

h

In hoc signo vinces!

Dedico esta atividade no
Polo XII-MNPEF e PPGEnFis

ao

Prof. Marco Antônio Moreira,
por

2019

o próton, o vácuo quântico e os quarks

**“A incessante busca da elementaridade:
do elétron e neutrino aos quarks,
dos quarks aos preons”**

J. A. Helayël-Neto (Diracstão - CBPF)

**VIII Reunião do Polo XII - PPGEnFis
SET 2019**

Proposta desta Contribuição

- Contextualizar o nascimento e o desenvolvimento do projeto de busca pela elementaridade mais radical (influência marcante do pensamento **Diraqueano**), com ênfase na **Física dos NUs**
- Os entrelaces dos anos embrionários
- A construção de uma nova teoria física (a interpretação adquire uma nova dimensão: manifestação real e realidade virtual, a partir dos NUs)
- Os personagens e seus embates ~ a Crítica Genética

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

- 1865 ~ Maxwell ~ Eletrodinâmica Clássica
(sem conhecimento da carga fundamental!)
- c (Maxwell) ~ $c^2 = \epsilon_0^{-1} \mu_0^{-1}$
(propriedades do vácuo!)
- Luz ~ onda de natureza eletromagnética
(para Maxwell, natureza mais elementar é *linear*)
- 1887 – 1888 ~ os experimentos de Hertz (μ -ondas)

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)
- 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

- **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

- **Einstein e a Relatividade Restrita, c**
(*nova visão do tempo*)
(*simetria e grupo de Lorentz ~ partículas elementares*)
- **Einstein e o Efeito Fotoelétrico, h**
(*elementaridade no fenômeno luminoso; quantum de luz*)
- **Einstein e o movimento Browniano**
(*escala atômica da matéria*)

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
- 1913 - Igor Stravinski
“A Sagração da Primavera”

O marco – 1915

- 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 **virtual (a geometria, a métrica)**: um novo momento.

Não simplesmente uma nova Matemática trazida para a Φ , mas uma nova postura: **real x virtual**.

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 1919.)

O mundo elementar contém, agora, 2 partículas de matéria – o **elétron** e o **próton** – e interagem com os **quanta de luz**.

- **Pirandello**: O drama “**Così è, se vi pare**”
(é assim também na Física que está surgindo).

O marco - 1919

- Rutherford descobre o **próton** e prevê a existência do **nêutron**: novas **elementaridades**.
- Começa a se delinear a Φ de Partículas: a **elementaridade** que se impõe.

Os marcos – [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 de Partículas congrega, agora, 3 entidades
elementares, muito diversas, porém:**

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

O marco – 1925: ganha forma a MQ

- Um trabalho de “Arqueologia”:
foram encontrados 3 fragmentos do mundo sub-atômico,
o elétron, o próton e o fóton;
- a partir destes 3 repertos “arqueológicos”, constroem-se novas visões da Realidade, novas leis são compreendidas a partir das **“atualizações”** e das **virtualidades.**

O marco – [1925 – 1931]

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”**
- AGO'26: **introduz a estatística de Fermi – Dirac**
- DEZ' 26: **Transformation Theory** (seu trabalho preferido)
- FEV' 27: **Teoria quântica da radiação** (campos quânticos)

O marco – [1925 – 1931]:

Dirac e o mundo virtual

- 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

O marco - 1929

- **DEZ'29**: um novo conceito, **o vácuo quântico**
(o mundo virtual) (uma interpretação polêmica)
*Influência do vácuo quântico nos fenômenos
eletromagnéticos: efeitos não-lineares*
Euler-Heisenberg, Born-Infeld, Einstein-Hoffman,
- **Reconexão com Einstein_1917**: Λ x **vácuo quântico**
- **Herman Weyl**: “Teoria de Grupos e MQ”
- **Herman Weyl**: a **equação de Weyl** (adotada para os NUs)

O marco – [1930 – 1931]: Dirac e a elementaridade

- Dirac em 1930: **“The Proton”**, na Nature.
- Ainda em 1930: **“The Principles of Quantum Mechanics”**
- **Carta de Pauli de 4 DEZ 1930: hipótese de novas partículas, os V 's**
- **MAI'31: Dirac e a busca da elementaridade do e^-**
o clássico trabalho **“1-por-que-não-3”**:
Dirac antecipa, através de uma **construção matemática**, a existência de novas formas de matéria: a **anti-matéria** (anti-elétron e anti-próton), as **cargas magnéticas** e encontra uma formulação para o **$-e, 0, +e$** .

