

# **“Neutrinos, 90 Anos: da carta de Pauli às oscilações”**

**UFPA – MNPEF, Polo\_37 – SET\_2020**

## **Os papers que assinalaram a descoberta das primeiras partículas sub-atómicas.**

**Descoberta do elétron,**

**J. J. Thomson**

Phil. Mag. Series 5, **Vol. 44, Issue 269** (1897) 293

“Cathode Rays”;

**Descoberta do núcleo atómico,**

**E. Rutherford**

Phil. Mag. Series 6, **Vol. 21, Issue 125** (1911) 669

“The scattering of  $\alpha$ - and  $\beta$ -particles and the structure of the atom”;

**Descoberta do próton,**

**E. Rutherford**

Proc. Roy. Soc. **A97** (1920) 374

“Nuclear constitution of atoms”;

**Identificação dos quanta de luz como partículas (fótons):**

**A.H. Compton**

“A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements”

Phys. Rev. **21, No. 5** (1923) 483;

**Descoberta do pósitron:**

**C. D. Anderson**

“The Positive Electron”

Phys. Rev. **43** (1933) 491;

**Descoberta do nêutron:**

**J. Chadwick**

Nature 129 (1932) 312

“Possible existence of a neutron”;

**Descoberta do múon:**

**S. H. Neddermeyer and C. D. Anderson**

Phys. Rev. 51 (1937) 884

“Notes on the nature of cosmic-ray particles”;

**Previsão da existências dos mésons- $\pi$ :**

**I.G. Tamm**

“Exchange forces between neutrons and protons and Fermi’s theory”,

Nature 133 (3374) (1934) 981;

**I.G. Tamm**

“Interaction of neutrons and protons”,

Nature 134 (3400) (1934) 1010.

**H. Yukawa**

“On the interaction of elementar particles”

Proc. Phys. Math. Soc. Jap. 17 (1935) 48

and Progress of Theoretical Physics Supplement, Volume 1 (1955) 1.

**Descoberta dos mésons- $\pi$  e sua posterior produção em laboratório:**

**C. M. G. Lattes, M. Muirhead, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell**

“Processes involving charged mesons”,

Nature 159 (1947) 694.

**E. Gardner and C. M. G. Lattes**

“Production of mesons by the 184-inch Berkeley cyclotron”

Science 107 (Issue 2776) (1948) 270

**Os 3 papers que assinalaram a detecção direta de anti-matéria:**

**C. D. Anderson**

“The Positive Electron”

Phys. Rev. 43 (1933) 491.

**O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand e T. Ypsilantis**  
"Observation of Antiprotons"  
Phys. Rev. **100** (1955) 947.

**B. Cork et al.**  
"Antineutrons produced from antiprotons in charge-exchange collisions"  
Phys. Rev. **104** (1956) 1193.

---

## A saga dos NUs e a longa jornada da Teoria Eletrofraca

- Fluxo de NUs na Terra:  $5 \times 10^{13}$  NU cm $^{-2}$  s $^{-1}$
- Energias entre 400 keV e 18 MeV
- Velocidades na faixa dos 99.9995% c
- 85% destes NUs são produzidos na reação  
 $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$
- Os outros 15% na reação  
 $Be^7(4p,3n) + e^- \rightarrow Li^7(3p,4n) + \nu_e$
- NUs: solares, atmosféricos, cósmicos, geoneutrinos
- Podemos destacar 4 fases:
  - A fase pré-histórica (1896 – 1929)
  - A fase histórica (1930 – 1956)
  - A fase de NUs no Modelo-Padrão (1957 – 1997)
  - A fase de NUs além do Modelo-Padrão (1998 - .....

### **1896 – Henri Becquerel**

“Sur les radiations émises par phosphorescence”

“Sur les radiations émises par les corps phosphorescents”

Comptes-Rendus de l’Académie des Sciences **122** (1896) p.420 et p.501.

### **1907 – 1914 – O. Hahn, L. Meitner, O. von Baeyer, W. Wilson e J. Chadwick**

Uma série de trabalhos independentes discutindo o espectro de energia dos elétrons emitidos nos processos de decaimento- $\beta$ . O debate persiste sem que haja um consenso se estes elétrons eram ou não monoenergéticos.

### **1914 – J. Chadwick**

“Intensity distribution in the magnetic spectrum of the beta-radiation of Radium B + C”

Verhandlungen der deutschen Physikalischen Gesellschaft **16** (1914) 383.

**1927 – C. D. Ellis e W. A. Wooster** concluem, em suas investigações iniciadas em 1920, que o espectro de elétrons emitidos no decaimento- $\beta$  é realmente contínuo.

“The average distribution of disintegration of Radium-E”

Proc. Roy. Soc. London, PRSL **A117** (1927) 109.

### **1927 – P. A. M. Dirac**

“The quantum theory of the emission and absorption of radiation”,

Proc. Roy. Soc. London (PRSL) **A114** (1927) 243.

