

Observer l'univers froid grâce aux infrarouges

Frédéric Pitout et Charlotte Vastel, Observatoire Midi-Pyrénées, Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse.

L'observation des infrarouges constitue un pan entier de l'astronomie au sol et spatiale moderne. Ces rayonnements nous permettent d'accéder à l'univers que l'on qualifie de « froid ». Dans cet article, nous proposons de voir l'expérience qui a permis leur découverte, de proposer quelques activités et d'évoquer quelques applications en astronomie.

Découverte des infrarouges et expériences simples de mise en évidence

Comme leur nom l'indique, les infrarouges se trouvent en-dessous du rouge. Dans le spectre électromagnétique ils correspondent à des ondes électromagnétiques de fréquences plus basses ; ou de manière équivalente à des longueurs d'onde plus longues, de 780 nm à environ 1 mm dans le vide typiquement (la limite haute peut varier de 0,1 à 5 mm selon les conventions). C'est donc un domaine nettement plus vaste que le domaine visible.

Détecter les infrarouges avec un thermomètre, l'expérience d'Herschel

Le rayonnement infrarouge a été mis en évidence en 1800 par William Herschel. On l'appelait « chaleur radiante » à cette époque ; ce n'est que plus tard qu'on montra que ce n'était qu'une onde électromagnétique comme les autres et qu'on lui donna son nom actuel : infrarouge.



Fig.1. Peinture montrant William Herschel, son expérience qui le conduisit à la découverte des infrarouges et en arrière-plan, le télescope de 40 pieds qu'il construisit.

Mais arrêtons-nous un instant sur la personne de William Herschel. Né Friedrich Wilhelm Herschel en 1738 à Hanovre, William Herschel était un professeur de musique et compositeur installé à Bath en Angleterre. Astronome amateur, il se lança dans la construction d'instruments d'observation. Ses télescopes et lunettes étaient d'une qualité telle qu'il se fit une belle renommée et fut engagé comme astronome royal par George III d'Angleterre. En 1789, il achève la construction de son célèbre télescope de 40 pieds de focale (12 m environ) dont le miroir primaire à un diamètre de 1,2 m, le plus grand de l'époque. Il est à l'origine de la découverte d'Uranus et deux de ses satellites, Obéron et Titania, des calottes polaires de Mars et des satellites saturniens Mimas et Encelade. Notons que sa sœur Caroline, aussi astronome de talent, l'aidera dans la plupart de ses travaux et contribua aux découvertes qu'ils firent ensemble.

Herschel fit une autre découverte historique, celle du rayonnement infrarouge (figure 1), avec des moyens très rudimentaires. C'est une expérience simple à mettre en œuvre, elle ne nécessite que peu de matériel de base :

- un prisme (en verre, car le plexiglass bloque les infrarouges) pour disperser la lumière ;
- des thermomètres pour mesurer la température correspondant à chaque couleur ;
- un carton assez profond.

Pratiquement, l'idéal est de disperser la lumière solaire dans une zone d'ombre pour que le spectre soit bien visible et pour bien l'isoler de la lumière directe du Soleil. Une possibilité est d'utiliser un carton suffisamment profond, de former un spectre au fond du carton et d'y mesurer la ou les températures (figure 2). On pourra fixer le prisme sur le haut d'un bord du carton en y taillant un espace au cutter. De même, pour insérer horizontalement le ou les

thermomètres au fond du carton, on pourra être amené à tailler le fond du carton sur un de ses bords.

