



Universidade Federal do ABC



IV INTERNATIONAL MASTERCLASSES UFABC - HANDS ON PARTICLE PHYSICS

Material de apoio ao professor e participantes

Martin Luther King Oliveira Sousa

Giselle Watanabe

Lúcio Campos Costa

Eduardo de Moraes Gregores

Carta de abertura

Prezados professores e participantes do *IV International Masterclasses UFABC - Hands On In Particle Physics*, é com grande satisfação que a UFABC apoia a realização desse evento promovido pelo CERN (*Centro Europeu para Pesquisas Nucleares*) em parceria com mais de 200 universidades em 42 países, envolvendo cerca de 10.000 alunos.

No programa do evento estão incluídas palestras com pesquisadores ligados ao CERN, que abordam de forma introdutória temas da Física de Partículas, como as principais teorias e experimentos, além de aspectos das pesquisas que os mesmos vêm desenvolvendo. Além disso, estão organizadas atividades de análise e interpretação de dados produzidos no LHC (*Large Hadron Collider - Grande Colisor de Hádrons*). Para a análise, os participantes usam um *software* de visualização similar ao empregado nas pesquisas reais. Através deste, se têm a oportunidade de interpretar os tipos de reações ocorridos nas colisões a partir dos traços deixados nos diferentes detectores do LHC pelas partículas geradas (como os elétrons, pósitrons, neutrinos, múons e anti-múons, fótons, bósons W, Z e H entre outras). A partir destas informações são produzidos gráficos e uma análise final é realizada para que, no último dia do evento, os participantes apresentem seus resultados em uma videoconferência na qual participam estudantes e cientistas de outros países. Este é um momento de trocas de informações, intercâmbio cultural e de questionamentos diversos.

Para que os participantes possam ir se inteirando do evento, nas semanas que o antecedem sugerimos a leitura do texto que segue e o uso do software (<https://www.i2u2.org/elab/cms/ispay-webgl>). Também nos acompanhem nas redes <https://www.facebook.com/masterclassufabc/> e <http://masterclassufabc.16mb.com/>

Com esse trabalho esperamos que o universo da Física de Partículas possa ser, ainda que de forma singela, aproximado de todos e que, em especial, seja possível estimular tanto a curiosidade quanto a reflexão crítica dos participantes acerca do trabalho dos cientistas e do desenvolvimento da Ciência em laboratórios de pesquisa. Então, mãos à obra, ou melhor, mãos nas partículas (*hands on particle physics*).

Equipe Masterclass UFABC 2017

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS	4
PREÂMBULO HISTÓRICO.....	4
O MODELO PADRÃO	10
BREVE RETOMADA	20
SUGESTÕES DE ATIVIDADES	22
2. CERN E LHC: O QUE É?	24
3. EXPERIMENTO CMS	32
4. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS

No texto que se segue, propõe-se uma introdução sobre alguns temas da Física de Partículas Elementares, como o Modelo Padrão, e o funcionamento dos aceleradores de partículas, em especial o LHC.

PREÂMBULO HISTÓRICO

Estudos em História das Ciências indicam que desde a Grécia antiga, pensadores refletiram sobre a composição da “matéria”. Empédocles (490 a.C – 430 a.C) afirmava que toda a matéria era concebida pela combinação de quatro elementos fundamentais, terra, água, fogo e ar e que esta combinação se dava sob a ação de duas forças básicas chamadas de “amor” e “ódio”, ou seja, repulsão e atração. Esta ideia ficou conhecida como a Teoria dos Quatro Elementos e, posteriormente, Aristóteles (384 a.C - 322 a.C) usa dessa teoria e lhes atribui qualidades, a saber, quente, frio, seco e úmido. Todas as substâncias existentes seriam formadas pelos quatro elementos e cada elemento era caracterizado por um par de qualidades. Demócrito (460 a.C - 370 a.C) concebia que a matéria é composta por pequenas partes imutáveis e indivisíveis, que são os átomos (em grego significa indivisível), sendo em geral, considerado como o pai da atomística.

Aqui, pedimos licença para darmos um salto de alguns séculos, retomando a questão da natureza da “matéria”. Em torno de 1660, Robert Boyle (1627-1691) apresentou a ideia de que um elemento era como uma substância que não podia ser separada em outras substâncias mais simples, rejeitando a Teoria dos quatro elementos. Em 1808 Dalton (1766-1844), propôs que cada elemento era formado por átomos de um certo tipo característico sendo neutro e não possuindo cargas.

Já no século XIX, num período onde as justificativas para hipótese atômica adquiriam maior embasamento empírico e representações teóricas cada vez mais robustas. Não se pode esquecer que, neste mesmo período, outras áreas da Física e Química se desenvolviam, permitindo um adequado entendimento de fenômenos isolados e, conseqüente suporte para se abordar outros mais complexos. Neste caso, como em outros, demarcar precisamente datas, personagens e locais envolvidos com

o processo humano de formação de uma concepção atômica da matéria não é tarefa simples e, por isso, advertimos os leitores que um aprofundamento histórico do tema é fundamental para não incorrerem em reducionismos e distorções históricas. Cientes destes riscos, ensaiaremos a seguir uma tentativa de apresentar, de forma pragmática e não necessariamente respeitosa ao curso histórico dos fatos, alguns elementos teóricos e experimentais da Física de Partículas conforme a conhecemos já desde os finais do século XX.

No entanto, antes, vamos relembrar algumas descobertas que deram origem aos modelos mais tradicionalmente apresentados nas aulas de Ensino Médio como, por exemplo, o modelo de Rutherford.

O físico Willian Crookes (1832-1919), em 1879, consegue obter em um experimento indícios de que uma radiação emitida por um catodo era constituída de cargas negativas quando uma descarga elétrica atravessava um gás, fato este confirmado por John J. Thomson (1856-1940), que, em 1897 usando a ampola de Crookes (adaptada), como apresenta a **Figura 1**, determinou que esses raios são constituídos de partículas menores que o átomo. Ao medir a relação carga/massa destas partículas, ele compara com a razão carga/massa de íons que eram obtidas em eletrólise e estas eram bem maiores que a razão das primeiras. Ele ainda verificou que independente dos constituintes da ampola, ou seja, do gás, catodo e anodo essas partículas eram sempre as mesmas, sendo por esse feito considerado o descobridor do elétron. Estas partículas que eram dotadas de cargas negativas, passam a ser consideradas constituintes universais da matéria. Dois anos depois, Thomson formulou um modelo para os constituintes da matéria onde o átomo era uma esfera eletricamente positiva com elétrons espalhados por toda a sua extensão. Como os elétrons são negativos, o átomo seria eletricamente neutro. Esse modelo ficou conhecido como “pudim de passas” conforme se observa na **Figura 2**.

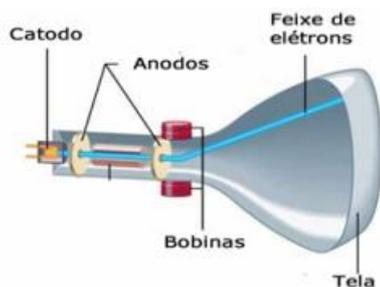


Figura 1: Ampola de Crookes (tubo de raios catódicos)

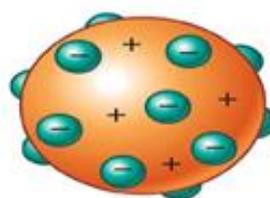


Figura 2: Modelo “pudim de passas”

Foi Ernest Rutherford (1871-1937) que descobriu que átomos radioativos emitiam dois tipos de radiação, alfa (α) e beta (β), que depois verificou-se serem o núcleo e o elétron do Hélio, respectivamente. Em um experimento, em 1909, ele obteve como resultado algo que contrariava o modelo “pudim de passas” de Thomson. Ao bombardear finas folhas de ouro com partículas α e estudar seus espalhamentos, ele verificou que algumas dessas partículas (em torno de uma em oito mil) voltavam em um ângulo maior que 90° , conforme representado na **Figura 3**. Assim, ele concluiu que o átomo tinha um núcleo central maciço e carregado positivamente, onde o desvio das partículas α ocorriam devido a uma repulsão eletrostática. Em 1911 ele apresenta seu modelo atômico planetário, que consiste em um núcleo no centro e os elétrons orbitando ao seu redor.

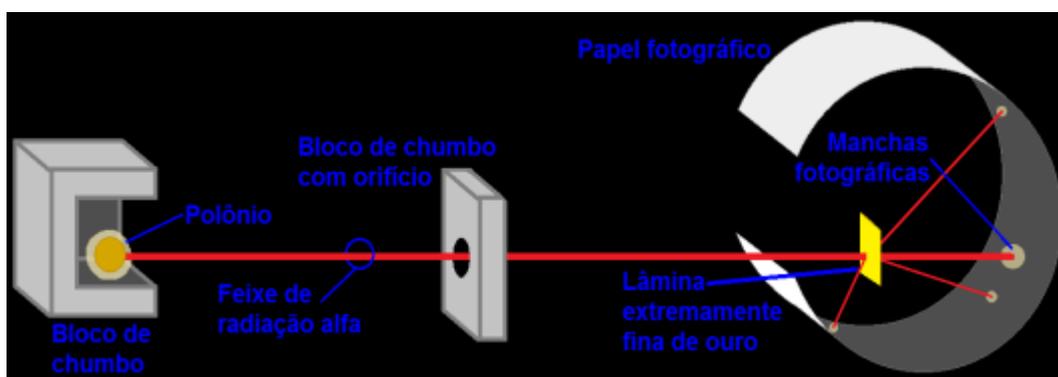


Figura 3: Experimento de Rutherford

Em 1913, Niels Bohr (1865-1962) propôs um modelo que ia de encontro aos dados experimentais obtidos até então, além de explicar a instabilidade que o modelo de Rutherford apresentava, já que cargas elétricas em movimento acelerado emitiam radiação e, não podendo ter uma órbita estável, o elétron teria o seu raio diminuindo e passaria a percorrer uma espiral até vir a colidir com o núcleo. Segundo o modelo de Bohr, os elétrons, ao girarem em torno do núcleo, o fazem em órbitas circulares, não ganhando e nem perdendo energia. Ao ganhar energia, através de uma radiação, o elétron passaria a ocupar uma outra órbita – com nível de energia maior – e, em seguida, liberaria essa energia recebida em forma de radiação eletromagnética e, então, retornaria ao nível de origem (**Figura 4**). As órbitas possuiriam níveis de energia bem definidos e a quantidade de energia, recebida ou emitida, definiria qual órbita o elétron passaria a ocupar (**Figura 5**).

