Detectarea exoplanetelor prin spectroscopie

Exemplul de 51 Pegasus b

Context

O exoplanetă este o planetă care orbitează în jurul unei alte stele decât Soarele. Una dintre metodele utilizate pentru a detecta o exoplanetă este măsurarea vitezei radiale a stelei (adică viteza sa în raport cu observatorul) în funcție de timp cu mare precizie.

Prezența unui însoțitor în jurul stelei face ca steaua să se miște periodic în jurul centrului de greutate al sistemului stea-planetă. Aceasta este o metodă indirectă, care măsoară efectul prezenței unei planete asupra mișcării stelei. Viteza radială a stelei este calculată din schimbarea poziției liniilor spectrale stelare datorită efectului Doppler-Fizeau. Aceasta este o metodă spectroscopică.

Prima exoplanetă care orbitează în jurul unei stele similare cu Soarele nostru, 51 Peg b, a fost descoperită în 1995 de o echipă de cercetători elvețieni folosind metoda vitezei radiale, cunoscută și sub numele de velocimetrie Doppler.

Scopul acestei activități este de a înțelege metoda de detectare a exoplanetelor prin măsurarea variațiilor vitezei radiale a stelei; să învețe cum să deduci anumite proprietăți ale planetei din aceste măsurători; înțelegeți limitările acestei metode.

Obiectivele

Scopul acestei activități este de a înțelege metoda utilizată pentru a detecta exoplanetele prin măsurarea variațiilor vitezei radiale a stelei. De asemenea, va arăta cum anumite proprietăți ale planetei pot fi deduse din aceste măsurători. În cele din urmă, vom discuta limitările acestei metode.

Această activitate va implica

- analizarea datelor spectroscopice obținute pe steaua 51 Peg pentru a deduce perioada orbitală și amplitudinea maximă a vitezei stelei pe orbita sa;
- determinarea distanței planetei 51 Peg b față de steaua sa și a masei sale din analiza anterioară;
- discutând limitările metodei spectroscopice de detectare a exoplanetelor.

Concepte acoperite

- Spectroscopie
- Spectru stelar
- Undă
- Efect Doppler-Fizeau
- Legile lui Kepler
- Legea gravitației
- Sistem dublu
- Mișcare circulară uniformă

- Sinusoid

Date numerice

(Sistemul internațional IS: metru, kilogram, secundă)

Cantităţi fizice

- constanta gravitațională: G = 6.67x10-11 IS
- Viteza luminii: C = 299.792.458 m/s

Cantităţi astrofizice

- masa Soarelui: M_{Sun} = 2x1030 kg
- unitate astronomică: 1 AU = $1.5x10^{11m}$
- masa lui Jupiter: M_J = 2x1027kg
- perioada de revoluție a lui Jupiter în jurul Soarelui: 12 ani
- masa Pământului: M_E = 6x1024kg
- Perioada de revoluție a lui Saturn în jurul Soarelui: 30 de ani

Planul lecţiei

1 Sistemul stea-planetă

Într-un sistem dublu, format aici dintr-o stea și planeta sa, ambele obiecte orbitează în jurul baricentrului sau "centrului de greutate" al sistemului.

Chiar dacă baricentrul este foarte aproape de centrul stelei, steaua se va mișca periodic. Acest lucru se manifestă prin variații ale vitezei radiale a stelei (adică proiecția vitezei obiectului pe linia vizuală a observatorului, vezi Figura 1). Vom încerca să detectăm aceste variații periodice ale vitezei radiale a stelei prin efectul pe care îl au asupra spectrului său. Când steaua se mișcă în jurul centrului de greutate al sistemului, viteza sa este îndreptată periodic spre noi și apoi departe de noi. Pe măsură ce steaua se deplasează spre noi, lumina se deplasează spre albastru, în timp ce pe măsură ce se îndepărtează, se deplasează spre roșu: acesta este efectul Doppler-Fizeau. Prin urmare, vom măsura în spectrul stelei deplasarea albastră sau roșie, Δλ, a lungimii de undă a liniilor spectrale corespunzătoare elementelor chimice a căror lungime de undă este cunoscută din măsurători de laborator, $\lambda_{laborator}$. Putem deduce apoi viteza radială a stelei, *v*, cu:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{obs_}\lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{v}{c}$$

Vezi Figura 1 pentru o explicație ilustrată a metodei.

Viteza stelei pe orbita sa în jurul centrului de greutate ia forma unei sinusoide și este descrisă de formula:

$$v_{star} = V.\sin\left(2\pi\frac{t}{T} + \varphi\right)$$

unde *V* este amplitudinea vitezei radiale, *t* este timpul, *T* este perioada de timp a sinusoidei (adică perioada de revoluție a planetei în jurul stelei sale, care este aceeași cu cea a stelei din jurul centrului de greutate) și φ este faza.

