

Um ano na fronteira do infinitamente pequeno

Sofia Andringa^{1,5}, Nuno Castro^{1,2,5}, Ricardo Gonçalo^{1,3,5}, Orlando Oliveira^{4,5}

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas - LIP

² Departamento de Física da Universidade do Minho

³ Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

⁴ Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

⁵ Divisão de Física de Partículas da Sociedade Portuguesa de Física

O ano que passou trouxe várias descobertas na fronteira do infinitamente pequeno, o domínio onde impera a Física de Partículas. Neste artigo, fazemos uma viagem pelas últimas novidades do mundo das partículas, com passagem por experiências e teoria que exploram uma realidade por vezes mais fantástica do que qualquer trabalho de ficção.

Experimentalmente, a Física de Partículas é investigada em experiências que não podiam ser mais diversas: desde gigantescos aceleradores como o LHC, a experiências que cabem numa pequena sala (mas conseguem uma inigualável precisão em medidas muito específicas¹), 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.

1. O LHC – a máquina dos infinitos

Nesta viagem, não podemos tentar visitar todos os portos. Em vez disso escolheremos algumas paragens, começando pelo LHC², uma das mais fantásticas ferramentas de investigação de que dispomos (Figura 1). Desde há quase uma década, as experiências do LHC têm trazido uma enorme quantidade de avanços, que pouco a pouco vão respondendo a velhas questões, fazendo medidas com melhor precisão, ou levantando novas e mais profundas questões.

Se tivéssemos que escolher apenas uma descoberta, de entre os muitos triunfos alcançados até à data pelo LHC, esse seria sem dúvida a descoberta do bosão de Higgs em 2012. Esta era a última partícula elementar ainda não observada

que era prevista pelo Modelo Padrão da Física de Partículas – o conjunto de teorias com que explicamos o mundo sub-nuclear. Mas é também central para o seu funcionamento, permitindo a unificação das forças electromagnética e nuclear fraca, regularizando cálculos teóricos que de outro modo seriam infinitos, e integrando de forma natural as massas das partículas elementares. Numa frase, o bem testado Modelo Padrão da Física de Partículas não funcionaria sem o mecanismo de Higgs, de que o bosão é a prova experimental.

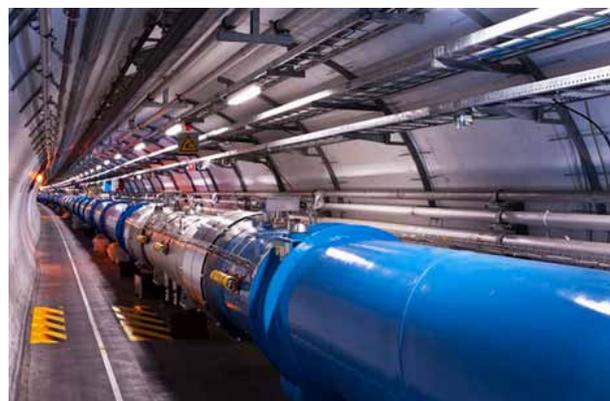


Fig. 1 - uma pequena parte do túnel do LHC onde se veem ímanes supercondutores dipolares que conduzem a órbita dos feixes, a azul, e ímanes quadripolares, a branco, que focam os feixes. (imagem: CERN Genebra)

Mas é hoje claro que isto não é o fim da história. Ou como diria o príncipe Hamlet, há realmente mais mistérios no céu e na Terra do que explica a física que hoje conhecemos: desde a matéria escura que circunda as galáxias até à força misteriosa que acelera a expansão do Universo, passando por perguntas aparentemente simples, como “para onde foi a antimatéria criada no Big Bang?”, “pode o bosão de Higgs ser a janela que precisamos para descobrir esta física nova desconhecida?” ou ainda “porque têm as partículas elementares massas tão diferentes?”.

¹ Por exemplo na medida de um dipolo elétrico do elétron, com implicações importantes na possibilidade da existência de uma “nova física” não prevista no modelo padrão.

² O LHC (Large Hadron Collider, em inglês) é o grande colisionador de partículas do CERN, o Laboratório Europeu de Física de Partículas, em Genebra na Suíça.

