DETECTION DES EXOPLANETES PAR SPECTROSCOPIE
51 Pegasus b

C. Barban, LIRA/UFE, Formation des Professeurs, Observatoire de Paris
(Caroline.Barban@obspm.fr)

1 . Contexte

Une exoplanète est une planète qui orbite autour d'une autre étoile que notre Soleil. Une des méthodes utilisées pour détecter une exoplanète consiste à mesurer avec une grande précision la vitesse radiale de l'étoile (c'est à dire sa vitesse par rapport à l'observateur) en fonction du temps.
En effet, la présence d'un compagnon autour de l'étoile entraine un mouvement périodique de l'étoile autour du centre de gravité du système étoile-planète. C'est une méthode indirecte, on mesure l'effet de la présence d'une planète sur le mouvement de l'étoile. La vitesse radiale de l'étoile est calculée à partir du décalage de la position des raies spectrales stellaires due à l'effet Doppler-Fizeau; c'est une méthode spectroscopique.
La première exoplanète orbitant autour d'une étoile semblable à notre Soleil, 51 Peg b, a été découverte en 1995 par une équipe de chercheurs suisses en utilisant la méthode des vitesses radiales appelée encore vélocimétrie Doppler.

2. Objectifs

Cette activité a pour objectif la compréhension de la méthode de détection des exoplanètes par la mesure des variations de vitesse radiale de l'étoile. On verra aussi comment on peut déduire de ces mesures certaines propriétés de la planète. On discutera enfin des limites de cette méthode.
Cette activité va consister en:
- l'analyse des données spectroscopiques obtenues sur l'étoile 51 Peg pour en déduire la période orbitale et l'amplitude maximale de la vitesse de l'étoile sur son orbite.
- la détermination de la distance de la planète 51 Peg b à son étoile ainsi que de sa masse à partir de l'analyse précédente.
- une réflexion sur les limitations de la méthode par spectroscopie pour détecter des exoplanètes.

3. Notions abordées

• Spectroscopie
• Spectre stellaire
• Longueur d'onde
• Effet Doppler-Fizeau
• Lois de Kepler
• Loi de la gravitation
• Système double
• Mouvement circulaire uniforme
• Sinusoïde

4. Matériel

règle, crayon à papier, gomme, calculatrice, papier calque.

5 Données numériques

(système SI : mètre, kilogramme, seconde)

5.1 Grandeurs physiques

- constante de gravitation: $G = 6.67\ 10^{-11}$ SI
- vitesse de la lumière: c = 299792458 m/s

5.2 Grandeurs astrophysiques

- masse du Soleil: $M_{\odot} = 2\ 10^{30}$ kg
- unité astronomique: 1 u.a. = $1.5\ 10^{11}$m
- masse de Jupiter: $M_J = 2\ 10^{27}$kg
- période de révolution de Jupiter autour du Soleil: 12 ans
- masse de la Terre: $M_T = 6\ 10^{24}$kg
- période de révolution de Saturne autour du Soleil: 30 ans

