

---

# Teoria e Equipamentos de Estudo de Partículas

# 10

## **META:**

Apresentação Modelo Padrão de partículas elementares.

Discutir aceleradores de partículas.

Discutir métodos de detecção de partículas e various tipos de detectores.

Apresentar um complexo moderno de estudo de partículas elementares.

## **OBJETIVOS:**

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Descrever Modelo Padrão de partículas elementares.

Descrever varios tipos de aceleradores de partículas.

Descrever varios tipos de detectores de partículas.

Descrever o complexo de LHC em CERN.

## **PRÉ-REQUISITOS**

Os conhecimentos de classificação de partículas elementares da Aula 8.

## 10.1 Modelo Padrão de Partículas Elementares

Teoria que descreve partículas elementares atualmente conhecidos é chamada *Modelo padrão de partículas elementares*. Essa teoria é teoria quântica de campos. Segundo a essa teoria partículas e suas interações são descritas por três gerações de férmions fundamentais e por bósons de calibre, que são apresentados na Tabela 10.1. Férmions fundamentais são 6 quarks, 6 léptons e suas anti-

férmions fundamentais				bósons de calibre		
u	d	t			g	
d	s	b			$\gamma$	
$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$			$W^\pm$	
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$			$Z^0$	

Tabela 10.1: Partículas fundamentais do Modelo Padrão.

partículas. De quarks são compostos todos hádrons. Bósons de calibre são responsáveis de interações: fótons  $\gamma$  são quanta de interação eletromagnética, bósons vetoriais  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  são quanta de interação fraca, glúons  $g$  são quanta de interação forte. Quarks participam em interações eletromagnética, forte e fraca, léptons carregados participam em interações eletromagnética e fraca, léptons neutros (nêutrons) participam somente em interação fraca. Além disso, Modelo Padrão exige existência de uma partícula, ainda não descoberta, chamada *bóson de Higgs*. Segundo Modelo Padrão bóson de Higgs é responsável por criação de massa de partículas que é realizado por meio de mecanismo conhecido como quebra espontânea de simetria. Esquema de interações entre partículas do Modelo Padrão é apresentada na Fig. 10.1.

Modelo Padrão contém um conjunto de parâmetros externos (isto

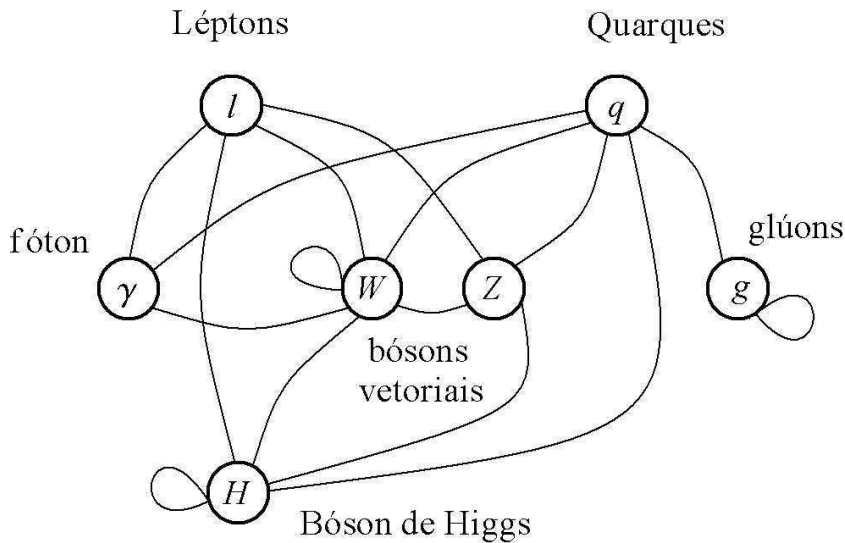


Figura 10.1: Esquema de Interações do Modelo Padrão

é, parâmetros que não são deduzidos da teoria). Eles são: três massas de léptons (neutrínos no Modelo Padrão são supostos sem massa), seis massas de quarques, quatro parâmetros de matriz de mistura de quarques (três ângulos de mistura e uma fase complexa), três constantes de interação, dois parâmetros de campo de Higgs.

