



## LES NEUTRINOS : LES PARTICULES FANTÔMES QUI COMPOSENT NOTRE UNIVERS

Art McDonald

Département de Physique, Physique de l'ingénieur et Astronomie, Université Queen's, Kingston, Canada

Le professeur Art McDonald a remporté le prix Nobel de physique en 2015, conjointement avec Takaaki Kajita, pour la découverte des oscillations des neutrinos, qui montrent que les neutrinos ont une masse.

Dans le domaine de l'astrophysique des particules, les scientifiques tentent de comprendre comment l'univers a commencé et comment il fonctionne à un niveau très fondamental. En utilisant des particules provenant de sources astrophysiques, nous étudions les lois de la physique à la plus petite échelle possible de la matière et élaborons des formules mathématiques qui décrivent comment les particules élémentaires interagissent les unes avec les autres pour constituer notre univers. Mes collègues et moi avons étudié les neutrinos, l'un des éléments fondamentaux de l'univers. Cela nous aide à comprendre comment l'univers a évolué depuis ses débuts avec le Big Bang il y a environ 13,8 milliards d'années. Dans cet article, je vais te parler de ces « particules fantômes » appelées neutrinos – ce qu'elles sont, comment nous les mesurons et pourquoi notre découverte a nécessité un changement majeur dans nos méthodes de mesure. Dans ce processus, tu verras comment les éléments les plus insaisissables autour de nous sont parfois parmi les plus importants.

### LES NEUTRINOS : DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

De quoi est fait l'Univers et comment a-t-il évolué depuis le Big Bang ? Ce sont quelques-unes des questions les plus intrigantes que nous puissions

### **PARTICULE**

**ÉLÉMENTAIRE.** Particule qui compose toutes les autres particules.

### **MODÈLE STANDARD.**

Modèle des particules fondamentales et de leurs interactions à travers les forces de la nature.

### **NEUTRINO.**

Particule fondamentale qui interagit par des interactions faibles et sont également sensibles à la gravité.

### **RADIOACTIVITÉ.**

Émission spontanée de particules énergétiques résultant de la dégradation de noyaux atomiques.

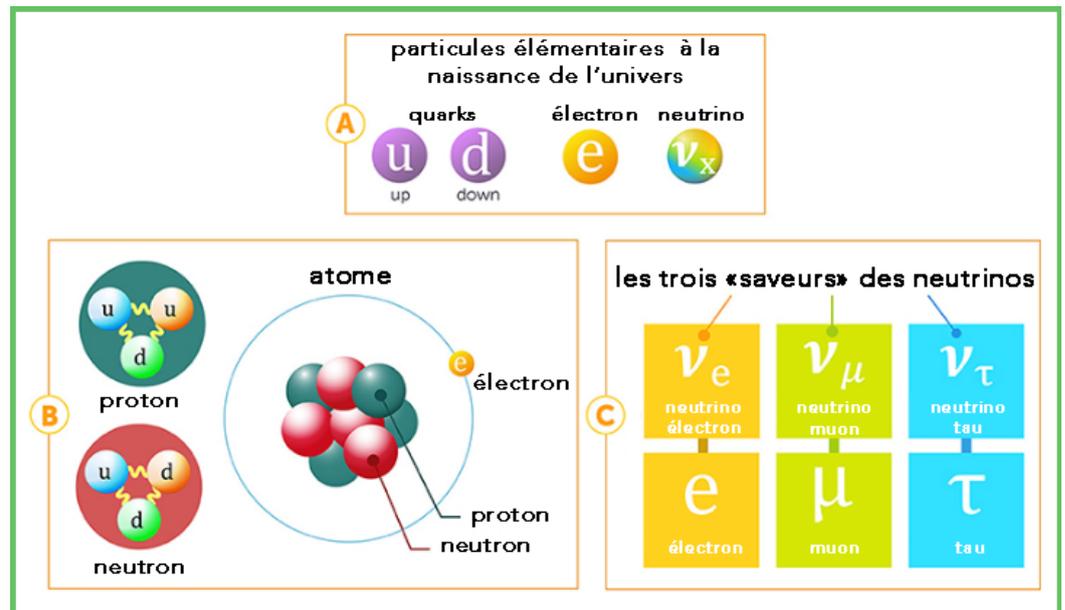
nous poser. Pour y répondre scientifiquement, nous pouvons utiliser diverses approches et méthodes. Je viens du domaine de l'astrophysique des particules, un domaine de recherche relativement nouveau qui étudie les particules de base voyageant dans l'espace, en particulier celles qui atteignent la Terre. Les physiciens des particules tentent de comprendre les particules de base qui constituent la matière et les forces qui régissent les interactions entre ces particules. En général, nous essayons de mettre au point des méthodes expérimentales pour trouver les plus petites particules, appelées **particules élémentaires**, c'est-à-dire les plus petites particules qui composent toutes les autres particules. Ensuite, en fonction de ce que nous trouvons, nous générons ce qu'on appelle un modèle théorique, qui est un ensemble d'idées et d'équations qui expliquent comment la matière est créée à partir de ces particules fondamentales. Nous ne disons jamais que notre modèle est le meilleur, car chaque version d'un modèle est fondée sur notre compréhension actuelle des choses, qui dépend de la sensibilité ou de la résolution des instruments dont nous disposons aujourd'hui. Au fil des ans, les instruments sont de plus en plus sensibles et, par conséquent, nous apprenons des choses nouvelles et passionnantes sur les éléments fondamentaux de la matière et de l'univers dans lequel nous vivons.

