GAZETA DE física

Para os físicos e amigos da física.
WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA / VOL. 48 - N.º 3 / Dezembro / 2025 / Periodicidade: 3 x Ano / €5,00



# ANO INTERNACIONAL DA Ciência e Tecnologia Quânticas 2025

sp física
SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

# Índice

1 **Editorial**

artigo geral
2 **A descoberta do mundo quântico** e a "construção" da Física de Partículas
Mário Pimenta

artigo geral
7 **Uma teoria de** campos quânticos
Carolina T. Lopes, J.P. Silva

artigo geral
10 **A Física Quântica** na Astrofísica e no Cosmos
Carlos A. R. Herdeiro

artigo geral
14 **Próxima paragem:** Gravitação Quântica
Orfeu Bertolami, Ricardo Schiappa

artigo geral
22 **Como a Física Quântica** impulsiona a investigação em Fusão e Plasmas Extremos
Marija Vranic, Bruno Gonçalves

artigo geral
26 **Materiais quânticos:** como a Física da Matéria Condensada transforma o mundo
Bruno Amorim, Eduardo V. Castro, João V. Lopes, Vítor M. Pereira, Pedro Ribeiro

artigo geral
32 **A Ótica e a Física Atómica** na revolução das Tecnologias Quânticas
José Carlos Viana Gomes

artigo geral
39 **Luz e coerência:** entre a tecnologia laser e a Ciência Quântica
Ariel Guerreiro

artigo geral
42 **O papel da Física Quântica** no desenvolvimento da Metrologia e nos padrões do Sistema Internacional de Unidades
Isabel Godinho, Carlos Pires, Olivier Pellegrino, Vitor Cabral

artigo geral
47 **Do Átomo ao Algoritmo:** 100 anos de ideias que mudaram o mundo
Teresa Peña

sala de professores
56 **Deus joga dados!** Fotónica e polarização quântica para todos
Horácio Fernandes, Marisa Correia, Emmanuel Zambrini Cruzeiro, Ângela Costa

vamos experimentar
61 **Sabes o que é** matéria escura?
Catarina Cosme, Constança Providência, Rita Wolters

64 **Notícias**

**Facebook: https://www.facebook.com/Gazeta.de.Fisica**
**Instagram: https://www.instagram.com/gazetadefisica**

**CRÉDITOS**
**Imagem da capa: Logo do Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas 2025**

# Editorial



"Foi bonita a festa, pá!"

O Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas, declarado pela Organização das Nações Unidas para 2025, suscitou a organização de mais de 1300 eventos, em mais de 80 países, em todos os continentes. Foi também uma edição especial do Dia Mundial Quântico, estendida ao longo de 2025, num ano em que todos os dias foram quânticos! Assim, este número da Gazeta de Física é uma edição especial dedicada à Mecânica Quântica, e como, nos últimos 100 anos, ela transformou a Física, as Tecnologias, e a Sociedade em que vivemos. Ela continua a transformar, a fascinar, e a motivar mais investigação e inovação.

Em Portugal, o Ano Internacional da Ciência e Tecnologias Quânticas 2025 foi assinalado por universidades, escolas, institutos e pela comissão nacional IYQ2025, com ações de divulgação, formação e investigação em vários pontos do país.

De entre os muitos eventos realizados, refira-se, por exemplo, o Quantum Day@PT na Universidade do Porto, o encontro "A Segunda Revolução Quântica: ciência fundamental e novas tecnologias" na Universidade do Minho, a exposição "QuantumLand" no Departamento de Física da Universidade de Coimbra, a tertúlia/ sessão pública associada à exposição no RÓMULO – Centro Ciência Viva da Universidade de Coimbra, as palestras ao longo de 2025 do Instituto Superior Técnico e Universidade de Lisboa, as atividades da Universidade de Aveiro com workshops e palestras sobre computação e criptografia quânticas e muitas outras atividades. Ao longo do ano de 2025, foram também desenvolvidas atividades direcionadas especificamente para as escolas, nomeadamente palestras e visitas de docentes e investigadores das diversas universidades a escolas secundárias, a academia quântica da Universidade Nova de Lisboa para alunos do ensino secundário, e as atividades promovidas pela Sociedade Portuguesa de Física e pela Comissão Nacional CiTeQ (ligada ao IYQ2025), integrando a agenda oficial "IYQ2025 Portugal".

Destacamos ainda o evento Quantum@School em Português, que juntou online mais de 2000 alunos do secundário e respetivos professores, de Portugal, Brasil, Angola, Cabo Verde, Guiné Bissau, Moçambique, S. Tomé e Príncipe, e Timor-Leste, organizado pela REQ – Rede de Escolas Quânticas do PQI – Portuguese Quantum Institute, para divulgar a Física Quântica, e entregar os prémios do concurso Quantum@Video em língua portuguesa, onde equipas de alunos do secundário concorrem com um vídeo de 3 minutos a explicar um aspeto da ciência quântica à sua escolha.

Em 2025, foi também lançada a nível global a iniciativa Quantum Cities, tendo havido mais de 30 cidades quânticas em Portugal!

Terminamos com um agradecimento especial aos autores que contribuíram com os seus textos para esta edição e aos co-editores Francisco Macedo e Olivier Pellegrino, para que este número da Gazeta fosse possível.

Findo o Ano Quântico, as celebrações continuam anualmente à escala global no Dia Mundial Quântico, a 14 de Abril... e arredores! Pois, todos os dias são quânticos!

Boas leituras
Yasser Omar, Bernardo Almeida




## Ficha Técnica

**Estatuto Editorial**
http://www.spf.pt/gazeta/editorial

**Propriedade | Sede | Redacção | Editor**
Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 – 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

**Director**
Bernardo Almeida

**Editores**
Francisco Macedo
Olivier Pellegrino

**Secretariado**
Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

**Comissão Editorial**
Pedro Abreu - Presidente da SPF
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular
Ana Rita Figueira - Física Médica
Augusto Fitas - Grupo História da Física
Deolinda Campos - Educação
Carlos Silva - Física dos Plasmas
Constança Providência - Física Nuclear
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada
José Marques - Física Atómica e Molecular
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia
Manuel Marques - Óptica e Laser
Nuno Castro - Física Partículas
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica
Sofia Andringa - Física Partículas

**Correspondentes**
Eduardo Castro - Delegação Norte
Cristina Monteiro - Delegação Centro
Jorge Sampaio - Delegação Sul e Ilhas

***Design* / Produção Gráfica**
Double Dot Consulting
geral@doubledot.pt

**Impressão**
ACD Print
Rua Marquesa d'Alorna Nº12-A, 2620-271 Ramada – Odivelas
www.acdprint.pt | geral@acdprint.pt

**NIPC** 501094628 **Registo ERC** 110856
**ISSN** 0396-3561 **Depósito Legal** 51419/91
**Tiragem** 1 000 Ex.

**Periodicidade:** 3 x Ano
As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

**Preço N.º Avulso** 5,00 € (inclui I.V.A.)
**Assinatura Anual** 15,00 € (inclui I.V.A.)
Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

2
artigo geral
VOL. 48 - N. 3

# 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 fotão. O fotão 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 fotões —, 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 caraterística 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 espetros de emissão e absorção de diferentes elementos, a começar pelo Hidrogénio, relevou o seu caráter discreto e único para cada elemento, tal como os códigos de barras que se utilizam atualmente na identificação dos produtos num supermercado. Este caráter 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, caraterizadas 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 fotões 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 fotões 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 espetros atómicos. 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 fermiões — seguem a estatística de Fermi-Dirac, em que só pode existir uma partícula por cada estado quântico.

O fotão tem spin 1 e é, portanto, um bosão; o eletrão tem spin ½ e é, consequentemente, um fermião. Os bosões são, assim, as partículas associadas aos campos de interação, enquanto os fermiões correspondem à "matéria".

Até hoje, foram descobertos 12 fermiões e 13 bosões elementares. Os fermiões dividem-se em dois grandes grupos — os leptões (sem carga forte) e os quarks (com carga forte) — cada uma com três famílias, que são réplicas da primeira mas com massas diferentes. Dos bosões, oito, os gluões, estão associados à interação nuclear forte, quatro, o fotão, o Z e os $W^+/W^-$, às interações eletrofracas, e o último é o famoso bosão 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 fotão, o eletrão, o protão 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 rastos deixados por raios cósmicos numa câmara de nuvens imersa num campo magnético, observou uma trajetória compatível com uma partícula de massa idêntica à do eletrão, mas com carga elétrica positiva: um eletrão positivo, a que se deu o nome de positrão. 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.

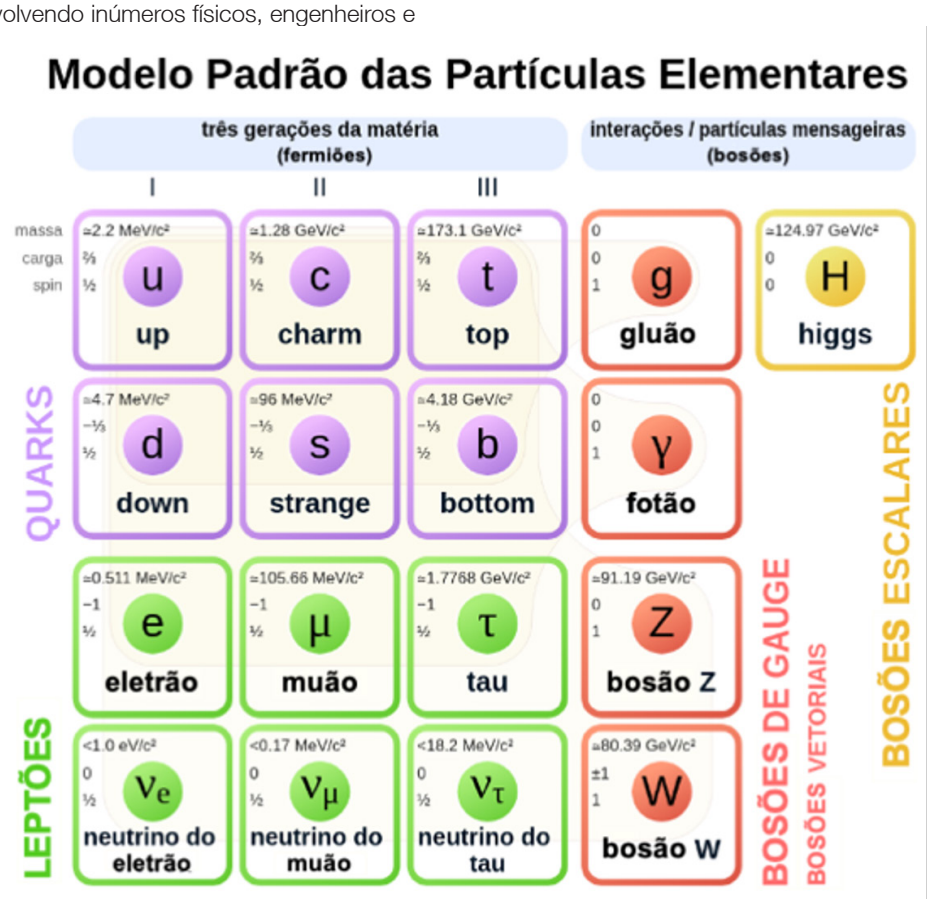



Figura 1

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 espetro 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 interacções 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 fermiões sem massa, à helicidade, isto é, à projeção do spin do fermião 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 fermião diz-se direito; se estiver orientado no sentido oposto, a helicidade é negativa e o fermião diz-se esquerdo. Na teoria revista das interacções fracas carregadas, estas ocorrem apenas entre partículas esquerdas e são mediadas por bosões com massa e carga elétrica — os bosões 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 gluões, 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 bosões vetoriais carregados, W+ e W–, e aos neutros, Z e $\gamma$ (fotão). Os três primeiros, que têm massa, estão associados às interações fracas, enquanto o fotão é o mediador da interação eletromagnética. Os novos bosões 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 espetro 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 fermiões como os bosões — que constituem a base do Modelo Padrão, com excepção do fotão e dos gluões e, eventualmente, de um dos neutrinos, possuem todas massas não nulas. O espetro 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 (bosão de spin 0), de carga elétrica nula, mas massa não nula. Tendo sido Peter Higgs o primeiro a referir explicitamente o seu aparecimento, a partícula ficou conhecida como o bosão 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 atual 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 detetores ATLAS e CMS do LHC, de uma ressonância estreita com uma massa de cerca de 125 GeV, compatível com o bosão 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 bosão 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 fermiões elementares neutros, de quiralidade esquerda e massa nula, os neutrinos. Cada um destes neutrinos está associado a uma das três famílias ou sabores — eletrónico, muónico e tauónico — em que se organizam os fermiões, e todos foram descobertos experimentalmente apenas na segunda metade do século XX: em 1956, o antineutrino do eletrão, detetado 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 eletrónicos 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 eletrónico 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 exatamente 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 subtilezas 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 todo 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 bosões 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.

7
artigo geral
VOL. 48 - N. 3

# Uma teoria de campos quânticos

Carolina T. Lopes[1] e J.P. Silva[2]

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

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

[2]jpsilva@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 fotoeléctrico, respectivamente, mostram que a luz se comporta como uma partícula – o fotão. 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 fotão 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 interacções. Numa definição comum, procura-se responder a duas perguntas: quais os constituintes fundamentais da matéria?; Quais as interacções 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

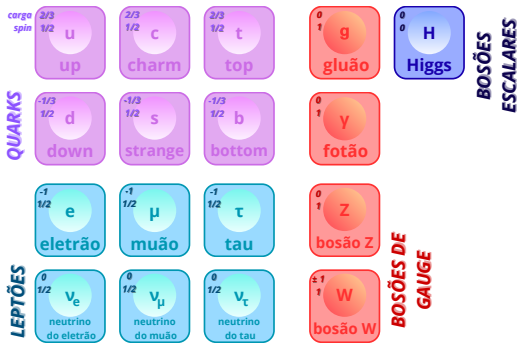



Figura 1 - Partículas detectadas até hoje. Adaptado de http://commons.wikimedia.org/wiki/

está logo na distinção entre partículas e interacções. Em que se distingue conceptualmente a interacção 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 fotão 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 fotões é cheia de acidentes, erros espectaculares das mais brilhantes mentes, avanços e recuos[1]. 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-

[1]Uma 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 equação[2]. 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 campos.

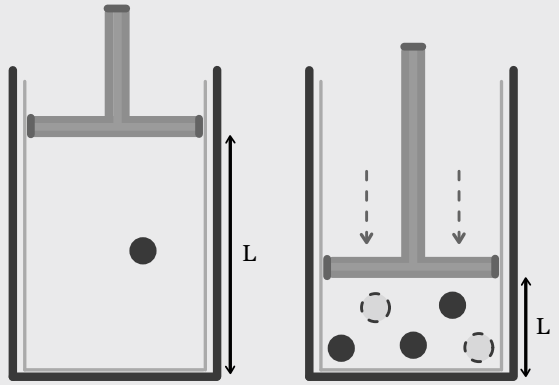



Figura 2 - À esquerda está representado o caso em que $L \gg \hbar/m_e c$; à direita, o caso em que $L \ll \hbar/m_e c$, em que o número de electrões (representados a cheio) e de positrões (representados a tracejado) se torna indeterminado. Inspirado em [4].

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 positrão[4]. 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 leptões 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

[2]A 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].
[3]É 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.

[4]No 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 fotão (γ) para a interacção electromagnética, os bosões W+,W- e Z para a interacção fraca, e os gluões (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 bosão 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 (leptões 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 escura[6].

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.

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

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

10
artigo geral
VOL. 48 - N. 3

# A Física Quântica
## na Astrofísica e no Cosmos

Carlos A. R. Herdeiro

Dept. Matemática e Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA), Universidade de Aveiro

herdeiro@ua.pt

*A Física Quântica descreve o microcosmos — o mundo das partículas, dos átomos e das forças fundamentais. A Astrofísica e a Cosmologia descrevem o macrocosmos — o Universo das estrelas, das galáxias e do espaço-tempo. Uma das inferências mais fascinantes da ciência do século XX foi que a Física do infinitamente pequeno desempenha um papel decisivo na dinâmica e nas propriedades do infinitamente grande. É a Quântica que explica o brilho e a longevidade das estrelas, a origem dos elementos e até a evolução do próprio Universo. E alguns dos maiores mistérios que hoje persistem sobre o cosmos — desde a matéria escura à natureza do espaço-tempo — residem, precisamente, no domínio quântico.*

### 1. Duas revoluções que mudaram o mundo

No virar do século XX, duas teorias emergiram quase simultaneamente, cada uma derrubando os pilares clássicos da Física. Em 1900, Max Planck propôs que a energia do campo eletromagnético não é contínua, mas quantizada [1]. Foi a primeira cena de uma peça dramática que levaria ao estabelecimento da Mecânica Quântica (MQ), há 100 anos atrás. Cinco [2] e quinze [3] anos depois da observação de Planck, Albert Einstein apresentou as suas teorias da Relatividade Restrita e Relatividade Geral (RG), respetivamente, onde o espaço e o tempo deixaram de ser um palco passivo para se tornarem atores dinâmicos. Estes atores e a sua dinâmica explicam a gravidade, dando-lhe novas facetas e tornando a RG fundamental para o estudo do Universo.

Estas duas revoluções nasceram de problemas distintos — o problema do corpo negro e a questão do éter — mas acabaram por se entrelaçar profundamente. A RG descreve o Cosmos macroscópico: o movimento das galáxias, o colapso das estrelas, a expansão do Universo. A MQ domina o micromundo: átomos, partículas e campos fundamentais. A Astrofísica moderna vive precisamente na sobreposição entre ambas. A luz das estrelas, a origem da energia solar, a formação de buracos negros e até a radiação cósmica de fundo são fenómenos cuja compreensão exige a união — às vezes tensa, outras vezes harmoniosa — destas duas linguagens da Natureza.

### 2. A Quântica entra na Astrofísica

O primeiro elo entre a MQ e a Astrofísica reside na observação mais elementar das propriedades dos astros: as estrelas emitem luz. Este elo foi revelado pela espectroscopia, criada muito antes da MQ por Joseph von Fraunhofer, no início do século XIX, que revelou a existência de linhas misteriosas nos espectros solares [4]. Na década de 1910, dois pioneiros da MQ, Niels Bohr [5] e Arnold Sommerfeld [6], perceberam que essas linhas eram as assinaturas quânticas dos átomos que compõem as estrelas. Cada risca no espectro é um testemunho da quantização da energia atómica. A astrofísica moderna nasceu, assim, de uma leitura quântica da luz.

O segundo passo foi compreender como se gera essa luz. O enigma da energia estelar intrigou gerações. Hermann von Helmholtz [7] e Lord Kelvin [8] propuseram, no século XIX, que as estrelas brilhassem pela contração gravitacional — mas isso só explicaria algumas dezenas de milhões de anos de vida, em claro conflito com a geologia e a biologia.

Foi a MQ, e o seu uso na Física Nuclear, que permitiu resolver o enigma. George Gamow mostrou que partículas podiam atravessar barreiras de potencial por efeito túnel [9] e Hans Bethe aplicou esse princípio para descrever a fusão nuclear como fonte da energia estelar [10]. Os núcleos atómicos podiam fundir-se apesar da repulsão coulombiana, porque as partículas, regidas pelo princípio de incerteza de Heisenberg [11], podem penetrar barreiras de potencial aparentemente intransponíveis. Assim nasceu a astrofísica nuclear.

### 3. A morte quântica das estrelas

A mesma física que "faz" brilhar as estrelas explica também a sua morte. Quando o combustível nuclear se esgota, a pressão exercida pela luz, gerada no interior da estrela, na sua fuga até à superfície, cessa. Resta apenas o peso da própria estrela que a quer fazer implodir — a gravidade torna-se o carrasco final da estrela. O colapso começa, mas a MQ pode intervir uma vez mais, sob a forma do princípio de exclusão de Pauli [12]. Wolfgang Pauli, em 1925, impôs uma regra aparentemente estranha, mas crucial para explicar a estrutura dos átomos: dois eletrões não podem ocupar o mesmo estado quântico. Ora, quando milhões de eletrões são comprimidos num volume minúsculo, como quando uma estrela implode, essa regra transforma-se numa força colossal — a pressão de degenerescência eletrónica. É ela que sustém as anãs brancas, os cadáveres das estrelas de baixa massa.

Subrahmanyan Chandrasekhar, com apenas 19 anos, calculou em 1930 que essa força tem limites [13]. Acima de 1,4 massas solares, a degenerescência eletrónica não basta para equilibrar a gravidade. Surge então uma nova classe de objetos: as estrelas de neutrões, sustentadas pela degenerescência de neutrões que resultam da "fusão" de protões com eletrões. O centro sobrevivente da estrela torna-se um autêntico núcleo atómico gigante. Esta é uma escala onde a MQ e a RG já não se podem ignorar mutuamente.

Mas mesmo esta pressão não consegue contrariar a gravidade se a estrela inicial for demasiado massiva. Estima-se que acima de um valor da massa (deste núcleo) entre 2 e 3 massas solares, a estrela de neutrões não é viável e o que resta da estrela colapsa para um objeto ainda mais misterioso: um buraco negro. O valor preciso ainda se encontra em debate, sendo estas estimativas resultado do trabalho de Richard Tolman [14], Robert Oppenheimer e George Volkoff [15].

Entre o colapso e a resistência, a Natureza revela-se minimalista: três possíveis destinos estelares — anã branca, estrela de neutrões ou buraco negro — todos determinados por leis quânticas.

**4. O misterioso lado quântico dos buracos negros**

O terceiro dos possíveis destinos de uma estrela — o buraco negro — leva a relação entre a RG e a MQ a um extremo. Sabemos hoje, por observações de raios X, ondas rádio, órbitas estelares, ondas gravitacionais e até imagiologia direta, que os buracos negros são extremamente abundantes no Universo. Teoricamente, os buracos negros são descritos pela RG, que é uma teoria clássica (isto é, não quântica). E de acordo com a RG, são mesmo negros: absorvem matéria/energia e nunca a libertam. Por isso só podem crescer em tamanho. Contudo, Stephen Hawking demonstrou, em 1974 [16], que a descrição quântica dos buracos negros prevê que estes sejam apenas "cinzentos": emitem radiação térmica e afinal os buracos negros podem decrescer, evaporando-se.

A ideia foi revolucionária, no âmbito da gravitação. Conceptualmente, o vácuo quântico não é vazio — é um mar em ebulição de partículas virtuais que se criam e se destroem incessantemente. Próximo do horizonte, uma dessas partículas pode escapar, levando energia para o exterior, enquanto a sua parceira antipartícula cai no buraco negro. O resultado é uma radiação com temperatura inversamente proporcional à massa do buraco negro. Por isso os buracos negros mais pequenos são os mais quentes.

Essa descoberta originou um paradoxo profundo. Na sua descrição clássica, os buracos negros aparentam não preservar a maior parte da informação do que os criou, sendo apenas descritos pela sua massa e pela sua rotação (e talvez a carga elétrica, que se pensa não ser muito relevante nos buracos negros astrofísicos). Mas talvez informação adicional estivesse de alguma forma escondida no buraco negro, em propriedades mais subtis. Contudo, se o buraco negro se evapora em radiação térmica, que tem a propriedade de não transportar essa informação, parece mesmo existir uma perda de informação. O resultante "paradoxo da informação" [17] tornou-se uma das maiores questões da física teórica, criando tensão entre uma propriedade fundamental da MQ (a unitariedade, ou conservação de probabilidade) e o destino dos buracos negros previstos pela RG. Esta observação, ainda não totalmente resolvida, mostrou que o encontro entre a Quântica e a Gravidade, previsto por Einstein e Planck, ainda aguarda uma teoria completa — a tão procurada gravitação quântica.

**5. Ecos quânticos no Universo observável**

Os buracos negros são um contexto astrofísico extremo, onde o casamento entre a RG e a MQ, ainda incompleto, será fundamental. Um outro exemplo será o universo primordial: compreender o chamado Big Bang implica um melhor entendimento da gravitação quântica, que ainda não temos. Mas mesmo sem ela, existem fenómenos quânticos no contexto astrofísico ou cosmológico que podemos compreender. De facto, a Astrofísica e Cosmologia modernas, são hoje um laboratório natural de fenómenos quânticos em larga escala. Eis alguns exemplos:

(a) Neutrinos cósmicos. Temos presentemente detetores subterrâneos, como o Super-Kamiokande e o IceCube, que captam estas partículas quase sem massa e que atravessam planetas inteiros por interagir muito fracamente com a matéria. De acordo com o modelo padrão da física de partículas há 3 "sabores" de neutrinos. E um neutrino pode oscilar entre estes sabores. As oscilações de neutrinos foram previstas teoricamente por Bruno Pontecorvo [18] e, mais tarde, por Ziro Maki, Masami Nakagawa e Shoichi Sakata [19], e foram observadas pela primeira vez na década de 1990 pelo Super-Kamiokande [20] e confirmadas pelo observatório SNO – *Sudbury Neutrino Observatory*, no Canadá [21]. Este fenómeno puramente quântico, em que os neutrinos mudam de 'sabor' durante a sua propagação, demonstra que têm massa e que a Quântica continua a governar o cosmos em escalas astronómicas.

(b) Matéria escura e campos quânticos. A matéria escura continua um dos grandes mistérios da física moderna e do Universo, desde os primeiros estudos de Jan Oort [22] e Fritz Zwicky [23] que a sugeriram na década de 1930. Entre as hipóteses mais estudadas para a matéria escura estão partículas quânticas ultraleves [24], como os axiões ou os bosões escalares. Estes campos, se existirem, podem formar estruturas cósmicas ou astrofísicas coerentes, desde halos galácticos até "estrelas de bosões" [25,26] e podem deixar assinaturas distintas, por exemplo, em ondas gravitacionais [27].

(c) Formação de estruturas no Universo. De acordo com o modelo cosmológico padrão, as estruturas de larga escala do Universo, desde galáxias a enxames de galáxias, nasceram de flutuações quânticas. No Universo primordial, terá havido uma fase de expansão muito rápida (exponencial), denominada inflação, energizada por um campo (mal compreendido) denominado campo inflatónico [28]. Pequenas perturbações do campo inflatónico, de origem quântica, amplificadas pela expansão exponencial, são as sementes de todas as galáxias [29,30,31,32]. As impressões digitais destas sementes ficaram gravadas no fundo cósmico de micro-ondas previsto pela teoria do Big Bang e observado pela primeira vez em 1965 por Arno Penzias e Robert Wilson [33]. As pequenas perturbações (ou anisotropias) foram medidas pela primeira vez pelo satélite COBE na década de 1990 [34] e depois com maior precisão pelo satélite Planck

[35], nome bem apropriado, dada a origem quântica destas anisotropias. Reproduzir este espectro de perturbações é um teste fundamental para qualquer modelo cosmológico, hoje em dia.

(d) Astrofísica de alta energia. Num artigo clássico sobre eletrodinâmica quântica, Julian Schwinger deduzia que existe um limite crítico para um campo elétrico (ou magnético) constante, a partir do qual o vácuo se torna instável e se torna favorável a criação de pares eletrão-positrão, tendo deduzido a taxa a que isso acontece [36]. Ora, sabemos hoje que em alguns tipos de estrelas de neutrões, nomeadamente pulsares e magnetars, os campos elétricos e magnéticos atingem valores próximos dos limites quânticos do vácuo definidos por Schwinger. Nestas condições, pares eletrão-positrão podem ser criados espontaneamente, e processos de radiação são dominados pela física quântica de campos [37,38,39]. A astrofísica de alta energia tornou-se, assim, indispensável para compreender alguns sistemas astrofísicos identificados.

(e) Nucleossíntese primordial, estelar e em eventos cataclísmicos. A própria origem dos elementos químicos é um testemunho direto da física quântica. Nos primeiros minutos após o Big Bang, as reações nucleares entre protões e neutrões — regidas pela MQ e pela força nuclear fraca — formaram o hélio e os elementos leves [40]. No interior das estrelas, a fusão quântica de núcleos constrói os elementos até ao ferro [41]. E nos eventos mais energéticos do cosmos — explosões de supernovas e fusões de estrelas de neutrões — as reações de captura rápida de neutrões (chamados processo r) sintetizam os elementos pesados, completando o inventário cósmico da matéria [42]. Esta última previsão foi espetacularmente confirmada em 2017, quando a deteção conjunta de ondas gravitacionais e radiação eletromagnética do evento GW170817 [43] — proveniente da fusão de duas estrelas de neutrões — revelou assinaturas químicas compatíveis com a síntese de elementos pesados pelo processo r [44]. Assim, o mesmo fenómeno que faz vibrar o espaço-tempo também fabrica o ouro e a platina: uma síntese cósmica que une a Relatividade, a Quântica e a origem da matéria no Universo.

**6. Tecnologia quântica na astrofísica: presente e futuro**

A MQ não influencia apenas a Astrofísica; em muitos casos também a possibilita. Por exemplo, sem o efeito fotoelétrico explicado por Einstein usando a teoria quântica [45], não haveria *Charge-Coupled Devices* (CCDs) [46], que hoje captam com precisão quântica a luz das estrelas; sem os lasers, desenvolvidos a partir da emissão estimulada prevista por Einstein e realizados experimentalmente por Theodore Maiman [47], não existiriam interferómetros como o *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO), cuja precisão quântica permitiu detetar diretamente as ondas gravitacionais [48], vibrações do espaço-tempo menores do que o diâmetro de um protão; são os relógios atómicos [49], baseados em transições quânticas de césio e rubídio, que sincronizam telescópios espalhados pelo globo em observações de interferometria de base muito longa (VLBI) [50], como as que permitiram obter a primeira imagem de um buraco negro pela colaboração *Event Horizon Telescope* — uma conquista simultaneamente quântica e relativista [51]. E de facto, o futuro da Astrofísica será, provavelmente, cada vez mais quântico — não apenas por causa da física fundamental, mas também pela tecnologia.

**7. A herança e o futuro**

No final do século XX, a Astrofísica tornou-se uma ciência quântica de campo aberto. Do brilho das estrelas à evaporação dos buracos negros, do ruído térmico dos detetores ao silêncio do vácuo, a Quântica revela-se em cada escala do Universo. Einstein, que tanto resistiu ao acaso quântico, deu-nos a equação do espaço-tempo; Planck, que iniciou tudo com um artifício matemático, abriu a porta a uma nova ontologia. Entre ambos, construiu-se uma visão do cosmos onde o infinitamente grande e o infinitamente pequeno já não são mundos separados, mas capítulos de uma mesma história.

O século XXI poderá ser o da sua unificação — em que o Universo se compreende como uma entidade quântica. Há desafios conceituais profundos: a reconciliação entre informação, entropia e causalidade no contexto quântico-gravitacional; a natureza das singularidades; a compreensão da matéria e energia escura, onde a MQ poderá ter um papel fundamental e até o papel da consciência no interface quântica-gravidade [52,53] — temas outrora considerados metafísicos, mas que talvez possam ter o seu lugar na discussão da física teórica.

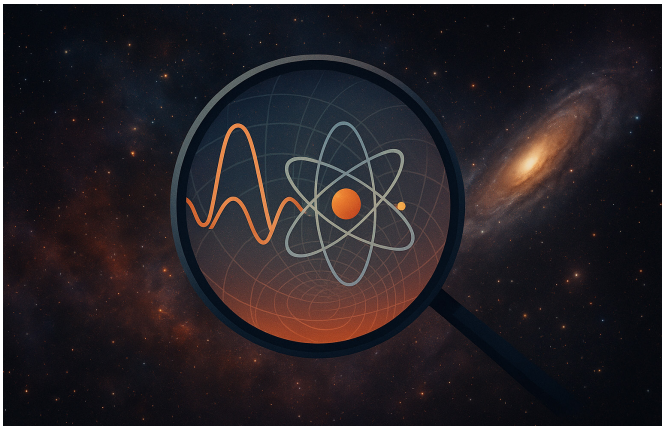


Figura 1 - Olhando para o Universo, vemos de facto uma manifestação da MQ e da Física de Partículas, que por sua vez, encontram nos sistemas astrofísicos e na descrição do Universo em Larga Escala um grande laboratório e teste experimental. Gera-se assim uma simbiose entre o muito grande e o muito pequeno. (Figura gerada com Inteligência Artificial).

**Agradecimentos**

Agradeço ao ChatGPT a elaboração da figura 1 e colaboração na coleção de referências relevantes. Este trabalho é suportado pelo CIDMA ao abrigo do Programa de Financiamento Plurianual de Unidades de I&D da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, https://ror.org/00snfqn58), referências UID/4106/2025 e UID/PRR/4106/2025 e também pelos projetos Horizon Europe staff exchange HORIZON-MSCA2021--SE-01, NewFunFiCO-101086251; 2022.04560.PTDC (https://doi.org/10.54499/2022.04560.PTDC) e 2024.05617.CERN (https://doi.org/10.54499/2024.05617.CERN).

Referências
[1] M. Planck, Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, Annalen der Physik, 1901.
[2] A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, in Annalen der Physik, 17 (1905) 891.
[3] A. Einstein, Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), (1915) 844-847.
[4] J. von Fraunhofer, Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre, Denkschr. Königl. Akad. Wiss. München, 5 (1814–1815) 193–226.
[5] N. Bohr, On the Constitution of Atoms and Molecules, Phil. Mag. 26 (1913).
[6] A. Sommerfeld, Zur Quantentheorie der Spektrallinien, Ann. Phys. 51 (1916) 1–94.
[7] H. von Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, Ann. Phys. Chem. 89 (1847) 53.
[8] W. Thomson (Lord Kelvin), On the Age of the Sun's Heat, Macmillan's Magazine 5 (1862) 288.
[9] G. Gamow, Zur Quantentheorie des Atomkernes, Z. Phys. 51 (1928) 204.
[10] H. A. Bethe, Energy Production in Stars, Phys. Rev. 55 (1939) 434.
[11] W. Heisenberg, Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, Z. Phys. 43 (1927) 172.
[12] W. Pauli, Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren, Z. Phys. 31 (1925) 765.
[13] S. Chandrasekhar, The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs, Astrophys. J. 74 (1931) 81.
[14] R. C. Tolman, Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid, Phys. Rev. 55 (1939) 364.
[15] J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff, On Massive Neutron Cores, Phys. Rev. 55 (1939) 374.
[16] S. W. Hawking, Black hole explosions?, Nature 248 (1974) 30–31.
[17] S. W. Hawking, Breakdown of predictability in gravitational collapse, Phys. Rev. D 14 (1976) 2460–2473. [18] B. Pontecorvo, Mesonium and Antimesonium, Sov. Phys. JETP 6 (1957) 429; Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge, Sov. Phys. JETP 7 (1958) 172.
[19] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, Remarks on the Unified Model of Elementary Particles, Prog. Theor. Phys. 28 (1962) 870.
[20] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562.
[21] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 011301.
[22] J. H. Oort, The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands 6 (1932) 249.
[23] F. Zwicky, Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, Helvetica Physica Acta 6 (1933) 110–127.
[24] L. Hui, J. P. Ostriker, S. Tremaine, E. Witten, Ultralight scalars as cosmological dark matter, Phys. Rev. D 95 (2017) 043541.
[25] F. E. Schunck, E. W. Mielke, Relativistic boson stars, Classical and Quantum Gravity 20 (2003) R301-R356.
[26] R. Brito, V. Cardoso, C. A. R. Herdeiro, E. Radu, Proca stars: Gravitating Bose–Einstein condensates of massive spin-1 particles, Phys. Lett. B 752 (2016) 291.
[27] J. C. Bustillo, N. Sanchis-Gual, A. Torres-Forné, J. A. Font, A. Vajpeyi, R. Smith, C. A. R. Herdeiro, E. Radu, S. H. W. Leong, GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of $8.7 \times 10^{-13}$ eV, Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 081101.
[28] A. H. Guth, Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems, Phys. Rev. D 23 (1981) 347.
[29] A. A. Starobinsky, Dynamics of phase transition in the new inflationary universe scenario and generation of perturbations, Phys. Lett. B 117 (1982) 175.
[30] A. H. Guth, S.-Y. Pi, Fluctuations in the new inflationary universe, Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1110.
[31] S. W. Hawking, The development of irregularities in a single bubble inflationary universe, Phys. Lett. B 115 (1982) 295.
[32] J. M. Bardeen, P. J. Steinhardt, M. S. Turner, Spontaneous creation of almost scale-free density perturbations in an inflationary universe, Phys. Rev. D 28 (1983) 679.
[33] A. A. Penzias, R. W. Wilson, A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, Astrophys. J. 142 (1965) 419.
[34] G. F. Smoot et al. (COBE Collaboration), Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps, Astrophys. J. Lett. 396 (1992) L1.
[35] Planck Collaboration, P. A. R. Ade et al., Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters, Astron. Astrophys. 571 (2014) A16.
[36] J. Schwinger, On Gauge Invariance and Vacuum Polarization, Phys. Rev. 82 (1951) 664.
[37] C. Thompson, R. C. Duncan, The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars – I. Radiative mechanism for outbursts, Astrophys. J. 392 (1992) L9.
[38] C. Thompson, R. C. Duncan, Neutron star dynamos and the origins of pulsar magnetism, Astrophys. J. 408 (1993) 194.
[39] A. K. Harding, D. Lai, Physics of strongly magnetized neutron stars, Rep. Prog. Phys. 69 (2006) 2631. [40] R. V. Wagoner, W. A. Fowler, F. Hoyle, On the Synthesis of Elements at Very High Temperatures, Astrophys. J. 148 (1967) 3.
[41] F. Hoyle, On Nuclear Reactions Occurring in Very Hot Stars. I. The Synthesis of Elements from Carbon to Nickel, Astrophys. J. Suppl. Ser. 1 (1954) 121.
[42] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 547.
[43] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 161101.
[44] M. M. Kasliwal et al., Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger, Science 358 (2017) 1559.
[45] A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Annalen der Physik 17 (1905) 132.
[46] W. S. Boyle, G. E. Smith, Charge Coupled Semiconductor Devices, Bell System Technical Journal 49 (1970) 587.
[47] T. H. Maiman, Stimulated Optical Radiation in Ruby, Nature 187 (1960) 493.
[48] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102.
[49] L. Essen, J. V. L. Parry, An Atomic Standard of Frequency and Time Interval: A Cæsium Resonator, Nature 176 (1955) 280.
[50] M. I. Cohen, A. L. Yen, K. I. Kellermann, Very Long Baseline Interferometry, Science 178 (1972) 297.
[51] The Event Horizon Telescope Collaboration, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, Astrophys. J. Lett. 875 (2019) L1.
[52] S. Hameroff, R. Penrose, Conscious events as orchestrated space-time selections, J. Conscious. Stud. 3 (1996) 36.
[53] R. Penrose, Consciousness, the brain, and spacetime geometry: an addendum, Ann. N.Y. Acad. Sci. 929 (2001) 105.