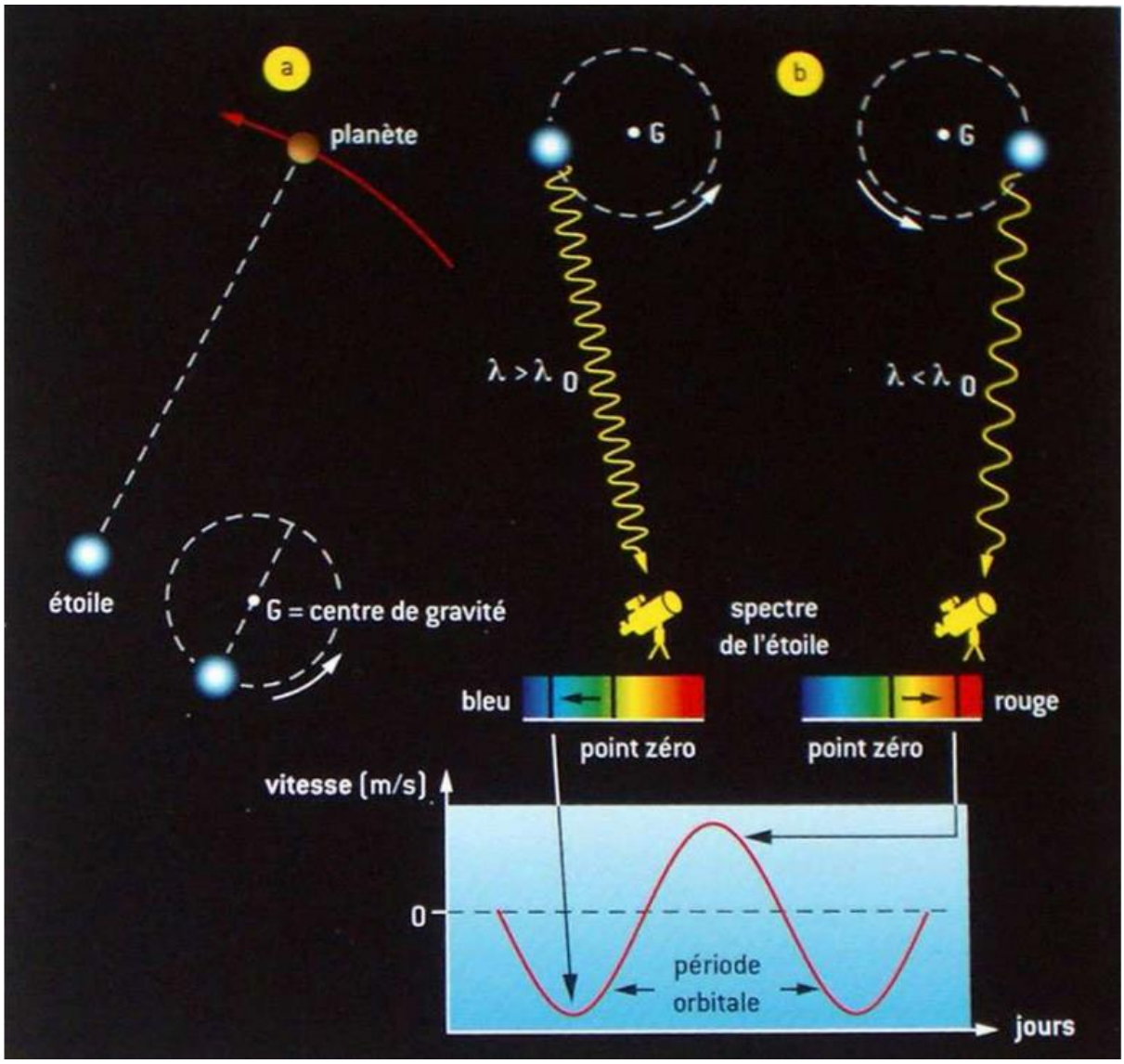

Figura 1: Cum funcționează metoda spectroscopică de detectare a exoplanetelor. (a) Planeta se învârte în jurul stelei sale; mai precis, planeta și steaua se învârt în jurul lui G, centrul de greutate al sistemului planetă-stea. (b) Efectul Doppler permite unui observator terestru să detecteze mișcările stelei. Acestea sunt în general induse de o planetă suficient de mare sau de un grup de planete. Succesiunea de deplasări roșii și albastre, caracteristice stelelor influențate de prezența unui însoțitor orbital, poate fi reprezentată ca o curbă sinusoidală

Întrebarea 1:

Pe curba roșie din partea de jos a Figurii 1, indicați ce părți ale acestei curbe corespund cazurilor în care steaua este cea mai apropiată de Pământ, unde este cea mai îndepărtată și pozițiilor intermediare.

2 Analiza datelor spectroscopice care au dus la detectarea 51 Peg b

51 Peg b este prima exoplanetă detectată în jurul unei stele de tip solar. A fost descoperit în 1995 de o echipă de cercetători elvețieni, M. Mayor și D. Queloz. Ei au folosit spectrograful ELODIE cuplată la telescopul cu diametrul de 193 cm de la Observatorul din Haute-Provence din Franța. Acest lucru le-a permis să detecteze perturbații în traiectoria stelei din cauza prezenței unei planete. Figura 2 arată spectrul real al stelei 51 Peg obținut cu spectrograful ELODIE pe 6 noiembrie 1995.

