

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2009 - Partie D

TITRE :

5

Détection des exoplanètes

Temps de préparation : 2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury :10 minutes

Entretien avec le jury :10 minutes

10

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint est constitué d'un texte principal de 12 pages.

Travail suggéré au candidat :

15

Le candidat pourra choisir un ordre de présentation différent de celui qui est utilisé dans le document. Pour chacune des méthodes expérimentales, il devra non seulement en décrire les principes mais aussi les intérêts et les limites d'application. Il devra montrer l'intérêt de la modélisation et les difficultés qu'elle présente.

20

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

25

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En rentrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés.

30

35

Détection des exoplanètes

Dès l'Antiquité, les philosophes se sont interrogés sur l'unicité ou la diversité des mondes possibles. Dès que les astronomes eurent acquis la certitude que la Terre n'était pas au centre de l'univers, que d'autres planètes tournaient, comme elle, autour du Soleil, on ne pouvait pas empêcher certains d'entre eux d'imaginer que des êtres pouvaient vivre sur ces planètes¹. La science-fiction allait trouver là un vaste sujet où rien ne pouvait freiner l'imagination des auteurs. Pour les scientifiques, qui ne manquent pourtant pas non plus d'imagination, il faut cependant tenir compte des lois de la physique, de la chimie et de la biologie qui sont très contraignantes quand on veut bâtir un scénario.

Dès le XIX^e siècle, le développement des moyens d'observation de l'astronomie a exclu la possibilité de la vie sur les planètes plus proches du Soleil que la Terre (Mercure et Vénus), car les températures y sont trop élevées (plusieurs centaines de degrés Celsius), ainsi que sur les planètes lointaines, Jupiter et au-delà, qui sont trop froides (température inférieure à -100°C). Restait Mars, certes un peu plus loin du Soleil que la Terre, mais pour laquelle on pouvait imaginer des conditions suffisamment clémentes, si un effet de serre suffisant le permettait. Dans la seconde moitié de ce siècle, certains astronomes crurent observer des « canaux » sur cette planète ; d'autres en nièrent existence. Le débat agita la communauté jusque dans les années 1940 mais les instruments d'observation se perfectionnant, les adeptes de l'hydrographie martienne devinrent moins nombreux. L'exploration de Mars a depuis révélé qu'il n'y a pas actuellement d'eau liquide à la surface de cette planète. Les canaux n'étaient dus qu'à des instruments imparfaits et peut-être à des observateurs un peu trop imaginatifs. Exit les « petits hommes verts ».

Reste que la question de la vie sur d'autres planètes du système solaire que la nôtre n'est pas définitivement résolue. Il n'est pas exclu qu'elle puisse exister souterrainement sur Mars ou sur Titan, un satellite de Saturne. Notons, au passage, que la définition de la vie est aussi un sujet de discussions entre scientifiques ainsi que les conditions qui la permettent. Mais s'il n'y a rien à trouver dans le système solaire, cela n'empêche pas d'aller regarder plus loin.

On sait maintenant que notre Soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres et qu'il y en a environ cent milliards rien que dans notre galaxie, et autant de galaxies.

¹ Giordano Bruno ayant été condamné au bûcher et exécuté à Rome en 1600, l'auteur de ce texte ne prend pas parti sur cette épineuse question.

Première question : quelle est la proportion d'entre elles qui sont entourées de planètes ? Deuxième question : quelle est la probabilité pour qu'une de ces planètes remplisse les conditions pour que la vie puisse s'y développer ? Le produit de ces probabilités, si on les connaît, multiplié par le nombre d'étoiles, donnerait le nombre des mondes possibles.

Avant d'aborder la première question, qui est le sujet de ce texte, donnons quelques indications sur la seconde. Les biologistes considèrent qu'une condition nécessaire à la vie est la présence d'eau à l'état liquide. Cela impose une gamme de températures relativement étroite, donc un taux d'éclairement par l'étoile voisine limité aussi à un domaine restreint. Cette conception des conditions nécessaires à la vie est peut-être trop restrictive : n'est-il pas envisageable que la vie puisse exister dans le cadre d'une chimie très différente où les molécules de base ne seraient pas des chaînes carbonées et le milieu liquide puisse être autre chose que de l'eau ? Là aussi, le débat est loin d'être clos.

Revenons à la première question qui est celle de la probabilité de l'existence d'un cortège planétaire pour une étoile donnée. Il y a deux approches pour y répondre : l'observation et la modélisation de la formation des étoiles.

