ATELIER

La loi de la gravitation appliquée à la détection des planètes extrasolaires

Caroline Terquem

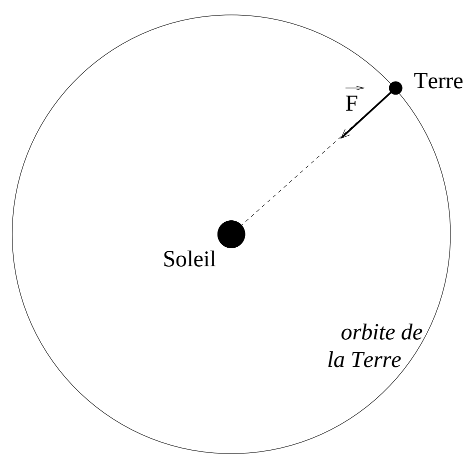
Août 2006

Plusieurs techniques sont utilisées pour mettre en évidence la présence d'une planète autour d'une étoile située loin de notre système solaire. Sauf dans des cas très particuliers, les planètes ne sont pas vues *directement, c'est–à–dire que la lumière qu'elles émettent (et qu'elles réfléchissent de l'étoile autour de laquelle elles tournent) n'est pas détectable par les techniques actuellement utilisées. Les astrophysiciens ont donc recours à des méthodes dites* indirectes, *parmi lesquelles celle des* vitesses radiales *et celle des* transits, *que nous allons présenter ici en détail. Au cours de cet atelier, nous allons suivre la démarche de l'astrophysicien qui, à partir d'un jeu de données obtenues en observant une étoile, déduit les caractéristiques de la planète en orbite autour de cette étoile.*

A — Méthode des vitesses radiales

A.1 — *Question préliminaire:*

La force exercée par le Soleil sur la Terre "pointe" de la Terre vers le Soleil (voir schéma ci–contre). La Terre est donc attirée par le Soleil. Comment expliquer, dans ces conditions, que la Terre ne "tombe" pas sur le Soleil, mais que sa trajectoire soit approximativement un cercle centré sur le Soleil? On rappelle que selon la loi de Newton, l'accélération $\vec{a}$ d'un objet de masse M est donnée par $M\vec{a} = \vec{F}$, où $\vec{F}$ est la force qui s'exerce sur l'objet. Si la vitesse de l'objet change de $\Delta\vec{v}$ pendant le temps Δt, alors on peut aussi écrire de façon approchée $M(\Delta\vec{v}/\Delta t) = \vec{F}$.



A.2 — *Mouvements dans un système binaire de deux étoiles de même masse:*

On a coutume de dire que la Terre tourne autour du Soleil... Imaginons cependant un système constitué de deux étoiles ayant des masses identiques M. Y a–t–il une raison pour que l'une des étoiles tourne autour de l'autre plutôt que l'inverse? En fait, chacune des étoiles tourne autour du *centre de masse* du système (situé ici exactement entre les deux étoiles). Nous supposerons que les trajectoires sont circulaires (d'une manière générale, les trajectoires sont des ellipses).
Représenter la trajectoire de chacune des étoiles, et leur position à un instant quelconque. Comment est orientée la vitesse des étoiles?

A.3 — *Mouvements dans un système binaire de deux étoiles de masses différentes:*

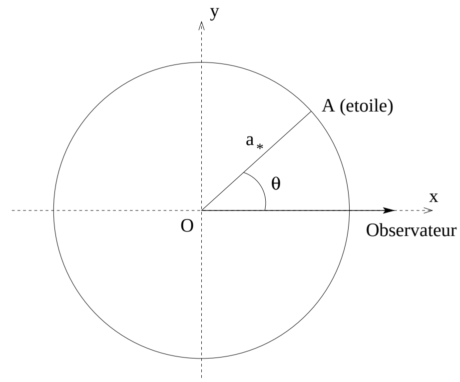
Supposons maintenant que les étoiles ont des masses différentes, M_1 et M_2 avec $M_1 < M_2$. On rappelle que le centre de masse O du système est tel que $M_1\overrightarrow{OA_1} + M_2\overrightarrow{OA_2} = \vec{0}$, où A_1 et A_2 désignent les positions des étoiles.
Que deviennent les trajectoires? Donner la relation qui existe entre leurs rayons respectifs R_1 et R_2 et les masses M_1 et M_2.
Représenter les trajectoires, ainsi que la position des étoiles à un instant quelconque.
Comparer les temps de révolution (ou *périodes*) des étoiles.
La vitesse des étoiles le long de leur trajectoire est uniforme. Donner la relation qui existe entre la norme de la vitesse, le rayon de la trajectoire et la période de révolution pour chacune des étoiles.

