

IMAGERIE SPATIALE DANS L'INFRA-ROUGE ET LE SUBMILLIMÉTRIQUE

Marc Sauvage, astrophysicien au CEA

L'auteur définit ce qu'est l'infrarouge pour les images d'astronomie et les conditions pour les obtenir, avant de détailler les différentes étapes permettant d'obtenir une image présentable au grand public. Derrière ces images en fausses couleurs se cache un long travail entre la collecte du signal et la réalisation de l'image.

Tout d'abord, puisqu'il s'agit d'exposer les particularités de l'imagerie dans ce domaine spectral, définissons-le : pour les astronomes l'infrarouge (IR) s'ouvre aux alentours de quelques microns et se referme vers quelques centaines de microns, région de transition où l'on arrive dans le submillimétrique (submm), qui logiquement s'arrête aux longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, pour laisser la place au domaine radio. Ces limites viennent des technologies déployées pour convertir les photons en signaux électriques, étape que l'on appellera ici la « détection ». De nos jours, les techniques de détection jusqu'à environ 30-50 μm sont très proches de celles déployées dans le domaine optique et pour cette raison, nous nous limiterons à discuter d'imagerie spatiale dans le domaine allant d'environ 50 μm à 1 mm.

Ceci posé, passons au deuxième terme important du titre : imagerie. C'est le fait d'obtenir des images avec un appareil technique. Mais qu'est-ce qu'une image ? Pour la plupart d'entre nous l'image est notre principal mode d'interaction avec le monde : nos yeux forment deux images de notre environnement, notre cerveau y reconnaît des objets et structures, et exploite les différences entre les deux images pour localiser ces objets et structures et nous permettre d'évoluer dans le monde. Une image c'est donc bien plus qu'une distribution de couleurs et d'intensités, c'est une représentation bidimensionnelle d'informations, et puisqu'on parle d'information et de représentation, la réalisation d'images en astronomie est un processus qui implique 4 étapes : la focalisation des photons sur un détecteur, la détection pour transformer les photons en signal, le traitement de ce signal et enfin la reconstruction d'une image. Nous allons parcourir ces 4 étapes en discutant des particularismes imposés par le domaine spectral, mais avant cela intéressons-nous à une question fondamentale.

Pourquoi l'espace et pourquoi l'infrarouge et le submillimétrique ?

Bien que nous vivions depuis quelques années dans une époque où l'accès à l'espace semble aisé, au point qu'on ne se soucie plus de préserver ce bien commun qu'est le

ciel nocturne, on ne décide pas de réaliser une expérience spatiale par caprice. Les coûts, la complexité et les limites (en taille, en masse, en puissance) imposés par le spatial sont tels que ce choix n'est fait que lorsqu'il est impossible d'atteindre les mêmes objectifs scientifiques à partir du sol ou de la haute atmosphère (avec un ballon).



*Fig.1a. Une carte Herschel d'une région de formation d'étoiles dans la constellation de la Carène. Il s'agit d'une carte en fausses couleurs où sont combinées trois images, à 70 μm pour le canal bleu, 160 μm pour le canal vert, et 250 μm pour le canal rouge. Avec ce codage, les régions les plus chaudes, celles qui contiennent des étoiles déjà formées, apparaissent en bleu, alors que les filaments qui contiennent les étoiles à naître apparaissent en rouge. Le champ de l'image est nettement plus grand que celui des détecteurs d'Herschel et cette carte est le produit de plusieurs heures d'observation par balayage.
crédits : ESA/Herschel/PACS, SPIRE/Hi-GAL Project).*

Ici c'est le cas : l'atmosphère est à la fois opaque, très brillante et instable. L'opacité s'explique principalement par la présence d'eau et le fait que les longueurs d'onde IR et submm correspondent à des transitions de vibration et rotation de ces molécules. La brillance de l'atmosphère vient de ce qu'il s'agit d'un corps dont la température place l'émission de refroidissement pile dans le domaine qui nous intéresse, et l'instabilité est le résultat des vents