Pour mettre en évidence la difficulté d'observer directement une planète en orbite autour d'une étoile, imaginons un observateur qui se situerait au voisinage de l'étoile la plus proche du Soleil (Proxima Centauri, qui se situe à environ quatre années-lumière) et qui braquerait son télescope vers le système solaire. Pour discerner Jupiter, il faudrait qu'il dispose d'un instrument capable de distinguer deux sources dont les luminosités diffèrent de 10^5 à 10^{10} ordres de grandeur (selon la longueur d'onde d'observation), qui seraient placées à deux centimètres l'une de l'autre et situées à un kilomètre de distance. Pour distinguer la Terre du Soleil, la situation équivalente demanderait de se reculer à cinq kilomètres avec un écart de luminosité encore plus grand. Ceci montre la difficulté de l'observation directe d'éventuelles planètes extrasolaires. Mais nous y reviendrons.

À défaut de moyens d'observation directs, c'est par des méthodes indirectes que l'on a pu détecter les premières planètes extrasolaires. Historiquement, les premières observations ont utilisé l'effet Doppler.

Effet Doppler

L'effet Doppler dans le domaine des *ondes* sonores est bien connu et a pu être observé par tous : changement de fréquence d'une sirène lorsque l'émetteur, après s'être dirigé vers l'observateur, s'en éloigne. Le son étant plus aigu dans la première phase, plus grave dans la

seconde. Le glissement de fréquence relatif, $\Delta f / f$, est égal à $v / (v_S - v)$, où v_S est la vitesse du son et v la vitesse déplacement du mobile. Le phénomène est le même pour les ondes électromagnétiques, la vitesse du son étant remplacée par celle de la lumière c . Dans le cas le plus général, la vitesse de déplacement est négligeable devant c , le déplacement de fréquence est alors $\Delta f / f = v / c$. Des signes doivent être affectés à v et à Δf de façon à ce que la fréquence croisse quand l'émetteur se rapproche du récepteur et décroisse dans le cas contraire ; c'est l'effet bien connu du décalage vers le rouge du spectre des galaxies qui s'éloignent de nous en raison de l'expansion de l'univers. Mais revenons à nos exoplanètes.

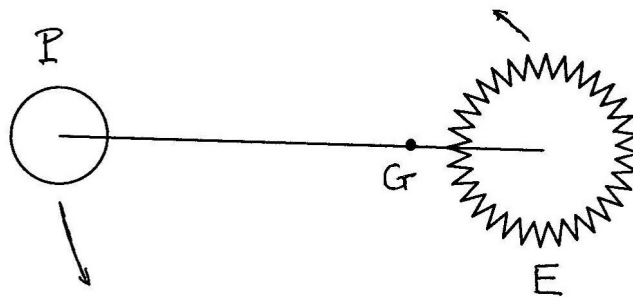


Figure I Schéma représentant le système étoile-planète

Considérons le cas simple d'une étoile autour de laquelle gravite une seule planète et admettons que notre observatoire se situe dans le plan de l'orbite de cette planète. Nous ne sommes capables que de capter la lumière issue de l'étoile et pas celle qui provient de la planète. Le système planète-étoile est en rotation autour de son centre de gravité G (voir fig I). Celui-ci se situe sur l'axe joignant les centres des deux astres, à une distance du centre de l'étoile r_ϵ telle que :

$$r_\epsilon \cdot m_\epsilon = r_p \cdot m_p \quad (1)$$

où les m représentent les masses de chacun des astres et le r les distances respectives au centre de gravité. La lumière émise par l'étoile est composée, entre autres, de raies monochromatiques qui sont caractéristiques des atomes présents à la surface de l'étoile. En raison de l'effet Doppler, la fréquence de ces raies oscille autour d'une valeur moyenne (voir fig II). La vitesse de rotation de l'étoile, qui se déduit de l'amplitude de cette oscillation sinusoïdale, est liée à la période P de rotation de la planète autour de l'étoile :