Le cas d'une planète en orbite autour d'une étoile correspond à la limite où M_1 est très petite comparée à M_2. Pourquoi dit–on dans ce cas–là, de manière un peu abusive, que la planète tourne autour de l'étoile?

A.4 — *Système étoile–planète:*

On note m la masse de la planète, M celle de l'étoile, a le rayon de la trajectoire de la planète et $a_\star$ celui de la trajectoire de l'étoile. (On se limite ici au cas de trajectoires circulaires.)

On définit un système d'axes de référence (Ox, Oy) où O représente le centre de masse du système étoile–planète. La position A de l'étoile sur son orbite est repérée par le rayon $a_\star$ et l'angle θ (voir figure ci–contre). L'axe Ox est choisi de sorte qu'il coïncide avec la *ligne de visée*, qui est la direction dans laquelle se trouve l'observateur. Donner la projection v_r de la vitesse de l'étoile le long de la ligne de visée en fonction de θ, $a_\star$ et de la période T du mouvement. Cette composante de la vitesse est dite *vitesse radiale*.

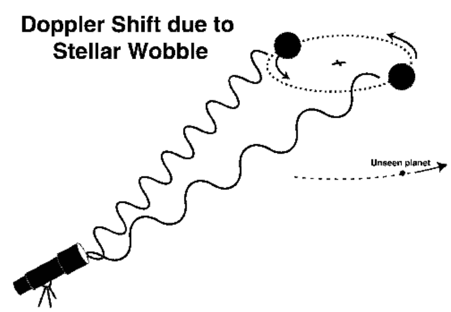


Dans le cas où m est très petite comparée à M, la troisième loi de Kepler donne $T \simeq 2\pi\sqrt{a^3/(GM)}$, où G est la constante universelle de la gravitation. En déduire v_r en fonction de θ, a, M et m.

Si la ligne de visée n'est pas dans le plan de l'orbite, mais fait un angle i avec la perpendiculaire à ce plan, comment est modifiée cette expression de v_r?

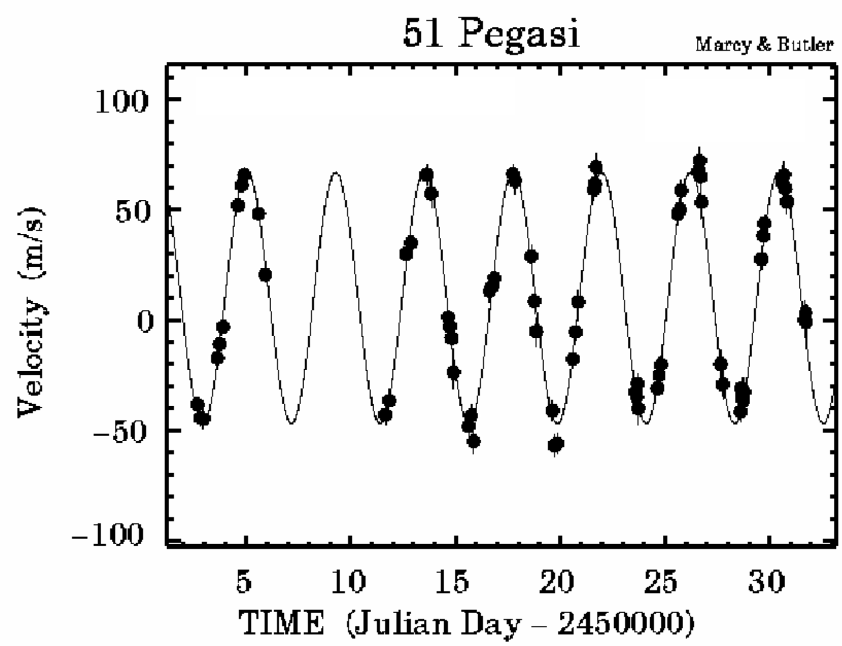
A.5 — *Interprétation des observations:*