6. Exercices

6.1 Le système étoile-planète.

Dans le cas d'un système double, ici nous avons un système formé par l'étoile et la planète, les deux objets orbitent chacun autour du barycentre ou centre de gravité du système. Même si ce barycentre est très proche du centre de l'étoile, cette dernière sera tout de même animée d'un mouvement périodique. Celui-ci se manifeste par des variations de la vitesse radiale de l'étoile (i.e. la projection de la vitesse de l'objet sur la ligne de visée, voir Figure 10). On va chercher à détecter ces variations périodiques de vitesse radiale de l'étoile à travers l'effet qu'elles induisent sur son spectre. Lorsque l'étoile se déplace autour du centre de gravité, l'étoile est animée d'une vitesse qui est périodiquement tantôt dirigée vers nous et tantôt dirigée dans le sens opposé. Quand l'étoile se rapproche de nous, la lumière, est décalée vers le bleu, quand elle s'éloigne elle est décalée vers le rouge: c'est l'effet Doppler-Fizeau. On va donc mesurer dans le spectre de l'étoile le décalage vers le bleu ou vers le rouge, $\Delta\lambda$, de la longueur d'onde de raies spectrales correspondant à des éléments chimiques dont la longueur d'onde est connue à partir de mesures de laboratoire, λ_{labo}. On en déduira alors la vitesse radiale de l'étoile, v, avec: $\Delta\lambda/\lambda = (\lambda_{obs}-\lambda_{labo})/\lambda_{labo} = v/c$. Voir la Figure 1 pour une explication en images de la méthode.
La vitesse de l'étoile sur son orbite autour du centre de gravité prend la forme d'une sinusoïde et s'écrit: $v_\star = A.\sin(2\pi\ P\ t + \phi)$ avec A, la vitesse radiale maximale et minimale, t est le temps, P la période de la sinusoïde (i.e. la période de révolution de la planète autour de son étoile qui est la même que celle de l'étoile autour du centre de gravité) et ϕ est la phase.

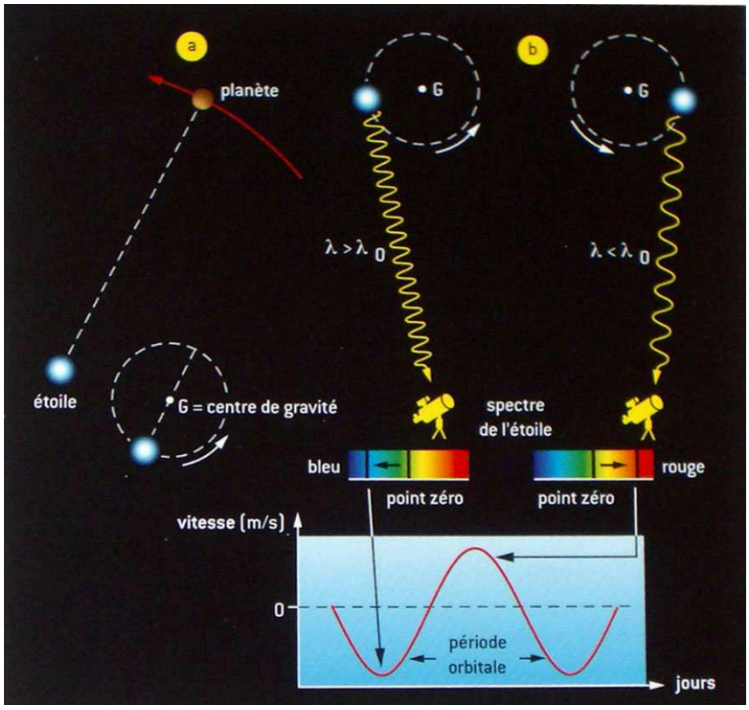

Figure 1: Principe de fonctionnement de la méthode spectroscopique pour la détection des exoplanètes. (a) La planète tourne autour de son étoile ; plus précisément, la planète et l'étoile tournent autour de G, centre de gravité du système planète-étoile. (b) L'effet Doppler permet à un observateur terrestre de détecter les mouvements de l'étoile. Ceux-ci sont généralement induits par une planète suffisamment grosse ou un cortège de planètes. La succession des décalages vers le rouge et le bleu, caractéristiques des étoiles influencées par la présence d'un compagnon en orbite, peut être traduite sur un graphique par une courbe sinusoïdale. ("Planète extrasolaires", F. Casoli, T. Encrenaz, Belin, Pour la science).

Question:

Indiquer sur la courbe rouge en bas de la Figure 1 à quelle partie de cette courbe correspond le cas où l'étoile est la plus proche de la Terre, celle où elle est la plus éloignée et les deux positions intermédiaires.