Modelo Padrão descreve resultados de maioria de experimentos com partículas com precisão extremamente alta. Entretanto, Modelo Padrão não pode ser considerado como uma teoria completa de física de partículas elementares. Existem algumas razões para tanta conclusão. Uma delas é o fato que Modelo Padrão contém número grande de parâmetros externos. Modelo Padrão não explica todos efeitos e fenômenos de partículas. Por exemplo, efeito de oscilações de neutrínos, que implica que neutrínos têm massa

não nula. Existem outros desvios do Modelo Padrão em resultados de experimentos. Além disso, em década de 90 observação detalhada com alta precisão de galáxias levou a conclusão de existência no Universo de tal chamada matéria escura. Matéria escura manifesta-se em interação gravitacional, mas não demonstra interação com matéria usual. Fenômeno de matéria escura também está fora do Modelo Padrão. Mencionamos também que existem teorias alternativas de partículas. Entre elas são *supersimetria* e *teoria de cordas*.

Nas próximas Seções discutiremos equipamentos que são utilizados para estudos de partículas.

### 10.2 Aceleradores

Os aceleradores de partículas são equipamentos que fornecem energia a feixes de partículas subatômicas eletricamente carregadas. Além das partículas mais básicas, elétrons, prótons, podem ser aceleradas também partículas mais pesadas, partículas alfa ou núcleos atômicos. O acelerador de partículas é um instrumento essencialmente construído utilizando uma fonte de partículas carregadas expostas a campos elétricos que as aceleram. Após a aceleração passam em seguida por um campo magnético que as desvia de suas trajetórias focalizando-as e controlando as direções. Todos os tipos de aceleradores independentemente de seu grau de avanço tecnológico obedecem aos mesmos princípios básicos. Devido à disposição geométrica dos campos eletromagnéticos responsáveis pela aceleração das partículas, basicamente são classificados em dois tipos: *cíclicos* e *lineares*.

## 10.2.1 Aceleradores lineares

Os aceleradores lineares fazem a partícula seguir uma trajetória reta onde a energia final obtida é proporcional à soma das diferenças de potencial geradas a partir dos mecanismos de aceleração dispostos ao longo da trajetória. Aceleradores lineares são desenvolvidos de dois sistemas.

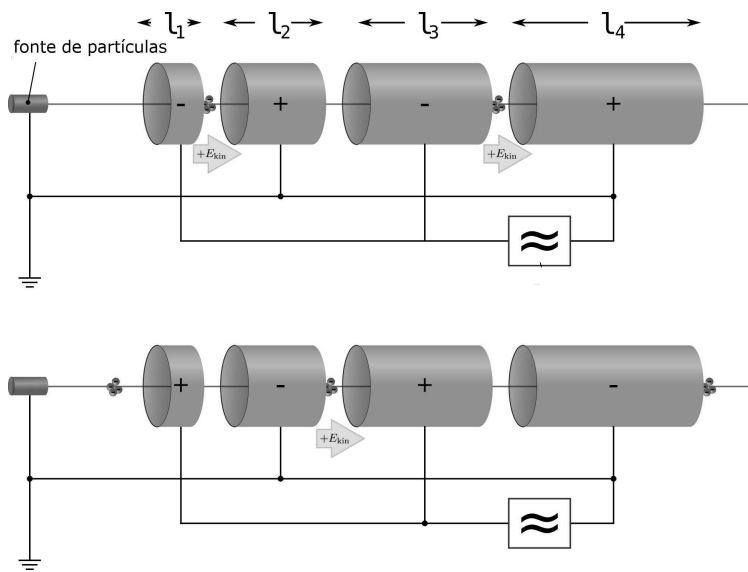


Figura 10.2: Equema de acelerador linear.

O primeiro sistema é o que utiliza a montagem de componentes que geram um campo magnético longitudinal móvel fornecendo assim energia cinética para os elétrons. Este equipamento é provido de uma câmara de aceleração composta de um tubo de vácuo cilíndrico, tipo cavidade ressonante, ou guia de ondas que dirige o campo acelerador. Existe também um amplificador de potência de vários megawatts que excita as câmaras aceleradoras sucessivas e seqüenciais que forçam o deslocamento de uma frente de onda progressiva no guia de ondas, esta uma vez sincronizada pelos

dispositivos aceleradores se desloca cada vez com maior velocidade até chegar ao fim do tubo. O que assegura a sincronização é a velocidade de fase da onda progressiva que acaba por se igualar à velocidade dos elétrons.

O segundo sistema de aceleração linear utiliza o método de ondas eletromagnéticas estacionárias. Os aceleradores de ondas estacionárias são usados somente como injetores de partículas para aceleradores cíclicos de grande energia que possuem dispositivos para detectar e corrigir as distorções ocasionadas pelos efeitos relativísticos.