Dans son mouvement le long de son orbite, l'étoile tantôt se rapproche, tantôt s'éloigne de l'observateur (voir schéma ci–contre). Du fait de l'effet Doppler, les raies spectrales qui nous parviennent de l'étoile (à travers un spectromètre) sont en conséquence tantôt décalées vers le bleu (longueurs d'onde plus courtes), tantôt décalées vers le rouge (longueurs d'onde plus grandes).



Plus précisément, si λ et λ' sont respectivement les longueurs d'onde propre et mesurée par l'observateur, on a $(\lambda - \lambda')/\lambda = v_r/c$, où v_r est la vitesse de la source en direction de l'observateur (c'est–à–dire projetée sur sa ligne de visée) et c est la vitesse de la lumière (on a supposé ici que v_r était très petite comparée à c). Si la source se rapproche de l'observateur, $v_r > 0$ et donc $\lambda' < \lambda$. Dans le cas contraire, $\lambda' > \lambda$. C'est la mesure de ce décalage spectral, appelé effet Doppler, qui permet à l'observateur de déduire la présence de la planète.

Le graphe ci–dessous représente la vitesse radiale de l'étoile Pegasi 51 ainsi mesurée. Les données couvrent une période d'un mois à partir du 12 octobre 1995, et ont été obtenues à l'Observatoire Lick en Californie par G. Marcy et P. Butler (les points représentent les observations, et la ligne en trait plein est un ajustement théorique):



En utilisant l'expression de v_r obtenue ci–dessus, expliquer pourquoi la courbe est périodique. Mesurer la période.

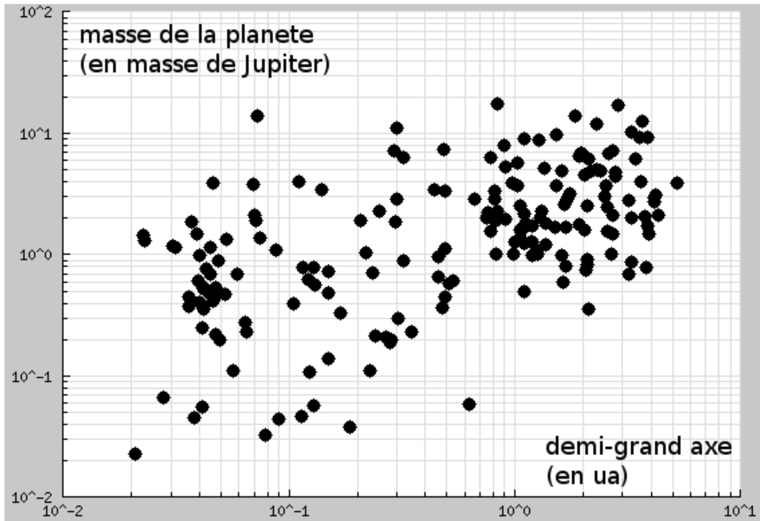
La masse de l'étoile Pegasi 51 est connue, et vaut environ 1 masse solaire. Calculer a à partir de la période.

Déduire finalement de la formule obtenue ci–dessus pour v_r la masse *projetée* $m \sin i$.

Et voilà, c'est ainsi que Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, ont découvert la première planète extrasolaire en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil!

A.6 — *Type de planètes pouvant être détectées par la méthode des vitesses radiales:*