A descoberta do bóson de Higgs abriu finalmente a possibilidade de medir as suas propriedades e interações com outras partículas conhecidas. O progresso conseguido desde então é assombroso. Hoje, devido ao trabalho colaborativo de alguns milhares de físicos das experiências ATLAS e CMS, conhecemos a massa do bóson de Higgs com uma precisão de 0,2 %, e observamos com segurança as suas interações mais importantes com outras partículas conhecidas. Os últimos episódios importantes nesta história aconteceram já em 2018.

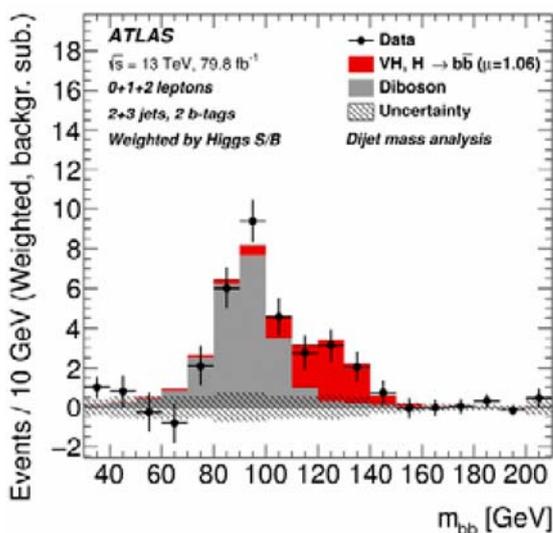


Fig. 2 - massa do bóson de Higgs medida através da sua desintegração num par de quarks b (a vermelho) sobreposto ao ruído de fundo. Os pontos representam os dados medidos experimentalmente. As zonas a cinzento e vermelho correspondem a dados simulados. (imagem: ATLAS Collaboration/CERN)

No início do verão, as experiências ATLAS e CMS publicaram vários artigos documentando medidas da taxa de produção do bóson de Higgs em diferentes reações. Estas medidas de precisão permitem sondar com enorme detalhe se o Higgs é tal como previsto no Modelo Padrão ou se, pelo contrário, há diferenças devidas a física nova. Isto é, de cada vez que se reduzem as incertezas experimentais, reduz-se o espaço livre para os efeitos do desconhecido. É um cerco, em que cada centímetro conquistado ao desconhecido é ganho à custa de mais dados e de muito trabalho de investigação!

De entre os resultados publicados em 2018, o lugar de destaque é com certeza para a observação, há muito esperada, da interação do Higgs com os quarks beauty e top (ou b e t). Quarks são os constituintes fundamentais de prótons e neutrões que formam os núcleos atômicos. A sua interação com o bóson de Higgs depende da sua massa. Quanto maior esta for, maior é a intensidade da interação. E os quarks b e t são os mais pesados que existem na Natureza. O top é a partícula elementar conhecida com maior massa, semelhante à de um átomo de ouro!

Mas a medida destas interações é um verdadeiro pesadelo experimental: por cada colisão no LHC

onde o Higgs se desintegra num par de quarks b (Figura 2), o sinal óbvio da sua interação mútua, são produzidos cerca de 20 milhões de colisões que resultam num par de quarks b mas que não provêm do Higgs. É como procurar uma agulha em centenas de palheiros! O quark top é demasiado pesado para ser produzido na desintegração de um bóson de Higgs. Por outro lado, a sua produção em simultâneo com um Higgs (Figura 3) assinala a interação entre estes dois tipos de partículas. Mas esta observação é igualmente um enorme desafio à criatividade e perseverança dos experimentalistas. Ambos estes desafios foram vencidos em 2018, com a publicação quase simultânea de artigos pelas experiências ATLAS e CMS para cada um destes processos.

