

# “Supersimetria: o que e quem são as partículas supersimétricas?”

[ O caminho das **simetrias** para a **SUSY** ]

LISHEP

Março 2023

# 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**, 1952.

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

**D. Gross**, 1999.

# A essência matemática da matéria:

## simetria ~ o ápeiron

- *“Em termos epistemológicos, penso que a ciência só alcança seu nível mais básico quando consegue interpretar algo em termos de **simetria**.”*

**Jacques Monod, 1965.**

# 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 **άπειρου**

- Ao introduzir o **άπειρον**, **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.**

# 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.)*

**O marco – 1905:**

**O absoluto da luz e uma nova simetria**

- **Einstein e a Relatividade Restrita, c**

**“On the electrodynamics of moving bodies”**

**Ann. der Phys. (ser.4) 17 (1905) 891.**

## O marco – 1915

(de Euclides para Riemann, nova simetria)

- 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  $\Phi$ , mas uma nova visão de mundo: **Riemanniano**.

# 1918, os Teoremas de (Emmy) Noether

- A tripla concertação do Teorema de Noether:

um **princípio variacional** (por exemplo, uma ação)

**simetria contínua**

**simetrias ~ leis de conservação, atributos quânticos**

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

## Paul Dirac – O marco 1928:

Uma nova simetria e a anti-matéria, primeira predição de partícula a partir de uma simetria

- 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

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

$\hbar$

$c$

$e$

$\alpha$

# 1932, grandes descobertas e outra 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 simetria SU(2) de spin isotópico e novas partículas previstas

- **1934 – I. Tamm**  
“Exchange forces between neutrons and protons and Fermi’s theory”  
Nature **133** (1934) 981.
- **1935 – H. Yukawa**  
“On the interaction of elementary particles”  
Proc. Phys. Math. Soc. Jap. **17** (1935) 48.  $\pi^+$   $\pi^0$   $\pi^-$
- **1937 – E. Wigner**  
“On the consequences of the symmetry of the nuclear Hamiltonian on the spectroscopy of nuclei”  
Phys. Rev. **51** (1937) 106.

# 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 $\Phi$ 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.

# Simetrias e $\Phi$ Experimental de Partículas

## (Anos '40 – Simetrias reveladas)

- **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 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.

# 1954, Yang - Mills – Shaw

## Um novo olhar sobre as simetrias

- **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.

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

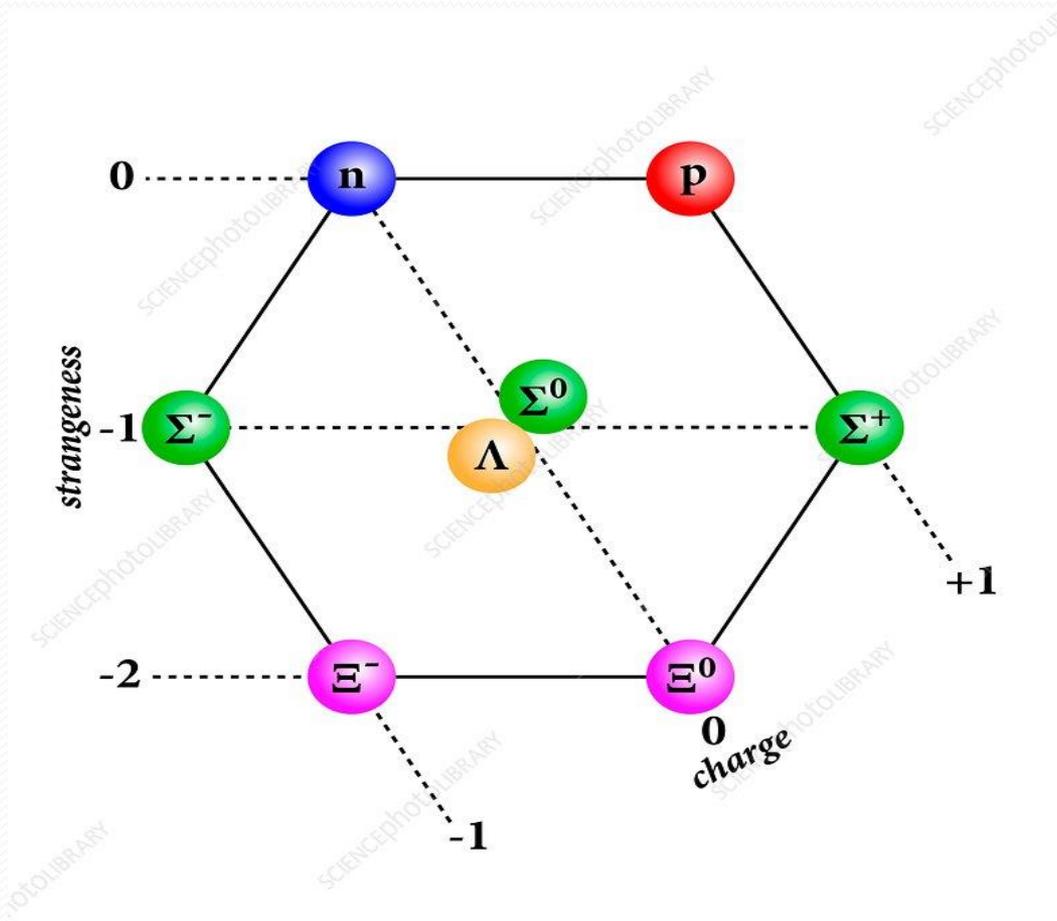
- de SU(2) a SU(3) – o **eightfold way**
- $\underline{3} \times \underline{3}^* = 1 + 8 \sim$  os quarks e anti-quarks
- um novo número quântico – a cor
- a violação de CP e a origem das massas
- a simetria de gauge e a origem das massas (**bóson de Higgs**)
- Cabibbo e o mixing de quarks (antecipando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