### 10.2.2 Aceleradores cíclicos

Além dos aceleradores lineares existem os aceleradores cíclicos. Eles são construídos para promover a trajetória curvada das partículas pela ação dos campos magnéticos em espiral ou circular. Este tipo de acelerador força a partícula a passar diversas vezes pelos sistemas de aceleração. A energia final das partículas depende da amplitude da diferença de potencial aplicada e do número de voltas que estas dão no dispositivo. Os tipos de aceleradores cíclicos mais utilizados são o *cíclotron* e o *síncrotron*.

#### Cíclotron

O cíclotron possui dois eletrodos com a forma de um D, estes são ocios e semicirculares. Sua montagem é numa câmara de vácuo entre os pólos de um eletromagneto. As partículas começam a se locomover no interior dos eletrodos em forma de D. Neste momento é injetada uma diferença de potencial alternada de alta frequência e potência nos eletrodos cuja frequência é próxima à

da circulação de partículas, produzindo assim saltos de aumento de velocidade cada vez que estes passam de um eletrodo para o outro subsequente. O que ocorre com as partículas neste momento, é uma trajetória em forma hipóide ou de semicírculos cujos raios são crescentes havendo então uma perda do foco do feixe. É necessário então um sistema de "focalização" para forçar os íons numa trajetória pré determinada, evitando assim a perda de partículas por espiralamento. Causando uma re-polarização forçada através da variação radial negativa do campo magnético, haverá sobre a partícula uma pequena componente perpendicular ao plano do movimento de aceleração. Este efeito manterá a trajetória da partícula estável não permitindo a perda desta para fora do acelerador. Essa componente de correção é primordial, pois a trajetória total da partícula muitas vezes chega a centenas de metros e, conforme o caso, milhares.

A correção de trajetória pela focalização do feixe de partículas somado ao efeito relativístico causa o surgimento de uma diferença entre a frequência de oscilação do potencial acelerador e a frequência de circulação da partícula num segmento da sua trajetória. Este efeito gera um erro inflacionário, que aumenta a cada volta, limitando assim a energia máxima da partícula.

### Sincrocíclotron

Para resolver este problema do erro exponencial, ou inflacionário, é necessário variar a frequência aplicada aos eletrodos em forma de D, assim pode-se alterar a focalização de partículas através da variação dos campos magnéticos sobre as partículas. Para tal, foi desenvolvido um equipamento chamado *sincrocíclotron* cuja

construção foi possível porque existem órbitas estáveis onde a frequência de revolução é igual à frequência da diferença de potencial aplicada aos eletrodos.

Neste sistema, quando é diminuída a frequência de oscilação, as partículas têm uma afinidade à sua órbita tendendo então em permanecer nesta, pois absorvem energia dos campos elétricos dos eletrodos. Ao se manter a estabilidade de sincronismo, as partículas acabam ganhando energia e tendem a se movimentar em órbitas cujos raios são crescentes até a órbita máxima permitida pelo projeto do eletromagneto. O sincrocíclotron praticamente não tem limites no número de revoluções necessárias para a obtenção de uma dada energia.

### **Síncrotron**

O desenvolvimento dos síncrotrons foi necessário para melhorar as soluções de aceleração de partículas cujas trajetórias são de raios fixos. Estes, da mesma forma que os cíclotrons, aceleram as partículas eletricamente e as confinam em campos magnéticos. A diferença é que o síncrotron utiliza o princípio da estabilidade de fase, mantendo desta forma o sincronismo entre campo elétrico aplicado e a frequência de revolução da partícula.

O funcionamento se dá através de um campo magnético que causa a deflexão da partícula para uma órbita circular, e cuja intensidade do campo é modulada de forma cíclica, mantendo assim órbitas cujo raio é bastante estável e constante, apesar do ganho de energia e massa conseqüentemente. Uma vez que se usa o campo magnético para manter a órbita ao invés de acelerá-la, as linhas de campo magnético só são necessárias na região anular que é



definida pela órbita. O campo é gerado por um eletromagneto anular.

Os síncrotrons de prótons são os aceleradores de partículas que atingem a maior energia chegando a 800 GeV, enquanto o síncrotron de elétrons alcança no máximo 12 GeV. A velocidade do próton só chega próxima da velocidade da luz no vácuo com uma energia acima de 1 GeV. O próton acelerado não perde energia por radiação, ou se perde é muito pouco. Os elétrons adquirem uma velocidade muito alta a energias relativamente baixas, e quando defletidos por campos magnéticos irradiam energia eletromagnética próxima do comprimento de onda dos raios X. Essa energia irradiada precisa ser repostada pelo sistema acelerador.

