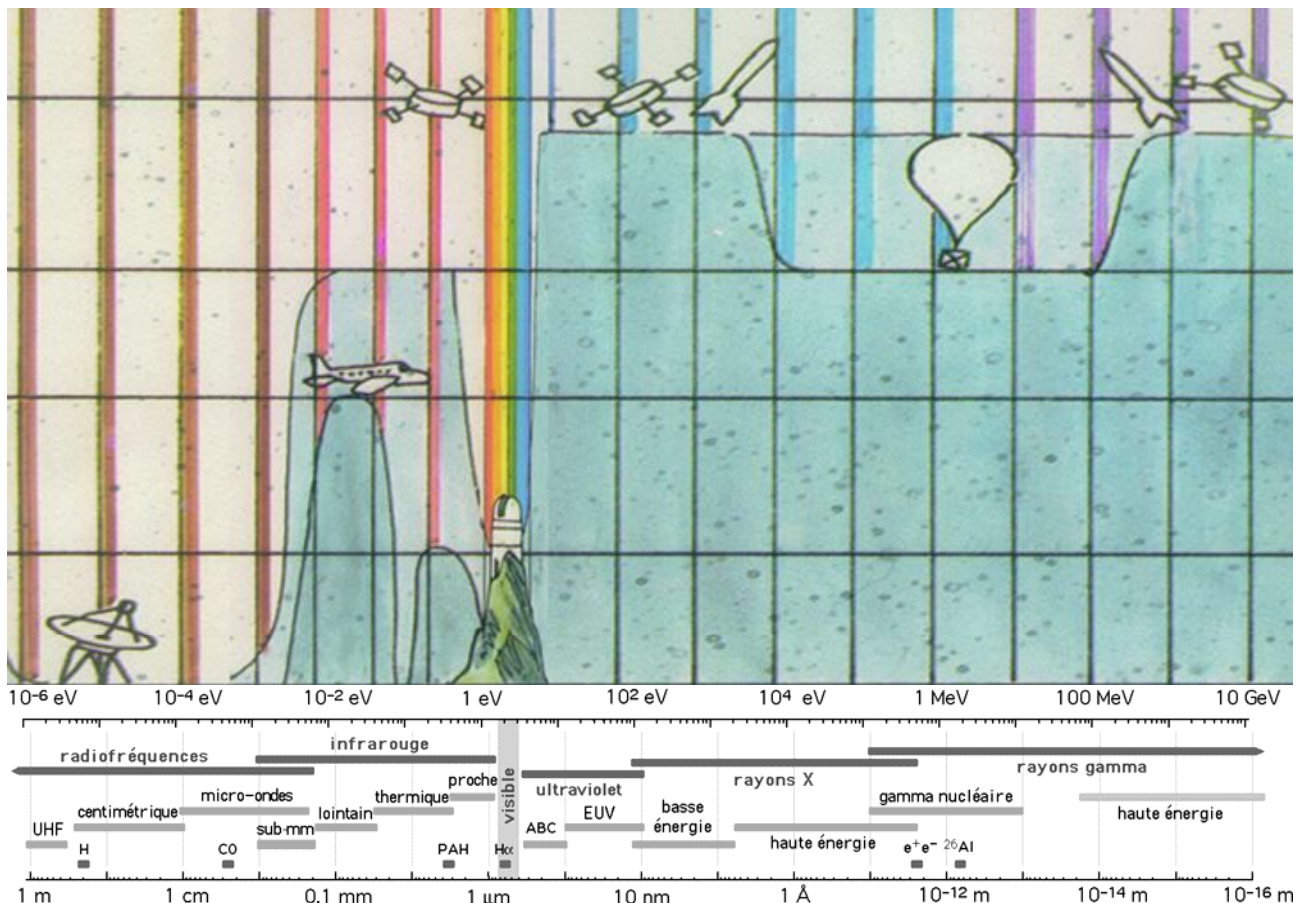


Atlas de la lumière

Peter von Ballmoos

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse

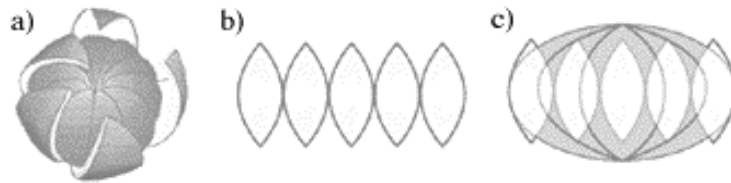
Grâce aux développements instrumentaux de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, de nouvelles fenêtres sur l'Univers ont pu être ouvertes : les domaines des ondes radio, du radar, de l'infrarouge, de l'ultraviolet, des rayons X et des rayons gamma sont pour la première fois accessibles à la curiosité des astrophysiciens. Chaque fois qu'une nouvelle fenêtre spectrale est ouverte, nous trouvons de nouvelles facettes de notre Univers, des phénomènes surprenants, souvent complètement inattendus, provoquant parfois une révolution de la science physique. Ce précis présente quelques facettes des nouvelles Astronomies : à côté des découvertes relatives aux diverses longueurs d'onde, l'intention est de décrire les images du ciel invisible en faisant la lumière sur la nature des processus qui sont à l'origine des rayonnements.



Tandis que les télescopes des domaines visible et radio peuvent nous permettre d'observer depuis la surface de la terre, il fallait attendre l'avènement des techniques spatiales pour observer les rayonnements IR, UV, X et gamma, qui ne traversent pas l'atmosphère terrestre. De part et d'autre du visible, dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge, les oscillations du rayonnement électromagnétique mettent en résonance les atomes de l'eau et de l'air. Tandis que les ultraviolets sont absorbés car leurs fréquences s'accordent aux vibrations des électrons dans les atomes, l'extinction de l'infrarouge est causé par la stimulation d'oscillations d'ions et molécules.

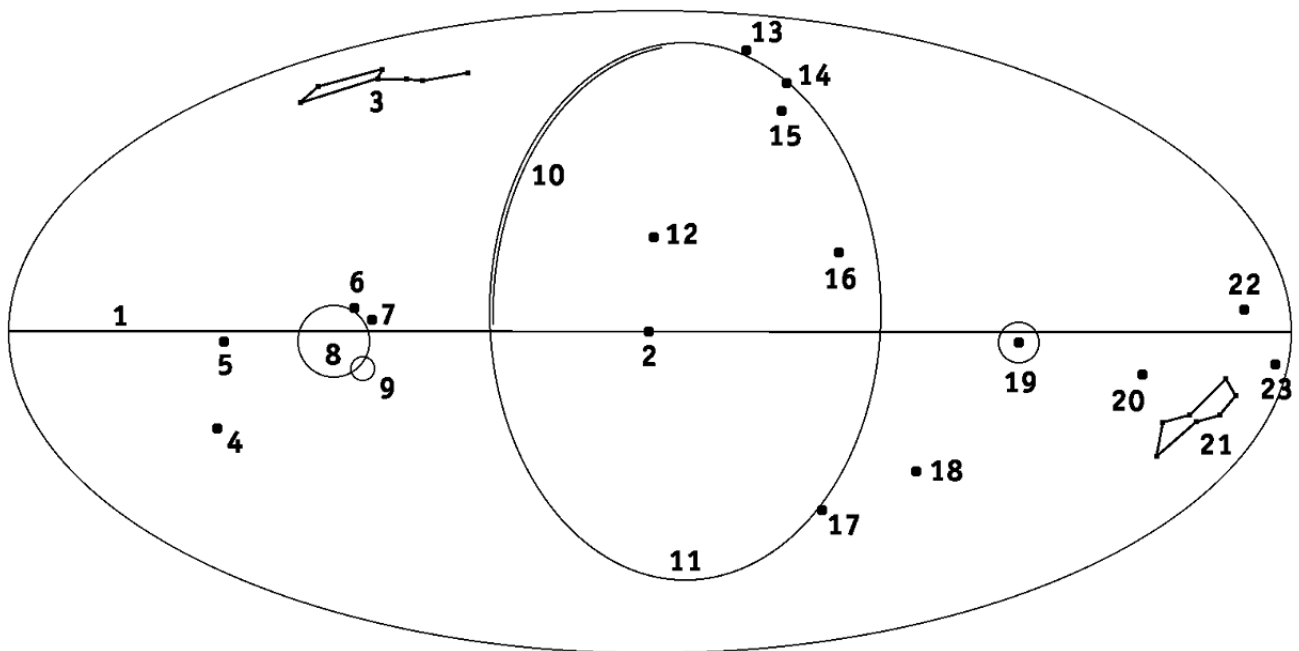
Aspect des cartes célestes (projection AITOFF)

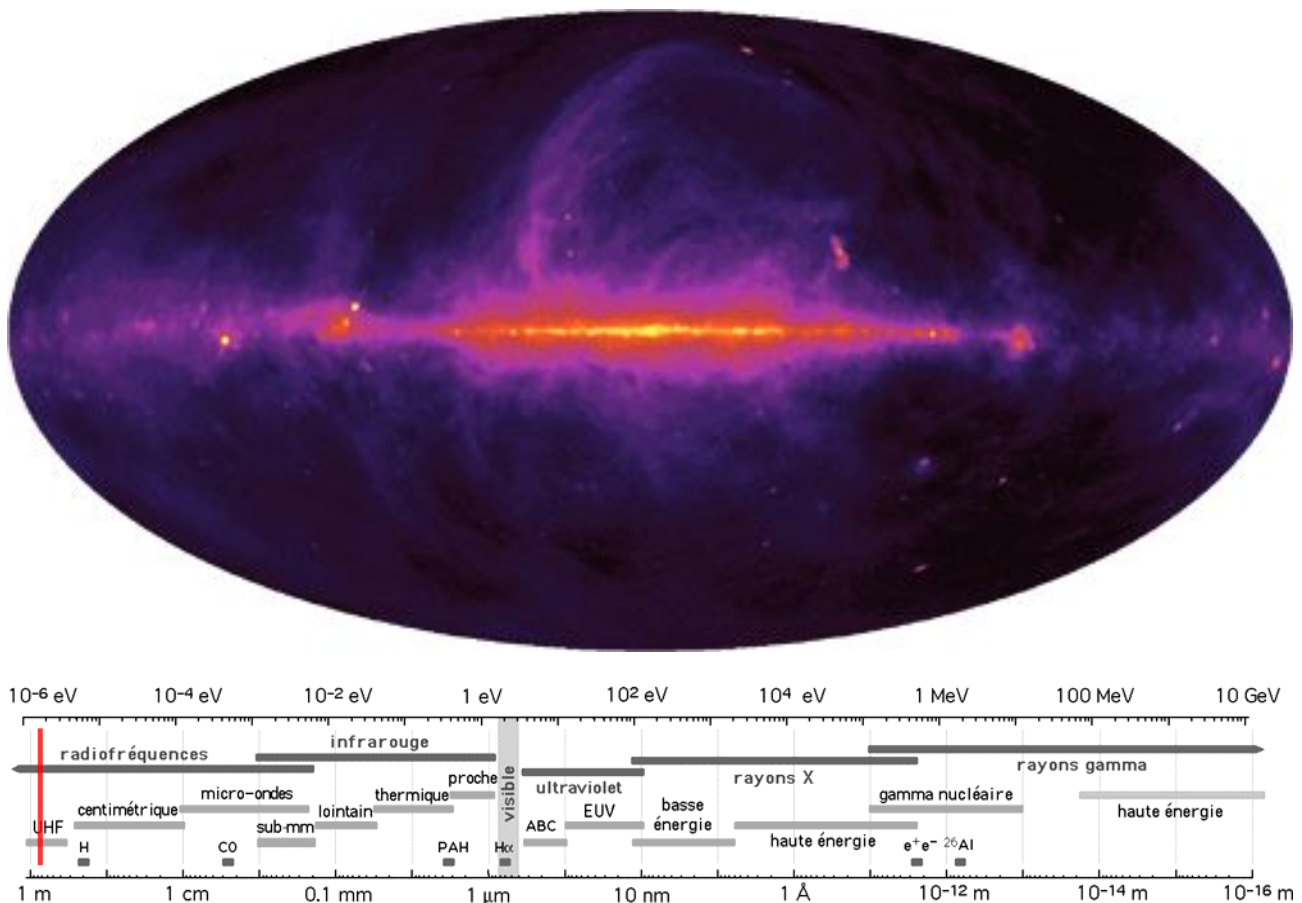
Les cartes construites par les astrophysiciens représentent l'ensemble de la sphère qui entoure notre planète. Ces cartes mettent à plat l'intérieur d'une sphère - un peu comme la peau d'une orange (a) qu'on étale (b) ... puisqu'on veut que les coins supérieurs de chaque quartier se situent au même endroit (c), les quartiers extérieurs sont déformés. On obtient une carte en projection galactique, en couplant l'axe horizontal du repère avec le plan de la voie lactée.