# SU(3): o Eightfold Way

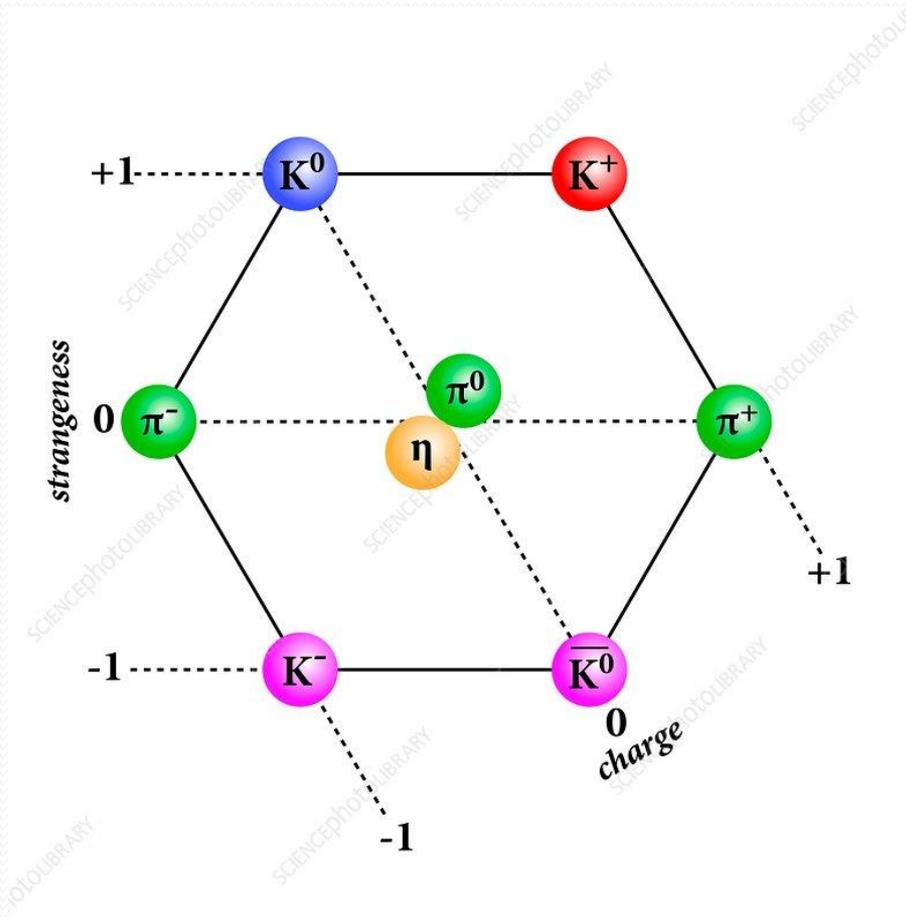
## Estranheza (nova qualidade de matéria)

