

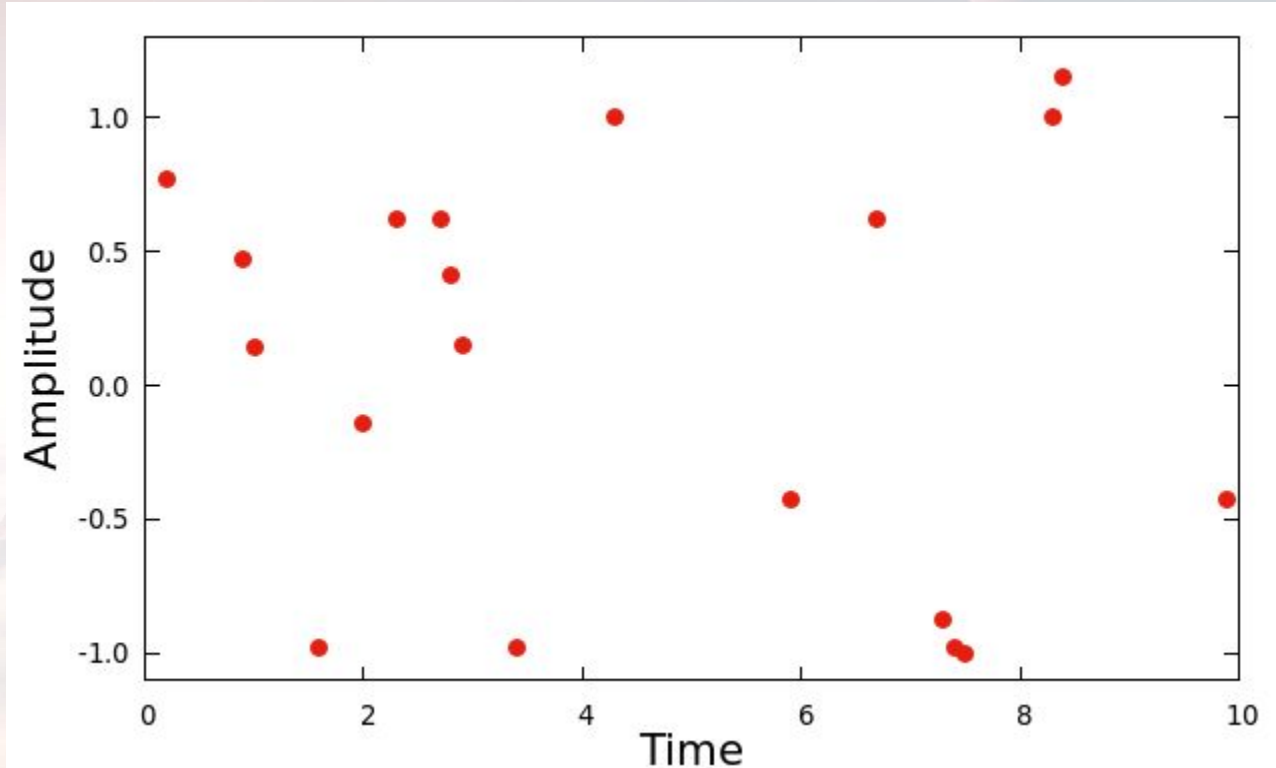
F7514 Exoplanety

3-Dráhy exoplanet, křivka radiálních rychlostí

Marek Skarka

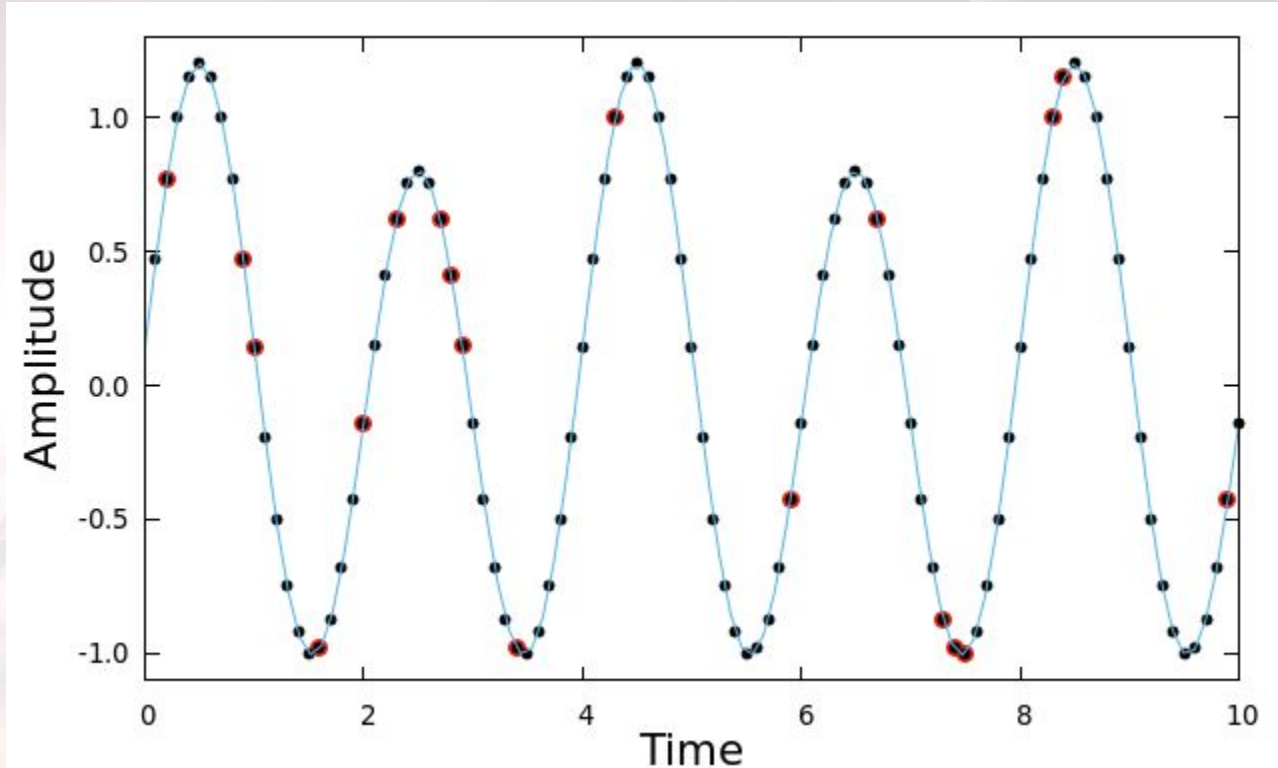
Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



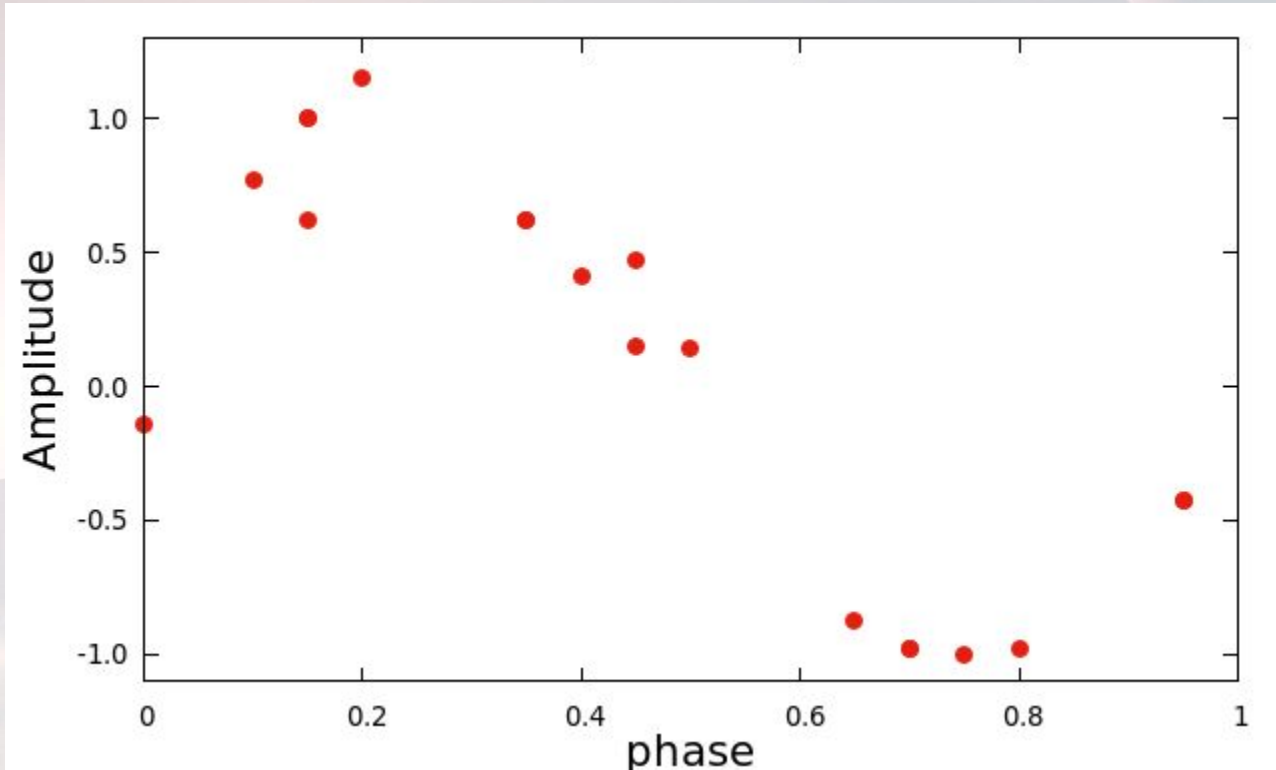
Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



