

**“De Emmy Noether ao
Modelo-Padrão ”**

[A unidade pelas simetrias]

CERN – Professores 2021

Visão Panorâmica

Proposta desta contribuição

- **Contextualizar as origens, o desenvolvimento, como se impôs e o grande protagonismo do Modelo-Padrão.**
- **Destacar o esforço e a persistência, ancorados em princípios fundamentais de **simetria**, no projeto de se estabelecer uma nova área da Física.**
- **Realçar também a interface da área com **aspectos filosóficos** presentes na literatura que fundamentou a elaboração do Modelo-Padrão.**

As fases do desenvolvimento da Φ MP

- **Fase-1: pré-história** (1894–1929)
- **Fase-2: surge a história** (1930–1956)
- **Fase-3: novos atributos da matéria** (1957–1964)
- **Fase-4: nasce a era Higgs** (1964–1967)
- **Fase-5: California dreamin'** (1968–1972)
- **Fase-6: a Revolução da Cor e o MP** (1972-1974)

O marco-0 de nossa discussão ~ a luz, c

- 1865 ~ Maxwell ~ Eletrodinâmica Clássica
(sem conhecimento da carga fundamental!)
- Luz ~ onda de natureza eletromagnética
(para Maxwell, natureza mais elementar é *linear*)
- 1887 – 1888 ~ os experimentos de Hertz (μ -ondas)
- 1894 – 1902 ~ Marconi, Braun
(telegrafia sem fios, rádio)
- 1895 ~ Röntgen (**raios-X**)

Átomos de eletricidade e magnetismo?

- **1894 – G. J. Stoney**

“Of the electron or atom of electricity”

Philosophical Magazine, **Series 5, 38** (1894) 418

(Apresenta a estimativa de 10^{-20} C para a carga.)

- **1894 – P. Curie**

“Sur la possibilité d’existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre”

Séances Soc. Française Phys. (1894) p. 76.

Simetrias e Propriedades Físicas

- 1894 – Pierre Curie

“Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d’un champ électrique et d’un champ magnétique”

J. Phys. Théor. Appl. **3(1)** (1894) 393.

*(Relação entre as **propriedades físicas** – térmicas, elétricas e magnéticas – de cristais e as **propriedades de simetria** das correspondentes estruturas cristalinas.)*

Átomos de eletricidade e magnetismo?

- 1896 – H. Poincaré

“Remarques sur une expérience de M. Birkeland”

Comp. Rend. Acad. Sci. **123** (1896) 530

(É desenvolvido o estudo matemático da trajetória de raios catódicos no campo de um polo magnético.)

- Só em **1938**, **P. Jordan** (7 anos após o paper de Dirac) defende que o monopolo magnético não é uma mera concepção matemática:

“Über die Diracschen Magnetpole”

Ann. der Phys. **424**, no. **1-2** (1938) 66.

Para os NUs, aqui tudo começa: 1896

- 1896 – Henri Becquerel
- **“Sur les radiations émises par phosphorescence”**
Comptes-Rendus de l’Académie des Sciences **122**
(1896) p.420.
- **“Sur les radiations émises par les corps phosphorescents”**
Comptes-Rendus de l’Académie des Sciences **122**
(1896) p.501.

Um novo marco ~ o elétron

- **Thomson (1897)** revela que os raios catódicos de Crookes são, na verdade, partículas de matéria - e não ondas - com a carga negativa dos raios catódicos ~ **elétrons**

(passo notável na busca da elementaridade)

J. J. Thomson

“Cathode Rays”

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

- Lembrando que, em **1892**, **Lorentz** havia sugerido que os raios catódicos (**agora, partículas**) deveriam ter **massa** em consequência de sua **carga elétrica**

(ponto de vista que será substituído pelo mecanismo de Higgs e pelo mecanismo de quebra da simetria quiral)

O marco – 1900:

h , quebra do determinismo Newtoniano

- **OUT:** Max Planck – Emissão do Corpo Negro
- **DEZ:** Max Planck – hipótese do **quantum de energia** (osciladores atômicos elementares quânticos)
- **Descoberta dos raios- γ (decaimento do U)**
- **Com o $h\nu$ de Planck, em direção ao fóton.**

O marco – 1902

(pouco citado, mas fundamental)

- **P. Lenard – Efeito fotoelétrico**

O fenômeno que estimulou Einstein a introduzir os chamados **quanta de luz**.

Mileva Maric, pupila de Lénard, é quem leva o estudo do fenômeno para debater com **Einstein**, seu marido.

“On an heuristic point of view concerning the production and transformation of light”

P. Lenard, Ann. of Phys. 8 (1902) 169.

O marco – 1905:

c, quebra da simultaneidade absoluta

- Einstein e a Relatividade Restrita, **c**
“On the electrodynamics of moving bodies”
Ann. der Phys. (ser.4) 17 (1905) 891.
- Einstein e o Efeito Fotoelétrico, **h**
(*elementaridade ~ quantum de luz*)
Ann. der Phys. (ser.4) 17 (1905) 132.
- Escalas de energia e comprimento agora relacionadas:
 $\hbar c \sim 200 \text{ MeV. fm}$

Poincaré, 1905

- “O Valor da Ciência”

I. As Ciências Matemáticas

(intuição e lógica na Matemática)

II. As Ciências Físicas

(a Física-Matemática)

III. O Valor Objetivo da Ciência

(Ciência e Realidade)

O marco - 1907 – 1914: a pré-história dos NUs – a era da emissão- β

- 1907 – 1908 - L. Meitner, O. Hahn, O. von Baeyern,
W. Wilson, J. Chadwick

e^- monoenergéticos?

- 1911 – 1914 - Wilson
contradiz este resultado. Seus experimentos indicam que o **espectro de energias** tem perfil **contínuo**.
Resultado acolhido com muita reserva.
Limitações das medições calorimétricas.

Os esforços do período 1907 - 1914

- **1914 – J. Chadwick** resume, no trabalho abaixo, os esforços empreendidos no período 1907 – 1914.

