**A física de partículas – entre o infinitamente pequeno e o infinitamente grande**

Ricardo Gonçalo, LIP/FCUL

O mundo do infinitamente pequeno é o domínio onde impera a física de partículas. Neste artigo fazemos uma breve viagem pelas teorias e as experiências que estudam esta realidade por vezes mais fantástica do que qualquer livro de ficção.

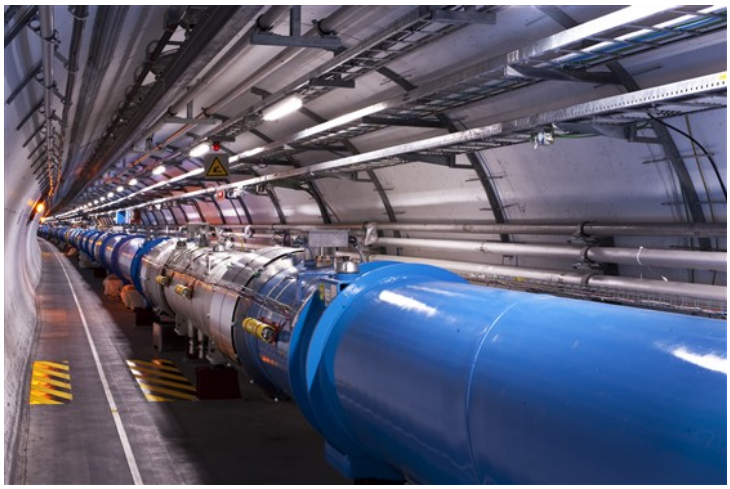

**Figura 1: uma pequena parte dos 27 km de circunferência do túnel do LHC, nos arredores de Genebra, onde se vêm ímanes supercondutores dipolares que conduzem a órbita dos feixes, a azul, e ímanes quadripolares, a branco, que focam os feixes de partículas (imagem: CERN).**

Experimentalmente, a física de partículas é investigada em experiências que não podiam ser mais variadas: desde gigantescos aceleradores como o Grande Colisionador de Hadrões do CERN (Large Hadron Collider, ou LHC, em inglês) até experiências que cabem numa pequena sala, mas conseguem uma inigualável precisão em medidas muito específicas. Até experiências que procuram antimatéria no Espaço ou matéria escura nas profundezas da terra. A própria atmosfera terrestre ou o gelo do Polo Sul são usados para procurar raios cósmicos ou neutrinos de enorme energia, ligando a física de partículas à astrofísica, o infinitamente pequeno e o infinitamente grande.

Todas estas experiências usam até ao limite o que a tecnologia de hoje consegue atingir: desde detetores de partículas, à electrónica rápida para ler os sinais desses detetores, às mais avançadas técnicas de computação e de análise de dados, incluindo a inteligência artificial e a ciência de dados. Na verdade, muitos dos instrumentos e técnicas usados tiveram que ser desenvolvidas para construir estas fantásticas experiências. Tudo isto para conseguirmos chegar mais longe na compreensão de como funciona o Universo à nossa volta. E daqui saem em seguida novas tecnologias que são aplicadas noutros domínios.

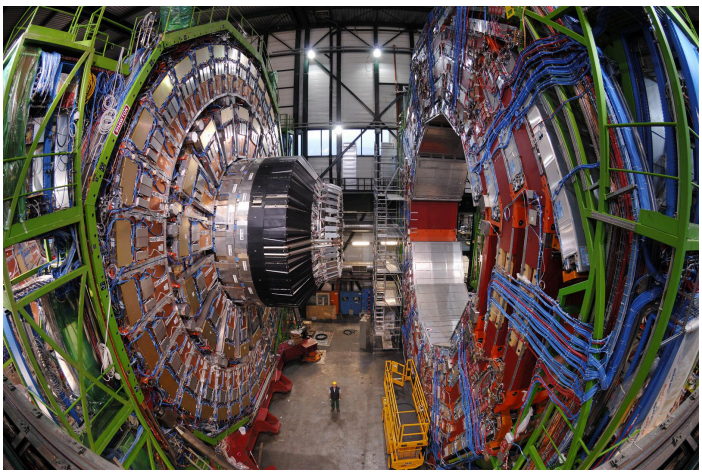

**Figura 2: uma das experiências no acelerador LHC no CERN. A experiência CMS está localizada numa caverna a 100 m de profundidade. Os feixes acelerados pelo LHC passam no centro da experiência. Um engenheiro em pé no fundo da caverna dá uma ideia da escala (imagem: CERN).**

