Mardi 23 janvier 2018

Communication de Georges BOULON, *membre titulaire*

3 pages couleurs

ETTORE MAJORANA (1906-1938 ?),

GÉNIAL PHYSICIEN ITALIEN DISPARU MYSTÉRIEUSEMENT

C'est une bien étrange histoire que celle d'Ettore Majorana, physicien théoricien italien de renom, membre du groupe des « *Ragazzi di via Panisperna* » dirigé par Enrico Fermi à l'Université La Sapienza de Rome. Un génie par ses contributions à la physique, en avance sur son temps et à l'origine de questions actuelles fondamentales en physique des particules. Il a disparu mystérieusement en 1938 à l'âge de 31 ans et, aujourd'hui, on se pose toujours la question de sa disparition. Nous retraçons l'histoire inédite de ce prodige et montrons brièvement comment ses contributions sont d'actualité, entre autres pour la caractérisation du neutrino.

Couleurs

Figure 1. Le couvent San Rocco, siège administratif de la Fondation Ettore Majorana à Erice.

La Fondation Ettore Majorana, Centre pour la Culture Scientifique d'Erice (Sicile)

Erice est un village situé sur un site exceptionnel, à l'extrême ouest de la Sicile. Il surplombe la ville de Trapani sur le mont Eryx, à 750 m d'altitude. Fondé par les Élymiens qui venaient de Troie, il a ensuite subi plusieurs invasions des Carthaginois, Romains, Byzantins, Arabes et Normands, dont on voit encore des traces. Aujourd'hui subsiste surtout l'aspect médiéval et spirituel, avec des couvents et églises restaurés ou en cours de restauration. Parmi eux, l'OTAN a réhabilité les anciens monastères San Rocco (*Fig. 1*), San Domenico, San Francesco, San Giovanni au profit de la « Fondation Ettore Majorana et Centre pour la culture scientifique », créée en 1963 sous la direction du Prof. Antonino Zichichi.

L'un des principaux objectifs de cette Fondation est d'organiser tout au long des années des écoles scientifiques spécialisées périodiques. Cette fondation affiche le souhait de rendre hommage à la fois à Galileo Galilei, fondateur de la science moderne, et à Enrico Fermi,

« *le navigateur italien, père des forces faibles* ». Si un grand nombre d'écoles concernent depuis 1974 la physique des particules et la cosmologie, domaine de prédilection du Prof. Antonino Zichichi, l'une d'entre elles concerne directement nos activités de recherche. Elle est organisée par le Prof. Baldassare Di Bartolo de *Boston College* (États-Unis), originaire de Trapani, sur la spectroscopie atomique et moléculaire dans les solides luminescents dont les applications sont connues en éclairage, scintillateurs et sources lasers. Nous bénéficions du privilège d'être régulièrement « *Invited lecturer* » depuis 1983 pour présenter des cours fondamentaux et les derniers résultats de nos recherches. La belle devise de cette école, reprise de Cicéron, puis au XVIIe siècle par Descartes, est : « *Docere, Delectare, Movere : Docendo discitur* » (« *enseigner, charmer, émouvoir : apprendre en enseignant* »). Ces nombreuses écoles apportent une contribution essentielle au développement des connaissances des doctorants et chercheurs et favorisent les coopérations avec les physiciens de toutes origines.

L'intégration parmi les « *Ragazzi di via Panisperna* »