Carlos Herdeiro é licenciado em Física/Matemática Aplicada pela Universidade do Porto e doutorado em Física Teórica pela Universidade de Cambridge (2001), em Inglaterra. Trabalhou nos departamentos de Física: da Universidade de Stanford, EUA (2001-2002), da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2002-2010), da Universidade de Aveiro (2010-2018) e do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (2018-2019). É atualmente Investigador Coordenador de carreira no Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro onde coordena o grupo de Geometria e Dinâmica Gravitacional do Centro de Investigação em Matemática e Aplicações (CIDMA). A sua investigação centra-se na interface da gravitação, cosmologia, astrofísica, física-matemática e física de altas energias, tendo publicado mais de 230 artigos em revistas internacionais em vários temas nesta interface e dirigido três redes internacionais Marie Curie financiadas pela União Europeia. É também autor de um livro de texto Universitário de Mecânica Quântica. Foi presidente da delegação norte da SPF (2007-2010). É membro fundador, foi presidente e é vice-presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação.

# Próxima paragem: Gravitação Quântica

Orfeu Bertolami[1], Ricardo Schiappa[2]

[1]Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

[2]Departamento de Matemática, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

orfeu.bertolami@fc.up.pt[1], ricardo.schiappa@tecnico.ulisboa.pt[2]

**Resumo**

A abrangência da Mecânica Quântica na descrição dos fenómenos físicos a pequenas e muito-pequenas escalas, sugere que também os fenómenos gravitacionais—pelo menos no contexto das mais diminutas distâncias ou das mais elevadas energias—devem incorporar os princípios basilares daquela teoria. Esta síntese, genericamente designada por gravitação quântica, deve admitir, no seu limite de escalas macroscópicas e baixas energias, a descrição do espaço-tempo por meio da sua curvatura tal como proposto pela Teoria da Relatividade Geral por Einstein em 1915. Exemplos de concretizações desta alusiva descrição teórica incluem, entre outras propostas, a teoria de cordas quânticas e o programa de quantização segundo variáveis de lacetes. Espera-se que, por meio da gravitação quântica, seja possível resolver o problema das singularidades de buracos negros e do Big Bang, e assim vir a entender os processos físicos que ocorrem quando atravessamos o horizonte de acontecimentos de um buraco negro ou que tiveram lugar nos primeiríssimos instantes da história do Universo (~$10^{-44}$ segundos).

**Introdução**

Um dos problemas mais desafiantes da física contemporânea diz respeito à compatibilidade entre as teorias físicas de maior abrangência construídas ao longo do século XX, nomeadamente a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade Geral. A primeira destas teorias descreve fenómenos em escalas microscópicas, que se podem estender a dimensões macroscópicas, mas cuja validade descritiva típica vai das moléculas até às partículas elementares. A diversidade da fenomenologia abrangida por esta teoria é vastíssima. Por sua vez, a teoria da Relatividade Geral descreve fenómenos de natureza gravitacional por meio da curvatura do espaço-tempo. O domínio de abrangência da Relatividade Geral inclui desde fenómenos subtis no Sistema Solar, tais como o avanço da precessão secular do periélio do planeta Mercúrio, até a própria evolução do Universo como um todo.

Conceptualmente, a Mecânica Quântica repousa sobre os factos essenciais associados à dualidade partícula-onda e à impossibilidade de se determinar com precisão arbitrária simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula microscópica (o chamado "Princípio de Incerteza" de Heisenberg). Estas propriedades decorrem da inevitável interação entre a instrumentação de observação e a partícula a observar, que por sua vez determina o seu carácter corpuscular ou ondulatório e altera simultaneamente a sua posição e velocidade. O limite na precisão com a qual medidas de posição e velocidade podem ser realizadas é determinado pelo quantum fundamental introduzido por Planck, h = 6,62607x$10^{-34}$ J s.

Presumivelmente, dada a universalidade dos princípios da Mecânica Quântica, uma teoria da gravitação que descreva fenómenos a distâncias microscópicas deve ser necessariamente compatível com aqueles princípios. Uma forma natural para atingir esta compatibilidade é através da hipótese de que o grau de liberdade fundamental da gravitação, o gravitão, seja quântico. O gravitão é a componente dinâmica da gravitação, a excitação gravitacional para além da geometria curva subjacente de uma região do espaço-tempo.

Na verdade, questões relativas à necessidade de considerar os campos fundamentais como objetos quânticos, foram tema de discussão pelos pioneiros da Mecânica Quântica, por exemplo aquando do tratamento de campos eletromagnéticos de partículas carregadas. Conclui-se então que a descrição quântica das partículas exige uma abordagem quântica compatível também para os respetivos campos. Esta descrição deu eventualmente origem à Teoria Quântica dos Campos e, em particular, à Eletrodinâmica Quântica. A Teoria Quântica dos Campos compatibiliza os Princípios da Relatividade Restrita de Einstein com os da Mecânica Quântica.

Por sua vez, acredita-se que a síntese que se procura entre a gravitação e a Mecânica Quântica poderá estabelecer a completude que a Teoria da Relatividade Geral não tem, dado que a descrição da gravitação em termos da curvatura do espaço-tempo contem singularidades diversas, pontos ou regiões no espaço-tempo onde as grandezas físicas divergem, ou seja, tornam-se infinitas. Tais singularidades são ubíquas na Relatividade Geral (ver, por exemplo, a Ref. [1]) e surgem, por exemplo, no contexto dos buracos negros e aquando do Big Bang que deu origem ao espaço-tempo que é, com toda a matéria e energia nele contida, o nosso Universo. Esta putativa síntese possibilitará uma unificação de todas as interações fundamentais da Natureza dado que as outras três Interações fundamentais, a nuclear forte, a nuclear fraca e a eletromagnética são todas bem descritas pela Teoria Quântica de Campos. A teoria resultante dessa unificação é por vezes designada por "Teoria de Tudo". Apesar de existir na Física uma bem sedimentada tradição asso-

ciada às teorias de unificação (ver, por exemplo as Refs., [2,3]), não é completamente claro quais as direções que devem nortear a teoria da gravitação quântica — sendo um obstáculo o facto de todas as Teorias de Campo serem formuladas tendo como subjacente um espaço-tempo clássico. Os argumentos apresentados acima sugerem que a gravitação deve ser também ela compatível com a Mecânica Quântica (há argumentos no sentido oposto, ver a referência [4] e outras ali mencionadas). Outra questão a dirimir diz respeito à propagação dos gravitões num espaço-tempo subjacente (clássico ou não) e sob que condições estes graus de liberdade podem ser considerados como quanta do campo gravitacional. É relativamente consensual a necessidade de se considerar seriamente a natureza quântica do gravitão, dado que uma conclusão incontroversa é a de que uma aproximação semi-clássica da teoria de Einstein, na qual o termo de fonte de matéria das equações de campo de Einstein corresponde ao valor esperado no vácuo do tensor de energia-momento de campos quânticos, não é consistente com a Mecânica Quântica [5], ainda que seja satisfatória enquanto teoria efetiva válida em escalas de energia mais baixas do que a característica da teoria da gravitação quântica [6]. Contudo, é no mínimo intrigante o facto de que a utilização direta dos instrumentos teóricos da Teoria Quântica de Campos como, por exemplo, as regras de comutação a se aplicar ao gravitão e ao seu momento canonicamente conjugado, seja dependente do espaço-tempo subjacente, o que não é satisfatório, e exige uma escolha específica das superfícies do tipo tempo necessárias para se construir a desejada descrição quântica (ver, por exemplo, a Ref. [7]). Mas o golpe fatal à pretensão de promover o gravitão enquanto grau de liberdade quântico como nos campos fundamentais das outras teorias fundamentais, os campos de calibre (gauge), é que gráficos de Feynman envolvendo loops de gravitões dão origem a quantidades infinitas que não são removíveis como os das Teorias Quânticas de Campos consistentes. Na verdade, estas ferramentas indicam que qualquer abordagem da gravitação nestes termos não pode dar origem a teorias de campo consistentes. O termo técnico distintivo de teorias nestas condições, é que não são renormalizáveis, o que significa que as quantidades infinitas não podem ser removidas e que respostas finitas não podem ser obtidas e confrontadas com a experimentação.

Dadas estas dificuldades, as abordagens de gravitação quântica mais desenvolvidas até ao presente, a teoria das cordas quânticas [8] e o programa de quantização através das variáveis de lacete [9,10], partem de pressupostos relativamente distintos dos da Teoria da Relatividade Geral. Nestas propostas, o gravitão surge como um grau de liberdade quântico enquanto elemento emergente no contexto destas teorias e não como ponto de partida. Na teoria das cordas quânticas, o gravitão, e também o dilatão, um campo escalar fundamental, e um campo tensorial anti-simétrico, entre outros campos, correspondem aos modos de vibração sem massa das cordas fechadas. Neste contexto, os problemas acima mencionados da abordagem direta da teoria quântica de campos ao gravitão da Relatividade Geral, são contornados uma vez que interações que na Relatividade Geral são pontuais, passam a ser naturalmente estendidas pela própria natureza das interações entre as cordas fechadas. Esta natureza estendida resolve também a dificuldade associada às singularidades da Relatividade Geral. A teoria das cordas quânticas será discutida mais detalhadamente abaixo.

Por sua vez, no programa de quantização através das variáveis de lacete, a gravitação é rescrita como uma teoria de calibre e o campo de calibre apropriadamente integrado ao longo de um caminho fechado (um "lacete"), a holonomia, é o objeto fundamental do formalismo [9,10]. Estes lacetes funcionam como elementos basilares da discretização da geometria e assim as singularidades são evitadas. Espera-se que o gravitão possa surgir aqui também no limite semi-clássico da teoria, pese embora após um conjunto razoavelmente extenso de hipóteses.

Mas antes de estender a discussão, tentemos estimar a escala típica dos processos que estivemos a discutir. Esta escala pode ser obtida considerando que a dimensão caraterística da teoria gravitacional deve ser da ordem do comprimento de onda típico de uma partícula, um conceito puramente quântico. Podemos avançar com duas escalas caraterísticas: a do mais simples dos buracos negros, um buraco negro de Schwarzschild com massa *M*, cujo raio do horizonte de acontecimentos é dado por $R_{\mathrm{Sch}} = 2\mathrm{G}\mathrm{M}/c^2$, onde *G* é a constante da gravitação universal de Newton e *c* a velocidade da luz no vácuo; o comprimento de onda de Compton, que corresponde ao comprimento de onda de de Broglie de uma partícula de massa *M*, e velocidade igual à velocidade da luz, $\lambda = \hbar/Mc$, onde $\hbar = h/2\pi$; igualando o comprimento de onda de Compton com $R_{\mathrm{Sch}}/2$, resolvendo para a massa e multiplicando por $c^2$, obtemos a chamada energia de Planck:

$$M_{\mathrm{p}}c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}} \simeq 1{,}2 \times 10^{19}\ \mathrm{GeV}$$

ou seja, uma energia que corresponde a cerca de 19 ordens de grandeza maior que a massa/energia de repouso do protão! A distância associada a esta massa pode ser imediatamente estimada e é dada por:

$$L_{\mathrm{p}} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \simeq 1{,}6 \times 10^{-35}\ \mathrm{m}$$

uma distância muitas ordens de grandeza menor que a menor das dimensões escrutinadas pelo mais potente acelerador de partículas da atualidade, o LHC (*Large Hadron Collider*) do CERN (Centro Europeu de Investigação Nuclear), cerca de $10^{-20}$ m. Naturalmente, as escalas dos efeitos gravitacionais quânticos são, no presente, inacessíveis à experimentação.

Ainda antes de discutirmos as interações fundamentais da Natureza e da teoria de cordas quânticas, há que frisar que naturalmente a teoria da gravitação quântica ou "Teoria de Tudo" não pode ser um sistema puramente axiomático de algoritmos computacionais—um problema subjacente à formulação matemática de qualquer teoria física, mas que aqui ganha uma magnitude especial se aceitarmos que de facto estamos a construir uma "teoria de tudo". Se assim o fosse, a teoria não poderia ser consistente e completa simultaneamente devida à indecidibilidade descrita no Teorema de Gödel, à impossibilidade de determinação da consistência interna de um sistema computacional segundo o Teorema de Tarski, e à incompletude computacional estabelecida pelo Teorema de Chaitin [11]. Naturalmente, estas

dificuldades poderiam sugerir que a teoria da gravitação quântica exigiria uma "meta-teoria" que suporte a sua consistência e validade [11]. Contudo, em nossa opinião, a teoria da gravitação quântica, aliás tal como qualquer outra teoria quântica que descreva fenómenos desde a matéria condensada até à física de partículas, deve ser guiada sobretudo por argumentos de plausibilidade fenomenológica e, possivelmente, por cenários de mediação entre o comportamento quântico da gravitação e o comportamento semi-clássico a partir do qual surgem as propriedades associadas à curvatura do espaço-tempo. Estes cenários podem também ser absolutamente necessários dado que não é evidente o que se entende por espaço-tempo num contexto quântico (ou sequer se faz sentido usar o termo num contexto completamente quântico) e como neste contexto se evitam, por exemplo, o aparecimento de curvas fechadas do tipo tempo que dão origem a paradoxos de ordenação cronológica. Parece-nos mais plausível que exigências de consistência da teoria emergente (a Relatividade Geral e suas extensões) sejam mais satisfatórios que a necessidade de uma "meta-teoria" para resolver os problemas de consistência matemática interna da gravitação quântica.

**Das Interações Fundamentais à Grande Unificação**

Um dos objetivos da "Teoria de Tudo" é descrever por meio de uma única formulação as quatro interações fundamentais conhecidas (e é neste sentido que se usa a palavra "tudo"). Estas interações são os processos mais elementares e qualitativamente distintos por meio dos quais todos os fenómenos do mundo físico podem ser compreendidos. Abrangem a gravitação, o eletromagnetismo, a interação nuclear forte (responsável pela coesão do núcleo atómico), e a interação nuclear fraca (intermediária de processos tais como o decaimento de neutrões livres). A propriedade ontológica que identifica uma interação e transmite os seus efeitos no espaço-tempo é designada por carga. A carga da interação gravitacional é a energia, de modo que todas as partículas necessariamente sentem o sutilíssimo efeito da gravitação. A carga do eletromagnetismo é a carga elétrica, a carga da interação nuclear forte é denominada "cor", e a carga da interação nuclear fraca corresponde à propriedade denominada "isospin fraco" que somada à carga elétrica dá origem à "hiper-carga" da teoria eletrofraca unificada. Outras propriedades das interações são o alcance, que corresponde à distância para além da qual o efeito de uma interação se torna desprezável, e a intensidade relativa com que as interações se manifestam a uma energia padrão. Esta é determinada pelas constantes de acoplamento, definidas através da relação $\alpha = g^2/4\pi\hbar c$, onde $g$ é a intensidade da carga correspondente a cada uma das interações. No Quadro I, são apresentadas as principais propriedades das interações fundamentais.

Acredita-se que a descrição teórica das interações é realizada no contexto da já referida Teoria Quântica dos Campos. Neste contexto, as vibrações ou ondas, que são o vetor de influências numa teoria de campo não-quântica, tem associadas a si partículas. Estas últimas são as partículas intermediárias específicas a cada uma das interações, como se apresenta no Quadro I.

Os desenvolvimentos teóricos, especialmente nas décadas de 60, 70 e 80 do século passado, permitiram obter descrições consistentes e experimentalmente verificáveis de Teorias de Campo Quânticas das interações não-gravitacionais (ver, por exemplo, a Ref. [12]). Estas teorias são dotadas de simetrias ditas de calibre, que não correspondem a simetrias do espaço-tempo, tais como a translação e a rotação, mas a invariâncias sob rotações num espaço interno abstrato. O princípio de invariância sob transformações de calibre permite alcançar a descrição matemática unificada das interações fundamentais. Neste contexto, a teoria quântica do eletromagnetismo, a eletrodinâmica quântica (EDQ) - corresponde a invariância sob o grupo unitário de um parâmetro, U(1), e a manifestação física quinta-essencial desta simetria é a conservação da carga elétrica e a dependência do acoplamento eletromagnético com a energia. A teoria das interações fortes, ou cromodinâmica quântica (CDQ), é obtida por meio da invariância sob o grupo especial unitário, SU(3), associado à existência de três "cores" distintas. No que refere às interações fracas, o formalismo das teorias de calibre convergiu no sentido de que a desejada teoria deveria necessariamente conter a eletrodinâmica quântica! O modelo resultante, que é hoje designado como Modelo Padrão das Partículas Elementares (MP), corresponde a uma teoria de calibre invariante sob a ação do grupo SU(3) x SU(2) x U(1) e coloca a questão da unificação das interações fundamentais como uma hipótese de trabalho necessária para se atingir a simplicidade conceptual que se encontra sob a riqueza fenomenológica da Natureza. Sob este prisma, a unificação das interações vai muito para além de um sentido puramente estético e enquadra-se na tradição cultural das grandes construções intelectuais que são eminentemente unificadoras [2,3]. Como veremos este é um dos aspetos mais sedutores da teoria de cordas quânticas.

O MP acomoda todas as partículas elementares conhecidas e as interações não-gravitacionais entre elas. As partículas elementares estão agrupadas em "gerações" compostas de quarks (partículas com cargas de cor e carga elétrica fracionária em relação à carga do eletrão, as quais se agrupam em tríades para formar o protão e o neutrão) e de leptões como o eletrão, o muão e a partícula tau e os respetivos neutrinos. No Quadro II, o conteúdo das gerações de partículas elementares é apresentado, assim como a configuração destas em termos das simetrias do MP.

Uma propriedade fundamental das interações conhecidas por meio da Teoria Quântica de Campos é que as suas constantes de acoplamento variam com a escala de energia considerada. É possível determinar que a uma escala de energia consideravelmente elevada, cerca de $10^{16}$ GeV, as constantes de acoplamento das interações fortes e interações electrofracas convergem (ver Figura I). Em abono do rigor mencionemos que essa convergência só é exata se adicionarmos uma nova simetria às nossas interações, relacionando matéria com interações, ou fermiões com bosões, e denominada de supersimetria, mas esse é todo um novo tópico sobre o qual não nos iremos debruçar em maior profundidade. Esta convergência sugere a existência de teorias de calibre que descrevem as interações do MP de forma unificada, as Teorias de Grande Unificação (TGU). Estas teorias são particularmente relevantes para se empreender o passo seguinte de unificação com a gravitação e têm importantes implicações a nível cosmológico uma vez que que permitem

| Interacção | Carga | Intensidade $+\alpha$ | Partículas Intermediárias | Spin P. I. | Alcance (m) | Teoria Quântica |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nuclear Forte | "Cor" | 10 | Gluões | 1 | $10^{-15}$ | CDQ |
| Electromagnética | Eléctrica | 1/137 | Fotão | 1 | $\infty$ | EDQ |
| Nuclear Fraca | Isospin Fraco | $10^{-10}$ | Bosões $W^{\pm}$ e $Z^0$ | 1 | $10^{-18}$ | MP |
| Gravitacional | Massa ou Energia | $10^{-38}$ | Gravitão | 2 | $\infty$ | ? |

**Nota:** CDQ = Cromodinâmica Quântica; EDQ = Electrodinâmica Quântica; MP = Modelo Padrão das Partículas Elementares.

Quadro 1 - Interações Fundamentais da Natureza

| | Cromodinâmica Quântica ($SU(3)$) Fermiões com Cor (Quarks) | Fermiões sem Cor (Leptões) |
|---|---|---|
| Simetria Electrofraca $SU(2) \otimes U(1)$ | $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $u_R\ d_R;\ u_R\ d_R;\ u_R\ d_R$ | $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$ $e_R^-$ |
| Simetria Electrofraca $SU(2) \otimes U(1)$ | $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$ $c_R\ s_R;\ c_R\ s_R;\ c_R\ s_R$ | $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$ $\mu_R^-$ |
| Simetria Electrofraca $SU(2) \otimes U(1)$ | $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ $t_R\ b_R;\ t_R\ b_R;\ t_R\ b_R$ | $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$ $\tau_R^-$ |

Quadro 2 - Gerações de Partículas Elementares – Fermiões

| | | |
|---|---|---|
| Bosões Intermediários Electrofracos | $\gamma, W^+, W^-, Z^0$ | (sem cor) |
| Bosões Intermediários Interacção Forte | $G_1, ..., G_8$ (Gluões) | (com cor) |
| Bosões de Higgs | $H$ | (sem cor) |

Quadro 3 - Partículas Elementares - Bosões

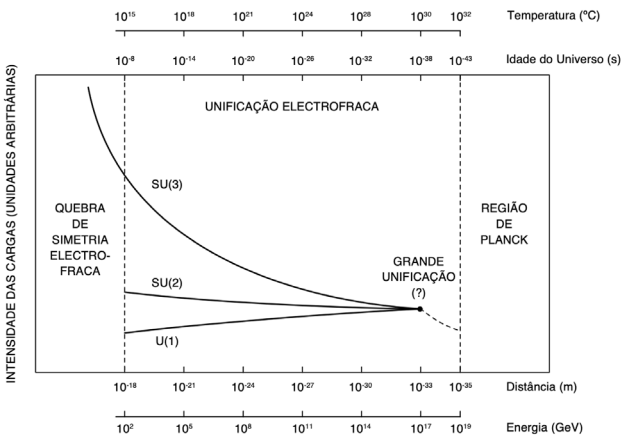



Figura 1 - Evolução das constantes de acoplamento em função da escala de energia

a violação de simetrias, tais como a associada ao número bariónico e à conjugação de carga e paridade (simetria CP) que, por sua vez, admite a conceção de cenários que podem explicar a observada predominância da matéria sobre a antimatéria no Universo. As TGU permitem, também, entender a observada isotropia e homogeneidade, bem como a ausência de curvatura do espaço em largas escalas, uma vez que estas teorias são dinamicamente compatíveis, quando consideradas em conjunto com uma simetria possível, mas ainda não observada, entre bosões e fermiões, a mencionada supersimetria, com um período de expansão exponencialmente acelerada do Universo nos seus primórdios, a inflação. Contudo, apesar destes aspetos encorajadores, as TGU contêm dificuldades essenciais e é neste contexto que as teorias de cordas quânticas são particularmente relevantes, muito especialmente quando consideradas em conjunto com a supersimetria.

## Teoria das Cordas Quânticas

Dito tudo isto ainda não dissemos ao certo no que consiste a teoria de cordas. Como muitas vezes em ciência, a história aqui foi tudo menos linear. Durante os anos 70 do século passado a ciência debruçava-se em como entender a força nuclear forte. Ao contrário das outras forças já descritas quanticamente (eletromagnética e força nuclear fraca), a força forte tinha a estranha de propriedade de crescer com a distância entre as cargas—ao invés de decrescer como nos parece mais intuitivo e familiar. Uma forma de tentar explicar esse fenómeno, hoje em dia dito de "liberdade assimptótica" (pois as cargas comportam-se como livres a altas energias), era moldar essa interação como que através de uma mola ou de um elástico. Uma "corda relativista" com uma carga em cada extremidade, que quando esticada iria resistir à separação entre cargas (devido à tensão natural da corda), mas que quando não esticada não iria produzir grande força entre os seus extremos. Essa ideia tinha alguma base experimental nas chamadas "trajetórias de Regge" (lineares) para diversas partículas de natureza hadrónica. Mas acabou por não vingar por duas razões: a primeira, pela descoberta da já mencionada Cromodinâmica Quântica que se revelou ser a teoria correta das interações fortes experimentalmente. A segunda, devido ao espectro de excitações quânticas das nossas "cordas relativistas", que se parecia não adequar à descrição das partículas de natureza forte.

Quando pensamos nestas "cordas relativistas" podemos imaginar que elas são de dois tipos: abertas (com extremidades) ou fechadas (sem extremidades). E para cada um destes tipos podemos tentar quantizar a corda e calcular o seu espectro de excitações quânticas. Um pouco como perguntar que tipo de notas podemos tocar com uma corda de um violino, decompondo-as em harmónicas. Ora o espectro tanto das cordas abertas como das cordas fechadas era muito rico, incluindo partículas sem massa, e torres infinitas de partículas muito massivas. No espectro sem massa, as cordas abertas incluíam partículas de força, como um fotão ou um gluão, o que era positivo à luz do seu possível uso para moldar as interações fortes. Mas as cordas fechadas eram mais curiosas: no seu espectro sem massa elas incluíam uma partícula elementar de spin 2. Ora a única partícula elementar de spin 2 que pensamos existir na natureza é o gravitão! Como anos mais tarde disse Edward Witten, esta

foi a primeira previsão experimental da teoria de cordas: que deve existir um gravitão! Neste contexto, e perante a emergência da Cromodinâmica Quântica como melhor explicação das interações fortes, a ciência perguntou se as cordas eram apenas uma curiosidade matemática, ou, antes, pela sua previsão do gravitão, se poderiam ser algo mais e moldar uma eventual gravitação quântica. Para isso, teria de ser possível quantizar uma corda relativista, sem deparar com os problemas de renormalização mencionados anteriormente, que surgem quando se tenta quantizar diretamente a Relatividade Geral.

As primeiras tentativas de quantizar a nossa corda relativista depararam com dois problemas técnicos. O primeiro, aquilo que se chama de uma "instabilidade taquiónica": o ponto em torno do qual estamos a tentar quantizar a teoria era um ponto naturalmente instável (como que um máximo de um potencial, ao invés de um mínimo) e não adequado ao procedimento. A solução pragmática encontrada para este problema foi o de juntar uma nova simetria, a já mencionada supersimetria, que relaciona excitações bosónicas (de "força") com excitações fermiónicas (de "matéria"), e que resolvia imediatamente o problema dos taquiões: por força desta supersimetria a quantização ocorre sempre num "mínimo do potencial". O segundo problema era ainda mais técnico, e tinha a ver com aquilo a que se chama uma "anomalia": certas simetrias que observávamos na formulação clássica da teoria, e que gostaríamos de observar também na formulação quântica da teoria, eram destruídas pelo processo de quantização. Isto era um fenómeno familiar em teoria quântica do campo, inclusive com previsões experimentais na famosa anomalia de Adler-Bell-Jackiw, mas não se sabia como resolver este problema em teoria de cordas. Note-se que ambos estes problemas, sendo naturais, eram de alguma forma "conservadores": se o Universo tiver natureza quântica no seu nível mais fundamental, não existe realmente razão nenhuma para acreditar que o processo de "quantização" possa existir sempre, ou sequer que seja natural. Contudo, a ciência gosta de prosseguir em passos pequenos sob terreno familiar, pelo que estas eram as principais questões no final dos anos 70 quando a teoria de cordas foi parcialmente posta de parte—suplantada pela Cromodinâmica Quântica nas interações fortes, e aparentemente não suscetível ao procedimento de quantização para poder descrever o desejado gravitão quântico.

Na "primeira revolução das cordas" nos anos 80, a quantização foi finalmente resolvida ao serem descobertas 5 tipos de supercordas (cordas supersimétricas) que eram livres de anomalias [13]. Podiam ser quantizadas e descreviam a gravitação quântica sem aparentemente tais problemas de renormalização. Apenas tinham dois "problemas": eram supersimétricas (uma simetria que embora observada em certos sistemas experimentais de matéria condensada, ainda não foi observada em física de partículas) e viviam em 10 dimensões de espaço-tempo plano (quando todos nós apenas observamos 4!). Os anos 80 viram uma enorme explosão de investigação em teoria de supercordas, como a tão procurada "Teoria de Tudo" descrevendo não só a gravitação quântica, mas também todas as interações da natureza (sendo todas as diferentes partículas de força e de matéria uma sinfonia de diferentes notas, diferentes oscilações, diferentes harmónicas destas cordas microscópicas). As 10 dimensões não seriam um problema se em vez de considerarmos teoria de cordas em 10 dimensões planas, considerássemos a teoria em 4 dimensões planas e 6 dimensões compactificadas microscopicamente (naquilo que se chama um espaço de Calabi-Yau). E a supersimetria não seria um problema se conseguíssemos encontrar um "vácuo", uma compactificação, onde ela fosse quebrada e tudo o que restasse fosse o MP [14]. Diferentes espaços de Calabi-Yau deram lugar a diferentes teorias de baixas energias, ora mais parecidas com o mundo real, ora menos parecidas com o mundo real, a vasta maioria ainda muito supersimétricas, e nenhuma com o MP. Onde se escondia esta teoria? Os anos 90 revelaram que encontrar o MP através deste procedimento não seria fácil: o número de possíveis espaços de Calabi-Yau a procurar estaria na ordem dos $10^{500}$! Esta descoberta fez surgir alguma crítica—sobre o poder preditivo da teoria: como selecionar essa compactificação?—mas do nosso ponto de vista uma crítica algo injustificada: também não existe nenhuma equação para o raio do planeta Terra ou da sua órbita em torno do Sol, ou para o raio dessa nossa própria estrela. Existem igualmente inúmeras possibilidades, todas ditadas de forma ambiental. No "multiverso" assim também muitos diferentes vácuos podem coexistir!

Uma crítica que, contudo, acompanhamos tinha a ver com o facto de todos os cálculos referidos serem cálculos perturbativos. O que isto quer dizer é que consideramos a teoria com uma força de interação muito fraca, e depois, perturbativamente, incrementalmente, pouco a pouco, fazemos essa força crescer para tentar estudar fenómenos onde as interações têm maior intensidade. Este é um procedimento que se tem concretizado em inúmeros resultados positivos praticamente desde o nascimento da Mecânica Quântica, e que ganhou um papel central no edifício quântico no contexto das diversas teorias de campo. Mas nem sempre é a forma mais adequada de estudar um fenómeno quântico, sendo algo limitado nas nossas já familiares interações fortes. Nestas, a ciência tinha já saltado para outros procedimentos, os mais profícuos de natureza computacional numérica. No que poderia consistir o estudo não-perturbativo de teoria de cordas? Esta pergunta foi respondida em grande parte com a "segunda revolução das cordas" dos anos 90, onde inicialmente se descobriram duas coisas fundamentais. A primeira, que a teoria de cordas não era uma teoria de cordas! Tínhamos toda uma lista de objetos "estendidos" para além das cordas: membranas, membranas com três dimensões, membranas com quatro dimensões, por aí fora, e incluindo ainda membranas em zero dimensões—sim!, incluindo ainda partículas (de natureza especial). A segunda, que aquelas 5 teorias de supercordas especiais que eram livres de anomalias, não passavam de aspetos diferentes de uma única teoria! Como descoberto por Edward Witten [15], estas 5 teorias não eram teorias especiais, mas "cantos" especiais de uma teoria única (ainda sem nome definido, mas por vezes chamada de "teoria M" para "Mãe" ou "Membrana" ou "Matriz"). Estes resultados foram particularmente significativos quando temos em mente a busca de uma "teoria de tudo". Não estamos em busca de 5 teorias de tudo, mas, idealmente, se de facto podemos entender o Universo, estamos em busca de apenas uma. E todos estes objetos "estendidos" eram absolutamente fundamentais para verificar essa unicidade.

Mas a revolução das cordas dos anos 90 estava apenas a começar. Em meados dos anos 90, Andrew Strominger e Cumrun

Vafa usaram estas "D-branas" (o nome dado às nossas membranas com dimensões diversas) para descrever de forma microscópica, de forma quântica, buracos negros [16]. Este era um puzzle que existia desde os anos 70. Ao estudar buracos negros semi-clássicos, dito de outra forma, ao estudar teoria quântica dos campos não num espaço-tempo plano mas num espaço-tempo de buraco negro, Stephen Hawking descobriu várias curiosidades sobre estes objetos astrofísicos. Talvez a mais famosa seria que os buracos negros não são assim tão negros: na realidade radiam (a chamada radiação de Hawking) e logo têm uma temperatura associada [17]. Mas se têm natureza térmica, então é natural aceitar que também têm natureza termodinâmica—em particular, uma entropia. Ora o que Bekenstein e Hawking descobriram foi que essa entropia era proporcional à área do horizonte de acontecimentos—logo, que essa entropia era um número gigantesco. Mas a Relatividade Geral diz-nos que os buracos negros são, de alguma forma, objetos extremamente simples, caracterizados pela sua massa, carga elétrica, e momento angular. Então do que são realmente feitos os buracos negros quânticos, por forma a dar origem à gigantesca entropia de Bekenstein e Hawking? O que Strominger e Vafa nos explicaram foi que os buracos negros quânticos são "feitos de D-branas" e que a previsão da teoria de cordas para a entropia de certo tipo de buracos negros estava em perfeito acordo com o que seria de esperar da Relatividade Geral! Esta foi talvez a descoberta mais significativa a colocar a teoria de cordas como a principal teoria no caminho para a gravitação quântica, ao conseguir fazer um cálculo que nenhuma outra alternativa ainda conseguiu.

Mas a grande revolução ainda estava por acontecer, tendo surgido um par de anos depois por intermédio de Juan Maldacena [18], que olhou de forma unificada para todas estas questões que temos vindo a discutir. Os buracos negros de Strominger e Vafa são buracos negros algo especiais, com massa e com carga. Quando nos aproximamos do seu horizonte de acontecimentos, a geometria do espaço-tempo é curva, e conforme estamos muito perto do horizonte essa curvatura é como que a de um cilindro infinito. Se considerarmos apenas a física em torno do horizonte, nesse "cilindro infinito", e nos esquecermos do resto, então a geometria do espaço-tempo em consideração simplifica-se – ao invés de um espaço-tempo de um buraco negro massivo e carregado, temos apenas aquilo a que se chama um espaço-tempo de anti-de Sitter (AdS). Podemos pensar nesta geometria como uma caixa cilíndrica infinita. Esta é uma analogia bastante curiosa, pois também quando aprendemos Mecânica Quântica talvez o primeiro problema que tentamos resolver, e que nos explica tanto sobre a própria teoria, é o poço de potencial infinito. O que Maldacena pergunta é que se os buracos negros são feitos de D-branas, por um lado, e se, por outro lado, perto do seu horizonte de acontecimentos podemos "desacoplar" a maior parte da geometria e nos focarmos sobre essa caixa cilíndrica infinita que é o espaço-tempo de AdS, então qual é o limite análogo do lado das nossas D-branas microscópicas? A resposta já tinha sido dada por Witten, sendo esse limite uma espécie de cromodinâmica quântica. Vamos ser rigorosos: em abono da verdade, esse limite não é cromodinâmica quântica, é uma versão supersimétrica que não exibe confinamento mas antes uma simetria de invariância de escala, por vezes dita simetria "conforme", e chama-se muitas vezes uma Teoria do Campo Conforme (CFT). Mas do ponto de vista divulgativo podemos aproximar essa teoria como se fosse uma cromodinâmica quântica, e assim Maldacena conjetura que, uma vez que aceitamos que os buracos negros são feitos de D-branas, temos também de aceitar que, no limite de desacoplamento, a gravitação em AdS tem que ser equivalente à cromodinâmica do tipo CFT. Isto ficou conhecido como a correspondência AdS/CFT. Agora, há dois aspetos muitos importantes a salientar. O primeiro, que o espaço-tempo de AdS vive em 5 dimensões, enquanto que a cromodinâmica do tipo CFT vive apenas em 4 dimensões (vive na fronteira do nosso cilindro infinito, logo numa dimensão menos do que a dimensão original). Assim, estamos a relacionar teorias que vivem em dimensões distintas. O segundo, que a teoria em AdS é uma teoria de gravitação, enquanto que a cromodinâmica do tipo CFT é uma teoria sem gravitação. Assim, estamos a descrever uma teoria gravitacional usando apenas teoria do campo usual!

É importante refletirmos para perceber o alcance do que acabámos de descrever. Primeiro, a ironia do destino do ponto de vista histórico. A teoria de cordas surge nos anos 70 para descrever as interações fortes mas falha nesse propósito. É então reinterpretada como uma teoria de gravitação quântica, e inicia uma longa jornada científica que, quase 30 anos depois, nos diz que compreender gravitação quântica em AdS é equivalente a perceber (algum tipo de) interações fortes ou, vice-versa, que perceber (algum tipo de) interações fortes é equivalente a compreender gravitação quântica em AdS. As cordas regressam para responder de forma positiva à questão inicial! De forma positiva, e também muito estranha: elas explicam as interações fortes através de gravitação quântica em dimensões superiores! A segunda, que as teorias de gravidade quântica não são teorias de campo no sentido habitual, pois existe uma alteração de dimensão entre o espaço-tempo de AdS, que vive em 5 dimensões, e a teoria de campo que descreve gravitação quântica em AdS, a CFT, que vive em 4 dimensões. Esta alteração de dimensão é aquilo que se chama de princípio holográfico e que pode ser uma propriedade fundamental de gravitação quântica: os graus de liberdade de um sistema gravitacional quântico não vivem no interior do espaço-tempo que queremos descrever, mas na sua fronteira, sendo o desenrolar das interações gravitacionais quânticas nesse espaço-tempo como que um holograma do ponto de vista da teoria na fronteira. Finalmente, um ponto absolutamente fundamental no que diz respeito à existência de alternativas teóricas para descrever a gravidade quântica. Será de esperar que, com o desenrolar do tempo, algumas—se não a maior parte—dessas alternativas sejam condenadas ao esquecimento. Esse é o natural caminho da ciência. Mas, independentemente da teoria das cordas ser a "Teoria de Tudo" ou não, enquanto a teoria quântica do campo usual estiver connosco, também estará a teoria de cordas, uma vez que a correspondência AdS/CFT nos certifica que elas são diferentes aspetos da mesma coisa! Aqui percebemos que a revolução em curso pode ser ainda maior: se não percebemos bem o que significa quantizar a gravitação, por esta ser dada por uma teoria de campo em dimensão mais baixa, também é certo que, vice-versa, não podemos realmente perceber bem o que é uma teoria quântica do campo, por esta ser dada por uma teoria de cordas que incluí a gravidade em dimensão mais alta. Há todo um mundo quântico por descobrir!

A correspondência AdS/CFT está em vias de completar 30 anos. O artigo de Maldacena é o artigo de física teórica de altas energias mais citado da história, a caminho das 22 mil citações. Mas todos os dias são dias de novas descobertas e de melhor perceber todas as verdadeiras consequências de teoria de cordas, de holografia, da correspondência AdS/CFT, e de como finalmente vir a compreender a gravitação quântica em toda a sua plenitude e virmos a coroar esta longa caminha científica com a desejada "Teoria de Tudo".