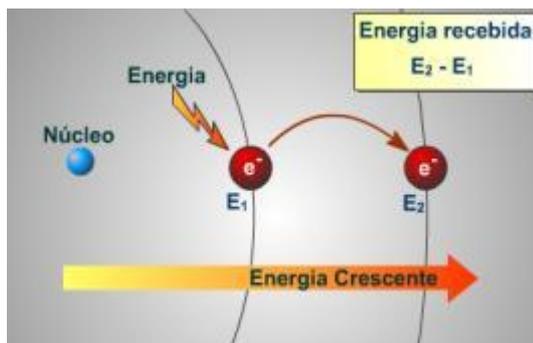


Figura 4: transição de um elétron

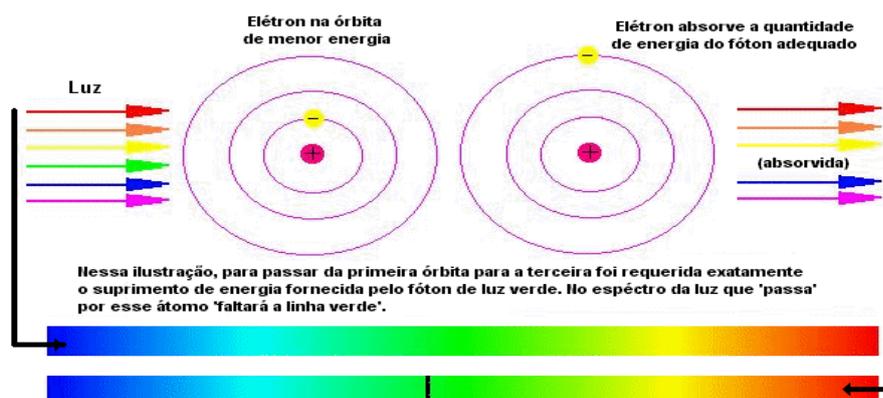
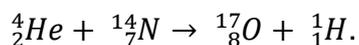
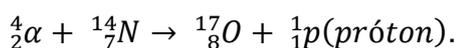


Figura 5: órbitas permitidas

Em 1920, Rutherford propôs publicamente a designação da carga positiva do núcleo de próton, que em grego significa o primeiro. Um ano antes, em 1919, ele publica o resultado obtido ao bombardear o nitrogênio com partículas α , obtendo um isótopo de oxigênio e núcleo de hidrogênio, que são prótons, como na equação a seguir:

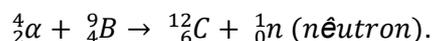


Que também pode ser representada conforme equação abaixo:



Nessa época, um problema em aberto era a radioatividade, que podia ser interpretada como uma instabilidade dos núcleos atômicos. Além da radiação β , que são elétrons, ainda havia a questão do núcleo, que não poderia ser formado apenas por prótons já que, devido a repulsão elétrica, culminaria em sua desintegração. Chegaram a sugerir a presença de uma partícula neutra, que seria constituída por prótons e elétrons, que estabilizaria o próton e ainda explicaria a origem dos raios β ,

mas essa proposta não seguiu adiante, uma vez que, pela Mecânica Quântica (Princípio da incerteza), seria necessária uma quantidade imensa de energia para se confinar um elétron no núcleo. Após alguns físicos chegarem bem próximos de detectar o nêutron, em 1931, James Chadwick (1891-1874) ao reproduzir uma experiência do casal Juliet-Currie, bombardeando berílio com partículas α , conseguiu como produto o carbono e uma partícula neutra, como nos mostra a equação:



Apesar da evolução do modelo atômico (**Figura 6**), o mais tradicionalmente ensinado nas aulas do EM até hoje é o modelo atômico orbital de Rutherford (**Figura 7**) que consiste de uma região central chamada de núcleo, que contém os prótons e os nêutrons, em torno da qual orbitam os elétrons, essa última chamada de eletrosfera.

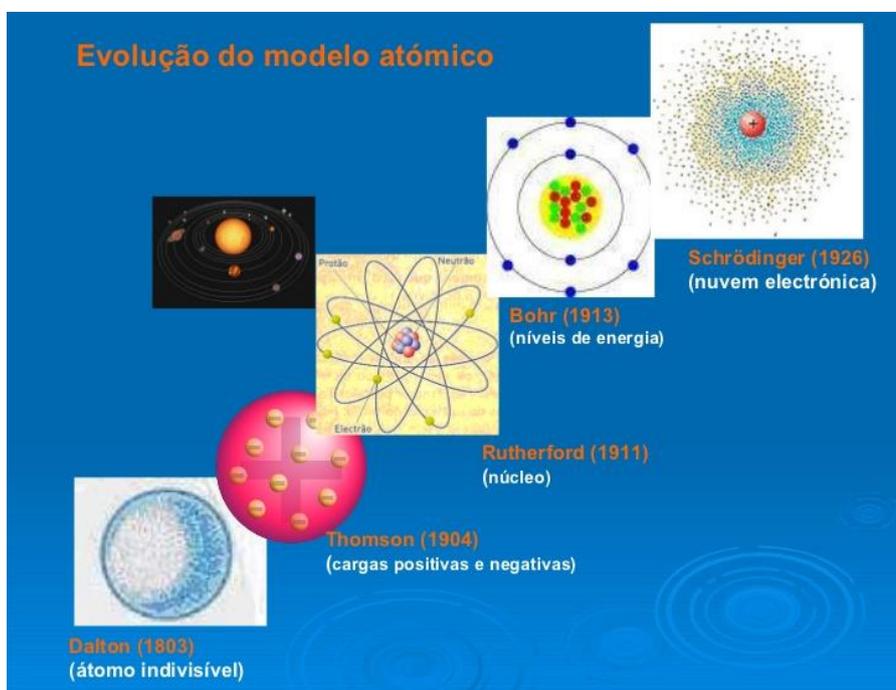


Figura 6: Evolução do modelo atômico

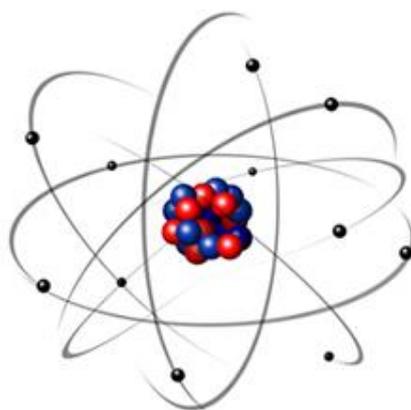


Figura 7: Modelo atômico orbital

Duas propriedades dessas partículas são citadas, a massa e a carga elétrica, onde a carga elétrica pode se manifestar com características opostas. O próton é portador da carga elétrica chamada positiva enquanto os elétrons são portadores da carga elétrica chamada de negativa. Os nêutrons não apresentam essa propriedade e, por isso, são chamados de eletricamente neutros.

Dessa forma, o núcleo será carregado eletricamente com carga positiva enquanto a eletrosfera eletricamente negativa, assim, um átomo é eletricamente neutro, uma vez que o número de prótons é sempre idêntico ao número de elétrons. Se, por algum processo, um átomo ganhar ou perder elétrons, ele deixa de ser eletricamente neutro e passa a ser chamado de íon. Os íons poderão ser positivos, caso o átomo perca elétrons e negativos caso o átomo ganhe elétrons sendo chamados de cátions e ânions respectivamente.

Por um longo tempo se teve a ideia de que essas três partículas, prótons, elétrons e nêutrons eram os elementares (não divisíveis), os 'tijolos' de toda a matéria e, até hoje, é passado esse modelo para os alunos. Porém, ao longo do século XX, diversas novas partículas foram propostas e descobertas, indicando o que pode ser, de fato, tratado como elementar e como a matéria é composta por combinações destas partículas.

Para aguçarmos a curiosidade, reflita sobre a seguinte questão: “seria correto afirmar que o adjetivo 'elementar' usado acima se refere, hoje, à nossa limitação experimental em prospectar subdivisões do que conhecemos? ”

Esse modelo, aceito atualmente pela comunidade científica para explicar o Universo microscópico que será apresentado de forma simplificada e introdutória, é o chamado MP.

O MODELO PADRÃO

O Modelo Padrão¹, a teoria que descreve as partículas elementares, foi desenvolvido no final dos anos 60 e, hoje, é aceito como a teoria que melhor descreve o comportamento das partículas elementares. Segundo o Modelo Padrão, as partículas elementares estariam divididas em dois grandes grupos:

- **Os Férmions**
- **Os Bósons**

Os férmions compõem a matéria e os bósons são os responsáveis pelas forças que atuam sobre a matéria. Os férmions fundamentais apresentam-se em dois tipos básicos:

- **Os Quarks**
- **Os Léptons**

Os quarks possuem duas propriedades importantes: o **sabor** e a **cor** (mais detalhes dessa propriedade na sequência do texto). Os nomes destas propriedades não têm relação com as propriedades macroscópicas, são apenas indicações, como a propriedade da carga elétrica, por exemplo, que pode ser a positiva ou negativa. Temos seis espécies de Quarks, também chamados de sabores, *up* (u), *down* (d) *top* (t), *bottom* (b), *charm* (c) e *strange* (s), tal como apresentado na **Figura 8**.

¹Não se assuste com a quantidade de nomes que aparecerão daqui para frente. São apenas formas de identificar e classificar as partículas segundo alguns critérios. Os nomes vão se tornando familiares a medida que você for “trabalhando” com essas partículas.

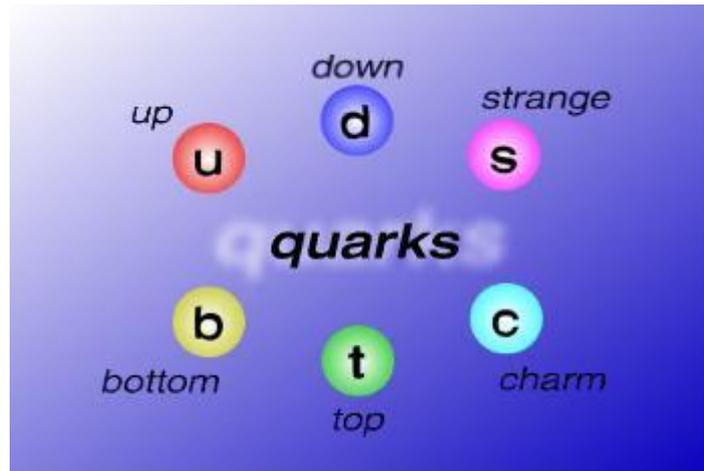


Figura 8: Sabores dos Quarks

Para cada sabor de um quark existe um antissabor, ou seja, cada quark possui o antiquark, que é a sua antipartícula. A antipartícula corresponde a uma partícula com a mesma massa, mas com carga elétrica oposta. Então, temos o antiup (designado por \bar{u}) o antidown e, assim, sucessivamente.