$$v_\epsilon = c \Delta f / f = 2\pi r_\epsilon / P \quad (2)$$

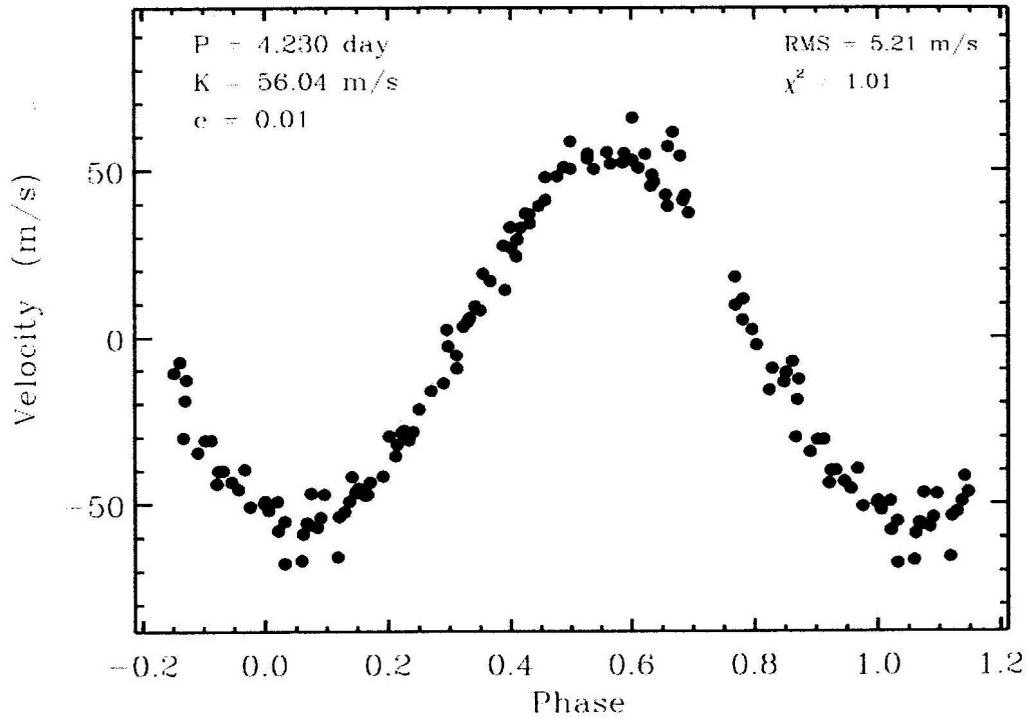


Figure II Exemple de variation de la vitesse radiale de l'étoile déduite des mesures de l'effet Doppler. Il s'agit d'une planète très proche de l'étoile car sa période orbitale (4,2 jours) est très courte.

135

La mesure de $\Delta f/f$ et de P permet de déduire r_ϵ . En outre, le mouvement relatif de la planète par rapport à l'étoile est gouverné par la troisième loi de Kepler ou, si l'on préfère, par la relation qui exprime l'équilibre entre l'attraction gravitationnelle et la force centrifuge :

140

$$r_p^3 = m_\epsilon G P^2 / 4\pi^2 \quad (3)$$

r_ϵ ayant été déduit de (2), les équations (1) et (3) donnent deux relations entre les trois paramètres caractéristiques du système planète-étoile que sont m_ϵ , m_p , et r_p . Il est donc nécessaire de disposer d'une relation supplémentaire pour déterminer les trois paramètres. En fait on peut souvent déduire la masse de l'étoile de sa luminosité et de son spectre. On obtient dans ce cas les valeurs de m_p et r_p

145

Si plusieurs planètes gravitent autour de l'étoile, la rotation de l'étoile sera due à la combinaison des différentes contributions planétaires. Cela revient à rechercher dans le signal donnant la variation de fréquence la somme de plusieurs sinusoides d'amplitudes et de périodes différentes. On a pu ainsi discerner la présence de cinq exoplanètes autour d'une même étoile.

150

Pour avoir une idée des ordres de grandeur qui interviennent dans ces mesures considérons la situation d'un astronome « exoplanétaire » qui observerait le système solaire. Pour calculer les effets qu'il pourrait détecter il faut calculer la vitesse de rotation du Soleil

155 autour du centre du système gravité planète/Soleil. Cette vitesse s'exprime à partir des équations(1) et (2) :

$$v_e = 2\pi m_p r_p / m_s P \quad (4)$$

160 où les m représentent les masses de la planète et du Soleil. L'effet prédominant est celui de Jupiter qui entraîne une vitesse de rotation d'un peu moins de 20m/s, puis celle de Saturne (environ 4 m/s), la contribution de la Terre n'étant qu'un peu supérieure à 0,1 mètre/seconde. Sachant que les techniques actuelles permettent de mesurer des vitesses de l'ordre d'un m/s, notre « exoastronome », disposant des mêmes moyens que nous, n'aurait pu déceler que les
165 deux plus grosses planètes de notre système solaire. Encore aurait-il fallu qu'il mène ses mesures pendant trente ans, durée d'une année saturnienne pour être bien sûr de ses résultats.