- **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)**

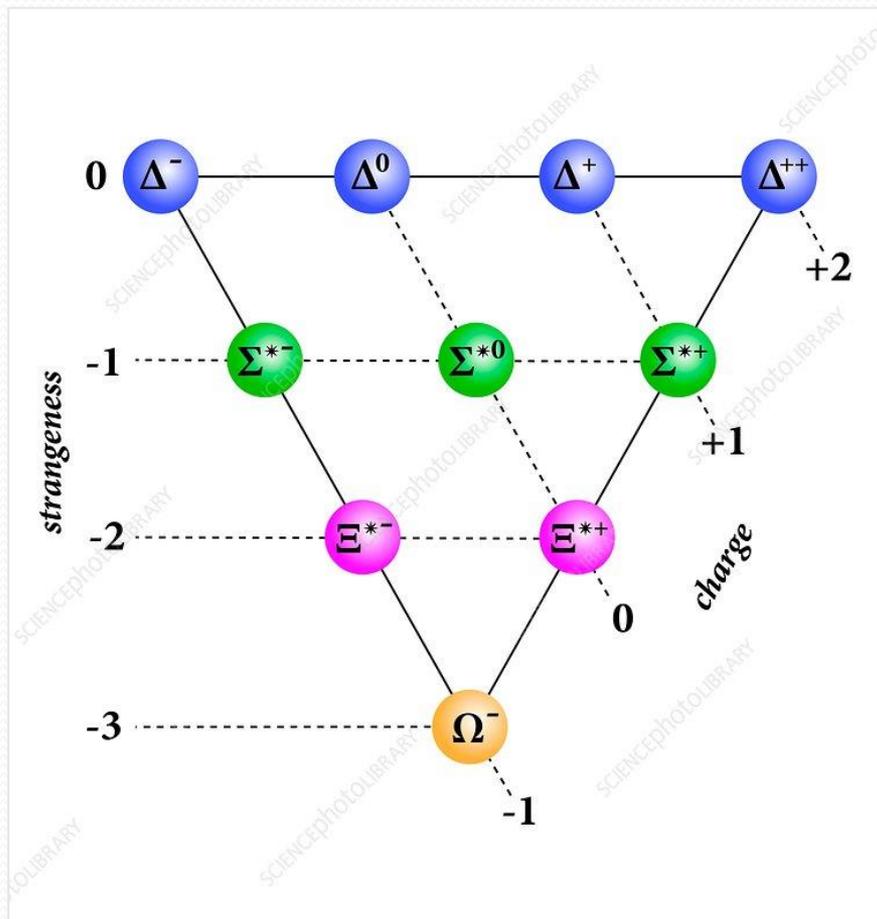
# O octete de bárions



# O octete de mésons



# O decuplete de bárions



# O DNA da simetria SU(3)

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

**M. Gell-Mann**

**“A schematic model of baryons and mesons”**

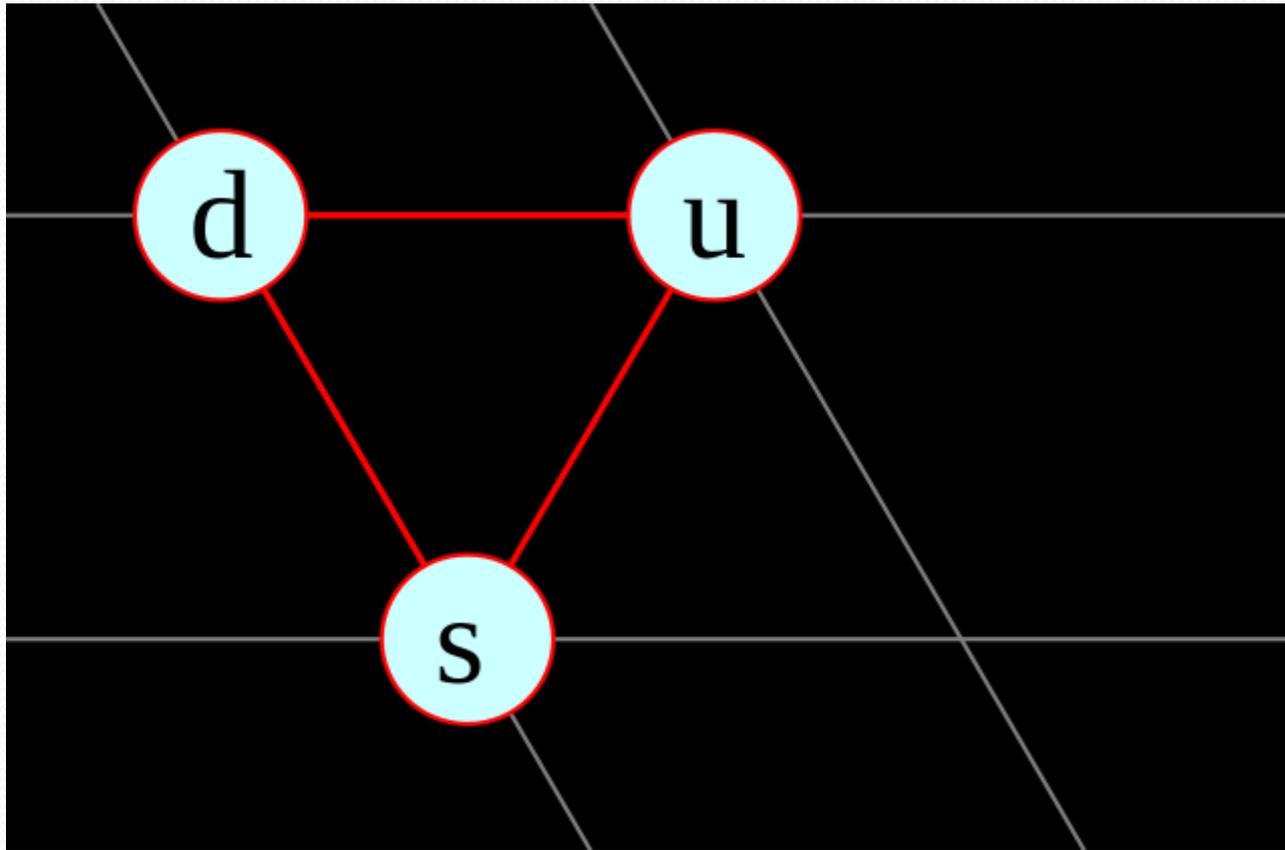
Phys. Lett. **8**, No. **3** (1964) 214

**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 1977 (**b**) e em 1995 (**t**)*

# 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.

# Agora, a liberdade assintótica (50 anos)

- **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**.

# Os parâmetros físicos do Modelo-Padrão (19 parâmetros; 1 único com dimensão)

- As 3 constantes de acoplamento das simetrias de gauge,  
 $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  ( $g_s, g, g'$ ) [ $e = e(g, g')$ ]
- Os 2 parâmetros do potencial de Higgs:  $m_H^2, \lambda$
- As 3 constantes de acoplamento de Yukawa dos léptons carregados:  $y_e \cdot y_\mu \cdot y_\tau$ .
- As 6 constantes de acoplamento de Yukawa dos quarks:  $y_u \cdot y_d \cdot y_c \cdot y_s \cdot y_t \cdot y_b$ .
- Os 3 ângulos de mixing e 1 fase da matriz-CKM
