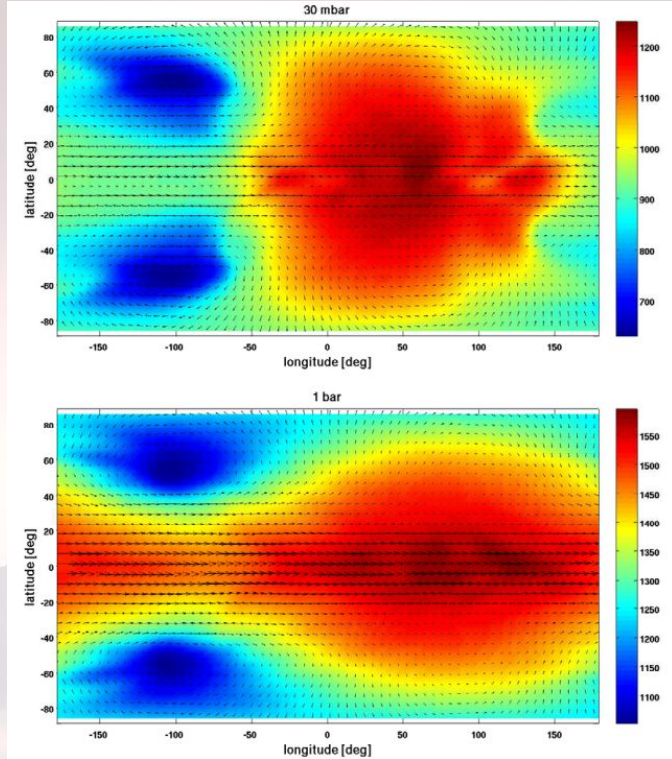
Z okamžiků a tvaru sekundárních tranzitů lze odhadnout teplotní rozložení atmosféry a tvar planety



