



A ESTRUTURA MATEMÁTICA DO MODELO 331

Palavras-Chave: Modelo 331, Física de Partículas

Autores/as:

JOÃO FELIPE FEITOSA FERREIRA [IFGW-UNICAMP]

Prof.^a Dr.^a PEDRO CUNHA DE HOLANDA (orientador/a) [IFGW-UNICAMP]

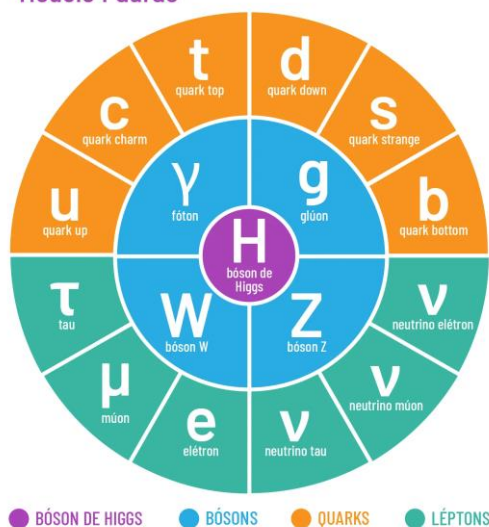
INTRODUÇÃO:

Além o modelo padrão, há outros tantos modelos de partículas que tentam suprir brechas e desenvolver de forma melhor tópicos ignorados ou não explicados pelo modelo padrão. Esse é o caso do modelo 331, fundamentado em uma base física e matemática semelhante ao modelo padrão, mas que traz consigo muitas mudanças essenciais para a continuidade da pesquisa em física de partículas. Uma delas, estrutural, está na mudança do grupo $SU(2)$ pelo grupo $SU(3)$, que por si só altera toda sua estrutura de grupo e suas implicações físicas. Mas, o que de fato é o modelo 331 e quais são as bases matemáticas desses modelo? É o que essa pesquisa visa estudar.

DISCUSSÃO:

Com o nascimento formal da física de partículas em meados do século XIX, revisitando as ideias de Tales de Mileto e Demócrito, e experimentos ao longo do século XX que mostraram uma gama enorme de partículas existentes, a união das forças fundamentais da natureza (com exceção da gravitacional) com a partículas elementares que constituem a matéria se tornou essencial. Portanto, de 1970 a 1973, foi desenvolvida a teoria do Modelo Padrão (MP) que organizou as partículas em função de propriedades intrínsecas a elas, como a massa, carga elétrica, spin e quiralidade. Com base nessas propriedades intrínsecas, as partículas elementares foram divididas em dois grandes grupos: os Bósons, e os Férmions, sendo o primeiro um grupo de partículas de interação, e o segundo com partículas de matéria. Dentro do grupo dos Bósons, por exemplo, se encontram os Bósons de Gauge, e os Bósons de Higgs. Já os férmions são constituídos por Léptons (como o neutrino, por exemplo) e os Quarks.

Modelo Padrão



Bóson de Higgs

2012 - CERN
Explica a origem da massa das outras partículas elementares.

Glúon

1979 - DESY
Une os quarks formando outras partículas, como os prótons.

Fóton

1923 - Washington University
Transmite força eletromagnética entre partículas carregadas.

Bóson W

1983 - CERN
Essencial para reações nucleares, como as do Sol.

Bóson Z

1983 - CERN
Eletricamente neutro, ele é sua própria antipartícula.

Quark Down

1968 - SLAC
Impede os prótons de decaírem dentro dos átomos.

Quark Charm

1974 - Brookhaven & SLAC
Atua nas correntes neutras da interação fraca.

Quark Top

1975 - Fermilab
Quark mais pesado, tem massa semelhante à de um átomo.

Quark Up

1968 - SLAC
Os quarks Up e Down compõem os prótons e nêutrons.

Quark Bottom

1977 - Fermilab
Explica a violação no decaimento de Kaons.

Quark Strange

1947 - Manchester University
Tem um tempo de desintegração maior do que o comum.

Neutrino Elétron

1956 - Savannah River Plant
É produzido através de reações nucleares como as solares.

Neutrino Múon

1962 - Brookhaven
Junto com sua antipartícula, compõe os feixes de neutrinos.

Neutrino Tau

2000 - Fermilab
Última partícula do modelo padrão a ser descoberta.

Tau

1976 - SLAC
Primeira partícula de terceira geração a ser descoberta.

Múon

1937 - Caltech & Harvard
Semelhante ao Elétron, porém com massa muito maior.

Elétron

1837 - Cavendish Laboratory
A partícula carregada mais leve, compõe todos os átomos.

Infografia: Beatriz Abdalla/Jornal da USP
Material baseado na publicação de Symmetry Magazine

Figura 1 – Modelo padrão da física de partículas detalhado. Retirado de [Maior acelerador de partículas do mundo passa por um upgrade. O que vem por aí? – Jornal da USP](#)

Por outro lado, o Modelo 331 é uma extensão ambiciosa do Modelo Padrão que tenta resolver algumas de suas limitações. A principal diferença entre os dois modelos reside na estrutura do grupo de simetria de gauge. No Modelo 331, o grupo de simetria é expandido para $SU(3)_C \times SU(3)_L \times U(1)_X$. A inclusão do grupo $SU(3)_L$ no Modelo 331 é uma mudança extremamente significativa, não apenas na estrutura do Modelo, mas também na interação das forças fundamentais descritas por eles. Portanto, o $SU(3)_L$ no Modelo 331 é uma extensão de cor que atua exclusivamente nos léptons *left-handed* e na terceira geração de quarks, em contrapartida ao $SU(2)_L$, presente no Modelo Padrão, que atua tanto nos léptons *left-handed* quanto nos quarks *left-handed*. Essa diferença resulta em um rearranjo das partículas em cada família, o que pode afetar as propriedades e interações das partículas.

