

A descoberta do mundo quântico e a “construção” da Física de Partículas

Mário Pimenta

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas – LIP

pimenta@lip.pt

Em 1887, a descoberta do efeito fotoelétrico por Heinrich Hertz revelou que a interação da luz com a matéria não seguia o comportamento esperado de uma onda mecânica. Poucos anos depois, em 1905, Einstein explicou esse fenómeno ao postular que a luz, embora se propague como uma onda eletromagnética — de acordo com as equações de Maxwell —, interage como uma partícula: o fóton. O fóton possui massa nula e uma energia E determinada pelo seu comprimento de onda λ , pela constante de Planck h e pela velocidade da luz no vácuo c : $E=hc/\lambda$.

A natureza quântica da luz ficava assim estabelecida, através da quantificação da sua energia. O campo eletromagnético, que desde Maxwell já se reconhecia como portador de energia e de momento, passou a ser interpretado como a sobreposição de partículas elementares — os fótons —, facto confirmado em 1923 por Arthur Compton, ao estudar a interação do campo eletromagnético com eletrões livres.

Em 1924, Louis de Broglie, na sua tese de doutoramento, propôs que este estranho comportamento dual da luz fosse, na verdade, uma característica universal de toda a matéria. Três anos mais tarde, em 1927, essa previsão — tão ousada quanto contraintuitiva — foi confirmada por Clinton Davisson e Lester Germer, ao observarem a difração de um feixe de eletrões. Estava, assim, demonstrado que também as partículas constituintes da matéria possuíam uma natureza quântica. A imagem do átomo sofreu, então, uma nova e profunda revolução.

A origem da ideia atómica remonta aos séculos VI e V a.C., na Índia e na Grécia, onde foi proposta a existência de uma partícula minúscula, invisível, indivisível e eterna, batizada mais tarde com o nome de “átomo” por Leucipo e popularizada pelo seu discípulo Demócrito.

A fundamentação científica da ideia do átomo foi, contudo, apenas estabelecida nos séculos XVIII e XIX, com o desenvolvimento de leis químicas fundamentais, como a lei da conservação da massa (Lavoisier, 1789), as leis dos gases ideais (Gay-Lussac, 1802) e a lei das proporções múltiplas (Dalton, 1805), sendo definitivamente consolidada com a proposta da tabela periódica por Mendeleiev, em 1869.

Mas a visão do átomo como uma entidade indivisível foi abandonada no final do século XIX. Tornou-se necessário admitir a existência de cargas elétricas no seu interior e, no início do século XX, descobriu-se (através da experiência proposta por Rutherford e realizada por Geiger e Marsden) que o átomo possui uma estrutura interna, composta por um núcleo minúsculo com carga elétrica positiva, rodeado por partículas com carga negativa: os eletrões. Por outro lado, o estudo dos espectros de emissão e absorção de diferentes elementos, a começar pelo Hidrogénio, revelou o seu carácter discreto e único para cada elemento, tal como os códigos de barras que se utilizam atualmente na identificação dos produtos num supermercado. Este carácter discreto induziu à definição de regras de quantificação no espaço e no momento angular (e na obtenção dos correspondentes números quânticos) que determinavam as órbitas acessíveis aos eletrões em torno do núcleo.

Com o advento da Mecânica Quântica, as partículas deixam de possuir posição e momento bem definidos, e as suas trajetórias deixam de estar determinadas. Passam a ser descritas por funções de onda complexas no espaço-tempo, sendo que o integral do quadrado dessa função, sobre uma determinada região do espaço e num dado instante, define a probabilidade de as partículas aí se encontrarem.

A posição dos eletrões num átomo passa, assim, a ser representada por nuvens de probabilidade associadas a cada uma das orbitais possíveis, caracterizadas por números quânticos bem definidos. Estas orbitais correspondem agora às soluções das equações de onda: a equação de Schrödinger, na formulação não relativista da Mecânica Quântica, e, pouco mais tarde, as equações de Klein-Gordon e de Dirac, no quadro relativista.

