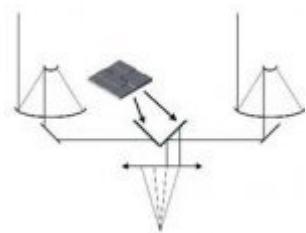


Pour la chasse aux exoplanètes, munissons-nous de deux échiquiers et d'un triangle



Date de mise en ligne : samedi 1er mars 2008

Une équipe de l'Observatoire de Paris propose un nouveau concept instrumental qui pourrait simplifier les expériences spatiales du futur qui visent la détection directe d'exoplanètes en infrarouge moyen. L'originalité de ce concept est d'utiliser des miroirs en échiquier dont les cellules sont définies par des relations mathématiques peu courantes en optique.

La détection directe d'une exoplanète (c'est à dire une planète en dehors de notre système solaire) en orbite autour d'une étoile exige que la lumière de cette dernière soit presque totalement atténuée. La raison en est l'énorme différence d'éclat (10^6-10^{10}) entre l'étoile et la planète, ainsi que la très petite séparation angulaire (10^{-6} radians) entre les deux objets. Dans l'infrarouge moyen, une solution proposée par Bracewell¹ dans le but d'y parvenir, est la mise en oeuvre d'un principe d'interférométrie annulante. On utilise au moins deux télescopes dont les faisceaux sont recombinaison de façon cohérente mais non classique, de sorte que la lumière éblouissante de l'étoile est supprimée par interférence destructive, ce qui permet, en principe, de "voir" la planète en orbite. Le corollaire séduisant est une porte s'entrouvre vers la recherche de bio-signature par spectroscopie².

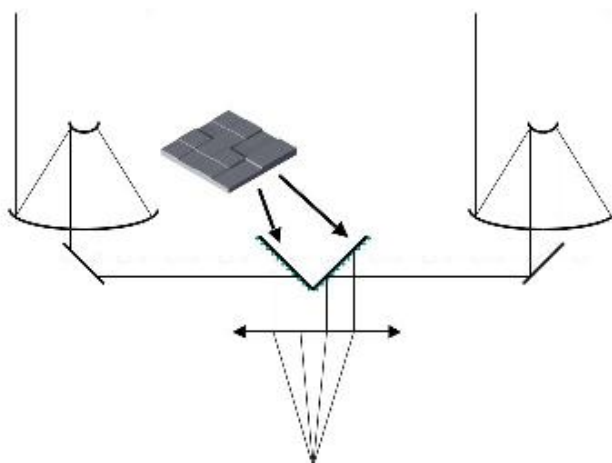


Figure 1 : L'Échiquier achromatique. La figure montre le schéma d'interféromètre considéré, en recombinaison multi-axiale. Les cellules d'un des miroirs-damier produisent des différences de chemin optique qui sont des multiples impairs de la moitié de la longueur d'onde centrale ($\lambda/2$) et les cellules de l'autre, des multiples impairs. Ainsi, un déphasage de λ est bien appliqué entre les deux branches pour $\lambda = \lambda_0$. Cliquez sur l'image pour l'agrandir

Dans cette solution, un déphasage de λ doit être appliqué à la lumière sur l'un des bras de l'interféromètre, de sorte qu'un système de franges montrant une frange centrale sombre est projeté sur le ciel. L'étoile, placée sur cette frange sombre, est fortement atténuée, tandis que la planète, pour peu qu'elle soit sur une frange brillante, peut alors être détectée. L'obtention d'un déphasage de λ à différentes longueurs d'onde simultanément (il est dit achromatique) est obligatoire parce que, d'une part le domaine longueurs d'onde où se trouvent des bio-signatures spectroscopiques est très étendu (typiquement 6-18 μm) et, d'autre part parce que c'est une expérience où le nombre de photons est si faible qu'on doit en capter le maximum.

Différentes méthodes ont été présentées en vue d'obtenir ce déphasage achromatique de λ dans un large domaine de longueurs d'onde³ : elles font généralement appel à un interféromètre asymétrique et demandent plusieurs

composants optiques parfois complexes à régler. Ici c'est une nouvelle solution^{4,5} qui est proposée, qui permet la symétrie complète et met en oeuvre un unique composant, en principe sans réglage : un double miroir en échiquier composé de cellules de différentes épaisseurs. C'est la distribution particulière des épaisseurs des cellules qui rend le déphasage de λ quasi-achromatique sur un vaste domaine. Entre toutes les distributions possibles des différentes épaisseurs, il en est une qui, étonnamment, permet en fait d'étendre cette propriété à des longueurs d'onde assez éloignées de λ_0 . Cette distribution est étrangement fournie par le "triangle de Pascal", c'est-à-dire les termes du développement du polynôme $(1+i)^n$. Chaque damier comporte alors $2n$ cellules. Dans cet assemblage, c'est une propriété d'égalité entre des sommes de puissances d'entiers pairs et impairs qui est mise en jeu. De telles relations, dites diophantiennes (du nom du mathématicien alexandrin Diophante, qui vécut vers le IIIe siècle de notre ère et qui a étudié des questions de ce genre), apparaissent dans d'autres problèmes d'optique examinés par l'équipe⁶, qui propose de dénommer optique diophantienne ce rameau nouveau de l'optique.

