



**Astrofyzika VI. cvičení**  
**Pohyby hvězd, rozlišovací  
schopnost dalekohledů**

**Vladimír Štefl**  
**Ústav teoretické fyziky a astrofyziky**

# Pohyby hvězd - hvězdný katalog v Almagestu

- Sedmá a osmá kniha *Almagestu* obsahují katalog více než jednoho tisíce hvězd sestavený Ptolemaiem, z nichž **polohy přibližně 850 hvězd byly s velkou pravděpodobností přebrány z katalogu Hipparcha.**
- Celkový počet objektů v katalogu je nejčastěji uváděn **1 028**, jsou rozděleny do **čtyřiceti osmi souhvězdí**, dále rozčleněných do dvaceti jedna **severních souhvězdí** (332 hvězd), dvanácti **zvířetníkových souhvězdí** (290 hvězd) a patnácti **jižních souhvězdí** (298 hvězd). Rovněž je v katalogu skupina hvězd neuvedených v žádném souhvězdí (108 hvězd).
- V katalogu uvedeno **1 020** hvězd, cca 20 hvězd je neidentifikovatelných.

<http://astro.isi.edu/reference/almagest.html>

# Původ Ptolemaiova katalogu hvězd

- Nesoulad mezi ekliptikální délkou a dobou sestavení katalogu, což zjistil již AL – SÚFÍ (903 – 986) a další, v ekliptikálních délkách hvězd chyba  $1^\circ$ , jestliže připustíme dobu vzniku katalogu v r. 138 n. l.

## Jaké je stáří katalogu a kdo ho vytvořil?

- Jsou v něm zachyceny **polohy hvězd v době jeho sestavení**. Hvězdy mění svoji polohu na obloze, jde o **vlastní pohyb  $\mu$** . U hvězd pozorovatelných pouhým okem je typická hodnota vlastního pohybu  $\mu$  přibližně **20** “ za století. Hvězdy od Ptolemaiovy doby přemístily na světové sféře o 400 “, přibližně o 1/10 stupně, což je měřitelné.

# Analýza Ptolemaiova katalogu

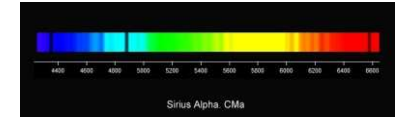
- U všech vybraných hvězd byly ze současných ekliptikálních souřadnic propočítány zpětně jejich změny v čase. Pro výpočty byl zvolen rok sestavení *Hipparchova katalogu* 127 př. n. l. a *Ptolemaiova katalogu* 138 n. l.
- Metoda analýzy vlastních pohybů hvězd vymezila časový interval vzniku katalogu na druhé století před n. l. kdy žil Hipparchos. Přesnost metody je odhadována na  $\pm 40$  roků, viz porovnání s katalogy, jejich datum vzniku známe,
- katalog Tychona Braha - 1598, katalog Ulugh Bega 1437.



# Pohyby hvězd

5. Ve spektru Siria A byla zjištěna pozorovaná vlnová délka  $\lambda = 486,125$  nm čáry  $H_\beta$  o laboratorní vlnové délce  $\lambda = 486,134$  nm. Určete radiální rychlost Siria A.

$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l}, \Delta\lambda = 0.009 \text{ nm}, v_r = -5,5 \text{ km/s} \quad \text{- modrý posuv}$$



1. Ve spektru novy v souhvězdí Herkula r. 1934 byla absorpční čára vodíku  $H_\gamma$   $\lambda = 434,05$  nm posunuta o 1,01 nm k fialovému - modrému konci spektra. Jaká byla rychlost plynu vyvrženého hvězdou?

Řešení:

$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l} = -698 \text{ km/s}$$

2. Jak se posune sodíková čára  $D_1$   $\lambda = 589,59$  nm ve spektru hvězdy, u níž byla stanovena radiální rychlost  $v_r = +161$  km/s .

Řešení:

*O hvězdu jaké populace jde?*

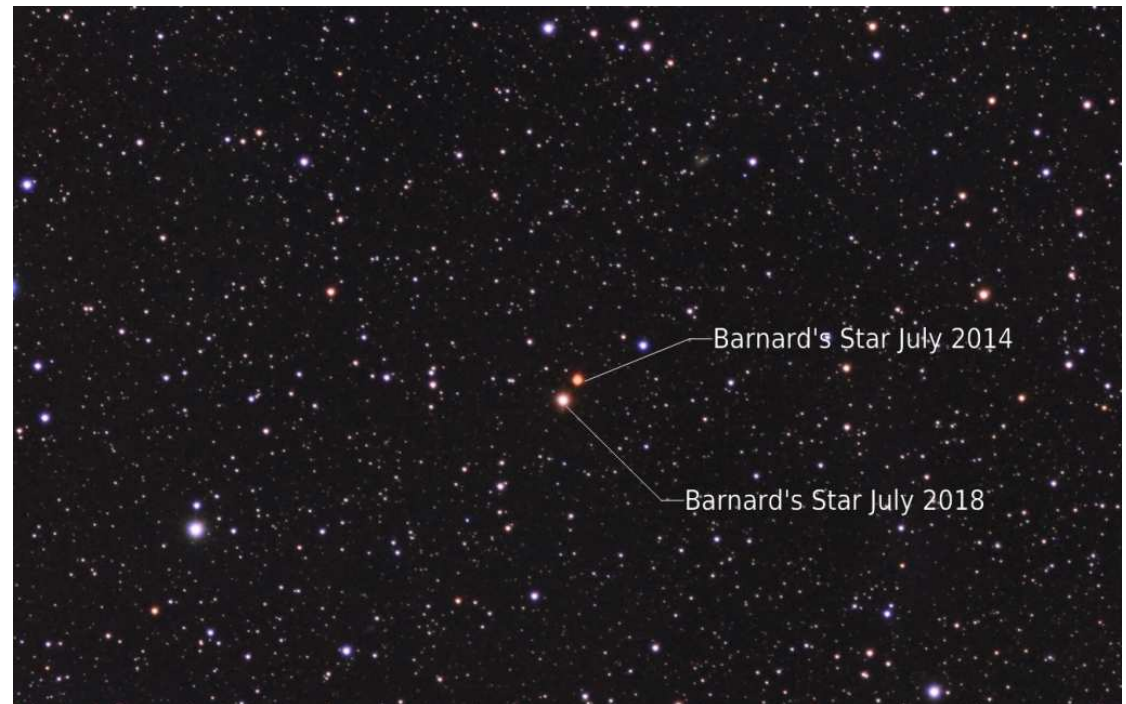
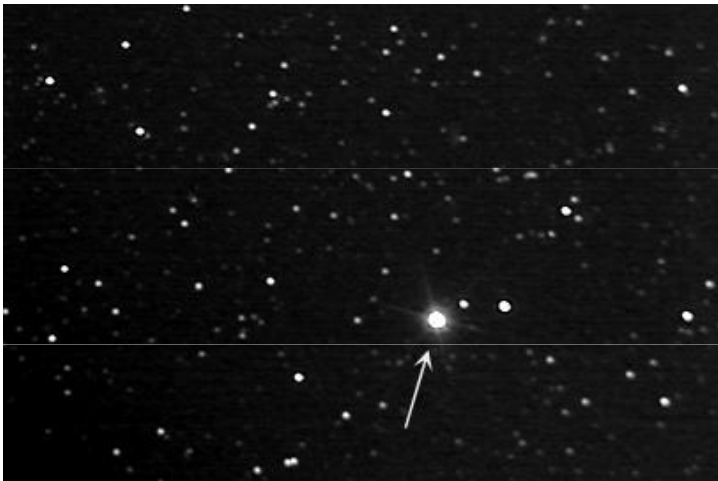
$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l} \quad \dots \lambda_p = 0,32 \text{ nm k červenému konci spektra.}$$

# Tangenciální rychlost

**Úloha 4.14** Červený trpaslík spektrální třídy M4 Ve má efektivní povrchovou teplotu 3200 K a absolutní vizuální hvězdnou velikost  $M_V = 13,4$  mag. Pomocí v tabulkách nalezené bolometrické korekce  $BC = -2,3$  mag nalezněte zářivý výkon a poloměr hvězdy.

*Řešení:*  $M_{\text{bol}} = BC + M_V = 11,1$  mag. Zářivý výkon v jednotkách zářivého výkonu Slunce stanovíme podle vztahu  $\log L = 0,4(4,75 - 11,1) = -2,54$ , tedy  $L = 0,003 L_{\odot}$ ,  $L = 1,2 \cdot 10^{24}$  W. Poloměr určíme ze vztahu  $R = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T_{\text{ef}}^4}\right)^{1/2} = 1,2 \cdot 10^8$  m, tedy  $0,17 R_{\odot}$ . Údaje v podstatě odpovídají Barnardově hvězdě, která má největší známý vlastní pohyb  $10,34''$  za rok. Byla objevena E. E. Barnardem roku 1916.

## Barnardova hvězda



# Celková rychlost hvězd

3. Barnardova hvězda má největší vlastní pohyb  $\mu = 10,36''$  za rok, její vzdálenost od Slunce je 1,83 pc. Vypočtete její tangenciální rychlost.

Řešení:

$$v_t = k \cdot \frac{\mu}{\pi} = k \cdot \mu \cdot r = 4,74 \cdot \mu \cdot r = 90 \text{ km/s. } k = 149\,597\,870\,700 / 31\,556\,925 \text{ m/s}$$

4. Vlastní pohyb Aldebarana je  $\mu = 0,200''$  a paralaxa činí  $\pi = 0,049''$ . Spektrální čára železa o laboratorní vlnové délce  $\lambda = 440,476 \text{ nm}$  je posunuta o 0,079 nm směrem k červenému konci spektra. Stanovte radiální, tangenciální a celkovou rychlost.

Řešení:

$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l}, \quad v_r = 53,8 \text{ km/s}, \quad v_t = 4,74 \cdot \mu \cdot r = 19,3 \text{ km/s}, \quad v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} = 57,2 \text{ km/s}$$

4. Vlastní pohyb Kapteynovy hvězdy činí  $\mu = 8,671''$  a paralaxa dosahuje  $\pi = 0,254''$ . Spektrální čára vápníku o laboratorní vlnové délce  $\lambda = 422,674 \text{ nm}$  je posunuta o 0,341 nm směrem k červenému konci spektra. Stanovte radiální, tangenciální a celkovou rychlost.

Řešení:

$$v_r = c \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l}, \quad v_r = 242,0 \text{ km/s}, \quad v_t = 4,74 \cdot \mu \cdot r = 161,8 \text{ km/s}, \quad v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} = 291,1 \text{ km/s}$$

***O hvězdu jaké populace jde?***

# Koperník studia v Polsku a Itálii

**Krakov: 1491 – 1495**

*Alfonsinské tabulky*

**Bologna, Řím: 1496 – 1501**

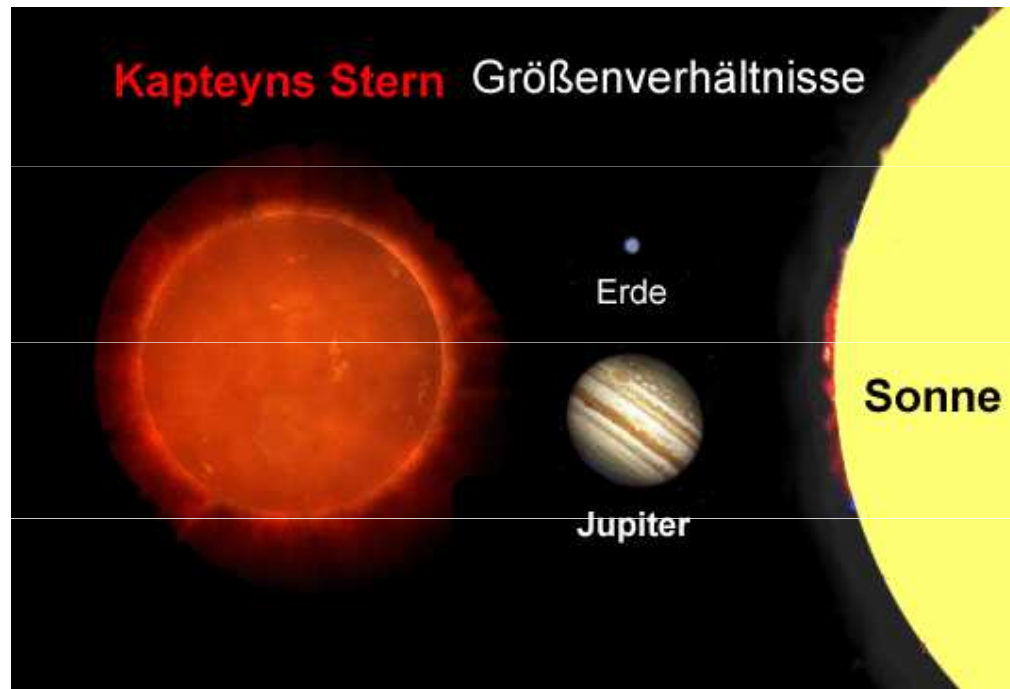
*D. M. Novara – pozorování  
zákrytu Aldebarana Měsícem 9.  
března 1497 , konjunkce  
Saturnu s Měsícem, kritika  
Ptolemaiovy teorie pohybu  
Měsíce*

