

Férmions de Majorana e a computação quântica – aula 1/3

Carlos Alberto dos Santos

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

UFERSA

cas.ufrgs@gmail.com

<http://pt.slideshare.net/casifufrgs/>

Ettore Majorana (1906-1938)

Majorana



Carlos Alberto dos Santos



https://www.livrariadafisica.com.br/detalhe_produto.aspx?id=155138&titulo=Majorana+-+o+oráculo+da+física+contemporânea

<https://www.amazon.com.br/stores/author/B001K6F2B0>

<https://www.estantevirtual.com.br/livro/majorana-o-oraculo-da-fisica-contemporanea-FU6-6703-000-BK>

<https://www.martinsfontespaulista.com.br/majorana---o-oraculo-da-fisica-contemporanea-1122229/p?srsId=AfmBOoqSX-XY21Nr6HPpCVtm12s6pC7-mhHRRdTd66cNHUHqSsLPqIOb>

Artigos em jornais e na RBEF

Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 46, e20240020 (2024)

www.scielo.br/rbef

DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0020>

História da Física e Ciências Afins



Licença Creative Commons

A presença de Majorana na física contemporânea

Majorana's presence in contemporary physics

Carlos Alberto dos Santos^{*1} 

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística,
Mossoró, RN, Brasil.

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/C7WD39q3vFKF6qmSQNHYqMH/?format=pdf&lang=pt>

Artigos em jornais e na RBEF

Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 46, e20240093 (2024)

www.scielo.br/rbef

DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0093>

História da Física e Ciências Afins



Licença Creative Commons

Majorana, Heisenberg, a interação de troca e o méson de Yukawa: o berço da interação forte

Majorana, Heisenberg, the exchange interaction and the Yukawa meson: the birthplace of the strong interaction

Carlos Alberto dos Santos^{*1} 

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística Mossoró, RN, Brasil.

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/Nhm5NGJ4VTbBxPvQPb5NDPD/?format=pdf&lang=pt>

Artigos em jornais e na RBEF

Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 47, suppl. 3, e20250253 (2025)