Tomando a carga elétrica do elétron como referência ($-1e$), todas as outras partículas possuem um número inteiro de carga elementar, como o próton, que possui $+1e$. Os quarks possuem uma característica peculiar quanto á carga elétrica. Eles possuem valores fracionários de carga elétrica elementar, podendo ser de $+\frac{2}{3}e$ ou $-\frac{1}{3}e$.

Até os dias atuais, os quarks nunca foram detectados sozinhos. Eles sempre são detectados em trios ou em pares sendo chamados de Hádrons, que do grego significa massivo. Os trios de quarks são chamados de **bárions**; os formados por 3 antiquarks são chamados de **antibárions**. As duplas formadas por 1 quark e 1 antiquark são chamadas de **mésons (Figura 9)**.

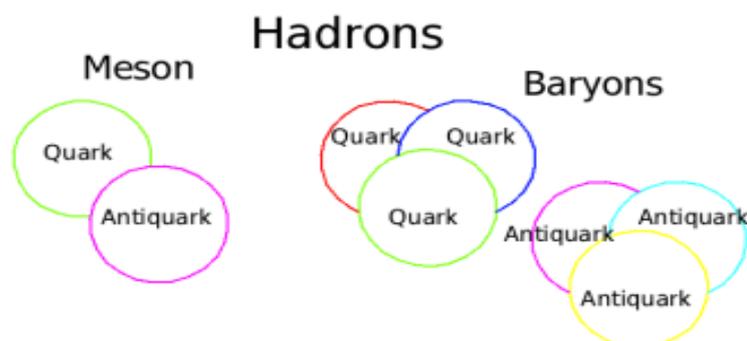


Figura 9: Formação dos Hádrons

Os representantes mais conhecidos dos bárions são os prótons e os nêutrons. Eles são formados pelas combinações de quarks up (u) e quarks down (d). Enquanto o próton é constituído por 2 quarks u e 1 quark d, o nêutron é constituído por 2 quarks d e 1 quark u. Os mésons mais conhecidos são os píons (π) e os káons (K) que podem ter diferentes combinações de quarks e antiquarks.

Devido as possíveis combinações entre quarks e antiquarks, podemos ter uma vasta família de partículas denominadas de hádrons. Na Figura 10, indicamos algumas dessas combinações

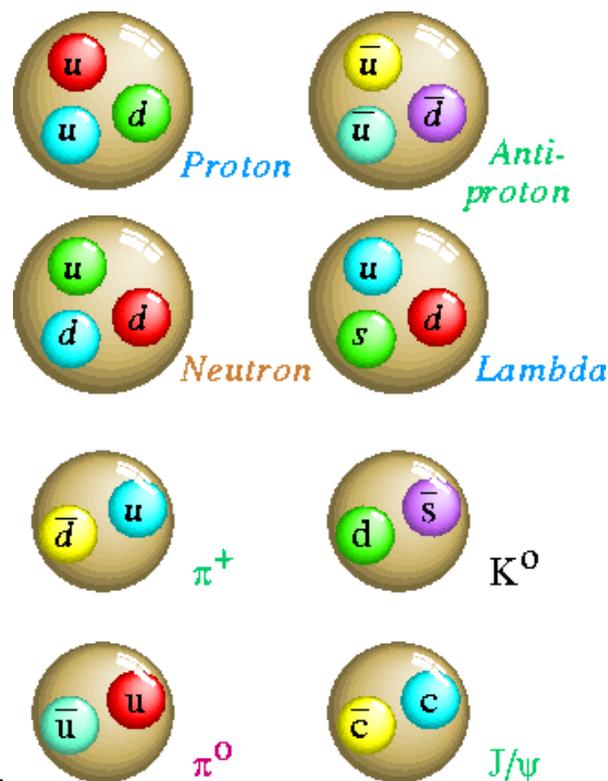


Figura 10: Exemplos de bárions e mésons

Como podemos perceber, os prótons e nêutrons não são partículas elementares, por serem formadas por combinações dos quarks up e down. Com uma relação simples, consegue-se demonstrar porquê o próton possui carga elétrica (p^+) enquanto o nêutron não possui carga elétrica (n^0). Partindo do fato de que ambos são formados por quarks u e d, temos uma demonstração simples:

$$\text{Carga do u} = +2/3 e \quad \text{Carga do d} = - 1/3 e.$$

$$\text{Próton} = uud = (+2/3e) + (+2/3e) + (- 1/3e) = + 1e$$

Carga elétrica do próton é +1 da carga elétrica elementar

Carga do u = +2/3 e Carga do d = - 1/3 e.

Nêutron = ddu = (-1/3e) + (-1/3e) + (+2/3e) = 0

Carga elétrica do nêutron é nula

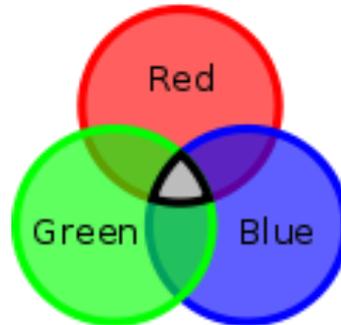
Uma outra propriedade da matéria, como carga elétrica ou carga cor, é chamada de spin, que também pode ser usada para definir a classificação entre as partículas elementares. Os férmions possuem spin semi-inteiro ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$) enquanto os bósons possuem spin inteiros (0,1,2). Os prótons, elétrons e nêutrons, são férmions de spin $\frac{1}{2}$, enquanto os fótons, W+, W-, Z e os glúons são bósons de spin 1. Os férmions obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, que diz que duas partículas idênticas não podem jamais apresentar os mesmos números quânticos, ou seja, ocupar o mesmo lugar no espaço, enquanto os bósons podem ter o mesmo número quântico e não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli. Toda e qualquer partícula tem os seus spins semi-inteiros, sendo férmions que se excluem, ou as partículas tem os seus spins inteiros, sendo bósons que se induzem uns aos outros a se agregarem.

A propriedade carga cor citada anteriormente, é o nome dado a estados quânticos possíveis para os quarks assumirem. Como vimos, os quarks estão sempre confinados em duplas ou trios e qualquer combinação seria possível. Sendo assim, podemos ter uma partícula formada por três quarks up (uuu), porém, esta constituição não era permitida pelo princípio de exclusão de Pauli, uma vez, que dois dos três quarks teriam spins iguais e dois Férmions idênticos não podem ocupar o mesmo lugar. O físico Americano Greenberg, em 1964, supôs que cada quark tivesse uma outra propriedade que os diferenciasses, e essa propriedade foi chamada de carga cor.

Em analogia a um sistema de cores, os quarks possuem três variedades, que podem assumir os valores *red* (vermelho), *green* (verde) e *blue* (azul) e suas anti cores. Os Hádrons, que são partículas compostas não têm cor, assim, a soma das cargas cores dos quarks constituintes tem que ser branco. Desta forma, cada quark do trio uud que formam o próton será de uma cor diferente, conforme indica a **Figura 11**. Conforme exposto, temos 6 quarks e 6 antiquarks com cada um podendo ser de 3 cores diferentes. Dessa forma fica fácil observar que podemos ter 36 quarks

diferentes. Outro fato curioso é que os quarks não possuem uma cor fixa, trocando-as constantemente através dos glúons como será apresentado a seguir.

Figura 11: Cores dos quarks



O outro grupo das partículas elementares são os léptons, do grego leve (hoje sabemos que existem léptons bem massivos, como o tauon (também chamado de tau), que possui massa maior que o próton e o nêutron). Diferentes dos quarks, eles se apresentam sozinhos. Temos 12 tipos diferentes, a saber: elétron (e^-), múon (μ) tauon (T), neutrino do elétron (ν_e), neutrino do múon (ν_μ), neutrino do tau (ν_T) e as seis respectivas antipartículas (**Figura 12**).

LÉPTONS		
e^- elétron	μ^- múon	τ^- tau
ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau

Figura 12: Partículas leptônicas

O lépton mais famoso é o elétron que junto com o próton e o nêutron, que são bárions, formam os átomos.

O Modelo Padrão não descreve apenas as partículas que formam a matéria, ou seja, léptons e quarks. O Modelo Padrão também descreve como essas partículas interagem entre si através dos chamados campos de forças. Dessa forma, temos um 2º grupo de partículas, as chamadas **partículas mediadoras das interações fundamentais** que constituem os chamados campos de forças, que são os bósons.

As interações fundamentais são de quatro tipos (**Figura 13**): gravitacional, eletromagnética, forte e fraca.



Figura 13: Forças Fundamentais da Natureza

A interação Gravitacional, mesmo sendo uma das interações fundamentais, não está contida no Modelo Padrão. Apesar de ela agir de forma relevante no mundo macroscópico, como atração entre planetas e estrelas e queda de objetos na superfície terrestre, no mundo subatômico a Gravidade possui um efeito praticamente desprezível se comparado às outras três formas de interações. A partícula que seria a mediadora da interação gravitacional seria o **gráviton**, partícula ainda não detectada.

Vejamos as outras interações que são descritas pelo Modelo Padrão. Vamos partir da seguinte questão: A força eletromagnética faz com que os corpos ou partículas carregadas eletricamente com cargas opostas se atraem e corpos ou partículas carregadas eletricamente com cargas iguais se repelem. Se no núcleo do átomo temos a presença de nêutrons (eletricamente neutro) e prótons (carregados positivamente), como eles permanecem confinados se pode ocorrer a repulsão entre os prótons devido a força eletromagnética?

No núcleo ocorre a repulsão eletromagnética, mas, por outro lado, existe uma força atrativa que supera a repulsão eletromagnética chamada força nuclear. O Modelo Padrão explica essas forças através do conceito de interação. As interações fundamentais se dão, considerando-se que as partículas interagentes trocassem informação entre elas através da troca de outros tipos de partículas. As chamadas partículas mediadoras. No caso da interação eletromagnética teríamos os **fótons**

como mediadores, na forte os **glúons**, na fraca os **Ws** e **Z**, e o **gráviton** para a gravitação.