**1928** – Os 2 trabalhos de lançamento da Equação de Dirac:

“The quantum theory of the electron”, PRSL **A117** (1928) 610.

“The quantum theory of the electron – Part II”, PRSL **A118** (1928) 351.

### **1929 – H. Weyl**

“Elektron und gravitation”, Zeit. f. Phys. **56** (1929) 330.

# A era das Interações Fracas: do decaimento- $\beta$ à Teoria Eletrofraca

**4 DEZ 1930** – Com base nos resultados de Chadwick (1914) e Ellis-Wooster (1927), **W. Pauli** escreve a sua histórica carta propondo a existência dos **neutrinos**, que, à época, ele chamou de nêutrons. Será Enrico Fermi, em 1933, a rebatizar o nêutron de Pauli como neutrino.

**1930 – P. A. M. Dirac**  
“The proton”  
Nature **126** (1930) 605.

**1930 – P. A. M. Dirac**  
“A theory of electrons and protons”  
PRSL **A126** (1930) 360.  
(*O trabalho foi submetido em 6 DEZ 1929 e introduz os conceitos de vácuo quântico e a chamada “hole interpretation”.*)

**1930 – E. Fermi**  
“Sopra l’Elettrodinamica Quantistica”  
Atti della Reale Accademia Nazionale dei Lincei, **Vol. 12** (1930) 431.

**1930 – E. Fermi**  
“Quantum Theory of Radiation”  
Rev. Mod. Phys. **4** (1932) 87.

**1931 – P. Dirac**  
“Quantised singularities in the electromagnetic field”  
PRSL **A133** (1931) 60.

**1932 – Descoberta do pósitron e do nêutron.**

**C. D. Anderson**  
“The apparent existence of easily deflectable positives”  
Science **76** (1932) 238.

**J. Chadwick**  
“Possible existence of a neutron”  
Nature **129** (1932) 312.

**1932** – Tem início a Física de Aceleradores.

**E. Lawrence** e seu estudante **M. S. Livingston** constroem o primeiro ciclotron, de 4.8 MeV, na Universidade de Berkeley.

**G. Gamov** e **L. Mysovskii** propõem o ciclotron de Leningrado em 1932, mas este só se torna operativo a partir de 1937.

**1933** – **E. Fermi** introduz a idéia de **interação fraca**, em associação ao processo de decaimento-beta do nêutron, já levando em conta o recém-postulado **neutrino**, partícula introduzida por Pauli em **1930** (e só descoberta experimentalmente em **1956** por **Cowan, Reines** e colaboradores, com resultado publicado pela **Science**.)

“Tentativo di uma Teoria dell’Emissione dei Raggi-Beta”  
Ricerca Scientifica **4** (2) (1933) 491,  
Il Nuovo Cim. **11** (1934) 1.

**1933 – F. Perrin**

“Possibilité d’émission de particules neutres de masse intrinsèque nulles

dans les radioactivités-beta”

Comptes-Rendus **197** (1933) 1625.

**1934 – H. Bethe e R. Peierls**

“The Neutrino”

Nature **133** (1934) 532.

**1934 – J. Chadwick and D. E. Lea**

“Attempt to detect a neutral particle of small mass”

Proc. Cambridge Phil. Soc. **30** (1934) 59.

**1934 – 1935 – Tamm e Yukawa** preveem a existência dos mésons- $\pi$ , que eles denominam mésotrons.

**I.G. Tamm**

“Exchange forces between neutrons and protons and Fermi’s theory”,  
Nature **133** (3374) (1934) 981;

“Interaction of neutrons and protons”,  
Nature **134** (3400) (1934) 1010.

**H. Yukawa**

“On the interaction of elementar particles”  
Proc. Phys. Math. Soc. Jap. **17** (1935) 48  
and Progress of Theoretical Physics Supplement, Volume **1** (1955) 1.

**1935 – W. J. Henderson**

“The mass of the neutrino”  
Proc. Cambridge Phil. Soc. **31** (1935) 285.

**1935 – M. E. Nahmias**

“An attempt to detect the neutrino”  
Proc. Cambridge Phil. Soc. **31** (1935) 99.

**1935 – M. Goeppert-Mayer**

“Double-beta disintegration”  
Phys. Rev. **48** (1935) 512.

**1936 – Anderson e Neddermeyer** descobrem os mûons.

“Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles”,  
S. H. Neddermeyer and C. D. Anderson  
Phys. Rev. **51** (1937) 834.

**1937 – É introduzida a proposta dos férmons de Majorana.**

“A symmetric theory of electrons and positrons”

**E. Majorana**

Il Nuovo Cim. **14** (1937) 171.

**1937 – G. Racah.**

“Sulla simmetria tra particelle e antiparticelle”  
Il Nuovo Cim. **14** (1937) 322.

**1938 – H. R. Crane and J. Halpern**

“The experimental evidence for the existence of a neutrino”  
Phys. Rev. **53** (1938) 789.