$$\theta = \text{frac} \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

$$E = \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

θ - fáze

t - čas

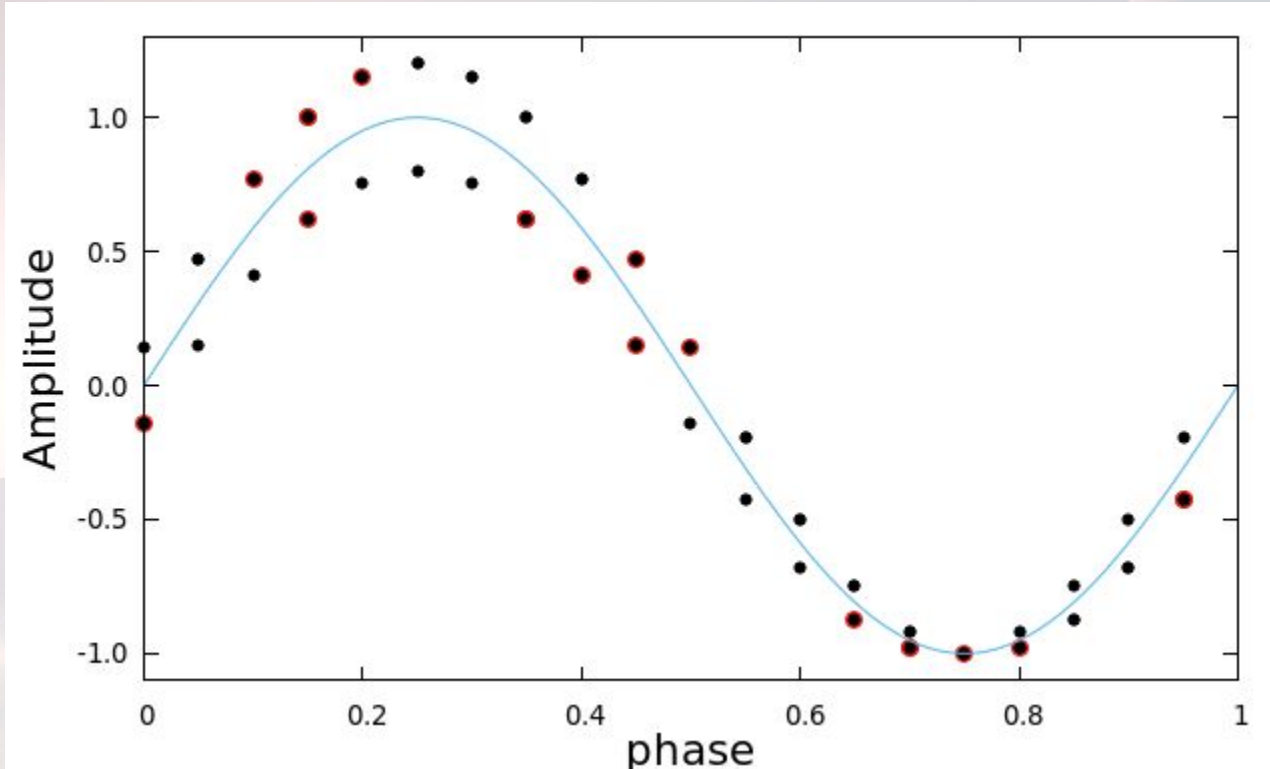
T_0 - okamžik počátku
počítání

P - perioda

E - počet cyklů od
počátku T_0

Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



$$\theta = \text{frac} \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

$$E = \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

θ - fáze

t - čas

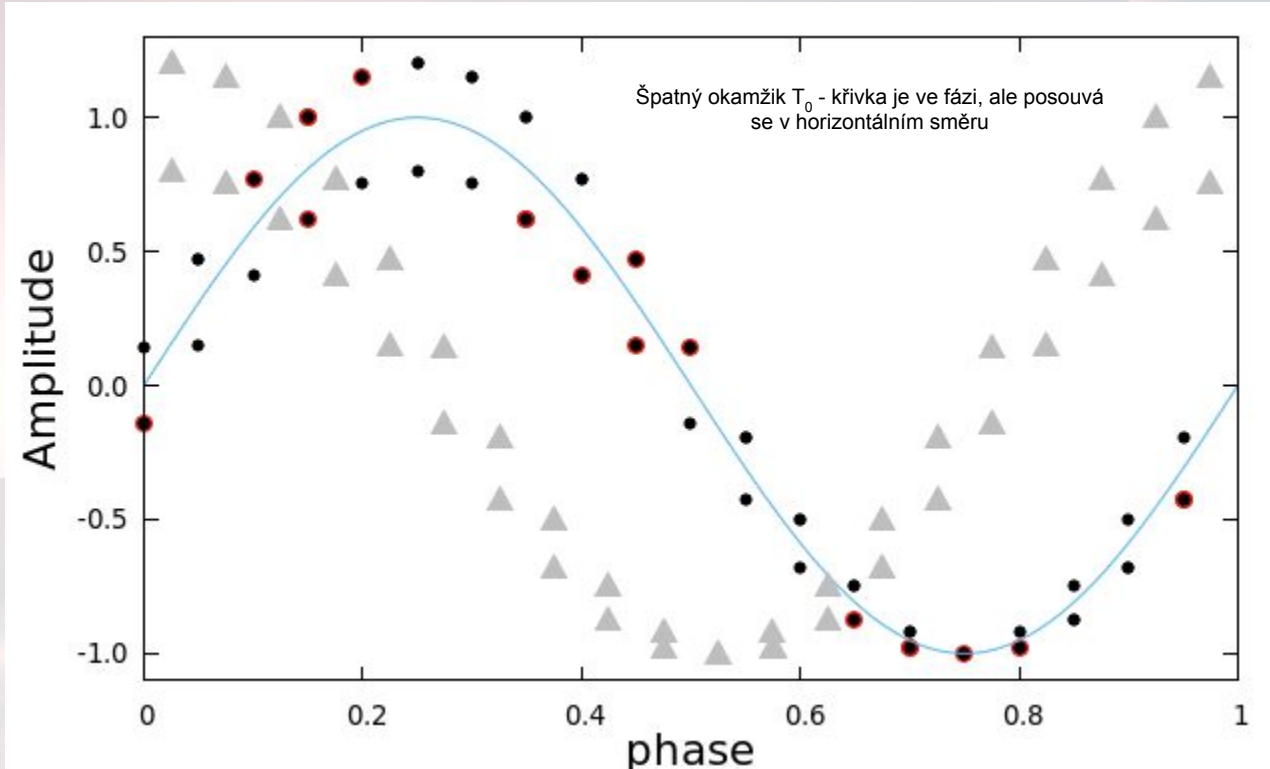
T_0 - okamžik počátku
počítání

P - perioda

E - počet cyklů od
počátku T_0

Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



$$\theta = \text{frac} \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

$$E = \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

θ - fáze

t - čas

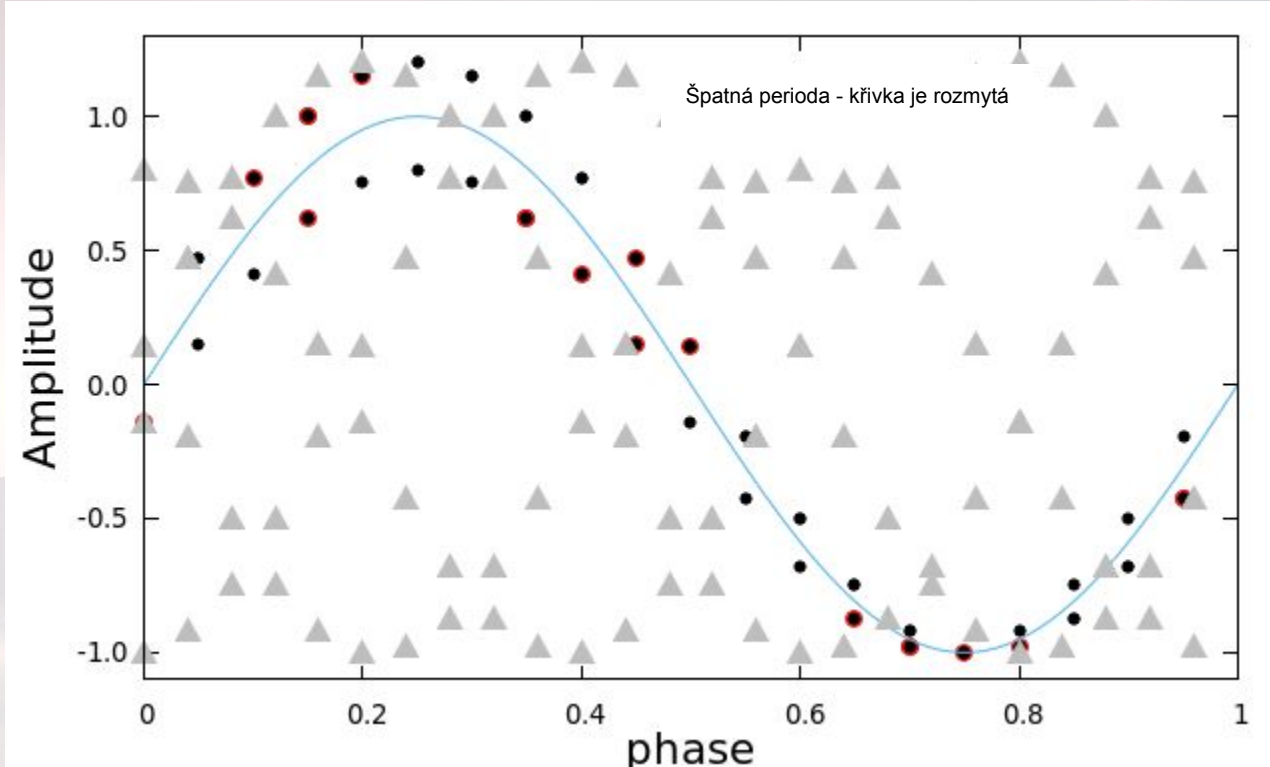
T_0 - okamžik počátku počítání

P - perioda

E - počet cyklů od počátku T_0

Světelné elementy

Pohyb planet je periodický jev -> výhodné používat fázovou křivku



$$\theta = \text{frac} \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

$$E = \left(\frac{t - T_0}{P} \right)$$

θ - fáze

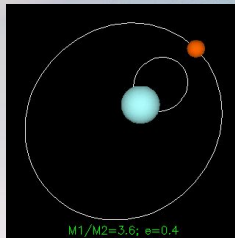
t - čas

T_0 - okamžik počátku počítání

P - perioda

E - počet cyklů od počátku T_0

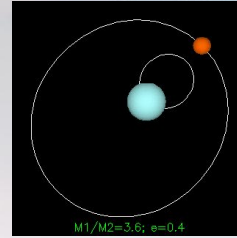
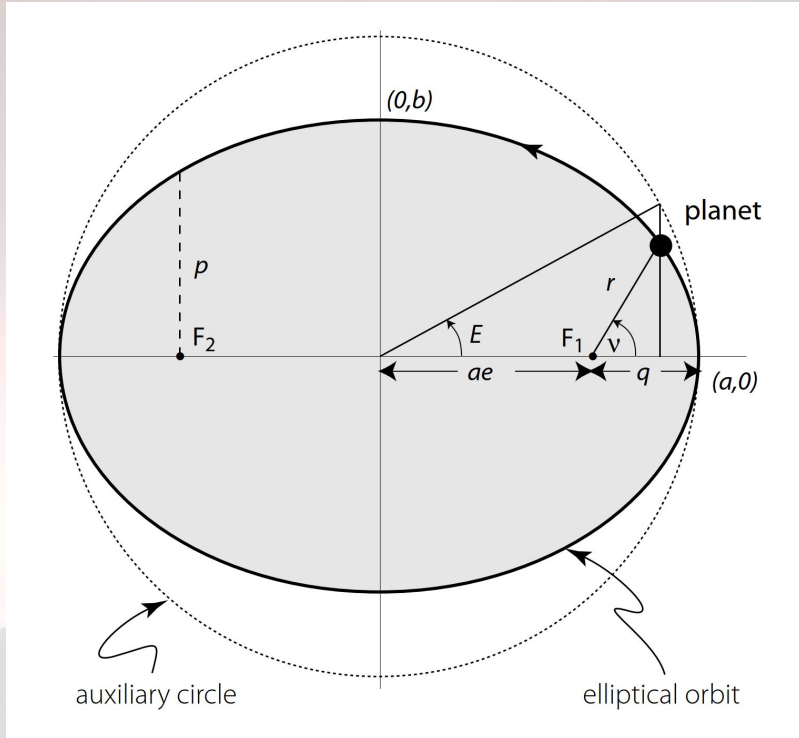
Elipsa a její parametry



Hmotná tělesa obíhají okolo společného středu hmotnosti po eliptických drahách

Elipsa je křivka se dvěma ohnisky přičemž součet vzdáleností bodu na elipse od obou ohnisek je konstantní

Elipsa a její parametry

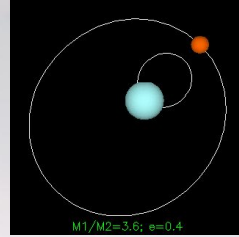
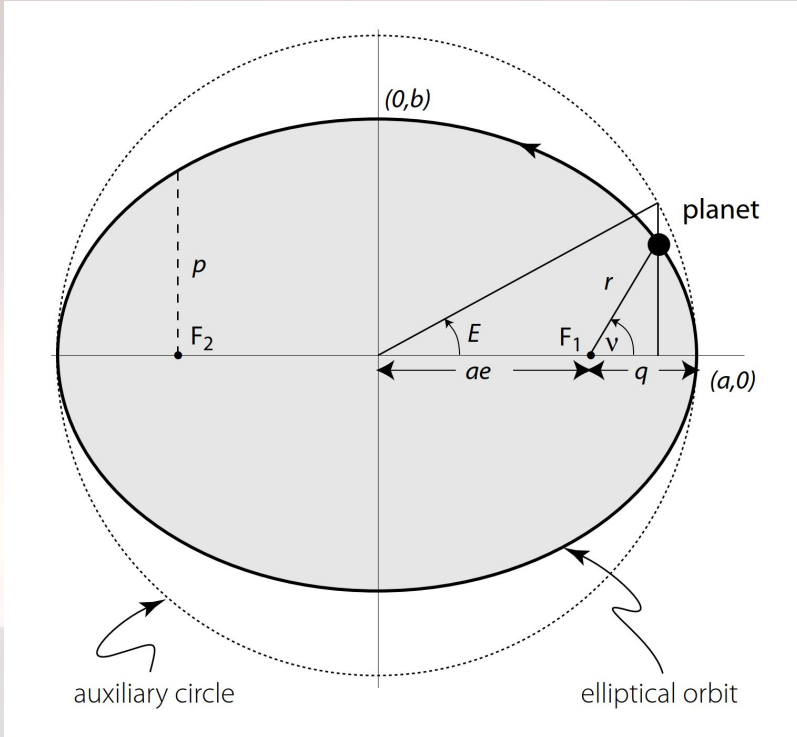


Hmotná tělesa obíhají okolo společného středu hmotnosti po eliptických drahách

Elipsa je křivka se dvěma ohnisky přičemž součet vzdáleností bodu na elipse od obou ohnisek je konstantní

$F_{1,2}$ - ohniska, a - velká poloosa; b - malá poloosa;
 e - excentricita, E - excentrická anomálie, v - pravá anomálie;
 r - vzdálenost tělesa od primárního ohniska;
 q - vzdálenost F_1 od nejbližšího bodu dráhy (pericentrum),
 Q - vzdálenost F_1 od nejvzdálenějšího bodu dráhy (apocentrum)

Elipsa a její parametry



Hmotná tělesa obíhají okolo společného středu hmotnosti po eliptických drahách

Elipsa je křivka se dvěma ohnisky přičemž součet vzdáleností bodu na elipse od obou ohnisek je konstantní

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu}$$

$$b^2 = a^2(1 - e^2)$$

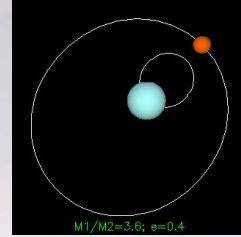
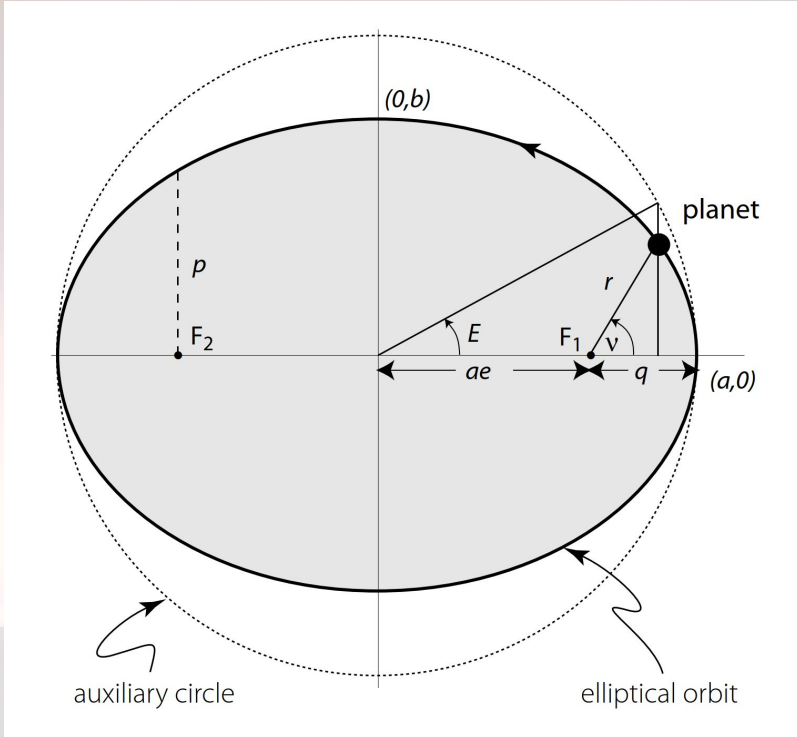
$$q = a(1 - e)$$

$$Q = a(1 + e)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$F_{1,2}$ - ohniska, a - velká poloosa; b - malá poloosa;
 e - excentricita, E - excentrická anomálie; ν - pravá anomálie;
 r - vzdálenost tělesa od primárního ohniska;
 q - vzdálenost F_1 od nejbližšího bodu dráhy (pericentrum),
 Q - vzdálenost F_1 od nejvzdálenějšího bodu dráhy (apocentrum)

Elipsa a její parametry



Hmotná tělesa obíhají okolo společného středu hmotnosti po eliptických drahách

Elipsa je křivka se dvěma ohnisky přičemž součet vzdáleností bodu na elipse od obou ohnisek je konstantní

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \nu}$$

$$b^2 = a^2(1 - e^2)$$

$$q = a(1 - e)$$

$$Q = a(1 + e)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$M(t) = \frac{2\pi}{P}(t - t_p)$$