**Figura 4: primeiro servidor da web do mundo, usado por Tim Berners-Lee enquanto trabalhava no CERN. A etiqueta diz "Esta máquina é um servidor. NÃO DESLIGAR!" (imagem: CERN).**

Um dos exemplos que nos é mais familiar é a World Wide Web. Na verdade, ao acedermos a qualquer página na internet estamos a usar uma ideia desenvolvidas por Sir Tim Berners-Lee no CERN em 1980: o Hypertext Transfer Protocol, ou HTTP (por isso os endereços começam com “http://”). O propósito era facilitar a troca de informação entre cientistas do CERN, que trabalham e vivem frequentemente em diferentes países. Mas há muitas outros desenvolvimentos tecnológicos que nasceram da física de partículas, desde a criogenia até ao diagnóstico e tratamento médico.

Segundo a física de partículas, a matéria à nossa volta é constituída por aglomerados de partículas elementares. Estas partículas são os constituintes dos átomos que nos são familiares. Os protões e neutrões que compõe o núcleo atómico são, eles próprios, constituídos por partículas elementares, os quarks.

Atualmente, a física de partículas é descrita por um conjunto de teorias conhecidas pelos físicos como o Modelo Padrão, que descrevem o conjunto das partículas elementares que sabemos existir. Os mais fundamentais pedaços de matéria do Universo (tanto quanto sabemos!). Dizer que são pequenas estaria na verdade errado, porque (tanto quanto sabemos...) simplesmente não têm tamanho, são pontuais. Na prática, o que sabemos com certeza é que são pelo menos dez mil vezes mais pequenas do que um minúsculo protão!

Estas partículas vêm em dois tipos: “quarks” e “leptões” (ver Fig.4). Os quarks são os constituintes de partículas complexas, como o protão, o neutrão, e muitas outras. O eletrão, que conhecemos há mais de um século é um leptão. É elementar e sem tamanho. Tem dois irmãos mais pesados: o muão e o tau, e a cada um deles corresponde um neutrino. Têm carga elétrica inteira ou nula, no caso dos neutrinos.

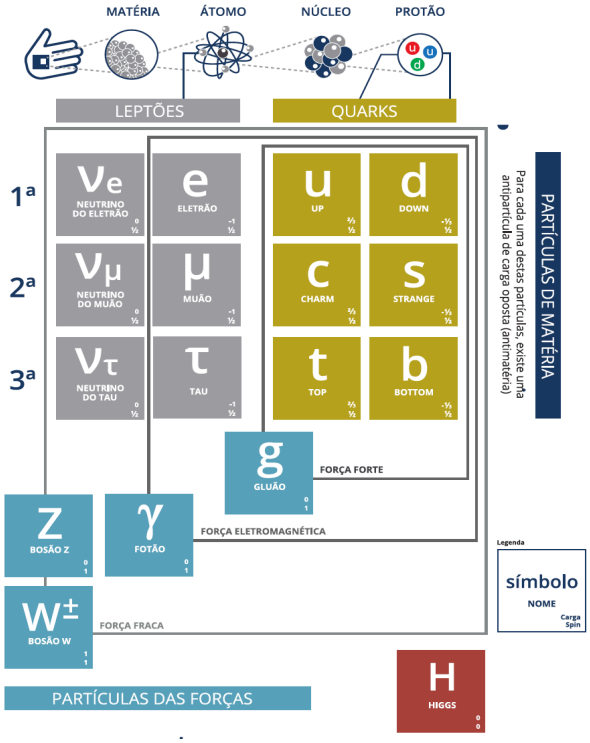


**Figura 5: Partículas elementares constituintes da matéria e partículas transmissoras das forças fundamentais, ou “bosões mensageiros”. (Imagem: LIP – exposição “Partículas – do bosão de Higgs à matéria escura”).**