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

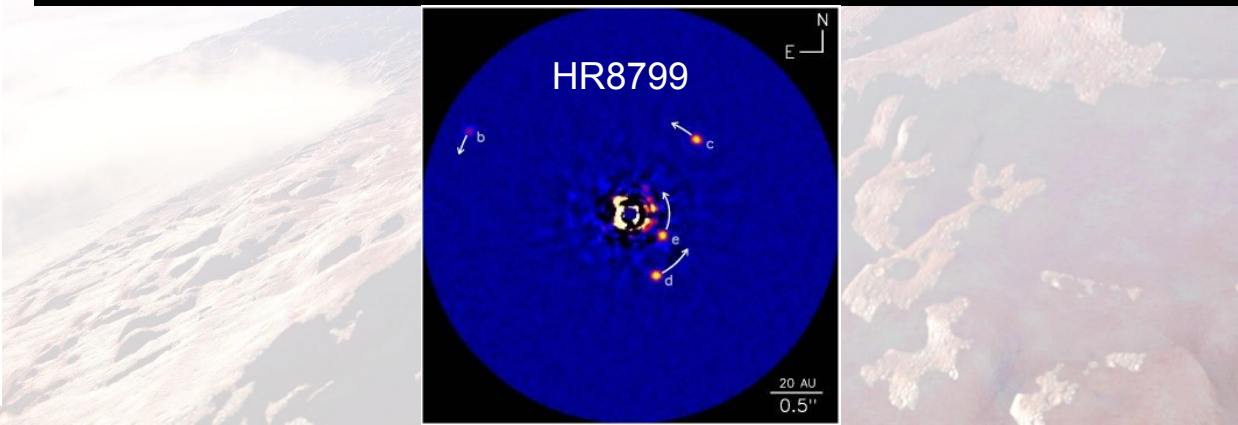
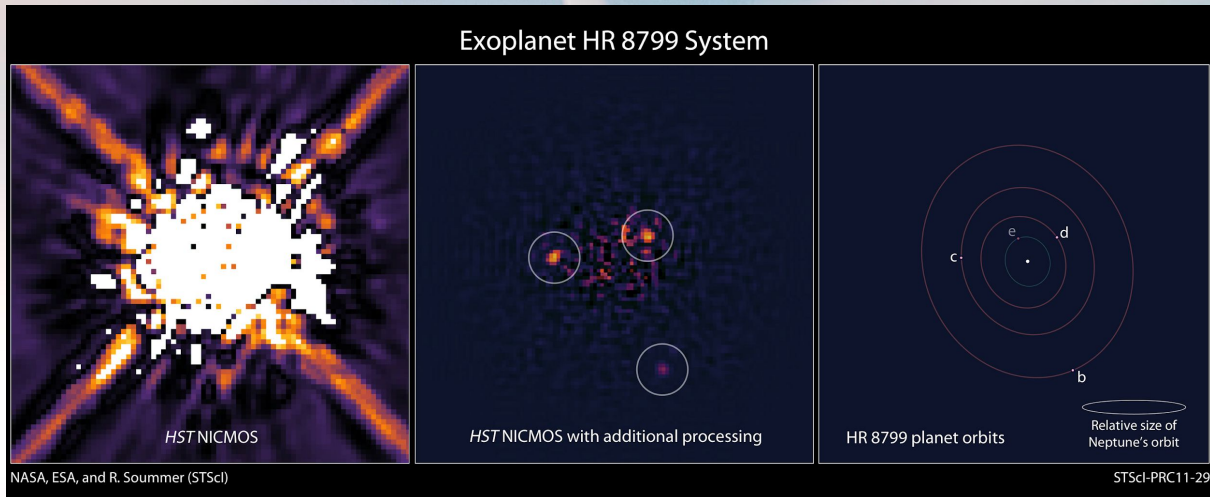
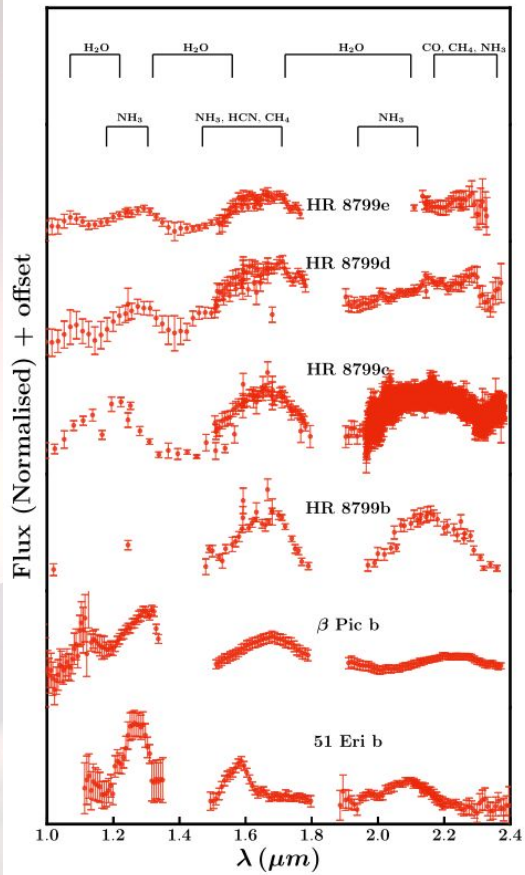
Sekundární tranzity (okultace)

