

# LE RAYONNEMENT THERMIQUE EN ASTROPHYSIQUE

**Marc Sauvage**

CEA/DRF/Irfu/Département d'Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
marc.sauvage@cea.fr



**Le rayonnement thermique est une source décisive d'informations pour une science de l'observation comme l'astrophysique. Dominant dans l'infrarouge lointain, il est difficile à mesurer, et nécessite le développement de détecteurs innovants et de techniques cryogéniques de pointe. Mise en œuvre à bord de satellite depuis 40 ans, la mesure du rayonnement thermique a permis de nombreuses découvertes liées à la formation stellaire et à l'évolution des galaxies.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202010541>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

©ESA/Herschel/PACS, SPIRE/Hi-GAL Project - Acknowledgement: G. Li Causi, IAPS/INAF, Italy

**L**e rayonnement d'origine thermique, résultant d'une émission de type corps-noir, éventuellement modifiée par une émissivité spécifique, constitue l'essentiel de l'information qui nous provient de l'espace. Il suffit par exemple de réaliser que la plus grande fraction de l'émission des étoiles est un processus thermique lié à la température de surface des étoiles, ou de se souvenir que le rayonnement du fond cosmologique est fort justement décrit comme celui d'un corps noir à 2.7 K, vestige de l'émission thermique du plasma qui remplissait l'Univers au moment de la dernière recombinaison. Évidemment, le spectre de tout objet astrophysique présente

en général une grande somme de raies atomiques ou moléculaires extrêmement importantes pour comprendre la physique de ces objets, mais ces motifs ne contribuent en général que peu à l'énergie totale émise par ces différentes sources. Le processus d'émission thermique est donc d'une importance majeure en astrophysique.

Cela dit, comme souvent en astrophysique, des termes apparemment génériques sont utilisés dans une acception plus restreinte, et c'est le cas du rayonnement thermique, qui est très souvent un raccourci pour rayonnement thermique infrarouge. Et c'est bien dans cette acception restreinte que cet article est rédigé. Pour préciser encore les termes, le domaine infrarouge dont nous

parlons s'étend approximativement de 50  $\mu\text{m}$  à 500  $\mu\text{m}$  (le rayonnement de fond cosmologique est donc plutôt situé dans le domaine millimétrique et submillimétrique, il a d'ailleurs été découvert avec une technologie issue de la radio).

## SOURCES DU RAYONNEMENT THERMIQUE

L'objet astronomique à l'origine de la quasi-totalité du rayonnement thermique infrarouge ne mesure que quelques  $\mu\text{m}$  ou dizaine de microns et porte un nom assez peu spécifique : la poussière interstellaire. Celle-ci est composée essentiellement de carbone et de silicium, dans des états parfois cristallins mais souvent amorphes, sous forme de grains qui peuvent être recouverts de ●●●

manteaux de glace ou de composés organiques. Anecdote du point de vue de la quantité de matière qu'elle représente (dans une galaxie comme la nôtre, la poussière interstellaire constitue au mieux 1/1000<sup>ème</sup> de la masse lumineuse, c'est-à-dire la masse qui peut être mesurée par le biais de son émission, au contraire de la matière noire, plus abondante, mais mesurable uniquement par son action gravitationnelle), la poussière interstellaire tire son importance de deux propriétés principales: d'une part, en évoluant à des températures situées entre la dizaine de K et 1500 K (température de sublimation), elle produit un rayonnement thermique qui couvre un vaste domaine du spectre électromagnétique, et d'autre part elle se trouve intimement mêlée à un grand nombre d'objets et de processus astrophysiques dont son émission constitue parfois l'unique trace.

