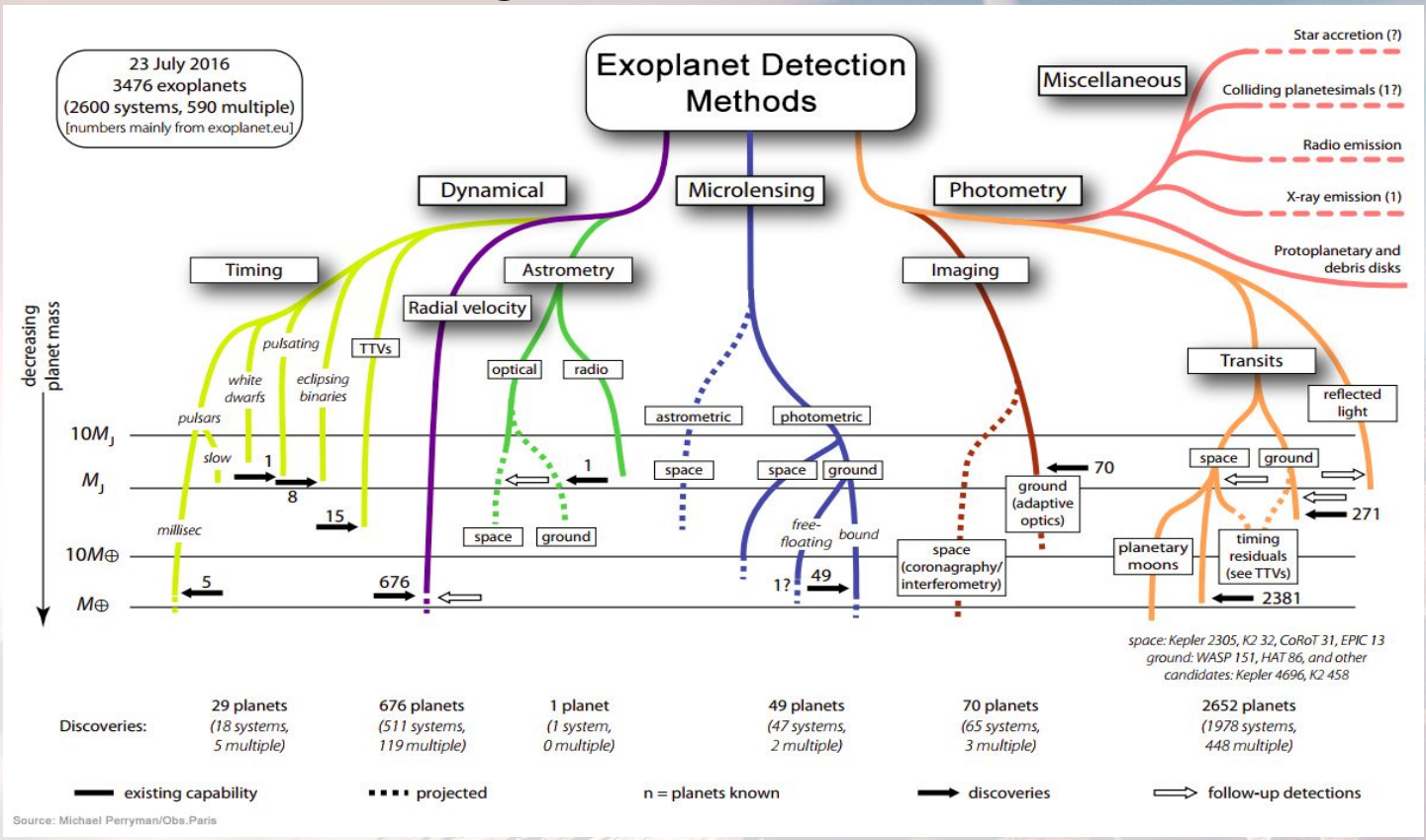


F7514 Exoplanety

7-Další metody detekce exoplanet

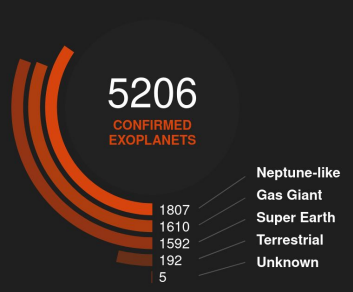
Marek Skarka

Jak objevit exoplanetu



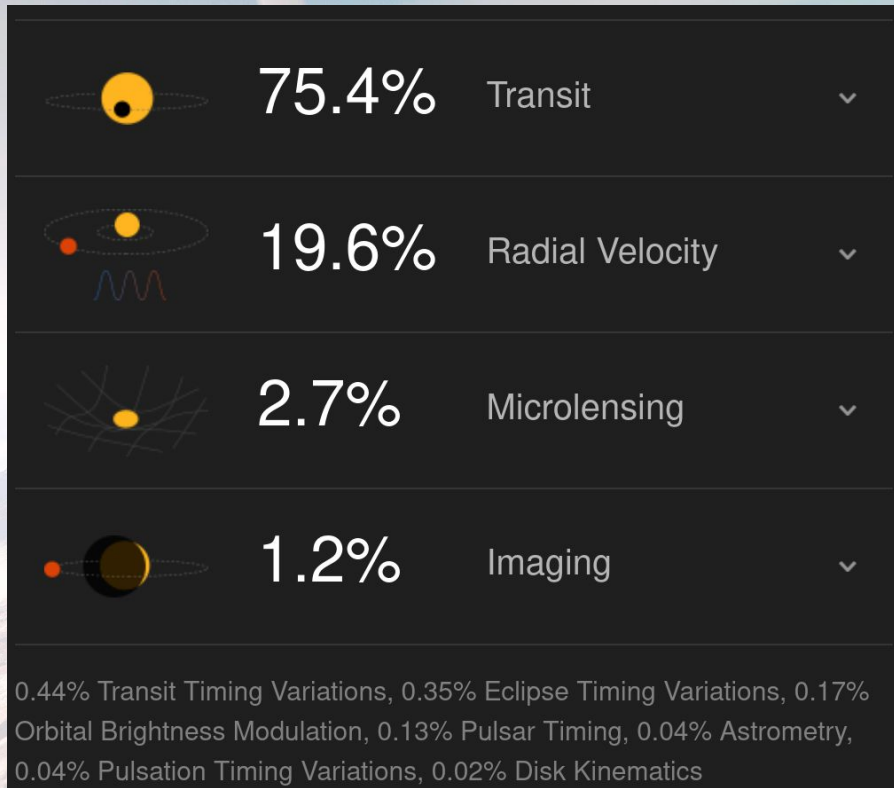
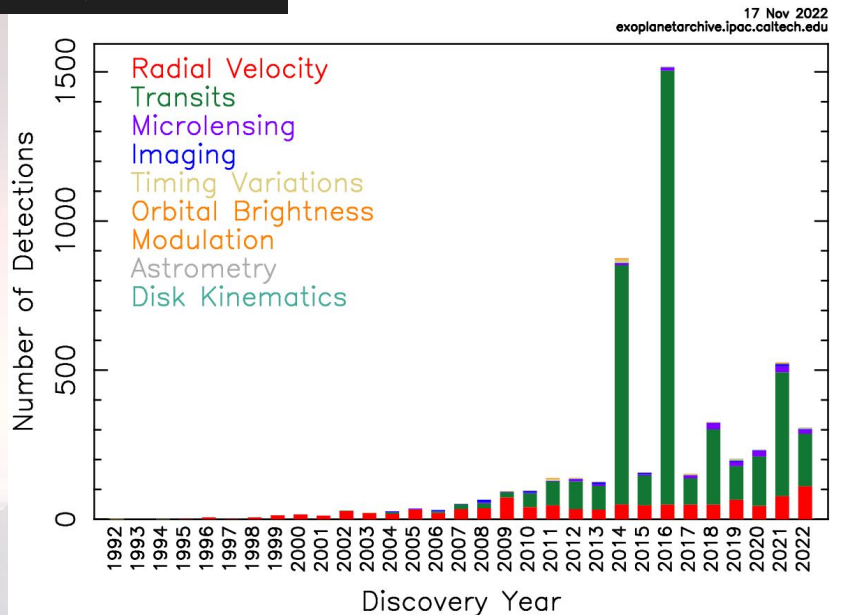
Přímé metody - přímé pozorování planety

Nepřímé metody - pozorování hvězdy -> jak planeta ovlivňuje pozorovatelné charakteristiky hvězdy



Jak objevit exoplanetu

Detections Per Year



Přímé metody - přímé pozorování planety

Nepřímé metody - pozorování hvězdy -> jak planeta ovlivňuje pozorovatelné charakteristiky hvězdy

Astrometrie

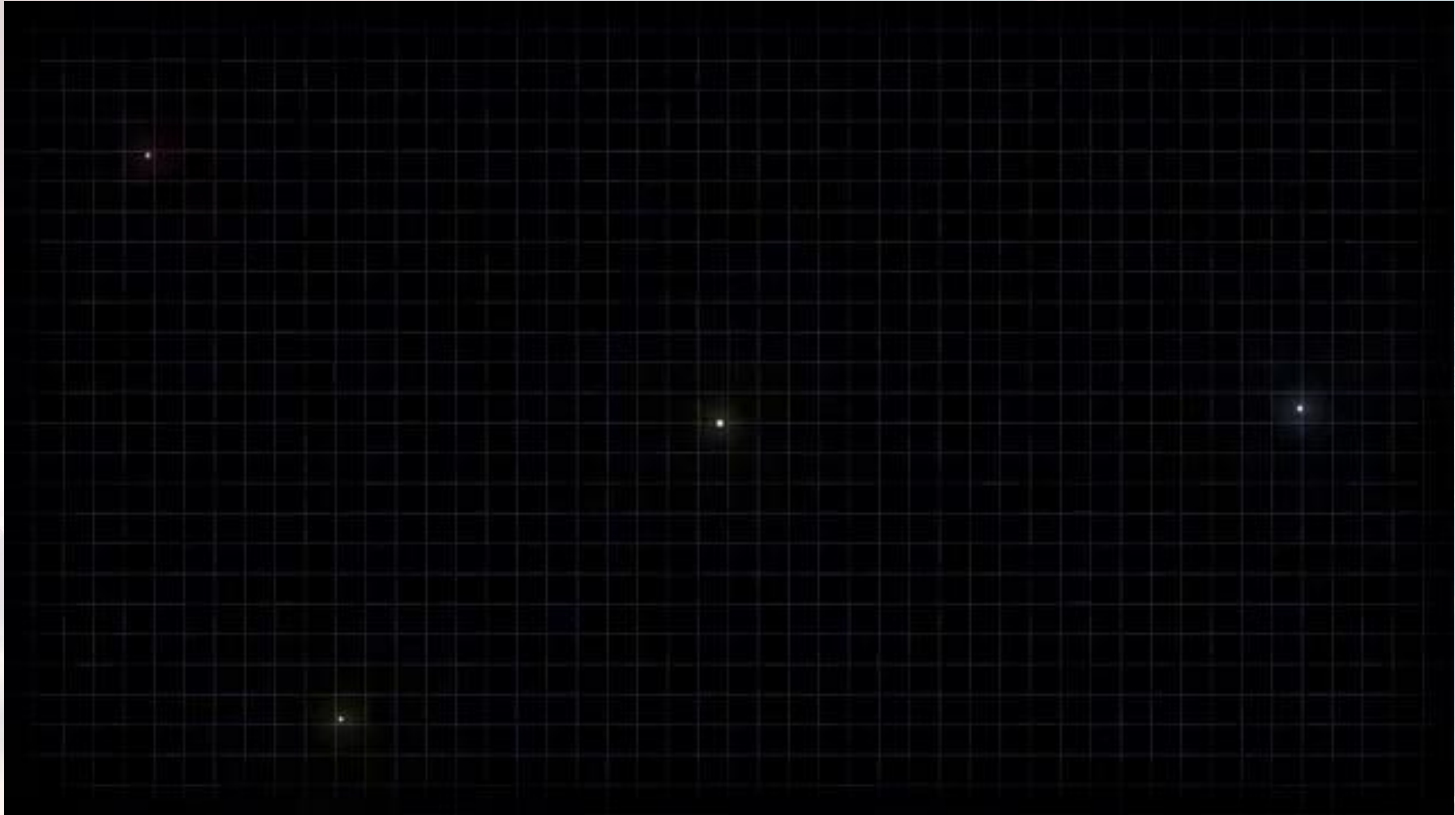
Využívá tzv. efektu odrazu - planeta i hvězda se pohybují okolo společného středu hmotnosti



Primoz Kosmus, Peking 2008

Astrometrie

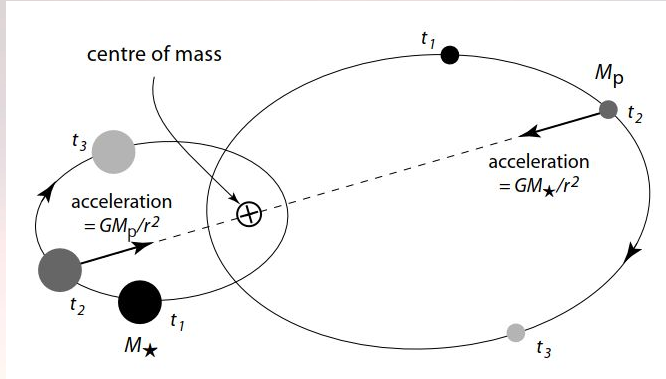
Využívá tzv. efektu odrazu - planeta i hvězda se pohybují okolo společného středu hmotnosti
Měří se přesná poloha hvězdy vůči ostatním hvězdám



Astrometrie

2 planety

Využívá tzv. efektu odrazu - planeta i hvězda se pohybují okolo společného středu hmotnosti
Měří se přesná poloha hvězdy vůči ostatním hvězdám



$$M_p a_p = M_\star a_\star$$

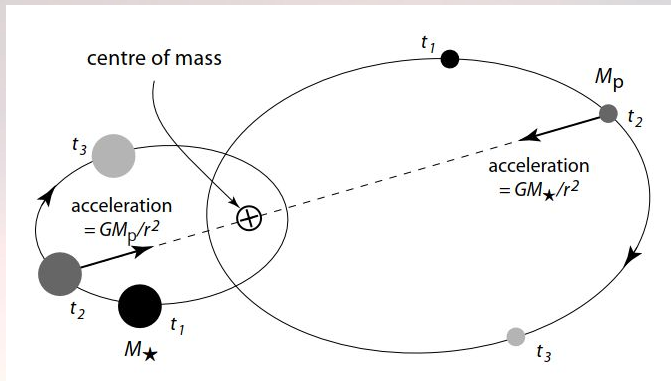
$$M_p \ll M_\star$$

$$a = a_p + a_\star = \left(\frac{M_\star + M_p}{M_p} \right) a_\star$$

Astrometrie

1 planeta

Využívá tzv. efektu odrazu - planeta i hvězda se pohybují okolo společného středu hmotnosti
Měří se přesná poloha hvězdy vůči ostatním hvězdám



$$M_p a_p = M_{\star} a_{\star}$$

$$M_p \ll M_{\star}$$

$$a = a_p + a_{\star} = \left(\frac{M_{\star} + M_p}{M_p} \right) a_{\star}$$

Úhlová velikost velké poloosy:

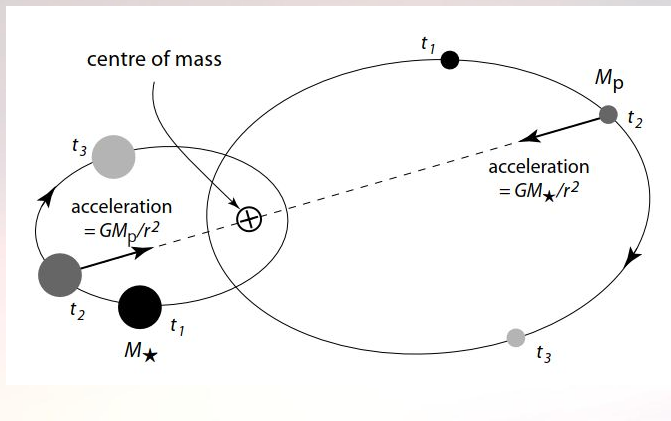
$$\alpha = \frac{a_{\star}}{d} = \left(\frac{M_p}{M_{\star}} \right) \left(\frac{a}{d} \right) = \left(\frac{M_p}{M_{\star}} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ pc}} \right)^{-1} \text{ arcsec}$$

Z amplitudy úhlového pohybu po obloze je možné odhadnout poměrnou hmotnost exoplanety

Astrometrie

2 planety

Využívá tzv. efektu odrazu - planeta i hvězda se pohybují okolo společného středu hmotnosti
Měří se přesná poloha hvězdy vůči ostatním hvězdám



$$M_p a_p = M_* a_*$$

$$M_p \ll M_*$$

$$a = a_p + a_* = \left(\frac{M_* + M_p}{M_p} \right) a_*$$

Úhlová velikost velké poloosy:

$$\alpha = \frac{a_*}{d} = \left(\frac{M_p}{M_*} \right) \left(\frac{a}{d} \right) = \left(\frac{M_p}{M_*} \right) \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ pc}} \right)^{-1} \text{ arcsec}$$

Jupiter a Země ze vzdálenosti 1 pc:

$$\alpha_{\text{Jupiter}} = 5 \text{ mas}$$

$$\alpha_{\text{Zeme}} = 3 \mu\text{as}$$

Mediánová hodnota pro tranzitující planety: 0.1 μas
Mediánová hodnota pro RV: 20 μas

=> potřeba extrémně precizních měření po dlouhý čas

Z amplitudy úhlového pohybu po obloze je možné odhadnout poměrnou hmotnost exoplanety

Astrometrie

2 planety

Přesnost měření daná fotonovým šumem:

$$\sigma_{\text{ph}} = \frac{\lambda}{4\pi D} \frac{1}{S/N}$$

Na 600 nm, dalekohled o průměru $D=10$ m, $V=15$ mag, expozice 1 h, propustnost optické soustavy 0.4: $\sigma=300 \mu\text{as}$



Astrometrie

2 planety

Přesnost měření daná fotonovým šumem:

$$\sigma_{\text{ph}} = \frac{\lambda}{4\pi D} \frac{1}{S/N}$$

Na 600 nm, dalekohled o průměru $D=10$ m, $V=15$ mag, expozice 1 h, propustnost optické soustavy 0.4: $\sigma=300$ μas

Přesnost měření úhlů pro blízké hvězdy v zenitu (úhlová vzdálenost Θ) při expozici t :

$$\sigma_{\delta} \simeq 540 D^{-\frac{2}{3}} \theta t^{-\frac{1}{2}} \text{ arcsec}$$

Pro $\Theta=1$ arcmin, $D=1$ m, $t=1$ h: $\sigma=3$ mas

Keck-I a VLTI jsou schopny dosáhnout k 10-100 μas - detekce několika hnědých trpaslíků

Jupiter a Země ze vzdálenosti 1 pc:

$$\alpha_{\text{Jupiter}} = 5 \text{ mas}$$

$$\alpha_{\text{Zeme}} = 3 \mu\text{as}$$

Mediánová hodnota pro tranzitující planety: 0.1 μas
Mediánová hodnota pro RV: 20 μas

Astrometrie

2 planety

Přesnost měření daná fotonovým šumem:

$$\sigma_{\text{ph}} = \frac{\lambda}{4\pi D} \frac{1}{S/N}$$

Na 600 nm, dalekohled o průměru $D=10$ m, $V=15$ mag, expozice 1 h, propustnost optické soustavy 0.4: $\sigma=300$ μs

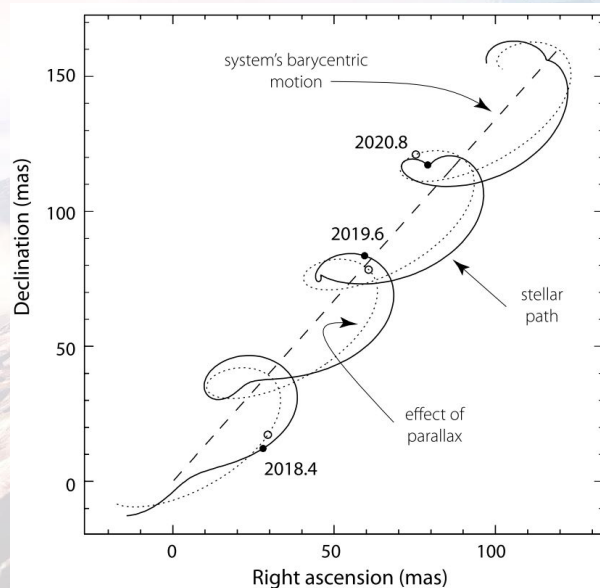
Přesnost měření úhlů pro blízké hvězdy v zenitu (úhlová vzdálenost Θ) při expozici t:

$$\sigma_{\delta} \approx 540 D^{-\frac{2}{3}} \theta t^{-\frac{1}{2}} \text{ arcsec}$$

Pro $\Theta=1$ arcmin, $D=1$ m, $t=1$ h: $\sigma=3$ mas

Měření je komplikováno pohyby Země (paralaxa, aberace), pohybem Slunce okolo barycentra, ohybem světla gravitačním polem Slunce a vlastním pohybem hvězdy v prostoru (zdánlivá změna radiální rychlosti)

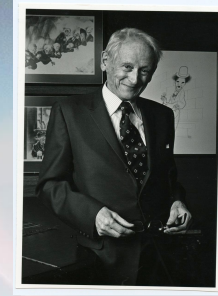
Simulace planety s $M_p=15 M_J$ okolo hvězdy $M_*=1 M_S$ na dráze s velkou poloosou 0.6 au a excentricitou 0.2 ve vzdálenosti 50 pc od Slunce s vlastním pohybem 50 mas/rok



Pohyb hvězdy zvětšen 30x!

Astrometrie

2 planetary



THE ASTRONOMICAL JOURNAL

VOLUME 68, NUMBER 7

SEPTEMBER 1963

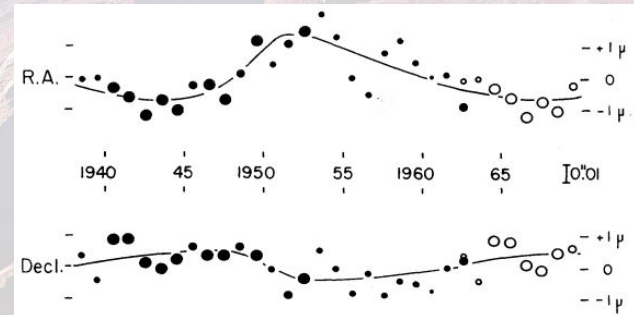
Astrometric Study of Barnard's Star from Plates Taken with the 24-inch Sproul Refractor

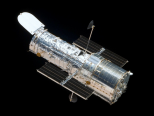
PETER VAN DE KAMP

Sproul Observatory, Swarthmore College

(Received 21 June 1963)

Twenty-five consecutive years of photographic observations of Barnard's star show deviations from uniform proper motion and secular acceleration which can be represented by Keplerian motion with a period of 24 yr and semi-axis major of $^{\circ}0245 \pm ^{\circ}002$ (p.e.). Assuming a value of $0.15 \odot$ for the mass of Barnard's star, the mass of the companion proves to be $0.0015 \odot$, or 1.6 times the mass of Jupiter.





Astrometrie

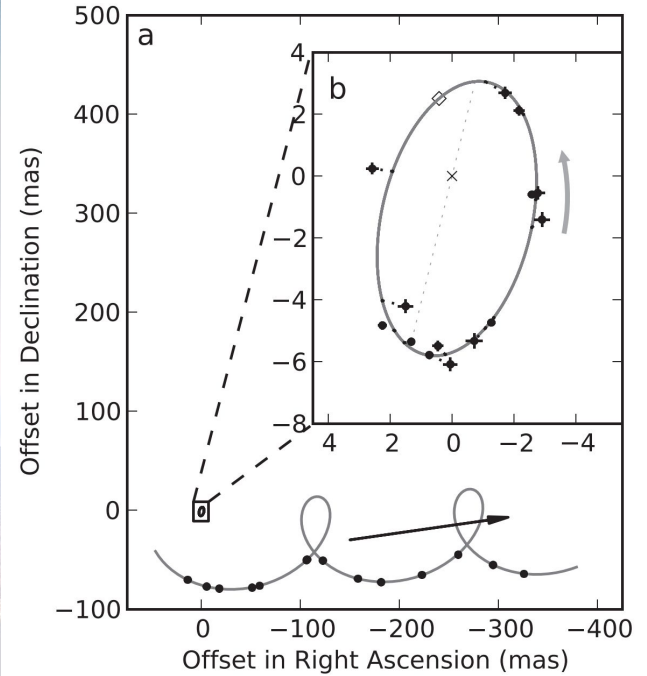
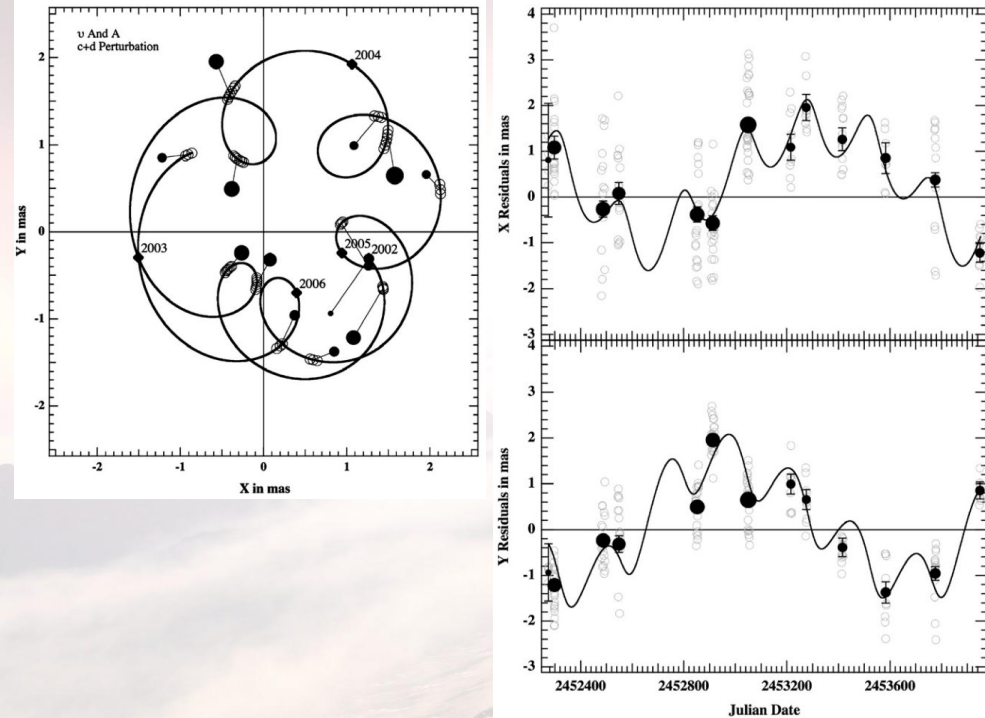
2 planetary

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 715:1203–1220, 2010 June 1
© 2010. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/0004-637X/715/2/1203

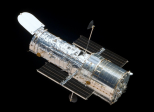
NEW OBSERVATIONAL CONSTRAINTS ON THE ν ANDROMEDAE SYSTEM WITH DATA FROM THE HUBBLE SPACE TELESCOPE AND HOBBY-EBERLY TELESCOPE*

BARBARA E. MCARTHUR¹, G. FRITZ BENEDICT¹, RORY BARNES², EDER MARTIOLI^{1,3}, SYLVAIN KORZENNIK⁴, ED NELAN⁵, AND R. PAUL BUTLER⁶



Sahlmann et al. 2013, A&A, 556, 133

Denis-P J082303.1-491201
2 roky pozorování na VLT,
L1.5 trpaslík +28 M_J



Astrometrie

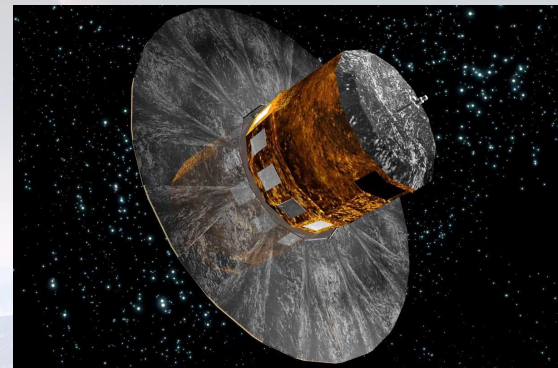
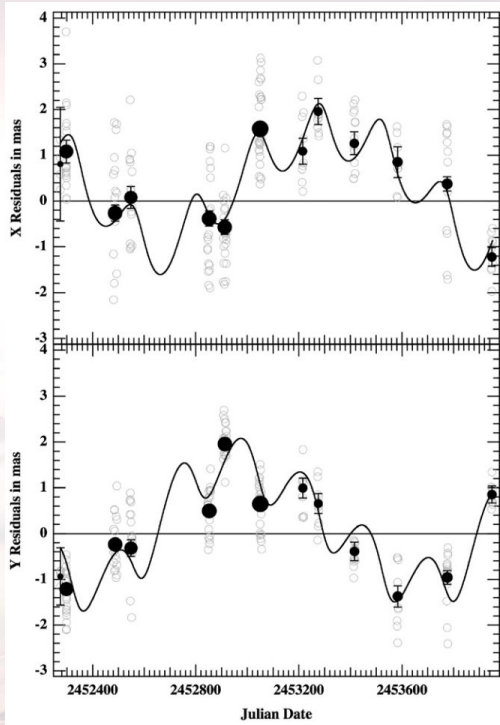
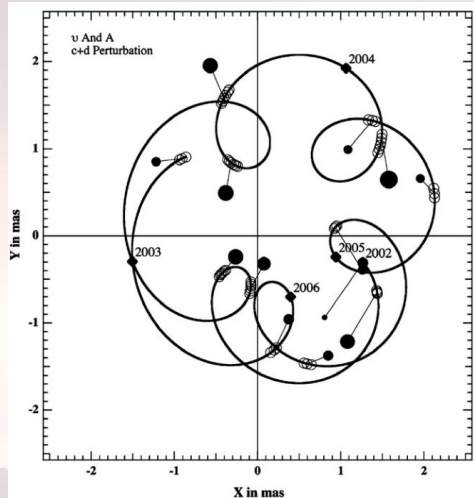
2 planety

