

Uma Breve Introdução ao Modelo Padrão da Física de Partículas

João Victor Caires Santos - [Projeto Olímpicos](#)

1. Introdução

Tudo no universo é composto de pequenos blocos denominados partículas elementares. As partículas elementares são as partículas mais fundamentais que existem: elas não podem ser divididas, ou seja, não possuem nenhuma subestrutura. O entendimento de como essas partículas se comportam, quais propriedades elas apresentam, é essencial para que possamos compreender as leis mais fundamentais que governam o nosso universo. E, para entender o comportamento dessas partículas, precisamos entender também o mecanismo pelo qual elas interagem umas com as outras. Esse mecanismo é chamado de forças fundamentais, que consiste em um grupo de forças compostas pelas forças gravitacional, eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte.

O Modelo Padrão é uma teoria quântica responsável por explicar como se comportam essas partículas elementares e como elas interagem entre si, propondo teorias que explicam três das quatro forças fundamentais (a força gravitacional é a única não incluída no Modelo Padrão).

2. Dos Átomos às Partículas Elementares

Para entender melhor o contexto em que o Modelo Padrão surgiu, precisamos entender primeiramente como surgiu a ideia de partículas elementares. Ela vai aparecer pela primeira vez com a proposta de que a matéria não seria contínua, mas formada por um conjunto de partículas menores: **os átomos**.

2.1 Surgimento das ideias atomistas

A ideia de que a matéria é feita de átomos surge no século V na Grécia Antiga. O filósofo grego Leucipo de Abdera e seu aluno, Demócrito de Abdera, propuseram que a matéria seria composta de pequenas partículas indivisíveis as quais receberam o nome de “átomos”. A ideia atomista da época pode ser resumida na seguinte frase dita por Demócrito: “No universo existe apenas o átomo e o vazio.” Porém, o atomismo só iria realmente entrar para o pensamento científico no início do século XIX. Com novas descobertas e estudos mais detalhados das estruturas atômicas sendo feitos, novas teorias atômicas vão surgir, sofrendo diversas alterações ao longo dos anos até chegar à teoria vigente hoje em dia.

A primeira teoria atômica realmente científica, conhecida como [Modelo de Dalton](#), foi proposta em 1808 pelo cientista inglês John Dalton. Dalton propôs que a matéria seria composta por átomos e que esses átomos seriam esferas maciças, indestrutíveis e indivisíveis. Mas, com avanços científicos ao longo do século XIX, a teoria atômica de Dalton precisou ser reformulada de forma que passasse a incluir uma nova partícula descoberta em 1897: **o elétron**.



2.2 Descoberta do Elétron

Em 1879, o físico e químico britânico William Crookes criou um aparato conhecido como Ampola de Crookes. Esse aparato consiste em um tubo de vidro, ou quartzo, com um lado positivo (ânodo) e um negativo (cátodo).

Em um experimento, Crookes conectou um gerador de tensão elétrica a este tubo, uma bateria por exemplo, e observou que isso causava a formação de um raio luminoso que aparentava sair do cátodo, então, este raio foi denominado **Raio Catódico**.

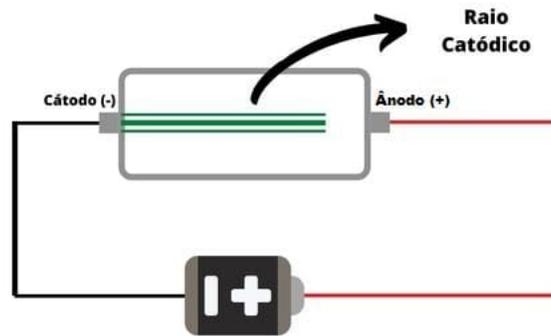


Figura 1: Ampola de Crookes e Raios Catódicos

Utilizando a Ampola de Crookes para fazer um experimento com os Raios Catódicos em 1897, o físico britânico J.J. Thomson colocou uma placa carregada positivamente e uma carregada negativamente perto da ampola e observou que os Raios Catódicos se desviavam para o lado da placa carregada positivamente. Thomson então concluiu que esses raios catódicos não eram nada mais que um feixe de partículas de carga negativa. Essas partículas receberam o nome de elétrons.

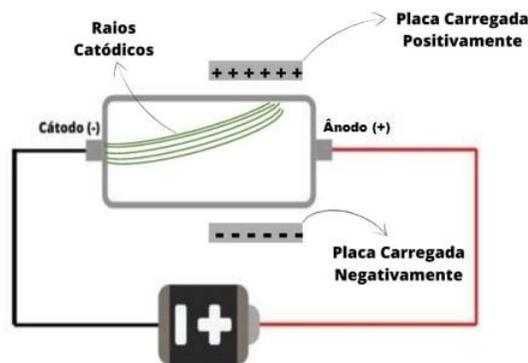


Figura 2: Experimento de Thomson

Com essa nova descoberta, Thomson propôs um novo modelo atômico: o Modelo de Thomson. Seu modelo substituiria o Modelo de Dalton, propondo que, na verdade, o átomo era divisível, sendo formado por partículas subatômicas de carga elétrica negativa (os elétrons). E, em seu modelo, esses elétrons estariam incrustados em uma esfera de carga positiva.



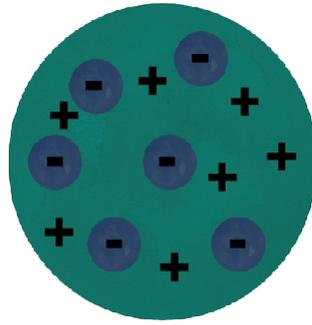


Figura 3: Seu modelo também ficou conhecido Modelo do Pudim de Passas

O Modelo de Thomson continuou como a teoria atômica vigente até o ano de 1911, quando novas descobertas exigiram a criação de um novo modelo. Então, em 1911, o físico neozelandês Ernest Rutherford propôs o [Modelo de Rutherford](#).

2.3 Modelo de Rutherford

No modelo atômico de Rutherford, foi proposto que o átomo seria, em sua maior parte, espaço vazio, teria um núcleo com carga positiva no seu centro e teria elétrons orbitando esse núcleo. No entanto, ele tinha alguns defeitos que, para serem resolvidos, foi preciso usar ideias da recém-nascida mecânica quântica.

As modificações necessárias no Modelo de Rutherford foram feitas em 1913 pelo físico dinamarquês Niels Bohr, propondo um novo modelo atômico que seria a primeira teoria quântica do átomo: o [Modelo de Bohr](#).

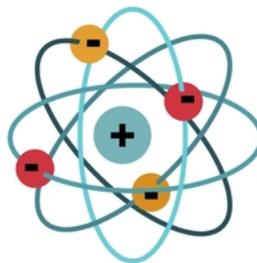


Figura 4: Modelo de Rutherford

A mecânica quântica havia nascido em 1900, quando Max Planck propôs a ideia de que a energia não seria emitida de forma contínua, mas em pequenos pacotes denominados quanta (plural de quantum), que nada mais são do que pacotes de energia definida.

Porém, Planck não acreditava que isso realmente acontecia na realidade, descrevendo sua ideia como apenas um “truque matemático”. Até que, em 1905, Albert Einstein mostrou que a ideia de Planck tinha sim aplicações na realidade, propondo que a própria luz seria formada por partículas que ele chamou de quanta de luz e que, hoje em dia, chamamos de **fótons**.

2.4 Descoberta dos fótons

Como dito anteriormente, a existência dos fótons foi proposta em 1905 pelo físico alemão Albert Einstein. Essa proposta foi feita em um artigo de título “Sobre um ponto de vista heurístico



concernente à geração e transformação da luz”, artigo em que Einstein explicou um fenômeno chamado de **Efeito Fotoelétrico**, propondo a existência dos fótons.