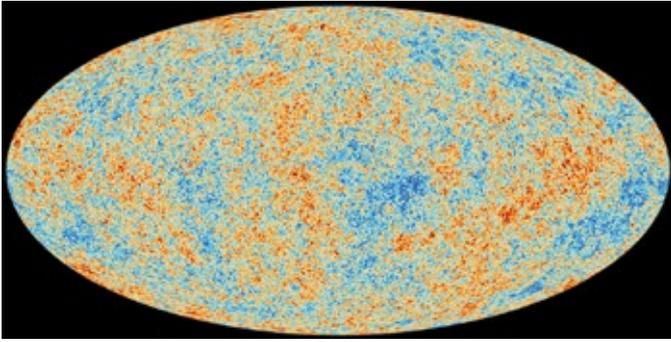


Fig 1b. La carte des fluctuations de la température du rayonnement cosmologique fossile autour de sa température moyenne (2,725 K) obtenue en analysant toutes les données de la mission Planck. Le satellite réalisait une carte complète du ciel en six mois dans 9 bandes spectrales distinctes. Ces observations multispectrales ont permis de séparer le rayonnement fossile des autres émissions et de mesurer sa température en tout point du ciel, sauf dans le plan galactique, trop brillant. Une extrapolation statistiquement conforme remplit les zones occupées par le plan galactique (la région médiane de l'image). (Crédits ESA/Planck Collaboration).

violents qui agitent notre atmosphère...

À de très rares exceptions près, l'observation depuis l'espace s'impose donc.

Quels sont alors les objectifs scientifiques principaux de l'observation astronomique dans ce domaine spectral ? On peut en distinguer deux principales catégories, illustrées par les figures 1a et 1b.

La première est liée à la nature du rayonnement qui domine l'émission, à savoir un rayonnement thermique de refroidissement émis par des poussières (des solides micro- et nanométriques). Ces poussières ont des origines diverses (enveloppes d'étoiles en fin d'évolution, éjecta de supernovæ, condensation dans les nuages interstellaires), et leur présence dans le milieu interstellaire permet d'y étudier des processus inaccessibles autrement. En effet, compte tenu de la densité d'énergie présente dans une galaxie (produite essentiellement par les étoiles), la température de cette poussière va d'une dizaine de kelvins (K) à plusieurs centaines de K, ce qui place son rayonnement de refroidissement principalement dans l'IR et le submm.

Le principal phénomène étudié est la formation des étoiles, qui débute par des processus de densification des nuages interstellaires, mal compris avant la mission Herschel, et se poursuit par un effondrement gravitationnel des régions les plus denses. Les observations du satellite Herschel ont mis en évidence une étape clé de ce processus, en révélant la présence systématique de réseaux de filaments de matière interstellaire dans les nuages, résultat combiné de la turbulence dans ces milieux diffus et du champ magnétique. Ce sont ces filaments qui abritent ensuite les cœurs d'étoiles en formation, et c'est en modélisant l'émission collectée (voir la section *reconstruction*) que l'on a pu remonter aux propriétés physiques des filaments et préciser leur origine.

La deuxième catégorie d'objectifs est liée à l'étude du rayonnement cosmologique fossile, cette lumière émise

lorsque l'Univers est devenu transparent il y a de cela pratiquement 13 milliards d'années, et que l'expansion a décalé spectralement pour la rendre aujourd'hui observable dans le domaine submm et au-delà. Le rayonnement fossile est observable du sol mais les précisions requises de nos jours pour en extraire des contraintes sur l'histoire et la nature de l'Univers sont telles qu'il n'est souvent pas possible de tolérer les incertitudes introduites par l'atmosphère. Il faut aussi préciser que cette mesure est loin d'être directe car le rayonnement fossile, s'il est bien présent sur tout le domaine spectral, n'est que très rarement l'émission la plus intense. Il faut passer par une série d'étapes combinant modélisation et acquisition de données à d'autres longueurs d'onde (en radio par exemple pour mesurer le gaz dans notre galaxie), pour séparer l'émission cosmologique de toutes les autres composantes. Les cartes de ce fond cosmologique qui ont fait la une des journaux lors de la mission Planck ne sont donc pas le résultat d'une simple captation du rayonnement infrarouge.

Revenons maintenant au cœur du sujet, la réalisation d'images.

Focalisation

Tous les objets astronomiques peuvent très exactement être vus comme des sources à l'infini, et la première étape de formation d'une image va donc être de construire des systèmes capables de collecter la plus grande quantité d'énergie en provenance de ces objets et de focaliser cette énergie sur une surface sensible.