Ettore Majorana est né le 5 août 1906 à Catane dans une riche famille catholique sicilienne qui assure directement son éducation. Très tôt on détecte ses facultés de calcul, mais aussi sa timidité et son caractère introverti. Il entre à 9 ans au collège Massimo alle Terme de Rome puis au Lycée Torquato Tasso où il obtint les meilleures notes puis son baccalauréat (Licenza Liceale) en 1923. Il entre à l'Université La Sapienza de Rome *(Fig. 2)* et suit une formation d'ingénieur qu'il abandonnera en 1928 pour rejoindre l'équipe du physicien Enrico Fermi en imitant son ami étudiant Emilio Segré, lequel avait été impressionné par un séminaire d'Enrico Fermi sur la physique quantique en cours d'émergence (Klein 2013 ; Sciascia 2012). En effet, sous l'impulsion d'Orso Mario Corbino, ancien député, directeur de l'Institut de Physique, Franco Rasetti et Enrico Fermi, avaient été chargés de créer une équipe de physiciens dans un palais de la Via Panisperna à Rome, au n° 89A, situé entre l'église Santa Maria Maggiore et le Forum *(Fig. 3)*. Par sa localisation, cette équipe était surnommée « *Ragazzi di via Panisperna* ». Elle était composée, d'une part, des théoriciens Gian Carlo Wick, Giulio Racah, Giovanni Gentile, Ugo Fano, Bruno Pontecorvo, puis Ettore Majorana, et, d'autre part, des expérimentateurs Emilio Segré, Edoardo Amaldi, Enrico Persico. Des noms devenus célèbres dans l'histoire de la physique moderne. Enrico Fermi recevra le Prix Nobel en 1938 pour la théorie de la radioactivité *beta* et la physique des réactions nucléaires en utilisant comme projectiles des neutrons lents. Emilio Segré obtiendra également cette distinction en 1959 pour sa découverte de l'antiproton.

Enrico Fermi, le *Pape*

Enrico Fermi (Rome 1901-Chicago 1954) est entré en 1918 à l'École Normale de Pise, école fondée par Napoléon sur le modèle de l'ENS de Paris. Docteur ès Sciences en 1922 avec une thèse sur la réfraction des rayons X par les surfaces cristallines, découverte par Von Laue (Nobel 1918), il a publié les résultats de recherches sur des problèmes d'électrodynamique et de relativité. Il est ensuite passé par des laboratoires réputés comme ceux de l'université de Göttingen, où il a appris la physique quantique avec Max Born (Nobel 1954) puis Werner Heisenberg (Nobel 1932) et Pascual Jordan, ainsi qu'à l'université de Leyde, où il a travaillé avec Paul Ehrenfest et fait la connaissance d'Albert Einstein (Nobel 1921) et d'Hendrick Lorentz (Nobel 1902). Sa force était de pouvoir aussi bien traiter des problèmes théoriques qu'expérimentaux. Enrico Fermi (*Fig. 4*) est nommé professeur de physique à 25 ans à l'université La Sapienza de Rome et a su s'entourer de brillants physiciens, créer une ambiance créative et organiser des séminaires avec les plus grands scientifiques de l'époque

Couleurs

Figure 2. Livret universitaire d'Ettore Majorana pour l'année académique 1923-1924 (Guerra, Nadia Robotti, 2015).

Couleurs

Figure 3. L'Institut de Physique au 89 A de la via Panisperna à Rome.
(Occupé par le Ministère de l'Intérieur italien, il est interdit au public. Il sera restitué à la science en 2019, comme *Centro Fermi-Museo Storico Della Fisica e Centro Studi e Ricerche*.)
[Photo prise le 1er décembre 2017 en présence du Prof. Giancarlo Righini, Directeur de Recherche émérite du projet de Musée Enrico Fermi, que nous remercions chaleureusement pour avoir rendu possible notre visite du palais de la Via Panisperna à Rome, site sensible du Ministère de l'Intérieur italien].

(*Fig. 5*). Fermi était « le Pape », Corbino « le Père éternel », Emilio Segré « le Basilic » à cause de son caractère colérique, Enrico Persico « *Propangada Fide* » comme cardinal responsable de la propagation de la foi en la physique quantique, et Ettore Majorana « le grand inquisiteur » en raison de la rigueur de son esprit critique et de l'acuité de sa pensée.

Mais après avoir reçu son prix à Stockholm en décembre 1938, Enrico Fermi décide de ne pas regagner l'Italie fasciste où son épouse, d'origine juive, est menacée par les nouvelles lois raciales. Et au début de 1939, il s'embarque avec sa famille pour les États-Unis, où il choisit la chaire de physique qui lui a été proposée à l'université Columbia. Il poursuit ses recherches sur la fission de l'uranium et entretient une réaction en chaîne, réalisant le 2 décembre 1942 la première pile atomique à Chicago, c'est-à-dire le premier réacteur

nucléaire, produisant de l'énergie grâce à une réaction de fission en chaîne contrôlée. Il fut naturalisé américain en 1944 et participa au projet Manhattan avec Niels Bohr, Emilio Segrè, Hans Bethe, Edward Teller, équipe dirigée par Robert Oppenheimer **à** Los Alamos (Nouveau-Mexique) ; le projet aboutit à l'explosion de la première bombe atomique, le 16 juillet 1945, à Alamogordo (Nouveau Mexique), qui fut rapidement utilisée par les Américains au Japon, d'abord à Hiroshima, le 6 août 1945, puis **à** Nagasaki le 9 août 1945.