Na **interação eletromagnética**, que é responsável pela coesão atômica, ou seja, atração entre o elétron e o núcleo, reações químicas, fenômenos elétricos e magnéticos temos a troca de fótons entre partículas. O fóton é o quantum do campo eletromagnético, sendo responsável por toda radiação eletromagnética, como a luz visível e os raios ultravioleta e gama. O que diferencia cada uma dessas radiações é a energia que cada fóton possui. Assim quanto maior a frequência da radiação mais energética ela será. A **Figura 14** mostra alguns exemplos de radiações eletromagnéticas e suas respectivas frequências. A **Figura 15** mostra o espectro da luz visível.

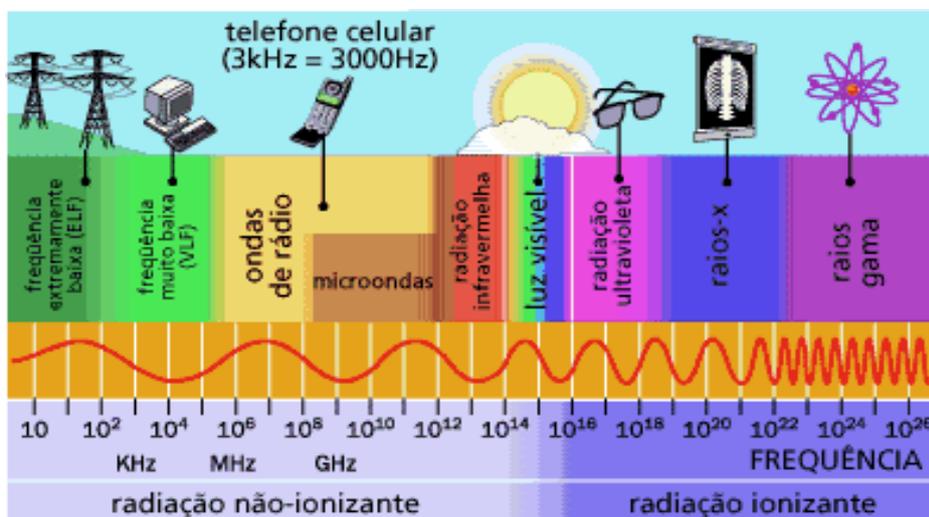


Figura 14: Espectro radiação

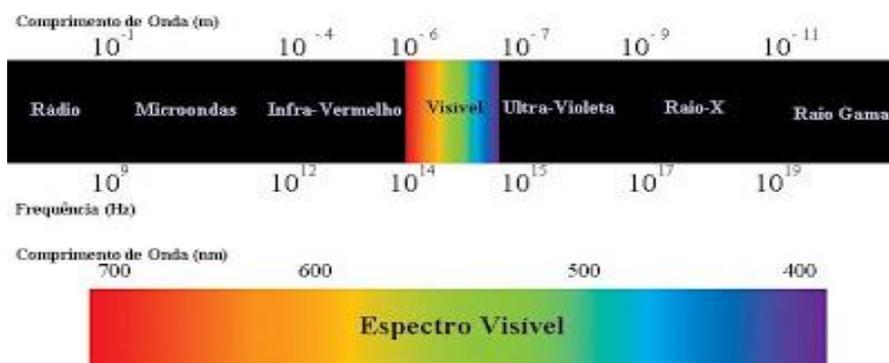


Figura 15: Espectro luz visível

A **interação nuclear** ocorre entre os hádrons (prótons, nêutrons etc.). A força nuclear atua em escala nuclear, tendo, portanto, um alcance extremamente curto da ordem de 10^{-15} m (1 fermi), sendo a responsável pela manutenção ou coesão do núcleo atômico. A interação forte, por sua vez, mantém os quarks unidos para formarem os prótons e nêutrons. A força nuclear entre os constituintes do núcleo atômico é apenas a força residual da interação forte, assim como as forças de Van-der Waals entre as moléculas eletricamente neutras de um líquido. As forças fortes, no entanto, diminuem para distâncias muito menores do que o tamanho de um próton e são desprezíveis a distância do tamanho dos quarks. Diferentemente das outras forças como a eletromagnética e a gravitação, a força forte cresce com a distância, fazendo com que os quarks fiquem confinados dentro dos hádrons. O glúon é o quantum do campo das interações nucleares fortes, ou seja, quarks interagem entre si pela força forte, emitindo e recebendo glúons. Dessa forma, os glúons são as partículas mediadoras da força forte e funcionam como uma espécie de “cola” (*glue* em inglês) entre as partículas que possuem carga de cor. Assim como os quarks, os glúons possuem a carga de cor, que é uma propriedade da matéria assim como a carga elétrica o é. A diferença é que a carga elétrica pode se apresentar em positiva e negativa e a carga cor pode se apresentar em três 3 tipos diferentes, verde, vermelho e azul (reforçando: a cor nesse caso não tem similaridade nenhuma com as cores estudadas em óptica) e cada uma delas ainda podem ser “positiva” ou “negativa”

A força forte atua sobre os quarks (**Figura 16**). A força forte não atua sobre os léptons, como o elétron, pois este não tem carga de cor.

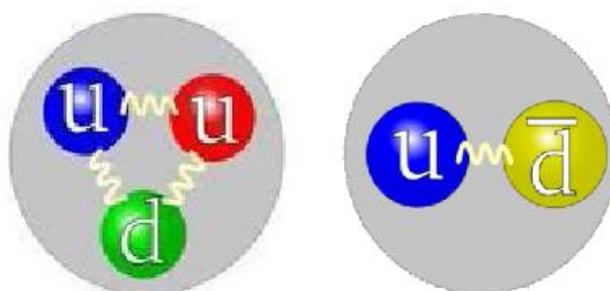


Figura 16: Representação de quarks trocando glúons em hádrons.

Dessa forma, na matéria teríamos as partículas interagindo entre si trocando outras partículas chamadas de mediadoras. Um exemplo seria como proposto na nossa questão inicial, sobre a coesão nuclear, teríamos os prótons trocando fótons

com prótons e elétrons (interação eletromagnética) e também trocando píons, mésons mediadores da interação nuclear, com prótons e nêutrons dentro do núcleo (interação nuclear). Da mesma forma, os quarks dentro dos prótons e nêutrons trocam glúons entre si (interação forte). Na **Figura 17**, temos a representação da interação do próton com o elétron e a interação entre os quarks.

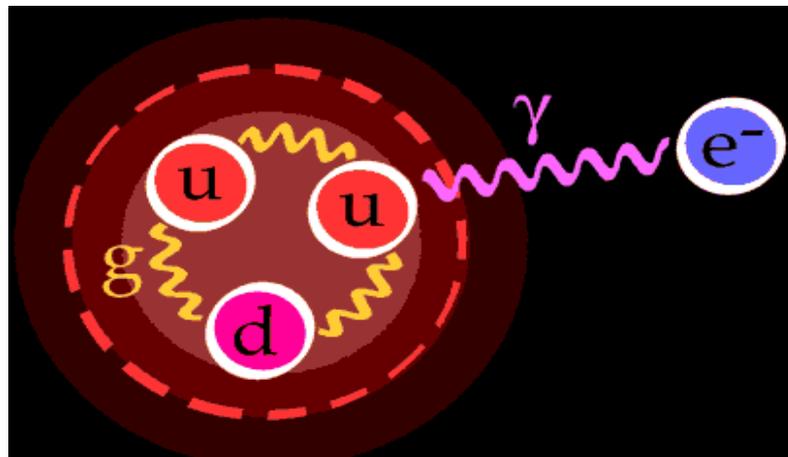
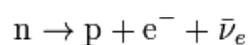


Figura 17: Representação da interação do próton com o elétron e a interação entre os quarks.

A interação fraca se manifesta quando ocorre o fenômeno chamado radioatividade. Nesse caso, temos uma partícula se transformando em outra. As partículas W (*weak* - fraco em inglês) e Z (zero) são os quanta da interação fraca, ou seja, as mediadoras dessa interação. Entendemos assim que uma partícula não decai simplesmente em outra, necessitando de uma partícula mediadora para que esse processo ocorra. Se no decaimento tivermos a mudança de carga elétrica, as mediadoras serão W^+ ou W^- , caso não exista mudança de carga elétrica a partícula Z^0 será a mediadora.

Um exemplo de decaimento é o Beta (β), onde um nêutron (n^0) decai em um próton (p^+) emitindo um elétron (e^-) e um anti neutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$).



Esse processo é mais bem entendido se pensarmos na transformação do quark down em quark up, com a emissão de um W^- que, por sua vez, devido a interação fraca, se transforma em um elétron e um anti-neutrino do elétron. A **Figura 18** mostra esse evento (uma explicação detalhada de cada passo pode ser vista no site:

<http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticula>). A **Figura 19** faz a mesma indicação usando o chamado diagrama de Feynman.

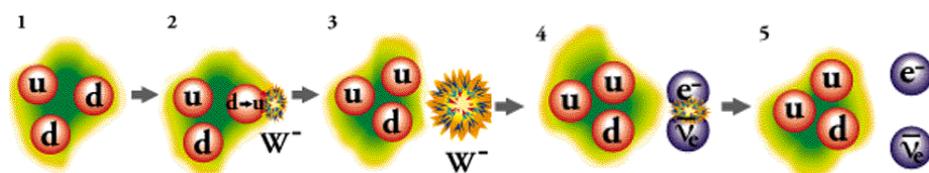


Figura 18: Transformação do quark down em quark up.

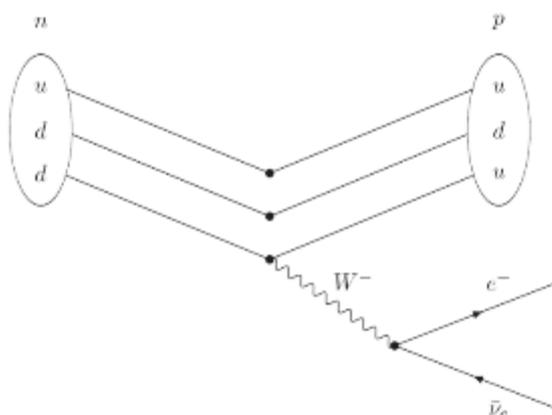


Figura 19: Transformação do quark down em quark up – Diagrama de Feynman.

Por um outro lado, **não** podemos ter um próton (p^+) se transformando em um nêutron (n^0), devido ao fato do próton possuir uma **massa menor** que o nêutron.

Outros processos de transformação de partículas em outras, com alteração de carga elétrica, através das partículas mediadoras da interação fraca são possíveis. O diagrama de Feynman representado na **Figura 20** mostra a transformação do pión + (π^+) em um antimúon (μ^+) e um neutrino do múon (ν_μ) por intermédio da partícula mediadora W^+ .