Le modèle de longue date décrivant les particules et les forces qui les relie est appelé le **modèle standard** [1] (pour en savoir plus [voir](#)) Selon le modèle standard, toute matière, y compris les atomes qui construisent notre corps, l'air que nous respirons et la lumière que nous recevons du Soleil, est composée de particules élémentaires. Ces particules ont été créées lors du Big Bang, il y a environ 13,8 milliards d'années, et au cours de l'évolution ultérieure de l'Univers.

Les particules élémentaires comprennent les électrons, les quarks et les **neutrinos** (Figure 1A), ainsi que d'autres particules dont tu as peut-être entendu parler, comme les photons, les bosons, les gluons et les particules de Higgs. Dans cet article, nous nous concentrerons sur les neutrinos. Toutes les particules fondamentales interagissent les unes avec les autres par le biais de quatre forces fondamentales, appelées force forte, force faible, force électromagnétique et force gravitationnelle. Les quarks sont les éléments constitutifs des protons et des neutrons. Les neutrons et les protons constituent les noyaux des atomes, qui sont entourés d'électrons (Figure 1B).

Les neutrinos sont émis par des substances naturellement **radioactives**, et lors de certaines réactions que nous pouvons provoquer dans des dispositifs scientifiques appelés accélérateurs. Cependant, les neutrinos sont le plus souvent engendrés par des réactions nucléaires dans le Soleil, lors d'un processus appelé fusion nucléaire. Dans la fusion nucléaire, deux noyaux atomiques se combinent pour former un seul atome plus lourd tout en libérant des quantités massives d'énergie et de particules, y compris des neutrinos. Ces neutrinos mettent deux secondes pour sortir du Soleil

et environ huit minutes pour atteindre la Terre. Leur nombre est phénoménal : pour te donner une idée, chaque seconde, chaque centimètre carré de la surface de la Terre est traversé par 65 milliards de neutrinos solaires !



**Figure 1.** Particules élémentaires. (A) Selon le modèle standard, l'univers a commencé par la formation de particules élémentaires appelées quarks, électrons et neutrinos. Il existe plusieurs types de quarks, parmi lesquels les quarks up (u) et down (d), et trois types de neutrinos ( $\nu_x$ , où  $\nu$  désigne le neutrino et  $x$  représente l'un des trois types). (B) Les quarks sont les éléments constitutifs des protons et des neutrons. Les neutrons et les protons constituent les noyaux des atomes, et les électrons tournent autour des noyaux atomiques. (C) Les neutrinos sont de trois types, ou saveurs, et ils interagissent avec trois particules élémentaires : l'électron (e), le muon ( $\mu$ ) et le tau ( $\tau$ ).

Les neutrinos sont des particules élémentaires inhabituelles parce qu'ils interagissent avec la matière par seulement deux des quatre forces fondamentales : la gravité et la force faible (la force faible peut permettre à un neutrino de transformer un neutron en un proton et un électron). Comme les neutrinos sont presque sans masse, la force de gravité qu'ils exercent est extrêmement faible et pratiquement indétectable. Quant à la force faible, ils doivent être extrêmement proches des protons, neutrons ou électrons pour interagir avec eux. Cela rend les neutrinos extrêmement difficiles à détecter [2]. Les neutrinos peuvent traverser la matière ordinaire comme si elle était presque transparente. En fait, les neutrinos n'interagissent avec la matière que lorsqu'ils frappent de front le noyau d'un atome ou les électrons tournant autour d'un noyau, et cela se produit assez rarement parce que les atomes sont pour la plupart des espaces vides. Dans tous les autres cas, les neutrinos traversent la matière sans être arrêtés, comme les plusieurs milliards d'entre eux qui traversent notre corps chaque seconde ! Parce que les neutrinos n'interagissent que très faiblement avec nos détecteurs, il est extrêmement difficile de les voir et de mesurer leurs propriétés. En raison de leurs interactions rares avec la matière, certaines personnes appellent les neutrinos « les fantômes de l'univers ».

Bien qu'insaisissables et difficiles à mesurer, les neutrinos jouent un rôle

## SAVEUR DE NEUTRINOS.

Caractéristique des neutrinos définissant leur type. Les neutrinos se déclinent en trois saveurs distinctes : le neutrino-électron, le neutrino-muon et le neutrino-tau.

central dans la formation de l'univers. Ils aident à construire des structures comme les étoiles et les galaxies. Ils ont également aidé à générer certains des éléments de base créés au début de l'univers pendant le Big Bang.

Les neutrinos se déclinent en trois types, ou **saveurs**, appelés neutrino-électron, neutrino-muon et neutrino-tau. Chaque saveur interagit avec la particule élémentaire correspondante – électron, muon et tau (**Figure 1C**) [3]. Nous ne savons pas exactement pourquoi il n'y a que trois types de neutrinos, mais ce sont les seuls que nous avons trouvés jusqu'à présent et ils correspondent aux prédictions du modèle standard. Comme tu le verras ci-dessous, notre importante découverte, pour laquelle j'ai reçu le prix Nobel de physique en 2015 conjointement avec le professeur Takaaki Kajita, porte sur les changements des saveurs des neutrinos lorsqu'ils voyagent dans l'espace, du noyau du Soleil à la Terre.

