

## Détection et calcul des caractéristiques des exoplanètes

Pierre Causeret, Esbarres

Comment détecter une exoplanète ? Et comment calculer sa masse, son rayon... ? Voici un court résumé des principales méthodes utilisées.

### La méthode des vitesses radiales

#### Le principe

Lorsqu'une planète tourne autour d'une étoile, elle ne la laisse pas insensible et va l'obliger à se déplacer. Une image souvent donnée est celle du lanceur de marteau où l'on voit bien que le sportif et son boulet tournent autour de leur centre de masse.

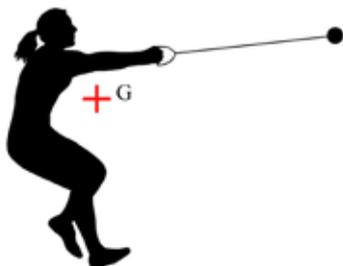


Fig.1. Le marteau et sa lanceuse tournent autour de leur centre de masse  $G$ .

Remplaçons la lanceuse par une étoile et le marteau par une planète : l'étoile et sa planète tournent autour d'un même point. Si on prend l'exemple du Soleil et de Jupiter, leur centre de masse se situe à 740 000 km du centre du Soleil, donc à l'extérieur du Soleil mais très près de sa surface.

Si nous ne considérons que l'attraction de Jupiter, le Soleil se déplace ainsi autour de ce point en un peu moins de 12 ans, la période de révolution de Jupiter. Imaginons un habitant d'une planète lointaine située approximativement dans le plan de l'écliptique. La planète Jupiter sera sans doute trop peu lumineuse à côté du Soleil pour qu'il puisse l'observer directement. Par contre, il pourra voir notre étoile parfois s'approcher et parfois s'éloigner de lui suivant une période de 12 ans. Les vitesses d'approche et d'éloignement sont appelées vitesses radiales car elles se trouvent le long du rayon observateur-étoile.

Ces vitesses radiales sont repérables grâce à l'effet Doppler-Fizeau et au déplacement des raies d'absorption dans le spectre de l'étoile. Ce phénomène a été décrit dans le n° 161 des Cahiers Clairaut.

La figure 2 décrit le principe de détection d'une planète extra solaire par un déplacement périodique des raies d'absorption d'une étoile. Plus la planète est massive, plus le déplacement est important et donc repérable. Plus la planète est proche de son étoile, plus sa période est courte et moins il faut de temps pour la détecter. C'est pour ces deux raisons que les premières exoplanètes découvertes furent des grosses planètes proches de leur étoile, des « jupiters chauds ».

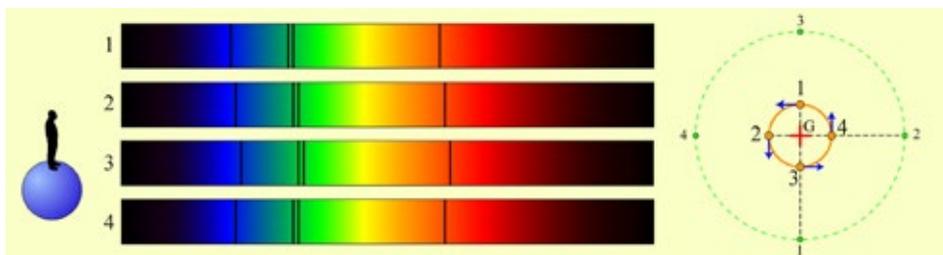


Fig.2. À droite, l'étoile orange et la planète verte tournent autour de leur centre de masse  $G$ . Lorsque la planète verte est en position 1, l'étoile orange est en 1, elle s'approche de l'observateur situé à gauche qui voit alors les raies spectrales de l'étoile décalées vers le bleu par effet Doppler-Fizeau (spectre 1). Lorsque étoile et planète sont en 3, l'étoile s'éloigne et les raies spectrales sont décalées vers le rouge (spectre 3). En 2 et 4, l'étoile ne s'approche ni ne s'éloigne, il n'y a pas de décalage spectral.

#### 51 Peg b

En 1994 et 1995, Michel Mayor et Didier Quéloz, deux astronomes de Genève, ont étudié le spectre de l'étoile 51 Peg (51 de la constellation de Pégase) grâce à un spectroscopie d'une très grande sensibilité appelé ÉLODIE, depuis l'Observatoire de Haute-

Provence. Ils ont pu observer un léger déplacement des raies spectrales suivant une période de 4,2 jours. Ils en ont déduit l'existence d'une planète dont la masse valait au moins 0,46 fois la masse de Jupiter et tournant autour de son étoile en 4,2 jours. On l'appelle 51 Peg b.