Enrico Fermi disparaît en 1954, emporté par un cancer de l'estomac, à 53 ans.

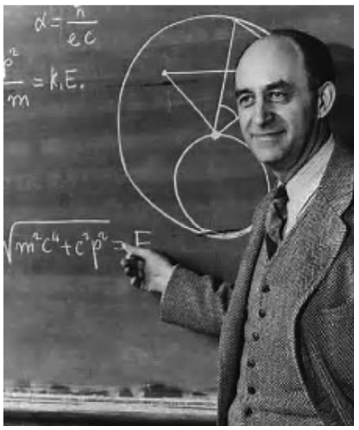


Figure 4. Le professeur Enrico Fermi.

Figure 5. Une conférence de physique nucléaire organisée par Enrico Fermi en 1931 Via Panisperna.

On reconnaît les signatures de présence des physiciens les plus illustres, comme Pauli, Millikan, Goldsmidt, Bohr, Meitner, Ehrenfest, Geiger, Compton, Sommerfeld, Heisenberg, Blackett, Jean Perrin (Guerra, Robotti 2015).

Introduction de l'enseignement de la Physique Quantique

Les années 1920 sont celles de l'épanouissement de la physique quantique. Elles coïncident avec la création de l'équipe des « *Ragazzi di via Panisperna* » à Rome. Jusqu'en 1900, la physique **« classique »,** issue des idées de Galilée et d'Isaac Newton, s'applique bien aux objets macroscopiques en mouvement à faible vitesse et décrit les grandeurs variant

de façon continue. Toutefois, des contradictions fondamentales apparaissent quand on essaie d'interpréter les expériences rattachées aux particules microscopiques qui venaient d'être découvertes comme l'électron de charge négative (1897, par Joseph John Thomson), le proton p de charge positive (1911, par Ernest Rutherford) et le neutron n sans charge électrique (1920, prédit par Ernest Rutherford, mais mis en évidence par James Chadwick en 1932). Tout naturellement, on s'est tourné vers les variations quantifiées des grandeurs physiques mises en jeu.

Il faut se tourner vers les ondes lumineuses pour comprendre la révolution quantique. La lumière donne lieu à des phénomènes d'interférences (Young, 1801) et de diffraction (Fresnel, 1818) interprétée par une théorie ondulatoire qui ne fut parfaitement décrite qu'en 1865 dans le cadre de la théorie électromagnétique de Maxwell. En 1900, l'alerte quantique allait sonner, obligeant à considérer des notions inhabituelles, même étranges, dans les interprétations de nouveaux résultats, donnant une certaine attractivité à la physique quantique. Ainsi, Max Planck postule que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font par des quantités discrètes, les quanta d'énergie E exprimés en joules, proportionnels à la fréquences v du rayonnement donc inversement proportionnels à la longueur d'onde λ : $E = h\nu = hc/\lambda$, v en Hertz (seconde^{-1}), c la célérité de la lumière=3.10^8 ms^{-1}, λ longueur d'onde en m, h la constante de Planck=$6{,}62 \times 10^{-34}$joules/seconde, afin d'interpréter la répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir. En 1905, Albert Einstein reprend l'idée de Planck pour interpréter l'effet photoélectrique de l'émission d'électrons par des ondes lumineuses seulement au-dessus d'un seuil de fréquence. Les quanta d'énergie lumineuse prennent le nom de photons et la lumière considérée comme de nature ondulatoire apparaît alors de nature corpusculaire. On parle dorénavant de dualité onde-corpuscule. Louis de Broglie en 1924 émet une autre idée révolutionnaire en associant une onde également aux particules de matière. La longueur d'onde λ associée à la particule de masse m et de vitesse v se calcule par $\lambda = h/mv$ où h désigne la constante de Planck. On caractérise ensuite une fonction d'onde ou paquet d'onde à chaque particule et on admet que la probabilité de présence d'une particule en un point de l'espace est mesurée par l'intensité de cette onde. Erwin Schrödinger démontre sa fameuse équation de propagation en 1925 permettant de calculer les fonctions d'onde par une mécanique ondulatoire. La même année, Werner Heisenberg élabore une mécanique des matrices pour calculer les fréquences et intensités des rayonnements, seules grandeurs physiques observables. C'est finalement Schrödinger qui unifie en 1926 les deux traitements ondulatoire et matriciel en mécanique quantique.