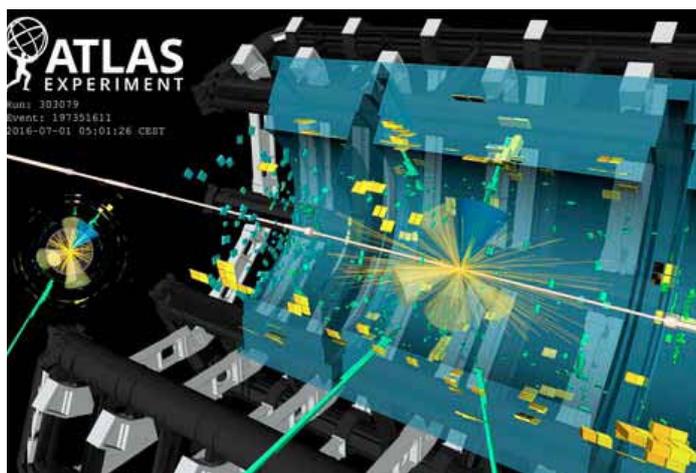


Fig. 3 - imagem de uma colisão de prótons em que foi provavelmente produzido um bóson de Higgs juntamente com um par de quarks top. Os prótons circulam no tubo que atravessa a figura, e os produtos do decaimento do Higgs e quarks top é registado pelos detetores em torno da colisão. (imagem: ATLAS Collaboration/CERN)

Claro que as experiências do LHC investigam muito mais do que o bóson de Higgs. Voltando ao quark top, a sua elevada massa faz com que desempenhe frequentemente um papel importante em teorias que procuram ir para além do Modelo Padrão. Fornece assinaturas experimentais muito características em colisionadores hadrónicos como o LHC, o que permite um vasto leque de medidas de precisão e pesquisas de novos fenómenos.

Em 2018, houve várias novidades em medidas associadas ao quark top, por exemplo com a observação de colisões onde foram produzidos um par de quark-antiquark top com elevado momento (Figura 4). Uma outra medida a destacar foi a da produção simultânea de quatro quarks top, anunciada pela colaboração ATLAS. É um processo extraordinariamente raro no Modelo Padrão, e a taxa de produção revelou-se um pouco acima do esperado, embora este excesso não seja estatisticamente significativo. O acumular de mais dados e o desenvolvimento de técnicas de análise mais avançadas dir-nos-ão se esta diferença se deve, ou não, a novos fenómenos não previstos no Modelo Padrão da Física de Partículas.

Também empolgantes foram as medidas de precisão do ângulo entre dois eletrões ou muões originados pela desintegração dos quarks top e anti-top produzidos numa mesma colisão. Esta grandeza é sensível à correlação entre os

spins dos dois quarks. Um desvio em relação à previsão teórica pode ser um indicio de nova física. E foi isso mesmo que se observou nestes resultados (ver Figura 5), criando uma grande animação na comunidade. No entanto, foi recentemente relatado por um grupo de físicos teóricos que cálculos mais precisos poderão explicar a diferença. Aguardamos ansiosamente por mais novidades neste tópico!

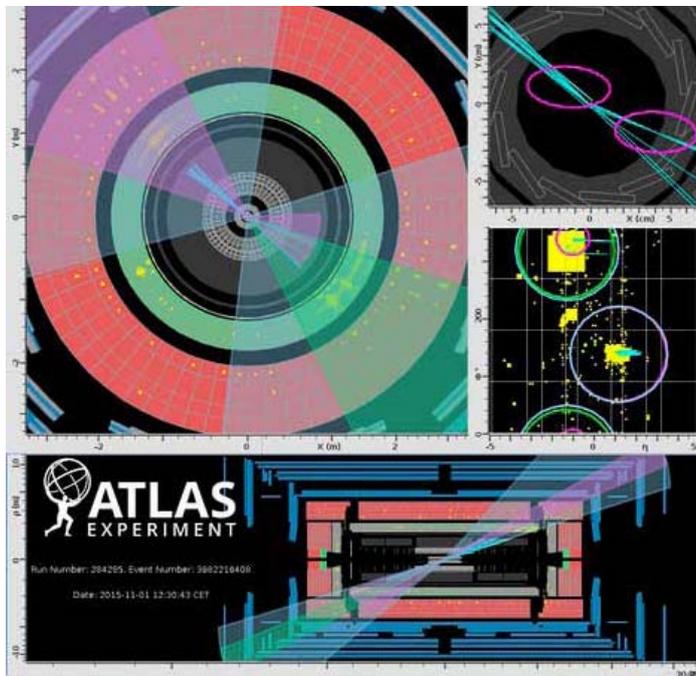


Fig. 4 - Colisão de prótons compatível com a produção simultânea de quarks top e anti-top em que os produtos de decaimento dos quarks tops surgem colimados devido ao seu elevado momento. (imagem: ATLAS Collaboration/CERN)

