

Uma teoria de campos quânticos

Carolina T. Lopes¹ e J.P. Silva²

CFTP e Departamento de Física, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

¹carolina.teixeira.lopes@tecnico.ulisboa.pt

²jpsilva@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Descreve-se a total interdependência entre Mecânica Quântica e Física das Partículas, que culminou numa Teoria Quântica dos Campos (relativista). Apesar do sucesso ímpar desta descrição da Natureza, ainda há muito por descobrir. São reptos para a actual geração de jovens.

As Nações Unidas declararam 2025 o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas. Como afectou a Mecânica Quântica a área de Física de Partículas, e como foi afectada por ela? Talvez se perceba melhor a total interdependência, com quatro provocações:

1. Não haveria Mecânica Quântica sem Física de Partículas.
2. Não há Física de Partículas sem Mecânica Quântica.
3. Não existe nem Mecânica Quântica nem Física de Partículas!
4. Ainda está quase tudo por descobrir!

Se os últimos pontos deixaram o leitor surpreso, já lá chegaremos.

Pode dizer-se que a Mecânica Quântica (MQ) nasceu do confronto de uma intuição velha de séculos, gerada na análise de fenómenos à escala humana (macroscópicos), com os resultados experimentais observados em fenómenos à escala do átomo (microscópicos). A experiência de dupla fenda de Young e as interferências que descobre mostram que a luz se comporta como uma onda. Mas as explicações de Planck e Einstein, do espectro do corpo negro e do efeito fotoelétrico, respectivamente, mostram que a luz se comporta como uma partícula – o fóton. De igual modo, a experiência de J.J. Thomson mostra que o electrão se comporta como uma partícula, mas as experiências de Davisson/Germer e de G.P. Thomson/Reid revelam que o electrão se comporta como uma onda. Na nossa experiência macroscópica, uma onda-partícula (uma ondícula) não parece existir. No mundo microscópico abundam ondículas. Nas palavras de Feynman: “A nossa experiência, adquirida pela observação de algumas coisas (macroscópicas) é incompleta. (...) Vou contar-lhes como se comporta a Natureza. Se admitirem simplesmente que talvez se comporte dessa maneira, vão achá-la maravilhosa e encantadora.” [1]

Ora, o fóton e o electrão (e a sua antipartícula – o positrão) são os actores principais da primeira teoria completa em Física de Partículas (FP): a Electrodinâmica Quântica (QED). Portanto, não

haveria MQ sem FP!

Em Física de Partículas, dedicamo-nos ao estudo dos elementos mais fundamentais da matéria e suas interações. Numa definição comum, procura-se responder a duas perguntas: quais os constituintes fundamentais da matéria?; Quais as interações fundamentais que regem todo o seu comportamento? O que se sabe hoje sobre este assunto está condensado na Figura 1. Ora, os fenómenos à escala microscópica só são compreensíveis no contexto da MQ. Assim, não há FP sem MQ!

As ideias relatadas até aqui vêm em muitos livros de divulgação. Está na altura de alterar uma parte delas. A primeira dificuldade

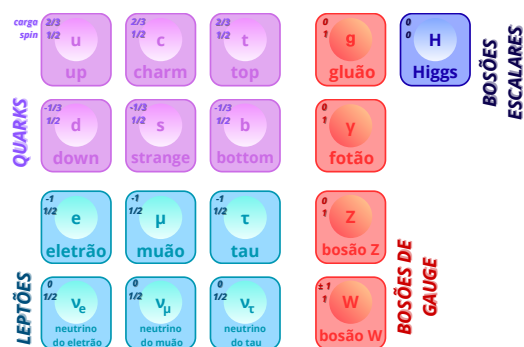


Figura 1 - Partículas detectadas até hoje. Adaptado de <http://commons.wikimedia.org/wiki/>

está logo na distinção entre partículas e interações. Em que se distingue conceptualmente a interação da matéria? Quando se pensava que a luz era só uma onda e o electrão só uma partícula, esta distinção era fácil. A distinção é mais subtil quando se aprende que o electrão é uma ondícula e o fóton também.

