

# Notre Univers Vu en Neutrinos

J. Mimouni

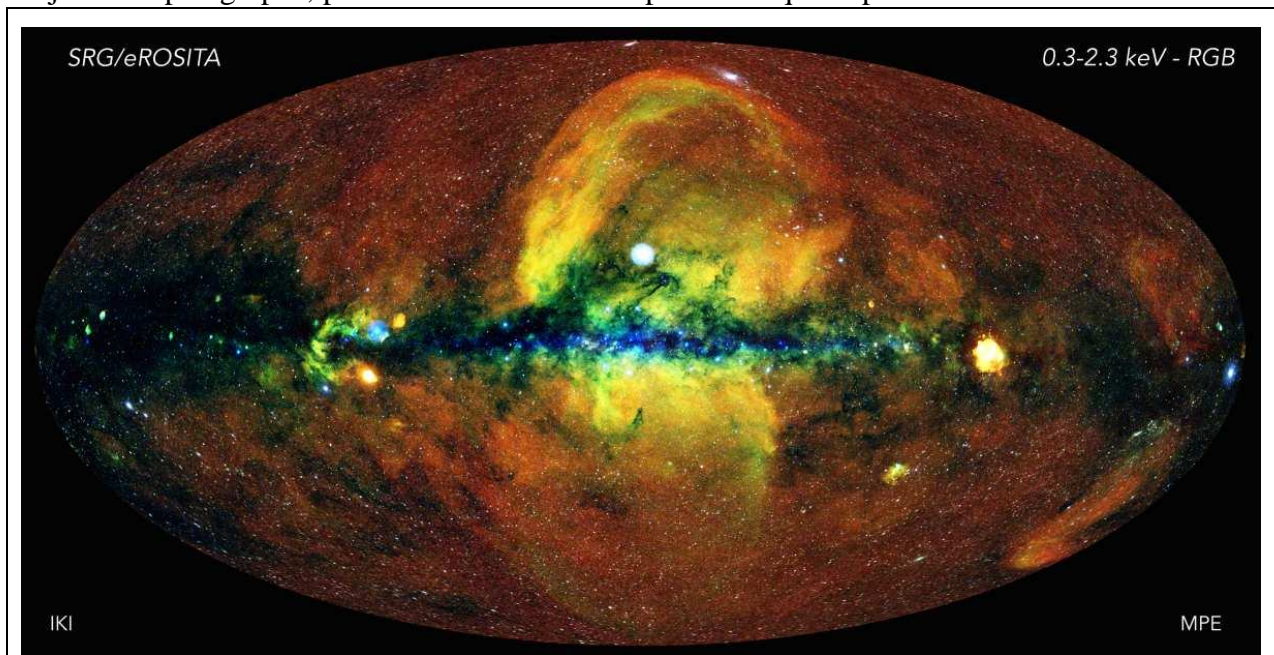
Univ. de Constantine 1, LPMPS, Constantine, Algérie

<https://lastronomieafrique.com/notre-univers-vu-en-neutrinos/>

Nous sommes tous familiers avec le ciel tel que nous le voyons en visible, avec l'éclat des étoiles et nébuleuses de notre Galaxie, et des galaxies proches et lointaines. Les images de nos télescopes terrestres et en particulier celles provenant du télescope spatial Hubble (HST) à la résolution inégalée a fixé dans les esprits des gens de glorieux panoramas qui font partie du spectacle céleste et qui nous viennent spontanément en mémoire lorsqu'on imagine le cosmos. Ce n'est pas briser la magie de ces charmantes scènes cosmiques devenues lieux communs que de dire qu'elles sont à bien des égards assez trompeuses car adaptées à notre petite fenêtre visuelle se situant entre 0.4 à 0.7microns. En effet, vu à d'autres longueurs d'ondes, ces paysages se métamorphosent en d'autres assez différents. De plus, vu à travers d'autres messagers que le photon, les scènes deviennent souvent méconnaissables. Nous aborderons dans cet article, d'autres astronomies que celle du visible, et en particulier une astronomie née précisément un certain jour de janvier 1987 que l'on appelle l'astronomie des neutrinos.

## L'Astronomie Classique ou «Photonique»

Depuis le siècle dernier, d'autres visions du ciel que celle du visible s'offrent à nous grâce notamment au progrès technique, d'abord pour le rayonnement optique, ce qui fera le sujet de ce paragraphe, puis en utilisant d'autres particules que le photon.



**Fig 1:** Notre vision la plus profonde du ciel aux rayons X grâce au télescope spatial eROSITA. La fine bande **bleue** centrale irrégulière correspond au plan de notre Galaxie. La tache brillante jaune à droite est le reste de la supernova qui a formé la nébuleuse des Voiles.