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 715:1203–1220, 2010 June 1
© 2010. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

doi:10.1088/0004-637X/715/2/1203

NEW OBSERVATIONAL CONSTRAINTS ON THE ν ANDROMEDAE SYSTEM WITH DATA FROM THE HUBBLE SPACE TELESCOPE AND HOBBY-EBERLY TELESCOPE*

BARBARA E. MCARTHUR¹, G. FRITZ BENEDICT¹, RORY BARNES², EDER MARTIOLI^{1,3}, SYLVAIN KORZENNIK⁴, ED NELAN⁵, AND R. PAUL BUTLER⁶



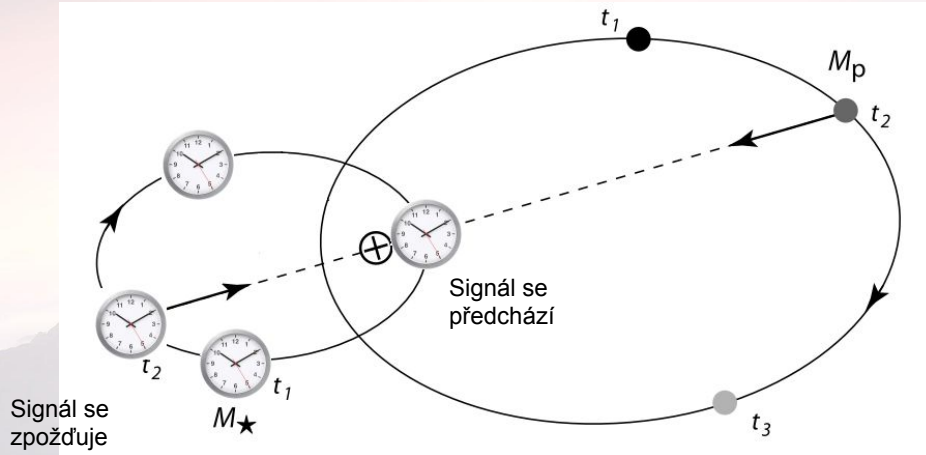
GAIA - start 2013, přesnost až 10 μ as pro $V \sim 7-12$ mag, 20-25 μ as pro $V=15$ mag

Očekává se objev tisíců exoplanet, ani po 8 letech měření žádná!!!

Změny pozorovaných časů dějů

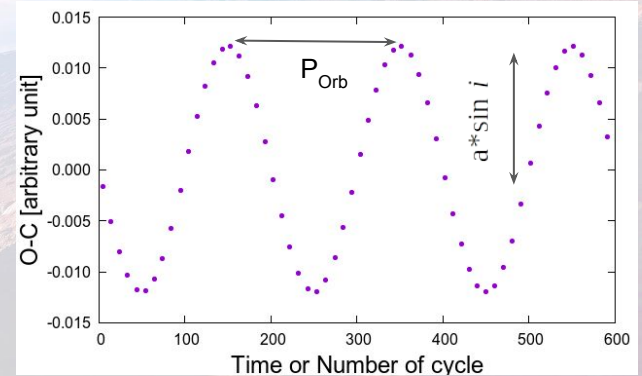
Při oběhu těles kolem společného těžiště je vlivem konečné rychlosti světla možné pozorovat cyklické změny periodických dějů v soustavě (pulzace, pulsy, změny okamžiků minim zákrytových dvojhvězd, tranzitů atd.)

Light Travel-Time effect (LTTE, LiTE)



K pozorovateli

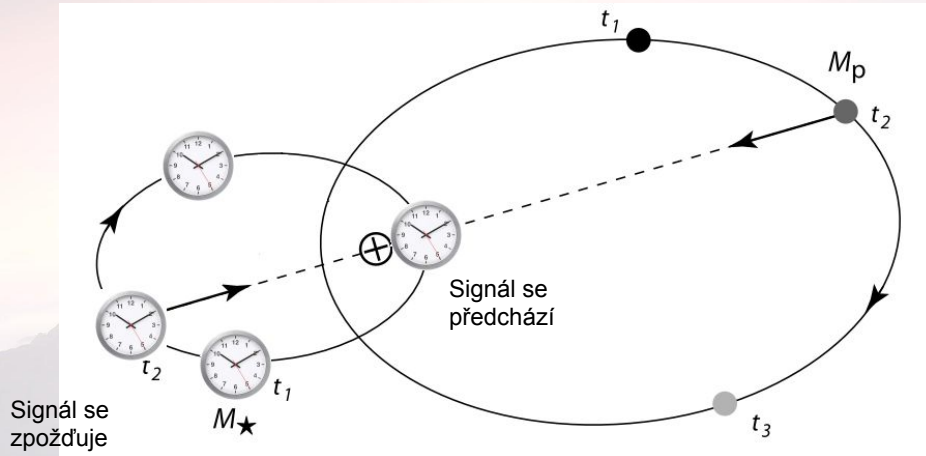
$$\tau_p = \frac{1}{c} \frac{a \sin i M_p}{M_{\star}}$$



Změny pozorovaných časů dějů

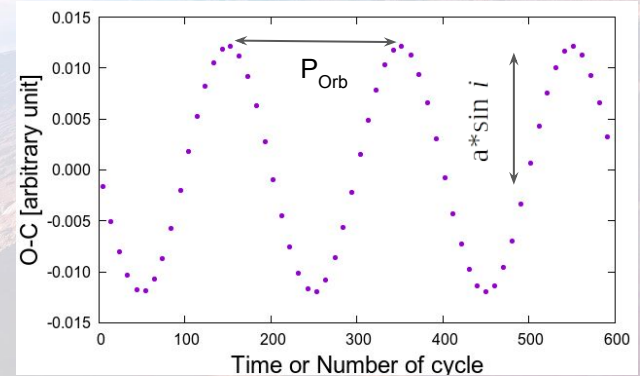
Při oběhu těles kolem společného těžiště je vlivem konečné rychlosti světla možné pozorovat cyklické změny periodických dějů v soustavě (pulzace, pulsy, změny okamžiků minim zákrytových dvojhvězd, tranzitů atd.)

Light Travel-Time effect (LTTE, LiTE)



K pozorovateli

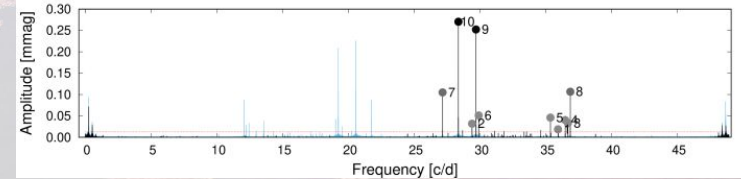
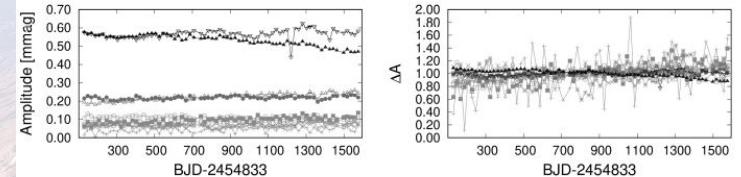
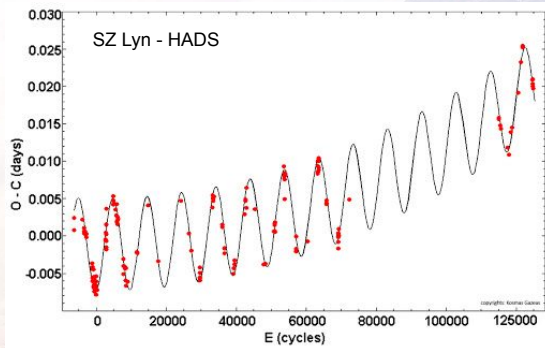
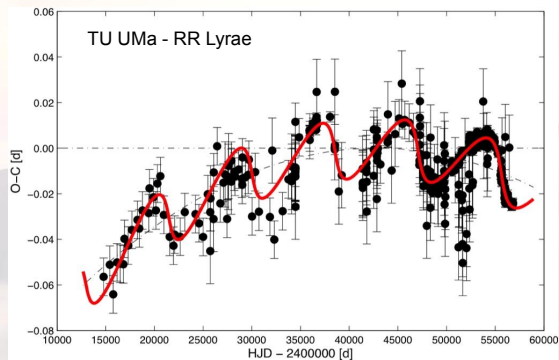
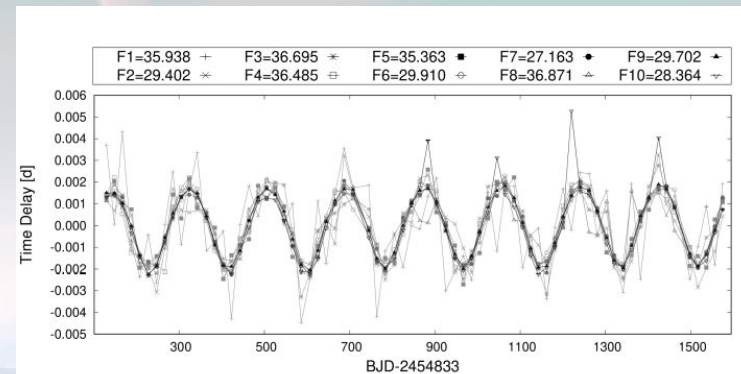
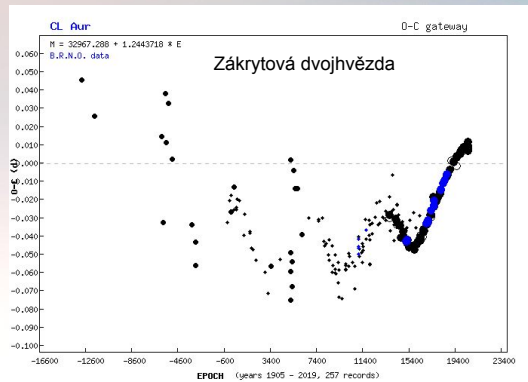
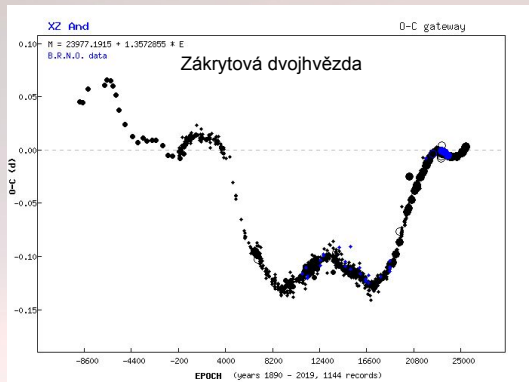
$$\tau_p = \frac{1}{c} \frac{a \sin i M_p}{M_\star}$$



$$v_{\text{rad},1}(t) = -c \frac{d\tau}{dt}$$

Metoda je plně ekvivalentní s měřením radiálních rychlostí

Změny pozorovaných časů dějů



Pulsary (PTV)

7 planet



A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12

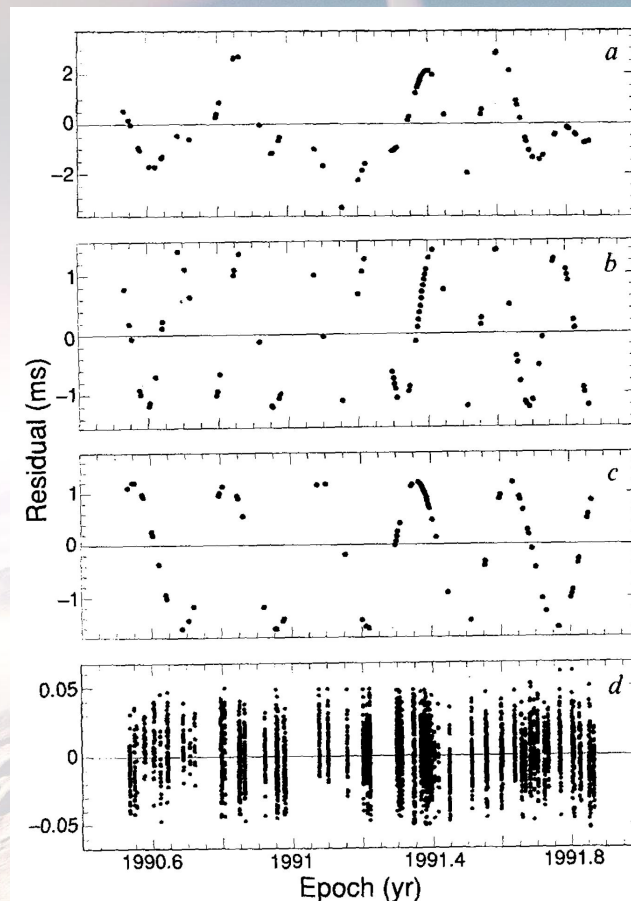
A. Wolszczan* & D. A. Frail†

* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257 + 12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least $2.8 M_{\oplus}$ and $3.4 M_{\oplus}$, where M_{\oplus} is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829 - 10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.

