

ARTICLE DE FOND

L'effet Doppler & les lois de Kepler, les clés de la découverte d'autres Terres

Cécile Ferrari, Université Paris Diderot

Personne n'a jamais vu une exoplanète dans un télescope. Cécile Ferrari nous présente des méthodes pour traquer leur présence au voisinage d'étoiles.

La chasse aux planètes situées hors de notre Système Solaire a donné ses premiers résultats à la fin du siècle dernier. Le succès de cette quête et l'importance de leur nombre, 704 à l'heure où ces lignes sont écrites¹, sont à l'image des moyens mis en œuvre depuis une quinzaine d'années. Pourtant, il reste extrêmement difficile et rare de voir une planète extrasolaire. L'étoile qui l'éclaire, à supposer qu'elle ressemble à notre Soleil, est typiquement 10 milliards de fois plus brillante qu'elle quand on l'observe avec un télescope dans le domaine des longueurs d'onde visible (0,5 μm). C'est un contraste que nos caméras les plus performantes ne peuvent saisir. Ce contraste diminue fortement aux longueurs d'onde infrarouges (10 μm typiquement) où l'étoile délivre moins de puissance alors que la planète chauffée par les rayons stellaires y émet une énergie comparable à celle qu'elle réfléchit de l'étoile dans le domaine visible. L'étoile n'est alors qu'un million de fois plus brillante que la planète. Les instruments qui vont pouvoir exploiter ce filon seront bientôt prêts. Mais alors comment a-t-on découvert ces planètes si on ne les a pas vues ?

On a simplement détecté leur présence grâce à leur masse. Si petite soit-elle relativement à l'étoile, dans un rapport de trois milliardièmes pour la Terre et le Soleil, elle perturbe la trajectoire de l'étoile. Quelle trajectoire ? Les étoiles vaquent dans la Voie Lactée, notre galaxie hôte, tel notre Soleil et suivent des trajectoires apparentes par rapport à nous, terronautes embarqués à toute allure dans notre trajectoire de Kepler autour du Soleil. Si l'on omet leur trajectoire galactique, les étoiles tournent autour du barycentre de masse du système planétaire qui les entoure (s'il y en a un), à l'instar de notre Soleil. Si l'étoile est très massive comparé à l'ensemble du cortège planétaire, le barycentre sera situé à l'intérieur de son enveloppe gazeuse. Le

barycentre du Système Solaire se situe en moyenne à 1,2 rayon solaire du centre du Soleil mais sa position varie suivant un cycle d'environ 180 ans, qui correspond à un cycle de positionnement relatif récurrent de Jupiter, Saturne et Uranus, les planètes les plus influentes en masse dans notre Système Solaire. Se superpose à ce cycle un cycle plus court, de l'ordre de 20 ans, une demi-mesure entre les périodes de Jupiter et de Saturne.

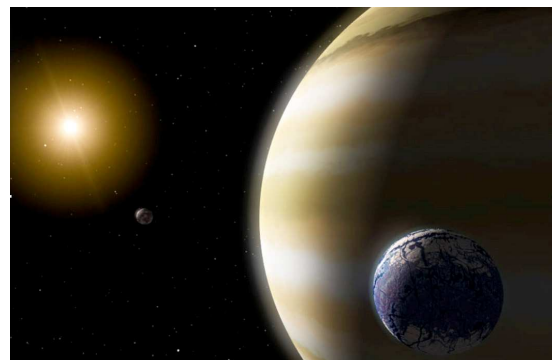


Fig.1. Image d'un système solaire externe.

Pour les planètes extrasolaires, c'est ce mouvement oscillant de l'étoile autour d'un point différent de son centre qui nous a aidés à les trouver. Ce sont les mêmes lois qui gèrent les mouvements orbitaux d'une étoile binaire (i.e. de deux étoiles). La plupart d'entre elles ont donc été découvertes avec cette méthode, couramment dénommée "la méthode de la vitesse radiale". Pourquoi la vitesse radiale ? Revenons à un cas simple, une seule planète autour d'une seule étoile.