www.scielo.br/rbef

DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2025-0253>


Artigos Gerais



Licença Creative Commons

Férmions de Majorana e a computação quântica

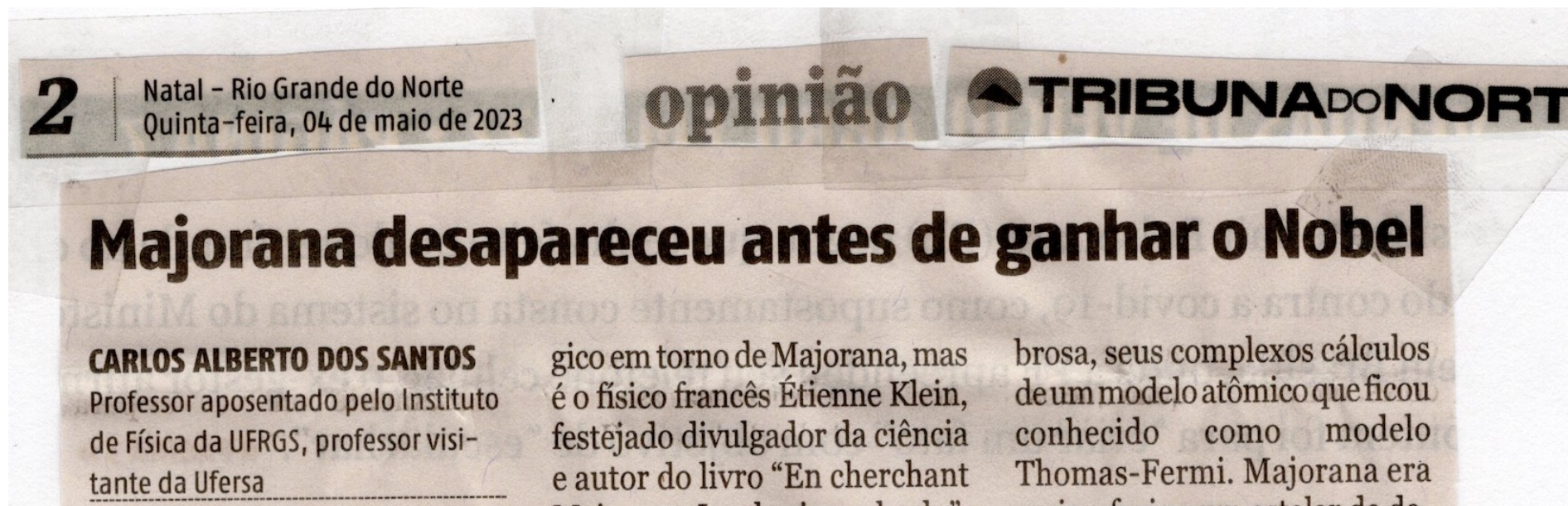
Majorana fermions and quantum computing

Carlos Alberto dos Santos^{*1} 

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 24 de junho de 2025. Aceito em 24 de junho de 2025.

Artigos em jornais e na RBEF



<https://tribunadonorte.com.br/colunas/artigos/majorana-desapareceu-antes-de-ganhar-o-nobel/>

Artigos em jornais e na RBEF



<https://tribunadonorte.com.br/colunas/artigos/majorana-desapareceu-antes-de-ganhar-o-nobel-parte-2/>

Artigos em jornais e na RBEF

O desaparecimento de Ettore Majorana: fatos e boatos

Carlos Alberto dos Santos, professor aposentado pelo Instituto de Física da UFRGS, relata os mistérios por trás do desaparecimento de Ettore Majorana, um dos mais instigantes personagens da história da física no século 20.

CARLOS ALBERTO DOS SANTOS / 2 DE OUTUBRO DE 2024 / CIÊNCIAS

<https://estadodaarte.estadao.com.br/ciencias/o-desaparecimento-de-ettore-majorana-fatos-e-boatos/>

