

# Quarks - constituintes elementares

Yara Do Amaral Coutinho

Instituto de Física - UFRJ



UFRJ

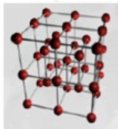
## Nuclear scale

Matter



Macroscopic

Crystal



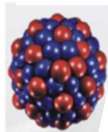
$10^{-9}$  m

Atom



$10^{-10}$  m

Atomic nucleus



$10^{-14}$  m

Angstrom

Nucleon



$10^{-15}$  m

femtometer  $< 10^{-18}$  m

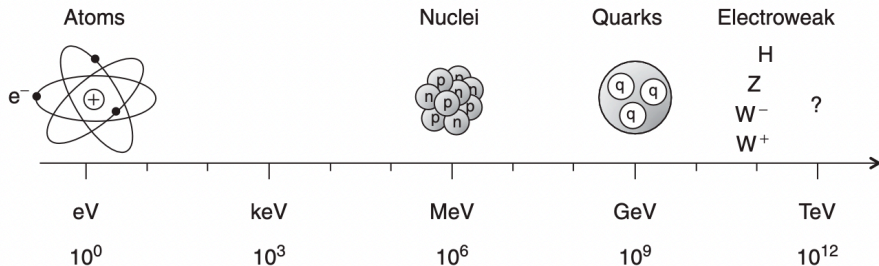
Quark



# Estruturas e escalas de energia

\*1910

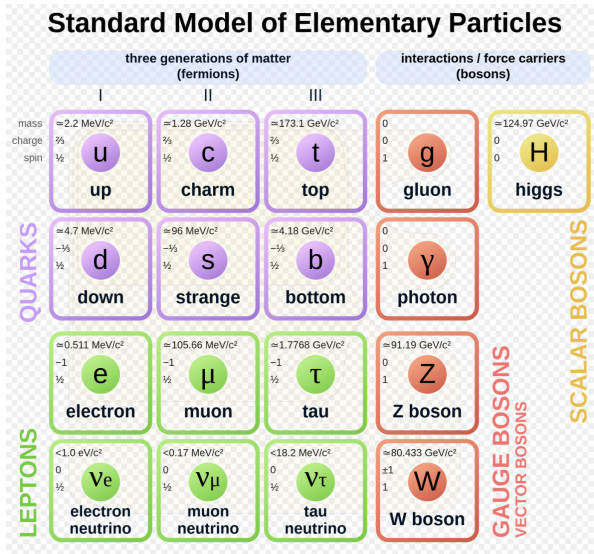
\*1980



The Universe at different energy scales, from atomic physics to modern particle physics at the TeV scale.

Modern Particle Physics, Mark Thomson (Cambridge University Press 2013)

# Modelo padrão das partículas elementares



<https://en.wikipedia.org/wiki/Quark>

# Modelo padrão das partículas elementares

- As partículas elementares são os constituintes fundamentais do Universo;
- O modelo padrão é a melhor descrição das interações das partículas elementares bem como de suas propriedades;
- Três das quatro forças dominam as interações das partículas elementares (forte, fraca e eletromagnética). A interação gravitacional é desprezível neste escala.

| Force          | Strength * | Boson     | Spin | Mass (GeV) |
|----------------|------------|-----------|------|------------|
| Strong         | 1          | $g$       | 1    | 0          |
| Eletromagnetic | $10^{-3}$  | $\gamma$  | 1    | 0          |
| Weak           | $10^{-8}$  | $W^{\pm}$ | 1    | 80.4       |
| Weak           | $10^{-8}$  | $Z^0$     | 1    | 91.2       |
| Gravitational  | $10^{-37}$ | $G$       | 2    | 0          |

\* The relative strengths are approximate indicative values for two fundamental particles at a distance of  $1\text{fm} = 10^{-15}\text{ m}$   
Modern Particle Physics, Mark Thomson (Cambridge University Press 2013)

# O átomo e a evidência da estrutura do nucleon

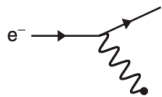
- Experimento de Rutherford (1907): primeira evidência de que o núcleo do átomo tem massa e é carregado positivamente;
- Partículas  $\alpha$  foram espalhadas por finas camadas de ouro a grandes ângulos;
- A evidência dos quarks foi confirmada nos experimentos do SLAC em 1968;
- Os experimentos de espalhamento (física de partícula): um feixe de partículas é dirigido a um alvo para obter a probabilidade de deflexão em específicas direções (como as partículas interagem/teste da estrutura das partículas).