Mas existem ainda inúmeros aspetos em aberto. Do lado fenomenológico, o nosso Universo não é um espaço-tempo do tipo AdS, é algo ao mesmo tempo muito diferente e muito parecido. O espaço-tempo AdS é caracterizado por ter uma constante cosmológica (um termo "constante" que podemos adicionar às equações de Einstein, e que o próprio ora achava boa ideia ora não achava boa ideia) e essa constante cosmológica é negativa. Isso não se verifica no nosso Universo, onde tudo indica que sim, existe uma constante cosmológica, mas que esta é positiva. Numa fase inflacionária, após o Big Bang, o nosso Universo seria assim um espaço-tempo do tipo de Sitter (dS)—ao invés de um cilindro, uma esfera. Acontece que em teoria de cordas é relativamente difícil encontrar soluções do tipo dS, e nesse aspecto ainda não temos uma resposta ao mesmo nível do que acontece com AdS. Uma possibilidade é estudar gravitação quântica em AdS do ponto de vista não-perturbativo, incluindo uma constante cosmológica que podemos variar, e tentar torná-la positiva através de procedimentos técnicos como "continuação analítica". É pouco claro se esse procedimento virá ou não a conduzir a novos discernimentos físicos sobre gravitação quântica em dS, e a fase inflacionária do nosso Universo. Do lado teórico, a "desconstrução" do espaço-tempo enquanto teatro fundamental das operações está apenas a começar. Uma analogia interessante tem a ver com a vida de um peixe no oceano. Um peixe relativamente inteligente até poderia descobrir as equações que governam o fluido no qual esse peixe existe, as equações de Navier-Stokes. Mas a comunidade científica do cardume rapidamente descobriria que quantizar as equações de Navier-Stokes não a iria levar a lado nenhum, e perceber a natureza quântica do oceano teria que necessitar de novas ideias. Através da física estatística o nosso cardume científico eventualmente poderia descobrir a natureza molecular e atómica da água, e perceber que o fluido em que vivem não é mais que uma aproximação, válida no limite termodinâmico, de uma realidade mais fundamental—e onde a palavra "fluido" nem sequer tem sentido. Através de AdS/CFT já percebemos que alguma parte do espaço-tempo também não deve fazer grande sentido de um ponto de vista fundamental: do lado da CFT, a dimensão extra de AdS é vista como se fosse uma escala energética. Existem ainda propostas para perceber essa dimensão extra como que associada a entrelaçamento quântico do lado da teoria do campo. Mas deveríamos um dia conseguir fazer isto para todo espaço-tempo; encontrar os "átomos" do espaço-tempo da mesma forma que o cardume científico conseguiu encontrar o hidrogénio e o oxigénio. Esse é o caminho a percorrer.

**Conclusões**

Qualquer que seja a sua formulação final, a teoria que capturar os aspetos quânticos da gravitação, tem potencialmente dentro de si os elementos fundamentais para responder às questões que são o nó górdio da física contemporânea: como abordar a gravitação de modo a colocá-la no contexto das descrições que abarcam as outras interações fundamentais por meio da Teoria Quântica de Campos?; será o esquema resultante uma "Teoria de Tudo"?; qual o papel dos objetos extensos, cordas, membranas, etc, nesta teoria e como estes podem resolver problemas fundamentais como o das singularidades e dos infinitos das teorias quântica dos campos?; qual a física estatística subjacente ao espaço-tempo enquanto limite termodinâmico?. E, para além destas questões técnicas, quais serão as bases desta teoria que evitarão que seja um sistema axiomático formal e que concretamente impulsione a resolução de problemas que no contexto do Universo primitivo e dos buracos negros possam ter implicações fenomenológicas verificáveis e refutáveis?

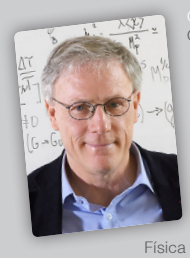
Estamos ainda muito longe de responder a estas questões, mas algumas ilações podem ser retiradas das tentativas já desenvolvidas. No contexto da teoria de cordas quânticas, parece-nos incontroverso afirmar que é vital que a teoria apresente um conjunto finito enumerável de estados fundamentais e que estes reproduzam o Universo quadridimensional em expansão acelerada e com uma constante cosmológica compatível com os valores que se inferem das observações. Seria extremamente interessante que a "Teoria de Tudo" resultante pudesse conter também elementos para abordar os aspetos não-perturbativos no contexto da teoria quântica de campos.

Finalmente, não nos parece absolutamente necessário que esteja na "Teoria de Tudo" a chave para a resolução de questões associadas à perda de coerência quântica [19] e que o "colapso" da putativa função de onda do Universo (ver, por exemplo, Refs. [20,21]) tenha uma origem gravitacional. Estas questões já estão presentes em contextos quânticos não-gravitacionais, e têm visto muitos desenvolvimentos ao longo dos anos—desde a perda de coerência quântica até ao "darwinismo" quântico, passando pela recente hipótese de medição-equilibrada, que colocam todas estas questões no contexto adequado de Mecânica Quântica Estatística de muitos-corpos, e lhes dão respostas já bastante completas [22]. Assim sendo, em nossa opinião, estas questões dizem respeito, como já o afirmamos acima, à harmonização da "Teoria de Tudo" com a descrição não quântica da gravitação. No contexto do Universo primitivo, tal implica, como já o dissemos, na compatibilidade com a inflação cosmológica.

Os autores agradecem a Alex Bernardini pela leitura crítica do manuscrito.

Referências

[1] Stephen W. Hawking e Roger Penrose, "A Natureza do Espaço e do Tempo", (Gradiva 1996).
[2] S. Weinberg, "Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature" (Vintage Books 1994).
[3] O. Bertolami, "The Spirit of Unification: The Wei of Physics", arXiv:1005.2918 [physics.hist-ph] (2010).
[4] J. Oppenheim "Is it time to rethink quantum gravity?", arXiv:2310.12221v1 [gr-qc] (2023).
[5] M. J. Duff, "Inconsistency Of Quantum Field Theory In Curved Space-Time", in Quantum Gravity II: A Second Oxford Symposium, edited by C. J. Isham, R. Penrose, and D. W. Sciama (Clarendon, Oxford 1981).
[6] J. F. Donoghue, "General Relativity as an Effective Field Theory: The Leading Quantum Corrections," Phys. Rev. D 50, 3874 (1994); arXiv:gr-qc/9405057.
[7] E. Álvarez, "Quantum Gravity", arXiv:gr-qc/0405107 (2004).
[8] M.B. Greene, J.H. Schwarz, E. Witten, "Superstring Theory", (Cambridge University Press 1987).
[9] C. Rovelli, "Quantum Gravity" (Cambridge Monographs on Mathematical Physics 2004).
[10] T. Thiemann, "Modern Canonical Quantum General Relativity", (Cambridge University Press 2007).
[11] M. Faizal, L.M. Krauss, A. Shabir, F. Marino, B. Pourhassan, "Quantum gravity cannot be both consistent and complete", arXiv: 2505.11773 [gr-qc] (2025).
[12] M.D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model", (Cambridge University Press 2014).
[13] M.B. Green, J.H. Schwarz, "Anomaly Cancellation in Supersymmetric D=10 Gauge Theory and Superstring Theory", Phys. Lett. B149, 117 (1984).
[14] P. Candelas, G.T. Horowitz, A. Strominger, E. Witten, "Vacuum Configurations for Superstrings", Nucl. Phys. B258, 46 (1985).
[15] E. Witten, "String Theory Dynamics in Various Dimensions", Nucl. Phys. B443, 85 (1995).
[16] A. Strominger, C. Vafa, "Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy", Phys. Lett. B379, 99 (1996).
[17] S.W. Hawking, "Particle Creation by Black Holes", Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
[18] J.M. Maldacena, "The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity", Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998).
[19] Wojciech H. Zurek, "Decoherence and the transition from quantum to classical – REVISITED", arXiv: quant-ph/0306072.
[20] J.B. Hartle, S.W. Hawking, "Wave function of the Universe", Phys. Rev. D 28, 2960-2975 (1983).
[21] O. Bertolami, "Seeding the vacuum with entropy: the Chaplygin-like vacuum hypothesis", Class. Quant. Grav. 40, 7, 177002 (2023).
[22] E. Schwarzhans, F.C. Binder, M. Huber, M.P.E. Lock, "Quantum Measurements and Equilibration: the Emergence of Objective Outcomes via Entropy Maximisation", e-Print: 2302.11253 [quant-ph].


Orfeu Bertolami nasceu em São Paulo, Brasil, em 1959. Graduado em Física pela Universidade de São Paulo em 1980, obteve o mestrado no Instituto de Física Teórica em São Paulo em 1983, o Grau Avançado em Matemática em 1984 e o doutoramento em Física Teórica em 1987, respetivamente nas Universidades de Cambridge e Oxford no Reino Unido. Desenvolveu atividades de investigação no Institut für Theoretische Physik em Heidelberg (1987–1989), no CERN (1993–1995) em Genebra, na secção de Turim do Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (1994) e na Universidade de Nova Iorque (1999). Foi professor no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico (1991–2010), e é Professor Catedrático no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Publicou mais de quatro centenas artigos científicos, em livros, jornais, atas de conferências, mais de 230 dos quais em revistas especializadas com arbitragem nas áreas da astrofísica, cosmologia, física e propulsão espacial, gravitação clássica e quântica, teorias de cordas quânticas e sobre a física do Sistema Terrestre. O seu livro mais recente "Fundamentos de Termodinâmica e Mecânica Estatística", foi publicado pela Universidade do Porto Press em 2025 e "Introdução à Relatividade Geral", será publicado pela mesma editora em 2026. Foi galardoado com o terceiro prémio da Gravity Research Foundation dos Estados Unidos em 1999, com o Prémio União Latina de Ciência em 2001, o Prémio Universidade Técnica de Lisboa/Santander Totta de excelência científica nas áreas de Biofísica e Física em 2007, e nomeado Outstanding Referee pela American Physical Society em 2013. Colaborou em projetos europeus no estudo da estrutura microscópica do espaço-tempo, da física da matéria escura e da energia escura, em problemas de física fundamental no espaço e sobre a física do Sistema Terrestre e das alterações climáticas em colaboração com o Stockholm Resilience Centre.





Ricardo Schiappa nasceu em Lisboa e cresceu nos seus arredores. Licenciou-se em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico em 1994 tendo vindo a doutorar-se 5 anos mais tarde, em 1999, pelo Massachusetts Institute of Technology nos Estados Unidos. Foi depois disso investigador de pós-doutoramento na Universidade de Harvard e Fellow no CERN. De regresso a Portugal ingressou de volta no Instituto Superior Técnico onde atualmente é Professor Catedrático em Física-Matemática. O seu trabalho de investigação revolve em torno de questões matemáticas não-perturbativas na formulação de teorias de gravitação quântica, em particular teoria de cordas, com especial ênfase nas relações com a teoria da ressurgência e teorias de matrizes aleatórias. Ao longo dos anos foi cientista convidado em diversas instituições internacionais, incluindo o CERN, a Universidade de Genebra, a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, e a Universidade de Cambridge, bem como foi ou é investigador principal ou investigador participante em diversos projetos internacionais nestas áreas, financiados pela Swiss National Science Foundation, a European Science Foundation, e o European Research Council. Em 2011 foi Prémio Científico UTL/Santander-Totta, em 2017 selecionado para os destaques do Jornal of Physics A: Mathematical and Theoretical, e em 2019 professor visitante distinguido no IHES em Paris.

# Como a Física Quântica impulsiona a investigação em Fusão e Plasmas Extremos

Marija Vranic[1], Bruno Gonçalves[2]

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

marija.vranic@tecnico.ulisboa.pt[1], bruno@ipfn.tecnico.ulisboa.pt[2]

**Resumo**

Os plasmas são gases ionizados compostos por partículas carregadas em movimento. Esta "sopa" de cargas interage com campos elétricos e magnéticos podendo, por exemplo, ser acelerada até altas energias ou "blindar" estes campos. Considera-se que um plasma é extremo quando os campos eletromagnéticos são tão intensos que produzem efeitos relativísticos e quânticos, podendo até dar origem à criação de pares de partículas e antipartículas. A fusão é o processo em que os núcleos atómicos de elementos leves se combinam para formar núcleos mais pesados, libertando grandes quantidades de energia. Este é o mecanismo que alimenta as estrelas no seu núcleo e os cientistas tentam recriá-lo de maneira controlada em laboratório para no futuro ser possível produzir energia limpa e abundante.

## Introdução

*Porquê a fusão?*

A fusão tem o potencial de fornecer uma fonte de energia quase inesgotável, gerando eletricidade sem as emissões nocivas associadas aos combustíveis fósseis. Ao contrário das centrais de fissão atuais, a fusão gera muito menos resíduos radioativos, o que a torna uma alternativa ambientalmente mais favorável. Os combustíveis primários da fusão, como os isótopos do hidrogénio — deutério e trítio — são abundantes. O deutério pode ser obtido da água do mar, enquanto o trítio pode ser gerado a partir do lítio, tornando a fusão uma opção energética sustentável a longo prazo, capaz de suprir as crescentes necessidades energéticas.

Além da energia limpa e do combustível abundante, os dispositivos de fusão são intrinsecamente seguros e eficientes. Num contexto de alterações climáticas, a fusão nuclear oferece um caminho viável para reduzir as emissões de carbono e substituir os combustíveis fósseis, alinhando-se com os objetivos de um futuro sustentável e com baixa intensidade carbónica. A maior iniciativa europeia da fusão é o projeto EUROfusion [1].

*Para que mais servem os plasmas?*

Para além da fusão, a investigação fundamental em plasma é essencial porque os plasmas — o quarto estado da matéria — estão no centro de muitas tecnologias que nos beneficiam diariamente. Por exemplo, a compreensão dos plasmas permite desenvolver fontes avançadas de partículas e radiação usadas em imagiologia médica e tratamentos oncológicos, melhorando diagnósticos e terapias. A investigação em plasma é também crucial para conceber aceleradores de partículas compactos e aperfeiçoar técnicas de imagem, vitais para a descoberta científica, segurança nacional e exploração espacial.

Sabia que mais de 99.% do universo visível existe em forma de plasma? Isso faz da compreensão dos plasmas não só uma curiosidade científica, mas também uma chave para desbloquear novos saltos tecnológicos no futuro.

## Fusão e fissão

*Fusão no Sol*

A 15 milhões graus Celsius, o núcleo do Sol transforma o hidrogénio em plasma, onde os eletrões são arrancados dos átomos, deixando um mar de iões carregados. Sob a imensa gravidade solar, os núcleos de hidrogénio, extremamente quentes e rápidos, colidem com força suficiente para vencer a repulsão elétrica e fundirem-se formando hélio. Este processo ocorre em três etapas: dois protões fundem-se, com um deles convertendo-se em neutrão e formando deutério; o deutério funde-se com outro protão para produzir hélio-3; finalmente, dois núcleos de hélio-3 colidem, formando hélio-4 e libertando dois protões (Fig. 1). A energia libertada ao converter quatro protões num núcleo de hélio é imensa — cerca de 10 milhões de vezes superior à energia de reações químicas como a combustão do hidrogénio com o oxigénio. No seu núcleo, o Sol funde 620 milhões toneladas métricas de hidrogénio por segundo, cuja energia alimenta a sua luminosidade e, em última instância, a vida na Terra.

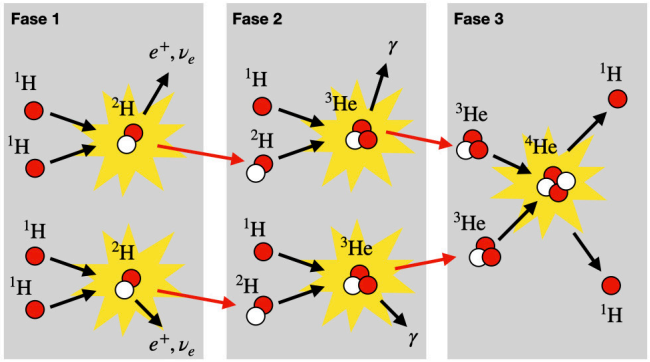



Figura 1 - Processo em que núcleos de hidrogénio fundem-se para formar hélio. Fusão no Sol (© M. Vranic, GoLP)

**Qual é a diferença entre a fusão e a fissão?**
A fissão e a fusão libertam grandes quantidades de energia, mas operam por mecanismos distintos. A fusão junta átomos e fissão separa-os.

*Fissão: partir átomos pesados*
A fissão é usada nas centrais nucleares atuais. Um átomo pesado como o urânio absorve um neutrão e torna-se instável, fragmentando-se em átomos mais leves — por exemplo iodo, césio, estrôncio, xénon e bário — e libertando energia e neutrões adicionais. Esses neutrões podem induzir mais fissões, criando uma reação em cadeia auto-sustentada que produz energia estável numa central; sem controlo, essa reação pode ser catastrófica. Os reatores modernos empregam sistemas de controlo e procedimentos de segurança, e existem regulamentos rigorosos sobre a sua segurança e proliferação.

*Fusão: juntar átomos leves*
A fusão combina núcleos leves para formar núcleos mais pesados. Na reação mais estudada para produção de energia, dois isótopos do hidrogénio — deutério e trítio — fundem-se para formar um núcleo de hélio e libertar energia. A fusão é fundamentalmente diferente da fissão: não existe uma reação em cadeia. A fusão exige condições muito específicas e extremas (altas temperaturas, equilíbrio preciso do combustível, baixa contaminação e campos magnéticos cuidadosamente configurados em dispositivos como tokamaks), pelo que a reação é naturalmente limitada — caso as condições saiam do intervalo necessário, a fusão enfraquece ou cessa. Essa sensibilidade inerente explica porque é que a fusão é considerada intrinsecamente segura. Alcançar e manter essas condições é o principal desafio científico e de engenharia atualmente; por isso a fusão ainda está em desenvolvimento enquanto que a fissão já fornece eletricidade hoje.

A escolha entre fusão ou fissão para um elemento químico depende se tem o núcleo "fortemente ligado". Os nucleões são ligados pela força nuclear forte — "forte ligação" significa que a força nuclear é usada de forma eficiente, tornando os núcleos estáveis e difíceis de separar. Os núcleos mais fortemente ligados situam-se perto do ferro (26 protões). Assim, pode libertar-se energia ao partir núcleos muito grandes (como o urânio, com 92 protões) ou ao fundir núcleos muito leves (como o hidrogénio, que só tem 1 protão). Ambos os processos convertem energia nuclear em calor para gerar vapor e mover turbinas, mas apresentam riscos e desafios técnicos distintos.

**Fusão, plasmas extremos e interação quântica**
*A visão clássica da fusão*
Imagine uma mesa de bilhar cheia, onde bolas colidem ocasionalmente e se juntam uma com outra. Substitua essas bolas neutras por minúsculas esferas positivas que se repelem. Nos materiais usuais, os núcleos dos átomos permanecem rodeados por nuvens de eletrões que impedem o contacto; para fundir, dois núcleos precisam aproximar-se o suficiente para que a força nuclear forte os una, superando a repulsão elétrica. Aquecer um gás até plasma dá às partículas energia suficiente para que as colisões venham a vencer essa repulsão — quanto mais quente o plasma, mais rápidas e frequentes as colisões e maior a probabilidade de fusão. A fusão em condições de laboratório usa a reação entre deutério (2H) e trítio (3H) para libertar energia (Fig. 2).

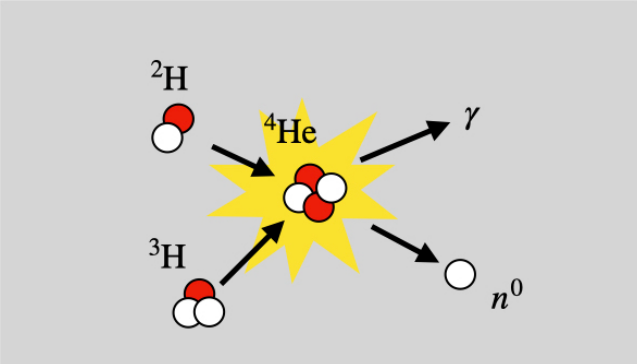


Figura 2 - Reação de fusão entre deutério (2H) e trítio (3H) para gerar energia. Fusão na Terra (© M. Vranic, GoLP)

*Mecânica quântica na fusão: efeito túnel e a janela de Gamow*
Mesmo quando os núcleos não têm energia cinética suficiente para ultrapassar a barreira elétrica, a mecânica quântica oferece um atalho chamado o efeito túnel. Em vez de precisar da energia clássica completa, um núcleo tem uma probabilidade de "atravessar a barreira", permitindo a fusão em energias inferiores às clássicas. Essa probabilidade decresce rapidamente com a energia, por isso a fusão num plasma quente é dominada por uma faixa estreita de energias — a janela de Gamow [2] — onde existe um compromisso entre a frequência de partículas e a probabilidade de tunelamento. Efeitos quânticos aparecem também em diagnósticos e tecnologia quântica, por exemplo na ótica quântica usada em diagnósticos de plasma e em processos quânticos nas superfícies em contacto com plasma que afetam a perda e aprisionamento de átomos de hidrogénio.

*Mecânica Quântica em Plasmas Extremos*
Em plasmas extremos, a mecânica quântica altera regras familiares. A densidades elevadas, os eletrões formam uma "nuvem" quântica que "blinda" a carga positiva dos núcleos, suavizando a barreira repulsiva e facilitando a fusão. Quando as funções de onda se sobrepõem, a estatística quântica regula a ocupação de estados, alterando pressão, capacidade calorífica e comportamento de colisões relativamente ao gás clássico. As colisões deixam de ser apenas impactos de bolas de bilhar e passam a ser interações quantizadas mediadas por ondas e fotões: as partículas trocam os quanta discretos da energia e as oscilações coletivas (ondas de plasma) transportam energia e momento a longas distâncias. Em regimes extremos — em densidades ultra-altas, campos ultra-intensos ou temperaturas ultra-relativistas — a eletrodinâmica quântica (QED) mistura-se com estes fenómenos coletivos: campos intensos criam pares matéria-antimatéria (Fig. 3) a partir do vácuo, o arrefecimento radiativo quântico afeta as trajetórias de partículas. O resultado é uma interação complexa onde processos quânticos de partícula isolada e comportamentos coletivos coexistem, sendo essencial compreender estes efeitos para astrofísica de alta energia e para experiências avançadas de fusão.

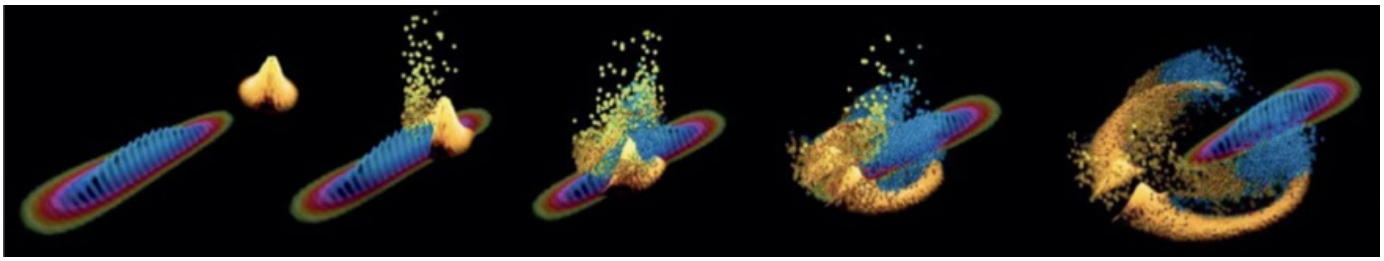


Figura 3 - Criação de antimatéria (mais precisamente, pares electrão-positrão) em interação dum laser ultra-intenso com um feixe de electrões (© M. Vranic, GoLP)

*Simulação quântica de plasmas*

No centro dos progressos modernos em física de plasmas está a capacidade de efetuar modelação computacional sofisticada. O plasma é um meio altamente não linear: pequenas variações nas condições iniciais podem produzir resultados muito diferentes, tornando insuficiente a abordagem puramente analítica. Os cientistas recorrem a supercomputadores com muitos processadores paralelos para modelar o movimento de milhares de milhões de partículas e a sua interação com campos eletromagnéticos. Mesmo usando cerca de um milhão de processadores, a simulação frequentemente não é suficiente para atingir a resolução desejada ou escala completa. Assim, cada avanço substancial em computação tem andado de mãos dadas com descobertas em plasma.

A computação quântica promete transformar a computação fundamentalmente. Pode revolucionar a modelação de sistemas grandes ao processar informação de forma exponencialmente mais eficiente do que computadores clássicos, usando propriedades de qubits. O potencial de aumento exponencial de informação armazenável significa que futuras simulações quânticas poderão alcançar precisão inédita, permitindo simular moléculas complexas, materiais, amostras biológicas e processos de plasma com maior fidelidade, o que pode catalisar avanços em medicina, novos materiais e no entendimento fundamental do universo.

*Fusão por confinamento magnético (MCF) e Fusão por confinamento inercial (ICF)*

Na abordagem MCF, o combustível de fusão é aquecido a temperaturas de milhões graus Celsius para formar um plasma que é depois confinado por campos magnéticos intensos, evitando o contacto com as paredes da máquina. Os sistemas MCF podem operar de forma contínua, o que é vantajoso para produção estável de energia. Um projeto emblemático é o ITER [3], em França, cujo objetivo é demonstrar a viabilidade da fusão em larga escala e com neutralidade carbónica. Um dos grandes desafios da MCF é manter temperatura e tempo de confinamento necessários para a fusão.

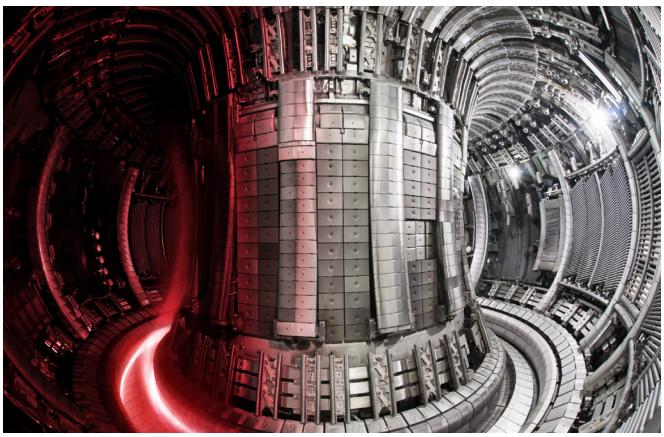


Figura 4 - Dentro de "Joint European Torus tokamak (JET)" em Culham, UK (© UKAEA, courtesy of EUROfusion)

A ICF adota uma estratégia distinta, comprimindo um pequeno globo de combustível por pulsos intensos de energia de lasers de alta potência. A camada exterior do globo é rapidamente aquecida e comprimida, levando o núcleo a condições extremas por curtos instantes (nanosegundos). O *National Ignition Facility* (NIF [4]) demonstrou recentemente "um ganho" em ICF (mais energia libertada do que investida em plasma), mas o desafio chave continua a ser atingir e manter as condições de ignição perante o comportamento não linear do plasma.

**A nossa investigação**

*Investigação em fusão magnética no IST*

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) participa ativamente no Programa Europeu de Fusão desde 1989. Em 2014, as atividades europeias foram coordenadas pelo consórcio EUROfusion, do qual o IPFN/IST é membro. O IPFN contribui com atividades experimentais e teóricas, formação avançada em engenharia e divulgação nas suas áreas de excelência: engenharia e integração de sistemas (diagnósticos por micro-ondas, controlo e aquisição de dados, manutenção remota), teoria e modelação, operação de tokamaks e caracterização de materiais. Em consonância com o roadmap europeu, as atividades do IPFN centram-se na construção e operação do ITER, na exploração científica dos dispositivos JET (Fig. 4 e 5) e ASDEX Upgrade, e no contributo para o desenho conceptual do DEMO. O programa inclui formação em Portugal (principalmente ligada ao tokamak ISTTOK) e no estrangeiro, bem como colaboração com a indústria emergente de fusão (p.ex. Proxima Fusion, Next Step Fusion, GeneralFusion). Mais informação em https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/research.

*Plasmas extremos, ICF e simulação quântica no IST*

No Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP) do IPFN colaboramos com equipas mundiais para estudar física de plasmas extremos em contextos astrofísicos e laboratoriais. Desenvolvemos aceleradores e fontes de radiação baseados em plasma para imagens e investigações; estudamos a criação de plasmas de pares matéria-antimatéria em laboratório para investigar a sua dinâmica coletiva; investigamos o comportamento da matéria sob campos eletromagnéticos extremos, os mecanismos de aceleração em choques e a possibilidade de plasmas com propriedades eletromagnéticas exóticas. A nossa investigação fundamental interliga-se com questões centrais da ICF— questões

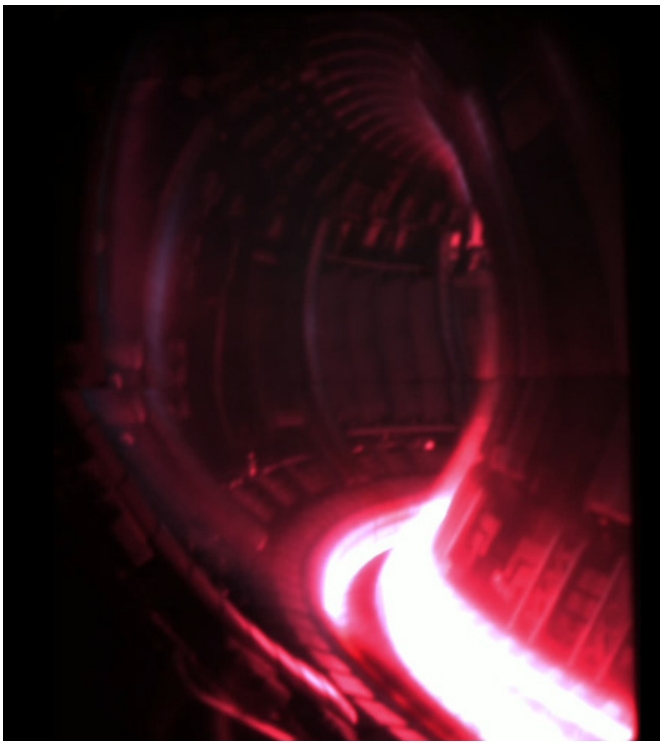


Figura 5 - Recorde de fusão (ref. #99971) usando 2H e 3H no Joint European Torus (JET) em Culham (© UKAEA, courtesy of EUROfusion)

como “Podem métodos avançados de ignição tornar a fusão inercial viável?” ou “Como desenvolver os lasers com potência acima do exawatt?”.

As nossas equipas utilizam os maiores supercomputadores (EuroHPC [5]), os lasers mais intensos (Extreme Light Infrastructure [6], Laserlab [7]), aceleradores e fontes de luz (CERN, SLAC, European XFEL). Desenvolvemos métodos de simulação de ponta e trabalhamos em algoritmos quânticos para aplicações futuras. Gerimos quatro laboratórios experimentais, fazendo do GoLP o maior polo de investigação em fotónica em Portugal. Mais informação em https://web.tecnico.ulisboa.pt/marija.vranic/ e https://golp.tecnico.ulisboa.pt/.

## Conclusão

Os plasmas são um dos atores principais na procura por energia de fusão, praticamente ilimitada e de baixo carbono; contudo, realizar esse potencial obriga a integrar física coletiva e processos quânticos — desde o efeito túnel e blindagem, até à produção de pares e outros efeitos QED — com avanços em lasers, confinamento magnético e simulações na escala do exa-flop (e, no futuro, quânticas). Persistem desafios fundamentais de física e engenharia — controlo da turbulência e instabilidades, otimização do confinamento e do abastecimento de combustível, e materiais capazes de resistir a campos e fluxos intensos — pelo que a fusão permanece uma fronteira onde a microfísica quântica, o comportamento coletivo e a engenharia de sistema devem convergir para tornar possível uma fonte de energia segura e escalável.


Referências

[1] Eurofusion: https://euro-fusion.org/
[2] “Nuclear reactions in stars” (NRS): https://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~idh/PHAS2112/Lectures/Current/Part7.pdf
[3] ITER: https://www.iter.org/
[4] Inertial Fusion (LLNL): https://lasers.llnl.gov/science/achieving-fusion-ignition
[5] EuroHPC: https://www.eurohpc-ju.europa.eu/
[6] Extreme Light Infrastructure (ELI): https://www.eli-laser.eu/
[7] Laserlab Europe: https://laserlab-europe.eu/





Marija Vranic é Professora Auxiliar no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa. Obteve o mestrado na Universidade de Belgrado (Sérvia) e o doutoramento no IST. Após o doutoramento trabalhou no Extreme Light Infrastructure em Praga (República Checa) antes de regressar para Portugal. A sua investigação centra-se em plasmas em condições extremas, onde efeitos quânticos influenciam a dinâmica coletiva do plasma. A Marija recebeu o prémio internacional John Dawson para a melhor tese de doutoramento, o IBM Scientific Prize, o IUPAP Young Scientists Award e o Ada Lovelace PRACE Award, reconhecimentos pelo seu contributo científico e em computação de alto desempenho. Foi membro eleito do “Seminário de Jovens Cientistas” da Academia das Ciências de Lisboa. A Prof.ª Vranic lidera a equipa Strong Field, Plasmas and Quantum (SFPQ) no Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP) do IPFN. A equipa combina teoria analítica e supercomputação para estudar efeitos quânticos na dinâmica de plasmas extremos, relevantes para experiências de ponta com os lasers mais intensos do mundo. Estes trabalhos visam reproduzir condições astrofísicas extremas em laboratório e aprofundar a compreensão desses sistemas em ambientes controlados. A equipa SFPQ explora ainda computação quântica para desenvolver algoritmos específicos para problemas de plasma, preparando-se para aproveitar o pleno potencial de hardware quântico no futuro.





Bruno Miguel Soares Gonçalves licenciou-se em Engenharia Física pelo Instituto Superior Técnico (1997), tem Mestrado em Física (IST/UTL, 2000) e doutoramento em Engenharia Física (IST/UTL, 2003). Em 2005 a sua tese de doutoramento foi distinguida com o European Physical Society Plasma Division PhD Research Award. Em fevereiro de 2012 obteve a Habilitação para o Exercício de Funções de Coordenação Científica em Engenharia Física Tecnológica. É Investigador Coordenador no Instituto Superior Técnico, Presidente do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (desde maio de 2012) e responsável pelo Grupo de Engenharia e Integração de Sistemas do IPFN. Liderou diversos projetos nas áreas de desenvolvimento de diagnósticos para dispositivos de fusão e de sistemas de controlo e aquisição de dados. É coinventor de oito patentes concedidas, coautor de um capítulo de livro, autor de 135 artigos em revistas internacionais e de 62 comunicações em atas de conferências. Participa em vários comités científicos internacionais e é delegado nacional no Conselho de Administração da Eurofusion e na Governing Board da Fusion for Energy. Bruno tem vasta experiência em comunicação científica junto de públicos alargados, em conferências, televisão e rádio. Fala sobre energia, energia nuclear e fusão nuclear, bem como sobre comunicação científica. É autor do livro “Nuclear Fusion in the Age of Climate Change” (disponível gratuitamente online: https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/fusao_nuclear_alteracoes_climaticas/download.html).

26
artigo geral
VOL. 48 - N.3

# Materiais quânticos: como a Física da Matéria Condensada transforma o mundo

Bruno Amorim[1], Eduardo V. Castro[1], João V. Lopes[1], Vítor M. Pereira[1], Pedro Ribeiro[2]

[1]Centro de Física das Universidades do Minho e Porto, LaPMET, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
[2]CeFEMA, LaPMET, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

evcastro@fc.up.pt

**Resumo**
Este artigo traça a evolução da física da matéria condensada, desde os fundamentos quânticos estabelecidos na década de 1920 até aos materiais quânticos que definem a atual fronteira de investigação. Explora como a mecânica quântica está na base de fenómenos emergentes como supercondutividade, magnetismo e fases topológicas, e destaca marcos chave neste percurso desde o nascimento da teoria quântica, incluindo o transístor, o grafeno e os efeitos de Hall quântico. Interligando os avanços teóricos fundamentais com os tecnológicos, o artigo ilustra o impacto contínuo dos materiais quânticos na computação, na eletrónica e nas tecnologias quânticas do futuro.

**Introdução**
A física da matéria condensada estuda sistemas com um grande número de constituintes microscópicos e as propriedades que emergem do seu comportamento coletivo. Quando dizemos grande, pensamos em números da ordem da constante de Avogadro, $10^{23}$. É o número típico de átomos num centímetro cúbico de materiais tão distintos como o diamante ou a grafite; ambos formados exclusivamente por átomos de carbono, mas com propriedades emergentes muitos diferentes. O brilho, ou a ausência dele, depende da forma como os eletrões do material interagem com a luz incidente. Sendo o comportamento dos eletrões determinado pela mecânica quântica, não surpreende que esta tenha um papel essencial na física da matéria condensada.

Propriedades eletrónicas como o caráter isolador ou metálico, o magnetismo do íman que colocamos no frigorífico, ou a supercondutividade utilizada em sistemas de diagnóstico por ressonância magnética na área da saúde, são explicadas aplicando a mecânica quântica a sistemas de muitas partículas. Por incidir sobretudo em sistemas na fase sólida, esta área foi inicialmente designada de Física do Estado Sólido. Atualmente, o termo Matéria Condensada é mais abrangente, incluindo também um vasto conjunto de sistemas conhecido por "matéria mole" onde a mecânica quântica não desempenha um papel tão central: líquidos, polímeros, meios coloidais, cristais líquidos, meios granulares, entre outros. No entanto, não se pense que a mecânica quântica é irrelevante para todos os fluidos: um superfluido é um fluido que apresenta propriedades quânticas macroscópicas, como a ausência de viscosidade, que lhe permite fluir sem dissipação de energia. Um exemplo clássico é o isótopo de $He^3$ a temperaturas extremamente baixas.

Na primeira parte deste artigo, dedicada ao passado, vamos centrar-nos na física do estado sólido e no papel da mecânica quântica no seu desenvolvimento. Como veremos, uma parte muito significativa do impacto societal da primeira revolução quântica ocorreu através da física do estado sólido. Na segunda parte iremos olhar para o presente/futuro, explorando o potencial dos materiais quânticos nas tecnologias associadas à segunda revolução quântica.

**A física do estado sólido e os primórdios da mecânica quântica**
A 29 de julho de 1925, Werner Heisenberg submeteu à Zeitschrift für Physik um artigo intitulado "*Sobre uma reinterpretação teórica quântica da cinemática e das relações mecânicas*" [1]. Este trabalho estabeleceu as bases daquilo que hoje conhecemos como formulação matricial da mecânica quântica. Em setembro do mesmo ano, Born e Jordan publicaram "*Sobre a mecânica quântica*" [2], consolidando essa formulação e apresentando-a numa forma que os físicos de hoje provavelmente entenderiam. Dois meses depois, Born, Heisenberg e Jordan assinam um artigo que muitos consideram a primeira exposição completa dos fundamentos da mecânica quântica moderna na sua formulação matricial [3]. Em 1932, Heisenberg recebeu o Prémio Nobel da Física pela criação da mecânica quântica e, em cartas enviadas a Jordan e a Born, expressou o seu desagrado por o prémio não ter sido partilhado com eles [4].

O ano de 1925 foi sem dúvida decisivo para a mecânica quântica e esse facto seguramente pesou na escolha das Nações Unidas para declarar 2025 como *Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas*; o ano em que se celebram 100 anos do nascimento da mecânica quântica. O leitor talvez conheça melhor o nome de Erwin Schrödinger, cuja famosa equação de onda só seria publicada em 1926 [5], estabelecendo a mecâni-

ca quântica ondulatória e mostrando a sua equivalência à formulação matricial de Heisenberg. Schrödinger viria a receber o Nobel em 1933, um ano depois de Heisenberg.