O marco - 1932

- **1932** – anunciada a descoberta do **nêutron (Chadwick)**
- **1932** – anunciada a descoberta do **pósitron (Anderson)**
- Neste mesmo ano, **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)**.

Elementaridade e Simetrias

- A lição que vamos construindo é que as estruturas mais elementares revelam as simetrias fundamentais do mundo microscópico:
- **SO(4)** e o átomo de H ($1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ $3s^2$ )
- a dualidade de De Broglie como uma simetria,
- a conjugação de carga na Equação de Dirac,
- a simetria **SU(2)** na escala sub-nuclear.

A Relação $\Phi - M$:

peça fundamental na busca da elementaridade ~ **simetrias**

- **Bacon:**

“For the things of this world cannot be made known without a knowledge of Mathematics.”

- **Russel:**

“Mathematics, rightly viewed, possesses not only truth, but supreme beauty.”

- **Dirac:**

“Beauty is the method.”

The Relation between Mathematics and Physics
PRS (Edinburgh) 59 (1938-1939), Part II, p.122.

A Relação Φ - M

- *“The physicist, in his study of natural phenomena, has two methods of making progress: (1) the method of experiment and observation, and (2) the method of mathematical reasoning. The former is just the collection of selected data; the latter enables one to infer results about experiments that have not been performed.” Dirac*
- Φ – M:
nova Matemática para trabalhar os nossos problemas,
e não criar novos problemas para a Matemática tradicional.

“A Beleza é o Método”

- *“What makes the theory of relativity so acceptable to physicists in spite of its going against the principle of simplicity is its **great mathematical beauty**. This is a quality which cannot be defined, any more than **beauty in art** can be defined, but which people who study mathematics usually have no difficulty in appreciating. The theory of relativity introduced mathematical beauty to an unprecedented extent into the description of Nature.” (Dirac, 1939).*
- **A Matemática como legítimo instrumento de investigação da Natureza: superação dos limites da tecnologia de uma época.**
- **A simplicidade e a estética como critérios formais para a construção de uma teoria.**
- **O estruturalismo de Dirac através da obra de Bakhtin (crença e busca contínua da **elementaridade**).**

A tenacidade e a crença em um princípio filosófico

- **Heisenberg em 1928:**

“The saddest chapter of Modern Physics is and remains the Dirac theory.”

“Up till that time I had the impression that in quantum theory we had come back into the harbour, into the port. Dirac’s paper threw us out into the sea again.”

A crítica de Pauli

- Pauli em 1932:

“Recently Dirac attempted the explanation of identifying the hole with antielectrons, particles of charge (+e) and mass same as the electron. The experimental absence of such particles We do not believe, therefore, that this explanation can be seriously considered.”

**Finalmente,
contexto estabelecido para o grande desafio dos NUs.**

Um grande desafio fenomenológico do final da década de '20

- O **decaimento- β nuclear** (nêutron ainda não descoberto)
- $X^Z \rightarrow X^{Z+1} + e^- + \text{(algo novo)}$
- Grande debate: **nova Φ ?** **matéria escura?**
- $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$
- $d \rightarrow u + e^- + \nu_e$

A carta de Pauli e a proposta dos NUs

Physics Institute Zürich
of the ETH Gloriastrasse
Zürich

December 4, 1930

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a **desperate remedy to save** the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely,

*the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call **neutrons**, that have **spin-1/2** and obey the exclusion principle and that further **differ from light quanta** in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event **not larger than 0.01 proton mass**.*

The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

... Finalizando a carta de Pauli

... I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time.

But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr. Debye, who told me recently in Bruxelles:

"Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes."

Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

- Signed W. Pauli.
- *[Translation: Kurt Riesselmann.]*

A elementaridade a partir da MQ

- **1932 - Carl Anderson descobre o pósitron**
- **1932 – Chadwick descobre o nêutron**
- **1934 - 1935 – Igor Tamm e Yukawa estudam as forças intra-nucleares entre prótons e nêutrons e preveem a existência dos hipotéticos mésostrons (mésons – π)**
- **1934 – Enrico Fermi e a Teoria das Interações Fracas**
- **1936 – descoberta dos μ^- por Anderson e Neddermeyer**

Fermi – 1933:

1ª teoria para o decaimento- β

- “Tentativo di una teoria dei raggi- β ”

La Ricerca Scientifica 2, fasc. 12, 1933

(passo crucial para consolidar a possibilidade de existência do ν e propõe a 4ª interação fundamental)

Recusado pela Nature: especulações muito distantes da realidade física!