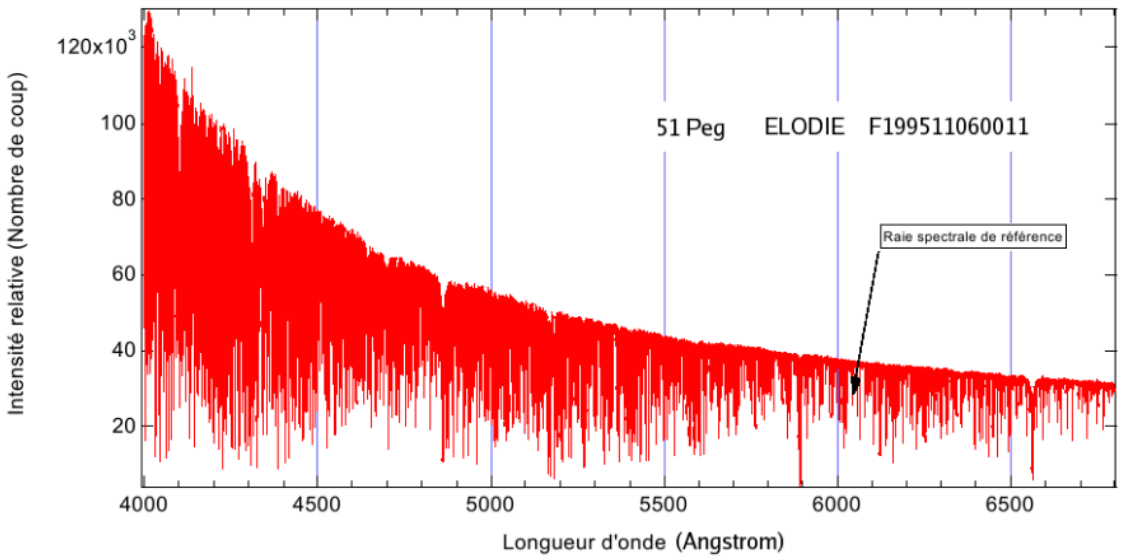

Figura 2: Spectrul de 51 Peg obținut cu spectrograful ELODIE al telescopului de 193 cm de la Observatorul din Haute-Provence pe 6 noiembrie 1995.

Variațiile de viteză radială sunt calculate folosind formula de deplasare Doppler:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{ref}} = \frac{\lambda_{obs}-\lambda_{ref}}{\lambda_{ref}} = \frac{\Delta v_{obs}}{c}$$

λ_{ref} este lungimea de undă a unei linii din spectru cunoscută sub numele de linie de referință și λ_{obs} este lungimea de undă a acelei linii din spectrul observat (λ_{lab} este înlocuit cu λ_{ref} deoarece aici nu calculăm viteza absolută (v), ci variația vitezei (Δv)).

Pentru a găsi variațiile vitezei radiale a stelei datorate prezenței unei planete, Δv_{obs} este corectat de viteza radială datorată rotației Pământului în jurul axei sale și în jurul Soarelui proiectată în direcția stelei, notat $v_{Pământ}$:

$\Delta v = \Delta v_{obs} - v_{Pământ}$

$v_{Pământ}$ este de ordinul a 20 km/s.

Δv se calculează pentru fiecare linie din spectru. Variațiile de viteză radială ale tuturor liniilor sunt apoi mediate. Variațiile de viteză radială astfel obținute ($< \Delta v >$) pentru steaua 51 Peg de către doi astronomi americani, Butler și Marcy (rezultate similare cu cele ale lui Mayor și Queloz) sunt prezentate în Tabelul 1.

Întrebări:

1. Desenați curba variațiilor vitezei radiale, $< \Delta v >$, în funcție de timpul în zile din Figura 3 din datele din Tabelul 1.
2. Trasați punctele acestei curbe pe hârtie de calc.
3. Comparați curba de pe hârtia de calc cu cele două curbe care reprezintă două sinusoide diferite (Figura 4 și Figura 5). Care dintre ele reprezintă cel mai bine datele?

4. Măsurați perioada, *T* (în zile) și amplitudinea, *K* (în m/s), a sinusoidei care reprezintă cel mai bine datele.

Timp *t* (zile)	**Viteză < Δ*v* > (m/s)**		**Timp *t* (zile)**	**Viteză < Δ*v* > (m/s)**
2.67365	-40.87		23.6448	-37.30
2.80873	-46.96		23.6904	-31.35
2.95979	-47.39		23.7258	-42.57
3.62695	-19.85		24.6391	-33.47
3.73265	-13.47		24.7261	-27.46
3.90077	-5.782		24.8174	-22.70
4.60753	49.41		25.6226	45.34
4.78429	58.66		25.7145	47.61
4.90699	63.20		25.7615	56.15
5.60503	45.60		26.6176	65.32
5.92544	17.88		26.6508	69.63
11.6443	-45.50		26.7020	62.54
11.8378	-38.98		26.7366	50.86
12.6355	27.27		27.6474	-22.66
12.8664	32.45		27.6893	-22.55
13.6242	63.38		27.7399	-31.82
13.8295	54.78		27.7721	-31.72
14.6428	-1.340		28.6061	-44.12
14.7229	-5.477		28.6556	-33.59
14.8161	-10.73		28.7019	-37.10
14.9043	-26.29		28.7450	-39.13
15.6261	-50.68		28.7799	-35.32
15.7467	-45.78		29.6093	25.09
15.8654	-57.54		29.7001	35.69
16.6149	10.56		29.7468	41.17
16.7592	12.91		30.6004	61.33
16.8474	16.40		30.6454	58.98
17.7341	63.64		30.6930	63.07
17.8442	60.48		30.7402	56.86
18.6161	26.29		30.8334	50.98
18.7648	5.988		31.6619	-2.545
18.8540	-7.798		31.7052	0.7633
19.6218	-43.62		31.7492	-4.599
19.7325	-59.45		32.6045	-38.53
19.8473	-58.60		32.6479	-48.68
20.6137	-20.22		32.6943	-38.84
20.7401	-8.064		33.6073	2.696
20.8543	5.596		33.6527	11.46
21.6151	56.41		33.6982	14.02
21.6620	59.26		33.7331	17.55
21.7063	66.78		35.5970	19.74
23.5986	-35.13			