**1940 – G. Gamov and M. Schoenberg**

“The possible role of neutrinos in stellar evolution”  
Phys. Rev. **58** (1940) 1117.

**1940 – G. Gamov and M. Schoenberg**

“Neutrino theory of stellar collapse”  
Phys. Rev. **59** (1941) 539.

**1942 – J. S. Allen**

“Experimental evidence for the existence of a neutrino”  
Phys. Rev. **61** (1942) 692.

**1946 – B. Pontecorvo**

“Inverse beta-process”

Report PD-225 of the National Research Council of Canada,  
Division of Atomic Energy, Chalk River, Ontario, NOV 13, 1946.  
**Este Report pode ser encontrado em “B. Pontecorvo: Selected  
Scientific Works”, p.21.**

**1947 – E. Fireman**

“Double-beta decay”  
Phys. Rev. **74** (1948) 1238.

**1947 – E. J. Konopinsky**

“ $^3\text{H}$  and the mass of the neutrino”  
Phys. Rev. **72** (1947) 518.

**1947 – B. Pontecorvo** propõe um método experimental para a detecção dos neutrinos:

“Nuclear capture of mesons and the meson decay”  
Phys. Rev. **72** (1947) 246.

**1947 – Descoberta dos mésons- $\pi$ .**

**C. M. G. Lattes, M. Muirhead, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell,**  
“Processes involving charged mesons”,  
Nature **159** (1947) 694.

**1948 – Produção de mésons- $\pi$  no ciclotron de Berkeley.**

**E. Gardner and C. M. G. Lattes**  
“Production of mesons by the 184-inch Berkeley cyclotron”  
Science **107** (Issue 2776) (1948) 270.

**1948 – Discussão da universalidade dos decaimentos fracos ( $e^-$ ,  $\mu^-$ )**  
“Sui mesoni dei raggi cosmici”  
G. Puppi, Il Nuovo Cim. **5** (1948) 587.

“Mesons and nucleons”  
O. Klein, Nature **161** (1948) 897.

**1948 – J. S. Allen**  
“The search for the neutrino through nuclear recoil experiments”  
Am. J. Phys. **16** (1948) 251.

**1948 – G. Gamow**  
“The reality of neutrinos”  
Phys. Rev. **1, 3, 4** (1948).

**1949 – L. W. Alvarez**  
“A proposed experimental test of the Neutrino Theory”  
UCRL Report **328** (1949).

**1950 - P. Dirac**

“A New Meaning of Gauge Transformations in Electrodynamics”  
Il Nuovo Cim. **7, no. 9** (1950) 925.

**1950 – C. N. Yang e J. Tiomno**

“Reflection properties of spin- $\frac{1}{2}$  fields and a universal Fermi-type interaction”  
Phys. Rev. **79** (1950) 495.

**1951 – P. Mathews and A. Salam**

(*auto-acoplamento de escalares carregados*)

“The renormalization of meson theories”

Rev. Mod. Phys. **23** (1951) 311.

**1952 – Dirac**

“Les Transformations de Jauge en Électrodynamique”

Ann. Inst. H. Poincaré **13, no. 1** (1952) 1.

**1952 – L. M. Langer and R. J. D. Moffat**

“The beta-spectrum of tritium and the mass of the neutrino”

Phys. Rev. **88** (1952) 689.

**1953 – D. R. Hamilton, W. P. Alford and L. Gross**

“Upper limit on the neutrino mass from the tritium beta-spectrum”

Phys. Rev. **92** (1953) 1521.

**1953 – F. Reines and C. L. Cowan**

“Detection of the free neutrino”

Phys. Rev. **92** (1953) 930.

**1954 – C. N. Yang e R. Mills**

“Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance”

Phys. Rev. **96** (1954) 191.

**1956 – F. Reines and C. L. Cowan et al.**

“Detection of the free neutrino: a confirmation.”

Science 124 (1956) 103.

**1956 – T. D. Lee and C. N. Yang**

“Question of parity conservation in weak interactions”

Phys. Rev. **104** (1956) 254.

**1956 – F. Reines and Clyde Cowan Jr.**

“The neutrino”

Nature **178** (1956) 446.

**1956** – Conferência de Seattle: **Int'l Congress on Theoretical Physics**,  
Seattle, 1956.

O grande resultado anunciado (**Lee e Yang**) foi a **violação da paridade nas interações fracas**, o que teve grande impacto sobre o **Salam**, que o utilizou para reavaliar o paper de Yang-Mills de 1954 e o levou também a propor a idéia de **simetria quiral**. Lee e Yang propõem a **violação da paridade** em **trabalho teórico**, baseando-se na análise dos dados experimentais sobre os decaimentos fracos até então conhecidos. Em seu trabalho teórico, propõem experimentos que poderiam fazer a verificação experimental direta da violação de paridade. (Em **1956** mesmo, **Mme. Wu** verifica experimentalmente a violação de paridade a partir destas propostas.)