**Padova, Ferrara: 1501 - 1503**  
**licenciát lékařství, doktor  
kanonického práva**





# Kapteynova hvězda



$r = 3.92 \text{ pc}$

**M1 V**

**T = 3570 K**

**0,28 Ms**

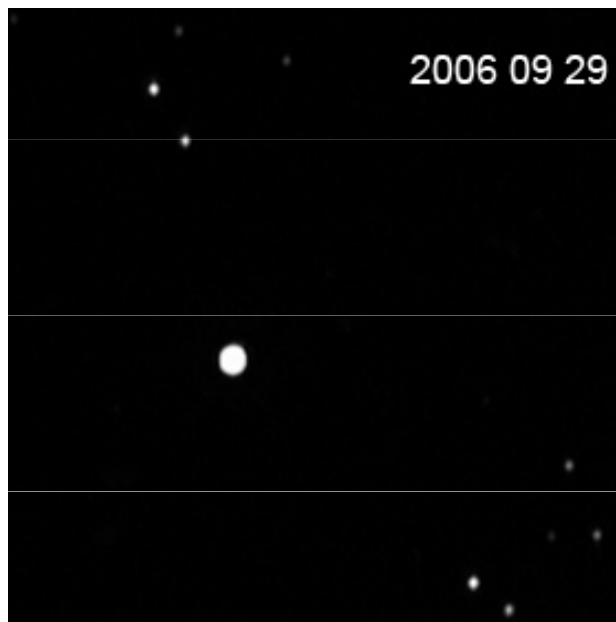
**0.29 Rs**

$v_r = + 291,1 \text{ km/s}$

**nejbližší hvězda**

**z hala Galaxie**

**populace II**



# Rozlišovací schopnost dalekohledů

Rozdělení intenzity světla při difrakci na kruhovém otvoru

$$\frac{1}{2} k D \sin \theta = 3,84$$

$$\sin \theta = \frac{3,84}{\pi} \frac{\lambda}{D} \quad \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

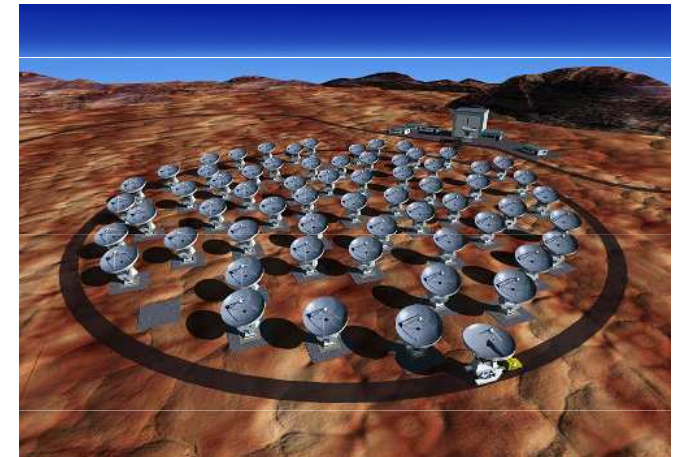
teoretické rozlišení vyvolané difrakcí, v radiánech, ve skutečnosti rozlišující schopnost nižší v důsledku aberace a turbulentnosti atmosféry

teoretické rozlišení **optického dalekohledu**

průměr 13 cm    1“

průměr 130 cm    0,1“

Keckovy dalekohledy 10 m    0,013“

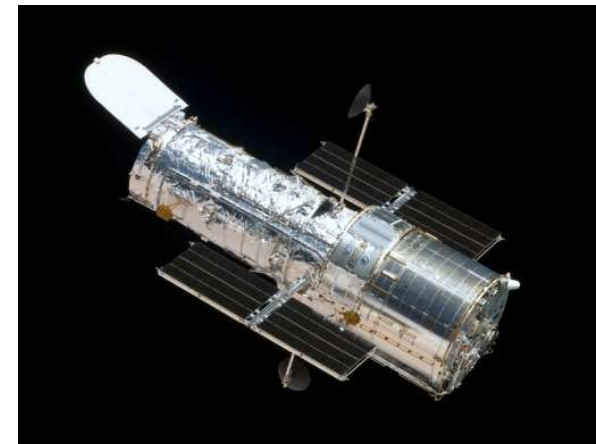


**v milimetrovém pásmu pracuje ALMA – 66 teleskopů**, každý o průměru 12 m, celková základna 12 km, úhlové rozlišení 0,01“

# Rozlišovací schopnost dalekohledů

1. Stanovte teoretickou mez úhlové vzdálenosti mezi dvěma hvězdami, rozlišitelnými prostřednictvím dalekohledu o průměru  $D = 510$  cm na Mount Palomar. Předpokládejme, že hvězdy vyzařují světlo se střední vlnovou délkou  $\lambda = 550$  nm.

$$\text{Řešení: } \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} = \frac{1,22 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{5,1} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$$



**Úloha 1.3** Hubbleův kosmický dalekohled obíhající nad Zemí ve výšce 600 km používá primární zrcadlo o průměru  $D = 2,4$  m. Určete jeho rozlišovací schopnost na vlnové délce čáry  $L_{\alpha}$ ,  $\lambda = 121,6$  nm.

*Řešení:*  $\Theta = 1,22\lambda/D = 6,2 \cdot 10^{-8} \text{ rad} = 0,0127''$ . Pod tímto úhlem bychom pozorovali minci o nominální hodnotě 20 Kč ze vzdálenosti 400 km.



# Rozlišovací schopnost dalekohledů

3. Úhel mezi dvěma hvězdami je  $10^{-6}$  rad.

a) Můžeme odlišit tyto hvězdy pomocí dalekohledu s průměrem objektivu 254 cm na vlnové délce  $\lambda = 510$  nm?

Řešení: Kruhová apertura 100 palcového dalekohledu na Mount Wilson zabezpečuje úhel difrakce  $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 2,4 \cdot 10^{-7}$  rad.

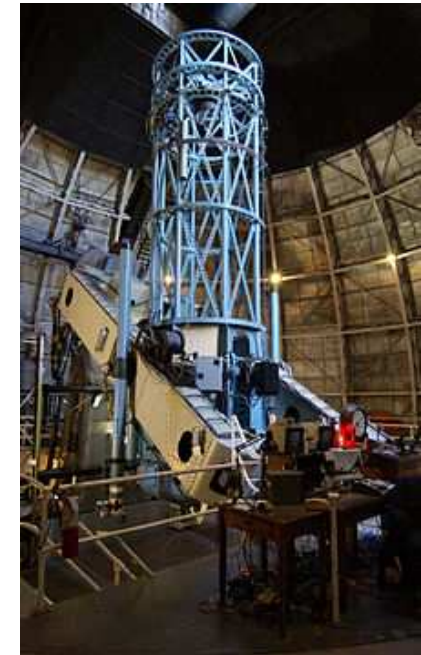
Úhlová vzdálenost mezi dvěma hvězdami 4krát převyšuje tuto hodnotu, tudíž dalekohledem lze obě hvězdy rozlišit.

b) Předpokládejme, že hvězdy rovněž vyzařují rádiovém oboru na frekvenci 400 MHz. Mohly být rozlišeny rádiovým dalekohledem v Arecibu o průměru 1 000 stop, 1 stopa 30,5 cm.

Řešení:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0,75 \text{ m}, \quad \theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

Nelze hvězdy rozlišit, potřebné je 3 000 krát větší rozlišení. Používá se metoda sdružených signálů z rádiových dalekohledů se vzájemnými vzdálenostmi tisíců km.





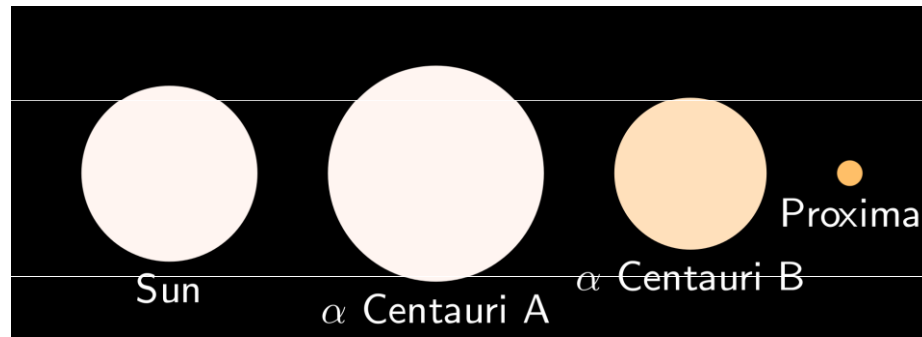
# Arecibo v provozu a nyní



# Rozlišovací schopnost dalekohledů

**Úloha 1.8** Hvězda  $\alpha$  Centauri A má roční paralaxu  $\pi = 0,742''$  a průměr  $1,7 \cdot 10^9$  m. Můžeme rozlišit v Hubbleově kosmickém dalekohledu její kotouček při pozorování na vlnové délce  $\lambda = 550$  nm?

*Řešení:* Platí  $\Theta = d/r = 4 \cdot 10^{-8}$  rad =  $0,0086''$ . Hubbleovým kosmickým dalekohledem nelze pozorovat kotouček hvězdy, neboť jeho rozlišovací schopnost je  $\Theta = 1,22\lambda/D = 2,8 \cdot 10^{-7}$  rad.



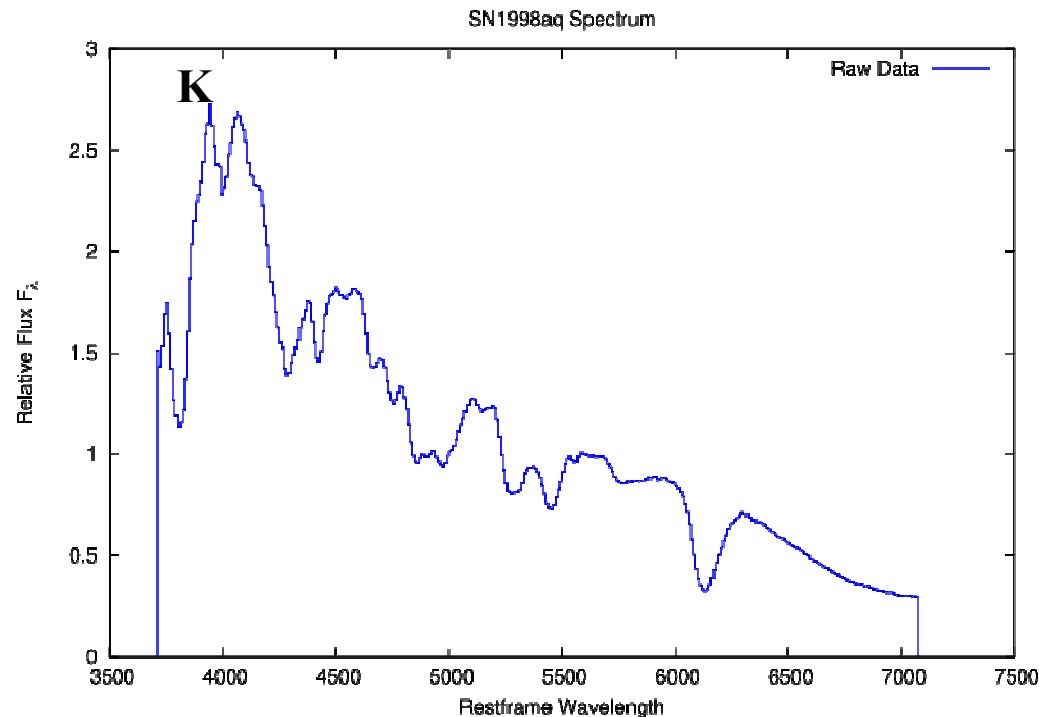
**Úloha 1.9** Stanovte úhlové rozlišení mezi Plutem a Charonem při jejich pozorování v opozici ze Země v perihéliu dráhy s excentricitou  $e = 0,25$ . Velikost velké poloosy dráhy Pluta je  $39,5$  AU, velikost velké poloosy dráhy Charona je  $d = 19\,600$  km. Jaký průměr dalekohledu je nezbytný k úhlovému rozlišení obou těles na vlnové délce  $\lambda = 550$  nm?

*Řešení:* Perihéliová vzdálenost od Slunce je  $r = a(1 - e) = 29,6$  AU, vzdálenost od Země je  $28,6 \cdot 1,5 \cdot 10^{11}$  m =  $4,3 \cdot 10^{12}$  m. Dosadíme do vztahu  $\Theta = \frac{d}{r} = \frac{19,6 \cdot 10^3 \text{ km}}{28,6 \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}} = 4,6 \cdot 10^{-6}$  rad =  $0,9''$ . Toto rozlišení je dosažitelné jen při velmi dobrých pozorovacích podmínkách, kvalitním seeingu. Ke stanovení průměru dalekohledu využijeme vztah  $D = 1,22\lambda/\Theta = 0,13$  m.

# Rozlišovací schopnost dalekohledů

**Úloha 1.25** Ve vzdálené galaxii byla pozorována supernova typu Ia. V jejím spektru byla zjištěna absorpční čára K Ca II o naměřené vlnové délce 409,10 nm. Předpokládaná pozorovaná hvězdná velikost v barvě  $B$  supernovy v maximu jasnosti je  $M_B = -19,5$  mag. Zvažte, zda bude pozorovatelná dalekohledem o průměru 70 cm.