## COMMENT NOUS AVONS MESURÉ LES NEUTRINOS

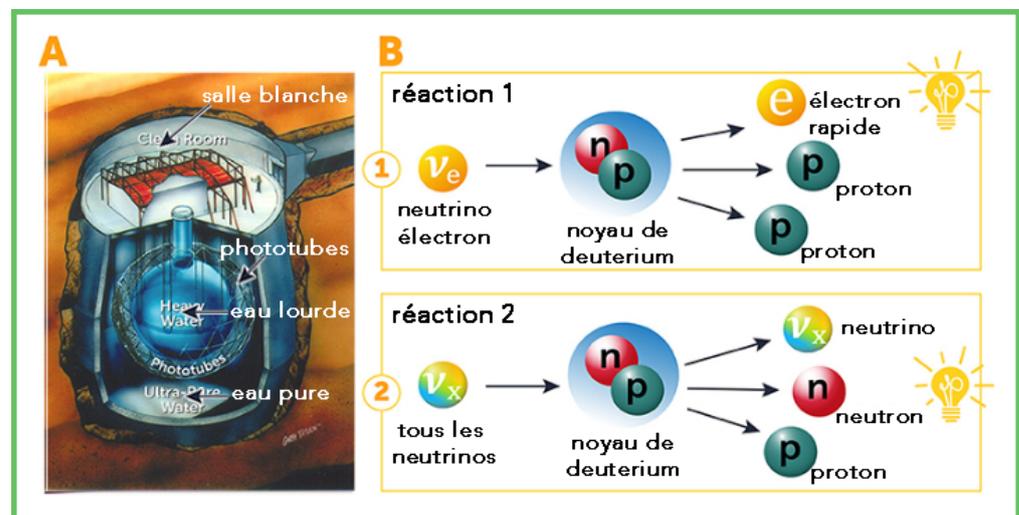
Lorsque nous avons commencé nos recherches sur les neutrinos, il y avait un problème non résolu en astrophysique des particules appelé le problème des neutrinos solaires [4]. Pour mesurer les neutrinos, des détecteurs spéciaux avaient été construits, mais ces détecteurs ont montré que le nombre mesuré de neutrinos-électrons provenant du Soleil était beaucoup plus faible que le nombre attendu, sur la base de calculs très solides sur la façon dont le Soleil brûle. Cet écart entre le nombre mesuré et le nombre attendu de neutrinos arrivant du Soleil vers la Terre signifiait l'une des deux choses suivantes : soit nous devons mettre à jour le modèle standard des particules élémentaires et modifier notre façon de penser les neutrinos, soit nous devons changer la façon dont nous calculons le nombre de neutrinos arrivant du Soleil. Les deux possibilités avaient des implications importantes pour notre compréhension de l'univers et, par conséquent, de nombreux astrophysiciens des particules décidèrent d'une mission collective pour concevoir une expérience qui pourrait résoudre le problème des neutrinos solaires.

Comme mentionné précédemment, les neutrinos ne peuvent pas être mesurés par interaction directe avec nos détecteurs. Ils sont au contraire mesurés indirectement, en utilisant des effets qui se produisent lorsque des particules fondamentales sont émises dans des processus radioactifs. Par exemple, un neutrino-électron peut être mesuré à l'occasion d'un processus radioactif appelé désintégration bêta, au cours duquel un électron est émis. Nous pouvons mesurer l'énergie des électrons émis et les scientifiques croyaient à l'origine que seuls des électrons sont émis dans ce processus ; ils s'attendaient donc à mesurer une seule énergie pour tous les électrons émis. Au lieu de cela, ils ont mesuré toute une gamme d'énergies inférieures à celle des électrons émis ! Pour prendre en compte cette différence, ils ont supposé qu'une autre particule (le neutrino-électron) était également libérée. De cette façon, ils ont indirectement mesuré les neutrinos-électrons à travers « l'énergie

**EAU LOURDE.** Molécule d'eau dont l'hydrogène est remplacé par du deutérium. Le noyau du deutérium possède un proton et un neutron, celui de l'hydrogène n'a qu'un proton. Ils ont le même comportement chimique.

manquante » des électrons émis lors de la désintégration bêta.

Dans notre expérience à l'Observatoire des neutrinos de Sudbury (ONS), à 2 km de profondeur dans le sol au Canada (Figure 2A et annexe), nous avons utilisé une approche similaire pour mesurer indirectement les neutrinos par leur effet sur un type spécial d'eau appelée **eau lourde**. Comme tu le sais, l'eau ordinaire ( $H_2O$ ) est composée d'un atome d'oxygène (O) et de deux atomes d'hydrogène (H). L'hydrogène n'a qu'un proton dans son noyau. En revanche, l'eau lourde ( $D_2O$ ) contient un atome d'oxygène mais deux atomes de deutérium (D). Le deutérium a un proton et un neutron dans son noyau (en d'autres termes, c'est un atome d'hydrogène avec un neutron supplémentaire). Cela augmente son poids de 10% mais ne change pas beaucoup ses propriétés chimiques. L'eau lourde est un produit naturel : 1 molécule d'eau sur 6 400 est  $D_2O$ .