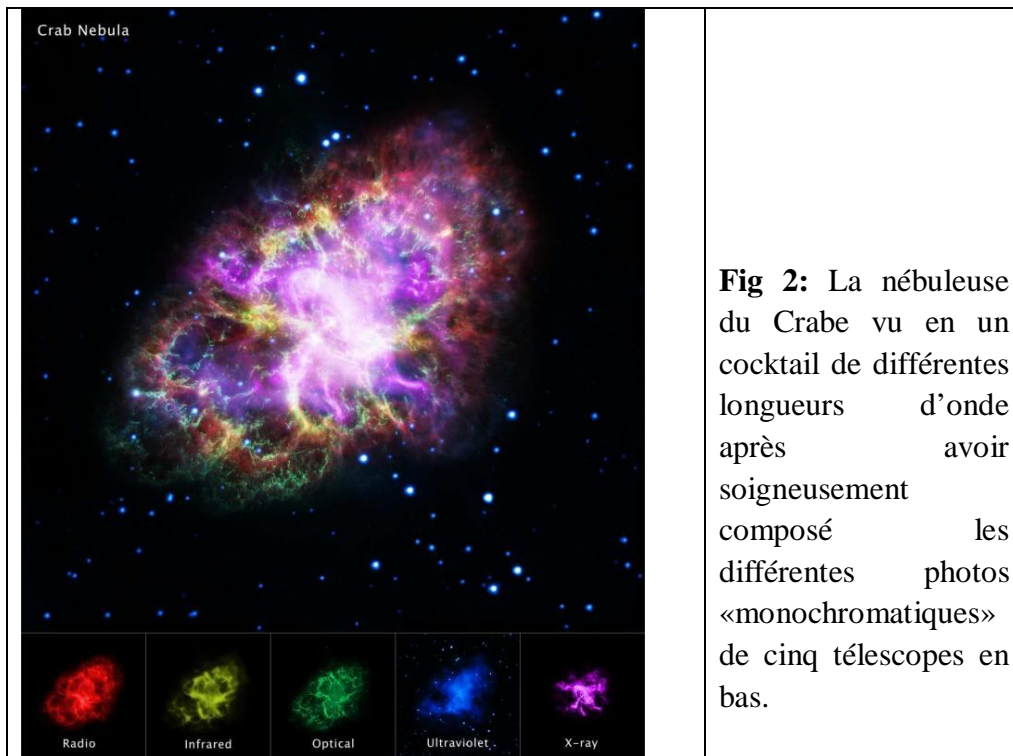
En effet, si la fenêtre visible est celle de l'astronomie traditionnelle, celle qui utilise les yeux puis l'argentique, pourquoi se limiter à ce que permet notre détecteur naturel qu'est l'œil ou son extension l'appareil photo? Cela commença par découverte du rayonnement infrarouge (IR) par l'astronome William Herschel dès 1800, puis se poursuivit avec notre compréhension de l'électromagnétisme qui étendit le spectre des ondes «lumineuses» bien au-delà de la fenêtre du visible.

Il suffisait seulement d'avoir les détecteurs adéquats pour explorer ces fenêtres nouvelles (Fig 1). Encore fallait-il que ces rayonnements puissent nous parvenir sur Terre, ce qui n'est pas le cas pour un large domaine du spectre photonique qui est absorbé par l'atmosphère terrestre. Il fallut aller chercher ces photons en sortant de l'atmosphère, d'où le développement de l'astronomie embarquée depuis l'ouverture de l'ère spatiale. Chaque domaine de fréquence des photons donna lieu à une astronomie nouvelle: Astronomie en infra-rouges (IR), ultra-violets (UV), en rayons-X, en rayons-gamma et en ondes radio.

## **L'Astronomie Multimessager**

Mais pourquoi se limiter aux photons pour sonder l'Univers et nous informer de son contenu et des processus s'y déroulant? Toute particule stable s'y propageant sur de longues distances peut être mise à contribution pour nous ramener les dernières nouvelles du Cosmos. Vite, quelles sont les particules stables qui existent? Tout physicien en herbe, tout honnête homme scientifique de ce début du XXIème siècle pourra vous en faire la liste. Elle est d'ailleurs si courte que c'est un jeu d'enfant... même s'il aura fallu tout les efforts de la physique du siècle dernier pour l'élaborer! Alors la voilà: le proton l'électron, le neutrino... et le graviton.

Il y a cependant un intrus qui s'est glissé dans notre liste. Seriez-vous à même de le débusquer? Accordez-vous un moment de réflexion et puis vous comparerez votre réponse avec celle donnée un peu plus loin. En fait, chacune des particules mentionnées forme désormais une branche particulière de l'astronomie. Nous avons ainsi l'astronomie des protons dite des Rayons Cosmiques, celle des neutrinos, des ondes gravitationnelles, chacune utilisant la particule fondamentale associée comme messenger cosmique.