Catânia, aos pés do vulcão Etnea

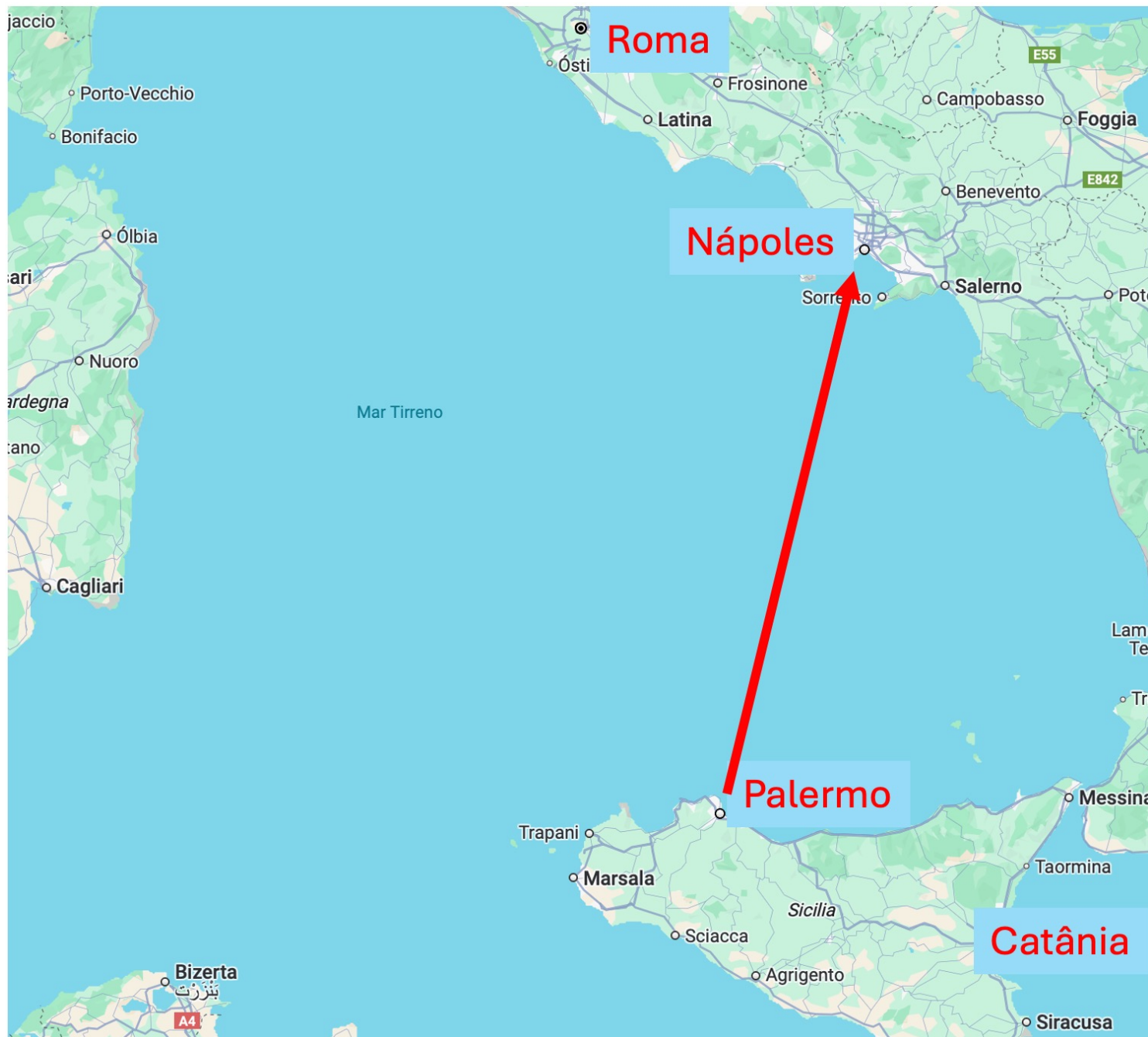


5 de agosto de 1906

Via Etnea, por volta de 1910.

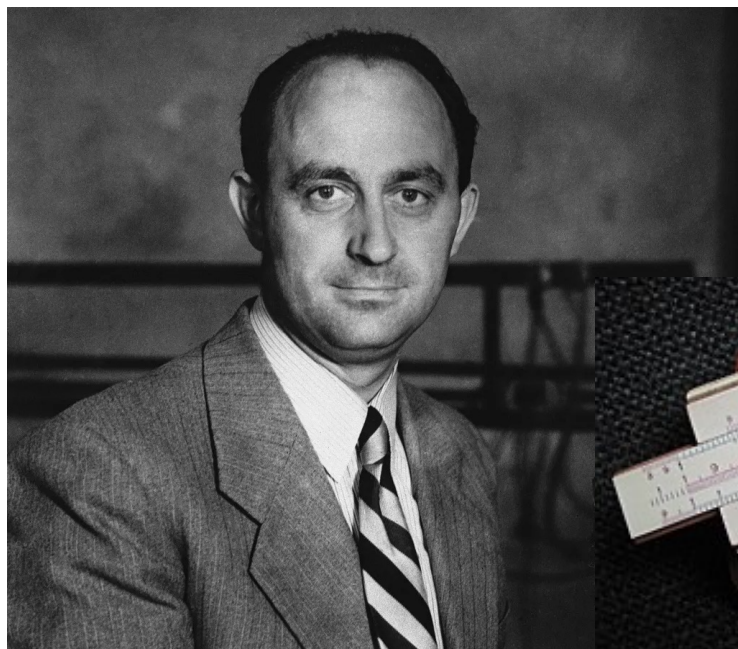
Fonte:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tram_in_via_Etnea_a_Catania.jpg



Menino precoce, jovem genial

As habilidades matemáticas de Ettore foram notadas já na infância, quando ele realizava, mentalmente, multiplicação de números com três algarismos, e sabia calcular raiz quadrada e raiz cúbica



