

# De la vie d'Ettore Majorana aux particules supersymétriques

---

cea



# Le « cas » Majorana : une histoire à rebondissement



Depuis 2005 :

- **Colloque du centenaire (2006)**
- **Découverte de manuscrits** (notamment the « Moreno paper » and the « french manuscript »)
- **Multiplés publications sur les travaux inédits de Majorana**
- **Précision de certains enjeux scientifiques** (Nature des neutrinos (Dirac/Majorana), supersymétrie, violation de CP dans le secteur des leptons, conservation du nombre leptonique...)

**Un homme (une œuvre) « caché(e) derrière sa disparition » ?**

# Ultimes messages

---



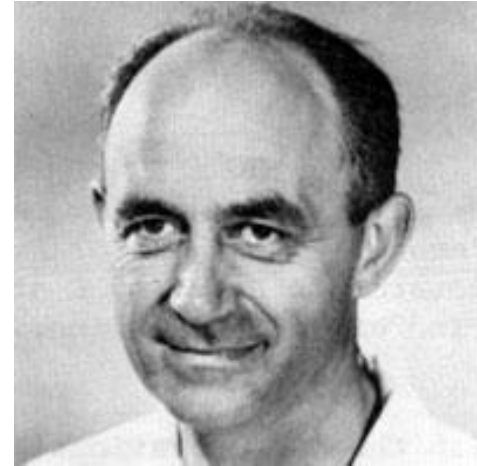
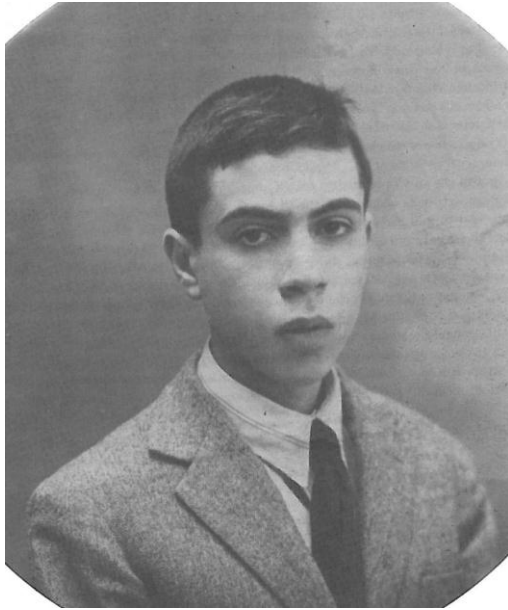
In Venice with his family in summer 1930.

Caro Carelli, j'ai pris une décision qui était désormais inévitable. Il n'y a dans cette décision nulle trace d'égoïsme, mais je me rends bien compte que ma disparition improvisée risque d'être une source d'ennuis, pour toi comme pour tes étudiants. C'est pourquoi je te prie de me pardonner, surtout pour avoir déçu ta confiance, ta sincère amitié et la sympathie dont tu as fait preuve à mon égard tout au long de ces derniers mois. Je te prie aussi de me rappeler au bon souvenir de ceux que j'ai appris à connaître et à apprécier dans ton Institut. D'eux tous, je conserverai un heureux souvenir au moins jusqu'à onze heures ce soir, et, si cela est possible, même après.

**Lettre d'EM du 25 mars 1938 à Antonio Carelli**

## Un « génie effrayant » (Chateaubriand, à propos de Blaise Pascal)

---



Vous savez, il y a plusieurs sortes de scientifiques. Ceux de troisième ou de deuxième catégorie font de leur mieux mais ne vont pas bien loin. Il y a aussi les scientifiques de premier rang, qui parviennent à des découvertes importantes pour le développement de la science. Et puis il y a les génies, comme Galilée et Newton. Ettore était l'un d'entre eux.

