

h

In hoc signo, vinces!

2019

o próton, o vácuo quântico e os quarks

**“A Física através de suas
constantes fundamentais”**

J. A. Helayël-Neto (Diracstão - CBPF)

VI EBEF_Edição 2019_Cariacica

Proposta desta Contribuição

- **Contextualizar o conteúdo da Física no quadro das constantes fundamentais da Natureza**
- **As suas inter-relações e as escalas das interações**
- **As constantes, as interações e as teorias físicas**
- **A percepção das teorias: as zonas claras e obscuras**
- **Grandes questões (de pesquisa) em aberto que podem motivar o ensino e o aprendizado**

O que estamos buscando

- #1: **atingir o Professor, centro de nossos esforço**
(reflexão para o curso de Licenciatura)
- #2: **motivar Professor e estudante através de uma**
visão menos disciplinar e mais epistemológica
- #3: **promover a aproximação com outras áreas**
- #4: **rever a relação entre a Matemática e a Física,**
entre a Física e demais disciplinas.

Pensando no Professor

- **“A Relatividade Especial no EM em um contexto de Aprendizagem Significativa”**
Anderson de Souza da Silva, MNPEF – UNIRIO
- **“A Física Quântica no EM em um contexto de Aprendizagem Significativa”**
Antônio Carlos Paiva Rêgo, MNPEF – UNIRIO
- **“A Física em uma aproximação interdisciplinar contribuindo para a formação de Professores de Ciências”**
Nathalia Mariz do Amaral,
uma coorientação com o Prof. Demison Motta, MNPEF - UNIRIO

Subsídios para esta reflexão

- A experiência de 24 anos em pré-vestibulares sociais e outros espaços não-formais
- A própria experiência como pesquisador do CBPF: PROVOC, IC e mesmo na P-G
- A experiência mais recente no MNPEF da SBF
- A experiência de encontros marcantes durante minha formação

Que estudante buscamos formar

- **Cooperatividade em projetos**
- **Reflexão e crítica**
(mais atividade, menos passividade)
- **Habilidade em estabelecer conexões entre conteúdos**
- **Desenvolvimento da abstração (real x virtual)**
- **O significado da Ciências, das teorias e seu valor como conquista abstrata e como materialização: cidadão posicionado frente à Ciência**

Parceiros essenciais no processo

- **Relação Física – Filosofia – Metafísica**
- **Repensar metodologias e abordagens da Física**
- **Valorização do contexto histórico**
- **Sublinhar o debate científico e a pluralidade de ideias**
- **O papel social e político da Física**
[Φ não pode ser neutra; **nem o γ e o v são tão neutros**]

É preciso repensar e reformular

- **A formação dos Licenciados**
- **A formação dos Bacharéis**
- **A relação ensino – pesquisa**
- **Enfatizar o significado da Ciência desde o EF**
- **A dialética útil – inútil em Ciência**

Sugestão (entre tantas) de leituras

- **“A estrutura das revoluções científicas”**
Thomas Kuhn
- **“A utilidade do inútil”**
Nuccio Ordine
- **“Why Science needs Philosophy”**
C. Rovelli et al.
Proceedings of the National Academy of Science,
Vol. 116, No. 10 (March 5, 2019) 3948

As nossas constantes fundamentais

- $G_N = 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$
- $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
- $\Lambda = 8\pi G_N c^{-4} \rho_{\text{vac}} = 1.11 \times 10^{-52} \text{ m}^{-2}$ [Planck, 2018]
- $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
- $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$
- $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

As interações fundamentais e suas escalas

- **Gravidade - estruturas**
- **Eletromagnetismo – estruturas e luz**
- **Forças nucleares (coesão e desintegração):
estruturas e suas transformações**
- **A origem destes campos de força**

As constantes e sua demarcação de categorias de fenômenos

- Gravidade - estruturas $\sim G_N \quad c \quad \Lambda$
- Eletromagnetismo – estruturas e luz $\sim e \quad c$
- Forças nucleares (coesão e desintegração):
estruturas e suas transformações $\sim e \quad c \quad h$
- O papel da constante de Boltzmann $\sim k_B$
- “A new basis for Cosmology”, Dirac
PRSL 165 (1938) 199.

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*)
Já com Maxwell: elementaridade ~ unificação
- 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** (45 anos depois, o 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; realidade x aparência)

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.
- A **elementaridade** arrasta consigo a ideia de **unificação**.