Eletrões e fótons apresentam, contudo, comportamentos profundamente distintos. Enquanto os eletrões obedecem ao princípio de exclusão de Pauli — segundo o qual cada estado quântico pode ser ocupado, no máximo, por um eletrão —, não existe limite para o número de fótons que podem partilhar um mesmo estado quântico.

Este contraste foi posteriormente associado, por Pauli, ao valor de um número quântico específico: o momento angular intrín-

seco, denominado spin, já anteriormente introduzido no estudo dos espectros atômicos. Fierz (1939) e Pauli (1940) demonstraram, no contexto da Mecânica Quântica relativista, que as partículas de spin inteiro — os bosões — obedecem à estatística de Bose-Einstein, em que as partículas podem ocupar o mesmo estado quântico, enquanto as partículas de spin semi-inteiro — os férmions — seguem a estatística de Fermi-Dirac, em que só pode existir uma partícula por cada estado quântico.

O fóton tem spin 1 e é, portanto, um bóson; o elétron tem spin $\frac{1}{2}$ e é, consequentemente, um férmion. Os bósons são, assim, as partículas associadas aos campos de interação, enquanto os férmions correspondem à “matéria”.

Até hoje, foram descobertos 12 férmions e 13 bósons elementares. Os férmions dividem-se em dois grandes grupos — os léptons (sem carga forte) e os quarks (com carga forte) — cada uma com três famílias, que são réplicas da primeira mas com massas diferentes. Dos bósons, oito, os glúons, estão associados à interação nuclear forte, quatro, o fóton, o Z e o W^+W^- , às interações eletrofracas, e o último é o famoso bóson de Higgs, sobre o qual falaremos mais adiante com maior detalhe. Esta estrutura encontra-se resumida na figura 1, onde se indicam ainda os valores das respetivas massas, cargas elétricas e spins, números “mágicos” precisos, que não podem ser deduzidos a partir das teorias existentes.

Estes constituintes formam o núcleo do Modelo Padrão da Física de Partículas (*Standard Model* – SM), cuja construção resultou de um processo longo e cumulativo, que se estendeu por mais de um século, envolvendo inúmeros físicos, engenheiros e

estudantes. Desde as primeiras partículas detetadas através do estudo da radiação cósmica que nos chega à Terra, utilizando detetores relativamente simples, até às medições de precisão realizadas em aceleradores de partículas, com feixes de maior energia e cada vez mais intensos e com detetores altamente sofisticados, capazes de produzir volumes imensos de dados a serem triados e analisados em tempo útil, o percurso foi extraordinário.

Houve momentos em que parecia que tudo estava finalmente compreendido para, apenas alguns anos depois, se perceber que o que então se julgava praticamente completo, constituía, na realidade, apenas uma pequena parte de um quadro muito mais vasto. Um quadro que continua a desafiar a nossa compreensão e a inspirar novas perguntas, mantendo viva a inquietação que alimenta o progresso da ciência.

No início da década de 1930, as partículas elementares conhecidas eram o fóton, o elétron, o próton e o recém-descoberto neutrão. Com elas era possível descrever todos os elementos da Tabela Periódica — em suma, todo o Universo ao alcance dos nossos sentidos. Pouco depois, em 1933 Carl Anderson, ao estudar no topo de uma montanha os rastros deixados por raios cósmicos numa câmara de nuvens imersa num campo magnético, observou uma trajetória compatível com uma partícula de massa idêntica à do elétron, mas com carga elétrica positiva: um elétron positivo, a que se deu o nome de pósitron. Era a descoberta da antimatéria, cuja existência havia sido prevista por Paul Dirac alguns anos antes, ao procurar conciliar a Mecânica Quântica com a Teoria da Relatividade.



Figura 1

Às invariâncias por translação no tempo, e por translação e rotação no espaço — associadas, na Física Clássica, à conservação da energia, do momento linear e do momento angular, respetivamente — juntava-se agora uma nova simetria: a conjugação de carga. O mundo da antimatéria seria, portanto, regido pelas mesmas leis que o “nosso” mundo de matéria. De facto, é hoje possível criar e estudar, por exemplo, átomos de anti-hidrogénio e determinar, com notável precisão, que o espectro de radiação destes anti-átomos é idêntico ao dos seus equivalentes de hidrogénio.