O efeito fotoelétrico foi observado pela primeira vez pelo físico alemão Heinrich Hertz em 1887. Hertz observou que quando certas frequências de radiação eletromagnética (luz) incidem sobre um metal, o metal algumas vezes exibe uma faísca.

No ano de 1899, o físico alemão Philipp Lenard demonstrou que o que essa incidência de radiação no metal causava era na verdade a emissão de raios catódicos, ou seja, feixes de elétrons. Ele explicou que esse fenômeno acontecia, pois os elétrons estavam absorvendo energia o bastante da luz incidente para serem arrancados do metal.

Lenard fez experimentos com esse efeito usando raios monocromáticos (de uma única cor). Ele percebeu que, quando se usava a mesma frequência (a mesma cor), não importava se ele chegasse mais perto do metal com a fonte de luz, aumentando a intensidade da radiação em uma certa área, os elétrons ainda eram arrancados com a mesma velocidade, ou seja, ainda absorviam a mesma quantidade de energia. Então, Lenard tentou explicar esse fenômeno, mas ele só viria a ser explicado em 1905 por Einstein.

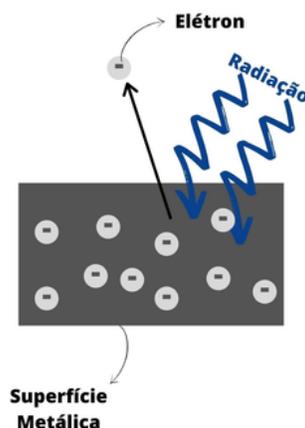


Figura 5: Efeito Fotoelétrico

Einstein percebeu que o efeito fotoelétrico poderia ser explicado usando as ideias de Planck de **quantização de energia** (ideia de que a energia vem em pacotes discretos chamados quanta) aplicando essa ideia para a luz. Então, Einstein propôs que a luz seria composta de pequenos pacotes de energia: os quanta de luz (fótons).

Os fótons tiveram sua existência provada de forma definitiva em 1921 pelo físico estadunidense Arthur Compton com a descoberta de um fenômeno chamado **Efeito Compton**.

Então, Niels Bohr, buscando resolver as falhas apresentadas pelo modelo atômico de Rutherford, viu que poderia fazer isso adicionando essas ideias quânticas à teoria atômica e, então, propôs seu modelo atômico (Modelo de Bohr). Porém, esse não seria o último modelo atômico a ser proposto. A mecânica quântica ainda era uma ideia muito nova na época, tendo surgido em 1900, ela estava apenas começando a se desenvolver. Logo, com avanços na teoria quântica, diversas alterações foram sendo feitas na teoria atômica até chegar na atual.

2.5 Descoberta de Novas Partículas

Novos estudos levaram à descoberta de novas partículas. Em 1919, Ernest Rutherford descobre os prótons e, em 1932, James Chadwick descobre os nêutrons. E essas duas partículas serão



incluídas no modelo atômico como parte da estrutura do átomo.

Até aí, como podemos ver, houveram desenvolvimentos significativos. A ciência, entre 1808 e 1932, foi de um átomo indivisível, para um átomo composto de elétrons, para um átomo composto de elétrons e prótons e, finalmente, para um átomo composto de elétrons, prótons e nêutrons.

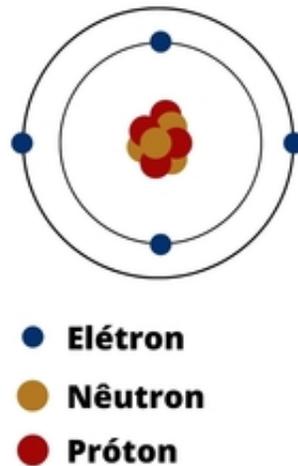


Figura 6: Modelo atômico com elétrons, prótons e nêutrons

Até o momento, quatro partículas já haviam sido descobertas (elétron, próton, nêutron e fóton), partículas que, no início dos anos 30, os cientistas acreditavam se tratar de partículas elementares (sem subestrutura). Porém, nas décadas seguintes, raios cósmicos e novos experimentos feitos usando aceleradores de partículas levaram à descoberta de diversas novas partículas, com diversas propriedades, exigindo a criação de uma teoria que as explicassem, levando, assim, à criação do **Modelo Padrão**.

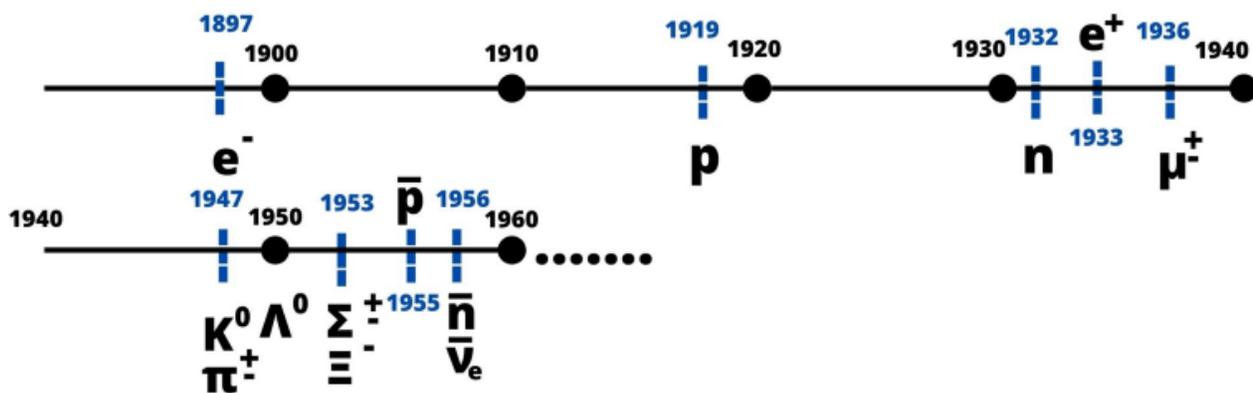


Figura 7: Algumas partículas e o ano em que foram descobertas



3. Nasce o Modelo Padrão

Com tantas descobertas de novas partículas, os cientistas, obviamente, vão querer estudá-las e entendê-las mais a fundo, vão querer entender como essas partículas se comportam e interagem entre si. Para isso, ao longo dos anos 70, começou a ser desenvolvido um grande modelo físico que agruparia todas essas partículas, descrevendo elas e explicando os mecanismos associados a suas interações: o **Modelo Padrão**.