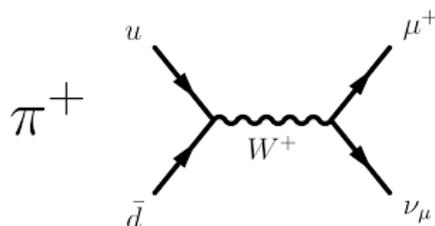


Figura 20: transformação do pión + (π^+) - Diagrama de Feynman.

Os processos de transformação de certas partículas em outras, sem alteração de carga elétrica, podem ocorrer através da partícula mediadora Z^0 da interação fraca. Como Z não possui carga elétrica, a soma das cargas elétricas dos seus produtos após o decaimento deve ser igual a zero. Sendo assim, a partícula mediadora Z sempre decai em um par partícula – anti-partícula. Uma das possibilidades para este par, seria Z decair em um lépton e um anti lépton carregados, ou seja, um par elétron / antielétron, múon / antimúon e tau / antitau. A **Figura 21** mostra o diagrama de Feynman para duas dessas possibilidades.

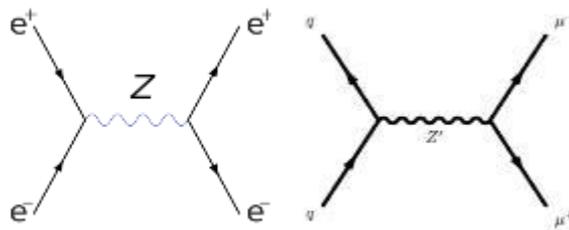


Figura 21: Decaimento em um par de elétron/antielétron e múon/antimúon

BREVE RETOMADA

Segundo o Modelo Padrão, os **6 quarks** e **6 léptons** são as partículas elementares para a formação da matéria. Temos ainda a presença de outras 4 partículas chamadas de mediadoras das quatro forças fundamentais que seriam necessárias para manter as partículas de matéria unidas e assim construir outros tipos de partículas.

As partículas de matéria, ou seja, léptons (que não sentem a Força Forte) e os quarks (que sentem a Força Forte) são chamadas de **férmions**. As partículas mediadoras das forças fundamentais recebem o nome de **bósons**. Uma outra propriedade da matéria, como carga elétrica ou carga cor, que é chamada de **spin**, define essa nova classificação.

Os férmions possuem spin semi-inteiro ($1/2, 3/2, 5/2$) enquanto os bósons possuem spin inteiros ($0, 1, 2$). Os prótons, elétrons e nêutrons, são férmions de spin $1/2$, enquanto os fótons, W^+ , W^- , Z e os glúons são bósons de spin 1. Os férmions obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, que diz que duas partículas idênticas

não podem ocupar o mesmo lugar no espaço, os bósons por sua vez não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli.

O Modelo Padrão mostra quais são as partículas fundamentais e como elas interagem entre si. Para que ele fosse validado, faltava detectar uma partícula que seria responsável por conferir massas às outras partículas. Estamos falando do Bóson de Higgs, previsto teoricamente por Peter Higgs, em 1964. O Bóson de Higgs não seria um bóson como os bósons Z e Ws que medeiam forças entre as partículas, pois possui spin igual a 0. Quanto maior a interação da partícula com o campo Higgs maior sua massa. A importância do Bóson de Higgs em validar o Modelo Padrão é que pelas “leis” do Modelo Padrão os bósons seriam sem massa. Porém os bósons W, Z são bem massivos, implicando na existência de uma partícula como o Bóson de Higgs (Carta na Escola, ed.69, set 2012). Enfim, no dia 04 de julho de 2012, o Bóson de Higgs foi detectado no LHC/CERN.

O Bóson de Higgs² pode ser “criado” em colisões de prótons de alta energia no acelerador de partículas LHC. Os detectores ATLAS e CMS já conseguiram observar decaimentos do bóson de Higgs em 2 bósons Z, que decaíram em 2 pares de léptons carregados, como mostra a **Figura 22**, ou em 2 fótons.

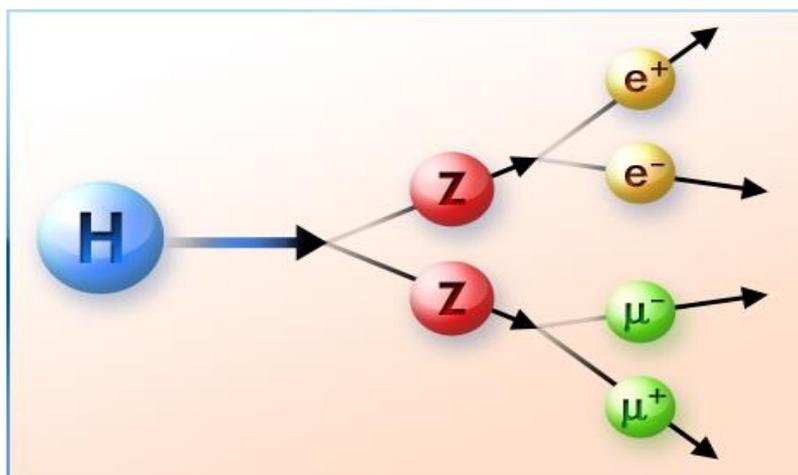


Figura 22: Bóson de Higgs.

²O Bóson de Higgs é muito massivo, possuindo uma vida média muito curta e, por isso, viaja apenas uma pequena distância. Por este motivo não se consegue medi-lo diretamente com o detector de partículas.

Com a detecção do Bóson de Higgs, o Modelo Padrão encontrou o último ‘tijolo’ que faltava para completar essa teoria. A **Figura 23** nos mostra um quadro resumo do Modelo Padrão.

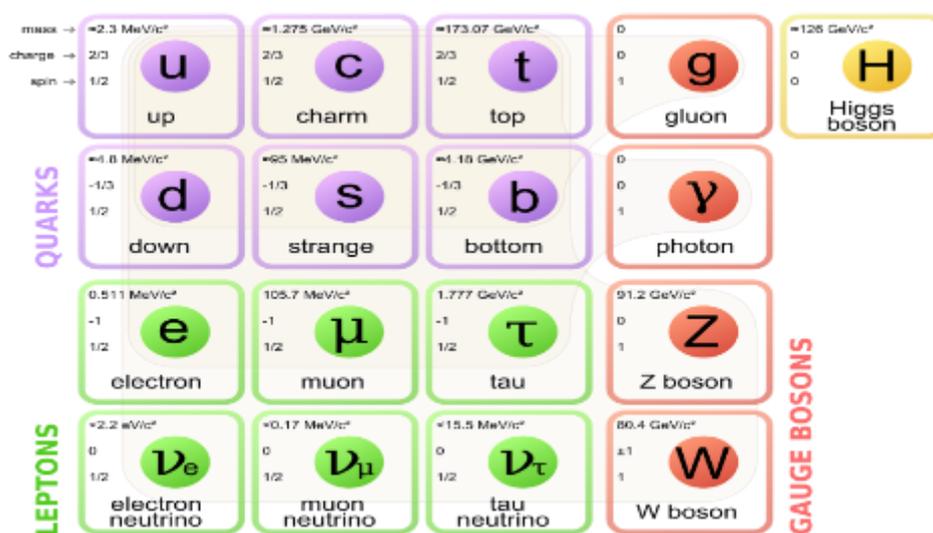


Figura 23: quadro resumo do Modelo Padrão.

SUGESTÕES DE ATIVIDADES

Na primeira parte deste material trouxemos informações sobre as partículas ditas elementares e as interações fundamentais. Nossa intenção com isso é aproximá-lo das principais ideias que permearão o evento; no entanto, toda essa discussão será retomada *no III International Masterclasses UFABC Hands on Particle Physics*.

Além das informações contidas neste material e da bibliografia apresentada, sugerimos um possível trabalho em sala de aula, que se refere à análise e discussão com os alunos dos pôsteres apresentados abaixo, (**Figuras 24 e 25**), facilmente encontrado em *sites* do Google.

Outra sugestão é o vídeo sobre Física de Partículas produzido pela TV Cultura e o IFT/UNESP, a saber: *O discreto charme das partículas elementares*. Ele encontra-se no *site* Youtube (https://www.youtube.com/watch?v=FAISMNkR_WM).

2. CERN / LHC: O QUE É?³

O nome do CERN é derivado do acrônimo para o francês "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", ou Conselho Europeu para a Pesquisa Nuclear, órgão provisório fundada em 1952 com o mandato de estabelecer uma organização para pesquisas e investigações da matéria, mais precisamente o interior do átomo, por isso o Nuclear em seu nome. O laboratório foi fundado em 1954, localizado na fronteira franco-suíça, perto de Genebra. Foi uma das primeiras joint ventures da Europa e agora tem 21 Estados Membros além de Estados observadores.

No CERN, pesquisadores e engenheiros estão investigando a estrutura fundamental da matéria. Eles usam os maiores e mais complexos instrumentos científicos (aceleradores e detectores) do mundo para estudar os componentes básicos da matéria - as partículas fundamentais. Nestes instrumentos as partículas colidem entre si a altas energias (próximas a velocidade da luz) ou contra alvos fixos. Nos detectores se observa e registra os resultados dessas colisões. Com esses resultados, os físicos recebem pistas sobre a existência de certas partículas e como elas interagem, fornecendo informações sobre a estrutura da matéria e sobre as leis fundamentais da natureza. Cerca de 10.000 cientistas de mais de 600 institutos e universidades de 113 países utilizam as instalações do CERN para as suas pesquisas sobre neutrinos, antimatéria, cosmologia, big-bang, energia escura, radiação cósmica de fundo, buracos negros, glúons entre outros temas. Como resultado positivo dessas pesquisas, como dito anteriormente, foi detectado em 2012 o bóson de Higgs, trazendo a confirmação que faltava para a consolidação do MP. As imagens a seguir, cedidas pelo CERN, dão um panorama de suas instalações.

³ O presente capítulo foi elaborado por meio da consulta ao site oficial do CERN/LHC, com algumas citações diretas. Disponível em: <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>



Figura 1: Sala de computadores para armazenar dados



Figura 2: Salas de controle



Figura 3: Visão externa do CERN

Deste o início de suas operações, o CERN promove a construção e o aperfeiçoamento de seus aparatos tecnológicos como aceleradores e detectores em busca de alcançar resultados cada vez mais expressivos. Inicialmente usava-se apenas aceleradores lineares e, a partir de 1959, o sistema foi ganhando novos aceleradores como o *Proton Synchrotron* (PS) e posteriormente o *Super Proton Synchrotron* (SPS). Foram com esses aparatos que o CERN conseguiu em 1983 detectar os bósons Z e Ws, que medeiam a força fraca. No mesmo ano, iniciou-se a construção do acelerador chamado de *Large Eléctron Pósitron* (LEP) que atingia a

energia de 200 GeV⁴ e que veio a ser desativado em 2000, após 11 anos de uso para a pesquisa.