**Enrico Fermi à Giuseppe Cocconi, 31 mars 1938.**

# Ultimes messages

---

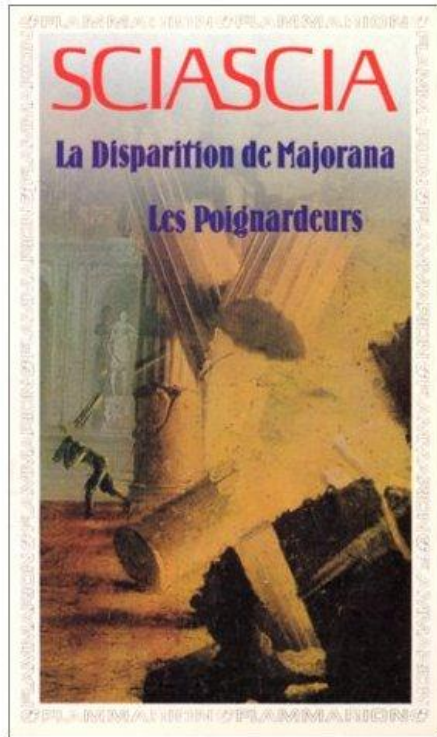


Karlsbad, autumn 1931. Ettore Majorana (second from the right) with his family.

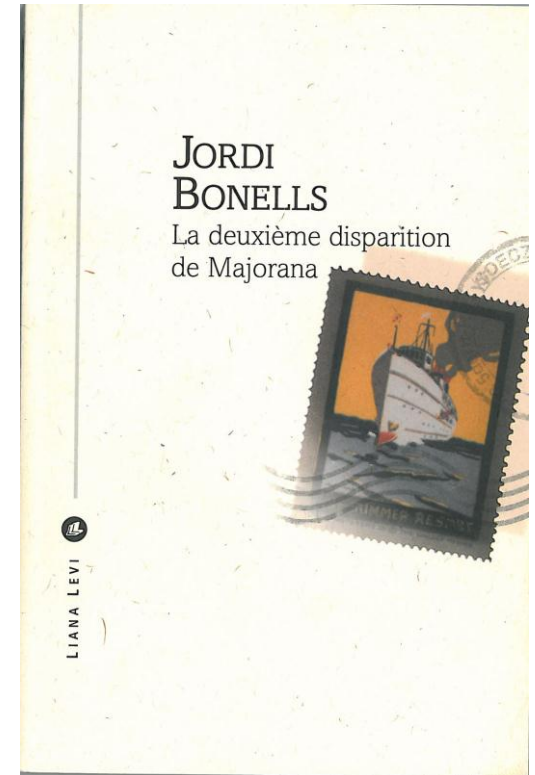
Je n'ai qu'un seul désir : que vous ne soyez pas vêtus de noir. Si vous voulez vous plier à l'usage, vous pourrez porter, mais pas plus de trois jours durant, un signe de deuil quelconque. Ensuite, si vous le pouvez, gardez-moi dans vos cœurs et pardonnez-moi.

**Lettre d'EM à sa famille, 25 mars 1938**

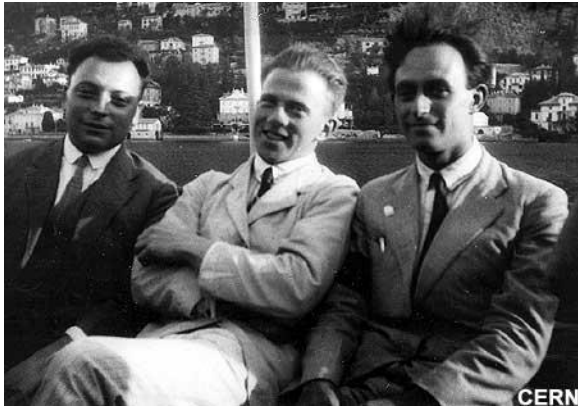
# Un personnage devenu *de roman*



Friedrich Dürrenmatt  
Les Physiciens



# Di ragazzi di via Spanisperna



**Enrico FERMI (« Pape »)**

**Enrico PERSICO (« Cardinal responsable de la propagation de la foi »)**

## **Expérimentateurs**

Emilio SEGRE

Eduardo AMALDI

Bruno PONTECORVO

Eugenio FUBINI

...