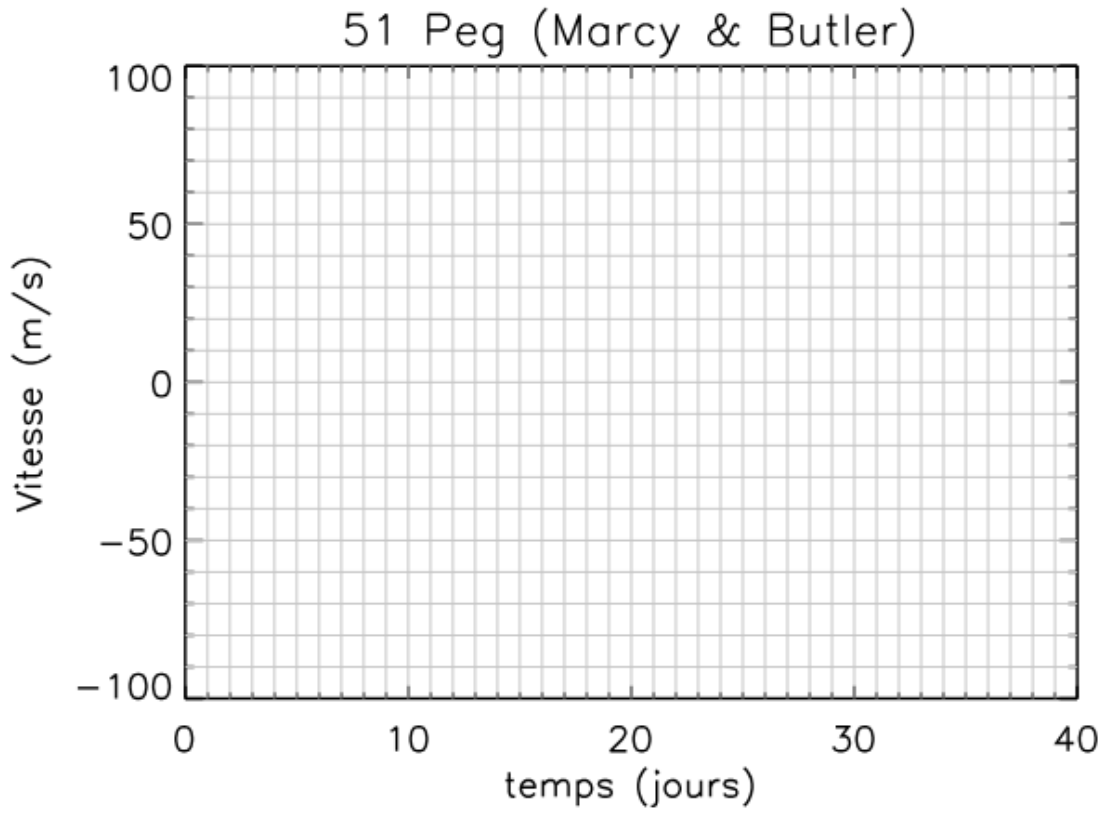

Figura 3: Variații de viteză radială ale 51 Peg în funcție de timp.