**T. D. Lee and C. N. Yang**

“Question of parity conservation in weak interactions”

Phys. Rev. **104** (1956) 254

**C. S. Wu et al.**

“Experimental test of parity conservation in beta-decay”

Phys. Rev. **105** (1957) 1413.

**Feynman** estava presente nesta Conferência, onde se discutiu muito também sobre uma possível formulação teórica-de-campos para a **supercondutividade**. Tornou-se conhecida a afirmação de Feynman nesta Conferência:

**“The only reason that we cannot do this problem of superconductivity is that we haven’t got enough imagination”.**

**1956 - Descoberta experimental do neutrino**, por **Cowan, Reines** e colaboradores, o que lhes confere o **Nobel de 1995**, 39 anos após a grande descoberta. Este resultado encontra-se publicado na **Science** de 20 de Julho de 1956.

**F. Reines and C. L. Cowan**

“The Neutrino”

Nature **178** (1956) 446.

**1957** – Após a Conferência de Seattle, **Salam** introduz o conceito de **quiralidade**, estimulado pela proposta de Lee e Yang, associando a massa nula do neutrino à invariância quiral, proposta fortemente atacada por Pauli em carta ao Prof. Salam:

“On Parity Conservation and Neutrino Mass”

Il Nuovo Cim. Ser.**10, Vol. 5** (1957) 299.

**1957 – B. Pontecorvo**

“Inverse beta-processes and non-conservation of lepton charge”

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **34** (1957) 247 e Sov. Phys. JETP **7** (1958) 172.

Neste trabalho são propostas as oscilações de sabores - antes mesmo da da segunda família aparecer – descobertas em 1998.

**1957 – C. L. Cowan and F. Reines**

“Test of neutrino-antineutrino identity”

Phys. Rev. **106** (1957) 825.

**1957 – T. D. Lee and C. N. Yang**

“Parity non-conservation and a two-component theory of the neutrino”

Phys. Rev. **105** (1957) 1671.

**1957 – L. Landau**

“On the conservation laws for weak interactions”

Nucl. Phys. **3** (1957) 127.

**1957, 1958 – Sudarshan/Marshak e Feynman/Gell-Mann:** proposta da estrutura (V-A) para a correntes fracas.

“The Nature of the Four-Fermion Interaction”: este foi realmente o primeiro paper sobre a estrutura (V-A), apresentado por Sudarshan e Marshak na Conferência de Padova-Venezia (Setembro/1957): Proc. of the Conference on Mesons and Newly-Discovered Particles in Padua-Venice, Ed. N. Zanichelli. Estes resultados haviam sido apresentados a Feynman e Gell-Mann em Junho/1957, cujo paper é de 1958.

Phys. Rev. **109** (1958) 1860

**E. C. G. Sudarshan e R. Marshak**

“Chirality Invariance and the Universal Fermi Interaction”.

Phys. Rev. **109** (1958) 193

**R. Feynman e M. Gell-Mann**

“Theory of the Fermi Interaction”.

**1958 – P. W. Anderson**

“Random-Phase Approximation in the Theory of Superconductivity”

Phys. Rev. **112** (1958) 1900

O Prof. Salam apontava que, neste paper, Anderson percebe o mecanismo de Higgs, chamando a atenção para o fato de que os bósons de Goldstone desaparecem no modelo-BCS devido à presença da interação Coulombiana, que é de longo alcance (essencialmente, a presença de um campo de gauge, ou seja, de uma simetria local).

**1958 – O trabalho do Prof. J. Leite Lopes**

“A model of the universal Fermi interaction”

Nucl. Phys. **8** (1958) 234.

**1958 – M. Goldhaber, L. Grodzins and A. Sunyar**

“Helicity of neutrinos”

Phys. Rev. **109** (1958) 1015.

**1959 – B. Pontecorvo**

“The universal Fermi interaction and astrophysics”

J. Exp. Theor. Phys. **36** (1959) 1615.

**1959 – B. Pontecorvo**

“Electron and muon neutrinos”

J. Exp. Theor. Phys. (JETP) **37** (1959) 1751.

**1960 – T. D. Lee and C. N. Yang**

“Theoretical discussions of possible high-energy neutrino experiments”

Phys. Rev. Lett. **4** (1960) 307.

**1961 – Salam e Ward**

“On a Gauge Theory of Elementary Interactions”

Il Nuovo Cim. **19** (1961) 165.

**1961 – Glashow e Gell-Mann**

“Gauge Theories and Vector Particles”

Ann. Phys. **15** (1961) 437.

**1961 – Glashow**

“Partial-Symmetries of Weak Interactions”

Nucl. Phys. **22** (1961) 579. (Paper que o indica ao **Nobel de 1979**).

**1961 – M. Markov and I. Zheleznykh**

“On high-energy neutrino physics in cosmic rays”

Nucl. Phys. **27** (1961) 385.

**1961 – B. Pontecorvo and Ya. Smorodinskii**

“The neutrino and the density matter in the Universe”

J. Exp. Theor. Phys. **41** (1961) 239.

**1962 – G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin**

“Neutrino production in the atmosphere”

Sov. Phys. JETP **14** (1962) 1294.