**Figure 2.** L'Observatoire souterrain de neutrinos de Sudbury pour la détection des neutrinos. (A) L'expérience a été réalisée à environ 2 100 mètres sous terre. Elle a été conçue pour détecter les neutrinos solaires grâce à leurs interactions avec l'eau lourde. L'observatoire comprenait une salle blanche à partir de laquelle les scientifiques descendaient l'équipement dans la zone de mesure, et une zone de mesure remplie d'eau ultra-pure, pour bloquer la radioactivité provenant de la roche environnante. La sphère acrylique au centre était remplie d'eau lourde et entourée d'une sphère contenant des phototubes pour mesurer les effets des neutrinos frappant l'eau lourde (Crédit image : Prof. McDonald). (B) Nous avons mesuré deux réactions : (1) les interactions des neutrinos-électrons avec le noyau de deutérium, et (2) les interactions des trois saveurs de neutrinos avec le noyau de deutérium.

Dans notre expérience à l'ONS, nous avons rempli un grand récipient d'eau lourde pure et mesuré les effets des collisions entre les neutrinos arrivant du Soleil avec cette eau lourde. Fondamentalement, nous avons mesuré deux réactions qui se produisent lorsque les neutrinos entrent en collision avec de l'eau lourde. Dans la première réaction, un neutrino-électron interagit avec un atome de deutérium de l'eau lourde. Cette interaction transforme le neutron dans le noyau de l'atome en un proton et un électron qui se déplace rapidement et produit de la lumière (Figure 2B, Réaction 1), et nous avons mesuré la lumière produite par cet électron. Dans la deuxième réaction, les neutrinos des trois saveurs (électron, muon

### PHOTOTUBES.

Capteurs de lumière qui nous aident à mesurer la lumière produite lorsque les neutrons interagissent avec l'eau lourde.

et tau) interagissent avec un atome de deutérium. Dans cette interaction, le noyau de l'atome de deutérium se brise en un proton et un neutron en mouvement libre. Le neutron libre se déplace dans l'eau lourde et est détecté de différentes manières dans les trois phases du projet. Dans la première phase, le neutron est capturé par un autre atome de deutérium, produisant de la lumière avec des propriétés différentes de la réaction 1 (Figure 2B, Réaction 2).

Ainsi, nous avons deux réactions de neutrinos produisant de la lumière avec de l'eau lourde que nous pouvons mesurer à l'aide de nos capteurs de lumière, appelés **phototubes** – par conséquent, nous pouvons mesurer indirectement la présence de neutrinos.

Il a fallu beaucoup d'efforts pour s'assurer que nous ne mesurions que les effets des neutrinos et d'aucune autre source de rayonnement. Nous devons protéger nos détecteurs de la radioactivité provenant de l'espace, c'est pourquoi nous avons dû placer les détecteurs à environ 2 kilomètres sous terre, entourés de roche (Figure 2A). Nous devons également nous assurer que nous ne mesurons pas la radioactivité provenant de la roche elle-même. Plus précisément, nous devons protéger notre zone d'eau lourde de l'uranium et du thorium, deux éléments radioactifs présents dans les roches. Pour ce faire, nous avons entouré notre lourd réservoir d'eau avec de l'eau ultra-propre – des milliards de fois plus propre, en termes d'éléments radioactifs, que l'eau du robinet. Cette eau propre captait les produits de la radioactivité de la roche. Nous avons également construit le détecteur à partir de matériaux soigneusement sélectionnés pour être à faible radioactivité et avons créé de l'air ultra-propre et des travailleurs ultra-propres qui prenaient des douches et portaient des vêtements non pelucheux.

Pour mesurer la lumière émise lorsque les neutrinos interagissent avec l'eau lourde, nous avons placé de nombreux phototubes autour du récipient d'eau lourde. La mise en place de cette configuration expérimentale a été très difficile – c'était à la fois une tâche d'ingénierie très délicate et une expérience physique complexe. (Pour en savoir plus sur l'aspect technique du projet, voir l'annexe.)