Quelques hypothèses ont été faites dans les calculs précédents, on a notamment assimilé les orbites planétaires à des cercles ; des ajustements dans les équations permettent de prendre en compte l'excentricité des ellipses. Nous avons aussi admis que nous,
170 observateurs, étions dans le plan de l'orbite de l'exoplanète. Dans le cas général, ceci est invérifiable. Si l'angle fait par l'axe de visée avec ce plan est i , on peut montrer que la masse m_p que l'on a déduite en négligeant cet angle, correspond à une masse réelle de la planète de $m_p / \cos i$. La valeur de m_p est donc, en l'absence de la connaissance de i , une limite inférieure de la masse de la planète.

175 Cette méthode de détection des exoplanètes par effet Doppler est la plus ancienne de celles qui ont été utilisées et ont donné lieu à des observations. La première découverte par deux astronomes suisses, Michel Mayor et Didier Queloz, date de 1995 (voir fig. II). Il s'agit d'une planète tournant autour de l'étoile 51Pegasi située à environ 50 années-lumière de la Terre. Sa masse est au moins égale à la moitié de celle de Jupiter et son orbite, décrite en 4
180 jours, est très proche de l'étoile (0,05 unité astronomique, c'est-à-dire un vingtième de la distance Terre-Soleil). Les découvertes suivantes ont aussi concerné des exoplanètes de masses élevées et voisines de leur étoile. Ceci s'explique aisément en considérant les équations précédentes. Par ailleurs, il est nécessaire de mener des observations pendant un temps au moins voisin de celui de la période orbitale de la planète, ce qui rend plus difficile la
185 détection de planètes éloignées de leur étoile.

Il existe une autre approche pour déterminer la présence d'exoplanètes qui est, en quelque sorte, complémentaire de celle qui utilise l'effet Doppler. Puisque l'étoile tourne autour du centre de gravité étoile/planète(s), on devrait pouvoir observer un déplacement apparent de l'étoile. C'est ce que l'on appelle la méthode astrométrique. Elle présente

190 l'avantage, par rapport à l'effet Doppler, de donner des résultats indépendants de la position
de l'observateur vis-à-vis du plan de l'orbite, mais nécessite d'être capable de mesurer des
déplacements apparents de l'étoile bien inférieurs à ce que l'on peut faire actuellement. Des
observatoires spatiaux qui s'affranchissent de la scintillation² devraient permettre d'obtenir
195 des résultats dans un proche avenir pour des étoiles voisines du Soleil. Cette méthode est
complémentaire de celle qui fait appel à l'effet Doppler. Quand les deux méthodes
s'appliquent, cela permet de lever l'incertitude sur l'angle entre l'axe d'observation et le plan
de l'orbite planétaire.

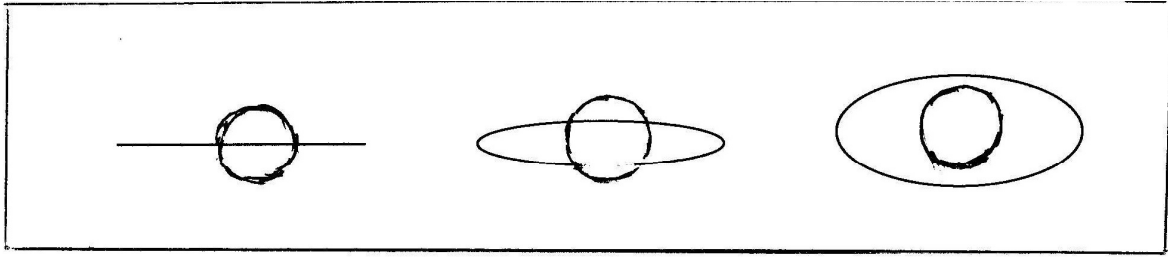
200 **Méthode du transit**

Le principe de cette méthode est simple : lorsque l'exoplanète passe entre l'étoile et
l'observateur terrestre on doit observer une diminution d'intensité lumineuse. Mais en raison
de la dimension de la planète, très inférieure à celle de l'étoile, cette variation de la luminosité
205 est difficile à détecter. À titre d'exemple et en revenant à notre exoastronome, le passage de
Jupiter devant le Soleil n'entraînerait qu'une diminution de luminosité de 1%, la Terre de
moins de 10^{-4} ³. Là encore, l'observation des « grosses » planètes proches de leur étoile est
favorisée car l'effet est plus marqué et se produit plus fréquemment. Les temps de transit sont
courts, ce qui impose une observation continue de l'étoile. Néanmoins, la mise en service de
210 systèmes de détection automatiques qui permettent de « surveiller » simultanément un très
grand nombre d'étoiles rend possible l'utilisation de la méthode du transit. Enfin, le passage
devant l'étoile n'est visible que si l'observateur est proche du plan de l'orbite (voir fig. III).
Cette condition est d'autant plus contraignante que le rayon de l'orbite est grand et que
l'observateur est éloigné de l'étoile étudiée.