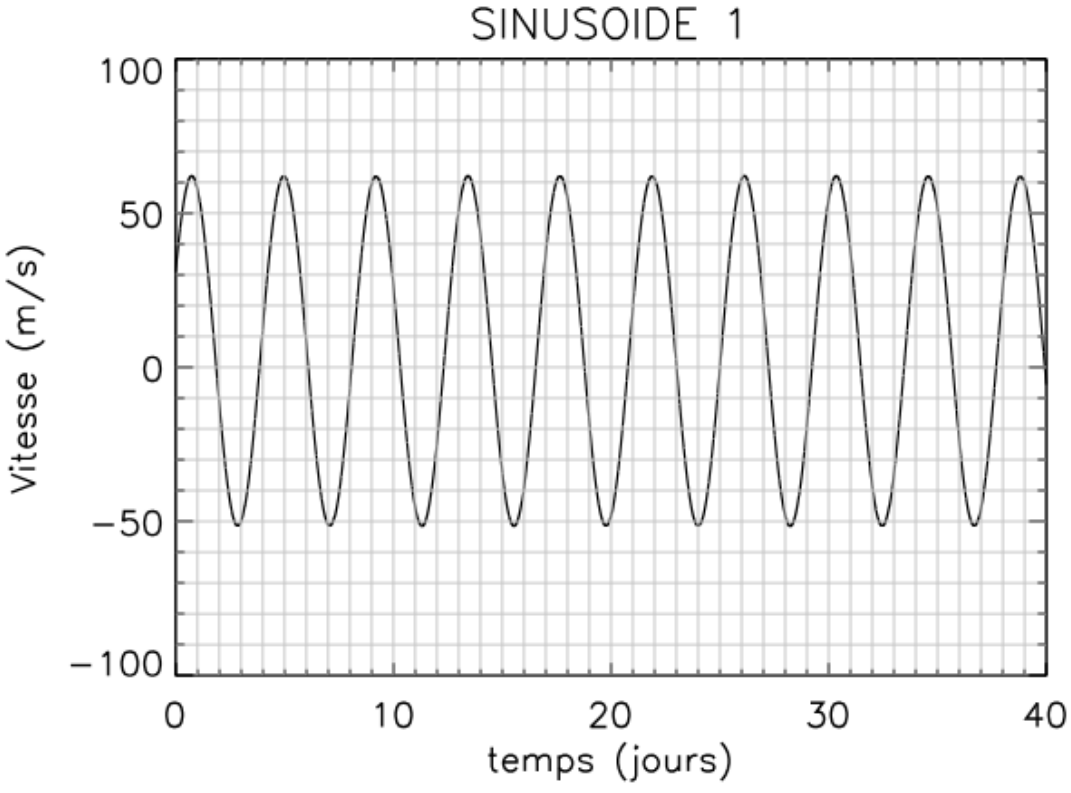

Figura 4: Sinusoid de referință #1

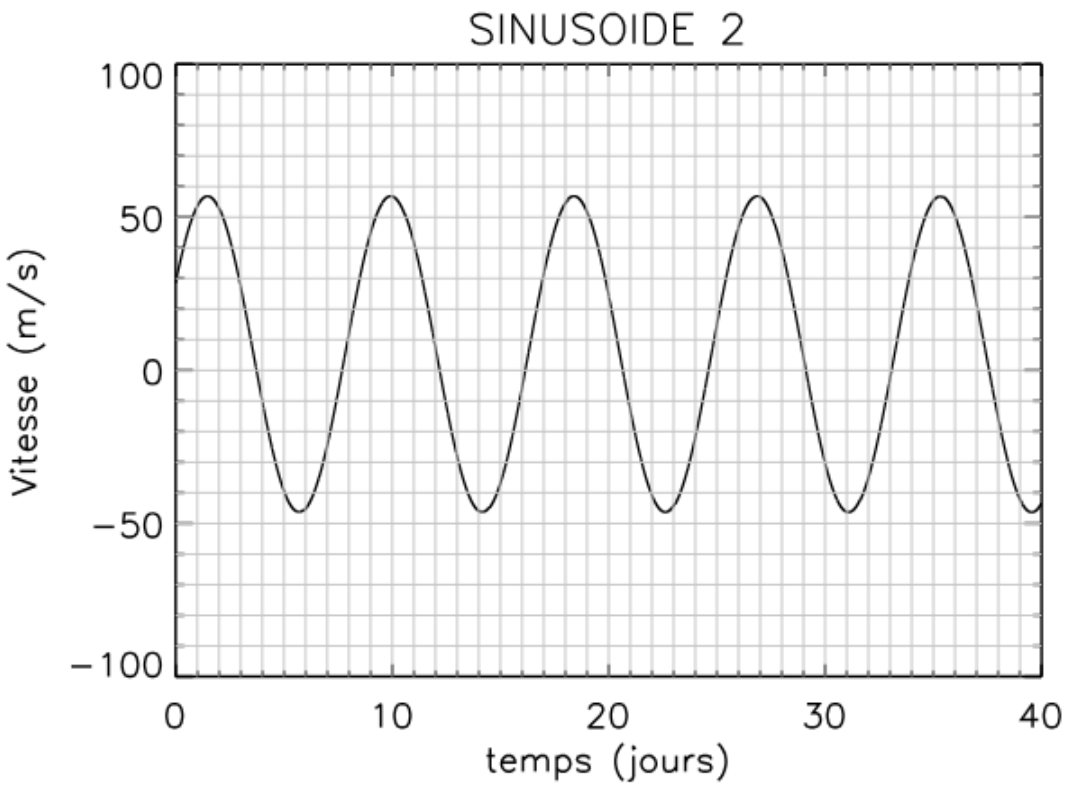

Figura 5: Sinusoid de referință #2

3 Parametrii exoplanetei

Acum vom estima masa planetei și distanța acesteia față de stea. Vom considera sistemul format de stea și planeta sa ca fiind izolat.

Legile lui Kepler.

Cele trei legi ale lui Kepler descriu mișcarea planetelor în jurul stelei lor. Ele stabilesc relația dintre perioada orbitală și distanța stea-planetă. Aceste trei legi sunt valabile în cadrul de referință heliocentric presupus a fi galileean.

De reținut:

- Cadrul de referință galileean: Un sistem de referință galileian este unul în care un obiect izolat (asupra căruia nu se exercită nicio forță sau asupra căruia rezultatul forțelor este zero) este fie staționar, fie într-o mișcare de translație rectilinie uniformă în raport cu acest sistem de referință. Aceasta înseamnă că se aplică principiul inerției, stabilit în Prima Lege a lui Newton.