O “mundo de Alice”, do outro lado do espelho, deveria obedecer às mesmas leis que regem o nosso. Contudo, o estudo experimental das interações fracas, na década de 1950 — culminando na célebre experiência de Chien-Shiung Wu, em 1957 — veio desmentir um dos dogmas da Física: nessas interações, a paridade — a simetria que faria o mundo e o seu reflexo comportarem-se de forma idêntica — é totalmente violada. Na linguagem da Mecânica Quântica, isto significa que a teoria das interações fracas não é invariante sob a ação do operador de paridade.

Sugeriu-se então que a ação combinada dos operadores de paridade (P) e de conjugação de carga (C) restauraria a simetria — em outras palavras, que o mundo refletido seria composto de antimatéria. Constatou-se, de facto, que a simetria CP era, em larga medida, respeitada; contudo, como se demonstrou de forma inesperada em 1964, numa experiência conduzida por James Cronin e Val Fitch, existiam decaimentos de partículas em que essa simetria era, afinal, violada.

A teoria das interações fracas fora proposta por Enrico Fermi, em 1933, na sequência de uma ousada hipótese de Wolfgang Pauli. Para resolver o enigma da aparente violação das leis de conservação da energia e do momento linear no decaimento do neutrão, Pauli sugeriu a existência de uma partícula quase etérea — talvez mesmo sem massa — que não interagisse nem por via eletromagnética, nem através da força nuclear forte. Essa partícula, designada mais tarde neutrino, dificilmente poderia ser detetada de forma direta.

A introdução da violação da paridade fez-se através da definição de um novo operador quântico: a quiralidade. Os seus estados próprios — esquerdo e direito — correspondem, no caso dos férmions sem massa, à helicidade, isto é, à projeção do spin do férmion na direção e sentido do seu momento linear. Se o spin estiver alinhado com o sentido do momento linear, a helicidade é positiva e o férmion diz-se direito; se estiver orientado no sentido oposto, a helicidade é negativa e o férmion diz-se esquerdo. Na teoria revista das interações fracas carregadas, estas ocorrem apenas entre partículas esquerdas e são mediadas por bósons com massa e carga elétrica — os bósons W^+ e W^- .

A exploração das possíveis simetrias existentes nos fenómenos físicos e das correspondentes invariâncias nas equações que os descrevem, esteve, e está, na base de muitos desenvolvimentos nas Teorias Físicas. A Mecânica Quântica não foi uma exceção: de facto, a fase das funções de onda complexas que descrevem as partículas é, por si só, destituída de significado absoluto, pois apenas os módulos quadrados dessas funções — as grandezas físicas realmente observáveis — têm relevância.

Assim, as equações que regem o seu comportamento, como a de Schrödinger, permanecem invariantes perante uma mudança global da fase, mas não face a uma mudança local dessa mesma fase.

Foi precisamente esta constatação que levou Hermann Weyl, Vladimir Fock e Fritz London, no final da década de 1920, a um resultado notável: se nas equações se introduzir o acoplamento ao campo eletromagnético, a invariância é restaurada. Dito de outro modo, exigir que as equações se mantenham invariantes perante transformações locais da fase conduz inevitavelmente à necessidade de introduzir a interação das partículas com um campo — que não é outro senão o campo eletromagnético, descrito pela eletrodinâmica quântica (QED).

Esta mudança local de fase corresponde a uma rotação local da fase, associável a uma transformação ligada a um grupo de simetria — no caso, o grupo de simetria $U(1)$, abeliano (comutativo), que descreve rotações num círculo de raio unitário.

A generalização para as invariâncias locais associadas a grupos não abelianos foi proposta em 1954 por Chen-Ning Yang e Robert Mills, estabelecendo as bases para descrever todas as interações fundamentais — com exceção da gravidade — como manifestações de simetrias locais.