Wolszczan&Frail 1992, Nature, 355, 145



Surová data

Data pro první planetu

Data pro druhou planetu

Rezidua

PSR 1257+12 b - planeta s nejmenší známou hmotností $0.02 M_{\oplus}$

Pulsary (PTV)

7 planet



A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12

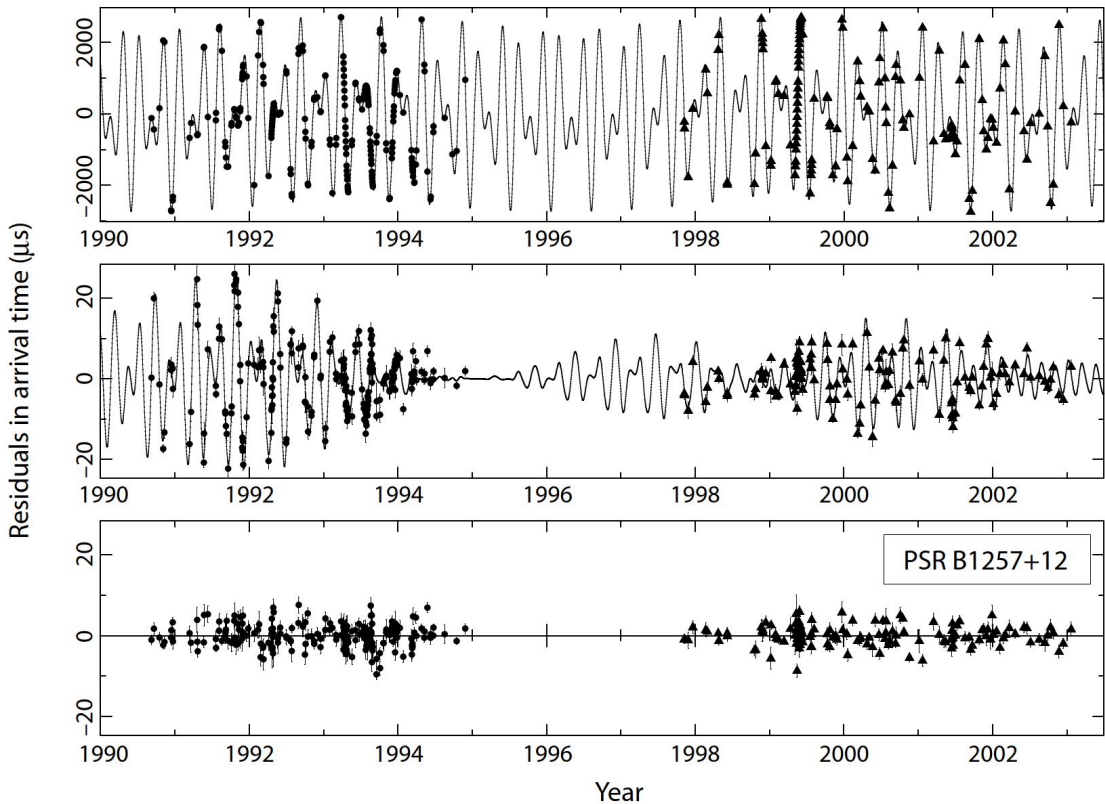
A. Wolszczan* & D. A. Frail†

* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257 + 12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least $2.8 M_{\oplus}$ and $3.4 M_{\oplus}$, where M_{\oplus} is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829 – 10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.

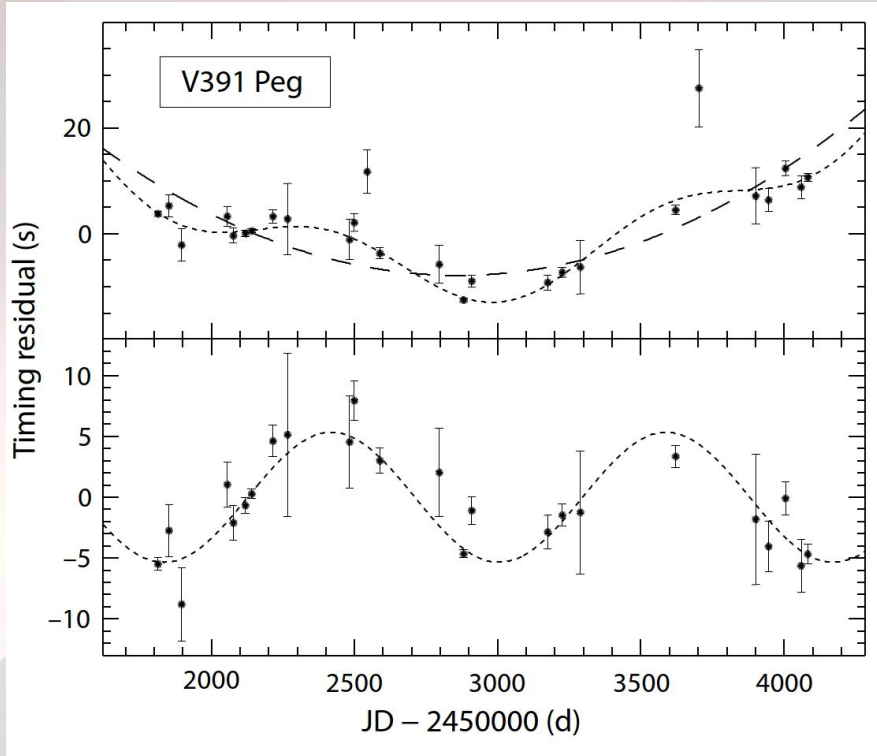
Wolszczan&Frail 1992, Nature, 355, 145



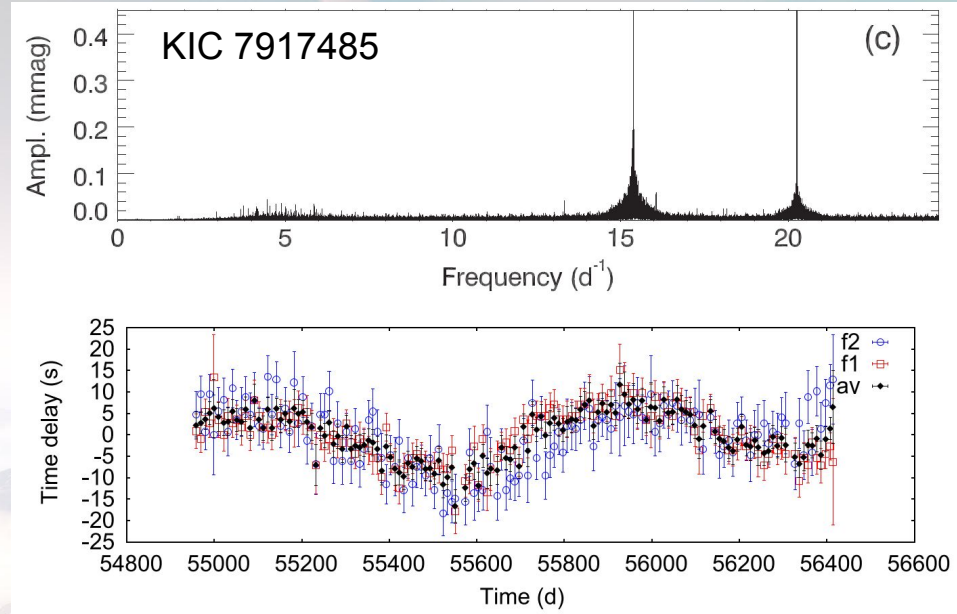
Konacki&Wolszczan 2003, ApJ, 591, 147

Pulzující hvězdy (PTV)

2 planety



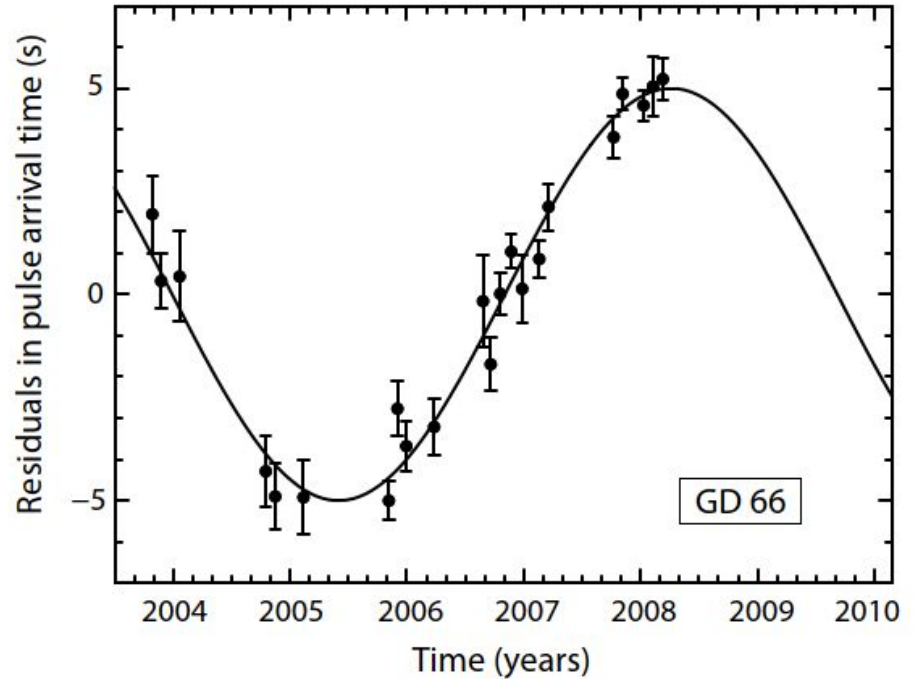
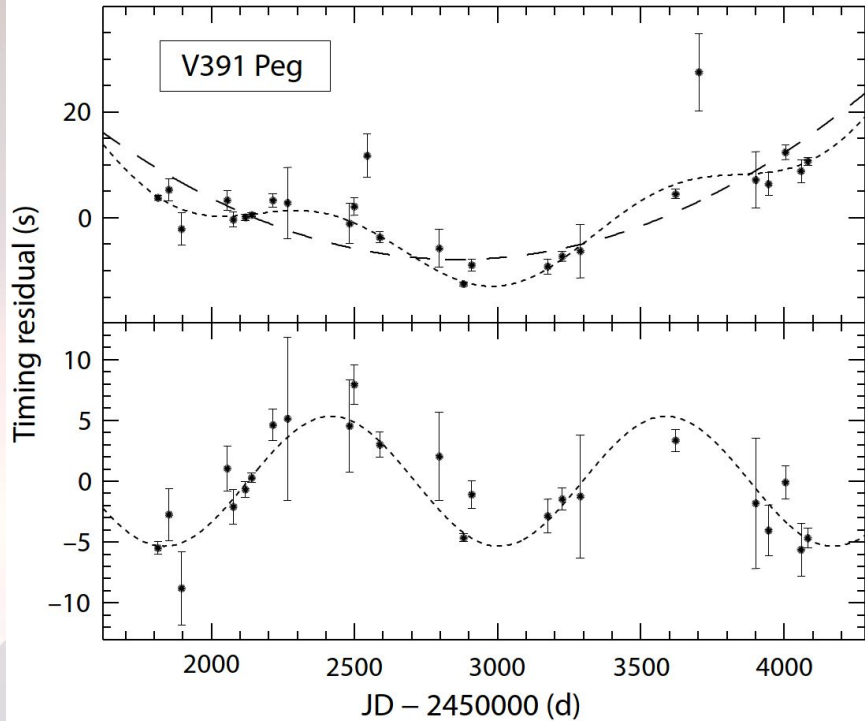
Silvotti et al. 2007, Nature, 449, 189
sdB+3.2 M_J , perioda 3.2 roku



Murphy et al. 2016, ApJL, 827, 17
MS A + 12 M_J , perioda 840 dní

Pulzující hvězdy (PTV)

2 planety

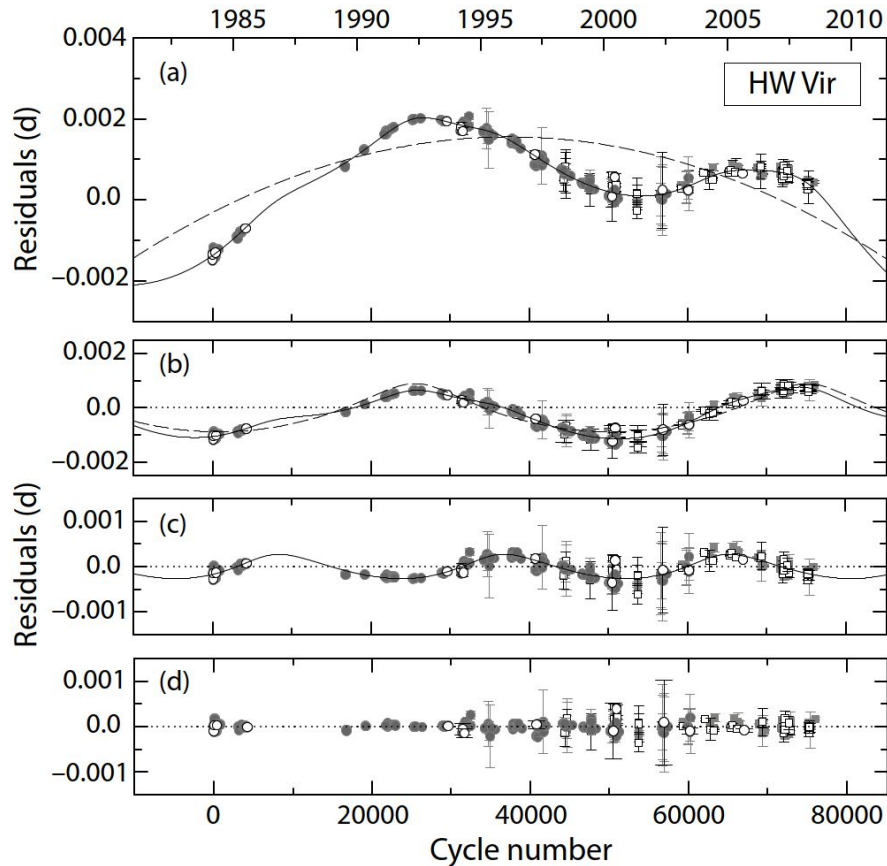


Silvotti et al. 2007, Nature, 449, 189
sdB+3.2 M_J , perioda 3.2 roku

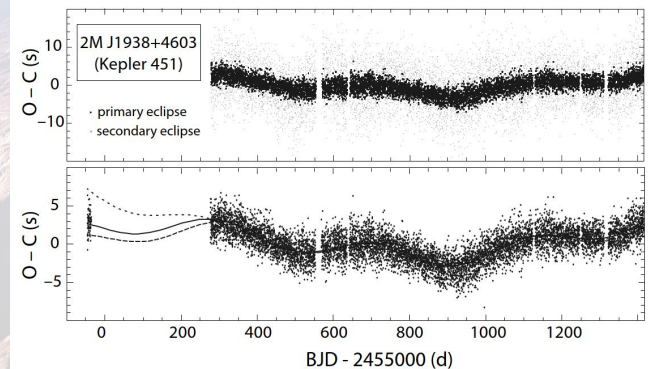
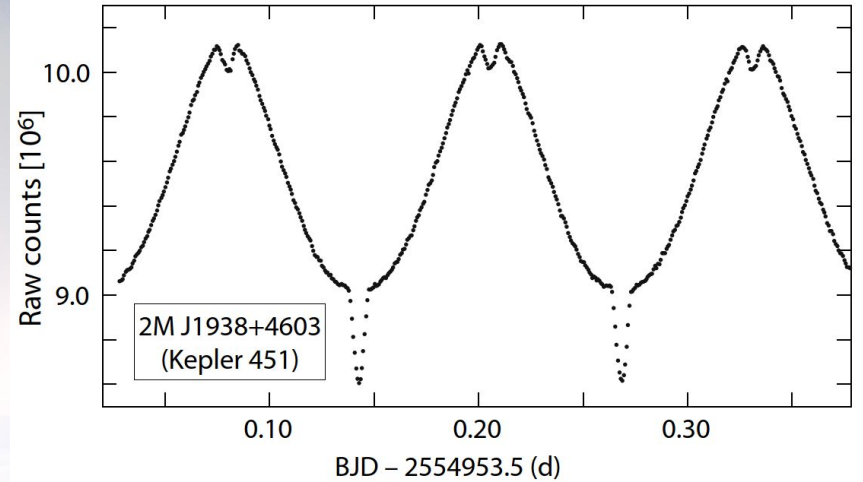
Mullally et al. 2009, ApJ, 694, 327 - kandidát