Em busca de respostas sobre os constituintes da matéria, o CERN usou o espaço físico deixado pelo LEP e construiu a maior máquina científica já feita pelo ser humano: O *Large Hadron Collider* (LHC). O LHC, ou o Grande Colisor de Hadrons, é o maior e mais poderoso acelerador de partículas do mundo. Ele foi construído a mais de 100 m de profundidade na fronteira da França com a Suíça (**Figura 4**), e consiste de um anel de 27 km circunferência (8.6 km de diâmetro) de supercondutores magnéticos que aceleram as partículas⁵, a valores de velocidades muito próximas a da velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s).



Figura 4: Localização do LHC

O LHC atingiu a marca de 7 TeV (1 TeV = 10^{12} eV) quando da detecção do bóson de Higgs, já superando essa marca ao atingir 8 TeV. Após 2 anos parados para reparos e incrementos, em maio de 2015, o LHC atingiu a incrível marca de 13 TeV se preparando para novos dados e possivelmente novas descobertas.

Como se dá todo esse processo de acelerar partículas a altíssimas energias? Para se acelerar uma partícula, esta deve ser carregada eletricamente, e devemos ter a presença de um campo elétrico para se aumentar o valor da velocidade da partícula e também devemos ter a presença de campo magnético para provocar desvios nas partículas, ou seja, forçá-los a executar curvas e também para estabilizar o feixe.

⁴1 elétron volt (eV) é a energia que um elétron adquire ao ser acelerado por uma diferença de potencial de um volt. 1eV equivale a $1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

⁵As colisões de Hadrons no LHC poder ser de prótons ou íons de chumbo

O p+ possui carga elétrica e pode ser conseguido de uma maneira relativamente simples ao se ionizar um átomo de hidrogênio que contém um p+ no núcleo e um elétron (e-) “orbitando” em sua volta. Para ionizar este átomo, basta que a energia de ligação do e- seja superada e as duas partículas sejam separadas. Esta primeira etapa da “aceleração” do p+ ocorre sob uma ddp em torno de 100 mil Volts em uma câmara chamada de Duoplasmatron.

Após essa separação os p+ são injetados no sistema de aceleração propriamente dito e agrupados em “pacotes” chamados de *bunches*. Eles iniciam sua viagem por um acelerador linear, o LINAC 2, onde a velocidade dos p+ são aumentadas até atingirem um terço da velocidade da luz alcançando assim uma energia de 50 Mev.

Em seguida, o feixe irá passar por aceleradores circulares que são mais eficientes que o linear, pois promovem um acréscimo de energia a cada volta percorrida. Os aceleradores circulares no CERN, são o *Booster* com 157m de circunferência e com quatro anéis –o feixe é separado pelos 4 anéis - onde um campo elétrico pulsante os acelera até atingir 91,6% da velocidade da luz, e campos magnéticos são aplicados para que os p+ executem as curvas e na sequência final sejam comprimidos e apenas um feixe entre no PS que é um acelerador com 628 m de circunferência, onde os *Blusters* o percorrem em 1,2 segundos alcançando ao final deste estágio 99,9% da velocidade da luz .

Nesse momento ocorre algo bem interessante, uma vez que não se consegue mais aumentar a velocidade dos p+, pois os mesmos já estão praticamente com a velocidade limite que é a da luz. A energia adicionada a eles pelo campo elétrico se manifesta em aumento de massa ($E = mc^2$), ou seja, se não pode ficar mais veloz então fica mais “pesado”. A relação entre massa e energia pode ser escrita de 2 formas diferentes. Para partículas com velocidade bem menores que a da luz pode ser escrita como $E = m_0c^2$, onde m_0 é massa de repouso da partícula e C a velocidade da luz, mas quando as partículas estão com velocidades próximas a da luz, a equivalência deve ser escrita como $E^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2$, onde o segundo termo da equação indica o momento linear da partícula, indicando assim que mesmo partículas sem massa como o fóton, mas com velocidade C possui energia devido ao termo pC . Devido a equivalência massa-energia, em FP a massa é indicada em unidades de

energia dividida por C^2 (Mev/ C^2). Por comodidade, faz-se $C^2 = 1$ e se expressa as unidades de massa em Mev e outros múltiplos como Gev e Tev.

Diante desse quadro, cada p^+ atinge a energia de 25 GeV, sendo assim eles se encontram com uma massa 25 vezes maior do que quando estavam em repouso. Na sequência, o feixe é lançado no SPS que é um acelerador com 7 Km de circunferência e consegue levar os p^+ até a energia de 450 GeV. Com estas energias, finalmente os p^+ são injetados no maior acelerador de todos, o LHC (**Figura 5**).

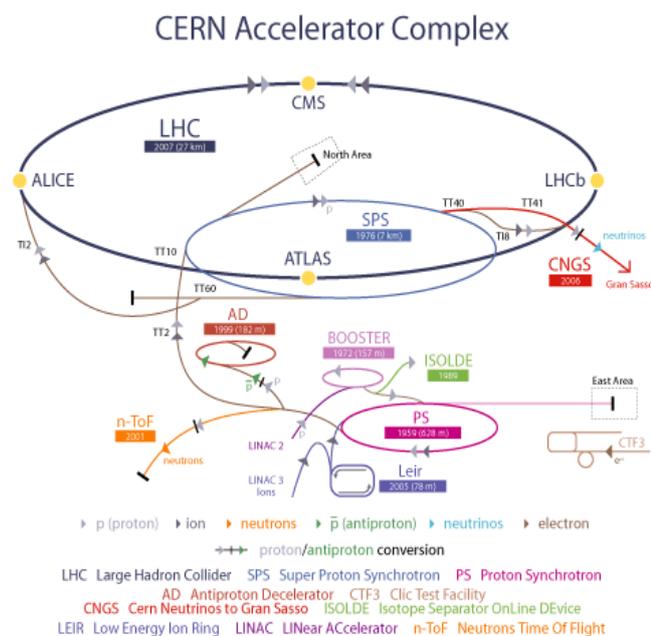


Figura 5: Complexo de Aceleradores do CERN

Nesse estágio, os p^+ percorrem os 27 Km de circunferência um pouco mais de 11000 vezes por segundo em 2 tubos a vácuo em sentidos opostos – horário e anti-horário – se cruzando em 4 pontos podendo ou não colidirem. Para conseguir fazer com que o feixe execute as curvas, é necessária uma força magnética altíssima, assim os ímãs precisam ser supercondutores, condição essa que provoca a necessidade do LHC ser levado a temperaturas mais baixas que o espaço, atingindo a marca de -271 °C ou 1,9 K. 1200 dipolos, de 15 m de comprimento cada se encontra espalhados ao longo dos 27 km do LHC. Cada dipolo possui 6 eletroímãs, criando assim os campos (elétrico e magnético) que aceleram o feixe. Como os constituintes dos feixes (p^+ ou íons) possuem cargas, ocorre uma tendência de dispersão entre eles devido a repulsão elétrica. A correção desse fenômeno é feita usando ímãs específicos que

além dos 6 eletroímãs possuem 2 quadrupolos (**Figura 6**). O campo magnético dentro do LHC chega a uma intensidade de 8 T (tesla).

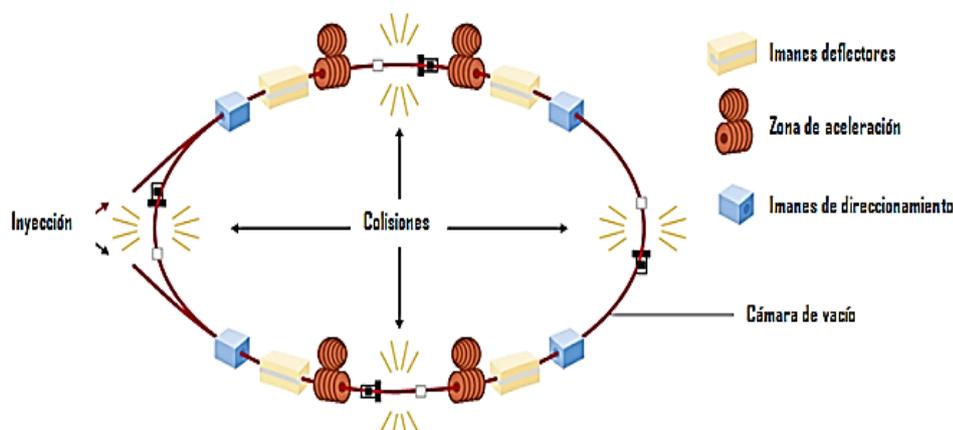


Figura 6: Complexo de eletroímãs nos aceleradores do LHC

Em cada volta, mais energia vai sendo fornecida ao feixe que vai se “convertendo” em aumento de massa e nesse momento, cada p^+ atinge a energia de 7 TeV, ou seja, sua massa é 7000 vezes a massa de repouso ($7000 m_0$).

Estando os p^+ prontos para colidirem, os feixes que percorrem o LHC são forçados para uma rota específica de colisão atingindo a marca de 14 TeV. Com toda essa energia, várias partículas são criadas e muitas delas decaem rapidamente em outras que deixam seus rastros (trajetórias) marcadas nos detectores que são ligados aos computadores e assim a análise de dados é feita pelos pesquisadores não apenas no CERN, mas em vários pontos espalhado pelo mundo todo.

Resumidamente, o LHC acelera os feixes de prótons até atingirem 7 TeV assim, a energia total de colisão entre dois prótons será de 14 TeV e depois fá-los-á colidir em quatro pontos distintos. As partículas produzidas nestes processos serão coletadas pelos quatro⁶ detectores: ATLAS, CMS, ALICE e LHC-b. Como nos mostra a **Figura 7**, eles estão colocados na extensão do anel do LHC. A **Figura 8** mostra cada um dos detectores.

⁶ATLAS (acrônimo para o inglês *A Toroidal LHC ApparatuS* - em português, Um Aparato Toroidal do LHC). CMS (acrônimo para o inglês *Compact Muon Solenoid* - em português, Solenóide Compacto para Múons). ALICE (acrônimo do inglês *A Large Ion Collider Experiment* - em português, Um Grande Experimento de Colisor de Íons). LHC-b (destinado ao estudo da física de decaimentos do Mésons B).