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

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

Os marcos - 1911, -1913

- 1911 – E. Rutherford
revolução na visão atômica da matéria ~ o núcleo
- 1913 – Niels Bohr
os 2 trabalhos sobre o seu modelo atômico
(a elementaridade do momento angular, $n\hbar$)
- 1913 – R. Millikan
medição da carga do elétron, e ;
determinação de h e confirmação da expressão $E = h\nu - W$
(em 1914)
- 1913 – Igor Stravinsky
“A Sagração da Primavera”

O marco – 1915

(de Euclides para Riemann)

- Teoria da Relatividade Geral

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 0 \quad (G_N, c)$$

- Expressando o **real (gravidade)** em termos do **abstrato (a geometria, a métrica)**: um novo momento.
- Não simplesmente uma nova Matemática trazida para a Φ , mas uma nova visão de mundo: **Riemanniano**.

O marco - 1917

- **Einstein e os quanta de luz** (a teoria do LASER)
- **Einstein e a Cosmologia – Constante cosmológica, Λ**
- **Rutherford**, agora, perscruta o núcleo atômico, descobre o **próton** e **prevê a existência do nêutron**.
(Este estudo é publicado somente em 1920.)
- O mundo elementar contém, agora, 2 partículas de matéria – o **elétron** e o **próton** – e interagem com os **quanta de luz**.

O marco - 1917

- O mundo elementar contém, agora, 2 partículas de matéria – o **elétron** e o **próton** – e interagem com os **quanta de luz**.
- **1917 – Max Weber**
“A Ciência como Vocação”
(Auto-reflexão e o interior, a vida espiritual das pessoas de uma sociedade fundada na Ciência)
- **1917 – Luigi Pirandello**
“Così è se vi pare”
(Visão não-absoluta do real.)

1918, os Teoremas de (Emmy) Noether

- A tripla concertação do Teorema de Noether:
um **princípio variacional** (por exemplo, uma ação)
simetria contínua
leis de conservação

*Elemento para uma reflexão sobre a profunda **relação**
entre a **Matemática** e a **Física** (Dirac).*

O marco – 1922 – 1923

- Os experimentos de **Arthur Compton**:
os **quanta de luz** de Einstein revelam-se **partículas**:
não só têm energia, mas também momentum
(a gênese do **fóton**, a 3ª partícula)
(Os resultados do Efeito Compton são publicados em 1923.)

A Φ Ps congrega, agora, 3 entidades elementares, muito diversas, porém:

*o elétron (carga $-e$), o próton (carga $+e$),
o fóton (carga $0.e$).*

O marco - 1924

- **Louis de Broglie**

(modelo ondulatório da estrutura atômica)

dualidade onda – partícula

constante **h** estabelece o **dualismo** como um aspecto da **elementaridade**

- **Wolfgang Pauli** propõe o chamado **Princípio da**

Exclusão para as partículas de matéria (e^- , p):

outro aspecto da **elementaridade**

O marco – 1925

A tensão pré-quântica atinge o seu clímax

- A proposta do **spin do elétron** (de novo, o **h**)

Uhlenbeck e Goudsmit

Spin ~ propriedade de natureza combinada

(**quântica e geométrica** ~ **espaço-temporal**)

- **Heisenberg, Born e Jordan (Mecânica Matricial)**

em 3 trabalhos fundamentais, propõem uma formulação algébrica para a MQ, até então, vista como um conjunto de ideias sem uma sistematização matemática.

- **Excelente referência: “The story of spin”, S.-I. Tomonaga.**

Dirac entra em cena

- **Paul Dirac**, um jovem físico de 23 anos, de Cambridge, compreende a Mecânica Matricial, **busca uma nova matemática** e a reformula, introduzindo as chamadas **variáveis-q**. Isto em NOV'25, após assistir ao seminário do Heisenberg, em Cambridge, em AGO'25.
- MAI'26: **PhD Thesis, “Quantum Mechanics”**
- DEZ'26: **Transformation Theory** (seu trabalho preferido)
- FEV'27: **Teoria quântica da radiação** (campos quânticos)

Os anos decisivos da MQ

- **DEZ'26: Schrödinger e a equação ondulatória da MQ**
- **FEV'27: Equação de Pauli**
- **MAR'27: Heisenberg e o Princípio da Incerteza**

Unificação de teorias:

- **JAN e FEV'28:**
a **unificação da MQ com a Relatividade Especial**
(Equação de Dirac, I e II)

O marco - 1928

- A **Mecânica Quântica Relativística** que, através da **Equação de Dirac**, introduz uma descrição do **spin compatível com a Relatividade Especial** e incorpora as Equações de Schrödinger e Pauli no regime de velocidades baixas em relação à velocidade da luz

$$(i\hbar c \gamma^\mu \partial_\mu - mc^2 - ec \gamma^\mu A_\mu) \psi = 0$$

\hbar c e α

O elétron do decaimento- β retorna

- **1927 – C. Ellis e W. Wooster:**

resolvem o impasse do espectro de energia dos e^- emitidos no decaimento- β .

Confirmam os resultados de Wilson e asseguram o caráter contínuo do espectro de energia dos e^- .

- **“The average distribution of disintegration of Radium-E”**
Proc. Roy. Soc. London **A117** (1927) 109.

1929, fecha-se a Fase-1

- **DEZ'29**: um novo conceito, o **vácuo quântico**
Vácuo quântico e fenômenos eletromagnéticos: efeitos não-lineares
“A theory of electrons and protons”
Proc. Roy. Soc. London **A126** (1930) 360
- **Herman Weyl**: a **equação de Weyl** (adotada para os NUs)
“Elektron und gravitation”
Zeit. f. Phys. **56** (1929) 330.

Fase-2, o próton e os neutrinos: Dirac e a elementaridade

- Dirac em 1930: **“The Proton”**, Nature 123 (1930) 605.
- **Carta de Pauli de 4 DEZ 1930: novas partículas, os V’s**
- **4 de Dezembro 1930 – Com base nos resultados de Chadwick (1914) e Ellis-Wooster (1927), 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.** A íntegra desta carta pode ser facilmente acessada em diversos sites da internet.
- Tradução da carta por **Kurt Riesselmann.**

Os primeiros desenvolvimentos da QED

- **QED na formulação não-covariante: 1927 – 1934**

P. Dirac (Teoria do elétron, vácuo quântico, anti-matéria)

P. Jordan

O. Klein

E. Wigner

W. Pauli

W. Heisenberg

V. Fock

E. Fermi

B. Podolsky

V. Weisskopf

Dirac, 1931: novas formas de matéria

- **P. Dirac**

“Quantised singularities in the electromagnetic field”

Proc. Roy. Soc. London **A133** (1931) 60.