Zákrytové dvojhvězdy (ETV)

18 planet



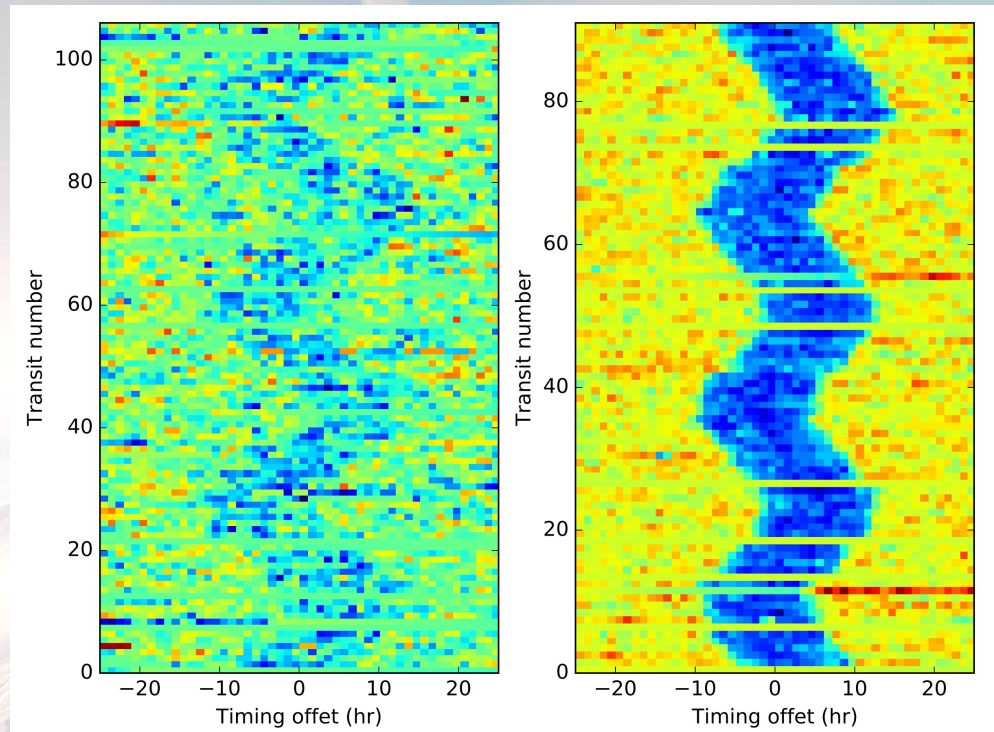
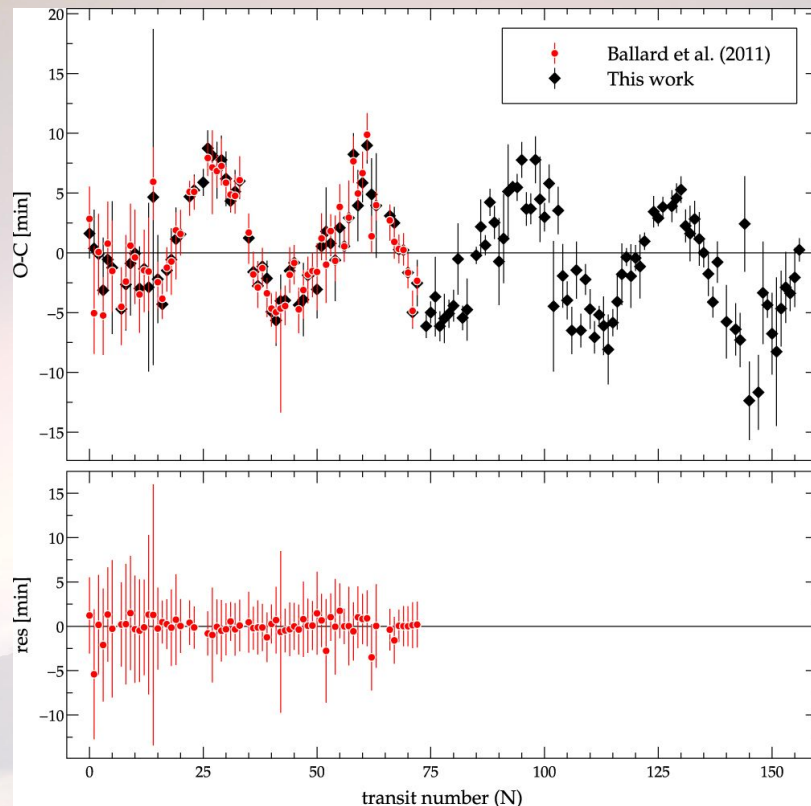
sdB + M trpaslík + 20 M_J , perioda 15 let



sdB + M trpaslík + 1.9 M_J , perioda 416 dní

Změny časů tranzitů (TTV)

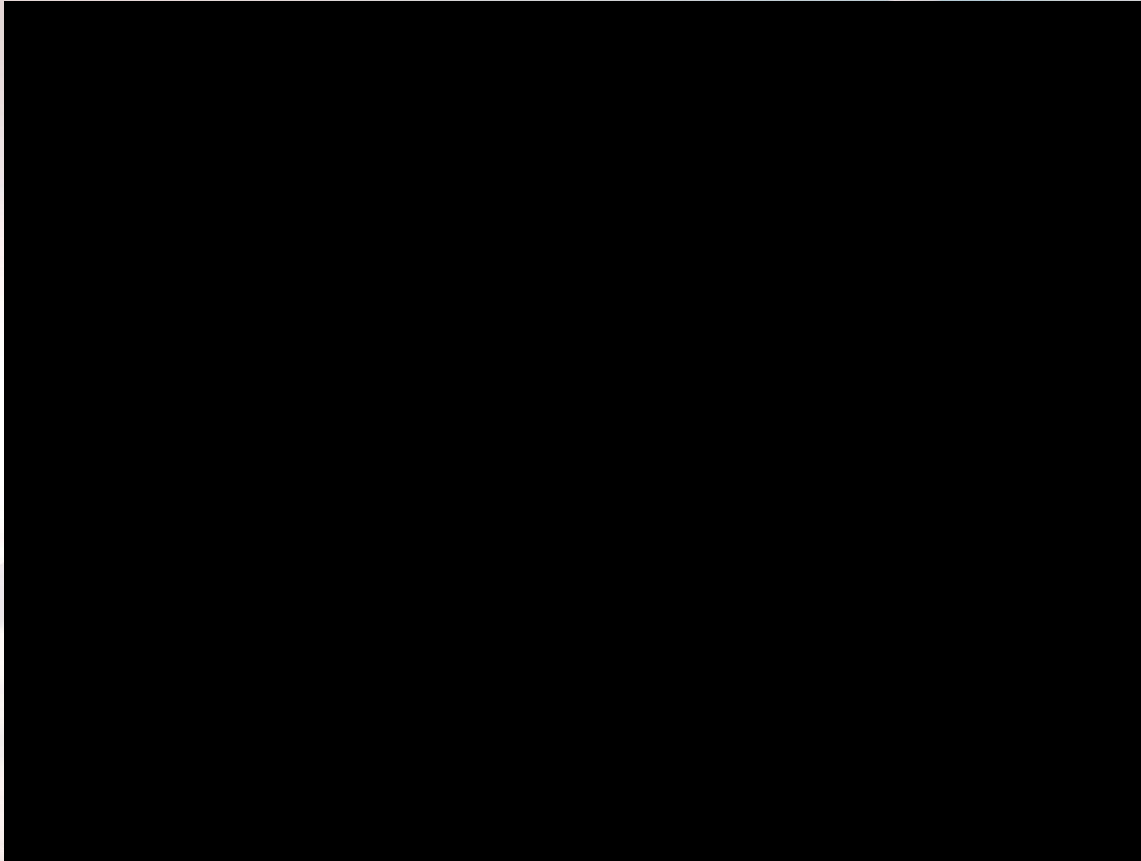
23 planet



Mikročočkování

140 planet

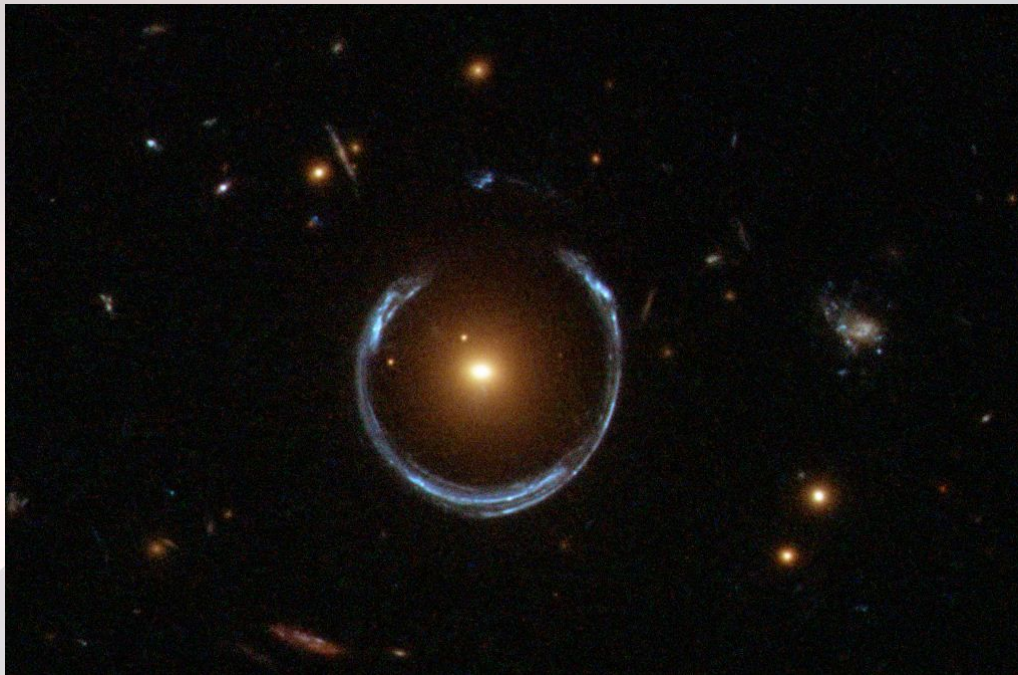
Využívá efektu ohybu paprsků v blízkosti hmotných těles



Mikročočkování

140 planet

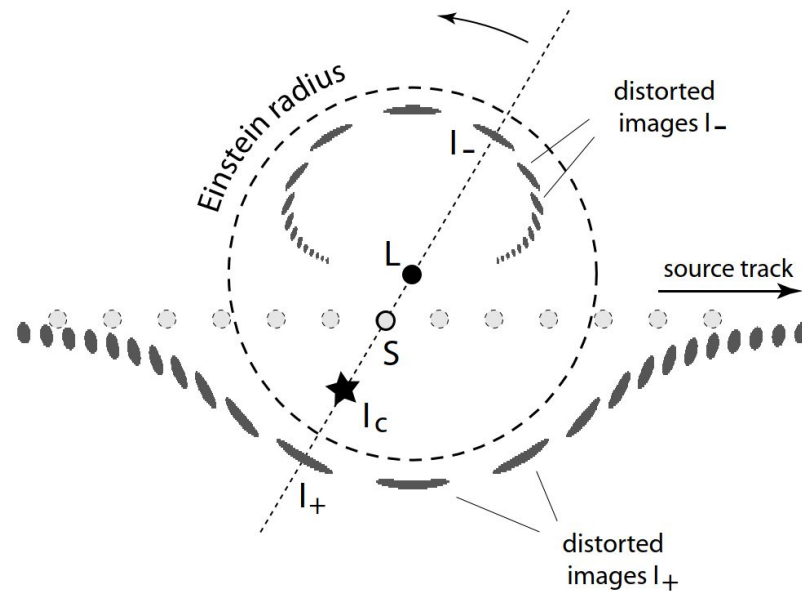
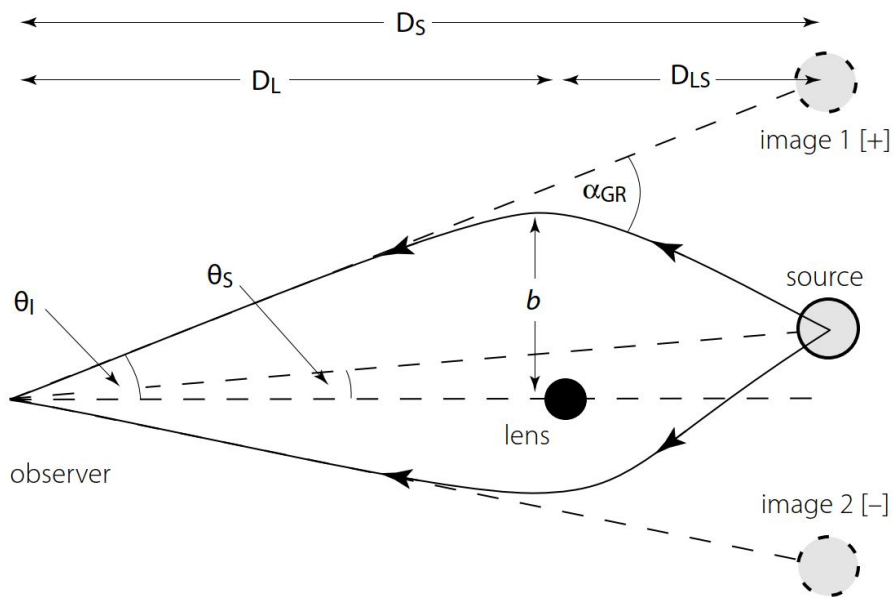
Využívá efektu ohybu paprsků v blízkosti hmotných těles