Entre 1925 e 1927 foram publicados cerca de 200 artigos que consolidaram a nova teoria e a aplicaram a problemas de física atómica. Quando, em 1928, Felix Bloch aplica a equação de Schrödinger ao problema dos eletrões num cristal [6], a teoria era jovem mas já sólida. O *teorema de Bloch*, então formulado e hoje ensinado em qualquer curso de física, mostra que as soluções da equação de Schrödinger num potencial periódico são ondas planas moduladas pela periodicidade do cristal: *as ondas de Bloch*. Ou seja, as soluções não diferem muito das encontradas para eletrões livres no vácuo, e têm a característica de se estenderem uniformemente por todo o material. Esta ideia está na base da mobilidade dos eletrões necessária para a condução elétrica. Curiosamente, o trabalho de 1928 foi publicado enquanto Bloch era aluno de doutoramento, tendo como orientador ninguém menos que Heisenberg. Bloch receberia o Nobel em 1952 pelo desenvolvimento de novos métodos para medir com precisão o magnetismo nuclear, conduzindo a descobertas como a ressonância magnética nuclear.

Três anos após a contribuição de Bloch surge o modelo de Kronig-Penney [7], que oferece uma base simples para entender a origem de bandas e hiatos ("gaps") de energia nos sólidos cristalinos. O espectro de energia deixa de ser contínuo como no eletrão livre e passa a apresentar intervalos permitidos (bandas) separados por intervalos proibidos (hiatos). Este conceito fornece, desde logo, a base microscópica para a classificação dos materiais entre isolantes, semicondutores ou condutores de corrente elétrica. Sobretudo, é fundamental para compreender as propriedades eletrónicas dos semicondutores, os quais, dependendo do material, apresentam hiatos desde 0,1 eV a 4 eV entre a banda de valência (a última preenchida com eletrões) e a banda de condução (a primeira vazia de electrões). A investigação em semicondutores permitiria a invenção do *transístor* em 1947; um marco que valeu o Nobel a Bardeen, Brattain e Shockley em 1956. O transístor é o componente eletrónico central na revolução tecnológica do século XX. O computador onde se escreve este texto tem mais de mil milhões no seu processador. Número semelhante ao que encontra no seu smartphone.

*O legado de Anderson*

A mesma mecânica quântica que prevê os estados (estendidos) de Bloch também explica fenómenos como a localização eletrónica em sistemas desordenados. Por desordem entende-se qualquer desvio ao potencial periódico sentido pelos eletrões no cristal perfeito. Ainda que as técnicas modernas de síntese de materiais permitam reduzir muito a desordem, ela é inevitável: até os melhores condutores apresentam uma resistividade finita, mesmo a baixa temperatura, e isso deve-se à desordem. Em 1958, Philip Anderson descobriu que a presença de desordem pode fazer com que as ondas de Bloch deem lugar a soluções espacialmente localizadas [8]. Ou seja, o sistema passa a ser um isolador, não porque o hiato que separa as bandas de valência e de condução seja elevado (como, por exemplo, no diamante), mas porque os eletrões se encontram localizados em certas regiões do material e daí não conseguem sair. Este fenómeno ficaria conhecido por *Localização de Anderson* e a sua descoberta valeu a Anderson o Nobel da Física em 1977.

O papel de Anderson na física da matéria condensada vai muito além da descoberta da localização eletrónica, sendo amplamente reconhecido pelas suas profundas contribuições para a compreensão teórica do magnetismo, da supercondutividade, da superfluidez e, de forma mais geral, das propriedades emergentes em sistemas quânticos com número macroscópico de partículas. Com efeito, Anderson é pioneiro do conceito de *Propriedades Emergentes* em matéria condensada. O seu artigo "*Mais é diferente*" [9], publicado em 1972 na revista *Science*, ilustra a ideia de forma clara: o comportamento de sistemas complexos feitos de muitas partículas não pode ser compreendido por simples extrapolação das propriedades dos seus constituintes elementares. Por exemplo, conhecer todas as propriedades do átomo de carbono não permite inferir que a grafite é opaca com um brilho metálico e o diamante transparente.

*As fases da matéria e a mecânica quântica*

Algumas das propriedades emergentes mais interessantes dos materiais têm origem no comportamento intrinsecamente quântico da matéria. Magnetismo e supercondutividade são dois excelentes exemplos.

Para compreender o magnetismo dos materiais é essencial considerar o comportamento quântico dos eletrões nos átomos que constituem o material e a forte interação de Coulomb entre eles. Heisenberg foi um dos primeiros a reconhecer que estes eram os ingredientes fundamentais, propondo em 1928 [10] o modelo quântico que ficaria conhecido como *Modelo de Heisenberg*, explicando o ferromagnetismo como um comportamento emergente de certos materiais; algo que a física clássica não conseguia justificar. A investigação e descoberta de diferentes tipos de interação e de ordem magnética permitiria vir a miniaturizar e a integrar estes materiais na revolução tecnológica do século XX, na qual adquirem uma relevância equiparada à do transístor: enquanto que os últimos operam o processamento da informação, o seu armazenamento e leitura dependem diretamente de materiais magnéticos, nos discos rígidos, por exemplo.

Outro exemplo notável é a supercondutividade; fenómeno caracterizado pela ausência de resistência elétrica em certos materiais a baixas temperaturas, mesmo (ou melhor, apesar de) na presença de desordem. Descoberta por Kamerlingh Onnes em 1911, feito que lhe valeu o Nobel em 1913, a explicação teórica só surgiria cinquenta e seis anos depois, com o trabalho de Bardeen, Cooper e Schrieffer (BCS) em 1957 [11]. Esse estudo demonstrou que a interação entre eletrões, que no vácuo é apenas a interação de Coulomb repulsiva, pode tornar-se atrativa quando mediada por vibrações da rede cristalina (cujas excitações elementares são conhecidas como fonões). Este efeito é particularmente relevante para os eletrões responsáveis pela condução elétrica nos metais. Quando essa atração efetiva supera a repulsão de Coulomb, o estado metálico

torna-se instável e os eletrões formam Pares de Cooper. Este processo traduz-se numa das transições de fase mais espetaculares na matéria: a correlação quântica desses pares leva à sua condensação num único estado quântico coletivo macroscópico, do qual emerge a propriedade supercondutora. A teoria ficou conhecida como teoria BCS, em homenagem aos seus autores, que em 1972 receberiam o Prémio Nobel da Física. Curiosamente, Bardeen é o mesmo físico que participou na invenção do transístor, fazendo dele o único cientista a ganhar o prémio Nobel da Física duas vezes.

Até ao início da década de 1980, a temperatura crítica dos supercondutores (isto é, a temperatura abaixo da qual surge a supercondutividade) não ultrapassava os 30 K. Chegou a acreditar-se que existiam razões fundamentais que impunham um limite máximo próximo desse valor. Em 1986, a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica, baseados em óxidos de cobre [12], revolucionou o campo e valeu a Bednorz e Müller o Nobel em 1987; um dos prémios atribuídos mais rapidamente na história. Até hoje, não existe consenso sobre o mecanismo responsável pela "cola" entre os eletrões que compõem os pares de Cooper desses materiais. Apesar disso, o potencial destes sistemas para aplicações futuras, incluindo tecnologias quânticas, é enorme. O Nobel da Física de 2025, atribuído a Devoret, Clarke e Martinis por descobertas fundamentais usando circuitos supercondutores, é também um reconhecimento dessa promessa.

**Os materiais quânticos e a segunda revolução**

*Advento dos materiais quânticos*

Retrospetivamente, podemos hoje dizer que a década de 1980 marca a transição para uma nova fase da teoria quântica do estado sólido, muito além da descoberta de supercondutividade a altas temperaturas. Muitos dos problemas fundamentais associados à compreensão microscópica da fenomenologia tradicional dos materiais (metais vs isolantes, magnéticos vs não magnéticos, supercondutores, etc.) estavam conceptualmente consolidados, e a atenção da comunidade começa a migrar para fenómenos onde a mecânica quântica se manifesta de forma mais subtil, global e robusta. O termo central e agregador destes aspetos é *Coerência Quântica*. (A noção de "coerência" é uma característica de fenómenos ondulatórios que, no presente contexto, significa que o estado quântico de um sistema se mantém bem sincronizado no tempo e espaço, permitindo que diferentes estados se possam combinar, propagar e interferir de forma previsível.) Surge assim uma mudança de paradigma: o foco passa dos materiais "convencionais" para sistemas cujas propriedades são determinadas pela coerência quântica, correlações fortes entre eletrões ou características geométricas e topológicas dos estados quânticos. É neste contexto que se consolida a noção moderna de *Materiais Quânticos*.

*O efeito de Hall quântico: quantização e universalidade*

Um marco decisivo desta transição foi a descoberta, em 1980, do *Efeito de Hall Quântico* por Klaus von Klitzing [13], pela qual recebeu o Nobel de 1985. Em amostras semicondutoras bidimensionais sujeitas a campos magnéticos intensos e a temperaturas muito baixas, a resistência de Hall (que classicamente se pode motivar como uma consequência da força de Lorentz sentida pelas cargas elétricas na presença do campo magnético) não varia de forma contínua, mas apresenta patamares quantizados com uma precisão extraordinária, cuja magnitude é determinada apenas por constantes fundamentais. Este resultado não só teve impacto imediato na metrologia (é hoje usado como padrão de resistência e permite a determinação da constante de estrutura fina com elevadíssima precisão), como revelou algo profundamente novo: uma propriedade eletrónica macroscópica *insensível a imperfeições microscópicas do material.*

Rapidamente se compreendeu que esta robustez tinha origem topológica: a quantização do efeito de Hall está associada a uma propriedade dos estados eletrónicos que é globalmente invariante, e não a detalhes locais da estrutura cristalina [14]; é em grande medida aqui que nasce o conceito de *Fase Topológica* em matéria condensada. Poucos anos depois, a descoberta do efeito de Hall quântico fracionário (Laughlin, Störmer e Tsui, Nobel em 1998) revelou um cenário ainda mais rico, no qual correlações fortes entre eletrões dão origem a excitações com carga fracionária, um exemplo extremo de comportamento emergente quântico [15,16]. Em 1988, Duncan Haldane deu um passo concetual, que teve tanto de seminal como de presciente, ao propor um modelo puramente teórico que exibia um efeito de Hall quântico na ausência de campo magnético externo [17]. Embora tenha permanecido vários anos como uma curiosidade teórica, este modelo de Haldane antecipou o conceito de *Efeito de Hall Quântico Anómalo* e tornou-se uma das pedras angulares da física topológica da matéria condensada, reconhecimento que culminaria em 2016 com a atribuição do Prémio Nobel, em conjunto com David Thouless e Michael Kosterlitz.

*Geometria quântica e fases de Berry*

Paralelamente, desenvolvia-se uma compreensão mais profunda do papel da geometria dos estados quânticos. Em 1984, Michael Berry mostrou que um sistema quântico sujeito a uma evolução lenta pode adquirir uma fase adicional que depende apenas do percurso seguido no espaço de parâmetros, e não do tempo nem da dinâmica detalhada [18]; é hoje conhecida como a *Fase de Berry*.

Esta ideia, inicialmente formulada num contexto abstrato ou como uma curiosidade, revelou-se particularmente fértil na física da matéria condensada. Como vimos, nos sólidos cristalinos, os estados eletrónicos organizam-se em bandas de energia. A "*geometria quântica*" dessas bandas (que é definida e descrita, por conceitos que generalizam noções geométricas como curvatura) tem consequências físicas mensuráveis, influenciando desde logo propriedades como o transporte eletrónico, a polarização elétrica ou o magnetismo. Trabalhos seminais como os de Joshua Zak mostraram que mesmo em sistemas unidimensionais existem fases geométricas quantizadas com consequências observáveis [19,20]. A linguagem da geometria e da topologia passa, assim, a integrar de forma natural a descrição quântica dos materiais.

*Isoladores topológicos: uma nova classe de fases da matéria*
Estas ideias culminaram, em meados da década de 2000, na previsão teórica dos Isoladores Topológicos. Em 2005 e 2006, Charles Kane e Eugene Mele [21,22] demonstraram que certos materiais poderiam ser eletricamente isolantes no seu interior, mas apresentar estados condutores nas superfícies, cuja existência é protegida por simetrias fundamentais da matéria, como a simetria de reversão temporal. Estes estados são notavelmente robustos: não podem ser eliminados por desordem ou imperfeições locais, desde que as simetrias sejam preservadas.

A subsequente descoberta experimental de vários isoladores topológicos bidimensionais e tridimensionais confirmou estas previsões e estabeleceu uma nova forma de classificar as fases da matéria, que vai além do paradigma tradicional baseado em quebras de simetria macroscópica. Aqui, a distinção entre fases reside em propriedades globais dos estados quânticos [23]. Este avanço conceptual representa um dos exemplos mais claros de como a mecânica quântica, aliada à topologia, conduz a fenómenos inteiramente novos.

*A emergência dos materiais bidimensionais*
Outro acontecimento transformador ocorreu em 2004, com o isolamento, por Andre Geim e Konstantin Novoselov, do grafeno, que consiste numa única camada de átomos de carbono organizada numa rede plana hexagonal, como num favo-de-mel [24]. Acreditava-se, desde há muitas décadas, que um cristal estritamente bidimensional não poderia existir porque seria instável. O isolamento e a subsequente explosão de trabalho experimental no grafeno não só refutou essa ideia, como revelou um material com propriedades excecionais. Na base dessas propriedades está o facto de os eletrões no grafeno serem descritos por equações análogas às que descrevem partículas ultra-relativistas, regime no qual a equação de Schrödinger (teoria quântica não-relativista) dá lugar à *Equação de Dirac* (teoria quântica relativista) [25]. As implicações são imensas, desde as mais pragmáticas, como serem eletrões com mobilidade eletrónica extremamente elevada, às mais fundamentais, como permitindo recriar fenómenos do domínio ultra-relativista na ponta de um lápis [26]. Por isto e pelo pioneirismo no lançamento deste campo de investigação, Geim e Novoselov foram reconhecidos com o Nobel em 2010.

O grafeno marcou o início do hoje vasto campo de investigação que são os chamados Materiais 2D: materiais com estrutura bidimensional (isto é, com a espessura de apenas um átomo), incluindo dicalcogenetos de metais de transição, isoladores topológicos e, sobretudo a tecnologia de heteroestruturas empilhadas camada a camada [27]. Esta nova abordagem permite uma engenharia sem precedentes das propriedades quânticas da matéria, que se almeja podermos "fazer à medida" de cada necessidade, com aplicações que vão desde transístores atomicamente finos (os mais pequenos do universo!) para integração nos mais variados dispositivos optoeletrónicos e sensores, até à descoberta de nova física fundamental. Por exemplo, a descoberta recente de fases exóticas em bicamadas de grafeno com pequenas rotações, em particular a supercondutividade e estados isolantes correlacionados que emergem a ângulos de rotação particulares [28], demonstrou como pequenas variações geométricas podem alterar drasticamente o comportamento quântico coletivo. Estes sistemas definem-se cada vez mais como "laboratórios" privilegiados para estudar a interação entre correlação eletrónica, topologia e supercondutividade.

*Supercondutividade, topologia e computação quântica*
A supercondutividade, já referida acima como um fenómeno quântico coletivo, adquiriu nas últimas décadas um novo protagonismo tecnológico. Supercondutores são hoje uma das plataformas mais avançadas para a realização de "qubits", os blocos fundamentais da computação quântica. Circuitos supercondutores permitem controlar estados quânticos macroscópicos com grande precisão e integrá-los em arquiteturas escaláveis, compatíveis com técnicas da microeletrónica.
A interseção entre supercondutividade e topologia abriu ainda a possibilidade de realizar qubits topologicamente protegidos, baseados em excitações conhecidas como estados de Majorana [29]. Nestes sistemas, a informação quântica é codificada de forma não local, tornando-a intrinsecamente mais robusta à perda de coerência, que é um dos principais obstáculos práticos à computação quântica. O reconhecimento recente do papel central dos circuitos supercondutores nas tecnologias quânticas, refletido na atribuição do Prémio Nobel de 2025, sublinha a importância contínua da física da matéria condensada neste domínio.

*Pontos quânticos e qubits em estado sólido*
Outra abordagem fundamental à computação quântica em estado sólido baseia-se nos chamados *Pontos Quânticos* ("quantum dots"), talvez melhor traduzidos como *Átomos Artificiais*, que consistem em nanoestruturas semicondutoras que confinam eletrões em todas as direções, funcionando literalmente como átomos artificiais [30]. Estes sistemas permitem um controlo preciso do número de eletrões e do seu spin. Em 1998, Daniel Loss e David DiVincenzo propuseram o spin de um eletrão num ponto quântico como qubit físico [31], lançando as bases de uma linha de investigação crucial à realização prática das *Tecnologias Quânticas*. Este trabalho foi fundacional em vários aspectos; um deles é a sistematização dos agora chamados "critérios de DiVincenzo" para a exequibilidade de computação quântica em escala; outro é a ênfase na necessidade de encontrar plataformas de estado sólido como garante "natural" desses critérios. A grande vantagem das abordagens em estado sólido reside na sua escalabilidade: ao contrário de outras plataformas quânticas, como átomos frios ou iões aprisionados, os dispositivos baseados em semicondutores e supercondutores podem à partida beneficiar da tecnologia desenvolvida ao longo de décadas pela indústria de microeletrónica [32]. Mais uma vez, a herança da física do estado sólido revela-se decisiva.

**Epílogo: a segunda revolução quântica e os materiais do futuro**
Da quantização do efeito de Hall aos isoladores topológicos, do grafeno aos qubits supercondutores, a história recente da física da matéria condensada é marcada por uma expansão contínua do papel da mecânica quântica. A segunda revolução

quântica não se limita ao controlo de sistemas quânticos individuais; pelo contrário, assenta na capacidade de conceber, sintetizar e manipular materiais quânticos com propriedades emergentes desenhadas à escala microscópica. Tal como na primeira revolução, prevê-se que o impacto destas descobertas na sociedade se irá manifestar de forma escalável e robusta quando concretizada em plataformas de estado sólido. Não é por acaso que os computadores quânticos já existentes se baseiam, em grande medida, em qubits supercondutores: a supercondutividade é um fenómeno de coerência quântica macroscópica, no qual um número macroscópico de eletrões se comportam como um único estado quântico coletivo. Essa coerência confere uma robustez intrínseca aos qubits e permite o seu controle com grande precisão, ao mesmo tempo que a tecnologia de circuitos supercondutores oferece um programa realista e previsível para a escalabilidade, beneficiando de décadas de desenvolvimento em microeletrónica.

Desde os anos 1980, uma fração notável dos Prémios Nobel da Física tem sido atribuída a descobertas em matéria condensada onde a mecânica quântica se manifesta de forma coletiva, topológica ou geometricamente protegida, atestando a centralidade dos materiais quânticos na física contemporânea. A física da matéria condensada continuará a desempenhar um papel central na tradução das ideias mais abstratas da mecânica quântica em materiais que as concretizem no mundo real, para que assim possam ser aplicadas em tecnologias concretas. A lição perene é que, sem dúvida, materiais e fenomenologia ainda mais decisiva para o futuro continuam "por aí", à espera da sua descoberta!

**Matéria e materiais quânticos em Portugal**

Em Portugal, a física da matéria condensada tem tido impacto internacional particularmente visível na física do grafeno e de materiais bidimensionais. Destacam-se contribuições pioneiras que ajudaram a moldar o campo, com vários artigos científicos em co-autoria com os laureados Geim e Novoselov, ainda antes de o serem, com destaque para um dos principais artigos de revisão na área [26]. Um marco foi o trabalho de João Lopes dos Santos e Nuno Peres (com António H. Castro Neto) sobre bicamadas de grafeno com rotação ("twisted bilayer") [33], que antecipou, uma década antes [28], a importância das estruturas de moiré na engenharia de bandas e correlações eletrónicas. A esta linha juntou-se uma nova geração que alargou o programa científico em materiais 2D, incluindo transporte, resposta óptica e efeitos de deformação ("strain"), com contributos reconhecidos em tópicos como condutividade óptica e propriedades eletrónicas em condições realistas.

Para além do eixo 2D/moiré, Portugal mantém uma tradição forte em problemas de muitos corpos e correlações fortes, incluindo abordagens em sistemas integráveis (por exemplo, no contexto do modelo de Hubbard e líquidos quânticos 1D) e desenvolvimentos em matéria topológica e supercondutividade, temas hoje centrais na paisagem dos materiais quânticos. Mais recentemente, há também uma presença crescente em sistemas quânticos fora de equilíbrio e transporte quântico, ligando ferramentas de teoria quântica moderna a fenómenos emergentes em materiais desordenados e topológicos. Em termos de articulação comunitária e formação avançada, a rede **Quantum.Matter@PT** (ver caixa) tem consolidado colóquios, escolas e colaborações nacionais, enquanto iniciativas de educação internacional como o mestrado **QUARMEN** (ver caixa) reforçam a integração europeia e a formação de uma nova geração de investigadores em ciência e tecnologia quântica.

**Rede Quantum.Matter@PT**

Fundada em 2020, a Quantum.Matter@PT é uma rede de investigadores, apoiada pela Sociedade Portuguesa de Física, dedicada à área dos materiais quânticos em Portugal. A sua criação foi motivada pelo facto de Portugal ter uma forte comunidade de investigadores na área dos materiais quânticos, mas esta comunidade estar dispersa, com os grupos individuais com falta de "massa crítica". O objetivo da Quantum.Matter@PT é resolver este problema, promovendo a colaboração entre investigadores de diferentes instituições. Curiosamente, o nascimento da Quantum.Matter@PT foi despoletado pela pandemia da COVID19. A mudança para trabalho remoto demonstrou que seria possível criar um "grupo investigação virtual" dedicado aos materiais quânticos, no qual poderiam participar investigadores de quaisquer instituições portuguesas. Tendo por base algumas colaborações informais anteriores, a Quantum.Matter@PT começou em 2020 a organizar uma série de seminários online, a "Quantum Agora", e uma série de colóquios por investigadores de renome internacional, o "Quantum Colloquium". Ainda em 2020, a Quantum.Matter@PT organizou também a primeira edição da "Quantum Matter School | Materials & Concepts", uma escola de treino avançada para estudantes de mestrado e doutoramento, que conta já com cinco edições. Mais informações sobre a rede em quantummatterpt.weebly.com.

**Quarmen**

O QUARMEN (Quantum Research Master Education Network) é um programa de Mestrado Erasmus Mundus de dois anos dedicado à Ciência e Tecnologia Quântica. Esta formação internacional tem como objetivo preparar uma nova geração de especialistas para a chamada segunda revolução quântica, oferecendo uma base sólida em conceitos fundamentais e tecnologias associadas a dispositivos e informação quântica. Além da Universidade do Porto, o consórcio inicial envolve as universidades: Sapienza Università di Roma, Université Paris-Saclay e University of Toronto - o programa proporciona uma experiência de mobilidade única, permitindo estudar em pelo menos dois países e obter múltiplos diplomas, seguindo a regra 1 semestre = 1 diploma. O programa combina formação teórica avançada, prática laboratorial e contacto direto com centros de investigação e empresas de tecnologia quântica. Inclui ainda escolas de verão e inverno focadas em gestão científica, inovação e tópicos de fronteira em computação, fotónica e materiais quânticos, preparando os estudantes para carreiras académicas e industriais altamente competitivas. Mais informações em master-quarmen.eu.

Referências

[1] Heisenberg, W. (1925). Über eine quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. Zeitschrift für Physik, 33, 879–893.
[2] Born, M., & Jordan, P. (1925). Zur Quantenmechanik. Zeitschrift für Physik, 34, 858–888.
[3] Born, M., Heisenberg, W., & Jordan, P. (1926). Zur Quantenmechanik II. Zeitschrift für Physik, 35, 557–615.
[4] Dahn, R. (2025). Demythologizing Quantum History. Physics Today, 78, 38–43.
[5] Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. Annalen der Physik, 384, 361–376.
[6] Bloch, F. (1928). Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. Zeitschrift für Physik, 52, 555–600.
[7] Kronig, R. de L., & Penney, W. G. (1931). Quantum Mechanics of Electrons in Crystal Lattices. Proceedings of the Royal Society A, 130, 499–513.
[8] Anderson, P. W. (1958). Absence of Diffusion in Certain Random Lattices. Physical Review, 109(5), 1492–1505.
[9] Anderson, P. W. (1972). More is Different: Broken Symmetry and the Nature of the Hierarchical Structure of Science. Science, 177(4047), 393–396.
[10] Heisenberg, W. (1928). Zur Theorie des Ferromagnetismus. Zeitschrift für Physik 49, 619–636.
[11] Bardeen, J., Cooper, J. L. N., Schrieffer, J. R. (1957). Theory of Superconductivity. Physical Review 108, 1175.
[12] J. Georg Bednorz e K. Alex Müller (1986). "Possible high-Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system". Zeitschrift für Physik B: Condensed Matter. 64, 189–193.
[13] von Klitzing, K., Dorda, G., Pepper, M. (1980). New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance. Physical Review Letters 45, 494.
[14] Thouless, D. J., Kohmoto, M., Nightingale, M. P., den Nijs, M. (1982). Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential. Physical Review Letters 49, 405.
[15] Tsui, D. C., Stormer, H. L., Gossard, A. C. (1982). Two-Dimensional Magnetotransport in the Extreme Quantum Limit. Physical Review Letters 48, 1559.
[16] Laughlin, R. B. (1983). Anomalous Quantum Hall Effect: An Incompressible Quantum Fluid with Fractionally Charged Excitations. Physical Review Letters 50, 1395.
[17] Haldane, F. D. M. (1988). Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels. Physical Review Letters 61, 2015.
[18] Berry, M. V. (1984). Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes. Proceedings of the Royal Society A 392, 45.
[19] Zak, J. (1989). Berry's Phase for Energy Bands in Solids. Physical Review Letters 62, 2747.
[20] Xiao, D., Chang, M.-C., Niu, Q. (2010). Berry Phase Effects on Electronic Properties. Reviews of Modern Physics 82, 1959.
[21] Kane, C. L., Mele, E. J. (2005). Quantum Spin Hall Effect in Graphene. Physical Review Letters 95, 226801.
[22] Kane, C. L., Mele, E. J. (2005). $Z_2$ Topological Order and the Quantum Spin Hall Effect. Physical Review Letters 95, 146802.
[23] Hasan, M. Z., Kane, C. L. (2010). Colloquium: Topological Insulators. Reviews of Modern Physics 82, 3045.
[24] Novoselov, K. S., et al. (2004). Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. Science 306, 666.
[25] Novoselov, K. S., et al. (2005). Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene. Nature 438, 197.
[26] Castro Neto, A. H., et al. (2009). The Electronic Properties of Graphene. Reviews of Modern Physics 81, 109.
[27] Geim, A. K., Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals Heterostructures. Nature 499, 419.
[28] Cao, Y., et al. (2018). Unconventional Superconductivity in Magic-Angle Graphene Superlattices. Nature 556, 43.
[29] Devoret, M. H., Schoelkopf, R. J. (2013). Superconducting Circuits for Quantum Information. Science 339, 1169.
[30] Kastner, M. A. (1993). Artificial Atoms. Physics Today 46, 24.
[32] Loss, D., DiVincenzo, D. P. (1998). Quantum Computation with Quantum Dots. Physical Review A 57, 120.
[33] J. M. B. Lopes dos Santos, N. M. R. Peres, e A. H. Castro Neto (2007). Graphene Bilayer with a Twist: Electronic Structure. Phys. Rev. Lett. 99, 256802.
[34] Veja-se, por exemplo, a tradição da série de conferências realizadas em Évora: https://www.cqm.uevora.pt




Eduardo V. Castro obteve a licenciatura e o doutoramento na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Fez pós-doutoramento no MIP-PKS em Dresden e no ICMM-CSIC em Madrid. Foi professor auxiliar no Instituto Superior Técnico e neste momento é professor associado na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Trabalha na área da teoria da matéria condensada, com ênfase para os materiais bidimensionais (grafeno e pós-grafeno), dedicando-se ainda ao estudo dos sistemas electrónicos com topologia não trivial e/ou com desordem e quase-periodicidade. Orientou mais de duas dezenas de estudantes de mestrado e doutoramento e leciona na área da física da matéria condensada e da matéria topológica.



Vitor M. Pereira é Professor Auxiliar na Universidade do Porto, especializado em teoria quântica da matéria condensada. Obteve o seu doutoramento distribuído entre a Universidade do Porto e Boston University. Entre 2010 e 2020 foi Investigador Principal na National University of Singapore (NUS), onde foi também membro fundador do NUS Centre for Advanced 2D Materials. Os seus interesses e trabalho de investigação combinam modelação analítica e simulação numérica para aprofundar o conhecimento de materiais quânticos, com foco em correlações eletrónicas, spintrónica, magnetismo e fenómenos topológicos, com particular ênfase na física de várias classes de materiais 2D. Orientou vários doutoramentos, pós-doutoramentos e projetos de graduação e leciona disciplinas de Teoria Quântica, Física do Estado Sólido e Materiais Quânticos.



João M. Viana P. Lopes é Professor Auxiliar na Universidade do Porto, especializado em Física Estatística, Física Computacional e Teoria Quântica. Obteve o seu doutoramento na UP e fez um percurso cientifico no intituto Max Planck for Complex Systems, na Universidade de Lisboa e na Universitat de les Illes Balears. Ao longo da carreira foi professor em várias instituições de ensino superior em Portugal (IPP, IPB, FEUP, FCUP). É fundador e programador do software Quantum Kite, e tem dirigido a sua investigação no desenvolvimento de metodologias de Física Teórica e Numérica para o cálculo de transporte quântico em sistemas desordenados de larga escala. Ao longo dos anos tem contribuído para a disseminação e divulgação da Física, sendo fundador da Escola de Verão de Física (FCUP), da Escola de Verão para Jovens Físicos (ICTP-SA, São Paulo), formação de professores em Angola (programa RETEP) etc. Atualmente é o coordenador local do programa Erasmus Mundus Quarmen e da comissão científica das bolsas Gulbenkian Novos Talentos na área da Física.



Bruno Amorim é Investigador Auxiliar na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e no Laboratório de Física para Materiais e Tecnologia Emergentes (LaPMET), especializado em teoria da matéria quântica. Obteve o seu doutoramento em 2016 pela Universidade Autónoma de Madrid. Foi um Marie Skłodowska-Curie fellow no Instituto Superior Técnico (2016-2018). Fez ainda pós-doutoramentos na Universidade do Minho (2019-2024) e no International Iberian Nanotechnology Laboratory (2014). Iniciou a sua posição actual em Dezembro de 2024. A sua investigação foca-se nas propriedades electrónicas de materiais bidimensionais e em camadas, transporte electrónico, optoelectrónica, física de campos fortes e física fora-de-equilíbrio. Está envolvido na orientação de vários alunos de mestrado e doutoramento. Leciona nas áreas da mecânica quântica e teoria quântica de muitos corpos.



Pedro Ribeiro é Professor Associado no Instituto Superior Técnico (Universidade de Lisboa) e investigador no Centro de Física e Engenharia de Materiais Avançados (CeFEMA). Doutorou-se em Física Teórica na Université Pierre et Marie Curie (Paris), e realizou pós-doutoramentos no CFIF, IST em Lisboa, no CMT, MIT em Cambridge, EUA e no MPI-PKS Dresden, Alemanha. Foi também research fellow no Russian Quantum Center em Moscovo. A sua investigação situa-se na interface entre a física da matéria condensada e a informação quântica, com enfoque em sistemas quânticos abertos, correlações fortes, dinâmicas fora do equilíbrio, caos quântico dissipativo e transporte quântico. Tem vasta experiência na orientação de estudantes de mestrado, doutoramento e pós-doutoramento e leciona nas áreas de Física da Matéria Condensada, Sistemas de Muitos Corpos e Fenómenos Críticos, e Física da Matéria e Informação Quânticas. Atualmente é Chair da COST Action "Many-body Open Quantum Systems (QOpen)" e coordenador dos Programas Doutorais em Física e Engenharia Física do IST.

32
artigo geral
VOL. 48 - N. 3

# A Ótica e a Física Atómica na revolução das Tecnologias Quânticas

José Carlos Viana Gomes

Departamento de Física, Universidade do Minho

zgomes@fisica.uminho.pt

Embora raramente pensemos nisso, grande parte do mundo moderno depende diretamente de descobertas feitas no âmbito da Ótica e da Física Atómica. Em grande medida, vivemos numa civilização construída sobre a luz. A invenção do laser, há pouco mais de sessenta anos, e o desenvolvimento das fibras ópticas mudaram radicalmente a forma como comunicamos, trabalhamos e organizamos a sociedade. Sem elas, a internet simplesmente não existiria.

Mais recentemente, a integração de guias de onda ópticos e múltiplos componentes óticos em circuitos fotónicos, uma tecnologia designada por *silicon photonics*, está a substituir componentes eletrónicos em telecomunicações, permitindo velocidades mais elevadas, maior capacidade de transmissão de dados e uma eficiência energética significativamente superior. O uso de fotões em vez de eletrões tem ganhado importância nas telecomunicações, mas também na própria informática e inteligência artificial. Ainda na sua infância, as redes neuronais óticas (*Optical Neural Networks*) [1] usam luz para processar informações de forma simultânea e paralela, explorando o comportamento natural da interferência óptica para realizar operações matemáticas complexas, a altíssimas velocidades e muito menor consumo energético. Startups como a Neurophos têm vindo a desenvolver unidades de processamento óptico (*Optical Processing Units*, OPUs), prometendo reduzir em milhares de vezes o consumo energético necessário para tarefas de *machine learning* (ver Caixa 1).

A computação ótica é um dos exemplos, muito recente e talvez com um enorme potencial disruptivo na economia global, de um conjunto de tecnologias que tem como precursor investigação fundamental feita numa área da Física que é geralmente designada por Física Atómica, Molecular e Ótica ou, na terminologia inglesa por *Atomic, Molecular, and Optical Physics* (AMOP). Esta é uma das áreas mais tradicionais e consolidadas da Física, listada como a primeira divisão em sociedades científicas como a *American Physical Society* e a *European Physical Society*. Ao longo de mais de um século, esta área não só produziu tecnologias transformadoras, como também esteve no centro de algumas das maiores revoluções concetuais da ciência. Este texto pretende não só ilustrar com exemplos a importância fundamental da AMOP na tecnologia emergente, em particular nas ditas tecnologias quânticas, como enfatizar o seu profundo impacto na economia e na sociedade, e como o treino de novas gerações de jovens investigadores nesta área é um fator crítico para a competitividade tecnológica das nações, com implicações diretas não apenas económicas, mas também geopolíticas. A necessidade de atrair atenção para esta área científica é particularmente premente no nosso país, onde a ausência de tradição se reflete em níveis alarmantemente baixos de atividade e investimento.

**Óptica de precisão e soberania tecnológica**

Uma outra tecnologia com enorme importância económica e geopolítica, crucial para a produção de microchips de última geração usados em computação de alto desempenho e inteligência artificial, é a litografia com luz no ultravioleta extremo (EUV). Estas máquinas, consideradas por muitos as mais complexas alguma vez construídas, utilizam sistemas ópticos avançadíssimos para manipular luz no ultravioleta extremo, gerada por plasmas criados com lasers de alta potência. O controlo desta radiação exige sistemas óticos de precisão extraordinária, capazes de operar em condições extremas de vácuo e estabilidade mecânica. A complexidade destes sistemas é tal que a tecnologia se encontra, em grande medida, concentrada numa única empresa europeia, a ASML, tornando-se um recurso estratégico disputado à escala global. Este exemplo ilustra de forma clara que a competitividade económica e a soberania tecnológica das nações dependem não apenas do acesso a matérias-primas ou infraestruturas industriais, mas também, de forma crítica, do domínio de conhecimento científico e tecnológico avançado. A formação de investigadores altamente qualificados, a acumulação sustentada de conhecimento e a capacidade de o aprofundar, adaptar e transferir para novas aplicações constituem, por isso, elementos centrais dessas capacidades estratégicas.

Um outro bom exemplo de contribuição crítica das tecnologias AMOP é nos sistemas globais de navegação por satélite, como o GPS ou o Galileo. Estes sistemas dependem no seu funcionamento de relógios atómicos de extrema precisão. A sincronização precisa do tempo, algo que hoje tomamos por garantido, só é possível graças ao controlo quântico e medição precisa de transições atómicas. Além da usual utilização destes sistemas por pessoas comuns para chegar a seu destino, esta tecnologia é fundamental para os sistemas de navegação

Caixa 1

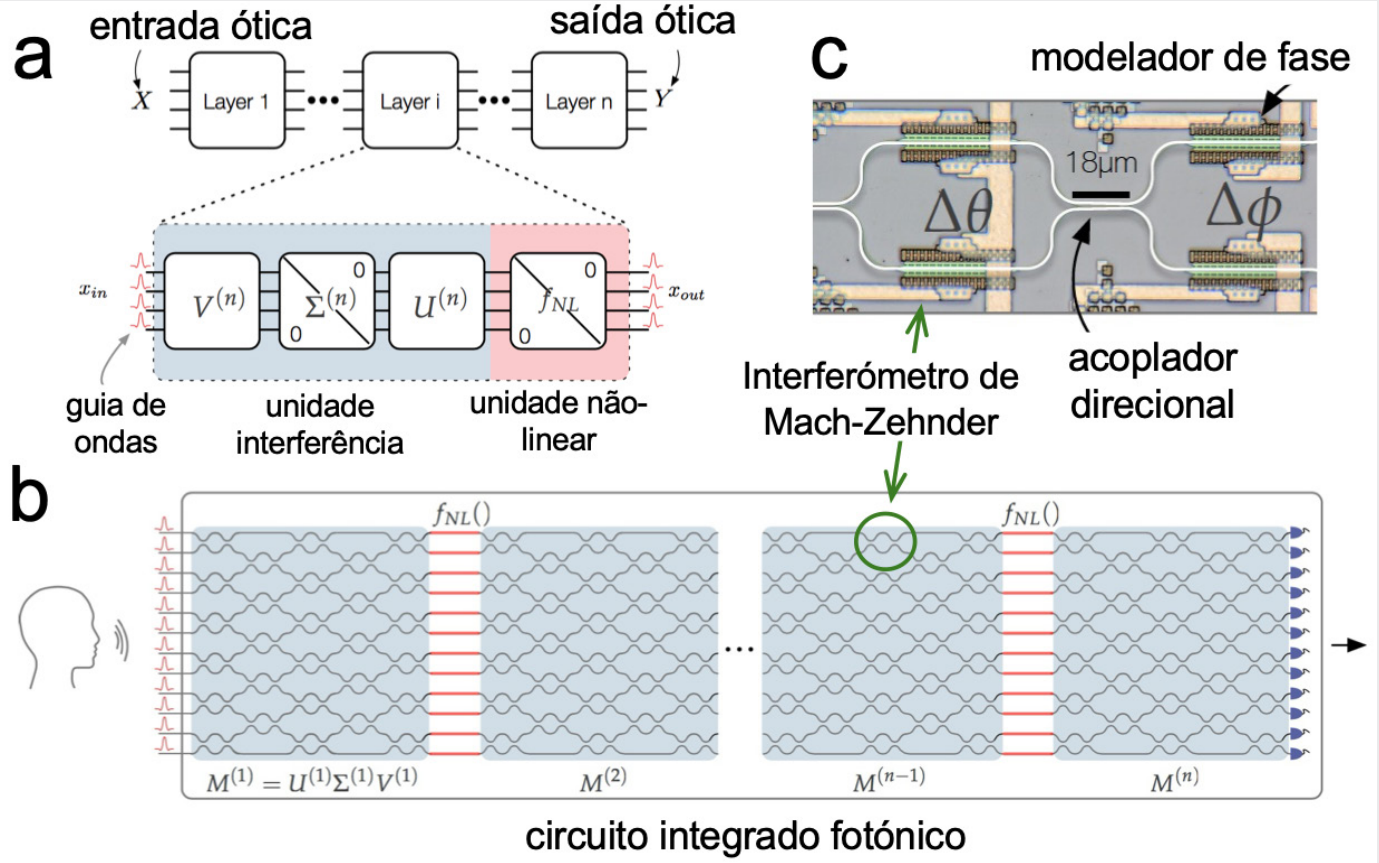



Figura 1: a) Decomposição da rede neural geral em camadas individuais, cada uma com unidades de interferência e não linear, requeridos para o funcionamento da rede neural; b) Proposta de esquema de uma rede complexa em ótica integrada; c) Ilustração de um interferómetros de Mach-Zehnder com modeladores de fase. Adaptada da Ref. Shen, 2017.