Para além das partículas elementares, o Modelo Padrão descreve as forças fundamentais que são exercidas entre estas partículas de matéria. Só conhecemos quatro: a força gravítica, a força electromagnética, e duas forças que chamamos nucleares (força nuclear “forte” e “fraca”... nomes mais descritivos do que imaginativos). A força nuclear fraca é geralmente mais fraca do que a força eletromagnética, mas essencial por exemplo no funcionamento das estrelas enquanto que a nuclear forte é... bem, muito mais forte. Haverá outras forças? As teorias abundam, mas sem sinais visíveis, portanto vamos ignorá-las de momento!

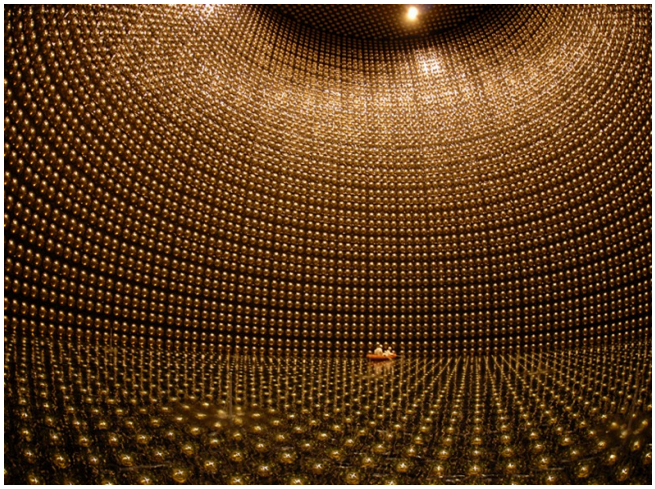

**Figura 6: detetor de neutrinos no japão consistindo num enorme tanque de água ultra-pura rodeado por 11 242 detetores de luz muito sensíveis. Na figura, alguns cientistas consertam um dos detetores de luz a partir de um barco de borracha, antes de encher totalmente o tanque com água (imagem: experiência Super-Kamiokande).**

Ao contrário do que aprendemos na física clássica, onde as forças são o resultado de campos (gravítico, elétrico, etc), quando olhamos para o domínio das partículas temos que descrever as forças como sendo exercidas pela troca de outras partículas, a que chamamos os bosões mensageiros.

O fotão, que  conhecemos desde o início do século XX devido a Planck, Einstein e outros, é o bosão mensageiro que transmite a força eletromagnética. É também o corpúsculo (i.e. partícula) que constitui a luz que usamos para ver. Tem massa nula e não tem carga elétrica. Entre duas cargas elétricas, há uma troca contínua de fotões, e é esta troca que exerce a força eletromagnética entre as cargas. O campo elétrico é apenas a manifestação macroscópica desta força exercida na verdade ao nível quântico.

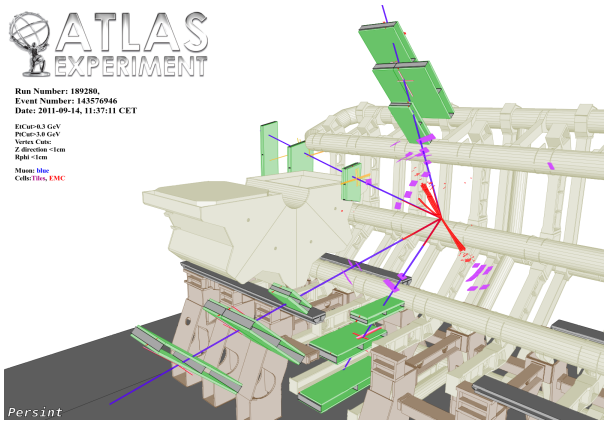


**Figura 7: representação de uma colisão de protões na experiência ATLAS do LHC onde foi provavelmente produzido um bosão de Higgs que se desintegrou produzindo dois bosões Z. Estes desintegraram-se em seguida produzindo quarto muões. Para que os quarto muões serem visíveis, apenas algumas partes da**

Ao contrário do fotão, os bosões mensageiros da força nuclear fraca têm uma massa enorme, à escala das partículas elementares, e dois deles têm também carga elétrica. São três e chamam-se $W^+$, $W^-$ e Z. A força nuclear forte, por seu lado, é transmitida por 8 “gluões”. O nome vem de “glue”, ou cola em inglês, porque são responsáveis por manter os quarks “colados” dentro de protões e neutrões.