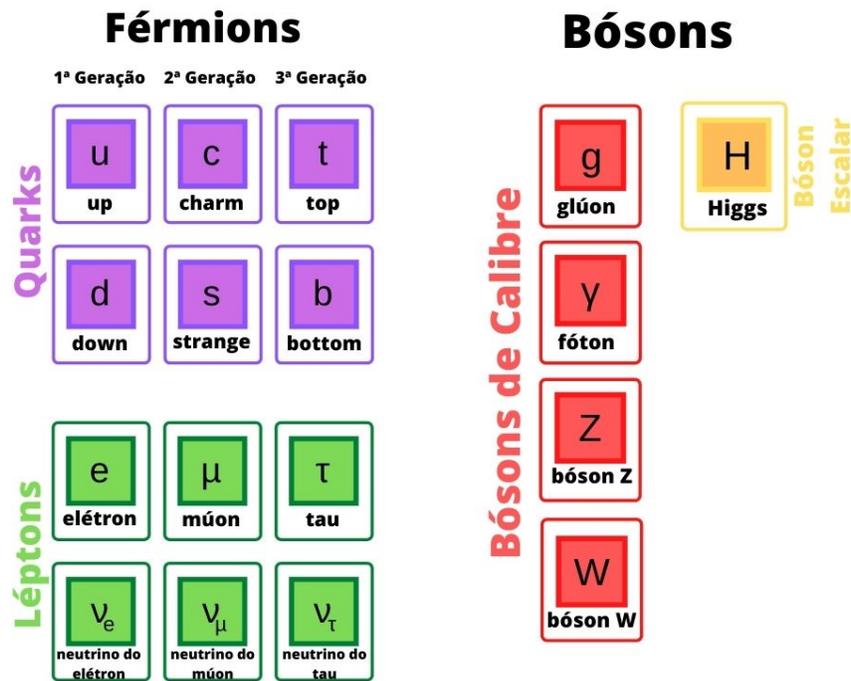


Figura 8: Modelo Padrão

Dentro do sistema do Modelo Padrão, as partículas são divididas em 2 grandes grupos que englobam todas as partículas conhecidas: os **férmions** e os **bósons**.

Para explicar como é feita a divisão das partículas entre férmions e bósons, existe um conceito importante chamado de spin. Como o objetivo deste texto é de fornecer uma breve introdução ao Modelo Padrão, não irei incluir uma explicação mais detalhada desse conceito, mas podemos descrevê-lo de forma breve como sendo uma propriedade intrínseca das partículas, como massa e carga elétrica, a qual, basicamente, indica a orientação que uma partícula apresenta quando é exposta a um campo eletromagnético.

3.1 Férmions

Férmion é o nome dado para um grupo que engloba as partículas que compõem a matéria. As partículas elementares que fazem parte dos férmions são chamadas de férmions elementares e são caracterizadas por apresentarem um spin de $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$, seguem o [Princípio da Exclusão de Pauli](#) e terem seu comportamento descrito pela chamada Estatística de Fermi-Dirac (formulada por Enrico Fermi e Paul Dirac).



Os férmions elementares são divididos em três colunas que representam três gerações:

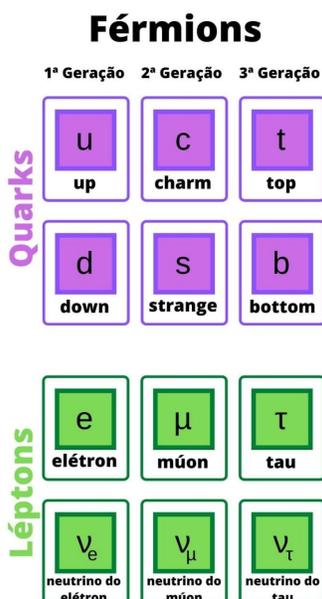


Figura 9: Gerações de férmions e suas respectivas subdivisões

1ª Geração: quark up, quark down, elétron e neutrino do elétron.

2ª Geração: quark charm, quark strange, múon e neutrino do múon.

3ª Geração: quark top, quark bottom, tau e neutrino do tau.

Partículas de gerações diferentes que estão na mesma linha são basicamente uma cópia da outra, a diferença é que a da geração seguinte é mais massiva e instável do que a da geração anterior. Por exemplo, o quark charm (que faz parte da 2ª geração) está na mesma linha que o quark up (que faz parte da 1ª geração), logo, ele é basicamente uma cópia deste quark, a diferença é que o quark charm é mais massivo e instável do que o quark up.

Então, se pegarmos o elétron (parte da 1ª geração), o múon (parte da 2ª geração) e o tau (parte da 3ª geração), por exemplo, teremos a relação de que o tau é mais massivo e instável do que o múon, que é mais massivo e instável do que o elétron.

Outra distinção que ocorre entre os férmions elementares é a divisão nos grupos dos **quarks** e dos **léptons**.

– Quarks

O primeiro grupo, o grupo dos Quarks, é o grupo de férmions elementares mais massivos. Existem seis tipos (ou sabores) de quarks, são eles os quarks up, down, charm, strange, top e bottom.

A existência dos quarks foi proposta em 1964 pelo físico estadunidense Murray Gell-Mann e pelo físico russo George Zweig de forma independente.



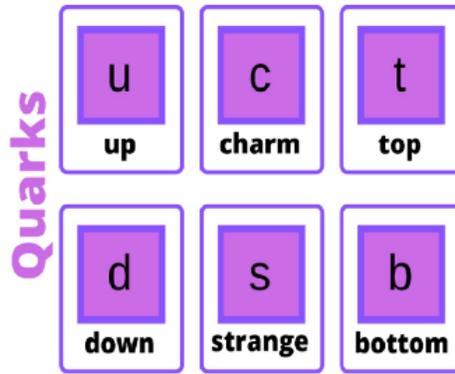


Figura 10: Tipos de quarks

Em 1961, Murray Gell-Mann criou um sistema chamado de Eightfold Way (caminho óctuplo) para organizar várias das partículas que haviam sido descobertas nas três décadas anteriores. Nesse sistema, Gell-Mann organizou as partículas conhecidas como hádrons (grupo de partículas do qual os prótons e nêutrons fazem parte) em esquemas com base na simetria apresentada entre as propriedades dessas partículas.

Em 1964, Gell-Mann percebeu que, usando o Eightfold Way, conseguiria descrever, entre outras coisas, as propriedades magnéticas dos prótons e nêutrons. Porém, esse modelo necessitava que os hádrons tivessem uma subestrutura composta por outras partículas, ou seja, partículas como prótons e nêutrons não poderiam ser elementares, deveriam ser formadas de partículas ainda menores. Diante de seus resultados, Murray Gell-Mann propõe, no mesmo ano, a existência de novas partículas elementares: os quarks.

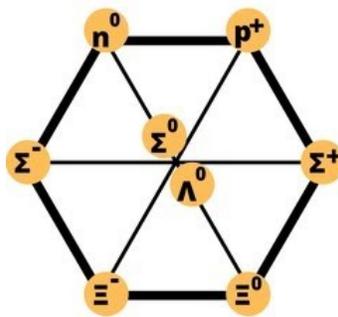


Figura 11: Octeto de Bárions, um dos sistemas do Eightfold Way

No mesmo ano, 1964, George Zweig também vai perceber, de forma independente, que os hádrons deveriam ser formados por partículas ainda menores, então ele propôs a existência de partículas que ele chamou de “ases”.

Ases e Quarks são a mesma coisa, Gell-Mann e Zweig estavam propondo as mesmas ideias, mas o trabalho de Gell-Mann ficou mais conhecido e o nome “quarks” foi o mais popularizado para essas partículas.

Então, em 1968, no Centro de Aceleração Linear de Stanford, a existência dos quarks foi comprovada, adicionando de forma definitiva mais uma partícula elementar ao Modelo Padrão.

Em relação à carga elétrica, os quarks up, charm e top apresentam carga elétrica de $+\frac{2}{3}e$, e os quarks down, strange e bottom apresentam carga elétrica de $-\frac{1}{3}e$.



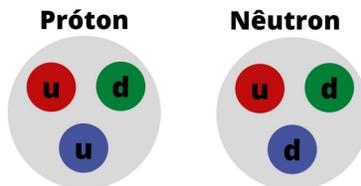


Figura 12: Estrutura do próton e do nêutron com a descoberta dos quarks.¹

Uma característica dos quarks que os diferenciam dos léptons é o fato de que nunca se tem um quark sozinho, eles sempre estão combinados com outros quarks ou com antiquarks (antipartículas do quarks)², formando partículas que são conhecidas como **hádrons**.