# Evidência dos quarks

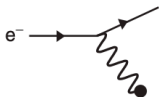
- 1960's espalhamento elástico  $\rightarrow$  prótons e neutrons dimensões  $\simeq 10^{-13}$  cm com uma estrutura interna difusa;
- Poucas teorias tentavam explicar a nova variedade dos hadrons com constituintes fundamentais;
- Gell-Mann e Ne'eman (1961) introduziram a simetria  $SU(3)$ , agrupando partículas com mesmo spin:  $\pi$ 's e  $K$ 's ( $s = 0$ ) octeto de mésons, ...;
- Baseado nas regularidades do esquema da simetria  $SU(3)$ , Gell-Mann e Zweig intoduziram os quarks;
- Três tipos fundamentais: u, d e s.  $q_u = 2e/3$ ,  $q_d = q_s = -1e/3$ ;
- Uma série de experimentos de espalhamentos e-nucleon (1968-1973) liderados pelos MIT-SLAC, foram fundamentaiss para confirmar os quarks;
- Jerome Friedman e Henry Kendall (MIT), e Richard Taylor (SLAC) receberam o Nobel em 1990;
- Quarks aparecem no poema "Finnegans Wake" de James Joyce (1939).

# Testando a estrutura do próton

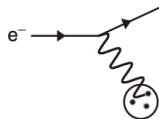
- Espalhamento e-p: ferramenta poderosa para testar a estrutura do próton;
- Espalhamento e-p: teste das propriedade globais do próton (raio de carga);
- Espalhamento e-p a altas energias (DIS): o próton é quebrado.



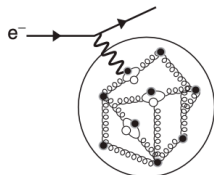
$$\lambda \gg r_p$$



$$\lambda \sim r_p$$



$$\lambda < r_p$$

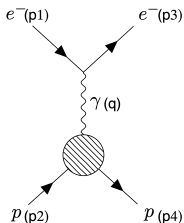


$$\lambda \ll r_p$$

The nature of  $e^-p$  scattering depending on the wavelength of the virtual photon.



# Experimentos do SLAC: espalhamento elástico e-p



Rosenbluth formula (M. N. Rosenbluth, Phys. Rev. 79 615, 1950)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{\alpha \hbar}{4ME \sin^2(\theta/2)} \right)^2 \frac{E'}{E} [2K_1 \sin^2(\theta/2) + K_2 \cos^2(\theta/2)]$$

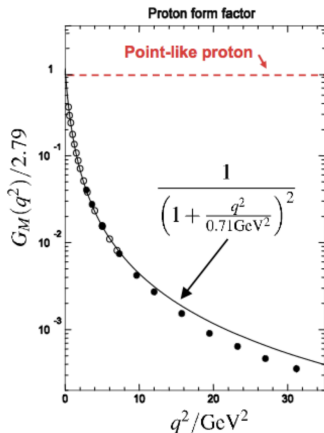
$$E' = \frac{E}{1 + (2E/Mc^2) \sin^2(\theta/2)}$$

Form factor  $K_{1,2}$ : determined counting the number of scattering electrons in a given direction, for a range of incident energy, comparing with theoretical predictions.