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”.

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**
- 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.”

O Filósofo, O estilista

- “Physical science and philosophy.”
Nature **139** (1937) 1001.
- “The relation between Mathematics and Physics.”
Proc. of the Royal Society (Edinburgh) **59** (1939) 122.
- “A new notation for Quantum Mechanics.”
Proc. Cambridge Philos. Soc. **35** (1939) 416.

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**

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**)

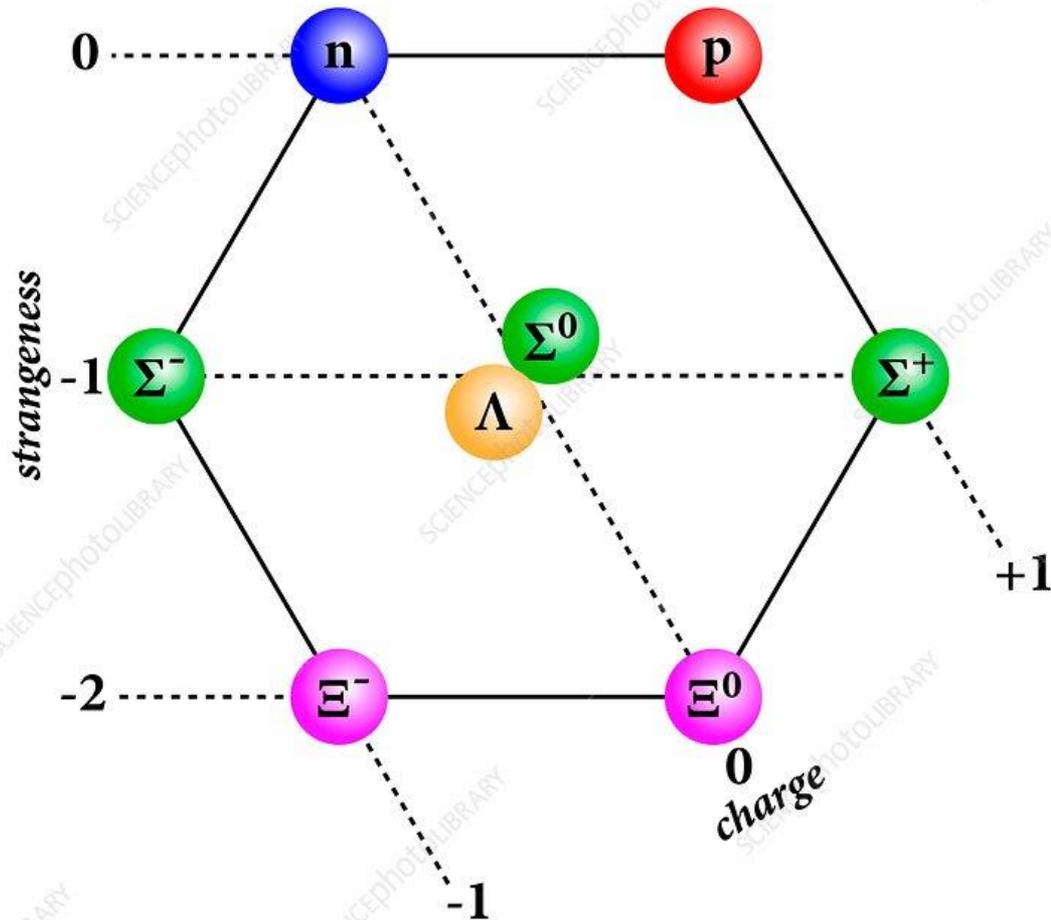
Simetrias e Visão da Natureza pela Φ e M

- 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)