- O parâmetro- $\theta$  do vácuo da QCD.

# As 3 interações do M-P

- $V_{em} \sim e^2/r$

alcance infinito,  $e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137.035999206$

- $V_{forte} \sim g_s^2 e^{-mr}/r$

alcance  $\sim 1 \text{ fm} = 10^{-13}\text{cm}$ ,  $g_s^2/4\pi \sim 14$

- $V_{fraca} \sim g_w^2 e^{-Mr}/r$

alcance  $\sim 10^{-3} \text{ fm} = 10^{-16}\text{cm}$ ,

$g_w^2 E^2/M^2 \sim 10^{-8}$ , para  $E = 1 \text{ GeV}$

# Reverendo a simetria espaço-tempo; por quê?

- A **Relatividade** e a **Supersimetria (SUSY)**

$$\text{SUSY} = (\text{Relatividade})^{1/2}$$

- **Reais motivações:**

**Matemática**, **Fenomenologia** e **Experimentos**

**Novas partículas** ou simplesmente **novos efeitos**?

**Por que novas partículas surgem a partir da SUSY?**

# Em que escalas buscar a SUSY?

- **SUSY em um nível mais fundamental**  
(*escala das partículas fundamentais*)
- **SUSY em um nível menos fundamental, mais efetivo**  
(*escalas atômica e nuclear*)
- **SUSY em materializações de natureza topológica**  
(*monopolos, sphalerons*)
- **SUSY realizada de forma emergente**
- **SUSY em versão tecnológica**  
(*recente dispositivo supersimétrico de LASER*)

