

## Avant-propos

Dans un communiqué de presse daté du 22 septembre 2011, le CNRS pose la question : Des neutrinos qui vont plus vite que la lumière ?

En examinant des neutrinos provenant du CERN à Genève, une expérience appelée OPERA, située sous la montagne du Gran Sasso pas loin de Rome, mesure pour ces particules une vitesse de propagation supérieure à la vitesse de la lumière. Ce résultat, en désaccord avec la théorie de la relativité telle qu'énoncée par Einstein, a mis la communauté en ébullition, et tous les médias l'ont relayé dans la journée. L'annonce a fait l'effet d'une véritable bombe ! Depuis la publication, une avalanche d'articles a examiné le problème sous toutes les coutures. Chacun tente d'expliquer ce qui ressemble encore à une anomalie incompréhensible. Pourquoi une réaction aussi vive ?

Examinons le problème en répondant à 50 questions clés qui feront le tour des informations disponibles à ce jour (novembre 2011).

### 1. De quoi s'agit-il exactement ?

Un faisceau de neutrinos, produit à partir d'un accélérateur construit au Centre européen de recherche nucléaire, le CERN, est envoyé dans la direction du Gran Sasso, une montagne située dans les Abruzzes en Italie, à 730 km de distance. Un laboratoire souterrain y a été construit, dans lequel un détecteur compte le passage de ces neutrinos. Leur vitesse apparente  $v$  est mesurée supérieure à celle de la lumière, et montre un excès de la quantité  $(v - c)/c$  faible mais significatif de  $2 \cdot 10^{-5}$ . Le temps de vol est plus court que celui d'un hypothétique rayon de lumière parcourant la même distance. Ici  $c$  désigne la vitesse de la lumière qui vaut le fameux 300 000 km/s, ou plus précisément 299 792 458 m/s. C'est l'une des constantes

fondamentales de la physique, essentielle pour déterminer le cadre théorique de notre compréhension du monde.

Si le résultat se confirme, cela signifie que les neutrinos voyageraient à 299 800 km/s. Sur le parcours, ils devanceraient de 60 ns (milliardième de seconde) la lumière, ou si l'on préfère, ils arriveraient au but en la battant de 20 m. Ils seraient donc supraluminiques. Cela impliquerait de profondes conséquences car, pour la théorie,  $c$  est une constante ultime, rien ne peut la dépasser. Est-ce le signe avant-coureur de la prochaine révolution en physique ?

## **2. Mais qu'est-ce que les neutrinos, au juste ?**

Il faut d'abord préciser la nature particulière des acteurs à l'origine de cet excitant mais encombrant résultat.

Les neutrinos sont des constituants élémentaires à la base de la composition de la matière. Ils s'inscrivent au côté des quarks et des autres leptons.

Faisons le point sur ce que nous savons sur le front de l'infiniment petit. La matière est formée d'atomes, ceux-ci présentant une structure planétaire avec des électrons qui tournent autour de noyaux, comme les planètes autour du Soleil. Dans les noyaux sont assemblés des protons et des neutrons, leur nombre variant selon les éléments considérés. Pour l'hydrogène, le noyau est réduit à un seul proton, pour l'uranium, il en comporte 92. Il y a, au niveau de l'atome, autant d'électrons que de protons pour maintenir la neutralité électrique globale de la matière. Les électrons sont élémentaires, ils ne peuvent pas se diviser, mais protons et neutrons ne le sont pas. On a découvert dans leur intérieur des objets plus élémentaires appelés les quarks.

Il faut au total six quarks et six leptons pour construire toutes les particules connues à ce jour. La matière est donc formée à partir des 12 constituants élémentaires qui apparaissent sur la table.

$$\begin{array}{l} \text{Quarks} \\ \text{Leptons} \end{array} \begin{pmatrix} \text{u} & \text{c} & \text{t} \\ \text{d} & \text{s} & \text{b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{e} & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Chaque colonne représente une famille, et dans chacune on reconnaît un quark de charge  $+2/3$ , un autre de charge  $-1/3$ , un lepton de charge  $-1$ , et un neutrino de charge nulle. Ainsi, la première famille regroupe les quarks u et d qui entrent dans la composition des protons et des neutrons, accompagnés de l'électron et du  $\nu_e$ . On constate que les seuls constituants de la première famille suffisent *a priori* pour construire tout le macrocosme.

À partir de cette poignée d'objets élémentaires, on explique la constitution de l'ensemble des objets matériels, non seulement ceux existant sur Terre, mais aussi les objets célestes tels que les étoiles, les trous noirs..., et tout ce qu'on peut imaginer.

On a divisé les constituants en deux catégories : les quarks d'un côté, les leptons de l'autre. Ils se distinguent par leurs interactions. Ils sont tous élémentaires, c'est-à-dire qu'on ne leur trouve aucune structure, ce sont des points de dimension minuscule, mesurée inférieure à  $10^{-18}$  m. Cette limite est dictée par les performances actuelles des accélérateurs les plus puissants. En comparaison, la taille des atomes est de l'ordre de  $10^{-10}$  m, et celle des protons de  $10^{-15}$  m.