6.2 Analyse des données spectroscopiques qui ont permis la détection de l'exoplanète 51 Peg b

51 Peg b est la première exoplanète détectée autour d'une étoile de type solaire. Elle a été découverte en 1995 par une équipe de chercheurs suisses M. Mayor & D. Queloz. Ils ont utilisé le spectrographe ELODIE couplé au télescope de 193 cm de diamètre de l'Observatoire de Haute-Provence en France. Ils ont pu ainsi détecter les perturbations de la trajectoire de l'étoile dues à la présence d'une planète. La figure 2 représente le spectre de l'étoile 51 Peg obtenu avec le spectrographe ELODIE le 6 novembre 1995.

Les variations de vitesse radiale sont calculées à partir de la formule du décalage Doppler:
$\Delta\lambda/\lambda_{ref} = \Delta v_{obs}/c$

avec $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_{ref}$. λ_{ref} est la longueur d'onde d'une raie du spectre appelé raie de référence et λ_{obs} est la longueur d'onde d'une raie du spectre (λ_{labo} est remplacé par λ_{ref} car on ne calcule pas ici la vitesse absolue (v) mais la variation de vitesse (Δv)).
Pour trouver les variations de vitesse radiale de l'étoile dues à la présence d'une planète, Δv_{obs} est corrigé de la vitesse radiale due à la rotation de la Terre autour de son axe et autour du Soleil projetée dans la direction de l'étoile, notée v_{Terre}:
$\Delta v = \Delta v_{obs} - v_{Terre}$
v_{Terre} est de l'ordre de 20 km/s.
Δv est ainsi calculée pour chaque raie du spectre. On fait ensuite la moyenne des variations de vitesse radiale de toutes les raies. Les variations de vitesse radiale ainsi obtenue ($< \Delta v >$) sur l'étoile 51 Peg par deux astronomes américains, Butler & Marcy (résultats similaires à ceux de Mayor & Queloz) sont indiquées dans la Table 1.

Questions:

- Tracer la courbe des variations de vitesse radiale, $< \Delta v >$, en fonction du temps en jours sur la Figure 3 à partir des données de la Table 1.
- Reporter les points de cette courbe sur un papier calque.
- Comparer cette courbe avec le calque aux deux courbes représentant deux sinusoïdes différentes (Figure 4 and Figure 5). Laquelle représente le mieux les données?
- Mesurer sur la sinusoïde qui représente le mieux les données la période, P , en jours et l'amplitude K, en m/s, de la sinusoïde.