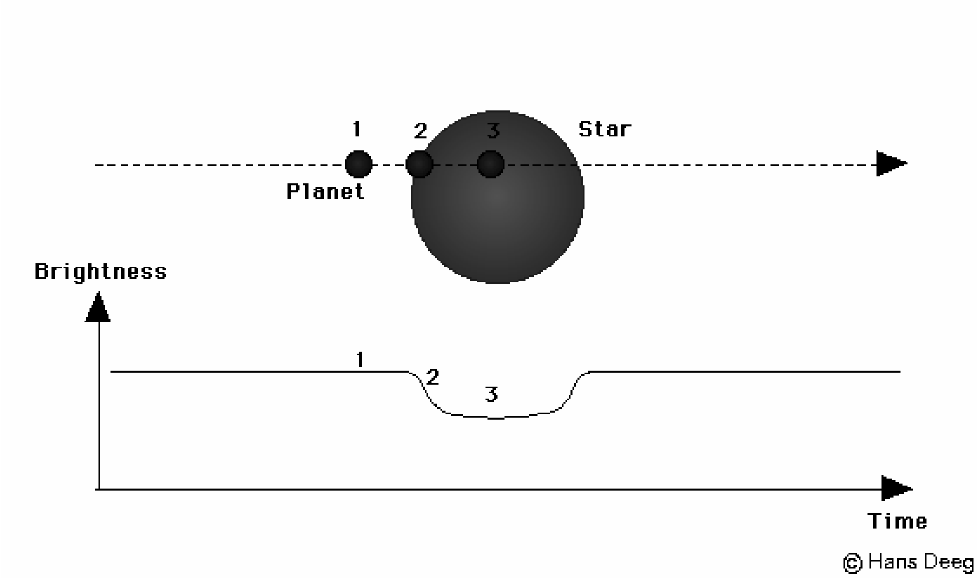
Le graphe ci–dessous représente la masse des planètes (en unité de masse de Jupiter) en fonction du demi–grand axe de leur orbite (en unité astronomique) pour les 188 planètes détectées à ce jour (fin juillet 2006) par la méthode des vitesses radiales (les échelles sont logarithmiques):



Pourquoi n'y a–t–il pas de points "en bas à droite" du graphe, c'est–à–dire de planètes de faible masse éloignées de l'étoile? (Le calcul de v_r ci–dessus a été fait pour une orbite circulaire, mais il est facile de voir que certaines conclusions restent valables pour des orbites elliptiques).

B — Méthode des transits

Le passage répété d'une planète devant son étoile parente provoque une diminution périodique du flux reçu de l'étoile si le système est observé sous un angle adéquat, c'est–à–dire si la planète traverse la ligne de visée de l'observateur. Ce processus est illustré sur la figure ci–dessous:



B.1 — *Probabilité de détecter un transit:*

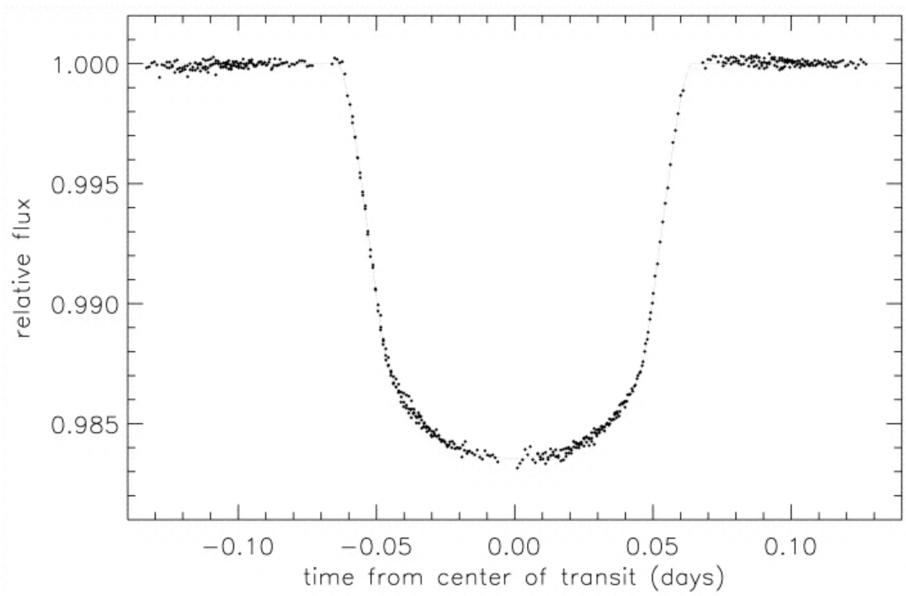
On peut montrer que la probabilité de détecter un transit vaut $R_\star/a$, où $R_\star$ est le rayon de l'étoile et a le rayon (ou demi–grand axe pour une orbite elliptique) de l'orbite de la planète. En 1999, une dizaine de planètes avec $a = 0.05$ unité astronomique avait été détectées par la méthode des vitesses radiales autour d'étoiles de type solaire. Est-ce surprenant qu'un transit ait été détecté cette année–là?