Como segunda dificuldade, a maioria dos fenómenos à escala das partículas elementares acarreta a relatividade restrita, pois envolve velocidades próximas da velocidade da luz (c) - velocidades ditas relativistas. A história da primeira teoria completa (quântica e relativista) de electrões e fótons é cheia de acidentes, erros espectaculares das mais brilhantes mentes, avanços e re-cuos¹. Os primeiros passos foram dados por Dirac, ao tentar encontrar uma equação quântica que descrevesse um electrão relativista. Um resultado inesperado dessa equação foi a pre-

¹Uma excelente exposição pode ser encontrada em [2].

visão da existência de uma partícula com massa igual e carga oposta às do electrão: o positrão. Esta é a primeira partícula inventada apenas para manter a consistência interna de uma equação². Só um ano depois de inventado é que o positrão foi descoberto nos raios cósmicos. Mas, interpretar a equação de Dirac impunha a ideia louca (é o termo)³ de que existe um mar infinito de electrões com energia negativa. Pior, a equação é de uma partícula, mas rapidamente se percebeu que juntar a MQ e a relatividade restrita obriga a teorias em que o número de partículas não é fixo. Elaboramos esta ideia na caixa 1.

A necessidade de uma teoria quântica de campos

Adaptado da referência [4]

Para compreender melhor esta ideia, consideremos uma experiência de dispersão de uma partícula num potencial, isto é, o processo pelo qual a trajectória de uma partícula é alterada devido à interacção com o potencial. Quando a energia é baixa relativamente à massa da partícula, os efeitos relativistas são desprezáveis e a mecânica quântica descreve bem o sistema: existe apenas uma partícula antes e depois da dispersão. A energias mais elevadas, no entanto, a situação muda: passa a existir energia suficiente para criar um par partícula-antipartícula. Assim, um problema que seria de dois corpos torna-se um problema de muitas partículas.

Um exemplo mais fundamental é o caso de uma partícula confinada numa caixa. Na mecânica quântica não relativista, é possível localizar a partícula numa região arbitrariamente pequena, aumentando indefinidamente a incerteza do momento. Porém, quando se consideram efeitos relativistas, esta descrição deixa de ser válida se a caixa for demasiado pequena. Para um electrão confinado numa caixa de lado L , a incerteza no momento é aproximadamente $\hbar/L$, traduzindo-se numa incerteza na energia de $\hbar c/L$. Quando $L \lesssim \hbar/m_e c$, a energia é suficiente para criar pares electrão-positrão, tornando o número de partículas indeterminado [4] (figura 2).

Assim, na mecânica quântica relativista não é possível falar de um problema com apenas uma ou um número finito de partículas, o que nos conduz à necessidade de uma teoria quântica de

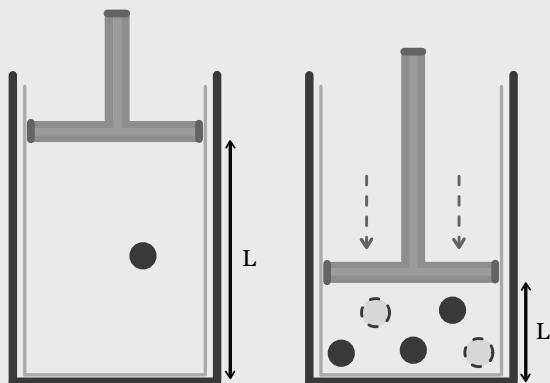


Figura 2 - À esquerda está representado o caso em que $L \gg \hbar/m_e c$; à direita, o caso em que $L \lesssim \hbar/m_e c$, em que o número de electrões (representados a cheio) e de positrões (representados a tracejado) se torna indeterminado. Inspirado em [4].

²A ideia de que uma equação em Física tem uma força própria, que extravasa em muito o fenómeno e a autoria que lhe deu origem, é brilhantemente relatada em [3].

³É curioso que uma ideia louca, mas errada (a ideia do mar de electrões), dá origem a uma ideia louca, mas certa (a existência do positrão). Muitos de nós gostamos de Física. De Dirac pode dizer-se que a Física gostava dele.

campos.