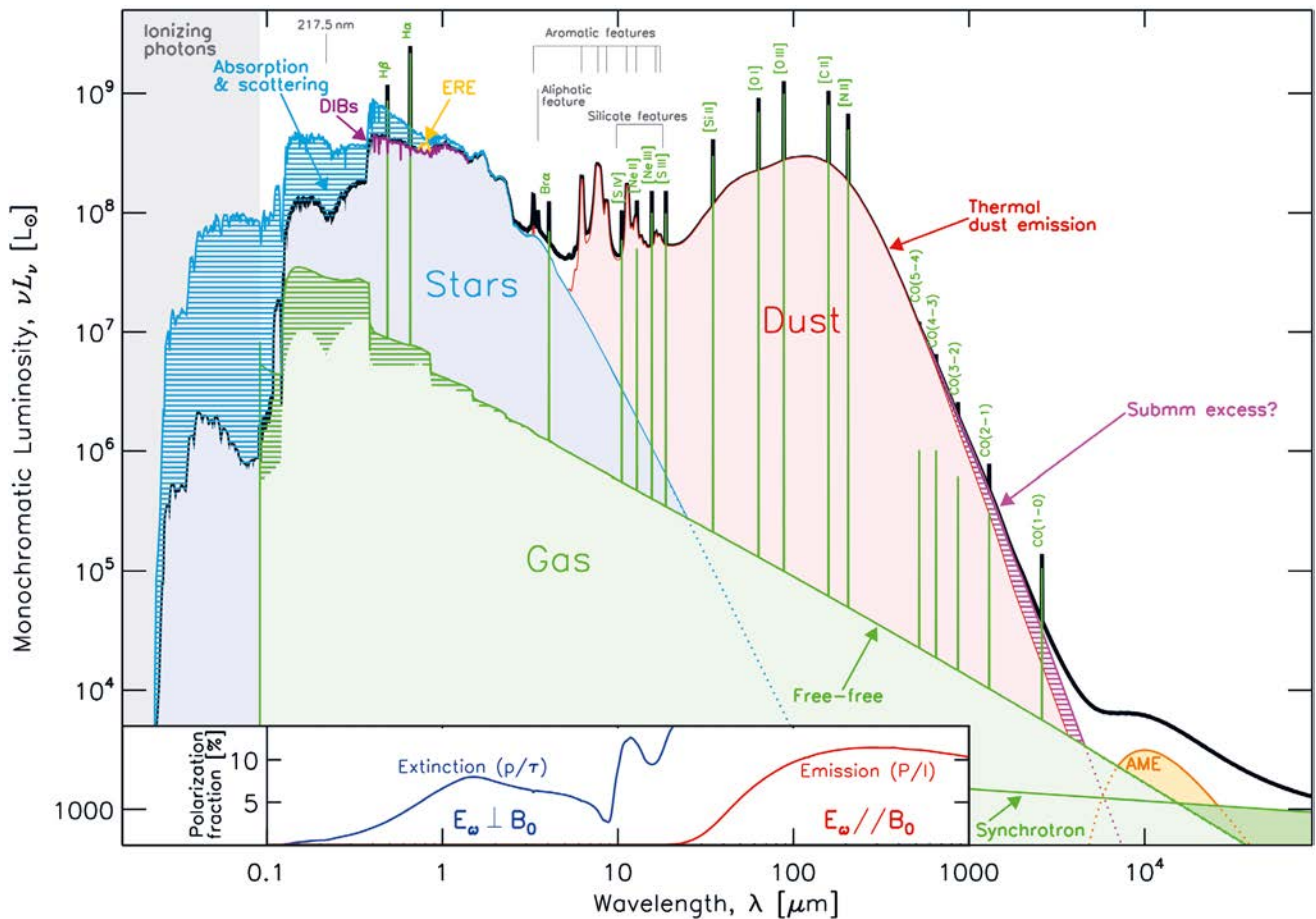
Tous les objets associés au processus de formation des étoiles et des planètes peuvent être étudiés grâce à l'émission thermique de la poussière interstellaire. Pour partir du plus vaste, la poussière est bien entendue présente dans les grands nuages de gaz dont l'effondrement engendre les nouvelles générations d'étoiles, et c'est *via* l'observation de la poussière qu'a été mise en évidence une étape clef

**Figure 1.**

Un modèle du spectre standard d'une galaxie montrant l'importance du rayonnement thermique: sur la droite de la figure, l'émission de la poussière ("dust") dont la majeure partie est une émission strictement thermique. Le grand massif sur la gauche ("stars") correspond à l'émission cumulée des étoiles. Si la source de cette énergie est la fusion thermonucléaire, le processus d'émission de l'énergie collectée est lui aussi thermique comme le montre l'allure générale du spectre. © F. Galliano, CEA/CNRS, communication privée.

de la formation des étoiles : la structuration des nuages interstellaires en réseau de filaments. Cette structuration universelle, visible sur la figure 2, découverte par le satellite, Herschel tire vraisemblablement son origine de processus turbulents dans lesquels gravité et champ magnétique entretiennent des rapports complexes. Elle constitue le premier pas vers la formation de régions denses et massives dans lesquelles les protoétoiles apparaissent. Du fait de la quasi-absence de source d'énergie dans ces nuages, les températures qui y règnent sont autour de 10 K ce qui fait de l'émission thermique des poussières un outil idéal pour sonder la matière.