Figura 7: os quatro detectores - ATLAS, CMS, ALICE e LHC-b

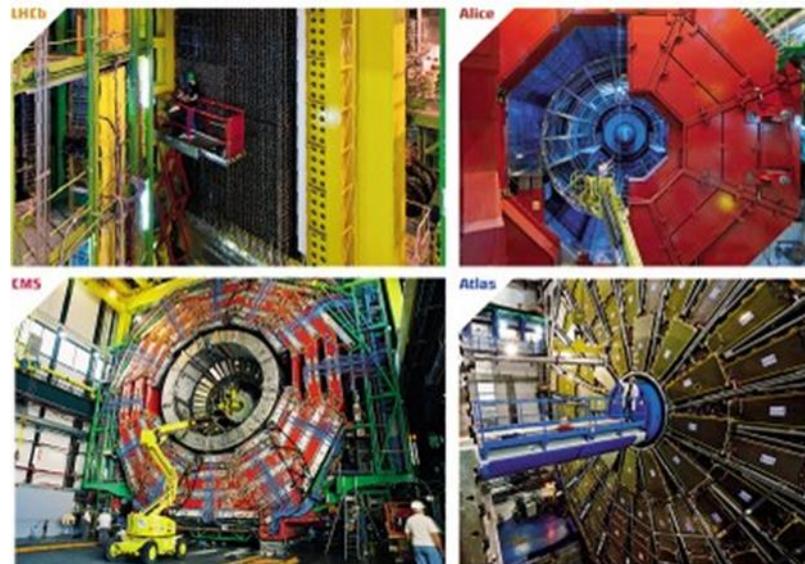


Figura 8: Vista de cada um dos detectores onde ocorrem as colisões dos prótons no LHC

São nesses espaços que as partículas são produzidas e deixam os rastros para serem analisados pelos cientistas. Cada detector é composto de subdetectores, cada um para registrar uma característica (como velocidade, massa e carga) da partícula. Com esses dados em mãos os cientistas vão observar, calcular, montar diagramas, gráficos e analisar a presença de cada uma das partículas formadas na colisão. A **Figura 9**, retirada do software a ser usado no Masterclass, simula os rastros deixados.

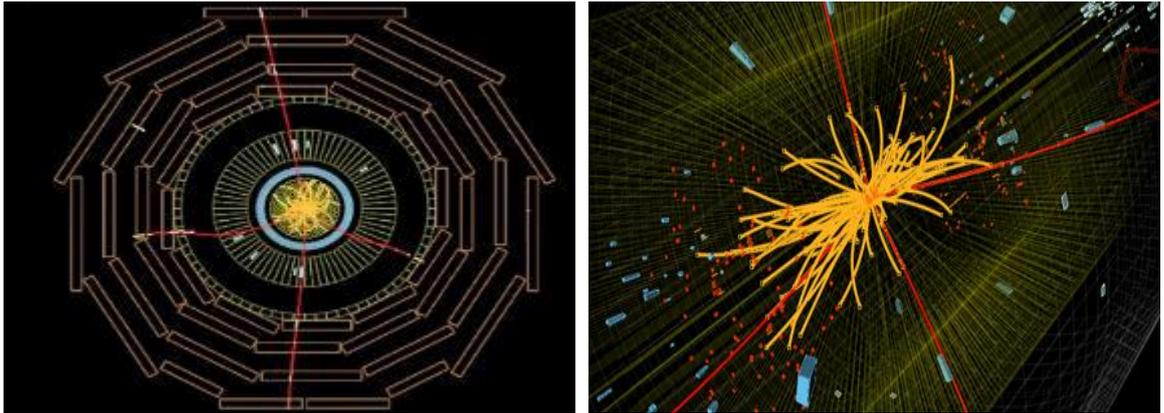


Figura 9: Exemplos de rastros deixados nos detectores (software para análise)

Uma simulação bem didática do funcionamento do LHC e das colisões entre os feixes de prótons pode ser vista em <http://cms.web.cern.ch/content/cms-videos>.

3. EXPERIMENTO CMS⁷

Parece ser algo contraditório, o fato de que para se produzir e detectar partículas tão pequenas, se faz necessário potentes aceleradores e detectores imensos. Os detectores necessitam serem grandes, uma vez que as partículas que surgem das colisões têm energias altíssimas, sendo assim, para conseguir absorvê-las, necessita-se de muito material e de grandes distâncias. Outro fator que se deve considerar é que quanto maior for o detector maior a quantidade de medidas serão tomadas fazendo assim que se tenha uma maior precisão ao se calcular o momentum das partículas (**Figura 1**).



Figura 1: partes do CMS.

Como vimos, o LHC colide prótons em velocidades próximas a da luz. Uma parte da energia de colisão é transformado em massa, criando novas partículas que são observadas no detector de partículas CMS (*Compact Muon Solenoid*). O CMS é cilíndrico e consiste em camadas (como se fosse uma cebola) de material detector que exploram as diferentes propriedades das partículas que o atravessa e mede a energia e o momento de cada uma. Ele possui cerca de 12.500 toneladas, 21,5 m de comprimento e 15 m de diâmetro. É o maior solenóide – bobina de fio supercondutor que quando percorrido por uma corrente elétrica cria um campo magnético – já construído, com um comprimento total de 13 m e um diâmetro de 7 m capaz de gerar um campo magnético de quase 4 teslas. O nome compacto advém de suas

⁷ O presente capítulo foi elaborado por meio da consulta ao site oficial do CERN/CMS, com algumas citações diretas. Disponível em: <http://cms.web.cern.ch/news/cms-detector-design>

“pequenas” dimensões em comparação com sua massa. Mais de 2.000 físicos trabalham com os dados gerados no CMS, representando mais de 150 institutos de 40 países, entre eles a UFABC. Serão os dados deste detector que iremos usar no III Masterclasses UFABC.

O CMS é um detector projetado para “ver” uma grande quantidade de partículas que são produzidas nas colisões. Novas partículas descobertas no CMS são tipicamente instáveis e transformam-se rapidamente em uma cascata de partículas mais estáveis e mais leves (**Figura 2**).

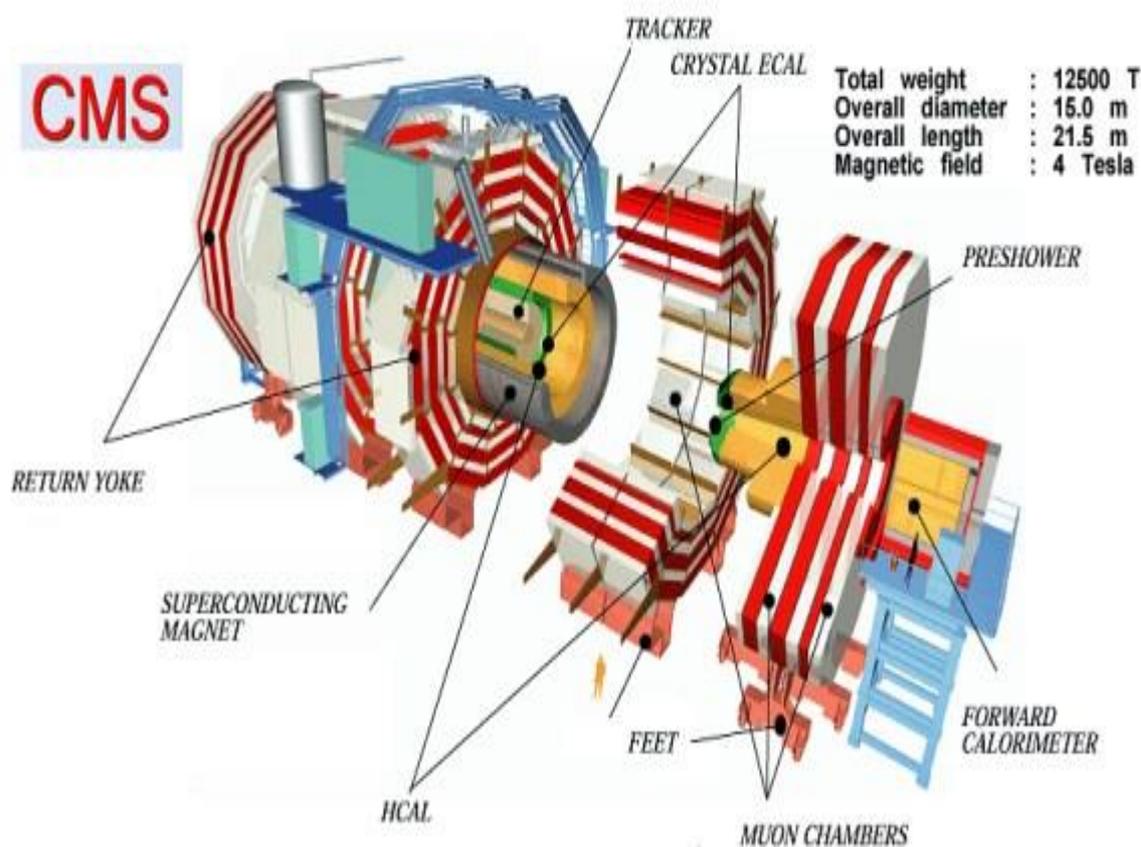


Figura 2: Desenho esquemático do CMS

Uma partícula que emerge da colisão vai encontrar primeiro o sistema de rastreamento, feito de *pixels* de silício e detectores de tira de silício. Estes medem com precisão as posições das partículas carregadas permitindo que se reconstruam suas trajetórias.

Partículas carregadas seguem uma trajetória espiral no campo magnético do CMS e a curvatura de seus caminhos revelam seus momentos (**Figura 3**).