- Adota a formulação da QED proposta por Dirac em '27, também seu próprio (Fermi) paper de 1929 e elabora interação

4-férmions: $\mathbf{H}_F = \mathbf{G}_F (\mathbf{p}^+ \gamma \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}^+ \gamma \mathbf{v})$.

- Revê o limite de massa do ν proposto por Pauli.
- Estima a constante de acoplamento fraca, \mathbf{G}_F .

A primeira seção-de-choque: ν + núcleo

- O projeto era já se tentar a detecção dos NUs. Mas, as limitações técnicas das décadas de '30 e '40 ainda não permitiam.
- Logo após a proposta do Hamiltoniano de Fermi para a incorporação do ν , Bethe e Peierls realizam o estudo teórico da seção-de-choque para o espalhamento do ν por núcleos atômicos: $(A, Z) + \nu \rightarrow (A, Z+1) + e^-$

Bethe – Peierls, 1934

- $\sigma_{BP} < 10^{-44} \text{ cm}^2$

H. Bethe and R. Peierls, “The Neutrino”, Nature 133 (1934) 532.

Este resultado implicava na impossibilidade de detecção do ν , pois seria necessária distância de cerca de 10^{14} km para capturá-lo.

- Estabeleceu-se quase um **consenso de que o ν seria uma partícula indetectável**, até que

.....Bruno Pontecorvo, 1946

- propôs o método rádio-químico, o método Cl-Ar, baseado na reação



B. Pontecorvo, Phys. Rev. 72 (1947) 246.

O método de Pontecorvo só veio realizado em 1998 na medição dos NUs solares:

B. T. Cleveland et al. , Astrophys. J. 496 (1998) 505.

A elementaridade em 1938

O encontro “**New Theories in Physics**”, Varsóvia, 1938:

- $e^- e^+$
- p (p^-)
- γ
- n (\tilde{n})
- $\mu^- \mu^+$
- $\pi^+ \pi^0 \pi^-$
- ν (**anti- ν**)

NUs, finalmente a descoberta

- A existência dos NUs ficou comprovada a partir de uma série de trabalhos publicados a partir dos experimentos de Cowan e Reines:
as seçõesde-choque medidas confirmaram prévios estudos teóricos e abriram uma nova era na Física Experimental, os aceleradores de neutrinos.
- **Reines recebeu o Prêmio Nobel de 1995:**
“ for the detection of the neutrino.”

Os trabalhos de Cowan e Reines

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

Phys. Rev. 92 (1953) 830,

Nature 178 (1956) 444 – a descoberta experimental,

Phys. Rev. 113 (1959) 273.

A segunda geração de NUs

$$\nu_{\mu}$$

- Descoberto em 1962 por Lederman, Schwartz e Steinberger, pelo que receberam o Nobel de 1988:
“Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos”
Phys. Rev. Lett. 9 (1) (1962) 36.
- ν_e e ν_{μ} são partículas diferentes:
 $\mu \rightarrow e^{-} + \gamma$ **não observado na Natureza**

A terceira geração de NUs

$$\nu_{\tau}$$

Descoberta anunciada em Julho de 2000, na Colaboração
DONUT (Direct Observation of the NU Tau) do FERMILAB:

K. Kodama et al., “Observation of Tau Neutrino Interactions”,
Phys. Lett. B504 (3) (2001) 218.

NU (e Marielle) presentes

- Fluxo de NUs na Terra: 5×10^{13} NU $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Energias entre **400 keV** e **18 MeV**
- Velocidades na faixa dos **99.9995% c**

- **85%** destes NUs são produzidos na reação
$$\mathbf{p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e}$$
- Os outros **15%** na reação
$$\mathbf{Be^7(4p,3n) + e^- \rightarrow Li^7(3p,4n) + \nu_e}$$

A elementaridade no pós-guerra

- **1946 – 1952** – constituição da **QED**, setor fundamental do **Modelo-Padrão das Partículas Elementares** (Tomonaga, Schwinger, Feynman)
- **1954** – Teorias de Yang-Mills-Shaw
- Década da descoberta da **estranheza** e **novas famílias de hádrons** (bárions e mésons).
- A **elementaridade** passa a ser investigada em 2 frentes: interações nucleares **fortes** e **fracas**.