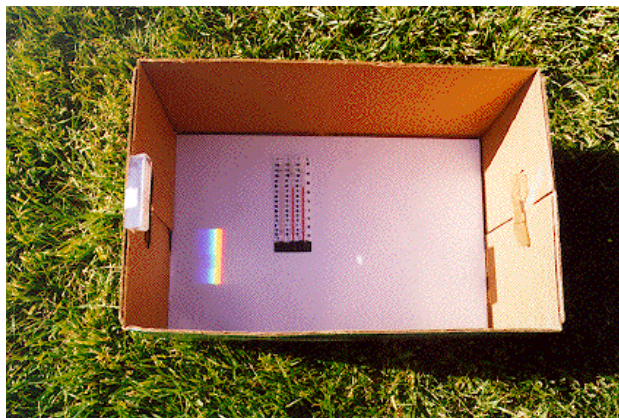


Fig.2. Dispositif expérimental pour la mesure des températures de chaque couleur du spectre lumineux (photo : CalTech).

Après avoir mis les thermomètres au fond du carton – à l’ombre du Soleil – et relevé les températures qu’ils indiquent, on les place chacun sur une couleur dispersée par le prisme. On attend quelques minutes et qu’observe-t-on ? Tout comme Herschel il y a plus de 200 ans, on constate que les thermomètres indiquent des températures supérieures à celles mesurées à l’ombre et différentes selon la couleur sur laquelle ils sont placés. Mais c’est le thermomètre que l’on aura placé au-delà du rouge visible qui nous intéresse. De manière tout à fait inattendue, il mesure aussi une augmentation de température, ce qui trahit la présence d’un rayonnement en dehors du domaine visible. Il se trouve même qu’il indique la température la plus élevée ! Ce dernier point ne veut évidemment pas dire que les infrarouges sont plus énergétiques que les autres couleurs (c’est même précisément l’inverse en vertu de l’expression $E = h\nu$, où E représente d’énergie du photon en joule, h la constante de Planck en $J.s$ et ν la fréquence en hertz). Pour expliquer ce phénomène a priori contre intuitif, il faudrait connaître la courbe de transmission du verre utilisé (on verrait entre autres chose qu’il bloque en grande partie les ultraviolets, les rayonnements les plus énergétiques) ; il faudrait aussi voir quelles longueurs d’onde interagissent le plus avec les molécules d’alcool qui remplissent les thermomètres.

Détection des (proches) infrarouges d’une télécommande

La plupart des télécommandes de télévision par exemple transmettent les informations grâce à une diode qui émet dans le proche infrarouge, entre 800 et 1 000 nm. Notre œil ne voit pas ces signaux mais les capteurs CCD de nos appareils photo ou smartphones, qui sont sensibles à un domaine plus

large que le visible, peuvent les détecter. On peut donc mettre en évidence les infrarouges émis par la télécommande en appuyant sur n’importe lequel de ses boutons et en regardant à travers l’écran d’un smartphone en mode photo (figure 3).

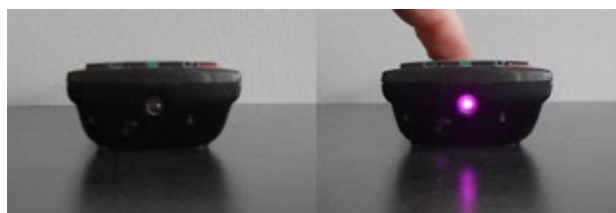


Fig.3. Le faisceau infrarouge d’une télécommande de télévision est invisible pour l’œil humain mais détecté par un appareil photo numérique.

Caméra thermique

Un moyen plus coûteux de mettre en évidence les infrarouges est d’utiliser une caméra thermique (remarquons que les lycées technologiques possèdent généralement ce genre de caméra ; on doit pouvoir la leur emprunter.) Ces caméras sont sensibles aux infrarouges de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres de longueur d’onde, qui correspondent à l’émission de corps de températures qui nous sont familières (d’où le qualificatif « thermique »). Tout ce qui émet de la chaleur sera donc détecté par la caméra, c’est-à-dire tout ce qui nous entoure !

Un petit rappel sur la loi de Wien s’impose peut-être : le maximum d’émission d’un corps noir se fait à une longueur d’onde λ_{\max} qui ne dépend que de la température du corps : $\lambda_{\max} \text{ (m)} = 2,898 \times 10^{-3} / T \text{ (K)}$.