No Modelo Padrão, a interação forte é regida pelo grupo de simetria $SU(3)$, cujos campos de interação são designados por glúons, enquanto as interações fraca e eletromagnética foram, na sequência dos trabalhos teóricos de Sheldon Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg, descritas como resultantes da conjugação dos grupos de simetria $SU(2)_L$ e $U(1)$. Importa notar que o grupo $SU(2)_L$ atua apenas sobre as componentes esquerdas dos campos fermiónicos, assegurando a violação da paridade nas interações fracas.

Dessa conjugação emergem os campos correspondentes aos bósons vetoriais carregados, W^+ e W^- , e aos neutros, Z e γ (fóton). Os três primeiros, que têm massa, estão associados às interações fracas, enquanto o fóton é o mediador da interação eletromagnética. Os novos bósons massivos foram descobertos posteriormente no início da década de 1980, no CERN, numa experiência liderada por Carlo Rubbia, e estudados em grande detalhe na década de 1990, em novas experiências no CERN e em Stanford (SLAC).

A receita está, por agora, bem definida: postula-se um ou mais grupos de simetria e impõe-se a chamada “invariância de gauge” segundo esses grupos — isto é, que as equações permaneçam invariantes sob as suas transformações — e, como consequência, surge um novo espectro de interações. A partir daí, preveem-se os seus efeitos no Universo e concebem-se experiências para os refutar ou, temporariamente, validar. Muitos outros grupos de simetria têm sido propostos, mas, teimosamente, o Modelo Padrão continua a descrever com notável exatidão todos os fenómenos observados nas escalas de energia e de precisão atualmente alcançáveis.

Há, no entanto, numerosas e fortes razões — experimentais e teóricas — para acreditar que não se está, nunca se está, no fim

da História. A esta questão voltaremos mais adiante.

Esta receita tinha, contudo, um pequeno — grande — constrangimento: esta invariância só existe num Universo composto por partículas sem massa. Ora, as partículas elementares — tanto os férmions como os bósons — que constituem a base do Modelo Padrão, com excepção do fóton e dos glúons e, eventualmente, de um dos neutrinos, possuem todas massas não nulas. O espectro destas massas, medido experimentalmente, mas não dedutível a partir da teoria, estende-se, aliás, por muitas ordens de magnitude.

A introdução das massas das partículas no Modelo Padrão, preservando a simetria de gauge, foi alcançada em 1964 por Robert Brout e François Englert, e de forma independente por Peter Higgs, através da proposta de um mecanismo de quebra espontânea de simetria.

No mecanismo proposto é introduzido um campo escalar complexo (o campo de Higgs) que preenche todo o Universo. A energia associada a esse campo, é descrita por um potencial que, no início do Universo, é simétrico em torno do valor nulo do campo, mas que transita para um potencial cujo mínimo corresponde a um valor não nulo do campo e a uma energia menor.

Como resultado dessa transição, surge uma nova partícula escalar (bóson de spin 0), de carga eléctrica nula, mas massa não nula. Tendo sido Peter Higgs o primeiro a referir explicitamente o seu aparecimento, a partícula ficou conhecida como o bóson de Higgs. As massas das diversas partículas do Modelo Padrão são agora entendidas como massas efetivas resultantes dos seus acoplamentos ao campo de Higgs, e não como massas intrínsecas. Estava, assim, preservada a invariância de gauge — o princípio central da actual descrição quântica do Universo. Culminando várias décadas de investigação — na qual participei pessoalmente durante mais de dez anos, entre 1989 e 2001 —, a 4 de Julho de 2012 uma conferência de imprensa no CERN anunciou ao mundo a observação, nos detektos ATLAS e CMS do LHC, de uma ressonância estreita com uma massa de cerca de 125 GeV, compatível com o bóson de Higgs. Desde essa altura tem-se vindo a verificar, com crescentes evidências experimentais, que esta nova partícula tem as propriedades esperadas, no quadro do Modelo Padrão, para o bóson de Higgs. Estava validado este estranho mecanismo da quebra espontânea de simetria.

Havia, contudo, uma “nuvem” no horizonte: o chamado problema dos neutrinos solares.