*Řešení:* Laboratorní vlnová délka čáry K Ca II je  $\lambda_l = 393,4$  nm. Dosazením do vztahu  $z = v/c = (\lambda_p - \lambda_l) / \lambda_l = 0,04$  stanovíme  $v = 0,04c \Rightarrow v = 1,2 \cdot 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Vzdálenost galaxie  $r$  určíme z Hubbleova zákona  $r = v/H = 160 \text{ Mpc} = 1,6 \cdot 10^8 \text{ pc}$ . Úpravou vztahu pro modul vzdálenosti obdržíme  $m_B = M_B + 5 \log r - 5 = 16,5$  mag. Pro limitní hvězdnou velikost  $m_B$  dalekohledu o průměru  $D$  v mm platí vztah  $m_B = 2,5 + 5 \log D$ . Dosazením získáme  $D = 631 \text{ mm} = 63,1 \text{ cm}$ , tudíž dalekohled o průměru 70 cm je postačující pro pozorování supernovy.

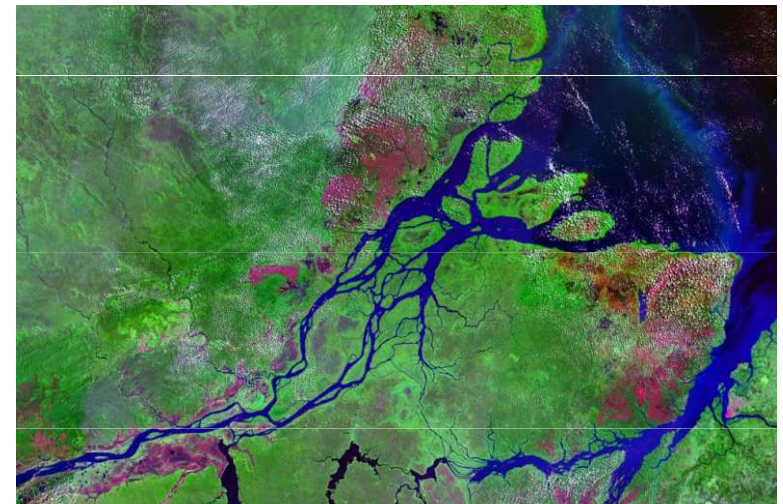




# Rozlišovací schopnost dalekohledů

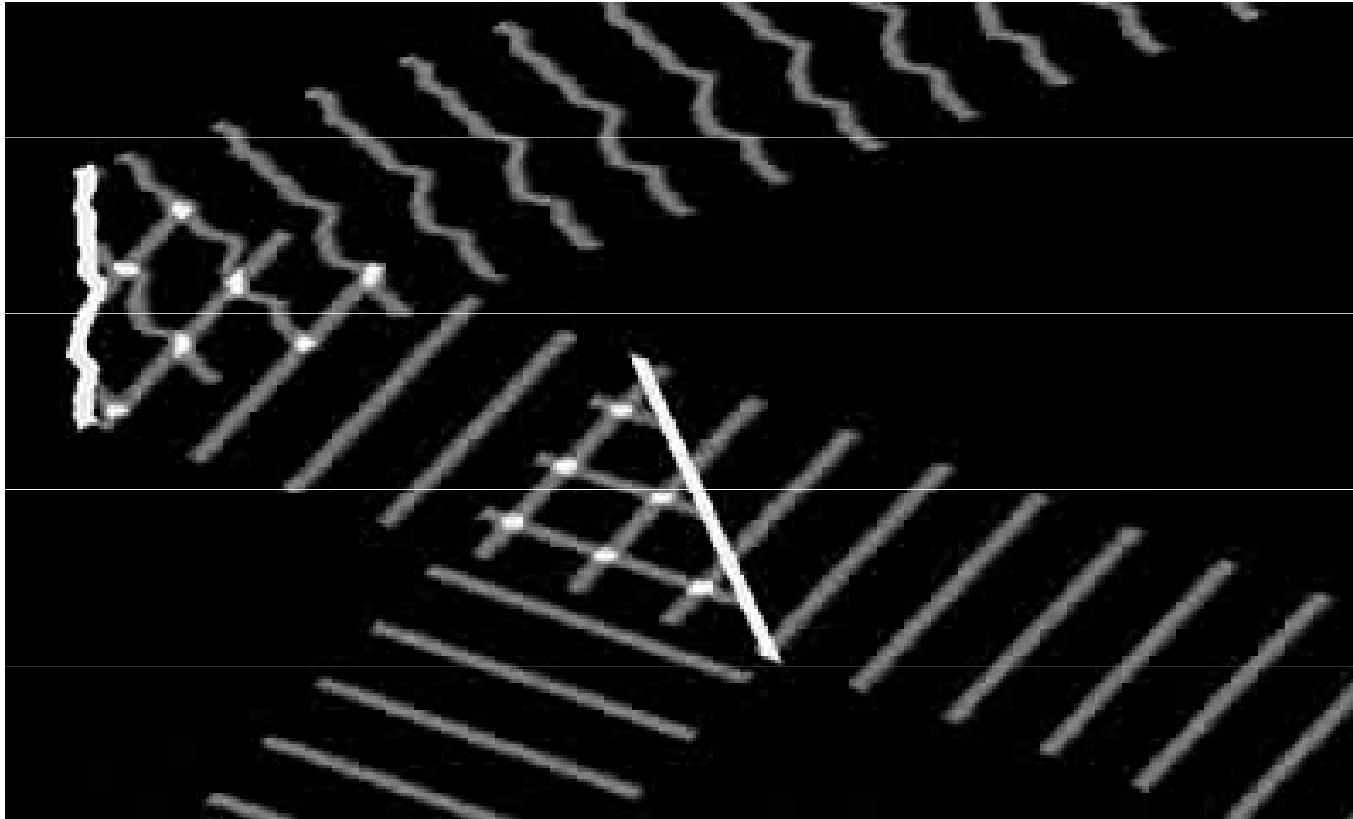
**Úloha 2.18** Můžeme ze Země vidět na Marsu údolní útvar Valley Marineris, jehož šířku odhadujeme na 200 km? Předpokládejte pozorování v době opozice, při které je Mars vzdálen od Země  $5,6 \cdot 10^{10}$  m.

*Řešení:* Při zadané vzdálenosti Marsu je šířka údolí Valley Marineris pozorována pod úhlem  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ$ , tedy přibližně  $0,5''$ , což je na hranici rozlišitelnosti největšími pozemskými dalekohledy za ideálních podmínek. Naopak z Marsu by za stejných podmínek bylo možné pozorovat například ústí Amazonky do Atlantického oceánu, jehož šířka přesahuje 250 km.





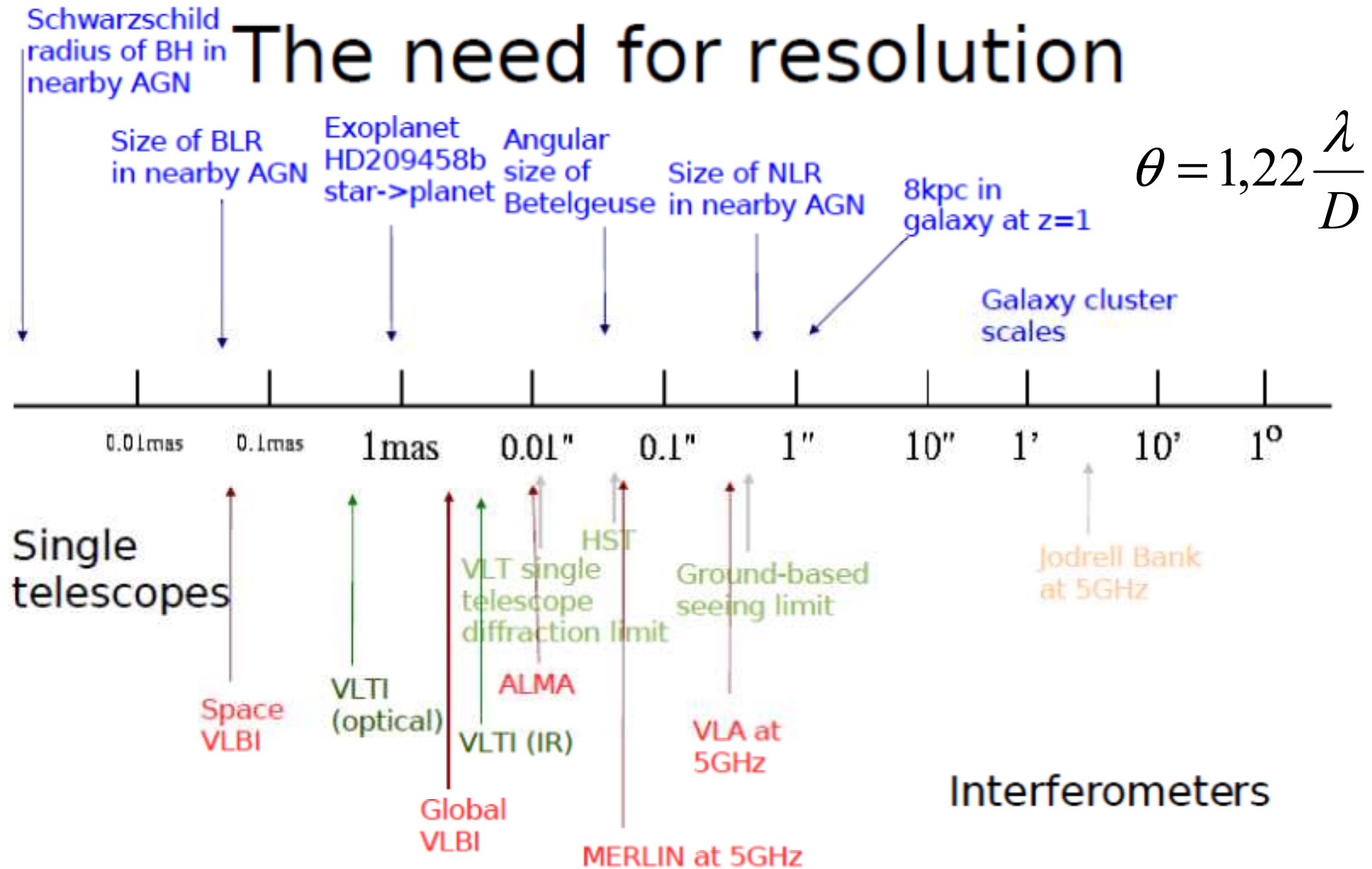
# Adaptivní optika



# Adaptivní optika



# Rozlišovací schopnost – srovnání



# Spektroskopické dvojhvězdy

**Úloha 8.6** Ze studia čárového spektra spektroskopické zákrytové dvojhvězdy byla zjištěna oběžná doba 8,6 roků. Maximální hodnota Dopplerova posuvu čáry  $H_\alpha$  o vlnové délce  $\lambda = 656,273$  nm pro první složku je  $\Delta_1 = 0,026$  nm, pro druhou složku  $\Delta_2 = 0,052$  nm. Ze sinusového charakteru křivky radiálních rychlostí vyplývá, že dráhy jsou blízké kruhovým. Předpokládáme sklon dráhy  $90^\circ$ . Určete hmotnosti jednotlivých složek dvojhvězdy.

*Řešení:* Pro poměr hmotností obou složek platí  $\frac{M_1}{M_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1} = 2$ . Z dopplerovského posuvu určíme radiální rychlosti  $v_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda}c = 1,2 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 12 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_2 = 24 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Poloměry drah jsou  $a_1 = \frac{v_1 T}{2\pi} = 3,5 \text{ AU}$ ,  $a_2 = 6,9 \text{ AU}$ . Velká poloosa  $a = a_1 + a_2 = 10,4 \text{ AU}$ . Pro celkovou hmotnost soustavy platí  $M_1 + M_2 = \frac{a^3}{T^2} = 15,3 M_\odot$ . Jednotlivé hmotnosti složek jsou  $M_1 = 10,2 M_\odot$  a  $M_2 = 5,1 M_\odot$ .

**Úloha 8.7** Ve spektru zákrytové dvojhvězdy, jejíž jasnost se mění s periodou 3,953 dne, se spektrální čáry posouvají na opačné strany o hodnoty  $(\Delta\lambda/\lambda)_1 = 1,9 \cdot 10^{-4}$  a  $(\Delta\lambda/\lambda)_2 = 2,9 \cdot 10^{-4}$  od normální vlnové délky. Určete hmotnosti jednotlivých složek dvojhvězdy.