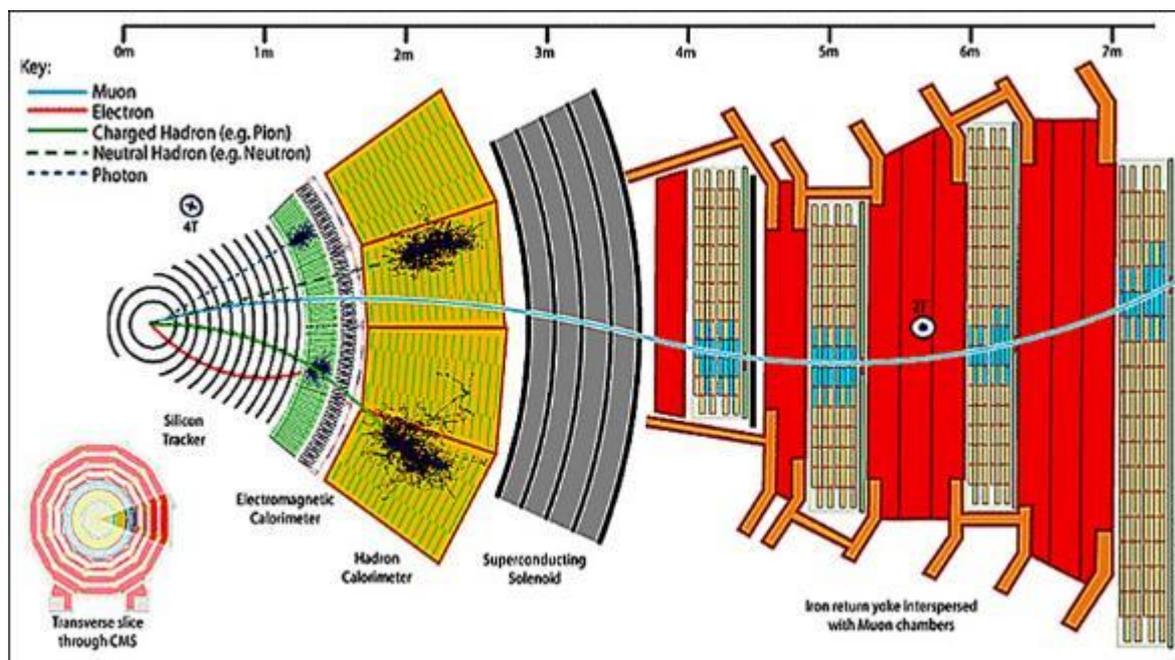


Figura 3: Esquema do detector CMS e os rastros deixados pelas diferentes partículas.

As energias das partículas irão ser medidas nas camadas seguintes do detector, os calorímetros. Elétrons, fótons e jatos (*sprays* de partículas produzidas por quarks) serão todos parados pelos calorímetros, permitindo assim que sua energia seja medida.

A primeira camada do calorímetro é projetada para medir as energias dos elétrons e fótons com grande precisão. Como estas partículas interagem eletromagneticamente, esta camada é chamada de um calorímetro eletromagnético (ECAL).

As partículas que interagem com a força nuclear (partículas formadas por *quarks*, chamadas *hádrons*), depositam maior parte de sua energia na camada seguinte, o chamado calorímetro hadrônico (HCAL).

Apenas os múons e os neutrinos conseguem passar por esse calorímetro. A parte maior e mais externa do detector é chamada de câmara de múons e como o próprio nome diz, serve para detectar estas partículas que possuem carga elétrica e uma massa 200 vezes maior que a do elétron.

Neutrinos, no entanto, não serão detectados passando por todas camadas do CMS, contudo, a sua presença pode ser inferida indiretamente, somando-se os

momentos transversais de todas as partículas detectadas, e atribuir o que falta para os neutrinos.

As partículas que viajam através do CMS, assim, deixam para trás padrões característicos, ou "assinaturas", nas diferentes camadas, o que permite a sua identificação. Esses dados são distribuídos pelo CERN para todos os centros parceiros ao redor do mundo onde serão analisados e em seguida, o "evento" é reconstruído e a presença de quaisquer novas partículas podem ser inferidas.

Com essas breves informações, esperamos que você faça bom uso desse material, tomando o primeiro contato com as partículas detectadas no CMS do LHC.

Não esqueça de entrar nos sites indicados, principalmente no **<http://cms.physicsmasterclasses.org/cmspt.html>** e no simulador que pode ser encontrado em: **<https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/>**.

4. REFERÊNCIAS

ABDALLA, Maria C.B. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: Editora Unesp, 2004.

ALVES, Gilvan; CARUSO, Francisco; MOTTA, Hélio; SANTORO, Alberto (Editores). **O Mundo das partículas de hoje e ontem**. São Paulo: Editora da Física, 2012.

BALTHAZAR, Wagner Franklin e OLIVEIRA, Alexandre Lopes de. **Partículas Elementares no Ensino Médio: Uma abordagem a partir do LHC**. São Paulo: Editora Livraria da Física: Rio de Janeiro: CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2010 / Coleção Tópicos em Física.

CARUSO, Francisco; SANTORO, Alberto (Editores). **Do átomo grego à Física das Interações Fundamentais**. São Paulo: Editora da Física, 2012.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto (Editores). **O que são quarks, glúons, bósons de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas?** São Paulo: Editora da Física, 2012.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto (Editores). **Partículas elementares: 100 anos de descobertas**. São Paulo: Editora da Física, 2012.

SANTORO, Alberto. **Cientistas não são bruxos caros**. Revista Carta Capital / Carta na Escola. São Paulo: Editora Confiança; Ed.69 2012.

KNEUBIL, Fabiana Botelho. **Explorando o CERN na Física do Ensino Médio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, São Paulo, 2013.

MARQUES, Gil da Costa. **Do que tudo é feito?**. Editora da Universidade de São Paulo; São Paulo, 2010.

MENEZES, Luis Carlos de. **A Matéria uma aventura do espírito: fundamentos e conceitos do conhecimento físico**. São Paulo: Editora da Física, 2005.

MOREIRA, Marco Antônio. **Física de Partículas: uma abordagem conceitual e epistemológica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

MOREIRA, Marco Antônio. **Partículas e Interações**. Revista Brasileira de Ensino de Física **31**,1306(2009); Física na Escola, v. 5, n. 2, São Paulo, 2004.

NÓBREGA, Fábio Kopp e MACKEDANZ, Luiz Fernando. **O LHC (Large Hadron Collider) e a nossa física de cada dia**. Rev. Bras. Ensino Fís. vol.35 no.1 São Paulo, 2013.

OLIVEIRA, Ivan S; **Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados – Vol. I**. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.

OLIVEIRA, Ivan S; **Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados – Vol. II**. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.

OSTERMANN, Fernanda. **Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola**. Revista Física na Escola, v. 2, n. 1, São Pulo, 2001.

PIRES, Antônio Sérgio Teixeira; CARVALHO, Regina Pinto de; **Por dentro do átomo: Física de partículas para leigos**. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2014.

ROCHA, José Fernando M. (Organizador); **Origens e evolução das ideias da física**. Salvador, EDUFBA, 2002.

Sites consultados

Disponível em: <<http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/>> Acesso em: 05 de março 2015.

Disponível em: <<http://cms.physicsmasterclasses.org/cmspt.html>> Acesso em: 05 de março 2015.

Disponível em: <<http://cms.web.cern.ch/news/tracker-detector>> Acesso em: 07 de março 2015.

Disponível em: <<http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>> Acesso em: 07 de março 2015.

Disponível em: <<https://quarknet.i2u2.org/>> Acesso em: 06 de março 2015.

Sites utilizados para inserção das figuras

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS

Figura 1 disponível em: <http://4.bp.blogspot.com/>-

Pcnmo_qB8tY/VjFnkFBxbjl/AAAAAAD4Y/6QldHjZ25_U/s1600/tele.PNG

Figura 2 disponível em: <https://encrypted->

tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRfcpmC1fUWar5eMfLmfH8wFBIrTHwQZhXHPzFs_ILI0pKT8vYHXw-d4Q

Figura 3 disponível em: <http://1.bp.blogspot.com/-DCYq1sQV25o/UZLj2ZqMybl/AAAAAAAAABII/HnLIYwu4igY/s1600/Experi%C3%Aancia+de+Rutherford.png>

Figura 4 disponível em:
<https://nosomeioporinteiro.files.wordpress.com/2012/02/untitled-474.jpg>

Figura 5 disponível em:
http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/image23/23_MA02_05.gif

Figura 6 disponível em:
<http://image.slidesharecdn.com/evoluodomodeloatmicofinal-111124124516-phpapp02/95/evluo-do-modelo-atmico-final-19-728.jpg?cb=1322140245>

Figura 7 disponível em: <http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/08/atomo.jpg>

Figura 8 disponível em:
<http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quarks/380>

Figura 9 disponível em: <http://www.thestargarden.co.uk/images1/Strong-hadrons.jpg>

Figura 10 disponível em: <http://www.staff.science.uu.nl/~hooft101/quarks.gif>

Figura 11 disponível em:
http://www.particlecentral.com/images/quark_colors.jpg

Figura 12 disponível em:
<http://www.brasilecola.com/upload/conteudo/images/os-leptons-jpg>

Figura 13 disponível em: <http://www.misteriosdouniverso.net>

Figura 14 disponível em: <http://www.astronoo.com/pt/artigos/espectro-eletromagnetico.html>

Figura 15 disponível em: <https://harmoniadomundo.wordpress.com/estrelas3>

Figura 16 disponível em: <https://www.sciencenews.org/sites/default/files/>

Figura 17 disponível em: <https://www.sciencenews.org/sites/default/files/>

Figura 18 disponível em: <http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticula>

Figura 19 disponível em:
<https://kjende.web.cern.ch/kjende/images/Feynman/betaminus.png>

Figura 20 disponível em:
http://atlas.physicsmasterclasses.org/zpath_files/img/highslide/feynman/Z

Figura 21 disponível em:

http://atlas.physicsmasterclasses.org/zpath_files/img/highslide/feynman/Z

Figura 22 disponível em: <https://www.sciencenews.org/sites/default/files/>

Figura 23 disponível em:

http://www.cecm.usp.br/~caique/images/Standard_Model.png

Figura 24 disponível em:

<http://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quarks/380>

Figura 25 disponível em:

<http://www.cienciamao.usp.br/cienciasfisicas/painel.jpg>

CAPÍTULO 2: CERN E LHC: O QUE É?

Figuras 1,2,3 disponível em: <http://home.web.cern.ch/about>

Figura 4 disponível em:

http://www.oficinadanet.com.br//imagens/conteudos/160/lhc/gd_lhc_diametro.jpg

Figura 5 disponível em: <http://blogs.uslhc.us/wp-content/uploads/2011/04/CERN-Accel-Complex.gif> /

Figura 6 disponível em:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Electromagnetismo/sincrotron3.PNG>

Figura 7 disponível em: http://www.explicatorium.com/images/lhc_tunnel.jpg

Figura 8 disponível em:

http://www.greatdreams.com/hadron/HadronCollider_6.jpg

Figura 9 disponível em: <http://home.web.cern.ch/about/experiments>

CAPÍTULO 3: EXPERIMENTO CMS

Figura 1 disponível em: <http://cds.cern.ch/collection/CMS%20Photos?ln=en>

Figura 2 disponível em:

http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2010/03/193849781_72947d460e_b.jpg

Figura 3 disponível em: http://science.portalhispanos.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/11/cms_2.jpg