- Principiul inerției: Într-un sistem de referință galileean, vectorul de viteză al centrului de inerție al unui sistem este constant dacă și numai dacă suma forțelor care acționează asupra sistemului este zero.

Prima lege a lui Kepler: legea orbitelor

Toate planetele descriu o mișcare eliptică, Soarele fiind la unul dintre focare (F în Figura 6).

Reținut despre elipse (Figura 7):

- AC=2a: axa majoră

- BD: axă minoră
- O: centru
- F și F': focare
- a: lungimea semiaxei majore
- b: lungimea semiaxei minore
- C: Distanța de la centru la focar
- e: excentricitate = c/a

Pentru o elipsă, excentricitatea este între 0 și 1. Vezi Figura 8 pentru câteva exemple de elipse cu excentricități diferite.

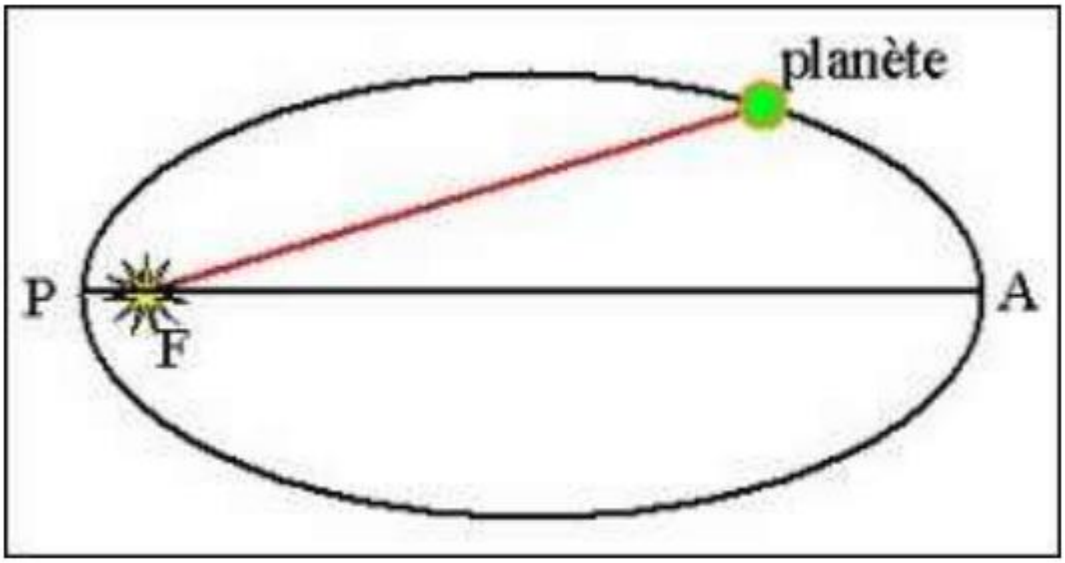

Figura 6: Soarele este situat la focarul F. P, periheliul, este cel mai apropiat punct de Soare. A, afeliul, este punctul cel mai îndepărtat de Soare. Timpul necesar pentru o orbită se numește perioadă.

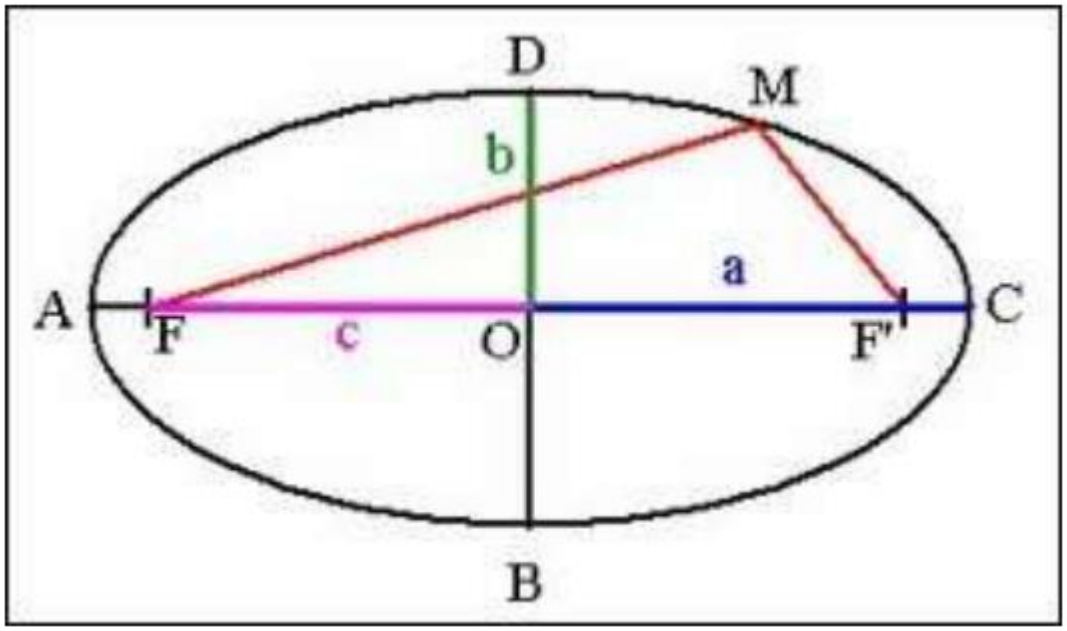

Figura 7: Elipsa este mulțimea de puncte M din plan pentru care suma distanțelor până la două puncte fixe din același plan (F și F') este o constantă dată: MF+MF'=2a. Cele două puncte fixe F și F' se numesc focare. Notă: un cerc poate fi considerat ca o elipsă ale cărei două focare coincid.