### Colisores

Aceleradores em quais são usados feixes opostos de partículas são chamados *colisores*. Em colisores mais utilizado sistema de aceleração de síncrotron. Por exemplo, no maior acelerador de partículas no mundo LHC (Large Hadron Collider), Grande Colisor de Hádrons, é usado sistema de aceleração de síncrotron.

#### 10.2.3 Câmaras de vácuo anulares

Existem outros equipamentos que são usados para acelerar partículas. Praticamente consistem num par de câmaras de vácuo em forma anular. O sistema é utilizado para armazenar feixes de partículas altamente energéticas e provocar colisões frontais entre eles. As altas energias obtidas a partir destas colisões permitem o estudo das interações entre as partículas fundamentais da matéria e da energia.

## 10.3 Detectores

Detector de partículas é um equipamento usado para detecção e medição de parâmetros de partículas produzidas em reações em aceleradores ou de partículas de raios cósmicos. Na primeira parte dessa Seção apresentaremos alguns aparelhos de detecção de partículas com descrição de princípios físicos que são utilizados deles. Na segunda parte apresentaremos esquema de um complexo moderno de detectores de partículas. Como exemplo descreveremos complexo de LHC (Large Hadron Collider), Grande Colisor de Hádrons, em CERN<sup>25</sup>.

### 10.3.1 Câmara de Wilson

Câmara de Wilson, também chamada câmara de nuvens, consiste em um eficiente método de identificação de partículas subatômicas inventado por C. Wilson na Universidade de Cambridge em 1897. Trata-se de uma câmara com interior saturado de vapor d'água. Se bombardear o interior da câmara com partículas carregadas, estas ionizam o gás presente na câmara. Os íons gasosos funcionam como núcleos de condensação do vapor, portanto podem ser observados traços de partículas na câmara. Por forma de traços são determinadas características de partículas.

Alguns importantes empregos da câmara foram as experiências que determinaram a carga elétrica do elétron, por Thomson. C. Wilson recebeu o Prêmio Nobel em 1927 por este feito.

---

<sup>25</sup>CERN é A Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, da sigla francês: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. O maior laboratório de física de partículas do mundo, localizado na região noroeste de Genebra (Suíça).

### 10.3.2 Câmara de bolhas

Uma câmara de bolhas é um vasilhame enchido com líquido (frequentemente hidrogênio líquido) transparente superaquecido usado para detectar partículas eletricamente carregadas movendo através dela. Foi inventado em 1952 por D. A. Glaser, pelo qual recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1960.

Na câmara de bolhas eram dispostas aberturas cobertas de vidro atrás das quais se encontrava a máquina de filmar que era acionadas quando se detectava a chegada de um eventos. Esse película cinematográfica (filme) devia ser revelado para permitir o seu exame posterior.

### 10.3.3 Câmara de faíscas

Câmara de faíscas tem esquema seguinte. Uma série de folhas metálicas dispostas paralelamente são metidas num recinto cheio de uma mistura de gás nobre, geralmente néon e hélio. As partículas atravessam a câmara perpendicularmente às placas e ionizam o gás durante alguns microsegundos. Um sistema dedicado aplica um breve campo elétrico ( $5 \text{ kV/cm}$  de  $0,1 \text{ s}$  à  $1 \mu\text{s}$ ) entres as placas. As faíscas aparecem nos locais onde passam as partículas, já que o gás tornou-se momentaneamente condutor nesses sítios. Podem então ser fotografadas e medidas a fim de deduzir a natureza das partículas que as induziram.

Estas câmaras que foram muito utilizadas em astronomia e para detecção dos raios gama foram progressivamente substituídas pelas câmara de bolhas que podem registrar os eventos mais exactamente e mais próximos no tempo. No entanto foram elas que per-

mitiram a descoberta do lépton tau e ainda são empregues devido à sua simplicidade de realização e funcionamento.

### 10.3.4 Contador Geiger

O contador Geiger (ou contador Geiger-Müller ou contador G-M) serve para medir certas radiações ionizantes (partículas alfa, beta ou radiação gama e raios-X, mas não os neutrons). Este instrumento de medida, cujo princípio foi imaginado por volta de 1913 por H. Geiger, foi aperfeiçoado por Geiger e Walther Müller em 1928. O contador Geiger é constituído de um tubo Geiger-Müller e de um sistema de amplificação e de registro do sinal. O tubo Geiger-Müller, uma câmara metálica cilíndrica no eixo da qual é tendido um fino fio metálico, é enchido por um gás a baixa pressão. Uma tensão elétrica de ordem de 1000 volts é estabelecida entre o cilindro (que tem papel de cátodo) e o fio (ânodo).