Les neutrinos sont donc des particules élémentaires mais elles diffèrent des autres. Sans charge électrique, elles sont pratiquement indétectables. Elles se comportent comme des fantômes et peuvent traverser la Terre entière sans être arrêtées.

### 3. Qu'est-ce que la physique des particules ?

La physique des particules est la discipline de recherche qui étudie les constituants élémentaires, en se donnant pour tâche de comprendre leurs propriétés intrinsèques et leurs comportements réciproques.

Comme il a été dit, dans la matière ordinaire, on a d'abord distingué le proton, le neutron et l'électron, mais la recherche n'en est pas restée là. Elle a mis au jour un ensemble beaucoup plus vaste de particules aux propriétés extrêmement variées. Au total, on recense environ 300 particules élémentaires. La liste inclut les divers mésons, pions et kaons, ainsi que les  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Omega$ , ..., les résonances  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ , ... Heureusement, les quarks ont amené un peu d'ordre dans ce bestiaire plutôt confus. Il en suffit de six variétés pour tout reproduire. Par exemple, le proton est constitué de 2 quarks u et 1 quark d, ce qui restitue bien la charge électrique +1. Les autres quarks entrent dans la composition de particules instables plus exotiques. Les mésons sont formés d'une paire quark-antiquark, ainsi le méson  $\pi^+$  ou pion associe un quark u et un antiquark d, et le méson  $K^+$  ou kaon, un quark u et un antiquark s.

La physique des particules s'est d'abord développée en étudiant les propriétés des rayons cosmiques qui nous bombardent constamment des cieux. Des expériences ont été menées sur de hautes montagnes et de nombreuses découvertes en découlèrent.

Depuis les années 1950, la recherche s'est structurée auprès d'accélérateurs de plus en plus performants où les conditions d'utilisation peuvent être parfaitement maîtrisées. Pour voir plus finement la matière, il faut la taper de plus en plus fort, et la montée en puissance des accélérateurs a permis de gagner 8 ordres de grandeur dans la résolution des structures : on voit aujourd'hui des détails 100 millions de fois plus précis qu'il y a un siècle.

Alors que les leptons sont produits librement et qu'on sait en construire des faisceaux, ce qu'on montrera dans le cas très concret des neutrinos, les quarks eux ne se voient jamais sous forme libre.

Leur charge non entière les oblige à rester confinés à l'intérieur des particules sous forme de combinaisons, soit de trois quarks, soit d'une paire quark-antiquark.

En parallèle avec le monde des particules, la physique a découvert les antiparticules. Ainsi à côté de l'électron, il existe un antiélectron ou positron de charge positive. D'abord postulé par la théorie, ce nouvel objet a été détecté dès 1932 dans les rayons cosmiques. De même, on connaît l'antiproton de charge négative puisque le proton a une charge positive. Il fut produit et identifié en 1955 grâce à un accélérateur construit à Berkeley pour l'occasion.

Il y a donc, à côté des 12 constituants, un total de 12 anticonstituants répétant la même structure mais en différant par des charges opposées.

#### 4. Comment est né le neutrino ?

Le neutrino a été postulé en 1930 pour résoudre un problème majeur en physique, celui de la conservation de l'énergie. Une règle sacrée impose que l'énergie se retrouve dans n'importe quelle circonstance. Elle peut changer de forme, et se transformer, de cinétique à potentielle, à thermique, à nucléaire..., et tous les tests entrepris précédemment avaient validé ce principe. Or cette règle semblait être violée dans les désintégrations radioactives de type  $\beta$  qui relâchent un électron. En effet, de l'énergie manquait au bilan.

W. Pauli proposa une solution drastique : l'électron n'est pas produit seul. Les désintégrations  $\beta$  émettent simultanément une autre particule indétectable, appelée peu après par E. Fermi, qui en formalisa la théorie, neutrino, le petit neutre en italien. L'hypothèse fut rapidement adoptée, mais il fallut attendre un quart de siècle avant de prouver expérimentalement l'existence de cette nouvelle particule. Cela fut réalisé en 1956 auprès d'un réacteur nucléaire américain. Cette constatation démontre bien la difficulté qu'il y a à « voir » un neutrino, car sa probabilité d'interaction restera toujours

minuscule. C'est en ce sens une particule unique puisqu'elle peut traverser la Terre entière sans être arrêtée, ne laissant aucune trace de son passage. D'où vient cette curieuse propriété ? Le neutrino ne possède pas de charge électrique, il est donc insensible à tout effet électrique ou magnétique présent dans son environnement, et surtout il ne subit que les interactions faibles qui, par leur nature, sont très improbables. À ce titre, il deviendra un outil de choix pour étudier ces interactions.

## **5. Que veut dire « interactions faibles » ?**

Il existe quatre interactions fondamentales qui régissent les échanges dans l'Univers.