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



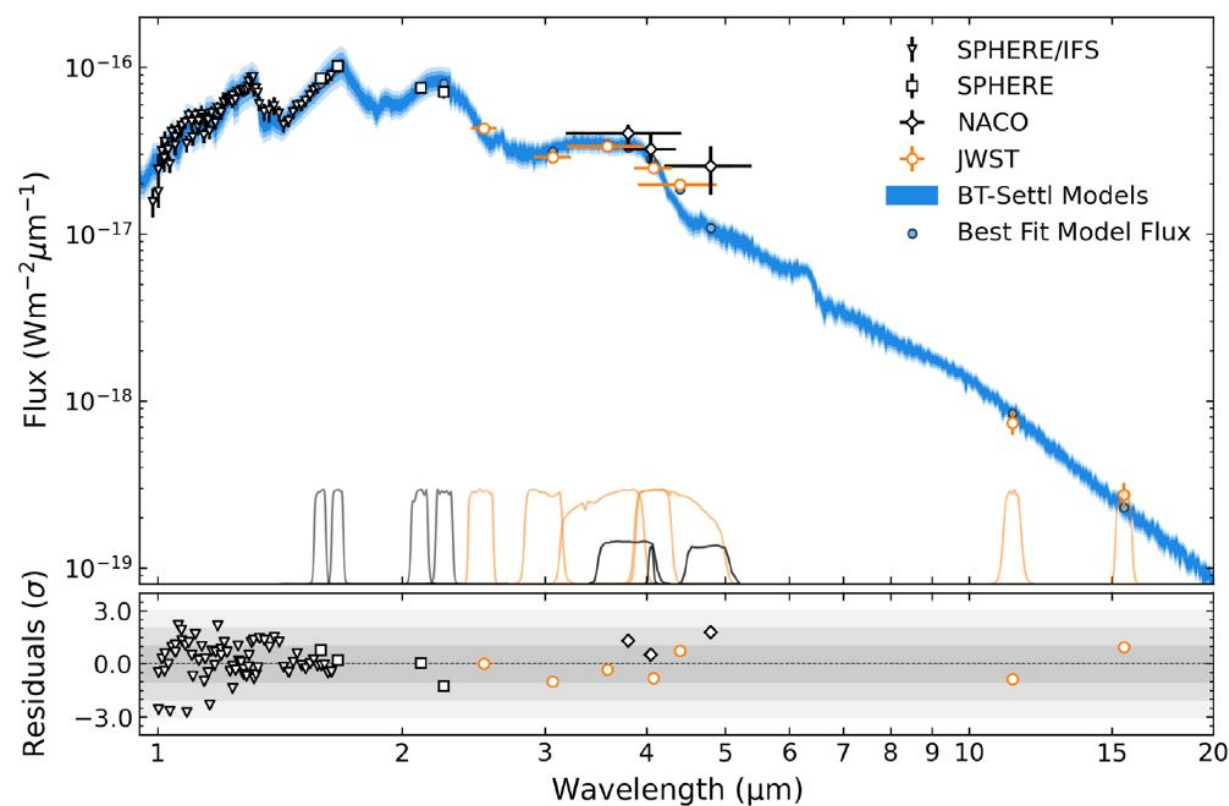
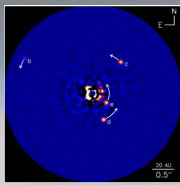
Přímé pozorování

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

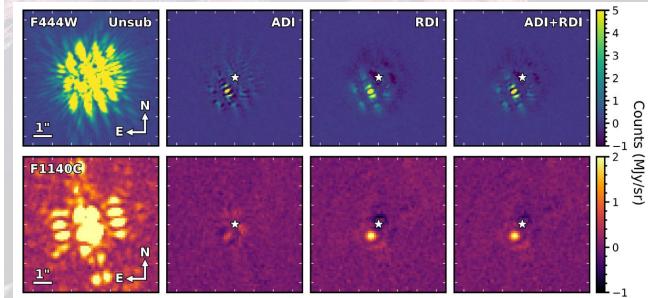


Přímé pozorování

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



Carter et al. 2023, ApJL,
951, 20 - HIP 65426 b -
JWST + VLT



Co bylo detekováno

Direct Imaging

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

High-resolution Doppler Spectroscopy

H ₂ O	51 Peg b (25), HD 179949 b (39), HD 189733b (24), HD 209458b (101)
CO	τ 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 ₂ 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 ₂ 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