C'est l'occasion de signaler un autre intérêt du rayonnement thermique infrarouge, à savoir sa capacité à traverser de grandes quantités de matière sans être absorbé, ce qui nous permet de recueillir des informations en provenance d'objets enfouis dans





la matière comme justement les protoétoiles. En effet, ces étoiles en formation sont tellement enfouies dans leur cocon de matière que seul le rayonnement thermique de la poussière chauffée par la dissipation de l'énergie gravitationnelle nous parvient. C'est grâce à ce rayonnement que l'on a pu identifier que les étoiles naissent le plus généralement dans des systèmes multiples, mais surtout, en combinant rayonnement thermique et interférométrie, que l'on a découvert les disques qui les entourent, par lesquels transite la matière avant de s'accumuler sur l'étoile, et dans lesquels se forment les planètes que l'on observe aujourd'hui par milliers autour d'étoiles plus évoluées, sorties de leurs nuages natals.

### OBSERVER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Comme nous l'avons dit la physique de ce rayonnement est simple, c'est celle de l'émission du corps noir. Il va donc de soi que lorsque l'on place un détecteur infrarouge au foyer d'un télescope, celui-ci va certes recueillir le rayonnement infrarouge en provenance de l'univers lointain, mais aussi celui de tout objet situé sur la ligne de visée dont la température est telle que son émission thermique couvre le domaine infrarouge. Pour les observatoires au sol, le premier de ces objets est bien entendu l'atmosphère, en général plus d'un million de fois plus brillante que le plus brillant des objets astrophysiques, mais il faut aussi compter parmi les perturbateurs les miroirs de télescope

**Figure 2.**

Nuages de formation d'étoiles dans la région Vela C dans notre galaxie, cartographiés par Herschel. La couleur code la température, avec en bleu les régions les plus chaudes, où de jeunes étoiles sont en train de disperser leur cocon de matière interstellaire, et en rouge des filaments de poussière plus froids où sont en train de se condenser les futures générations d'étoiles. ©ESA/PACS & SPIRE Consortia, T. Hill, F. Motte, Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/IRFU – CNRS/INSU – Uni. Paris Diderot, HOBYS Key Programme Consortium.

**Figure 3.**

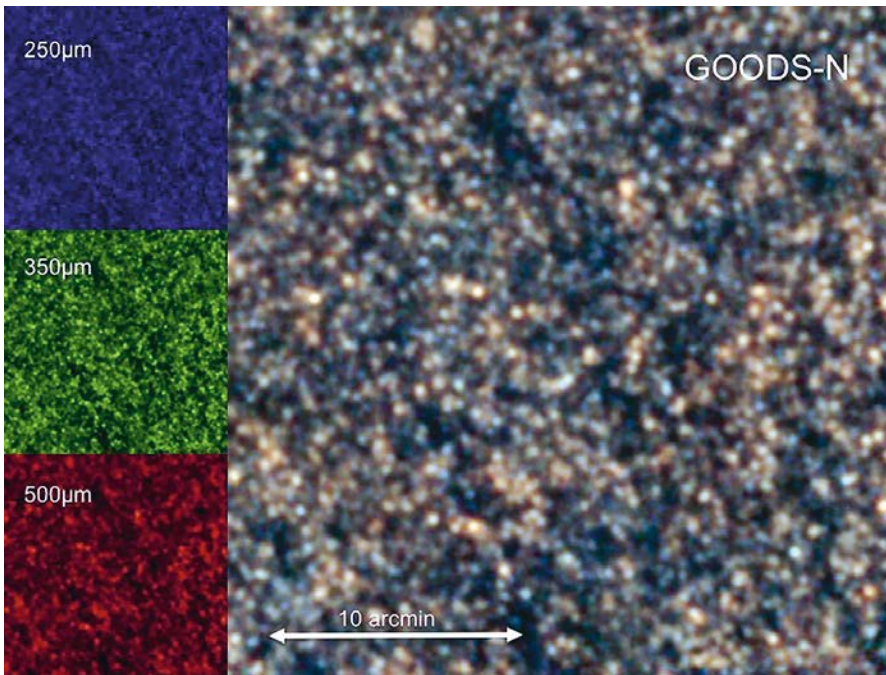
Représentation numérique du James Webb Space Telescope une fois déployé et opérationnel. Au premier plan les 5 voiles déployées (en rose sur cette figure) constituent le système d'écran en V-grooves qui protège le télescope du rayonnement solaire et permet de le maintenir à une température de 40 K en optimisant la réjection du rayonnement à l'opposé du miroir. © Northrop Grumman.

ainsi que tous les éléments optiques (miroirs, filtres...) que contient tout instrument de mesure.