Le corps humain, censé être à une température de 37 °C, c.-à-d. 310 K, émet selon cette loi un rayonnement électromagnétique dont le maximum d’émission a une longueur d’onde d’environ 9 μm , dans l’infrarouge donc. Une première expérience peut donc consister à faire l’obscurité totale dans une pièce et constater que toutes les personnes présentes sont détectées en infrarouge (figure 4).

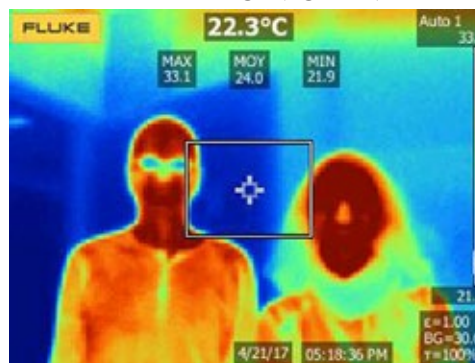


Fig.4. Les auteurs de cet article pris par une caméra thermique.

Nous émettons donc bien de cette *lumière* invisible que sont les infrarouges. On peut dès lors s'amuser à détailler les différences de température en identifiant les parties plus chaudes (couleurs vives) et plus froides (couleurs sombres) de notre corps.

Ensuite, on peut mettre en évidence des propriétés intéressantes des infrarouges.

Une cuve en plexiglass, transparente dans le domaine visible, est quasiment opaque aux infrarouges auxquels est sensible la caméra (haut de la figure 5).

À l'opposé, une main dans un sac poubelle noir est vue par la caméra thermique : le sachet noir, opaque en lumière visible, est donc parfaitement transparent en infrarouge (bas de la figure 5).

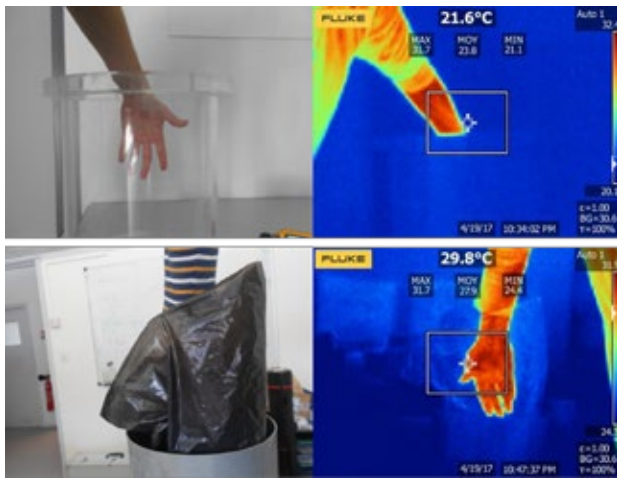


Fig.5. Main dans une cuve en plexiglass (en haut) et dans un sac poubelle noir (en bas) vue par un appareil photo numérique standard (à gauche) et par une caméra thermique (à droite).

Une plaque de métal quelconque agit comme un parfait miroir en infrarouge (figure 6) tant que les aspérités de surface sont inférieures à $\sim \lambda/10$ (où λ représente la longueur d'onde). Étant donné leur grande longueur d'onde, les infrarouges ne nécessitent pas de miroirs parfaitement polis comme pour la lumière visible pour être réfléchis.

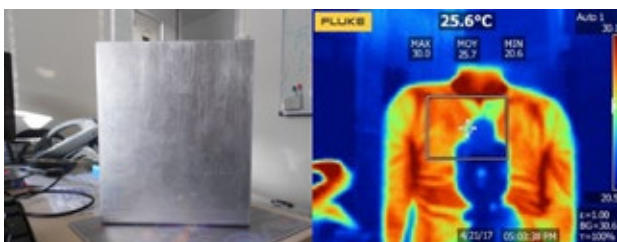


Fig.6. Plaque d'aluminium vue par un appareil photo numérique (à gauche) et par une caméra thermique (à droite).