Ensuite, en 1927, l'anglais Paul Dirac (Nobel 1933) appliqua le principe de dualité onde-corpuscule à une particule relativiste se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière, conduisant à des valeurs d'énergie aussi bien positive, donc acceptables, que négative, difficiles à comprendre. Dirac admet que l'état quantique de l'univers appelé l'état du vide est rempli d'électrons à énergie négative (mer de Dirac par analogie avec la mer de Fermi pour les nucléons) et émet alors l'idée en 1931 que toute perturbation extérieure fait passer l'électron dans une énergie positive détectable tout en laissant un trou, image de l'antiparticule de l'électron appelé positron. Electron et positron sont créés simultanément et associés par paires. Le positron fut découvert en 1932 par l'américain Carl Anderson, Prix Nobel 1936. On trouvera une excellente présentation du Modèle Standard de la physique des particules dans l'article de Guy Chanfray publié dans les *Mémoires de l'Académie* (Chanfray 2017).

Un physicien hors du commun

En Italie, Enrico Fermi est le premier à enseigner la physique quantique et l'esprit mathématique d'Ettore Majorana arrive à point pour interpréter les nouveaux résultats de physique des particules. Il a soutenu son doctorat le 6 juillet 1929, sur la théorie quantique des noyaux radioactifs, au bout d'un an de travail seulement avec l'évaluation de 110/110. En novembre 1932, il obtient son doctorat d'État (*Libera Docenza*) en physique théorique. À l'époque, Ettore Majorana est le seul, selon Emilio Segré, à pouvoir parler d'égal à égal avec Enrico Fermi. Bruno Pontecorvo rapporte les mots de Fermi : « *Si un problème a été posé, personne au monde ne peut mieux le résoudre que Majorana* ».

Ainsi, Edoardo Amaldi note « *son aisance peu commune à exploiter les propriétés de symétrie pour simplifier les problèmes* », qu'il attribue à ses « *dons exceptionnels de calculateur* ». En effet, Ettore Majorana doit être associé avec Paul Dirac, Hermann Weyl et Eugene Wigner à l'introduction de la théorie des groupes pour décrire les propriétés de symétries fondamentales qui régissent la dynamique des particules élémentaires et qui ont été si fructueuses en physique quantique (Wigner 1931 ; Esposito 2015). Nous ajoutons que cet intérêt s'est révélé essentiel non seulement en physique nucléaire mais aussi en physique atomique, dans notre domaine de recherche relatif à la résolution spectroscopique des niveaux d'énergie des ions insérés dans les sites cristallographiques de diverses symétries ponctuelles des matériaux pour l'optique.

Parmi les évaluations prononcées par les Ragazzi, il faut citer celle de leur chef, Enrico Fermi, rapportée au cours d'une discussion avec Giuseppe Cocconi après la disparition d'Ettore Majorana :

> « *Il y a en ce monde diverses catégories d'hommes de science. Des personnes de deuxième et troisième rang qui font de leur mieux mais ne vont pas très loin. Des personnes de premier rang qui font de leur mieux, qui arrivent à des découvertes de grande importance, fondamentales pour le dévelopement de la science. Mais il y a aussi les génies, comme Galilée et Newton. Eh bien, Majorana était un de ceux-là. Majorana avait ce que ne possède aucun autre au monde ; malheureusement, il lui manquait ce qu'au contraire il est commun de trouver dans les autres hommes : le simple bon sens.* »

De même Laura, l'épouse d'Enrico Fermi, dresse le portrait psychologique suivant :

> « *Majorana, cependant, avait un caractère étrange : il était excessivement timide et introverti. Dans la matinée, en allant en bus à l'institut, il commençait à réfléchir. Il lui venait à l'esprit une nouvelle idée, ou la solution à un problème difficile, ou l'explication de certains résultats expérimentaux qui semblaient incompréhensibles : il fouillait dans ses poches, sortait un crayon et un paquet de cigarettes sur lequel il griffonnait des formules compliquées. Descendu du bus, il s'en allait perdu dans ses pensées. Arrivé à l'institut il cherchait Fermi ou Rasetti et, le paquet de cigarettes à la main, expliquait son idée. Ensuite, il jetait souvent le paquet de cigarettes* ».