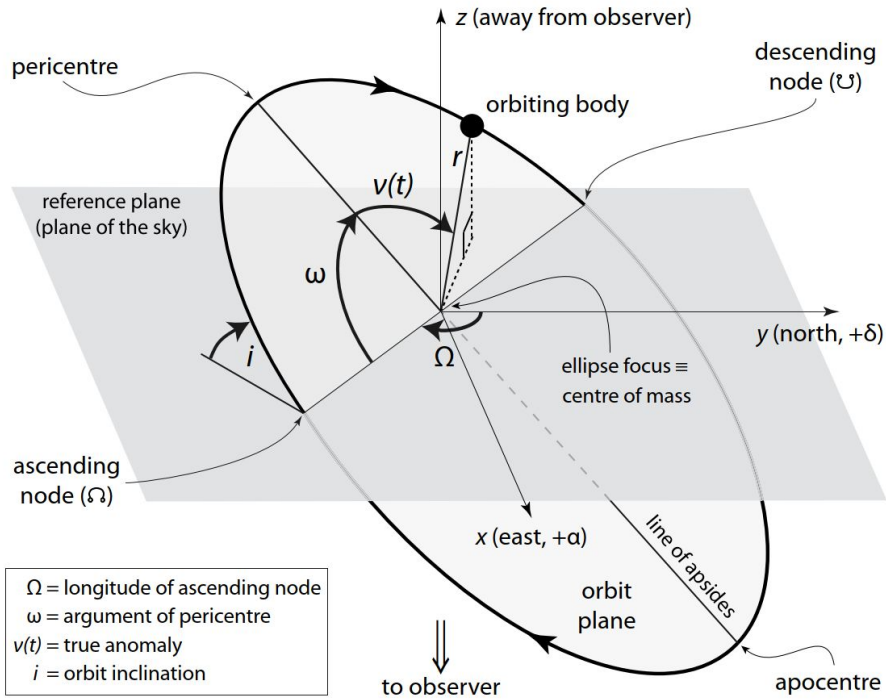
Střední anomálie

$$M(t) = E(t) - e \sin E(t)$$

$$\cos \nu(t) = \frac{\cos E(t) - e}{1 - e \cos E(t)}$$

$F_{1,2}$ - ohniska, a - velká poloosa; b - malá poloosa;
 e - excentricita, E - excentrická anomálie; ν - pravá anomálie;
 r - vzdálenost tělesa od primárního ohniska;
 q - vzdálenost F_1 od nejbližšího bodu dráhy (pericentrum),
 Q - vzdálenost F_1 od nejvzdálenějšího bodu dráhy (apocentrum)

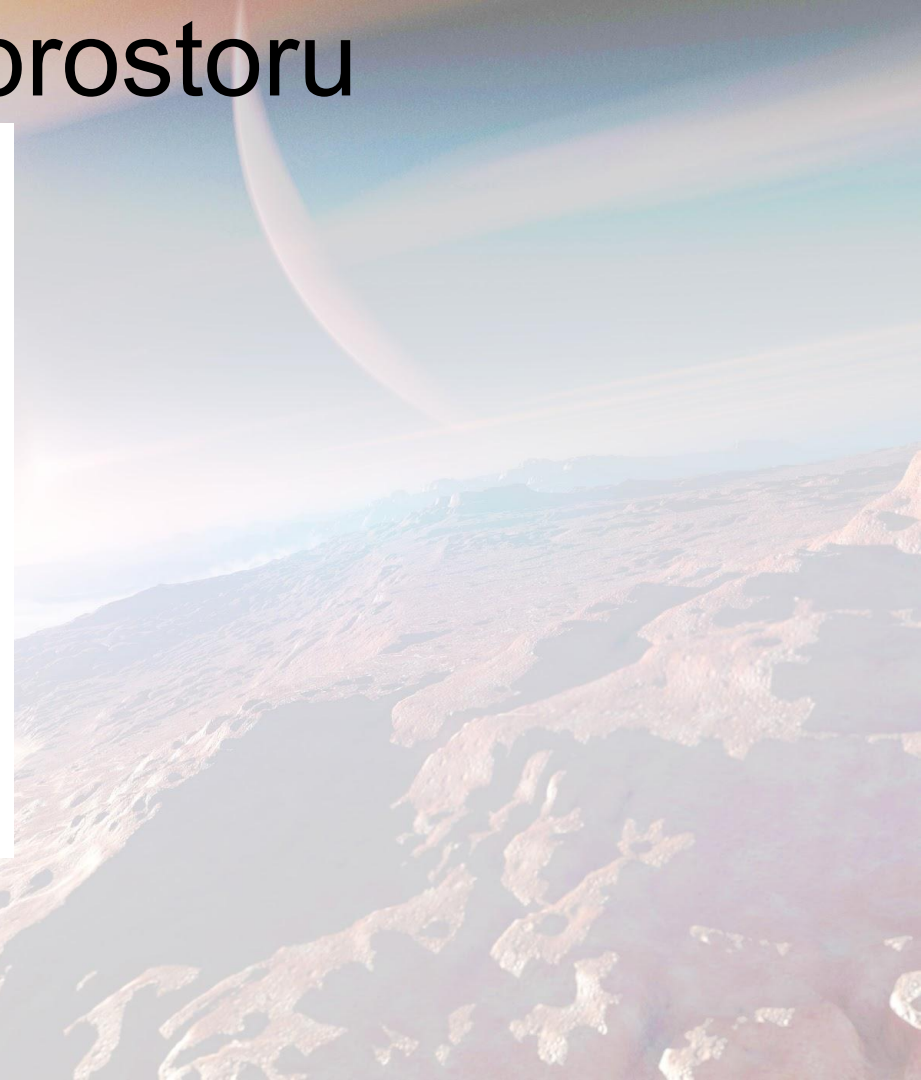
Dráha v prostoru



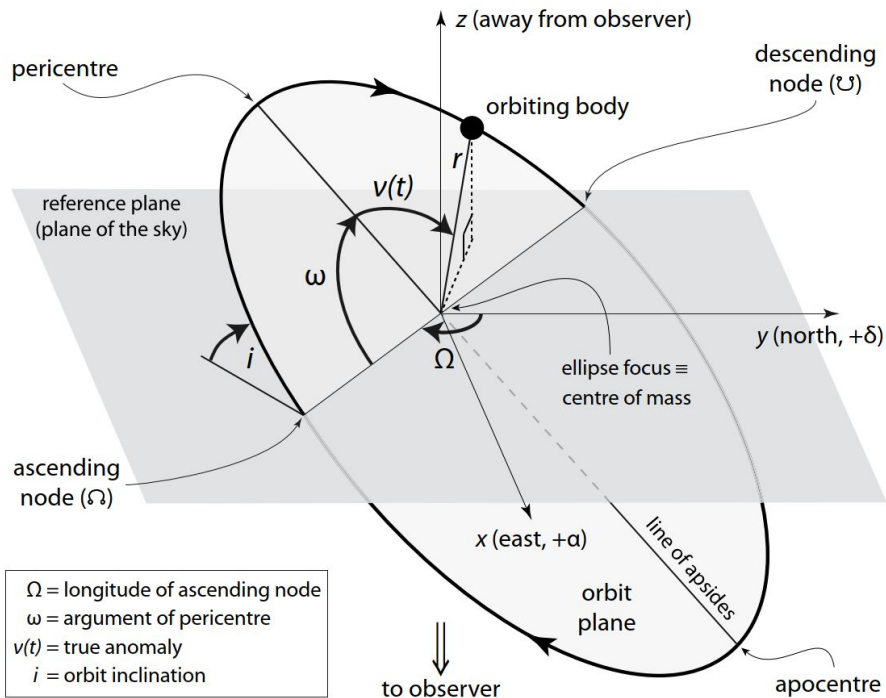
Ω - délka výstupného uzlu (úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k severu)

ω - argument pericentra (úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid), pro $e=0$ není definován

i - inklinace (úhel mezi rovinou dráhy tělesa a nebeskou sférou).
 $i < 90^\circ$ - prográdní; $i > 90^\circ$ - retrográdní



Dráha v prostoru



Ω = longitude of ascending node
 ω = argument of pericentre
 $v(t)$ = true anomaly
 i = orbit inclination

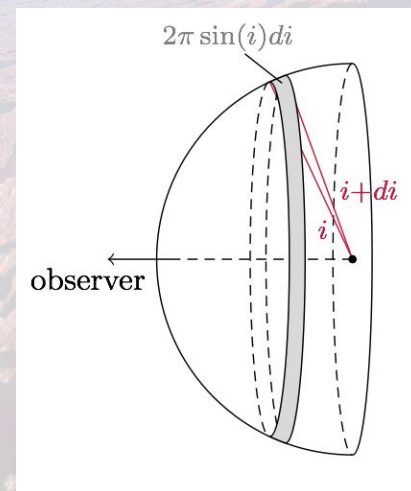
Pravděpodobnost, že bude mít systém inklinaci menší než úhel θ :

$$p(i < \theta) = \frac{2 \int_0^\theta p(i) di}{\int_0^\pi p(i) di} = (1 - \cos \theta)$$

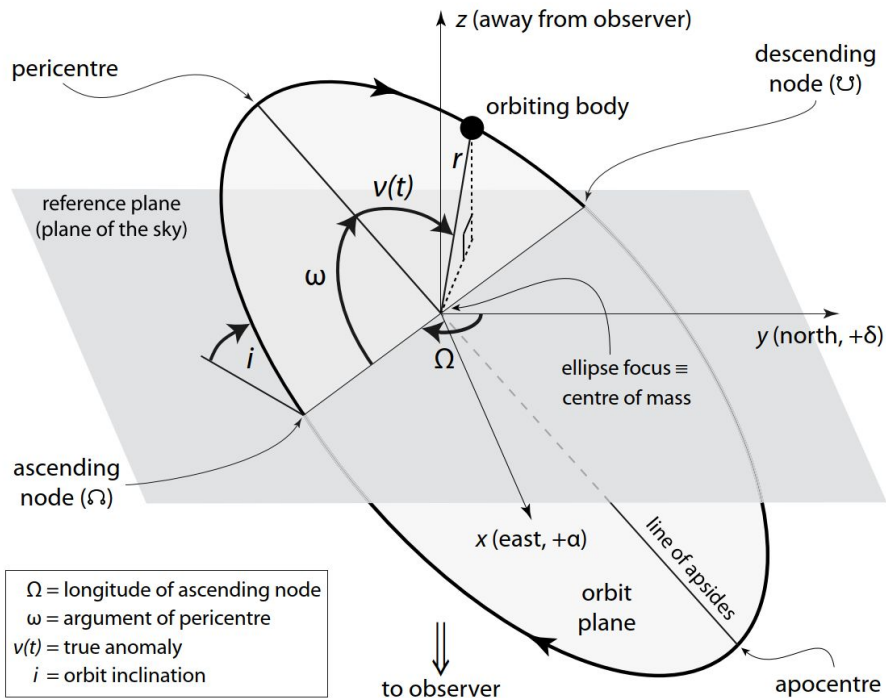
Ω - délka výstupného uzlu (úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k severu)

ω - argument pericentra (úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid), pro $e=0$ není definován

i - inklinace (úhel mezi rovinou dráhy tělesa a nebeskou sférou).
 $i < 90^\circ$ - prográdní; $i > 90^\circ$ - retrográdní



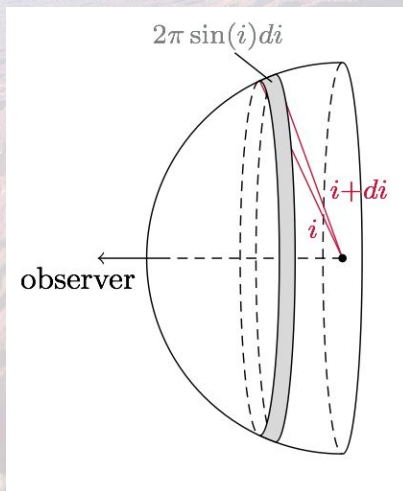
Dráha v prostoru



Pravděpodobnost, že bude mít systém inklinaci menší než úhel θ :

$$p(i < \theta) = \frac{2 \int_0^\theta p(i) di}{\int_0^\pi p(i) di} = (1 - \cos \theta)$$

- $i < 30^\circ$: $p \sim 13\%$
- $i < 10^\circ$: $p \sim 1.5\%$
- $i < 5^\circ$: $p \sim 0.3\%$
- $i < 1^\circ$: $p \sim 0.015\%$

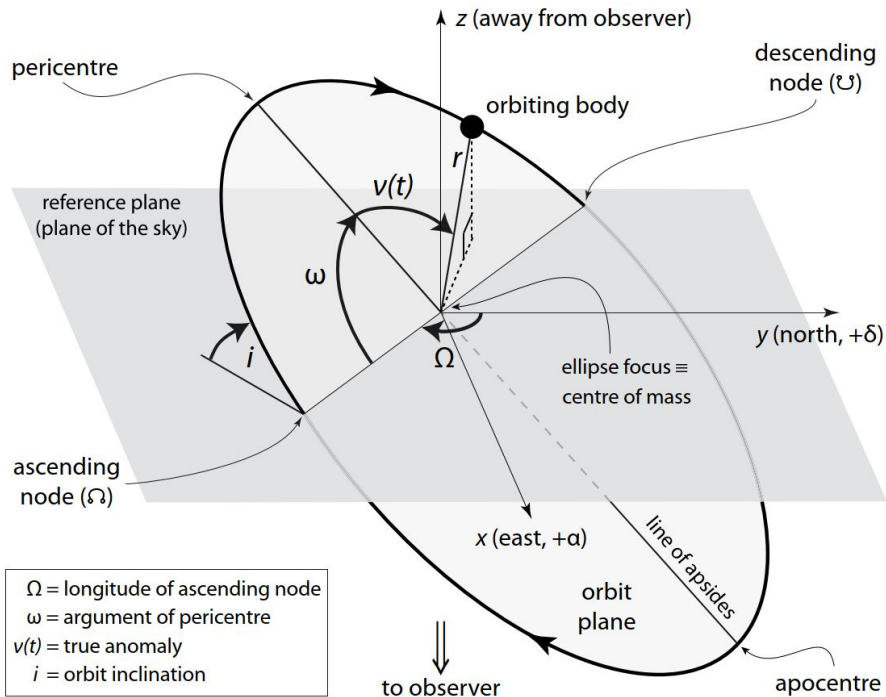


Ω - délka výstupného uzlu (úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k severu)

ω - argument pericentra (úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid), pro $e=0$ není definován

i - inklinace (úhel mezi rovinou dráhy tělesa a nebeskou sférou).
 $i < 90^\circ$ - prográdní; $i > 90^\circ$ - retrográdní