## **Théoriciens**

Ettore MAJORANA (« Grand Inquisiteur »)

Gian Carlo WICK

Franco RASETTI (« Vicaire Cardinal »)

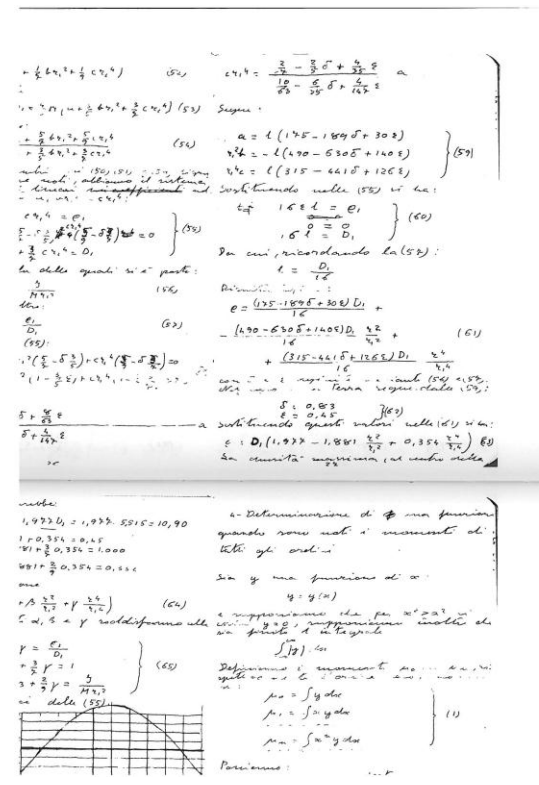
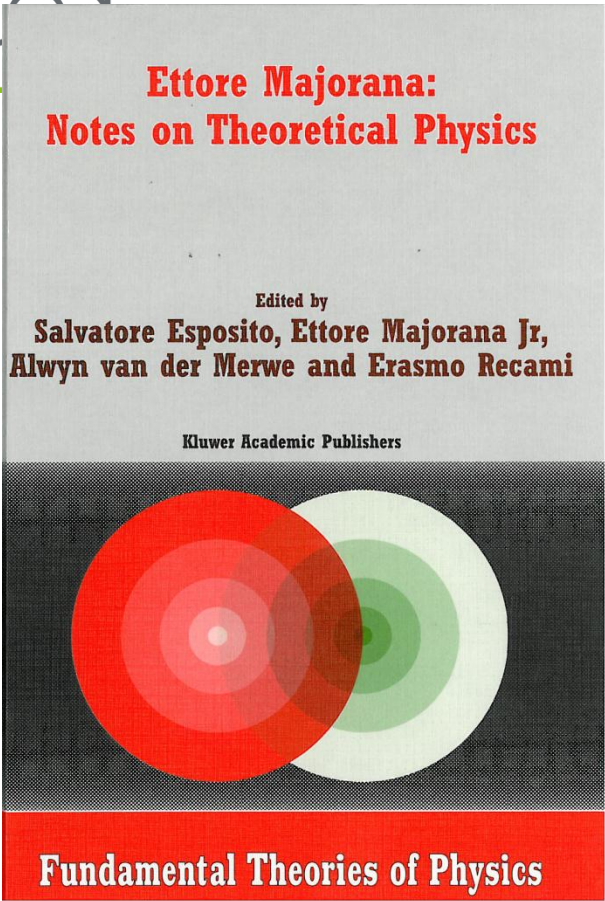
Giulio RACAH

Giovanni GENTILE Jr

Ugo FANO

...

# Le rayonnement d'un spectre : Des milliers de pages de calcul, écrites en quelques années... (« Volumetti » : 1927 → 1932)



where the  $\alpha$  matrices are the ones displayed in Sec. 3.18 with  $n = 4$ ,  $p = 5$ . Let  $\mathcal{H}_1$  be the operator obtained from  $\mathcal{H}$  by changing its last term  $mc/i$  into  $-mc/i$ , and consider the quantity  $\mathcal{H}_1\mathcal{H}\psi$ <sup>20</sup>:

$$\left[ - \left( mc + \frac{W}{c} + \frac{e}{c}\phi \right)^2 + \left( p_x + \frac{e}{c}A_x \right)^2 + \left( p_y + \frac{e}{c}A_y \right)^2 + \left( p_z + \frac{e}{c}A_z \right)^2 + m^2c^2 + \alpha_1\alpha_2 \frac{e\hbar}{c}E_x + \alpha_1\alpha_3 \frac{e\hbar}{c}E_y + \alpha_1\alpha_4 \frac{e\hbar}{c}E_z - \frac{e\hbar}{ci}\alpha_2\alpha_3H_x - \frac{e\hbar}{ci}\alpha_3\alpha_4H_y - \frac{e\hbar}{ci}\alpha_4\alpha_2H_z \right] \psi = 0. \quad (3.550)$$