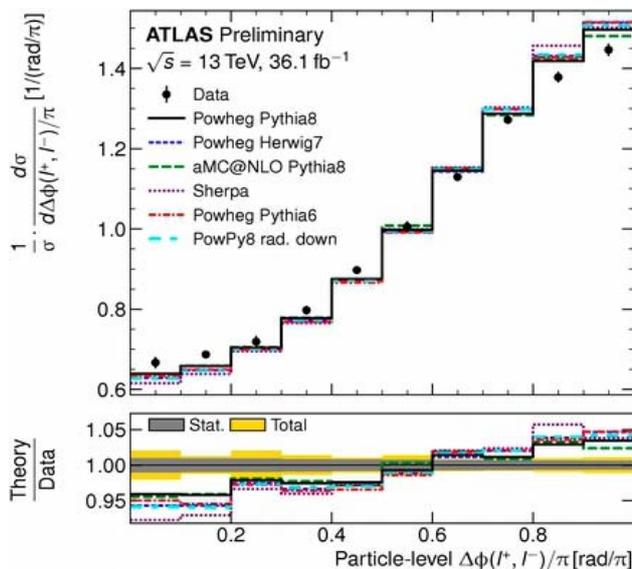


Fig. 5 - Medida da secção eficaz diferencial da produção de pares top/anti-top em função da diferença de ângulo azimutal entre os leptões carregados. A medição (círculos) mostra uma aparente discrepância com várias previsões teóricas (histogramas), que tem causado uma grande animação na comunidade. (imagem: ATLAS Collaboration/CERN).

A pesquisa de novos fenómenos de Física, tais como novas partículas ou novas interações, está frequentemente ligada aos processos com quarks top, seja porque as novas interações favorecem o acoplamento ao top, seja porque as novas partículas são preferencialmente produzidas em associação com o top ou decaem para estes quarks. Um exemplo disto são os quarks vectoriais, novas partículas propostas por diversos modelos que tentam explicar a enorme diferença entre as massas das partículas conhecidas.

Este ano foi frutuoso na quantidade de pesquisas por estes quarks vectoriais, recorrendo-se a diversos estados finais para procurar assinaturas de física para além do Modelo Padrão. Infelizmente não encontramos ainda evidências de tais partículas, estando os limites inferiores na massa de diversos tipos de quarks vectoriais já bem acima do teraeletrãovolt, ou TeV. De igual forma, a pesquisa por novos leptoquarks, novos bosões, estrutura nas partículas fundamentais do Modelo Padrão, partículas super-simétricas ou possíveis mediadores que acoplem a partículas responsáveis pela matéria escura não resultou, até ao momento, num novo paradigma da Física de Partículas.

No entanto, o LHC ainda irá obter muitos mais dados do que os acumulados até agora! E estes dados adicionais poderão vir a revelar um novo mundo à espreita para além dos limites explorados até ao momento. Para isso, o LHC vai fazer enormes melhoramentos, nos seus ímanes supercondutores, colimadores, cavidades de aceleração, etc. para recolher mais dados, e mais depressa, até ao fim do seu programa em 2035. As experiências ATLAS e CMS, com a participação importante de grupos de físicos portugueses, vão fazer grandes mudanças nos seus detetores e sistemas de electrónica. Levarão os próximos dois anos a executar esse trabalho, para em seguida voltar a observar colisões no LHC com mais precisão, que permitam investigar mais a fundo a natureza e propriedades do bosão de Higgs, procurar quarks vectoriais, fazer medidas de quarks top e investigar muitos outros assuntos na fronteira do nosso conhecimento.