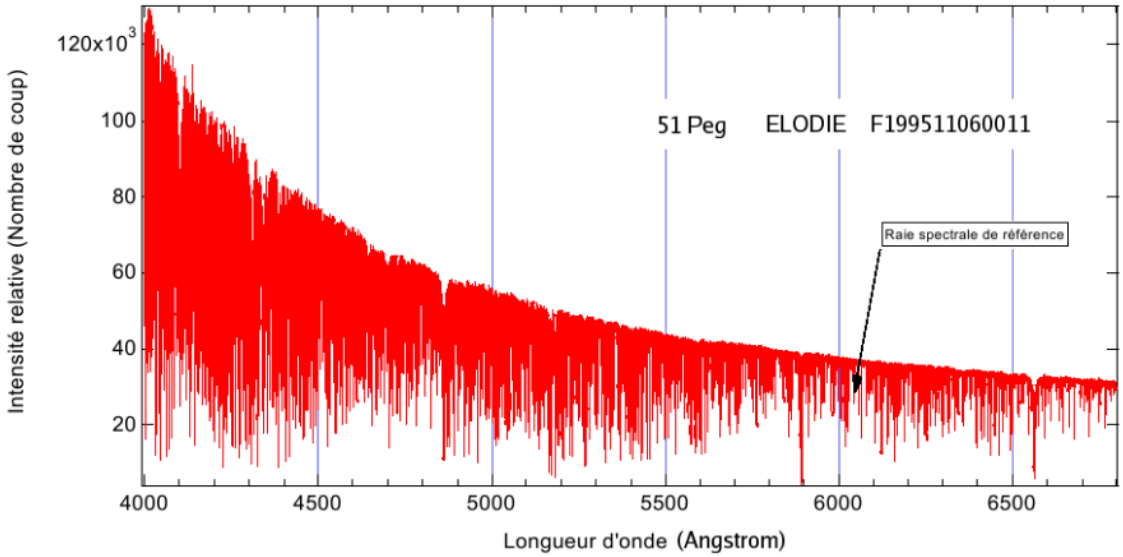

Figure 2: Spectre de 51 Peg obtenu avec le spectrographe ELODIE du télescope de 193 cm à l'Observatoire de Haute-Provence le 6 novembre 1995.

Temps (jours)	Vitesse (< Δv >) (m/s)
2.67365	-40.87
2.80873	-46.96
2.95979	-47.39
3.62695	-19.85
3.73265	-13.47
3.90077	-5.782
4.60753	49.41
4.78429	58.66
4.90699	63.20
5.60503	45.60
5.92544	17.88
11.6443	-45.50
11.8378	-38.98
12.6355	27.27
12.8664	32.45
13.6242	63.38
13.8295	54.78
14.6428	-1.340
14.7229	-5.477
14.8161	-10.73
14.9043	-26.29
15.6261	-50.68
15.7467	-45.78
15.8654	-57.54
16.6149	10.56
16.7592	12.91
16.8474	16.40
17.7341	63.64
17.8442	60.48
18.6161	26.29
18.7648	5.988
18.8540	-7.798
19.6218	-43.62
19.7325	-59.45
19.8473	-58.60
20.6137	-20.22
20.7401	-8.064
20.8543	5.596
21.6151	56.41
21.6620	59.26
21.7063	66.78
23.5986	-35.13
23.6448	-37.30
23.6904 -	31.35
23.7258	-42.57
24.6391	-33.47

24.7261	-27.46
24.8174	-22.70
25.6226	45.34
25.7145	47.61
25.7615	56.15
26.6176	65.32
26.6508	69.63
26.7020	62.54
26.7366	50.86
27.6474	-22.66
27.6893	-22.55
27.7399	-31.82
27.7721	-31.72
28.6061	-44.12
28.6556	-33.59
28.7019	-37.10
28.7450	-39.13
28.7799	-35.32
29.6093	25.09
29.7001	35.69
29.7468	41.17
30.6004	61.33
30.6454	58.98
30.6930	63.07
30.7402	56.86
30.8334	50.98
31.6619	-2.545
31.7052	0.7633
31.7492	-4.599
32.6045	-38.53
32.6479	-48.68
32.6943	-38.84
33.6073	2.696
33.6527	11.46
33.6982	14.02
33.7331	17.55
35.5970	19.74

Table 1: Variation de vitesse radiale obtenue pour l'étoile 51 Peg (Marcy et al., 1997)

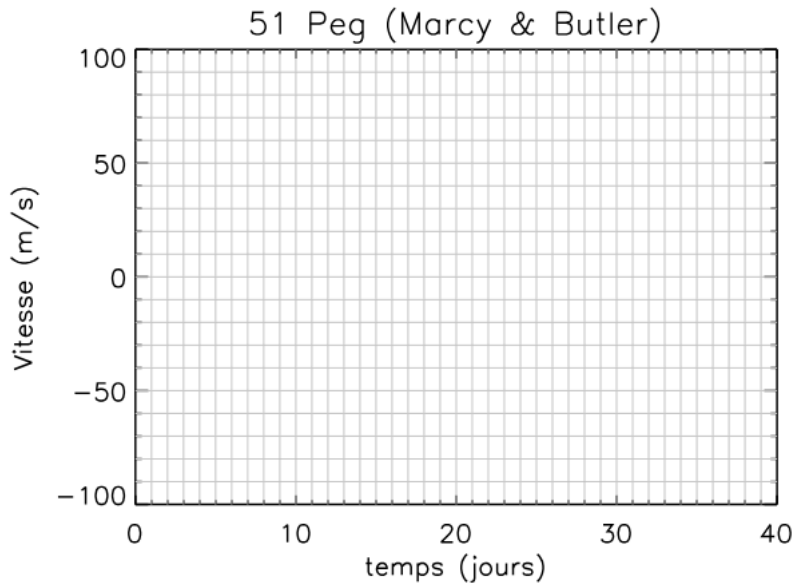

Figure 3: Variations de la vitesse radiale de 51 Peg au cours du temps.