# Os objetivos desta discussão

- #1. **Localizar os mais jovens**, iniciantes, na área;
- #2. observar o **contexto dos anos '60 – '70** em que surge e com que expectativas;
- #3. a **fases** e os **tópicos** que a área vem focalizando ao longo, sobretudo, dos **últimos 47 anos**;
- #4. apresentar a **extensão** da área para **além da  $\Phi P_s$** ;
- #5. e se a **SUSY não for revelada no LHC?**

# O contexto em que emerge a SUSY

- **O cenário de final dos anos '60 e início dos anos '70 em que a SUSY emerge como extensão da simetria de Poincaré:**
- **teoria da matriz-S e bootstrap;**
- **o DIS (SLAC) e a liberdade assintótica;**
- **intensa atividade em torno da simetria conforme;**
- **a Revolução de Novembro (1974) e o charm;**
- **renormalização das teorias de YM;**
- **consolida-se o Modelo-Padrão com suas manifestas limitações.**

# Enfatizando o contexto em que surge a SUSY: a simetria conforme

- **M. Flato and D. Sternheimer**

“Remarques sur les automorphismes causals de  
l’espace-temps”

Comptes-Rendus Acad. Sci., Paris, **263 A** (1966) 935.

- **S. Coleman and J.E. Mandula**

“All possible symmetries of the S-matrix”

Phys. Rev. **159** (1967) 1251

*(a contextualização do Teorema de Coleman-Mandula)*

# O contexto em que surge a SUSY

- “Scale invariance, conformal invariance, and the high-energy behavior of scattering amplitudes”  
Phys. Rev. **D2** (1970) 753 (com **D. J. Gross**).
- “Conformal invariance and the energy-momentum tensor”  
Springer Tracts in Modern Physics **60** (1971) 1.

# Um pouco mais sobre o contexto

- **O estudo da simetria conforme aparece, no final dos anos '60, como um outro marcante papel dos princípios de simetria na formulação da dinâmica dos campos quânticos.**
- Lembrando que o Grupo Conforme é o grupo máximo dos automorfismos causais locais de espaços-tempo pseudo-Riemannianos.
- **Excelente referência: (1973).**  
“Conformal álgebra in space-time and operator-product expansion” – Springer Tracts in Modern Physics, 67  
**S. Ferrara, R. Gatto and A. F. Grillo.**

# SUSY “fora da caixinha”

- Sendo ainda uma **questão em debate** e aguardando a sua **validação na escala mais fundamental** das interações e das partículas, a **SUSY e técnicas supersimétricas** encontram aplicações em várias frentes:

- **Física Atômica e Física Nuclear**

“Dynamical supersymmetries in nuclei”

F. Iachello

Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 772.

# SUSY “fora da caixinha”

- **“Supersymmetry in nuclear physics”**  
F. Iachello  
Physica **D15** (1985) 85.
- **Teorias do tipo-BCS: Y. Nambu**  
**“Fermion-boson relations in BCS-type theories”**  
Physica **D15** (1985) 147;  
**“Supersymmetry and Superconductivity”**  
Proceedings EFI–85–86, University of Chicago,  
November, p. 390.

# SUSY “fora da caixinha”

- Solubilidade de potenciais em MQ e Mecânica Estatística

## “Supersymmetry and Quantum Mechanics”

F. Cooper, A. Khare and U. Sukhatme

Phys. Rep. **251** (1995) 267;

## “Supersymmetric methods in quantum and statistical physics”

G. Junker

Springer, 1996.

# SUSY “fora da caixinha”

- **Redes óticas planares**

**“Simulating the Wess-Zumino supersymmetric model in optical lattices”**

Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 150605

- **Sistemas não-lineares**

**“Interplay between parity-time symmetry, supersymmetry and non-linearity: an analytically tractable case example”**

P. G. Kevrekidis et al.

Phys. Rev. **E92** (2015) 042901, **arXiv:1507.03211 [nlin.PS]**.