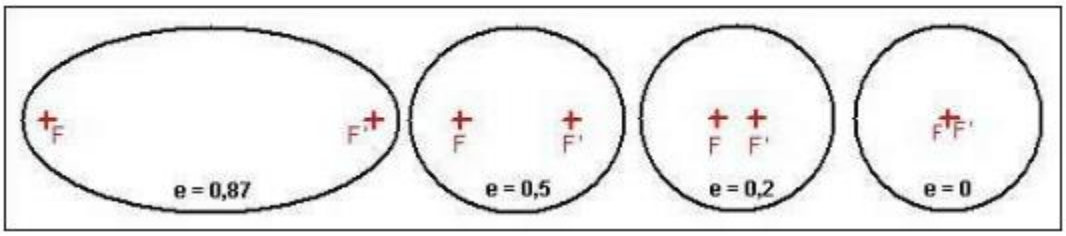

Figura 8: Cu cât excentricitatea este mai mică, cu atât elipsa este mai aproape de cerc.

A doua lege a lui Kepler: legea zonelor
Segmentul de linie dreaptă care leagă centrul stelei și a planetei mătură zone egale pentru timpi egali (vezi Figura 9).

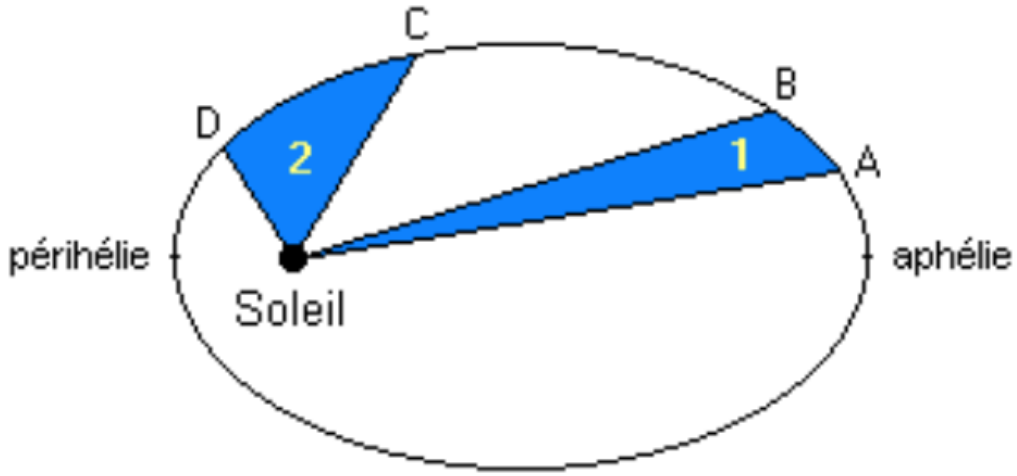

Figura 9: A doua lege a lui Kepler. Aria 1 este egală cu aria 2, iar arcurile AB și CD, de lungimi diferite, sunt acoperite în același timp. În consecință, viteza unei planete pe orbita sa nu este constantă: cu cât planeta este mai aproape de Soare, cu atât viteza sa este mai mare (maximă la periheliu și minimă la afeliu).

A treia lege a lui Kepler: legea perioadelor
Raportul dintre pătratul perioadei de revoluție (*T*) a unei planete în jurul stelei sale și cubul semiaxei majore a orbitei eliptice este constant:

$$\frac{T^2}{a^3} = C = \frac{4\pi^2}{\mathcal{G}M_{star}}$$

unde *C* este o constantă. Valoarea acestei constante depinde doar de stea.

Aplicarea celei de-a treia legi a lui Kepler: distanța stea-planetă
Folosind a treia lege a lui Kepler, calculați distanța dintre planetă și steaua sa, știind că masa stelei 51 Peg a este de 0,95 $M_{\odot}$. Rezultatul va fi dat în unități astronomice (UA).

Aplicarea celei de-a treia legi a lui Kepler: masa exoplanetei

Am văzut în secțiunea 1 că viteza radială măsurată a stelei este de forma:

$$v_{star}(t) = V.\sin\left(2\pi\frac{t}{T} + \varphi\right)$$

Relația dintre viteza radială măsurată și viteza stelei pe orbita sa este:

$$v_{rad}(t) = v_{star}(t)\sin i$$

unde *i* este unghiul dintre normalul și planul orbitei sistemului stelar-planetă și linia de vedere (Figura 10). Observatorul vede proiecția vitezei stelei pe linia de vedere.

Vom încerca acum să definim expresia pentru *K* = *V* sin i, care este amplitudinea. *vrad* măsurată din curba variațiilor vitezei radiale. Din amplitudinea *K* putem estima masa planetei.