Mikročočkování

140 planet

Využívá efektu ohybu paprsků v blízkosti hmotných těles



Úhel ohybu

$$\alpha_{GR} = \frac{4GM_L}{c^2 b} = \frac{2R_S}{b}$$

Poloměr Einsteinova prstence => vzdálenost obrazů dvojnásobná

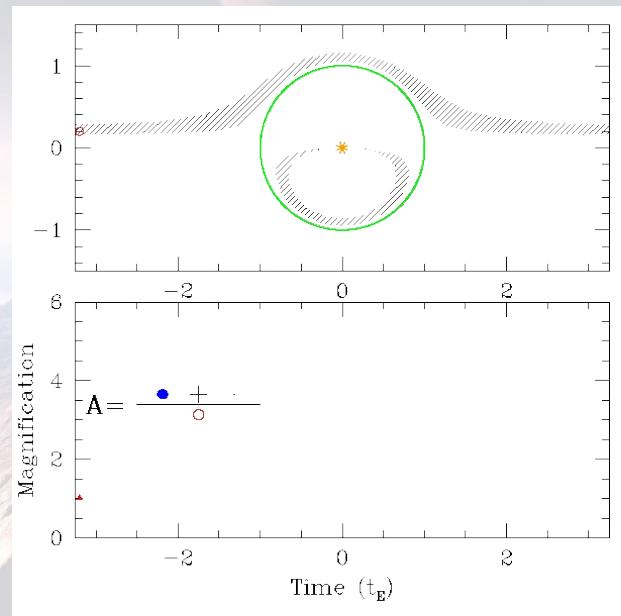
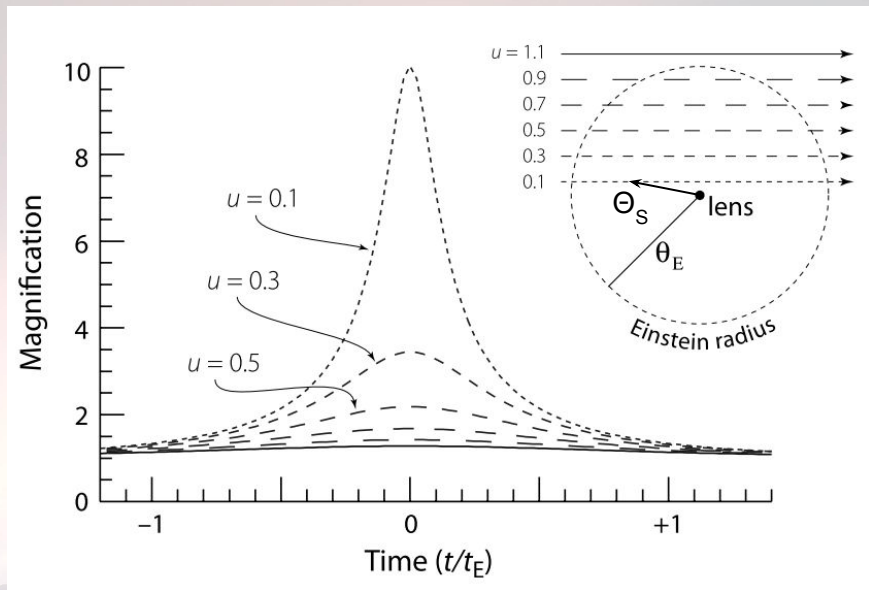
$$\theta_E = \left[2R_S \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right]^{1/2} = \left[\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right]^{1/2}$$

Typicky jsou $\theta_E < \sim 1$ mas

Mikročočkování

140 planet

Zjasnění dáno poměrem součtu ploch obrazů a plochy původního zdroje



$$A_{\pm} = \left| \frac{u_{\pm}}{u} \frac{du_{\pm}}{du} \right|$$

$$u \equiv \frac{\theta_S}{\theta_E}$$

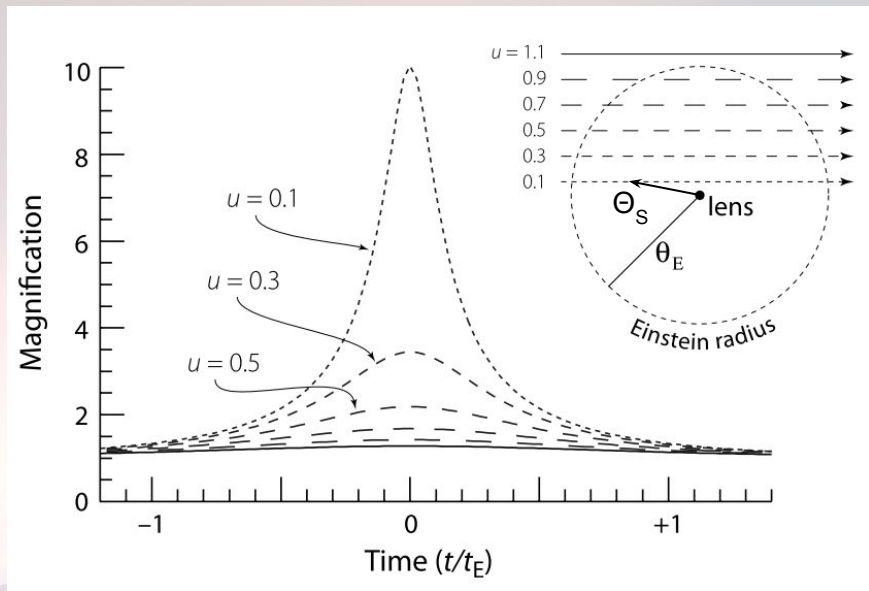
θ_S je aktuální úhlová vzdálenost čochujícího objektu od zdroje -> pro $\theta_S=0$ by měla jasnost být nekonečná - není díky konečné velikosti těles

Animace z <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~gaudi/movies.html>

Mikročočkování

140 planet

Zjasnění dáno poměrem součtu ploch obrazů a plochy původního zdroje



$$t_E = R_E / v_{\perp} \simeq 70 \left(\frac{M_L}{M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_S}{8 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v_{\perp}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1} \text{ days}.$$

Charakteristický čas t_E je dán dobou, za kterou projde čochující těleso Einsteinovým poloměrem

=> Pro tělesa v Galaktické výduti s čochující tělesem v poloviční vzdálenosti jsou charakteristické časy

$M_{\text{Slunce}} \sim$ měsíc

$M_{\text{Jupiter}} \sim$ den

$M_{\text{Země}} \sim$ hodina

$$A_{\pm} = \left| \frac{u_{\pm}}{u} \frac{du_{\pm}}{du} \right|$$

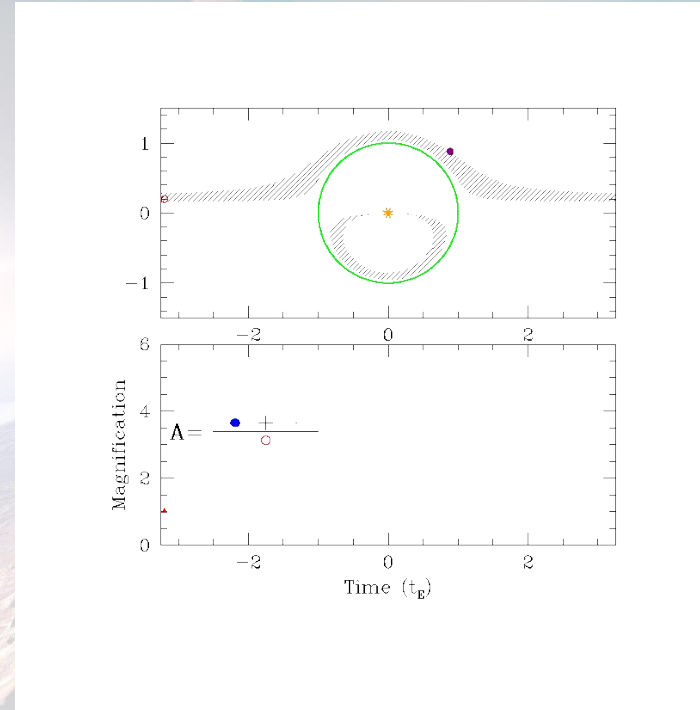
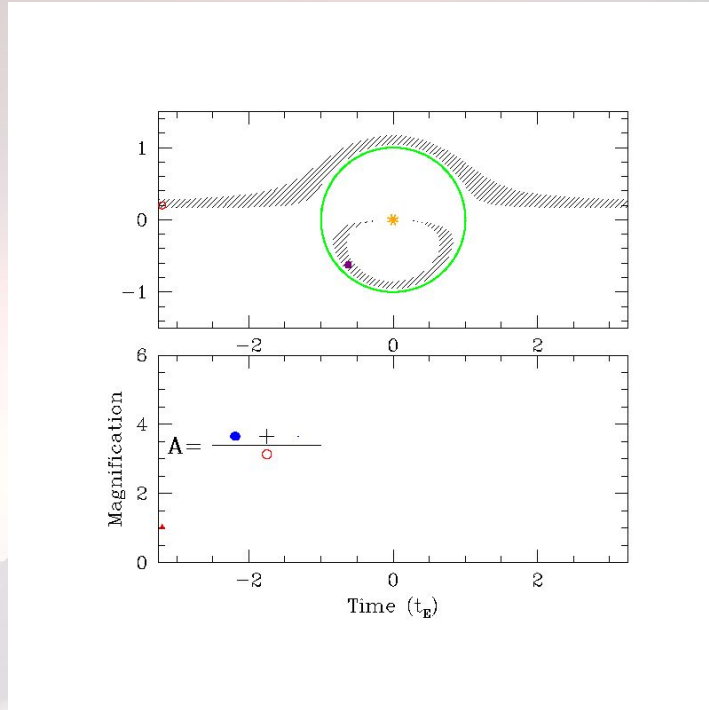
$$u \equiv \frac{\Theta_S}{\theta_E}$$

Θ_S je aktuální úhlová vzdálenost čochujícího objektu od zdroje -> pro $\Theta_S = 0$ by měla jasnost být nekonečná - není díky konečné velikosti těles

Mikročočkování

140 planet

Zjasnění dáno poměrem součtu ploch obrazů a plochy původního zdroje



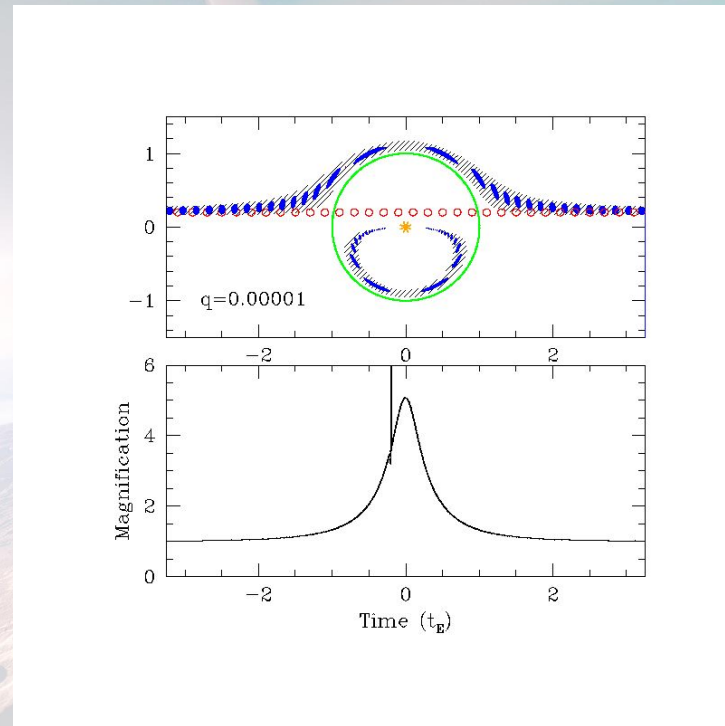
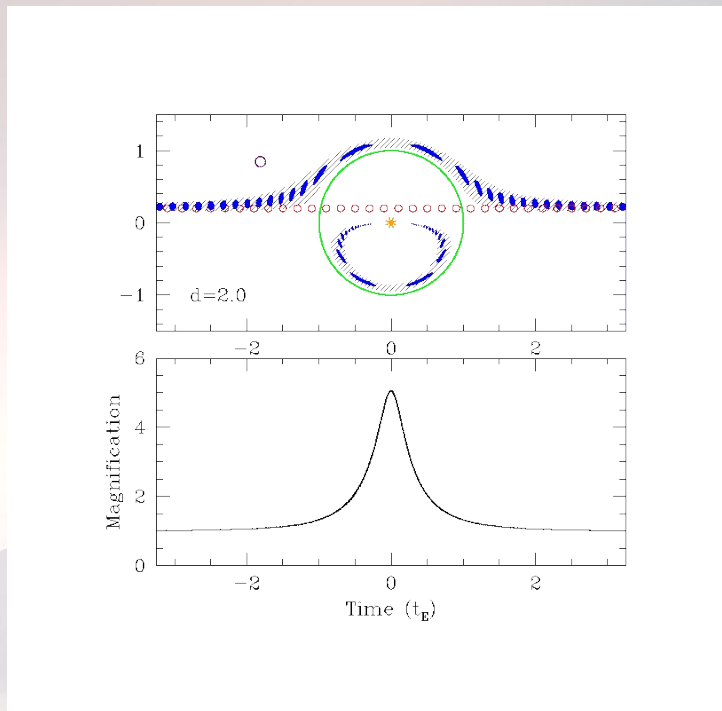
Animace z <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~gaudi/movies.html>

Tvar zjasnění závisí na aktuální poloze planety vůči čočkovému obrazci
Planeta případně vůbec nemusí být zaznamenaná

Mikročočkování

140 planet

Zjasnění dáno poměrem součtu ploch obrazů a plochy původního zdroje



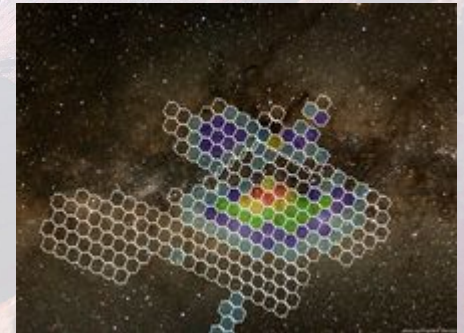
Animace z <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~gaudi/movies.html>

Tvar zjasnění závisí na aktuální poloze planety vůči čočkovému obrazci a také na vzájemném poměru hmotností planeta/hvězda (q)

Mikročočkování

140 planet

- Velikost zjasnění tím větší, čím blíže je zdroj a čočkový objekt na obloze
- Mikročočkování je achromatické (stejně na všech vlnových délkách)
- Šance na mikročočku je velmi nízká ($\sim 1:10^5$ - $1:10^6$)
- Planety vyvolají jen krátkou odezvu



OGLE - The Optical Gravitational Lensing Experiment, 1.3m dalekohled na Las Campanas (Chile), od roku 1992 monitoring Galaktické výdutě a LMC+SMC+galaktický disk, polský projekt