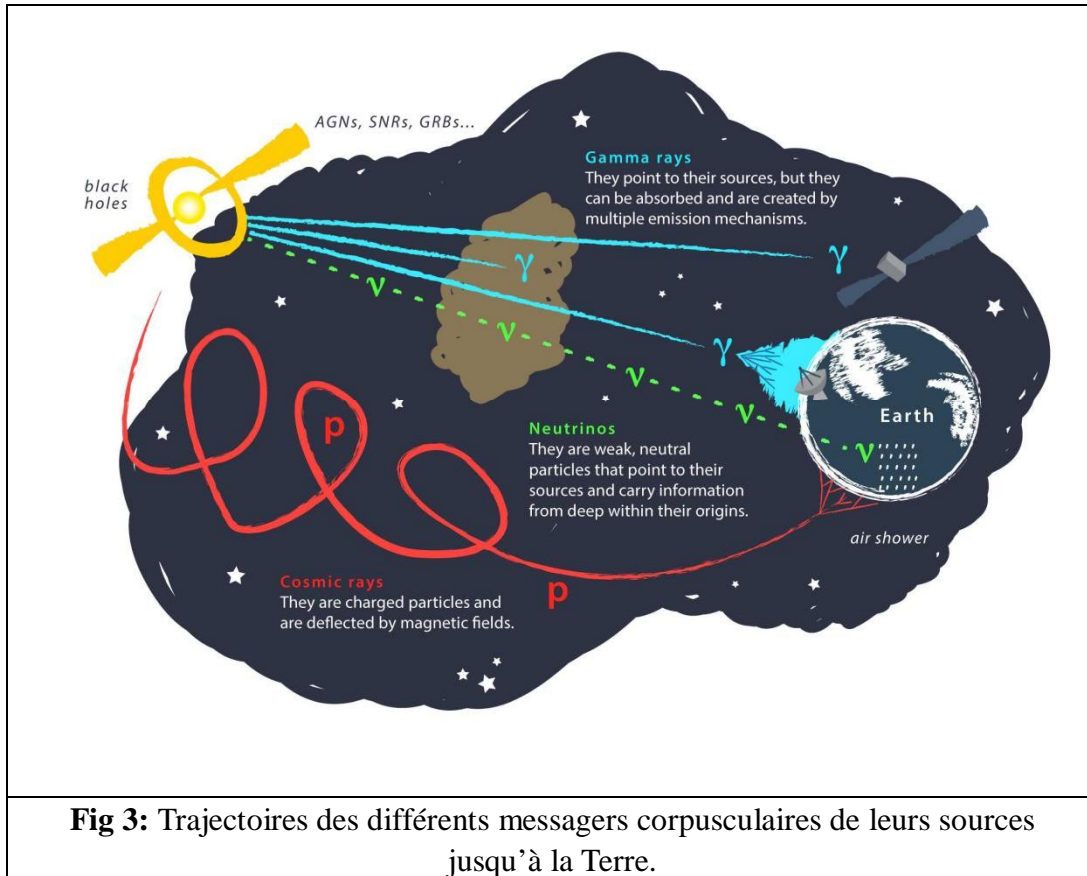


**Fig 2:** La nébuleuse du Crabe vu en un cocktail de différentes longueurs d'onde après avoir soigneusement composé les différentes photos «monochromatiques» de cinq télescopes en bas.

Cette astronomie nouvelle, en fait largement synthétique, est le fruit du progrès de la physique des particules appliquée au Cosmos. Elle est aussi multidisciplinaire que peut l'être une branche du savoir, en fait c'est dans un sens, la plus fondamentalement multidisciplinaire de tous les prétendants à la pluridisciplinarité puisque utilisant toutes les particules «fondamentales» stables connues.

## **L'Astronomie Protonique ou des Rayons Cosmiques**

Cette astronomie particulière utilise le proton, cette lourde particule de matière chargée qui peut parcourir d'immenses distances sans souci et qui peut donc nous informer des conditions physiques régnant à sa source. Ceci est possible pour deux raisons bien distinctes, d'abord parce que le proton est stable et n'aura donc pas la mauvaise idée de se désintégrer en chemin telles que d'autres particules fondamentales comme le muon et le pion, mais surtout parce que l'espace entre les étoiles dit espace intersidéral, ou même entre les galaxies dit intergalactique, est essentiellement vide. Le proton a cependant un grave défaut pour son utilisation optimale en astronomie: il est chargé et donc sensible aux champs magnétiques des régions qu'il traverse avant de nous parvenir. Ces champs magnétiques, mêmes extrêmement faibles par rapport à ceux régnants sur Terre par exemple, agissent sur d'immenses distances et sont à même de dévier complètement la trajectoire des protons qui arrivent finalement sur Terre en rendant leurs directions aléatoires (Fig 3).



Ainsi, contrairement aux photons, leur détection sur Terre ne permet pas de désigner la position de la source dans le ciel- sauf pour les rayons cosmiques d'ultra haute énergie- leurs détecteurs sont à cet égard de bien mauvais télescopes au sens traditionnel. Pourtant leur capacité à sonder des domaines d'énergie très élevée et donnant donc un aperçu des phénomènes de l'Univers violent et inaccessibles par d'autres moyens rend l'astronomie des rayons cosmiques irremplaçable. Ajoutons pour la précision que les rayons cosmiques, en plus des protons qui en sont la composante principale, comprennent aussi des noyaux légers eux aussi chargés, quelques noyaux plus lourds, ainsi que les rayons gamma d'ultra haute énergie.