Ettore Majorana ne souhaitait pas publier ses travaux prétextant qu'ils n'étaient pas terminés. Il faisait preuve d'une grande assurance dans l'analyse critique des articles scientifiques : ainsi, en janvier 1932, prenant connaissance d'un article des Joliot-Curie interprétant leur résultat par un effet Compton sur les protons, il suggéra aussitôt à Segré et Amaldi, qu'ils avaient sûrement découvert sans s'en rendre compte un « proton neutre », le neutron, dont l'existence sera effectivement démontrée quelques mois plus tard par Chadwick, Prix Nobel 1935. Il ébauche ensuite une théorie où les protons et les neutrons seraient les seuls constituants du noyau et émet l'idée que ces particules interagiraient par les

forces d'échange des seules coordonnées spatiales. Malgré l'insistance de Fermi, il refuse de publier, de sorte que c'est Werner Heisenberg qui publie en juillet 1932 une théorie du noyau très proche de son modèle. Heisenberg fut lauréat du prix Nobel de physique en 1932 « *pour la création de la mécanique quantique* ».

À son retour à Rome en 1933, arrivant de Leipzig où il a rencontré Heisenberg et de Copenhague où il a rencontré Niels Bohr, Ettore Majorana vit en reclus ; il se renferme sur lui-même et ne vient plus au laboratoire, semblant fortement déprimé surtout après la disparition de son père en 1934. Il lit en particulier Luigi Pirandello, qui écrit dans son roman *Feu Mathias Pascal* : « *Qui peut dire le nombre de ceux qui sont comme moi, mes frères… On laisse son chapeau et sa veste avec une lettre dans sa poche, sur le parapet d'un pont qui enjambe une rivière ; puis, au lieu de se jeter dans l'eau, on s'en va tranquillement en Amérique ou ailleurs* ». On peut logiquement penser que cette lecture a eu une incidence sur sa disparition.

Une disparition mystérieuse

Peu à peu il reprend goût à la vie et, sous la pression des *Ragazzi di via Panisperna*, il accepte même de se présenter, contre toute attente, à un concours de professeur à l'université de Palerme en octobre 1937, mais il doit montrer une publication récente pour justifier sa candidature. En fait il possédait quelques réserves puisqu'il ne souhaitait pas publier ses études. Il publie alors un travail qu'il avait déjà réalisé lors de son stage chez Heisenberg en 1933 sur la théorie symétrique de l'électron et du positron (Majorana 1937), dont une conséquence est qu'un fermion neutre doit coïncider avec sa propre anti-particule, en contradiction avec le modèle standard élaboré par Dirac. Cet article a une résonance importante en physique quantique. Giulio Racah proposa alors d'appliquer l'idée aux neutrinos et nous donnerons par la suite un état de l'art succinct des recherches relatives aux neutrinos, toujours d'actualité comme un bel exemple des travaux d'Ettore Majorana.

Fermi, qui préside le jury du poste de professeur à Palerme, se doit de promouvoir Ettore Majorana devant tout autre candidat puisqu'il le considère être un génie du niveau de Galilée et de Newton. Si bien que le concours est reporté pour tous les candidats, excepté Ettore Majorana qui se voit offrir un poste de professeur pour mérites exceptionnels à l'Institut de physique théorique de l'université de Naples. Il démarre ses cours en janvier 1938, enseigne deux fois par semaine un cours de haut niveau suivi par seulement cinq étudiants, mais, paraît-il, suivi sérieusement par un seul. Il entretient de bonnes relations professionnelles avec Carelli, le directeur de l'Institut. En réalité, il vit mal cette obligation de transmettre le savoir, lui qui répugne à communiquer et disparaît de façon mystérieuse. Il quitte Naples le soir du 25 mars 1938 par le paquebot-poste en direction de Palerme, et il envoie des lettres à Carelli à Naples ainsi qu'à sa famille pour déclarer son intention de disparaître ; mais le 26 mars, de Palerme, il écrit de nouveau un télégramme à Carelli mentionnant que la mer l'a refusé, qu'il rentrait à Naples et qu'il avait l'intention de renoncer à l'enseignement. Aujourd'hui on ignore toujours ce qu'est devenu Ettore Majorana, et sa disparition nourrit diverses polémiques dans les médias. En Italie, on s'est bien sûr passionné pour cette affaire, mais pas seulement en Italie, si l'on en juge par tous les articles, émissions de radio et de TV ou les enregistrements internet postés sur « Youtube ».