# Experimentos do SLAC: e-p elástico (fatores de forma)

$$K_1(q^2) = -q^2 G_M, \quad K_2(q^2) = (2Mc)^2 \frac{G_E^2 - (q^2/(2Mc)^2)G_M^2}{1 - (q^2/(2Mc)^2)}$$

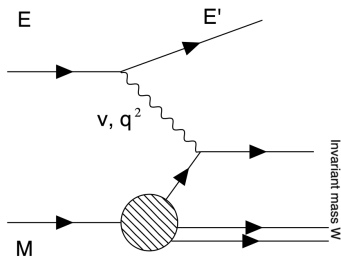
$G_E, G_M \rightarrow$  distribuição de carga e momento magnético do próton.



Modelo simples:  $K_1 = -q^2, K_2 = (2Mc)^2$  com  $G_E = G_M = 1$  (próton pontual).

# Experimentos MIT-SLAC: $e + p \rightarrow e + X$ (DIS)

Elétron energético  $\rightarrow$  DIS



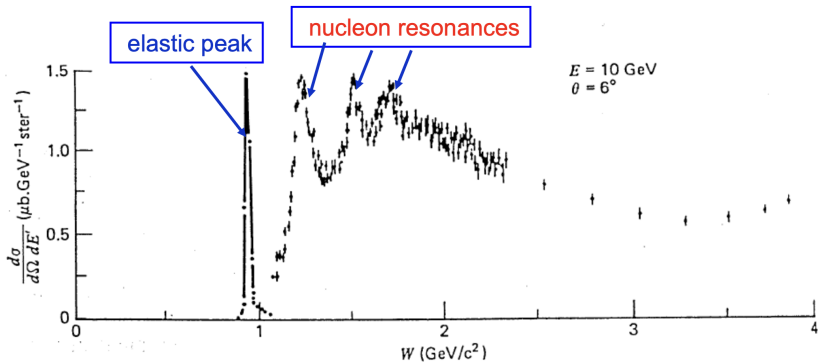
$$\frac{d\sigma}{dE' d\Omega} = \left( \frac{\alpha \hbar}{4ME \sin^2(\theta/2)} \right)^2 \frac{E'}{E} [2W_1 \sin^2(\theta/2) + W_2 \cos^2(\theta/2)]$$

Com  $W_{1,2} = W_{1,2}(E', \theta)$  ou  $W_{1,2} = W_{1,2}(q^2, x)$  devem ser previstos pela teoria.

# Bjorken scaling

Para  $E$  fixa:  $W_{1,2}$  (funções de estrutura) dependem de:

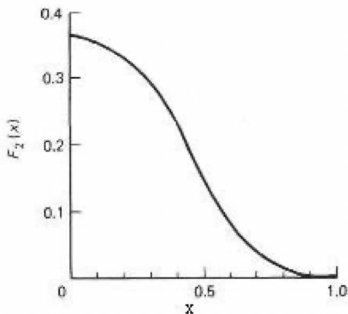
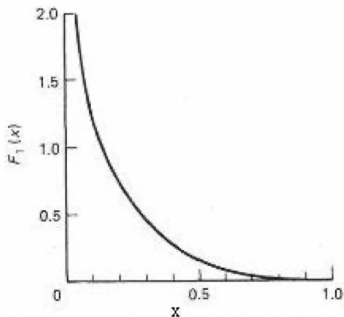
$$q^2 \quad \text{and} \quad x = \frac{q^2}{2q \cdot p}$$



# Bjorken scaling

- Predição de Bjorken a altas energias:

$$MW_1(q^2, x) \rightarrow F_1(x) \quad - \quad \frac{q^2}{2Mc^2x} W_2(q^2, x) \rightarrow F_2(x)$$