# SUSY “na caixinha” da $\Phi P_s$ e Interações Fundamentais

- A relação **SUSY**  $\sim$   **$\Phi P_s$**  deve ser fundamentada nas motivações fenomenológicas para se considerar **SUSY na escala do TeV**.

(**Estabilidade do vácuo eletrofraco**

e a **LSP** como candidata a “cold dark matter”.)

- O modelo vigente é o **MSSM** em suas diversas versões: **mSUGRA**, **G-MSM**, **A-MSM**, **pMSSM**.

# Por que se insiste com SUSY na escala do TeV?

- “Investigating the near-criticality of the Higgs boson”  
D. Buttazzo et al.  
JHEP **12** (2013) 089  
**arXiv:1307.3536 [hep-ph]**
- Com a **massa do Higgs** medida no LHC e a **massa do top** do FermiLab, os cálculos do **potencial efetivo do M-P** via **RGEs** indicam **instabilidade do vácuo eletrofraco**.  
Com o **MSSM**, consegue-se ajustar parâmetros para se conseguir **estabilização do vácuo** na escala dos 246 GeV.

# Agora, SUSY “na caixinha” da Física Fundamental

- Os anos da SUSY global como simetria espaço-temporal (*extensão do grupo de Poincaré*)

“Extension of the álgebra of Poincaré group generators and violation of P-invariance”

Yu. A. Gol’fand and E. P. Likhtman

JETP Lett. **13** (1971) 323.

“Is the neutrino a Goldstone particle?”

D. V. Volkov and V. P. Akulov

Phys. Lett. **46B** (1973) 109.

# Agora, SUSY “na caixinha” da Física Fundamental

- Os anos da SUSY global como simetria espaço-temporal (*extensão do grupo de Poincaré*)

“Supergauge transformations in four dimensions”

J. Wess and B. Zumino

Nucl. Phys. **B70** (1974) 39.

“Supergauge transformations”

A. Salam and J. J. Strathdee

Nucl. Phys. **B76** (1974) 477

(*novo espaço – superespaço – e novo cálculo tensorial*)

# Agora, SUSY “na caixinha” da Física Fundamental

- Os anos da SUSY global como simetria espaço-temporal (*extensão do grupo de Poincaré*)

“Unitary representations of supergauge symmetries”

A. Salam and J. J. Strathdee

Nucl. Phys. **B80** (1974) 499.

“All possible generators of supersymmetries of the S-matrix”

R. Haag, J. Lopuszanski and M. Sohnius

Nucl. Phys. **B88** (1975) 257.

# Agora, SUSY “na caixinha” da Física Fundamental

- **A era da construção de teorias supersimétricas:** **matéria**, **gauge/Yang-Mills** e **modelos- $\sigma$  não-lineares** (*novas geometrias complexas, hyperKähler*).
- **SUSY, comportamento ultravioleta, renormalização e novas técnicas perturbativas no superespaço.**
- **1980 – 1983:** os intensos anos da **função- $\beta$  nula** em **SYM-N=4** e **SYM-N=2**.  
(*Dirac*: “..... Eventually, a finite field theory would be discovered for all processes.”)

# SUSY, agora, “na caixinha” da Física Fundamental

- **Os mecanismos para implementação da SUSY:**  
quebra espontânea e as quebras explícitas “soft”
- **“Dynamical breaking of supersymmetry”**  
E. Witten  
Nucl. Phys. **B185** (1981) 513  
(*Aulas no ICTP Summer Workshop, 1981*).

# SUSY, agora, “na caixinha” da Física Fundamental

- **SUSY e modelos para a Física de Partículas:**

“Softly broken supersymmetry and SU(5)”

S. Dimopoulos and H. Georgi

Nucl. Phys. **B193** (1981) 150.

S. Dimopoulos, S. Raby and F. Wilczek:

“Supersymmetry and the scale of unification”

Phys. Rev. **D24** (1981) 1681;

“Proton decay in supersymmetric models”

Phys. Lett. **112B** (1982) 133.