Dans ce numéro, on trouvera des situations (dans les domaines X ou gamma) où cette étape est extrêmement complexe du fait de l'impossibilité de faire se réfléchir les photons sur des surfaces. Ce n'est pas le cas ici et les montages optiques tels que les télescopes réflecteurs déployés dans le domaine visible sont tout à fait adaptés à l'IR et au submm. Le défi principal est de faire en sorte que le télescope n'aveugle pas de son rayonnement propre le détecteur. En effet le télescope produit un rayonnement thermique et, suivant sa température, ce rayonnement peut être plus intense que celui des sources astronomiques. C'est pour cela que les satellites « infrarouges » ont déployé des stratégies de refroidissement de leurs télescopes (figure 2). Pour des diamètres inférieurs au mètre (IRAS, ISO, Spitzer), le télescope a pu être placé dans un cryostat qui en garantissait le refroidissement vers des températures inférieures à la dizaine de K (le rendant effectivement « invisible »), mais lorsque le diamètre ou la géométrie du montage optique empêchait la réalisation d'un cryostat (Herschel, Planck), le télescope a dû être protégé du chauffage solaire par des écrans qui descendent passivement la température vers les 50-80 K. À ces températures les surfaces sont lumineuses mais pas au point d'aveugler les détecteurs.



Fig.2. De gauche à droite et de haut en bas, des vues d'artiste des satellites ISO, Spitzer, Herschel et Planck, illustrant les différentes stratégies de refroidissement du télescope. Dans le cas d'ISO, le télescope est à l'intérieur du cryostat qui contient aussi les instruments situés derrière le miroir primaire. Dans le cas de Spitzer, il lui est connecté thermiquement et l'ensemble est isolé dans un système de tubes qui optimisent l'évacuation de la chaleur. Comme pour ISO les instruments sont eux dans le cryostat. Dans le cas d'Herschel, le télescope est aussi posé au-dessus du cryostat mais il ne lui est pas connecté. Le refroidissement du télescope de 3,5 m est uniquement passif du fait de l'ombre portée de l'écran solaire. Enfin pour Planck où le télescope doit être plus froid que celui d'Herschel, un système d'écrans enchâssés, dit en V-grooves, est positionné entre le télescope et le module de service et fait aussi écran aux rayons du Soleil situé « sous » le satellite dans cette représentation.

Détection

Détecter un rayonnement, c'est utiliser une interaction physique entre lumière et matière pour convertir certaines des propriétés de ce rayonnement en signal, généralement électrique, susceptible d'être transféré du

lieu de détection vers un lieu d'analyse. Ces propriétés peuvent être la longueur d'onde, la phase et l'amplitude de l'onde, l'énergie du photon, son temps d'arrivée... Dans le visible et le proche IR on utilise des matériaux semi-conducteurs ajustés pour que l'énergie des photons

fasse passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction et on compte les charges produites. Dans l'IR et le submm l'énergie des photons est plus faible et il n'existe pas de semi-conducteurs dont le gap entre les deux bandes soit assez étroit (et plus le gap¹ est petit et plus d'autres mécanismes que l'absorption d'un photon peuvent le faire franchir à un électron, ce qui va générer du bruit).

Dans le domaine IR et submm on a donc majoritairement recours à un autre type de détecteur, le bolomètre. Son principe est de mesurer l'élévation de la température d'un matériau suite à l'absorption d'un photon par quelque phénomène que ce soit. Par exemple, il peut s'agir de réseaux de petites antennes métalliques qui vont se coupler au rayonnement, et les mouvements excités dans le matériau vont produire une élévation de température. Pour mesurer cette élévation, on associe le matériau absorbant avec un matériau dont la résistance varie avec la température, le thermomètre, et à l'aide d'un circuit électrique, on mesure cette résistance. Pour que le bolomètre puisse suivre les variations de l'illumination, on connecte le thermomètre à un « bain » dont la température est maintenue constante. Ce type de détecteur est assez ancien : il a servi à mesurer l'énergie reçue du Soleil en 1881 par S. P. Langley. Depuis, ces détecteurs ont été raffinés et miniaturisés ce qui permet aujourd'hui d'en fabriquer des matrices, qui, installées au plan focal des télescopes, réalisent la détection des images. Cette technologie a cependant encore un certain nombre de limites qui introduisent des spécificités de l'imagerie dans le domaine.