Analysons rapidement les diverses hypothèses de sa disparition. Le suicide doit être écarté puisque « *la mer l'a refusé* ». Ettore Majorana était très catholique et son confesseur Monsignor Francesco Riccieri l'exclut. En outre, plusieurs témoins dirent l'avoir vu après le 28 mars et parmi eux, son infirmière, le curé de l'église du Gesù Nuovo et le prieur du couvent

San Pasquale di Portici le 12 avril 1938. Il semble qu'il ait orchestré son changement de vie influencé par la lecture de Pirandello. Il avait d'ailleurs retiré ses économies à la banque et emporté son passeport. Leonardo Sciascia (Sciascia 2012) et sa mère penchent plutôt pour une nouvelle vie monastique. À l'automne 1939 le Père Caselli, un jésuite qui officie dans un Monastère de Calabre, a accepté une donation de la famille de Majorana et en parle comme du défunt. Serait-il donc mort dans ce monastère (Sciascia 2012) ? Pourtant le 7 juin 2011, les médias italiens annoncent qu'après une analyse anthropologique d'un visage prise en Argentine en 1955, publié par le « *Reparto investigazioni scientifiche dei Carabinieri* », il y avait une forte présomption que ce soit celui d'Ettore Majorana. Enfin, le procureur de Rome a officiellement fermé l'affaire le 4 février 2015 après avoir affirmé que Majorana était vivant entre 1955 et 1959, à Valencia, au Venezuela (Palma 1959). Après ces différentes hypothèses on peut simplement penser qu'Ettore Majorana a su orchestrer sa disparition, probablement sous l'influence de la lecture de l'écrivain italien Pirandello.

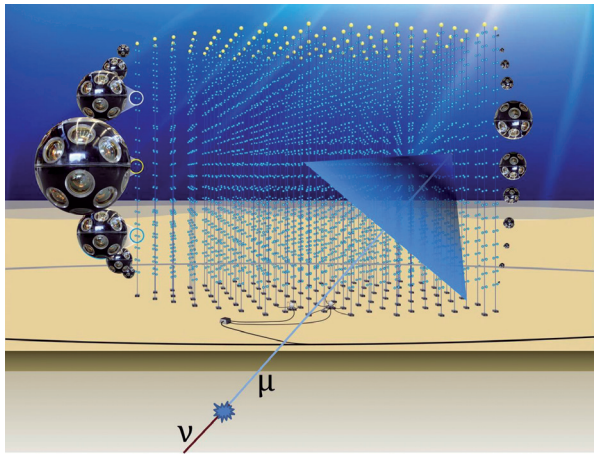
Une question reste intrigante après cette analyse. Pourquoi souhaitait-il se libérer de la science ? Il est clair qu'Ettore Majorana éprouvait des difficultés à supporter les dons scientifiques que lui avaient transmis le destin. Des arguments étranges sont alors avancés. Leonardo Sciascia rappelle que la Sicile n'a pas de culture scientifique, n'a pas donné de savants depuis Archimède à Syracuse en 212 avant J-C, et s'étonne donc du génie d'Ettore Majorana qui apparaît comme une singularité historique[2] (Sciascia 2012). Il avance aussi l'idée, réfutée par les Ragazzi, qu'il aurait anticipé les applications néfastes de la physique nucléaire. Un esprit prodigieux comme celui d'Ettore Majorana était-il capable d'anticiper le futur de la physique en prévoyant que les forces nucléaires conduiraient à des bombes atomiques conséquences des premiers travaux de Fermi réalisés dans le même laboratoire que celui d'Ettore Majorana ? Il avait connu les horreurs de la Première guerre ; ne souhaitant pas participer à la construction d'une bombe atomique destructrice, il aurait préférer disparaître. C'est finalement en décembre 1938, quelques mois après la disparition d'Ettore Majorana, que Hahn et Strassmann ont découvert la fission du noyau d'uranium. On peut mettre en parallèle les propos d'Ettore Majorana rapportés à sa sœur Maria lui disant que les physiciens sont sur une mauvaise voie, et Leonardo Sciascia a même affirmé qu'il se comportait comme un homme épouvanté (Sciascia 2012).