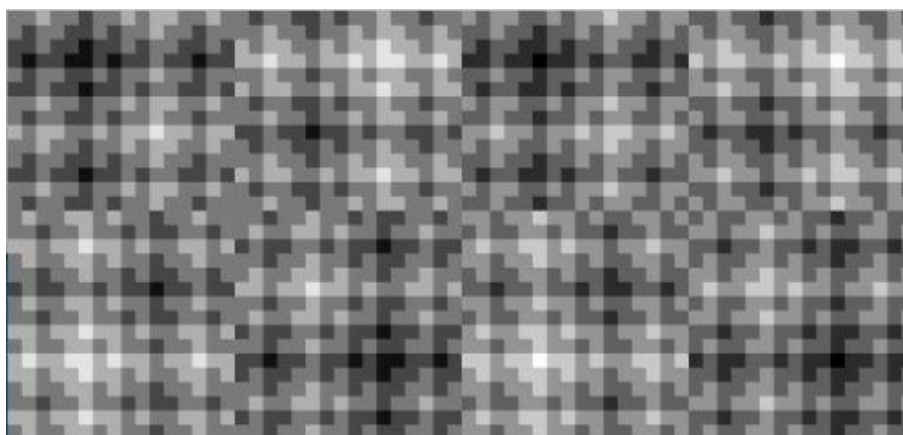
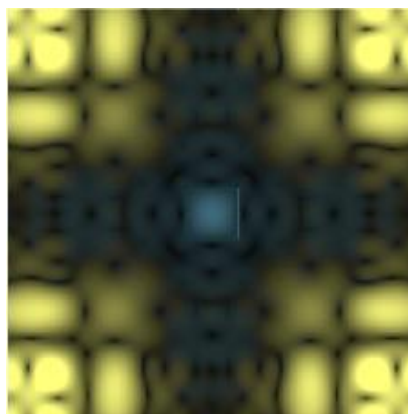


Figure 2 : Structure des deux échiquiers de la paire de miroirs (impair et pair) lorsque $n = 5$.

La distribution des cellules en x et y (i.e. à la surface des miroirs) joue aussi un rôle important pour améliorer la réjection de la lumière. Une distribution a donc été définie, également construite par récurrence sur une base mathématique diophantienne, qui est optimale en termes de minimisation des résidus de l'étoile. La Figure 2 montre un exemple de la structure des deux échiquiers de la paire de miroirs (impair et pair) lorsque $n = 5$. Cliquer sur l'image pour l'agrandir



Cliquer sur l'image pour l'agrandir

Performances : L'équipe a développé un simulateur, entièrement analytique, pour prédire la performance des solutions.

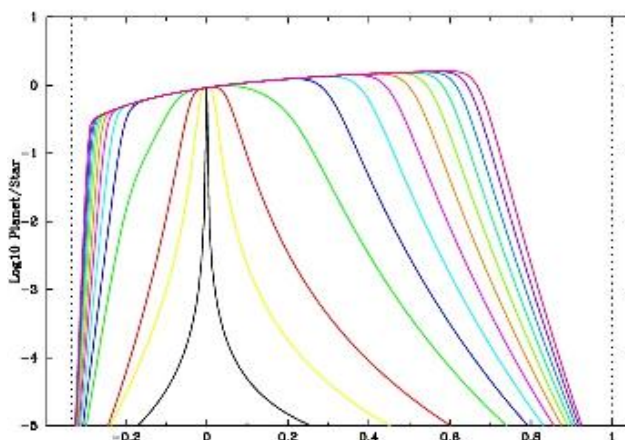


Figure 3 : La figure montre la détection simulée d'une exoplanète (en bleu) un million de fois plus faible que son étoile (en jaune), lorsque la longueur d'onde diffère de λ_0 à hauteur de 20%. Cliquer sur l'image pour l'agrandir

Un composant de 8×16 cellules, avec un pas de la cellule de $600 \frac{1}{4}$ m a été fabriqué par la société SILIOS-France en utilisant la technique de gravure par ions. Les deux masques (impair et pair) sont placés côte à côte.

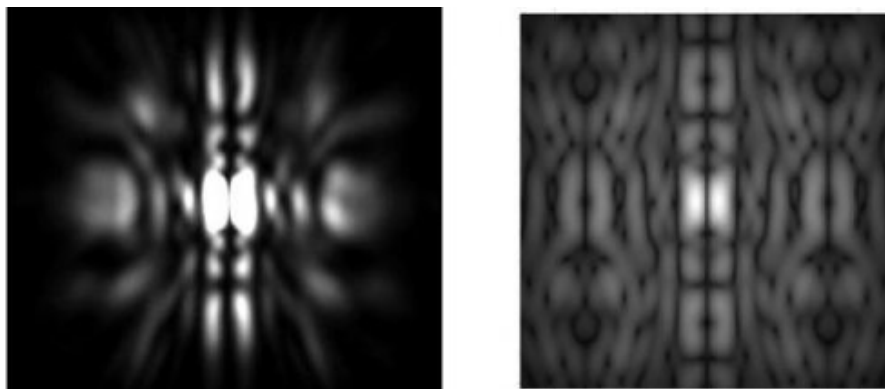


Figure 4 : La figure compare, pour une planète un million de fois plus faible que son étoile, l'efficacité d'annulation en fonction de λ / λ_0 pour les différentes tailles croissantes du damier optimum (en couleur). Il convient de noter le comportement relativement plat du rapport "résidu étoile sur résidu de la planète" en fonction de λ / λ_0 . La bande passante est typiquement $[0,85 \lambda_0 - 1,7 \lambda_0]$, c'est-à-dire une octave. On note qu'une erreur de phase réaliste est en plus introduite dans le modèle. Cliquer sur l'image pour l'agrandir