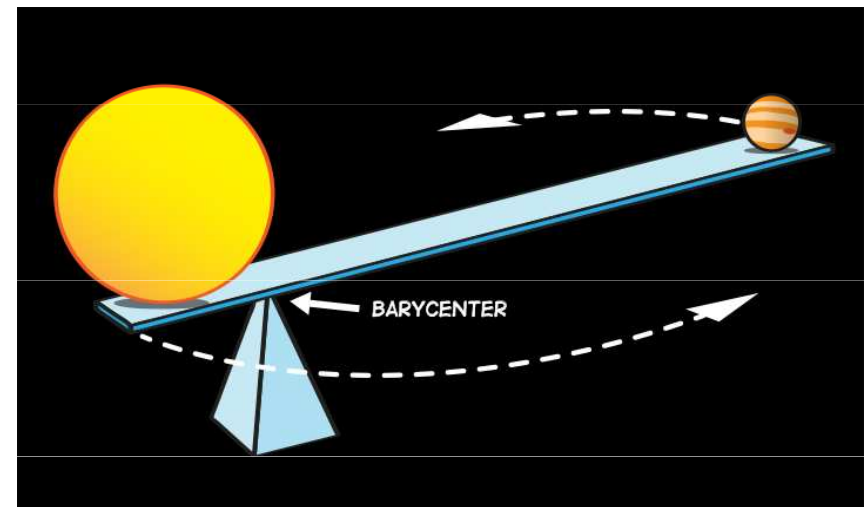
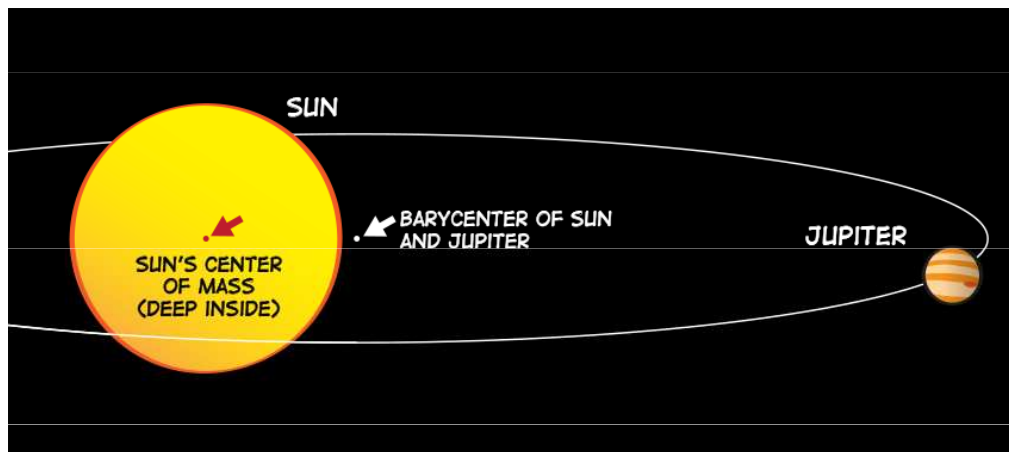
*Řešení:* Obdobně jako u předcházejících úloh určíme rychlosti obou složek  $v_1 = c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_1 = 57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_2 = c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_2 = 87 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dále určíme velikosti jednotlivých poloos  $a_1 = \frac{v_1 T}{2\pi} = 3,1 \cdot 10^9 \text{ m}$ ,  $a_2 = 4,7 \cdot 10^9 \text{ m}$ . Velká poloosa  $a = a_1 + a_2 = 7,8 \cdot 10^9 \text{ m}$ . Při výpočtu celkové hmotnosti soustavy dosadíme do III. Keplerova zákona  $M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{T^2} = 2,4 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , hmotnost jednotlivých složek určíme ze vztahu  $\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1} \Rightarrow M_1 = 1,4 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 0,7 M_\odot$ ,  $M_2 = 1,0 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 0,5 M_\odot$



# Hvězda – Jupiter

**Úloha 8.10** Přítomnost extrasolárních planet s hmotností řádově srovnatelnou s hmotností Jupitera zjišťujeme na základě změn radiálních rychlostí hvězd. Vypočtete periodu a amplitudy změn radiální rychlosti vyvolaných hypotetickou planetou o stejné hmotnosti jako Jupiter. Předpokládáme hvězdu o hmotnosti  $1 M_{\odot}$ . Posuďte měřitelnost těchto změn současnými astronomickými prostředky.

*Řešení:* Budeme zjednodušeně předpokládat, že kolem hvězdy obíhá pouze jedna planeta s hmotností Jupitera. Střední oběžná rychlost pohybu extrasolární planety  $v_J$  by tudíž byla  $13 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Protože  $\frac{M_h}{M_J} = \frac{v_J}{v_h} \Rightarrow$  že očekávaná rychlost pohybu hvězdy bude  $v_h \cong 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  v dráhové rovině exoplanety. Požadovaná přesnost optických metod určování radiálních rychlostí by měla být ještě  $2 \times$  větší, v roce 1998 již byla dostatečná, dosahovala zhruba  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



# Úlohy

13.3, 13.4. 13.5, 13. 9, 13.11, 13.15, 13.17, 13.19

# Exoplanety

## 51 Pegasi b a exoplanetární revoluce

Přednáška u příležitosti udělení Nobelovy ceny za fyziku za rok 2019

© The Nobel Foundation 2019

**Didier Queloz** + **Michel Mayor**

Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, Spojené království a Department of

V roce 1952 publikoval Struve [4] překvapující vizionářskou poznámku, v níž se zmiňoval o využití „*vysoce přesného měření radiální rychlosti*“ k pátrání po planetách „*mnohem blíže k jejich mateřským hvězdám, než je tomu ve Sluneční soustavě*“. Tato myšlenka daleko předběhla svoji dobu, dokud celá řada inovací výrazně neredukovala nejistoty v měření radiálních rychlostí. Až do následující dekády tehdy nikdo vážně neuvažoval o pátrání po planetách pomocí dopplerovské spektroskopie.



**Obr. 1** Spektrograf ELODIE na observatoři OHP. Na levé straně je difrakční mřížka typu échelle. Optická vlákna (červená) přivádí signál do spektrometru. Nahoře je kryostat, v němž je umístěn CCD detektor. Optika se zkříženou disperzí je umístěna ve střední vertikální černé části.



# Exoplanety

Spektrograf byl navržen k přesným měřením metodou dopplerovské spektroskopie. Optická koncepce byla dána požadavkem na kompaktní, stabilní přístroj a na maximální využití celé dostupné plochy ( $1024 \times 1024$  pixelů) CCD detektoru E2V k získání spekter s nejvyšším možným rozlišením v celém rozsahu viditelného spektra – od 390 nm do 681 nm. To bylo umožněno použitím velké stupňovité difrakční mřížky typu échelle, vyrobené firmou Milton and Roy. Ke zvýšení stability osvětlení mřížky byl na vstupu do optického vlákna použit dvojitý *scrambler*. Navíc byla ELODIE vybavena softwarem pro zpracování dat (*pipeline*) redukcujícím data tak, aby krátce po pozorování již byla k dispozici radiální rychlost prostřednictvím numerické korelační metody [16].



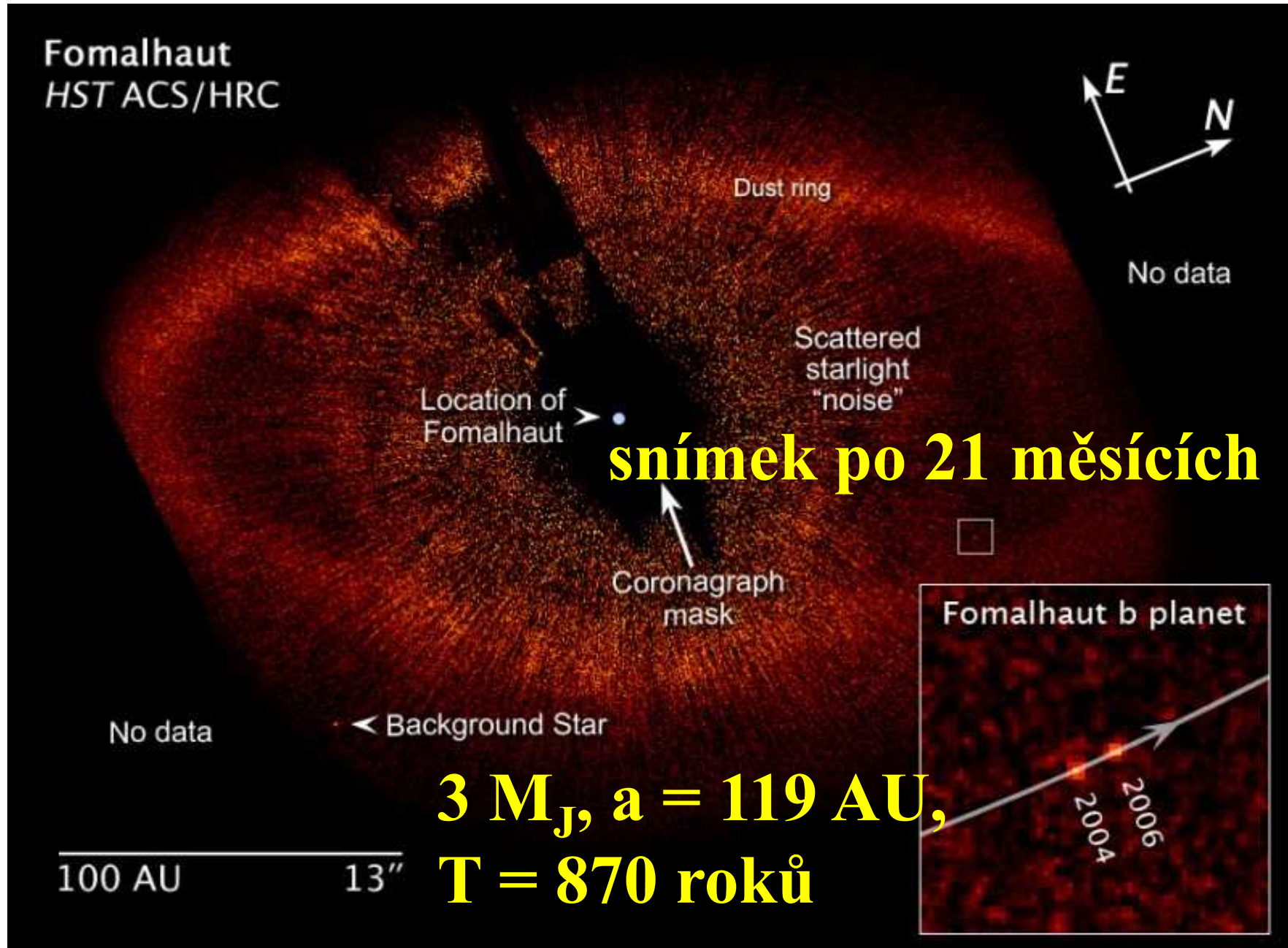
**Obr. 2** Střední část hvězdného spektra zaznamenaného CCD detektorem ELODIE, spolu se spektrem thoria. Zakřivená posloupnost spektroskopických řádů spekter spolu s emisním spektrem thoriové lampy ozařující druhé optické vlákno.

Sluší se říci, že v lednu 1995 byla moje první reakce poněkud panická, když jsem si uvědomil, že hvězda HD217014 vykazuje větší změny radiální rychlosti, než by vyplývalo pouze z přesnosti dopplerovských měření, jakou jsem z dostupných spektroskopických informací očekával. Myslel jsem si, že jde o nějakou chybu ve spektrografu nebo v analýze dat. Po dnech a nocích, které jsem s úzkostí strávil sám kontrolou všech součástí a možných chyb softwaru, jsem po získání dalších dat došel k jedinému možnému závěru, který by mohl kolísání rychlosti vysvětlit: kolem hvězdy 51 Peg obíhá planeta o hmotnosti Jupitera s periodou 4,25 dne, což odpovídá orbitální vzdálenosti 0,05 astronomické jednotky. Planeta je doslova „upečená“ a její atmosféra má teplotu 1 000 K. Když o tom zpětně přemýšlím, uvědomuji si, jaká to byla odvážná a pošetilá představa: privilegium nadšeného doktoranda.





# Exoplaneta u hvězdy Fomalhaut – *rybí tlama*



# Exoplaneta Fomalhaut b

Planeta **Fomalhaut b** obíhá kolem hvězdy **Fomalhaut a**,  $r = 7,66$  pc. Hvězda:  $2,1 M_S$ , poloměru  $1,8 R_S$ , povrchová teplota  $8\,700$  K. Planeta obíhá po dráze s  $a = 115$  au, dráhová rovina shodná s rovinou oblohy. Určete oběžnou dobu planety  $T$  v rocích. HST snímkování planety v letech 2004 a 2006. Jakou vzdálenost urazila planeta mezi oběma snímky?

Řešení: úhlová vzdálenost mezi hvězdou **Fomalhaut a** a planetou **Fomalhaut b** je

$$\varphi = \frac{115 \cdot 1,496 \cdot 10^{11}}{7,66 \cdot 3,086 \cdot 10^{16}} = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \approx 15''$$

III. Keplerův zákon v přesném tvaru  $a^3 = \frac{G}{4\pi^2} MT^2$  Porovnáním soustavy

Fomalhaut a – b se soustavou Slunce – Země obdržíme

$$\left( \frac{a_{Fb}}{a_Z} \right)^3 = \frac{M_{Fa}}{M_S} \left( \frac{T_{Fb}}{T_Z} \right)^2$$