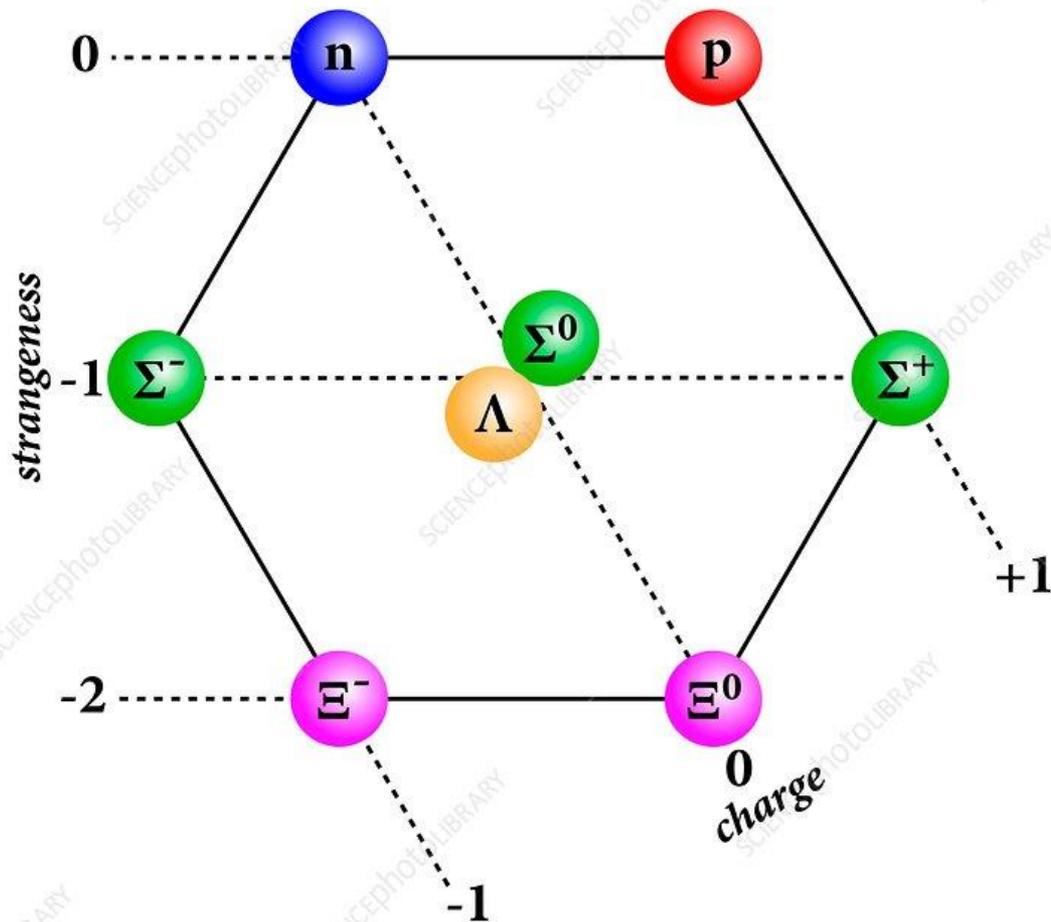
Simetrias e Visão da Natureza pela Φ e M

- Campo da Matemática (Álgebra): **Teoria de Grupos**
Grande impulso através da Mecânica Quântica
- Forças da Natureza ~ **Simetrias** (o que são)
- Leis de conservação da Natureza ~ **Simetrias**
- **Simetrias** ~ **Grupos**
(categoria de estrutura algébrica)
- **Grupos** ~ revelados na Natureza através de suas representações (famílias)