- Neste trabalho, Dirac reúne 3 resultados de alta consequência: prevê a **existência da anti-matéria** (pósitron e anti-próton), prevê também a **existência dos monopolos magnéticos** e resolve o desafio da **quantização da carga elétrica**. Introduz também a importante simetria discreta de **conjugação de carga (C-symmetry)**. É este trabalho que o leva ao Prêmio Nobel de 1933, que divide com Erwin Schrödinger.

1932, grandes descobertas e uma nova simetria, o spin isotópico

- **1932** – anunciada a descoberta do **nêutron (Chadwick)**
- **1932** – anunciada a descoberta do **pósitron (Anderson)**
- **1932** - **Heisenberg** lança a proposta de uma **estrutura matemática** com a finalidade de levar em conta uma quase-evidente **simetria próton – nêutron**: introduz um novo conceito – **spin isotópico** e o **grupo unitário SU(2)**.
- **1932** – Lawrence (em Berkeley) e Gamow (Leningrado) lançam o primeiro **cíclotron**, com elétrons sendo acelerados até à energia de **4.8 MeV**.

A interação nuclear fraca, uma nova Φ

- **1933** – **E. Fermi**

“Tentativo di una teoria dei raggi- β ”

La Ricerca Scientifica **2** (1933) 1,

Zeit. f. Phys. **88** (1934) 161.

- **1934** – **I. Tamm**

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

Nature **133** (1934) 981.

A simetria SU(2) de spin isotópico

- **1935 – H. Yukawa**
“On the interaction of elementary particles”
Proc. Phys. Math. Soc. Jap. **17** (1935) 48. π^+ π^0 π^-
- **1936 – B. Cassen and E. U. Condon**
“On nuclear forces”
Phys.Rev. **50** (1936) 846.
- **1937 – E. Wigner**
“On the consequences of the symmetry of the nuclear Hamiltonian on the spectroscopy of nuclei”
Phys. Rev. **51** (1937) 106.

A primeira Teoria do Todo

- **1938 – O. Klein**

“On the theory of charged fields”

Proc. of the Conference “New Theories in Physics”,
1938, Warsaw.

A relação entre a Matemática e a Física: o critério da estética

- **P. A. M. Dirac**

“The relation between Mathematics and Physics”

Proc. Roy. Soc. Edinburgh **59** (1938 – 1939), Part II, 122.

“The evolution of the physicist’s picture of Nature”

Scientific American, **May 1963**.

“Development of the physicist’s conception of Nature”

The Physicist’s Conception of Nature,

Ed. J. Mehra, **1973**, D. Reidel Publishing Company, p.1 .

A essência matemática da matéria:

simetria ~ o ápeiron

- *“As far as I see, all a-priori statements in Physics have their origin in **symmetry**.”*

H. Weyl in “Symmetry, Crystals: The General Mathematical Idea of Symmetry”, 1952, p. 126.

- *“The most important lesson that we have learned in this century is that the secret of Nature is **symmetry**.”*

D. Gross, 1999.

Anaximandro de Mileto, Século VI a.C.

- Vamos observar a contemporaneidade destas 3 afirmações:
- “A **multiplicidade** das coisas que formam a Natureza é totalmente derivada de uma **única origem**, “o **princípio**”, chamado “**ápeiron**”.
- “A **transformação** das coisas umas nas outras é regulada pela necessidade. É esta que determina a **evolução temporal dos fenômenos**.”

Anaximandro de Mileto, Século VI a.C.

- O mundo não é aquilo que se apresenta a nós. O mundo é diferente de como nos aparece. **A nossa visão de mundo é modulada pela pequenez de nossas experiências.**
- A **Relatividade Restrita** (simultaneidade relativa), a **Relatividade Geral** (Geometria Riemanniana), a **Mecânica Quântica** (indeterminismo), e a **Teoria Quântica de Campos** (vácuo com estrutura) nos confirmam exatamente o que é dito acima.

A eternidade do **ἀπειρου**

- Ao introduzir o **ἀπειρον**, **Anaximandro** está propondo o que a Física já vem fazendo há alguns séculos:

introduzir entidades não-diretamente mensuráveis, entidades físicas de caráter abstrato, para descrever os fenômenos e fazer previsões de curto, médio e longo prazos.

Heranças do ápeiron na Física atual

- Átomos (**Demócrito, Leucipo**; Dalton ~ teoria atômica)
- O conceito de campo clássico (**Faraday** e **Maxwell**)
- O elétron (átomo de eletricidade) (**Stoney**)
- A ideia do éter (**Lorentz**)
- O quantum (**Planck** e **Einstein**)
- O espaço-tempo (plano ou curvo)(**Minkowski, Einstein**)
- A função-de-onda da Mecânica Quântica (**Schrödinger**)
- O campo e o vácuo quânticos (**Dirac**)
- Os quarks (e préons) (**Gell-Mann, Zweig**; **Dirac – Salam**)
- As cordas fundamentais (**Green – Schwarz**)
- A spin foam (**Baez**)

Observemos uma persistente atitude atomística.

A essência matemática da matéria

- O ponto-de-vista aqui adotado é que

a **qualidade matemática da matéria** (ou da Natureza, como defende o Prof. Paul Dirac) **não reside na mera descrição por meio dos métodos matemáticos**, mas

sim na capacidade da Matemática de levar à previsão de resultados que serão comprovados a longo prazo.

A essência matemática da matéria

- **E. Wigner**

“The role of mathematical methods in physical theories”

Journal of the Franklin Institute **250** (1950) 477.

- **E. Wigner** (*no evento The Nature of Matter, October 1963*)

“Symmetries and conservation laws”

Proc. Nat. Acad. Sci. of the USA **51** (1964) 956.

- **S. Bochner and E. Wigner**

“The role of Mathematics in the rise of Science”

Physics Today **20** (1967) 93.

Duas excelentes referências

- **“From Summetria to Symmetry:
The Making of a Revolutionary Scientific Concept”**
G. Hon and B. R. Goldstein
Springer, 2008.
- **“Symmetries of Nature”**
K. Mainzer
Berlin – De Gruyter, 1996.