L'astronomie infrarouge

Quel est l'intérêt des infrarouges en astronomie ?

Si on reprend la loi de Wien évoquée plus haut, on constate que les corps qui émettent le maximum de

rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge ont des températures de l'ordre de quelques centaines de kelvins. En astrophysique, les observations en infrarouge permettent donc d'observer l'univers « froid ». C'est le cas des planètes qui, en plus du rayonnement solaire ou stellaire qu'elles réfléchissent, émettent en infrarouge (figure 7).

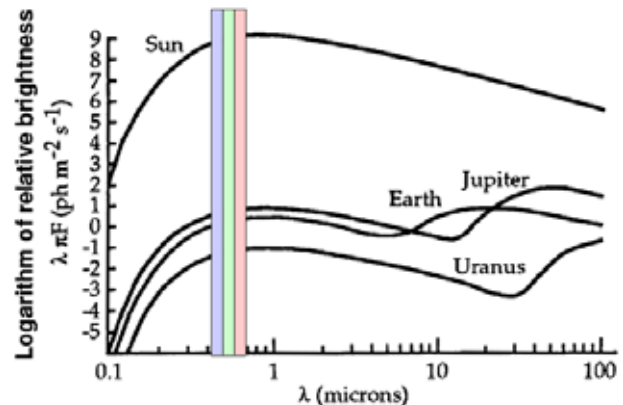


Fig.7. Spectres électromagnétiques schématisés du Soleil et de trois planètes du Système solaire. Pour les planètes, on voit la composante réfléchie de la lumière solaire, dans le visible, et la composante émise par les planètes elles-mêmes, dans l'infrarouge.

On constate d'ailleurs que la détection d'exoplanètes est rendue plus facile dans l'infrarouge que dans le visible grâce au contraste plus favorable dans ce domaine : une étoile est moins brillante dans le domaine infrarouge alors qu'une planète émet son propre rayonnement dans ce même domaine. Pour mettre à profit cette propriété, des détecteurs infrarouges dédiés à la détection d'exoplanètes sont mis en service. C'est le cas du spectropolarimètre infrarouge SPIrou (<http://spirou.irap.omp.eu/>) qui est installé depuis 2018 sur le *Canada-France Hawaii Telescope* (CFHT), télescope de 3,6 m de diamètre implanté sur le sommet du Mauna Kea sur la Grande Île d'Hawaii. SPIrou commence à donner ses premiers résultats.

Toujours concernant les planètes, il se trouve que le domaine infrarouge correspond à des transitions moléculaires de nombreuses molécules comme le dioxyde de carbone et le méthane par exemple, présentes dans l'atmosphère des planètes. Observer une planète comme Jupiter qui possède du méthane dans son atmosphère avec un filtre étroit autour de 889 nm (dans le proche infrarouge) laisse passer une bande du méthane et permet donc de repérer où le méthane se concentre.

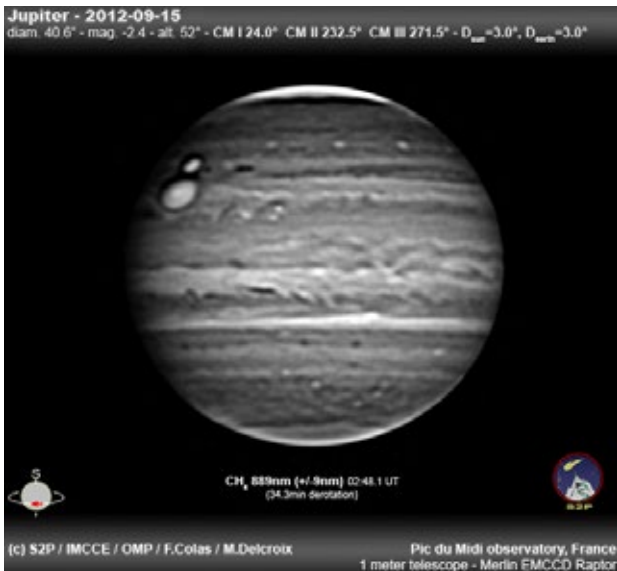


Fig.8. Image de Jupiter à travers un filtre étroit autour de 889 nm qui correspond à une transition moléculaire du méthane (Crédit : S2P/IMCCE/OMP/F. Colas/M. Delcroix).