Peser la planète en visant l'étoile

Soit l'étoile de masse M_E et la planète de masse M_P , leur distance au barycentre du Système respectivement définies comme R_E et R_P telles que :

$$M_E R_E = M_P R_P$$

le barycentre étant situé sur le rayon vecteur qui relie planète et étoile, distantes de $R = R_E + R_P$.

¹ Voir <http://exoplanet.eu/catalog.php>

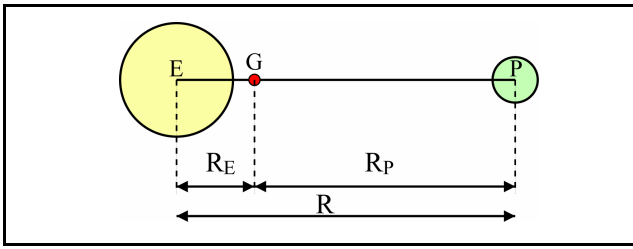


Fig.2. Distances du centre de l'étoile E et du centre de la planète P au centre de masse G.

Le module de la force de gravitation par laquelle les deux corps massifs interagissent suivant ce rayon vecteur est :

$$F = G \frac{M_E M_P}{R^2}$$

La force agissant sur l'étoile suivant la relation fondamentale de la dynamique définit l'accélération a_E de l'étoile autour du barycentre, telle que :

$$F = M_E a_E = M_E \frac{V_E^2}{R_E} = G \frac{M_E M_P}{R^2}$$

en supposant que le mouvement de l'étoile est circulaire et uniforme de vitesse V_E . Cette vitesse s'écrit alors, dans le cas où l'étoile est bien plus massive que son compagnon planétaire :

$$V_E^2 = G \frac{M_P^2}{R_P M_E \left(1 + \frac{M_P}{M_E}\right)^2} \approx M_P^2 \times \frac{G}{R_P M_E}$$

Une vitesse donc bien dépendante de la masse de la planète compagnon et de sa distance au barycentre. La période de l'étoile T_E autour du barycentre est telle que :

$$T_E V_E = 2 \pi R_E$$

ou

$$T_E^2 = \frac{4 \pi^2 R^3}{G M_E \left(1 + \frac{M_P}{M_E}\right)} \approx \frac{4 \pi^2 R^3}{G M_E} \text{ ou } \frac{T_E^2}{R^3} = \frac{4 \pi^2}{G M_E}$$

On retrouve ici la troisième loi de Kepler lorsque $M_P \ll M_E$ et $R_P \approx R$. L'étoile et la planète tournent autour du barycentre avec la même période.

Nous sommes observateurs extérieurs à ce système planétaire. Si le plan orbital de la planète est orienté d'un angle i par rapport à la ligne de visée liant l'observateur à l'étoile alors la composante de la vitesse de l'étoile sera pondérée d'un $\sin i$, inconnu a priori¹. Si nous réussissons à mesurer cette vitesse radiale, on peut s'attendre à ce qu'elle soit sinusoïdale, de période $T_P = T_E$. Si l'on connaît la masse de l'étoile, la troisième loi de Kepler nous permettra de déterminer la distance $R = R_P$ de la planète à l'étoile.

¹ Il s'agit de l'angle entre la ligne de visée et la perpendiculaire au plan de l'orbite.

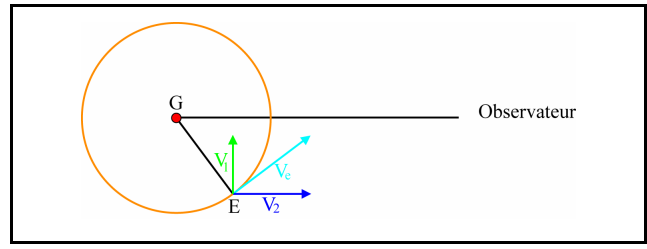


Fig.3. Cas de l'observateur dans le plan de l'orbite de la planète. La vitesse cyan V_e de l'étoile se décompose en une vitesse V_1 et une vitesse radiale bleue V_2 que l'on va pouvoir déterminer.