## L'Astronomie des ondes gravitationnelles

Cette astronomie des ondes gravitationnelles (GW) ou «gravitonique» pour lui donner une touche de physique des particules, est une autre branche récente de l'astronomie qui est née précisément en 2015 avec la première détection sur Terre d'une bouffée d'ondes gravitationnelles provenant de la fusion de deux trous noirs à quelque 1.4 milliards d'année-lumière de chez nous. Notons que parler de gravitons pour désigner ces GW est en fait commettre un petit abus de langage. En effet, les physiciens des particules l'utilisent dans une vision essentiellement quantique, et le principe de dualité onde-particule aidant, l'homologue des GW est une particule s'insérant dans le formalisme de la Relativité Générale d'Einstein décrivant la gravitation et doté d'un spin 2 que l'on a naturellement dénommé graviton. Sauf que ces gravitons ne peuvent par aucun moyen présent et futur être détecté et leur existence elle-même est considérée comme une extrapolation quantique tenue pour nécessaire par les physiciens théoriciens! Cependant, les ondes gravitationnelles existent bel et bien

indépendamment de tout formalisme quantique.

Il ne faudrait pas confondre ces ondes avec la force de gravitation qui s'exerce entre corps massifs suivant la loi de Newton. Dans le cas des GW, c'est bien les médiateurs mêmes de cette gravitation que l'on observe et qui sont produits en quantité détectable lors d'événements ultra violents mettant en branle des masses énormes et des accélérations prodigieuses. Ce sont finalement des ondes d'espace-temps qui perturbent momentanément la géométrie de l'espace lui-même lors de leur passage. Ces GW se déplacent à la vitesse de la lumière et sont porteuses de précieuses informations sur les processus qui leur ont donné naissance et sur l'environnement des sources mêmes. Cette fenêtre est cependant très éclectique et se limite à la fusion de systèmes d'objets compacts tels que trous noirs stellaires ou galactiques, étoiles à neutron, (de la rotation dissymétrique de certains de ces objets compacts), et peut-être à certains événements qui en génèrent aux tout premiers instants de l'Univers.



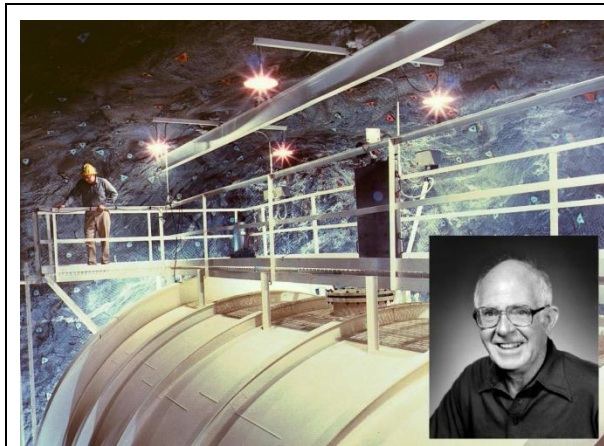
**Fig 4:** Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo en Italie avec ses deux bras en forme de L de 3km de longueur chacun.

Leur détection se fait au moyen de gigantesques instruments en forme de la lettre «L» chacun étant en fait une sorte d'interférométrie comme celui de Fabry-Perrot en optique classique, mais hors échelle (Fig 4). Trois de ces détecteurs sont en fonctionnement actuellement, deux en tandem du nom de LIGO aux États Unis et l'autre Virgo en Europe.

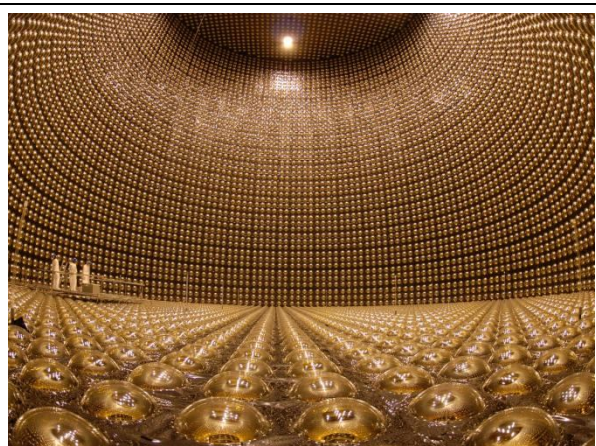
## **Le Neutrino, cette particule passe-muraille**

Nous arrivons au cœur de notre article proprement dit, le neutrino comme messager céleste. C'est une particule fort discrète, fantomatique comme elle est décrite parfois, qui fut prédite par le grand physicien Le neutrino est également un messager céleste. C'est une particule fort discrète, fantomatique comme elle est décrite parfois, de masse quasiment nulle et sans charge électrique qui fut prédite par le physicien Wolfgang Pauli pour expliquer des

processus de désintégration nucléaire de type bêta. La nouvelle force fondamentale - ou interaction dans le jargon des physiciens- par laquelle le neutrino est produit est dite interaction nucléaire faible, et son domaine d'application va bien au-delà de ces réactions de désintégration. C'est d'ailleurs la plus universelle de toutes les interactions fondamentales et toutes les particules quel que soit leur nature y sont sensible. Il s'avère que le neutrino est la particule la plus omniprésente de toutes les particules matérielles et elle est presque aussi abondante que le photon dans l'Univers. Notons que bien que le neutrino apparaisse surtout dans des processus nucléaires, il n'a pourtant aucune relation avec l'interaction nucléaire dite forte, ni même avec l'interaction électromagnétique vu qu'il n'est pas chargé, mais agit uniquement par le biais de l'interaction nucléaire faible.