**1962** – Descoberta experimental da 2' da família de neutrinos – o **neutrino do mûon** – por **Lederman, Schwarz e Steinberger** (por este resultado, recebem o **Nobel de 1988**). Antes desta descoberta, já se supunha a existência do neutrino do mûon, ao qual se referia na época como **neutretto**:

**L. Lederman et al.**

“Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos”

Phys. Rev. Lett. **9 (1)** (1962) 36.

**1963** – **Cabibbo**: propõe o mixing do quark-s com o quark-d (family mixing, mecanismo-base para o problema da CP-violation)

“Unitary Symmetry and Lepton Decays”

Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531.

**1964 – R. Davis Jr.**

“Solar neutrinos. II. Experimental”

Phys. Rev. Lett. **12** (1964) 303 .

**1964 – Proc. XXXII International School of Physics “Enrico Fermi”**

**“Weak interactions and high-energy neutrino physics”**

Varenna sul Lago di Como, June 1964

Published by Academic Press, 1966.

**1964 – J. N. Bahcall**

“Solar neutrinos. I. Theoretical”

Phys. Rev. Lett. **12** (1964) 300.

**1964 – A. Salam e J. C. Ward**

“Electromagnetic and Weak Interactions”

Phys. Lett. **13** (1964) 168.

**1964 – Cronin e Fitch** descobrem experimentalmente violação de CP nos decaimentos fracos dos káons neutros, resultado que anunciam em Dubna, na **12th ICHEP**. Por este resultado de grande impacto, recebem o **Nobel de 1980**. Este resultado experimental foi crucial para o trabalho posterior (**1973**) de **Kobayashi e Maskawa**, que, adotando a Teoria Eletrofraca de Salam, Glashow e Weinberg, observam que, para acomodar a violação de CP, é preciso introduzir uma 3'ra geração de quarks. Com esta previsão, verificada posteriormente com a descoberta dos quarks b e t, recebem o **Nobel de 2008**.

**J. W. Cronin et al.**

“Evidence for the  $2\pi$ -decay of the  $K_2^0$ -meson”  
Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 138.

**1964 – Gell-Mann e Zweig** introduzem, independentemente, o modelo-SU(3) de quarks:

**M. Gell-Mann**

“A schematic model of baryons and mesons”  
Phys. Lett. **8, No. 3** (1964) 214 (paper que indica Gell-Mann para o **Nobel de 1969**).

**G. Zweig**

“An SU(3) model for strong interactions symmetry and its breaking”  
CERN preprint 8182 – TH. 401, 17 JAN 1964 (**paper não aceito para publicação**).

**1965 – F. Reines and A. R. Woods**

“New approach of the detection of solar neutrinos via inverse beta-decay”  
Phys. Rev. Lett. **14** (1965) 20.

**1965 – F. Reines et al.**

“Evidence for high-energy cosmic ray neutrino interactions”  
Phys. Rev. Lett. **15** (1965) 429.

**1966 – J. N. Bahcall**

“Solar neutrinos”  
Phys. Rev. Lett. **17** (1966) 398.

**1966 – G. Eder**

“Terrestrial neutrinos”

Nucl. Phys. **78** (1966) 657.

**1966 – S. S. Gershtein and Ya. B. Zel'dovich**

“Rest mass of muonic neutrino and cosmology”

JETP Letters **4** (1966) 120.

**1967 – B. Pontecorvo**

“Neutrino experiments and the question of leptonic-charge conservation”

Sov. Phys. JETP **26** (1968) 924

(*o artigo foi publicado em russo em 1967*).

**1967 – S. Weinberg**

“A Model of Leptons”

Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264

(paper que o indica para o **Nobel de 1979**).

**1968 – A. Salam**

“Weak and Electromagnetic Interactions”

in “Elementary Particle Theory” – Nobel Lectures de 1968,

Ed. N. Svartholm (paper que o indica para o **Nobel de 1979**).

**1968 – R. Davis, D. S. Harmer and K. C. Hoffman**

“Search for neutrinos from the Sun”

Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 1205.

**1968 – F. L. Wilson**

“Fermi's theory of beta-decay”

Am. J. Phys. **36** (1968) 1150.

**1967 – 1969:** Experimento inelástico profundo (DIS) no SLAC: descoberta dos quarks.

**J. D. Bjorken** (a contribuição aqui é o scaling de Bjorken)  
Phys. Rev. **179** (1969) 1547;

**R. Feynman** (aqui, Feynman introduz o seu modelo de pártons)  
Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 1415.

**J. D. Bjorken and E. A. Paschos**

Phys. Rev. **185** (1969) 1975

(investigam a estrutura dos nucleons e identificam os pártons de Feynman com os quarks de Gell-Mann e Zweig).

**M. Riordan**

“The discovery of quarks”

SLAC – PUB -5724, April 1992.