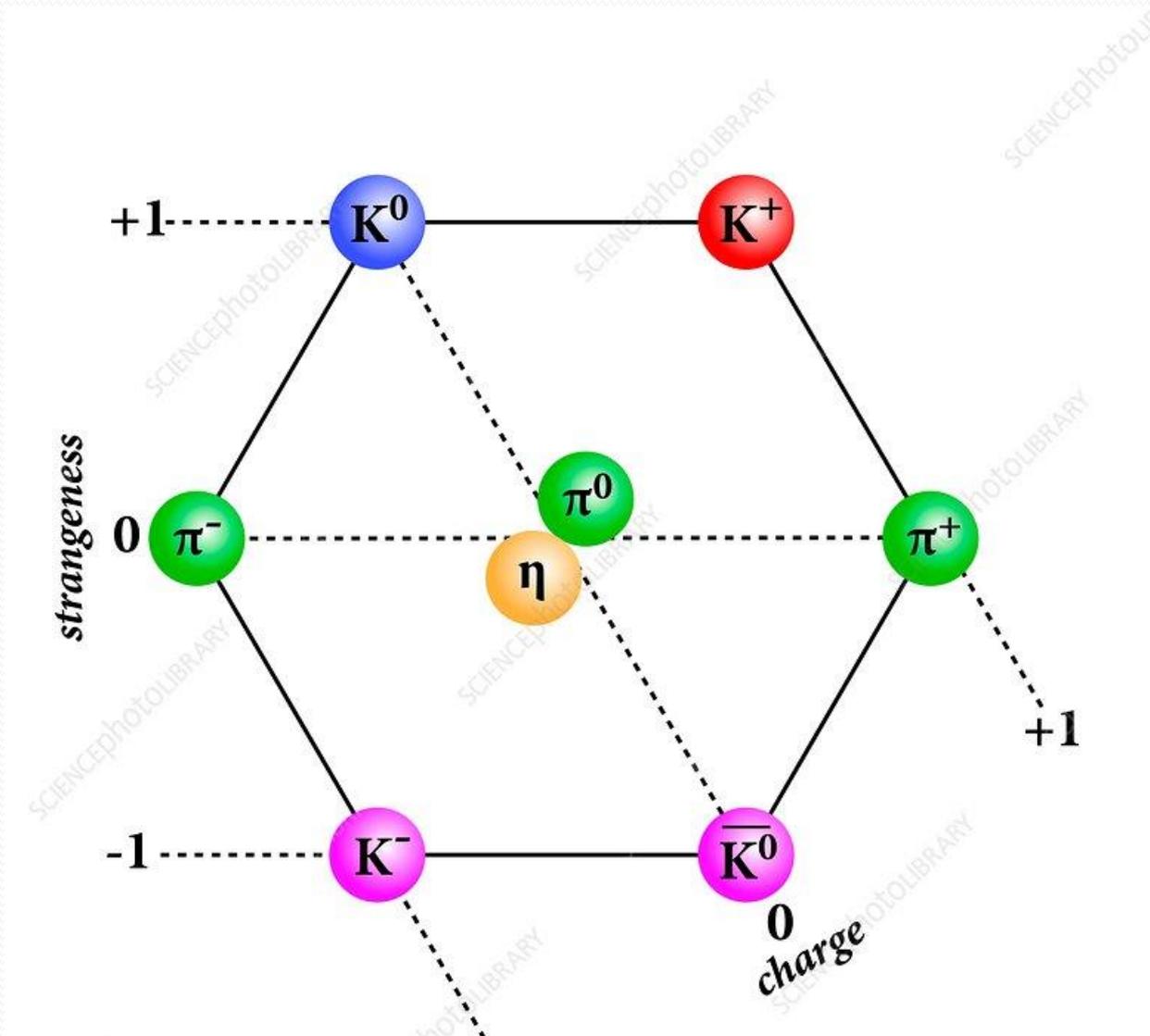
A elementaridade, novas simetrias: o eightfold way – um novo degrau

- **1961** - Gell-Mann e Ne'eman estabelecem a simetria **SU(3) de sabor** para os **hádrons**:
Eightfold way – octetes de **bárions** e **mésons**
- **SO(4) do Modelo Atômico: 2, 8, 18, 32,** (energias)
- **SU(3) do Eightfold Way: 3, 6, 8, 10, 15, 18,** (massas)
- **p, n, Σ , Ξ , Λ ~ octete bariônico**
- **π , K, K^0 , η ~ octete de mésons**