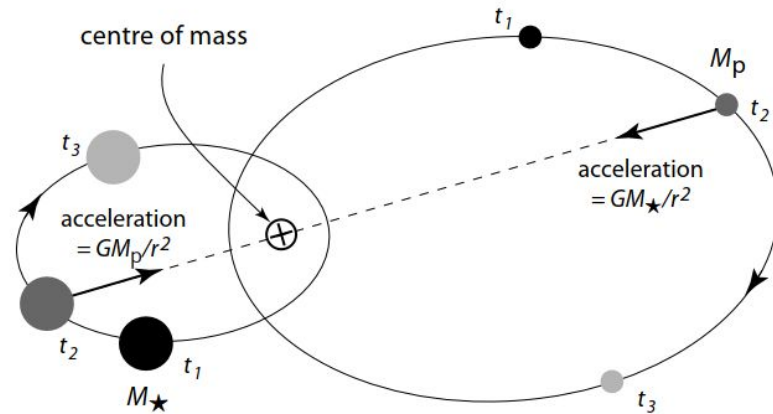
Dráha v prostoru



Ω - délka výstupného uzlu (úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k severu)

ω - argument pericentra (úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid), pro $e=0$ není definován

i - inklinace (úhel mezi rovinou dráhy tělesa a nebeskou sférou).
 $i < 90^\circ$ - prográdní; $i > 90^\circ$ - retrográdní



$$e_{\text{rel}} = e_{\star} = e_p$$

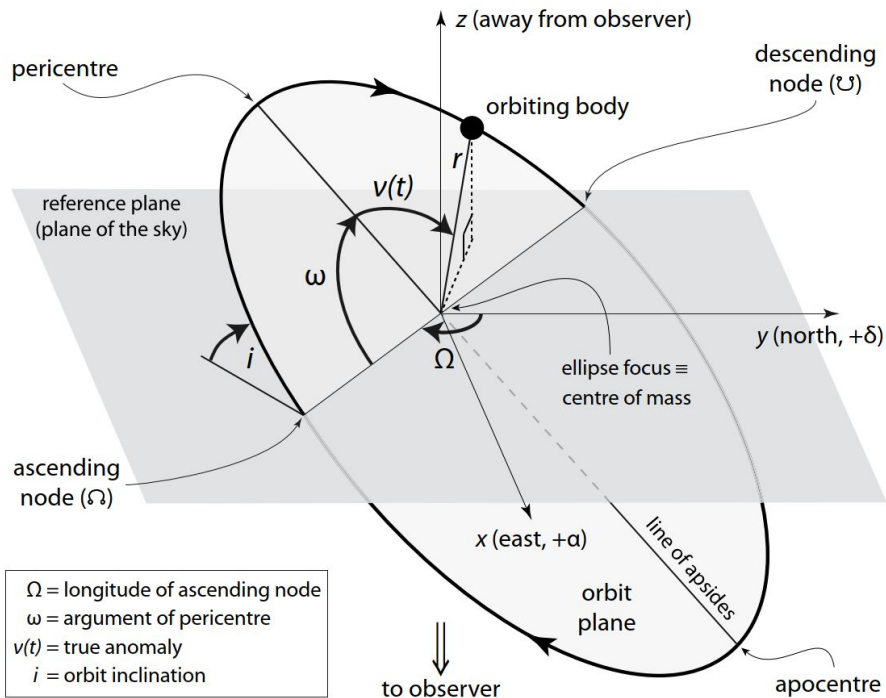
rel - vůči hvězdě

$$P_{\text{rel}} = P_{\star} = P_p$$

$$a_{\star} : a_p : a_{\text{rel}} = M_p : M_{\star} : (M_{\star} + M_p)$$

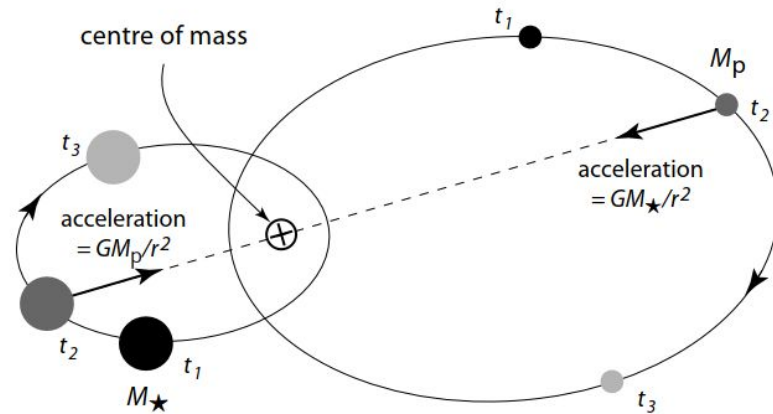
$$a_{\text{rel}} = a_{\star} + a_p$$

Dráha v prostoru



Ω = longitude of ascending node
 ω = argument of pericentre
 $v(t)$ = true anomaly
 i = orbit inclination

Ω - délka výstupného uzlu (úhel mezi uzlovou přímkou a směrem k severu)
 ω - argument pericentra (úhel mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid), pro $e=0$ není definován
 i - inklinace (úhel mezi rovinou dráhy tělesa a nebeskou sférou).
 $i < 90^\circ$ - prográdní; $i > 90^\circ$ - retrográdní



$$e_{\text{rel}} = e_{\star} = e_p$$

rel - vůči hvězdě

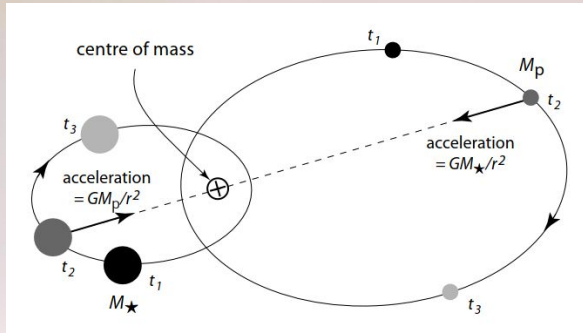
$$P_{\text{rel}} = P_{\star} = P_p$$

$$a_{\star} : a_p : a_{\text{rel}} = M_p : M_{\star} : (M_{\star} + M_p)$$

$$a_{\text{rel}} = a_{\star} + a_p$$

Ze studia pohybu hvězdy můžeme odhadnout hmotnost planety - metody astrometrie a měření radiálních rychlostí

III. Keplerův zákon

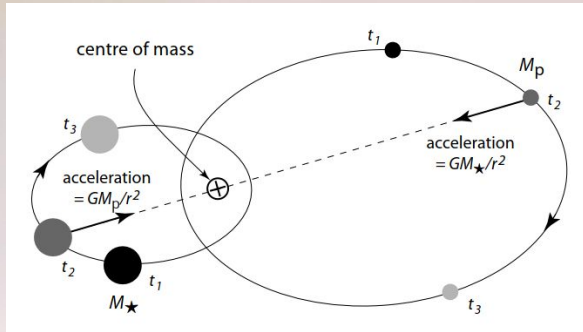


$$M_p a_p = M_* a_*$$

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

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

III. Keplerův zákon



$$M_p a_p = M_* a_*$$

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

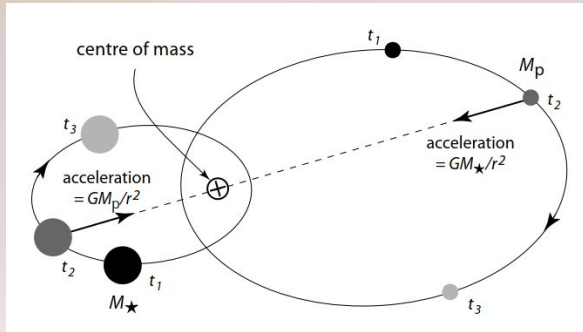
$$a_p = \left(\frac{M_*}{M_* + M_p} \right) a$$

Z rovnováhy sil působících na planetu:

$$F_G = G \frac{M_* M_p}{a^2} \quad F_O = M_p \frac{v_p^2}{a_p} \quad \left| v_p = \frac{2\pi a_p}{P} \right.$$

$$G \frac{M_* M_p}{a^2} = M_p \frac{4\pi^2 a_p^2}{a_p P^2}$$

III. Keplerův zákon



$$M_p a_p = M_* a_*$$

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

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

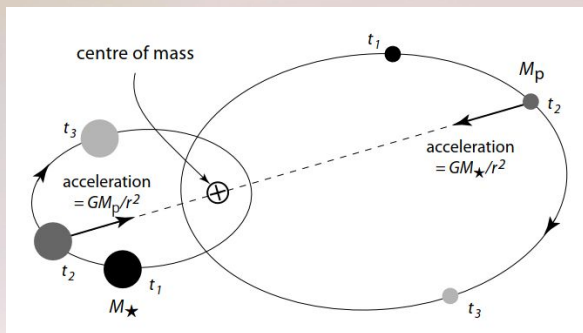
Z rovnováhy sil působících na planetu:

$$F_G = G \frac{M_* M_p}{a^2} \quad F_O = M_p \frac{v_p^2}{a_p} \quad \left| v_p = \frac{2\pi a_p}{P} \right.$$

$$G \frac{M_* M_p}{a^2} = M_p \frac{4\pi^2 a_p^2}{a_p P^2}$$

$$G \frac{M_* M_p}{a^2} = M_p \left(\frac{M_*}{M_* + M_p} \right) a \frac{4\pi^2}{P^2}$$

III. Keplerův zákon



$$M_p a_p = M_* a_*$$

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

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

Z rovnováhy sil působících na planetu:

$$F_G = G \frac{M_* M_p}{a^2} \quad F_O = M_p \frac{v_p^2}{a_p} \quad \left| \quad v_p = \frac{2\pi a_p}{P} \right.$$

$$G \frac{M_* M_p}{a^2} = M_p \frac{4\pi^2 a_p^2}{a_p P^2}$$

$$G \frac{M_* M_p}{a^2} = M_p \left(\frac{M_*}{M_* + M_p} \right) a \frac{4\pi^2}{P^2}$$

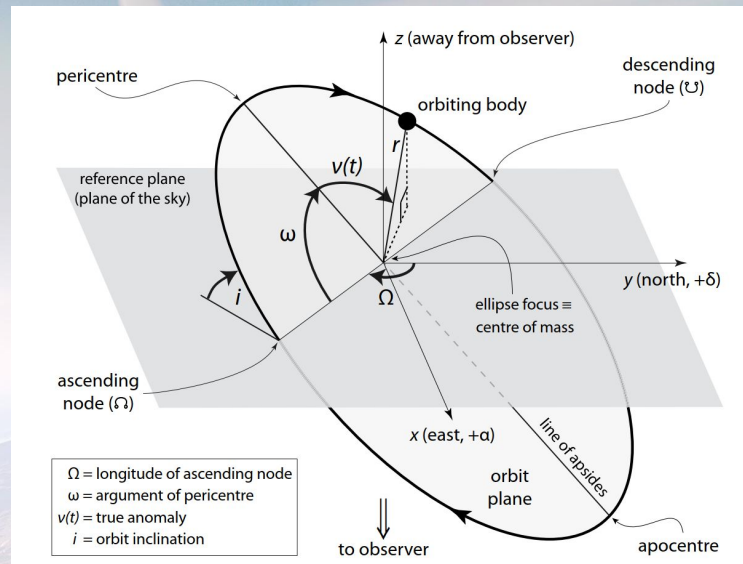
Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_* + M_p}{4\pi^2}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

$$z = r(t) \sin i \sin(\omega + \nu)$$

Souřadnice ve směru od pozorovatele



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_* + M_p}{4\pi^2}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

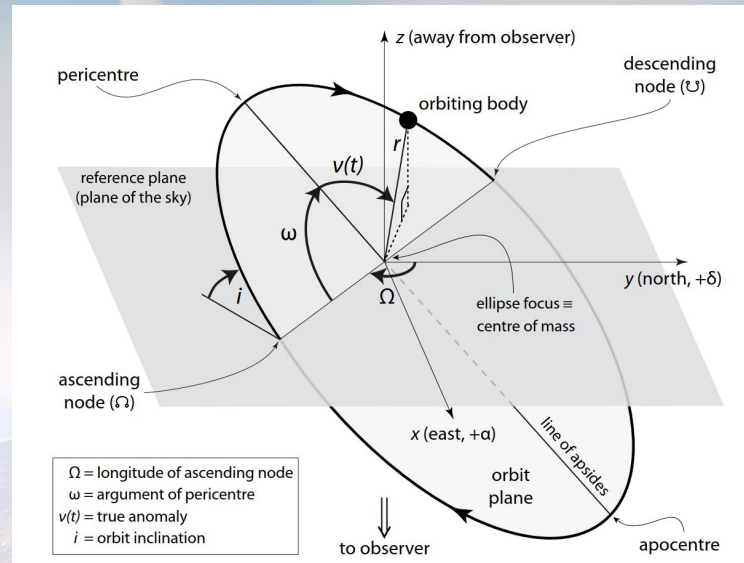
$$z = r(t) \sin i \sin(\omega + \nu)$$

Souřadnice ve směru od pozorovatele

$$v_r \equiv \dot{z} = \sin i [\dot{r} \sin(\omega + \nu) + r \dot{\nu} \cos(\omega + \nu)]$$

rychlost ve směru od pozorovatele =>
RADIÁLNÍ RYCHLOST

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_* + M_p}{4\pi^2}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

$$z = r(t) \sin i \sin(\omega + \nu)$$

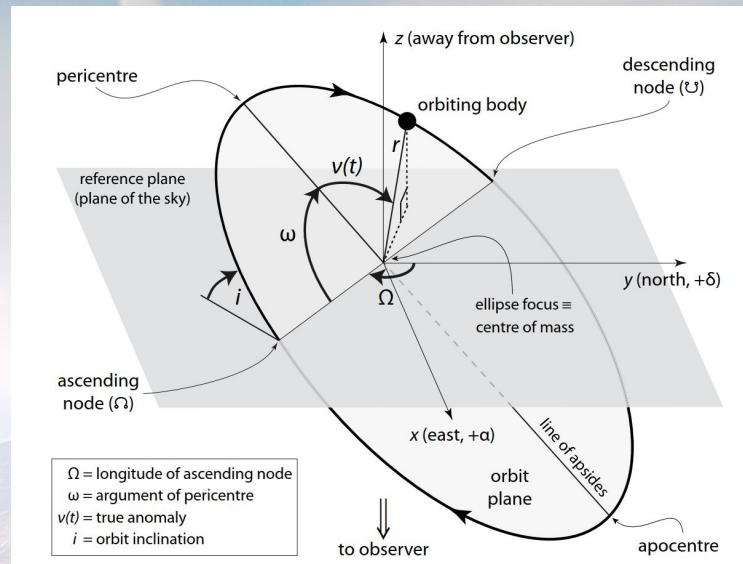
Souřadnice ve směru od pozorovatele

$$v_r \equiv \dot{z} = \sin i [\dot{r} \sin(\omega + \nu) + r \dot{\nu} \cos(\omega + \nu)]$$

rychlost ve směru od pozorovatele =>
RADIÁLNÍ RYCHLOST

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$

Popisuje tvar křivky



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_* + M_p}{4\pi^2}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

$$z = r(t) \sin i \sin(\omega + \nu)$$

Souřadnice ve směru od pozorovatele

$$v_r \equiv \dot{z} = \sin i [\dot{r} \sin(\omega + \nu) + r \dot{\nu} \cos(\omega + \nu)]$$