# SUSY, agora, “na caixinha” da Física Fundamental

- **SUGRA simples, SUGRAs estendidas e K-K SUGRAs:**  
*intensa atividade entre 1976 e 1984.*
- **Modelos de SUGRA para a Física de Partículas:**  
*intensa atividade entre 1982 e 1984.*
- **Aspectos não-perturbativos da SUSY; origem topológica das cargas centrais:**  
*a atividade se concentra entre 1980 e 1984.*

# SUSY, agora, “na caixinha” da Física Fundamental

- 1984, das SUGRAs para as Supercordas:

“Anomaly cancellations in supersymmetric D=10 gauge theory and superstring theory”

M. B. Green and J. H. Schwarz

Phys. Lett. **149B** (1984) 117.

- Intensa atividade ligada às SUSYs em (1+1)-D: heterotic (p,q)-SUSY  $\sigma$ -models.

# 10- e 11-D: **SUGRAs** ~ limite de baixas energias de teorias de cordas

- **SUGRA - D = 11:**  
teoria efetiva a baixas energias da **Teoria-M**.
- **SUGRA – Tipo I em 10D**, acoplada a campos de gauge:  
teoria efetiva a baixas energias da **corda heterótica**.
- **SUGRAs – IIA e –IIB:**  
teorias efetivas a baixas energias das **teorias de cordas IIA e IIB**.

# SUSY, agora, “na caixinha” da Física Fundamental

- **O início da década de ‘90 é marcado por atividades de natureza mais fenomenológica:**  
estava em operação, no CERN, o **LEP** (1989 – 2000) ( $e^+ e^-$ ,  $E = 209 \text{ GeV}$ ), com foco nos **testes de precisão da Teoria Eletrofraca**.
- A SUSY, agora com maior concentração de atividades voltadas para as (super)cordas, progredia em uma região de estabilidade, até que, em **15 JUL 1994**, é lançado o **arXiv:hep-th/9407087**, que marca o início de uma nova era: **a fase não-perturbativa, que transcende à própria SUSY**.

# ..... Seiberg e Witten: dualidade elétrico-magnética e N=2-SYM

- N. Seiberg and E. Witten

**“Electric-magnetic duality, monopole condensation, and confinement in N=2-supersymmetric YM theory”**

Nucl. Phys. **B426** (1994) 19,

Nucl. Phys. **B430** (1994) 485 (**erratum**);

**“Monopoles, duality and chiral symmetry breaking in N=2-supersymmetric QCD”**

Nucl. Phys. **B431** (1994) 484.

# A Teoria de Seiberg - Witten

- Um verdadeiro **laboratório para a Física e a Matemática**.
- Apresenta uma descrição a **baixas energias** das teorias de gauge com **SUSY-N=2**, com um rico setor não-perturbativo, que inclui **monopolos não-massivos** que podem sofrer processo de **condensação** e induzir **confinamento**, com a **quebra da SUSY-N=2** para a **SUSY-N=1**.
- “Introduction to S-duality in N=2-supersymmetric gauge theories: a pedagogical review of the paper of Seiberg and Witten”  
L. Álvarez-Gaumé and S. F. Hassan, **arXiv: hep-th/9701069**.

# O vácuo de YM e o setor topológico

- **A. M. Polyakov**  
“**Particle spectrum in quantum field theory**”  
JETP Lett. **20** (1974) 194. (*Monopolos de ‘t Hooft – Polyakov*)
- **G. ‘t Hooft**  
“**Magnetic monopoles in unified gauge theories**”  
Nucl. Phys. **B79** (1974) 276. (*Monopolos de ‘t Hooft – Polyakov*)
- **A.A. Belavin, A.M. Polyakov, A.S. Schwartz**
- **and Yu.S. Tyupkin**  
“**Pseudoparticle solutions of the Yang-Mills equations**” (*Instantons*)  
Phys. Lett. **59B** (1975) 85.

# O status epistemológico

O **Modelo-Padrão** deve ser considerado um **modelo efetivo**, derivado de alguma **teoria mais fundamental**.

**SUSY nos caminhos além do Modelo-Padrão?**

# O MSSM e as Colaborações do LHC

- A **ausência de SUSY** nos **Runs-1 e -2 do LHC** colocam em xeque a sua viabilidade na Física de Partículas além do Modelo-Padrão.
- Por outro lado, a argumentação **favorável à SUSY na escala do TeV** é apoiada na **estabilização do vácuo eletrofraco (EWPT)**  
e **na relação entre as massas do Higgs e do top**, como já confirmadas experimentalmente.