2. Os novos observatórios – notícias do mundo das “astropartículas”

A paragem seguinte na nossa viagem é na área das 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!) da ordem de 1 joule por próton, mas não sabemos ainda quais são. Copiando a tecnologia do LHC, seria necessário um acelerador com o perímetro da órbita de Mercúrio para produzir prótons com estas energias. Mas não é fácil encontrar no Espaço campos magnéticos tão elevados como os do LHC. Sendo as trajetórias de partículas carregadas desviadas pelos campos magnéticos, torna-se difícil identificar as suas fontes. Uma estratégia é procurar partículas neutras: fótons e neutrinos, criados pela interação de prótons e núcleos

atômicos, seja diretamente nas fontes ou no caminho até nós. Estas partículas apontarão uma direção, que idealmente indicará um fenómeno identificável por outro tipo de experiência.

Nas notícias da Física de Partículas em 2018, destaca-se a publicação das observações de dois eventos cósmicos estudados através de múltiplos mensageiros. Para estas observações, juntaram-se astrónomos amadores, telescópios clássicos, detetores na Terra, no Espaço, e em laboratórios subterrâneos, etc. e desta vez também detetores de ondas gravitacionais!



Fig. 6 - Detetor de Hanford, no estado de Washington, do observatório de ondas gravitacionais LIGO - Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. (imagem: Caltech/MIT/LIGO Lab)

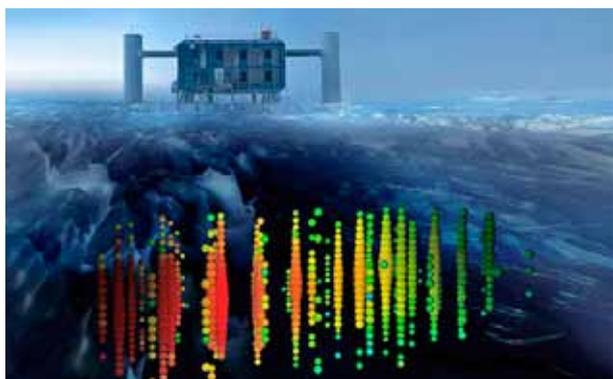


Fig. 7 - Experiência IceCube - detetor que usa 1km³ de gelo do Polo Sul para procurar a passagem de neutrinos de muito alta energia. Em baixo na imagem pode ver-se a representação de um destes eventos. (imagem: IceCube Collaboration)

Em agosto de 2017, os novos detetores de ondas gravitacionais³ LIGO e VIRGO – interferómetros com braços perpendiculares de 4 km (Figura 6) – registaram os últimos dois minutos da história de duas estrelas de neutrões, que aceleram numa espiral até se fundirem. Segundos depois, foi identificada uma explosão de raios gama na mesma direção. E, algumas horas depois, foi identificada a galáxia de origem das estrelas de neutrões. Esta aumentou de brilho em comprimentos de onda desde o rádio aos raios-X, permitindo a observação durante vários dias

³ Ondas gravitacionais são perturbações do espaço-tempo, que se propagam à velocidade da luz por todo o Universo, induzindo variações nas distâncias. Passaram 100 anos desde a previsão da sua existência até à primeira detecção, que foi distinguida com o Prémio Nobel de 2017.

de uma KiloNova e, pela primeira vez, do fenómeno que a originou.

Em setembro do mesmo ano, a experiência IceCube – 1 km³ de gelo instrumentado no Pólo Sul (Figura 7) – detectou um neutrino de energia tão elevada que ativou um alerta para os vários observatórios. Neste caso, foi observado o aumento de brilho de uma galáxia, originado por um blazar BL-Lac. Estes objetos têm largos períodos de repouso, interrompidos por grandes emissões quando apontam um jacto de partículas na nossa direção.