A figura ilustra uma arquitetura de rede neuronal ótica proposta em 2017, num trabalho em que os autores demonstraram a utilização de um processador fotónico no reconhecimento de vogais. Fabricado num circuito integrado fotónico de silício, o sistema era constituído por 56 interferómetros de Mach–Zehnder programáveis, o componente fundamental deste tipo de arquiteturas.

Recentemente, a empresa Neurophos anunciou o lançamento, previsto para 2028, de uma Optical Processing Unit (OPU) capaz de executar $10^{18}$ operações por segundo (um ExaOPS), um desempenho centenas de vezes superior ao atualmente alcançado por unidades de processamento gráfico (GPUs). Embora ainda não tenham sido divulgados muitos detalhes técnicos, a empresa afirma conseguir integrar mais de um milhão de elementos de processamento ótico, à escala micrométrica, num único chip.

Espera-se que as OPUs possam ser até 100 vezes mais eficientes energeticamente do que as GPUs em tarefas específicas de inteligência artificial. Atualmente, estas tarefas dependem de infraestruturas de computação de alto desempenho baseadas em eletrónica convencional, cujo consumo energético cresce a ritmo vertiginoso. Estima-se que os grandes centros de dados dedicados à IA já consumam tantos terawatts-hora por ano quanto países de média dimensão e que, para satisfazer a procura global crescente, seja necessária a produção equivalente à de várias dezenas de centrais nucleares. Este apetite energético tornou-se um dos principais desafios tecnológicos e ambientais da era da inteligência artificial.

Tal como nas fibras óticas, estes dispositivos têm a enorme vantagem de poderem transportar e processar múltiplos fluxos de dados simultaneamente no mesmo circuito, uma vez que os fotões não interagem entre si e podem ser facilmente distinguidos pela sua frequência. Isso permite aumentar drasticamente a largura de banda sem necessidade de ligações físicas adicionais. Além disso, são imunes a perturbações eletromagnéticas, não sofrem de interferência entre canais (cross-talk) e dissipam significativamente menos calor do que os circuitos eletrónicos tradicionais..

Tal como nas fibras óticas, estes dispositivos têm a enorme vantagem de poderem transportar e processar múltiplos fluxos de dados simultaneamente no mesmo circuito, uma vez que os fotões não interagem entre si e podem ser facilmente distinguidos pela sua frequência. Isso permite aumentar drasticamente a largura de banda sem necessidade de ligações físicas adicionais. Além disso, são imunes a perturbações eletromagnéticas, não sofrem de interferência entre canais (cross-talk) e dissipam significativamente menos calor do que os circuitos eletrónicos tradicionais.

e de defesa dos países. Num mundo cada vez mais dependente de sistemas de navegação por satélite, torna-se claro que esta dependência cria também vulnerabilidades estratégicas. A eventual indisponibilidade, temporária ou permanente, de sistemas globais como o GPS, por razões técnicas (como por exemplo em submarinos ou no espaço), naturais ou geopolíticas, exigiria alternativas capazes de garantir navegação e posicionamento autónomos. Nesse contexto, o acesso a outro tipo de dispositivos óticos e atómicos, como acelerómetros e giroscópios, é de fundamental importância. Baseados em interferómetros ultrasensíveis [2], este tipo de tecnologia, usada em gravímetros ou sensores de navegação, consegue em certas circunstâncias oferecer níveis de sensibilidade sem precedentes. Outro exemplo notável de sensores AMOP é o caso dos magnetómetros atómicos (também designados por "*optically pumped magnetometers*", OPMs), dispositivos de altíssima sensibilidade que medem campos magnéticos utilizando vapores atómicos polarizados (por exemplo, rubídio) como sensores. Em particular, um certo tipo de OPMs que funcionam num regime de campo quase nulo, designados em inglês por *spin exchange relaxation free magnetometer* (SERF)[1] [3,4], podem atingir sensibilidades record de um femtotesla ($10^{-15}$T) numa célula de 1 cm$^2$, num tempo de integração de 1 segundo, superiores aos melhores sensores supercondutores, e sem necessidade de sistemas complicados de criogenia. Este nível de sensibilidade, de 1.fT/Hz$^{-1/2}$, é o requerido para medir atividade cerebral, sendo que estes dispositivos são já usados em encefalografia (no caso, magnetoencefalografia[2]) ou como sensores neuronais para controle de próteses ou outros interfaces homem-máquina.

A lista de áreas em que ideias, técnicas e investigadores formados em AMOP desempenham um papel central poderia prolongar-se ainda por muitas páginas. Um exemplo particularmente impressionante surge no domínio da energia limpa, com os esforços para alcançar a fusão por confinamento inercial no Lawrence Livermore National Laboratory, nos Estados Unidos, onde o sistema laser mais potente alguma vez construído é utilizado para comprimir e aquecer uma minúscula cápsula de combustível de deutério-trítio até temperaturas superiores a cem milhões de graus Celsius, na tentativa de reproduzir na Terra os processos energétesicos das estrelas. Outros exemplos, de enorme impacto económico, incluem a fabricação industrial com lasers ultrarrápidos, que permite processar materiais com precisão micrométrica, bem como técnicas de diagnóstico e tratamento médico usando lasers, hoje amplamente utilizadas em imagiologia, cirurgia e terapias minimamente invasivas. Menos visível, mas cada vez mais relevante no contexto atual, é também o papel da ótica em aplicações de defesa e segurança, desde lasers de alta potência e sistemas de visão no infravermelho até sensores óticos, LIDARs e, como já referido, instrumentos de navegação baseados em magnetómetros e giroscópios óticos.

Os avanços tecnológicos não surgem de forma espontânea nem emergem do vazio. São, quase sempre, o resultado indireto de décadas de investigação fundamental. Os exemplos anteriormente referidos ilustram de forma clara como a área de Átomos, Moléculas e Óptica se consolidou como uma componente estrutural da tecnologia moderna, com profundas implicações económicas, industriais e estratégicas. Nas secções seguintes, após uma muito breve resenha histórica das principais contribuições científicas da AMOP, focar-nos-emos em temas relacionados com a área de átomos frios.

**Da óptica clássica à revolução quântica**

Muito antes de se tornar uma ferramenta tecnológica, a luz e os átomos estiveram no centro do grande desafio intelectual de compreender o mundo em que vivemos. A tentativa de entender a natureza da luz atravessa séculos de história, desde as ideias corpusculares de Isaac Newton até à teoria ondulatória desenvolvida por Huygens, Young e Fresnel, que explicou fenómenos como a interferência e a difração. Esta longa sequência de experiências e modelos culminou, no século XIX, com a teoria eletromagnética da luz de James Clerk Maxwell. Foi no contexto do eletromagnetismo de Maxwell que Albert Einstein, em 1905, formulou a relatividade restrita, redefinindo os conceitos de espaço e tempo. O sucesso desta teoria foi sustentado por evidências experimentais obtidas em interferómetros óticos, nomeadamente nas célebres experiências de Fizeau e Michelson.

No final do século XIX, surgiram novas fissuras no edifício aparentemente sólido da mecânica clássica. Fenómenos óticos como a radiação de corpo negro e a espectroscopia atómica resistiam às explicações clássicas. Do esforço para resolver esses paradoxos nasceu a mecânica quântica, uma teoria profundamente contraintuitiva, mas extraordinariamente bem-sucedida. Um dos seus aspetos mais surpreendentes é a não-localidade quântica. A sua confirmação experimental, ela também emergente da investigação em física atómica e ótica, marcou o início da revolução quântica em curso. O famoso paradoxo EPR, proposto [5] por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935, questionava se a teoria quântica poderia ser considerada completa, uma vez que parecia permitir correlações entre partículas distantes que desafiavam o princípio da causalidade relativista. Décadas mais tarde, experiências com fontes óticas de fotões entrelaçados confirmaram essas correlações de forma inequívoca.

O que começou como um debate filosófico entre Niels Bohr e Einstein, em 1927, tornou-se, a partir da proposta teórica de John Bell em 1964 [6], um facto experimental nos laboratórios de Alain Aspect [7], John Clauser e Anton Zeilinger — trabalho que lhes valeu o Prémio Nobel da Física de 2022 — abrindo caminho ao que hoje se designa por segunda revolução quântica, a porta de entrada das tecnologias quânticas.

Nos dias de hoje, a ótica continua a ser uma das principais ferramentas para explorar o Universo e testar os limites das teorias físicas. Um exemplo notável é a deteção direta de on-

[1] Este tipo de magnetómetros medem a frequência de precessão de Larmor do spin de gases atómicos polarizados na presença de campos magnéticos extremamente fracos. Neste regime, a precessão é muito lenta e a relaxação da polarização atómica por troca de spin em colisões é suprimida. Paradoxalmente, isto é conseguido aumentando a taxa de colisões entre os átomos, de modo a que estas ocorram muito mais rapidamente do que a frequência de precessão do spin. A rápida troca de spin entre os diferentes estados possíveis permite que os átomos preservem, em média, o estado de polarização, que evolui de forma coerente no tempo. Experimentalmente, este regime é alcançado operando com elevada densidade atómica, temperaturas elevadas e um campo magnético suficientemente baixo.

[2] Em comparação com a eletroencefalografia, a magnetoencefalografia permite um acesso mais direto à atividade neuronal, uma vez que os campos magnéticos gerados pelas correntes sinápticas são praticamente insensíveis às propriedades condutivas dos tecidos cranianos. A deteção de sinais neuromagnéticos fracos possibilita uma elevada precisão na cartografia da atividade cerebral, ultrapassando limitações fundamentais das medições elétricas convencionais.

das gravitacionais: ondulações no próprio tecido do espaço-tempo, previstas por Einstein em 1916 e observadas experimentalmente apenas um século depois [8]. Essas deteções foram realizadas com interferómetros laser capazes de medir variações de distância cerca de dez mil vezes menores do que o diâmetro de um protão — uma precisão equivalente a detetar a variação da largura de um cabelo humano na distância até à estrela mais próxima. Alcançar este nível de sensibilidade só foi possível graças a técnicas de óptica quântica, como a compressão quântica (*quantum squeezing*) [9], que permitem ultrapassar limites fundamentais impostos pelo ruído quântico. Aqui, ideias desenvolvidas originalmente em ótica quântica tornaram-se essenciais para "ver" fenómenos cósmicos ocorridos a milhares de milhões de anos-luz da Terra.

As tecnologias quânticas fazem uso de propriedades exclusivamente quânticas da matéria e da luz, como a interferência e o entrelaçamento, para realizar tarefas impossíveis ou extremamente ineficientes usando tecnologias clássicas. Em geral, em três grandes áreas: sensores e metrologia de precisão, comunicação segura e computação quântica. Um elemento comum a estas aplicações é a necessidade de um extremo controlo dos estados quânticos dos sistemas usados. Um exemplo simples que ilustra bem esta aspecto é o aprisionamento de átomos únicos a partir de nuvens atómicas diluídas. Aqui, os protocolos quânticos dependem da capacidade de controlar os átomos individualmente, a sua localização no espaço, assim como o seu estado quântico interno, que é feito hoje em dia com uma precisão extraordinária. Para o fazer, os experimentalistas pensaram em algo profundamente contraintuitivo: arrefecer e imobilizar átomos usando luz.

### Átomos frios

À primeira vista, iluminar um objeto parece ter sempre como resultado aquecê-lo. No entanto, ao nível atómico, e usando técncias adequadas, é possível usar luz para arrefecer os átomos. A luz transporta momento (ou quantidade de movimento), e esse momento pode ser usado de forma engenhosa para travar o movimento dos átomos. Foi esta ideia que esteve na base do desenvolvimento das técnicas de arrefecimento e aprisionamento de átomos com lasers levadas a cabo por Steven Chu [10], William Phillips e Claude Cohen-Tannoudji [11], que viriam a ser distinguidas com o Prémio Nobel da Física em 1997. Ao ajustar cuidadosamente a frequência da luz laser à volta de uma transição atómica específica, é possível fazer com que átomos em movimento absorvam preferencialmente fotões que se opõem à sua direção de deslocamento. Cada absorção e emissão subsequente de um fotão retira uma pequena quantidade de momento ao átomo, reduzindo gradualmente a sua velocidade. Utilizando configurações apropriadas de feixes laser e campos magnéticos, foi possível não só arrefecer átomos, como também confiná-los no espaço, em dispositivos experimentais chamados armadilhas magneto-óticas [12]. Estas técnicas permitem arrefecer nuvens atómicas a valores tão baixos de temperatura como 1$\mu$K, reduzindo a velocidade dos átomos para apenas cm/s, um regime onde o comportamento dos átomos passa a ser dominado pelas leis da mecânica quântica. Quase parados, os átomos tornam-se sistemas ideais para experiências de precisão extrema e para a construção de dispositivos quânticos.

Quando se continua a arrefecer os átomos, abaixo dos 100 nK, ocorre um fenómeno notável: todos os átomos presentes na nuvem rapidamente "empilham" num único estado quântico, o de menor energia. Este fenómeno acontece apenas para partículas (elementares ou compostas) que obedecem a uma determinada estatística quântica (têm spin total inteiro) chamada de estatística de Bose-Einstein e são, por isso, chamados bosões. Ao contrário dos bosões, que "gostam" de se "empilhar" num mesmo estado quântico, a outra classe de partículas, os fermiões, obedecem ao princípio da exclusão de Pauli não partilhando estados quânticos. Com spin total semi-inteiro estas partículas estão sujeitas à estatística de Fermi-Dirac, de onde o seu nome deriva. O mesmo elemento atómico pode ser um bosão ou um fermião, bastando para isso terem por exemplo um número diferente de neutrões (um isótopo com diferente número de massa), modificando o spin nuclear. A temperaturas muito próximas do zero absoluto, tanto bosões como os fermiões tornam-se gases degenerados, com os fermiões a ocupar todos os estados disponíveis de menor energia, enquanto que bosões ocupam apenas um único estado. Este estado degenerado de bosões é conhecido como condensado de Bose–Einstein (BEC), e foi observado com átomos pela primeira vez em 1995 [13,14] em nuvens de rubídio e sódio, um feito experimental notável distinguido com o prémio Nobel da Física em 2001 (ver Caixa 2). Num BEC deixa de fazer sentido pensar em átomos individuais. O sistema comporta-se como uma única entidade quântica macroscópica, descrita por uma só função de onda [15]. A realização de BECs em gases atómicos não só abriu um novo campo de investigação como se tornou uma plataforma central para simulações quânticas [16], e o estudo de gases atómicos e moleculares degenerados.

A realização de BECs teve ainda uma consequência concetual profunda: pela primeira vez, tornou-se possível dispor de fontes coerentes de matéria, em muitos aspetos análogas a um laser, mas constituídas por átomos em vez de fotões. Este novo regime abriu caminho à chamada ótica atómica, na qual experiências clássicas da ótica, como interferência e difração, passaram a ser reproduzidas com ondas de matéria coerentes. Mais do que uma simples analogia pedagógica, estes sistemas permitiram estender ao domínio dos átomos técnicas originalmente desenvolvidas em ótica quântica, incluindo o estudo de correlações de intensidade entre partículas indistinguíveis e a investigação do papel da coerência quântica em sistemas de muitos corpos. Em particular, versões com átomos de experiências emblemáticas, como o interferómetro de Hanbury Brown–Twiss ou a experiência de Hong–Ou–Mandel, evidenciaram como fenómenos de interferência puramente quânticos não são exclusivos da luz, mas emergem sempre que partículas indistinguíveis obedecem às leis da mecânica quântica. Estes progressos estenderam-se também a testes cada vez mais sofisticados das desigualdades de Bell com átomos (o anteriormente referido paradoxo EPR), reforçando a ligação concetual entre a física dos átomos ultrafrios e os fundamentos da teoria quântica. Mais, o facto de se poder escolher entre bosões ou fermiões, ou até combinar diferentes espécies neste tipo de experiências, multiplica dramaticamente as possibili-

dades experimentais sendo possível explorar os dois tipos de estatística quântica.

Um exemplo interessante de aplicação prática da ótica atómica é o seu uso em interferometria com átomos frios na deteção de ondas gravitacionais. Assim como os grandes interferómetros laser como o LIGO e o Virgo usam a interferência da luz para medir as minúsculas ondulações do espaço-tempo produzidas por eventos cósmicos, há esforços na comunidade científica para desenvolver um novo tipo de detetor de ondas gravitacionais baseado na interferometria de átomos frios. Em vez de medir pequenas variações na distância percorrida por feixes de luz, estes detetores exploram a natureza ondulatória dos átomos para medir diretamente mudanças que uma onda gravitacional induz na fase de uma onda de matéria, que se traduz numa medida do sinal gravitacional. O que torna esta abordagem especialmente atraente é a sua sensibilidade potencial em bandas de frequência intermédias (tipicamente na faixa de 0,1 a 10 Hz) que são difíceis de cobrir com os interferómetros clássicos terrestres a laser, devido a ruídos sísmicos e a outras limitações técnicas. Detetores baseados em átomos frios poderiam, em princípio, preencher esta "lacuna" na sensibilidade e complementar observatórios como os LIGO e Virgo, e os futuros detetores espaciais como LISA, abrindo uma nova janela para fenómenos astrofísicos com massas intermédias ou eventos mais longos.

## Caixa 2

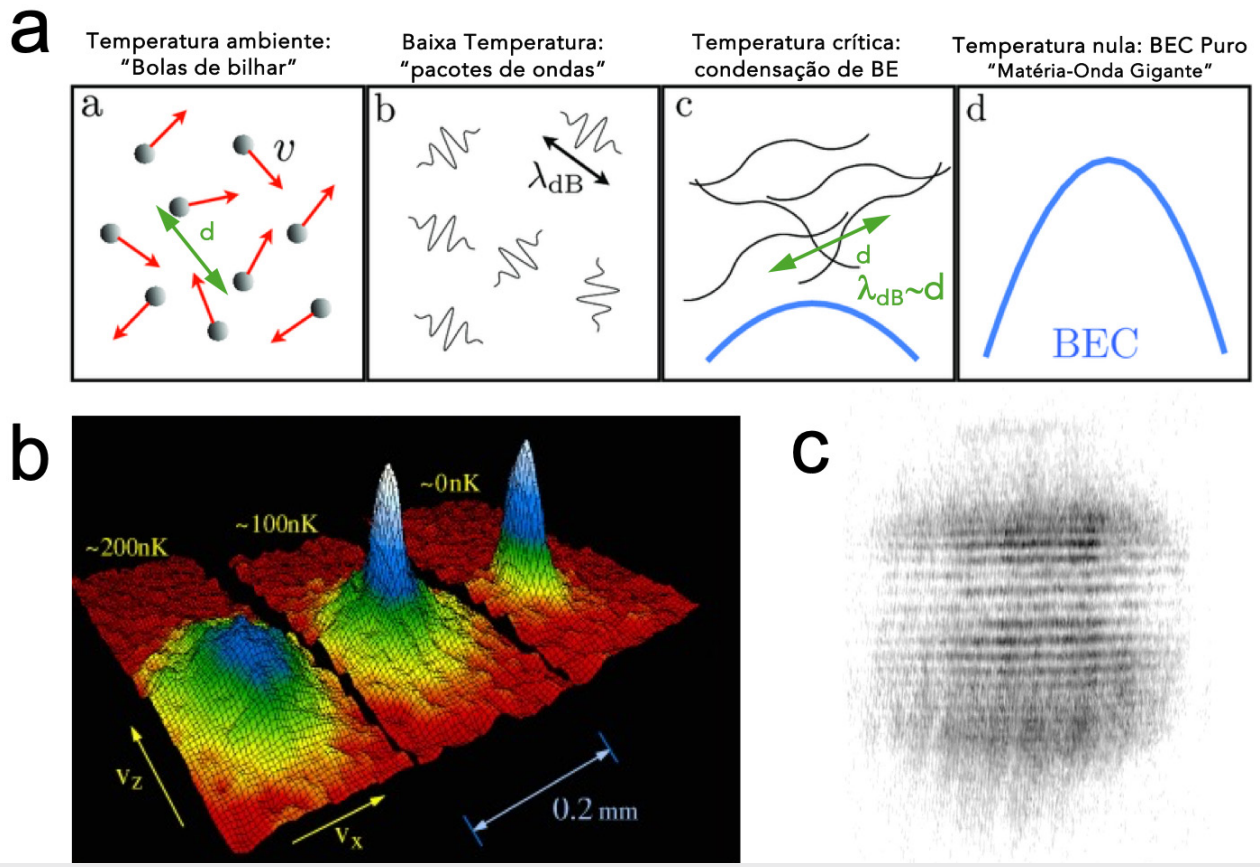



Figura 2: Figuras a) e c) adaptadas de Ketterle (1999); figura b) adaptada do registo publicado da palestra Nobel de Carl E. Wieman, proferida a 8 de dezembro de 2001.

a) Condensação de Bose–Einstein. À temperatura ambiente, um gás fracamente interativo pode ser descrito, de forma clássica, como um conjunto de "bolas de bilhar". Do ponto de vista quântico, porém, à medida que a temperatura (e a velocidade) diminui, os átomos passam a comportar-se como pacotes de onda com uma extensão dada pelo comprimento de onda de de Broglie, $\lambda_{dB}$. Na temperatura crítica de transição, $\lambda_{dB}$ torna-se comparável à distância média entre átomos, d, levando à formação do condensado. Quando a temperatura se aproxima do zero absoluto, a componente térmica desaparece e permanece um condensado praticamente puro.

b) Distribuições de densidade de nuvens de átomos de rubídio após expansão, a três temperaturas distintas. À esquerda observa-se uma nuvem térmica (não degenerada). No centro, já é visível o "nascimento" do condensado, coexistindo com uma componente térmica a cerca de 100 nK. À direita surge um BEC quase puro, com a grande maioria dos átomos no estado condensado.

c) Padrão de interferência obtido quando dois BECs de sódio, inicialmente confinados num poço de potencial duplo, são libertados e se sobrepõem no espaço. As franjas observadas evidenciam a coerência quântica macroscópica característica deste estado da matéria.

**Computadores quânticos com átomos neutros**

A ideia de um computador quântico universal, uma máquina capaz de explorar de forma sistemática os princípios da mecânica quântica para realizar certos cálculos de forma exponencialmente mais eficiente do que qualquer computador clássico, foi formulada por David Deutsch em 1985 [17]. Poucos anos depois, surgiram as primeiras propostas concretas para a sua implementação experimental, muitas delas oriundas diretamente da comunidade de física atómica.

Em 1995, Ignacio Cirac e Peter Zoller propuseram uma arquitetura para computação quântica baseada em iões aprisionados [18], na qual estados internos de átomos ionizados desempenhariam o papel de bits quânticos, ou qubits. Esta proposta marcou o início de um esforço experimental intenso que, ao longo das décadas seguintes, demonstrou níveis extraordinários de controlo quântico e fidelidade de operações lógicas, em grande parte graças a técnicas de espectroscopia de precisão e de arrefecimento e confinamento desenvolvidas no âmbito da Física Atómica e Ótica. O trabalho pioneiro de David Wineland e colaboradores estabeleceu os iões aprisionados como uma das plataformas mais robustas para computação quântica.

Se fosse possível conceber um qubit ideal, seria difícil encontrar algo mais adequado do que um átomo. Todos os átomos de um mesmo elemento são rigorosamente idênticos, e possuem níveis quânticos extremamente bem caracterizados e estáveis. Usando técnicas desenvolvidas originalmente por Arthur Ashkin para fazer pinças ópticas [19], que lhe valeu o Nobel da Física em 2012, tornou-se possível aprisionar átomos individuais em feixes laser fortemente focalizados. Estes feixes funcionam como pequenas armadilhas de luz, que podem ser organizadas em redes regulares a duas ou três dimensões, contendo centenas ou mesmo milhares de átomos, cada um ocupando uma posição bem definida no espaço.

Em arquiteturas deste tipo, cada átomo desempenha o papel de um qubit, com a informação quântica codificada em dois estados internos de longa duração. Como os átomos estão eletricamente neutros e confinados em potenciais óticos extremamente estáveis, interagem muito pouco com o ambiente, o que lhes confere tempos de coerência relativamente longos. Embora estes tempos sejam, em geral, inferiores aos alcançados em plataformas baseadas em iões, superam largamente os observados em arquiteturas supercondutoras, ao mesmo tempo que oferecem uma escalabilidade significativamente superior.

Para realizar operações lógicas quânticas, é necessário induzir interações controladas entre qubits vizinhos. Nos sistemas de átomos neutros, isto é conseguido excitando temporariamente os átomos para estados altamente excitados, conhecidos como estados de Rydberg. Nestes estados, um dos eletrões do átomo encontra-se muito afastado do núcleo, ocupando orbitais com números quânticos principais elevados (tipicamente n=50~100). O resultado é um átomo excecionalmente grande à escala atómica com dimensões típicas de 5~10μm, comparáveis à separação entre átomos vizinhos na rede ótica. Esta distensão espacial dá origem a interações fortes e de longo alcance entre átomos excitados, tipicamente de natureza dipolo–dipolo. Um fenómeno particularmente importante é o chamado bloqueio de Rydberg: a excitação de um átomo para um estado de Rydberg pode impedir a excitação simultânea de átomos vizinhos, criando correlações quânticas controladas entre qubits. Este mecanismo constitui a base para a implementação de portas lógicas quânticas de dois qubits e para a criação de estados entrelaçados, ingredientes essenciais da computação quântica. Para além dos tempos de coerência relativamente longos, as arquiteturas baseadas em átomos neutros apresentam várias vantagens notáveis. A escalabilidade é uma das mais importantes: redes óticas podem, em princípio, ser estendidas para milhares ou dezenas de milhares de qubits, mantendo uma uniformidade praticamente perfeita entre eles. O controlo é realizado exclusivamente por luz, permitindo operações rápidas e reconfiguráveis, bem como a possibilidade de endereçar qubits individuais com elevada precisão espacial. Não é assim surpreendente que os computadores quânticos baseados em átomos neutros estejam hoje no centro de um esforço intenso, tanto académico como industrial. Laboratórios e empresas em várias partes do mundo trabalham ativamente no desenvolvimento desta plataforma, explorando-a não apenas para computação quântica universal, mas também para simulações quânticas de sistemas complexos, onde a dinâmica coletiva de muitos qubits pode ser estudada de forma controlada.

Noutra direção da ótica, na área da fotónica, há hoje em dia também um grande destaque da computação quântica usando plataformas fotónicas, onde a informação quântica é transportada por fotões individuais. Estas abordagens beneficiam de operação à temperatura ambiente e de uma compatibilidade natural com redes óticas, sendo exploradas por empresas como a Xanadu ou a PsiQuantum, apoiadas por investimentos industriais e governamentais significativos. No entanto, a implementação de interações fortes e controladas entre fotões continua a ser um dos grandes desafios desta abordagem. É possível, ou mesmo provável, que este tipo de plataformas possam vir no futuro a ser interligadas com as que usam átomos neutros ou iões, tirando partido da intercomplementaridade, ambas usando luz para guardar ou controlar informação e, em particular, por usarem essencialmente o mesmo tipo de ferramentas e partilharem uma herança comum de técnicas e conceitos desenvolvidos no âmbito da AMOP.

**Relógios Atómicos Óticos**

A mesma capacidade de controlar átomos com precisão extrema encontra uma expressão particularmente impressionante nos relógios atómicos óticos. Se os computadores quânticos prometem transformar a forma como processamos informação, estes relógios representam o limite último da nossa capacidade de medir o tempo. Os relógios atómicos tradicionais, como os de rubídio que equipam o sistema GPS, exploram transições na gama das micro-ondas, com frequências de alguns gigahertz. Os relógios óticos [20] baseiam-se em transições eletrónicas com frequência entre os $10^{14}$ e $10^{15}$ Hz. Contar estes "tiques" muito mais rápidos equivale a utilizar uma

[3]Metade do prémio desse ano foi para outro herói da ótica, Roy Glauber, por contribuições teóricas fundamentais para a ótica quântica e teoria da coerência.

"régua de tempo" quase um milhão de vezes mais fina, conduzindo a um salto dramático na precisão. Os melhores relógios óticos atuais [21] atingem incertezas fracionárias ao nível de $10^{-18}$, aproximando-se mesmo de $10^{-19}$. Um relógio com este desempenho atrasar-se-ia apenas uma fração de segundo ao longo de um intervalo de tempo superior à idade do Universo.

Grande parte deste progresso foi impulsionado por trabalhos desenvolvidos em laboratórios de metrologia atómica, num ambiente onde convergiram avanços em lasers ultrastáveis, átomos frios e em metrologia de precisão. Um passo absolutamente decisivo foi o desenvolvimento dos pentes de frequências óticas [22,23], distinguido com parte[3] do Prémio Nobel da Física de 2005, atribuído a Theodor W. Hänsch e a John L. Hall. Os pentes de frequência funcionam como réguas no domínio da frequência, permitindo ligar transições óticas extremamente rápidas a padrões de tempo eletrónicos. Sem esta ferramenta, a estabilidade extraordinária dos relógios óticos não poderia ser medida nem comparada, e estes dispositivos não poderiam desempenhar o seu papel como padrões de tempo. Em paralelo, avanços na física de átomos ultrafrios criaram as condições ideais para a metrologia de precisão. O trabalho pioneiro de Deborah Jin, ao arrefecer gases de átomos fermiónicos até ao regime quântico degenerado, estabeleceu técnicas e conceitos cruciais para desenvolvimentos posteriores. Muitos dos relógios óticos mais precisos utilizam hoje isótopos fermiónicos, como o estrôncio-87 ou o itérbio-171, nos quais o princípio da exclusão de Pauli suprime colisões entre átomos, reduzindo desvios sistemáticos e permitindo uma exatidão excecional mesmo a altas densidades atómicas. Com base nestes fundamentos, grupos liderados por investigadores como Jun Ye [24] construíram relógios baseados em gases degenerados de fermiões aprisionados em redes óticas que representam atualmente o estado da arte na medição do tempo.

Com este nível de precisão, incertezas fracionárias de $10^{-19}$, algo notável ocorre: diferenças de altura de apenas alguns centímetros à superfície da Terra já alteram a passagem do tempo de forma mensurável, em pleno acordo com a teoria da relatividade geral [25]. Os relógios óticos tornam-se, assim, sensores diretos da curvatura do espaço-tempo. Conseguir medir o tempo com este nível de precisão deixa de ser apenas um desafio tecnológico, e torna-se uma forma direta de investigar as leis fundamentais da natureza. Propostas ainda mais arrojadas como os relógios nucleares, baseados numa transição de baixa energia no núcleo do tório-229, prometem empurrar ainda mais os limites da estabilidade e da exatidão [26]. Se concretizadas, estas ideias poderão abrir novas vias para testar física fundamental e aprofundar a nossa compreensão da relação entre o mundo quântico e a gravidade.

**Conclusão**

Dos computadores quânticos construídos átomo a átomo aos relógios que sentem a curvatura do espaço-tempo, as tecnologias oriundas da AMOP mostram que a revolução quântica não resulta de fenómenos isolados, mas de um domínio profundo, sistemático e engenhoso das interações entre luz e matéria. Esta área do saber fornece as ferramentas para transformar perguntas fundamentais em tecnologias capazes de redefinir o futuro. Em última análise, o que une todas estas inovações é a mesma tradição que começou com a espectroscopia atómica e a ótica clássica: a capacidade de entender e controlar a luz e a matéria ao nível mais fundamental.

Tal como a invenção do laser e das fibras óticas transformou a comunicação e a sociedade, hoje a Física Atómica e a Ótica continuam a moldar tecnologias disruptivas, definindo o que será possível nas próximas décadas na ciência, na indústria e no nosso quotidiano. No contexto nacional, uma aposta estratégica na formação de recursos humanos e no investimento continuado nas áreas AMOP seria determinante para que Portugal não permanecesse apenas como utilizador, mas como contribuinte ativo das tecnologias quânticas do futuro.



José Viana-Gomes é licenciado em Física Aplicada, ramo de Ótica e Lasers, pela Universidade do Minho, onde é atualmente Professor Auxiliar no Departamento de Física. Doutorou-se em Física Atómica na Université Paris-Sud em 2007, com trabalho na área da termometria e das propriedades de coerência de gases quânticos ultrafrios de hélio metastável. Ao longo do seu percurso académico, desenvolveu também atividade docente e de investigação internacional, tendo sido Professor Associado Convidado e posteriormente Professor Auxiliar no Departamento de Física da National University of Singapore entre 2012 e 2020. Os meus interesses científicos centram-se principalmente na metrologia ótica e atómica, abrangendo ainda áreas como a ótica não linear, a espectroscopia de materiais bidimensionais, a física de excitões e a plasmónica.

Referências

[1] Deep learning with coherent nanophotonic circuits. Shen, Y., Harris, N., Skirlo, S. et al. . 2017, Nature Photon 11, pp. 441–446.
[2] Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms. Peters, A., Chung, K. Y. & Chu, S. 1999, Nature , Vol. 400, p. 849.
[3] A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer. I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis. 2003, Nature, Vol. 422, pp. 596–599.
[4] Optical magnetometry. Budker, D., Romalis, M. 2007, Nature Phys, Vol. 3, p. 227.
[5] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Einstein, A. and Podolsky, B. and Rosen, N. 10, 1935, Phys. Rev., Vol. 47, p. 777.
[6] On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. Bell, J. S. 3, 1964, Physics Physique Fizika, Vol. 1, p. 195.
[7] Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. Aspect, Alain and Dalibard, Jean and Roger, Gérard. 25, 1982, Phys. Rev. Lett., Vol. 49, p. 1804.
[8] Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo. 2016, Phys. Rev. Lett., Vol. 116, p. 061102.
[9] Quantum-mechanical noise in an interferometer. Caves, Carlton M. 8, 1981, Phys. Rev. D, Vol. 23, p. 1693.
[10] Three-Dimensional Viscous Confinement and Cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure. S. Chu, L. Hollberg, J. E. Bjorkholm, A. Cable, and A. Ashkin. 1985, Phys. Rev. Lett., Vol. 55, p. 48.
[11] New Mechanisms for Laser Cooling. Phillips, Claude N. CohenTannoudji and William D. 10, 1990, Phys. Today, Vol. 43, p. 33.
[12] Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure. Raab, E. L. and Prentiss, M. and Cable, Alex and Chu, Steven and Pritchard, D. E. 23, 1987, Phys. Rev. Lett., Vol. 59, p. 2631.
[13] Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor. Anderson, M. H. et al. 1995, Science, Vol. 269, p. 198.
[14] Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms. Davis, K. B. and Mewes, M. -O. and Andrews, M. R. and van Druten, N. J. and Durfee, D. S. and Kurn, D. M. and Ketterle, W. 22, 1995, Phys. Rev. Lett., Vol. 75, p. 3969.
[15] Making, probing and understanding Bose-Einstein condensates. Ketterle, W. and Durfee, D. S. and Stamper-Kurn, D. M. 1999, arXiv preprint cond-mat/9904034, pp. url={https://arxiv.org/abs/cond-mat/9904034}.
[16] Many-body physics with ultracold gases. Bloch, Immanuel and Dalibard, Jean and Zwerger, Wilhelm. 3, 2008, Rev. Mod. Phys., Vol. 80, p. 885 .
[17] Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Deutsch, . 1818, 1985, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 400, p. 97.
[18] Quantum Computations with Cold Trapped Ions. Cirac, J. I. and Zoller, P. 20, 1995, Phys. Rev. Lett., Vol. 74, p. 4091.
[19] Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and Steven Chu. 1986, Opt. Lett., Vol. 11, p. 288.
[20] Optical atomic clocks. Ludlow, Andrew D. and Boyd, Martin M. and Ye, Jun and Peik, E. and Schmidt, P. O. 2, 2015, Rev. Mod. Phys., Vol. 87, p. 637.
[21] Clock Precision beyond the Standard Quantum Limit at {10}^{\ensuremath{-}18}$ Level},. Yang, Y. A. et al. 19, 2025, Phys. Rev. Lett., Vol. 135, p. 193202.
[22] Nobel Lecture: Passion for precision. Hänsch, T. W. 4, 2006, Reviews of Modern Physics, Vol. 78, p. 1297.
[23] Colloquium: Femtosecond optical frequency combs. Cundiff, Steven T. and Ye, Jun. 1, 2003, Rev. Mod. Phys., Vol. 75, p. 325.
[24] A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock. Campbell, S. L. et al. 2017, Science, Vol. 358, p. 90.
[25] Optical Clocks and Relativity. Chou, C. W. et al. 2010, Science, Vol. 329, p. 1630.
[26] Direct detection of the Th-229 nuclear clock transition. von der Wense, L., Seiferle, B., Laatiaoui, M. et al. 2016, Nature, Vol. 533, p. 47.

39
artigo geral
VOL. 48 - N. 3

# Luz e coerência: entre a tecnologia laser e a Ciência Quântica

Ariel Guerreiro

Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Center for Applied Photonics, INESC-TEC

ariel@fc.up.pt

**Resumo**
A luz, enquanto fenómeno natural e objeto de estudo científico, acompanhou todas as grandes transformações da física. Este artigo apresenta um resumo do percurso histórico e conceptual que conduz da teoria ondulatória clássica à quantização da radiação e à invenção do laser, explicando os princípios que unem a emissão estimulada, a coerência ótica e as manifestações quânticas da luz.

## Introdução

A luz sempre foi uma das melhores professoras da ciência. Ilumina o mundo e, ao fazê-lo, revela os limites do nosso entendimento. Em cada época, um conjunto de experiências obrigou-nos a rever conceitos e a reformular o que pensávamos saber. A história da luz é reveladora de como a ciência progride: observam-se fenómenos inesperados, formulam-se perguntas, constroem-se explicações provisórias, testam-se as explicações, e cada resposta abre o caminho para novas perguntas.