Os hádrons são definidos como partículas compostas por dois ou mais quarks ligados pela força nuclear forte. Eles são divididos em grupos dependendo de sua composição, entre esses grupos cabe destacar os **bárions**, que são partículas compostas por três quarks (ex: próton, nêutron, bárion lambda), e os **mésons**, que são partículas compostas por um quark e um antiquark (ex: píons, káons)

Os motivos para os quarks sempre estarem se juntando a outros quarks, formando hádrons, e para os quarks nunca serem encontrados sozinhos será explicado em Uma Breve Introdução ao Modelo Padrão da Física de Partículas III quando falarmos sobre a Força Nuclear Forte.

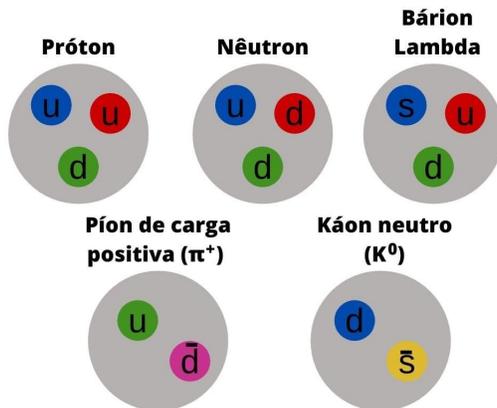


Figura 13: Exemplos de hádrons³

¹Note que, para esse modelo funcionar, os quarks (up e down, nesse caso) devem possuir uma carga “quebrada”, isto é, um não-múltiplo da carga elementar. De fato, foi comprovado que a carga do quark up é de $+\frac{2}{3}e$ e do down $-\frac{1}{3}e$, sendo e a carga elementar.

²Antipartículas são iguais suas partículas correspondentes, porém suas cargas elétricas são opostas a de suas partículas correspondentes. Se pegarmos o elétron, por exemplo, sua antipartícula seria o antieletron (mais conhecido como pósitron), o qual teria uma carga elétrica de $+1e$, enquanto a carga do elétron é de $-1e$.

³O traço em cima da letra indica que é uma antipartícula.



- Léptons

O segundo grupo dentro dos férmions, o grupo dos léptons, é o grupo de férmions elementares mais leves, composto pelo elétron, neutrino do elétron, múon, neutrino do múon, tau e neutrino do tau.

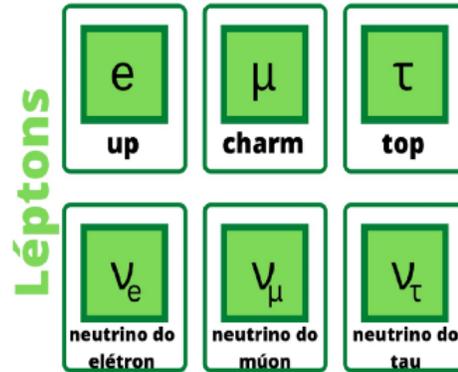


Figura 14: Tipos de léptons

• Elétrons, Múons e Taus

Os elétrons, múons e taus são os únicos léptons que apresentam carga elétrica, apresentando uma carga $-1e$. Essas três partículas são bem parecidas, mas graças às suas diferenças no tempo de vida (estabilidade) e na massa, é possível diferenciá-las.

Partícula	Massa (MeV)	Tempo de vida
Elétron	0.511	∞
Múon	106	2.2 milionésimos de segundo
Tau	1777	0.29 trilionésimos de segundo

Figura 15: Relação entre elétron, múon e tau

O múon tem uma massa aproximadamente 200 vezes maior do que a do elétron e um tempo de vida de 2.2 milionésimos de segundo, depois desse tempo, ele decai em um elétron e dois neutrinos.

Já o tau tem uma massa quase 3500 vezes maior do que a do elétron e um tempo de vida de 0.29 trilionésimos de segundo, depois desse tempo, ele decai em um múon, um neutrino do tau e um antineutrino do múon, ou em um elétron, um neutrino do tau e um antineutrino do elétron.

O elétron foi descoberto em 1897 por J.J. Thomson por meio de um experimento com raios catódicos. Já o múon foi descoberto em 1936 por Carl Anderson e Seth Neddermeyer por



meio da análise das partículas presentes em raios cósmicos. Por fim, o tau teve sua existência comprovada na década de 1970 por um grupo liderado por Martin Perl por meio de observações de seu decaimento em múons e em elétrons.

- **Neutrinos**

Agora, vamos falar um pouco dos neutrinos, os léptons mais leves e com carga elétrica neutra. A existência deles foi proposta pela primeira vez em 1930 pelo físico austríaco Wolfgang Pauli com o objetivo de explicar um processo radioativo chamado “decaimento beta”.

O decaimento beta consiste basicamente em um processo radioativo no qual um nêutron se transforma em um próton ou um próton se transforma em um nêutron, transformando assim o átomo de um elemento em um átomo de outro elemento. Para que esse processo ocorra, há a liberação das chamadas “partículas beta”, que são partículas compostas por elétrons e neutrinos.

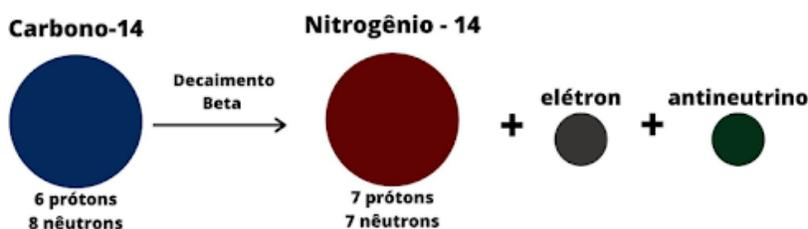


Figura 16: Decaimento β^- (um nêutron se transforma em um próton)

No início, acreditava-se que as partículas liberadas nesse processo, as partículas beta, eram compostas apenas por elétrons, mas percebeu-se que a energia do átomo inicial era menor do que a energia do átomo final mais a energia do elétron liberado. Logo, tinha energia a mais no processo que os cientistas não sabiam explicar de onde vinha. Então, Pauli propôs que existiriam outras partículas, além dos elétrons, que também eram liberadas nesse processo: os neutrinos.

Os neutrinos são partículas bem abundantes no universo. O Sol, por exemplo, libera trilhões de neutrinos por segundo, mas eles interagem muito pouco com a matéria e, por isso, foram difíceis de terem sua existência comprovada. Os Neutrinos só foram detectados pela primeira vez em 1956 por Clyde Cowan e Frederick Reines.

3.2 **Bósons**

O outro grande grupo de partículas, além dos férmions, é o grupo dos bósons. Os bósons são caracterizados por apresentarem um spin inteiro (-1, 0, 1, etc), não seguir o Princípio de Exclusão de Pauli e terem seu comportamento descrito pela Estatística de Bose-Einstein (formulada por formulada por Satyendra Nath Bose e Albert Einstein).

As partículas elementares que fazem parte deste grupo são chamadas de bósons elementares e são divididas em dois grupos: os **bósons de calibre** e os **bósons escalares**.



Bósons

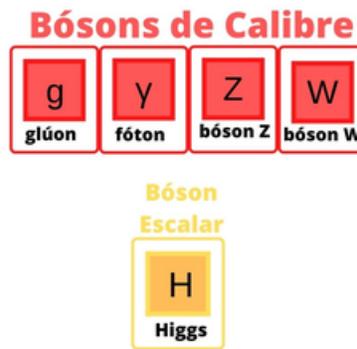


Figura 17: Os dois grupos de bósons e seus respectivos representantes

– Bósons de Calibre

Os bósons de calibre, também conhecidos como partículas mediadoras de força, são as partículas responsáveis por transportarem as forças fundamentais. Esse grupo é composto pelos **fótons**, os **glúons**, os **bósons Z** e os **bósons W**.