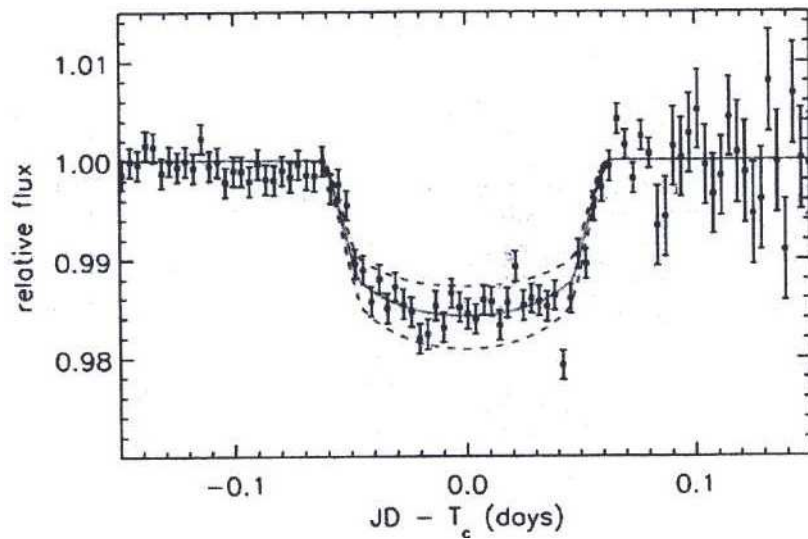
215 Cette méthode de transit a cependant déjà permis de détecter une cinquantaine
d'exoplanètes depuis la première observation en 2000 et l'utilisation de télescopes spatiaux
tels que CoRoT, lancé par les Européens fin 2006, et Kepler, lancé par les Américains fin
2008, apportent, et apporteront une importante moisson de résultats (voir un exemple fig. IV).

² La scintillation est due à la variation de l'indice optique de l'air sous l'effet des conditions météorologiques dans la haute atmosphère.

³ Ces valeurs dépendent de la longueur d'onde d'observation. Celles qui sont données ici se réfèrent au domaine du rayonnement visible.



220 **Figure III** Selon la position de l'observateur vis-à-vis du plan de l'orbite de l'exoplanète, le transit est plus ou moins observable.



225 **Figure IV** Variation du flux lumineux reçu en provenance d'une étoile lors du transit d'une exoplanète.

Il existe une autre méthode dite de transit secondaire. Elle consiste à détecter le passage de la planète derrière l'étoile. Avant cette occultation, la lumière provenant du couple est la somme de celle de l'étoile et de celle de la face éclairée de la planète. Après l'éclipse de la planète, il ne reste plus que la lumière émise par l'étoile. La soustraction de deux signaux permet de déterminer la lumière provenant de la planète. C'est en 2005 que le télescope spatial Hubble a permis la première découverte d'une exoplanète par cette méthode.

235 **Lentilles gravitationnelles**

Cette méthode est très différente des précédentes et fait intervenir un élément étranger au couple étoile/planète. Elle s'appuie sur la théorie de la relativité générale, due à Albert Einstein, qui prévoit une déformation de l'espace au voisinage d'un corps massif. Cette

déformation entraîne une déviation des rayons lumineux qui passent à proximité d'un tel corps avec un effet d'autant plus important que la masse est élevée. Cet effet est analogue à celui qui dévie une balle qui roule sur une surface plane et rencontre une dépression circulaire du terrain. Si une étoile B s'interpose entre une étoile A et l'observateur terrestre, au moment de l'occultation, la lumière émise par A apparaît renforcée car elle peut parvenir à l'observateur par différents chemins optiques. C'est ce que l'on appelle l'effet de lentille gravitationnelle. On voit l'analogie avec les lentilles optiques où c'est la variation d'indice (air-verre) et la géométrie de la lentille qui entraîne la focalisation des rayons lumineux. Dans le cas de la lentille gravitationnelle, il n'y a pas focalisation de la lumière, le phénomène s'apparente à la formation des caustiques en optique (voir fig. V).