Velikost velké poloosy v au, oběžná doba v rocích obdržíme

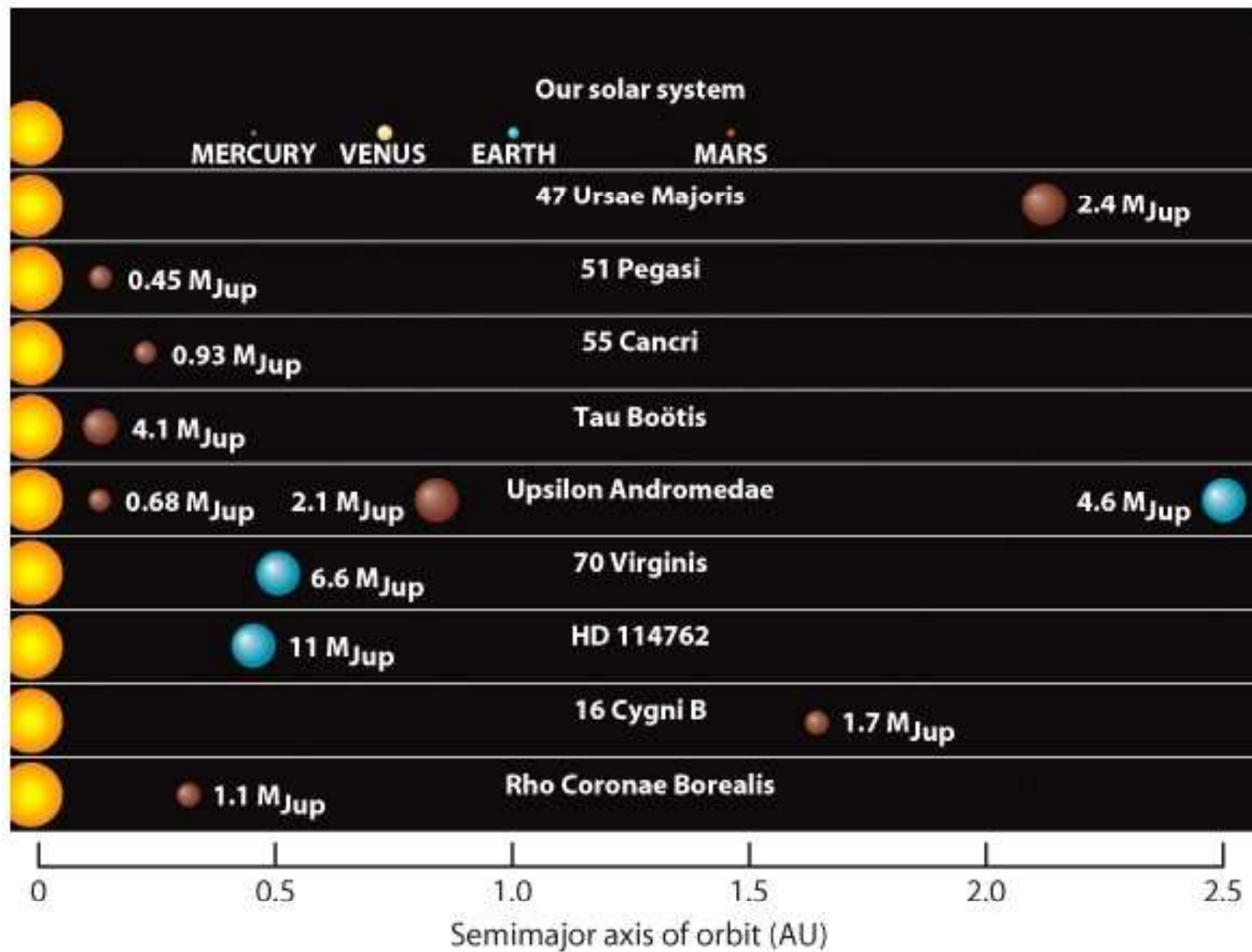
$$a_{Fb}^3 = \frac{M_{Fa}}{M_S} T_{Fb}^2$$

Po dosazení  $T_{Fb} = 850$  roků. Při zjednodušení - kruhová oběžná dráha planety je  $2\pi a_{Fb}$ .

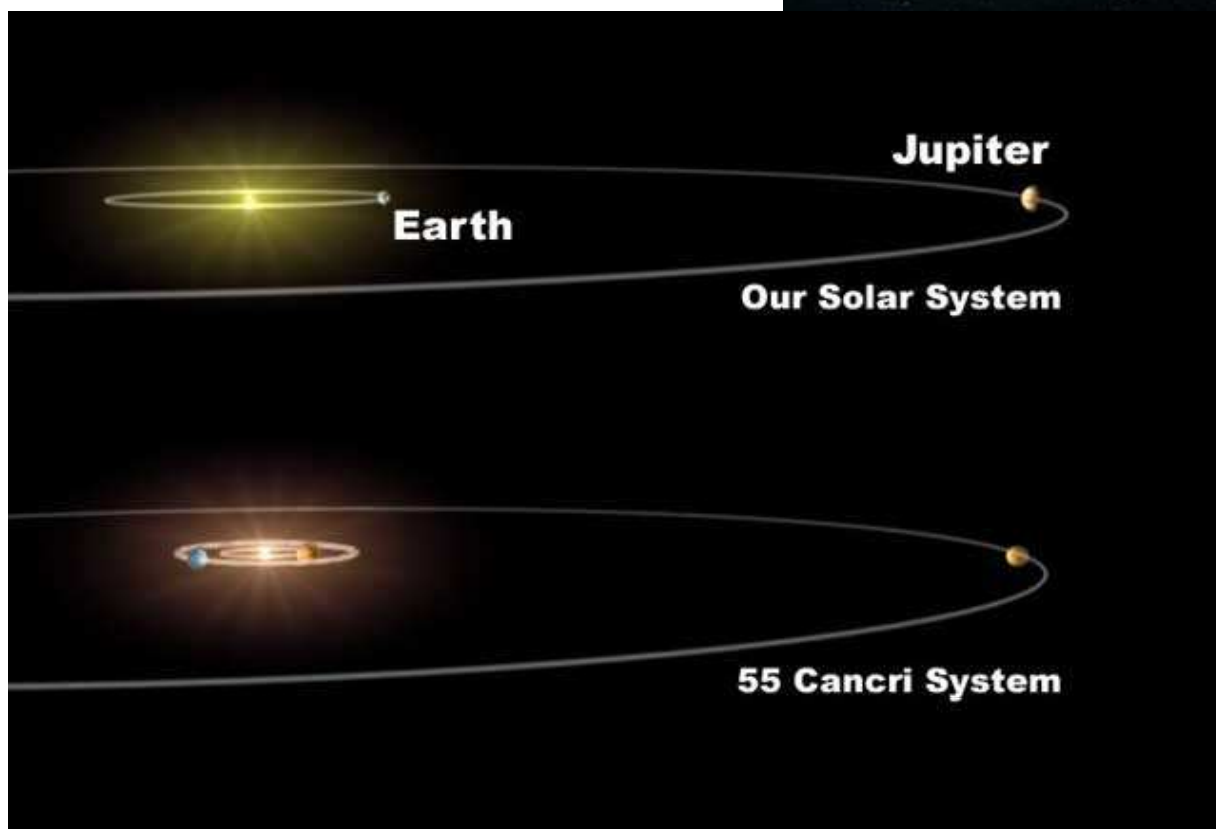
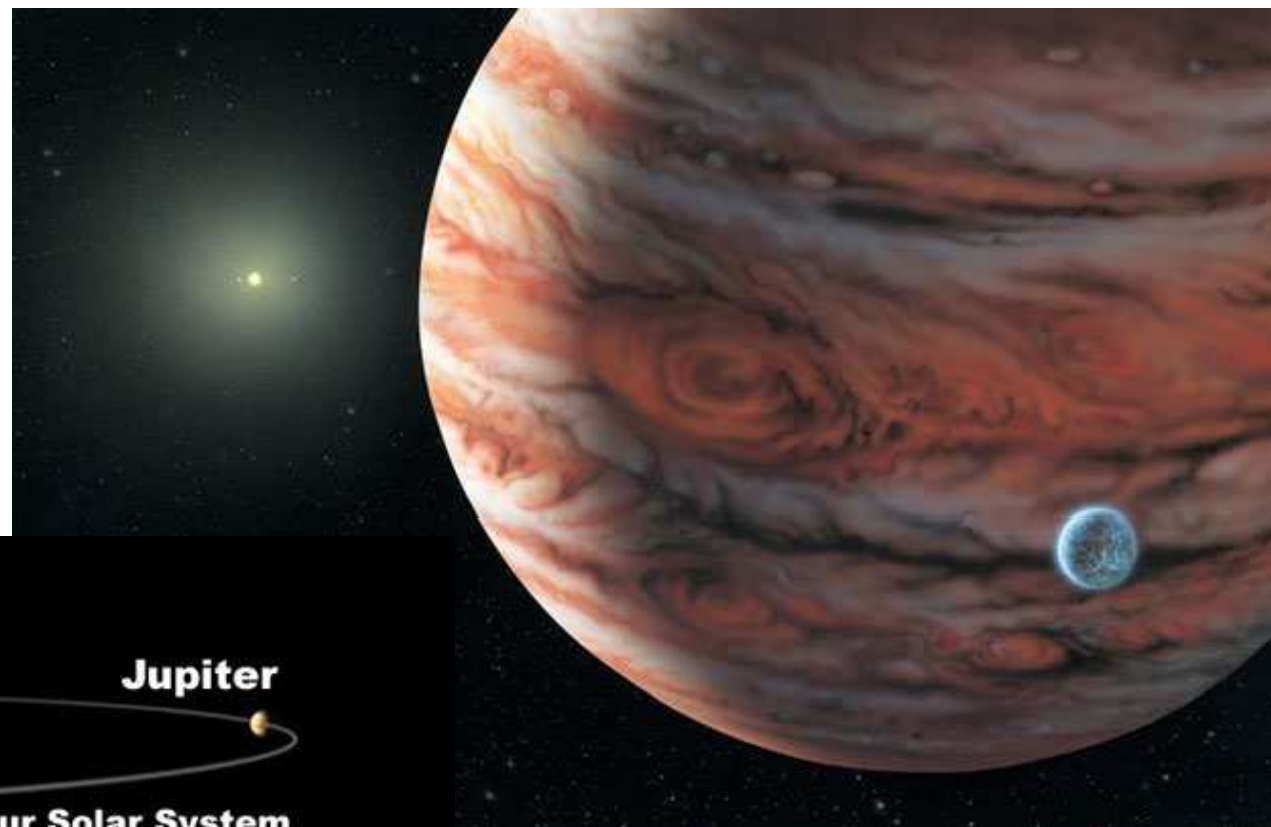
Za dva roky činí uražená dráha planetou