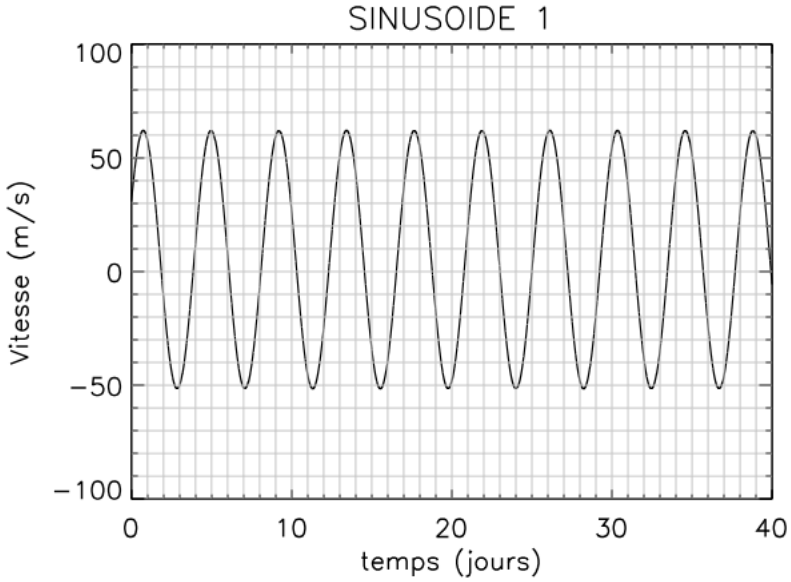

Figure 4 : Sinusoïde 1

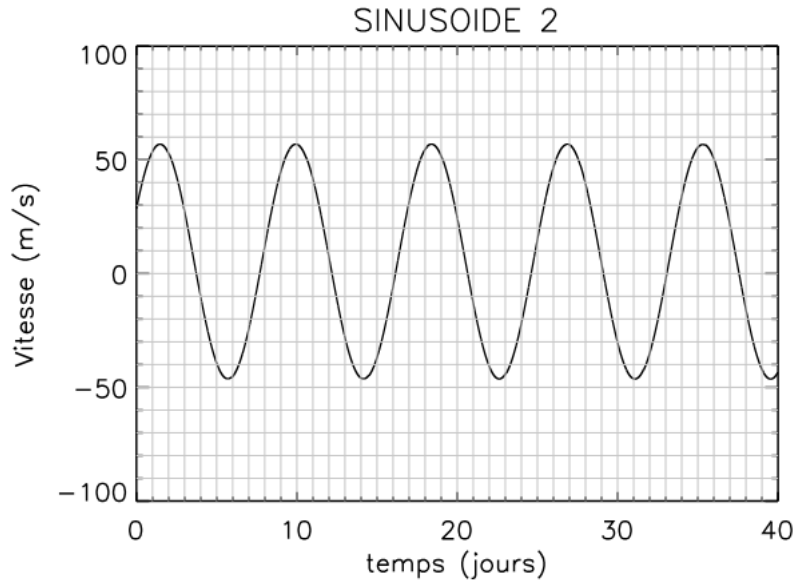

Figure 5 : Sinusoïde 2

6.3 Paramètres de l'exoplanète

Nous allons maintenant estimer la masse de la planète et sa distance à l'étoile. On considérera le système constitué par l'étoile et sa planète comme isolé.