Repères d'objets et régions célestes pour comparaison avec les cartes du ciel

1) Plan Galactique, 2) Centre Galactique; 3) constellation de la grande ourse; 4) galaxie spirale de l'Andromède; 5) Cas A, reste de supernova (SNR); 6) Cygnus A, radiogalaxie; 7) Cygnus X-1, binaire X (candidat trou noir); 8) superbulle du Cygne; 9) boucle du Cygne, SNR; 10) éperon galactique du nord, SNR (partie de la loop-1); 11) loop-1, SNR; 12) Sco X-1, binaire X; 13) Virgo A, quasar; 14) 3C273, quasar; 15) 3C279, quasar; 16) Cen A, galaxie active; 17) petit nuage de Magellan, galaxie; 18) grand nuage de Magellan; 19) pulsar et reste de supernova de la Vela; 20) Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel visible; 21) constellation d'Orion; 22) Geminga, pulsar; 23) pulsar et reste de supernova du Crabe.





Le ciel radio

Le ciel radio n'a pas grand chose à voir avec celui des "voyants". A la fréquence de 408 MHz (longueur d'onde 73 cm) le ciel est dominé par un composé d'émissions inextricables - pour la plupart liées au plan de la Voie Lactée. Avant tout une émission intense du plan galactique (n°1), étroite, éclatante, telle une crête affûtée divisant la sphère céleste en deux hémisphères. De part et d'autre de cette nervure centrale, des filaments cotonneux enlacent le ciel vers les pôles galactiques.

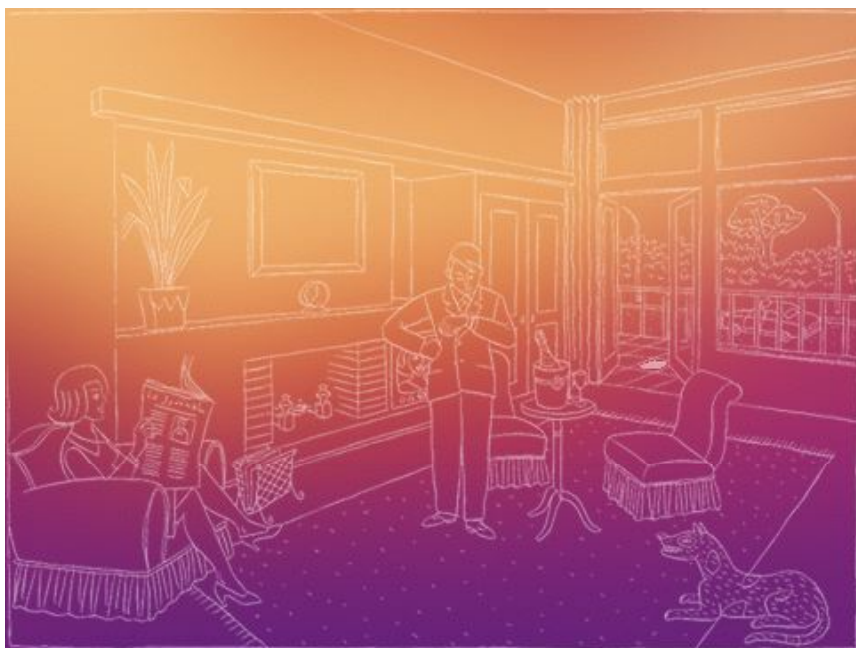
Les radiotélescopes au sol nous ont fait découvrir une multitude de sources dont l'existence n'était généralement pas soupçonnée auparavant : pulsars, quasars, restes de supernovae, sources superlumineux, masers interstellaires etc. En 1967, grâce au radiotélescope de Cambridge (Grande Bretagne), Bell et Hewish découvraient le pulsar - et ainsi l'existence de la matière neutronique : L'intensité d'une source radio, qu'on allait plus tard appeler CP1919, montrait de fortes variations d'une régularité étonnante - une impulsion toutes les 1.337 301 13 secondes précisément : le premier *pulsar* venait d'être découvert ! Un objet dont la luminosité varie si rapidement est forcément de très petite taille - quelle que soit la manière dont la fluctuation de luminosité se propage d'un bord à l'autre de la source, sa vitesse doit être inférieure à celle de la lumière c . Aujourd'hui, nous connaissons des pulsars avec des périodes de millisecondes ! Tandis que le rayon d'un pulsar est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres, sa masse est d'au moins 1.4 fois celle du soleil ! Les pulsars sont donc des astres ultracompacts, des étoiles effondrées sur elles-mêmes, constitués essentiellement de neutrons - une cuillère de matière neutronique pèserait aussi lourd que tous les immeubles de la ville de Paris ! Ces astres incommensurables, minuscules seraient très certainement restés inaperçus, s'il n'entraînaient pas un champ magnétique intense dans leur rotation vertigineuse. Ainsi des particules chargées sont accélérées et émettent un "rayonnement synchrotron" dans un faisceau étroit qui balaie l'espace tel un phare. Les émissions radios de notre Galaxie sont fréquemment liées à des électrons relativistes - leur trajectoire est déviée par des champs magnétiques, ce qui produit du rayonnement

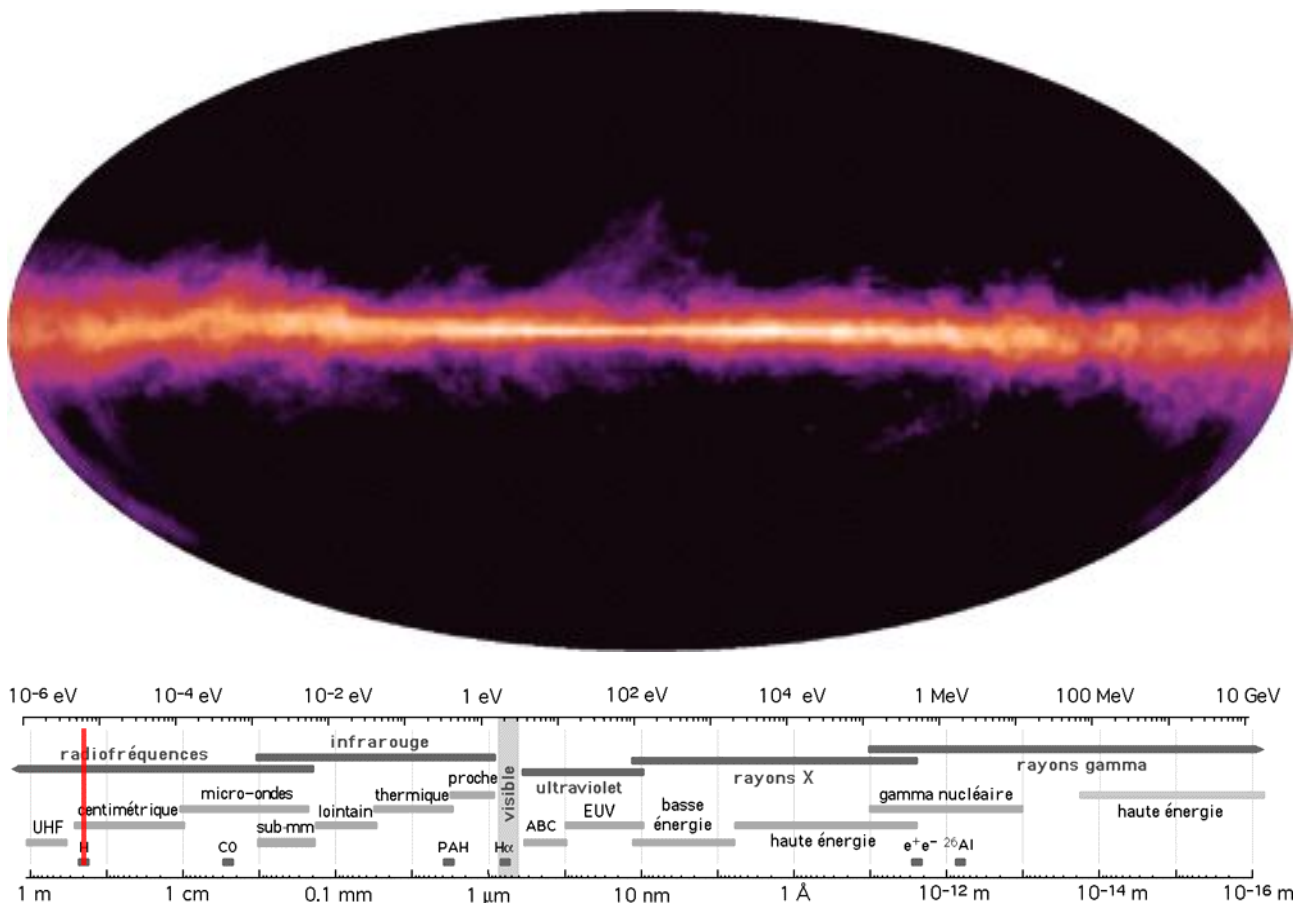
synchrotron. C'est dans ce type de lumière que se dévoilent les restes de supernova - p.e. Cas A (n° 5), Crabe (n° 23), éperon galactique du nord (n° 10) - résidus d'étoiles explosées, et des régions ionisées dans les bras spiraux de notre Galaxie. Parmi les découvertes extragalactiques, les "jets" des radiogalaxies - p.e. Cyg A (n° 6) et Cen A (n° 16) - et quasars (p.e. Virgo-A, n°13; 3C273, n°14) sont des plus remarquables. Rendus "visible" par la signature radio d'un rayonnement synchrotron, les lobes de ces jets de matière s'étendent à des millions d'années lumière dans l'espace, de part et d'autre d'un noyau central extrêmement compact.

Notre monde vu avec des yeux sensibles en radio

Les émissions radio inondent notre monde quotidien - pas seulement dans le sens figuratif - mais dans un sens réellement physique. Nos moyens de communication modernes - radio, TV, téléphones portables - sont basés sur l'émission d'ondes radio qui nous parviennent malgré des murs, et souvent par monts et vaux. Les fréquences radio sont trop basses pour mettre en résonance les atomes des corps solides. A part la faible absorption par la matière, qui permet aux radioastronomes de voir à travers toute la Galaxie, les ondes radio peuvent souvent se répandre autour d'obstacles grâce à leur grande longueur d'onde (diffraction).

Aussi, même si un peintre pouvait regarder notre monde avec des yeux "radio-sensibles" géants, il serait dans l'incapacité de représenter les objets de cette scène : en effet, la longueur d'onde est plus grande que les objets qui composent cette image et c'est comme si son "pinceau" était trop large pour les objets à dessiner.





Le ciel à 21 cm

Lorsqu'on parcourt le spectre des radiofréquences, à 21 cm de longueur d'onde, un ciel sans étoiles apparaît soudain. Sous cette lumière monochrome, la bande de la Voie Lactée qui entoure le ciel intégralement paraît diffuse - aucun éclat ponctuel ne vient rappeler notre voûte étoilée. Dans la direction du Centre Galactique (n° 2), la bande est étroite mais particulièrement marquée et lumineuse; dans la direction opposée, l'anticentre (aux extrêmes gauche et droite de la carte), l'émission devient de plus en plus large et fondue, des structures filamenteuses, des éperons, s'étirent de part et d'autre de la Voie Lactée vers les pôles Galactiques.

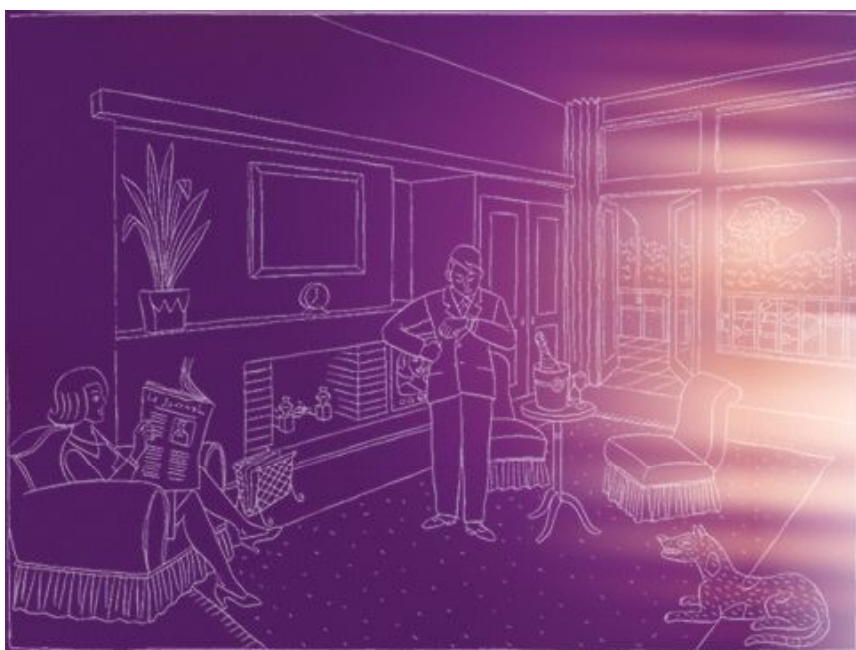
Le ciel à 21 cm est marqué par la signature d'atomes d'hydrogène neutres qui émettent à cette longueur d'onde spécifique s'il se trouvent à basse température et à faible pression. Loin des étoiles, au sein de vastes nuages dans le milieu interstellaire, dont la température varie entre 10 et 100 K, ces conditions sont remplies. La transition hyperfine (spin parallèle $\rightarrow$ spin antiparallèle) du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène conduit à l'émission d'un photon de très faible énergie, correspondant à une longueur d'onde de 21 cm.