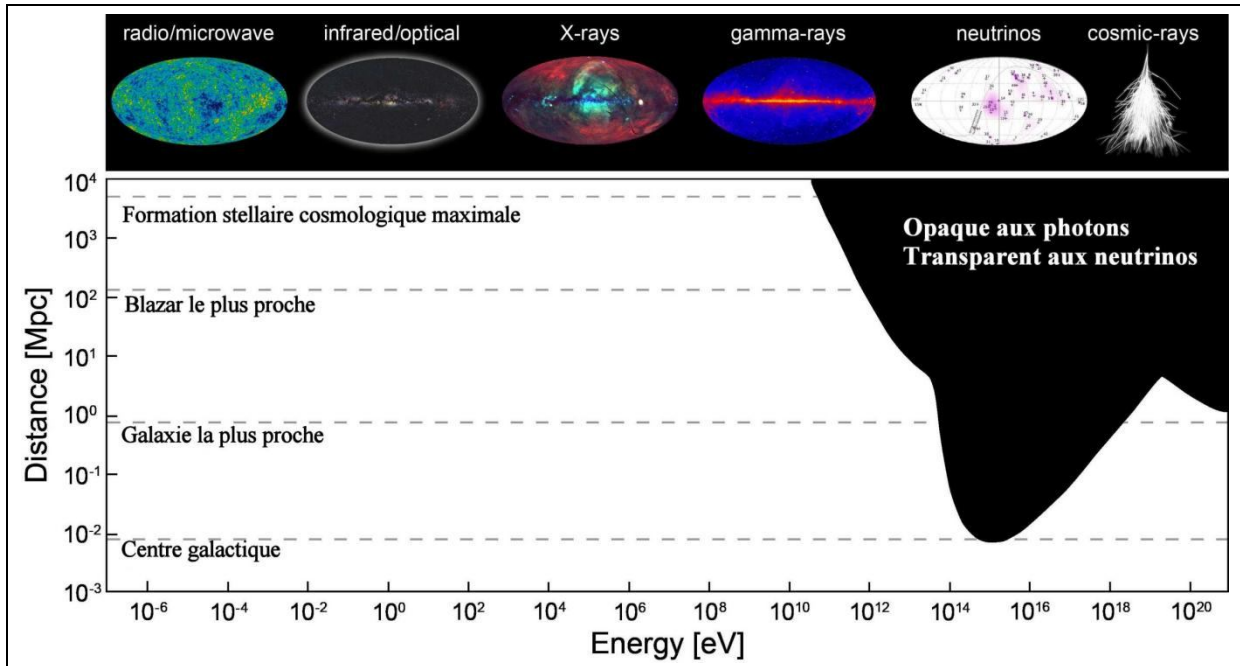


**Fig 5:** L'expérience historique de Raymond Davis dans la mine d'or abandonnée de Homestake au Dakota du Sud aux Etats Unis. Elle aboutira à la détection des neutrinos solaires, ouvrant ainsi la voie à l'astronomie des neutrinos. Davis (à gauche debout sur la plate-forme et aussi en médaillon), un chimiste de formation, obtiendra le prix Nobel de physique en 2002.



**Fig 6:** La gigantesque cuve du détecteur de neutrinos Super Kamiokande au Japon contenant quelque 50.000 tonnes d'eau ultra pure et tapissée de modules optiques pour détecter les photons Cerenkov trahissant l'annihilation d'un neutrino cosmique. Les trois hommes au fond à gauche donnent l'échelle.

Cette faiblesse atavique de l'interaction du neutrino avec la matière fait de lui la parfaite particule passe-muraille; quasiment rien ne le retient sur place. D'ailleurs Pauli de désespoir, reconnu tout contrit qu'il venait de postuler l'existence d'une particule qui ne pourrait jamais être détectée et qui ne peut être confinée ou presque. A son époque, émettre une telle hypothèse sur l'existence d'une nouvelle entité fondamentale était en science assez proche de l'occultisme, quoique les mentalités ont bien évoluées depuis! Ainsi comme exemple souvent cité pour apprécier la faiblesse de cette interaction du neutrino, un calcul simple donne pour qu'un neutrino puisse être absorbé par la matière avec **une probabilité** appréciable, il lui faudrait traverser quelque 10 années- lumière de longueur de plomb.