Le milieu interstellaire, les nuages moléculaires ainsi que les disques protoplanétaires sont des cibles favorites des instruments sensibles aux infrarouges. Comme les expériences menées plus haut, des milieux comme un nuage moléculaire et de poussières peuvent être opaques en lumière visible et transparents en infrarouge. En effet, le rayonnement visible est complètement absorbé par les grandes quantités de poussières sur la ligne de visée, notamment les nuages moléculaires dans lesquels se forment les cœurs pré-stellaires, embryons des systèmes planétaires comme notre Système solaire. La lumière visible est absorbée par les poussières qui réémettent dans le domaine infrarouge. L'infrarouge permet donc de sonder l'intérieur de ces nuages (figure 9), mais aussi les étoiles en arrière-plan, et donc de sonder les premières étapes de la formation stellaire, enfouies dans leur cocon de gaz et de poussière.

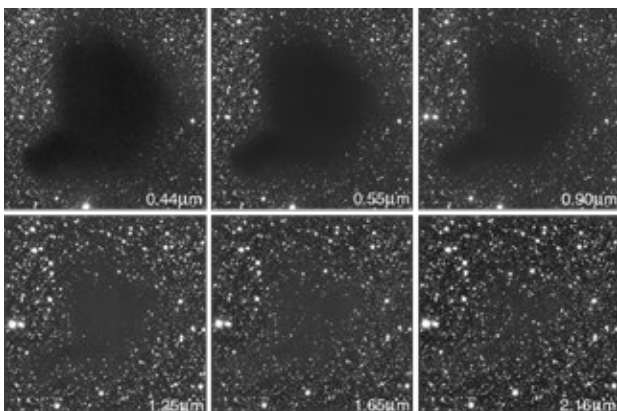


Fig.9. Le nuage moléculaire Barnard 68 observé par le VLT à plusieurs longueurs d'onde du visible à l'infrarouge moyen. (Crédit : ESO).

Observer l'univers en infrarouge

L'observation des infrarouges venus de l'univers est difficile à mener depuis le sol parce que le ciel est opaque à de nombreuses bandes infrarouges et que le bruit de fond est partout : l'air, les bâtiments, tout est source de rayonnement infrarouge dans notre environnement. En plus de ce bruit de fond, il faut refroidir les détecteurs à des températures extrêmement basses pour éviter qu'ils ne détectent leur propre rayonnement thermique et qu'ils ne se polluent eux-mêmes ! Des télescopes optiques peuvent être pourvus de détecteurs infrarouges, comme le *Very Large Telescope* (VLT). Il existe aussi des observatoires au sol dans le domaine millimétrique (infrarouge lointain, à la limite du domaine radio) comme celui de l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) sur le plateau de Bure dans les Hautes-Alpes et près de Grenade en Espagne, ou l'*Atacama large millimetric array* (ALMA) au Chili. L'atmosphère terrestre affecte fortement la transmission du rayonnement infrarouge selon la longueur d'onde et les observations spatiales sont alors nécessaires. Le satellite Herschel (figure 10) fut placé au point de Lagrange L2 en 2009. Avec son miroir primaire de 3,5 m, il observa pendant 4 ans les infrarouges lointains (longueurs d'onde de 60 à 670 μm) grâce à un cryostat permettant de refroidir les instruments à une température de $-271\text{ }^\circ\text{C}$. Sa durée de vie, trop courte, est due au réchauffement inexorable des instruments dans l'espace.



Fig.10. Satellite d'observation en infrarouge Herschel (crédit : ESA).