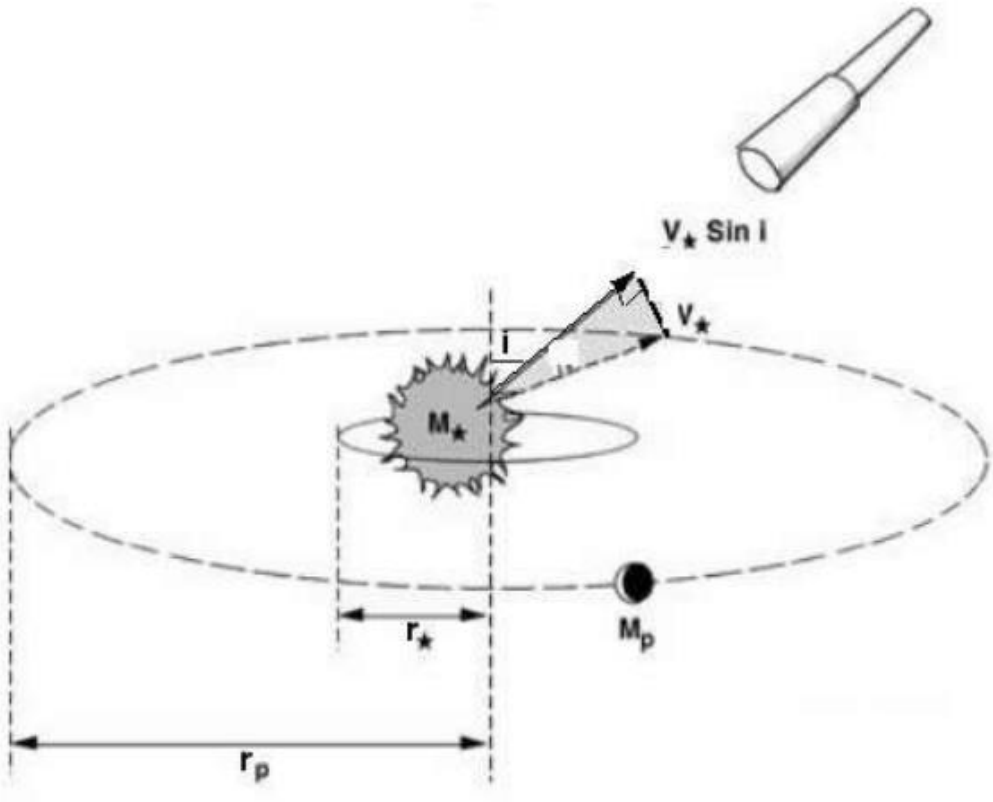

Figura 10: Definiția unghiului *i*, unghiul dintre planul normal și orbital al sistemului stelar-planetă și axa de orientare

Întrebări

- Stabiliți relația dintre masele planetei și ale stelei (M_{star} și $m_{planetă}$) și distanțele acestora față de centrul de greutate G (r_{star} și r_{planet}). Vom folosi definiția centrului de greutate al sistemului.
- Derivați expresia pentru viteza stelei, V, în funcție de $m_{planetă}$, M_{star} , T și a care este distanța dintre stea și planetă. Se va presupune că steaua coincide cu centrul de greutate, deci $planeta \sim a$.

- Utilizați a 3-a lege a lui Kepler pentru a determina expresia pentru m_{planet} sin *i* în funcție de K, M M_{star} și *T* . Masa planetei va fi neglijată în fața masei stelei.
- Calculați m_{planet} sin *i* pentru planeta 51 Peg b. Rezultatul va fi prezentat în unități ale masei lui Jupiter.

Folosind această metodă, care se bazează pe variații ale vitezei radiale a stelei, nu putem deduce masa reală a planetei *m,* ci m_{planet} sin *i*, unde *i* este unghiul prin care vedem planul orbital. Masa reală a planetei este, prin urmare, necunoscută și depinde de unghiul la care este observat sistemul planetar, un unghi care nu este întotdeauna cunoscut (Figura 10).

Prin urmare, obținem o valoare mai mică pentru masa planetei, adică masa planetei nu poate fi mai mică decât valoarea găsită.

4 Limitări ale metodei de detectare a exoplanetelor prin spectroscopie

Întrebări:

- Calculați viteza perturbată, V, a Soarelui de:
  1. Jupiter
  2. Pământ
- În 1995, precizia instrumentelor a fost de ordinul a 15 m/s. Am putea detecta planete telurice la aceeași distanță de stea ca și planetele telurice din Sistemul Solar? Dar planetele gigante?
- Precizia actuală a instrumentelor este de ordinul a 1 m/s (spectrograful HARPS instalat pe un telescop ESO 3m60 la La Silla din Chile). Putem detecta acum planete telurice ca cele din Sistemul Solar?
- De ce o planetă ca Saturn din sistemul nostru solar nu va fi detectată înainte de 2025?
- Această metodă de detectare are o părtinire. Favorizează detectarea planetelor cu proprietăți speciale. Ce proprietăți?

Referințe:

- "Planeta extrasolară", F. Casoli, T. Encrenaz, Belin, Pour la science
- Mayor M., & Queloz D., 1995, Nature, Vol. 378, p. 355.
- Lumières sur l'Univers https://ufe.obspm.fr/formations/diplomes-d-universite/du-lulumieres-sur-l-univers/article/presentation-generale