Pour ces raisons, même si les premiers développements de l'observation du rayonnement thermique ont été réalisés au sol, très rapidement le spatial, ou l'aéroporté (télescope embarqué dans un avion) sont devenus des techniques de choix pour ce domaine de l'astrophysique. L'environnement spatial apporte d'emblée deux éléments clés pour le domaine infrarouge. D'une part l'absence d'atmosphère permet une bien meilleure stabilité, de longues séquences d'observations et donc la capacité de cartographier des grandes zones du ciel (ce que la forte variabilité temporelle de l'atmosphère interdit). D'autre part, la température d'équilibre dans l'espace au niveau de l'orbite terrestre (environ 150–200 K suivant l'orientation par rapport au soleil) vient déjà diminuer l'émission thermique des objets techniques nécessaires à l'observation.

Mais ces faibles températures ne suffisent pas à assurer des conditions optimales d'observation dans le domaine infrarouge et toutes les missions spatiales infrarouges ont déployé un vaste ensemble de techniques cryogéniques pour refroidir encore plus les éléments clés (télescope, instruments). Celles-ci se ●●●





divisent en deux branches, passives et actives. Les techniques passives consistent à optimiser le refroidissement par rayonnement du satellite au moyen d'écrans interposés entre les éléments clefs du satellite et le soleil, en jouant sur les propriétés d'absorption et de réflexion des matériaux ainsi que sur la géométrie 3D des écrans pour maximiser les pertes thermiques. Un exemple tout à fait spectaculaire de cette stratégie est le JWST avec sa structure déployable d'écrans qui permet d'atteindre pour le télescope de 6 m de diamètre une température de 40 K.

Pour atteindre des températures plus basses (et on verra que les détecteurs les plus sensibles nécessitent des températures inférieures au K), l'observation spatiale infrarouge demande d'embarquer des systèmes cryogéniques actifs. Le plus simple d'entre eux est évidemment le cryostat et, par exemple, l'observatoire spatial Herschel a embarqué un cryostat de 2000 L d'hélium liquide pour maintenir ses instruments à une température aux alentours de 2 K par la vaporisation contrôlée de l'hélium. La suite de la descente en froid est en général assurée par des

**Figure 4.**

Une image d'un champ profond observé par l'instrument SPIRE du satellite. Sur cette image, dont la taille angulaire correspond à peu près à celle de la pleine Lune, chaque point est une galaxie distante. Par effet de décalage spectral dû à l'expansion de l'univers, les sources les plus rouges correspondent aux galaxies les plus distantes. C'est en analysant ce type d'images que l'on a pu établir l'histoire des galaxies sur pratiquement les 2/3 de la durée d'existence de l'Univers. © ESA/SPIRE Consortium/HerMES Key Programme Consortium.

machines à cycle fermé, comme dans le cas d'Herschel un cryo-réfrigérateur développé au CEA.

La cryogénie est donc une technique essentielle pour l'observation infrarouge, et avec le développement de détecteurs innovants, l'un des postes les plus critiques du développement d'un satellite infrarouge, du fait des contraintes de poids, de puissance qui limitent les capacités des systèmes, et de la difficulté de gérer les problèmes de thermique dans le vide. Jusqu'ici tous les observatoires spatiaux infrarouges ont eu une durée de vie limitée par la quantité de fluide cryogénique qu'ils ont pu emporter pour assurer les premiers

« étages » du refroidissement (la masse totale du satellite étant, elle, limitée par la capacité du lanceur). Par exemple l'observatoire Herschel a eu une durée de vie de 4 ans, quand des observatoires dans le domaine X, dont le seul consommable est le gaz qui sert à manœuvrer le satellite, peuvent avoir des durées de vie de plusieurs décennies. Étant donné l'investissement conséquent que représente une mission spatiale (plus d'un milliard d'euros pour Herschel), maximiser la durée de vie des satellites infrarouges représente un intérêt considérable et c'est pour cela que des systèmes en cycle fermé sont aujourd'hui activement développés.

### DÉTECTER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Dernier intermédiaire dans l'observation du rayonnement thermique, ou premier suivant le point de vue que l'on choisit d'adopter : le détecteur. Un grand nombre de technologies ont été développées pour mesurer le rayonnement infrarouge thermique mais la complexité de cette tâche vient du fait qu'aux alentours de 50–100 µm, la technologie des photoconducteurs a cessé d'être efficace, alors que les technologies radios, et en particulier la détection hétérodyne, ne sont pas encore capables de prendre le relais. C'est pour cela que la technique privilégiée est celle du bolomètre. En peu de mots, un bolomètre est un détecteur où l'on utilise l'élévation de la température d'un matériau consécutive à l'absorption du rayonnement pour mesurer la puissance de ce rayonnement. Pour mesurer ces élévations de température, le bolomètre est en général une résistance variable avec la température que l'on place dans un circuit pour pouvoir transformer les variations de température en variations de tension. Cette résistance doit aussi être connectée à un bain thermique pour que la puissance absorbée puisse être évacuée et éviter que le bolomètre ne sature. Évidemment, puisque l'on parle de puissance absorbée dans

le domaine infrarouge, les quantités d'énergie portées par les photons sont extrêmement faibles, et c'est pour cette raison que les détecteurs eux-mêmes doivent être maintenus à des températures proches du zéro absolu, typiquement entre 50 et 300 mK.