B.2 — *Caractéristiques de la planète mesurées lors d'un transit:*

L'énergie émise par la surface de l'étoile par unité de temps est appelée *flux* et est notée $F_\star$. Lorsque la planète passe devant l'étoile, le flux diminue de $\Delta F_\star$. Donner l'expression de $\Delta F_\star/F_\star$ en fonction des rayons de l'étoile et de la planète.
Quelles sont les caractéristiques de la planète qui peuvent être mesurées lors d'un transit? Quelle est la grandeur mal contrainte par la méthode des vitesses radiales qui peut être précisée ici?

B.3 — *Interprétation des observations:*

Le graphe ci–dessous représente la courbe de lumière de l'étoile HD 209458 obtenue au printemps 2000 par le Télescope Spatial Hubble. Le transit avait déjà été observé depuis le sol en novembre 1999 par D. Charbonneau et collaborateurs. Les mesures correspondant à quatre transits sont en fait reportées sur ce graphe:



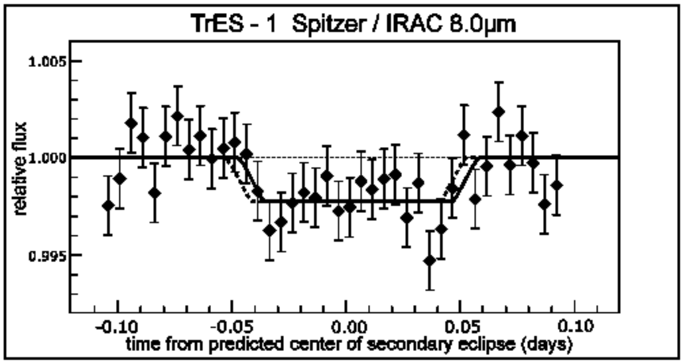
Une planète autour de HD 209458 a d'autre part été détectée par la méthode des vitesses radiales, qui donne $a = 0.045$ unité astronomique et $m \sin i = 0.66$ masse de Jupiter. La masse et le rayon de l'étoile sont 1.03 masse solaire et 1.15 rayon solaire respectivement.

Déduire de la courbe de transit le rayon de la planète.

Quelle est la densité de masse moyenne de la planète? Que peut–on en conclure quant à la nature de cette planète? (Pour comparaison, la moins dense des planètes du système solaire, Saturne, a une densité d'environ 700 kg m^{-3}, inférieure à celle de l'eau!).

B.4 — *Eclipse secondaire:*

Le graphe ci–dessous représente la courbe de lumière dans l'*infra–rouge* de l'étoile TrES–1, autour de laquelle gravite une planète, obtenue par D. Charbonneau et collaborateurs avec le télescope spatial Spitzer:



La diminution du flux apparente sur ces courbes se produit lorsque la planète passe *derrière* l'étoile, non l'inverse. Pourquoi?

Quelques données:

Constante de la gravitation: $G = 6.67 \times 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}

Vitesse de la lumière: $c = 3.00 \times 10^8$ m s^{-1}

Unité astronomique (distance Terre–Soleil): 1 ua $= 1.496 \times 10^{11}$ m

Parsec: 1 pc $= 3.086 \times 10^{16}$ m

Année lumière: 1 al $= 9.463 \times 10^{15}$ m

Masse du Soleil: 1 $M_\odot = 1.99 \times 10^{30}$ kg

Rayon du Soleil: 1 $R_\odot = 6.95 \times 10^8$ m

Masse de Jupiter: 1 $M_J = 1.90 \times 10^{27}$ kg

Rayon de Jupiter: 1 $R_J = 7.15 \times 10^7$ m

Masse de Saturne: 1 $M_S = 5.68 \times 10^{26}$ kg

Masse de la Terre: 1 $M_\oplus = 5.98 \times 10^{24}$ kg

Rayon de la Terre: 1 $R_\oplus = 6.38 \times 10^6$ m