Outra consequência importante do Modelo 331 é a presença de bósons vetoriais intermediários adicionais associados à simetria $SU(3)_L$ estendida. Além dos conhecidos bósons W^+ , W^- , e Z^0 que mediam as interações fracas no Modelo Padrão, o Modelo 331 introduz novos bósons carregados e neutros relacionados a essa simetria estendida. Esses, podem ter efeitos observáveis em experimentos de alta energia e podem ser detectados em aceleradores de partículas.

Além desses, o mecanismo de quebra espontânea de simetria também está presente tanto no Modelo Padrão quanto no Modelo 331. No Modelo Padrão, esse mecanismo é responsável pela unificação das interações fracas e eletromagnéticas, resultando na aquisição de massa pelos bósons W^+ , W^- , e Z^0 . No Modelo 331, a quebra espontânea de simetria é ainda mais complexa devido ao grupo de simetria estendido, e é essencial para gerar as massas não nulas dos novos bósons vetoriais intermediários e das partículas da terceira geração de quarks e léptons.

Sendo assim, é necessária que a Lagrangiana seja construída a partir dos campos de partículas e acoplamentos que respeitam as simetrias do grupo de gauge $SU(3)_C \times SU(3)_L \times U(1)_X$. A Lagrangiana total do modelo 331 é bastante extensa, incluindo termos para os campos dos glúons, dos vetores intermediários de massa, dos quarks e léptons, além de termos de acoplamento entre eles.

A) ESTRUTURA MATEMÁTICA DO MODELO PADRÃO:

O modelo padrão é estruturado matematicamente através da teoria de grupos e da Teoria Quântica de Campos de Gauge como um grupo de produto unitário $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. O grupo $SU(3)$ é um grupo de Lie de matrizes 3×3 com determinante igual a 1, com operação de multiplicação de matrizes, chamado de grupo especial unitário de grau 3 que é aplicado diretamente na cromodinâmica quântica. Para o

grupo SU(2) a mesma lógica é aplicada, apenas alterando o grau, ou seja, possui matrizes 2x2 de determinante igual a 1, e também a representação, que agora passa a ser acerca das interações eletrofracas. Por fim, o grupo U(1), que representa o grupo de matrizes unitárias 1x1 com operação de multiplicação de matrizes, é chamado de grupo unitário para grau n, mas para o caso de n=1, também é conhecido como grupo cíclico, formado por números complexos com valor absoluto igual a 1, em relação a multiplicação.

B) TEORIA DE GRUPOS:

Além desses, é interessante se atentar para as notações de grupos e entender melhor como essas estruturas são formadas e se comportam. Sendo assim, um grupo é definido da seguinte maneira:

Definição 1. Um grupo é conjunto de elementos $G = \{a, b, c, \dots\}$ finito ou infinito, para os quais está definida uma operação binária $G \times G \rightarrow G$, representada por $\{G, *\}$ que satisfaz os seguintes axiomas [2]

a) **Fechamento:** $\forall a, b \in G, a * b = c \in G$

b) **Associatividade:** $\forall a, b, c \in G, (a * b) * c = a * (b * c)$

c) **Elemento Neutro:** $\exists e \in G$, tal que: $\forall a \in G, a * e = e * a = a$

d) **Elemento inverso:** $\forall a \in G, \exists a^{-1}$ tal que: $a^{-1} * a = a * a^{-1} = e$

C) ESTRUTURA MATEMÁTICA DO MODELO 331:

Dado a estrutura do MP, um setor de interesse para a pesquisa do modelo 331 é o setor eletrofraco. Este setor está fundamentado no grupo de Gauge SU(2)_L ⊗ U(1)_Y, fazendo com que a disposição das partículas que interajam por força eletrofraca permita a escrita da Lagrangiana por transformações do grupo de simetria citado. O grupo SU(2)_L, que designa as interações fracas ou iso-spin, é baseado no grupo SU(2) que tem geradores que satisfazem à álgebra de Lie:

$$[T_a, T_b] = ie_{abc}T_c$$

onde o tensor e_{abc} é o tensor antissimétrico de Levi-Civita e os índices a,b,c = 1,2,3. Assim, cada grupo possui sua "função". O fator SU(3)_C é o grupo de simetria relacionado à interação forte. "SU" significa Grupo Unitário Especial e "3" se refere ao número de cores. A interação forte é mediada pelos glúons e afeta os quarks, partículas fundamentais que possuem carga de cor. Já o grupo SU(3)_L é uma extensão do grupo SU(2)_L presente no Modelo Padrão. "L" se refere a "left-handed" e indica que o grupo atua apenas nas partículas canhotas (quarks e léptons). Esse grupo está associado às interações fracas eletrofracas mediadas pelos bósons intermediários W⁺, W⁻, e Z⁰. E, por fim, o fator U(1)_X é um grupo abeliano associado a uma simetria adicional. "U" significa Grupo Unitário e "1" indica que este é um grupo de um único gerador.

BIBLIOGRAFIA

- [1]** Antonio Costantini. Bsm physics from enlarged gauge symmetry: the 331 model, a case of study, 2019.
- [2]** José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani. Teoria de Grupos. Livraria da Física, 2008.
- [3]** J. G. Ferreira Júnior. O modelo 331 mínimo reduzido. UFPB, 2012.
- [4]** Mark Thomson. Modern particle physics. Cambridge University Press, New York, 2013.