Tout d'abord pour mesurer une élévation de température consécutive à l'absorption d'un photon IR ou submm, il faut que le matériau absorbant soit très froid. On parle ici de quelques dizaines de millikelvins, ce qui demande des systèmes de refroidissement extrêmement complexes et coûteux.

Ensuite, ce système mesure des variations et non des niveaux absolus de flux. Le problème de l'étalonnage (c'est-à-dire remonter du signal mesuré à la puissance émise par les sources) devient crucial pour bon nombre d'objectifs scientifiques, et il n'est pas simple car dans ce domaine nous disposons d'assez peu d'objets dont la luminosité soit parfaitement connue.

Enfin ces détecteurs sont souvent affectés de bruits de dérive (ou bruit à basse fréquence). Contrairement au bruit de photon (les fluctuations stochastiques de l'émission des sources) qui peut être combattu en augmentant le temps de pose des observations, ce bruit introduit une dé-corrélation des signaux mesurés qui augmente avec le temps : plus on augmente le temps de pose et plus le signal s'éloigne de la valeur mesurée dans les premiers instants.

¹ Dans les semi-conducteurs, on appelle gap la largeur de la bande interdite, laquelle est l'intervalle d'énergies situé entre la bande de conduction (état de plus basse énergie) et la bande de valence (état de plus haute énergie).

Pour combattre ce bruit il faut moduler le signal incident à une fréquence supérieure à celle du bruit, par exemple en utilisant un mode d'observation où le télescope balaye la scène à observer, en revenant à des instants différents de l'observation sur les mêmes régions de la scène (figure 3).

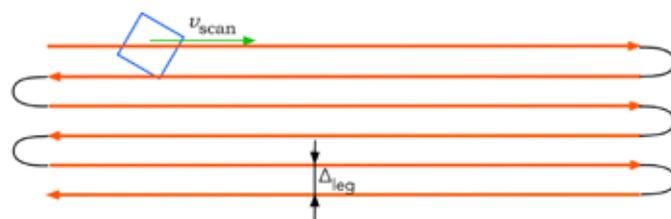


Fig.3. Schéma du mode d'observation en balayage : on utilise le contrôle d'attitude du satellite pour lui faire parcourir des aller-retours sur le ciel (trajectoire rouge), décalés d'une distance inférieure à une fraction de la taille du détecteur (Δ_{leg}), de telle sorte que les bandes de ciel couvertes successivement par le détecteur (représenté par le carré bleu) se recouvrent. Le satellite se déplace à une vitesse constante (V_{scan}) pour contrôler la transformation des fréquences spatiales de la scène en fréquences temporelles dans le signal.

Cette technique, propre au domaine IR et submm, sert aussi à compenser une autre particularité des détecteurs dans ce domaine : leur faible nombre de pixels. En optique, le standard actuel des CCD est de 4 000×4 000 pixels, et ils peuvent être joints pour réaliser d'énormes plans focaux : l'imageur visible du satellite Euclid comporte 36 CCD et a un champ de vue instantané de 0,5 degré carré. En IR et submm, cela ne fait qu'un peu moins de deux décennies que nos détecteurs ne sont plus réalisés pixel par pixel, et à l'heure actuelle, suivant la technologie, nos matrices de détecteurs contiennent au plus quelques milliers de pixels et les champs de vue sont de l'ordre de quelques minutes d'arc. Si l'on revient aux objectifs scientifiques principaux, on réalise que ces champs de vue sont bien plus petits que les objets d'intérêt. La technique de l'observation en balayage permet donc aussi d'observer de plus grandes zones du ciel que simplement le champ de vue imagé par le détecteur. On remarquera au passage que ce mode d'observation transforme le signal spatial de la scène en un signal temporel : la suite des points du ciel observés par chaque pixel au fil du balayage. Ce point n'est pas sans conséquences sur le traitement et la reconstruction de l'image.