Le neutrino est-il une particule de Majorana ?

Le neutrino, un fermion de spin ½, électriquement neutre, est la particule élémentaire la plus abondante de l'Univers produit dans de nombreuses réactions gouvernées par l'interaction faible comme dans les réacteurs nucléaires, les supernovas, la géophysique, surtout le soleil. Pour les neutrinos, la matière est transparente. Il fut proposé de façon purement théorique par Wolfgang Pauli en 1930, Nobel 1945, puis par Enrico Fermi en 1934, Nobel 1938, et découvert en 1956 par une équipe de chercheurs américains dirigée par Clyde Cowan et Frederick Reines, Nobel 1995. Il est désormais connu que le neutrino et son équivalent d'antimatière, l'antineutrino, sont présents dans la nature en trois types ou « saveurs », chacune associée à un lepton élémentaire (électron, muon et tau).

Nous allons maintenant montrer combien les idées d'Ettore Majorana influencent les recherches actuelles en physique des particules en nous limitant aux travaux sur le neutrino. Dirac avait introduit en physique quantique la notion de mer d'électrons dans le vide, énergie négative, non acceptée par Ettore Majorana qui a alors construit une théorie alternative permettant d'éliminer complètement les solutions d'énergie négative et proposa vers 1932-33 que les particules neutres sont leurs propres antiparticules (Majorana 1937). Ce sont les

« *particules de Majorana* » alors que les particules chargées sont des « *particules de Dirac* » pour lesquelles particules et antiparticules sont différentes. L'équation d'onde relativiste de Majorana est similaire à l'équation de Dirac, mais inclut la charge conjuguée Ψ_c d'un spineur Ψ élément d'un espace vectoriel complexe. Lorsqu'ils sont égaux, Ψ est alors appelé spineur de Majorana et apparaît comme une représentation réelle du groupe de Lorentz. Quant aux spineurs de Weyl et aux spineurs de Dirac, ils s'expriment dans l'espace complexe.



Couleurs

Figure 6. Le 22 septembre 2017, la première ligne de détection d'ORCA a été mise en service à 2 437 m de profondeur et à 40 km au large de Toulon.
Dans l'obscurité des abysses, les détecteurs de lumière bleue Cherenkov de KM3Net sont des cellules de photomultiplicateurs disposées sous la forme d'un réseau de plusieurs centaines de cordes verticales attachées au fond de la mer, destinées à détecter les muons μ générés par les neutrinos ν ayant traversé la Terre (Katz 2012 ; De Jong 2016).

La conséquence est d'importance. En effet, dans le cadre du Modèle Standard les neutrinos ont une masse nulle. Or le phénomène d'oscillation, imaginé dès 1957 par Bruno Pontecorvo, un des Ragazzi, a été observé en 1998 avec l'expérience Super-Kamiokande, une piscine de 50 000 tonnes d'eau sous terre au Japon (*Takaaki Kajita*, Nobel 2015), et a montré que les neutrinos se transforment entre différentes « saveurs », ce qui leur confère une masse.

Actuellement, un vaste programme expérimental vise à connaître la masse des neutrinos et à déterminer si le neutrino est réellement sa propre antiparticule. On recherche donc *la particule de Majorana* par la mise en évidence d'une forme particulière de la radioactivité par double désintégration bêta sans émission de neutrino ($\beta\beta0\nu$). Les expériences doivent se libérer des rayonnements cosmiques. Mentionnons le détecteur NEMO3 (2003-2011) (*Neutrino Ettore Majorana Observatory*) au Laboratoire Souterrain de Modane, sous le tunnel de Fréjus, qui a permis la détermination d'une masse maximale du neutrino inférieure à 1 eV et qui se poursuit par le projet SuperNemo3. De même, Exo-200 (Exo pour *Enriched Xenon Observatory*), avec 200 kg de xénon liquide enrichi à plus de 80 % de l'isotope radioactif xénon 136, a duré deux années à l'aide d'un détecteur installé à 650 mètres de profondeur dans le *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP), un centre de stockage de déchets radioactifs militaires dans la commune de Carlsbad (Nouveau-Mexique). Aujourd'hui l'expérience se poursuit avec nEXO (pour « *Next Exo* ») utilisant une tonne d'eau. Un autre projet européen est le télescope à neutrinos KM3NeT (*Cubic kilometre Neutrino Telescope*) installé en Méditerranée au large de Toulon (ORCA = *Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*)