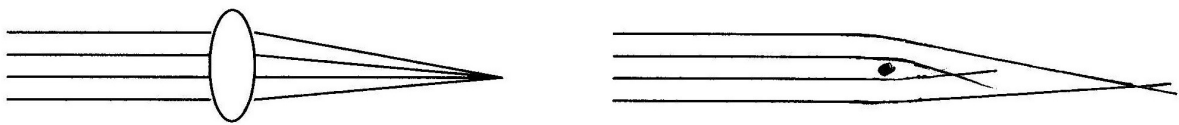
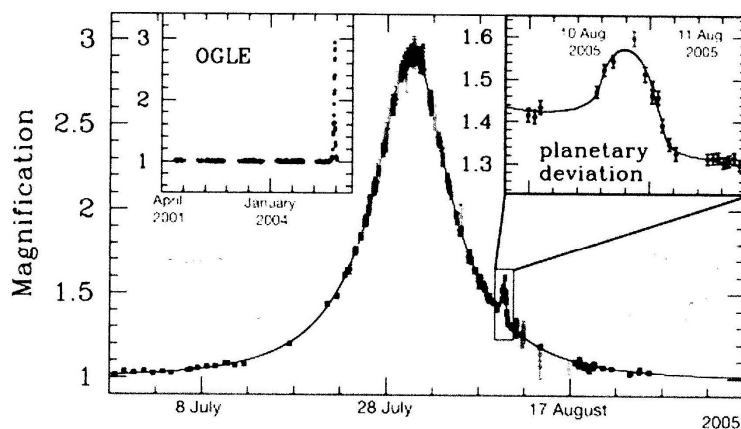


Figure V À gauche : focalisation optique par une lentille. À droite : effet de la présence d'une masse qui défléchit la lumière provenant d'une étoile. On constate que les deux effets sont différents.

Quand l'étoile A passe derrière B, on constate un renforcement de la luminosité apparente de A puisque la lumière parvient à l'observateur par plusieurs chemins. Si A est accompagné d'une planète, celle-ci induit aussi un effet de lentille gravitationnelle qui s'ajoute à celui de l'étoile : cet effet est appelé « microlentille gravitationnelle » (voir fig. VI). Grâce à cette méthode, de nombreuses exoplanètes ont été récemment découvertes et c'est, semble-t-il, la méthode qui donne les plus grands espoirs.



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

Figure VI Variation de l'intensité lumineuse, lors du passage d'un système étoile-planète derrière un objet massif, dû à l'effet de lentille et de microlentille gravitationnelles.

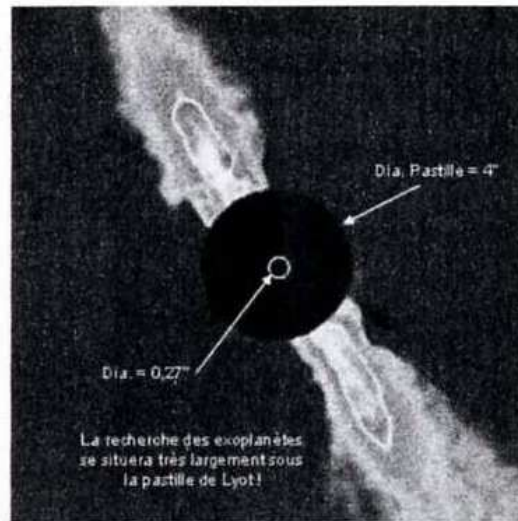
Un avantage de cette méthode, par rapport à l'effet Doppler, est qu'elle favorise l'observation de planètes relativement éloignées de leur Soleil (1 à 10 u.a.⁴).

270 **Coronographie stellaire**

Nous avons indiqué précédemment que l'observation directe des exoplanètes n'était pas envisageable en raison de la grande différence de luminosité avec l'étoile. Pour étudier le voisinage du Soleil, les astronomes ont longtemps pourchassé les éclipses totales de Soleil, 275 mais celles-ci n'avaient pas toujours le bon goût d'être observables là où ils disposaient d'observatoires. Le coronographe solaire a été inventé en 1930 par Bernard Lyot (1897-1952). En plaçant dans un télescope, au niveau d'une image intermédiaire, un disque opaque qui arrête la propagation de la lumière provenant du Soleil, on peut observer son voisinage immédiat. C'est grâce à un tel instrument embarqué dans l'observatoire spatial Soho qu'on a 280 pu découvrir un grand nombre de comètes que la lumière provenant du Soleil aurait masqué.