Isto não é tudo novo: há muito que as observações nos vários comprimentos de onda electromagnéticos são postas em conjunto, e em 1987 já houve um caso de observação conjunta com neutrinos, embora de energias muito menores. Num mesmo minuto, três detetores verificaram um grande aumento do fluxo de neutrinos. Três horas depois foi detetada uma SuperNova tão brilhante que era mesmo visível a olho nu. A emissão da SuperNova SN1987A nos vários comprimentos de onda é seguida até hoje, tendo os neutrinos dado um contributo único para compreender este tipo de fenómeno.

O que mudou entretanto? Em primeiro lugar, as primeiras detecções de ondas gravitacionais demonstraram que fenómenos como a fusão de estrelas de neutrões ou de buracos negros não são tão raros como se pensava. E, se no caso das estrelas de neutrões a fusão pode ser observada por outros meios, a fusão de buracos negros tem apenas um mensageiro: as ondas gravitacionais. Os detetores de raios gama, usando técnicas da Física de Partículas, passaram também a mapear o céu em comprimentos de onda antes invisíveis para nós, e encontrando novas fontes desconhecidas de luz. Os detetores de neutrinos passaram a funcionar em rede, de forma que uma SuperNova na nossa galáxia ou próxima, não passe despercebida. Por outro lado, há agora observatórios sensíveis a neutrinos com uma gama de energias muito maior. Os neutrinos de alta energia podem servir para identificar as fontes de maior energia do Universo. Finalmente, os detetores de raios cósmicos cobrem hoje todo o céu, e juntam várias técnicas que permitem ter maior confiança nas suas medições.

As “astropartículas” continuam a ser exploradas no âmbito da Física de Partículas, mas o diálogo com outras áreas da física, está a potenciar a área e trará com certeza muitos resultados importantes nos próximos anos.

3. Os mistérios da força forte

A última paragem nesta viagem é na fronteira da física teórica de partículas. Mais especificamente no estudo da força forte, responsável pela existência de prótons e neutrões.

Uma das componentes do Modelo Padrão, a interação de cor, envolve quarks e gluões. Esta teoria, designada por Cromodinâmica Quântica (QCD na sigla em inglês), foi formulada na década de 70 do século passado, mas a sua resolução e compreensão tem-se revelado particularmente difícil. A dificuldade resulta da falta de métodos apropriados para resolver as equações fundamentais que surgem em QCD.

As partículas fundamentais da QCD, os quarks e os gluões, não são observados na Natureza. Surgem sempre na forma

de hádrons que aparecem como partículas constituídas por 3 quarks, designados por bárions (por exemplo prótons e neutrões), ou por pares de quark-antiquark, que designamos por mesões (por exemplo o pião que associamos à interação nuclear a longas distâncias). Em princípio, a teoria permite também a formação de outro tipos de estados ligados, como por exemplo, bolas de glúões ou estados formados por múltiplos quarks.

A descrição da interação entre quarks é um primeiro passo para que se consiga compreender a formação de prótons e, posteriormente, a formação de núcleos atômicos o que permitirá entender a Física Nuclear, as propriedades das estrelas de neutrões e os detalhes da evolução do Universo. A massa do próton resulta da própria dinâmica da QCD, e o mecanismo de Higgs tem aqui uma contribuição insignificante⁴.

A determinação das massas dos hádrons é um cálculo de referência para validar a teoria da QCD. Este objectivo tem sido prosseguido ao longo dos anos, melhorando a cada ano a