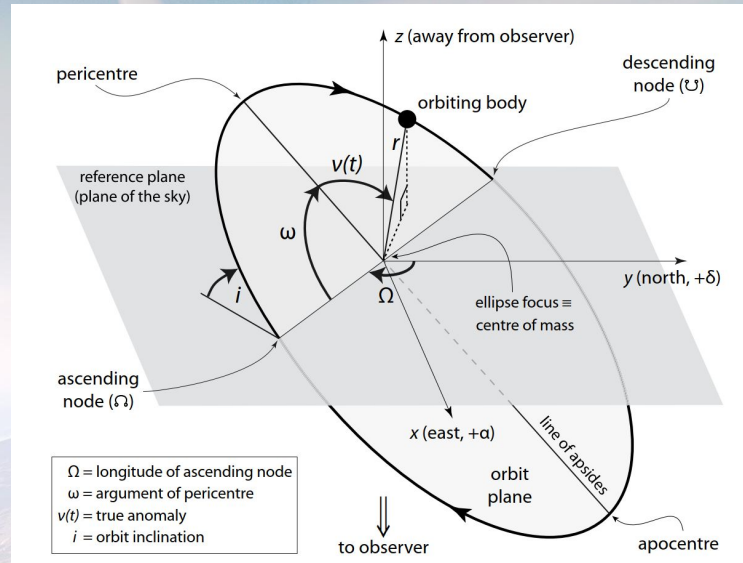
rychlost ve směru od pozorovatele => **RADIÁLNÍ RYCHLOST**

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$

Popisuje tvar křivky

Poloamplituda křivky radiálních rychlostí

$$K \equiv \frac{2\pi}{P} \frac{a_\star \sin i}{(1 - e^2)^{1/2}}$$



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_\star + M_p}{4\pi^2}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

$$z = r(t) \sin i \sin(\omega + \nu) \quad \text{Souřadnice ve směru od pozorovatele}$$

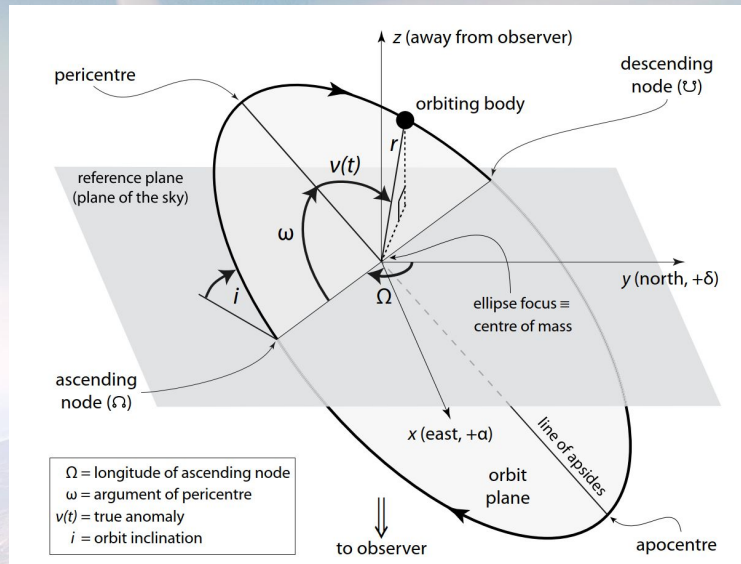
$$v_r \equiv \dot{z} = \sin i [\dot{r} \sin(\omega + \nu) + r \dot{\nu} \cos(\omega + \nu)] \quad \text{rychlost ve směru od pozorovatele => RADIÁLNÍ RYCHLOST}$$

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$

Popisuje tvar křivky

Poloamplituda křivky radiálních rychlostí

$$K \equiv \frac{2\pi}{P} \frac{a_\star \sin i}{(1 - e^2)^{1/2}}$$



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_\star + M_p}{4\pi^2}$$

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

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

$$v_p = \frac{2\pi a_p}{P} \quad v_\star = \frac{2\pi a_\star}{P}$$

III. Keplerův zákon -> radiální rychlosti

$z = r(t) \sin i \sin(\omega + v)$ Souřadnice ve směru od pozorovatele

$v_r \equiv \dot{z} = \sin i [\dot{r} \sin(\omega + v) + r \dot{v} \cos(\omega + v)]$ rychlost ve směru od pozorovatele => **RADIÁLNÍ RYCHLOST**

$v_r = K [\cos(\omega + v) + e \cos \omega]$ Popisuje tvar křivky

Poloamplituda křivky radiálních rychlostí

$$K \equiv \frac{2\pi}{P} \frac{a_\star \sin i}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

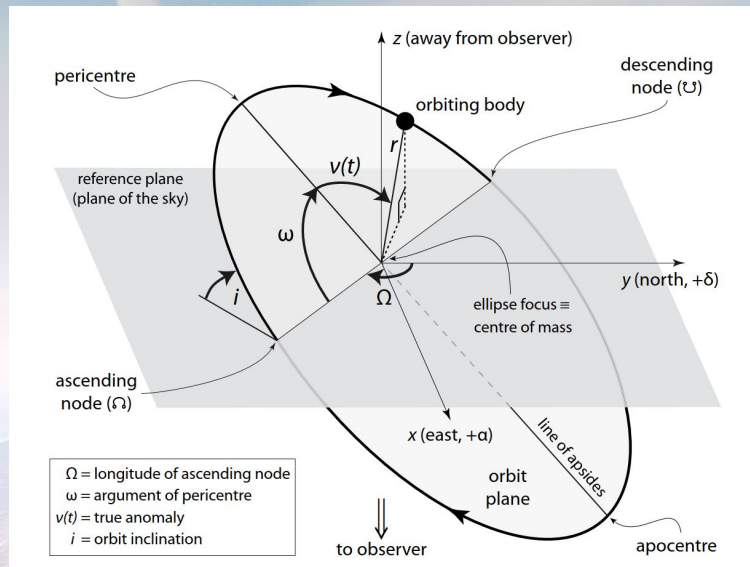
$$M_p a_p = M_\star a_\star$$

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

$$v_p = \frac{2\pi a_p}{P}$$

$$v_\star = \frac{2\pi a_\star}{P}$$

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$



Základní tvar III. Keplerova zákona

$$\frac{a^3}{P^2} = G \frac{M_\star + M_p}{4\pi^2}$$

Křivka radiálních rychlostí

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

$$\mathcal{M} \equiv \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_p)^2}$$

Funkce hmotnosti - při znalosti hmotnosti hvězdy jsme schopni určit jen spodní mez hmotnosti planety

V kombinaci s metodou tranzitu jsme ale schopni určit hmotnost planety absolutně!



Křivka radiálních rychlostí

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

$$\mathcal{M} \equiv \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_p)^2}$$

Funkce hmotnosti - při znalosti hmotnosti hvězdy jsme schopni určit jen spodní mez hmotnosti planety

V kombinaci s metodou tranzitu jsme ale schopni určit hmotnost planety absolutně!

$$K = 28.4 \text{ ms}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-1/3} \left(\frac{M_p \sin i}{M_J} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-2/3}$$

Maximální výchylka Slunce způsobená Jupiterem ($P_J = 11.9$ roků): 12.5 m/s

Zemí ($P_Z = 1$ rok): 0.09 m/s

Křivka radiálních rychlostí

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

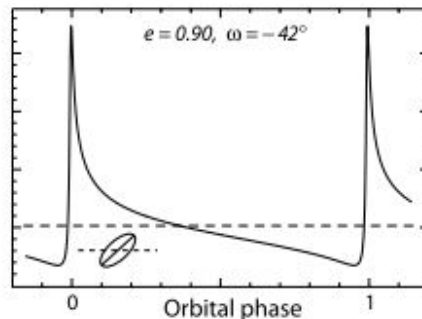
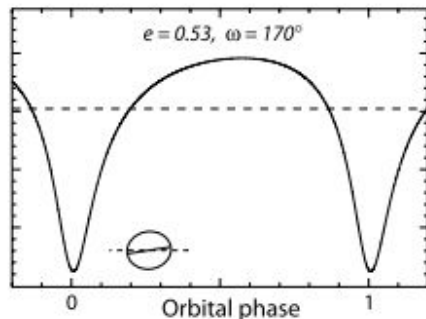
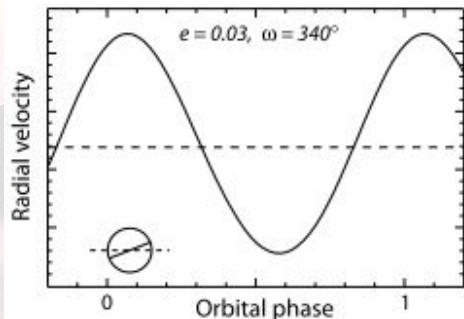
$$\mathcal{M} \equiv \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_p)^2}$$

Funkce hmotnosti - při znalosti hmotnosti hvězdy jsme schopni určit jen spodní mez hmotnosti planety

V kombinaci s metodou tranzitu jsme ale schopni určit hmotnost planety absolutně!

$$K = 28.4 \text{ ms}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-1/3} \left(\frac{M_p \sin i}{M_J} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-2/3}$$

Maximální výchylka Slunce způsobená Jupiterem ($P_J=11.9$ roků): 12.5 m/s
Zemí ($P_Z=1$ rok): 0.09 m/s



$$v_r = K [\cos(\omega + v) + e \cos \omega]$$

Různé tvary křivek RV podle orientace a elipticity dráhy

Křivka radiálních rychlostí

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

$$\mathcal{M} \equiv \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_p)^2}$$

Funkce hmotnosti - při znalosti hmotnosti hvězdy jsme schopni určit jen spodní mez hmotnosti planety

V kombinaci s metodou tranzitu jsme ale schopni určit hmotnost planety absolutně!

$$K = 28.4 \text{ ms}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-1/3} \left(\frac{M_p \sin i}{M_J} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-2/3}$$

Maximální výchylka Slunce způsobená Jupiterem ($P_J = 11.9$ roků): 12.5 m/s

Zemí ($P_Z = 1$ rok): 0.09 m/s

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$

e - Vliv především na tvar, méně pak i na amplitudu

ω - Vliv především na tvar křivky

i - Zásadní vliv na amplitudu

Křivka radiálních rychlostí

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_\star + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}$$

$$\mathcal{M} \equiv \frac{M_p^3 \sin^3 i}{(M_\star + M_p)^2}$$

Funkce hmotnosti - při znalosti hmotnosti hvězdy jsme schopni určit jen spodní mez hmotnosti planety

V kombinaci s metodou tranzitu jsme ale schopni určit hmotnost planety absolutně!

$$K = 28.4 \text{ ms}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-1/3} \left(\frac{M_p \sin i}{M_J} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-2/3}$$

Maximální výchylka Slunce způsobená Jupiterem ($P_J = 11.9$ roků): 12.5 m/s
Zemí ($P_Z = 1$ rok): 0.09 m/s

Je potřeba započítat i vlastní pohyb hvězdy a lineární trend daný možným souputníkem s dlouhou periodou

$$v_r(t) = K [\cos(\omega + \nu(t)) + e \cos \omega] + \gamma + d(t - t_0)$$

$$v_r = K [\cos(\omega + \nu) + e \cos \omega]$$

e - Vliv především na tvar, méně pak i na amplitudu

ω - Vliv především na tvar křivky

i - Zásadní vliv na amplitudu

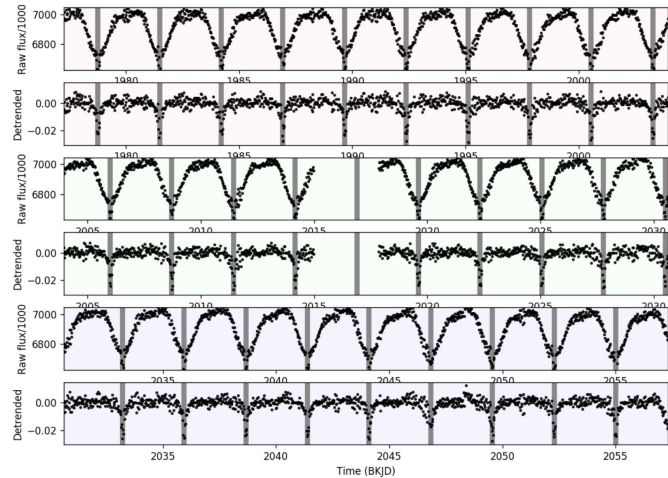
Křivka radiálních rychlostí

Ověřování exoplanetární povahy kandidátů identifikovaných ve fotometrických přehlídkách