L'idée est venue de transposer cette méthode à l'observation du voisinage des étoiles afin de découvrir des exoplanètes. Cette approche se heurte cependant à une grande difficulté. Dans un instrument d'optique, l'image d'un point est une tache lumineuse, dite d'Airy, constituée d'une partie centrale et d'anneaux concentriques dont l'intensité va en s'atténuant 285 du centre vers l'extérieur. Le diamètre de la tache est proportionnel à la longueur d'onde du rayonnement et inversement proportionnel au diamètre de l'instrument d'observation. Avec les instruments dont on dispose actuellement, le diamètre de cette tache est, le plus souvent, bien supérieur à celui de l'orbite des planètes que l'on peut espérer découvrir ; néanmoins des disques de poussières autour de certaines étoiles ont pu être observés (voir fig. VII). Ces 290 disques constitués de poussières sont, comme nous le verrons plus loin, un préalable à la formation de planètes. Très récemment, une équipe américaine utilisant les données fournies par l'observatoire spatial Hubble, a annoncé la découverte d'une planète d'une masse proche de trois fois la masse de Jupiter, distante de 120 u.a. de son étoile, et située à environ 25 années-lumière de nous. Ce résultat devra cependant être confirmé. Par ailleurs, des travaux 295 sont en cours, faisant appel à des techniques interférométriques, qui permettront d'améliorer les performances des coronographes stellaires.

⁴ Unité astronomique égale à la distance Terre-Soleil.



300 **Figure VII** Image coronagraphique du disque de poussières autour de
 l'étoile β Pictoris. Le masque occulteur est beaucoup plus large que le diamètre de la tache
 d'Airy afin de mieux masquer la lumière de l'étoile et de faire apparaître les zones les plus
 externes du disque où l'on observe l'existence d'un disque de poussières. Le masque occulte
 également les orbites d'hypothétiques planètes. Le cercle central représente l'orbite d'une
 305 planète qui serait située à 5 u.a. de l'étoile.

État des découvertes

Le nombre d'exoplanètes connues à ce jour est de l'ordre de trois cents, mais on en
 310 découvre actuellement environ deux par mois. Afin de les classer, on a défini différentes
 catégories de façon très qualitative en prenant en compte leur masse et la proximité de
 l'étoile. On distingue ainsi des Jupiters, des Neptunes et des super-Terres, selon que leurs
 masses se rapprochent de celle d'une de ces planètes du système solaire⁵. On les qualifie aussi
 de chaudes ou de froides selon que la proximité de l'étoile entraîne une température trop
 315 élevée, ou au contraire trop basse, pour que la vie y soit possible. Ce qu'on aimerait découvrir
 c'est une planète tellurique⁶, de dimension voisine de celle de la Terre, qui recevrait de son
 étoile une quantité d'énergie telle que sa température soit relativement proche de celle que
 nous connaissons. Mais en dehors de cette quête de la possibilité de vie hors du système

⁵ La masse de Jupiter est égale à 320 fois celle de la Terre et celle de Neptune à 17 fois.

⁶ On distingue parmi les planètes celles qui sont principalement constituées de gaz (hydrogène et hélium) telles que Jupiter ou Neptune et les planètes telluriques ou rocheuses, comme la Terre ou Mars. Les astronomes estiment que les planètes telluriques ont une masse qui ne peut dépasser une dizaine de fois celle de la Terre, car pour des masses supérieures, l'attraction gravitationnelle condenserait les gaz. Vue de l'extérieur, cette planète apparaîtrait comme gazeuse avec, en son centre, un cœur solide, comme cela semble être le cas de Jupiter.

solaire, il y a un autre intérêt à la recherche des systèmes planétaires.

320 **Modélisation de la formation des systèmes planétaires**

Pour connaître l'origine et le devenir d'un système complexe, une approche consiste à le modéliser, c'est-à-dire à écrire un ensemble d'équations couplées qui expriment les lois physiques qui interviennent dans le système. L'exemple le plus connu de modélisation est
325 celui de la météorologie. Dans ce cas, pour décrire l'évolution du système, il faut découper l'espace en éléments de volume et affecter à chacun d'eux des conditions initiales telles que pression, température, concentration de vapeur d'eau, etc. Le modèle représente d'autant mieux la réalité que le découpage de l'espace est plus fin, ce qui nécessite une grande puissance de calculs. Il faut aussi disposer de données initiales en chacun des points, ce qui
330 impose un réseau serré de mesures. L'évolution du système prévu par le modèle est très sensible aux incertitudes sur ces conditions initiales et cela limite la possibilité de prévoir le développement à long terme. C'est la caractéristique de ce qu'il est convenu d'appeler un système chaotique.