No caso da força gravítica, pensa-se que exista uma partícula chamada gravitão, que nunca foi vista. Mas a força gravítica é tão fraca, quando comparada mesmo com a força nuclear fraca, que não influencia em nada as nossas experiências. É também um mistério para a física teórica, porque ainda não foi possível construir uma teoria quântica da gravidade. Mas isso ficará para outro artigo...

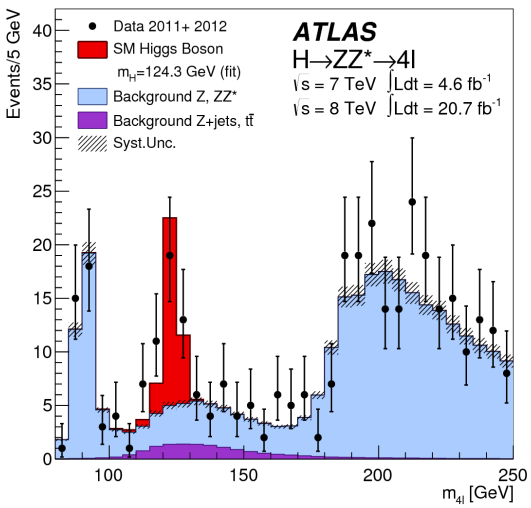


**Figura 8: um dos gráficos que demonstrou a descoberta do bosão de Higgs. O pico a vermelho visível no gráfico corresponde a bosões de Higgs desintegrando-se em dois bosões Z (imagem: CERN).**

Há finalmente uma partícula que não é nem matéria nem força: o bosão de Higgs. Mesmo assim ocupa um lugar central na teoria do Modelo Padrão. Surgiu muito pouco tempo depois do Big Bang, num evento cataclísmico conhecido por "quebra espontânea da simetria electrofraca", em que surgiram as próprias forças electromagnética e nuclear fraca tais como as conhecemos hoje. Antes desta "quebra de simetria" as duas forças eram uma única força "electrofraca"! Sem este evento o universo seria muito diferente do que hoje conhecemos. As partículas elementares teriam todas massa nula. Devido às energia de ligação entre os quarks, os protões seriam mais pesados do que os neutrões, e poderiam por isso desintegrar-se[1]. Assim, passado pouco tempo, não existiria hidrogénio. O Sol não iria brilhar! E de qualquer modo não existiriam átomos ou seres humanos para apreciar o seu calor... Numa frase, o Modelo Padrão da física de partículas, uma das teorias mais bem testadas de sempre, não funcionaria sem o mecanismo que deu origem ao bosão de Higgs e às forças nuclear fraca e electromagnética. Se tivéssemos que escolher apenas um, de entre os muitos triunfos do LHC, esse seria sem dúvida a descoberta do bosão de Higgs em 2012. Mais de 50 anos depois de ser prevista a sua existência, por Peter Higgs e outros, esta era a última partícula elementar do Modelo Padrão que ainda nunca fora observada.

Mas a descoberta do bosão de Higgs não foi o fim da história. Muito pelo contrário! Marcou o princípio da era em que é possível medir as propriedades desta partícula, e essas medidas utilizadas para procurar sinais de novos fenómenos no mundo subatómico. Por exemplo, só em 2018 foram obtidas provas experimentais da interação entre o Higgs e os quarks *beauty* e *top* (ou *b* e *t*). Dois marcos importantes no estudo desta partícula!