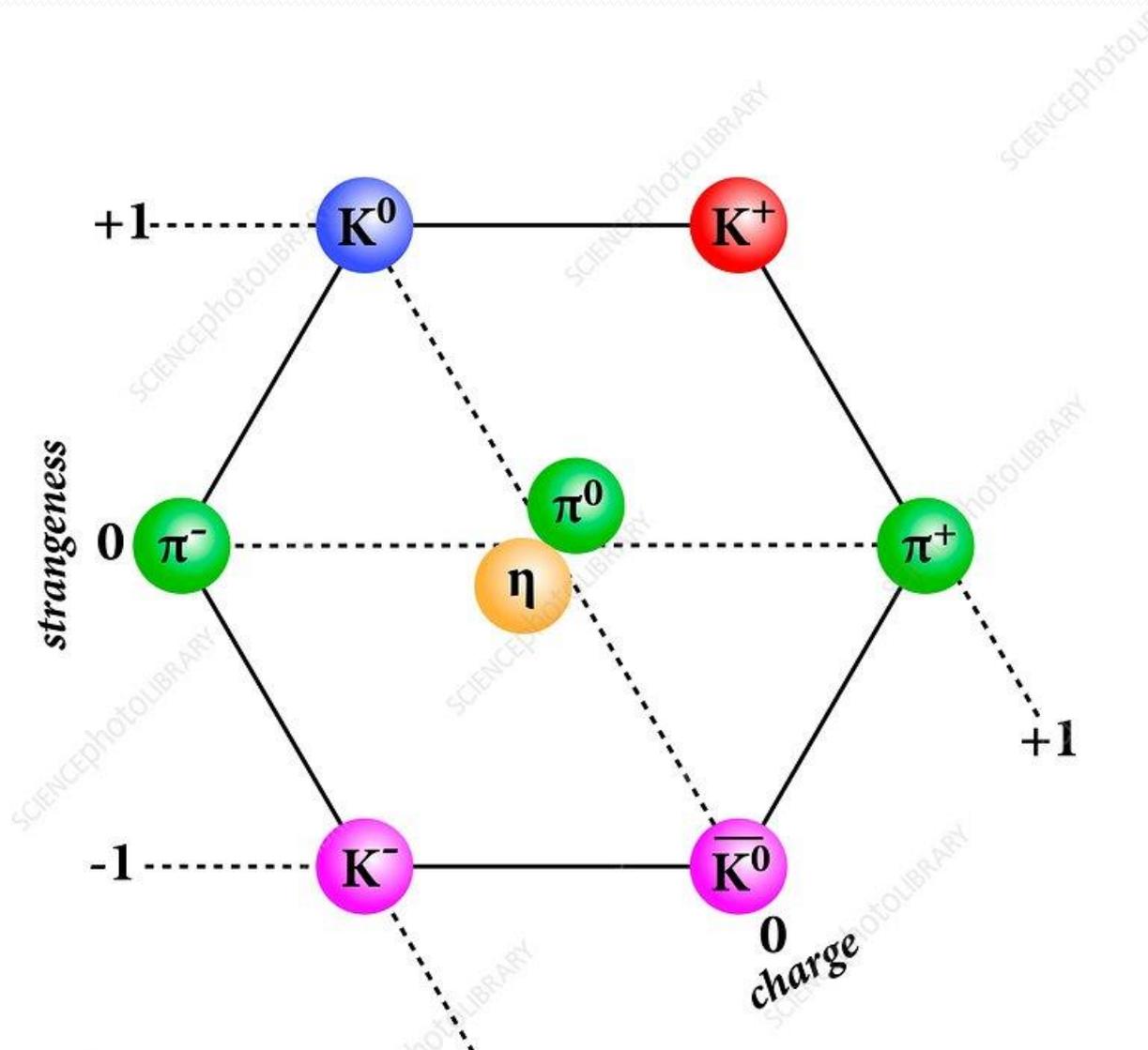
A elementaridade, novas simetrias: o eightfold way – um novo degrau