# O MSSM e as Colaborações do LHC

- Uma outra janela que se abre para a **SUSY no LHC** vem da **Colaboração MoEDAL**, através da assinatura de **partículas carregadas com longa vida-média**, o que não havia sido considerado anteriormente.
- Também, na **Colaboração MoEDAL**, a possibilidade de **detecção de monopolos com assinatura da SUSY**.
- **“Search for magnetic monopoles with the MoEDAL forward trapping detector in 13-TeV proton-proton collisions at the LHC”**

B. Acharya et al.

Phys. Rev. Lett. **118** (2017) 061801.

# Finalmente, os avatares da SUSY

- Por que a SUSY introduz novas partículas ao lado das partículas do Modelo-Padrão?
- **Quarks**  $\sim$  quarks escalares
- **Léptons**  $\sim$  léptons escalares
- **Higgs**  $\sim$  Higgses extras **e** higgsinos
- **Fóton**  $\sim$  fotino
- **Glúons**  $\sim$  gluínos
- **$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$**   $\sim$  **W-inos e Z-ino**

# Predição e a descoberta: escala de tempo

- Ondas gravitacionais e buracos negros (1916; 2016)
- Anti-matéria (1931; 1932, 1956)
- Mésons-pi (1935; 1948)
- Neutrinos (1930; 1956, 1962, 2000)
- Quarks (1964; 1969, 1974, 1978, 1995)
- Bóson de Higgs (1964; 2012)
- Bósons-W, Bóson-Z (1967; 1982, 1983)

**SUSY ?**

# O magnetismo do múon como laboratório

- $\frac{1}{2} (g_\mu - 2)_{\text{SM}} = 0.001\,165\,918\,04\,(51)$
- $\frac{1}{2} (g_\mu - 2)_{\text{exp}} = 0.001\,165\,920\,9(6)$
- $\frac{1}{2} (g_\mu - 2)_{\text{SUSY}} \sim 130 \times 10^{-7} m_{\text{SUSY}}^{-2} \tan\beta$  ,  
( $m_{\text{SUSY}}$  deve ser expressa em **GeV** nesta expressão).

# Uma nova assinatura fora da “caixinha”: emergência da SUSY

- **SUSY na Matéria Condensada: materiais de Dirac.**

“Emergent space-time supersymmetry in 3D Weyl semimetals and 2D Dirac semimetals”

S.-K. Jian, Y.-F. Jiang and H. Yao,

Phys. Rev. Lett. **114**, no. **10** (2015) 237001,

**arXiv:1407.4497 [cond-mat.str-el]**

# Emergência da SUSY

- **SUSY na Matéria Condensada: isolantes topológicos**  
“The edge quantum criticality and emergent supersymmetry in topological phases”  
Phys. Rev. Lett. **119**, no. **10** (2017) 107202  
Z. X. Li, Y. F. Jiang and H. Yao.
- **A SUSY pode se revelar útil antes mesmo de ser descoberta como uma simetria fundamental.**

# SUSY e LASERs

- **SUSY (MQ) na tecnologia de LASERs:**

**“Supersymmetric LASER arrays”**

M. P. Hokmabadi et al.

Science **363** (2019) 623.

- **CERN Courier, 8 MAR 2019:**

**“First light for supersymmetry”**

(Uma engenharia supersimétrica com dispositivo de LASER baseado em MQ Supersimétrica.)

# Finalizando

- #1. Tentamos ilustrar a **SUSY** como uma **simetria** naturalmente associada à **estrutura causal do espaço-tempo**;
- #2. procuramos mostrar os caminhos da **SUSY** ao longo dos seus **quase 50 anos de atividades** (**2021: Monopolos, 8-fold Way, SUSY**);
- #3. buscamos apresentar **novos encaminhamentos** de uma SUSY fundamental em **experimentos em  $\Phi$ P**s;
- #4. elencamos resultados referentes à **SUSY como simetria emergente**;
- #5. mesmo que, como **simetria fundamental**, SUSY ainda não tenha sido detectada, está nascendo uma **engenharia supersimétrica** no campo dos **LASERs de alta potência**.