



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Séance solennelle de l'Académie des sciences / 19 juin 2007
Discours sous la Coupole de Membres élus en 2005

**À la recherche d'une chaleur venue d'ailleurs :
astronomie infrarouge, optique diophantienne**
Daniel Rouan

« Et livré aux délices d'une chaleur venue d'ailleurs ».

Ce vers du poète victorien Théodore Wratislaw ne devra pas être considéré comme un raccourci fidèle de ma carrière, car la récompense du chercheur n'est sans doute pas tant faite de délices exquises, que d'étapes franchies et de paris réussis. En revanche, la *chaleur venue d'ailleurs*, elle, aura bien été au cœur de ma recherche.

Cette chaleur, c'est celle émise par n'importe quel objet de l'Univers - pour peu que sa température dépasse quelques Kelvin - sous forme de cette lumière invisible qu'est le rayonnement infrarouge. Je me suis ainsi employé, toujours en équipe, à capter, analyser comprendre l'origine de cette chaleur, venue d'un ailleurs souvent très lointain. Depuis les planètes de notre système solaire, jusqu'aux cœurs de galaxies qui flamboient sous le feu d'étoiles jeunes et massives, en passant par l'environnement du trou noir monstrueux qui siège au centre de notre Galaxie. Cette chaleur, c'est également -et j'y reviendrai plus loin, celle, aussi ténue soit-elle, de ces planètes extrasolaires qui viennent de bouleverser, depuis quelques années, non seulement le paysage de l'astronomie mais aussi notre vision de la place de l'homme dans l'Univers.

Si l'astronomie infrarouge est un outil privilégié pour étudier les objets froids, elle est également un moyen irremplaçable pour sonder les objets cachés. Le rayonnement infrarouge est en effet capable de percer le voile de poussière qui s'étend dans toutes les galaxies et en masque les régions distantes. Un voile qui se renforce même dans les zones de formation stellaire ou autour des étoiles en fin de vie quand elles se construisent pudiquement un linceul de particules.

L'astronomie infrarouge

Quand débute ma carrière, guidée par Pierre Léna, l'astronomie infrarouge est une nouvelle fenêtre sur l'Univers qui commence juste à s'entrebâiller. Comme beaucoup d'autres domaines du spectre électromagnétique, ceux de la radio, de l'ultraviolet, des rayons X ou gamma, la fenêtre infrarouge n'avait pu être utilisée par les astronomes des générations précédentes qui devaient se contenter de l'unique octave de la lumière visible pour appréhender le Cosmos. À cette lacune, il y avait de bonnes raisons : les détecteurs étaient peu performants et n'avaient qu'un unique pixel mais surtout les embûches étaient multiples :

notre atmosphère est opaque pour la majeure partie du domaine infrarouge et l'environnement est lui-même source de rayonnement infrarouge qui parasite les mesures. Imaginez un astronome qui chercherait un astre en plein jour à l'aide d'un télescope et d'une caméra phosphorescents. Il fallait donc mettre en place les nouveaux outils : observer depuis des avions, des ballons ou les sommets des montagnes, mettre en œuvre les capteurs à deux dimensions qui apparaissent dans les années 80, franchir l'étape décisive du satellite, ce sera en particulier ISO le satellite de l'agence spatiale européenne. Enfin il faut profiter de l'avantage que procure la longueur d'onde pour améliorer la résolution angulaire, c'est-à-dire le piqué des images, qui reste en effet visé par la turbulence atmosphérique à un plancher un peu frustrant. Ce plancher, l'optique adaptative le fera éclater.

Nos équipes auront ainsi été au cœur de nombre de ces avancées qui s'accompagneront de découvertes astrophysiques importantes. Citons trois étapes significatives. La première est la mesure de l'émission infrarouge de notre Galaxie vue par la tranche, observation effectuée à partir d'un jet, la Caravelle du Centre d'essais en vol, grâce au télescope aéroporté que nous y avons installé. Le rôle de convertisseur d'énergie joué par les poussières au sein des immenses nuages de gaz qui peuplent la Galaxie se trouvait ainsi confirmé.

Une seconde entreprise sera la réalisation de la première caméra infrarouge développée en Europe et mettant en œuvre une matrice bidimensionnelle infrarouge. Installée au foyer du télescope Canada-France-Hawaï, qui offre la plus belle qualité d'image au monde, sa réussite durant plus de huit ans ne sera pas étrangère à la décision européenne de démarrer le projet de satellite infrarouge ISO. La découverte de l'extraordinaire nébuleuse du Lion givré, dont les lobes évoquant un hamburger, recèlent d'énormes quantités de glace d'eau, est un exemple d'un des résultats marquants.

Un troisième pas sera le développement de l'optique adaptative. Pour résumer cette technique de pointe, on peut dire qu'elle cultive l'art de *décabosser* en temps réel, c'est-à-dire un millier fois par seconde, le front d'une onde lumineuse mis à mal par la turbulence atmosphérique ; ainsi, elle permet rendre leur piqué d'origine aux images captées par les télescopes. Sur celui de 8 mètres de diamètre du Very Large Telescope européen, ce piqué devient tellement saisissant qu'avec le système NAOS, mis au point par notre équipe associée à celle de R. Genzel, il a été possible d'obtenir la preuve quasi-définitive de la présence au Centre de notre Galaxie d'un trou noir de 4 millions de fois la masse du soleil. Dans une région totalement obscurcie dans le visible par le voile des poussières interstellaires et peuplée d'une foule dense d'étoiles -un million de fois la densité au voisinage de notre soleil-, il fallait cette acuité décuplée pour distinguer les très subtils effets du trou noir sur son environnement immédiat.