No Modelo Padrão, existem três férmions elementares neutros, de quiralidade esquerda e massa nula, os neutrinos. Cada um destes neutrinos está associado a uma das três famílias ou sabores — electrónico, muónico e tauónico — em que se organizam os férmions, e todos foram descobertos experimentalmente apenas na segunda metade do século XX: em 1956, o antineutrino do electrão, detektado por Clyde Cowan e Frederick Reines; em 1962, o neutrino do muão, identificado por Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger; e, por fim, em 2000, o neutrino do tau, observado pela experiência DONUT, no Fermilab.

O enigma surgia do facto de que o número de neutrinos electrónicos provenientes do Sol que chegava à Terra, era muito inferior — entre um terço e 60.% — ao valor previsto com base na potência solar observada.

A explicação para esta discrepância passou por admitir que os neutrinos dos diferentes sabores podem misturar-se e transformar-se uns nos outros à medida que viajam pelo espaço. Assim, um neutrino produzido no interior do Sol como electrónico pode chegar à Terra sob a forma de neutrino do muão ou do tau.

Este fenómeno, conhecido como oscilação de neutrinos, é explicado considerando que os estados de sabor não coincidem exactamente com os estados de massa: cada neutrino de um dado sabor é uma superposição quântica de três estados de massa distintos, que se propagam com velocidades ligeiramente diferentes — as subtilidades permitidas pela Mecânica Quântica.

Observações realizadas no final do século XX — nos observatórios de Kamiokande e Super-Kamiokande, no Japão, e no SNO, no Canadá — confirmaram de forma inequívoca esta previsão, demonstrando que pelo menos dois neutrinos possuem massa, ainda que extremamente pequena, constituindo a primeira evidência experimental de um fenómeno de Física para além do previsto pelo Modelo Padrão.

A convicção de que, afinal, há muito mais perguntas por responder — e Nova Física por descobrir — tem vindo a ser alicerçada desde o início deste século. É verdade que a evidência da existência de matéria sem interações eletromagnéticas, cuja natureza é desconhecida — a assim designada “matéria escura” —, numa proporção muito superior à matéria “visível”, formada pelas partículas do Modelo Padrão, não é de toda nova.

De facto, já em 1933, Fritz Zwicky concluíra que a massa associada às galáxias que formam o enxame de Coma devia ser cerca de duas ordens de grandeza superior à massa visível. E, desde a década de 1960, a quantidade de matéria escura presente no Universo começou a ser estimada com maior precisão, através de estudos sistemáticos de muitas galáxias, impulsionados pelos trabalhos de Vera Rubin.

Contudo, manteve-se, para muitos, a convicção de que a introdução de novos grupos de simetria e/ou de novos campos escalares — dando origem a novos bósons de Higgs — acabaria, mais cedo ou mais tarde, por conduzir à sua explicação. Mas, já na viragem para o presente século, medições muito mais precisas da radiação cósmica de fundo e da aceleração da expansão do Universo revelaram a presença de uma componente ainda mais enigmática: a chamada energia escura, responsável por cerca de setenta por cento do conteúdo energético do cosmos.

Estas descobertas vieram sublinhar que o Modelo Padrão, embora notavelmente bem-sucedido a descrever a maioria dos dados experimentais obtidos até ao momento, descreve apenas uma fração mínima do Universo. A maior parte da matéria e da energia que o compõem continua invisível e misteriosa — uma fronteira aberta à exploração científica das próximas décadas.

Essa exploração faz-se, e far-se-á, de modo cada vez mais integrado: combinando o desenvolvimento de novos e mais potentes aceleradores — entre os quais o FCC (*Future Circular Collider*) do CERN se destaca como um dos mais promissores — com medições de maior precisão das oscilações e da natureza dos neutrinos, bem como com a observação dos mensageiros cósmicos que nos chegam do Universo: raios cósmicos, raios gama e neutrinos com energias muito superiores às que alguma vez será possível produzir na Terra.

A observação astrofísica e cosmológica deverá também conhecer um enorme desenvolvimento, com um número crescente de experiências e observatórios de grande precisão. E, no meio de tudo isto, a gravitação entrou finalmente no domínio da física experimental de alta precisão, com a observação direta de ondas gravitacionais.