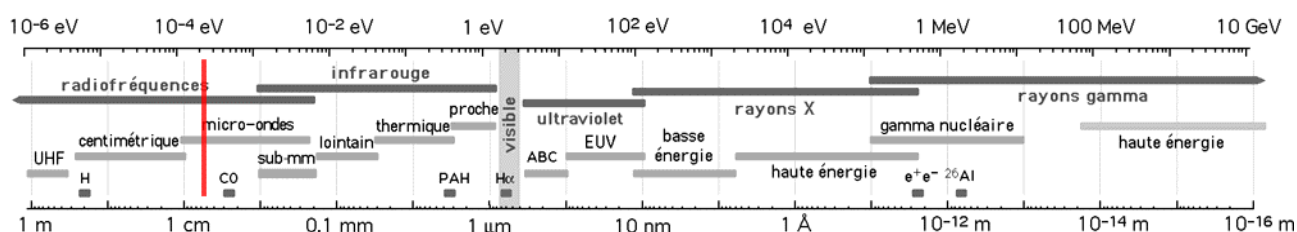
La carte du ciel à 21 cm montre que l'espace séparant les étoiles est loin d'être vide et sombre. Les nuages froids d'hydrogène atomique sont en fait la principale composante du gaz interstellaire. Ils se répartissent le long du plan galactique en un disque extrêmement mince : son épaisseur est d'environ 1000 a.l. (années lumière) tandis que son diamètre est de presque 100'000 a.l. Depuis le système solaire, à presque 25'000 a.l. du Centre Galactique, nous voyons ce disque par la tranche. Vers l'extérieur de ce disque se trouvent uniquement des nuages d'hydrogène relativement proches; ainsi cette partie de la ceinture nous paraît assez étendue. Aux alentours du Centre Galactique, nous observons l'hydrogène à travers le disque entier. Ici, l'émission est dominée par les régions lointaines de la voie lactée, qui, sous cet angle, semble plus étroite.

Notre point de vue dans la Galaxie ne nous permet pas de distinguer directement sa forme spirale. Nous faisons partie du disque galactique et nous ne pouvons donc la voir que par la tranche. Par contre, l'analyse de l'élargissement de la raie d'émission à 21 cm (effet Doppler dû à la rotation différentielle de la Galaxie) a permis d'établir un modèle en trois dimensions de notre Voie Lactée. Aussi, il est possible d'observer la structure spirale d'autres galaxies.

Notre monde vu avec des yeux sensibles en radio

Si notre peintre pouvait voir les ondes radio, il pourrait "régler" ses yeux sur une fréquence radio précise qui lui permettrait d'apercevoir une tache de lumière très lumineuse sur la droite de la scène : l'antenne du taxi qui attend devant l'immeuble. Si des structures métalliques telle la balustrade du balcon peuvent diffracter ces longueurs d'ondes, les objets de notre quotidien sont généralement trop petits pour être distingués. En tant qu'outil pour étudier notre monde macroscopique, les ondes radio s'avèrent donc trop grandes.





Le ciel dans le domaine des micro-ondes

A première vue, une lueur parfaitement uniforme remplit totalement le ciel des micro-ondes, telle une surface homogène couvrant la sphère céleste entière. Outre l'aspect insolite de ce ciel, c'est la température de ce rayonnement qui surprend : quelle que soit la direction que l'on vise, cette température n'atteint que 2.7 ...

L'interprétation du ciel des micro-ondes a profondément changé notre vision du monde : ce rayonnement est la mémoire refroidie de la naissance ardente de l'Univers - il est aujourd'hui considéré comme la principale preuve étayant la théorie du Big Bang. Depuis les températures extrêmes qui régnaient alors, l'Univers s'est progressivement refroidi pour atteindre cette température de 2.7 K.

L'expérience COBE/DMR a scruté le ciel des micro-ondes à des longueurs d'onde de quelques millimètres, correspondant à des fréquences de 31 - 90 Ghz.

L'analyse des données, de plus en plus fine, indiqua tout d'abord que la température d'un hémisphère du ciel est à peine un peu plus élevée que l'autre. Cette faible anisotropie du fond cosmique témoigne du voyage de notre planète à travers l'Univers. La légère augmentation de la température vers la constellation du Lion signifie "E puore si muove" : D'une vitesse de 360 kilomètres par seconde, notre odyssée dans l'Univers est composée du mouvement de la terre au sein du cortège des planètes de notre Soleil, de celles-ci tournant dans un bras spiral de la banlieue galactique, et de la Voie Lactée entière qui est précipitée, capturée par un "grand attracteur", vers l'amas de galaxies de la Vierge.

Après soustraction du dipôle entraîné par notre mouvement, l'étude des données DMR fit alors apparaître la faible signature de notre Voie Lactée. Cette émission galactique provient principalement de nuages d'électrons libres dans la proximité d'étoiles jeunes.

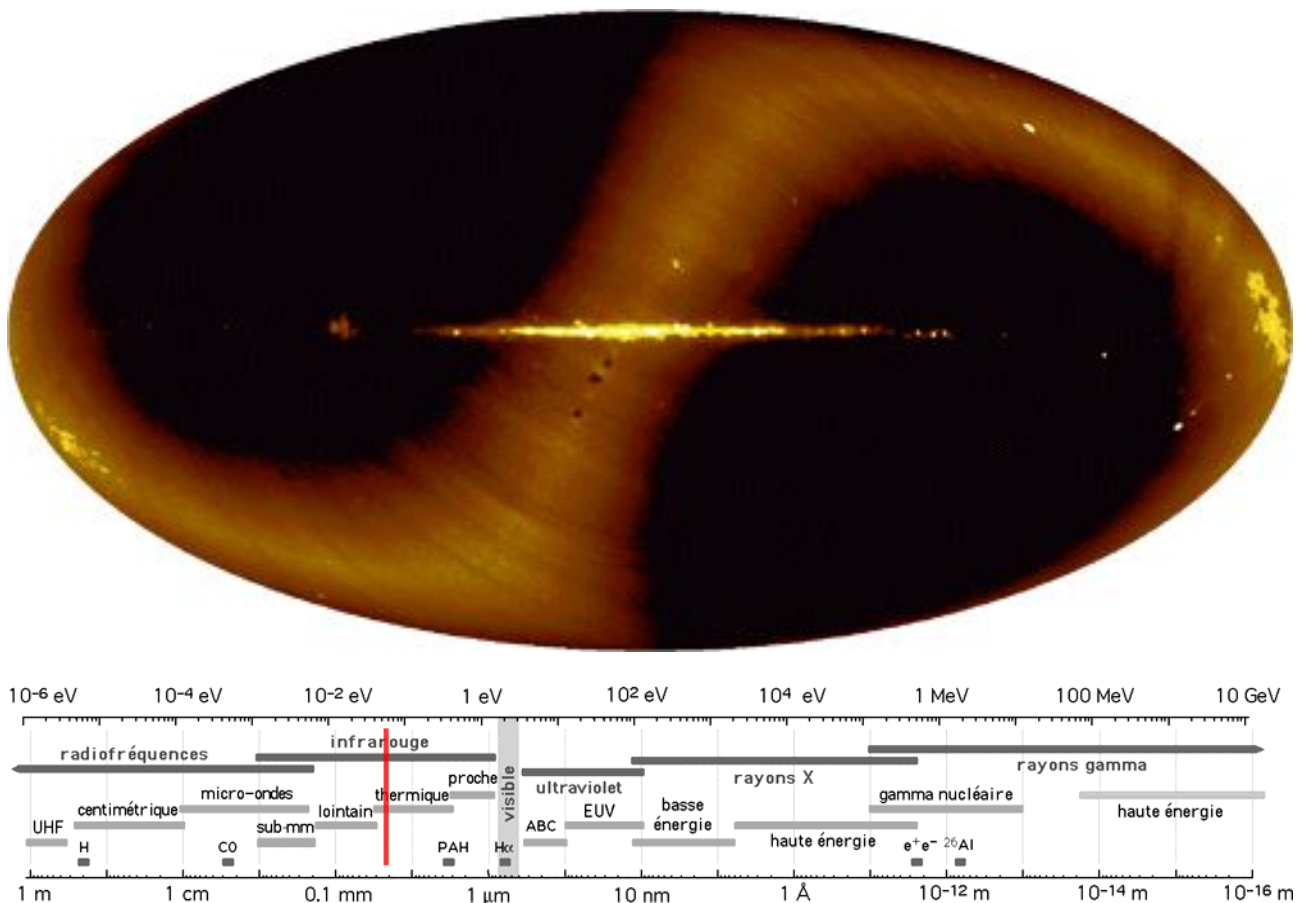
Enfin, une analyse extrêmement pointue révéla d'infimes grumeaux dans ce fond presque homogène. Ce sont des fluctuations d'amplitude d'un cent millièmme du fond cosmologique. Ils correspondent à

des régions de densité plus ou moins élevées quand l'Univers n'avait encore que 300'000 ans. Ces rides dans l'espace-temps témoignent de la formation des toutes premières structures dans l'Univers, longtemps avant la formation des galaxies et des étoiles. Ce sont ces inhomogénéités primordiales qui ont induit une variation à leur voisinage du champ de gravitation et permis la formation des premières structures par effondrement gravitationnel.

Notre monde vu avec des yeux sensibles aux micro-ondes

Un peintre qui regarderait notre monde avec des yeux sensibles aux micro-ondes ne verrait que le rayonnement thermique émanant des objets (chauds, tièdes, froids). Etant donné que les objets chauds sont prédominants dans cette peinture, il serait bien incapable de représenter très nettement cette scène : en effet, les outils en sa possession, les micro-ondes, ne sont pas assez courtes pour reproduire de petits objets aux contours précis tels que nous sommes habitués à les voir dans la lumière visible.





Le ciel en infrarouge thermique

D'une longueur d'onde d'une dizaine de microns, comparable à la taille d'un globule sanguin, le ciel de l'infrarouge thermique dévoile tout d'abord deux bandes lumineuses qui, en se croisant, parcourent chacune la voûte céleste entière.

La carte dressée par le télescope COBE/DIRBE montre un large ruban lumineux qui serpente à travers toute la sphère céleste. Dans une projection AITOFF où la Voie Lactée se trouve dans une bande centrale, le plan du système solaire se présente sous la forme d'un "S". Ce sont des grains de poussière interplanétaire qui sont à l'origine de cette émission infrarouge. Les grains de poussière absorbent la lumière visible et ultraviolette en provenance du Soleil, atteignant ainsi des températures pouvant aller à une centaine de Kelvin. A cette température, ces grains re-émettent l'énergie absorbée dans le domaine de l'infrarouge thermique.

La Voie Lactée se découpe telle une bande étroite et rectiligne (n° 1), jonchée d'éclats intenses tantôt ponctuels, tantôt étendus et filandreux. A cette longueur d'onde, la Galaxie est principalement illuminée par l'émission thermique de poussières, minuscules grains de matière contenus dans des nuages interstellaires. Ce sont précisément ces poussières-là qui obscurcissent partiellement la lumière visible des étoiles dans le plan de la Voie Lactée. En absorbant les longueurs d'onde visibles et ultraviolettes, ces grains sont réchauffés, l'énergie thermique ainsi acquise devient la source de l'émission infrarouge. Les vieilles étoiles du bulbe central de notre Voie Lactée émettent le rayonnement infrarouge le plus intense.