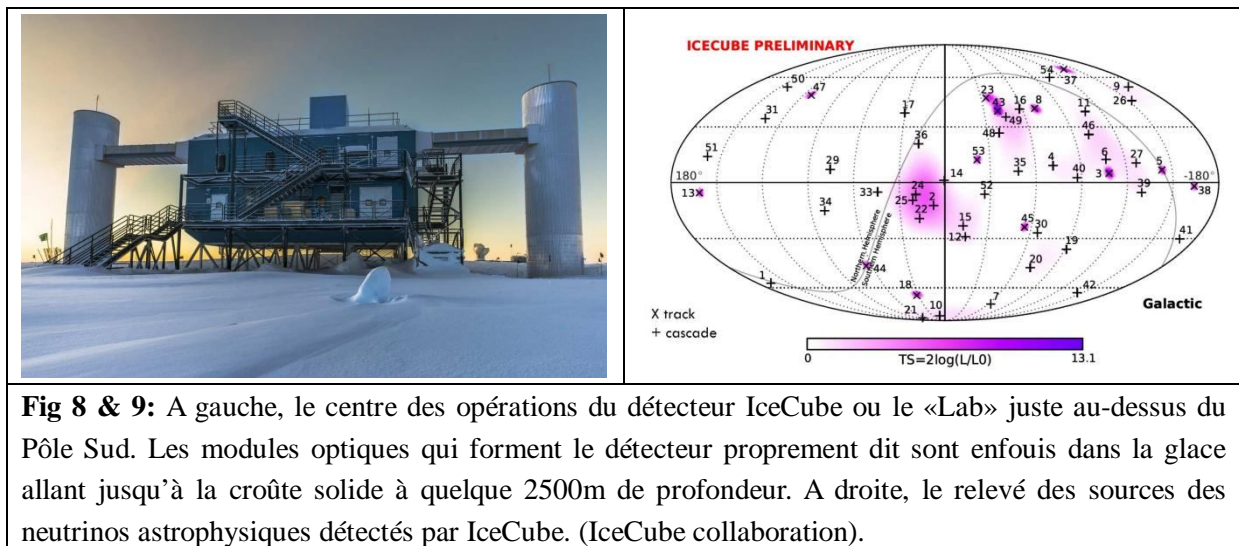
**Fig 7:** L'absorption des photons en fonction de la distance. Alors que l'Univers permet aux neutrinos, aux GW ainsi qu'aux photons de faible énergie de voyager essentiellement sans entrave, les photons plus durs sont arrêtés à diverses distances suivant les milieux rencontrés. Nous voyons que dans une large gamme d'énergie (En noir) l'Univers ne peut être exploré par l'astronomie photonique. La bande supérieure représente l'Univers vu à travers diverses fenêtres multi-messager de la Terre. (IceCube Collaboration)

En fait heureusement pour lui et pour la science, il se trompait lourdement. L'ingéniosité des scientifiques permit de le détecter expérimentalement en plaçant leur un appareil à proximité immédiate d'une des plus puissantes et compactes sources de neutrinos sur Terre : un réacteur nucléaire. L'expérience conduite par Cowan et Reines se déroula en 1957 en utilisant l'intense flux de neutrinos du réacteur nucléaire de Savannah River en Caroline du Sud aux États-Unis qui venait juste d'entrer en fonctionnement. La physique des neutrinos venait véritablement de naître. A quand donc une astrophysique des neutrinos? Seuls les neutrinos de très haute énergie, comme ceux qui seront étudiés avec le projet chinois GRAND, ont une section efficace plus grande, et la traversée d'une montagne suffira à en détecter un grand nombre.

## La Fenêtre Neutrinique sur l' Univers

En plus de la production de neutrinos par les réacteurs nucléaires et la radioactivité de la Terre, ceux-ci sont abondamment produits au sein des étoiles, des Supernovae, et au niveau des jets de trous noirs actifs. En général, les AGN (Active Galactic Nuclei), ces galaxies en surchauffe grâce précisément à un trou noir central actif sont les sources supposées pour toutes ces variantes, y compris pour les monstrueux quasars et blazars. Mais d'emblée, le défi paraît formidable: comment détecter des neutrinos de sources situées à des distances cosmologiques alors que le faire sur Terre relève déjà de l'exploit et qu'il fallait comme nous l'avons vu se placer à proximité d'une source intense de telles particules ? L'idée de base est pourtant simple: pour pallier à la faiblesse extrême de l'interaction du neutrino avec la matière, il faut en faire passer beaucoup par un détecteur pour que sa probabilité d'interagir

soit non négligeable. Ainsi, à défaut de se placer à proximité d'une source intense, ce qui n'est pas possible pour l'astronomie où la détection doit se faire nécessairement sur Terre ou en orbite, il faut utiliser un détecteur gargantuesque. En pratique, il y a trois milieux suffisamment transparents sur Terre qui peuvent jouer ce rôle de maxi détecteur hors gabarit, l'atmosphère terrestre, le fonds des océans ou l'écorce de glace de l'Antarctique. Il y a dans le premier cas de «détecteur atmosphérique» un sérieux problème de fond parasite, et seuls pourraient éventuellement être observés des neutrinos ultra-énergétiques. Il reste les deux autres derniers cas pour lesquels des détecteurs sont actuellement en activité ou en voie de réalisation.



**Fig 8 & 9:** A gauche, le centre des opérations du détecteur IceCube ou le «Lab» juste au-dessus du Pôle Sud. Les modules optiques qui forment le détecteur proprement dit sont enfouis dans la glace allant jusqu'à la croûte solide à quelque 2500m de profondeur. A droite, le relevé des sources des neutrinos astrophysiques détectés par IceCube. (IceCube collaboration).