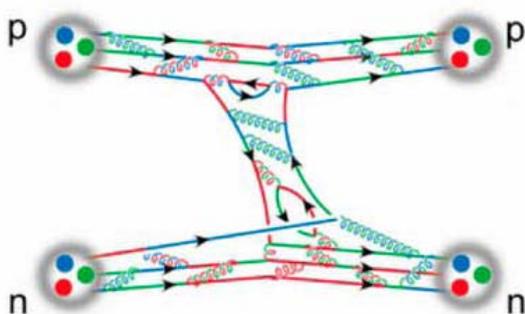


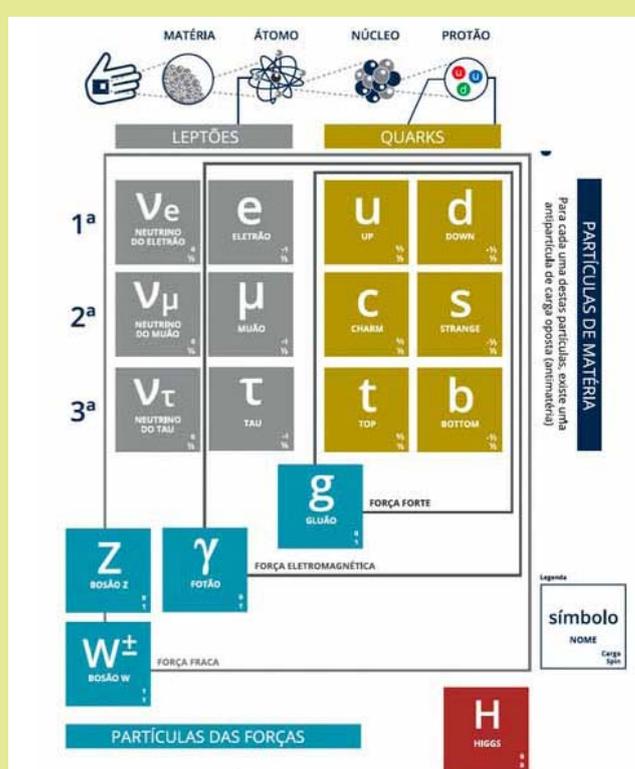
Fig. 8 - Descrição da interação nuclear

precisão do cálculo de primeiros princípios e procurando incorporar detalhes como, por exemplo, a diferença de massas devidas à interação electromagnética ou a diferença de massa entre quarks u e d .

Um estudo com implicações profundas na nossa compreensão do Universo é a procura da descrição da interação nuclear a partir de primeiros princípios. Do ponto de vista da teoria, a interação nuclear é um processo complexo que envolve a participação de todas as componentes da teoria (Figura 8). Apesar da dificuldade do problema, há vários grupos que se têm dedicado a este tema procurando obter o potencial nuclear.

O potencial nuclear é um objecto complexo que depende dos números quânticos dos prótons e neutrões. Na Figura 9, ilustramos a componente central do potencial nuclear determinado pela colaboração HAL. Os resultados de outros estudos são similares. Dada a complexidade do problema em si mesmo, as simulações a partir de primeiros princípios não são completamente realistas e ainda há um grande esforço a realizar para as aproximar das condições observadas na Natureza. Apesar das limitações, há uma intensa atividade que estuda sistemas que envolvem mais do que dois nucleões, como a espectroscopia de sistemas de dois nucleões, o comportamento da dinâmica em meios com densidade finita, como por exemplo no plasma de quarks e glúões, só para mencionar alguns.

A física de partículas descreve a matéria à nossa volta como sendo constituída por aglomerados de partículas elementares, que compõe as moléculas e átomos com que estamos familiarizados. Os prótons e neutrões que compõe o núcleo atômicos são eles próprios constituídos por partículas elementares, os quarks. Atualmente, a física de partículas é descrita por um conjunto de teorias conhecidas como Modelo Padrão. Além de definir o conjunto de partículas elementares conhecidas, classificadas como quarks e leptões — o electrão que conhecemos há mais de um século é um leptão — o Modelo Padrão descreve as várias forças entre as partículas elementares de matéria como sendo exercidas pela troca de outras partículas, os bosões mensageiros — o fóton, nosso conhecido como o corpúsculo que constitui a luz que usamos para ver, é um bosão mensageiro. As partículas de matéria têm spin $1/2$, enquanto que os bosões mensageiros têm spin 1. As forças fundamentais que conhecemos são: a força eletromagnética, que afeta todas as partículas com carga elétrica e é transmitida pela troca de fótons; a força nuclear forte, que afeta apenas os quarks e é transmitida pela troca de glúões; a força nuclear fraca, transmitida pelos bosões W^+ , W^- e Z , e a força gravítica, a mais familiar das forças, mas cuja descrição quântica continua um mistério para a física e não é descrita pelo Modelo Padrão. Finalmente, o bosão de Higgs, com spin zero, apesar de não transmitir uma força, ocupa um lugar central na teoria do Modelo Padrão.