Quando uma radiação ionizante penetra no contador, ela ioniza o gás argônio, isto é, faz com que elétrons sejam liberados. Esses elétrons se multiplicam rapidamente por avalanche eletrônica, tornando o gás condutor durante um curto tempo (fenômeno de descarga elétrica). Após amplificação, o sinal elétrico assim produzido é registrado e traduzido para uma indicação visual (agulha, lâmpada) ou sonora (clique).

### 10.3.5 Câmara de ionização

Uma câmara de ionização é um detector de partículas ionizadas que detecta a passagem de uma partícula medindo a carga total dos elétrons dos íons produzidos aquando da ionização do meio gasoso pela partícula.

Para recuperar os elétrons e os íons antes que eles se recombinem em átomos, é necessária a presença de um campo elétrico para os separar e fazê-los derivar em direção dos electrodos. As cargas (elétrons e íons) derivando induzem correntes nos electrodos, correntes que são detectadas por um amplificador que produz um sinal elétrico.

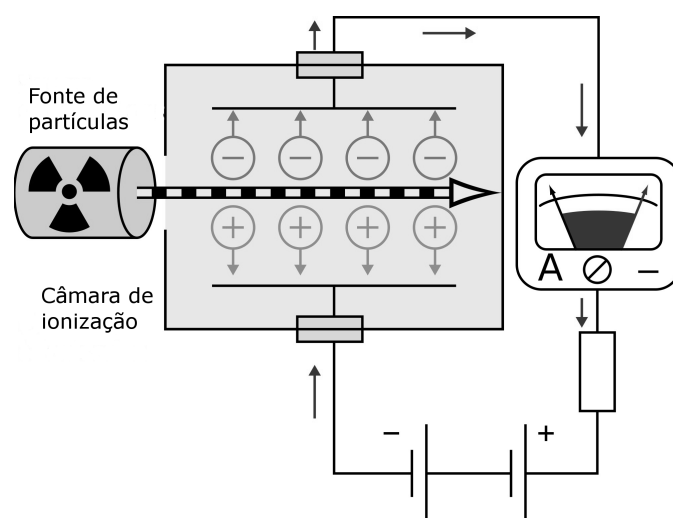


Figura 10.3: Equema de câmara de ionização.

As câmaras de ionização medem as cargas depositadas pela partícula carregada ao atravessar o meio ionizado que tanto pode ser um gás como um líquido ou mesmo um sólido, cada um tendo as suas vantagens e as suas aplicações. Uma partícula carregada suficientemente energética é capaz de tirar os elétrons dos átomos do meio atravessado, é o processo de ionização, razão do nome da câmara.

As câmaras de ionização também são usadas na medicina para determinar a atividade do tratamento terapêutico.

### 10.3.6 Câmara proporcional multifios

Pelas suas características este detector substituiu rapidamente a câmara de bolhas onde era preciso fotografar os traços deixados pelas partículas, revelar a película antes de poderem ser analisados. Na câmara de fios, é possível fazer-se um tratamento do sinal (informático), o que permite determinar com precisão a trajectória das partículas que a atravessa.

Este detector apresenta-se como uma câmara cheia com um gás nobre, tipo árgon, e no interior tem várias grelhas compostas de um grande número de fios disposto paralelamente. Todas as estão sobre tensão e empilhadas alternando os catodos com os anodos. Assim, quando uma partícula eletricamente carregada penetra na câmara, ela ioniza o gás, separando os átomos em electrons carregados negativamente e em íons carregados positivamente. Os electrons são em seguida atirados pelos anodos e os íons pelos catodos. A presença da partícula é em seguida detectada por uma pulsação eléctrica sobre os fios dos anodos.

### 10.3.7 Detectores de LHC

Em aceleradores modernos são utilizados complexos grandes de detectores, que permitem detectar várias características de partículas. Complexos de detectores é um sistema automatizada e computerizada, tal que dados recebidos de reações são guardados e analisados com vários tipos de programação computacional. Como exemplo descreveremos complexo de LHC (Large Hadron Collider), Grande Colisor de Hádrons, em CERN.

