5.2 Vitesse radiale de l'étoile

FIGURE 7
Christian Doppler

La vitesse radiale de l'étoile qui servira au calcul de la masse de la planète extrasolaire (donc, à la preuve de son existence) peut être obtenue grâce à l'effet Doppler.

C'est le physicien autrichien Christian Doppler qui fut le premier, en 1842, a montré qu'une source sonore se déplaçant dans un milieu tel l'air compresse sa longueur d'onde devant elle et la dilate derrière. Le changement de longueur d'onde de tout type d'onde causé par le mouvement de la source émettrice et/ou de l'observateur est appelé effet Doppler. Doppler a déduit que la différence entre la longueur d'onde observée λ_{OBS} pour une source sonore en mouvement et la longueur d'onde de cette même source au repos λ_{REP} est reliée à la vitesse radiale de la source, c'est-à-dire à la composante de la vitesse allant directement sur ou complètement à l'opposé de l'observateur. Cette relation est :

$$\frac{\lambda_{OBS} - \lambda_{REP}}{\lambda_{REP}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{REP}} = \frac{v_R}{v_S} \tag{5.16}$$

Où : λ_{OBS} = longueur d'onde observée
λ_{REP} =longueur d'onde de la source au repos
$\Delta\lambda$ = différence de longueurs d'onde
v_R = vitesse radiale de la source
v_S = vitesse réelle de la source dans le milieu

Cependant, cette expression très simple ne s'applique pas pour la lumière car, au contraire du son, les ondes lumineuses sont électromagnétiques et n'ont pas besoin de milieu matériel pour se propager, comme il fut démontré par Michelson et Morley. Donc, l'effet Doppler appliqué à la lumière est un phénomène qualitativement différent de l'effet Doppler appliqué au son.

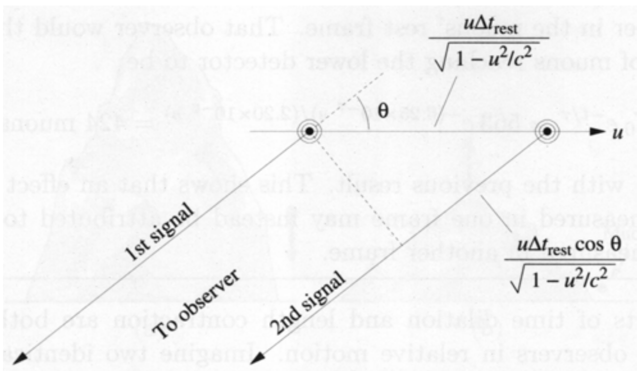

FIGURE 8
Déplacement d'une source lumineuse dans son référentiel

Source : CARROLL, Bradley W. et OSTLIE, Dale A. (1996*), An Introduction to Modern Astrophysics*, États-Unis, Éditions Addison-Wesley Publishing Company, Inc., p.108.

Où : t_{REP1} = moment correspondant à l'emplacement initial de la source (S_1)
t_{REP2} = moment correspondant à l'emplacement final de la source (S_2)
u = vitesse de la source

Si la source est en mouvement relativement à un observateur, le temps de réception des signaux lumineux où se trouve l'observateur dépendra de l'effet de dilatation du temps et de la différence de distances parcourues par les signaux de la source à l'observateur (la source lumineuse est estimée assez lointaine pour que les signaux émanant de la source à t_{REP1} et à t_{REP2} voyagent parallèlement jusqu'à l'observateur).

À partir de l'équation suivante[1], nous trouvons que la différence de temps entre l'émission des signaux mesurée dans le référentiel de l'observateur est :

$$\Delta t_{OBS} = \frac{\Delta t_{REP}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \tag{5.17}$$

Où : Δt_{OBS} = temps entre l'émission des signaux mesuré dans le référentiel de l'observateur
Δt_{REP} = temps entre les emplacements de la source (de S_1 à S_2)
u = vitesse de la source
c = vitesse de la lumière

Pendant cet intervalle de temps, nous pouvons trouver que la distance entre la source et l'observateur (*voir Figure 8*) a varié de :