Tout modèle doit être validé par des confrontations avec l'observation, car il n'est pas
335 exclu que l'on ait négligé des mécanismes qui jouent un rôle notable. Les modèles météorologiques ont progressé grâce à ces confrontations. Mais revenons à nos planètes.

Les modèles de la formation des systèmes planétaires découlent de ceux qui décrivent celle des étoiles. On part d'un nuage diffus et de poussières, qui présente des inhomogénéités. On fait intervenir les lois de la gravitation, de la mécanique et de la thermodynamique. Sous
340 l'effet de l'attraction gravitationnelle, les modèles font apparaître une condensation progressive d'une partie du nuage en une zone centrale. Lorsque la condensation est suffisante, une masse importante de gaz se trouve comprimée et chauffée et quand les conditions de pression et de température sont atteintes, les réactions de fusion nucléaire entre atomes d'hydrogène s'amorcent et dégagent une grande quantité d'énergie. L'énergie dégagée
345 accroît la pression qui équilibre les forces de gravitation. L'étoile est née. Les modèles montrent que cette condensation s'accompagne de la formation d'un disque, appelé « protoplanétaire », qui gravite autour de l'étoile. Ce disque constitué du reste du gaz et des poussières qui appartenaient au nuage initial et n'ont pas été condensés dans l'étoile naissante. C'est au sein de ce disque que, progressivement, se forment les planètes en agrégeant le
350 restant de matière qui constitue le disque. Ces corps, très nombreux, orbitent autour de l'étoile et interagissent entre eux. On comprendra aisément que les modèles décrivant l'évolution du disque protoplanétaire nécessitent une grande puissance de calculs et, à l'instar des modèles

météorologiques, sont très sensibles aux conditions initiales et conduisent donc à des systèmes chaotiques⁷.

355 Il est donc important de tester la validité de ces modèles par comparaison avec des données de l'observation, mais il n'est pas pensable d'envisager de suivre l'évolution d'un système planétaire dont les constantes de temps se mesurent en centaines de millions, voire milliards d'années. C'est en étudiant un grand nombre de ces systèmes qui sont à des stades différents de leur évolution que l'on peut espérer disposer d'éléments de comparaison avec ce
360 que prévoient les modèles. Si la modélisation de la formation des étoiles est maintenant bien au point et les mécanismes qui interviennent relativement bien compris, la formation des systèmes planétaires donne des résultats qui diffèrent largement selon les modèles.

Jusqu'aux premières observations d'exoplanètes, on ne connaissait qu'un système planétaire : le nôtre. On a, au plus près de l'étoile, des petites planètes telluriques – Mercure,
365 Vénus, Terre et Mars – et vers l'extérieur du système des planètes gazeuses plus massives telles que Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, sans compter d'autres objets de dimensions plus réduites. Les questions étaient alors : 1) l'existence d'un cortège planétaire autour d'une étoile est-il un phénomène unique, rare, fréquent ou inéluctable ? – 2) Quand ce système existe, suit-il la même loi de distribution que le nôtre ?

370 On comprend alors tout l'intérêt de la prospection des exoplanètes. Tout en étant conscient du biais qu'apporte l'état actuel des observations, puisqu'on détecte préférentiellement les grosses planètes proches de leur étoile, on peut déjà apporter des réponses partielles aux deux questions posées précédemment : 1) il existe des systèmes planétaires, 2) ils ne sont pas tous organisés comme le nôtre. On ne dispose pas aujourd'hui
375 de résultats suffisamment nombreux et complets pour établir une statistique sur la proportion d'étoiles disposant d'un cortège planétaire. Les modèles prévoient cependant que la formation d'une étoile doit (toujours ?) s'accompagner de celle d'un disque protoplanétaire, puisque la totalité du gaz et des poussières du nuage initial ne s'agrège pas au sein de l'étoile. La variété des organisations possibles pour ces systèmes reste toutefois hors de portée tant qu'on ne sera
380 pas en mesure de détecter la présence des petites planètes.

⁷ Notons au passage que le système solaire, longtemps considéré comme stable et qui servit même à définir l'unité de temps, est en fait chaotique, comme l'a montré Henri Poincaré (1854-1912). Fort heureusement pour nous terriens, les constantes de temps sont telles que depuis que les hommes observent le ciel les changements sont peu visibles.