O complexo de LHC é apresentado na Fig. 10.4, onde por abreviat-

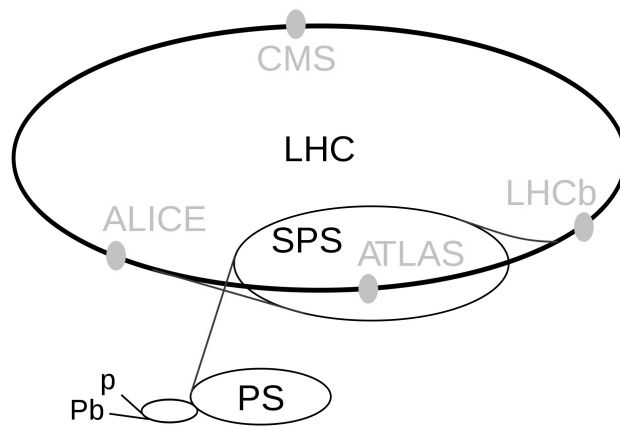


Figura 10.4: Equema de complexo de LHC em CERN (descrição em texto do Capítulo 10).

uras são designados elementos seguintes do complexo. Embaixo da figura variors pre-aceleradores: p – acelerador linear de prótons; Pb – acelerador linear de núcleos de chumbo; aneis menores: PS - Síncrotron de prótons, SPS - Super-síncrotron de prótons. Anel grande LHC é propriamente Grande Colisor de Hádrons. Neste anel grande são marcados locais onde localizados detectores ALICE, ATLAS, CMS, LHCb. Além destes detectores em LHC são realizados outras experiências, que não são indicadas na Fig. 10.4: LHCf, TOTEM.

### Solenóide de Múon Compacto (CMS)

CMS é o Solenóide de Múon Compacto (do inglês Compact Muon Solenoid). Seção de CMS é apresentada na Fig. (10.5). O CMS possui um tamanho relativamente compacto e comprimido, está otimizado a fim de detectar múons, possui um potente imã solenoidal. O CMS é um detector de uso geral, capaz de estudar múltiplos as-

pectos das colisões de prótons à 14 TeV, a energia média do LHC. Contém sistemas para medir a energia e a quantidade de movimento de fótons, elétrons, múons e outras partículas resultantes das colisões. A camada detectora interior é um semicondutor de silício. Ao seu redor, um calorímetro eletromagnético de cristais centelhadores, é rodeado por um calorímetro de amostragem de hádrons. O rastreador e o calorímetro são suficientemente compactados para que possam ficar entre o imã solenoideal do CMS, que gera um campo magnético de 4 teslas. No exterior do imã situam-se os detectores de múons.

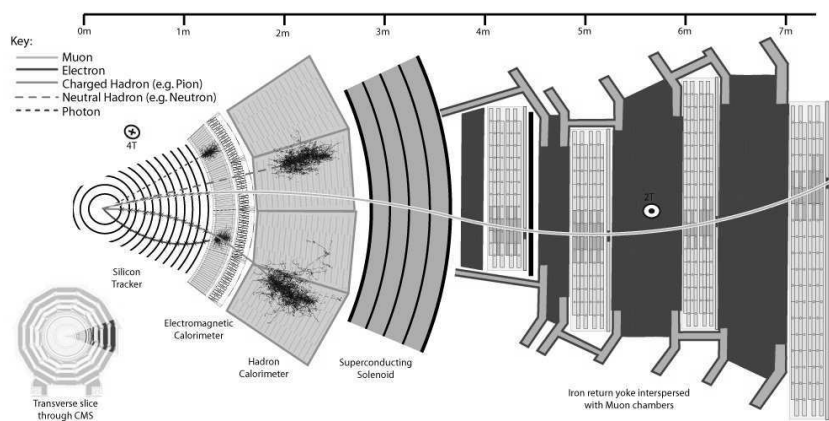


Figura 10.5: Esquema de seção do Solenóide de Múon Compacto (CMS).

**Região central da colisão.** Nesta zona ocorre a colisão dos prótons. Os imãs do LHC forçam os prótons, a girarem em sentidos opostos, colidindo-os no centro do detector. Os feixes de prótons são distribuídos em "pacotes", com cerca de 100.000 milhões de prótons formando cada pacote. Os prótons são tão pequenos que a probabilidade de que se choquem é muito reduzida, com uma taxa de umas 20 colisões para cada 200.000 milhões de prótons.