## A corrida entre a partícula e a luz

No século XVII, dois gigantes da ciência, Isaac Newton e Christiaan Huygens, ofereceram interpretações opostas sobre a natureza da luz. Newton via a luz como um feixe de corpúsculos capazes de se mover em linha reta e de sofrer choques elásticos. Esta visão explicava bem os processos de reflexão e a refração e parecia coerente com a mecânica que o próprio Newton criara. Huygens, pelo contrário, defendia que a luz era uma onda que se propagava através de um meio hipotético, quiçá um éter.

Durante mais de um século, o prestígio de Newton manteve viva a ideia corpuscular. Mas, no início do século XIX, as experiências de Thomas Young [1] e Augustin Fresnel [2] com interferência e difração demonstraram que a luz se comporta inequivocamente como uma onda.

A visão ondulatória ganhou uma fundamentação profunda com James Clerk Maxwell [3]. Em 1864, Maxwell apresentou as equações que unificavam eletricidade e magnetismo, prevendo a existência de ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz. Em 1887, Heinrich Hertz produziu e detetou essas ondas em laboratório, confirmando a teoria [4]. Tudo indicava que a luz era, de facto, uma onda eletromagnética.
O êxito da teoria de Maxwell parecia definitivo. No final do século XIX, a luz era considerada uma perturbação oscilante dos campos elétrico e magnético, propagando-se no espaço. No entanto, problemas inesperados surgiram que a visão ondulatória da luz não resolvia. A radiação emitida por um corpo aquecido não seguia a distribuição prevista pela física clássica (um desvio conhecido como a "catástrofe do ultravioleta"), e o efeito fotoelétrico mostrava que luz de baixa intensidade, mas de frequência adequada, podia libertar eletrões de um metal, enquanto luz intensa, mas com frequência errada, não o conseguia. Faltava algo essencial na descrição da energia transportada pela luz.

## A quantização de Planck e Einstein

Em 1900, Max Planck propôs uma solução ousada: a energia não é emitida de forma contínua, mas em múltiplos de uma quantidade elementar [5]. Cinco anos depois, Albert Einstein aplicou esta ideia ao efeito fotoelétrico, sugerindo que a própria luz é composta por partículas, os fotões [6]. Se a energia do fotão for superior ao trabalho necessário para libertar um eletrão, o eletrão é ejetado. A experiência confirmava a hipótese, que lhe valeu o Prémio Nobel da Física em 1921. Nesta altura, a ciência estava pronta para entender a luz como tendo uma natureza dupla: a luz é um campo que, conforme a situação e a forma de medir, revela um lado ondulatório ou um lado corpuscular. Esta dualidade onda-partícula é uma das pedras angulares da Física Quântica.

## O B-A-BA de Einstein

Em 1917, Einstein voltou a estudar a interação entre luz e matéria e introduziu os coeficientes A e B [7]. Estes descrevem três processos fundamentais: emissão espontânea, absorção e emissão estimulada. A ideia de emissão estimulada é a mais notável: um átomo excitado, ao encontrar um fotão com a frequência certa, pode emitir outro fotão idêntico em frequência, fase e direção. Esse mecanismo está na base de funcionamento do laser. Durante décadas, a previsão manteve-se teórica. Faltavam meios tecnológicos para produzir uma inversão de população, isto é, um estado em que mais átomos estão excitados do que no nível fundamental. Essa condição só foi atingida na segunda metade do século XX, tornando possível o primeiro maser [8] e, pouco depois, o laser [9,10].

**Da ideia ao laser**

Durante a primeira metade do século XX, a física atómica e as técnicas experimentais evoluíram rapidamente e em paralelo. A espectroscopia de alta resolução permitiu conhecer melhor os níveis de energia dos átomos e moléculas. Ao mesmo tempo, novos métodos de excitação dos níveis de energia atómicos (descargas elétricas, micro-ondas, lâmpadas de flash) tornaram possível manipular amostras gasosas e cristalinas com grande precisão. Estes progressos criaram as condições para que a emissão estimulada passasse de conceito teórico a fenómeno controlável.

Em 1954, Charles Townes, Nikolai Basov e Alexander Prokhorov demonstraram o maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) [8,9]. No maser, moléculas de amónia, excitadas num feixe molecular, eram colocadas numa cavidade de micro-ondas ajustada para que a emissão estimulada amplificasse a radiação. O resultado foi uma fonte de micro-ondas extremamente pura e estável, e a primeira prova prática do princípio de Einstein.

O maser mostrou que a emissão estimulada podia ser explorada para obter radiação coerente, ou seja, com frequência e fase bem definidas. Este sucesso valeu aos seus inventores o Prémio Nobel de Física de 1964. Porém, a transição das micro-ondas para a luz visível era tudo menos trivial. As frequências óticas são cerca de cem mil vezes mais elevadas, exigindo técnicas de bombeamento energético muito mais potentes e precisas.

Em 1960, Theodore Maiman, nos Laboratórios Hughes, construiu o primeiro laser operacional, usando um cristal de rubi como meio ativo [10]. O dispositivo consistia num bastão de rubi sintético envolvido por uma lâmpada de flash helicoidal. A lâmpada fornecia a energia necessária para excitar os átomos de crómio no rubi. Um espelho totalmente refletor e outro parcialmente refletor formavam a cavidade ótica. Quando a inversão de população era atingida, a emissão estimulada amplificava a luz num comprimento de onda de 694 nm (um vermelho profundo), gerando um feixe intenso e colimado. Nascia assim o laser de rubi. Pouco depois, seguiram-se lasers a gás (hélio-neon), a semicondutores e de estado sólido, cada qual com características próprias e adaptado a diferentes aplicações. Estas primeiras fontes de luz coerente inauguraram uma nova era para a ciência e para a tecnologia.

É verdade que, entre a teoria e a caixa preta do laboratório, se interpõe o mundo ruidoso da realidade. Existem perdas, superfícies imperfeitas, absorções residuais, aquecimento. Afinal, a luz mexe com cargas, com vibrações e com tudo o que faz um material ser material. É por isso que, a história do laser é também a história dos engenheiros que aprenderam a controlar ruído, a polir espelhos, a afastar calor, a casar materiais com caprichos óticos e elétricos. Mas, por baixo destas tecnologias, vive o esqueleto de Einstein. Sempre.

**A coerência: do caos luminoso à disciplina quântica**

Com o laser, a palavra coerência passou dos livros de teoria para a prática experimental. A luz de uma lâmpada é uma multidão de emissores independentes; cada átomo emite com fase e direção aleatórias, resultando num brilho incoerente. Num laser, pelo contrário, os fotões gerados pela emissão estimulada têm a mesma frequência e fase: é um feixe ordenado, como um coro em uníssono. Essa coerência permite interferometria de alta precisão, comunicações óticas e espectroscopia extremamente fina. Mas há um segundo nível de coerência, mais subtil: a coerência quântica, que se manifesta quando tratamos a luz não como uma onda contínua, mas como um conjunto de fotões individuais.

**Estatística de fotões: a "impressão digital" da luz**

Na década de 1950, Hanbury Brown e Twiss realizaram uma experiência decisiva [11]. Dividiram um feixe de luz em dois e contaram coincidências na chegada de fotões aos detetores. Descobriram que, para fontes térmicas (como lâmpadas ou estrelas), há tendência para fotões chegarem em grupo, fenómeno conhecido como *bunching*. Com fontes quânticas que emitem um fotão único (como pontos quânticos, centros de vacância-azoto em diamante ou átomos isolados) observa-se o oposto: *anti-bunching*. Neste caso, a emissão de um fotão reduz temporariamente a probabilidade de surgir outro logo a seguir.

Estas correlações revelam a estatística da luz e permitem distinguir, apenas pela análise temporal dos sinais, se uma fonte é clássica (térmica), semi-clássica (laser) ou verdadeiramente quântica (fotões únicos). O formalismo de Roy Glauber [12] deu a estas observações uma base rigorosa: a coerência não surge apenas para explicar o arranjo ordenado de franjas de luz quando duas ondas interferem, é também um padrão de correlações no tempo quando partículas interferem entre si.

**Dois fotões, um destino: o efeito Hong-Ou-Mandel**

Outra experiência emblemática é a de Hong, Ou e Mandel, realizada nos anos 1980 [13]. Dois fotões indistinguíveis incidem em lados opostos de um divisor de feixe, com detetores nas duas saídas. O que seria razoável, pensando com a visão da física clássica? Metade das vezes, cada fotão escolhe uma saída diferente; logo, metade das experiências deveriam registar coincidência. No entanto, quando os fotões são completamente idênticos, as coincidências desaparecem. Ambos os fotões saem sempre juntos pelo mesmo lado. Este é um fenómeno puramente quântico resultante da interferência das amplitudes de probabilidade associadas a processos indistinguíveis, uma outra faceta da coerência quântica.

O que "proíbe" os eventos em que cada fotão sai por seu lado? Por que razão basta poder distinguir os fotões para se recuperar as coincidências? Parece que a Natureza tem uma maneira impiedosamente clara de tratar processos indistinguíveis: interferem como ondas. E, como ondas, podem anular-se. O caso "um em cada saída" pode acontecer por dois caminhos indiscerníveis: os dois fotões refletem-se, ou os dois transmitem-se pelo divisor de feixe. Se a física não nos dá forma de distinguir qual ocorreu, estas "ondas de possibilidade" cancelam-se os dois fotões saem pela mesma saída. Mas basta uma réstia de distinguibilidade, um ligeiro atraso entre os fotões, ou uma diferença na sua polarização, para destruir essa indistinguibilidade

e restaurar as coincidências. A descoberta de Hong-Ou-Mandel é, nos laboratórios, não só um fenómeno bonito, mas um diagnóstico de distinguibilidade.

**Metrologia, relógios e computadores com luz**

O controlo da luz ao nível do fotão abriu uma nova era em metrologia quântica, a ciência da medição extrema. Os relógios óticos atómicos, baseados em transições eletrónicas de átomos de estrôncio ou itérbio, atingem precisões superiores a uma parte em $10^{18}$. Essa estabilidade permite medir variações mínimas no campo gravitacional terrestre e testar os limites da relatividade geral. A utilização de luz comprimida (squeezed light) em interferómetros, como o LIGO [14,15], reduziu o ruído quântico e aumentou a sensibilidade na deteção de ondas gravitacionais. Estes exemplos mostram que o domínio quântico da luz não é apenas uma curiosidade teórica: é uma ferramenta de medição e de descoberta.

Paralelamente, desenvolve-se a computação quântica fotónica [16,17]. Os fotões são excelentes portadores de informação quântica: deslocam-se rapidamente, interagem pouco com o ambiente e mantêm a coerência durante longas distâncias. Circuitos integrados de silício com guias de onda, divisores de feixe e detetores permitem manipular e emaranhar fotões em escalas cada vez maiores. Embora os computadores quânticos fotónicos ainda estejam em fase experimental, já foram demonstrados processadores capazes de realizar operações que desafiam o cálculo clássico. É um campo em rápida expansão, que junta física fundamental, engenharia ótica e ciência da informação.

**Os novos mistérios da luz: a fenda no tempo**

A luz continua ser a ferramenta de novas descobertas. Em 2023, um grupo do Imperial College de Londres realizou uma experiência surpreendente [18]: a fenda no tempo, uma versão temporal da clássica experiência de dupla fenda. Em vez de abrir duas fendas no espaço, os investigadores abriram duas janelas muito curtas no tempo, controlando a forma como um material refletia a luz. Para isso, usaram um material transparente chamado óxido de índio-estanho (ITO), comum em ecrãs de telemóvel, cuja reflectividade pode ser alterada num intervalo de femtossegundos com a ajuda de um pulso laser. Durante um breve instante, o material deixa de ser transparente e passa a comportar-se como um espelho. Se essa comutação ocorre uma única vez, o pulso de luz refletido sofre um ligeiro alargamento de frequências; mas se ocorrer duas vezes, separadas por um pequeno atraso, forma-se um padrão de interferência no espetro, um análogo temporal das franjas observadas num ecrã na dupla fenda espacial.

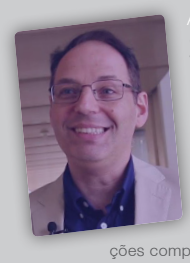
A explicação é simples, mas profunda. Quando se criam duas janelas temporais, a luz é amostrada em dois instantes diferentes e essas duas "cópias" temporais interferem entre si, gerando franjas no domínio da frequência. Quanto maior for o atraso entre as janelas, mais próximas ficam as franjas. Assim, a fenda no tempo mostra que o que fazemos no tempo tem efeitos visíveis no espetro, tal como o que fazemos no espaço tem efeitos visíveis na intensidade. Longe de violar as leis da física, esta experiência demonstra a simetria entre espaço e tempo na ótica moderna e abre caminho a novas tecnologias, como lentes temporais, comutadores ultrarrápidos e filtros espectrais dinâmicos, que permitem manipular pulsos de luz com precisão femtosegundo.

**Conclusão**

Da disputa entre Newton e Huygens às experiências de fotões únicos em chips fotónicos, a história da luz ilustra a transição do espanto para o controlo. O laser, nascido das ideias de Einstein, é o elo entre a Física Quântica e a sociedade tecnológica moderna, uma ponte entre a teoria e as aplicações. Compreender como a luz se transforma em ferramenta é compreender também como a ciência se renova: cada resposta revela novas perguntas, e cada fotão é, afinal, um pequeno mensageiro da estrutura quântica do mundo.


Referências

[1] T. Young, "Experiments and Calculations relative to Physical Optics" (1803).
[2] A. Fresnel, "Mémoire sur la diffraction de la lumière", Mémoires de l'Académie des Sciences (1818).
[3] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1865).
[4] H. Hertz, "Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen", Annalen der Physik 270, 421-448 (1887).
[5] M. Planck, "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum" (1900).
[6] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" (1905).
[7] A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung" (1917).
[8] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, "The Maser-New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer", Physical Review 99, 1264-1274 (1955).
[9] A. L. Schawlow, C. H. Townes, "Infrared and Optical Masers", Physical Review 112, 1940-1949 (1958).
[10] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby", Nature 187, 493-494 (1960).
[11] R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, "Correlation between Photons in two Coherent Beams of Light", Nature 177, 27-29 (1956).
[12] R. J. Glauber, "The Quantum Theory of Optical Coherence", Physical Review 130, 2529-2539 (1963).
[13] C. K. Hong, Z. Y. Ou, L. Mandel, "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference", Physical Review Letters 59, 2044-2046 (1987).
[14] C. M. Caves, "Quantum-mechanical noise in an interferometer", Physical Review D 23, 1693-1708 (1981).
[15] J. Abadie et al. (LIGO Scientific Collaboration), "A gravitational-wave detector with squeezed light", Nature Physics 7, 962-965 (2011).
[16] R. Loudon, The Quantum Theory of Light, 3rd ed., Oxford University Press (2000).
[17] C. C. Gerry, P. L. Knight, Introductory Quantum Optics, Cambridge University Press (2005).
[18] R. Tirole et al., "Double-slit time diffraction at optical frequencies", Nature Physics 19, 999-1002 (2023).


Ariel Guerreiro é Professor Associado no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e investigador sénior no INESC TEC. Doutorado em Engenharia Física pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. A sua carreira científica inclui colaborações internacionais com instituições de referência como o Rutherford Appleton Laboratory (Reino Unido), Laboratoire d'Optique Appliquée (França) e University of Texas at Austin (EUA). Especialista em ótica quântica e nanoplasmónica, tem-se dedicado ao estudo das interações luz–matéria, com aplicações em sensores óticos, informação quântica e simulações complexas. É autor de dezenas de publicações científicas, distinguido com prémios nacionais e internacionais, e tem interesse particular em tecnologias quânticas emergentes e aplicações interdisciplinares da física.

42
artigo geral
VOL. 48 - N.3

# O papel da Física Quântica no desenvolvimento da Metrologia e nos padrões do Sistema Internacional de Unidades

Isabel Godinho[1], Carlos Pires, Olivier Pellegrino, Vitor Cabral

[1]Instituto Português da Qualidade, I. P., Rua António Gião, 2, 2829-513 Caparica

igodinho@ipq.pt[1]

**Resumo**

A Física Quântica tem desempenhado um papel central na evolução da Metrologia Científica, sustentando a definição moderna do Sistema Internacional de Unidades em constantes fundamentais da natureza. O presente artigo aborda as aplicações atuais e as perspetivas de desenvolvimento futuras no domínio da Metrologia Quântica, com ênfase nos padrões quânticos e nas tecnologias emergentes, como a fotónica, a eletrónica, os relógios ópticos e os sensores de elevada exatidão, considerando as implicações societais destas inovações. Releva o papel do IPQ, enquanto Instituição Nacional de Metrologia, e o seu contributo para assegurar medições fiáveis, rastreáveis e comparáveis a nível internacional, enquanto um pilar de soberania, inovação e competitividade.

Palavras-chave: Física Quântica, Metrologia, Sistema Internacional de Unidades, Padrões Quânticos, Tecnologias Quânticas, IPQ.

## Introdução

A Metrologia, ciência da medição e das suas aplicações, tem acompanhado de forma intrínseca os avanços científicos e tecnológicos. A revolução quântica, iniciada no início do século XX, abriu novas perspetivas que culminaram, em 2018 [1], na redefinição do Sistema Internacional de Unidades (SI), constituindo um marco histórico na Metrologia, ancorando as unidades em constantes fundamentais da natureza em vez de artefactos materiais. Estas redefinições, que marcaram uma mudança de paradigma (formulação de "constante explícita" em vez de "unidade explícita"), permitem separar a definição da realização das unidades, utilizando equações da física e abrindo caminho para métodos de medição inovadores com exatidão potencialmente ilimitada, estabelecendo um "SI quântico", representam um marco, consolidando padrões universais e imutáveis, independentes de artefactos materiais.

Esta transformação é indissociável dos avanços da Física Quântica ao longo do século XX e início do século XXI, que permitiram traduzir conceitos teóricos em padrões universais e invariáveis. O ponto de partida pode ser identificado em 1900, quando Max Planck introduziu a quantização da energia ao descrever a radiação do corpo negro. A constante que leva o seu nome tornou-se, mais de um século depois, a base da definição do kilograma através da balança de Kibble [2]. Poucos anos mais tarde, Albert Einstein consolidaria a física quântica emergente ao explicar o efeito fotoelétrico (1905), introduzindo o conceito de fotão, e ao formular a teoria da relatividade restrita, cujas correções são hoje indispensáveis ao funcionamento de relógios atómicos e sistemas de navegação.

O modelo atómico de Niels Bohr (1913), ao introduzir níveis de energia discretos, abriu caminho para a utilização de transições eletrónicas como padrões para a medição do tempo. Este princípio é a base da definição atual do segundo, sustentada pelas transições hiperfinas do átomo de césio-133 e, mais recentemente, pelos relógios ópticos, por exemplo de estrôncio, itérbio ou cálcio. Paralelamente, os contributos de Werner Heisenberg, com o princípio da incerteza, e de Erwin Schrödinger, com a sua equação de onda, permitiram o enquadramento teórico que ainda hoje sustenta a modelação dos sistemas atómicos utilizados em Metrologia.

A contribuição de Paul Dirac foi igualmente determinante, com a formulação da equação relativística do eletrão e a fundamentação da quantização da carga elétrica, que permitiram consolidar a atual definição do ampere com base na carga elementar. Na segunda metade do século XX, emergiram dois contributos experimentais de grande impacto: o Efeito Josephson (EJ), descoberto por Brian Josephson, em 1962, que viabilizou a utilização de padrões quânticos de tensão elétrica, e o Efeito de Hall Quântico (EHQ), descoberto por Klaus von Klitzing, em 1980, que estabeleceu um padrão universal de resistência elétrica através da constante de von Klitzing. Estas descobertas,

reconhecidas com o Prémio Nobel da Física, possibilitaram a materialização destas duas grandezas elétricas através de padrões rastreáveis e invariáveis, dependentes apenas da constante de Planck e da carga elementar.

Finalmente, o trabalho de Bryan Kibble foi decisivo para a redefinição do kilograma. A sua invenção da balança de Kibble (anteriormente designada por balança de Watt) permitiu relacionar diretamente a constante de Planck com a unidade de massa, tendo esta realização experimental permitido substituir a dependência de um protótipo material de platina iridiada, o protótipo internacional do kilograma, guardado no Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM), em Sèvres.

A culminar este percurso, em 2019, o SI passou a basear as suas unidades de base (kilograma, metro, segundo, ampere, kelvin, mole e candela) em constantes fundamentais da natureza, tais como a constante de Planck (*h*), a velocidade de luz no vazio (*c*), a carga elementar (*e*), a constante de Boltzmann (*k*) e a constante de Avogadro ($N_A$), tal como indicado na Tabela seguinte, em vez de artefactos materiais, propriedades de materiais ou descrições de medições.

Assim, o legado de mais de um século de investigação quântica traduz-se hoje em medições universais, robustas e sustentáveis, que constituem o pilar da ciência e da inovação tecnológica contemporânea. Os desenvolvimentos da ciência e das tecnologias, em particular no domínio da física quântica, têm permitido a realização prática destas unidades, conseguindo alcançar níveis de exatidão, limitada apenas pela estrutura quântica da natureza e pelas capacidades técnicas, e não pelas definições propriamente ditas.

O desenvolvimento de novos sistemas de medição, baseados em padrões quânticos e utilizando supercondutores, semicondutores, amostras de grafeno, entre outros sensores de elevada exatidão, exigem métodos validados e medições rastreáveis e comparáveis, pelo que a Metrologia Quântica não é apenas um suporte, mas também um motor de inovação técnico-científica. Atualmente, o desenvolvimento da Metrologia Científica está intimamente ligado às tecnologias quânticas emergentes, com implicações em setores estratégicos como telecomunicações, defesa, saúde, segurança, energia, indústria e comércio internacional.

**Padrões Quânticos no Sistema Internacional de Unidades**

*Padrões de tempo e frequência*

As escalas de tempo formam a base da sociedade moderna, permitindo tecnologias como o GNSS (*Global Navigation Satellite System), radiowave interferometer arrays*, sincronização de redes em telecomunicações e sistemas de energia elétrica. Atualmente, existem 3 métodos primários para medição do tempo: Tempo Universal (UT), baseado no movimento de rotação da Terra; Tempo Efeméride (ET), baseado na órbita da Terra à volta do Sol; e Tempo Atómico (AT), baseado nos efeitos quânticos dos átomos. O Tempo Atómico Internacional (TAI) é uma escala de tempo uniforme, mantida pelo BIPM e baseada na transição atómica do átomo de Cs, de acordo com a definição do segundo do SI. A base de tempo civil, o Tempo Universal Coordenado (UTC), é uma escala atómica com a mesma taxa do TAI mas que se mantém em concordância com o UT em menos de 0,9 s. Desde a primeira observação da transição hiperfina do átomo de Cs-133, na década de 50 do século XX, que se especulou que os relógios atómicos podiam superar todas as referências temporais existentes. A exatidão da referência atómica levou em 1967 à redefinição do segundo do SI, que se tornou a primeira unidade a ter como base da sua definição um princípio da natureza em vez de um artefacto físico. O desenvolvimento dos relógios de Cs atingiu o seu pico com uma estabilidade na ordem dos $10^{-16}$. Atualmente, este é o limite que se consegue obter utilizando a atual definição do segundo e a comunidade científica considera pouco realista conseguir melhorar este valor.

Nos últimos vinte anos, os avanços alcançados nos padrões de frequência óptica revelaram níveis de estabilidade e exatidão que ultrapassam, em pelo menos duas ordens de grandeza ($10^{-18}$), os dos atuais padrões de tempo baseados em micro-ondas. Esta evolução tecnológica levou a comunidade internacional de tempo e frequência a considerar a futura redefinição do segundo do SI, tendo por base padrões de frequência óptica, que oferecem um desempenho significativamente superior. Com esse objetivo, o BIPM elaborou um *roadmap* para orientar o processo de redefinição do segundo. Esse pla-

| Grandeza | Unidade | Símbolo | Constante universal | Valor numérico | Unidade |
|---|---|---|---|---|---|
| Massa | kilograma | kg | constante de Planck | h - 6,626 070 15 × $10^{-34}$ | J s |
| Comprimento | metro | m | velocidade da luz no vazio | c - 299 792 458 | m/s |
| Tempo | segundo | s | frequência de transição hiperfina do estado fundamental do átomo de $^{133}$Cs não perturbado | $\Delta\nu_{Cs}$ - 9 192 631 770 | Hz |
| Corrente elétrica | ampere | A | carga elementar | e - 1,602 176 634 × $10^{-19}$ | C |
| Temperatura termodinâmica | kelvin | K | constante de Boltzmann | k - 1,380 649 × $10^{-23}$ | J/K |
| Intensidade luminosa | candela | cd | eficácia luminosa | $K_{cd}$ - 683 | lm/W |
| Quantidade de matéria | mole | mol | constante de Avogadro | $N_A$ - 6,022 140 76 × $10^{23}$ | $mol^{-1}$ |

Tabela 1

no estabelece critérios, indicadores e marcos de progresso destinados a avaliar a maturidade tecnológica e científica dos diferentes candidatos a padrões ópticos. O Comité International de Pesos e Medidas (CIPM) pretende, na 28.ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), a realizar em outubro de 2026, analisar propostas e identificar os melhores elementos atómicos a utilizar na construção dos relógios ópticos – tais como o estrôncio (Sr), o alumínio (Al) ou o ítrio (Yb). A adoção oficial da nova definição do segundo SI está prevista para a 29.ª CGPM, em 2035, quando se espera que a comunidade científica disponha de consenso técnico e comprovação experimental suficiente para garantir uma transição segura, estável e universalmente rastreável para os novos padrões óticos de tempo e frequência.

*Padrões das grandezas elétricas*

Na realização prática das unidades de medida das grandezas elétricas [3] através de métodos primários, os efeitos quânticos de Josephson e de Hall têm sido utilizados há décadas para a realização do volt e ohm, respetivamente.

O volt (V) é realizado utilizando o valor da constante Josephson, $K_J = 2e/h$ = 483 597,848 416 984 GHz $V^{-1}$. Os sistemas experimentais atuais (PJVS – *Programmable Josephson Voltage System*) que materializam este efeito utilizam *arrays* de milhares de junções (de materiais supercondutores, e.g. $NbSi_x$) (Figura 1), programadas para associar em série essas junções e gerarem valores de tensão entre 0 V e 10 V, com uma resolução de $f/K_J$, sendo $f$ a frequência das micro-ondas (de alguns gigahertz) que irradiam essas junções, submetidas a temperaturas de alguns kelvins para assegurar a sua supercondutividade.

O ohm (Ω) é realizado utilizando o valor da constante de von Klitzing, $R_K = h/e^2$ = 25 812,807 459 3045 Ω. Os sistemas experimentais que materializam este efeito submetem junções de heteroestruturas de materias semicondutores (e.g. GaAs/AlGaAs) (Figura 1), a temperaturas próximas de 1 kelvin e a campos magnéticos elevados (dezenas de tesla) transversais à direção da corrente que percorre a amostra, possibilitando assim a observação de valores quantizados de resistência $R = R_K/n$, onde $n$ é um número inteiro.

Comparações entre estes sistemas demonstram a possibilidade de obter incertezas relativas na ordem de algumas partes em $10^{-9}$ nos valores gerados.

Através da lei de Ohm, é possível realizar a unidade de corrente elétrica, o ampere (A), com base na relação A = V/ Ω, através do EHQ e do EJ. Paralelamente, o ampere pode também ser realizado de forma direta através de dispositivos que implementam o princípio de *single electron transport*, com base na relação A = C/s, no valor da carga elementar (*e*) fixada na definição do ampere e na realização prática da unidade de tempo segundo. Estes dispositivos recorrem a nanoestruturas concebidas para controlar a passagem individual de eletrões entre contactos metálicos, e ao efeito *quantum tunneling* para permitir a passagem de cargas através de barreiras de potencial em semicondutores. No entanto, esta realização do ampere apresenta ainda níveis de incerteza superiores aos obtidos indiretamente, através da Lei de Ohm e dos efeitos quânticos de Josephson e Hall.

**Tecnologias Quânticas em Desenvolvimento na Metrologia**

*Relógios quânticos*

Os relógios atómicos de última geração (Figura 2), baseados em transições ópticas, atingem estabilidades temporais da ordem de $10^{-18}$, o que representa um avanço sem precedentes na medição do tempo. Este nível de desempenho tem impacto direto em múltiplos domínios tecnológicos, nomeadamente nas redes de comunicação, sistemas de navegação e posicionamento global e nas missões de exploração espacial. Estes relógios utilizam transições atómicas em frequências superiores às das frequências emitidas pelos átomos de césio, permitindo subdividir o segundo com uma exatidão superior em mais de 2 ordens de grandeza face aos relógios de césio, atualmente em uso como referência do SI. Embora os relógios comerciais utilizados nos satélites do sistema GNSS já incorporem os efeitos da relatividade, a exatidão e a estabilidade de um relógio óptico permite detetar variações de altitude da ordem de 1 cm, demonstrando o seu potencial em geodesia relativística. Entre as suas aplicações mais promissoras destacam-se:

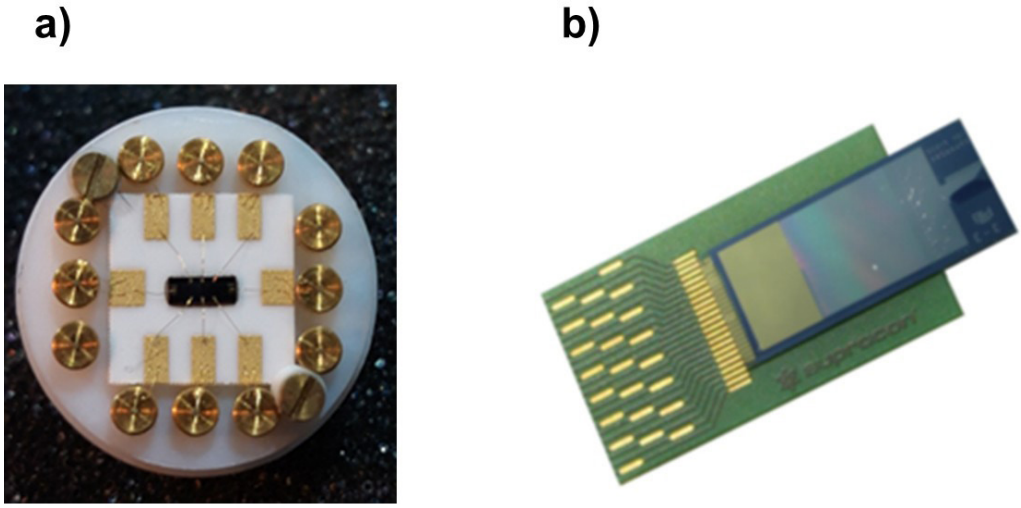



Figura 1: a) Amostra de Hall, com ligações ao longo da heteroestrutura semicondutora (©IPQ). b) *Array* de tensão Josephson com milhares de junções supercondutor-isolador-supercondutor (©Supracon)

- a medição do potencial gravítico da Terra, contribuindo para um mapeamento geodésico de precisão sem precedentes;
- a criação de redes de relógios óticos interligados por fibras ópticas, capazes de detetar variações sísmicas e antecipar terramotos;
- e a monitorização de variações em constantes fundamentais da natureza, o que poderá fornecer indícios de uma nova física, ajudando a compreender a matéria escura e a energia escura (projeto europeu QSNET).

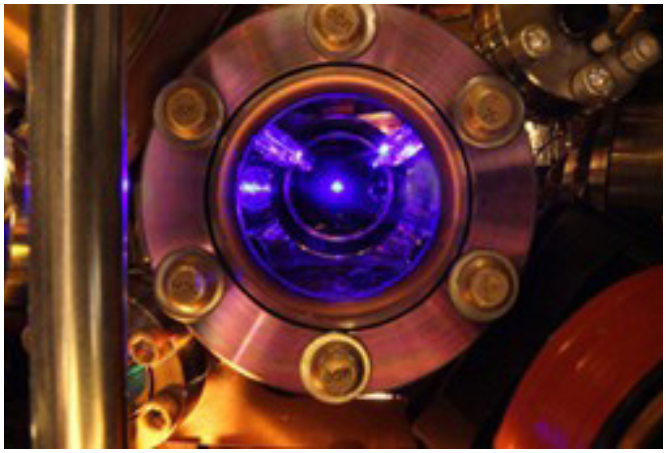


Figura 2: Relógio óptico de Sr, JILA.
(©The Ye group and Brad Baxley, JILA)

*Padrões quânticos de resistência elétrica*

Atualmente estão a ser estudados sistemas experimentais baseados no "efeito quântico de Hall anómalo", como alternativa ao efeito de Hall clássico, com a vantagem destes sistemas funcionarem sem a necessidade de campo magnético [4]. Estes sistemas baseiam-se em materiais isoladores topológicos (e.g. $Bi_2Se_3$ e $Bi_2Te_3$) dopados com átomos magnéticos os quais permitem que surjam efeitos quânticos exóticos.

Outros sensores quânticos como o caso de memristores que podem gerar valores discretos múltiplos da condutância fundamental, à temperatura ambiente, e com a possibilidade de serem incorporados em circuitos integrados, estão a ser estudados com vista à sua utilização como padrões intrínsecos de resistência elétrica. A integração destes padrões na eletrónica dos instrumentos de medição, constituindo a sua referência metrológica, permitirá suportar processos de auto calibração e auto ajuste, com rastreabilidade direta ao SI, materializando o conceito de "NMI on chip" (*National Metrology Institute on a chip*) e eliminando a necessidade de longas cadeias de calibração, permitindo implementar "serviços metrológicos diretamente em microchips" [5].

*Óptica quântica*

A óptica quântica constitui atualmente um dos domínios mais ativos e inovadores da física fundamental e da física aplicada [6]. O estudo dos estados quânticos da luz, incluindo a sua representação, caracterização, coerência quântica e não separabilidade (emaranhamento) é uma das áreas de investigação mais desenvolvidas, conduzindo naturalmente à criação de fontes monofotónicas, um dos instrumentos essenciais da óptica quântica moderna. Outro campo de grande relevância é o da comunicação quântica, que explora sistemas óticos e métodos avançados para teletransporte quântico, memórias quânticas e criptografia quântica, nomeadamente através da distribuição quântica de chaves (QKD – *Quantum Key Distribution*). Estes avanços possibilitam sistemas de comunicação intrinsecamente seguros, baseados em princípios fundamentais da mecânica quântica.

A produção quântica de imagens constitui igualmente uma área emergente, com aplicações potenciais em metrologia de precisão, biotecnologia e deteção remota, entre outras. Paralelamente, tem-se verificado um crescimento significativo no desenvolvimento de técnicas e dispositivos para metrologia ótica quântica e sensores baseados em coerência ótica quântica, com impacto direto na medição de grandezas físicas com incertezas extremamente reduzidas.

Na radiometria quântica, lidando-se com fluxos fotónicos extremamente baixos — da ordem de $10^6$ fotões por segundo — recorrem-se a técnicas de contagem de fotões e a fontes monofotónicas [7].

Estas fontes são essenciais para a calibração de detetores monofotónicos, atualmente já tecnologicamente maduros e disponíveis comercialmente, como o díodo de avalanche monofotónico (SPAD), o sensor de bordo de transição (TES) e o detetor monofotónico de nanofio supercondutor (SNSPD), amplamente utilizados nas aplicações referidas anteriormente.
A fotónica quântica desempenha assim um papel central no desenvolvimento de padrões ópticos de frequência e de sistemas de comunicação invioláveis, sustentando o avanço da Metrologia Quântica e da infraestrutura científica europeia. As fontes monofotónicas são, por isso, objeto de vários projetos de investigação colaborativos que envolvem Institutos Nacionais de Metrologia, centros de investigação e universidades europeias [8].

Na *mise en pratique* para a realização da candela [3], é já explicitamente referida a possibilidade de utilização de fontes monofotónicas, o que permitirá, no futuro, exprimir as grandezas fotométricas e radiométricas em função do número de fotões, reforçando a rastreabilidade quântica das medições de luz.

**Implicações Societais**

Os desenvolvimentos em Metrologia Quântica têm efeitos diretos em áreas críticas da sociedade, tais como:
- economia digital: comunicações seguras baseadas em criptografia quântica.
- saúde: técnicas de diagnóstico por imagem e sensores biomédicos de alta resolução.
- energia e ambiente: monitorização precisa de gases, campos e fluxos energéticos.
- indústria: padrões rastreáveis que suportam qualidade, inovação e comércio internacional.

A confiança nas medições e a rastreabilidade universal são elementos centrais para a segurança e para a tomada de decisão baseada em dados. Enquanto Instituição Nacional de Metrologia, o IPQ desempenha um papel essencial na implementação e no desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida, assegurando o rigor e a exatidão das medições realizadas, bem como a sua comparabilidade e rastreabilidade ao

SI, concretizando o objetivo constitucional de soberania no domínio dos padrões de medição e do controlo dos instrumentos de medição necessários à indústria e à sociedade portuguesa em geral.

No âmbito da Metrologia Quântica, o IPQ além de integrar a *European Metrology Network for Quantum Technologies* (EMN-Q) da EURAMET, participou no projeto de I&D "*Memristive Devices as Quantum Standard for Nanometrology*" para a implementação e desenvolvimento de dispositivos em chip (CMOS), integrados em instrumentação de laboratório, possibilitando a implementação de processos de auto ajuste e de auto calibração de instrumentos de medição ou de geração de grandezas elétricas. Esta nova aproximação para a realização da unidade elétrica de resistência, Ω, à temperatura ambiente e sem necessidade de um campo magnético, como acontece com o sistema primário de EHQ, embora com menor exatidão das medições, tem a grande vantagem de ter uma aplicação muito simplificada, com grande impacto industrial, dada a rastreabilidade imediata ao SI.

**Conclusão**

A Física Quântica redefiniu a Metrologia e abriu caminho para padrões baseados em constantes fundamentais da natureza. O estado atual da Metrologia Científica demonstra avanços notáveis, nomeadamente no desenvolvimento de relógios ópticos, que irão contribuir para a redefinição do segundo, de sensores e sistemas de fotónica e eletrónica, com perspetivas de impacto transformador em múltiplos setores da sociedade, desde a segurança de dados e a navegação até à saúde, indústria e sustentabilidade ambiental, mas só poderão fazê-lo com base em medições fiáveis, rastreáveis e comparáveis a nível internacional. A colaboração ativa entre Institutos Nacionais de Metrologia (como o IPQ), a academia e a indústria são essenciais para continuar a impulsionar a investigação, a normalização e a transferência de conhecimento, assegurando a liderança europeia neste domínio. A nível nacional, o IPQ desempenha um papel catalisador, promovendo e participando no ecossistema europeu da Metrologia Quântica, nomeadamente em redes europeias e em projetos de I&D, incentivando e acelerando o desenvolvimento e a adoção das tecnologias quânticas através de medições comparáveis e rastreadas. O futuro da Metrologia Quântica dependerá da capacidade de consolidar infraestruturas globais de confiança, capazes de responder aos desafios científicos, tecnológicos e societais.


Referências

[1] "O Sistema Internacional de Unidades", Tradução luso-brasileira do SI - 2.ª edição, INMETRO / IPQ, 2025, ISBN: PT 978-972-763-189-6.