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")

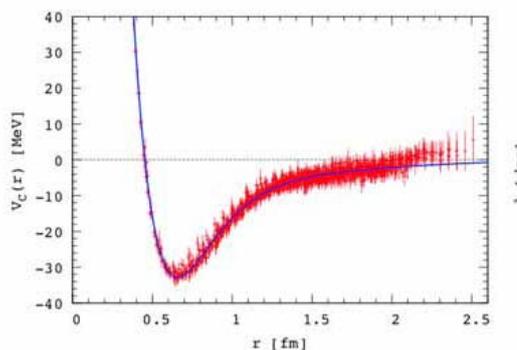


Fig. 9 - Uma das componentes do potencial nuclear. (imagem: HAL Collaboration, arXiv:1811.06232 [hep-lat])

Além destes exemplos, a interação de cor tem um papel essencial em muitos outros, como nas propriedades do quark top, ou o factor giromagnético do muão (uma das grandezas medidas com mais precisão em física de partículas), etc. Nos últimos anos tem-se, por isso, assistido a muita atividade no desenvolvimento de novas técnicas para a realização destes cálculos.

4. O fim da viagem?

Não, claro! Apenas um começo, para aguçar o apetite para o que nos reserva o próximo ano. E muito mais haveria a dizer. Não seria fácil cobrir todas as áreas num campo vibrante de atividade como a física das partículas.

Contactos:



Divisão de Física de Partículas da SPF (partículas@spf.pt)

Sofia Andringa (sofia@lip.pt)

Nuno Castro (Nuno.Castro@cern.ch)

Ricardo Gonçalo (Jose.Goncalo@cern.ch)

Orlando Oliveira (orlando@uc.pt)

Links úteis:

Divisão de Partículas da SPF: https://www.spf.pt/fisica_particulas

Astronomia multi-mensageiros (notícia LIP e outros links): <https://www.lip.pt/?section=press&page=news-details&id=620>

Resultados das experiências ATLAS e CMS do LHC (páginas públicas): <https://atlas.cern/updates/physics-briefing/>
<https://cms.cern/news/category/382>

HAL Collaboration (Hadrons to Atomic Nuclei) ver p/ex: <https://arxiv.org/abs/1811.06232>



Sofia Andringa Investigadora no LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas. Doutorada pelo Instituto Superior Técnico, com uma tese sobre pesquisas do Higgs em LEP, fez um primeiro pós-doc em Barcelona, no Institut de Física d'Altes Energias, em K2K – a primeira experiência de confirmação da oscilação de neutrinos. A sua investigação foca-se em física experimental de neutrinos (em SNO+ e DUNE) e na deteção de raios cósmicos de muito alta energia no Observatório Pierre Auger.



Nuno Castro Professor Auxiliar no Departamento de Física da Universidade do Minho e Diretor do LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas. Doutorou-se na Universidade de Coimbra e foi Investigador de pós-doutoramento no Departamento de Física Teórica e dos Cosmo da Universidade de Granada, tendo também sido Professor Convidado no Departamento de Física e Astronomia da Universidade do Porto. Desenvolve a sua investigação na pesquisa de novos fenómenos de Física em colisionadores de partículas, em particular no sector do quark top. É membro da Colaboração ATLAS do CERN desde 2004.



Ricardo Gonçalo Investigador no LIP – Lab. 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. Contribuiu para a descoberta do bóson de Higgs na experiência ATLAS do CERN, onde continua a investigar as propriedades desta partícula.



Orlando Oliveira Professor Auxiliar com Agregação no Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e membro do Centro de Física da Universidade de Coimbra. Doutorou-se na Universidade de Edimburgo. Desenvolve a sua investigação na área das interações fortes, em particular no da estrutura não-perturbativa da QCD.

⁴ O mecanismo de Higgs que é responsável pela massa de partículas elementares, contribui apenas para cerca de 1 % da massa do protão, contida nos quarks que o constituem. O resto é "energia de ligação" determinada pela QCD.