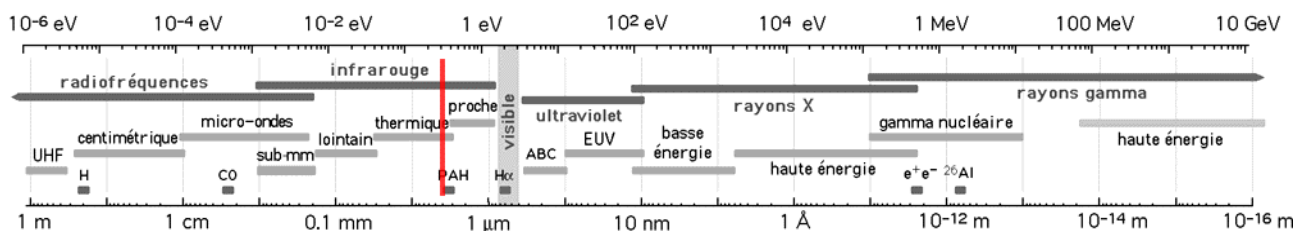
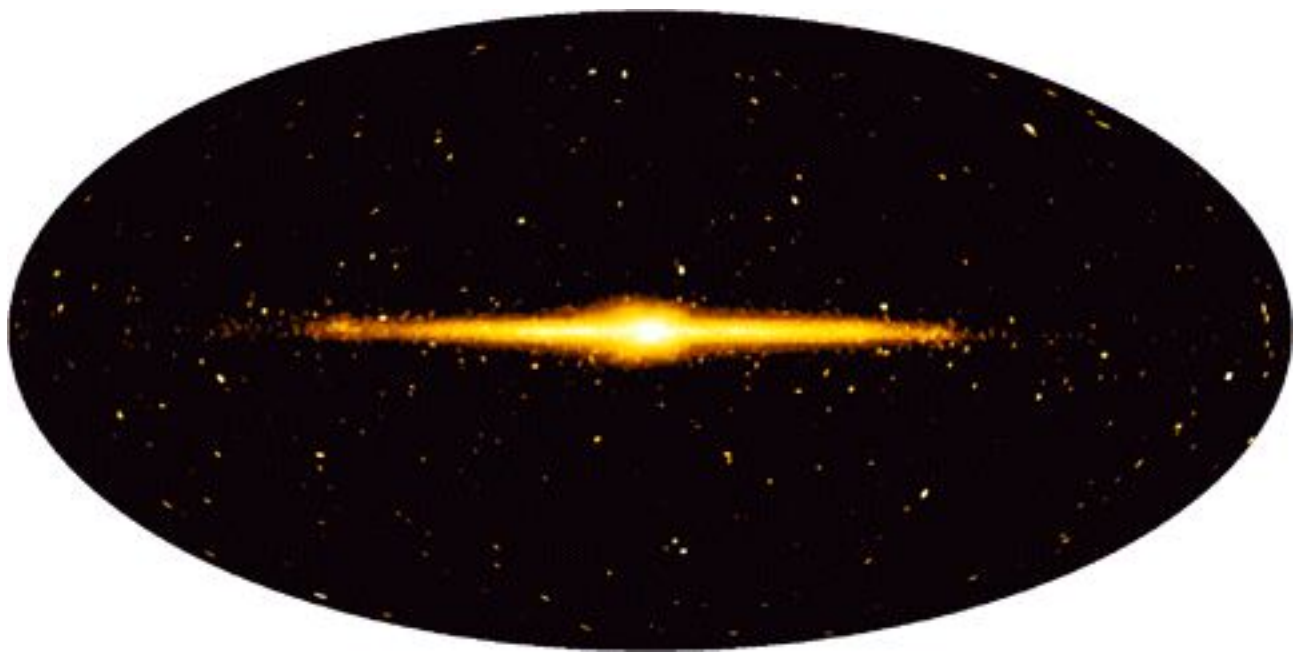
L'infrarouge est devenue un outil indispensable pour l'étude de l'Univers froid, des nuages de gaz et de poussières où naissent les étoiles et les planètes. Par exemple, l'une des premières indications de l'existence de planètes hors de notre système solaire nous a été donnée par l'observation dans l'infrarouge de l'étoile β -pictoris : un disque de poussières tièdes, vu par la tranche, un peu comme notre propre système solaire, ceinture cette étoile.

Notre monde vu avec des yeux sensibles en infrarouge

Si nos yeux étaient sensibles en infrarouge, nous verrions un monde lumineux, tous les éléments qui composent notre dessin jouant en fait le rôle de lampes infrarouges. Certains sont intenses, en particulier les objets "chauds" tels la cheminée ou le chien, d'autres sont plus faibles parce que d'une température moins élevée, comme par exemple le seau à Champagne.

Certaines qualités intrinsèques des choses peuvent également changer: alors que les fenêtres sont opaques et devenues source de lumière infrarouge, le journal lui est devenu transparent.





Le ciel en infrarouge proche

Reconnaître nos constellations familières sur la voûte céleste vue sous cette lumière, se révèle une tentative vaine - pourtant, avec une longueur d'onde de 1-4 microns on n'est pas bien loin de la lumière visible. La grande constellation d'Orion (n°20), par exemple, est dénuée d'étoiles à part son épaule gauche, l'étoile Betelgeuse; qui est cependant recouverte d'un énorme voile de cirrus radieux. La carte du ciel en infrarouge proche montre que la traînée lumineuse de notre Voie Lactée est particulièrement intense dans la direction du Centre Galactique (n° 2) où le disque s'épaissit en un bulbe qui renferme de vieilles étoiles, plus froides que notre Soleil. Cette région abrite les premiers astres engendrés par notre Galaxie.

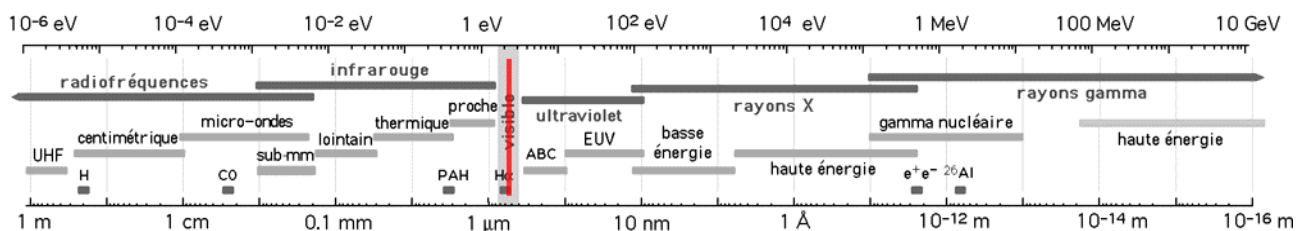
Le satellite COBE, arrimé à bord d'une fusée DELTA, fut lancé en 1989 par la NASA. Avec à son bord les télescopes DIRBE, FIRAS et DMR (voir micro-ondes), l'étendue du rayonnement accessible s'étend de l'infrarouge proche aux ondes millimétriques. Le télescope DIRBE, refroidi à l'hélium liquide pour échapper aux émissions parasites de ses propres composants, a fourni depuis sa mise en service, une vue panoramique du ciel infrarouge. La carte du ciel obtenue en infrarouge proche grâce au télescope DIRBE nous fait plonger dans notre Voie Lactée plus profondément qu'aucun télescope optique ne l'a fait auparavant - elle montre notre Galaxie telle qu'un observateur placé en dehors de la Voie Lactée pourrait peut-être la percevoir : un disque galactique fin qui s'épaissit vers son centre. Le rayonnement infrarouge proche est beaucoup moins absorbé par la poussière interstellaire que la lumière visible. Comme les particules de poussière interstellaire ont des tailles caractéristiques de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible, ils l'absorbent de manière efficace.

Le ciel en infrarouge proche révèle à la fois les plus petites et les plus grandes des étoiles (rayonnement de corps noir de $T \approx 1000-2000$ degrés). D'une part ce sont les plus petites naines rouges; avec dans leur cœur de modestes réacteurs nucléaires, ils brûlent leur combustible au ralenti et atteignent ainsi une extrême longévité. D'autre part ce sont les géantes rouges, étoiles massives en fin d'une courte vie, qui sont marquées par l'émission dans l'infrarouge proche.

Notre monde vu par des yeux sensibles en infrarouge proche

Un peintre capable de percevoir la lumière infrarouge proche ferait un tableau qui, au premier coup d'œil, ressemblerait assez à ce que nous avons l'habitude de voir. Chaque chose paraît à sa place, et pourtant certains objets sont étrangement différents : alors que le ciel paraît presque noir même en pleine journée (diffusion de Rayleigh $\sim 1/\lambda^4$), certains objets réfléchissent la lumière ambiante de façon différente que dans le visible; ici, le feuillage des arbres, les plantes et chevelures sont particulièrement lumineuses.





Le ciel visible

Le ciel visible est avant tout un ciel d'étoiles ! La nuit, lorsque nous levons les yeux au ciel, nous distinguons des myriades d'étoiles - la plupart d'entre elles sont confinées dans la longue traînée blanchâtre que nous appelons la Voie Lactée : l' image de notre Galaxie spirale, vue de l'intérieur par la tranche.

Les yeux des voyants permettent de voir le monde à des longueurs d'onde comprises entre 0.37 et 0.73 micromètres. Ceci n'est sûrement pas un hasard car c'est dans cet intervalle que l'émission du Soleil ($\sim$ corps noir à 5800 K) connaît son maximum.

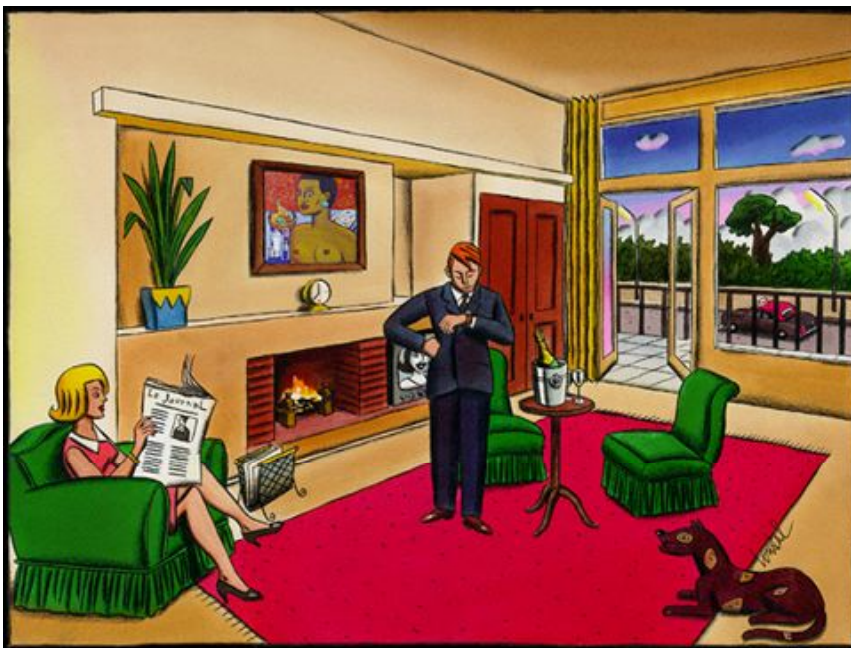
La principale source d'énergie à l'origine de cette formidable lueur galactique de 100 milliards d'étoiles est un processus nucléaire : la fusion de quatre protons en un noyau d'hélium. Pendant une grande partie de sa vie, une étoile du type solaire rayonne la plupart de cette énergie sous forme de lumière visible. Les photons du domaine visible sont donc avant tout les messagers des étoiles (c.a.d. de leurs photosphères) : grâce à l'astronomie visible, nous avons acquis la majorité de nos connaissances sur la vie des étoiles.