Fig.4. Si le plan de l'orbite est incliné par rapport à la ligne de visée, la composante observée de la vitesse radiale V_3 s'écrit $V_2 \sin i$.

On constate ici qu'il va nous falloir observer longtemps le mouvement oscillant de cette étoile pour détecter des planètes lointaines. Saturne tourne autour du Soleil en 29 ans, il est donc nécessaire d'observer au moins sur ce laps de temps pour découvrir des "saturnes" autour d'étoiles comparables à notre Soleil. La découverte de la première planète 51Peg date de 1995. Il nous faudra encore quelques années pour découvrir des planètes situées à 10 UA de leur soleil. Il suffit de regarder la statistique des éléments orbitaux des exoplanètes découvertes pour constater ce premier biais observationnel. Comment pèse-t-on le compagnon dès lors que l'on connaît sa distance à l'étoile ?

L'effet Doppler entre dans la danse

C'est alors que l'effet Doppler intervient. Une étoile est une source de lumière, d'information. Elle émet des messages à différentes fréquences ν avec une intensité variable $I(\nu)$, son spectre. L'intensité des messages obéit à une loi bien précise, celle de l'émission d'un corps noir à une température T , 5 770 K pour le Soleil. Cette loi a été découverte par Max Planck en 1900 et lui a valu le prix Nobel en 1918. Ce message est émis à la surface du Soleil, mais il est filtré en partie par la chromosphère, une enveloppe de gaz qui va absorber des photons de fréquence bien déterminée, correspondant aux niveaux d'énergie d'électrons des atomes du gaz. De notre point de vue, ces messages vont manquer et le spectre va apparaître noir à ces fréquences. Ces trous de messages sont des bandes d'absorption. L'étoile est donc un émetteur de messages ou de non-messages, nous en sommes les récepteurs. Au cours de sa révolution autour du barycentre, elle va alterner mouvements d'approche et d'éloignement de

nous. La vitesse de l'étoile suivant notre ligne de visée va s'annuler lorsque l'étoile passe entre nous et le centre de masse ou à l'opposé de ce point et va être maximale au moment où elle vient dans notre direction.

Suivant les conséquences de l'effet Doppler, les messages de lumière vont sembler nous parvenir à une fréquence plus grande que sa fréquence au repos ν_0 lorsque l'étoile se rapproche de nous et plus petite lorsqu'elle s'éloigne. Ce décalage de fréquence et donc de longueur d'onde $\Delta\lambda$ est fonction de la vitesse radiale de l'étoile observée V_{OBS} et donc :

$$V_{OBS} = M_P \sin i \sqrt{\frac{G}{R_P M_E}} = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

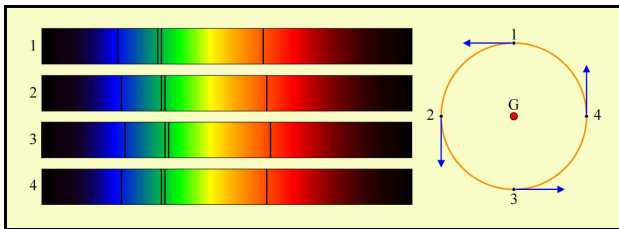


Fig.5. Vitesse radiale et décalage spectral. L'observateur est situé ici à gauche. Quand l'étoile s'approche (en 1), le spectre est décalé vers le bleu. En 2 comme en 4, la vitesse radiale est nulle, le spectre n'est pas décalé. Quand l'étoile s'éloigne (en 3), le décalage est vers le rouge. Les raies d'absorption sont placées ici au hasard et les décalages sont très exagérés.

Il reste à connaître la masse de l'étoile M_E , pour connaître R_P à partir de la mesure de T_E (périodicité de V_{OBS}) et de la loi de Kepler et déterminer $M_P \sin i$ par effet Doppler.