L'optique diophantienne

J'aborde maintenant la seconde partie de mon exposé que j'ai intitulé « l'optique diophantienne ».

C'est sous ce vocable que j'ai récemment imaginé de regrouper un ensemble d'idées qui commencèrent à émerger au début de cette décennie. J'ai choisi d'en parler aujourd'hui car ce travail illustre assez bien une autre façon dont la recherche avance, en contraste avec les grands programmes finalisés auxquels j'ai, on l'a vu, largement contribué. Il s'agit plutôt ici d'une pensée vagabonde qui par des associations improbables fait se rejoindre des domaines a priori aussi éloignés que les planètes extrasolaires, la détection de la vie dans l'univers, les interférences optiques et les équations diophantiennes, une branche des mathématiques. Aujourd'hui certaines des idées qui sont nées de ces rapprochements inattendus s'épanouissent et se concrétisent au cœur d'instruments d'observation et produisent des résultats, tandis que les promesses annoncées par d'autres enfants de cet étrange

accouplement sont encore explorées, avec l'assistance de l'ordinateur et de mon récent complice en la matière, Didier Pelat.

De quoi s'agit-il donc ?

Une équation diophantienne, telle que Diophante d'Alexandrie les a définies, est une équation polynomiale ne mettant en jeu que des entiers. La dernière conjecture de Fermat, récemment démontrée par Andrew Wiles, est une équation diophantienne. Le triangle rectangle égyptien qui a pour côtés 3, 4 et 5 permettait aux Anciens de construire des pyramides aux bases parfaitement à angles droits. Lui appliquer le théorème de Pythagore, c'est bien écrire une équation diophantienne. Des relations remarquables entre puissances de nombres entiers peuvent ainsi avoir une utilité qui ne se révèle pas sur le champ. Celle qui nous intéresse ici est un très beau résultat établi par Prouhet au milieu du XIX^e siècle et publié dans les Comptes Rendus de cette auguste maison. Considérons la suite de Thué-Morse qu'on se devrait au passage d'appeler suite de Prouhet-Thué-Morse : c'est une suite fractale constituée de deux symboles seulement, 1 et 0 ou + et -, qui se construit sans que jamais ne se redouble un motif quelconque. Le beau résultat de Prouhet est que, si on partitionne les 2^N premiers entiers suivant le rang des deux symboles dans la série, les deux sous-ensembles obtenus possèdent la propriété diophantienne remarquable suivante : les sommes de leurs éléments respectifs élevés à une puissance k inférieure à N sont égales.

Fasciné par la beauté de cette propriété, je réalise un jour qu'elle permet de faire avancer un problème qu'avec des collègues nous nous posions depuis quelques années : comment éteindre au mieux la lumière d'une étoile pour faire apparaître celle d'une planète qui l'orbite, à l'éclat entre dix millions et un milliard de fois plus faible, et très proche angulairement parlant. C'est une difficulté qu'il faut absolument contourner pour atteindre un jour ce qui est devenu un enjeu majeur de l'astronomie moderne : caractériser la composition chimique des planètes extrasolaires et, ultimement tenter d'y déceler des bio-traceurs révélant la présence de la vie. La réponse que me proposait l'optique diophantienne : à partir du principe de l'interféromètre supprimeur imaginé par Bracewell, combiner de façon interférométrique la lumière captée par plusieurs télescopes en munissant la moitié d'entre eux, désignés par leur rang dans la série de Prouhet-Thué-Morse, d'un dispositif changeant le signe du champ électrique, qu'on appelle déphaseur de π . À partir de cette solution, un champ plus vaste s'ouvre, celui d'une véritable algèbre des interféromètres supprimeurs qui permet de multiplier les configurations supprimant la lumière stellaire de façon de plus en plus efficace, en jouant sur les géométries et les tailles de télescopes.

Rebondissant sur cette idée, l'application au cas particulier d'un télescope unique permet alors l'invention du coronographe à quatre-quadrants qui permet de bloquer efficacement la lumière d'une étoile pour explorer son environnement proche bien moins brillant. Au laboratoire, le facteur un milliard est aujourd'hui atteint. Installé sur plusieurs instruments, dont le futur télescope dans l'espace qui succèdera au Hubble Telescope, ce système permet d'envisager dans un avenir proche la détection directe d'une planète de type Jupiter et d'en estimer température et composition.

Une autre difficulté sérieuse que présentent les interféromètres supprimeurs est liée à la nécessité d'explorer simultanément un vaste domaine de longueur d'onde infrarouge, de 6 à 18 μm , où sont présentes les bio-signatures. Là également, l'optique diophantienne apporte une réponse originale en permettant de réaliser le dispositif déphaseur sur une très large plage de longueurs d'onde. Des damiers de miroirs dont les cellules possèdent une épaisseur désignée par les coefficients du binôme, le fameux triangle de Pascal, permettent d'arriver à

ce résultat. Ici c'est une autre relation diophantienne entre des ensembles de nombres pairs et impairs, satisfaisant à la condition de Prouhet-Tarry-Escott qui donne cette solution un peu magique au problème.

Il est temps de conclure :

« D'autres mondes, avec des plantes et d'autres êtres vivants, certains similaires et d'autres différents des nôtres, doivent exister ». Epicure en formulant le premier cette question, simple mais fondamentale, accessible à tous et touchant chacun d'entre nous, ne pouvait se douter qu'un mathématicien presque contemporain, Diophante d'Alexandrie, contribuerait par-delà quelques 20 siècles, à apporter des éléments à la recherche d'une réponse, probablement proche maintenant, à une question qui hante l'humanité. Avoir la chance d'être partie prenante de cette aventure est certainement l'une des plus enthousiasmante récompense de ma carrière de chercheur.