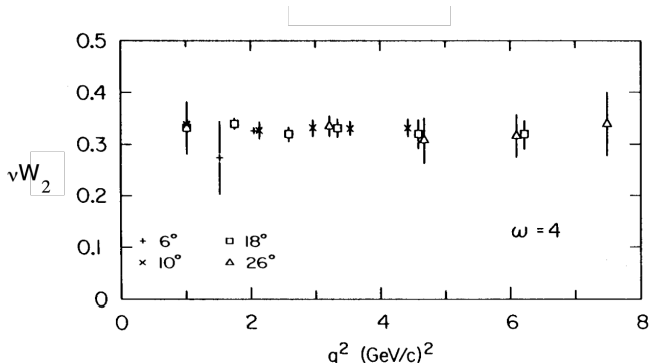


# Modelo de partons e Bjorken scaling

- Regime DIS:

$$-q^2 [= (4EE'/c^2) \sin^2(\theta/2)] \quad \& \quad q \cdot p [= M(E - E')] \quad \text{grandes}$$

$$-2x = \frac{-q^2}{q \cdot p} \quad \text{”Scaling” (a razão não é grande)*}$$



\* Partículas pontuais não podem ser resolvidas, a medida não depende de  $q^2$ .  $\omega = 1/x$

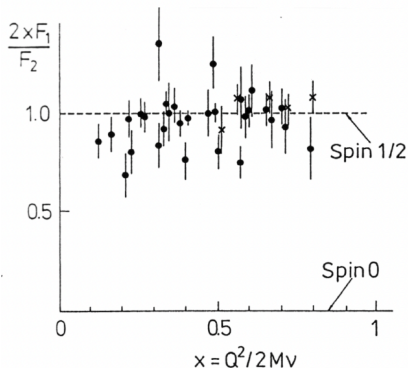
Deep Inelastic Electron Scattering, Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Ann. Rev. Nuc. Sci. 1972.22:203-254

# Bjorken scaling e a relação de Callan-Gross

- Scaling  $\rightarrow$  o próton tem constituintes pontuais ( $s = 1/2$ );

$$2xF_1(x) = F_2(x) \quad \text{Callan-Gross (1969)}$$

- Em altas energias a fótons virtual interage com um quark livre;
- Bjorken scaling e a relação de Callan-Gross é um teste do modelo quark-parton.

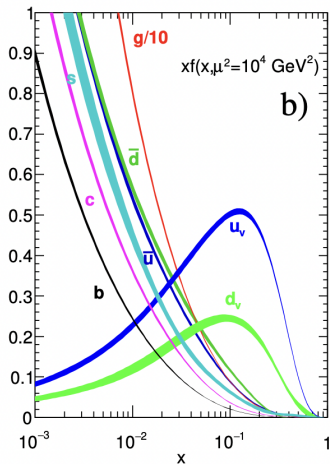
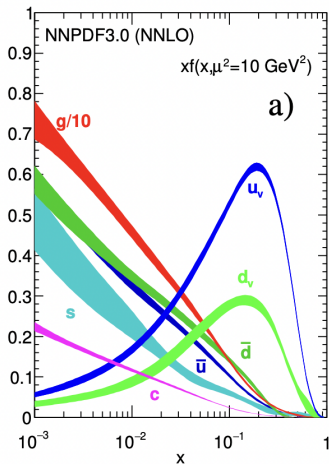


# Modelo quark-parton (Feynman)

- No modelo quark-parton as contribuições das funções de estrutura  $F_i$  são expressas em termos das funções distribuição dos quarks  $q(x, Q^2)$  do próton, onde  $q = u, \bar{u}, d, \bar{d}$ , etc...;
- $q(x, Q^2)dx$  é o número de quarks (ou antiquarks) de um certo sabor carregando uma fração do momento do próton entre  $x$  e  $x + dx$  num referencial onde o momento do próton é grande;
- Como os quarks são confinados, não podemos medir as suas massas diretamente, somente indiretamente (Lattice Gauge Theory);
- A hipótese de que os quarks dentro do próton são livres é uma aproximação. Eles interagem entre si;
- Os quarks  $u$  e  $d$  carregam metade do momento do próton;
- Outros constituintes do próton carregam parte de seu momento. Os gluons carregam metade do momento do próton (descobertos nas colisões e-p PETRA - DESY em 1979).