Notons que même s'il n'y pas de source intense proche à part le Soleil, ces explosions d'étoiles massives en fin de vie que sont les Supernovae sont aussi des sources super intenses de neutrinos. Ces neutrinos émis durant quelques secondes équivalent à tous les neutrinos produits par le Soleil durant ses quatre milliards et demi d'années et peuvent constituer un signal détectable. Là encore on compense la distance de la source par l'intensité du flux de neutrinos. La loi de décroissance de tout flux de matière ou rayonnement suivant l'inverse de la distance au carré, on peut se convaincre facilement que seules les supernovas galactiques sont accessibles. Encore faut-il être prêt pour un tel événement rare. C'est bien ce qui se passa le 23 février 1987 lorsque dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine en orbite autour de la nôtre, une étoile géante bleue connut son heure de gloire en expulsant ses couches extérieures suite à une implosion de son cœur de fer (SN87A). Le feu d'artifice céleste était suffisamment puissant pour qu'il puisse être vu à l'oeil nu, un phénomène rarissime qui n'avait pas été observé depuis la fameuse supernova de Kepler en 1604. Ceci marqua la naissance de l'Astrophysique des neutrinos. Reconnaissons qu'au rythme dans le meilleur des cas de deux à trois Supernovae par siècle dans notre Galaxie, les postulants au titre d'astronomes des neutrinos de SN ont tout le temps de voir leurs cheveux blanchir avant la prochaine détection!

C'est avec un détecteur de ce type situé précisément au Pôle Sud, appelé IceCube (Fig 8) que furent détectés en 2012 les premiers neutrinos astrophysiques. Le détecteur consiste en un milliard de mètres cubes de glace immaculée de plusieurs kilomètres d'épaisseur sous la surface du pôle Sud où furent enfouis quelques 2000 modules optiques à même de détecter la pâle lumière Cerenkov signalant l'interaction de neutrinos cosmiques avec la glace. D'autres

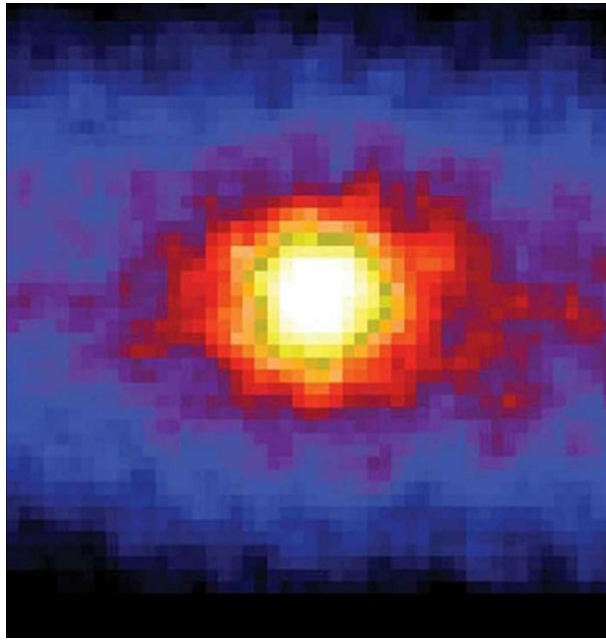


sont en construction, dont l'un en Méditerranée appelé KM3NeT lui aussi dans la catégorie du milliard de tonnes (Rappelez-vous, avec la densité de l'eau qui est d'un, un mètre cube c'est une tonne). Vous ne serez pas surpris de savoir ce à quoi correspond l'acronyme : «The Cubic Kilometre Neutrino Telescope».

Contrairement aux détecteurs des rayons cosmiques, les neutrinos, insensibles à toute interaction de par leur masse quasiment nulle et leur neutralité électrique, révèlent la direction de leur source d'origine comme les photons le font si bien. Sauf que là, c'est de la source même qu'émanent les neutrinos et non de la dernière «couche» d'interaction comme l'est la surface du Soleil pour les photons. Ainsi, si la lumière solaire nous parvient 8mn après avoir quitté la surface du Soleil, ses photons ont été produits quelque 30.000 ans avant au cœur du Soleil, soit lors du dernier âge glacial sur Terre. Par contre, les neutrinos solaires qui atteignent nos détecteurs terrestres ont été émis il n'y a pas plus que 8mn et «deux secondes» du cœur même du Soleil.

Il faut cependant avouer que l'astronomie des neutrinos est bien dans son enfance à présent avec une poignée de neutrinos de sources astrophysiques lointaines détectés jusqu'à présent. On a de plus été incapable de les corrélés en direction à des sources connues, et donc le ciel en neutrinos est plutôt blême avec une distribution assez isotrope (Voir la Figure 9). La détection du premier neutrino pointant vers une source astrophysique a eu lieu en 2017 et correspondait à un blazar à quelque 3.7 milliards d'années-lumière de chez nous. L'aubaine serait bien sûr que se répète l'événement de la Supernova de 1987, et si possible dans notre Galaxie même, auquel cas des milliers voire des dizaines de milliers de neutrinos qui seraient détectés. Personne ne sera surpris de savoir que tous les détecteurs de neutrinos sur Terre (n fait souterrains) sont à l'affut d'un tel événement extraordinaire s'il arrivait à se produire. Il ne faudrait cependant pas que cette explosion d'étoile se produise trop près de la Terre, auquel cas la grosse bouffée de neutrinos qui nous parviendrait serait accompagnée d'un déluge de rayonnement X et gamma destructeurs.