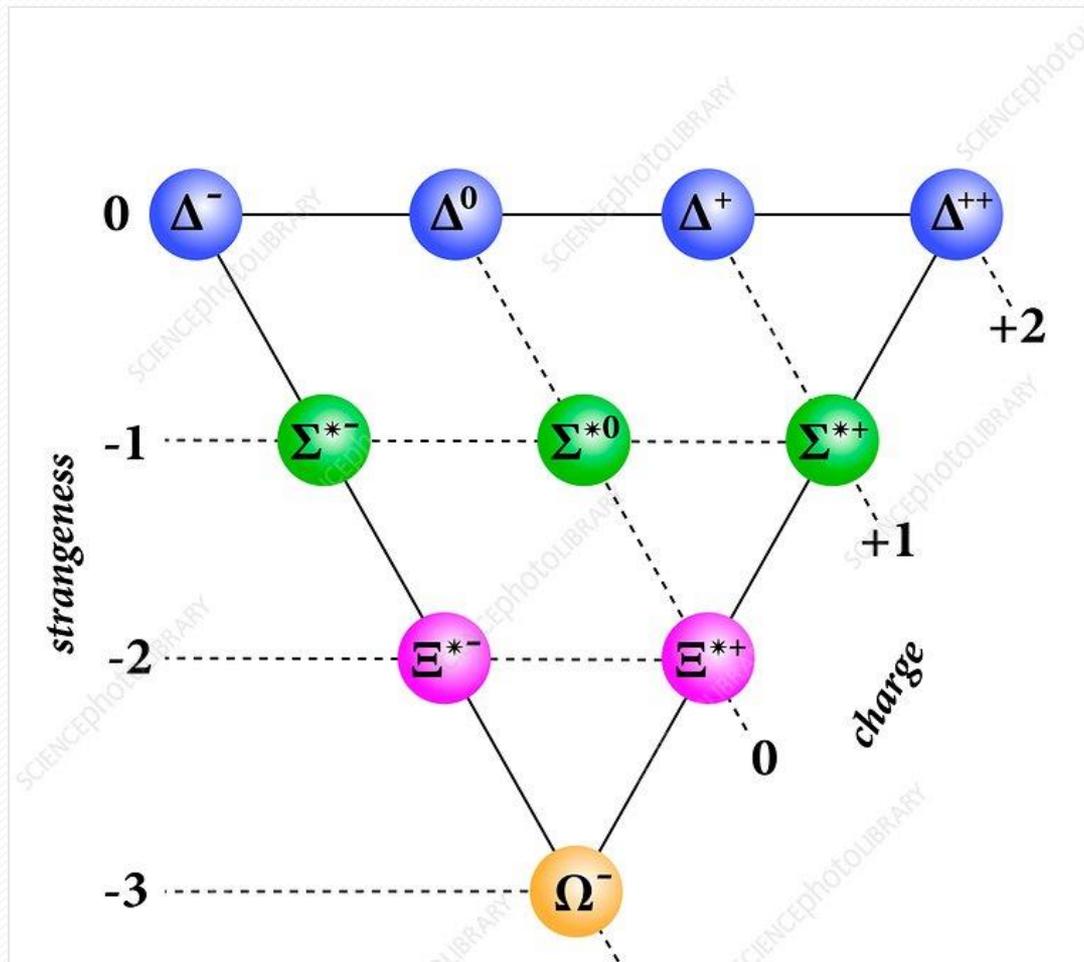
Um octete de bárions



Um octete de mésons



Um decuplete de bárions



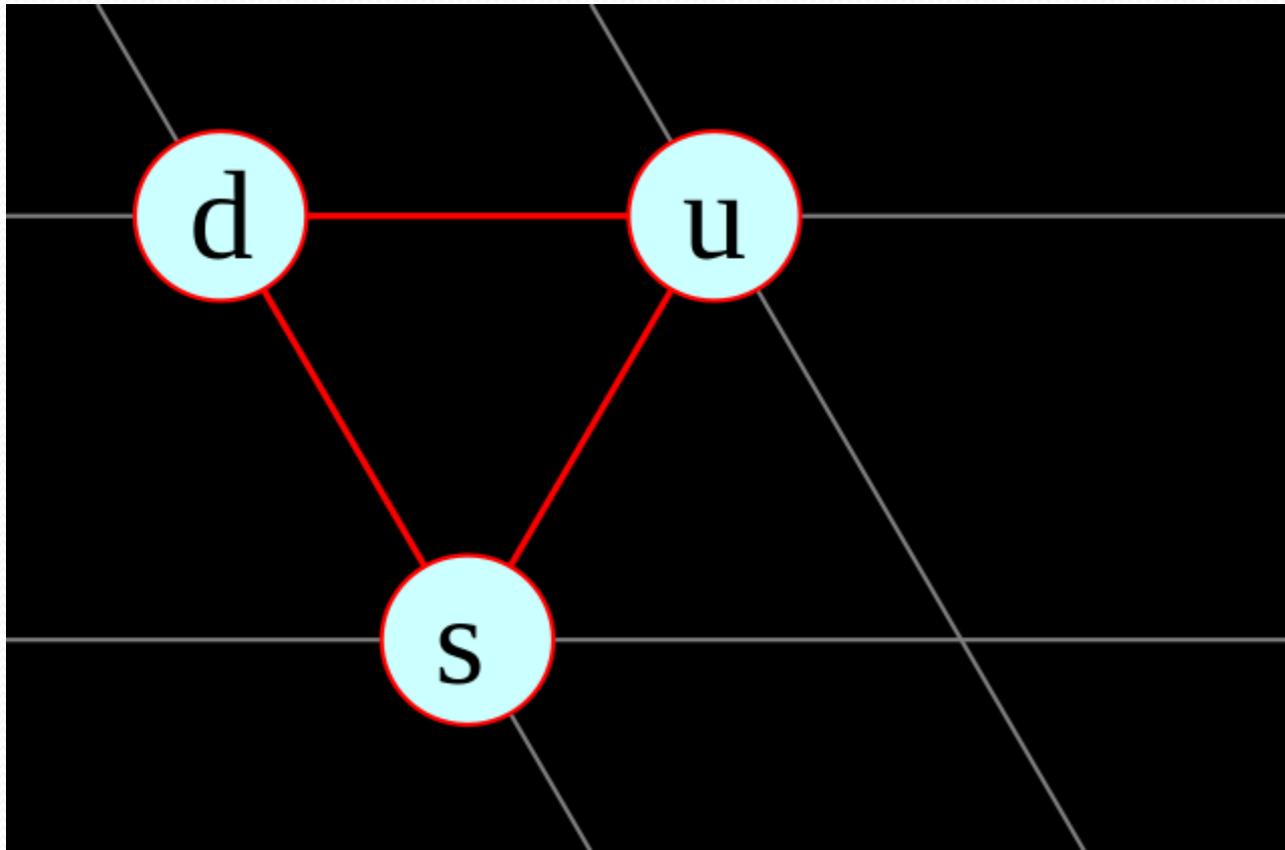
Dirac e uma elementaridade radical: singletons, a extrema elementaridade

