Quebra espontânea de simetria e o Mecanismo de Higgs

Thiago V. Acconcia   Marcelo M. Guzzo

Instituto de Física Gleb Wataghin - Universidade Estadual de Campinas

Abstract:

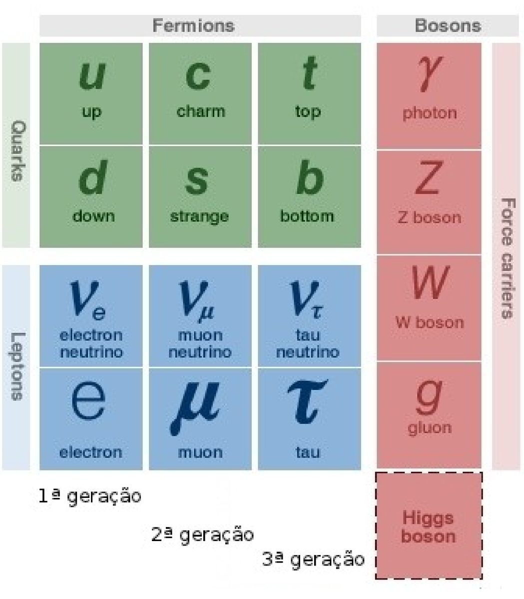
O Modelo Padrão da física de partículas é uma das teorias mais bem sucedidas da história da ciência. Este modelo é formado de um quadro de partículas denominadas elementares, as quais compõem toda a matéria que forma o universo conhecido, bem como permite entender as interações entre essas partículas. As principais teorias que descrevem essas interações são: Cromodinâmica Quântica , Eletrodinâmica Quântica e a Interação nuclear Fraca. Estas duas últimas foram unificadas, passando a serem denominadas conjuntamente por interação Eletrofraca. O processo envolve quebras de simetrias, assim como o processo que confere massas à todas as partículas do modelo estudado. Este trabalho pautou-se justamente no estudo desse mecanismo, chamado Mecanismo de Higgs.

O Modelo Padrão da física de partículas

- **Definição de modelo:** Um modelo científico é um conjunto de teorias que, usando certas hipóteses, explicam os fenômenos correlacionados com estas teorias.

- **Modelo Padrão da Física de Partículas** possui satisfatórios resultados teóricos condizentes com os dados experimentais obtidos nos grandes experimentos da área que existem no mundo.

- **Composição:**



Férmions: partículas que compõem todas a matéria do universo.

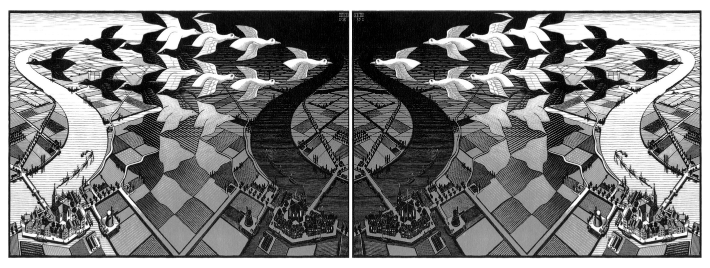
Bósons: partículas mediadoras das interações entre os férmions

Simetrias nas leis da Física

- **Definição de simetria:** propriedades que alguns sistemas possuem de manter suas leis invariantes diante de algumas formações.

- **Tipos:**

Discretas



Contínuas

Simetrias → **Leis de Conservação**

Teorema de Noether: *"qualquer simetria diferenciável da ação de um sistema físico possui uma lei de conservação atrelada."*

Transições de Fase

- **Definição de transição de fase**: fenômeno que ocorre quando há mudança simetria em um sistema.

- Lev. Landau, em meados dos anos 30: transições de fase possuem algo em comum: estão associadas com algum tipo de *quebra de simetria.*

- O mecanismo que descreve o ganho de massa das partículas do modelo padrão é um exemplo de quebra de simetria.

As Equações de Maxwell e a QED

- As equações de Maxwell podem ser escritas da seguinte forma diferencial:

$$[F^{\mu\nu}] = \begin{bmatrix} 0 & -E_x & -E_y & -Ez \\ E_x & 0 & -B_z & B_y \\ E_y & B_z & 0 & -B_x \\ E_z & -B_y & B_x & 0 \end{bmatrix}$$

- Ou ainda, em sua forma tensorial:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} J^\mu \qquad \text{Onde:} \quad F^{\mu\nu} \;=\; \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

- O tensor eletromagnético $F^{\mu\nu}$ acima é invariante pela transformação de Gauge:

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \lambda$$

Eletromagnetismo de Maxwell → **Simetria de Gauge**

- Lagrangeana de Maxwell:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{16\pi} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{c} J^\mu A_\mu$$

- Para o caso em que $J^\mu = 0$: temos a Lagrangeana de um campo vetorial sem massa se propagando:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{16\pi} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Invariante de Gauge e componente da QED

- **Se o campo vetorial possuir um termo de massa:**

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{16\pi} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \frac{1}{8\pi}\left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 A^\nu A_\nu$$

Esse sistema <u>não é invariante</u> pela transformação de gauge!!!

- **Porém, a interação nuclear fraca é um campo vetorial massivo:**

$$W^{\pm} \sim 81GeV \qquad Z^0 \sim 91GeV$$

O Mecanismo de Higgs

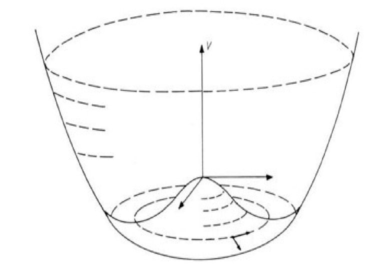
- O Mecanismo de Higgs quebra espontaneamente a simetria de gauge

- Valor médio no vácuo não nulo
- Introduzimos então campos escalares de Higgs: $\phi_1 \ e \ \phi_2$

- Lagrangeana:

$$\mathcal{L} = \underbrace{\frac{1}{2}(\partial_\mu \phi_1)(\partial^\mu \phi_1) + \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi_2)(\partial^\mu \phi_2)}_{Termos\ cinéticos} + \underbrace{\frac{1}{2}\mu^2(\phi_1^2 + \phi_2^2) - \frac{1}{4}\lambda^2(\phi_1^4 + \phi_2^4)}_{Potencial}$$

Mínimos do potencial: $\phi_1^2 + \phi_2^2 = \frac{\mu^2}{\lambda^2}$



Fazendo:

$$\phi = \phi_1 + i\phi_2$$

- Trocando a derivada pela derivada covariante:

$$D_\mu = \partial_\mu + i\frac{q}{\hbar c} A_\mu$$

- Surgirá um termo proporcional à: $(\phi^* \phi) A^\nu A_\nu$ com $\langle \phi \rangle = \mu / \lambda$

- Portanto:

$$\langle \phi \rangle^2 A^\nu A_\nu = (\mu/\lambda)^2 A^\nu A_\nu \longrightarrow m = 2\sqrt{q}\frac{\mu}{\lambda}$$

Agradecimentos

CNPq

Referências:

[1] F.Halzen, A.Martin - *Quarks and Leptons - An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons, 1984;
[2] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë - *Quantum Mechanics*, Volume 2, John Wiley & Sons;