Pour ces bons télescopes qui «pointent» vers la source, les dimensions se comptent en gigatonnes de matière fiduciaire (L'eau en général) et non en diamètre d'un miroir principal. L'astronomie des neutrinos porte en elle la promesse de voir les étoiles en plein jour... et dans toutes les directions, y compris celles du côté opposé au sol, puisque les neutrinos passe-muraille auront traversé la Terre ! Elle complétera les autres astronomies en nous dévoilant certains secrets de l'Univers violent (Très hautes énergies) et même peut-être de l'Univers primordial (Très proche du Big Bang).



**Fig 10:** Le Soleil «photographié» en neutrinos. La résolution n'est pas fameuse. Encore faudrait-il se rappeler que cette photo du Soleil a été prise de nuit et en regardant vers le bas à travers la Terre! Qui dit mieux? (Super Kamiokande collaboration)

Entre temps, pour avoir un avant-goût en toute sobriété des promesses de l'astrophysique des neutrinos, pourquoi ne pas méditer sur cette belle photo du Soleil en neutrinos (Figure 10)?

### Réponse à Question et Questions sans Réponses (Attention spoilers)

Revenons à une question laissée de côté plus haut. Vous avez du réaliser que la particule stable en trop dans la liste des particules stables était l'électron. En effet, malgré sa stabilité, il n'y a pas de branche astronomique qui lui est associée, une astronomie qui s'appellerait naturellement l'astronomie des électrons ou de leurs antiparticules les positrons. La raison, certains d'entre vous l'aura deviné, est liée au fait que l'électron a une charge et donc est dévié par tout champ magnétique. Mais cela ne peut-être qu'une partie de la réponse car les plus futés d'entre vous objecteront que cela est aussi le cas pour les protons. En fait, vu sa faible masse, son libre parcours moyen est limité et donc l'électron ne peut nous parvenir que de sources très proches pour lesquelles les distances parcourues sont minimales au regard des distances des objets célestes intéressants dans notre Galaxie et plus encore pour ceux au-delà. Elle ne peut donc constituer qu'une astronomie de proximité. Mais nous possédons d'autres moyens plus efficaces pour sonder ces environnements cosmiques immédiats, et cette astronomie potentielle n'apporterait quasiment aucune plus-value. Notons que nous parlons bien sûr que des électrons primaires, c'est à dire ceux produit au sein des sources astrophysiques observées, et non ceux produits au voisinage des détecteurs par des collisions de protons, ou de photons d'origine astrophysique.

Maintenant une autre question pour nos attentifs lecteurs. Pourquoi ne pas placer ces

télescopes neutriniques en orbite en utilisant la «transparence» du milieu interstellaire comme on le fait en optique?

Dans la foulée, on pourrait bien s'interroger pourquoi n'y a-t-il pas d'astronomie neutronique, une astronomie qui utiliserait comme messager le neutron. Le neutron est bien cet autre nucléon qui, avec son compagnon le proton, forme la matière nucléaire des noyaux stables. Il est très abondant dans le cosmos. C'est en fait la deuxième particule massive de matière ordinaire de par l'abondance dans l'Univers après le proton et avant l'électron. Et de plus, proche de la moitié de notre poids provient des neutrons des noyaux des atomes des molécules formant les tissus de notre corps. Mais là je pense que le lecteur averti aura sûrement trouvée la réponse de lui-même. Dans le cas contraire, qu'il se creuse un peu les méninges... ou qu'il cherche sur Internet. La réponse commentée dans le prochain numéro.

Pour les plus futés de nos lecteurs et ceux qui n'ont pas peur d'un peu d'arithmétique, pourraient-ils trouver quel est le pourcentage en masse des neutrons dans l'Univers? Et dans notre corps? Au-delà d'avoir à connaître la composition en éléments de l'Univers et de notre corps que vous trouverez facilement sur Internet, le reste est un calcul arithmétique tout simple ne nécessitant pas plus que l'utilisation (judicieuse) de la règle de trois.

### **Conclusion :**

L'astronomie multi-messager qui permet d'étudier des classes de phénomènes cosmiques inaccessibles si on se limitait à la seule astronomie électromagnétique (photonique), est relativement nouvelle. Elle est apparue progressivement en parallèle avec les avancées de l'astrophysique théorique, elle-même tributaire des progrès de diverses branches de la physique, et notamment la physique des hautes énergies. Les progrès techniques ont rendu possible le développement de détecteurs dédiés tant au sol qu'embarqué, au pouvoir de résolution sans cesse croissant, qui ont permis d'ouvrir ses différentes fenêtres. Finalement, fonctionnant comme une « union fait la force » cosmique, cette astronomie analyse les phénomènes sous différentes coutures, d'où sa vue redoutablement perçante.

Le potentiel de découvertes de cette nouvelle astronomie est énorme et on peut s'attendre grâce à elle, à des avancées majeures dans notre compréhension de l'Univers dans les toutes prochaines années.