[1] Il est à noter que cette formule est ici utilisée sans preuve car nous avons jugé qu'elle n'était pas nécessaire à la compréhension générale de notre propos. Elle se trouve *dans An introduction to Modern Astrophysics* par Bradley W. Carroll et Dale A. Ostlie (référence complète dans la bibliographie, p.64).

$$\frac{u \Delta t_{REP} \cos\theta}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \tag{5.18}$$

Où : Δt_{REP} = temps entre les emplacements de la source (de S_1 à S_2)
u = vitesse de la source
c = vitesse de la lumière

Donc, l'intervalle de temps entre l'arrivée des deux signaux à l'observateur est :

$$\Delta t_{OBS} = \frac{\Delta t_{REP}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \left[1 + (u/c)\cos\theta\right] \tag{5.19}$$

Où : Δt_{OBS} = temps entre l'émission des signaux mesuré dans le référentiel de l'observateur
Δt_{REP} = temps entre les emplacements de la source (de S_1 à S_2)
u = vitesse de la source
c = vitesse de la lumière

Si Δt_{REP} représente le temps entre l'émission des crêtes d'ondes lumineuses (référentiel à la source) et Δt_{OBS} représente le temps entre l'arrivée des crêtes d'ondes lumineuses (référentiel de l'observateur), alors les fréquences des ondes lumineuses sont :

$$\nu_{REP} = \frac{1}{\Delta t_{REP}} \quad \text{et} \quad \nu_{OBS} = \frac{1}{\Delta t_{OBS}} \tag{5.20 et 5.21}$$

Où : ν_{REP} = vitesse de la source dans le référentiel de la source
ν_{OBS} = vitesse de la source dans le référentiel de l'observateur
Δt_{REP} = temps entre l'émission des crêtes d'ondes lumineuses (référentiel à la source)
Δt_{OBS} = temps entre l'arrivée des crêtes d'ondes lumineuses (référentiel de l'observateur)

L'équation décrivant l'effet Doppler relativiste est :

$$v_{OBS} = \frac{v_{REP}\sqrt{1 - u^2/c^2}}{1 + (u/c)\cos\theta} = \frac{v_{REP}\sqrt{1 - u^2/c^2}}{1 + v_R/c} \tag{5.22}$$

Où : v_{OBS} = vitesse de la source dans le référentiel de l'observateur
v_{REP} = vitesse de la source dans le référentiel de la source
u = vitesse de la source
c = vitesse de la lumière
$v_R = u \cos\theta$ = vitesse radiale

Si la source se déplace directement vers ou à l'inverse de l'observateur, l'équation précédente devient :

$$v_{OBS} = v_{REP}\sqrt{\frac{1 - v_R/c}{1 + v_R/c}} \tag{5.23}$$

Où : v_{OBS} = vitesse de la source dans le référentiel de l'observateur
v_{REP} = vitesse de la source dans le référentiel de la source
$v_R = u \cos\theta$ = vitesse radiale
c = vitesse de la lumière

Lorsque nous observons une étoile s'éloignant ou se rapprochant de la Terre, la longueur d'onde de la lumière reçue est modifiée vers des plus longues ou des plus courtes, vers le bleu ou le rouge respectivement. Alors, si l'étoile s'éloigne de la Terre ($v_R>0$) alors $\lambda_{OBS}>\lambda_{REP}$ (appelé « redshift »). Si l'étoile se rapproche de la Terre ($v_R<0$), alors $\lambda_{OBS}<\lambda_{REP}$ (appelé « blueshift »).

De l’équation 5.23, avec $c = \lambda v$:

$$\lambda_{OBS} = \lambda_{REP} \sqrt{\frac{1 - v_R/c}{1 + v_R/c}} \tag{5.24}$$

Où : λ_{OBS} = longueur d’onde de la source dans le référentiel de l’observateur
λ_{REP} = longueur d’onde de la source dans le référentiel de la source
$v_R = u \cos \theta$ = vitesse radiale
c = vitesse de la lumière

Par cette dernière équation, nous voyons clairement qu’avec les mesures de λ_{OBS} et λ_{REP} obtenues par l’effet Doppler, il est possible de trouver la vitesse radiale de l’étoile.