Mikročočkování

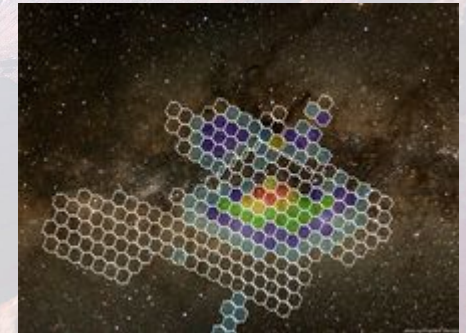
140 planet

- Velikost zjasnění tím větší, čím blíže je zdroj a čočkový objekt na obloze
- Mikročočkování je achromatické (stejně na všech vlnových délkách)
- Šance na mikročočku je velmi nízká ($\sim 1:10^5$ - $1:10^6$)
- Planety vyvolají jen krátkou odezvu

=> Je žádoucí co nejpřesněji pozorovat mnoho objektů po dlouhou dobu
Projekty OGLE, MACHO, MOA, KMTNet

- Tvar zjasnění závisí na poloze planet(y), geometrii její(ch) dráh(y) a relativní hmotnosti vůči mateřské hvězdě

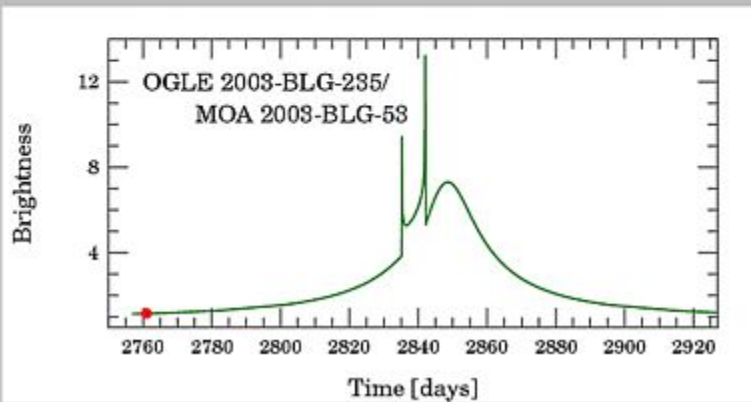
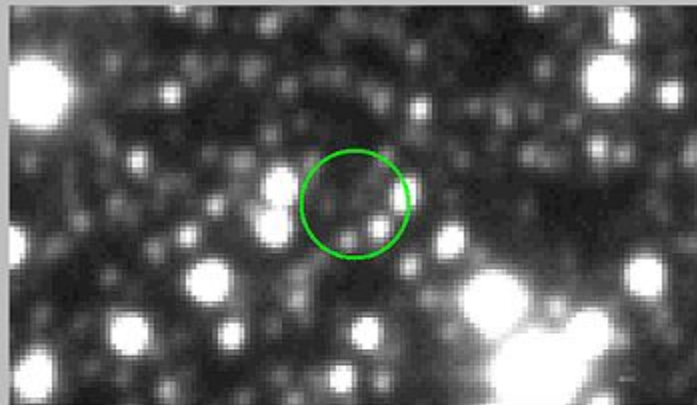
Z doby trvání, tvaru a velikosti zjasnění lze odhadnout hmotnost čočkovacího tělesa



OGLE - The Optical Gravitational Lensing Experiment, 1.3m dalekohled na Las Campanas (Chile), od roku 1992 monitoring Galaktické výdutě a LMC+SMC+galaktický disk, polský projekt

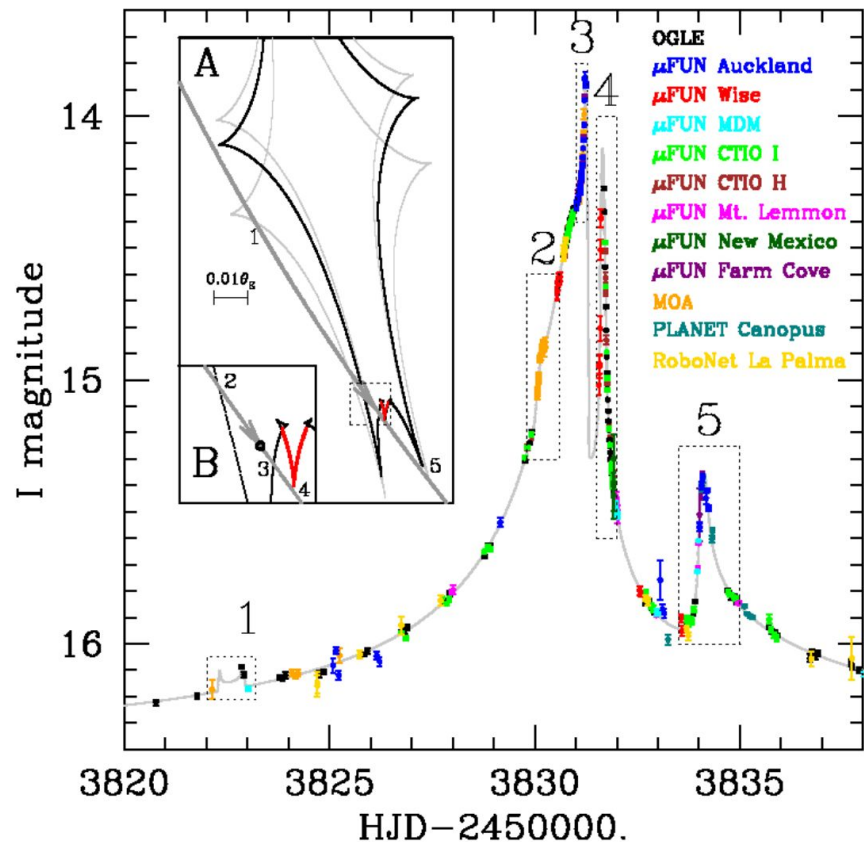
Mikročočkování

140 planet

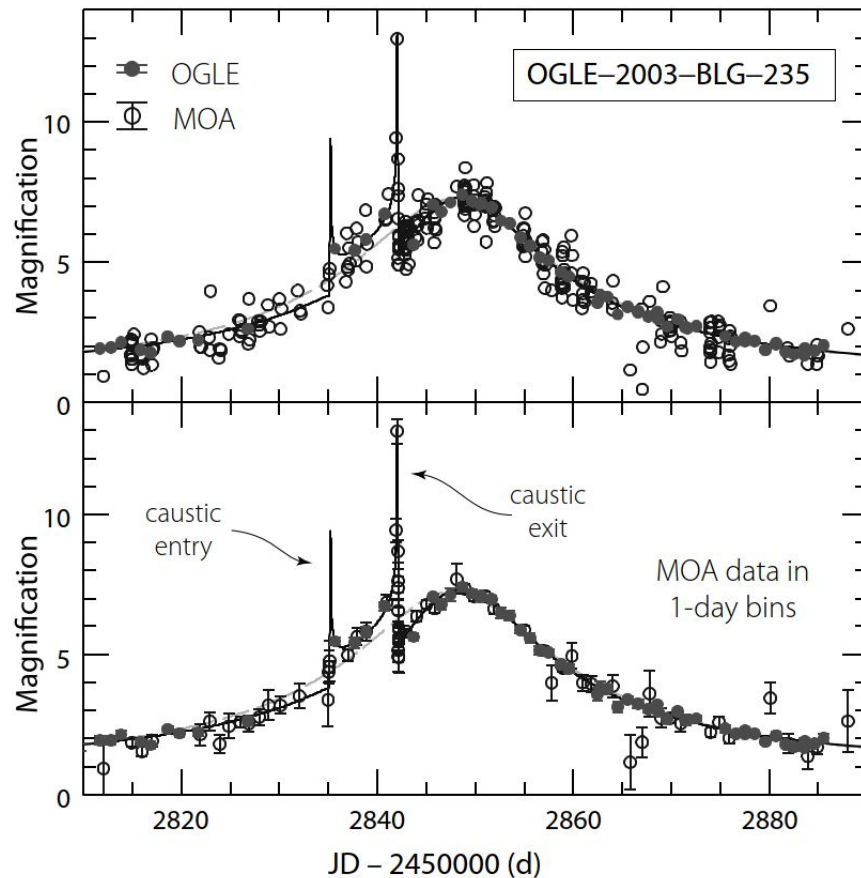


Mikročočkování

140 planet

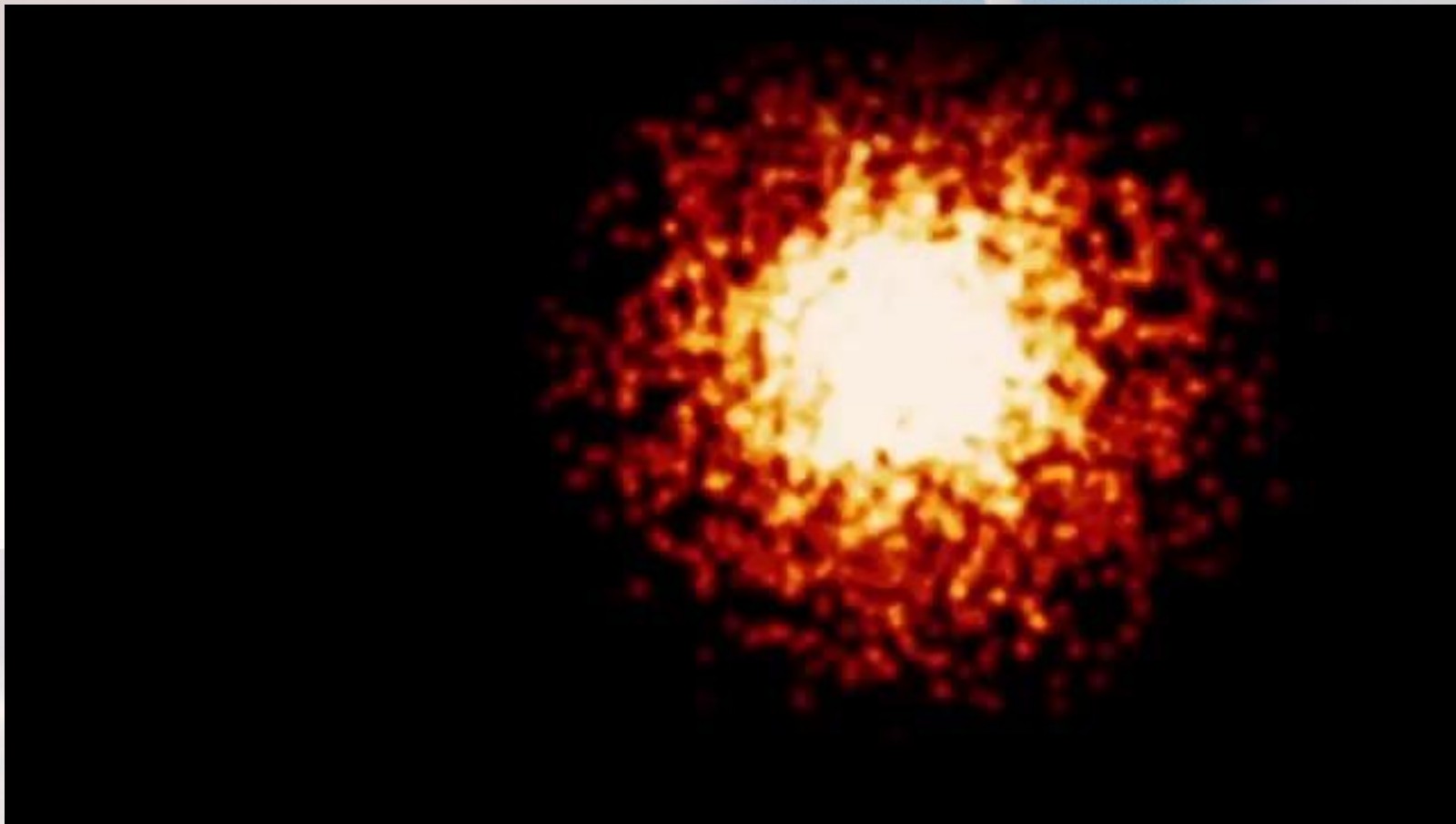


Gaudi et al. 2008, Science, 319, 927



Přímé zobrazení

62 planet



Přímé zobrazení

62 planet

- Je nutno odfiltrvat světlo hvězdy (nulovací interferometrie, koronograf, polarimetrie)
- Planetu je nutno odlišit od hvězdy (rozlišovací schopnost, eliminace atmosférických vlivů)

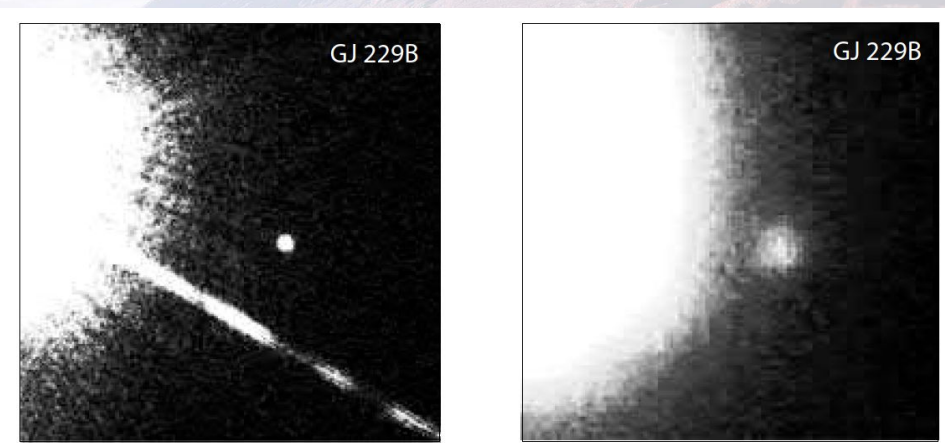
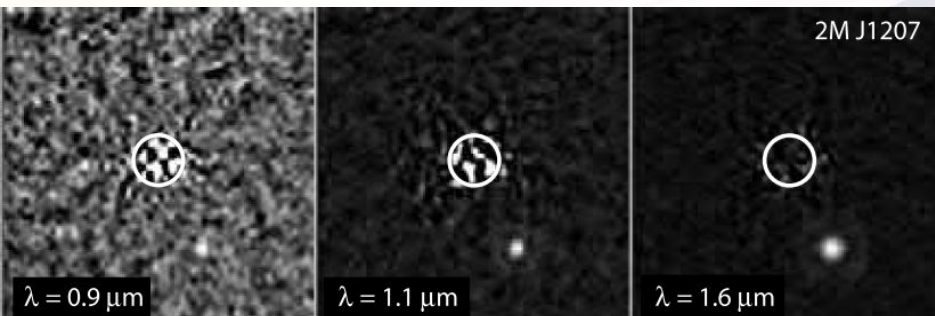
Úhlové rozlišení dalekohledu