EPIC 201534540=HD 99458 - identifikován v K2, Barros et al. 2016, A&A, 594, 100

PDC Detrending

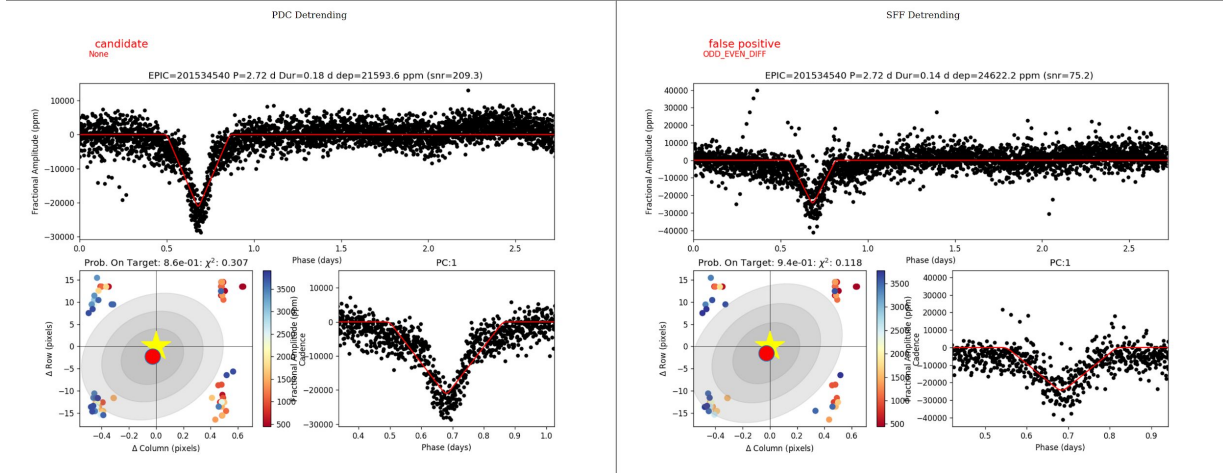
EPIC 201534540 Campaign 1



EPIC 201534540

Candidate with Period = 2.722732 Days and Epoch = 1981.491832 BKJD

Summary Plots

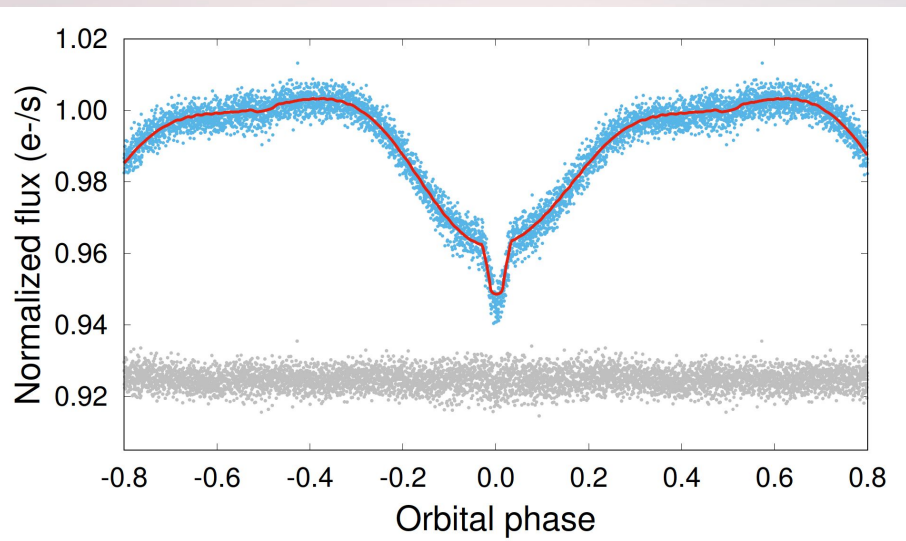


Křivka radiálních rychlostí

Ověřování exoplanetární povahy kandidátů identifikovaných ve fotometrických přehlídkách

EPIC 201534540=HD 99458 - identifikován v K2, Barros et al. 2016, A&A, 594, 100

Měření radiálních rychlostí v Ondřejově - souputník je červený trpaslík, Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230

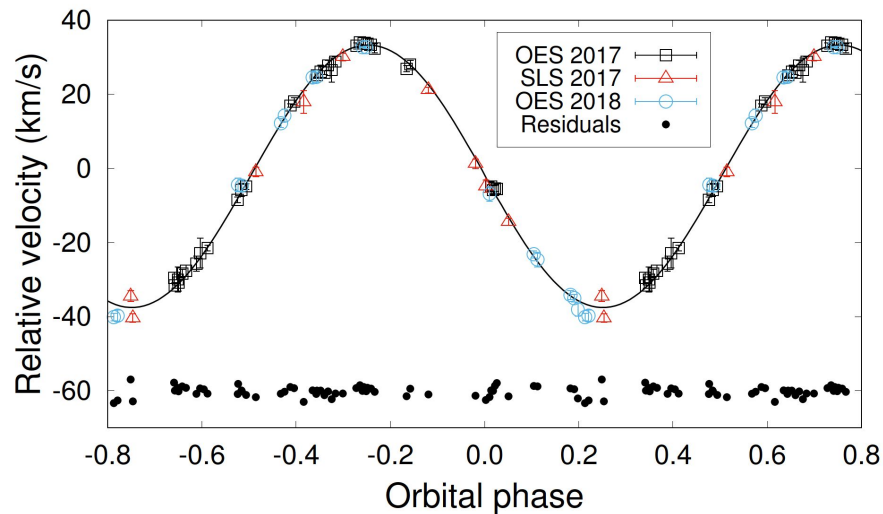
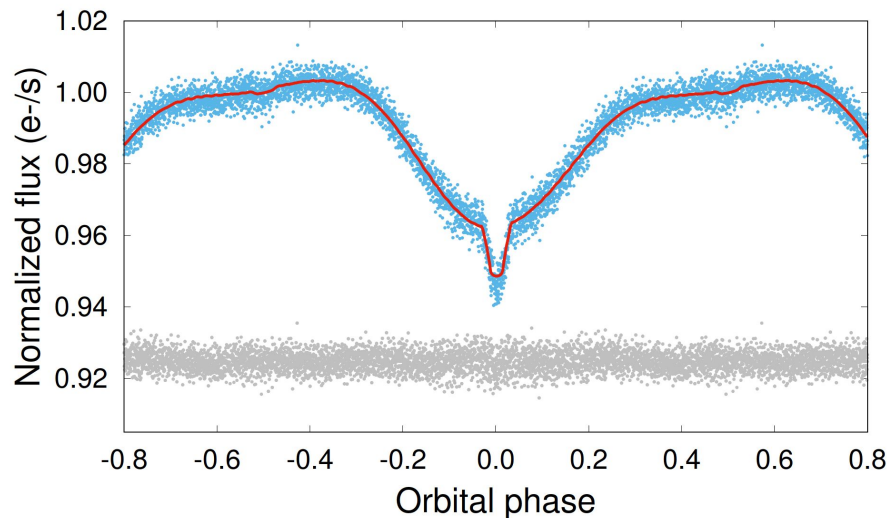


Křivka radiálních rychlostí

Ověřování exoplanetární povahy kandidátů identifikovaných ve fotometrických přehlídkách

EPIC 201534540=HD 99458 - identifikován v K2, Barros et al. 2016, A&A, 594, 100

Měření radiálních rychlostí v Ondřejově - souputník je červený trpaslík, Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230



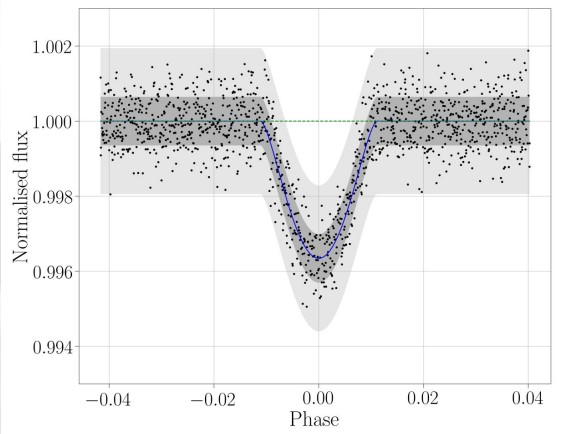
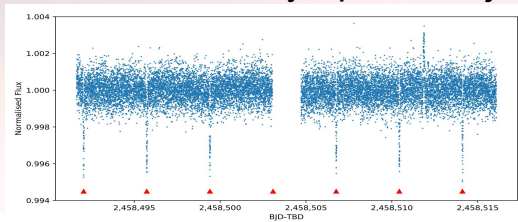
Křivka radiálních rychlostí

Ověřování exoplanetární povahy kandidátů identifikovaných ve fotometrických přehlídkách

EPIC 201534540=HD 99458 - identifikován v K2, Barros et al. 2016, A&A, 594, 100

Měření radiálních rychlostí v Ondřejově - souputník je červený trpaslík, Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230

TOI-503 - První hnědý trpaslík objevený TESS, Šubjak et al. 2020, AJ, 159, 151



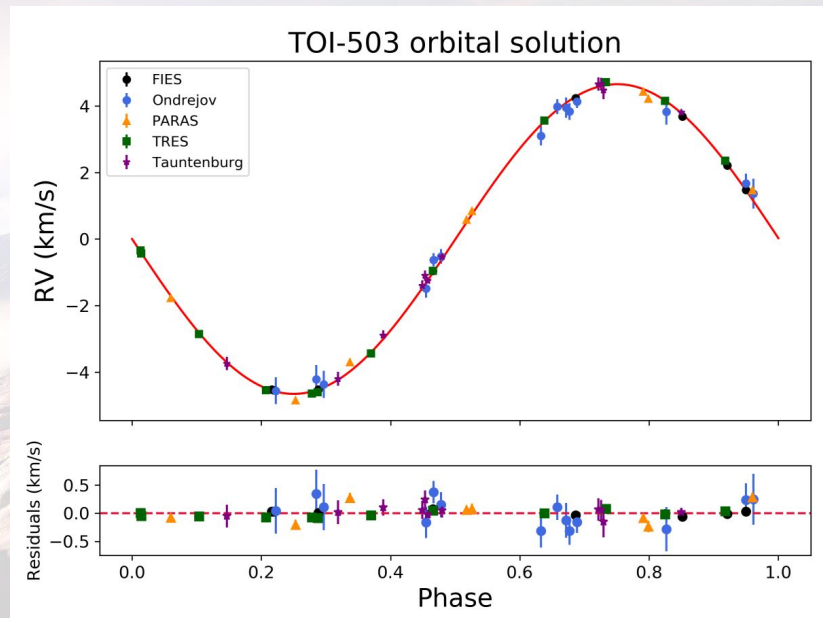
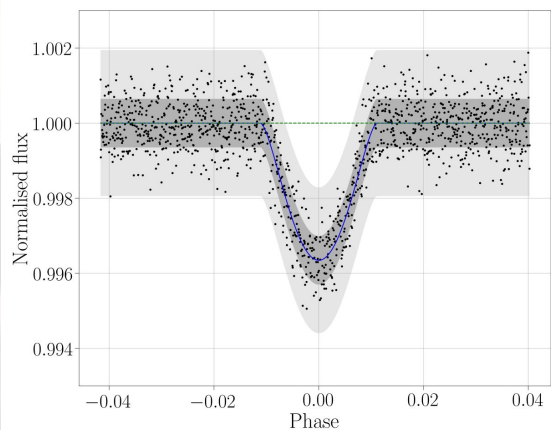
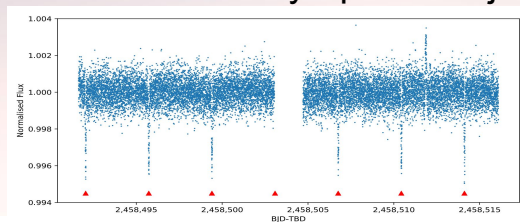
Křivka radiálních rychlostí

Ověřování exoplanetární povahy kandidátů identifikovaných ve fotometrických přehlídkách

EPIC 201534540=HD 99458 - identifikován v K2, Barros et al. 2016, A&A, 594, 100

Měření radiálních rychlostí v Ondřejově - souputník je červený trpaslík, Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230

TOI-503 - První hnědý trpaslík objevený TESS, Šubjak et al. 2020, AJ, 159, 151



Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

Vogel 1890, PASP, 2, 27

ORBIT AND MASS OF THE VARIABLE STAR *ALGOL* (β Persei).

On the 28th of November a very important discovery was communicated to the Academy of Sciences of Berlin by Professor H. C. VOGEL, Director, and Dr. SCHEINER, Astronomer of the Astrophysikalische Observatorium of Potsdam. I condense from the *Sitzungsberichte* of the Academy, 1889, (page 1045), the following :—

“Three photographic negatives of the spectrum of *Algol* taken during the winter of 1888-9 showed that before a minimum *Algol* was moving away from the sun, and after a minimum it was moving towards it. Three new exposures of November, 1889, confirm this result. The observations taken together afford a very strong support to the theory that the cause of the variations in the light of *Algol* is to be found in the eclipses of this star by a dark (invisible) satellite revolving about it. The phenomena can be explained by assuming

the following particulars of the dimensions of the two bodies :—

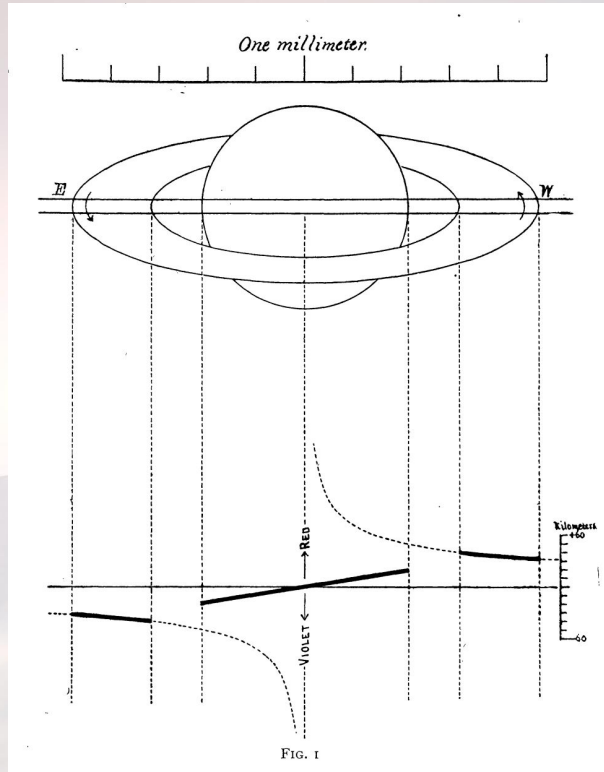
- “ Diameter of *Algol* = 230,000 geographical miles.
- “ Diameter of the invisible satellite = 180,000 “ “
- “ Distance between their centres . = 700,000 “ “
- “ Satellite’s velocity in orbit . . . = 12.0 “ “
- “ Mass of *Algol* = $\frac{3}{8}$ of the Sun’s mass.
- “ Mass of the satellite = $\frac{1}{8}$ “ “ “
- “ Motion of both bodies in the line of sight (toward the Sun) 0.5 geographical miles.”

E. S. H.

Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

Keeler 1895, ApJ, 1, 41 - Saturn rotuje jako tuhé těleso, prstence keplerovskou rotací

Vogel 1890, PASP, 2, 27



ORBIT AND MASS OF THE VARIABLE STAR *ALGOL* (β Persei).