Cette découverte leur a valu le prix Nobel de physique à l'automne 2019 avec un autre astronome, James Peebles.

### Calcul du demi-grand axe de l'orbite

Le demi-grand axe de l'orbite de l'exoplanète se détermine à partir de la 3<sup>e</sup> loi de Kepler

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2}$$

m, la masse de la planète est négligeable devant M, la masse de l'étoile, supposée connue. La période T est donnée par l'observation du phénomène. On en déduit directement a, le demi-grand axe de l'orbite de l'exoplanète.

### Calcul de la masse de la planète

On considère dans un premier temps que l'observateur est situé dans le plan de l'orbite de la planète comme sur la figure 2. Les orbites sont supposées circulaires. La mesure du décalage spectral permet de calculer la vitesse radiale v de l'étoile (en position 1 ou 3), avec la formule classique de l'effet Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Si on appelle r la distance centre de masse - étoile et T la période, on a

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

On connaît v et T, on peut calculer r.

Le centre de masse est placé de telle manière que  $M \times r = m \times a$

On connaît M, r et on a calculé a, on en déduit m, la masse de l'exoplanète.

En réalité, il s'agit d'une valeur minimale pour cette masse car l'observateur n'a aucune raison d'être précisément dans le plan de l'orbite de la planète. La vitesse mesurée grâce au décalage est une valeur inférieure ou égale à la vraie vitesse dans le plan de l'orbite. Au lieu d'indiquer la masse, les catalogues donnent souvent la valeur  $m \times \sin(i)$  où i est l'angle entre le plan de l'orbite et le plan perpendiculaire à la ligne de visée.

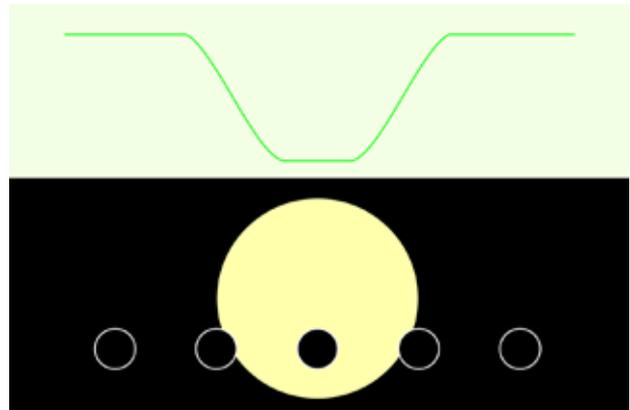
### La méthode des transits

#### Le principe

Si une planète passe devant son étoile, elle va occulter une petite partie de sa surface et ainsi faire baisser sa luminosité (figure 3). Si un extraterrestre voit Jupiter passer devant le Soleil, il verra la luminosité de celui-ci baisser de 1 %.

Pour détecter une exoplanète, il suffit donc de surveiller une étoile et d'observer une baisse périodique de sa luminosité.

On peut alors calculer le demi grand axe de l'orbite comme dans le cas précédent, à partir de la masse de l'étoile et de la période observée.



*Fig.3. Baisse de luminosité d'une étoile due au transit d'une exoplanète devant cette étoile. Schéma simplifié réalisé pour une luminosité de l'étoile uniforme.*

La forme de la courbe de luminosité permet de savoir si la planète va passer devant le centre de l'étoile ou plutôt devant un bord, ce qui permet de déterminer l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport à la ligne de visée.

### Calcul du rayon de la planète

Si on connaît le rayon de l'étoile  $r_E$ , la mesure de la baisse de luminosité va permettre de calculer le rayon de l'exoplanète  $r_p$ .

Une baisse de luminosité de 1 % correspond à une occultation de 1 % de la surface de l'étoile donc à un rayon de l'exoplanète valant 10 % du rayon de l'étoile. En effet la surface est proportionnelle au carré du rayon :

Si  $r_p = 0,1 \times r_E$ , la surface occultée vaut  $0,1^2$  donc 0,01 fois la surface du disque de l'étoile.

### Compléments

L'idéal est d'observer une exoplanète par les deux méthodes.

L'observation par transit donne une indication de l'inclinaison de l'orbite donc permet de préciser sa masse.

De plus, si on a déterminé le rayon de l'exoplanète, on peut calculer sa masse volumique.

Nous avons considéré dans les exemples ci-dessus une seule exoplanète autour de son étoile. Il est courant qu'il y en ait plusieurs, ce qui complique bien évidemment les calculs.

Nous n'avons présenté que deux méthodes de détection d'exoplanètes, il en existe d'autres, mais ces deux méthodes ont permis de détecter plus de 90 % des 4 172 exoplanètes connues au 4 février 2020...