O problema de conjugar MQ e relatividade restrita só foi resolvido no âmbito de uma teoria quântica de campos, de que a QED referida acima foi o primeiro exemplo. A ideia principal é que a cada ondícula corresponde um campo quântico que permeia todo o espaço. Assim, haverá por toda a parte um campo de electrão. O que é então um electrão? Um electrão é uma excitação (uma espécie de oscilação) desse campo de electrão que permeia todo o espaço. Talvez numa melhor nomenclatura se designasse por campo de electrão/positrão, dado que uma outra excitação desse campo poderá ser num positrão. Neste formalismo, há uma simetria total, dita simetria da carga-paridade (CP), entre electrão e positrão⁴. As ondículas da Figura 1 (e as suas anti-ondículas) são de facto excitações de campos quânticos [5]. Numa melhor terminologia, chamar-lhes-emos “quanta”. Se o espaço está carregado de campos, será vazio? Não! O vácuo de uma teoria quântica de campos é mais análogo a água a ferver do que a vazio. Tal como se formam e desaparecem constantemente bolhas de vapor em água a ferver, assim se formam e desaparecem constantemente pares electrão/positrão no vácuo. Assim, o número de partículas não é fixo e uma teoria quântica relativista de uma partícula é coisa que não existe. E, este constante borbulhar, tem consequências mensuráveis.

Agora percebemos a provocação do início deste artigo. Não há Física de Partículas! Há Física de Campos Quânticos. Podemos falar de partículas nas ocasiões em que as oscilações dos campos quânticos se comportam como tal. Mas, sendo “quanta”, noutras alturas comportam-se como ondas e, pior, noutras ocasiões temos que pensar nelas com o borbulhar de campos que as acompanha. Do ponto de vista do mundo macroscópico, isto pode parecer muito estranho. Mas as equações precisas que estão na base deste modelo tomam conta de tudo. E permitem fazer previsões que se adequam a experiências com uma precisão incrível de uma parte em 10^{12} (para referência, há menos de 10^{10} humanos).

Ao nível mais fundamental, não há regras que se apliquem exclusivamente a ondículas, ignorando o constante borbulhar dos campos que lhes está associado. Nesse sentido, não há Mecânica Quântica! O mundo é quântico e relativista; a Natureza é dos Campos Quânticos. Então, temos de esquecer a MQ? Não! Da mesma forma que não esquecemos a Mecânica de Newton e a usamos para construir prédios. Nos problemas em que as flutuações de energia são muito inferiores à energia necessária para criar pares partícula/antipartícula, podemos pensar em MQ. Tal como, para velocidades muito menores do que c e para distâncias macroscópicas, podemos pensar na Mecânica de Newton.

Esclarecidas estas questões, voltemos à terminologia habitual de FP e a uma análise da Figura 1.

Os constituintes fundamentais da matéria são os quarks com carga positiva (+2/3), os quarks com carga negativa (-1/3), os léptões carregados (com carga -1, em unidades de carga do positrão), e os neutrinos (sem carga eléctrica). Para as três primeiras classes, há as correspondentes antipartículas. No caso

⁴No Modelo Padrão, mencionado abaixo, a interacção entre campos quebra explicitamente esta simetria.

dos neutrinos está em aberto uma questão fundamental: os neutrinos serão as suas próprias antipartículas?⁵ No caso das interacções, os quanta são o fóton (γ) para a interacção electro-magnética, os bósons W^+ , W^- e Z para a interacção fraca, e os glúons (g) para a interacção forte.

Apesar de todos serem quanta em campos quânticos, há de facto uma diferença ao nível da teoria entre matéria e interacções. Os campos de matéria são postos na teoria de modo a coincidir com o observado na experiência. Pelo contrário, os campos das interacções podem ser “inventados” usando princípios de simetria local, dita de “gauge”. Se essa simetria fosse exacta, nenhuma das partículas teria massa. Para dar massa às partículas, existe um novo campo: o campo de Higgs. O quanta correspondente é o bóson de Higgs. Previsto no contexto de uma equação em 1964, foi descoberto em 2012 no CERN (Organização Europeia para a Investigação Nuclear), providenciando o Prémio Nobel aos seus proponentes.