$$\int_0^{10} (4 - 2t + 6t^2) dt$$





*17 anos, grande consultor
para os problemas difíceis*

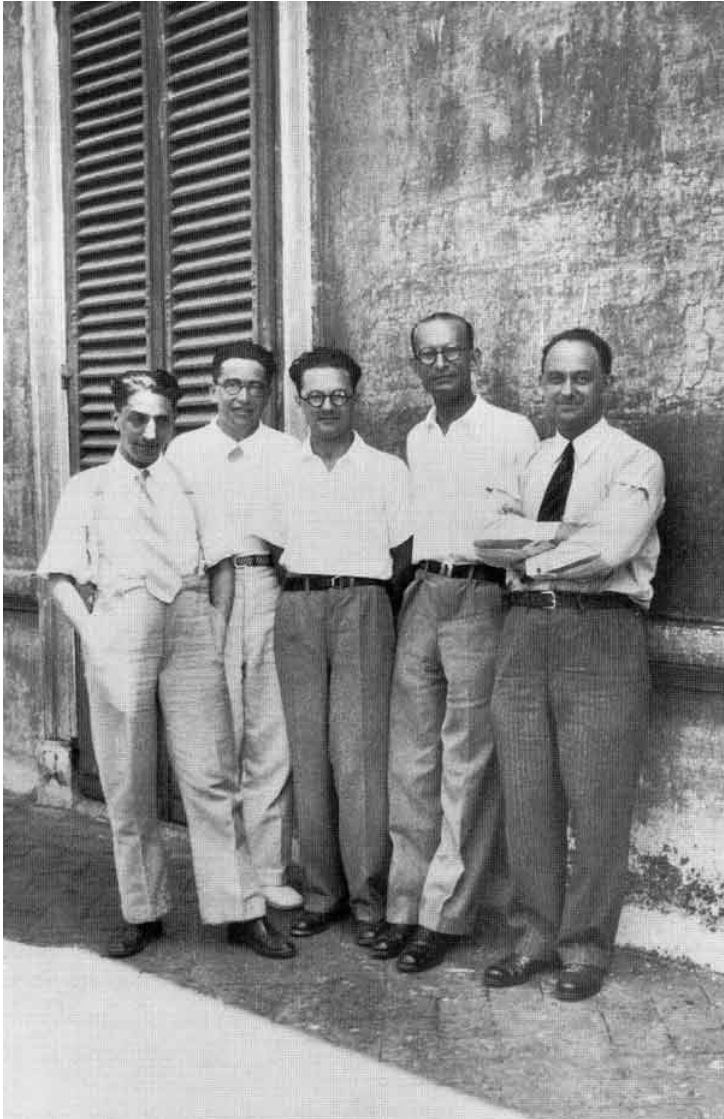
*Detestava os
professores,
excetuando o
matemático Tullio
Levi-Civita, que
inventou o cálculo
tensorial, com seu
orientador Gregorio
Ricci. Tiveram
participação no
desenvolvimento da
teoria da relatividade
geral*

Na via Panisperna, aos 22 anos



Instituto de Física da Universidade de Roma, por volta de 1930. Fonte:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regio_Istituto_di_Fisica_Esterno.png.

Os rapazes da via Panisperna



*A partir da esquerda: Oscar D'Agostino, **Emilio Segrè**, **Edoardo Amaldi**, Franco Rasetti e **Enrico Fermi**.*

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ragazzi_di_via_Panisperna_cropped.jpg.

O modelo de Thomas-Fermi

Introduzida em 1927 por Thomas, e em 1928 por Fermi serve para calcular distribuições de elétrons e campos em átomos pesados.

$$\begin{aligned} t(\mathbf{r}) &= \int \frac{p^2}{2m_e} n(\mathbf{r}) F_{\mathbf{r}}(p) dp \\ &= n(\mathbf{r}) \int_0^{p_f(\mathbf{r})} \frac{p^2}{2m_e} \frac{4\pi p^2}{\frac{4}{3}\pi p_F^3(\mathbf{r})} dp \\ &= C_{\text{kin}} [n(\mathbf{r})]^{5/3} \end{aligned}$$

Tese: 6 de julho de 1929

Sulla meccanica dei nuclei radioattivi

Primeiro trabalho na Itália que aplicou a teoria quântica ao estudo dos núcleos radioativos

1928 - 1937

- 1) Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen e ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio ([em colaboração com G. Gentile junior](#)). **Rendiconti Accademia Lincei**, 8, pp. 229-233 (1928).
- 2) Sulla formazione dello ione molecolare di He, **Nuovo Cimento**, 8, pp. 22-28 (1931).
- 3) I presunti termini anomali dell'Elio, **Nuovo Cimento**, 8, pp. 78-83 (1931).
- 4) Reazione pseudopolare fra atomi di idrogeno, **Rendiconti Accademia Lincei**, 13, pp. 58-61 (1931).
- 5) Teoria dei tripletti P' incompleti, **Nuovo Cimento**, 8, pp. 107-113 (1931).

1928 - 1937

- 6) Atomi orientati in campo magnetico variabile, **Nuovo Cimento**, 9, pp. 43-50 (1932).
- 7) Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario, **Nuovo Cimento**, 9, pp. 335-344 (1932).
- 8) Über die Kerntheorie, **Zeitschrift für Physik**, 82, pp. 137-145 (1933).
- 9) Sulla teoria dei nuclei, **La Ricerca Scientifica**", 4 (I), pp. 559-565 (1933).
- 10) Teoria simmetrica dell'elettrone e del protone, **Nuovo Cimento**, 14, pp. 171-184 (1937).