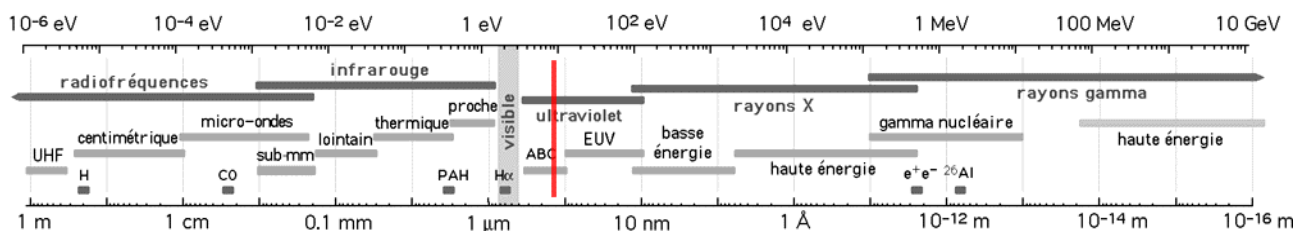
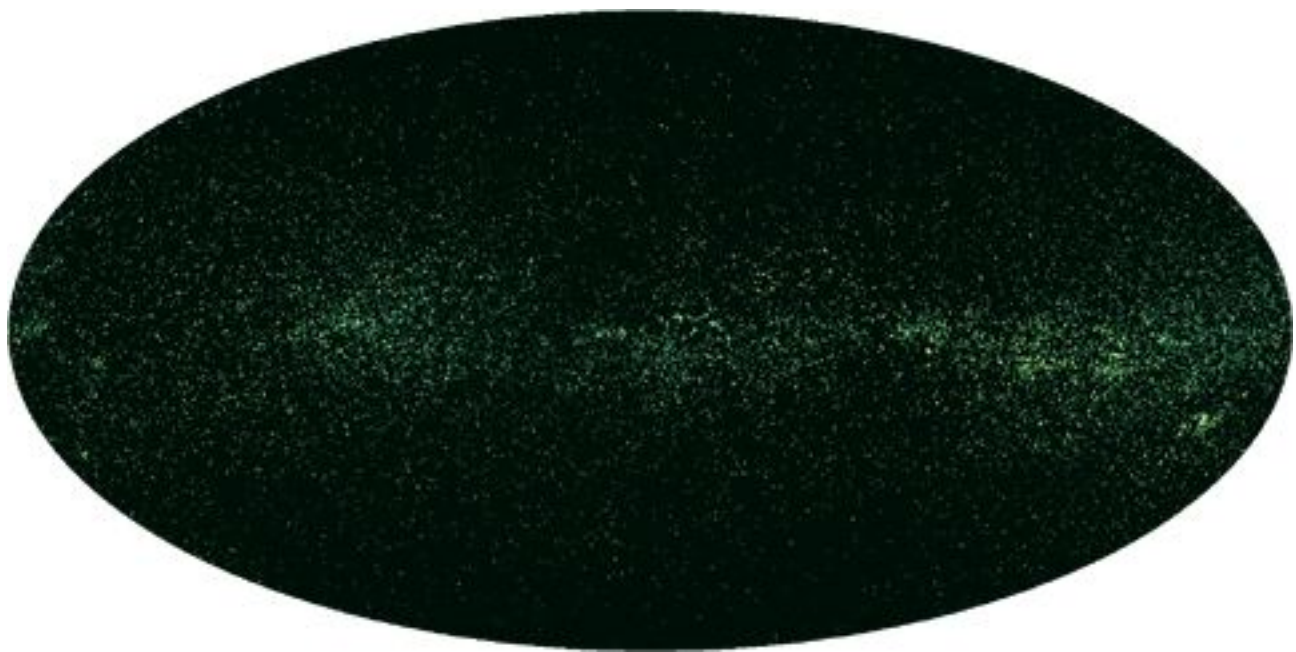
Par contre, en ce qui concerne l'étude de notre voie lactée, la lumière visible ne porte pas bien loin. Les régions éloignées de notre Galaxie, et tout particulièrement son centre, sont obscurcies par la présence de nuages de poussière interstellaire. A part les zones d'ombre que nous distinguer au milieu de la Voie Lactée, nous pouvons prendre conscience de notre myopie interstellaire en réalisant l'énorme largueur de la bande galactique. En la comparant avec la nervure étroite qu'elle montre en infrarouge, et qui représente une Galaxie transparente, on s'aperçoit intuitivement avoir la vue courte : dans un disque galactique d'une certaine épaisseur, les étoiles proches occupent une bande plus large que les étoiles lointaines. Prenons enfin conscience, que toutes les étoiles de la carte appartiennent à ce disque Galactique.

Les nébuleuses des autres galaxies, comme p.e. la spirale de l'Andromède (n°4) n'apparaissent pas au premier plan. Seuls les nuages de Magellan (n°16, et 17), galaxies satellites de la notre, se dessinent clairement dans la partie australe du ciel comme deux petits nuages diffus.

Le monde de nos couleurs

Cette scène des années 50 peinte par l'illustrateur Loustal correspond au monde de nos couleurs. La lumière que nous percevons recèle une formidable richesse: les couleurs. Toutes sont contenues dans la lumière blanche. Lorsqu'un objet est éclairé par une telle lumière, il absorbe une partie du rayonnement incident et réfléchit le reste. Seule une partie de la lumière nous parvient alors: la couleur dont nous voyons l'objet. On peut se demander à quoi aurait ressemblé ce dessin si l'artiste pouvait percevoir les rayonnements radio, infrarouge, ultraviolette, rayons X et gamma.





Le ciel en ultraviolet

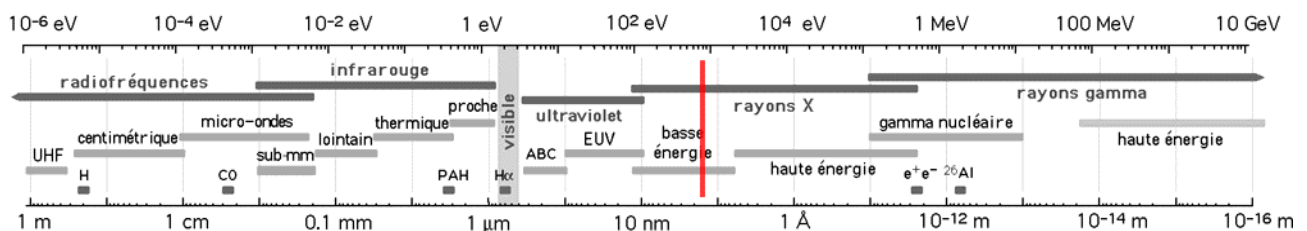
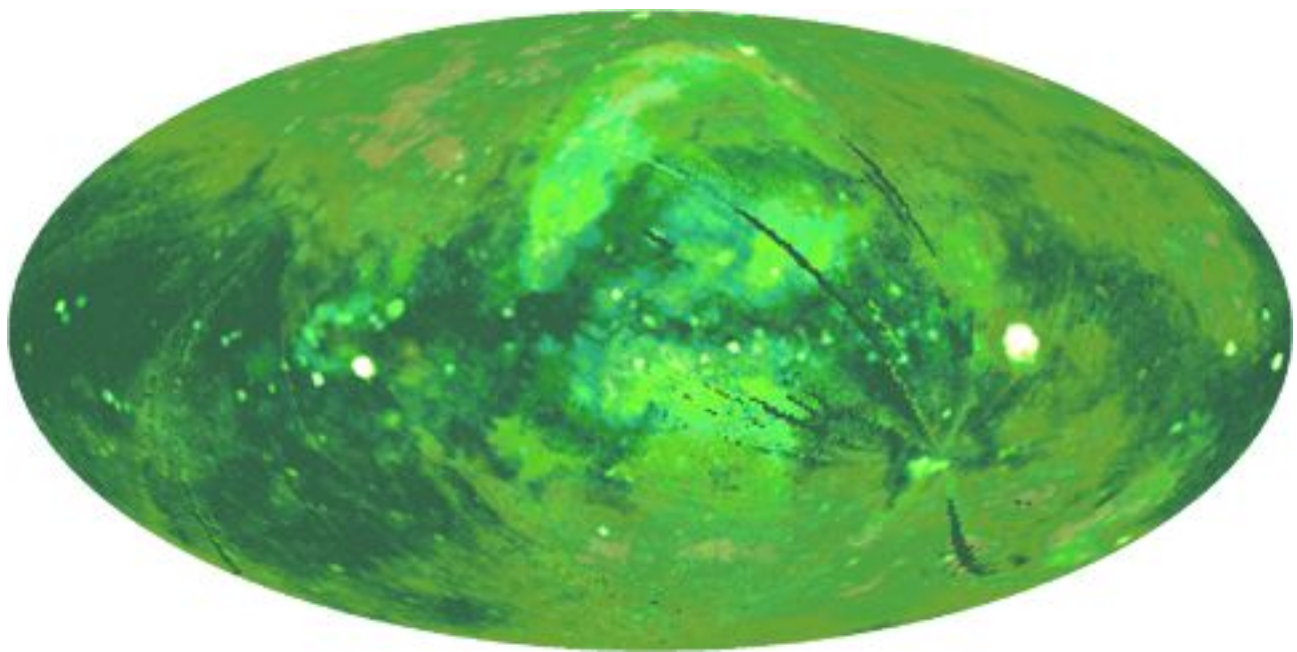
Une voûte céleste parsemée de myriades d'étoiles qui se densifient en une traînée lumineuse parcourant le ciel entier ... cela sonne plutôt familier. Et pourtant, nous nous sentirions cruellement perdus sous le ciel ultraviolet. En s'obstinant, peut-être trouverions-nous des fragments d'une constellation, la ceinture d'Orion (n° 20), par exemple, et ensuite, éblouissantes, les étoiles Rigel et Saiph qui symbolisent les jambes, mais pas moyen de retrouver Betelgeuse, l'épaule gauche d'Orion. Un deuxième regard sur ce ciel nous montrerait que la bande qui condense les étoiles dans une traînée lumineuse ne suit point le trajet de la Voie Lactée. En fait, elle s'en éloigne considérablement, traversant la sphère céleste sur un grand cercle faiblement incliné par rapport au plan galactique.

L'image ci-dessus traduit la vision du télescope UVSST qui détecta les oscillations de la lumière d'une longueur d'onde de 0.15 micromètres en 1972. En raison de la forte extinction de l'ultraviolet par les atomes de l'air, la camera d'UVSST a observé au-dessus de l'atmosphère, embarquée sur le satellite européen TD-1. Réciproquement, les nuages de gaz interstellaire de notre Voie Lactée absorbent à leur tour les rayons ultraviolets. Il n'est donc pas possible de voir très loin dans notre Galaxie et les étoiles qui dominent l'image sont proches ... et chaudes. En fait, seulement des corps d'une température supérieure à 15000 degrés produisent suffisamment de rayonnement thermique dans le domaine ultraviolet. Ces étoiles chaudes et massives sont extrêmement lumineuses, et brûlent ainsi leur réserves d'énergie par les deux bouts de chandelle. En règle générale, les étoiles qui émettent en ultraviolet existent donc depuis peu seulement. Ainsi, les photons ultraviolets nous font découvrir un ciel d'étoiles jeunes et proches - les plus brillantes forment une traînée qui révèle ainsi une région de formation récente d'étoiles dans le voisinage du soleil : la ceinture de Gould, inclinée de 20° par rapport au plan Galactique. Les régions qu'elle regroupe sont à des distances entre 800 et 1500 années lumière.

Notre monde vu par des yeux sensibles en ultraviolet

Le rayonnement ultraviolet évoque la plage, les vacances ... Cependant, après le coucher du soleil, il est plutôt rare d'être exposé à la lumière ultraviolette - à part peut-être les "lumières noires" des boîtes de nuit ... A une époque, il y eut pourtant nos lampes fluorescentes, appelées couramment "néons", qui laissaient échapper des rayons UV. Dans les années 50, un peintre sensible aux rayons UV aurait pu voir un salon à peine éclairé, à travers la porte entrouverte, par le tube fluorescent d'un réverbère. L'atmosphère ayant un fort pouvoir de diffusion pour l'UV (diffusion de Rayleigh $\sim 1/\lambda^4$), on observe un rayonnement ultraviolet répandu tout autour du "néon" tandis que la lumière du second "néon" est totalement absorbée par la vitre. Aujourd'hui l'ultraviolet ne s'échappe plus des "tubes au néon"; il est efficacement transformé en lumière visible par les couches phosphorescentes sur les parois de la lampe.





Le ciel dans le domaine des rayons x-mous

Tandis que nos nuit semblent obscures, le ciel tout entier est lumière pour celui qui verrait les rayons X. Seule une bande irrégulière qui coïncide approximativement avec celle de la voie lactée paraît plus sombre. A plusieurs endroits l'émission X est particulièrement intense, les formations diffuses semblent alors composer des anneaux et boucles éclatantes. En imaginant une profondeur au ciel, ces structures se voient transformées en sphères tridimensionnelles - certaines de la taille de la Lune, d'autres d'une étendue d'un poing à bras tendu (bulle du Cygne, n°9 et de la Vela, n°18; superbulle du Cygne, n° 8). La plus grande de ces bulles remplit presque un quart du ciel ("loop 1", n° 11), son centre se situe légèrement hors du plan de la voie lactée. Enfin, toutes ces vastes formes sont piquetées des éclats de plus de cent mille étoiles !