- **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**

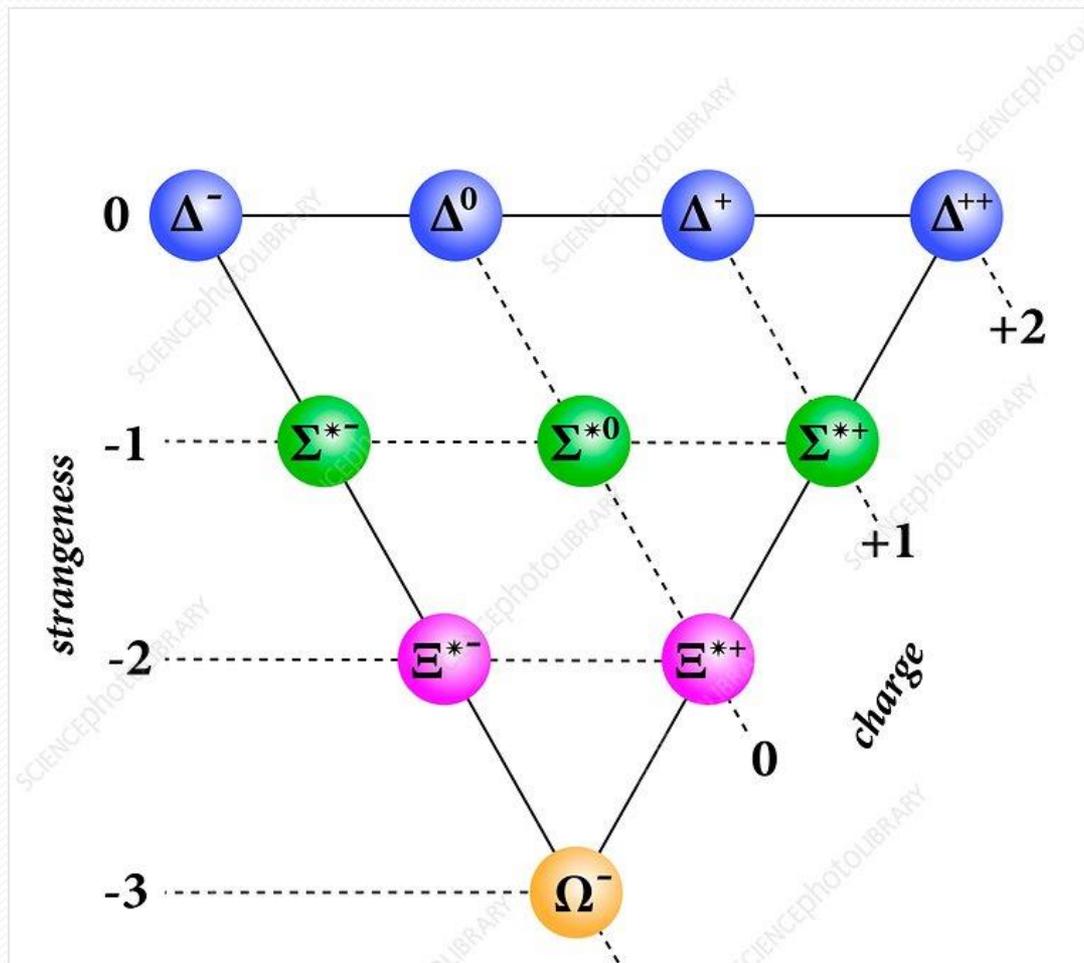
Um octete de bárions



Um octete de mésons



Um decuplete de bárions



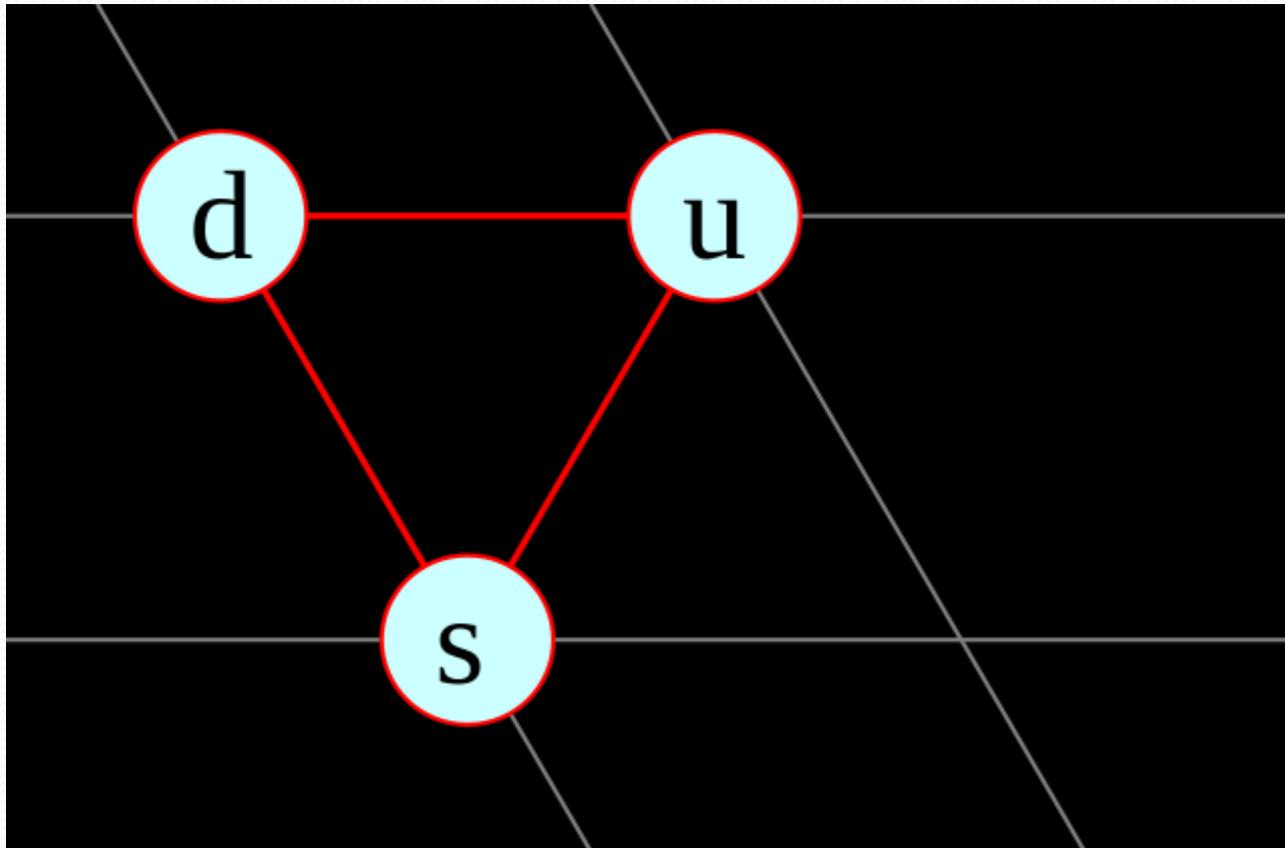
Dirac e uma elementaridade radical: singletons, a extrema elementaridade