O impacto do encontro da Simetria com a Mecânica Quântica

- O encontro da Teoria de Grupos e suas representações com a MQ assinala o ponto de partida para o papel das simetrias na nascente Física de Partículas e no programa de unificação das interações fundamentais
(Wigner e Weyl são os primeiros a reconhecer).
- Se G é o grupo de simetria de um sistema quântico, os estados deste sistema se agrupam em representações de G (degenerescências). Alto potencial de predição!
- Traduzindo para a $\Phi P_s \sim$ multipletes de partículas.

6 marcos no programa das simetrias na Φ do Século XX

- de simetrias globais a simetrias locais
- das simetrias espaço-temporais às simetrias internas
- as categorias discretas: P, C e T
- o mecanismo de quebra espontânea, Goldstone, Higgs (**massas**)
- a unidade promovida pelas simetrias e a unificação
- o papel das simetrias no regime ultravioleta
- de simetrias a supersimetrias e dimensões extras.

A nova versão (covariante) da QED

- 1946 – 1951:

Neste período, trabalhando independentemente, **S.-I. Tomonaga**, **J. Schwinger** e **R. Feynman** publicaram uma série de trabalhos que culminou com a chamada **formulação covariante da Eletrodinâmica Quântica**, como a utilizamos atualmente. Por estas importantes contribuições, estes três autores dividiram o Prêmio Nobel de Física de 1965. Fica, assim, estabelecido o primeiro alicerce fundamental do Modelo-Padrão, a QED.



Simetrias e Φ Experimental de Partículas

(Anos '40 – Simetrias reveladas)

- **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- π**

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

“Processes involving charged mesons”

Nature 159 (1947) 694.

Simetrias e Φ Experimental de Partículas (Anos '40 – Simetrias reveladas)

- **1948** – Produção de mésons- π no cíclotron de Berkeley

E. Gardner and C. M. G. Lattes

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

Science **107** (Issue 2776) (1948) 270.

Simetria e Universalidade (e^- , μ^-)

- **1948 – 1949:** Discussão da **universalidade** dos decaimentos fracos (e^- , μ^-)
- “Sui mesoni dei raggi cosmici”
G. Puppi, *Il Nuovo Cim.* **5** (1948) 587.
- “Mesons and nucleons”
O. Klein, *Nature* **161** (1948) 897.
- “Energy spectrum of electrons from meson decay universality”
J. Tiomno, J. A. Wheeler, *Rev. Mod. Phys.* **21** (1) (1949) 144.

As simetrias nos anos '50

- **1950** – E. Schrödinger
“What is an elementary particle ?”
Endeavour **9** (1950) 109.
- **1952** – H. Weyl
Livro: “Symmetry”
Princeton University Press.
- **1953** – E. Schrödinger
“What is matter ?”
Scient. Am. **189** (1953) 52.

1954, Yang - Mills - Shaw

- **C.N. Yang and R. L. Mills, 1954**
“**Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance**”
Phys. Rev. **96** (1954) 191.
- **R. Shaw, 1954**
- (Chega às Teorias de Yang-Mills em Janeiro de 1954, de forma independente.)
“**The Problem of Particle Types and Other Contributions to the Theory of Elementary Particles**”
PhD Thesis, September 1955 – Cambridge University,
Advisor: A. Salam.

1954, Spirit and Nature

- E. Heisenberg, **1954**

“The Spirit of Science”

Livro: Spirit and Nature

Papers from the Eranos Yearbooks

pp. 322 – 341

Pantheon Books, New York, 1954.

O esquema de Gell-Mann e Nishijima

Novas qualidades de matéria

- **1955 – 1956**

São conhecidas cerca de **30 partículas subatômicas**:
dentre os léptons carregados (**e, μ , pósitron e anti- μ**)
o **neutrino e o anti-neutrino do elétron**,
o **fóton**,
os nucleons (**p, n**) e suas anti-partículas,
alguns **novos mésons** além dos **mésons- π** ,
e outros bárions (**Λ , Σ , Ξ**) e correspondentes anti-bárions:

partículas **estranhas** (longa vida média $\gg 10^{-18}$ s.

O esquema de Gell-Mann e Nishijima

Novas qualidades de matéria

- **Gell-Mann** e **Nishijima**, independentemente, adotam a simetria **SU(2)** de spin isotópico forte (interação nuclear forte independente da carga elétrica), supondo que todos os **bárions se agrupem em multipletes de isospin**. Assim, definem um número quântico – **hipercarga forte, Y** –

$$Y = 2 (Q_{em} - I_3)$$

e, a partir deste, a **estranheza, S**,

$$S = Y - B.$$

O esquema de Gell-Mann e Nishijima

Novas qualidades de matéria

- **K. Nishijima, 1955**

“Charge independence theory of V-particles”

Progr. Theoret. Phys. (Kyoto) **13** (1955) 285.

- **M. Gell-Mann, 1956**

“The interpretation of the new particles as displaced charge multiplets”

Il Nuovo Cim. Suppl. **4** (1956) 848.

A violação da paridade e se conclui a **Fase-2**

- **T. D. Lee and C. N. Yang, 1956**
“Question of parity conservation in weak interactions”
Phys. Rev. **104** (1956) 254.
- **A. Salam, 1956**
“The interaction Lagrangian for fundamental particles”
Nucl. Phys. **2** (1956) 173.

As duas grandes descobertas de 1956: inicia-se a **Fase-3**

- **C. S. Wu et al., 15 JAN 1957**
“Experimental test of parity conservation in beta-decay”
Phys. Rev. **105** (1957) 1413.
- **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.

1956-1957, passos concretos para a unificação

- **1956** – **Abdus Salam**
“**The interaction Lagrangian for fundamental particles**”
Nucl. Phys. **2** (1956) 173.
- **1957** – **J. Schwinger**
“**A Theory of the fundamental interactions**”
Ann. Phys. **2** (1957) 407.
- **1957** – **B. d’Espagnat, J. Prentki and A. Salam**
“**On symmetries in elementary-particle interactions**”
Nucl. Phys. **3** (1957) 446.

As simetrias nos anos '50

- **P. W. Anderson, 1958**
“Random-Phase Approximation in the Theory of Superconductivity”
Phys. Rev. **112** (1958) 1900.
- **J. Leite Lopes, 1958**
“A model of the universal Fermi interaction”
Nucl. Phys. **8** (1958) 234.