Le ciel des rayons X est révélatrice de la nature du milieu interstellaire - il met en évidence une galaxie violente, mouvementée et de structure complexe : l'espace interstellaire est balayée et réchauffée par un enchevêtrement de bulles de gaz en expansion. Ces bulles brûlantes sont dues à de très violents phénomènes : les supernovae. Lorsque l'escalade de la synthèse des éléments au coeur d'une étoile massive arrive à sa fin, le combustible nucléaire est consumé et l'équilibre entre attraction gravitationnelle et mouvement thermique est bouleversé. La gravitation prend le dessus, comprimant la matière à des densités extrêmes. Rapidement, aucun mouvement - thermique ou électronique - peut s'opposer à la l'effondrement gravitationnel et l'étoile implose : c'est la supernova. Tandis que l'effondrement du noyau engendre, dans un intervalle de minutes voire secondes, un "cadavre stellaire" d'une densité comparable à celle d'un noyau nucléaire (étoile à neutrons), les couches extérieures de l'étoiles sont expulsés dans une explosion colossale. En rapide expansion, ces bulles agissent alors comme une sorte de chasse-neige, accumulant et chauffant la matière à son contact, conduisant à l'émission de rayons X par "bremsstrahlung" (voir "rayons x-durs")

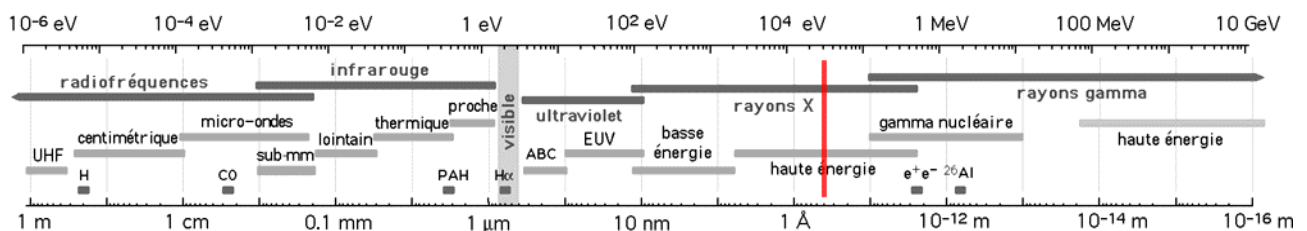
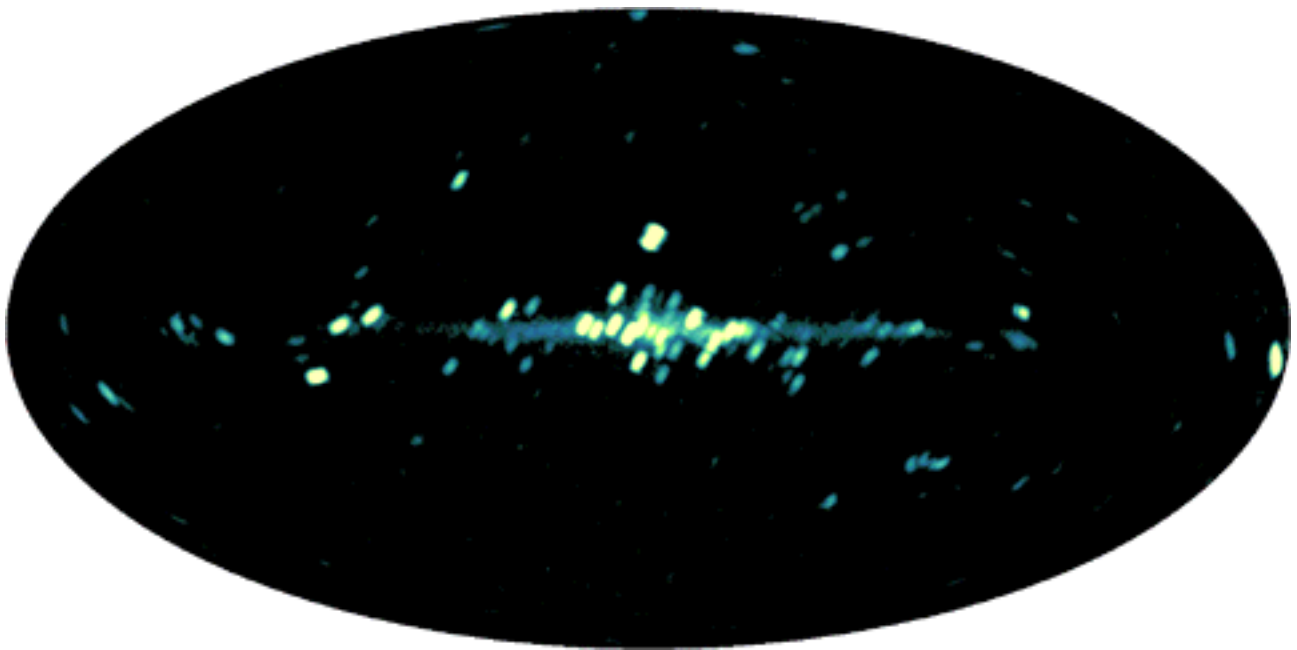
Etant donné que les milieux denses absorbent plus les rayons X, les nuages de poussière et de gaz proches du plan galactique apparaissent telles un squelette lors d'une radiographie.

La plupart des corps célestes rayonnent en X. Notre plus proche voisin extragalactique, le Grand Nuage de Magellan (n° 17) révèle l'émission X des étoiles et du gaz. Aussi, le milieu situé entre les galaxies n'est pas vide - il contient un gaz extrêmement chaud (quelques dizaines de millions de degrés) qui a pu être mis en évidence par son rayonnement X. Enfin, les innombrables éclats ponctuels sont dus à divers types d'astres : des quasars aux confins de l'Univers observable aux comètes de notre système solaire. Des sources particulièrement intéressantes dans le domaine des rayons X sont les étoiles à neutrons de notre Galaxie, notamment les "binaires X" (voir X-durs).

Notre monde vu avec des yeux sensibles aux rayons X-mous

Un peintre aux yeux sensibles aux rayons X trouverait notre monde quotidien plutôt sombre, à l'exception du poste de télévision. En effet, quand les électrons accélérés à l'intérieur du tube percutent l'écran de télévision, des rayons X sont générés. Dans les années 50, les postes de télévision émettaient une quantité considérable de rayons X ; aujourd'hui, ces émissions sont efficacement atténuées par les verres épais des écrans.





Le ciel dans le domaine des rayons X-durs

Nul part ailleurs dans le spectre électromagnétique, le contraste avec le ciel visible est si exorbitant : Tandis que le mouvement harmonieux des astres visibles rythme notre vie, mesurant nos jours, mois et années, le ciel des rayons X et gamma manifeste une nature chaotique. Alors que la prévisibilité et la sérénité des changements dans l'Univers est profondément enracinée dans toutes les cultures, le ciel des hautes énergies nous en montre une nouvelle face, violente et imprévisible.

Vouloir établir la carte du ciel des rayons X-durs ressemble à une tâche de Pénélope - à des échelles de temps très variées, de nouveaux astres apparaissent, fluctuent en intensité pour s'éteindre aussi brusquement qu'ils étaient apparus - la seule constance du ciel des hautes énergies réside dans le fait qu'il change sans cesse.

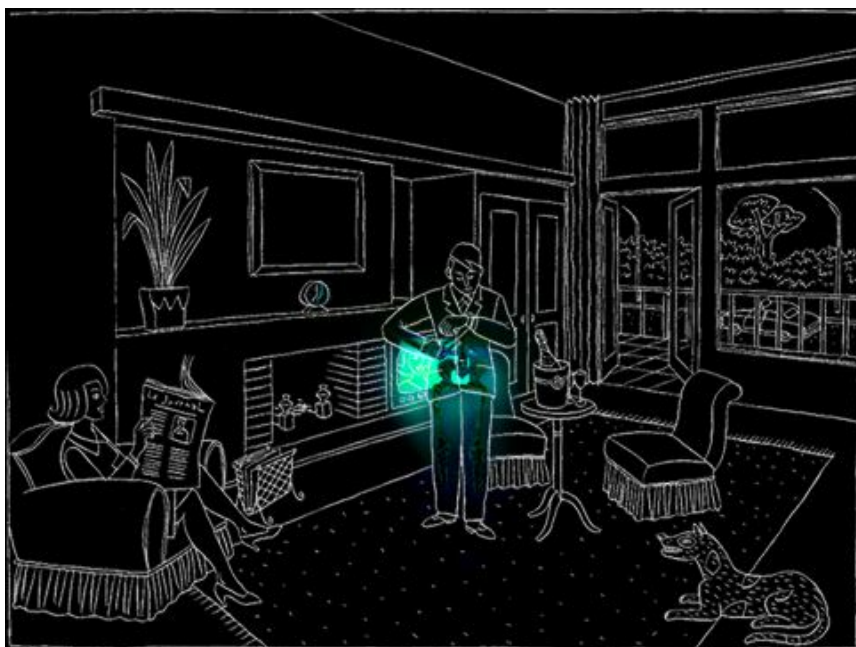
Entre 1977-1979, le satellite HEAO-1 explorait le ciel des rayons X; les données permettaient d'établir un catalogue comportant plus de 850 sources. La principale caractéristique de la carte dressée par les détecteurs d'X-durs est une famille d'objets qui se distribuent le long de la bande de notre Voie Lactée, et particulièrement dans ses régions centrales. Ces sources qui dominent le ciel des X-durs sont les "binaires X"; ils sont extrêmement compactes, malgré leur étendu apparente sur la carte, provenant de la très modeste résolution spatiale des instruments sur HEAO-1.

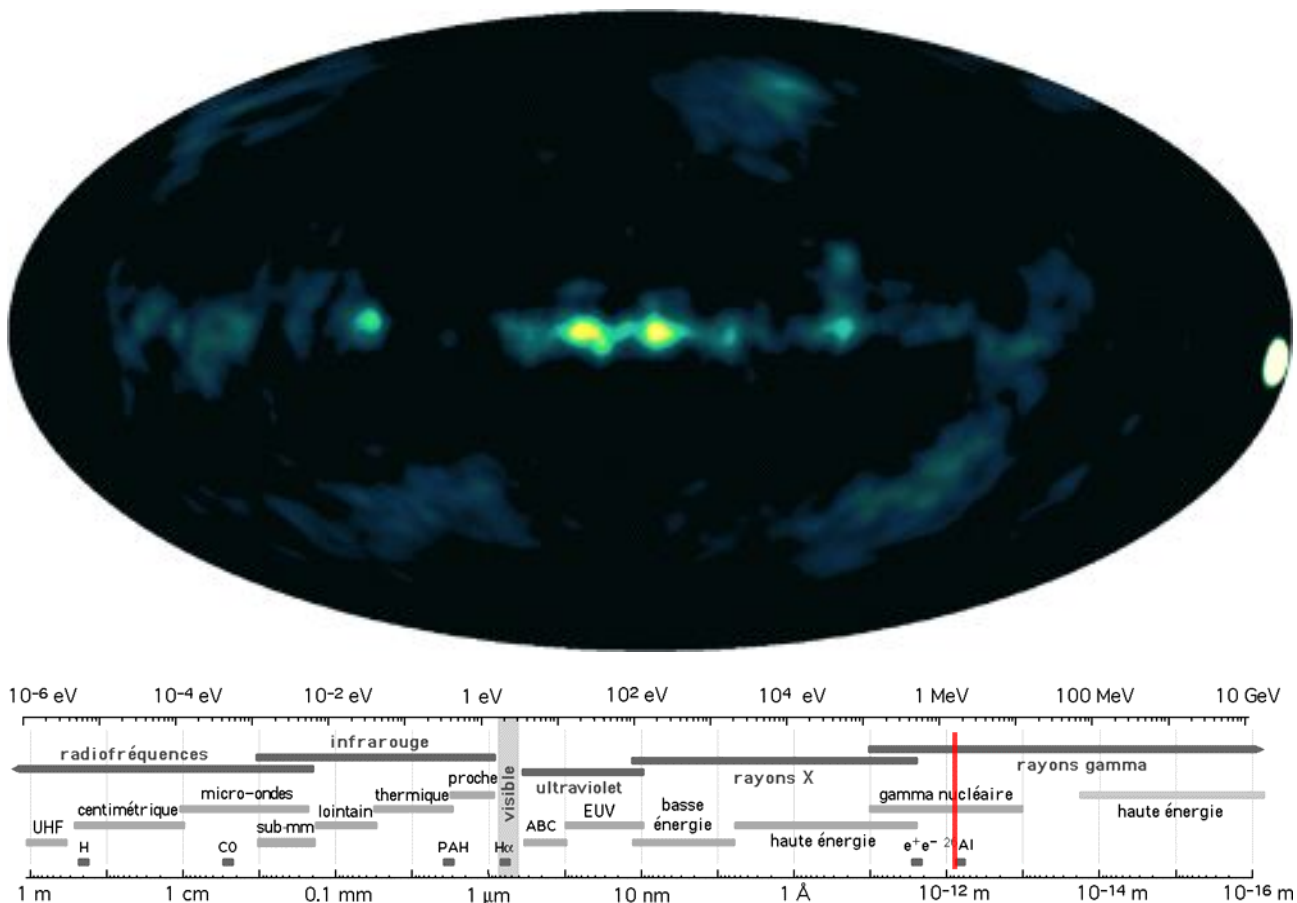
Les binaires X sont composés de deux étoiles qui gravitent l'une autour de l'autre. La chute de matière provenant d'un "compagnon" (une étoile normale) sur un "objet compact" libère de l'énergie sous la forme de rayonnement X. Quand les astronomes parlent "d'objets compacts", il s'agit de naines blanches, d'étoiles à neutrons ou de trous noir. Au cours de sa chute, la matière forme un disque d'accrétion autour de l'objet compact où la matière s'échauffe par friction; la température des électrons peut finalement atteindre plusieurs millions de degrés. Le principal mécanisme donnant naissance aux rayons X est de type "Bremsstrahlung" : un électron ayant acquis une très grande vitesse subit une forte décélération lors de sa collision avec un atome, cédant son énergie cinétique à un photon.