### OÙ SONT LES NEUTRINOS MANQUANTS ?

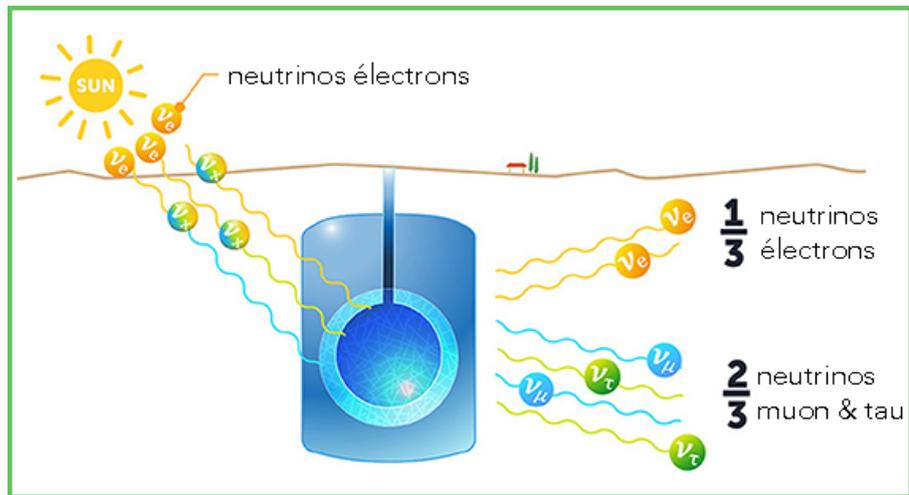
Notre défi était donc de résoudre le problème des neutrinos solaires, où le nombre de neutrinos-électrons mesurés pour atteindre la Terre était environ trois fois plus petit que le nombre attendu. Soit l'expérience ou la théorie (ou les deux) auraient pu être incorrectes, soit peut-être, les neutrinos-électrons du soleil changeaient de saveur et échappaient à la détection dans des expériences qui étaient uniquement ou principalement sensibles aux neutrinos-électrons.

Dans notre expérience, nous voulions vérifier si un changement de saveur se produisait avant que les neutrinos n'atteignent la Terre. Nous savions

que, dans le noyau du Soleil, seuls des neutrinos-électrons sont produits (les particules de muons et de tau sont plus lourdes que les électrons et donc les produire ainsi que leurs neutrinos associés nécessite plus d'énergie que ce qui est disponible dans le Soleil). Cela signifie que, si certains des neutrinos arrivant du Soleil ne sont pas des neutrinos-électrons, c'est qu'ils ont changé de saveur en voyageant du noyau du Soleil à la Terre. (Les neutrinos changent de saveur de manière périodique, par un phénomène quantique appelé oscillation de neutrinos. Tu peux en savoir plus à ce sujet sur ce [site](#)). En réglant nos détecteurs sur une fenêtre particulière d'énergie, nous pouvons détecter les effets des neutrinos provenant du Soleil, et non d'autres sources comme les rayons cosmiques qui émettent des neutrinos avec des énergies plus élevées. Aux énergies que nous avons étudiées, le Soleil est de loin le principal producteur de neutrinos atteignant la Terre.

Lors d'une mesure avec notre détecteur, nous avons observé des neutrinos-électrons interagissant avec des atomes de deutérium et émettant un électron libre se déplaçant rapidement, comme décrit ci-dessus. Dans une mesure séparée, nous avons observé des neutrinos des trois saveurs interagissant avec des atomes de deutérium et émettant un neutron en mouvement libre. En d'autres termes, la première mesure nous a dit combien de neutrinos-électrons arrivent du Soleil, tandis que la deuxième mesure nous a indiqué le nombre total de tous les neutrinos provenant du Soleil. En comparant les deux, nous avons constaté que seulement un tiers des neutrinos totaux arrivant du Soleil sont des neutrinos-électrons. Par conséquent, les deux tiers des neutrinos ont changé leur saveur, passant du neutrino-électron au neutrino-muon ou au neutrino-tau ([Figure 3](#)) [2, 5]. Notre expérience a montré qu'un neutrino-électron peut changer de saveur au cours de son voyage – c'était la solution au problème des neutrinos solaires !

Dans le cadre du modèle standard pour les particules élémentaires, on a considéré que les neutrinos n'avaient pas de masse et qu'ils se déplaçaient à la vitesse de la lumière. La découverte que les neutrinos oscillent impliquait – selon des considérations résultant de la théorie de la relativité d'Einstein – que les neutrinos ont une masse. Expliquer en détail pourquoi le fait que les neutrinos changent de saveur dans l'espace signifie qu'ils ont une masse n'entre pas dans le cadre de cet article. Mais, en général, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein détermine que ce changement périodique de saveur signifie que, du point de vue des neutrinos, le temps s'écoule. Une expérience du temps implique que les neutrinos se déplacent plus lentement que la vitesse de la lumière, et ont donc une masse. Notre expérience et l'expérience dite Super-Kamiokande réalisée au Japon par le collègue avec lequel j'ai partagé le prix Nobel, ont fourni la première preuve en physique qu'il faut dépasser le modèle standard.



**Figure 3.** Les neutrinos changent de saveur lorsqu'ils se déplacent du noyau du Soleil vers la Terre.

L'extension du modèle standard nous donnera une compréhension plus complète de notre univers à un niveau très fondamental. Un grand nombre de personnes ont travaillé pendant de longues années pour rendre cette grande réalisation possible. Je suis profondément reconnaissant envers toutes les personnes impliquées dans ce formidable projet et je me sens chanceux d'y avoir participé. En recevant le prix Nobel, je me considère comme représentant tous mes collègues hautement qualifiés et dévoués qui ont contribué au succès de ce projet.