**1969 – G. Marx**

“Geophysics by neutrinos”

Czech. J. Phys. **B19** (1969) 1471.

**1969 – V. Gribov and B. Pontecorvo**

“Neutrino astronomy and lepton charge”

Phys. Lett. **B28** (1969) 493.

**1973 – Kobayashi e Maskawa:** CP-violation e previsão da 3'a família de quarks

“CP-Violation in the Renormalisable Theory of Weak Interaction”

Prog. Theor. Phys. **49, no. 2** (1973) 652 (paper que os indica para o **Nobel de 2008**).

**1973 – Descoberta das correntes neutras no Gargamelle – CERN:**

F. Hasert et al.

“Observation of neutrino-like interactions without muon or éléctron in the Gargamelle neutrino-experiment”

Phys. Lett. **B46** (1973) 138.

**1974** – Descoberta do quark-c em Stanford (S. C. C. Ting and B. Richter)  
Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 1406

**1977** – Descoberta do quark-b por Leon Lederman no FERMILAB:  
Phys. Rev. Lett. **39** (1977) 252;

**L. Lederman**  
“The upsilon particle”  
Scientific American **239** (1978) 72.

**1977 – M. L. Perl et al.**  
“Properties of the proposed charged tau-lepton”  
Phys. Lett. **B70** (1978) 487.

**1978 – L. Wolfenstein**  
“Neutrino oscillations in matter”  
Phys. Rev. **D17** (1978) 2369.

**1979 – M. Gell-Mann, P. Ramond and R. Slansky**  
“Complex spinors and unified theories”  
**arXiv: 1306.4669**  
in “Supergravity”, ed. D. Freedman and P. van Nieuwenhuizen  
North-Holland, 1979.

**1979 – Y. Yanagida**  
“Horizontal symmetries and masses of neutrinos”  
Prog. Theor. Phys. **64** (1980) 1103.

**1980 – Proceedings Neutrino '80,**  
Ettore Majorana International Science Series  
Phys. Sci. 12 (1982), Plenum Press.

**1982 – International Colloquium on the History of Particle Physics**  
(Paris, 21 – 23 Julho de 1982)  
Journal de Physique Colloque C-8, Suppl. No. 12.

**1983** – São anunciadas as descobertas dos bósons vetoriais eletrofracos,  $W^+$   $W^- Z^0$  :

**UA1-Collaboration at the CERN SPS**

“Experimental observation of large transverse energy electrons with Associated missing energy at  $s = 540$  Gev”  
Phys. Lett. **B122** (1983) 103

**UA2-Collaboration at the CERN SPS**

“Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing tranverse energy at the CERN pp collider”  
Phys. Lett. **B122** (1983) 476 (UA2-Collaboration at the CERN SPS).

**UA1-Collaboration at the CERN SPS**

“Experimental observation of lepton pairs of invariant mass of 95 Gev/c<sup>2</sup> at the CERN SPS collider”  
Phys. Lett. B126 (1983) 398.

**UA2-Collaboration at the CERN SPS**

“Evidence for  $Z^0$  into  $e^+ e^-$  at the CERN pp collider”  
Phys. Lett. B129 (1983) 130.

**1984 – Proceedings of the XI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics – Neutrino '84, World Scientific.**

**1987 – K. S. Hirata et al. (Kamiokande Collaboration)**

“Observation of a neutrino burst from the Supernova SN 1987 A”  
Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1490.

**1992 – S. M. Bilenky and S. Petcov**

“Massive neutrinos and neutrino oscillations”  
Rev. Mod. Phys. **59** (1987) 671.

**1992 – Gallex Collaboration**

“Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso”  
Phys. Lett. **B285** (1992) 376.

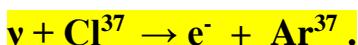
**1995** – Descoberta do quark-t no FERMILAB:  
Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2626.

**1998 – Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration)**  
“Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos”  
Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562.

**1998 – T. Kajita**  
“Atmospheric neutrino results from Super-Kamiokande and Kamiokande – Evidence for muon-neutrino oscillations”  
Nucl. Phys. **B (Proc. Suppl.) 77** (1999) 123.

**1998 – T. Cleveland et al.**  
“Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake Chlorine Detector”  
The Astrophysical Journal **496, No. 1** (1998) 505.

É a realização do método rádio-químico proposto por Pontecorvo em 1947, Baseado no decaimento beta inverso:



**2000** – Anunciada a detecção do  $\nu_\tau$  no FERMILAB; a publicação é feita em 2001.

**K. Kodama et al. (DONUT Collaboration)**  
“Observation of tau-neutrino interactions”  
Phys. Lett. **B504** (2001) 218  
arXiv: **hep-ex 0012035**.

**2003 – R. Davis Jr.**  
Nobel Lecture: “A half-century with solar neutrinos”  
Rev. Mod. Phys. **75** (2003) 985.

**2005 – T. Yanagida**  
“Horizontal gauge symmetry and masses of neutrinos”  
SEESAW 25 C **2005** 7902131, p. 261.

**2010 – T. Kajita**

“Atmospheric neutrinos and discovery of neutrino oscillations”

Proceedings of the Japan Academy, Series B,

Physical and Biological Sciences, **86(4)** (2010) 303.