Les deux instruments d'imagerie à bord d'Herschel, SPIRE et PACS, fonctionnaient avec des bolomètres, comme l'instrument HFI à bord du satellite Planck.

Il existe plusieurs types de bolomètres qui se distinguent principalement par la technologie utilisée pour réaliser l'élément dont les propriétés vont varier avec la température. Un des moyens de réaliser un « thermomètre » très sensible est de le réaliser dans un matériau supraconducteur à très basse température (c'est la lignée technologique des Transition Edge Sensors). En maintenant ce thermomètre à une température proche de sa transition, l'absorption d'une très faible quantité d'énergie suffit à faire sortir le matériau de son état supraconducteur et donc faire varier très sensiblement sa résistance. Évidemment la mise en œuvre de ces technologies de détection est bien plus complexe que ces quelques lignes de description, ce qui fait des « caméras » qui ont équipé les satellites infrarouges et submillimétriques des chefs-d'œuvre de technologie.

### UN RÉSULTAT SCIENTIFIQUE MAJEUR

Il y a évidemment une injustice flagrante à ne retenir de presque 40 ans d'exploration spatiale de l'émission infrarouge thermique qu'un seul résultat obtenu par le dernier représentant en date de cette lignée, le satellite Herschel, mais l'exhaustivité est bien entendu inatteignable, et le lecteur intéressé pourra par exemple consulter le document produit par l'ESA à la fin de la mission Herschel (<https://sci.esa.int/web/herschel/-/61336-herschel-science-and-legacy-brochure>).

Ce résultat concerne l'évolution des galaxies. Pour l'astrophysicien, étudier l'évolution des galaxies c'est établir l'histoire de la formation des étoiles dans les galaxies, ainsi que recenser les populations de galaxies (par type, taille ou masse) au fil du temps.

Comment l'émission thermique des poussières interstellaires se retrouve-t-elle associée à ce genre d'étude ? La raison profonde est que la poussière interstellaire agit un peu comme un calorimètre pour les galaxies : diffuse dans toute la galaxie, elle absorbe une partie du rayonnement produit par les étoiles, et sa luminosité est en quelque sorte une mesure de l'intensité de ce rayonnement, et donc de la population stellaire de la galaxie. Comme celle-ci, aux échelles de temps considérées, est dominée par les étoiles jeunes et massives, à l'échelle des galaxies, le rayonnement de la poussière est statistiquement un bon indicateur du taux de formation d'étoiles. Ainsi le satellite Herschel a procédé à des cartographies profondes de l'univers, détectant les galaxies dont l'émission se produisait alors que l'Univers n'avait qu'une fraction de son âge actuel. Ces études ont permis d'établir avec certitude que l'époque du maximum d'activité de formation d'étoiles dans l'univers a été atteinte il y a environ 10 milliards d'années, mais surtout, grâce à la capacité d'Herschel à distinguer des détails fins, que même à cette époque, la plus grande partie des étoiles se formaient dans des galaxies où les conditions physiques étaient proches de celles qui règnent actuellement dans la Voie Lactée, et non au sein de quelques grandes collisions de galaxies comme on le pensait jusque dans les années 2000.

### CONCLUSION

Quatre décennies de collecte et d'interprétation des informations transportées par le rayonnement thermique infrarouge en provenance de l'Univers nous ont permis une compréhension fine des processus de formation des étoiles, des planètes, et de l'évolution des galaxies. Mais comme bien souvent en recherche, la compréhension ouvre sur de nouvelles questions, et pour cela il nous faudra affiner nos moyens d'étude, par exemple en augmentant la résolution spatiale à l'aide de plus grands miroirs ou d'interféromètres, ou en exploitant d'autres propriétés de l'émission thermique comme sa polarisation, intimement liée à la présence de champ magnétique dans les objets astrophysiques, lui-même au cœur de la structuration de la matière dans l'Univers. ●

Laser Optics  
When Size Matters



Large custom laser optics with highest damage threshold.