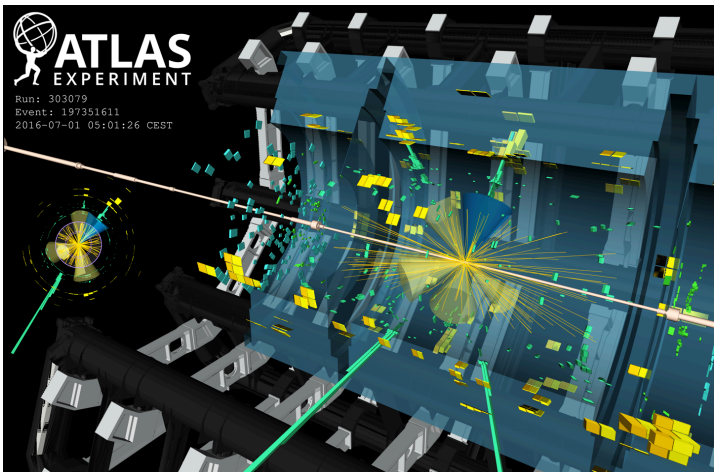


**Figura 9: imagem de uma colisão de protões em que foi provavelmente produzido um bosão de Higgs juntamente com um par de quarks top (imagem: CERN).**

[1] Se o protão fosse um pouco mais pesado do que o neutrão, poderia desintegrar-se rapidamente num neutrão, um positrão (a particular de antimatéria correspondente ao eletrão) e um neutrino. Uma vez que é o neutrão o mais pesado dos dois, o protão não decai.

É hoje claro que ainda há muito mais para descobrir. Ou como diria o príncipe Hamlet na peça de Shakespeare, há realmente mais mistérios no céu e na Terra do que explica a física que hoje conhecemos (e o bosão de Higgs, pode ser a janela que precisamos para descobrir esta "física nova" desconhecida!).

Por exemplo, sabemos por várias medidas de astrofísica (a sua presença muda a velocidade de rotação de galáxias e conjuntos de galáxias, "micro-lensing" gravitacional, e densidade espectral da radiação cósmica de fundo) que existe uma "matéria escura" que forma uma "nuvem" circundando as galáxias, e interage muito fracamente com a matéria normal. Na verdade, tudo o que realmente sabemos desta nova forma de matéria é que não é composta por nenhum tipo de objetos astrofísicos conhecido (buracos negros, poeira interestelar, etc) nem pode ser nenhuma partícula conhecida. Mas sabemos que existe! Por isso é natural procurar por algum tipo de partícula nova que possa constituir esta forma de matéria.

**Figura 10: imagem mostrando duas nuvens de materia escura (em azul) rodeando dois grupos de galáxias que se atravessaram mutuamente (imagem: observatório de raios-x Chandra)**

Há várias formas de procurar matéria escura: no LHC podemos procurar novas partículas que tenham características compatíveis com as propriedades da matéria escura. Por exemplo, têm que ter massa elevada, para explicar os efeitos gravitacionais da matéria escura, e carga elétrica nula, pois de outro modo teriam interações mais fortes com a matéria normal. Outra forma de a procurar é aproveitando a enorme velocidade da Terra através do espaço da nossa galáxia. Se a matéria escura forma uma espécie de nuvem em torno da galáxia, deveríamos vê-la como uma espécie de vento contrário ao nosso movimento. Uma vez que as partículas de matéria escura interagem muito pouco, precisamos de detetores muito precisos e com muito pouco ruído. Para isso colocamos detetores extremamente sensíveis em minas muito profundas, de modo a que não sejam afectados por sinais falsos criados por raios cósmicos.

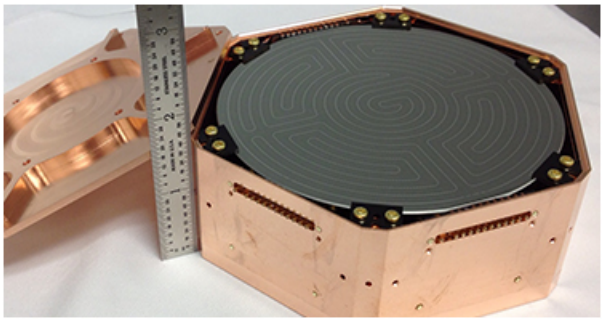

**Figura 11: detetor de germânio de alta pureza arrefecido até um grau acima do zero absolute e colocado numa experiência de procura de matéria escura situada numa mina no Canadá a 2 000 m de profundidade (imagem: experiência superCDMS).**