$$\frac{2\pi a_F}{850} \cdot 2 = 1,7 \text{ AU}$$

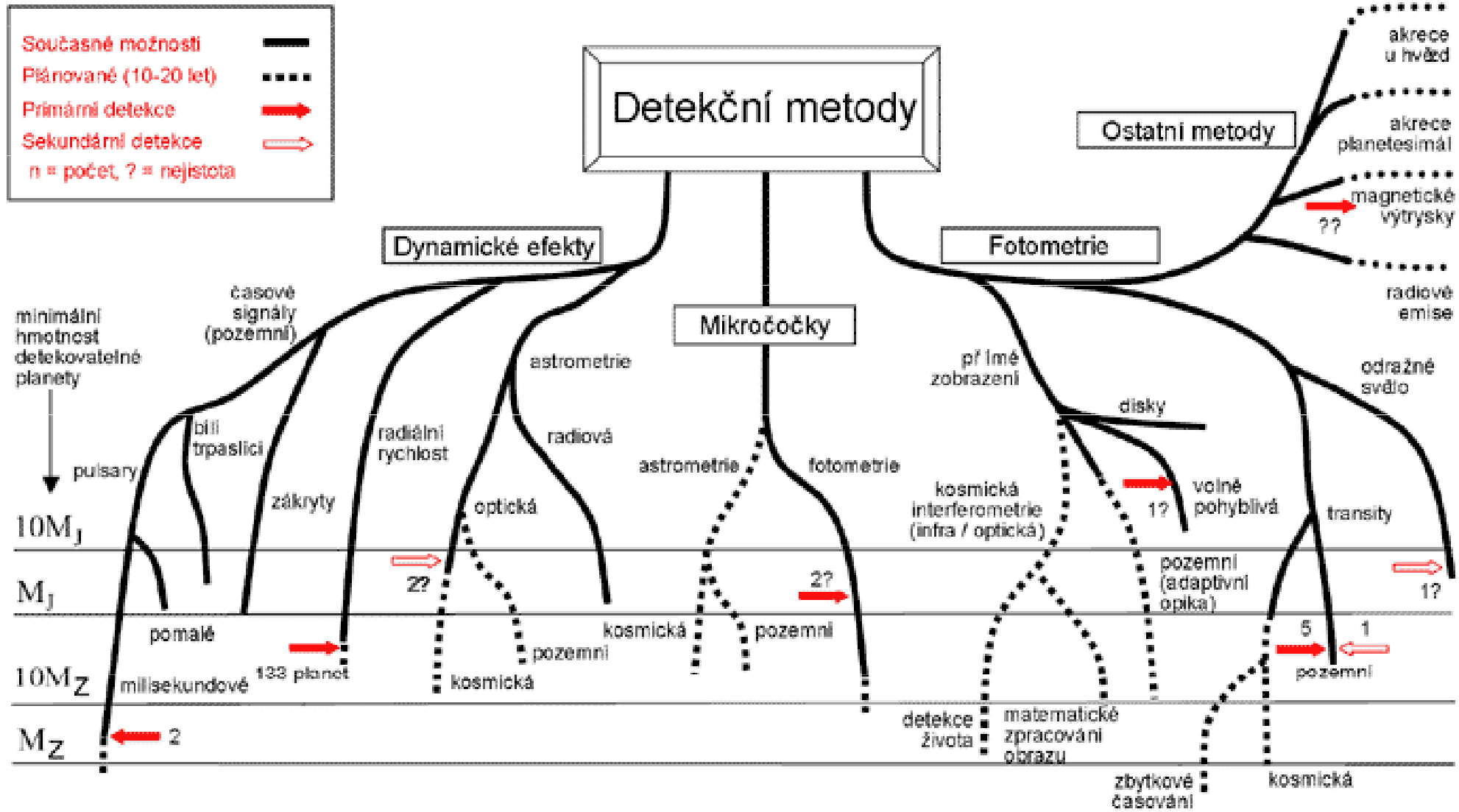
# První objevené extrasolární systémy



# Extrasolární systém 55 Can

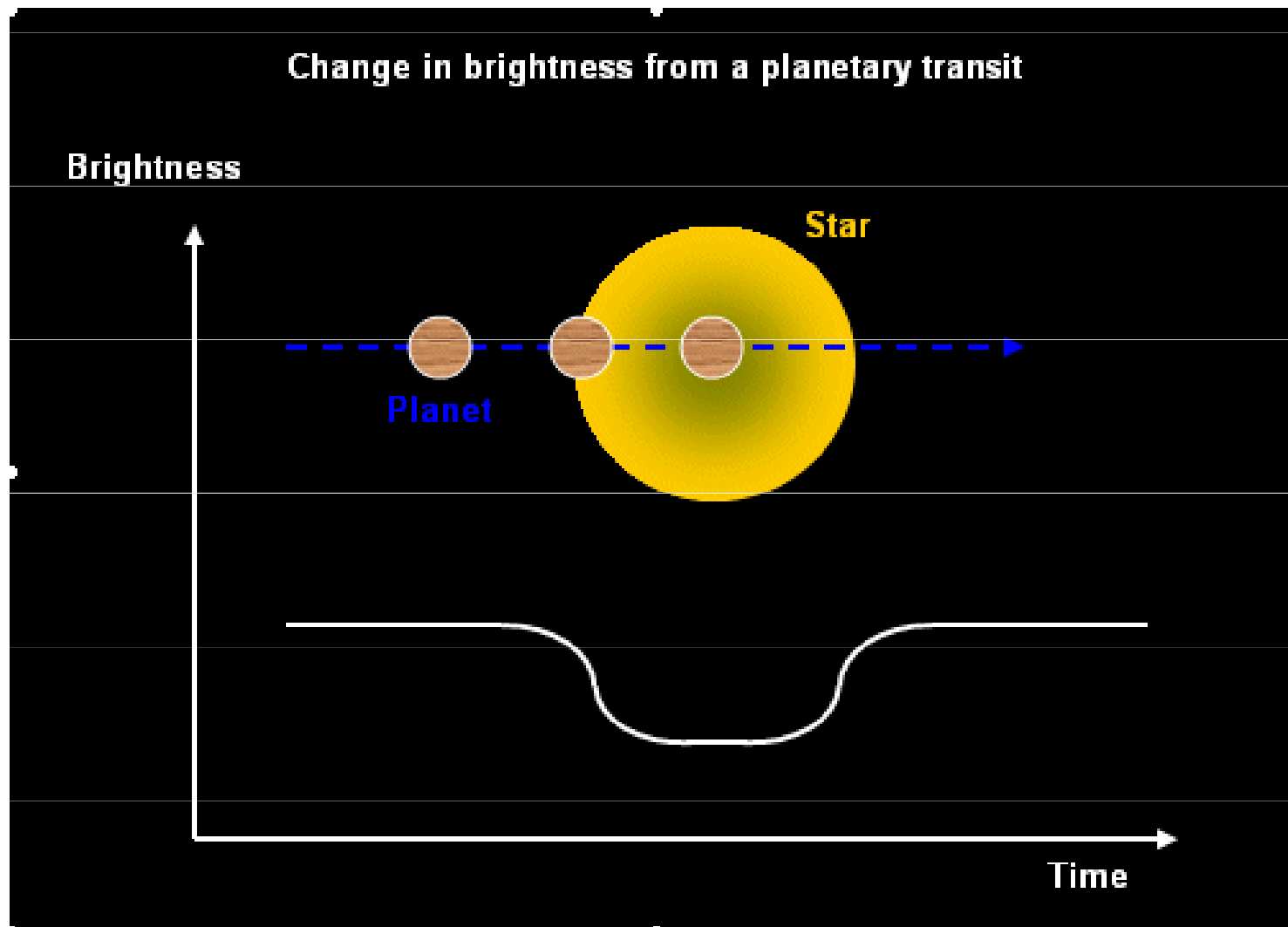


# Metody detekce exoplanet

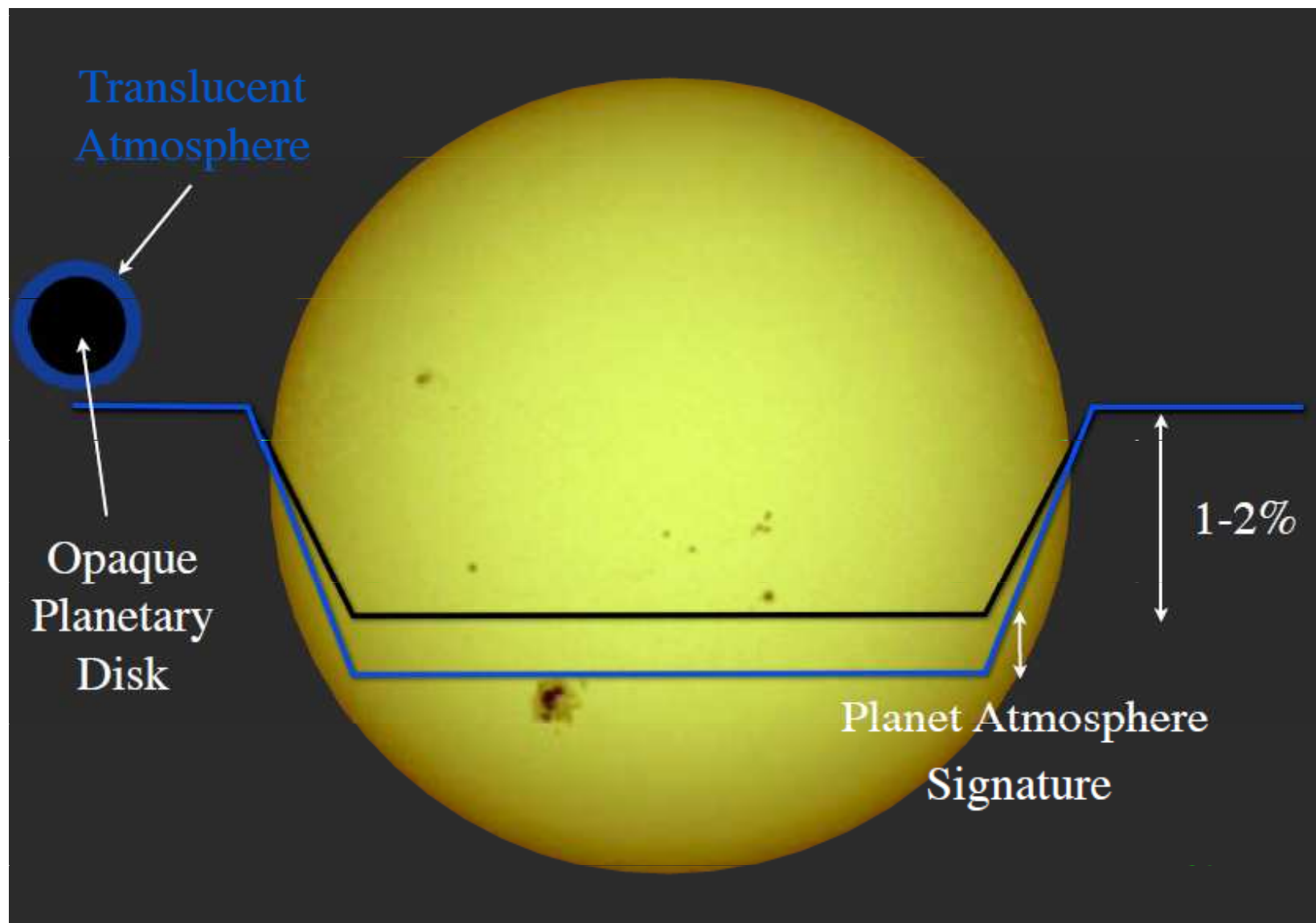




# Fotometrické studium exoplanet



# Fotometrie přechodu exoplanety - okrajové ztemnění, planetární atmosféra



# Světelné křivky přechodů exoplanety HD 209458b

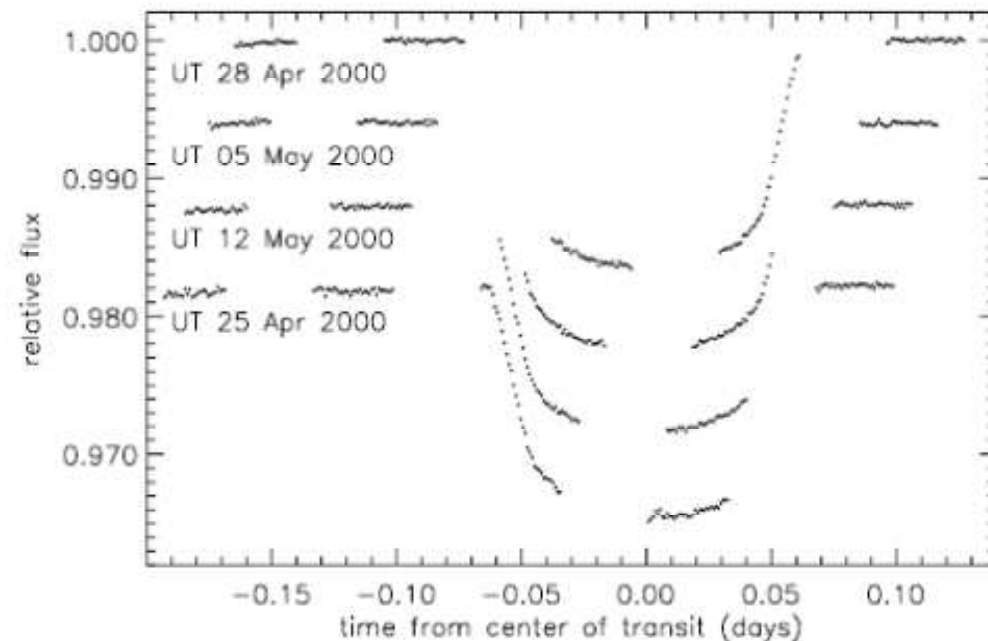


FIG. 2.—Time series of the corrected intensity shown separately for each of the four transits observed by *HST*, with successive transits offset by  $-0.006$  for clarity. Note that, because the transit duration is almost two *HST* orbits, complete temporal coverage was not obtained for any one transit.

note that the depth of the eclipse is only 1.7%!). The orbital period was determined to be 3.5247 days, the lower limit on the mass of the planet  $M_p \sin i = 0.69 \pm 0.05 M_J$  (with the inclination angle  $i = 86^\circ 6 \pm 9^\circ 14$ ), and the radius of the planet  $R_p = 1.347 \pm 0.060 R_J$ . Most

# Studium spektra HD 209458 - G0 V, $r = 47$ pc 1,1 $M_S$ , 1,1 $R_S$

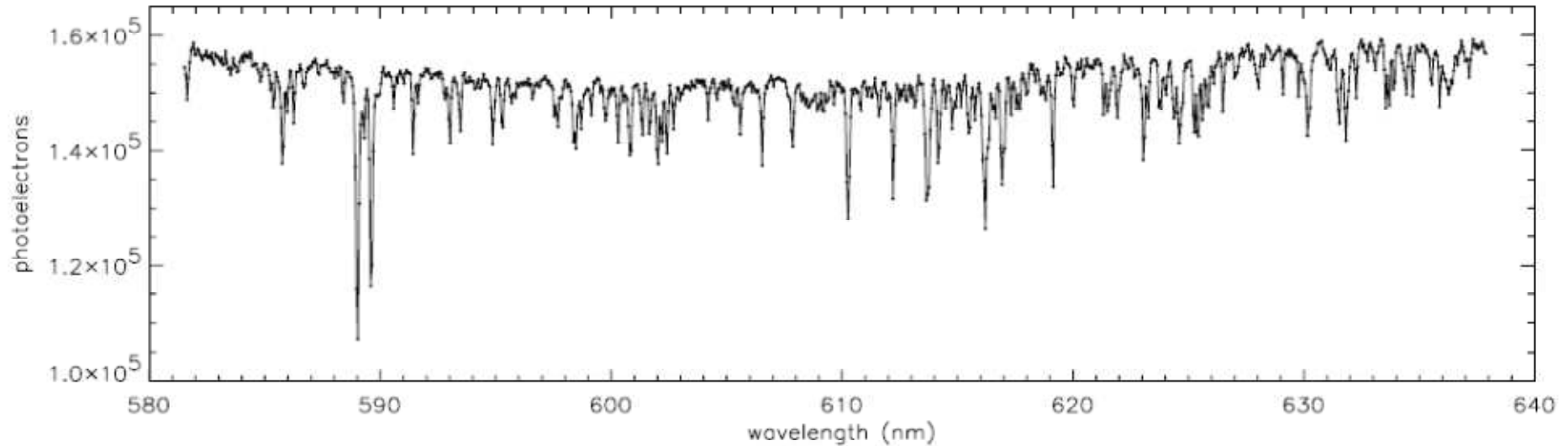


FIG. 1.—Typical spectrum of HD 209458 obtained with the STIS instrument, showing the number of detected photons in a single 60 s integration vs. wavelength. We obtained 684 such spectra in all.

teoretické modely Seager S., Sasselov D. D.:

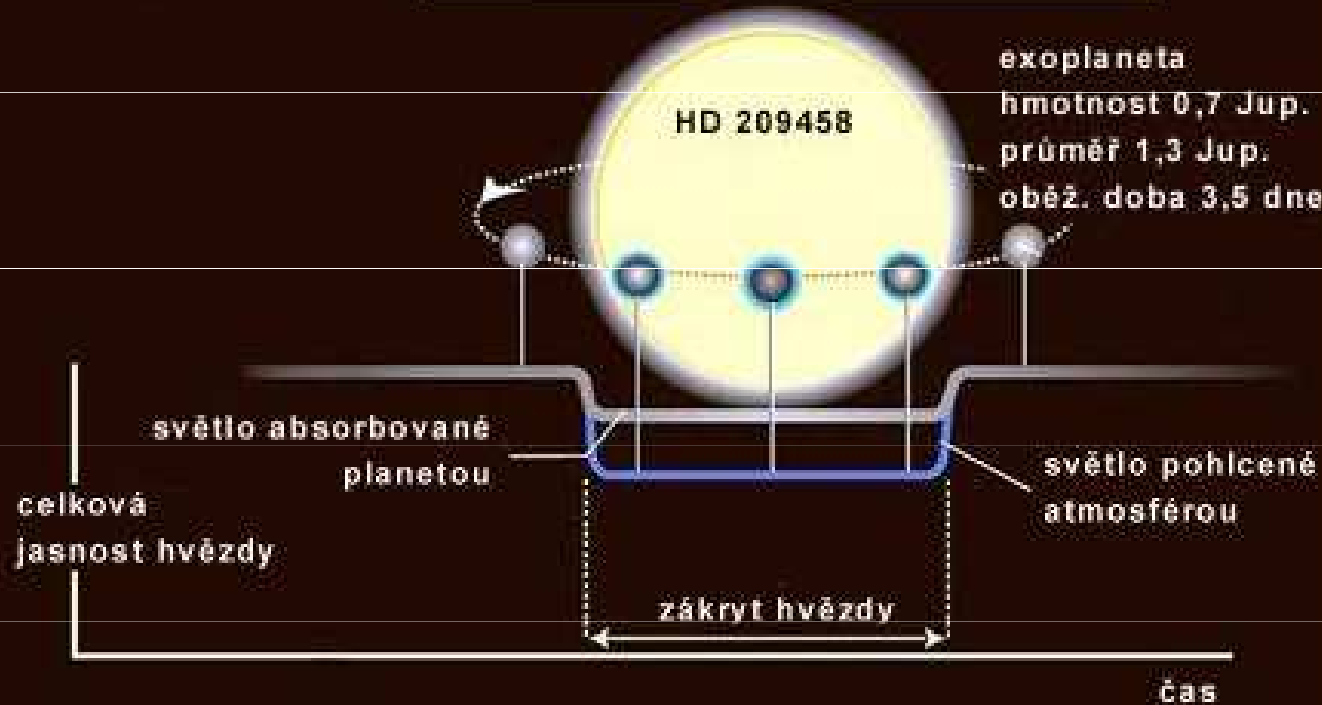
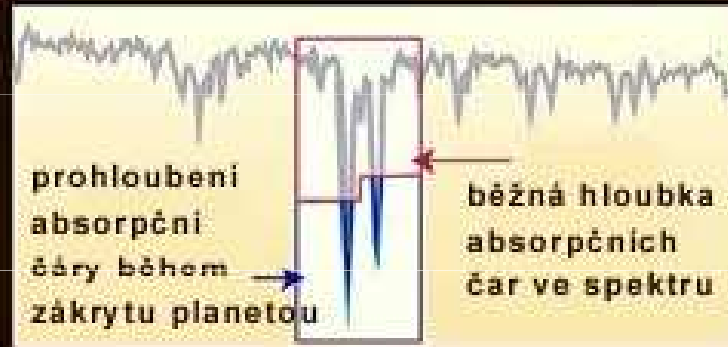
Astrophys. J. **537**, 916, **2000** → předpověď prohloubení čar  
při zákrytu

pozorování Charbonneau D. T., aj.: Astrophys. J. **568**, 377,  
**2002** → observační potvrzení



# Důkaz atmosféry exoplanety HD 209458b

princip metody  
odhalující  
atmosféry  
u exoplanet



$a = 6,7$   
mil.km

Kresba NASA.

# Studium atmosféry exoplanety HD 209458b

## An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b

A. Vidal-Madjar\*, A. Lecavelier des Etangs\*, J.-M. Désert\*,  
G. E. Ballester†, R. Ferlet\*, G. Hébrard\* & M. Mayor‡

\* *Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS/UPMC, 98bis boulevard Arago,  
F-75014 Paris, France*

† *Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, 1040 E. 4th St., Rm 901,  
Tucson, Arizona 85721-0077, USA*

‡ *Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland*

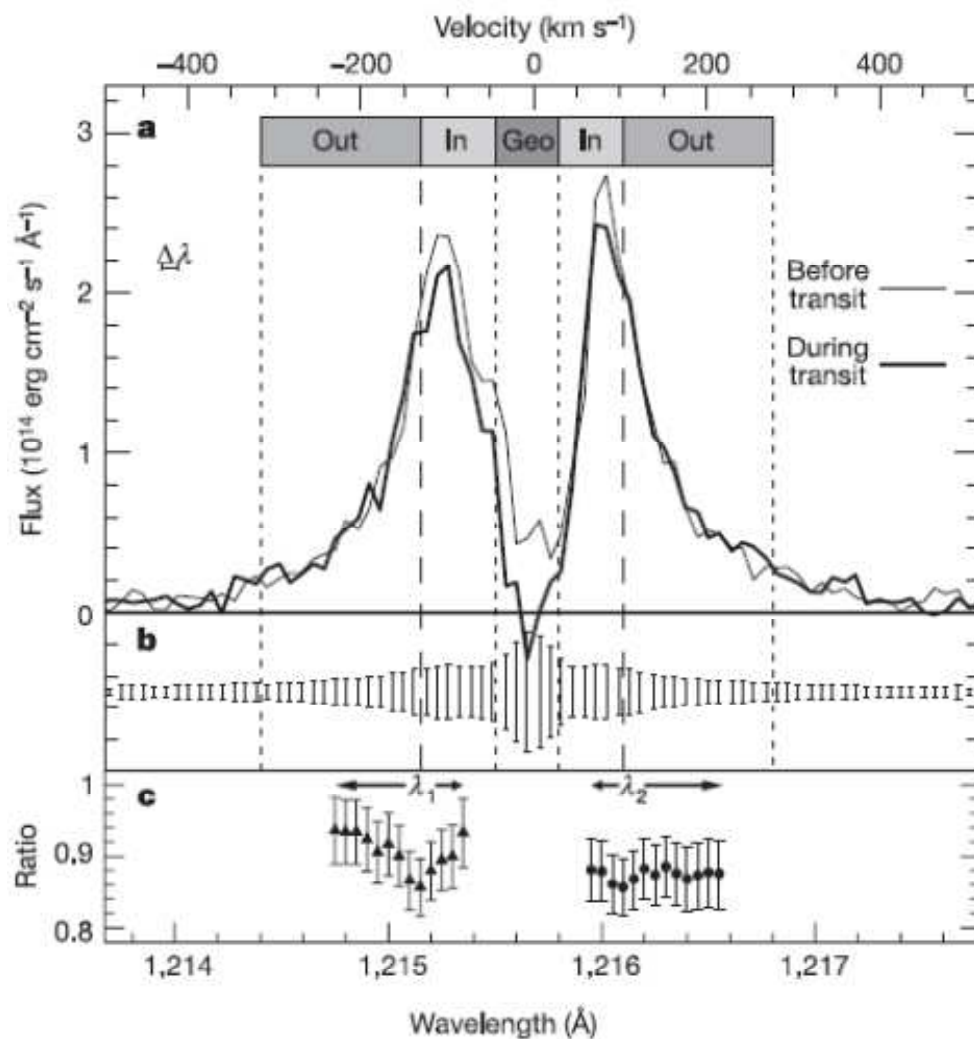
---

The planet in the system HD209458 is the first one for which repeated transits across the stellar disk have been observed<sup>1,2</sup>. Together with radial velocity measurements<sup>3</sup>, this has led to a determination of the planet's radius and mass, confirming it to be a gas giant. But despite numerous searches for an atmospheric signature<sup>4-6</sup>, only the dense lower atmosphere of HD209458b has been observed, through the detection of neutral sodium absorption<sup>7</sup>. Here we report the detection of atomic hydrogen absorption in the stellar Lyman  $\alpha$  line during three transits of HD209458b. An absorption of  $15 \pm 4\%$  ( $1\sigma$ ) is observed. Comparison with models shows that this absorption should take place beyond the Roche limit and therefore can be understood in terms of escaping hydrogen atoms.

Nature **422**, 143, 2003

# Studium spektra HD 209458

## čáry $L_\alpha$ – STIS, mřížka G140M



Změny v absorpci v modré a částečně červené oblasti, mezi  $(-130 + 100)$  km.s<sup>-1</sup>,  
 $\lambda_1 = 1\,215,15$  Å  
 $\lambda_2 = 1\,216,10$  Å  
**pokles intenzity  $L_\alpha$  při přechodu  $15 \pm 4$  %**,  
pokles necitlivý k  $\lambda_2$   
model - pozorování →  
asymetrický únik vodíku -  
ohon z atmosféry planety,  
výpočet min. únikového toku  $\sim 10^7$  kg.s<sup>-1</sup>

# Spektrum exoplanety HD 209 458b

## Balmerův skok - „horký“ vodík

Atmosféra exoplanety je ohřívána ( $a = 6,7$  mil. km)

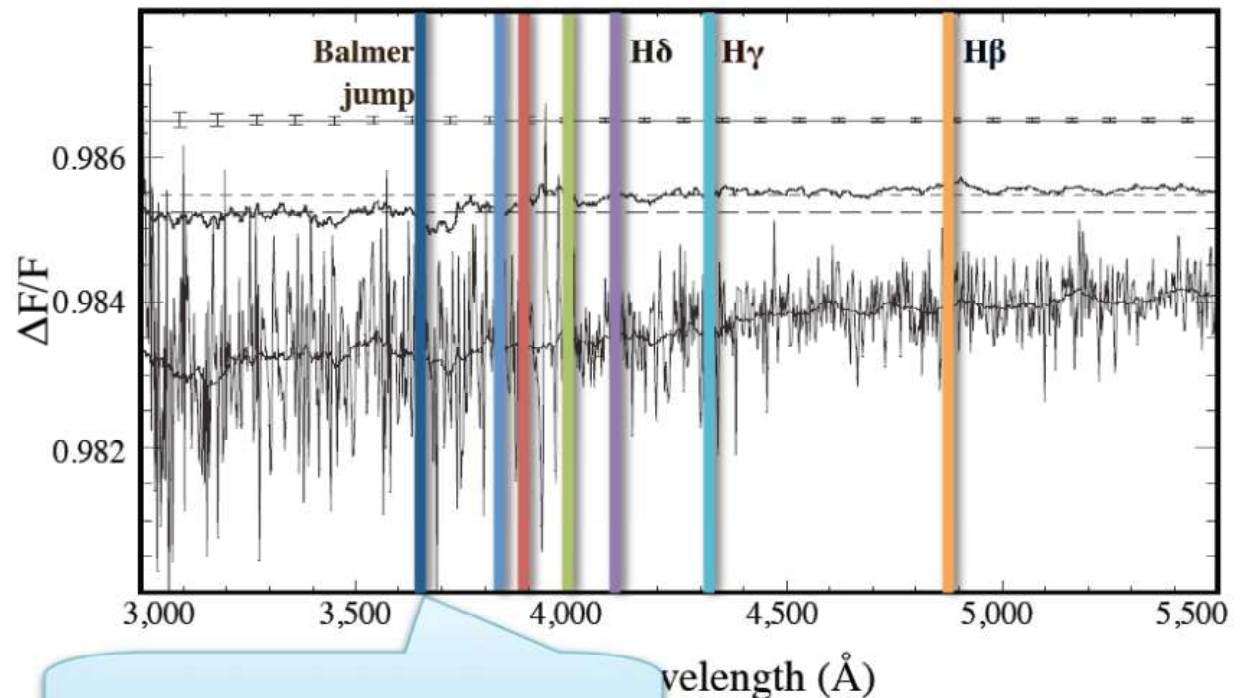
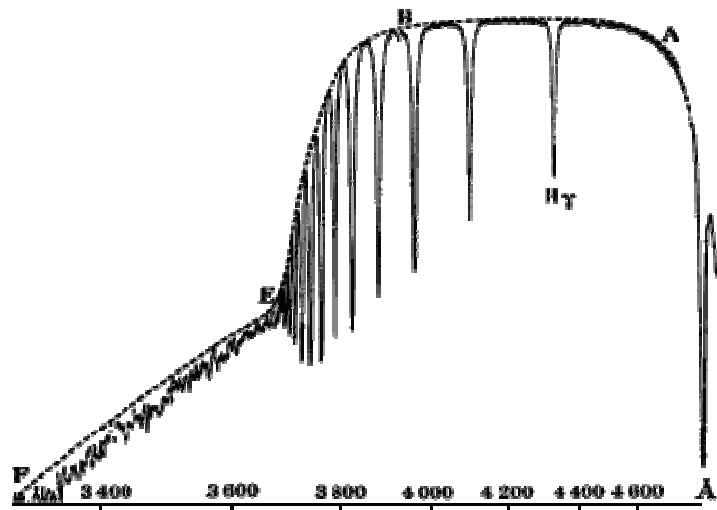
hvězdou, rozepíná se, z horní vrstvy uniká vodík