On the 28th of November a very important discovery was communicated to the Academy of Sciences of Berlin by Professor H. C. VOGEL, Director, and Dr. SCHEINER, Astronomer of the Astrophysikalisches Observatorium of Potsdam. I condense from the *Sitzungsberichte* of the Academy, 1889, (page 1045), the following:—

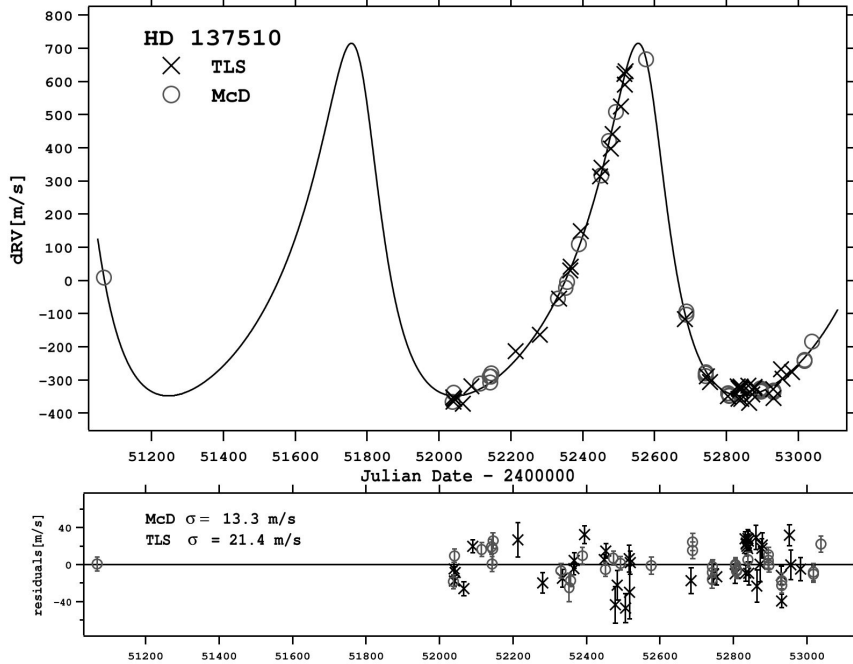
“Three photographic negatives of the spectrum of *Algol* taken during the winter of 1888-9 showed that before a minimum *Algol* was moving away from the sun, and after a minimum it was moving towards it. Three new exposures of November, 1889, confirm this result. The observations taken together afford a very strong support to the theory that the cause of the variations in the light of *Algol* is to be found in the eclipses of this star by a dark (invisible) satellite revolving about it. The phenomena can be explained by assuming the following particulars of the dimensions of the two bodies:—

- “Diameter of *Algol* = 230,000 geographical miles.
- “Diameter of the invisible satellite = 180,000 “ “
- “Distance between their centres . = 700,000 “ “
- “Satellite’s velocity in orbit . . . = 12.0 “ “
- “Mass of *Algol* = $\frac{4}{5}$ of the Sun’s mass.
- “Mass of the satellite = $\frac{1}{5}$ “ “ “
- “Motion of both bodies in the line of sight (toward the Sun) 0.5 geographical miles.”

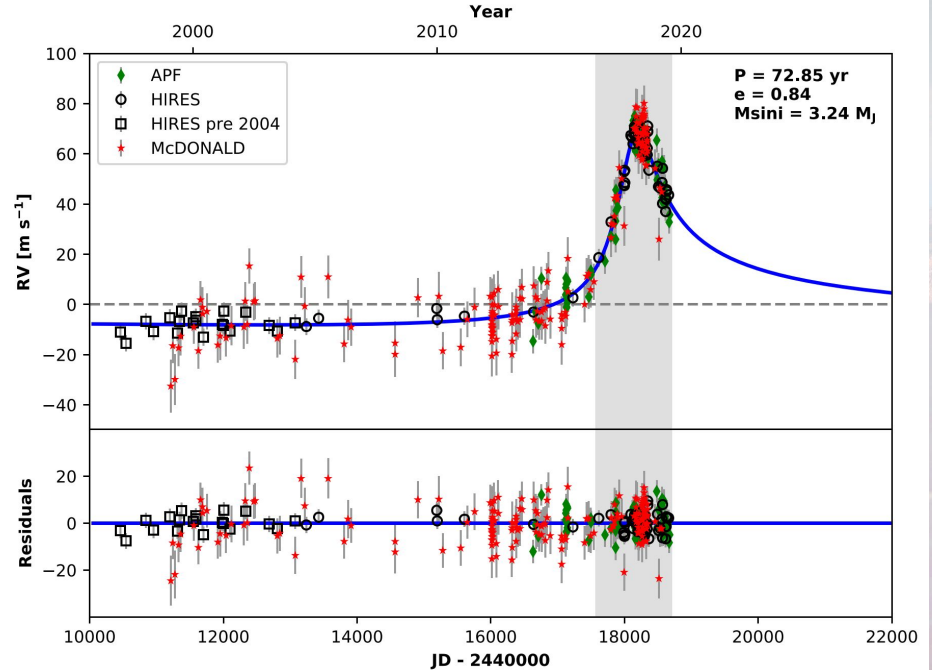
E. S. H.

Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

Endl et al. 2004, ApJ, 611, 1121



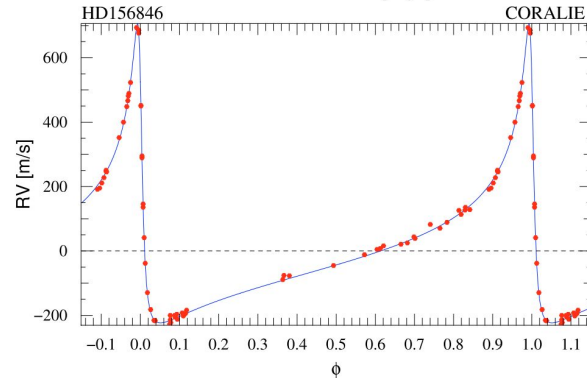
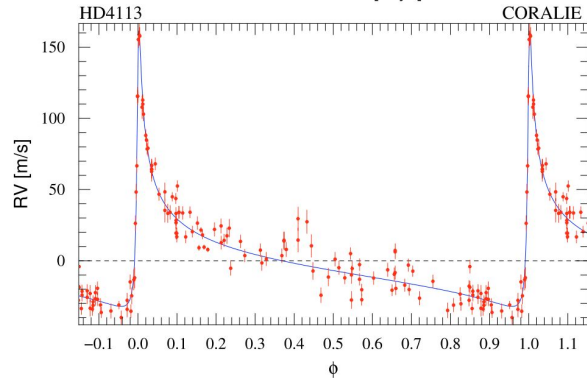
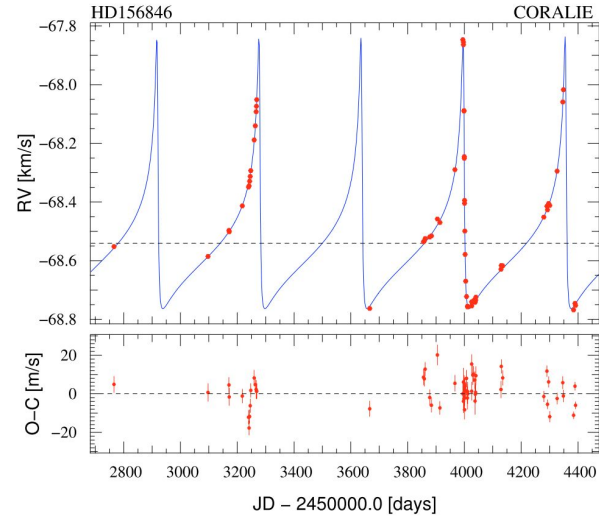
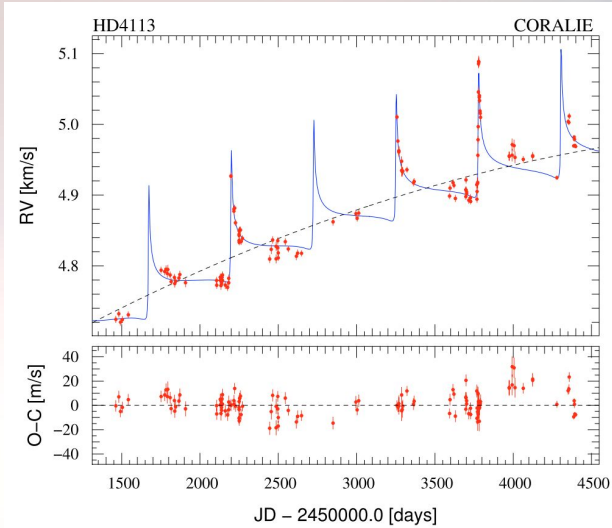
Blunt et al. 2019, AJ, 158, 181



Dlouhodobá měření mohou ukázat na přítomnost planet

Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

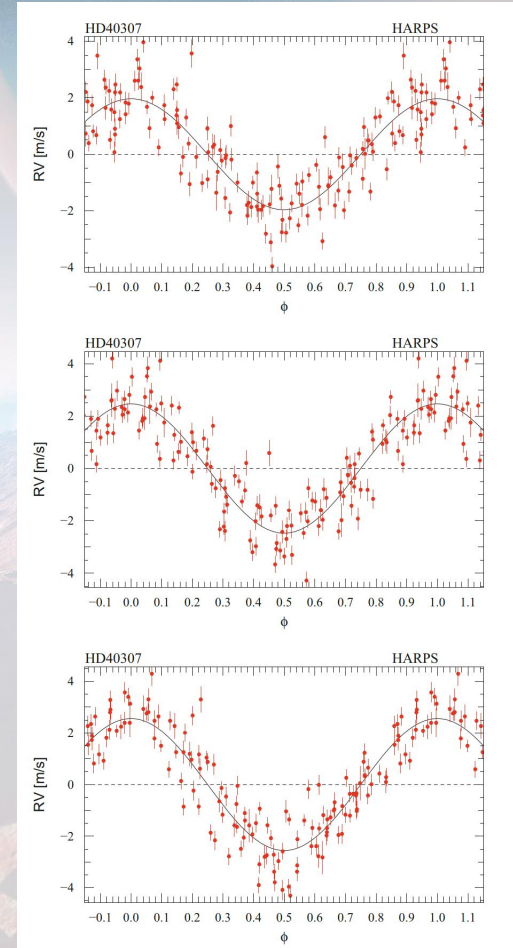
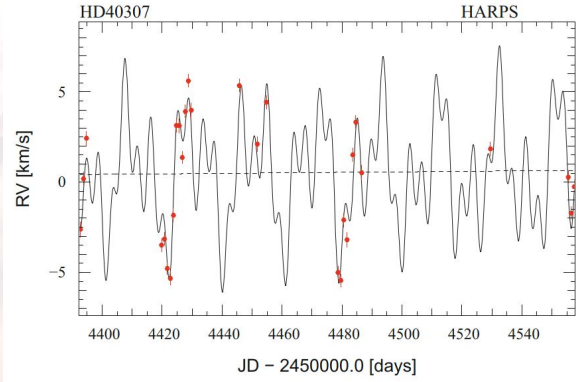
Tamuz et al. 2008, A&A, 480, 33



Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

Mayor et al. 2009, A&A, 493, 639

Parameter		HD 40307 b	HD 40307 c	HD 40307 d
P	[days]	4.3115 ± 0.0006	9.620 ± 0.002	20.46 ± 0.01
T	[JD-2 400 000]	$54\,562.77 \pm 0.08$	$54\,551.53 \pm 0.15$	$54\,532.42 \pm 0.29$
e		0.0	0.0	0.0
ω	[deg]	0.0	0.0	0.0
K	[m s ⁻¹]	1.97 ± 0.11	2.47 ± 0.11	4.55 ± 0.12
V	[km s ⁻¹]		31.332	
drift	[m s ⁻¹ /yr]		0.51 ± 0.10	
$f(m)$	[10 ⁻¹⁴ M_{\odot}]	0.35	1.53	3.59
$m_2 \sin i$	[M_{\oplus}]	4.2	6.9	9.2
a	[AU]	0.047	0.081	0.134
N_{meas}			135	
Span	[days]		1628	
σ (O-C)	[ms ⁻¹]		0.85	
χ_{red}^2			2.57	



Metoda radiálních rychlostí - zajímavé výsledky

Fischer et al. 2008, ApJ, 675, 790 - 5 planet okolo 55 Cnc

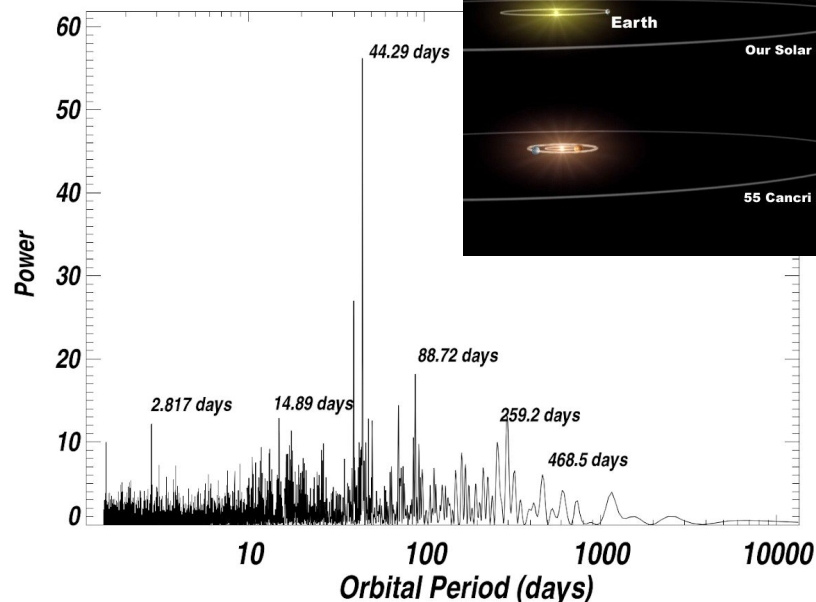
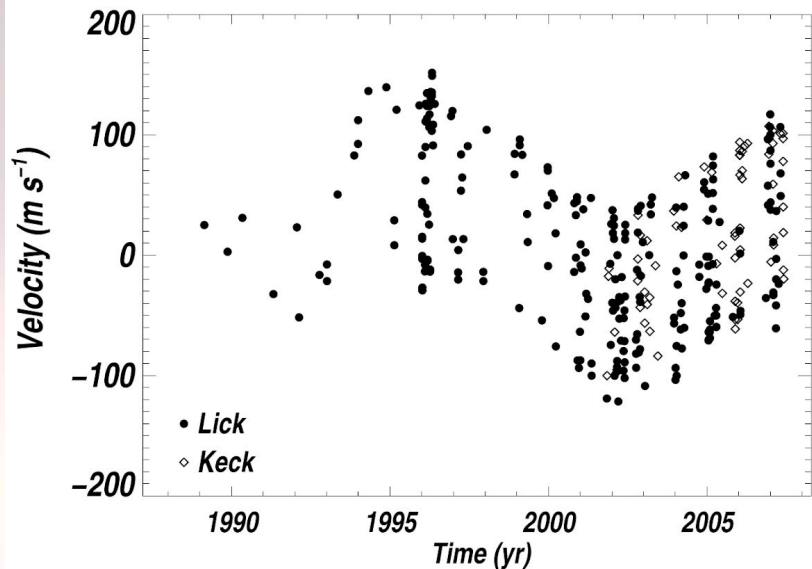
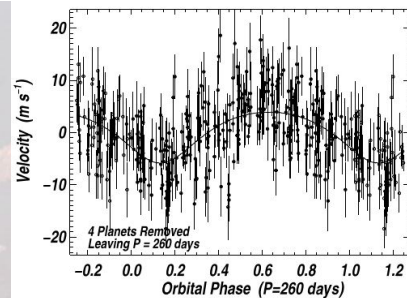