Les observations d'une binaire X massive, Cygnus X-1 (n° 7), comptent parmi les meilleures indications pour l'existence de trou noirs. Repérée en 1970 par le satellite UHURU, Cygnus X-1 est une source intense de rayons X durs. Son compagnon, une géante étoile bleue d'environ 30 masses solaires. Comme ce système binaire valse avec une période orbitale de 5.6 jours, on déduit sans ambiguïté la présence d'un astre effondré dont la masse s'avérerait supérieure à la limite de stabilité des étoiles à neutrons (env. $3 M_{\odot}$). Il est donc probable que Cygnus X-1 soit un trou noir.

Notre monde vu avec des yeux sensibles aux rayons X-durs

Dans les années 50, les postes de télévision étaient aussi de simples émetteurs de rayonnement X : la collision des électrons accélérés par le tube cathodique sur l'écran provoque l'émission de photons X (Bremsstrahlung). Aujourd'hui, les écrans sont équipés d'épaisses vitres qui arrêtent efficacement les rayons X ... mais autrefois, les rayons X durs étaient moins atténués. Un peintre sensible aux rayons X, et placé au bon endroit, aurait pu voir se dessiner, à la manière d'une ombre chinoise, le squelette de l'homme de notre scène. Le corps humain est pratiquement transparent à cette pénétrante forme de lumière - seules les parties les plus denses, tels les os, produisent un contraste.





Le ciel en gamma

Entre 1991 et 2000, la plate-forme orbitale GRO (Gamma Ray Observatory) a observé le ciel avec ses quatre télescopes dans une bande spectrale entre 4 et 9 ordres de magnitude au dessus de la gamme visible - un intervalle aussi large que celui entre le radio et le visible. Dans un domaine si vaste, il va de soi que l'apparence de la voûte céleste est extrêmement variée, aussi variée que ses multiples phénomènes extraordinaires.

Une physique extrêmement riche et variée se manifeste dans la seule gamme du télescope GRO-COMPTEL : les photons du MeV (de l'ordre d'un million de fois plus énergétiques que les photons visibles) témoignent de collisions à l'échelle atomique à travers le disque de notre Galaxie. Le gaz interstellaire froid et dense est continuellement soumis aux impacts des électrons du rayonnement cosmique qui sillonnent la Voie Lactée à des vitesses proches de celle de la lumière. Le freinage des électrons produit du rayonnement "bremsstrahlung" de haute énergie (voir "rayons x-durs"). Aussi, des photons gamma MeV sont émis par effet Compton inverse : un photon de faible énergie, interagissant avec un électron animée d'une grande vitesse acquiert de l'énergie aux dépens de celle-ci - l'accroissement d'énergie va transformer le photon en photon gamma.

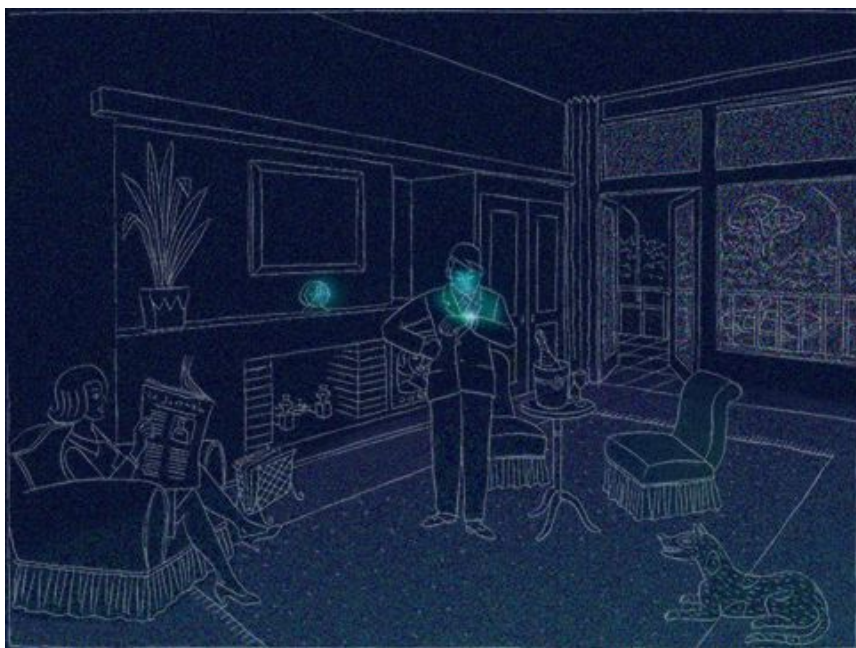
Pour celui qui aurait des yeux pour voir les rayonnements gamma, le plus impressionnant serait sans doute que le ciel se révèle être un gigantesque feu d'artifice, dominé par des bouffées d'énergie colossale: les sursauts gamma. En moyenne une fois par jour, il verrait dans une direction complètement imprévisible un éclat extraordinairement intense de rayonnement gamma. Quelques secondes plus tard, la source s'éteint, à jamais selon toute apparence. Ce phénomène tout à fait inattendu à été découvert dans les années 70 par des satellites militaires. Destinés à l'origine à contrôler la bonne application du traité d'interdiction des essais nucléaires, les détecteurs observèrent de gigantesques explosions de rayonnement gamma.

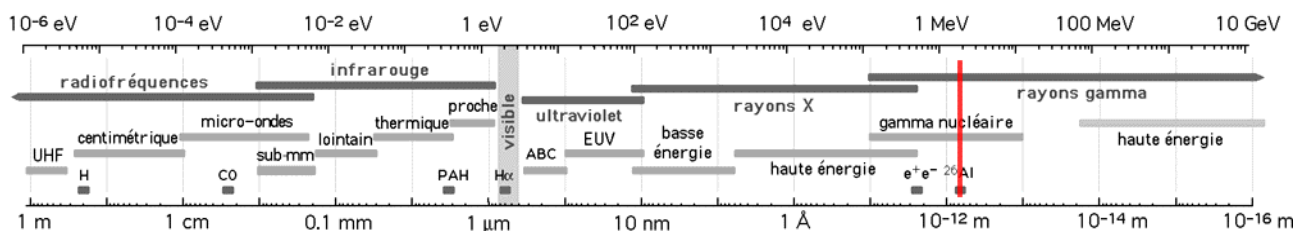
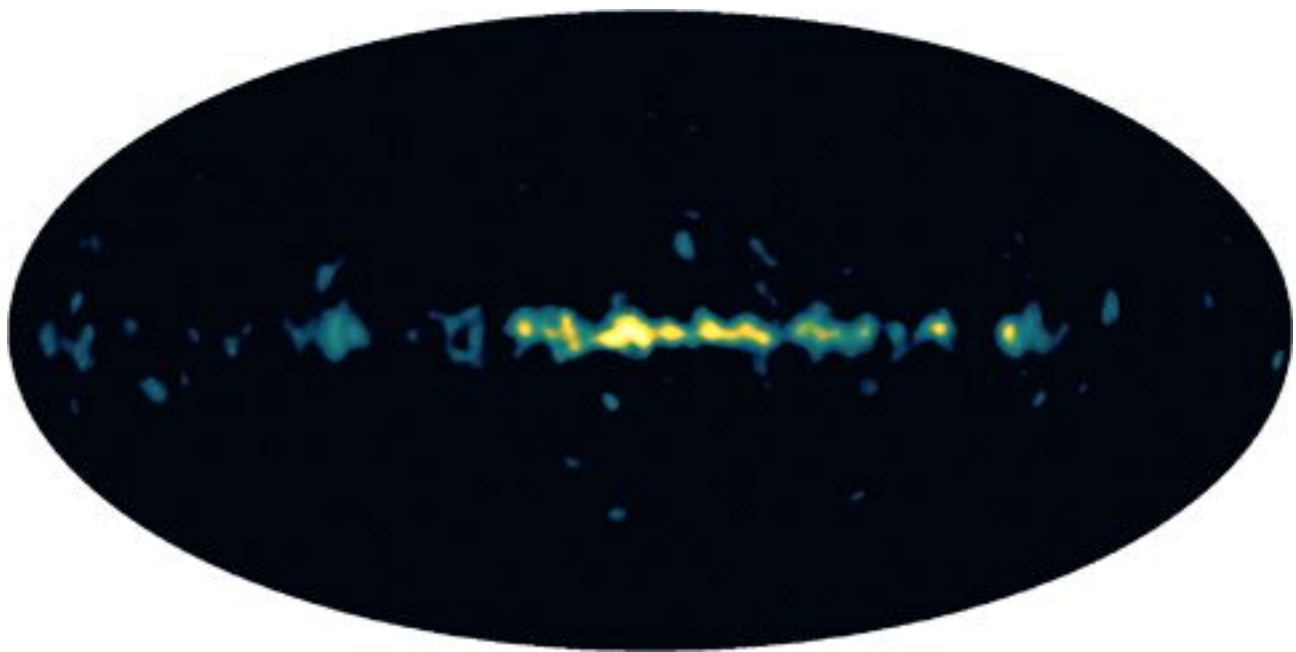
L'origine des sursauts gamma est aujourd'hui l'une des plus grandes énigmes auxquelles sont confrontés les astrophysiciens. On pense actuellement que les sursauts gamma sont situés aux confins de notre Univers. Le modèle le plus couramment admis fait maintenant appel à des explosions d'étoiles massives en fin de vie, les hypernovae (des supernovae avortés). Depuis le Big Bang, les sursauts gamma sont les plus importantes explosions dans l'Univers - leur énergie, libérée en quelques secondes, équivaldrait à l'énergie rayonnée par les cent milliards d'étoiles de notre Galaxie pendant une année ...

Notre monde vu par des yeux sensibles en gamma

Sur Terre, nous rencontrons le rayonnement gamma essentiellement à travers le phénomène naturel de la "radioactivité". Au cours d'une décroissance radioactive un atome se transforme en un autre, le noyau de celui ci passe d'un état excité à un état dit " fondamental " avec, en général, émission de rayons gamma (voir le Ciel radioactif). Notre tableau n'est pourtant pas très contrasté - seulement de faibles différences dans la composition et la concentration isotopiques permettent de distinguer certains types de sols et matériaux de construction. Par exemple, des traces de potassium radioactif transforment les vitres des fenêtres en sources de lumière à cette énergie.

De plus, les rayons gamma émis par des éléments radioactifs peuvent être diffusés par les matériaux environnants : par exemple, l'émission des produits radioactifs contenus dans les cadrans et les aiguilles sera perçue à travers leur diffusion Compton sur les matériaux proches des sources.





Le ciel radioactif

Par l'observation de raies gamma-nucléaires, dans le domaine des MeV, les détecteurs satellisés viennent de découvrir des ciels radioactifs. La carte montre notre Galaxie dans la lumière de l'isotope Aluminium 26. Sa décroissance s'accompagne de l'émission d'un photon gamma d'énergie 1809 keV. Cartographié par le télescope COMPTEL du satellite GRO, la bande de la Voie Lactée rayonne vraisemblablement de manière diffuse, par endroits elle paraît légèrement enflée. Si l'image de ce ciel peut paraître un peu dépouillé, c'est que les instruments de la génération actuelle ne sont pas encore très perfectionnés. Avec une définition plus de cent fois inférieure à celle de nos yeux, les télescopes gamma sont les malvoyants de l'astronomie moderne.