The first five terms give the relativistic Hamiltonian for an electron without spin, while the others represent the corrections induced by spin. By noting that the square of the matrices  $\alpha_1\alpha_2, \alpha_1\alpha_3, \alpha_1\alpha_4, \alpha_2\alpha_3, \alpha_3\alpha_4, \alpha_4\alpha_2$  is  $-1$ , so that their eigenvalues are  $\pm i$ , and that the classical Hamiltonian, in first approximation, is  $\mathcal{H}_1\mathcal{H}/2m$ , we deduce that the electron has a magnetic moment  $e\hbar/2mc$  and an imaginary electric moment  $e\hbar/2mci$ .

Let us consider the equivalent, but more convenient, expressions for Eqs. (3.549):

$$\left[ - \left( mc + \frac{W}{c} + \frac{e}{c}\phi \right) + \alpha_1 mc + \alpha_2 \left( p_x + \frac{e}{c}A_x \right) + \alpha_3 \left( p_y + \frac{e}{c}A_y \right) + \alpha_4 \left( p_z + \frac{e}{c}A_z \right) \right] \psi = 0, \quad (3.551)$$

which can be cast in the form

$$\mathcal{H}\psi \equiv \left[ (\alpha_1 - 1) mc^2 - \frac{e}{c}\phi + \alpha_2 c \left( p_x + \frac{e}{c}A_x \right) + \alpha_3 c \left( p_y + \frac{e}{c}A_y \right) + \alpha_4 c \left( p_z + \frac{e}{c}A_z \right) \right] = W\psi. \quad (3.552)$$

Let us assume that the magnetic field is constant, with intensity  $H$ , and that it is directed along the  $z$  axis. We then have

$$A_x = -\frac{1}{2}yH, \quad A_y = \frac{1}{2}xH, \quad A_z = 0, \quad (3.553)$$

<sup>20</sup> In the original manuscript, the old notation  $h/2\pi$  is used, while we here denote the same quantity with  $\hbar$ . Note also that  $\phi$  and  $A$  are the scalar and vector electromagnetic potentials, respectively, while in the following  $E$  and  $H$  denote the electric and magnetic fields, respectively.





### HOLE THEORY AND QUANTUM ELECTRODYNAMICS IN AN UNKNOWN *FRENCH* MANUSCRIPT BY ETTORE MAJORANA

S. ESPOSITO

**ABSTRACT.** We give an accurate historical and scientific account of a previously unknown manuscript written by Ettore Majorana in French. The retrieved text deals with Quantum Electrodynamics by using the formalism of field quantization, and it is here reported, for the first time, in translation. It is likely related to an invited talk for a conference at Leningrad (or Kharkov) in 1933 (or 1934) which, however, Majorana never attended. Probably this manuscript refers to the last missing papers of the “Senatore folder”, given by Majorana to one student of his at the University of Naples in 1938, just before his disappearance.

# The « french manuscript »

- Sans doute rédigé en 1933, en préparation soit d'une conférence de physique nucléaire (Leningrad, septembre 1933), soit d'une conférence de physique théorique (Kharkov, mai 1934).
- Une partie de ce manuscrit concerne l'électrodynamique quantique, qu'EM essaie de construire en écrivant les équations de Maxwell comme des équations « de type Dirac » (idem Oppenheimer). Le reste propose une application du formalisme de la seconde quantification à la théorie des trous de Dirac (idem Heisenberg).



[By introducing the operators]

$$W = -\frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial t}, \quad p_x = \frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x}, \quad \dots$$

[we have:]

$$\begin{cases} \frac{1}{c} W \psi_x + i p_y \psi_z - i p_z \psi_y = 0, \\ \frac{1}{c} W \psi_y + i p_z \psi_x - i p_x \psi_z = 0, \\ \frac{1}{c} W \psi_z + i p_x \psi_y - i p_y \psi_x = 0, \end{cases} \quad \underline{p_x \psi_x + p_y \psi_y + p_z \psi_z = 0},$$