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

GEMINI

HST

HST - nulování polarizací



Přímé zobrazení

62 planet

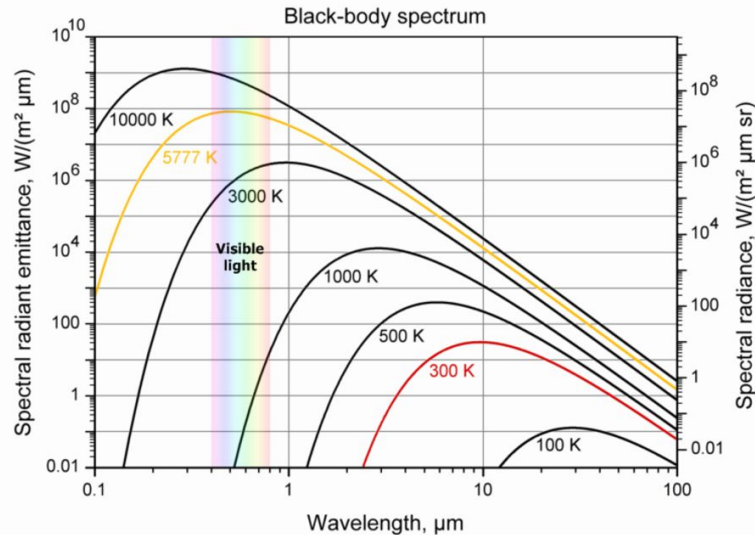
- Je nutno odfiltrovat světlo hvězdy (nulovací interferometrie, koronograf, polarimetrie)
- Planetu je nutno odlišit od hvězdy (rozlišovací schopnost, eliminace atmosférických vlivů)
- Planeta musí odrážet dostatek světla
 - => Je možné pozorovat pouze planety daleko od své mateřské hvězdy
 - => Zatím možno pozorovat jen velké planety ve správné fázi
 - => Pouze blízké hvězdy
 - => Pro pozorování se hodí jen velké dalekohledy a interferometry, pozorování v IR

Poměr jasů planety a hvězdy

Geometrické albedo

Fázová funkce

$$\frac{f_p(\alpha, \lambda)}{f_\star(\lambda)} = p(\lambda) \left(\frac{R_p}{a} \right)^2 g(\alpha)$$

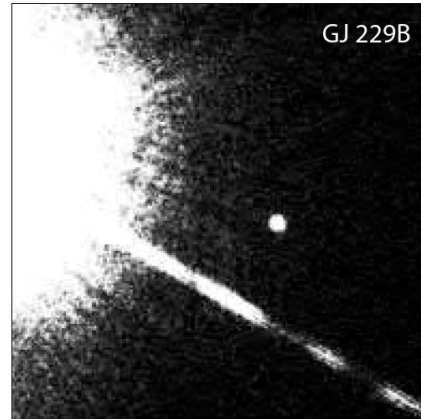


Úhlové rozlišení dalekohledu

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

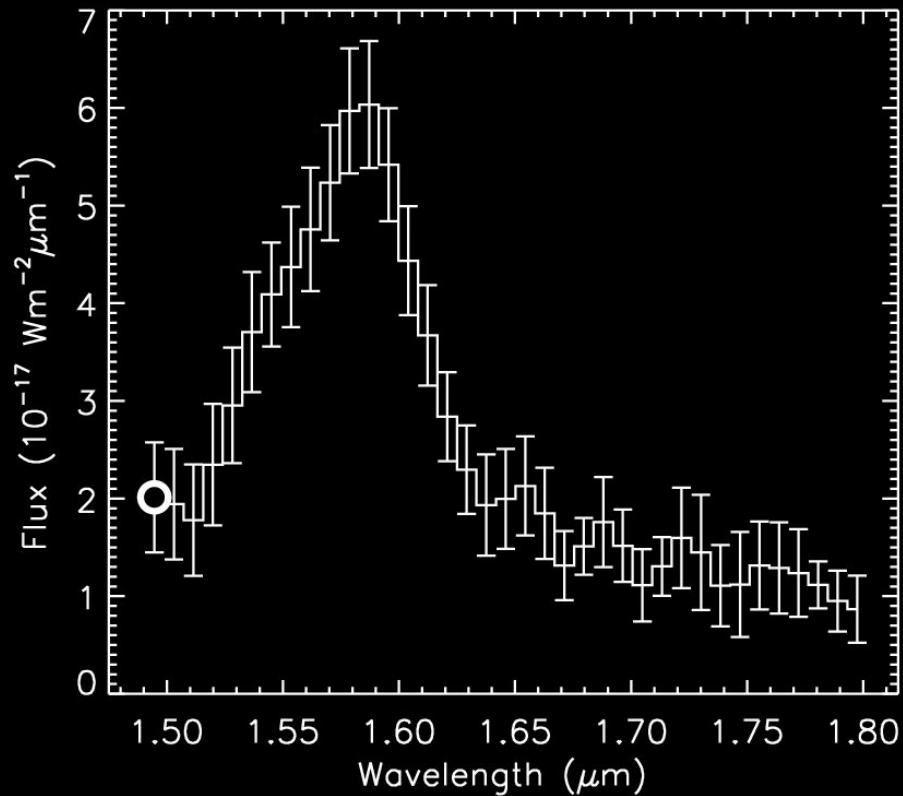
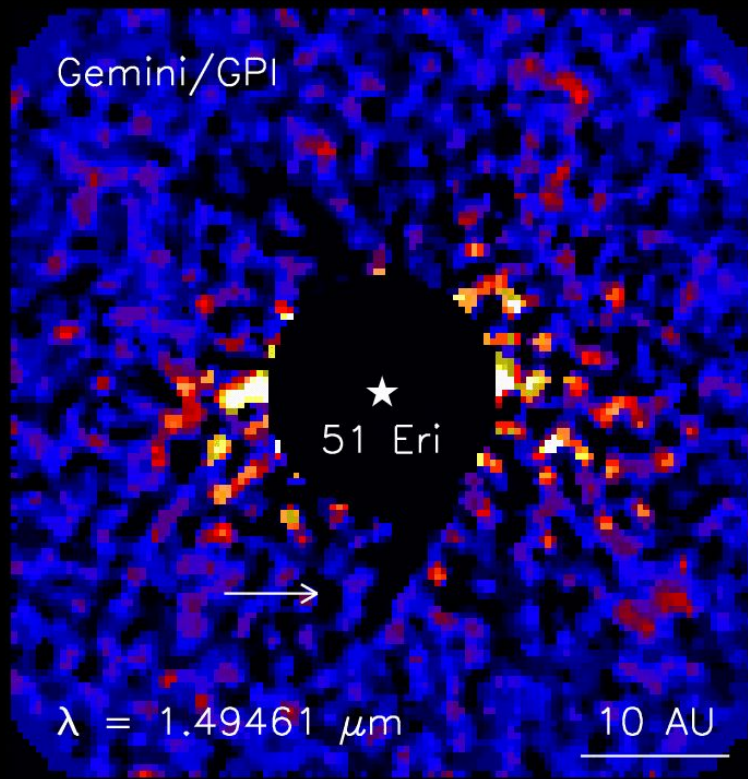
GEMINI

HST



Přímé zobrazení

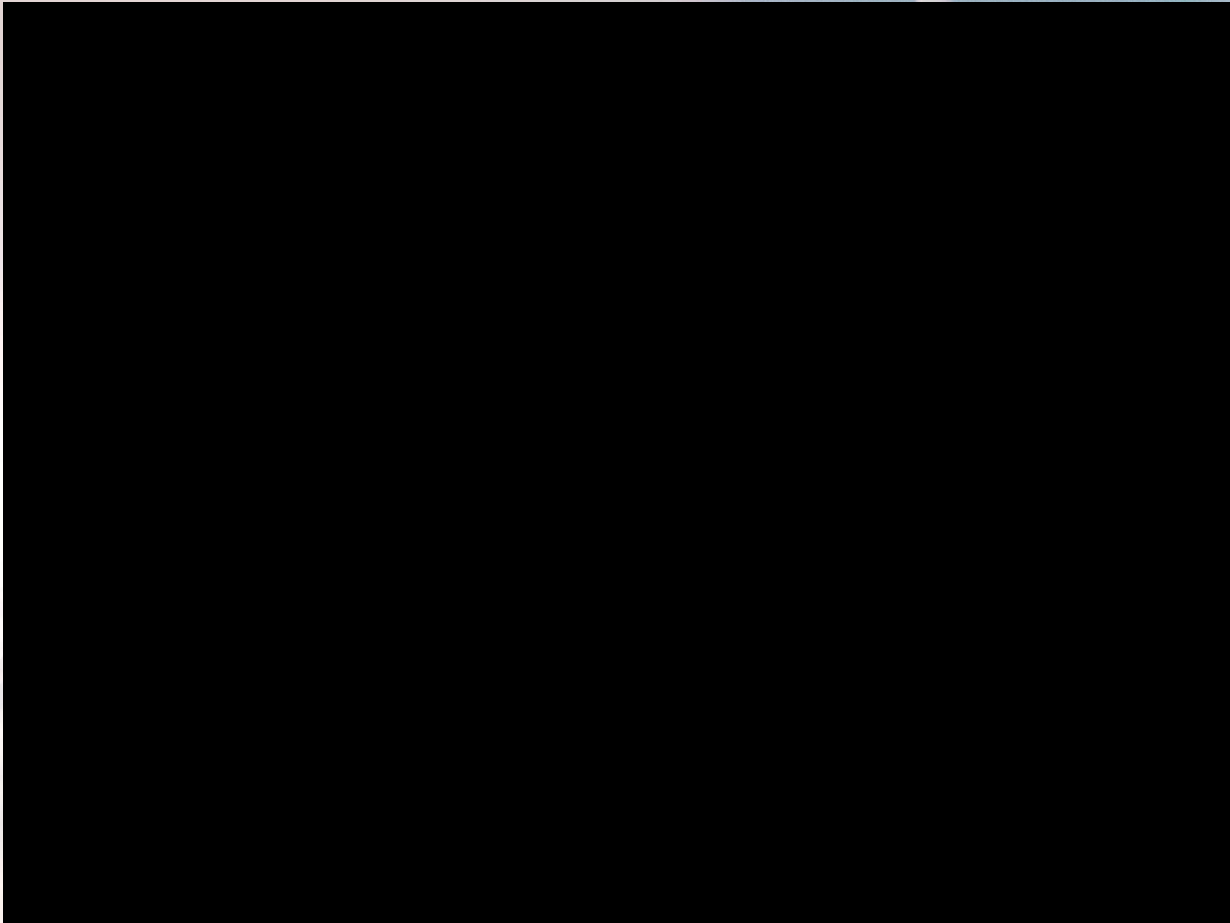
62 planet



Přímé zobrazení

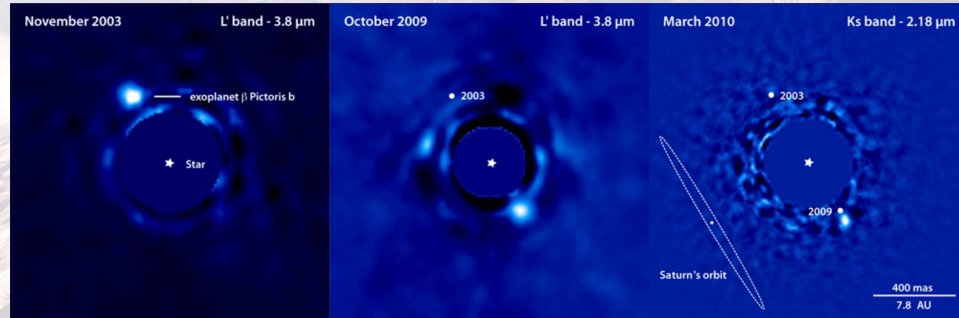
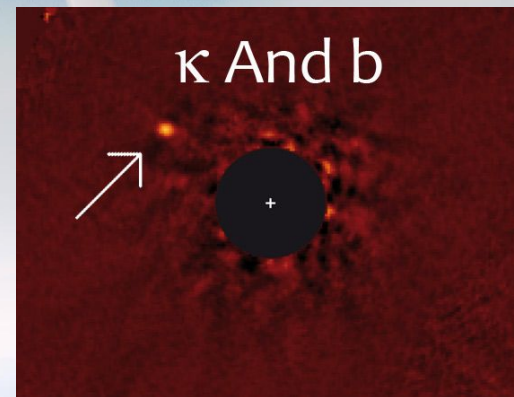
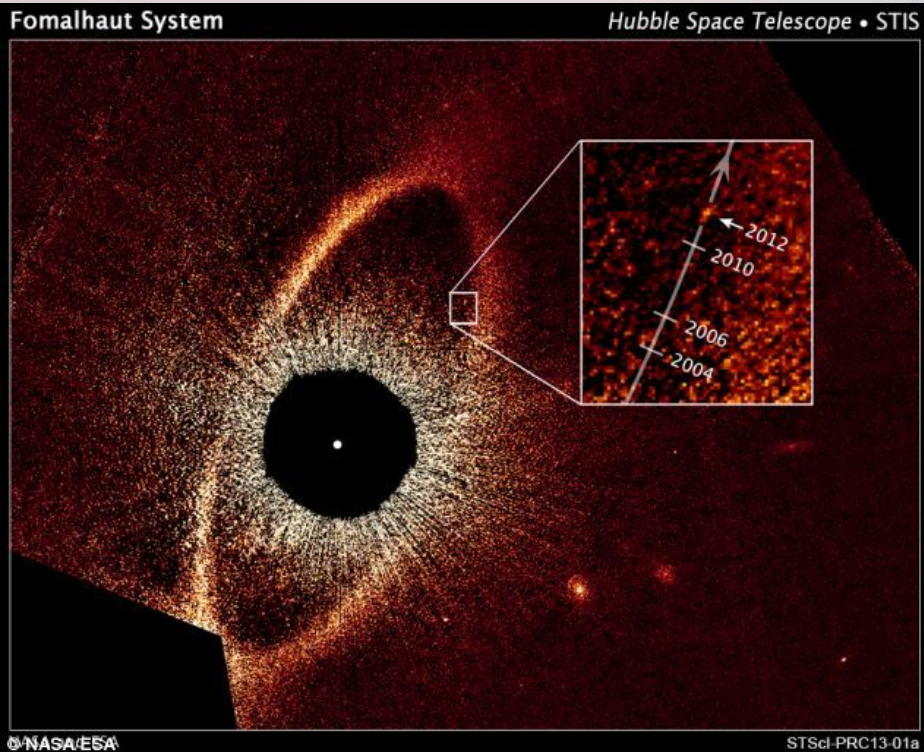
62 planet

HR 8799



Přímé zobrazení

62 planet



Přímé zobrazení

62 planet