- **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

G_N

- **A interação gravitacional**
- **Lei de Kepler e o problema da matéria escura**
- $G_N M R^{-2} \sim m s^{-2} \sim$ campo gravitacional
- $G_N M R^{-1} \sim m^2 s^{-2} \sim$ [velocidade de escape]²
- $[G_N M R^{-1}]^{1/2} > c \sim$ buraco negro (M-87)
- $G_N M c^{-2} \sim$ comprimento (horizonte de eventos)
- $G_N \times c \sim$ violando o Princípio da Ação – Reação
- **A origem da massa ~ a Física do Higgs**

C

- **O absoluto que envolve tempo e espaço**
(unificação espaço – tempo)
Einstein e o absoluto (1905) (questão filosófica)
Reaparece a questão em 1917, com a constante Λ
- **Uma nova geometria imposta pelo absoluto da luz:**
(um princípio de simetria)

$$x = ct, \quad x' = ct', \quad c^2 t^2 - x^2 = c^2 t'^2 - x'^2$$

$$t' = \alpha t + \beta x, \quad x' = \gamma t + \delta x$$

chegamos às transformações de Lorentz
e suas consequências.

G_N C

- Ondas gravitacionais
- Buracos negros
- A galáxia M-87

Buscando compreender o absoluto da luz

e

- **A carga fundamental e o fenômeno elétrico**
- **O conceito de campo e o campo eletrostático**
(analogia com o campo gravitacional ~ unificação)
- **Corrente elétrica e campo magnetostático**
- **A discussão sobre a carga magnética**

- $[E] = [\text{velocidade}] \cdot [B]$
- $\Delta E \Delta x^{-1} = - \Delta B \Delta t^{-1}$ (Faraday – Lenz)

- **A propagação de uma onda eletromagnética**

O absoluto **c** e a estrutura do vácuo

- **c (Maxwell)** $\sim c^2 = \epsilon_0^{-1} \mu_0^{-1}$
(propriedades do vácuo!)
- **Efeitos não-lineares entram em ação**
- **Cargas aceleradas e o Bremsstrahlung**
- **O colapso do átomo na visão clássica**
(a zona escura da Teoria Eletromagnética)

Uma nova constante, \hbar - uma nova Φ

- O átomo de Bohr, a escala gravitacional e a escala do eletromagnetismo
- $e^2 (4\pi\epsilon_0\hbar c)^{-1} = \alpha = (137)^{-1}$: dimensões desaparecem
- $m_e^2 c^3 e^{-1} \hbar^{-1} \sim 10^{17} \text{ NC}^{-1}$
- $m_e^2 c^2 e^{-1} \hbar^{-1} \sim 10^9 \text{ T}$
- $\hbar \cdot (m_e c^2)^{-1} \sim 10^{-21} \text{ s}$
- $[\hbar G_N c^{-3}]^{1/2} \sim 10^{-33} \text{ cm}$ (L de Planck)
- $[\hbar G_N^{-1} c^5]^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}$ (Escala de Planck)