- **1963** - **Dirac** retorna à **constante cosmológica** e estuda a simetria de **anti-de Sitter**, **SO(2,3)**:
- publica no **J. Math. Phys.**
- precursor da **SUSY** e **SUGRA**
- precursor da correspondência gauge-gravidade (**Maldacena, 1997: AdS-CFT**)
- **Singletons** como os constituintes mais elementares
- **Singletons** sob regime de **confinamento** em $M^{1,3}$

Os quarks e seus sabores (previsões)

- **1964** – **Gell-Mann** e **Zweig**, independentemente, propõem os **quarks** associados ao **triplete** de **SU(3)-sabor: u, d, s** (**argumentação teórica**): previsão confirmada em **1969** pelo experimento **DIS** (SLAC), revelando a constituição em quarks do próton e do nêutron.
- **Bárions ~ 3 quarks, Mésons ~ quark + anti-quark**
- **1964** – **Glashow, Iliopoulos** e **Maiani** preveem o quarto quark, o **charm**: descoberto apenas em **1974**.

Triplete de quarks de SU(3)



As 3 famílias e os 6 sabores

- [**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)*

Previsão teórica e detecção nos aceleradores

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

Prêmios Nobel de Física

Os quarks e seus sabores - *bis*

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

DIS e Liberdade Assintótica ~ 50 anos

- **1967 – 1969: os experimentos chamados de DIS**
(SLAC)
- **O scaling de Bjorken ~ simetria conforme**
- **1968: Scaling de Bjorken e a proposta dos pártons**
(Feynman)
- **1969: Bjorken e Paschos identificam os pártons como Quarks.**

Os quarks e seus sabores - *tris*

- **1972** – **Kobayashi** e **Maskawa** preveem a existência de mais um dublete de quarks, (**b**, **t**), com base no experimento de Cronin – Fitch de 1964, que revela **violação da simetria CP** em decaimentos fracos [**b** ~ **1978**, **t** ~ **1995**]
- **1973** – Surge a **QCD** (**Gross** – **Wilczek** e **Politzer**), na qual se introduz uma nova simetria, **SU(3)-cor**, que estabelece 3 estados distintos para cada sabor de quark ~ baseada no fenômeno da **liberdade assintótica**, observado no DIS do SLAC em '68, '69. O **confinamento** (**IR**) e a **liberdade assintótica** (**UV**)
Renasce a formulação baseada nos campos quânticos.

O marco do Higgs: [1958 – 1964]: gerando escala (um flashback)

- **Salam (1951):** um escalar fundamental como elo perdido
- **Nambu (1958):** supercondutividade na Φ de Partículas
(geração de escala)
- **Goldstone, Salam, Weinberg (1963)**
um novo mecanismo de se introduzir simetrias (SSB)
- **Higgs, Kibble, Englert, Brout (1964)**
SSB e a geração de massas para a matéria e os mediadores
- **O bóson de Higgs, os quarks e a formação da matéria**

Os quarks e seus atributos quânticos

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

- $I = 1, 2, 3$ (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.

Dos quarks, aos **singletons**

Dos **singletons**, aos 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.

**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

Um panorama da Física de NUs

- Os distintos períodos da Φ de NUs:

1930 – 1956, 1957 – 1997, 1998 – 2019.

1930 – 1956

NUs de Weyl ($m = 0$, spin alinhado com o momento linear):

$$i\hbar c \sigma^\mu \partial_\mu \psi = 0$$

NUs de Majorana (massa não-nula, mas NU = anti-NU):

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

E. Majorana, Il Nuovo Cim. 14 (1937) 171.

1956 – 1957: violação da paridade

1956: Conferência de Seattle

- Lee e Yang: **violação da paridade**

Phys. Rev. 104 (1956) 254.