(*Fig. 6*), en Sicile (ARCA = *Astroparticles Research with Cosmics in the Abyss*) et plus tard en Grèce pour détecter la très faible lumière générée par les neutrinos ayant traversé la terre.

L'avenir nous dira si la particule d'Ettore Majorana identique à son anti-particule existe réellement avec pour conséquences le développement d'une physique différente du Modèle Standard ainsi que de la possible compréhension de la dissymétrie observée de l'univers, la matière étant constituée essentiellement de particules et non pas d'anti-particules, ou, encore, la nature de la matière noire invisible autour des galaxies dont on perçoit les effets gravitationnels par les déviations de la lumière qui passe à proximité (Klein 2013).

Conclusion

À partir de notre participation à la Fondation Ettore Majorana d'Erice en Sicile, nous avons souhaité retracer l'histoire du physicien italien d'origine sicilienne dont elle porte le nom. Considéré comme un génie, Ettore Majorana intégra en 1928 les « *Ragazzi di via Panisperna* », pépinière de brillants chercheurs italiens constituée par Enrico Fermi à l'Institut de Physique de l'université La Sapienza à Rome. À l'époque, Enrico Fermi l'a comparé à Galilée et à Newton. Son caractère était étrange. Sombre de nature, il avait tendance à vivre en marge de la société. Toutes les hypothèses formulées sur sa disparition mystérieuse à l'âge de 31 ans conduisent à beaucoup d'incertitudes, basées sur le désir d'un changement radical d'une vie en dehors de la science. Il répugnait à publier ses études, en réalité nobélisables, au sommet des recherches de la physique théorique. Ses travaux trouvent un écho aujourd'hui en physique des particules, avec la recherche de la particule de Majorana identique à son anti-particule qui pourrait s'appliquer au neutrino.

BIBLIOGRAPHIE

CHANFRAY (Guy), « Sur l'origine de la masse des particules élémentaires et de la matière », *Mémoires de l'Académie ses Sciences, Belles Lettres et Arts de Lyon*, 4e série, tome 17, 2017, p. 83-105.

DE JONG (Maarten), « Birth of Neutrino Astronomy », *Science and Technology of Pan European Networks*, vol. 21, December 2016, p. 28-31.

ESPOSITO (Salvatore), *The Physics of Ettore Majorana : Theoretical, Mathematical, and Phenomenological,* Cambridge University Press, 2015. [ISBN 978-1-107-04402-9].

GUERRA (Francesco), ROBOTTI (Nadia), *Enrico Fermi e il quaderno ritrovato-20 marzo 1934. La vera storia della scoperta della radioattivita indotta da neutroni,* Societa Italiana di Fisica, Bologne, 2015.

KATZ (Uli), « A neutrino telescope deep in the Mediterranean Sea », *CERN Courier, 52N6*, 2012, p. 31-33.

KLEIN (Etienne), *En cherchant Majorana. Le physicien absolu*, Flammarion / Equateurs essais, Paris, 2013 [204 pages. ISBN 978-2-849-90-259-2].

MAJORANA (Ettore),« Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone », *Il Nuovo Cimento*, vol. 14, avril 1937, p. 171-184.

PALMA (Ester), « La Procura: Ettore Majorana vivo in Venezuela fra il 1955 e il 1959 », sur *roma. corriere.it*, *Corriere della sera* (consulté le 4 février 2015).

SCIASCIA (Leonardo), *La disparition de Majorana*, traduit de l'italien par Mario Fusco, éd. Allia, Paris, 2012 [110 pages]

WIGNER Eugen, *La Théorie des groupes et ses applications à la mécanique quantique des atomes (Gruppentheorie und ihre Anwendungen auf die Quantenmechanik der Atome)*, Braunschweig : F. Vieweg & Sohn Akt.-Ges, 1931.