[and the Maxwell equations may be written in the compact form, analogous to that of the Dirac equation,]

$$\left[ \frac{1}{c} W + (\alpha, p) \right] \psi = 0,$$

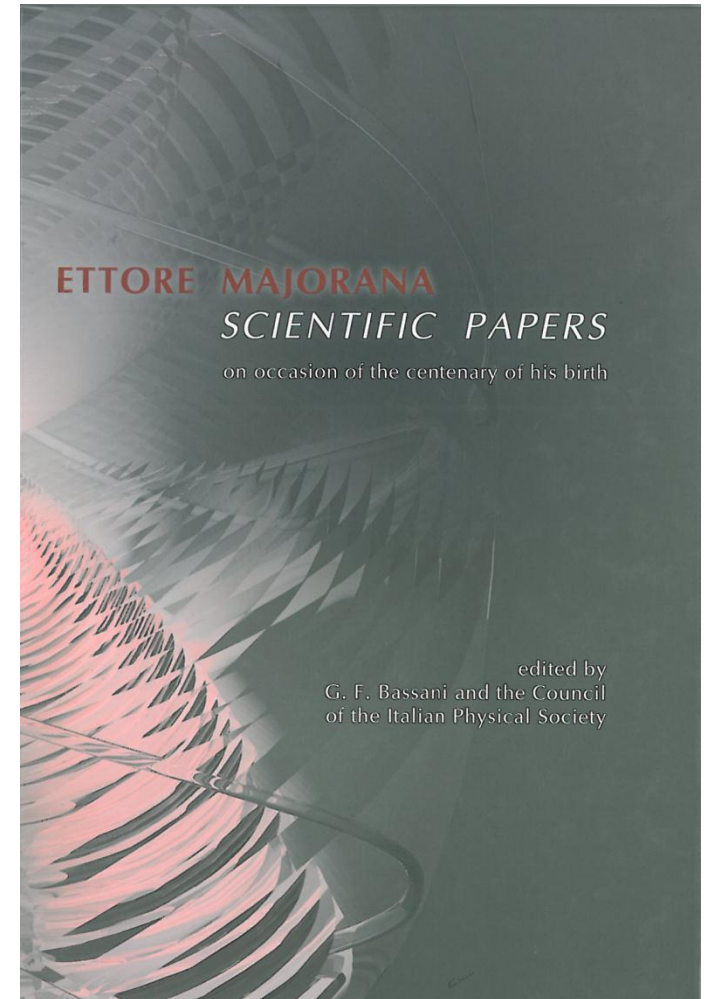
[with]

$$\alpha_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \alpha_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \alpha_z = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

# Les articles publiés de son vivant



- (1) “Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell’elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio,” in collaboration with Giovanni Gentile Jr., *Rendiconti Accademia Lincei* **8** (1928) 229-233.
- (2) “Sulla formazione dello ione molecolare di He,” *Nuovo Cimento* **8** (1931) 22-28.
- (3) “I presunti termini anomali dell’Elio,” *Nuovo Cimento* **8** (1931) 78-83.
- (4) “Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno,” *Rendiconti Accademia Lincei* **13** (1931) 58-61.
- (5) “Teoria dei tripletti  $P'$  incompleti,” *Nuovo Cimento* **8** (1931) 107-113.
- (6) “Atomi orientati in campo magnetico variabile,” *Nuovo Cimento* **9** (1932) 43-50.
- (7) “Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario,” *Nuovo Cimento* **9** (1932) 335-344.
- (8) “Über die Kerntheorie,” *Zeitschrift für Physik* **82** (1933) 137-145; “Sulla teoria dei nuclei,” *La Ricerca Scientifica* **4**(1) (1933) 559-565.
- (9) “Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone,” *Nuovo Cimento* **14** (1937) 171-184.



# Les neutrinos sont-ils de Dirac ou de Majorana ?

Les états d'énergie négative « répugnent » à Majorana, qui considère que la mer de Dirac constitue une hypothèse « artificielle et insatisfaisante » dont il faut débarrasser la physique. Dans le modèle qu'il propose, les particules neutres sont nécessairement identiques à leurs propres antiparticules. Plus précisément, les particules neutres doivent avoir pour antiparticules leur propre image dans un miroir.

**La question de l'existence de particules « de Majorana » est fondamentale pour comprendre l'origine de la masse des neutrinos, et également les symétries cachées qui structurent les interactions fondamentales.**




?