Quando dois prótons colidem com estas energias, eles se desarranjam, e durante a troca de matéria e energia se formam partículas inexistentes no mundo cotidiano. Muitos desses processos de produção de partículas estão muito estudados, e estima-se, que somente 100 em cada 1.000.000.000 de colisões produzem eventos "interessantes" do ponto de vista físico. Portanto, é necessário atingir a maior quantidade de colisões possíveis, já que os pacotes, que viajam muito juntos, produzem umas 40 milhões de colisões por segundo, ou seja, uma colisão a cada 25 nanosegundos.

**Camada 1 - O rastreador.** Finos segmentos de silício (barras e píxels) permitem medir a quantidade de movimento e a trajetória das partículas carregadas. Também revelam a posição de onde de desintegram (decaem) partículas instáveis de vida média-longa. O CMS contém o maior detector de silício do mundo, com 205 m<sup>2</sup> de sensores (aproximadamente a área duma quadra de tênis), que contém 9,3 milhões de barras e 66 milhões de píxels.

**Camada 2 - O calorímetro eletromagnético.** Está constituído por uns 80.000 cristais escintiladores de tungstato de plomo (PbWO<sub>4</sub>), que medem com precisão as energias de fótons e elétrons. Um detector baseado em sensores de silício ajuda a identificar a partícula detectada.

Os principais objetivos deste experimento são: explorar a física na faixa de energias de TeV; buscar de evidências de existência do bóson de Higgs; buscar evidências que comprovariam uma física além do Modelo Padrão, como a supersimetria e as dimensões espaciais extras; estudar os aspectos das colisões de íons pesados.

### ALICE

O detector ALICE é Experiência do Grande Colisionador de íons, do inglês A Large Ion Collider Experiment. O detector ALICE destina-se ao estudo do plasma de quarks-glúons obtido pela colisão de íons pesados. O seu objectivo é descobrir o mistério da matéria quente e densa que é brevemente criada quando da colisão de íons pesados a altas energias. A detecção de múons produzidos durante a desintegração de partículas contendo quarks pesados devem permitir esclarecer a questão. Assim o espectrômetro a múons tem um papel fundamental no detector ALICE. As condições nas quais se operam as colisões de íons pesados impõe restrições particulares na concepção do espectrômetro, do ponto de vista da sua localização, dos absorventes utilizados para pararem os hádrons, da abertura do ímã e dos detectores necessários para "descobrir" as partículas e assegurar o lançamento do sistema de múons. Dimensões do detector ALICE: 26 m de comprimento, 16m de largura e altura. Peso 1000 toneladas.

### ATLAS

O detector ATLAS é Dispositivo Instrumental Toroidal para o LHC, da sigla inglesa de A Toroidal LHC ApparatuS. É um detector que utiliza um eletroímã toroidal onde o campo magnético fecha-se sobre si-mesmo no ar. O detector ATLAS é um detector de partículas semelhante ao CMS, mas de maiores dimensões e de concepção diferente. Tem por finalidade detectar o bóson de Higgs, partículas supersimétricas (SUSY) que são preditas pela teoria mas ainda não foram detectadas experimentalmente. Di-

mensões: 46 m de comprimento, 25 m de largura e de altura. Peso 7000 toneladas.

### **LHCb**

LHCb é sigla inglesa de "Large Hadron Collider beauty" e onde "beauty" se refere ao quark beauty (ou bottom). O LHCb é um experimento desenvolvido para medidas precisas da violação da simetria CP e decaimentos raros de mésons b, isto é mésons que contêm na sua estrutura quark b, ou anti-quark  $\bar{b}$ . O detector da experiência de 4500 toneladas foi especificamente desenhado para retirar estas partículas e produtos do decaimento delas.

Em vez de partirem em todas as direções, os mésons b formados pelo feixe dos prótons em colisão, mantêm-se, no tubo, perto da linha central dos feixes, e isso reflete-se no desenho do detector. Outras experiências do LHC estão em volta do ponto de colisão em camadas de subdetectores, como uma cebola, mas o detector LHCb estende-se por 20 m ao longo do tubo com os seus subdetectores dispostos ao lado uns dos outros como numa biblioteca. O detector LHCb tem dimensões 21 m de comprimento, 13 m de largura e 10 m de altura, peso 5600 toneladas.

### **TOTEM**

TOTEM é sigla inglesa de TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement, estuda as partículas a um muito pequeno ângulo, uma parte da física inacessível às experiências polivalentes. Entre outras pesquisas, TOTEM vai medir o tamanho dos prótons e calcular precisamente a luminosidade do LHC do CERN. TOTEM completará os resultados obtidos pelo detector CMS as-

sim como das outras experiências do LHC. Dimensões: 440 m de comprimento, 5 m de largura e de altura. Peso 2000 toneladas.