Les lois de Kepler.
Les trois lois de Kepler décrivent le mouvement des planètes autour de leur étoile. Elles établissent la relation entre la période orbitale et la distance étoile-planète. Ces trois lois sont valables dans le référentiel héliocentrique supposé comme étant Galiléen.

Rappels:
- Référentiel Galiléen: Un référentiel Galiléen est un référentiel dans lequel un objet isolé (sur lequel ne s'exerce aucune force ou sur lequel la résultante des forces est nulle) est soit immobile, soit en mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à ce référentiel. Cela signifie que le principe d'inertie, qui est énoncé dans la première loi de Newton, s'applique.
- Principe d'inertie: Dans un référentiel Galiléen, le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système est constant si et seulement si la somme des forces qui s'exercent sur le système est nulle.

• **Première loi de Kepler: loi des orbites**
Toutes les planètes décrivent un mouvement elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers (noté F sur la Figure 6).

Rappels sur les ellipses:
AC=2a : grand axe
BD : petit axe
O : centre

F et F’ : foyers
a : longueur du demi grand axe
b : longueur du demi petit axe
c : distance du centre au foyer
e : excentricité = c/a
Pour une ellipse l’excentricité est comprise entre 0 et 1. Voir la Figure 6 pour quelques exemples d’ellipses de différentes excentricités.

• **Deuxième loi de Kepler: loi des aires**
Le segment de droite qui relie les centres de l’étoile et de la planète balaie des aires égales pendant des durées égales (voir Figure 9)

Troisième loi de Kepler: loi des périodes
Le rapport entre le carré de la période de révolution (P) d’une planète autour de son étoile et le cube du demi grand axe de l’orbite elliptique est constant:
$P^2/a^3 = C = 4\pi 2/GM_\star$
avec C, une constante. La valeur de cette constante ne dépend que de l’étoile.

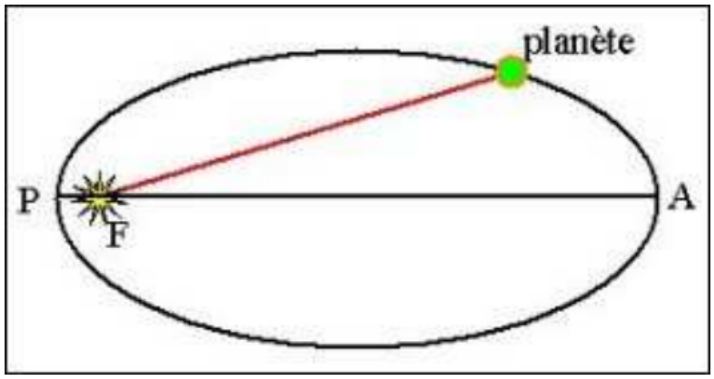

Figure 6: Le soleil se situe au foyer F. P, le périhélie, est le point le plus proche du Soleil. A, l’aphélie, est le point le plus éloigné du Soleil. La durée mise pour parcourir une fois l’ellipse s’appelle période.

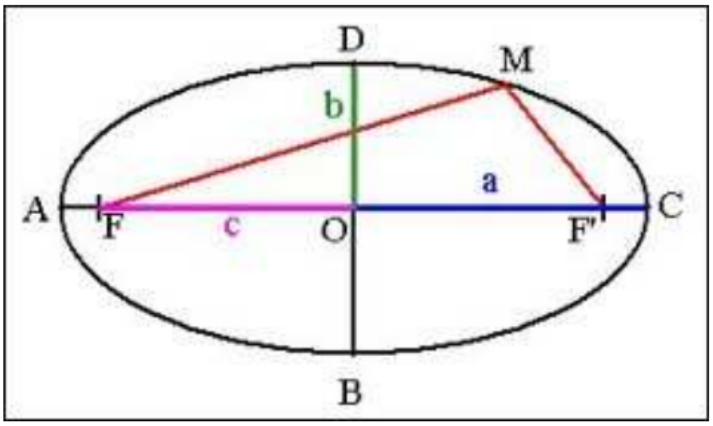

Figure 7: L'ellipse est l'ensemble des points M du plan dont la somme des distances à deux points fixes du même plan (les foyers F et F') est une constante donnée: MF+MF'=2a. Les deux points fixes F et F' sont appelés foyers. Remarque: un cercle peut être considéré comme une ellipse dont les deux foyers sont confondus.