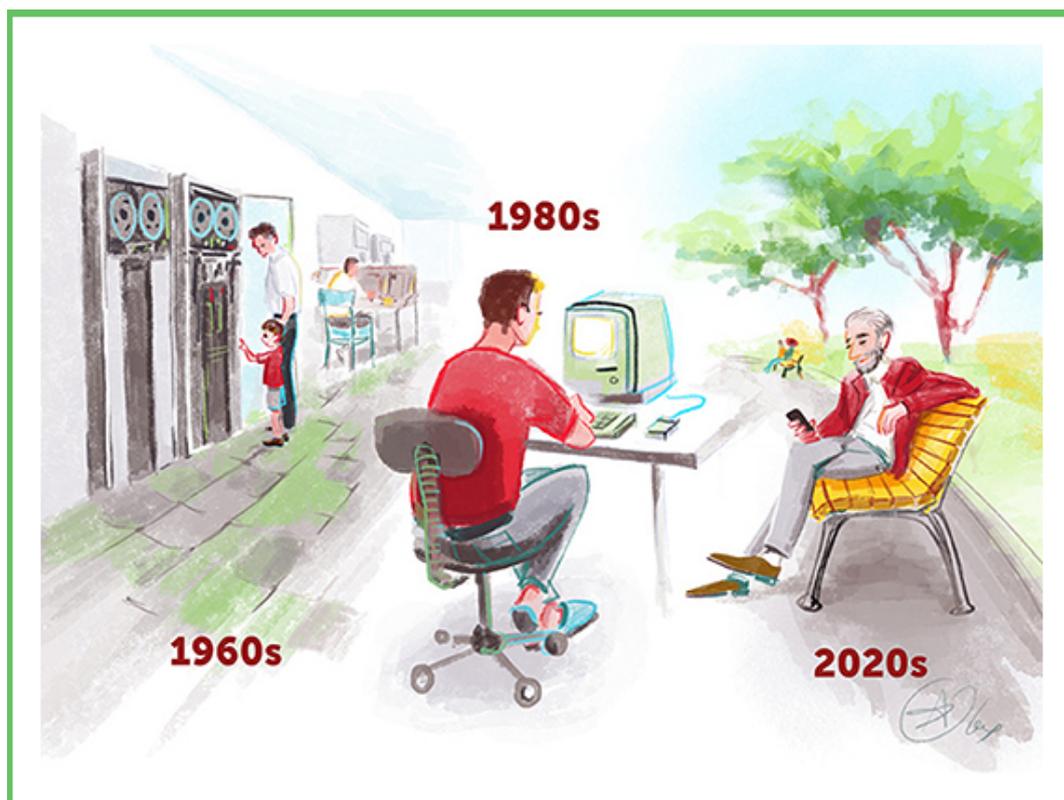
### RECOMMANDATION POUR LES JEUNES

J'ai grandi dans une très petite ville sidérurgique au Canada. Alors que les gens appréciaient la valeur de l'éducation, personne ne s'attendait à ce qu'un résident finisse par remporter un prix Nobel. Cela signifie que n'importe lequel d'entre nous – s'il travaille assez dur et trouve de très bonnes personnes avec qui travailler – peut faire quelque chose de vraiment significatif dans sa vie, et peut-être gagner un prix comme le prix Nobel.

Quand il s'agit de choisir ta carrière, je te conseille de choisir des choses que tu seras heureux de faire lorsque tu te réveilleras le matin, puis de les essayer. Ensuite, vois dans lesquelles tu es bon, c'est ce que j'ai fait ! Je crois que c'est une très bonne façon de choisir ta carrière. Après avoir fait ton choix, continue simplement à travailler dans cette carrière et maintiens des relations positives et amicales avec les gens autour de toi – elles sont très importantes pour ton succès.

Il est également très important de rester curieux tout au long de ta vie, car le monde dans son ensemble, et la science en particulier, ne cessent de changer rapidement. Tu ne le croiras peut-être pas, mais quand j'étais à l'université en 1964, l'université a reçu son premier ordinateur. Il était si grand et si lourd qu'il a dû être soulevé avec une grue et descendu par le toit dans le bâtiment de physique ! De nos jours, beaucoup de gens ont des ordinateurs portables ou même des téléphones cellulaires beaucoup

plus puissants et beaucoup plus petits que ces premiers ordinateurs (Figure 4). Cela montre combien la science a changé au cours de ma carrière, et je pense que ce rythme incroyable se poursuivra. Par conséquent, continue à être curieux, apprends de nouvelles choses et adapte-toi aux nouvelles avancées. De plus, rappelle-toi que ce sont les jeunes qui sont le mieux à même de travailler avec de nouvelles technologies et de les mettre en œuvre, ils ont donc beaucoup à apporter ! Par conséquent, n'hésite pas à en apprendre le plus possible sur les dernières technologies et essaie de transmettre tes connaissances et d'éduquer les autres, même tes collègues plus âgés.



**Figure 4.** Reste curieux, car le monde change rapidement. La technologie a progressé rapidement depuis que j'étais étudiant dans les années 1960, et je crois que ce rythme rapide se poursuivra à l'avenir.

### MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

Ain't no stopping them now with Art McDonald [ici](#).

### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Noa Segev d'avoir mené l'interview qui a servi de base à cet article et pour l'avoir écrit avec moi, et Alex Bernstein pour avoir fourni les figures 1 à 4.