Início de 1937, concurso para as universidades de Palermo, Pisa e Milão

16 de novembro de
1937, Majorana é
nomeado para uma
cátedra criada para ele
na Universidade de
Nápoles

13 de janeiro de 1938,
primeira aula de
Majorana na
Universidade de
Nápoles

24 de março de 1938,
última aula de
Majorana na
Universidade de
Nápoles

Sexta-feira, 25 de março de 1938

Mamãe, só tenho um desejo: que você não se vista de preto. Se quiser se curvar ao uso, leve, mas por não mais que três dias, algum sinal de luto. Lembrem-se de mim, se puderem, em seus corações e me perdoem. Afetuosamente, Ettore.

Sexta-feira, 25 de março de 1938

Caro Carrelli, tomei uma decisão que agora é inevitável. Não há um único grão de egoísmo nisso, mas estou ciente dos problemas que meu súbito desaparecimento pode causar para você e para os alunos. (...) Por favor, lembre-se também daqueles que aprendi a conhecer e apreciar em seu instituto, especialmente Sciuti, de quem guardarei boas lembranças pelo menos até as onze da noite, e possivelmente até depois. – E. Majorana.

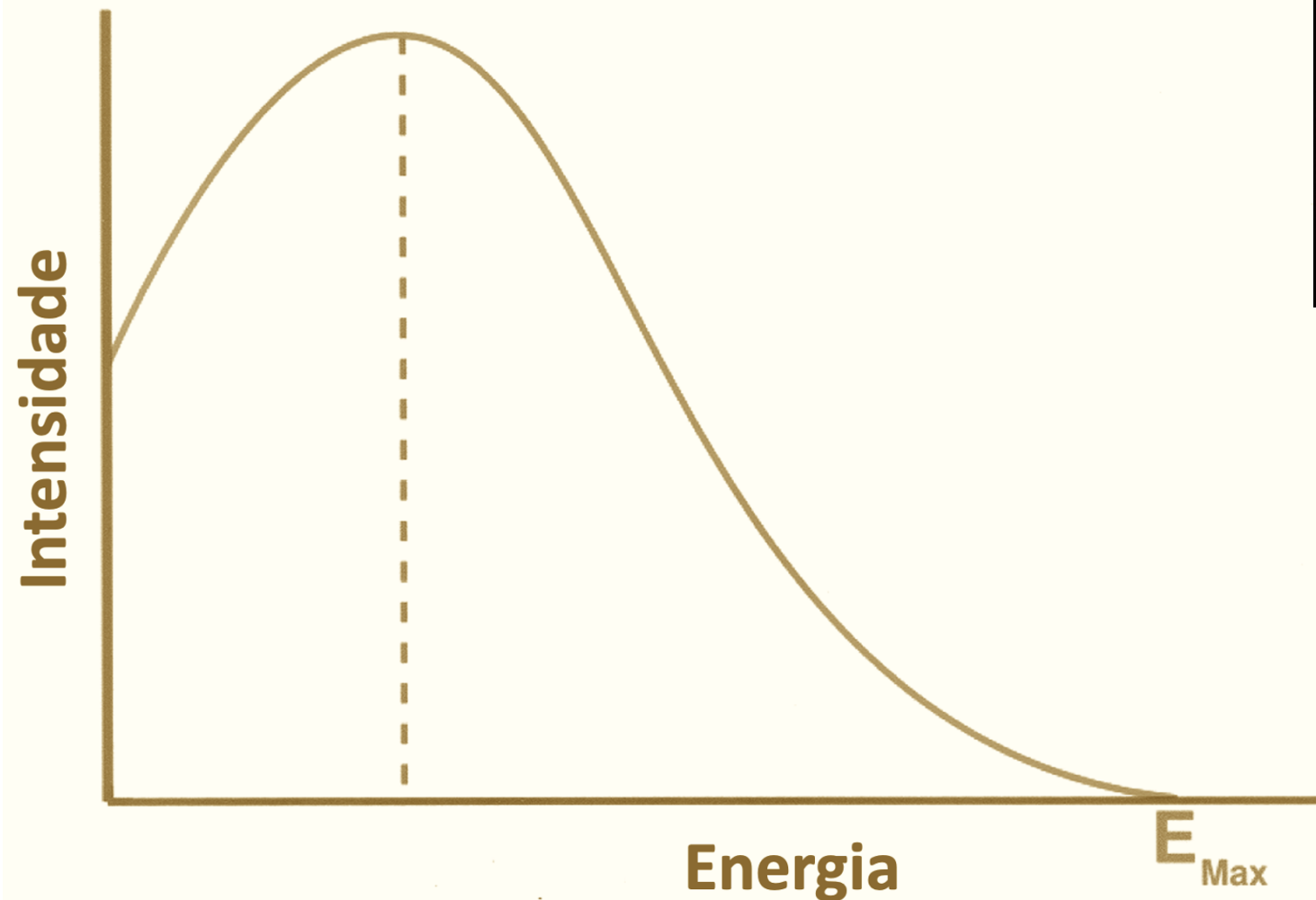
Sábado, 26 de março de 1938

Caro Carrelli, espero que o telegrama e a carta tenham chegado juntos. O mar rejeitou-me e voltarei amanhã ao hotel Bolonha [em Nápoles], talvez viajando com esta mesma folha. No entanto, pretendo desistir de lecionar. (...). Estou à sua disposição para maiores detalhes. Carinhosamente, E. Majorana.

Domingo, 27 de março de 1938

O *Postale* sai de Palermo à noite com destino a Nápoles, onde deverá chegar às 5h45 da manhã de segunda-feira. Majorana compra um assento em uma cabine. Tudo sugere que Ettore quer voltar a Nápoles. Em vez disso, durante a viagem ou imediatamente depois (ou imediatamente antes), ele desaparece.

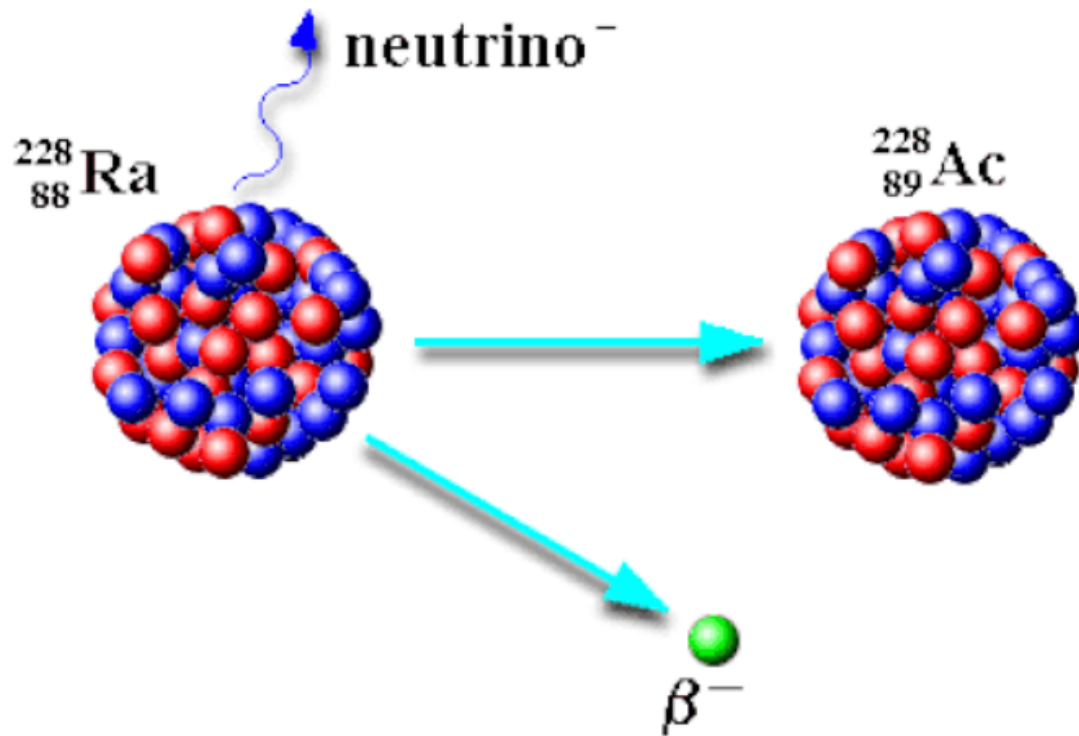
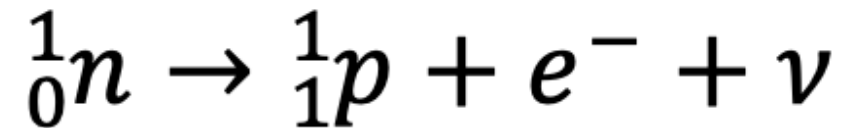
Como o neutrino entrou na vida de Majorana



$$E=mc^2$$

Espectro típico observado no decaimento beta. Adaptado de
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Beta_Ray_Spectrum.PNG>