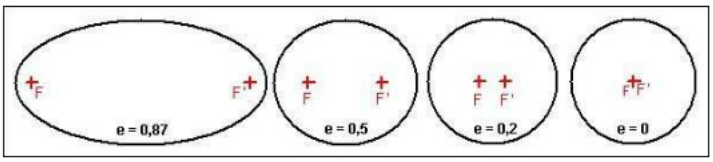

Figure 8: Plus l'excentricité devient faible, plus l'ellipse se rapproche du cercle.

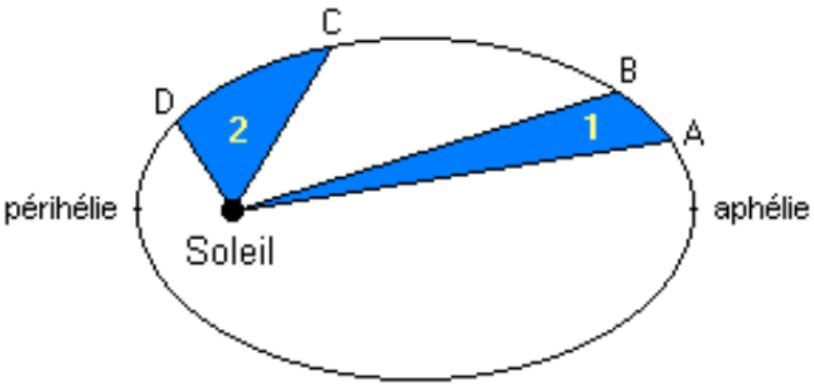

Figure 9: Deuxième loi de Kepler. L'aire 1 est égale à l'aire 2 et les arcs AB et CD, de longueurs différentes, sont parcourus durant le même temps. En conséquence, la vitesse d'une planète sur son orbite n'est pas constante : plus la planète est proche du Soleil, plus sa vitesse est grande (maximale au périhélie et minimale à l'aphélie).

II) Application de la troisième loi de Kepler: distance étoile-planète

Questions:
- En utilisant la troisième loi de Kepler, calculer la distance entre la planète et son étoile,

sachant que la masse de l'étoile 51 Peg a est de 0.95M⊙. On donnera le résultat en unité astronomique (u.a.).

III) Application de la troisième loi de Kepler: masse de la planète

On a vu dans la section 6.1 que la vitesse radiale de l'étoile que l'on mesure est de la forme:
$v\star(t) = A\sin(2\pi/P\ t + \phi)$
avec A est la vitesse radiale maximale/minimale, t est le temps, P la période de la sinusoïde (i.e. la période de révolution de la planète autour de son étoile) et ϕ est la phase.
La relation entre le vitesse radiale mesurée et la vitesse de l'étoile sur son orbite est:
$v_{rad}(t) = v\star(t) \sin i$
avec i l'angle entre la normale au plan de l'orbite du système étoile-planète et l'axe de visée (Figure 10). L'observateur voit la projection de la vitesse de l'étoile sur l'axe de visée.

On va chercher maintenant à définir l'expression de K = A sin i qui est l'amplitude de vrad que l'on mesure à partir de la courbe des variations de vitesse radiale. C'est à partir de K que l'on va pouvoir estimer la masse de la planète.