Prêmio Nobel de 1957:

“.....for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles.“

1956 – 1957: violação da paridade

- Salam introduz a **simetria quiral** em associação com **NUs de massa nula**.
“**On parity conservation and neutrino mass**”
Il Nuovo Cim. Vol. V, No. 1 (1957) 299.
- Lee and Yang:
“**Parity non-conservation and a 2-componente theory of the neutrino**”
Phys. Rev. 105 (1957) 1671.

1956 – 1957: violação da paridade: a verificação experimental

- C. S. Wu et al.

“**Experimental test of parity conservation in β -decay**”

Phys. Rev. 105 (1957) 1413 (Letter to Editor)

Os NUs na Teoria Eletrofraca (1962 – 1997)

- A **simetria** famílias de quarks – famílias de léptons

[**u** **d**] [**c** **s**] [**t** **b**] + **anti-quarks**

[**e** ν_e] [μ ν_μ] [τ ν_τ] + **anti-léptons**

- **Massa nula, logo não se acoplam ao campo de Higgs**
- **Carga nula, logo não se acoplam ao fóton**
- **Interações: $L \nu_L W$ e corrente neutra: $\nu_L \nu_L Z^0$**

1973 – Um super-teste: correntes neutras

Notável contribuição experimental:

Descoberta das correntes fracas neutras

- F.J. Hasert et al,
“Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment”
Phys. Lett. 46B (1973) 138.

Uma nova era na $\Phi\nu$: massas, mixings e oscilações (1998 – 2004)

- **NUs massivos** e suas **oscilações** são um primeiro sinal de **nova Φ além do Modelo-Padrão**.
- **Importante**: a ideia não era nova. Pontecorvo já havia introduzido, teoricamente, a ideia de NUs massivos, mixings e oscilações em 1957:
JETP 33 (1957) 549.
- Porém,

Uma nova era na $\Phi\nu$: massas, mixings e oscilações (1998 – 2004)

- nos anos '80 e '90, com um grande acervo de novos experimentos com NUs solares e o significativo acúmulo de eventos detectados com NUs atmosféricos, adquiriu-se material suficiente para se testar as ideias de Pontecorvo de 4 décadas antes.
- Até que, em **1998, no Super-Kamioande, experimentos com NUs atmosféricos evidenciam a oscilação entre famílias de NUs, o que só é possível de estes forem massivos**. Isto significa que

Uma nova era na $\Phi\nu$:

massas, mixings e oscilações (1998 – 2004)

- os neutrinos com sabores, ν_e , ν_μ , ν_τ , possuem pequenas massas e são, na verdade, cada um deles, uma mistura de partículas neutras, ν_1 , ν_2 , ν_3 .
- Os neutrinos com sabores são conhecidos como auto-estados de gauge; os neutrinos ν_1 , ν_2 , ν_3 são os chamados auto-estados de massa.
- Não medimos as massas individuais, mas as diferenças entre os quadrados das massas: $\Delta m^2 = m_i^2 - m_j^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$
- As **massas individuais** devem se situar na faixa dos **2 a 3 eVs**.

Massa e natureza dos NUs

- Com as 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 **$0\nu\beta\beta$ – decay** como indicativo da natureza de Majorana dos NUs (**questão em aberto**):



Experimentos com NUs

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

Aplicações tecnológicas dos Nus

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

Para concluirmos, algumas considerações

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

1988 (Lederman, Schwatz e Steinberger)
descoberta do ν_μ

1995 (Reines): descoberta do ν_e

2002 (Davis e Koshiba): detecção de NUs cósmicos

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

Para concluirmos, algumas considerações

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

NUs, Φ , Meta- Φ e Filosofia

- **26 anos após a sua previsão é detectado:**
achava-se que seria indetectável, mas não descartável.
- **A meta- Φ do mundo elementar:**
Aristóteles (real) x Bergson (virtual)
- **“A utilidade do inútil”** - Nuccio Ordine
- **Para-que-serve *versus* O-que-significa**
- **“Why Science needs Philosophy”** - Carlo Rovelli et al.
Proceedings of the National Academy of Science,
Vol. 116, No. 10 (March 5, 2019) 3948

Física x Humanidades

Àqueles que desejarem interagir

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

Barra: Física Quântica

- Para mais informações:
República Fundamentalista do Diracstão,
CBPF, 3'ro andar, Ala – D.