odečtení spekter hvězdy a při tranzitu = **spektrum exoplanety**

→ Balmerův skok

Hot hydrogen in HD 209458b

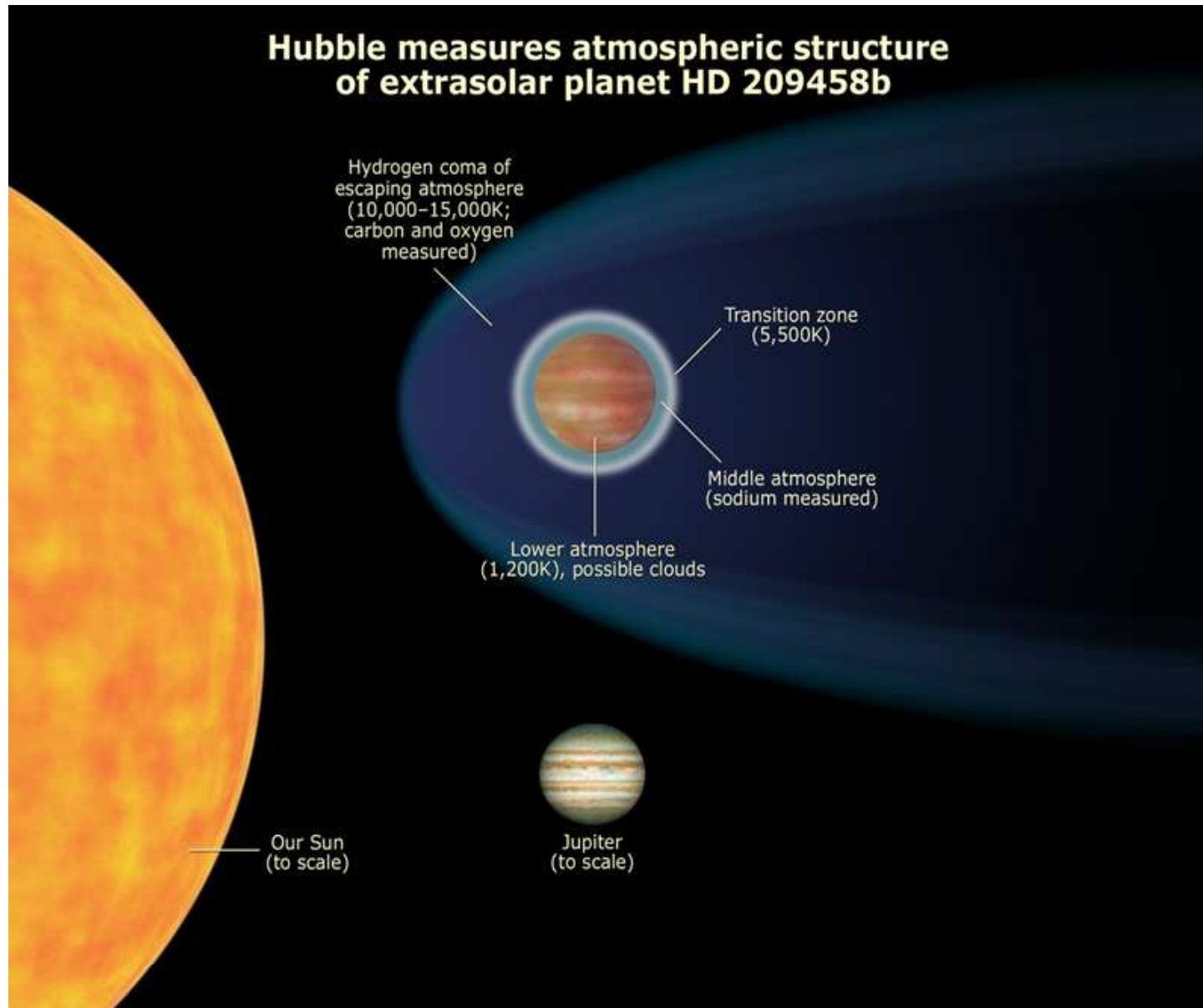
[Ballester et al. 2007]



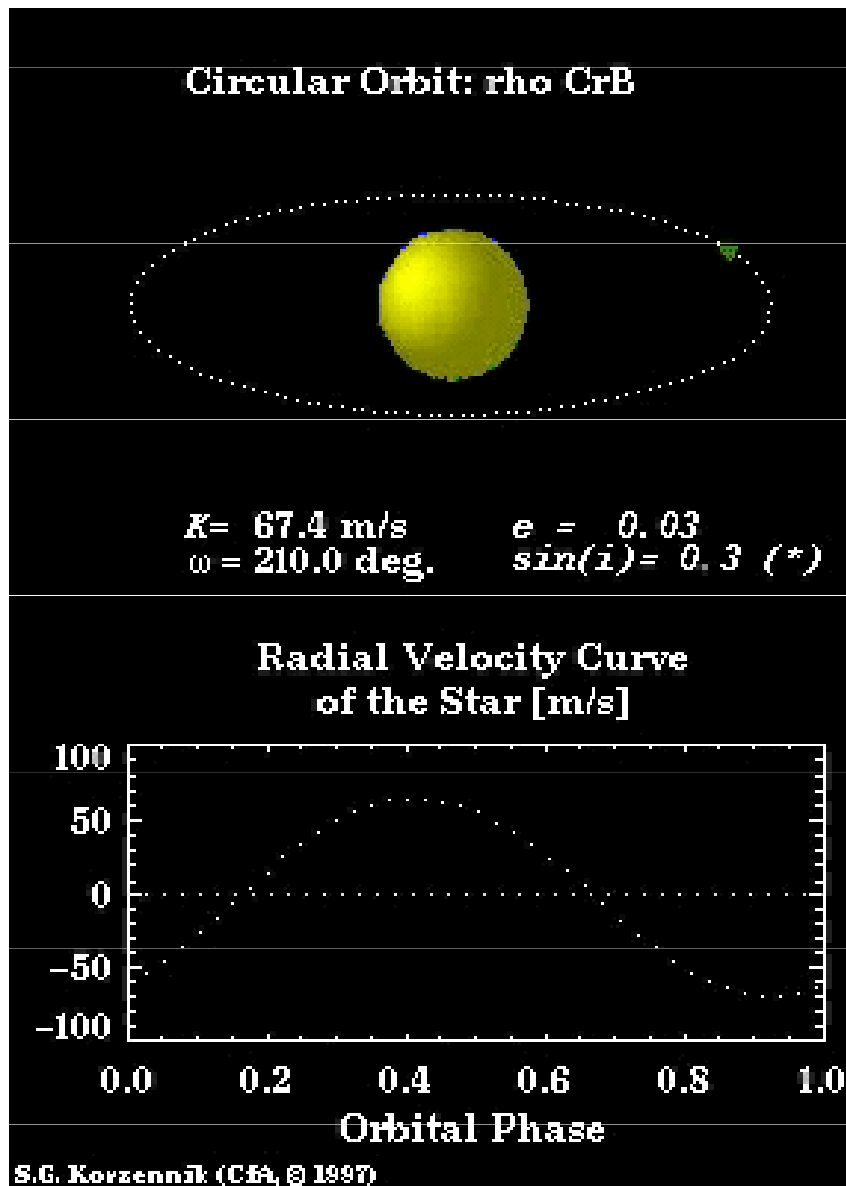
$\Delta F/F \sim 0.03\%$  at  $\sim 3700$  Å → Balmer Jump



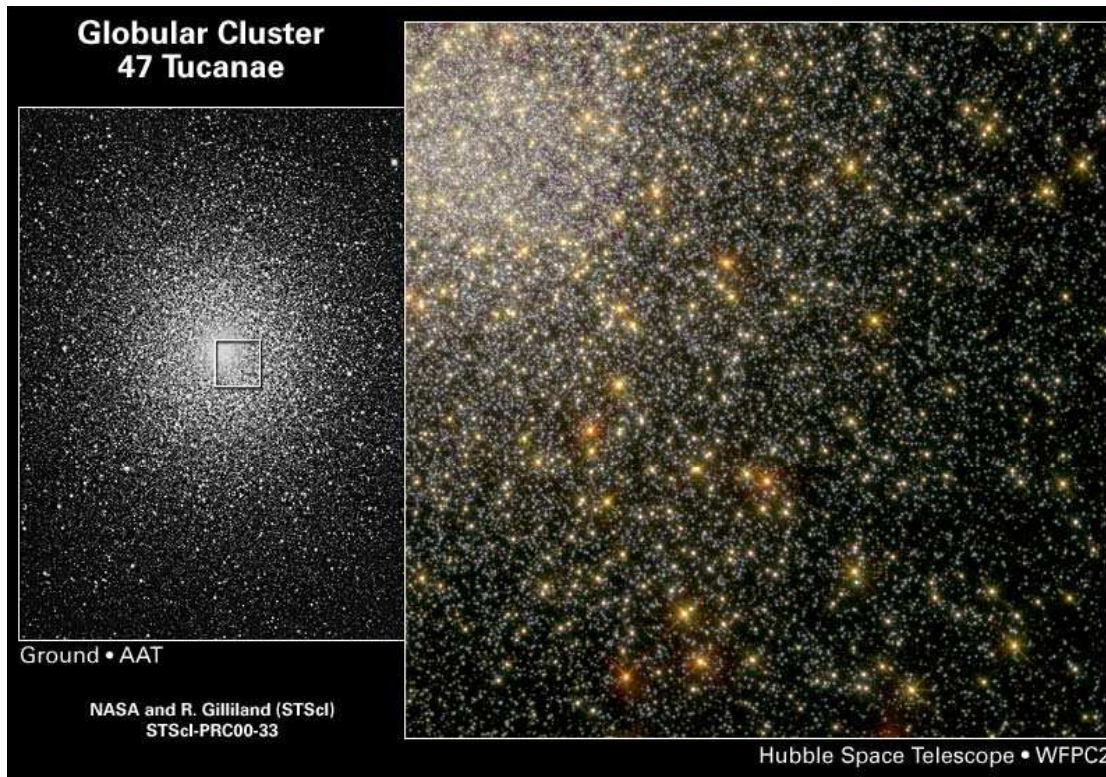
# Struktura atmosféry exoplanety HD 209458b



# Spektroskopické studium exoplanet



# Extrasolární soustavy



**NGC 104, 47 Tuc,**  
 **$r = 4,7$  kpc**

**stáří 11 miliard, Fe/H ↓,**

**středová hustota**

**$1,5 \cdot 10^5 \text{ pc}^{-3}$**

platí  $\tau_{\text{tran}} = 1.412 M_*^{-1/3} R_* P_{\text{orb}}^{1/3}$

$M_*, R_*, P_{\text{orb}} \dots \text{dny}, \tau \dots \text{hod},$

HST WFPC2, 8,3 dne  
předpoklad: **17 planet**

$M_* = 0,81, R_* = 0,92, P_{\text{orb}} = 3,8 \text{ dne},$   
 $\tau = 2,2 \text{ hod}$



# Extrasolární soustavy

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 545:L47–L51, 2000 December 10  
© 2000. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## A LACK OF PLANETS IN 47 TUCANAE FROM A *HUBBLE SPACE TELESCOPE* SEARCH<sup>1</sup>

RONALD L. GILLILAND,<sup>2</sup> T. M. BROWN,<sup>3</sup> P. GUHATHAKURTA,<sup>4</sup> A. SARAJEDINI,<sup>5</sup> E. F. MILONE,<sup>6</sup> M. D. ALBROW,<sup>2</sup>  
N. R. BALIBER,<sup>7</sup> H. BRUNTT,<sup>8</sup> A. BURROWS,<sup>9</sup> D. CHARBONNEAU,<sup>3,10</sup> P. CHOI,<sup>4</sup> W. D. COCHRAN,<sup>7</sup>  
P. D. EDMONDS,<sup>10</sup> S. FRANSEN,<sup>8</sup> J. H. HOWELL,<sup>4</sup> D. N. C. LIN,<sup>4</sup> G. W. MARCY,<sup>11</sup> M. MAYOR,<sup>12</sup>  
D. NAEF,<sup>12</sup> S. SIGURDSSON,<sup>13</sup> C. R. STAGG,<sup>6</sup> D. A. VANDENBERG,<sup>14</sup>  
S. S. VOGT,<sup>4</sup> AND M. D. WILLIAMS<sup>6</sup>

*Received 2000 August 25; accepted 2000 October 10; published 2000 November 28*

### ABSTRACT

We report results from a large *Hubble Space Telescope* project to observe a significant (~34,000) ensemble of main-sequence stars in the globular cluster 47 Tucanae with a goal of defining the frequency of inner orbit, gas giant planets. Simulations based on the characteristics of the 8.3 days of time series data in the F555W and F814W Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) filters show that ~17 planets should be detected by photometric transit signals if the frequency of hot Jupiters found in the solar neighborhood is assumed to hold for 47 Tuc. The experiment provided high-quality data sufficient to detect planets. A full analysis of these WFPC2 data reveals ~75 variables, but no light curves resulted for which a convincing interpretation as a planet could be made. The planet frequency in 47 Tuc is at least an order of magnitude below that for the solar neighborhood. The cause of the absence of close-in planets in 47 Tuc is not yet known; presumably the low metallicity and/or crowding of 47 Tuc interfered with planet formation, with orbital evolution to close-in positions, or with planet survival.

*Subject headings:* binaries: eclipsing — globular clusters: individual (NGC 104, 47 Tucanae) — planetary systems — techniques: photometric



# Nenalezení extrasolárních planet v NGC 104

fotometricky pozorováno 34 000 hvězd, nalezeno 75 proměnných hvězd, **negativní výsledek u planet,**

Vysvětlení:

- **planety se vůbec neformovaly nebo velmi zřídka**
- **planety byly „roztrhány“ mateřskými hvězdami**

Příčina: nízký obsahem kovů respektive fotovypařování protoplanetárních disků ?!

# Úlohy

13.3, 13.4. 13.5, 13. 9, 13.11, 13.15, 13.17, 13.19