**2010 – G. Bellini et al.**

“Observation of Geo-neutrinos”

Phys. Lett. **B687** (2010) 299.

**2012 – Anunciada a esperada detecção do bóson de Higgs no LHC:**

**ATLAS Collaboration**

“Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs bóson with the ATLAS detector at the LHC”

Phys. Lett. **B716** (2012) 1

**CMS Collaboration**

“Observation of a new bóson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”

Phys. Lett. **B716** (2012) 30.

**2013 – IceCube Collaboration**

“First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube”

Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 021103.

**2016 – NOBEL Lectures****Arthur B. McDonald**

“The Sudbury Neutrino Observatory: observation of flavor change for solar neutrinos”

Rev. Mod. Phys. **88** (2016) 030502;

**Takaaki Kajita**

“Discovery of atmospheric neutrino oscillations”

Rev. Mod. Phys. **88** (2016) 030501.

**2016 – S. Dell’Oro et al.**

“Neutrinoless double-beta decay: 2015 Review”

Adv. High Energy Phys., **Volume 2016, Article ID 2162659**.

**2018 – Conference on the History of the Neutrino,**

Paris, September\_2018.

Alain Blondel

“The third family of neutrinos”

arXiv: 1812.11362 [physics.hist-ph].

**2019 – GERDA Collaboration**

“Probing Majorana neutrinos with double-beta decay”

Science **365** (2019) 1445.**2019 – Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP),**

16th International Conference, September 9 – 13, 2019, Toyama, Japan.

**2020 – S. Böser et al.**

“Status of light sterile neutrino searches”

Progr. Part. Nucl. Phys. **111** (2020) 103736.**2020 – J. Detwiler**

“Future neutrinoless double-beta decay experiments”

Proc. International Conference **Neutrino 2020**,

Chicago, 28 June – 2 July 2020.

**2020 – S. Bilenky**

“Neutrinos: Majorana or Dirac ?”

Universe **6(9)** (2020) 134

(Publicação do dia 24 AGO 2020).

## Finalização

- Os neutrinos com sabores,  $\nu_e$  ,  $\nu_\mu$  ,  $\nu_\tau$  , possuem pequenas massas e são, na verdade, cada um deles, uma mistura de partículas neutras,  $\nu_1$  ,  $\nu_2$  ,  $\nu_3$  .
- Os neutrinos com sabores são conhecidos como auto-estados de gauge; os neutrinos físicos,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  são os chamados auto-estados de massa.
- Não medimos as massas individuais, mas as diferenças entre os quadrados das massas:

$$\Delta m^2 = m_i^2 - m_j^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- Resultados recentes do experimento KATRIN indicam que as **massas individuais** não devem superar **1.1 eV** ( $\sim 10^{-6} m_e$ ). Este resultado é muito recente, foi anunciado em **13 SET 2019** em conferência (TAUP) realizada em Toyama, Japão.
- Com a evidências de uma pequena massa e das oscilações, abre-se uma grande questão:

**NUs, férmions de Dirac ou férmions de Majorana?**

- Entra em cena a busca  $0\nu\beta\beta - \text{decay}$  como indicativo da natureza de Majorana dos NUs (**questão em aberto**):



A  $\Phi v$  levou à concessão de **4 Prêmios Nobel**:

**1988 (Lederman, Schwartz e Steinberger): descoberta do  $v_\mu$**

**1995 (Reines): descoberta do  $v_e$**

**2002 (Davis e Koshiba): detecção de NUs cósmicos**

**2015 (Kajita e McDonald): descoberta das oscilações e, portanto, da massa dos NUs.**

- **Experimentos com NUs:**

<https://www.symmetrymagazine.org/article/game-changing-neutrino-experiments>

**Aplicações tecnológicas dos NUs:**

- **Monitoramento de proliferação nuclear**
- **Computação quântica com NUs, telecomunicações**
- **Prospecção mineral e de petróleo**
- **Utilização dos geoneutrinos**
- **NUs e Biofísica**

- NUs só apresentam interações nucleares fracas, logo, suas seções-de-choque são muito pequenas comparativamente às seções-de-choque características das interações eletromagnéticas e nucleares fracas.
  - 99% da energia emitida nas explosões de supernovas estão sob a forma de NUs.
- 
- **NUs são fermions de Dirac ou Majorana?**
  - **Os NUs possuem magnetismo?**
  - **Novos NUs (NUs estéreis)?**
  - **Lições da história dos NUs.**

# **Quebra Espontânea de Simetria, Teorema de Goldstone e Mecanismo de Higgs**

## **1960 – Nambu**

**“A Superconductor Model of Elementary Particles and Its Consequences”**

Seminário apresentado (por Jona-Lasinio) na Annual Midwest Theoretical Physics Conference, Purdue University.