[2] F. Bielsa; K. Fujita; A. Kiss; H. Fang et al., "Development of a beam mechanism for the BIPM Kibble Balance", IEEE, 2024, 10.1109/CPEM61406.2024.10646070

[3] "Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI", SI Brochure - 9th edition (2019) - Appendix 2, 20 May 2019

[4] Patel et al., "A zero external magnetic field quantum standard of resistance at the 10-9 level", Nat. Electron 7, 1111–1116 (2024), ArXiV preprint: https://arxiv.org/abs/2410.13365

[5] Gianluca Milano, Xin Zheng, Fabio Michieletti, Giuseppe Leonetti, Gabriel Caballero, Ilker Oztoprak, Luca Boarino, Özgür Bozat, Luca Callegaro, Natascia De Leo, Isabel Godinho, Daniel Granados, Itir Koymen, Mariela Menghini, Enrique Miranda, Luís Ribeiro, Carlo Ricciardi, Jordi Suñe, Vitor Cabral, Ilia Valov, "A quantum resistance memristor for an intrinsically traceable International System of Units standard", Nature Nanotechnology, 2025, https://doi.org/10.1038/s41565-025-02037-5

[6] Liñares, J.; Prieto-Blanco, "Quantum Optics: Theory, Methods, and Applications", Appl. Sci. 2025, 15(21), 11691, https://doi.org/10.3390/app152111691

[7] Zwinkels, J.C.; Ikonen, E.; Fox, N.P.; Ulm, G.; Rastello, M.L; "Photometry, radiometry and 'the candela': evolution in the classical and quantum world", Metrologia 47 (2010) R15–R32, DOI:10.1088/0026-1394/47/5/R01

[8] Kück, S. et al., "Single photon sources for quantum radiometry: a brief review about the current state-of-the-art", Applied Physics B 128 (2022) 28, https://doi.org/10.1007/s00340-021-07734-2





Isabel Godinho é licenciada em Física, pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e doutorada em Física pela mesma Universidade. É, desde 2016, diretora do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade e responsável pelo Subsistema Nacional de Metrologia, nas áreas da Metrologia Científica, Aplicada e Legal. Ingressou no Laboratório de Metrologia Elétrica do Laboratório Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (LNETI) em 1991 e esteve envolvida no desenvolvimento e materialização de padrões nas áreas da Metrologia elétrica, quântica e aceleração e em diversos projetos de cooperação e de I&D. É atualmente delegada nacional no âmbito do comité European Partnership on Metrology e representante nacional na EURAMET, no Comité Internacional de Metrologia Legal, da Organização Internacional de Metrologia Legal, e no BIPM.





Carlos Pires é licenciado em Engenharia Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e, pela mesma faculdade, fez o mestrado em Engenharia Física. Em 2007, iniciou as suas funções no Laboratório de Velocidade do Laboratório Nacional de Metrologia, do Instituto Português da Qualidade, como Técnico Superior. Em 2015, assume as funções de Responsável Técnico pelo domínio do Tempo e da Frequência, tendo como principal função realizar e disseminar o segundo, bem como dar rastreabilidade à unidade a nível nacional. Atualmente, desempenha as funções de presidente do Comité Técnico de Tempo e Frequência (TC-TF) da EURAMET.





Olivier Pellegrino. PhD em Física, pela Université de Paris 6, Licenciatura de Engenharia Química, técnico superior no Instituto Português da Qualidade (IPQ) onde, desde 2002, é responsável pelos Domínios Metrológicos de Fotometria, Radiometria e Radiofrequências no Departamento de Metrologia, representando o IPQ em Comissões Técnicas de Normalização CTE 01 – Terminologia, CTE 25- Grandezas e Unidades e CT 225 – Aplicações de Métodos Estatísticos, com participações em vários projetos de investigação científica europeus. É membro da equipa editorial da Gazeta de Física, da Sociedade Portuguesa de Física.





Vitor Cabral é licenciado em Engenharia Física pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Em 2014, iniciou funções no Laboratório de Eletricidade do Laboratório Nacional de Metrologia, do IPQ - Instituto Português da Qualidade, sendo atualmente Responsável Técnico dos domínios elétrico, termometria e higrometria e representante do IPQ no Comité Técnico da Eletricidade e Magnetismo da EURAMET. Tem participado em diversos projetos de investigação internacionais no âmbito dos programas coordenados pela EURAMET.

47
artigo geral
VOL. 48 - N.3

# Do Átomo ao Algoritmo:
## 100 anos de ideias que mudaram o mundo

Teresa Peña

Departamento de Física e Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares, IST, Universidade de Lisboa
LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

teresa.pena@tecnico.ulisboa.pt

*"A mais interessante teorização dos tempos recentes é a de Heisenberg-Born-Jordan sobre estados quânticos: os cálculos são verdadeira feitiçaria."*

**Albert Einsten, carta a Michele Besso**

Com a conclusão das celebrações do Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica, chegou o momento ideal para refletir sobre o alcance científico da Mecânica Quântica, desenvolvida ao longo do século XX, e sobre o seu incrível impacto tecnológico que permanece transformador no século XXI. A feitiçaria (ou talvez melhor, magia) dos cálculos de que falava Einstein converteu-se, ao longo de um século, e converte-se ainda, também em real feitiçaria (magia) tecnológica. Apresentamos neste artigo os princípios da Mecânica Quântica e o seu impacto direto, tanto no significado do ato de medir, a base da ciência, como na operacionalidade dos computadores quânticos da segunda revolução quântica. Abordamos ainda as condições que levam ao comportamento quântico (caixa 1) e a forma como este emerge ou se desvanece no mundo macroscópico.

### Introdução:
### Das anomalias da Física Clássica à Economia

A Mecânica Quântica oferece uma visão integrada de princípios fundamentais e ferramentas transformadoras. Demonstra, de forma única, que sondar e medir fenómenos a escalas que transcendem a observação humana direta permite criar tecnologias que beneficiam a humanidade nas suas dimensões individual e social.

A Física Quântica foi motivada, no final do século XIX, por anomalias inexplicáveis à luz da Física Clássica: a radiação do corpo negro, o mistério dos espectros de emissão dos átomos e o enigma da estabilidade das órbitas dos eletrões. Ao longo do século XX, a física destes processos — que revelaram que a energia a escalas atómicas não varia de forma contínua — evoluiu para a Teoria Quântica. Esta, por sua vez, deu origem a tecnologias disruptivas que mudaram o mundo.

A Mecânica Quântica alicerça a compreensão da Natureza em princípios estranhos à nossa intuição, que dificilmente ou nunca se entranham, válidos a uma escala de tamanhos milhares de milhões de vezes inferior à dos seres humanos. No entanto, é omnipresente na nossa civilização, com contributos precisos para a sustentabilidade através de materiais e dispositivos inovadores. Se os semicondutores (Caixa 2 e Tabela 2) tornaram possíveis os telemóveis, computadores, robótica e painéis solares, os supercondutores (Caixa 3 e Tabela 3) impactam áreas como a saúde, indústria, ambiente e transportes. Das tecnologias quânticas emergiram lasers, transístores, ressonância magnética e sensores de precisão; hoje, parece não haver tecnologia que escape ao enquadramento da Mecânica Quântica.




Devido ao seu papel central na Economia, atualmente os semicondutores são um tema de segurança nacional. A capacidade de fabricar chips de 2 nm ou 3 nm (os mais avançados) está concentrada em poucas empresas (como a TSMC em Taiwan), e a cadeia de abastecimento global extremamente sensível a tensões geopolíticas. A Ciência é neutra e alimentada pela criatividade e satisfação da descoberta, os ainda "superpoderes" do ser humano na era em que a Inteligência Artificial está a mudar a forma de fazer ciência. Mas a Tecnologia pode não ser neutra!

### A primeira e a segunda revoluções quânticas

A primeira revolução quântica, marcada pelos semicondutores e transístores, trouxe a era digital e a computação clássica. Caracterizou-se pelo uso "passivo" de efeitos quânticos em materiais e a miniaturização de dispositivos. Já o final do sécu-

lo XX e o início do XXI trouxeram a segunda revolução quântica, que vivemos hoje: uma nova era na computação, criptografia e comunicação.

Esta segunda revolução [1] distingue-se da primeira pela preparação e manipulação ativa de estados quânticos especificamente desenhados ("*engineered*") . Estes estados não se encontram de forma natural no Universo, ao contrário dos átomos da Tabela Periódica que a Teoria Quântica originalmente explicou. Enquanto a primeira revolução estabeleceu o predomínio quântico na eletrónica e instrumentação, a segunda revolução define uma nova etapa: a da supremacia na computação e comunicação.

Esta nova era concretiza-se pelo engenho no uso ativo dos princípios teóricos de superposição (ou sobreposição), entrelaçamento e coerência dos estados da matéria. Uma das suas promessas é a maior ubiquidade da Inteligência Artificial e a sua fusão com pessoas e objetos. Esta promessa será maldição ou salvação? Ainda não sabemos.




**De Helgoland ao Hardware Quântico**

*O artigo "Umdeutung" (Reinterpretação)*

O marco fundador da Mecânica Quântica ocorreu no verão de 1925, quando Werner Heisenberg, isolado na ilha de Helgoland para recuperar de uma crise aguda de febre dos fenos [2], escreveu o artigo que inauguraria a chamada mecânica matricial [3].

O ponto de partida de Heisenberg foi audaz: rejeitou a existência das órbitas dos eletrões no átomo, aceitou a impossibilidade de seguir em cada instante a posição e o momento linear (base da mecânica clássica) desses eletrões, e fixou-se numa formulação estritamente assente em observáveis — as frequências discretas e as intensidades das linhas espectrais da radiação emitida pelos átomos (o análogo do arco-íris para a radiação visível).

Em vez de procurar uma nova interação que explicasse as órbitas estáveis ou novas leis dinâmicas, Heisenberg utilizou a 2.ª Lei de Newton. Mas rompeu com a Física clássica ao introduzir nessa Lei as grandezas posição e momento, em cada instante, não como números, mas antes tabelas de números

$$x\hat{(t)}, p\hat{(t)}$$

formadas pelos coeficientes de Fourier dessas grandezas periódicas nas frequências dos saltos energéticos das órbitas. As tabelas eram de facto matrizes, como reconhecido por Dirac pouco tempo depois.




O golpe de génio no artigo *Umdeutung* [3], como ficou conhecido, surgiu ao multiplicar as expansões de Fourier da posição e do momento. Heisenberg eliminou, por opção, os termos em que as frequências não seguiam o princípio de combinação de Rydberg-Ritz (segundo o qual a frequência de uma linha espectral é a soma de outras duas). Ao fazê-lo, deduziu que a multiplicação das tabelas não comuta, isto é

$$x(t)p(t) \neq p(t)x(t).$$

Este resultado abalou a essência da Física Clássica: se a ordem dos fatores altera o produto, o que significa, afinal, o ato de medir? Medir o momento antes da posição altera o valor que se mede para a posição e vice-versa?

Mais tarde, após a inspiração febril de Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan [4] formalizaram rigorosamente este resultado através das relações de comutação canónicas. A ruptura com a Física clássica ficou consolidada.

Heisenberg incluiu ainda no artigo *Umdeutung* uma primeira digressão pelo que hoje conhecemos como o Teorema de Ehrenfest, segundo o qual os valores médios (valores esperados) das grandezas quânticas evoluem no tempo de forma análoga às equações da mecânica clássica, estabelecendo

uma ponte fundamental entre os dois mundos.

*Destruição criativa e a relação entre Ciência e Tecnologia*
O episódio de Helgoland ilustra como a Física avança através de saltos conceptuais radicais, frequentemente em contextos inesperados. O isolamento e a medicação para a febre dos fenos podem ter potenciado a originalidade visionária de Heisenberg. O seu artigo é um paradigma de destruição criativa (ou criação destrutiva?): uma construção nova que, para existir, teve de desmantelar os pilares do pensamento anterior.

Curiosamente, exatamente cem anos depois, o Prémio Nobel da Economia de 2025 foi atribuído à teoria da "destruição criativa", que reconhece na inovação tecnológica o motor que impede a estagnação e gera crescimento. Embora muitos utilizem esta teoria para defender a primazia da ciência aplicada, a Mecânica Quântica é o exemplo flagrante de que a ciência fundamental tem a semente da transformação.

Contudo, o inverso também é verdadeiro: a investigação aplicada gera conhecimento fundamental. Veja-se o caso da instrumentação ótica: o aperfeiçoamento das lentes (onde trabalhou Spinoza) e a luneta de Galileu foram precursores da Astrofísica moderna. Não existe um sentido único na caminhada da ciência e inovação! O que existe é um diálogo constante entre a teoria pura e a invenção prática e tecnológica.

Analisemos então os princípios teóricos da Mecânica Quântica e a sua articulação com a inovação, em particular da 2ª revolução quântica.

*1. Quantização*
As energias permitidas de um sistema de partículas fortemente confinado estão restritas a um conjunto discreto de valores, ao contrário do que acontece na Física Clássica, onde a energia varia de forma contínua. Na Natureza, à escala atómica, as partículas "sobem ou descem a escada" dos níveis de energia possíveis: tal como nós só podemos estar estacionários num degrau e nunca entre dois, uma partícula não pode existir em estados de energia intermédios.

Este fenómeno é uma consequência direta da natureza ondulatória da matéria. Quando uma partícula, como um electrão, é confinada (por exemplo, pelo potencial elétrico de um núcleo), a sua função de onda deve satisfazer condições de fronteira específicas. Tal como as notas de uma corda de guitarra dependem do seu comprimento, apenas certas frequências são permitidas — e, portanto, também apenas certas energias, devido à relação frequência-energia que Planck descobriu ao estudar a radiação do corpo negro.

A quantização estende-se a outras propriedades, como o momento angular e o *spin*. Este último define como uma partícula interage com campos magnéticos, tal como a massa dita a como interage com campos gravitacionais. Uma consequência direta desta discretização é que os espectros de emissão e absorção dos elementos apresentam riscas nítidas, correspondentes às diferenças exatas de energia entre os estados permitidos.

Na 2.ª Revolução Quântica, este princípio é levado ao extremo com os pontos quânticos (quantum dots). Nestas nanoestruturas, aprisionam-se electrões e manipula-se o espaçamento entre degraus de energia, permitindo criar lasers de alta precisão, detetores de fotões únicos e, crucialmente, os estados que alicerçam a informação quântica.

*2. Princípio da Incerteza*
A informação sobre um sistema obtem-se através de atos de medida. A informação relevante sobre qualquer sistema é a que permite prever a evolução desse sistema. Na Mecânica Clássica isto exige conhecer num dado instante a posição e a velocidade. É aqui que a Física Quântica se distingue da Física Clássica. Carlo Rovelli descreve esta diferença de forma elegante [5]): Na Mecânica Quântica "*A quantidade máxima de informação relevante que se pode adquirir sobre um objeto é finita*". Este é o cerne do Princípio da Incerteza de Heisenberg. Para as incertezas na posição e o momento linear estabelece que

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2.$$

Esta desigualdade, onde $\hbar$ é a constante de Planck reduzida, implica que não podemos conhecer simultaneamente a posição e o momento de uma partícula: as incertezas na posição e no momento não podem ser simultaneamente próximas de zero, nas escalas em que a constante de Planck não possa ser considerada praticamente nula.

No entanto há mais: a não comutação do produto das matrizes de Heisenberg para a posição e o momento linear também tem consequências profundas. Seguindo ainda Rovelli [5]: "É sempre possível obter nova informação relevante sobre um objecto." Isto contradiz a primeira afirmação, o princípio de incerteza? Só aparentemente! A primeira afirmação diz que a informação relevante é finita, a segunda que se transforma e é renovável. De facto, se medirmos primeiro a posição, ficamos sem informação precisa sobre o momento, pelo princípio da incerteza. Mas, pela não comutatividade da medição das duas grandezas, se a seguir medirmos o momento, apagamos, perdemos a informação que tinhamos sobre a posição que passa a ter qualquer novo valor e se não esgotou num valor fixo.

Esta limitação não é uma falha dos nossos aparelhos, mas uma característica intrínseca da realidade que é crítica para o funcionamento do hardware quântico.

*3. Superposição (ou sobreposição) Quântica*
Na física clássica um objeto está num lugar ou noutro, e não simultaneamente em dois ou mais lugares; um pião gira da esquerda para a direita ou da direita para a esquerda, e não simultaneamente nos dois sentidos; um interruptor está ligado ou desligado e não simultaneamente ligado e desligado, etc. Na mecânica quântica, uma partícula (electrão, fotão, protão,…) pode existir numa combinação linear de todos ou alguns estados possíveis.

Esta superposição persiste apenas enquanto o sistema não é

observado. No momento em que medimos o estado da partícula, a superposição de várias componentes ou estados é destruída ("colapsa"), reduzindo-se apenas a um dos estados da superposição.

O que faz colapsar a superposição de estados num só estado? Uma hipótese é a interação que qualquer ato de medida implica (ver decoerência no ponto 4). Outra interpretação é a teoria dos Muitos Mundos (Universos Paralelos) que interpreta a função de onda da equação de Schrodinger como a entidade que descreve a realidade. Segundo essa teoria quando se faz uma medição a realidade ramifica-se em vários mundos, ou versões do mundo igualmente reais e concretas. A incompatibilidade com a experiência de outras teorias alternativas, como as de "variáveis escondidas" iniciadas por David Bohm para salvar o determinismo, foi demonstrada pelas experiências que valeram o Nobel de 2022 a Aspect, Clauser e Zeilinger.

Os computadores quânticos usam o princípio da superposição para mudar o jogo clássico. Um qubit (ou bit quântico) em vez de um bit clássico - que é 0 ou 1 - representa simultaneamente os valores 0 e 1, o dá aos computadores quânticos uma capacidade massiva de processamente paralelo. *N* qubits podem representar $2^N$ estados ao mesmo tempo, o que dá uma vantagem exponencial sobre *N* bits clássicos - que representam só *N* estados. Com apenas 300 qubits, poderíamos processar mais estados do que o número de átomos no universo observável. Foi por isso que Richard Feynman [6], no início da década de 1980, sugeriu um computador quântico como ferramenta eficaz para resolver problemas em física e química.

O desafio da engenharia atual é manter este estado de superposição tempo suficiente para efetuar cálculos, conhecido como tempo de coerência que analisamos de seguida.

*4. Decoerência*

A decoerência é o processo pelo qual um sistema quântico perde a propriedade de superposição ao interagir com o ambiente, transformando-se num sistema clássico comum. É a razão pela qual uma mesa ou um livros não são superposições de mesas ou livros diferentes. Um caso particular de decoerência é o que acontece quando o ato de medida é realizado num sistema quântico, pois a escalas em que a constante de Planck não pode ser considerada nula a medição afecta inexoravelmente o sistema, de acordo com o Princípio de Incerteza.

Para combater a decoerência, os processadores quânticos (como o *Willow* da Google ou os sistemas da IBM) operam em Refrigeradores de Diluição a temperaturas de milikelvin, protegidos por blindagens que bloqueiam o campo magnético terrestre e sinais de Wi-Fi. O desafio atual é aumentar o tempo de coerência — o "cronómetro" que dita quanto tempo temos para calcular antes que a física quântica se desvaneça. Em 1999, este tempo era de 1 nanosegundo; hoje, aproxima-se de 1 milissegundo, com a esperança de que os qubits topológicos (estudados pela Microsoft) ofereçam uma imunidade geométrica à decoerência: em vez de apenas um ponto frágil, armazena-se a informação em tranças quânticas. Se o sistema sofrer um pequeno interação com o ambiente, a geometria da trança não muda, e a informação permanece intacta.

*5. Entrelaçamento*

Um estado entrelaçado é um estado onde os estados de duas ou mais partículas estão correlacionados de tal forma que o estado quântico de uma não pode ser descrito independentemente do estado de outra, independentemente da distância que as separa, implicando uma conetividade não-local. Um estado é entrelaçado apenas se não puder ser escrito de forma separável, como produto de estados individuais.

Enquanto a superposição permite que um qubit represente os estados 0 e 1 simultaneamente, o entrelaçamento é o que permite que múltiplos qubits trabalhem de forma coordenada e correlacionada.

Um exemplo de estado entrelaçado é o que representa a superposição de dois cenários: no primeiro o estado da partícula A é 1 (branca) e o da partícula B é 0 (preta); no segundo, as cores das bolas estão trocadas. Este estado descreve duas caixas, cada uma com uma bola de cor desconhecida. Se ao abrirmos a primeira caixa observarmos 1 para a partícula A, sabemos instantaneamente que a outra partícula é 0, e vice-versa. A distância entre as caixas é irrelevante; a conectividade é não-local. O que importa é a forma como o sistema foi preparado originalmente.

Sem o entrelaçamento um computador quântico seria apenas um conjunto de partículas isoladas em superposição. É o entrelaçamento que cria a verdadeira capacidade do computador quântico, pois a alteração de um único qubit num sistema entrelaçado pode influenciar o estado de todos os outros, e assim permite filtrar, por entre triliões de combinações, a resposta correta para problemas complexos de química, física e criptografia. Sem estados entrelaçados não existiria o poder de processamento que define a supremacia quântica.

*6. Efeito de túnel*

Na mecânica clássica, uma partícula de massa *m* e energia E




só pode entrar numa zona onde a energia potencial é $U>0$ se $E>U$, devido à conservação de energia. Por exemplo, se uma bola lançada junto ao chão não tem energia suficiente para atingir a altura de um muro, nunca passará para o outro lado. Mas, quanticamente, a função de onda atravessa mesmo a barreira, o muro, permitindo que a partícula reapareça do outro lado, porque a equação de Schrödinger independente do tempo admite uma solução de decaimento exponencial: $\psi(x) \propto e^{-kx}$ , onde

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m(U-E)}{\hbar^2}}.$$

A escalas onde constante de Planck pode ser considerada praticamente zero a função de onda é nula e a barreira não é atravessada, recuperando-se o caso clássico.

O efeito de túnel não é apenas uma curiosidade teórica: é a razão porque o Sol brilha. Os protões no interior das estrelas não têm energia térmica suficiente para vencer a repulsão eletrostática e a fusão nuclear dos protões - que gera a energia das estrelas - só ocorre porque a barreiras de Coulomb é atravessada por efeito de túnel, com uma probabilidade não nula. Sem efeito de túnel os protões primordiais não teriam conseguido formar núcleos mais pesados e não existiríamos. Que relação tem o efeito de túnel com os computadores quânticos? É um motor por detrás do hardware quântico: nas Junções de Josephson (ver caixa sobre supercondutores) os pares de electrões atravessam barreiras para criar o fluxo de corrente que define o qubit.

Curiosamente, o efeito túnel é também um desafio para a computação clássica: as chips de silício tradicionais estão a atingir um limite físico de miniaturização porque, à medida que diminuem, o efeito de túnel tem maior probabilidade de ocorrer e os electrões começam a atravessar as paredes dos transístores, gerando calor e erro (decoerência).

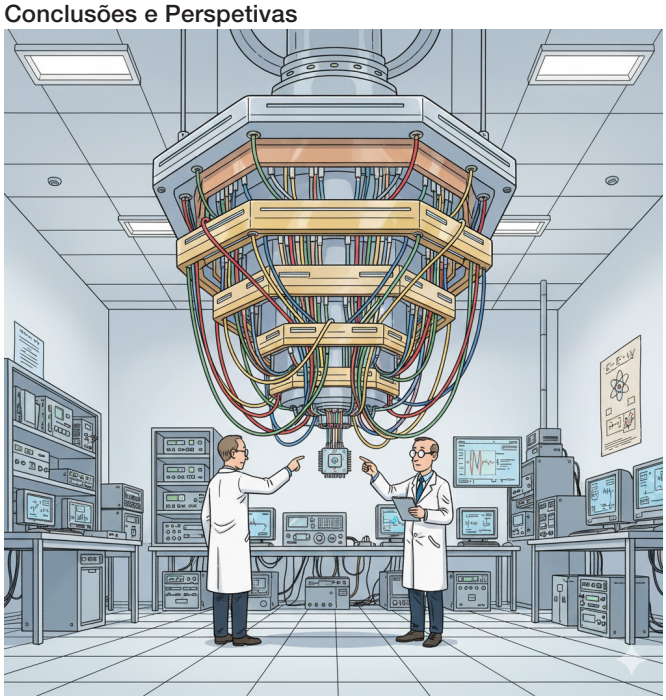
A Tabela 1 resume as funcionalidades, em permanente evolução ainda, dos princípios da Mecânica nos computadores quânticos.

## Progressos recentes

Os progressos mais recentes em computação quântica incluem não apenas o desenvolvimento de novos algoritmos, mas também demonstrações experimentais que exploram novos regimes onde dispositivos quânticos superam métodos clássicos conhecidos. Resultados de processadores supercondutores [7] e arquiteturas fotónicas [8] mostraram que tarefas de amostragem aleatória podem ser realizadas em tempos impossíveis para supercomputadores clássicos, inaugurando uma nova fase nos estudos de "vantagem quântica".

A vantagem prática dos computadores quânticos depende da fidelidade dos qubits e da tolerância ao ruído da superposição quântica [9], bem como da escolha criteriosa dos algoritmos clássicos de referência. Nos últimos anos, houve avanços notáveis em algoritmos quânticos e, em paralelo, esforços sistemáticos para medir, de forma rigorosa, quando e onde os dispositivos quânticos superam máquinas clássicas. Exemplos emblemáticos incluem o processador supercondutor Sycamore da Google [10], que executou uma tarefa de amostragem complexa, alegando um custo computacional que seria proibitivo para supercomputadores clássicos.

## Conclusões e Perspetivas



*Interdisciplinariedade*

Criar e consolidar tecnologias quânticas exige uma abordagem interdisciplinar que una teoria quântica, engenharia de sistemas, ciência dos materiais, criogenia, teoria da informação e ciência computacional.

O legado iniciado por Heisenberg em Helgoland alimenta laboratórios e empresas que procuram atingir computação tolerante ao ruído, comunicações invioláveis e metrologia de precisão

| Princípio | Papel no Computador Quântico | Implicação no Computador Quântico | Impacto no Computador Quântico |
|---|---|---|---|
| Quantização | Permite estados quantizados. | Funcionalidade. | Criação de qubits. |
| Sobreposição | Permite que um qubit exista em 0 e 1 simultaneamente. | Funcionalidade. | Capacidade de processamento paralelo massivo. |
| Entrelaçamento | Cria correlações entre qubits. | Funcionalidade. | Permite coordenação entre múltiplos qubits e transporte de informação. |
| Efeito de Túnel | Permite que partículas atravessem barreiras de energia. | Misto: Funcionalidadde e Disfunção (Erro). | Permite o funcionamento das Junções de Josephson nos qubits supercondutores mas pode causar fuga de corrente em qubits mal isolados. |
| Decoerência | Interação indesejada com o ambiente. | Disfunção (Erro). | Ruído que destrói a informação e termina o cálculo prematuramente |

Tabela 1 - Princípios da Mecânica Quântica e impactos respectivos no Computador Quântico

sem precedentes. O caminho que começou com o mistério da radiação do corpo negro continua…

Cem anos após a "alucinação" visionária de Heisenberg em Helgoland, a Mecânica Quântica deixou de ser apenas um exercício de abstração matemática e imaginação física para se tornar o alicerce da nossa infraestrutura tecnológica. A transição da primeira para a segunda revolução quântica marca a passagem do uso passivo de materiais para a manipulação ativa da própria natureza da informação. A superposição e o entrelaçamento dos estados quânticos geram um processamento paralelo que não é apenas mais rápido, mas fundamentalmente diferente.

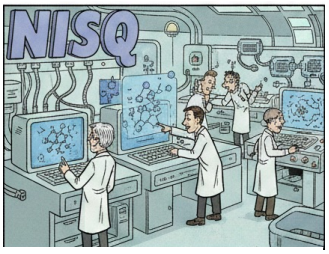
*Confluências: Ciência, Computação Quântica, Inteligência Artificial e Sociedade*

A promessa de computadores capazes de simular novos fármacos em segundos, de quebrar códigos criptográficos outrora inexpugnáveis ou de otimizar redes logísticas globais é, simultaneamente, entusiasmante e assustadora. Esta revolução converge agora com o crescimento da Inteligência Artificial. A fusão entre o hardware quântico e a IA promete uma ubiquidade de processamento que poderá integrar-se de forma invisível nas nossas vidas e até na nossa biologia.

Surge então a questão que deixámos no início: esta promessa é maldição ou salvação, ameaça ou oportunidade? A história ensina-nos que a tecnologia pode não ser moralmente neutra; o seu impacto depende da ética e dos objetivos de quem a desenvolve e aplica. Se, por um lado, a computação quântica pode ser a chave para problemas de sustentabilidade, na saúde e no ambiente, por outro, tem consigo o risco de uma enorme desigualdade entre quem detém a "supremacia quântica" e quem depende dela.




1925: A halucinação quântica




2025: O alicerce tecnológico

Com o encerramento do Ano Internacional da Ciência e Tecnologias Quânticas, uma questão natural é: que novas aplicações surgirão quando alcançarmos controlo total sobre sistemas quânticos complexos? A história da Física sugere que não sabemos exatamente responder a esta pergunta. O futuro não está determinado, está em sobreposição. A nossa responsabilidade está em realizarmos bem as nossas próximas medições — as nossas escolhas coletivas — para fazer colapsar o futuro numa realidade melhor que a do presente.

O que devemos certamente garantir é que na Ciência se continue a fazer perguntas e se estimule a criatividade – superpoderes humanos que temos de cultivar ainda mais agora, porque a Inteligência Artificial já permite a identificação das melhores respostas e dos padrões nos grandes oceanos de dados, com uma rapidez que nos ultrapassa.

**Caixa 1 - Por que não observamos à nossa volta comportamentos quânticos?**

No mundo quântico, todas as partículas se comportam como ondas. Sabemos que uma onda de luz ao passar por obstáculos comparáveis ao seu comprimento de onda, cria zonas alternadamente iluminadas e escuras que só se explicam com o fenómeno de interferência: ondas originadas em pontos diferentes adicionam-se ou subtraem-se. Como a luz, também o comportamento ondulatório de partículas exige escalas especiais de energia e extensão no espaço (ou tamanho) das partículas.

Experiências de difração e interferência de feixes de partículas mostram que comprimento de onda de de Broglie da onda associada a uma partícula é dado por

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

onde $h$ é a constante de Planck. Quando este comprimento de onda se estende muito para lá da dimensão d da partícula, o comportamento quântico acontece. As ondas de de Broglie, tal como a luz ou o som, ou as ondas do mar, das partículas quânticas não têm uma localização bem definida no espaço, mas espalham-se no espaço ou numa dada região. Mas para uma bola com a massa *m* de 1 kg este comportamento quântico não é observável: o comprimento de onda da bola não se estende para lá da sua dimensão natural, é praticamente zero.

De facto, para podermos observar efeitos quânticos numa bola de 1 kg e 10 cm de diâmetro d, teríamos que impor a condição $\lambda \geq d$. Usando a relação não relativista entre energia cinética E e momento linear p

$$E = \frac{p^2}{2m},$$

podemos verificar que para se ter $\lambda \geq d$ a energia cinética tem de ser inferior a $10^{-65}$ J ou, em unidades de temperatura, $10^{-42}$ K. Por isso nunca vemos bolas de ténis quânticas! O resultado obtido é cerca de um milhar de milhões de biliões de biliões de vezes inferior à temperatura mais baixa possível num laboratório. Mesmo que a bola tivesse uma energia tão inimaginavelmente baixa, o ruído térmico, resultante das colisões com as moléculas que a rodeiam e com os fotões (luz) do ambiente, e as vibrações internas destruiam qualquer efeito quântico. Para referência, a radiação cósmica de fundo é 2,7 K e o universo é mesmo muito frio!

Esta demonstração numérica mostra que em geral uma partícula macroscópica não tem comportamento quântico. Mas existem sistemas macroscópicos especiais, feitos de muitas partículas, com comportamento quântico colectivo emergente a temperaturas baixas realizáveis no laboratório, descoberta que valeu o prémio Nobel da Física de 2025. É o caso dos supercondutores, que têm um papel relevante na tecnologia e ciência de hoje.

## Caixa 2 - Semicondutores e a era digital

Um semicondutor é um tipo de material sólido cuja condutividade elétrica é intermédia, situando-se entre a de um condutor e a de um isolante. Esta propriedade permite a criação de transístores, que controlam o fluxo de corrente eléctrica e funcionam como interruptores elétricos extremamente pequenos e rápidos. O transístor é o bloco de construção fundamental dos chips da electrónica digital.

É a capacidade de concentrar milhões de milhões de interruptores em miniatura num único chip que faz do semicondutor (silício) a base da tecnologia dos smartphones, computadores, painéis solares,...

| Área de Impacto | Principais Tecnologias / Dispositivos | Função do Semicondutor |
|---|---|---|
| Computação e IA | PCs, Servidores, GPUs (NVIDIA), CPUs. | Processamento de dados complexos e execução de modelos de IA. |
| Comunicação | Smartphones, Redes 5G/6G, Satélites, Routers. | Modulação de sinais de rádio e gestão de dados em alta velocidade. |
| Saúde e Medicina | Ressonância Magnética, Pacemakers, Cirurgia Robótica. | Sensores de alta precisão e processamento de imagem diagnóstica. |
| Energia Renovável | Painéis Fotovoltaicos, Inversores Eólicos. | Conversão de luz solar em eletricidade e gestão de redes inteligentes. |
| Indústria 4.0 | Robôs Industriais, Sensores IoT, Impressão 3D. | Automação de linhas de produção e monitorização em tempo real. |
| Automóvel | Carros Elétricos (EV), Condução Autónoma, ADAS. | Controlo da bateria, sensores de proximidade e info-entretenimento. |
| Eletrónica de Consumo | TVs LED/OLED, Frigoríficos Inteligentes, Consolas. | Controlo de eficiência energética e interfaces de utilizador. |
| Defesa e Espaço | Radares de varrimento ativo, Telescópios (James Webb). | Deteção de infravermelhos e sistemas de navegação de precisão. |

Tabela 2 - Síntese do impacto dos semicondutores.

## Caixa 3 - Supercondutores e aplicações

Um supercondutor é um exemplo de um objeto macroscópico com comportamento quântico. Num condutor normal, os electrões colidem com os átomos, gerando resistência (calor). Num supercondutor a temperaturas muito baixas, os electrões que normalmente se repelem unem-se formando pares (de Cooper) que, sendo bosões, se agregam e cooordenam num grande condensado macroscópico, descrito por uma única função de onda colectiva. Abaixo de uma temperatura crítica os supercondutores apresentam resistência eléctrica nula.

As aplicações dos supercondutores cobrem vários sectores de atividade:

- Na medicina, as máquinas de ressonância magnética (MRI) utilizam bobinas de supercondutores (como nióbio-titânio) para criar campos magnéticos potentes e estáveis; sem resistência, a corrente elétrica circula sem gerar calor, permitindo imagens de alta resolução irrealizáveis com ímanes convencionais.

- Nos transportes, nos Comboios Maglev os supercondutores permitem uma levitação estável de massas de toneladas; sem atrito com os carris o gasto energético é eficiente e atingem-se velocidades da ordem de 600 km/h!

- Nas redes elétricas, cabos supercondutores podem transportar até 10 vezes mais eletricidade do que um cabo de cobre, sem perda de energia por calor.

- Com os sensores de ultraprecisão (SQUIDs, “Superconducting Quantum Interference Device”) detectam-se as fraquíssimas correntes elétricas no cérebro humano em Magnetoencefalografia, e na prospeção mineral variações magnéticas mínimas.

- Na investigação científica, o acelerador de Hadrões (LHC) no CERN usa ímanes supercondutores para acelerar protões até velocidades próximas da velocidade da luz.

Entrando na 2.ª revolução digital, muitos computadores quânticos atuais (como os da IBM e Google) utilizam circuitos de materiais supercondutores em vez de chips convencionais. No coração dos qubits está a Junção de Josephson: pelo efeito de túnel, um isolante entre dois supercondutores controla os níveis de energia do circuito e os estados lógicos 0 e 1.

Qual o Papel dos Supercondutores nos Computadores Quânticos? Para que um computador quântico funcione, as suas componentes devem conduzir eletricidade sem qualquer resistência e proteger a informação quântica do ruído externo. Os supercondutores respondem a este desafio: Como os supercondutores não dissipam energia sob a forma de calor, ajudam a manter a coerência quântica que permite ao qubit realizar cálculos.

Como as propriedades supercondutoras só existem a temperaturas extremamente baixas, próximas do zero absoluto (–273,15 °C), os computadores quânticos são instalados num ambiente mais frio que o do espaço profundo.
Tabela 3: Síntese das aplicações dos supercondutores.

| Área | Aplicação | Benefício Principal |
|---|---|---|
| Saúde | Ressonância Magnética | Imagens sem radiação ionizante. |
| Transporte | Comboios Maglev | Velocidade extrema e ausência de atrito. |
| Ciência | Aceleradores de Partículas | Estudo das leis fundamentais do universo. |
| Energia | Cabos de Transmissão | Eficiência total (zero desperdício). |
| Computação | Computadores Quânticos | Criação de qubits (como os da IBM/Google). |

Tabela 3 - Síntese das aplicações dos supercondutores.


Referências

[1] Dowling, J., & Milburn, G. (2003). "Quantum Technology: The Second Quantum Revolution." Philosophical Transactions of the Royal Society A, 361, 1655–1674.
[2] Cassidy, D. (1992). Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg. W. H. Freeman.
[3] Heisenberg, W. (1925). "Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen." Zeitschrift für Physik, 33, 879–893, (1925)
[4] Born, M., & Jordan, P. (1925). "Zur Quantenmechanik." Zeitschrift für Physik, 34, 858–888.
[5] Carlo Rovelli, Helgoland, The Strange and Beautiful Story of Quantum Mechanics, Penguin Random House, (2021).
[6] Feynman, R. P. Simulating physics with computers. Int. J. Theor. Phys. 21, 467–488 (1982).
[7] Arute, F. et al. "Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor." Nature, 574, 505–510, (2019).
[8] ZHONG, Han-Sen, et al. "Quantum computational advantage using photons". Science, v. 370, n. 6523, p. 1460-1463, (2020).
[9] PRESKILL, John. "Quantum Computing in the NISQ era and beyond". Quantum, v. 2, p. 79, (2018).
[10] PAN, Feng; CHEN, Keyang; ZHANG, Pan. "Solving the sampling problem of the Sycamore quantum circuits". Physical Review Letters, v. 129, n. 9, 090502, (2022).


Declaração de Uso

Foram utilizadas ferramentas de IA no desenvolvimento deste artigo. Esta utilização aplicou-se especificamente aos processos de recolha de alguma informação, revisão da escrita e elaboração de todas as figuras.
Todas as contribuições de IA foram revistas pela autora seguindo critérios de fiabilidade e coerência da informação, e procura de eficácia da mensagem escrita e gráfica.