1930: Wolfgang Pauli propõe a existência do neutrino



[Betazerfall von Radium-228 zu Actinium.gif](#)

Fermi, o neutrino e a interação fraca

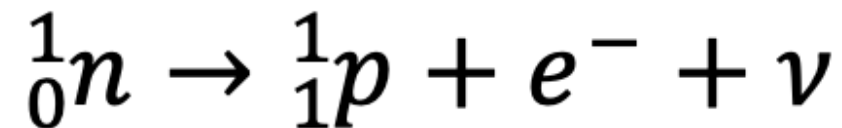
IL NUOVO CIMENTO

NUOVA SERIE N. 1, PAG. 1–20

Anno XI - 1934

An attempt to a β rays theory

NOTA DI ENRICO FERMI

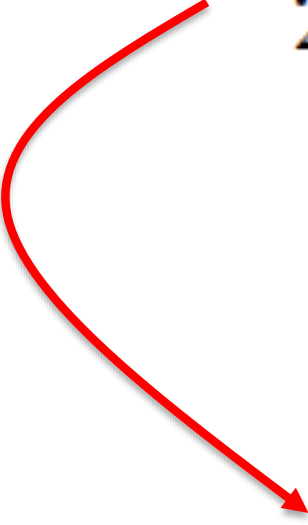


Majorana chega ao neutrino por outro caminho: Dirac

Teoria quântica não relativística: Schrödinger

$$-\frac{1}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = i\frac{\partial\psi}{\partial t},$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$


$$\frac{p^2}{2m} + V = E, \quad p \rightarrow -i\nabla; E \rightarrow i\frac{\partial}{\partial t}.$$

Majorana chega ao neutrino por outro caminho: Dirac

Teoria quântica relativística: Dirac

$$E^2 - p^2 - m^2 = 0 \quad (\text{fazendo } \hbar = c = 1)$$

$$-\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + \nabla^2 \Psi - m^2 = 0.$$