O “eightfold path” das simetrias no período ‘60 – ‘64

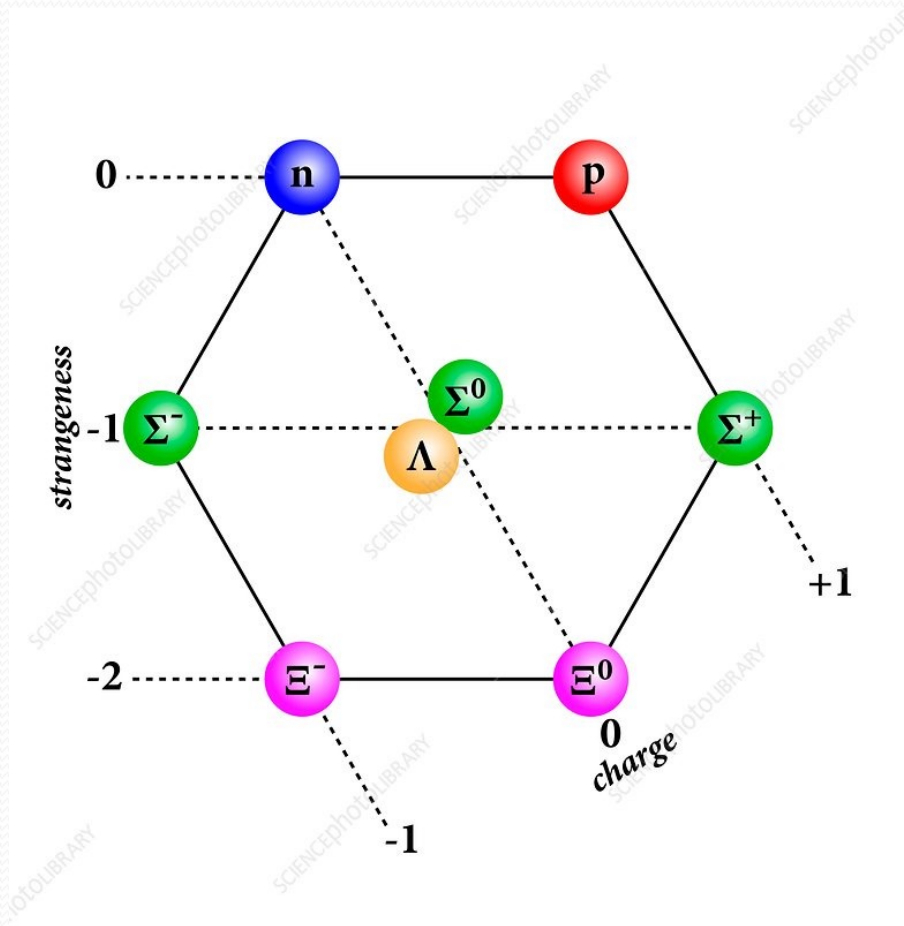
- de SU(2) a SU(3) – o **eightfold way**
- $\underline{3} \times \underline{3}^* = 1 + 8 \sim$ os quarks e anti-quarks
- um novo número quântico – a cor
- a violação de CP e a origem das massas
- a simetria de gauge e a origem das massas (**bóson de Higgs**)
- Cabibbo e o mixing de quarks (antecipando CKM)
- avanços na busca da unificação
- uma antecipação (24 anos!) da correspondência AdS/CFT.

SU(3): o Eightfold Way:

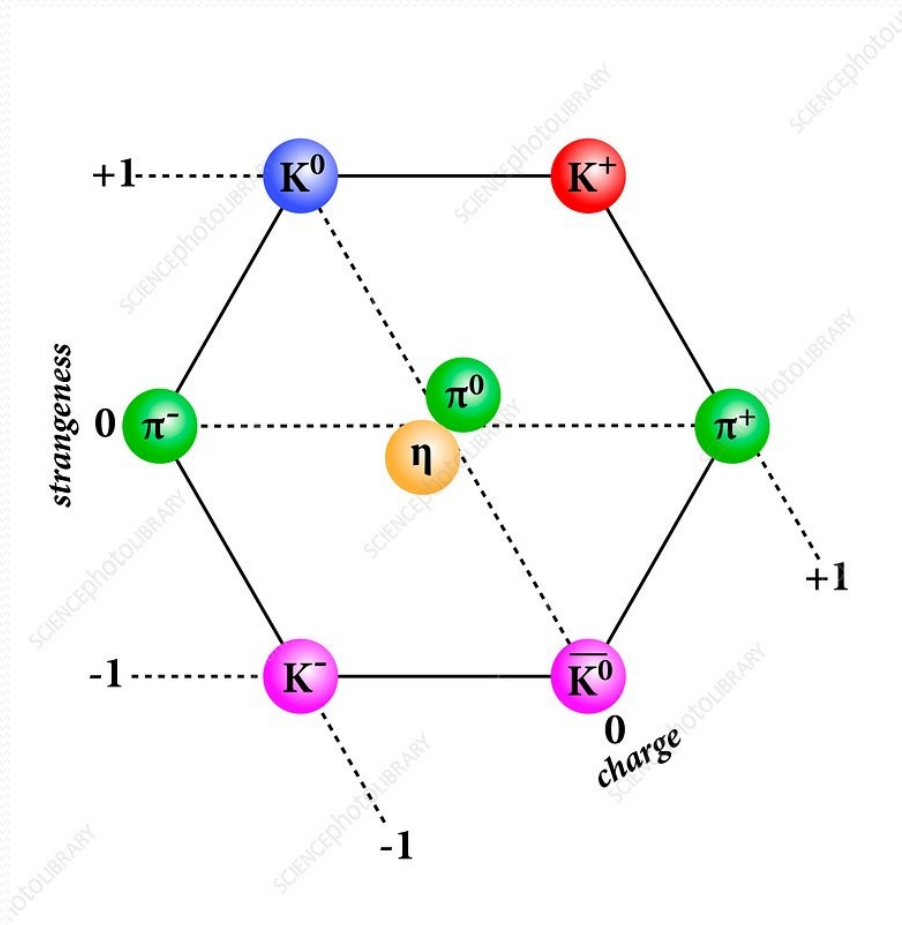
Spin isotópico e estranheza

- **M. Gell-Mann**
“**Symmetries of baryons and mesons**”
Phys. Rev. **125** (1962) 1067.
- **Yu. Ne’eman**
“**Derivation of strong interactions from a gauge invariance**”
Nucl. Phys. **26** (1961) 222.
- **SO(4) do Modelo Atômico: 2, 8, 18, 32, (energias)**
- **SU(3) do Eightfold Way: 3, 6, 8, 10, 15, 18, (massas)**