L'interaction de gravitation ou interaction de Newton naît quand deux objets massifs sont en rapport. Elle se révèle par une force toujours attractive. Au niveau des particules, et bien que celles-ci soient pour la plupart massives, cette interaction est complètement négligeable devant les autres. On l'oublie toujours en physique des particules.

L'interaction électromagnétique agit entre charges électriques. Deux charges de même signe se repoussent, deux charges de signes opposés s'attirent, avec une dépendance variant comme l'inverse du carré de la distance les séparant. Ceci est vérifié au niveau des particules, par exemple entre l'électron et le proton d'un atome.

L'interaction forte ou nucléaire résulte en une force attractive qui lie les protons et les neutrons à l'intérieur du noyau. Elle est suffisamment intense pour compenser la répulsion électromagnétique qui naît entre deux protons voisins dans un même noyau, mais sa portée très faible la limite aux seules dimensions nucléaires. Sans interactions fortes, les noyaux éclateraient. Les neutrons ne portent pas de charge électrique donc ne subissent pas l'interaction électromagnétique. En revanche, ils sont sensibles à l'interaction forte et par là contribuent à la cohésion des noyaux.

L'interaction faible complète le tableau. Elle est opérante dans la désintégration  $\beta$  des noyaux radioactifs, mais aussi dans les réactions de fusion existant à l'intérieur du Soleil. Son domaine d'action est limité à de très courtes portées. C'est la seule interaction affectant les neutrinos.

Par définition, les quarks sont sensibles à toutes les interactions existantes, en particulier aux interactions fortes. En revanche les leptons sont insensibles à ces dernières. Ainsi, les électrons ne restent jamais piégés dans les noyaux.

La vision quantique interprète les interactions sous forme d'un échange d'objets médiateurs. L'interaction électromagnétique se conçoit comme un échange de photons. C'est le cas entre l'électron et le proton dans l'atome d'hydrogène. De manière similaire, les messagers de l'interaction forte sont les gluons, objets sans masse et sans charge électrique qui restent confinés à l'intérieur des particules. L'interaction faible échange des bosons, soit le  $Z^0$  neutre, soit le  $W^\pm$  chargé, qui sont des objets au contraire très massifs, le  $Z^0$  ayant une masse équivalente à plus de 90 protons. Les interactions faibles apparaissent donc sous deux formes : par échange d'un  $Z^0$ , elles sont dites à courant neutre, par échange d'un  $W^\pm$ , elles sont dites à courant chargé.

## 6. Combien de types de neutrinos ?

Il existe trois types différents de neutrinos. On les appelle successivement électronique, muonique et tauique et ils sont symbolisés par les écritures  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$ .

Le premier neutrino postulé par Pauli est associé à l'électron, autant à sa production par désintégration  $\beta$ , qu'à son interaction quand il engendre un électron par interaction faible à courant chargé. C'est donc le  $\nu_e$ . En 1964 était découvert le second neutrino au laboratoire de Brookhaven près de New York. Il est associé au muon, le grand frère de l'électron, c'est le  $\nu_\mu$ , celui dont il sera question dans

notre discussion de dépassement de vitesse de la lumière. Quant au troisième neutrino, le  $\nu_\tau$ , il fallut attendre 1975 avec la découverte du dernier lepton chargé le tau pour devoir l'inscrire dans la liste des objets élémentaires. Le  $\nu_\tau$  sera mis en évidence expérimentalement en 1996 grâce à une poignée d'événements montrant la production d'un tau en utilisant une technique similaire à celle qui sera adoptée plus tard par OPERA.

On sait que la liste est aujourd'hui complète, il existe trois neutrinos légers subissant les interactions faibles et trois seulement. Ce résultat fondamental provient de l'analyse des propriétés du médiateur des interactions faibles, le  $Z^0$ , qui fut effectuée grâce à l'accélérateur LEP du CERN en 1989. Le  $Z^0$  couple à tous les neutrinos existant et se désintègre également dans toutes les paires possibles neutrino-antineutrino. Si le nombre d'espèces avait été supérieur à 3, la forme du  $Z^0$  en aurait témoigné par un profil élargi. Le nombre de neutrinos limite directement le nombre de familles de constituants, et donc avec trois neutrinos, la liste est aujourd'hui complète. Il n'y a plus rien à découvrir sur ce front.

Les trois types de neutrinos diffèrent entre eux clairement, autant qu'une pomme diffère d'une poire qui diffère d'une orange. Lors d'une interaction par courant chargé, le  $\nu_e$  donnera un électron, le  $\nu_\mu$  un muon et le  $\nu_\tau$  un tau. Chaque neutrino est intimement lié à son propre lepton chargé, et c'est ainsi qu'on reconnaîtra la « saveur » du neutrino interagissant dans un détecteur.

## 7. Des antineutrinos existent-ils ?

On a vu qu'à chaque constituant correspond un anticonstituant ayant des propriétés identiques mais des charges opposées. Le neutrino ne possède pas de charge électrique, mais il existe d'autres charges généralisées qui dictent la manière dont les particules réagissent entre elles. Dans le cas du neutrino, il faut invoquer la charge dite leptonique qui, à l'égal de la charge électrique, doit être