O modelo da Física dos processos fundamentais que aqui descrevemos tem um tal sucesso em precisão e na diversidade dos fenómenos que explica, que é conhecido como Modelo Padrão. Os estudantes levam cerca de 16 anos de escolaridade a perceber os detalhes do que aqui apresentamos. Mas vale a pena. É, para muitos de nós, o pináculo do conhecimento humano. Está reservada uma última surpresa. Apesar do seu notável sucesso, sabemos com bastante segurança que o Modelo Padrão tem de ser substituído por algo mais abrangente! Em breves palavras, este modelo não prevê os valores das massas, não explica porque há três famílias de fermiões (léptões e quarks) e não diz se há mais do que um campo de Higgs. Para além disso, não existe ainda confirmação experimental sobre violação de simetria CP nos neutrinos ou sobre se estes são ou não as suas próprias antipartículas.

Há centenas de experiências no mundo a investigar estas e outras questões, havendo sempre a possibilidade de que, como aconteceu repetidamente no passado, estas venham a descobrir alguma partícula ou fenómeno completamente novos. Novas experiências estão constantemente a ser propostas, entre as quais se destacam as designadas por FCC-ee (FCC-hh), um acelerador de electrões e positrões (protão-protão), proposto para iniciar operações por volta de 2045 (2070s). Estas questões levar-nos-ão até ao final do século e já só serão dirimidas pela juventude que agora inicia a sua carreira.

Mas, os mais espectaculares falhanços do Modelo Padrão surgem na interface com a Cosmologia. Após o Big-Bang, à medida que o Universo arrefece, o campo de Higgs provoca uma transição de fase, de uma época em que as partículas não têm massa, para uma época em que as partículas têm massa. Há também uma violação da simetria CP e processos que violam uma outra simetria (dita bariónica). Embora estas três condições sejam necessárias para explicar o excesso de matéria sobre antimatéria, tal não ocorre no Modelo Padrão a uma taxa suficiente para explicar os resultados experimentais. É preciso algo mais. Pior do que tudo, o Modelo Padrão explica apenas cerca de 15.% do conteúdo de matéria do Universo. Os outros 85.%, que

sabemos existir por uma grande variedade de resultados experimentais, são conhecidos por matéria escura. Desta sabemos muito pouco, havendo, também aqui, centenas de experiências a decorrer e planeadas com o intuito de determinar a natureza da matéria escura⁶.

As pistas destes últimos parágrafos darão provavelmente os Prémios Nobel do futuro. Nada nos daria maior prazer do que ver tal prémio ser atribuído a alguém que agora leia este texto.

Agradecimentos

Agradecimentos são devidos a Ana Armada, Augusto Barroso e André Milagre por uma leitura atenta e sugestões.

Referências

- [1] R. P. Feynman, “O Que É Uma Lei Física?”, Gradiva, Lisboa (1989). Do original “Your experience with things that you have seen before is incomplete... I am going to tell you what nature behaves like. If you simply admit that maybe she does behave like this, you will find her a delightful, entrancing thing.”
- [2] S. S. Schweber, “QED and the men who made it”, Princeton University Press, Princeton (1994).
- [3] E. P. Wigner, “The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences”, Communications on Pure and Applied Mathematics Vol. XIII, p. 001 (1960).
- [4] M. Luke, “PHY2403F Lecture Notes” (https://luke.physics.utoronto.ca/documents/418/PHY2403_current.pdf). Ver também, S. Coleman, “Quantum Field Theory: Lectures of Sidney Coleman”, World Scientific (2018).
- [5] A este respeito, vale a pena ver o vídeo MinutePhysics, “Theory of Everything: What is Matter?” (<https://www.youtube.com/watch?v=Fxeb3Pc4PA4>).



Carolina T. Lopes é Licenciada e actual aluna do Mestrado em Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, com trabalho teórico em Física de Partículas. Fez parte do Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico e da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico onde foi Coordenadora da Redacção. Nos tempos livres, dedica-se ao desenho, sendo da sua autoria as ilustrações que acompanham este artigo.



João P. Silva é doutorado em Física pela Universidade de Carnegie Mellon, especializado em Física de Partículas Teórica. Foi *Fullbright fellow* na Universidade de Stanford, e é actualmente Professor Catedrático no Departamento de Física e membro do Centro de Física Teórica de Partículas do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. É autor de cerca de 100 artigos e de 4 livros de Física, de carácter pedagógico e de divulgação. Aprecia gelados italianos artesanais.

⁵Se a leitora resolver este problema, será candidata ao Prémio Nobel.

⁶E há ainda a energia escura. Mas isso é tema para outro artigo.