### RÉFÉRENCES

1. Cottingham, W. N., and Greenwood, D. A. 2007. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. New York, NY: Cambridge University Press.
2. McDonald, A. B. 2016. Nobel lecture: the Sudbury Neutrino Observatory: observation of flavor change for solar neutrinos. *Rev. Modern*

*Phys.* 88:030502. doi: 10.1103/RevModPhys.88.030502

3. Acker, A., and Pakvasa, S. 1997. Three neutrino flavors are enough. *Phys. Lett. B.* 397:209–15. doi: 10.1016/S0370-2693(97)00174-3

4. Haxton, W. C. 1995. The solar neutrino problem. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 33:459–503.

5. Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., et al. 2002. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 89:011301. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.011301

## VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2022.1034181 ; McDonald A (2023) Neutrinos: The Ghost Particles That Make Up Our Universe. *Front. Young Minds.* 11:1034181).

**TRADUCTION** : Jean-Marie Clément, Association Jeunes Francophones et la Science

**ÉDITION** : Catherine Braun-Breton & Manouk Abkarian, Association Jeunes Francophones et la Science

## ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

**SOU MIS** le 1er septembre 2022 ; **ACCEPTÉ** le 29 novembre 2022;

**PUBLIÉ EN LIGNE** le 31 janvier 2023

**ÉDITEUR** : Idan Segev

**MENTOR SCIENTIFIQUE** : Kalee Tock.

**CITATION** : McDonald A (2023) Neutrinos: The Ghost Particles That Make Up Our Universe. *Front. Young Minds.* 11:1034181. doi: 10.3389/frym.2022.1034181

## DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊTS.

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

## DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 : McDonald.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

## JEUNE EXAMINATEUR

### RYAN, 15 ANS

J'aime vraiment le codage et j'adore les Rubik's cubes. J'aime aussi beaucoup jouer à Minecraft.

## AUTEUR

### ART McDONALD

Le professeur Art McDonald est un astrophysicien canadien né en 1943 à Sydney, en Nouvelle-Écosse, au Canada, une ville d'environ 30 000 habitants sur l'île du Cap-Breton. Sydney était une communauté formidable – sûre, sociale et solidaire, avec de nombreux enseignants dévoués. Le professeur McDonald se souvient particulièrement de M. Bob Chafe, qui était son professeur de mathématiques. Adolescent, le professeur McDonald appartenait à un club qui organisait une danse communautaire le samedi soir au YMCA. C'est là qu'il a rencontré sa future épouse, Janet. Il a obtenu son baccalauréat et sa maîtrise en physique à l'Université Dalhousie à Halifax, en Nouvelle-Écosse, au Canada, et son doctorat en physique au California Institute of Technology (Caltech) à Pasadena, aux États-Unis. Après Caltech, il a accepté un poste de chercheur aux Laboratoires nucléaires de Chalk River d'Énergie atomique du Canada (EACL), où il a fait de la recherche fondamentale et participé à l'installation de l'accélérateur. En 1982, Il a déménagé à l'Université de Princeton dans le New Jersey, où il est devenu professeur. Au cours des années 1980, il a rejoint le projet de construction de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (ONS) en Ontario, au Canada, pour étudier le problème des neutrinos solaires. En 1989, il est devenu professeur à l'Université Queen's à Kingston, Ontario, Canada, et il est également devenu directeur de l'établissement de l'ONS. En 1999, l'observatoire de l'ONS a commencé à mesurer les neutrinos, ce qui a conduit le professeur McDonald et son équipe à la conclusion que les neutrinos changent de saveur, ce qui implique qu'ils ont également une masse finie. Cela contraste avec la prédiction du modèle standard. Au cours de sa carrière, Il a remporté de nombreux prix, dont la médaille Benjamin Franklin (2007), la médaille Henry Marshall Tory (2011), le prix Nobel de physique (2015) et le prix Breakthrough en physique fondamentale (2016). Il est actuellement professeur émérite à l'Université Queen's au Canada. Il continue d'être actif dans la recherche fondamentale sur les neutrinos et la matière noire. Pendant la pandémie de COVID-19 au printemps 2020, Il est devenu l'un des leaders d'un projet visant à produire en série des ventilateurs mécaniques, qui étaient rares, à faible coût. Le professeur McDonald et son épouse Janet ont quatre enfants et neuf petits-enfants, qui sont une grande joie pour eux. \*art@snolab.ca

## ANNEXE

### Expérience de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury

L'expérience de l'ONS pour mesurer les neutrinos et leurs saveurs a été un grand effort de collaboration. Plus de 150 personnes travaillaient en permanence sur l'expérience, chacune responsable d'une certaine partie. Tout d'abord, nous avons dû creuser une énorme cavité, à 2 km sous terre, dans une ancienne mine à Sudbury, au Canada. L'équipe de construction a dû percer des trous dans le sol de la caverne et y placer des explosifs. Ils ont ensuite dû soulever tout leur équipement hors de la cavité et déclencher les explosifs pour approfondir et élargir la cavité. Après cela, ils ont dû enlever les décombres créés par l'explosion. Il a fallu environ 2 ans et demi et 8 séries d'explosions pour créer cette cavité de 34 mètres de haut (la hauteur d'un bâtiment de 10 étages) et de 22 mètres de large.

Nous avons dû ensuite construire la sphère acrylique qui contiendrait l'eau lourde. La sphère a été construite à partir de 120 pièces, chacune suffisamment petite pour pouvoir être descendue dans la mine à l'aide de l'ascenseur.