Outros mistérios que a física tenta resolver vêm de partículas que nos chegam do Espaço, mensageiras que nos trazem informação sobre zonas distantes do Universo. Sabemos que existem objetos cósmicos que podem acelerar partículas a energias enormes, muito acima da energia dos feixes do LHC! Mas não sabemos ainda quais são, onde estão, ou como produzem tamanha energia. Destes objetos chegam-nos vários tipos de partículas: os raios cósmicos são compostos sobretudo por protões, mas contêm outras partículas carregadas. Chegam também

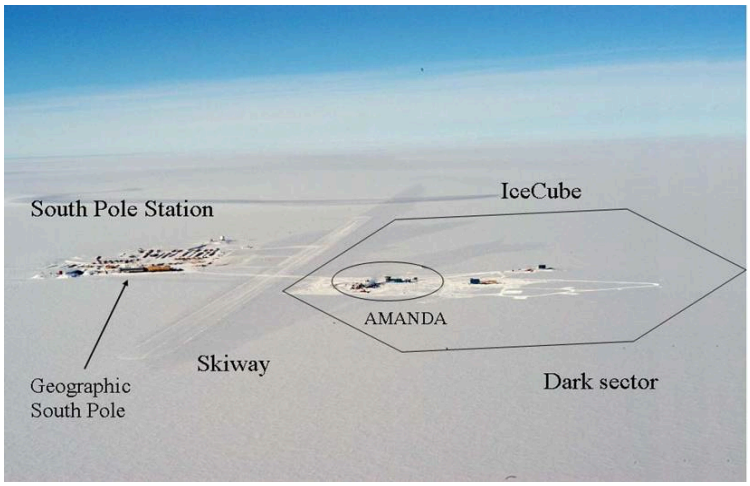


**Figura 12: experiência IceCube na estação científica Amundsen-Scott na Antártida. Esta experiência usa 1 km3 do gelo do Polo Sul para detetar a passagem de neutrinos muito energéticos (imagem: colaboração IceCube).**

do Espaço fotões e neutrinos de altíssima energia. Para registar a chegada destas partículas e estudar os objetos que lhes dão origem é essencial procurar simultaneamente vários tipos de partículas. Por exemplo, em 2017 foram observados raios gama (fotões muito energéticos) vindos da mesma região do espaço que uma onda gravitacional, coincidentes também com raios-x e ondas rádio. Foi também observado um neutrino de energia elevadíssima num gigantesco detetor situado no Polo Sul. Em 2018 foi também feita a análise da direção de raios cósmicos de elevada energia, que permitiu concluir que estes chegavam de fora da nossa galáxia. São mensageiros que nos chegam do Universo longínquo!

Estamos mesmo no fim desta viagem pela física do infinitamente pequeno, e as suas ligações com o infinitamente grande. Mas é preciso dizer que nesta curta viagem foi apenas possível cobrir uma parte muito pequena do que sabemos. E uma pequena parte da investigação com que hoje em dia tentamos descobrir mais. Há muito mais questões em aberto do que as que foi possível abordar aqui. Algumas destas poderão ser respondidas por nos próximos anos, e provavelmente levarão a outras perguntas mais profundas sobre o funcionamento do Universo. Outras continuarão certamente a intrigar e a maravilhar os físicos, e por certo levarão a novas ideias, teorias, experiências, e descobertas. Talvez feitas por alguns de vocês, que são hoje alunos na Escola Secundária António Damásio!

Ricardo Gonçalo é investigador no LIP – Laboratório de Instrumentação e Partículas e Professor Convidado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Foi assistente de investigação no Imperial College, onde se doutorou, e no Royal Holloway College da Universidade de Londres. Enquanto investigador no Royal Holloway trabalho durante vários anos no CERN, onde contribuiu para a descoberta do bosão de Higgs na experiência ATLAS do LHC.