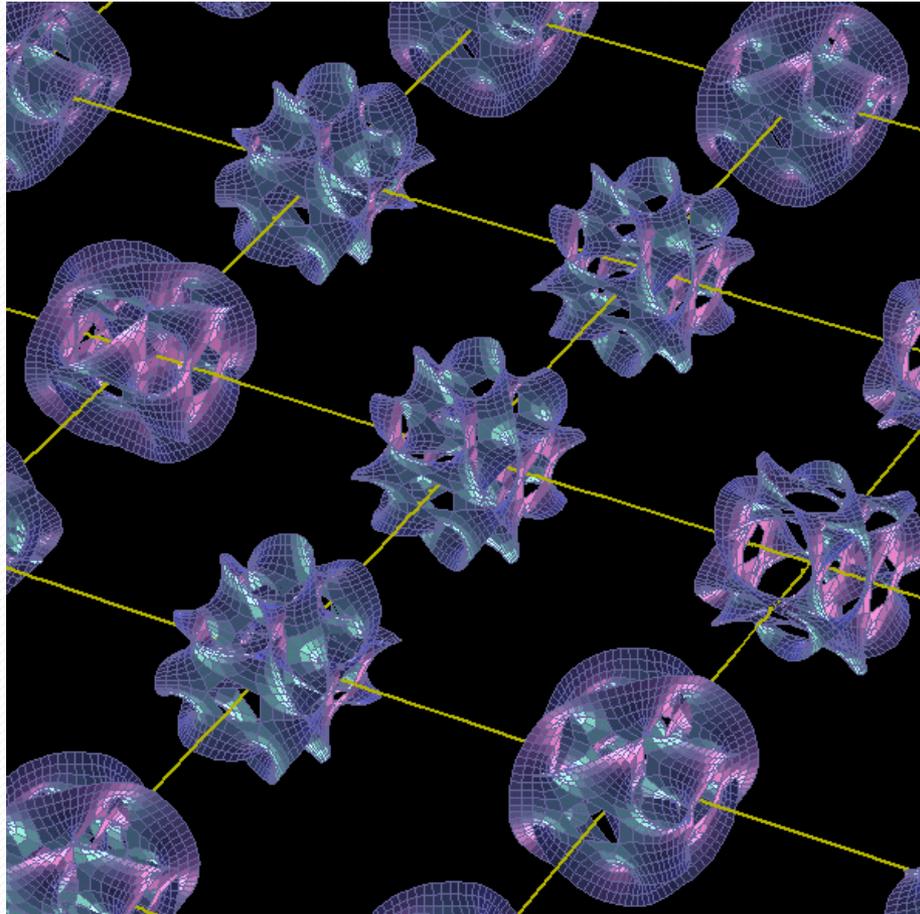
O vácuo quântico e a constante cosmológica, Λ

- $\Lambda = 8\pi G_N c^{-4} \rho_{\text{vac}}$
- Grande desafio: o problema da constante cosmológica
- O problema da energia escura
- $\Lambda \cdot \text{sqrt}(G_N \hbar^3 c^{-5}) \sim \text{massa} \sim \text{gráviton massivo}$

O Vácuo teria uma estrutura?

- Temos **confirmações experimentais** na Física Atômica da chamada **flutuação do Vácuo** (ou *flutuação de ponto-zero*):
Lamb shift (1947)
Efeito Casimir (1948; medição **direta** em 1997).
- Porém, a estrutura do **Vácuo** seria **sensível à gravidade**?
Experimentos com átomos também mostraram que **sim**
(Braginskii e Panov, 1971 – 1972).
- Isto reforça a ideia de **relacionar efeitos quânticos da matéria com gravitação**, aparentemente duas físicas distintas.

Representação pictórica do vácuo-q



Como um filme da “nouvelle vague”.....

- **e o plano inclinado ?**
- **as roldanas ?**
- **o atrito ?**
- **o calorímetro ?**
- **as lentes e espelhos ?**
- **os circuitos e as resistências combinadas ?**
- **qual foi a mensagem ?**
- **Vamos tirar as nossas conclusões.**

Àqueles que desejarem interagir

- helayel@cbpf.br
josehelayel@gmail.com
- www.professorglobal.com.br
Barra: Física Quântica