Traitement

Au vu des images spectaculaires que chaque mission spatiale publie pour assurer sa notoriété, on peine à imaginer les étapes qui séparent le signal collecté de l'image finale. Pourtant, malgré le soin apporté aux détecteurs, le signal astrophysique est souvent perdu au milieu d'une multitude de sources perturbatrices. L'enjeu de cette étape va être de séparer ces composantes en affectant le moins possible celle qui nous intéresse.

Pour prendre l'exemple du bruit basse fréquence, la

séparation entre bruit et ciel peut se faire dans l'espace des fréquences, en annulant la puissance en dessous d'une fréquence seuil. Ce traitement va cependant affecter les grandes structures spatiales présentes dans le ciel (puisqu'avec l'observation en balayage elles ont été transformées en variations de basse fréquence temporelle). Un traitement plus optimal fait appel aux méthodes de résolution de problèmes inverses : via le mode d'observation en balayage, chaque point de la carte a été observé plusieurs fois, par une série de pixels, à différents instants de l'observation ; le bruit lui est l'addition d'un composant inconnu à chaque instant, mais dont le comportement statistique peut être contraint par des données d'étalonnage (on peut mesurer en laboratoire les propriétés de ce bruit). En introduisant ces contraintes dans un algorithme de minimisation, on peut calculer la carte du ciel la plus compatible avec les mesures et notre connaissance des propriétés du bruit en inversant l'équation qui relie le ciel observé au signal mesuré. La connaissance de la direction instantanée du pointage du satellite devient alors extrêmement importante et c'est pour cela que si les satellites d'observation en IR et submm ont des exigences de pointage absolu relativement faibles (peu importe que le satellite pointe exactement là où on lui demande), elles sont nettement plus grandes sur la connaissance du pointage réel (savoir où le satellite pointait effectivement).

Toujours dans les traitements, notons une autre particularité de l'observation spatiale : la nécessité de filtrer les impacts de particules (voir une illustration de ce phénomène sur la figure 4). En effet, au-delà de l'enveloppe protectrice offerte par l'atmosphère, nos détecteurs sont soumis à un bombardement de particules (électrons, noyaux atomiques). Quand ces particules frappent le détecteur leur énergie est convertie en chaleur et crée un signal parasite. L'observation avec des détecteurs bolométriques présente un certain avantage par rapport à l'observation avec des détecteurs de type CCD : ceux-ci se présentent comme des surfaces pleines et leur section efficace est assez grande, ce qui fait qu'ils interceptent une grande partie des particules. Avec les bolomètres l'absorption du rayonnement est souvent réalisée via une antenne en forme de grille très fine dont la taille de maille est une fraction de la longueur d'onde. Ce sont donc des détecteurs dont la section efficace aux particules est plus faible. Malgré cela, il n'est pas possible de reconstruire des images sans filtrer les impacts. Une méthode efficace repose à nouveau sur l'exploitation du mode d'observation : chaque point du ciel étant observé un grand nombre de fois il est possible de construire pour