- **Fótons**

Os fótons foram os primeiros bósons de calibre a serem descobertos, sendo propostos pela primeira vez em 1905 por Albert Einstein e tendo sua existência comprovada em 1921 por Arthur Compton. Eles são responsáveis por carregarem a força eletromagnética (força que age sobre partículas que possuem carga elétrica).

- **Glúons**

Os glúons foram descobertos em 1979 no acelerador de partículas PETRA na Alemanha. Eles são os bósons responsáveis por carregarem a força nuclear forte (a força que mantém os prótons e nêutrons unidos no núcleo do átomo).

- **Bósons Z e W**

Os bósons Z e W foram propostos nos anos 60 por Abdus Salam, Steven Weinberg e Sheldon Glashow, e tiveram suas existências comprovadas em 1983 por meio de experimentos no acelerador de partículas SPS da CERN (Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear). Eles são os responsáveis por carregar a força nuclear fraca (força responsável por decaimentos radioativos).

– Bósons Escalares

- **Bósons de Higgs**

O único Bóson Escalar presente no Modelo Padrão é o chamado Bóson de Higgs, também conhecido popularmente como a “partícula de Deus”. Esse bóson é o responsável por dar massa a todas as partículas do universo.

A existência do Bóson de Higgs foi proposta em 1964 pelo físico britânico Peter Higgs. Na época, ninguém sabia explicar porque as partículas tem massa e porque algumas, como os fótons, não tem. Então, Higgs propôs que existiria um campo invisível, conhecido como



Campo de Higgs, que estaria presente em todo o universo e as partículas interagiriam com este campo.

Para explicar o que é o campo de Higgs, existe uma analogia bem interessante mostrada no vídeo [What is the Higgs boson?](#) que é a seguinte:

Pense nesse Campo de Higgs como um grande campo de neve. Se você está com um esquí, esquiando sobre o campo, ele não causa nenhuma resistência no seu movimento. Então, você consegue passar por ele de forma bem fluida e rápida, essas seriam as partículas sem massa, como o fóton.

Se você está usando aqueles sapatos próprios para neve, você consegue andar pelo o campo, mas apresenta certa dificuldade, porque o seu pé afunda um pouco na neve, essas seriam as partículas com massa. E se você está usando um sapato não apropriado para andar na neve, como um salto alto, seu pé afunda ainda mais na neve, causando uma resistência muito maior sobre seu movimento, essas seriam as partículas mais massivas.

Então, o que acontece é que as partículas interagem de formas diferentes com o Campo de Higgs. Algumas interagem muito, outras pouco, outras nem interagem, e isso é o que causa o que a gente chama de massa. Quanto mais uma partícula interage com o campo de Higgs, maior a resistência que ele vai exercer sobre o movimento da partícula, logo, maior a massa da partícula.

O bóson de Higgs seria a partícula que forma esse campo. Ele, na analogia, seria o floco de neve que, junto com outros flocos, forma o campo de neve.

A existência do bóson de Higgs, comprovada em 2012 por meio de experimentos no LHC (o maior acelerador de partículas do mundo), rendeu o Nobel da Física para Peter Higgs em 2013.

- **Gráviton**

Existe a hipótese de que existiria outro bóson de calibre, o gráviton. Esse bóson seria o responsável por carregar a força gravitacional. Porém, ele é apenas hipotético até o momento, nunca tendo tido sua existência comprovada.

4. Forças Fundamentais

Agora vamos falar um pouco sobre as forças fundamentais.

Existem quatro forças fundamentais: Força Eletromagnética, Força Gravitacional, Força Nuclear Forte e Força Nuclear Fraca. Essas forças agem sobre as partículas elementares, promovendo interações entre elas. Neste texto, falaremos um pouco sobre cada uma dessas forças, começando pela Força Gravitacional.

4.1 Força Gravitacional

A Força Gravitacional é a única das quatro forças fundamentais que não faz parte do Modelo Padrão e não é explicada por ele.

A teoria que melhor explica como a Força Gravitacional age é a Teoria da Relatividade Geral, que foi proposta por Albert Einstein em 1915. Nessa teoria, a força gravitacional é descrita como sendo curvaturas no tecido do espaço-tempo causadas pela presença de massa ou energia.



A gravidade é de longe a mais fraca das 4 forças fundamentais e como ela se comporta no mundo quântico é um mistério que os físicos estão tentando resolver.

Como dito em Uma Breve Introdução ao Modelo Padrão da Física de Partículas II, existe uma partícula que foi proposta como sendo a partícula mediadora da força gravitacional, o Gráviton, que seria um bóson de spin 2, e a explicação seria que a força gravitacional é transmitida por uma troca de grávitons entre as partículas. Porém, o gráviton nunca foi observado até hoje, sendo apenas uma partícula hipotética.

4.2 Força Eletromagnética

A próxima força que iremos falar sobre é a **Força Eletromagnética**, a força responsável pela repulsão entre partículas de carga elétrica de mesmo sinal (positiva com positiva e negativa com negativa) e atração entre cargas elétricas de sinais opostos (positiva com negativa).

A teoria quântica que explica essa força é a **Eletrodinâmica Quântica**.

– Eletrodinâmica Quântica (EDQ)

A Eletrodinâmica Quântica é a teoria mais precisa já proposta na física. Ela começou a ser desenvolvida em 1928 por Paul Dirac, que propôs uma teoria relativística do elétron, uma teoria que incorporava tanto a Mecânica Quântica quanto a Relatividade Restrita de Einstein.

Essa teoria proposta por Dirac viria a passar por novos desenvolvimentos ao longo dos anos com diversos contribuidores, entre eles vale destacar três nomes: Richard Feynman, Sin-Itiro Tomonaga e Julian Schwinger, os quais receberam o Nobel da Física em 1965 por suas contribuições à EDQ.

A Eletrodinâmica Quântica traz a Força Eletromagnética como uma força que age apenas sobre partículas que possuem a propriedade de **carga elétrica** (ex: elétrons, quarks e pósitrons) e tem o **fóton** como o bóson que transporta essa força.

Para explicar o funcionamento da força eletromagnética, vamos pegar dois elétrons como exemplo. Imagine esses dois elétrons se movendo um em direção ao outro, sabemos que, como os elétrons possuem cargas elétricas de mesmo sinal, eles vão se repelir, fazendo com que suas trajetórias mudem (Figura 18).

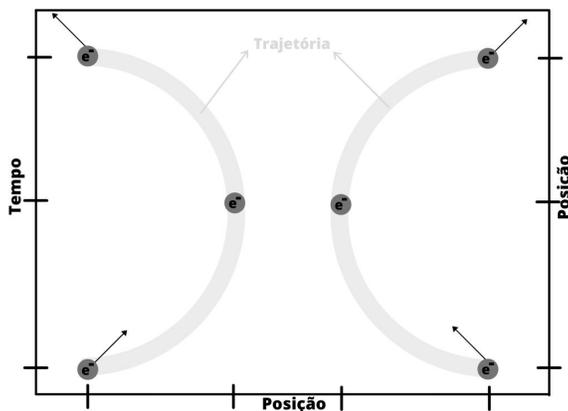


Figura 18: Elétrons se movendo em direção um ao outro e tendo suas trajetórias mudadas devido à força de repulsão entre eles.