Assim, a Humanidade saiba conceder a devida prioridade à Ciência Fundamental, apoiando com convicção — e com o necessário financiamento — a comunidade científica e o desenvolvimento das novas infraestruturas de investigação, no espírito do convénio fundador do CERN, celebrado quando a realidade da destruição massiva da Segunda Guerra Mundial ainda estava bem presente no espírito de todos os europeus.

E Portugal?

Em 1986, graças à ação de José Mariano Gago, Portugal aderiu ao CERN. Nesse mesmo ano, foi criado o LIP — Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas — e estabelecido um comité conjunto Portugal-CERN, destinado a acompanhar as atividades da comunidade científica portuguesa. Desde então, passou a assegurar-se a realização periódica de concursos de financiamento para projetos científicos e tecnológicos desenvolvidos no CERN, ou reconhecidos por este. A ciência em Portugal era, então, em todos os indicadores, incipiente e com um grau de internacionalização quase nulo. As Universidades, na sua esmagadora maioria, não valorizavam nem promoviam as atividades de investigação. O LIP reunia apenas uma dezena de doutorados e estudantes, provenientes do Instituto Superior Técnico, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e da Universidade de Coimbra.

Hoje, o LIP reúne mais de duas centenas de pessoas, com polos em Lisboa, Coimbra e Minho, incluindo uma centena de doutorados integrados, e mantém uma participação ativa não só no CERN, mas também em grandes colaborações internacionais na ESA e em experiências de astropartículas e neutrinos. Conta ainda com grupos muito dinâmicos nas áreas da computação, instrumentação, física médica, fenomenologia e física teórica de partículas e nuclear.

Nas atividades com o CERN, existe agora uma comunidade alargada de cerca de 250 físicos experimentais e teóricos, engenheiros, técnicos e estudantes de pós-graduação de várias instituições portuguesas. A formação avançada de engenheiros, bem como o apoio à formação de professores do ensino secundário, as atividades com alunos de todos os graus de ensino e as iniciativas de divulgação científica dirigidas ao público em geral, têm igualmente beneficiado enormemente da participação de Portugal no CERN.

O panorama geral da ciência fundamental em Portugal é também, felizmente, muito diferente. Na sequência da adesão ao CERN, o país integrou várias organizações científicas internacionais — nomeadamente nas áreas da astrofísica, espaço, biologia, medicina, e ciência dos materiais — e conta hoje com um número de doutorados e uma atividade científica e uma participação em experiências e colaborações internacionais impensáveis há quarenta anos.

Contudo, o sistema científico português continua longe de estar plenamente estabilizado. Persistem instituições fragilizadas e carreiras científicas por consolidar, enquanto, a cada crise, regressam as vozes que proclamam que a Ciência Fundamental é um luxo caro para um país pequeno, de recursos limitados e com carências ainda significativas.

Que não se perca, porém, a lição de José Mariano Gago: só um país com um setor científico forte, estável e competitivo na ciência fundamental pode aspirar a ser um interveniente ativo no mundo de amanhã.

Agradecimentos

Agradeço aos Professores Pedro Abreu, Liliana Apolinário, Nuno Castro, Ruben Conceição, Jorge Romão e João Paulo Silva a leitura e comentários, que não invalidam a minha responsabilidade individual pelos eventuais erros e/ou omissões.



Mário Pimenta é Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa e investigador do Laboratório de Instrumentação e Física de Partículas (LIP). Foi diretor (1995-2015) e Presidente (2015-2024) do LIP. É o Representante de Portugal no Conselho do CERN (desde 2019). Obteve o doutoramento em Física em 1986 e a Agregação em 1992 pelo IST. Possui um vasto percurso de publicações, comunicações e atividade editorial, tendo sido ou é o investigador principal de numerosos projetos nas áreas da física de partículas e de astropartículas: DELPHI/LEP (1993-2001); EUSO (2001-2004); Pierre Auger (2005-2014); LATTES (2014-2019); SWGO (desde 2019). Foi responsável por vários contratos entre a ESA e o LIP. Organizou mais de 25 conferências e workshops internacionais. Orientou mais de 12 teses de doutoramento e várias teses de mestrado. Foi fundador e coordenador (2010-2023) da rede internacional de doutoramento IDPASC.