## **1961 – Nambu e Jona-Lasinio**

“Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductors” – I e II

Phys. Rev. **122** (1961) 345

Phys. Rev. **124** (1961) 246.

## **1961 – Goldstone**

“Field Theories with Superconductor Solutions”

Il Nuovo Cim. **19** (1961) 154.

## **1962 – Goldstone, Salam e Weinberg**

“Broken Symmetries”

Phys. Rev. **127** (1962) 965.

## **1964 – W. Gilbert**

“Broken symmetries and massless particles”

Phys. Rev. Lett. **12** (1964) 713

Neste trabalho, são explicitadas e discutidas todas as hipóteses para a validade do Teorema de Goldstone. Higgs percebe, através desta publicação, o ponto-chave para a observação de Anderson de '58 sobre o desaparecimento dos bósons de Goldstone: a existência de uma interação de longo alcance, caracterizada pela presença do campo de gauge. Com isto, ele publica os seus 3 trabalhos fundamentais de '64.

## **1964 – P. W. Higgs**

“Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields”

Phys. Lett. **12** (1964) 132;

“Broken symmetries and the masses of the gauge bosons”

Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 508.

**1964 – F. Englert e R. Brout**

“Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Bosons”  
Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321.

**1964 – Guralnik, Hagen e Kibble**

G.S. Guralnik, C.R. Hagen and T.W. Kibble,  
“Global conservation laws and massless particles”  
Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964)

**1964 – A. Klein and B.W. Lee**

“Does spontaneous breakdown of symmetry imply zero-mass particles?”  
Phys. Rev. Lett. **12** (1964) 266.

Argumentação muito clara sobre o papel da covariância de Lorentz na derivação do Teorema de Goldstone.

**1966 – P. W. Higgs**

“Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons”  
Phys. Rev. **145** (1966) 1156.

**1966 – E. Fabri and L. E. Picasso**

“Quantum field theory and approximate symmetries”  
Phys. Rev. Lett. **16** (1966) 408

Estabelecem uma discussão aprofundada da degenerescência do vácuo e da infinitude da norma do estado gerado pelo operador de carga, Q, atuando no estado de vácuo.

**1966 – N. D. Mermin and H. Wagner**

“Absence of ferromagnetism or antiferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg model”  
Phys. Rev. Lett. **17** (1966) 1307.

Este trabalho ilustra a impossibilidade de quebra espontânea de simetria em sistemas bidimensionais. A extensão deste resultado para as teorias de campos relativísticas é feita por S. Coleman, em **1973**, no paper

**“There are no Goldstone bosons in two dimensions”**  
Comm. Math. Phys. **31** (1973) 259.

**1968 – Guralnik, Hagen e Kibble** publicam um excelente review-paper sobre o Teorema de Goldstone e o Mecanismo de Higgs, sintetizando toda a discussão da época. Este material pode ser encontrado no “**Advances in Particle Physics**”, vol.2, p. 567 (editado por Cool e Marshak).

“Broken Symmetries and the Goldstone Theorem”,  
in *Advances in Particle Physics*, Vol. 2, R.L. Cool and R.E. Marshak eds.,  
Interscience 1968, p. 567.

**1973 – Weinberg**

“General Theory of Broken Local Symmetries”  
Phys. Rev. **D7** (1973) 1068.

**1972 – 1973** – A demonstração da renormalizabilidade das teorias de gauge com quebra espontânea de simetria.

**B. W. Lee and J. Zinn-Justin**

“Spontaneously broken gauge symmetries. I, II, III, IV.”  
Phys. Rev. **D5** (1972) 3121  
Phys. Rev. **D5** (1972) 3137  
Phys. Rev. **D5** (1972) 3155  
Phys. Rev. **D7** (1973) 1049.

**J. J. Strathdee and A. Salam**

“A Renormalizable Gauge Model of Lepton Interactions”  
Nuovo Cimento Ser.**11, 11A** (1972) 397.

**D. A. Ross and J. C. Taylor**

“Renormalization of a unified theory of weak and electromagnetic interactions”  
Nucl. Phys. **B51** (1973) 125.

**1976** – Neste paper de Ellis, Gaillard e Nanopoulos, o Prof. Higgs se torna um bóson:

**J. Ellis, M. K. Gaillard and D. V. Nanopoulos**  
“A phenomenological profile of the Higgs boson”  
Nucl. Phys. **B106** (1976) 292.

**1977** – A discussão do Higgs na unitariedade.

**B. W. Lee, C. Quigg and H. B. Thacker**

“Weak interactions at very high energies: the rôle of the Higgs-boson mass”

Phys. Rev. **D16** (1977) 1519.

**Para finalizar:**

Uma excelente síntese atualizada da **Teoria Eletrofraca** é feita por **Michael Peskin** em suas aulas na **CERN – JINR European School of Particle Physics de 2016**:

**M. Peskin**

“Lectures on the theory of weak interaction”

**arXiv:1708.09043 [hep – ph].**