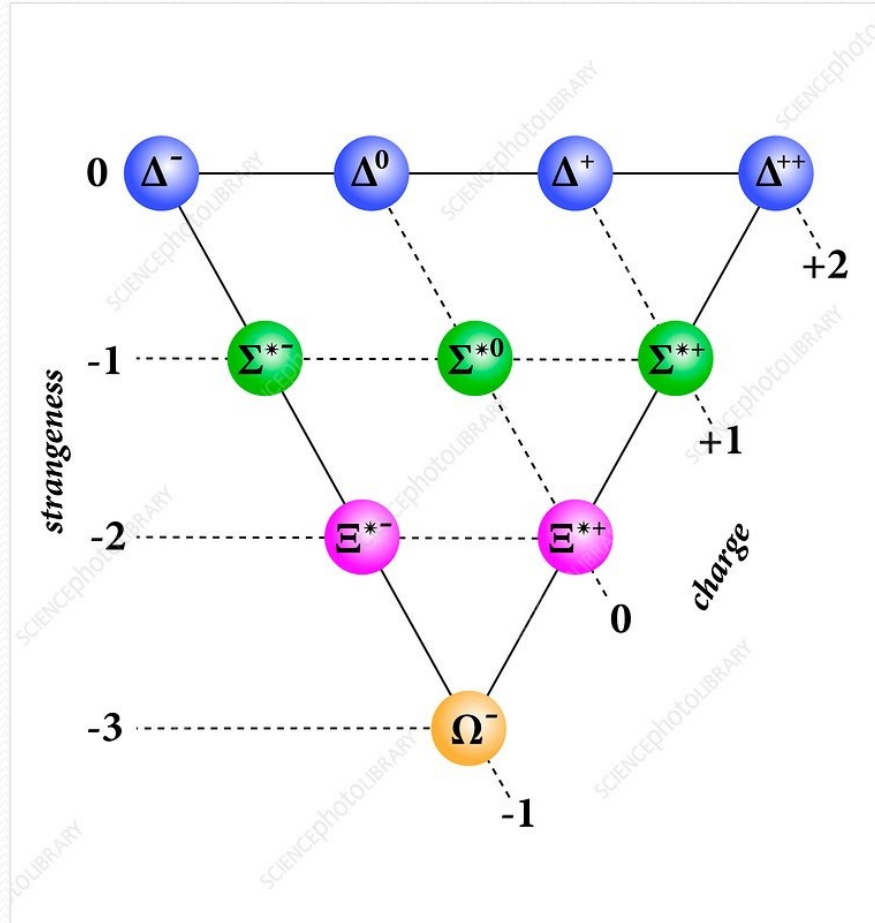
O octete de bárions



O octete de mésons



O decuplete de bárions



Uma outra grande descoberta

- **1962** – Descoberta experimental da 2ª da família de neutrinos – o **neutrino do múon** – por **Lederman, Schwarz e Steinberger** (por este resultado, recebem o **Nobel de 1988**). Antes desta descoberta, já se supunha a existência do neutrino do múon, 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.

O atomismo 2.500 depois : os quarks

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

M. Gell-Mann

“A schematic model of baryons and mesons”

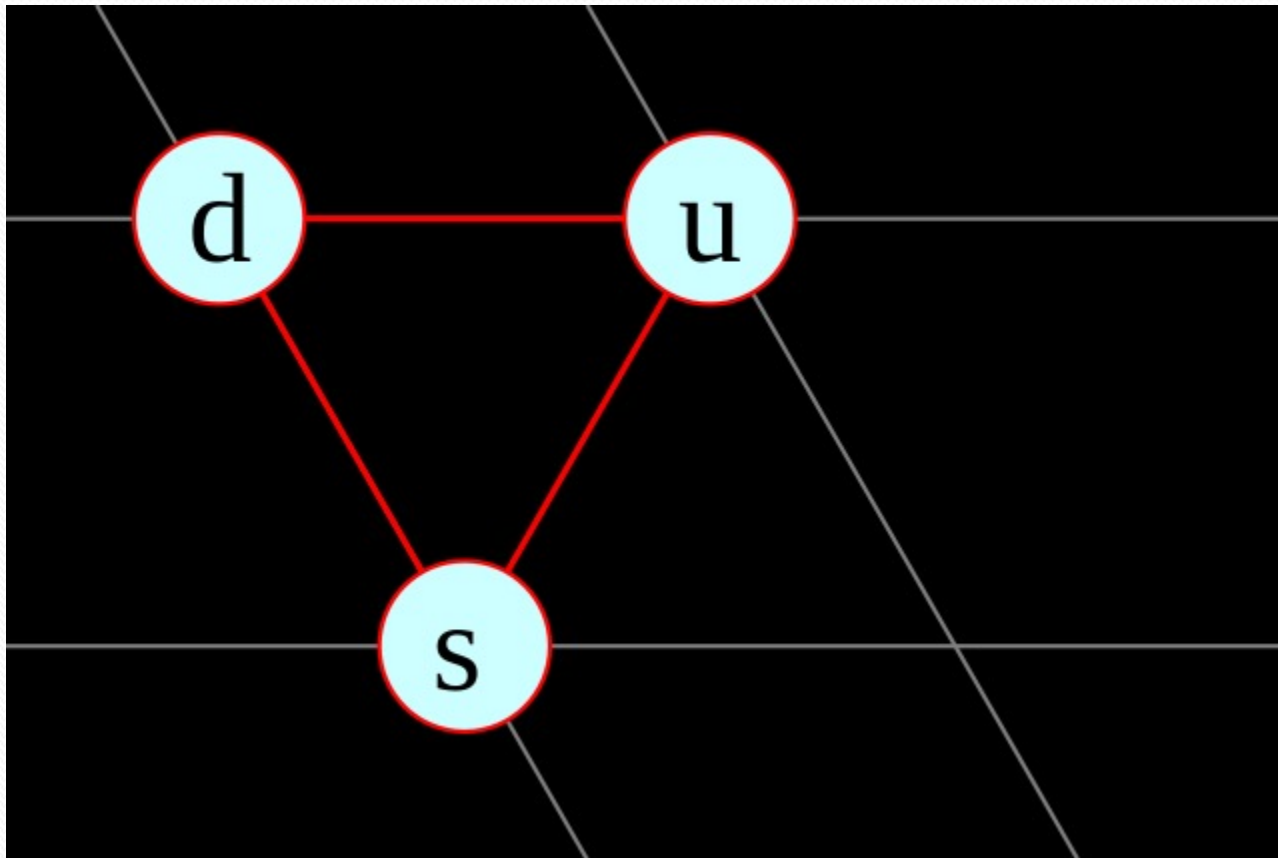
Phys. Lett. **8**, No. **3** (1964) 214

G. Zweig

“An SU(3) model for strong interactions symmetry and its breaking”