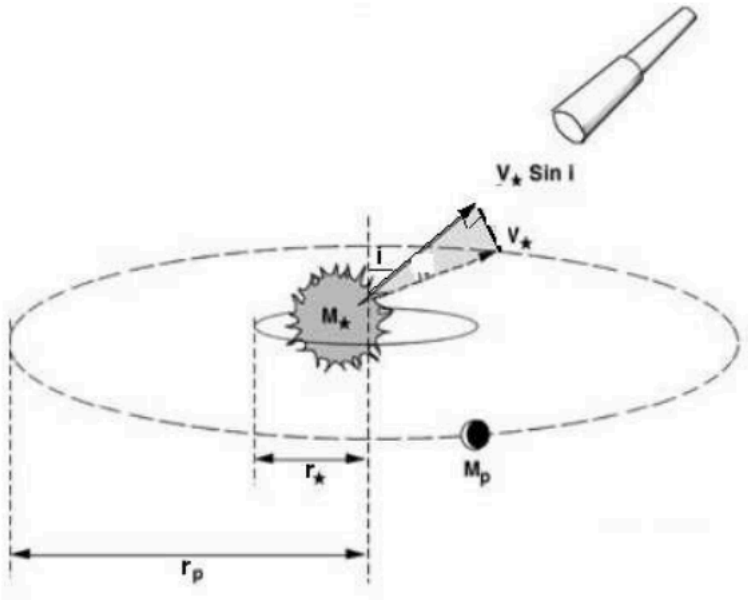

Figure 10: Définition de l'angle i, angle entre la normale au plan de l'orbite du système étoile-planète et l'axe de visée

Questions:

- Etablir la relation entre les masses de la planète et de l'étoile (M⋆ et mp) et leurs distances par rapport au centre de gravité G ($r_\star$ et r_p). On utilisera la définition du centre de gravité du système.
- En déduire l'expression de la vitesse de l'étoile, A, en fonction de mp, M⋆, P et a qui est la distance entre l'étoile et la planète. On fera l'hypothèse que l'étoile est confondue avec le centre de gravité donc $r_p \sim a$.

- Utiliser la 3ème loi de Kepler pour déterminer l'expression de mp sin i en fonction de K, M⋆ et P . On négligera la masse de la planète devant celle de l'étoile.
- Calculer mp sin i pour la planète de 51 Peg. On présentera le résultat en masse de Jupiter.
Par cette méthode basée sur les variations de vitesse radiale de l'étoile, on en déduit non pas la masse de la planète mp mais mp sin i, oùi est l'angle suivant lequel on voit le plan orbital. La masse réelle de la planète n'est donc pas connue, elle dépend de l'angle sous lequel on observe le système planétaire, angle que l'on ne connait pas toujours (Figure 10). On obtient donc une valeur inférieure de la masse de la planète i.e. la masse de la planète ne peut pas être plus petite que cette valeur.

6.4 Limitations de la méthode de détection des exoplanètes par spectroscopie

Questions:

- Calculer la vitesse, A, de notre Soleil perturbé par:
a) Jupiter
b) la Terre

- En 1995, la précision des instruments étaient de l'ordre de 15 m/s, pouvait-on détecter des planètes telluriques à la même distance de l'étoile que les planètes telluriques du système solaire?
Et les planètes géantes?

- La précision actuelle des instruments est de l'ordre du m/s (le spectrographe HARPS installé sur un télescope de 3m60 de l'ESO à la Silla au Chili), peut-on maintenant détecter des planètes telluriques comme celles du système solaire?

- Pourquoi une planète comme Saturne dans notre système solaire ne pourra être détectée pas avant 2025?
- Cette méthode de détection comporte un biais. Elle favorise la détection de planètes ayant des propriétés particulières. Lesquelles?

Références:
- "Planète extrasolaires", F. Casoli, T. Encrenaz, Belin, Pour la science
- TD Détection de planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales. Application sur les spectres de 51 Peg obtenus par Mayor et Queloz en 1995.
- Mayor M., & Queloz D., 1995, Nature, Vol. 378, p. 355.
- "Lumières sur l'Univers https://ufe.obspm.fr/formations/diplomes-d-universite/du-lu-lumieres-sur-l-univers/