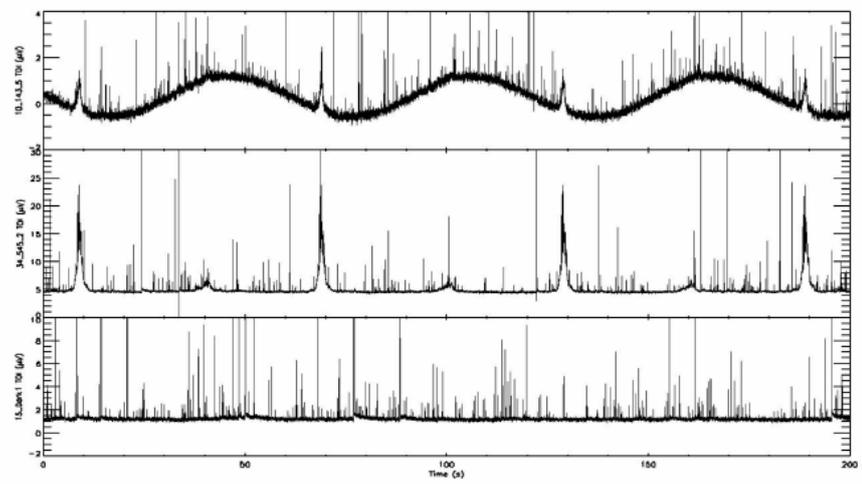


Fig.4. Signal brut enregistré par trois détecteurs de l'instrument HFI dans Planck, le signal du panneau inférieur provenant d'un détecteur «aveugle» c'est-à-dire ne recevant aucun photon du ciel. Sur ces données tous les pics sont des impacts de particules. Deux signaux astrophysiques sont observables à l'œil nu et sont périodiques du fait de la rotation du satellite : le dipôle cosmologique, une oscillation de grande amplitude du signal due au fait que le Système solaire n'est pas au repos dans le référentiel du rayonnement cosmologique fossile, et un pic large lui aussi périodique qui correspond au passage du plan galactique dans le champ de vue des détecteurs. Les fluctuations du rayonnement fossile sont, elles, indétectables avant traitement approfondi (figure tirée de Catalano et al. 2014, *Journal of Low Temperature Physics*, 176). On le voit, les impacts de particules doivent être corrigés si l'on veut avoir accès au signal d'intérêt scientifique.

chaque pixel du ciel la statistique des mesures obtenues en ce point. Les impacts de particules représentent un tel dépôt d'énergie qu'ils sont des points aberrants dans ces distributions et peuvent aisément être filtrés.

Dans ces exemples on remarque un élément caractéristique des méthodes les plus performantes de traitement : l'exploitation conjointe des propriétés connues du détecteur et des particularités du mode d'observation.

Reconstruction

Il s'agit maintenant de produire, à partir des séries temporelles générées par les pixels, traitées pour ne plus contenir que le signal en provenance des sources astronomiques, une image ou carte du ciel telle qu'on se la représente classiquement. Comme je l'ai dit plus haut, une image c'est la représentation d'une information et l'étape de reconstruction est en fait l'occasion de choisir quelle information représenter et de quelle façon. Même si l'on se contente de l'intensité mesurée en chaque point du ciel, il va falloir faire un choix : celui de coder chaque valeur de l'intensité par une couleur ou une gradation de couleur, car dans ce domaine, toute notion de couleur est arbitraire.

On peut aller plus loin car bien souvent la même observation est réalisée à différentes longueurs d'onde, par exemple en disposant plusieurs plans de détecteurs au foyer du télescope (ceci est justement possible car ils sont encore de petite taille, et donc chaque plan n'occupe qu'une fraction du champ offert par le télescope). Avec plusieurs longueurs d'onde on peut reconstruire des cartes en fausses couleurs (la couleur va coder la répartition de l'énergie reçue dans différentes bandes spectrales, comme sur la figure 1a) qui donnent une première

impression des variations spectrales observées dans le champ. Mais l'utilisation d'un modèle d'émission permet de relier les intensités mesurées dans les différentes bandes spectrales à la température et à la densité du milieu observé. On en arrive donc à produire des cartes contenant des informations directement interprétables scientifiquement (comme sur la figure 1b). Bien entendu plus la reconstruction des images s'appuie sur un modèle et plus il sera important d'évaluer les incertitudes liées aux simplifications et approximations apportées par le modèle. Les images reconstruites s'accompagnent alors de cartes d'incertitude (qui sont rarement diffusées au-delà des publications scientifiques).

Conclusion

La réalisation d'images telles que le grand public peut les concevoir est un fait relativement récent dans le domaine IR et submm, puisqu'on peut dire que ce n'est qu'à partir des satellites ISO (1995), Spitzer (2003) et Herschel (2009) qu'elle a réellement pris corps, à la suite du développement de matrices de détecteurs dans ce domaine. Les exigences de ces détecteurs, en particulier

le besoin de cryogénie, font que la maturation des technologies est lente et que les détecteurs sont encore à l'état de prototype. De ce fait la production d'images est un processus dont la complexité est encore apparente contrairement à ce qui peut maintenant être le cas dans le visible (bien qu'elle y soit présente mais bien plus sous contrôle et son traitement intégré à la chaîne de production du signal). Mais en travaillant sur cette complexité avec des méthodes avancées, l'opportunité se présente aussi d'aller au-delà de la simple production d'une image, vers une représentation d'informations plus directement exploitables pour nos objectifs scientifiques. ■