# Les neutrinos sont-ils de Dirac ou de Majorana ?

---

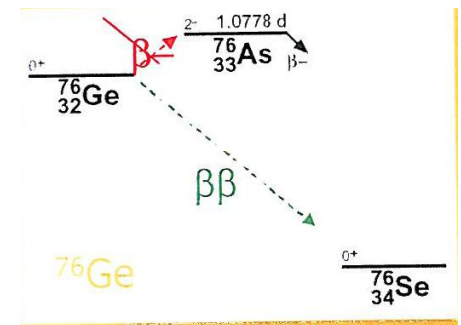
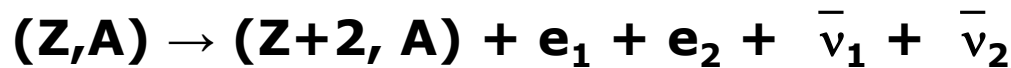
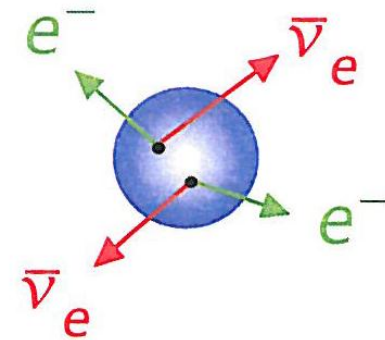
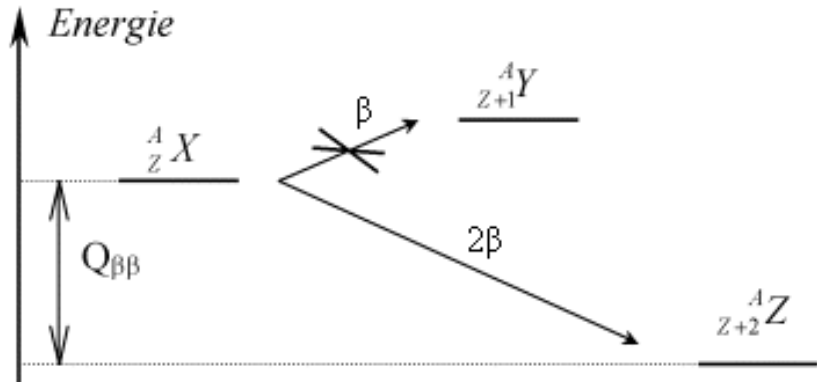


**Selon la théorie de Dirac**, un neutrino peut être gaucher ou droitier, et il en va de même pour un antineutrino (donc quatre composantes). Un neutrino observé gaucher dans un repère donné peut-être observé droitier dans un autre repère (idem pour l'antineutrino) : il suffit pour cela que cet autre repère se déplace plus vite que le neutrino, ce qui n'est possible que si le neutrino est massif. Ce n'est que la dynamique et le repère dans lequel on se place qui fait que, le plus souvent, on observe des neutrinos gauchers et des antineutrinos droitiers.

**Selon la théorie de Majorana**, en revanche, neutrino et antineutrino forment une seule et même particule (donc deux composantes seulement). Leur nombre leptonique est nul. L'antiparticule du neutrino gaucher n'est pas autre chose que le neutrino droitier, et réciproquement. Il n'y a donc plus que deux composantes, images l'une de l'autre par réflexion dans un miroir.

Si la masse du neutrino était nulle (ce que l'on sait faux depuis 2001), ces deux théories seraient équivalentes (le neutrino serait une particule de Weyl, décrite par un spineur sans masse à deux composantes). Mais dès lors que le neutrino a une masse, on peut imaginer des expériences qui conduiraient à des résultats différents selon que les neutrinos sont de Dirac ou de Majorana (par exemple envoi d'un faisceau de neutrinos sur une cible).

# La désintégration double bêta avec émission de neutrinos



Ce processus rare est autorisé par le modèle standard et a été observé sur différents isotopes :  ${}^{48}\text{Ca}$ ,  ${}^{76}\text{Ge}$ ,  ${}^{82}\text{Se}$ ,  ${}^{96}\text{Zr}$ ,  ${}^{100}\text{Mo}$ ,  ${}^{116}\text{Cd}$ ,  ${}^{130}\text{Te}$ ,  ${}^{136}\text{Xe}$ ,  ${}^{150}\text{Nd}$ ...