Le spectre de l'étoile nous donne son type spectral, sa température et sa luminosité L_E , à partir desquels on peut déterminer sa masse M_E suivant une relation masse-luminosité qui est en première approximation $\log(L_E/L_S) = 3,5 \log(M_E/M_S)$ où L_S et M_S sont les masse et luminosité solaires.

L'enjeu technique est d'avoir un instrument suffisamment stable au cours du temps pour obtenir une mesure de $\Delta\lambda$ la plus fine possible. On comprend que mesurer des décalages Doppler petits permet de détecter des planètes peu massives. Il y a donc là aussi dans la distribution de masses des planètes découvertes un biais observationnel dû aux limites des instruments. Grâce aux progrès instrumentaux, les planètes détectées sont 10 à 15 fois moins massives qu'en 1995. Il reste à préciser que l'analyse se complexifie lorsque plusieurs planètes sont présentes autour de l'étoile.

Ces deux biais observationnels, la durée d'observation et les limites instrumentales, induisent une image encore biaisée sur la nature des systèmes planétaires, composés pour l'essentiel de planètes

"géantes chaudes", "géantes" car massives et "chaudes" car proches de leur étoile et donc de périodes courtes, détectables en quelques mois ou années. On parlait donc de "jupiters" ou de "neptunes chauds" il y a encore 2 ou 3 ans. La surveillance sur des dizaines d'années des systèmes déjà connus nous permettra de sonder la présence de planètes lointaines, l'amélioration des spectromètres nous permettra de diminuer l'erreur sur la mesure du décalage Doppler. Le spectromètre HARPS en opération sur le télescope de 3,6 m de l'Observatoire Européen Austral (ESO) est à la pointe et détecte actuellement des super-terres, de quelques masses terrestres. La combinaison de cette méthode avec la méthode du transit, qui mesure leur diamètre, permet d'estimer la masse volumique. L'observation par le télescope européen Corot du transit de la planète Corot 7b indique un rayon de 1,8 rayon terrestre et son suivi avec HARPS qui l'a pesée à une masse minimale de 5 masses terrestres, conduisent à une estimation de sa masse volumique de $5\,000 \text{ kg/m}^3$, tout à fait comparable à celle de la Terre. Ceci fait de Corot7b la première exoplanète "tellurique" découverte.

Notre image des planètes extrasolaires est en perpétuelle mutation, l'actualité est brûlante, les moyens engagés au sol comme dans l'espace sont phénoménaux, à la hauteur de l'intérêt suscité par la potentielle découverte d'une autre Terre, peut-être d'une vie ailleurs.

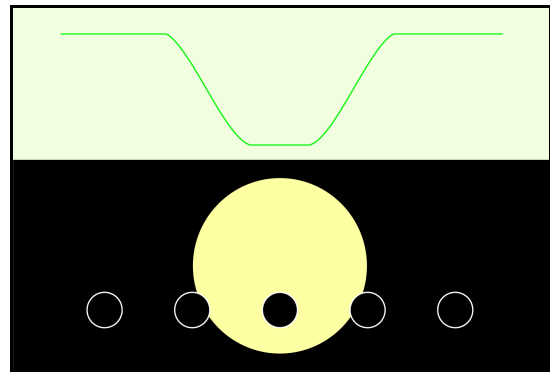


Fig.6. Transit d'une exoplanète devant son étoile et courbe de l'intensité lumineuse perçue. L'analyse de cette courbe permet de déterminer le rayon de la planète connaissant le rayon de l'étoile a_E , connu à partir de sa température de surface T et de sa luminosité $L_E = 4\pi a_e^2 \sigma T^4$, $\sigma =$ constante de Stefan.

<http://exoplanet.eu/catalog.php>: Base de données de l'Observatoire de Paris.

<http://nsted.ipac.caltech.edu/>: Base de données américaine des exo-planètes.

<http://planetquest.jpl.nasa.gov/>: Site de la NASA sur l'exploration des exo-planètes.

(NDLR : vous trouverez le détail du calcul de la masse sur le site et une application numérique sera proposée dans un prochain numéro des Cahiers Clairaut).