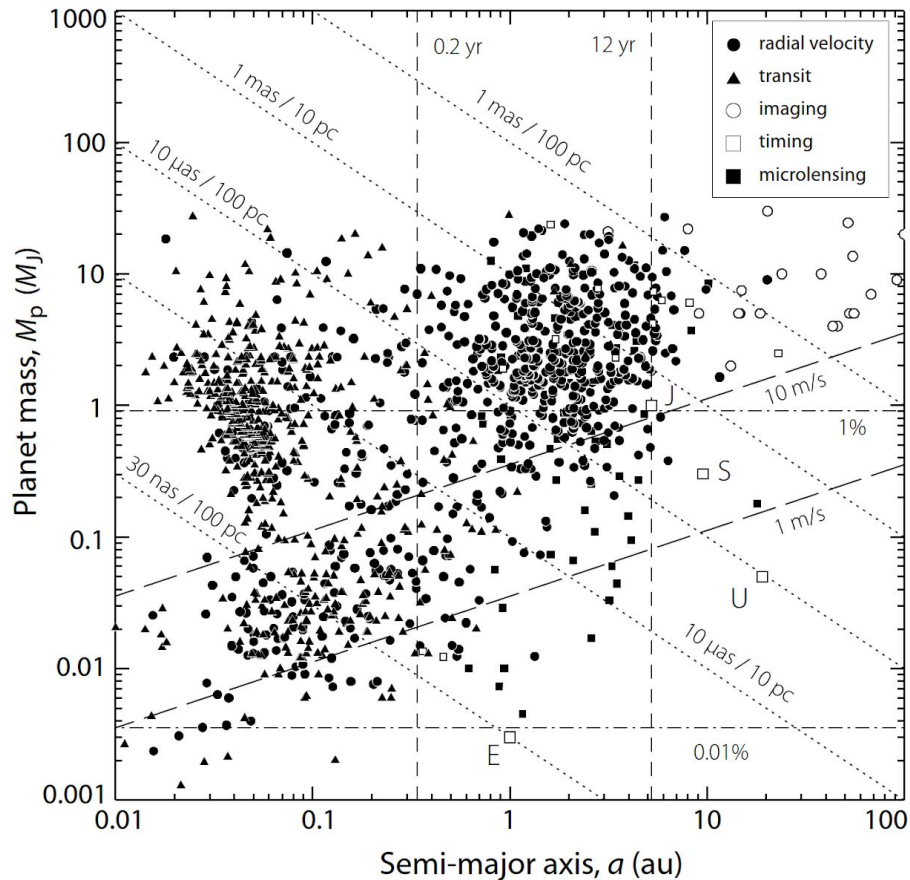
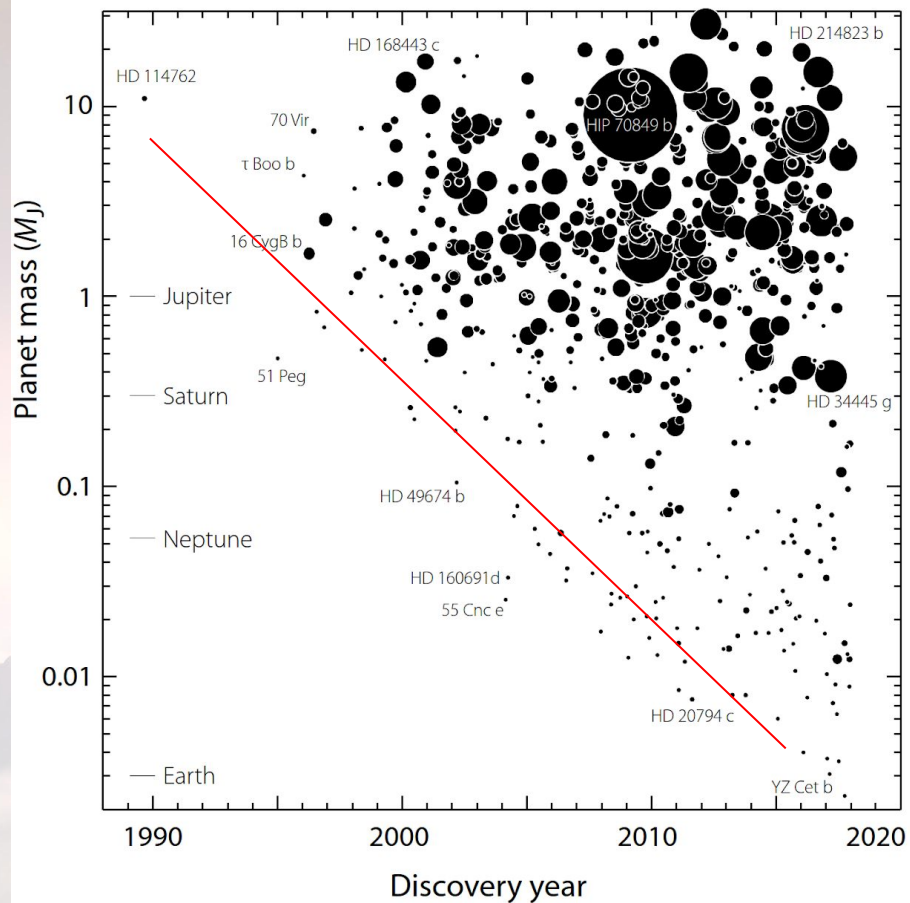
TABLE 2
ORBITAL PARAMETERS FOR THE FIVE-PLANET MODEL

Planet ^a	Period (days)	T_p	e	ω (deg)	K ($m s^{-1}$)	$M \sin i$ (M_{Jup})	a (AU)
e.....	2.81705 ± 0.0001	249999.83643 ± 0.0001	0.07 ± 0.06	248.9 ± 38	5.07 ± 0.53	0.034 ± 0.0036	$0.038 \pm 1.0 \times 10^{-6}$
b.....	14.65162 ± 0.0007	2450002.94749 ± 1.2	0.014 ± 0.008	131.94 ± 30	71.32 ± 0.41	0.824 ± 0.007	$0.115 \pm 1.1 \times 10^{-6}$
c.....	44.3446 ± 0.007	2449989.3385 ± 3.3	0.086 ± 0.052	77.9 ± 29	10.18 ± 0.43	0.169 ± 0.008	$0.240 \pm 4.5 \times 10^{-5}$
f.....	260.00 ± 1.1	2450080.9108 ± 1.1	0.2 ± 0.2 (f)	181.1 ± 60	4.879 ± 0.6	0.144 ± 0.04	0.781 ± 0.007
d.....	5218 ± 230	2452500.6 ± 230	0.025 ± 0.03	181.3 ± 32	46.85 ± 1.8	3.835 ± 0.08	5.77 ± 0.11

^a Planets are listed in order of increasing orbital period; however, the planet designations, b–f, correspond to the chronological order of their discovery.



Metoda radiálních rychlostí - statistiky a limity

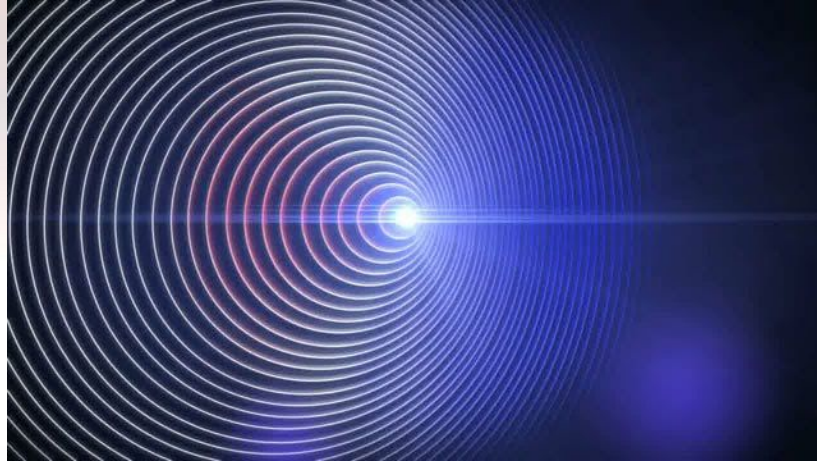


Dopplerův jev

Změna pozorované frekvence vlivem pohybu zdroje a pozorovatele

$$f_{\text{poz}} = \left(\frac{c \pm v_{\text{poz}}}{c \mp v_{\text{zdroj}}} \right) f_0$$

f_0 - frekvence vlnění
 f_{poz} - pozorovaná frekvence
 c - rychlost vlnění
 v_{poz} - rychlost pozorovatele
 v_{zdroj} - rychlost zdroje



Christian Doppler (1803–1853)

Konvence:

Objekt se vzdaluje (červený posuv): K je kladné

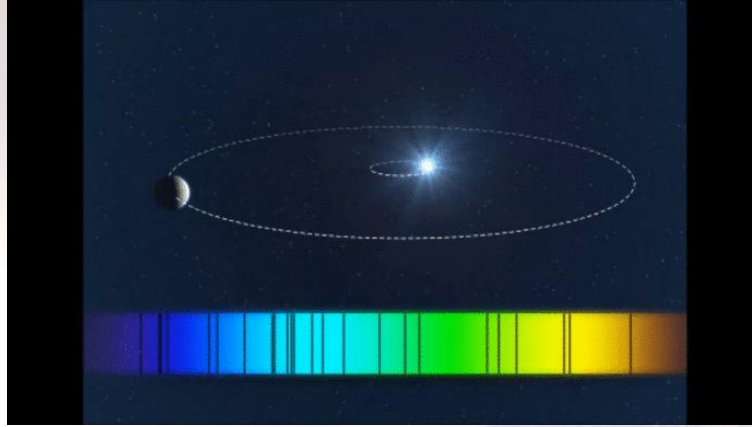
Objekt se přibližuje (modrý posuv): K je záporné

Dopplerův jev

Změna pozorované frekvence vlivem pohybu zdroje a pozorovatele

$$f_{\text{poz}} = \left(\frac{c \pm v_{\text{poz}}}{c \mp v_{\text{zdroj}}} \right) f_0$$

f_0 - frekvence vlnění
 f_{poz} - pozorovaná frekvence
 c - rychlost vlnění
 v_{poz} - rychlost pozorovatele
 v_{zdroj} - rychlost zdroje



Christian Doppler (1803–1853)

Konvence:

Objekt se vzdaluje (červený posuv): K je kladné

Objekt se přibližuje (modrý posuv): K je záporné

$$f_{\text{poz}} = \left(\frac{c}{c - v} \right)$$

→

$$\frac{c}{\lambda_{\text{poz}}}(c - v) = \frac{c^2}{\lambda_{\text{poz}}}$$

$$c \left(1 - \frac{v}{c} \right) = \frac{\lambda_{\text{poz}}}{\lambda_0} c$$

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$$

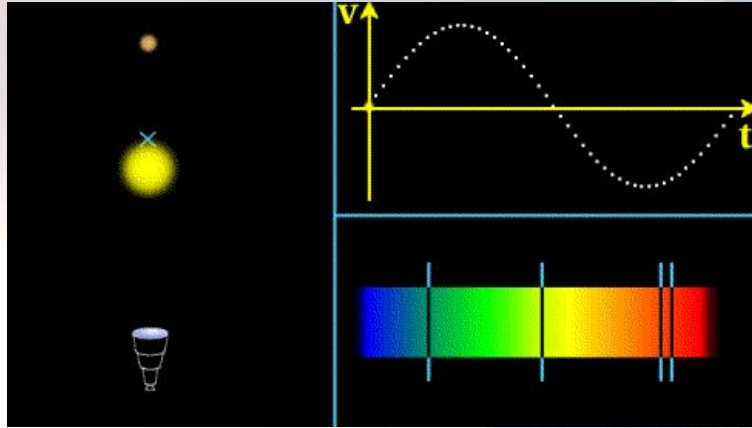
$$f_{\text{poz}} = c \lambda_{\text{poz}} \quad f_0 = c \lambda_0$$

Dopplerův jev

Změna pozorované frekvence vlivem pohybu zdroje a pozorovatele

$$f_{\text{poz}} = \left(\frac{c \pm v_{\text{poz}}}{c \mp v_{\text{zdroj}}} \right) f_0$$

f_0 - frekvence vlnění
 f_{poz} - pozorovaná frekvence
 c - rychlost vlnění
 v_{poz} - rychlost pozorovatele
 v_{zdroj} - rychlost zdroje



Christian Doppler (1803–1853)

Konvence:

Objekt se vzdaluje (červený posuv): K je kladné

Objekt se přibližuje (modrý posuv): K je záporné

$$f_{\text{poz}} = \left(\frac{c}{c - v} \right)$$

→

$$\frac{c}{\lambda_{\text{poz}}}(c - v) = \frac{c^2}{\lambda_{\text{poz}}}$$

$$c \left(1 - \frac{v}{c} \right) = \frac{\lambda_{\text{poz}}}{\lambda_0} c$$

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$$

$$f_{\text{poz}} = c \lambda_{\text{poz}} \quad f_0 = c \lambda_0$$

Dopplerův jev

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Posuv spektrálních čar $\Delta\lambda$ je nepřímo úměrný rychlosti světla => nutnost měřit velmi malé posuvy

Amplitudy způsobené exoplanetami typicky $< 1 \text{ km/s}$ → na 400 nm posuv $\Delta\lambda$ 0.0013 nm !
=> Extrémní nároky na stabilitu spektrografu, zpracování dat a analytické metody

ŠPATNÁ ANIMACE! PROČ?