A forma como a Eletrodinâmica Quântica vai explicar essa interação entre os dois elétrons é a seguinte: na Figura 19, um elétron se move em direção ao outro, para que acontece a interação



eletromagnética entre eles, um dos elétrons (vamos dizer o da esquerda) emite um fóton, sofrendo, assim um recuo e mudando sua trajetória. O outro elétron (o da direita) irá absorver o fóton emitido e, assim, sofrerá um recuo e terá sua trajetória mudada.

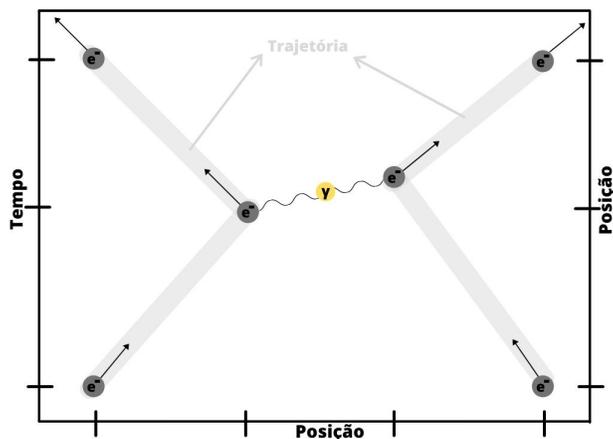


Figura 19: Elétrons se movendo em direção um ao outro e tendo suas trajetórias mudadas devido à força de repulsão entre eles a partir da emissão de fótons.

E, dessa forma, a Eletrodinâmica Quântica explicará a interação eletromagnética entre as partículas com carga elétrica, ela se trata de uma troca de fótons entre as partículas.

Como uma forma de criar uma descrição da matemática do comportamento e da interação entre partículas subatômicas de uma forma visual, facilitando o entendimento do processo, Richard Feynman criou os chamados **Diagramas de Feynman** em 1948.

– Diagramas de Feynman

Usando os Diagramas de Feynman, podemos representar a interação mostrada na Figura 19 da seguinte forma:

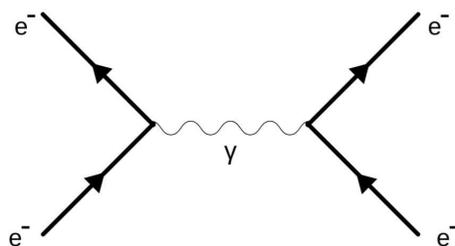


Figura 20: Diagrama de Feynman em interação eletromagnética com emissão de um fóton.

Onde a linha ondulada representa o fóton emitido, as setas representam o movimento dos elétrons e os vértices representam os pontos onde o fóton foi emitido ou absorvido.

Existem outras formas da interação eletromagnética ocorrer, com a emissão de mais fótons, com o fóton se transformando temporariamente em um par elétron e pósitron e depois se transformando novamente em um fóton antes de ser absorvido, etc. Mas esse diagrama com a emissão de um único fóton é o mais simples e fácil de entender e é o mais comum de acontecer.



4.3 Força Nuclear Fraca

Agora vamos falar sobre a Força Nuclear Fraca, a força fundamental responsável por processos radioativos. Essa força age sobre todos os férmions elementares e tem como sua partícula mediadora os bósons W e Z, mais especificamente os bósons W^+ (W positivo), W^- (W negativo) e Z^0 (Z nulo)⁴. O primeiro a começar a desenvolver uma teoria para essa força foi Enrico Fermi em 1933.

Para explicar como a Força Nuclear Fraca age, vamos usar o decaimento radioativo beta como exemplo, o decaimento em que um nêutron se transforma em um próton (beta menos), liberando um elétron e um antineutrino (antipartícula do neutrino) ou um próton se transforma em um nêutron (beta mais), liberando um pósitron (antipartícula do elétron) e um neutrino.

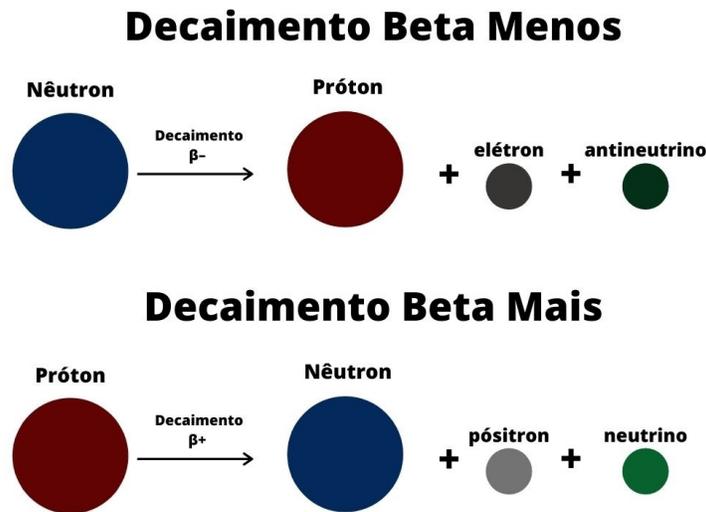


Figura 21: Decaimento Beta

Para entender como esse decaimento funciona, precisamos olhar no interior dos prótons e nêutrons. Sabemos que o próton é formado por dois quarks up e um down, e o nêutron é formado por dois quarks down e um up. Logo, precisaríamos transformar um dos quarks down do nêutron em um quark up para transformar um nêutron em um próton e um dos quarks up do próton em um quark down para transformar um próton em um nêutron.

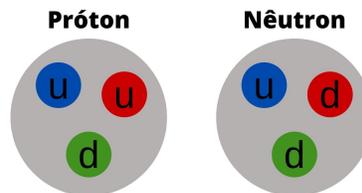


Figura 22: Estrutura do próton e do nêutron.

Vamos usar o Decaimento Beta Menos como exemplo. Nele, será necessário que um quark down do nêutron se transforme em um quark up, transformando, assim, um nêutron em um próton. A forma que o decaimento ocorrerá é a seguinte: um dos quarks down do nêutron irá emitir um

⁴Positivo, negativo e nulo se referem à carga elétrica desses bósons, o W^+ possui uma carga $+1e$, o W^- possui uma carga $-1e$ e o Z^0 possui uma carga 0.



bóson W^- , se transformando em um quark up e o bóson W^- rapidamente decai em um elétron e um antineutrino. Já no Decaimento Beta Mais, um dos quarks up do próton emite um bóson W^+ , se transformando em um quark down e o bóson W^+ irá rapidamente decair em um pósitron e um neutrino.

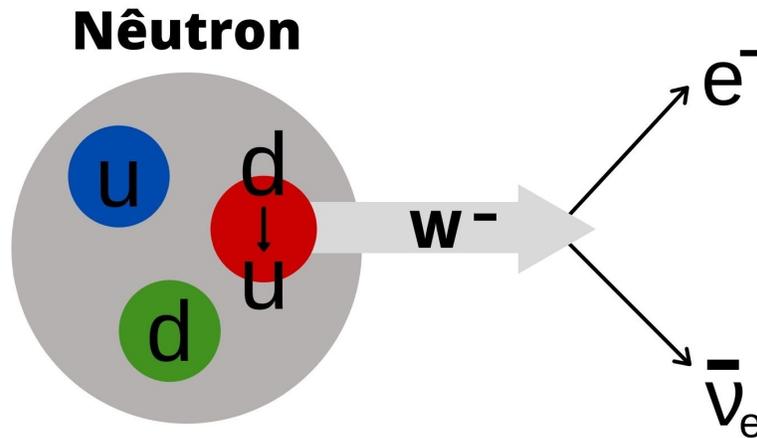


Figura 23: Quark down emitindo bóson W^- em decaimento beta menos, liberando um elétron e um antineutrino.