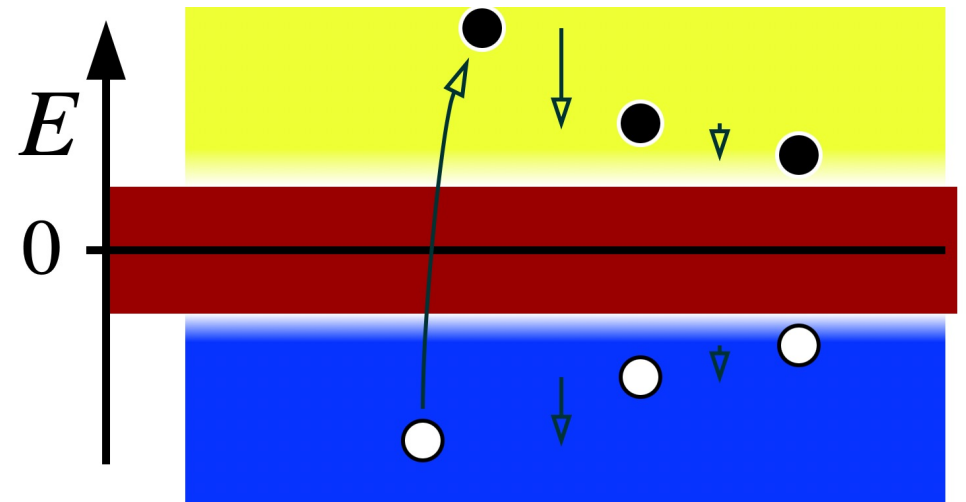
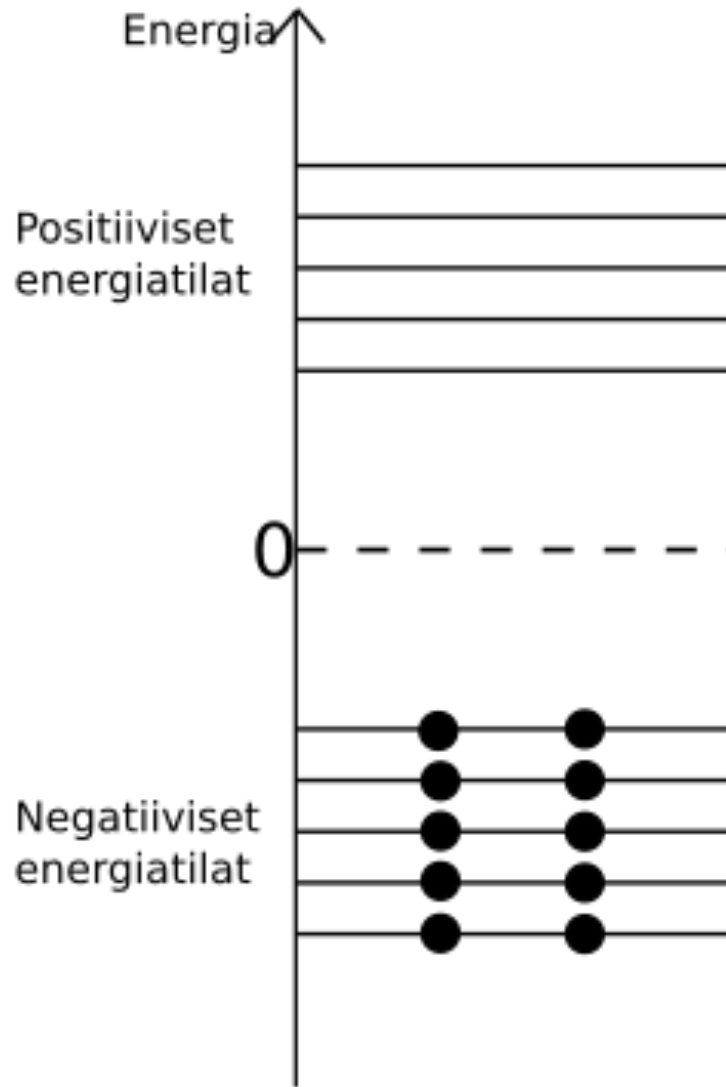
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Dirac: elétron (energia positiva) e pósitron (energia negativa)

A teoria quântica relativística de um elétron em movimento em um dado campo eletromagnético, embora bem-sucedida na previsão das propriedades de **spin do elétron**, apresenta uma **séria dificuldade** que demonstra que alguma alteração fundamental é necessária antes que possamos considerá-la uma descrição precisa da natureza. Essa dificuldade está relacionada ao fato de que a equação de onda tem, além das soluções desejadas para as quais a energia cinética do elétron é positiva, um número igual de soluções indesejadas com energia cinética negativa para o elétron, que parecem não ter significado físico.

P.A.M. Dirac, Proc. R. Soc. Lond. A 126, 360 (1930)

Dirac: elétron (energia positiva) e pósitron (energia negativa)



Majorana X Dirac

A SYMMETRIC THEORY OF ELECTRONS AND POSITRONS

Note by Ettore Majorana

Translated from Italian by Luciano Maiani* 'Il Nuovo Cimento' 14 (1937) 171–184

Majorana começou a trabalhar no assunto em 1932.

1933 – 1936: recluso.

1937: concurso nacional

artigo

Majorana X Dirac

No caso de elétrons e pósitrons, podemos antecipar apenas um progresso formal; mas consideramos importante, para possíveis extensões por analogia, que a própria noção de estados de energia negativa possa ser evitada. Vemos, de fato, que é perfeitamente possível, e da maneira mais natural, formular uma teoria de partículas neutras elementares que não possuem estados (de energia) negativos.

Majorana X Dirac

$$(i\bar{\gamma}^{\mu}\partial_{\mu} - m)\bar{\psi} = 0$$

$\bar{\gamma}^{\mu}$ Imaginários

$i\bar{\gamma}^{\mu}$ reais

Majorana X Dirac

$$\begin{aligned}\bar{\gamma}^0 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \bar{\gamma}^2 &= \begin{pmatrix} i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i \end{pmatrix} \\ \bar{\gamma}^1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \end{pmatrix} & \bar{\gamma}^3 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

Majorana começou com
partículas neutras e chegou
na “equação de Dirac”

Partículas = Antipartículas

Férmions de Majorana =
Antiférmions de Majorana



Como os
férmions de
Majorana
chegam ao
chip de
computação
quântica da
Microsoft