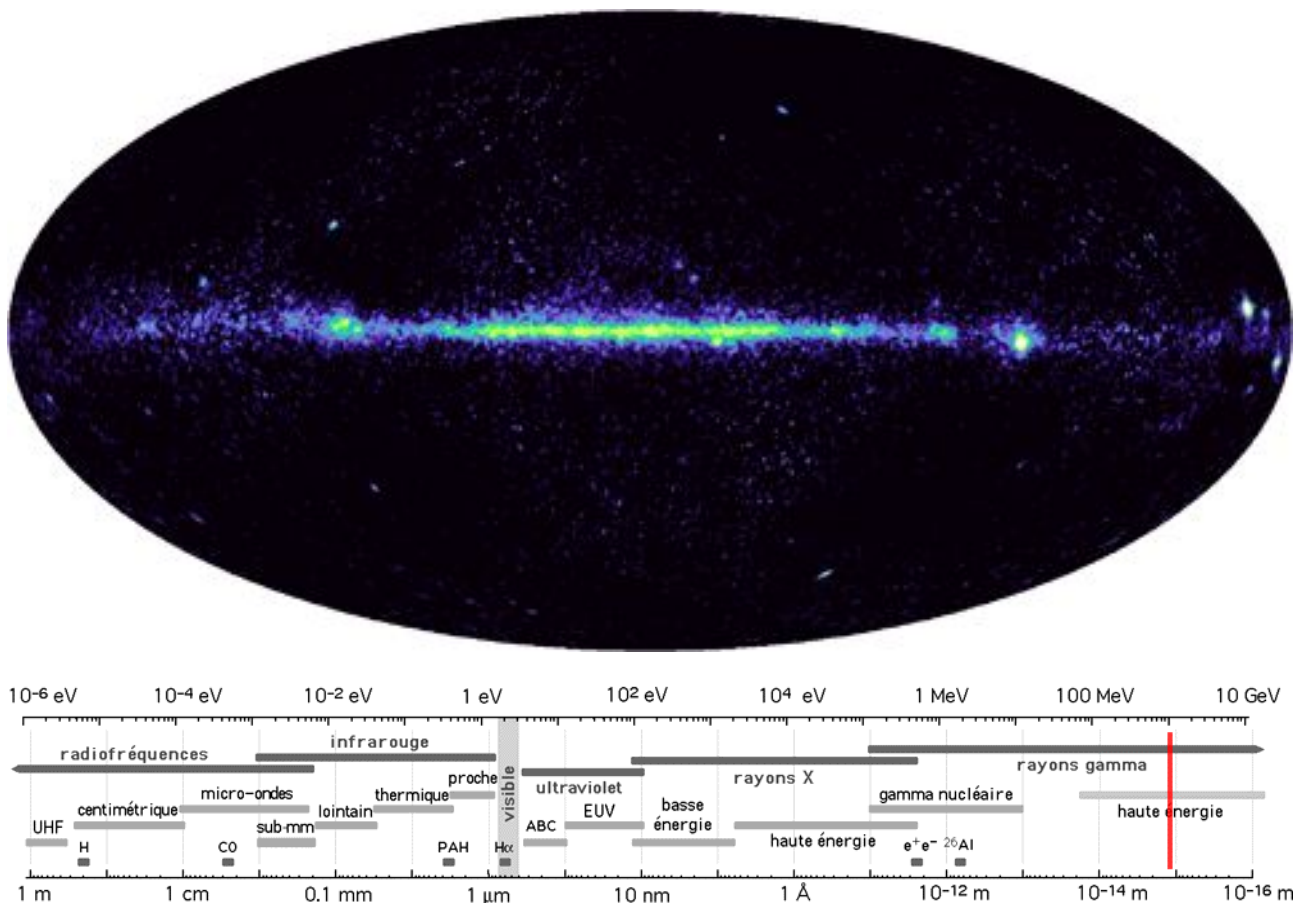
Que nous apporte l'observation de la radioactivité galactique ? Avec sa demi-vie de 700'000 ans, l'Aluminium 26 se transforme spontanément en magnésium au bout de quelques millions d'années, un temps relativement court en astrophysique. L'observation des photons gamma-nucléaires qui s'échappent au cours de cette transmutation nous informe donc forcément des sites de formation d'éléments récents - telle une empreinte digitale, la "raie gamma" à 1809 keV est la preuve directe de la production d'éléments chimiques dans notre Univers actuel.

L'émission de l' ^{26}Al est concentrée dans le plan de la Voie Lactée où les étoiles jeunes se forment et explosent. Il est intéressant de noter que les bulles de supernovae dans la constellation du Cygne (n°8) et dans la région de Vela (n° 18), sites proches où des étoiles massives ont récemment explosé (voir rayons X-mous), sont particulièrement brillantes ... indiquant que des étoiles en fin de vie produisent nos éléments chimiques !

Notre monde vu avec des yeux sensibles aux rayons gamma-nucléaires

Aujourd'hui, un peintre aux yeux sensibles à la longueur d'onde émise par un élément radioactif ne verrait pas grand chose de ce tableau à part la radioactivité naturelle présente dans certains matériaux de construction. Jusqu'aux années 50, il aurait été au moins capable de lire l'heure: en effet, à cette époque les cadrans et les aiguilles de certaines montres et horloges étaient souvent traités avec une peinture contenant des éléments radioactifs qui les rendait phosphorescents dans le noir. Ces éléments, issus de séries radioactives d'isotopes de très longue demie vie ($\geq$ milliards d'années) ont du être produits dans les étoiles massives avant que notre système solaire s'était formé - tout comme les autres éléments qui nous constituent ...





Le ciel en gamma de haute énergie

Aux énergies les plus extrêmes, plus de sept ordres de magnitudes au delà du domaine visible, la chambre à étincelles EGRET de la plate-forme GRO a observé un rayonnement provenant d'une fine bande marquée de notre Galaxie.

Ce ciel révèle la trace de phénomènes extrêmement violents : le long du disque de notre Galaxie, le gaz interstellaire froid et dense est continuellement soumis aux impacts des particules du rayonnement cosmique, noyaux d'atomes qui la sillonnent à des vitesses relativistes. Les collisions induisent des gerbes de particules élémentaires, parmi lesquelles certaines (π^0 , $\mu^\pm$...) se désintègrent en émettant des rayons gamma de haute énergie. Seulement, quel genre d'objet astronomique est-il capable d'accélérer les particules du rayonnement cosmique à des vitesses proches de celle de la lumière ? Un scénario vraisemblable pour leur accélération implique le front de choc dans les restes de supernovae (voir "Le ciel radioactif" et "Le ciel dans le domaine des rayons X").

Loin du centre de la Galaxie, on remarque des émissions en provenance de plusieurs objets insolites: les pulsars du Crabe (n° 22) et de Geminga (n°21), dans l'Anticentre de la Galaxie et le pulsar de la Vela (n°21), l'objet le plus brillant dans ce ciel. Les pulsars (voir "le ciel radio"), avec leurs formidables densités (10^{12} - 10^{16} g/cm³), leurs champs magnétique énormes (10^{12} - 10^{14} Gauss) et leurs vitesses de rotation (0.001 - 4 secondes) peuvent accélérer, si leur axe de rotation ne coïncide pas avec l'axe magnétique de l'étoile, de puissant faisceau de particules relativistes, qui, à leur tour engendrent des photons gamma.

Vers le pôle nord de la carte on distingue une des sources les plus brillantes du ciel gamma des hautes énergies : le quasar 3C279 (n° 14). Malgré sa luminosité, 3C279 ne fait pas partie de notre Galaxie : il se trouve à 10^{10} années lumière - à comparer avec le diamètre de notre Galaxie - env. 10^5 a.l. Découverts en 1960, les quasars sont des galaxies lointaines extrêmement brillantes. Ces sources furent d'abord considérées comme des étoiles, ce qui leur vaut leur nom (contraction de quasi-stars).

En combinant leur intensité apparente et leur distance, on calcule qu'un quasar moyen émet autant d'énergie que des milliers de galaxies normales réunies. Mais un quasar peut aussi changer de luminosité de façon significative sur un intervalle d'une journée, sa taille ne peut donc excéder un jour-lumière. Comment expliquer qu'un si petit objet puisse émettre tant d'énergie ? L'hypothèse la plus vraisemblable suppose qu'au cœur de ces objets lointains, un trou noir géant engloutit les étoiles et le gaz qui l'entourent.

Notre monde vu avec des yeux sensibles en gamma de haute énergie

Si nous tentions d'observer la scène du salon à cette longueur d'onde, notre peinture serait probablement entièrement noire. Les rayons gamma hautement énergétiques sont absents de notre vie quotidienne. Il n'y a que dans de grands accélérateurs souterrains, où l'on utilise les collisions de particules énergétiques pour étudier la structure élémentaire de la matière, que l'on peut produire des rayons gamma de haute énergie.

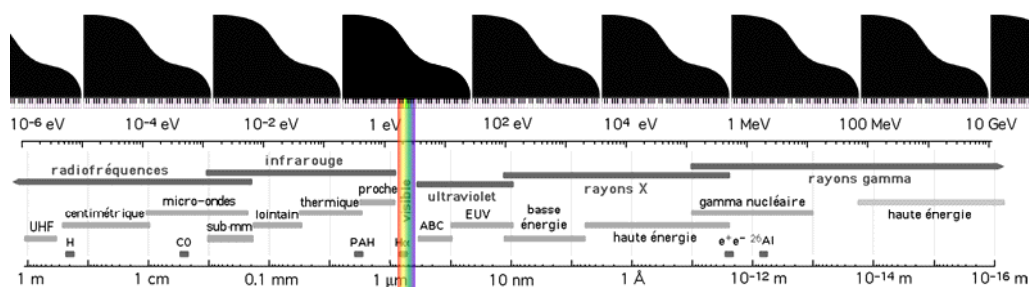


L'essentiel est invisible ...

Au cours de l'histoire de l'Astronomie, notre vision de l'Univers n'a cessé d'évoluer grâce aux découvertes successives rendues possibles par l'émergence de nouvelles technologies : nous avons ainsi découvert que la Terre n'était pas au centre du système solaire, que celui-ci était loin du coeur de la Voie Lactée, et que notre Galaxie n'avait aucune place particulière dans l'Univers.

Aujourd'hui, les découvertes de l'ère spatiale nous invitent à nouveau à dépasser la simple vision anthropocentrique : nous devons apprendre que nos yeux ne nous font connaître qu'une infime fraction du spectre électromagnétique. Outre la place insignifiante que nous occupons dans l'espace, et le temps limité qui nous est donné pour l'explorer, nous sommes limités à la "cinquième dimension" : celle des couleurs.

Le domaine des couleurs visibles couvre un intervalle qui correspond à peine à la largeur d'une octave. Sur un "piano de lumière" cette octave se décomposerait en tons et demi-tons allant du rouge au violet. L'échelle de ces couleurs devrait donc tout-à-fait convenir pour interpréter un motif simple. On imagine cependant à quel point la nature pourrait s'exprimer sur les sept octaves d'un piano entier.



Couvrant ainsi les domaines de l'infrarouge proche à l'ultraviolet C, la richesse et la subtilité des coloratures feraient paraître la gamme visible incolore et monotone. Bien que ce "piano de lumière" signifie tout un Univers de couleurs, ce n'est toujours que la pointe de l'iceberg : chacune des six facettes du ciel invisible esquissées ci-dessus représente un échantillon d'un tel Univers. L'intégralité des longueurs d'onde observés aujourd'hui, du domaine des ondes radio aux rayons gamma des hautes énergies, comprend plus de 50 octaves !

Si nos yeux perçoivent une octave sur plus de cinquante, l'essentiel est clairement invisible ... aujourd'hui, l'astronome ne voit bien qu'avec ses détecteurs - et à travers les ordinateurs - au coeur de l'astrophysique moderne sont les observations multilongueur d'onde.

Provenance des cartes du ciel : Max Planck Institut für Radioastronomie, Bonn, Allemagne (radio 408 MHz, 1420 MHz); NASA / Goddard Space Flight Center, Greenbelt USA (données des satellites COBE, HEAO et GRO-OSSE), Max Planck Institut für extraterrestrische Physik, Munich, Allemagne (données des télescopes ROSAT, GRO COMPTEL et EGRET); Lund Observatory, Lund, Suede (origine de la carte visible, transformation de coordonnées : CESR); Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse (carte de ^{26}Al); Tableau : "Notre monde vu avec d'autres yeux", Loustal, von Ballmoos

Remerciements à Jürgen Knödlseider, Cyril Dall'Ava, Christophe Galian, et Pascale Ramon du CESR.