Nous avons dû construire une sphère géodésique autour de la sphère acrylique, où seraient placés les photodétecteurs pour mesurer les effets des neutrinos réagissant avec l'eau lourde. Au total, nous avons descendu par les ascenseurs 10 000 photodétecteurs que nous avons installés sur la sphère géodésique.

Finalement, nous avons rempli la sphère acrylique avec 1 000 tonnes d'eau lourde pure ( $D_2O$ ). L'eau était si pure que nous avons moins d'une désintégration radioactive spontanée par jour et par tonne d'eau, ce qui est un milliard de fois moins que dans l'eau du robinet. Même avec une telle quantité d'eau lourde pure, nous pensions ne pouvoir mesurer l'effet que d'un seul neutrino arrivant du Soleil par heure, car les neutrinos interagissent rarement avec la matière.

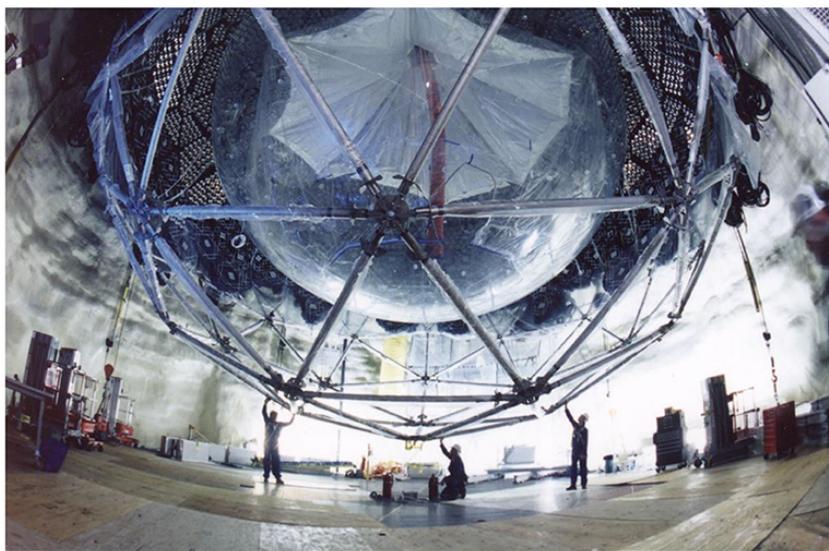
Comme tu peux le constater, ce projet était à la fois une tâche d'ingénierie complexe et une expérience de physique fondamentale. De nombreuses personnes compétentes et dévouées ont collaboré à cet objectif commun qu'elles estimaient important. Nous devons souvent choisir comment procéder et nous l'avons fait en communiquant les uns avec les autres en détail sur les alternatives, jusqu'à ce qu'il soit clair que le groupe était favorable à une alternative plutôt qu'une autre. Heureusement, nous avons pu parvenir à un accord après de fructueuses discussions. En travaillant ensemble de cette manière collégiale, nous avons réussi notre expérience et, par conséquent, nous avons appris quelque chose de nouveau et d'important sur les éléments fondamentaux de notre univers.



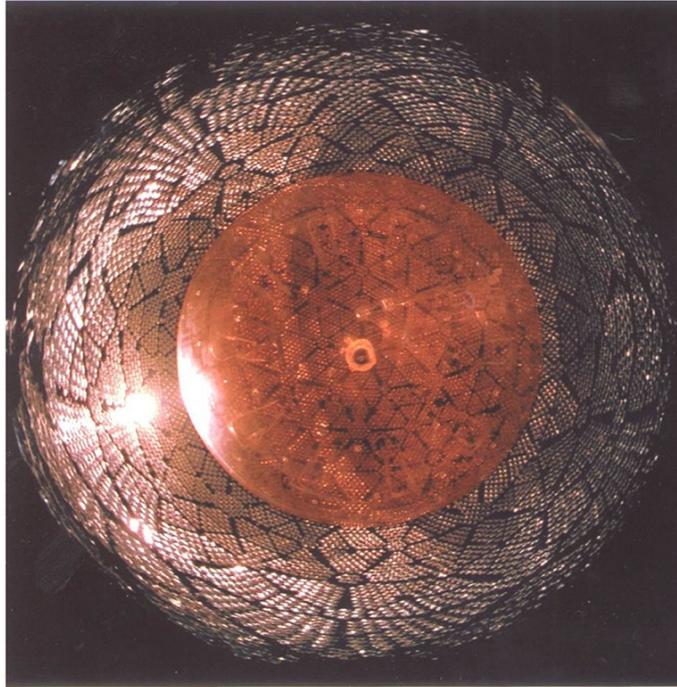
**Annexe figure 1.** L'équipe de construction pose des explosifs pour créer la cavité de l'ONS



**Annexe figure 2.** Assemblage des 60 premiers morceaux (sur 120) de la sphère acrylique qui contiendrait l'eau lourde



**Annexe figure 3.** Construction du dôme géodésique autour de la sphère acrylique, avant l'installation des photodétecteurs destinés à détecter les neutrinos.



**Annexe figure 4.** Plan grand angle regardant vers le haut au fond de la sphère acrylique (rouge), entourée de 10 000 photodétecteurs utilisés pour détecter la présence de neutrinos.