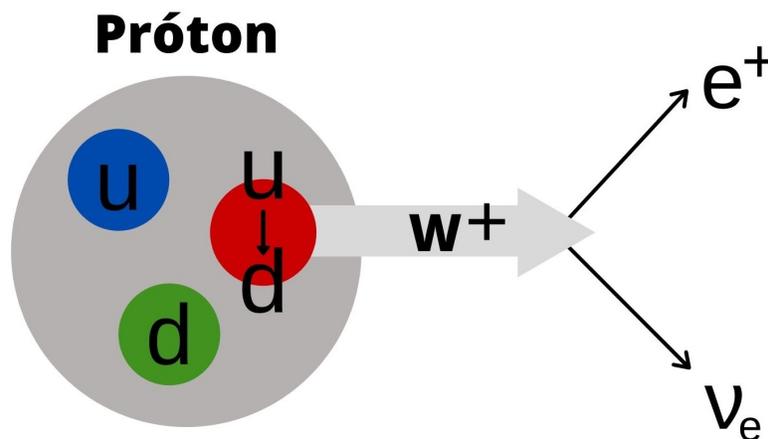


Figura 24: Quark down emitindo bóson W^+ em decaimento beta mais, liberando um pósitron (antielétron) e um neutrino.

4.4 Teoria Eletrofraca

Um maior entendimento da Força Nuclear Fraca veio na década de 1960, quando Abdus Salaam, Steven Weinberg e Sheldon Glashow fizeram uma proposta muito interessante: eles propuseram que a Força Eletromagnética e a Força Nuclear Fraca seriam apenas manifestações diferentes de uma mesma força, ou seja, essas duas forças poderiam ser unificadas em uma única força que recebeu o nome de **Força Eletrofraca**, sendo o funcionamento dessa força unificada descrita pela denominada **Teoria Eletrofraca**.

Com a Teoria Eletrofraca, Salaam, Glashow e Weinberg propuseram a existência de novas partículas que seriam as responsáveis por transportar a Força Nuclear Fraca, os bósons Z e W. A



teoria propõe que, sob energias baixas, os bósons Z e W e os fótons (partículas que transportam a Força Eletromagnética) seriam, na verdade, o mesmo tipo de partículas, só que em estados diferentes. Isso seria explicado por uma propriedade trazida pela Teoria Eletrofraca denominada **Ruptura Espontânea de Simetria**.

A Ruptura Espontânea de Simetria vai explicar que, sob energias mais elevadas, energias a partir de aproximadamente 100 GeV, os bósons Z e W e os fótons se comportariam de maneira semelhante, ou seja, a força eletromagnética e nuclear fraca se mostrariam ser uma mesma força, uma força unificada.

4.5 Força Nuclear Forte

Quando pensamos no núcleo de um átomo, sabemos que ele é composto por prótons e nêutrons, mas como esse núcleo consegue se manter unido? Por que a força de repulsão elétrica entre os prótons não faz o núcleo atômico se separar? A resposta para essas perguntas está na existência da Força Nuclear Forte, ela é a força fundamental responsável por manter o núcleo atômico unido, ela faz isso mantendo as partículas elementares que compõem os prótons e nêutrons, os quarks, unidos.

A forma como essa força age é descrita por uma teoria chamada de **Cromodinâmica Quântica**, a qual diz que a Força Nuclear Forte age apenas sobre as partículas elementares **quarks** e **glúons**.

Para que possamos entender um pouco melhor sobre como a Cromodinâmica Quântica funciona, precisamos primeiro conhecer uma propriedade dos quarks e dos glúons chamada de **Carga de Cor**.

– Carga de Cor

Como visto em Uma Breve Introdução ao Modelo Padrão da Física de Partículas II, os quarks são partículas elementares classificadas como férmions, sendo assim, elas devem obedecer ao Princípio da Exclusão de Pauli, o qual afirma que "férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente".

Logo, percebemos que, quando pegamos um hádron (partículas formadas por conjuntos de quarks), cada quark que compõe o hádron precisa ter ao menos uma característica que o diferencie dos outros quarks que compõem o mesmo hádron, uma característica que diferencie seus estados quânticos para que o Princípio da Exclusão de Pauli seja obedecido. Até o início da década de 1960 as propriedades conhecidas dos quarks que poderiam fazer essa diferenciação eram o spin e o sabor do quark (up, down, charm, strange, top ou bottom). Para ilustrar melhor essa ideia, vamos pegar um próton, por exemplo. O próton é formado por dois quarks up e um quark down, já fica evidente que os quarks up se diferenciam do down em sabor, então já não são idênticos, mas e entre os quarks up? O que pode diferenciar eles? Eles poderiam ser diferenciados pelo spin, um poderia ter um spin $+\frac{1}{2}$ e o outro ter um spin $-\frac{1}{2}$ e assim o Princípio da Exclusão de Pauli estaria sendo obedecido.



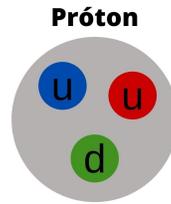


Figura 25: Próton

Porém, Murray Gell-Mann, em 1964 (mesmo ano em que havia proposto a existência de quarks), descobriu a existência de uma partícula que recebeu o nome de Bárion Omega-menos, uma partícula composta por três quarks strange. Isso gerou um problema, porque, com o conhecimento que se tinha na época, essa partícula parecia não obedecer ao Princípio da Exclusão de Pauli. Já que a partícula é formada por três quarks strange, então o sabor dos quarks já não é o que os diferencia um dos outros, e um deles poderia ter um spin de $-\frac{1}{2}$ e outro um spin de $+\frac{1}{2}$, mas e o terceiro quark strange? Sendo um férmion elementar, ele só pode apresentar spin $+\frac{1}{2}$ ou $-\frac{1}{2}$, logo seria necessariamente idêntico a um dos outros quarks strange presentes na partícula e, assim, o Princípio da Exclusão de Pauli seria desobedecido.



Figura 26: Bárion Omega-menos.

Para resolver esse problema, Oscar Greenberg e Yoichiro Nambu propuseram, em 1964, a existência de uma nova propriedade para os quarks, uma propriedade que recebeu o nome de **Carga de Cor**. Essa nova propriedade propunha que os quarks poderiam ter uma carga de cor vermelha, verde ou azul⁵, o que permitiria que nenhum dos quarks no Bárion Omega-menos fossem idênticos.

Com a proposta da propriedade da Carga de Cor⁶, veio a proposta de que essa propriedade poderia ser a fonte da Força Nuclear Forte, assim como a carga elétrica é a fonte da Força Eletromagnética. A partir disso, foi-se desenvolvendo uma teoria para explicar melhor essa propriedade e como ela poderia promover interações entre quarks, a **Cromodinâmica Quântica**.

– Cromodinâmica Quântica

Como falado anteriormente, a Cromodinâmica Quântica é a teoria quântica que explica a Força Nuclear Forte. Ela diz que os bósons que transportam essa força são os glúons, os quais

⁵A propriedade "carga de cor" recebeu esse nome, pois possui três estados que foram nomeados de forma análoga às cores primárias da luz (azul, vermelho e verde). Vale ressaltar que os quarks não apresentam realmente um cor vermelha, verde ou azul, esses foram apenas os nomes que os estados dessa propriedade receberam de forma análoga.