CERN preprint **8182 – TH. 401**, 17 JAN 1964

O triplete de quarks



3 famílias: 6 sabores, 3 cores

- [**u** **d**] *presentes na matéria atômica*
[nos prótons (uud) e nêutrons (udd)]
- [**c** **s**] *excitados nos aceleradores (colisões de prótons)*
- [**t** **b**] *excitados nos aceleradores (colisões de prótons)*
- *O quark mais leve: u (~ 6 massas do elétron)*
- *O quark mais pesado: t (~ 350.000 massas do elétron;
seu tempo de vida ~ 10^{-25} s)*

Quarks: previsões e detecções

- **u, d, s** - *previstos em 1964, descobertos em 1968 - 1969*
- **c** - *previsto em 1970, descoberto em 1974*
- **t, b** - *previstos em 1972, descobertos em 1978 (**b**) e em 1995 (**t**)*

Prêmios Nobel de Física

O último elo com o Universo Primordial: inicia-se a era Higgs, Fase-4

- **1964** – estabelecido o **mecanismo de Higgs**, decisivo para **Salam, Glashow, Weinberg** proporem, a chamada **Teoria Eletrofraca, $SU(2) \times U(1)$** .

Nova previsão: bóson de Higgs.

- **1964** – **Cabibbo** introduz a ideia de **mixing de famílias** (oscilação $d - s$); hoje, **oscilação $d - s - b$** , com base na fenomenologia das **correntes neutras** das interações fracas. [**Matriz-CKM**]

Os quarks e seus números quânticos: produto Cartesiano de qualidades da matéria

$$\Psi_{\alpha I i a}$$

- $I = 1, 2, 3$ (família; SU(3) flavor)
- $i = 1, 2$ (sabor dentro da família)
- $I = 1$ (u,d) $I = 2$ (c, s) $I = 3$ (t, b)
- $\alpha = 1, 2, 3, 4$ (índice de componente spinorial)
- $a = 1, 2, 3$ (índice de SU(3) cor)

Estes índices governam as interações **eletromagnética**,
nuclear forte e **nuclear fraca** dos quarks.

California dreamin', a Fase-5: os quarks

- **1967 – 1969**: DIS no SLAC: descoberta dos quarks.
- **J. D. Bjorken**
 - **“Asymptotic sum rules at infinite momentum”**
Phys. Rev. **179** (1969) 1547.
(*A contribuição aqui é o scaling de Bjorken, fundamental para a introdução da simetria conforme na TQC.*)
- **R. Feynman**
 - **“Very high-energy collisions of hadrons”**
Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 1415.
(*Feynman introduz o seu modelo de pártons.*)

Os pártons são os quarks

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

“Inelastic electron-proton and γ -proton scattering and the structure of the nucleon”

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

(Investigam a estrutura dos nucleons e identificam os pártons de Feynman com os quarks, propostos em 1964, por Gell-Mann e, independentemente, por Zweig.)

- **M. Riordan**

“The discovery of quarks”, SLAC – PUB -5724, April 1992.

Os anos '70, cores e charm da Física

- Os anos '70 chegam e as **simetrias** fazem a sua **primeira grande previsão da década**:
a proposta de um quarto sabor de quark, o **charm**.

- **S. L. Glashow, J. Iliopoulos and L. Maiani**
(*GIM Mechanism*)

“Weak interactions with lepton – hadron symmetry”

Phys. Rev. **D2** (1970) 1285.

Os charmosos anos '70 e a Revolução de Novembro_1974 serão o objeto da discussão que fechara o ciclo Simetrias.

Uma nova teoria, a QCD

- **H. Fritzsch and M. Gell-Mann**

“Current álgebra: quarks and what else?”

eConfC720906V2 (1972) 135

Proc. XVI International Conference on High-Energy Physics, Chicago, 1972; **arXiv:hep-ph/0208010**

(Aqui, é escrito o Lagrangeano da QCD, **$SU_c(3)$ local.**)

- **H. Fritzsch, M. Gell-Mann and H. Leutwyler**

“Advantages of the color octet gluon picture”

Phys. Lett. **B47 (1973) 365.**

Novo fenômenos no mundo dos quarks, a liberdade assintótica e o confinamento

- **D. J. Gross and F. Wilczek**

“Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories”

Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1343.

- **H. D. Politzer**

“Reliable perturbative results for strong interactions”

Phys. Rev. Lett. **30** (1973) 1346.

A previsão da 3ª família de quarks, (t,b), e a matriz-CKM

- **M. Kobayashi e T. Maskawa**

**“CP-violation in the renormalisable theory
of weak interaction”**

Prog. Theor. Phys. **49**, no. 2 (1973) 652.

Um grande teste da Teoria Eletrofraca, a descoberta das **correntes neutras**

- **F. Hasert et al.**

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

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

A Revolução de Novembro de 1974, o charm e o charmonium

- S. C. C. Ting et al.
“**Experimental observation of a heavy particle J**”
Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 1404.
- B. Richter et al.
“**Discovery of a narrow resonance in e^+e^- annihilation**”
Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 1406.
- B. Richter (**Nobel Lecture**)
“**From the PSI to charm: the experiments of 1975 and 1976**”
Science **196**, Issue **4296** (1977) 1286.

O Modelo-Padrão, $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$

- **L. Maiani**

“Recent developments in the Theory of Weak Interactions”

Riv. Nuovo Cim. Vol. 3 (N.2) (1973) 165.

- **J. Iliopoulos**

“Progress in gauge theories”

Proc. 17th International Conference on High-Energy Physics, ICHEP 74, Vol. III, p. 89.

- **J. Iliopoulos**

“Great Years”

11th. Rencontres de Moriond, 1976, p. 35.