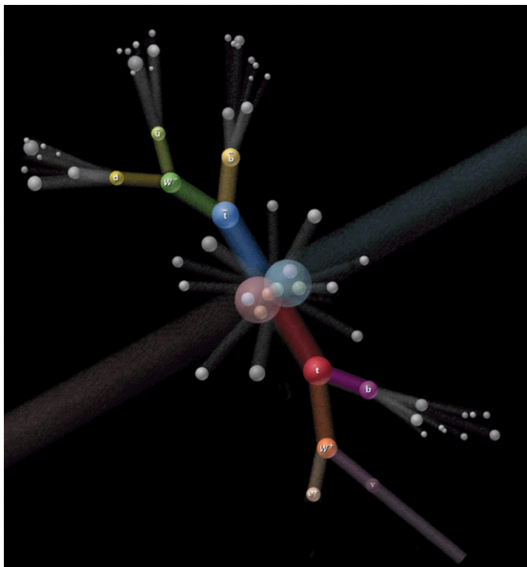


# Funções de distribuição de partons (PDF)

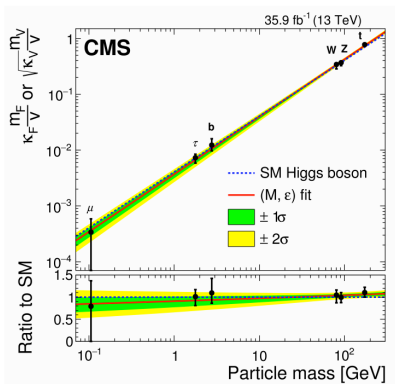
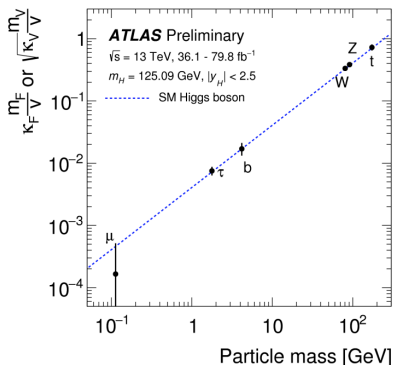


Review of Particle Physics (2022). R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

# Colisões próton-próton



# Massas das partículas



Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to  $80 \text{ fb}^{-1}$  of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  collected with the ATLAS experiment, Tech. Report ATLAS-CONF-2018-031, CERN.

A. M. Sirunyan et al., Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ , CMS Collaboration, Eur. Phys. J., 79 (2019) 421.

# Conclusões & perspectivas

- Importância dos colisores/detectores no entendimento das subestruturas das partículas;
- Combinação de estudos teóricos e resultados experimentais é fundamental para o entendimento da estrutura do nucleon;
- Toda a matéria conhecida é composta por quarks (u e d) e léptons (elétrons);
- As medidas de precisão vem testando as predições do MP, e até agora parecem ajustar-se aos resultados experimentais;
- Aumentar o regime de energia pode revelar mais constituintes e/ou novas partículas?

The Nobel Prize in Physics 2004

David J. Gross, H. David Politzer and Frank Wilczek “for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction”

# MUITO OBRIGADA

# Referências

- [1] High Energy Elastic Scattering of Electrons on Protons. M. N. Rosenbluth. Phys. Rev. vol 79 (1950) 615.
- [2] Deep Inelastic Electron Scattering, Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Ann. Rev. Nuc. Sci 22 (1972) 203.
- [3] Modern Particle Physics, Mark Thomson. Cambridge University Press (2013).
- [4] Gauge theory of elementary particle physics. Ta-Pei Cheng and Ling-Fong Li. Clarendon Press . Oxford. (1982).
- [5] Review of Particle Physics. R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022 083C01 (2022).
- [6] The Physics of Deep-Inelastic Scattering at HERA. Cristinel Diaconu. AIP Conf.Proc. 972 (2008) 203.
- [7] Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb<sup>-1</sup> of proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV collected with the ATLAS experiment, Tech. Report ATLAS-CONF-2018-031, CERN.
- [8] A. M. Sirunyan et al., Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, CMS Collaboration, Eur. Phys. J., 79 (2019) 421.