### LHCf

LHCf é sigla inglesa de Large Hadron Collider forward, estuda as partículas a um muito pequeno ângulo (tal como a TOTEM) criadas no interior do LHC para simular os raios cósmicos em condições de laboratório. As colisões no LHC que produzem cascatas semelhantes, poderiam ajudar os físicos a calibrar os detectores das gigantescas experiências sobre os raios cósmicos (algumas atingem milhares de Km) assim como a interpretar os seus resultados. Construção de LHCf inclui dois detectores cada um de 30 cm de comprimento, 10 cm de largura e 80 cm de altura. Peso 40 kg cada um.

## 10.4 Conclusão

Nesta aula apresentamos o Modelo Padrão de partículas elementares. Discutimos aceleradores e detectores de partículas. Descrevemos o complexo de LHC em CERN.

### RESUMO

No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foi apresentado o Modelo Padrão de Partículas Elementares. Esse modelo é a teoria quântica de campos. Segundo a essa teoria partículas e suas interações são descritas por três gerações de



férmions fundamentais e por bósons de calibre. Férmions fundamentais são 6 quarks, 6 léptons e suas anti-partículas. De quarks são compostos todos hádrons. Bósons de calibre são responsáveis de interações: fótons  $\gamma$  são quanta de interação eletromagnética, bósons vetoriais  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  são quanta de interação fraca, glúons  $g$  são quanta de interação forte.

Além disso, Modelo Padrão exige existência de uma partícula, ainda não descoberta, chamada *bóson de Higgs*. Segundo Modelo Padrão bóson de Higgs é responsável por criação de massa de partículas que é realizado por meio de mecanismo conhecido como quebra espontânea de simetria. Tabela de partículas fundamentais e esquema de interações entre partículas do Modelo Padrão são apresentadas no Capítulo.

São discutidos equipamentos usados para estudos de partículas elementares: aceleradores e detectores. Por tipo de geometria aceleradores são divididos por lineares e cíclicos. Foi discutidos princípios de funcionamento de aceleradores lineares e de varios tipos de aceleradores cíclicos: ciclotron, sincrociclotron, síncrotron, colisores. Foi discutida necessidade de câmaras de vácuo anulares (aneis de armazenamento) em complexos de aceleradores modernos. Foi discutidos destinos e princípios de funcionamento de detectores seguintes: Câmara de Wilson, Câmara de bolhas, Câmara de faíscas, Contador Geiger, Câmara de ionização, Câmara proporcional multifios.

Foi apresentata esquema do complexo de LHC em CERN. Sistema de aceleração de partículas inclui o grupo de pre-aceleradores: acelerador linear de prótons, acelerador linear de núcleos de chumbo, síncrotron de prótons, super-síncrotron de prótons, e o mesmo

Grande Colisor de Hádrons. Sistema de detectores inclui experiências: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, TOTEM. CMS é o Solenóide de Múon Compacto (do inglês Compact Muon Solenoid). O detector ALICE é Experiência do Grande Colisionador de íons, do inglês A Large Ion Collider Experiment. O detector ATLAS é Dispositivo Instrumental Toroidal, da sigla inglesa de A Toroidal LHC ApparatuS. LHCb é sigla inglesa de "Large Hadron Collider beauty" e onde "beauty" se refere ao quark beauty (ou bottom). LHCf é sigla inglesa de Large Hadron Collider forward. TOTEM é sigla inglesa de TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement. Esquema do complexo de LHC é apresentada na diagrama do Capítulo.



### ATIVIDADES

**ATIV. 10.1.** Quais são férmions fundamentais do Modelo Padrão?

**ATIV. 10.2.** Quais são bósons de calibre do Modelo Padrão?

**ATIV. 10.3.** Quais tipos de aceleradores são usados em experiências com partículas?

**ATIV. 10.4.** Qual equipamento é utilizado para observar partículas?

**ATIV. 10.5.** Descrever o complexo de aceleradores e detectores de Grande Colisor de Hádrons em CERN.



### LEITURA COMPLEMENTAR

MENEZES, D. P. - Introdução à física nuclear e de partículas elementares. Florianópolis, Editora da UFSC, 2002.

SHELLARD, R. C. - Introdução a física das partículas elementares.

São Paulo, Instituto de Física Teórica, 1982.