# La double désintégration bêta sans émission de neutrinos

Mais si  $m_\nu \neq 0$  et si  $\nu = \bar{\nu}$  (neutrino de Majorana), alors la double désintégration bêta peut se produire sans émission de neutrinos :



(violation de la conservation du nombre leptonique :  $\Delta L = 2$ )

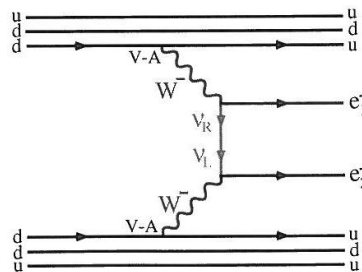
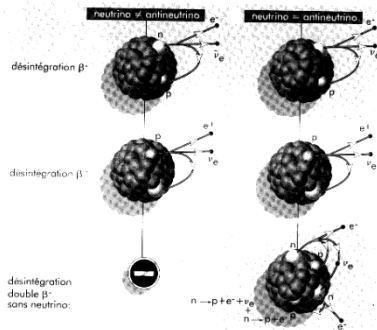


Fig. 2. Neutrinoless double beta decay scheme mediated by the exchange of a light Majorana neutrino interacting through the left-handed V-A weak currents.

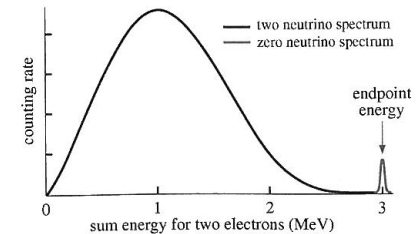
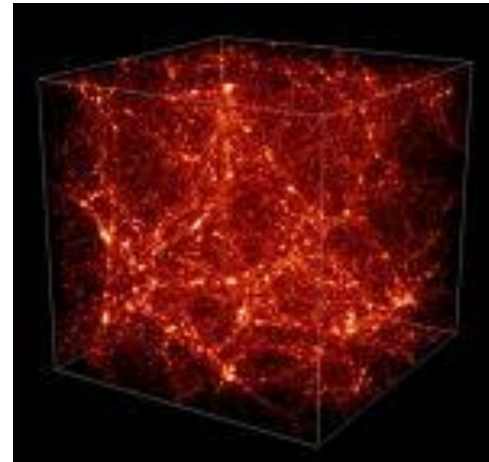
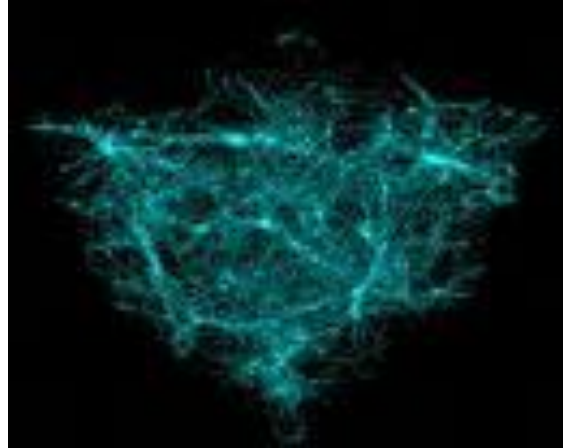


Fig. 1. Energy spectrum for the two electrons.

**De nombreuses expériences tentent de traquer ce phénomène : SUPERNEMO, CUORE, MOON, EXO, GERDA, MAJORANA... Elles donneront des indications sur la violation de CP, sur une éventuelle violation du nombre leptonique, et apporteront des contraintes dans la construction de modèles théoriques de type SUSY.**

# La matière « noire » (plus exactement transparente)

---





# Dilemme...

---



Deux voies de résolution :

— ou bien *on accepte de compléter l'ontologie de l'univers au nom de l'universalité de ses lois (en l'occurrence de celles de la gravitation)*

*Ou bien on remet en cause cette universalité pour éviter d'avoir à peupler l'univers de mystérieux fantômes.*

En d'autres termes, s'agit-il, pour la physique, d'une **crise législative** (de l'*exactitude* ou de l'*universalité* des lois) ou d'une **crise ontologique** (de la *complétude* de son mobilier)?

# L'exemple du « puzzle » de la radioactivité bêta

cea



neutron