⁶No caso de antiquarks, as carga de cor seriam anti-vermelho, anti-verde e anti-azul.



também possuem Carga de Cor. Logo, podemos resumir a Força Nuclear Forte como sendo a força fundamental que age sobre partículas com Carga de Cor.

A Cromodinâmica Quântica também traz para os quarks a chamada **Propriedade de Confinamento**, essa propriedade diz que os quarks sempre devem estar juntos de outros quarks ou antiquarks de maneira a formar uma partícula incolor ou "branca". Se pegarmos um bárion (partículas formadas por três quarks), por exemplo, ele terá que ter necessariamente um quark vermelho, outro verde e outro azul para satisfazer essa propriedade, já que a junção dessas três cores resulta na cor branca.

Já em mésons (partículas formadas por um quark e um antiquark), as combinações possíveis seriam as seguintes: quark vermelho e antiquark antivermelho, quark verde e antiquark antiverde, quark azul e antiquark antiazul. Dessa forma, a cor e a anticor combinadas resultam em uma partícula incolor e a Propriedade de Confinamento é obedecida.



Figura 27: Cargas de Cor.

Como a Propriedade de Confinamento diz que os quarks nunca podem ser encontrados sozinhos, eles devem estar ligados a outros quarks, e quem promove essa ligação é a Força Nuclear Forte da seguinte forma: o quark emite um glúon, o que muda a carga de cor do quark, e esse glúon será absorvido por outro quark, mudando a cor desse quark que o absorveu de forma a manter a cor resultante branca da partícula. Essa troca constante de glúons entre quarks é o que os mantém unidos.

Para explicar melhor o funcionamento dessa força, vamos pegar um bárion com exemplo. Como já sabemos, o bárion é formado por um quark verde, um vermelho e um azul. Vamos usar esse exemplo em passos:

Passo 1: O quark azul emite um glúon.

Passo 2: A cor desse quark azul muda para verde (agora temos uma partícula formada por dois quarks verdes e um vermelho).

Passo 3: O quark verde absorve o glúon emitido.

Passo 4: A cor do quark verde que absorveu o glúon muda para azul.

E, assim, voltamos a ter uma partícula incolor com um quark verde, um azul e um vermelho e o Confinamento é obedecido.



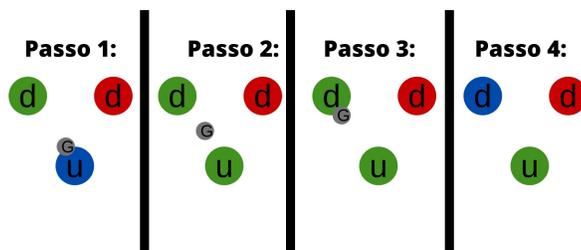


Figura 28: Passos do exemplo

No núcleo dos átomos, os quarks também trocam glúons entre si entre bárions diferentes, mantendo o núcleo atômico unido pela Força Nuclear Forte.

Outra propriedade que a força nuclear forte apresenta é a chamada **Liberdade Assintótica**, a qual afirma que, sob energias normais, a Força Nuclear Forte é realmente muito forte e mantém os quarks e glúons bem unidos. Porém, sob energias elevadas, experimentos com aceleradores de partícula mostraram que a Força Nuclear Forte começa a enfraquecer e os quarks e glúons passam a se comportar quase como se fossem partículas livres.

5. Teoria da Grande Unificação

Com o sucesso que a Teoria Eletrofraca teve, era natural que os cientistas procurassem encontrar uma forma de unificar a Teoria Eletrofraca e a Cromodinâmica Quântica, ou seja, unificar as forças eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte. Então, foi desenvolvida a chamada **Teoria da Grande Unificação**.

Se observa, por meio de experimentos, que quanto maior a energia, mais fraca fica a Força Nuclear Forte e mais forte ficam as forças Eletromagnética e Nuclear Fraca, fazendo com que, a certa energia, essas forças se igualem, essa energia é a chamada de **Energia da Grande Unificação**.

A Energia da Grande Unificação tem um valor de aproximadamente 10^{16} GeV, ou seja, a uma energia de 10^{16} GeV, as forças eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte se unificariam em uma única força. Para se ter ideia de quanta energia isso significa, isso é aproximadamente 100 bilhões de vezes a energia que o maior acelerador de partículas do mundo, o LHC, consegue gerar, então não se tem prova experimental de que essa teoria esteja certa, já que, atualmente, não é possível testá-la em laboratório. Porém, acredita-se que essas condições teriam acontecido a 10^{-34} segundos após Big Bang, indicando que essas forças estariam unificadas nessa época.

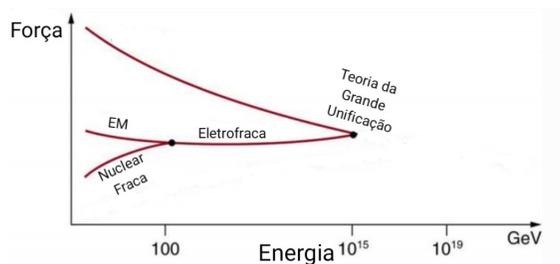


Figura 29: Gráfico Força x Energia mostrando a unificação da força eletrofraca com a força nuclear forte.

[Imagem original](#)



6. Teoria de Tudo

Outra ideia de unificação de forças fundamentais é a **Teoria de Tudo**. Ela, diferente da Teoria da Grande Unificação, que propõe a unificação de apenas três das quatro forças fundamentais, propõe uma unificação de todas as forças fundamentais, incluindo a gravitacional.

Acredita-se que a energia necessária para unificar as quatro forças fundamentais seja de 10^{19} GeV. Para se ter uma ideia de quanta energia isso significa, usando a mesma tecnologia do LHC, seria necessário construir um acelerador de partículas de 1000 anos-luz (aproximadamente 9.5×10^{15} quilômetros) de diâmetro para gerar essa quantidade de energia.

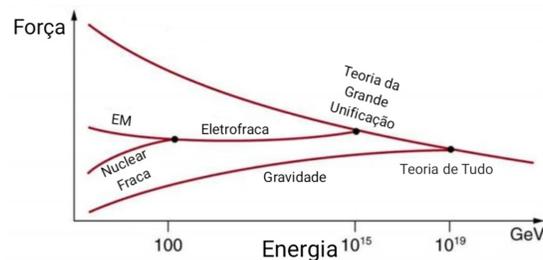


Figura 30: Gráfico Força x Energia mostrando a unificação de todas as forças fundamentais.

[Imagem original](#)

7. Comparação das Forças Fundamentais

Para finalizar gostaria de fazer uma comparação entre as forças fundamentais.

Forças Fundamentais

Força	Propriedade Associada	Efeito	Alcance	Partícula que carrega a força	Força Relativa
Gravitacional	Massa	Todas massas atraem uma a outra	Infinito, mas enfraquece com a distância	Gráviton	10^{-36}
Eletromagnética	Carga elétrica	Cargas opostas se atraem, iguais se repelem	Infinito, mas enfraquece com a distância	Fóton	1
Nuclear Forte	Carga de Cor	Três cores se combinam para fazer combinações neutras	$\approx 10^{-15}$ metros (distância entre prótons no núcleo atômico)	Gluon	102
Nuclear Fraca	Carga fraca	Partículas massivas decaem em partículas menos massivas	$\approx 10^{-18}$ (1/1000 do diâmetro de um próton)	Bósons W e Z	10^{-7}

[Imagem Original](#)

Como se pode ver na tabela, a Força Nuclear Forte é a mais forte de todas forças fundamentais, seguida da Força Eletromagnética, depois da Força Nuclear Fraca e, por último, a mais fraca de todas é a Gravitacional.