Por que Modelo-Padrão **não é** a teoria-padrão ?

- #1. **19 parâmetros físicos** é um número excessivo para se pensar em uma teoria fundamental.
(O foco de nossa “ignorância” está no setor de Higgs: 11 parâmetros.)
- #2. O critério da naturalidade e o **problema da hierarquia de gauge**.
- #3. A origem do **parâmetro de massa no potencial de Higgs**.
- #4. A **grande diferença** entre as **constantes de acoplamento de Yukawa** dos quarks e léptons com o setor de Higgs.
- #5. A questão da **violação de CP no setor forte**.

Por que Modelo-Padrão **não é** a teoria-padrão ?

- #6. A **ausência de massa** e de **oscilações no setor de neutrinos** (**a matriz-PMNS**).
- #7. Não faz qualquer referência à origem e à constituição da **matéria e da energia escuras**
(M-P: 4% do Universo; 15% matéria usual, 85% matéria escura)
- #8. Não considera o setor de **interações gravitacionais**.
- #9. A **trivialidade quântica** e o **problema do polo de Landau**:
Higgses realmente elementares?

Por que Modelo-Padrão **não é** a teoria-padrão ?

- #10. Indícios provenientes do **BaBar (SLAC)**:
excesso não-previsto pelo M-P nos canais de decaimento do méson-Bbar ?
- #11. O limite superior no **momento de dipolo elétrico do elétron**.
- #12. A **assimetria matéria – antimatéria (Bariogênese)**
- #13. A **assimetria matéria fermiônica–matéria escalar**.

Atomismo radical:

quarks, singletons, preons (=pré-quarks)

- **1974** – **Pati** e **Salam** introduzem uma descrição dinâmica através de uma teoria de Yang-Mills, baseada em três simetrias **SU(4)** para os **preons (singletons !)**, estes **constituintes dos quarks e dos léptons**, matéria carregada do Modelo-Padrão.

Novos caminhos no universo dos quarks.

Quarks compostos?

“Are quarks composite?”

J. C. Pati and A. Salam

Phys. Lett. **59B** (1975) 265.

A elementaridade tem um limite?

**O nosso conhecimento da
estrutura do vácuo.**

O que vem surgindo de novo sobre os quarks nas Colaborações do LHC

- **Quarks escalares (squarks)** - ATLAS e CMS
- **Pentaquarks (ou moléculas sub-nucleares)** - LHCb
- **Tetraquarks (ou moléculas sub-nucleares)** - LHCb
- **Glueballs e Odderons** - TOTEM
- **Gluons massivos** - ATLAS e CMS
- **Plasmas de quarks e gluons** - ALICE
- **Unparticles** - ATLAS e CMS

O charme da matéria topless

- Descoberta dos **tetraquarks**:
- 2003, o Experimento Belle, no Japão: **X(3872)**;
- 2016, LHCb: **X(4274)**, **X(4500)**, **X(4700)**;
- 2020, LHCb: **X(6900)**, puramente **charmoso**.

- Descoberta dos **pentaquarks**:
- 2015, LHCb: **P_c⁺(4312)**, **P_c⁺(4380)**, **P_c⁺(4440)**, **P_c⁺(4457)**

- 2007, D0–FermiLab: **Ξ_b(5774)** (**dsb**), (**cascade-b**), **3 famílias presentes numa única partícula**.

Abrindo uma reflexão

- O. W. Greenberg
“Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons”
Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 598.
- *“Early in my professional career, I spent much time pursuing “useless” knowledge – an understanding of a quantum statistics that does not occur in Nature. But those studies led me the idea of quark color, a concept that proved to be quite useful.” (O. W. Greenberg)*

Matéria e interações no Modelo-Padrão

- Setor de léptons: e, ν_e μ, ν_μ τ, ν_τ

- Setor de quarks: u, d c, s t, b

- Bósons mediadores:

$W^+, W^-, Z^0 \sim SU(2)$

$\gamma \sim U(1)$

$G_{\mu a} \sim SU(3)$

- Bóson de Higgs: H .

São descobertos os mediadores W^+ W^-

- **UA1-Collaboration at the CERN SPS**

“Experimental observation of large transverse energy electrons with associated missing energy at $s = 540 \text{ Gev}$ ”

Phys. Lett. **B122** (1983) 103

- **UA2-Collaboration at the CERN SPS**

“Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN pp collider”

Phys. Lett. **B122** (1983) 476 (UA2-Collaboration at the CERN SPS).

É descoberto o Z^0

- **UA1-Collaboration at the CERN SPS**

“Experimental observation of lepton pairs of invariant mass of $95 \text{ Gev}/c^2$ 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.

48 anos após a previsão, o Higgs

- **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.

Filosofia e Meta- Φ , Φ e M

- A base meta- Φ do mundo elementar
- Para-que-serve \times O-que-significa
- “Penso, logo existo” \times “Existo, logo penso”
- Avaliação crítica das hipóteses científicas
- Elaboração de conceitos científicos
- Formulação de teorias
- Indução de interdisciplinaridade
- Promoção do diálogo Ciência - Sociedade

Em defesa da Ciência

- **“O valor da Ciência”**
Henri Poincaré, 1905
- **“A Ciência como vocação”**
Max Weber, 1917
- **“As bases metafísicas da Ciência Moderna”**
Edwin A. Burrt, 1931

Em defesa da Ciência

- **“A estrutura das revoluções científicas”**
Thomas Kuhn, 1962
- **“Conjecturas e refutações”**
(O progresso do conhecimento científico)
Karl Popper, 1963
- **“Ciência e Libertação”**
José Leite Lopes, 1969

Em defesa da Ciência

- **“The road to Reality”**
Roger Penrose, 2004
- **“A utilidade do inútil”**
Nuccio Ordine, 2013
- **“A realidade não é o que parece”**
Carlo Rovelli, 2014
- **“Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe”**
Roger Penrose, 2016.

Para interações acadêmicas fortes

- helayel@cbpf.br josehelayel@gmail.com
- www.professorglobal.com.br

Barra: Física Quântica

Playlists das palestras no Professor Global

- https://www.youtube.com/watch?v=BYjR2K_tGzs&list=PL117KmmwT24ikLhuX47eLpFFv7MmVu8gk
- https://www.youtube.com/playlist?list=PL117KmmwT24igAE-GI0tc_-_sfwaQx0ju