As ferramentas utilizadas foram:
- OpenAI. (2025). ChatGPT [Large language model]. Acedido em Novembro e Dezembro de 2025, https://chat.openai.com
- Google. (2025). Gemini [Large language model]. Acedido em Novembro e Dezembro de 2025, https://gemini.google.com




Teresa Peña é o Professora Catedrática no Instituto Superior Técnico (IST), ULisboa, e investigadora sénior do LIP onde é líder do grupo de física nuclear/hadrónica teórica NPSTRONG.É Membro Associado da HFHF, a Academia de Pesquisa Helmholtz Hesse para FAIR/GSI, um *think-tank* para a Investigação nas instalaçoes do GSI (Darmstadt) e Sócia Honorária da EPS. Obteve o reconhecimento de Professora Distinta do IST e é membro Correspondente da Academia das Ciências de Lisboa, classe de Ciências. Autora de mais de uma centena de artigos e vários livros, investigou sistemas complexos de física hadrónica e nuclear, incluindo forças de três nucleões, produção de mesões, e reacções fotonucleares que afectam a evolução do Cosmos. Investiga estruturas multiquark exóticas que foram recentemente descobertas.
É autora do livro "Nucleus: a trip into the heart of matter", com Ray Mackintosh, Jim Al-Khalili, Bjorn Jonson, ed. Johns Hopkins University Press e traduzido para português, francês, checo, húngario, sueco e coreano, bem como do livro "Einstein, Albert Einstein, Homem, Cidadão e Cientista", com Jorge Dias de Deus, ed. Gradiva.
Foi Directora da Gazeta de Física, Presidente da SPF e membro do Conselho Editorial do European Physics News (EPN-EPS). Serviu dois mandatos como Membro da Comissão Executiva da Sociedade Europeia de Física. É Membro da Comissão Internacional de várias Conferências na sua área de trabalho (por exemplo, NSTAR24), da Comissão Europeia de Problemas de Poucos Corpos e do Internacional Light Cone Advisory Commitee, ILCAC. Serviu o Senado da ULisboa e a Comissão Permanente do Senado Universitário para Assuntos Científicos. No IST, coordenou dois Programas de Mestrado e lançou o de Engenharia Biomédica, foi Presidente do Departamento de Física e Presidente do Conselho Pedagógico.

**Quantos animais e plantas vê ao espreitar pela sua janela? Pela nossa, vemos 252 espécies de fauna e mais de 900 espécies e subespécies de flora.**

Visite-nos em
biodiversidade.com.pt

BIODIVERSIDADE

*by The Navigator Company*



# Deus joga dados!
# Fotónica e polarização quântica para todos

**Horácio Fernandes[1,*], Marisa Correia[2], Emmanuel Zambrini Cruzeiro[3], Ângela Costa[4]**

[1]Departamento de Física, Instituto Superior técnico, Universidade de Lisboa

[2]Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Santarém

[3]Quantum Information and Quantum Optics Laboratory, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

[4]Escola Secundária Sebastião e Silva, Oeiras

hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

*O jogo aqui descrito pode ser realizado quer num tabuleiro quer numa atividade com um grande de alunos, por exemplo na entrada de um anfiteatro, substituindo os peões-fotão por alunos-fotão. É uma forma divertida e informal de demonstrar o conceito probabilístico intrínseco à física quântica.*

Segundo Einstein, "a teoria quântica produz um bom resultado, mas dificilmente nos aproxima do segredo do Criador. Estou, em todos os casos, convencido de que Ele não joga dados." sic.

Mas o processo aleatório (estocástico) da física quântica será mesmo assim? Aparentemente quando jogamos aos dados ou à roleta sabemos que UMA jogada é completamente aleatória mas para GRANDES NÚMEROS conseguimos prever um valor médio: por exemplo, jogando com dois dados, se alguém aposta sempre no 7, ao fim de muitas jogadas, ganhará sobre qualquer outra aposta!

Por isso Einstein acredita que "Tudo é determinado, tanto o começo como o fim, por forças sobre as quais não temos controle… Todos dançamos numa melodia misteriosa, entoada à distância por um invisível 'jogador'." e alega, mesmo aceitando um cariz aleatório para a mecânica quântica, que a física em algum ponto fica determinada… e se não fica é porque ainda desconhecemos algo sobre as suas leis.

Vamos jogar.

**Fundamentos do jogo**

A luz tem uma natureza ondulatória e também quântica, pois conseguimos descrever os fenómenos físicos da luz interpretando-a como um conjunto de partículas.

Este jogo é baseado numa característica importante da luz, a sua polarização.

Os polarizadores são materiais que só se deixam atravessar para um determinado estado de polarização de cada fotão: se este estiver numa combinação de dois estados, por exemplo horizontal e vertical e se o virmos a atravessar um polarizador, então fica definido que ele tem a polarização da orientação desse polarizador. Ao pensarmos num único fotão, é interessan-

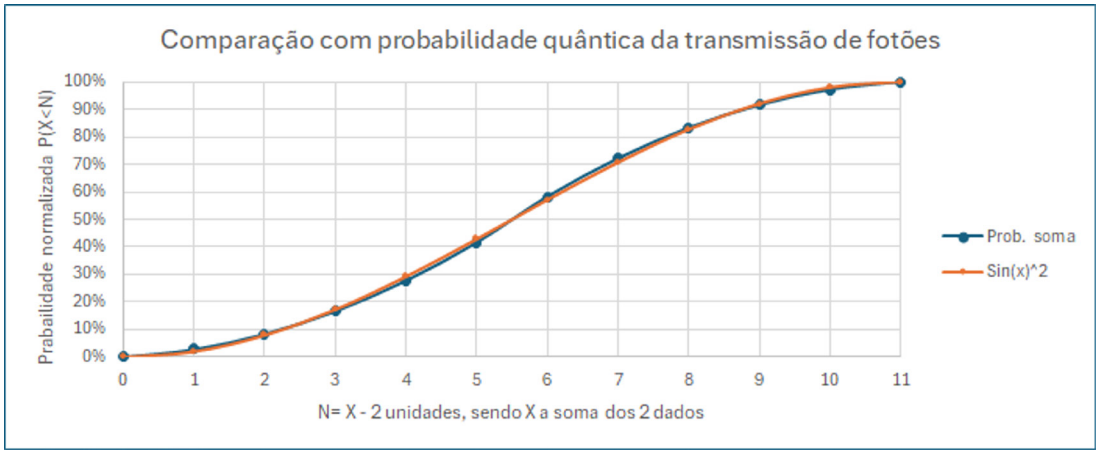



Figura 1 - Probabilidade quântica de absorção de um fotão por um polarizador de acordo com a polarização da luz e comparação com o lançamento de dois dados, dada a condição "maior do que a soma dos dados". N é a soma dos pontos dos dados subtraída de 2 unidades para se obter $P(X<N)=0$.

te notar que essa passagem pelo polarizador tem uma certa probabilidade de ocorrer dependendo do ângulo da polarização inicial da luz com o eixo do polarizador. Esta probabilidade demonstra-se ser igual ao quadrado do cosseno desse ângulo. Na figura 1 temos a comparação entre esta probabilidade quântica com a probabilidade de obter determinada soma quando lançamos 2 dados: a semelhança é incrível!

Com dois dados torna-se mais fácil interpretar as probabilidades tal como descrito na tabela. Contudo, no nosso jogo jogaremos com 3 dados, por ser uma função simétrica em torno dos 50% de probabilidade.

Com efeito, se o polarizador estiver a 90º essa probabilidade é nula, ou seja toda a luz é bloqueada, e se estiver alinhado a 0º é 100 %, ou seja toda a luz passa. Para valores intermédios, neste jogo, faremos uma proporcionalidade entre o ângulo e os valores da soma de três dados que sabemos variar entre 3 e 18. Como os nossos dados não começam do zero, associaremos o valor 2 ao zero e o 18 aos 90º (figura 2). Deste modo, caso o fotão encontre um polarizador alinhado com o seu estado, o seu ângulo é 0º e, ao lançar os dados, obtemos um valor sempre superior a 2 pelo que o fotão nunca é absorvido pelo polarizador, ou seja, atravessa-o sempre. Pelo contrário, se estiver a 90º qualquer lançamento de dados nunca será superior a 18 e consequentemente nunca conseguirá atravessar o polarizador.

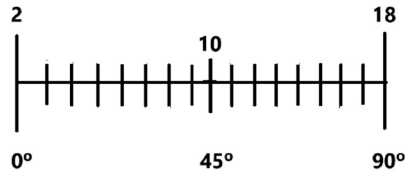



Figura 2 - Relação entre os ângulos da polarização da luz e o valor limite da soma dos dados. Por exemplo, para um ângulo de 22,5º o fotão é transmitido se essa soma for superior a seis; para 0º todos serão transmitidos porque os dados somarão pelo menos 3!

Numa gama intermédia de valores faremos a respectiva proporcionalidade ou seja, um valor de 45º corresponderá a obter um lançamento superior a 10. Para ângulos inferiores essa exigência é menor, ou seja para 22,5º será 6 e 11,25º será 4.

### O percurso óptico no tabuleiro

No jogo de tabuleiro[1] apresentam-se três percursos ou pistas (P2, P4 e P8) que atravessam simbolicamente 2, 4 ou 8 polarizadores. Consideramos ainda que os polarizadores dividem em partes iguais o ângulo reto, por exemplo, na pista P2 estão posicionados a 45º, na pista P4 cada um está desfasado 25º do seu antecedente e na pista P8 11,25º igualmente do antecedente. Daí a probabilidade de passagem variar de acordo com a figura 1. Em cada polarizador, o fotão-peão tem de lançar os dados para o atravessar e tentar atingir a chegada… ou ser rejeitado, sendo equivalente a ser absorvido no polarizador! Cada peão representa um fotão a viajar no espaço, atravessando um conjunto de polarizadores descritos como a condição de passagem no tabuleiro (♦). Três peões-fotão partem em simultâneo no início do jogo mas depois vão viajando independentemente, criando a sua estatística própria, sendo esta apurada no final do jogo (figura 3). Ao atingirem um alvo são reposicionados na partida, recomeçando um novo percurso enquanto um fotão renascido.

[1] http://www.elab.tecnico.ulisboa.pt/wiki/index.php?title=Deus_joga_dados!

### As variantes do jogo

Este jogo é colaborativo entre um elevado número de participantes embora seja jogado individualmente à vez, e pretende demonstrar o cariz aleatório da física quântica. Quanto mais participantes jogarem melhor resulta a estatística e mais próximo estaremos do resultado físico expectável.

### O tabuleiro

O jogo em tabuleiro pode ser realizado em várias mesas e tabuleiros e somando os resultados no final, garantindo um maior envolvimento de uma turma em pequenos grupos.

Cada jogador fica responsável por gerir um determinado número de peões-fotão (em princípio um mas pode haver variantes ao jogo em que cada jogador joga em pistas simultâneas) e associa-os a uma pista: P2, P4 ou P8.





Figura 3 - Alunos em grupos de 3 elementos a jogar no Instituto Politécnico de Santarém e a estabelecer a estatística.

Preenchendo a tabela seguinte, podemos calcular a razão entre os peões-fotão que atravessaram a cascata de "polarizadores" e o total de fotões em jogo por cada percurso óptico inicial. No exemplo, dados obtidos pelos alunos do Instituto Politécnico de Santarém comparados com o resultado teórico expectável entre parênteses.

| **Percurso** | Absorvidos | Transmitidos | Total | % Transmitidos |
|---|---|---|---|---|
| Pista P2 | 185 | 71 | 256 | 28% (25%) |
| Pista P4 | 34 | 81 | 115 | 70% (68%) |
| Pista P8 | 7 | 45 | 52 | 87% (86%) |

Tabela 1 - Razão entre os peões-fotão que atravessaram a cascata de "polarizadores" e o total de fotões em jogo por cada percurso óptico inicial.

Após o jogo,(i) poder-se-á realizar uma experiência no laboratório controlado remotamente do elab onde existe uma experiência real com múltiplos polarizadores, comprovando experimentalmente os resultados obtidos para o percurso com dois e quatro polarizadores (ii) ou recorrer a uma folha de cálculo com a simulação do jogo.

**Cenário teatral alternativo**

Numa situação de elevada disponibilidade de alunos, o jogo pode ser recriado teatralmente, por exemplo à entrada de um anfiteatro. Nesse caso, os "polarizadores" são alunos numa fieira de mesas que oferecem os dados para os colegas lançarem e estes, em função da soma dos dados, poderão (i) passar, se a soma for maior do que o valor indicado (4, 6 ou 10) transitando para o "polarizador" seguinte ou (ii) poderão ser excluídos se não conseguirem satisfazer essa condição (figura 4).



Figura 4 - Exemplo de um percurso óptico à entrada do anfiteatro para uma sessão sobre física quântica, onde os *alunos-fotão* lançam a sua sorte cada vez que avançam pelos *alunos-polarizador*.

Formam-se 3 filas paralelas à entrada com 2, 4 ou 8 *alunos-polarizador* por mesa e cada um destes alunos está equipado com 3 dados e uma folha de registo. Convém designar igualmente as três zonas marcantes do jogo (i) zona da partida (onde se concentram todos dos restantes alunos que vão funcionar como "fotões"); serão os *alunos-fotão*; (ii) zona da chegada dos *alunos-fotão* que atravessam todos os polarizadores; e (iii) zona da chegada dos *alunos-fotão* rejeitados. Ao passar pelos polarizadores, os *alunos-fotão* recebem um papel colorido, de cor diferente no caso de terem atravessado todos os polarizadores ou de terem sido rejeitados; as cores variam consoante o seja a fila de 2, 4 ou 8 polarizadores. No final, os alunos colocam os papéis em provetas, permitindo "medir" a evolução do jogo (figura 5).




Figura 5 - Final de uma partida com a coleção em provetas dos resultados de cada aluno que transitou no respetivo "percurso óptico" antes da entrada num anfiteatro na escola secundária Sebastião e Silva, em Oeiras.

Nesta interpretação do jogo cada *aluno-polarizador* tem uma folha de registo com a condição de passagem, 3 dados e um copo para os lançar. Em cada pista a condição de passagem é proporcional ao ângulo, sendo utilizada a condição "maior do que" de acordo com o ângulo entre polarizadores. Para a pista de 2 polarizadores (P2) essa condição é >10, para P4 usa-se >6 e para P8 >4.

0\ Cada *aluno-fotão* escolhe uma pista a seguir;
1\ Dirige-se então ao primeiro *aluno-polarizador*;
2\ Este *aluno-fotão* faz a pergunta "Dá licença?"
3\ O aluno-polarizador dá-lhe os dados para lançar uma primeira vez: de acordo com a soma dos dados e de acordo com a condição dessa mesa decide (i) rejeitar o *aluno-fotão* se a soma dos dados for inferior ou igual a esse valor designado ou (ii) manda-o avançar para a mesa seguinte caso a soma dos dados seja superior.
4.1\ Se o *aluno-fotão* for rejeitado adiciona uma contagem na respetiva proveta;
4.2\ Se o *aluno-fotão* for aprovado e prosseguir para a casa do aluno-polarizador seguinte o jogo prossegue para si e repete-se até ter conseguido ultrapassar todas as mesas dos alunos-polarizador;

No final da entrada de todos os alunos, apuram-se os resultados através dos registos efetuados pelos alunos-polarizadores, sendo declarados publicamente.

Conclui-se a demonstração fazendo a experiência do paradoxo dos 3 polarizadores e "brinca-se" com polarizadores[2] (por exemplo, tamanho 20 cm x 20 cm).

[2] https://www.informationphilosopher.com/solutions/experiments/dirac_3-polarizers/

## Discussão

| D2/D1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |

Tabela 2 - Probabilidades no lançamento de dois dados; neste exemplo são contadas as ocorrências superiores a 4, com uma probabilidade de 30/36.

A ideia subjacente deste jogo é que quanto mais polarizadores houver a dividir o ângulo reto e consequentemente o ângulo entre eles for menor, mais alunos conseguem ultrapassar a cascata de polarizadores, pelo que o jogo deve ser jogado com um número variável de alunos-polarizador. O jogo pode ser jogado igualmente com ângulos variados, por exemplo estando 100% alinhados com o polarizador anterior e aí o fotão passa sempre (porque saí pelo menos 3 nos dados e a condição de ângulo zero é ser superior ou igual a 2).

Nesta experiência é importante salientar a semelhança entre a probabilidade discreta, obtida pelo lançamento dos dados e a probabilidade do evento quântico, dada pelo quadrado do seno. Com efeito, a tabela de probabilidades dos eventos do lançamento de dois dados reportada à sua soma é sempre uma função crescente mas não exatamente igual. Com os três dados ainda se afasta ligeiramente mais mas ainda é adequada para efeitos da compreensão do fenómeno quântico subjacente ao jogo.

## Conclusão

Este jogo de dados permite de uma forma lúdica interpretar o paradoxo de Dirac, tratando-se de uma atividade que coloca o aluno no centro do processo de aprendizagem, conduzindo-o a participar e refletir, relacionando as ações e resultados do jogo, com os fenómenos físicos (quânticos) e com os resultados experimentais da experiência remota do elab.

Paralelamente pode ser utilizada a folha de cálculo disponibilizada para fazer a simulação da transmissividade de vários polarizadores, e através da criação de variantes ao jogo, pode-se comprovar a teoria para vários ângulos. Note-se que no jogo parte-se da quadratura entre o ângulo inicial e o último polarizador para ilustrar o paradoxo de Dirac mas tal não é obrigatório, a experiência online pode ser livremente simulada para quaisquer ângulos.

Por último, existe a hipótese de utilizar a simulação oferecida pelo quantum@UC disponível online e onde se compreende imediatamente a fenomenologia do processo.




Horácio Fernandes é professor associado do departamento de física do IST e investigador no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear onde coordena a atividade do tokamak ISTTOK. Em 1999 criou o elab, laboratório remoto do IST, com acesso livre. Mantém igualmente uma regular participação em divulgação científica. Foi membro do "Technical Advisory Panel" da agência europeia para o ITER (F4E) e investigador coordenador de uma atividade de pesquisa da IAEA. Presentemente é membro da comissão de "física para o desenvolvimento" no seio da IUPAP.



Marisa Correia é professora no Instituto Politécnico de Santarém (Escola Superior de Educação). Licenciada em Ensino da Física e da Química, Mestre em Educação pela Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa (FCUL) e Doutorada em Educação em Ciências pelo Instituto de Educação - Universidade de Lisboa (IE-UL). Pós-graduada em Educação e Tecnologias Digitais pelo Instituto de Educação - Universidade de Lisboa. Realizou um programa de Pós-Doutoramento no IE-UL, no âmbito do Projeto GoSTEM, financiado pela FCT. Coordena a Área Científica Educação para a Qualidade no Centro de Investigação em Qualidade de Vida (CIEQV). Coordena o programa de pós-graduação em Educação STEAM.

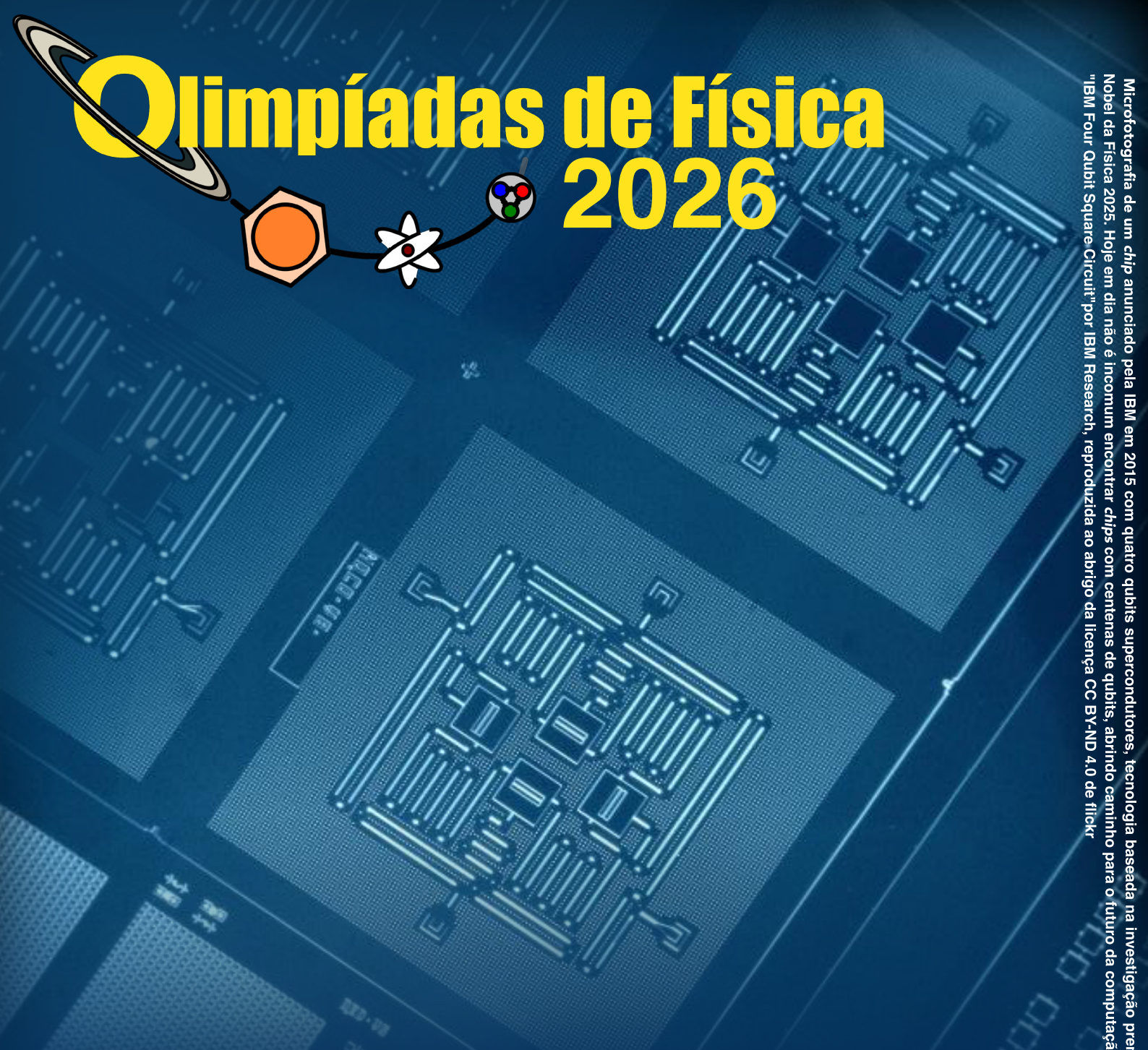


Emmanuel Zambrini Cruzeiro é professor no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (D.E.E.C.) do Instituto Superior Técnico. Coordena o grupo de Física da Informação Quântica, e o laboratório de Fotónica Quântica no Instituto de Telecomunicações. Investiga fundamentos de física quântica e as suas diversas aplicações, nomeadamente em tecnologias da informação.



Ângela Costa é professora na Escola Secundária Sebastião e Silva, em Oeiras. Licenciada em Ensino de Física e Química - Variante de Física pela FCUL e mestre em Física para o Ensino pela Universidade de Évora. Integra o grupo de Avaliação e Certificação de Manuais Escolares de Físico e Química da FCUL e tem desenvolvido atividades didáticas e projetos, alguns dos quais apresentados em Encontros e Festivais de Ciência.

# Olimpíadas de Física 2026



Microfotografia de um *chip* anunciado pela IBM em 2015 com quatro qubits supercondutores, tecnologia baseada na investigação premiada com o Nobel da Física 2025. Hoje em dia não é incomum encontrar *chips* com centenas de qubits, abrindo caminho para o futuro da computação quântica! "IBM Four Qubit Square Circuit"por IBM Research, reproduzida ao abrigo da licença CC BY-ND 4.0 de flickr

## Calendário de Provas

**Etapa Regional:**
21 de março de 2026

**Etapa Nacional:**
16 de maio de 2026

**Olimpíadas Internacionais:**
julho de 2027, Hungria

**Olimpíadas Ibero-Americanas:**
setembro de 2027, Portugal

## Inscrições abertas até
30 de janeiro de 2026

*https://olimpiadas.spf.pt/inscricao/*

**Escalão A (até ao 9.° ano)**
**Escalão B (10.° e 11.° anos)**

sp física
SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

CIÊNCIA VIVA
Agência Nacional para a Cultura Científica e Tecnológica

REPÚBLICA PORTUGUESA
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E INOVAÇÃO

# Sabes o que é matéria escura?

Catarina Cosme[1], Constança Providência[1], Rita Wolters[2]

[1] CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra

[2] Ilustradora

**Material**

- Duas garrafas transparentes com tampa (figura 1);
- Vários objetos pequenos coloridos (missangas, botões pequenos, anilhas, parafusos pequenos, moedas pequenas, pedrinhas…);
- Água;
- Balança (opcional; para mais facilmente determinar a massa de cada garrafa).



Figura 1 - Material

**Matéria escura**

À noite, entra no teu quarto fecha a porta, coloca a persiana para baixo e desliga todas as luzes de modo a ficar escuro. Olhas à volta, e o que vês? Nada, claro. Liga a luz. Agora sim, consegues ver a tua cama, livros e todos os objetos que tens no quarto. Consegues vê-los porque a luz é refletida pela superfície destes objetos: bate na superfície do objecto e parte dela é enviada na direção dos teus olhos. É muito parecido com o que acontece quando atiras uma bola à parede: ela volta para ti. Outra parte da luz é absorvida e aquece o objeto: por exemplo, quando te estendes ao Sol, o teu corpo vai aquecendo.

Agora, imagina que tens um objeto feito de um material muito estranho que não reflete a luz. Supõe que a luz atravessa o objeto feito desse material estranho e consegue fazê-lo sem ser refletida pela sua superfície e sem o aquecer. Atravessa o objeto como se ele não existisse. A este material exótico chamamos matéria escura.

Podes perguntar: mas porque me hei-de preocupar com um material tão estranho? Como é que isso afeta a minha vida, ou o Universo em que vivemos? E, mais importante, será que esta matéria escura realmente existe?

Acontece que este material exótico deixa marcas: por exemplo, quando a matéria que conseguimos ver (vamos chamá-la de matéria visível, ou ordinária) está perto desta matéria escura, comporta-se de uma maneira diferente daquela com que se comportaria se não houvesse este material estranho. Os astrofísicos são cientistas que estudam como se movimentam os astros (estrelas, planetas, galáxias…) no Espaço. Eles descobriram que alguns astros têm um movimento atípico, diferente do que esperaríamos tendo em conta as leis que determinam o movimento dos objetos. Ora, é a força da gravidade que estabelece esse movimento, e todos os objetos que têm massa sentem esta força. Quando te colocas em cima de uma balança, estás a medir a força que a Terra faz sobre ti. Quando largas um objeto, ele cai porque a Terra o puxa para o chão. Newton tomou nota da posição dos astros ao longo dos anos e com essas medições descobriu como atua a força da gravidade. Embora a matéria escura não seja perturbada pela luz, tem massa e, por isso, sente a força da gravidade! E os cientistas conseguem observar essas perturbações.

Para teres uma maior intuição para este tema da matéria escura, sugerimos-te que faças uma experiência, tal como um verdadeiro cientista. Para tal, precisas de duas garrafas transparentes sem rótulos. Coloca dentro delas pedrinhas e pequenos objetos (por exemplo, missangas, botões pequenos, anilhas, parafusos pequenos, moedas pequenas) em igual quantidade de modo a cobrir o fundo de cada uma (figura 2).



Figura 2

Agora, enche uma delas com água e coloca uma rolha em ambas de modo que, olhando para elas, não consegues ver nenhuma diferença.

A água funciona como matéria escura. Pega em ambas as garrafas e faz uma lista do que as distingue. Pede também a um colega para indicar quais são as propriedades de cada uma. A grande questão que queremos responder é: como explicaríamos a alguém que existe água numa das garrafas, sem abrir a garrafa e tocar na água? Para te guiares, deixamos aqui algumas sugestões:

1. Qual das garrafas é mais pesada (figura 3)? Será isto uma pista para a existência de algo mais numa das garrafas, mesmo que não consigamos ver?

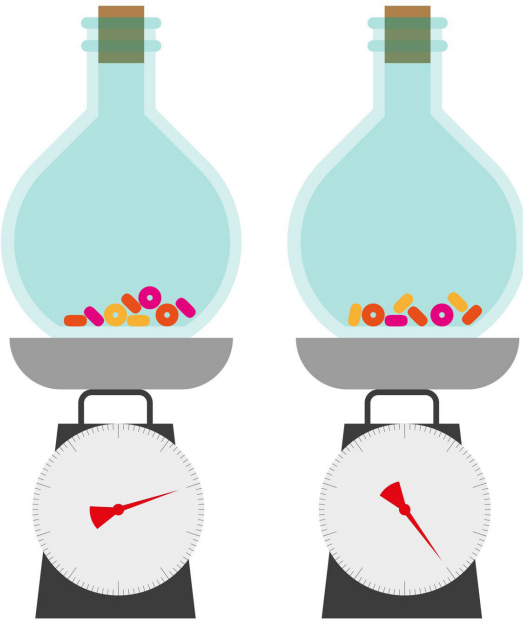


Figura 3

2. O que acontece aos pequenos objetos dentro de cada garrafa, quando as invertes (figura 4)? Os movimentos dos objetos são os mesmos em cada garrafa? Em alguma das garrafas, o movimento dos objetos é mais lento?

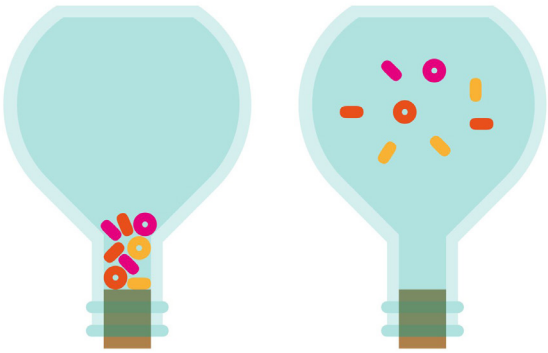


Figura 4

3. Coloca algo (por exemplo, uma pera) por trás de cada uma das garrafas, e observa-a através da garrafa (figura 5). A imagem da pera que observas é igual nas duas garrafas? Notas alguma distorção da imagem em alguma das garrafas?



Figura 5

Como provavelmente concluíste, algumas propriedades que distinguem as duas garrafas são: o peso; o modo como os pequenos objetos se movem quando abanamos as garrafas, i.e., a sua velocidade, a maneira como chocam uns com os outros; o aspecto de objetos iluminados pela luz que atravessa as garrafas. Encontraste mais alguma?

Apesar de muito simples, esta experiência é muito interessante porque nos explica o que acontece quando a matéria visível está perto da matéria escura. Por exemplo, no ponto 1, apesar de não conseguirmos ver a água, sabemos que algo mais tem de estar lá, porque uma das garrafas é mais pesada do que a outra. Da mesma maneira, embora não consigam ver a matéria escura, os cientistas têm métodos diferentes de "pesar" o Universo. Quando o fizeram, descobriram que há muito mais matéria escura que matéria visível no nosso Universo!

No ponto 2, verificaste que os pequenos objectos se moviam de maneira muito diferente, consoante a garrafa tivesse água ou não. Na realidade, na garrafa com água, o seu movimento era mais lento. No caso do Universo, sabemos que a matéria escura altera o modo como as galáxias se movem. Em particular, a matéria escura é responsável por fazer com que as partes mais exteriores das galáxias se movam mais rapidamente do que se só contivessem matéria ordinária. Além disso, a matéria escura funciona como uma "cola" para o Universo, já que impede a desagregação das galáxias.

No ponto 3, observaste que a imagem da pera se distorcia na garrafa que continha água. O mesmo acontece nos pontos do Espaço onde existe matéria escura: devido ao seu efeito gravitacional, a luz de galáxias distantes é desviada e, quando viaja e chega até aos nós, vemos imagens distorcidas. Este é o chamado efeito de lente gravitacional. Os cientistas sabem que a quantidade de matéria visível que existe não é responsável pela quantidade de distorção que observam. Tem de existir outra fonte de distorção, outro tipo de matéria que, como não sabemos o que é nem a vemos, damos o nome de matéria escura.

Em suma, é deste modo que os astrofísicos identificam a presença da matéria escura no Espaço. Observam que as galáxias se movem de um modo diferente do que é esperado, que em certas regiões do espaço a luz é desviada dando origem a ima-

gens distorcidas, e que o Universo se comporta como tendo mais massa do que aquela que observamos.

No entanto, há uma grande questão que permanece sem resposta: o que é mesmo a matéria escura? De que é feita a matéria escura? Isso, ainda ninguém sabe! Há muitos cientistas a fazer cálculos, observações e experiências para chegar a uma resposta, mas não sabemos quando a teremos. E, quem sabe, talvez sejas tu quem vai dar resposta a esta questão tão importante da Física!

**Bibliografia**

https://www.jpl.nasa.gov/edu/resources/lesson-plan/how-do-we-see-dark-matter/

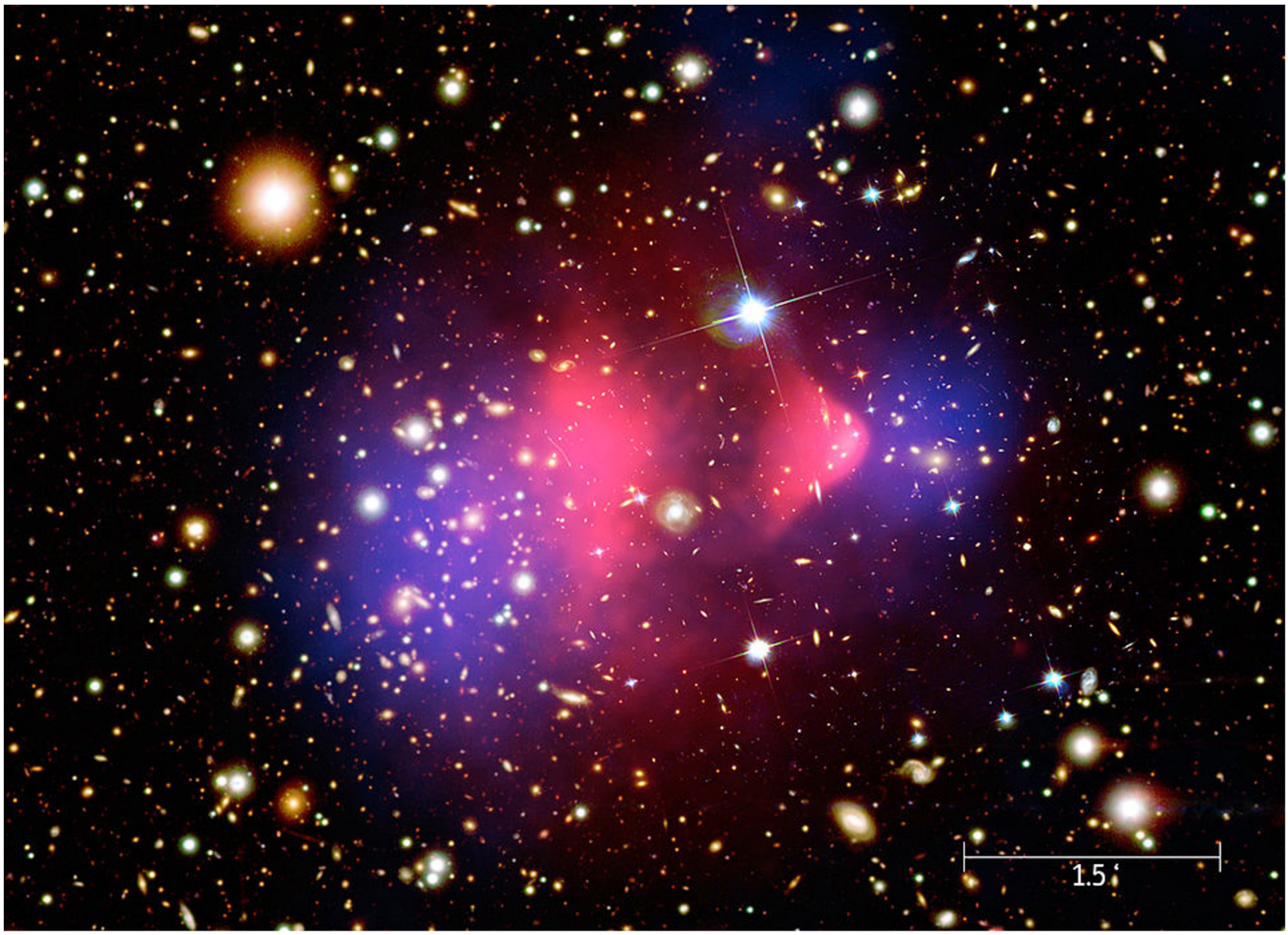



Figura 6 - Colisão de dois agregados de galáxias (Aglomerado Bullet (1E 0657-56)): A região rosa identifica a emissão de raios-X pela matéria visível e a região azul a localização da matéria escura determinada a partir de efeitos de lente gravitacional.
Créditos: NASA/CXC/M. Weiss (https://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_Cluster#/media/File:1e0657_scale.jpg)

# notícias

## 6.ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa (6.ª CFPLP) 17 a 19 de junho de 2026 – Lubango, Angola

A comunidade lusófona de Física volta a reunir-se na 6.ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa (6.ª CFPLP), um encontro internacional que promove a colaboração, a inovação e a excelência na investigação e no ensino, na área da Física.

A realizar no Instituto Superior de Ciências da Educação (ISCED) - Huíla, na cidade do Lubango, esta edição tem como tema focal "Física, Inovação e Futuro Sustentável", e pretende dar ênfase aos mais recentes trabalhos nas áreas que mais contribuem para um Futuro Sustentável, incluíndo - mas não restrito a - física médica, energias renováveis, novos materiais, física da Terra, tecnologias emergentes e ensino das ciências físicas.

O programa inclui mesas-redondas, palestras plenárias, apresentações curtas por investigadores e estudantes, exposição de projetos e formação para professores. Pretende-se ainda criar espaços dedicados ao fortalecimento de parcerias entre instituições de ensino e investigação dos diferentes países de língua portuguesa.

Nas edições passadas, a CFPLP contou com uma participação diversa, incluindo físicos e professores de vários países lusófonos, membros da diáspora da CPLP e até participantes de outras nacionalidades. É nossa expectativa que esta diversidade se mantenha e se fortaleça na edição de 2026. A 6.ª CFPLP conta já com o apoio da Associação Angolana de Física, da Sociedade Brasileira de Física e da Sociedade Portuguesa de Física. Tem ainda contado, ao longo das edições anteriores, com o apoio institucional da CPLP. A organização prevê solicitar novamente esse apoio para a edição de 2026.

Como é habitual, será elaborado um Livro de Resumos que compilará todas as participações e as listas de participantes, bem como os apoios recebidos e os textos institucionais submetidos pelas organizações parceiras. Os apoios serão igualmente visíveis em todo o material de divulgação e nas futuras notícias sobre o evento.

O ISCED-Huíla, anfitrião deste evento, é um instituto público de ensino superior dedicado à formação de professores, à investigação científica e ao desenvolvimento académico na região sul de Angola. Reconhecido pelo rigor académico e pelo estímulo à inovação pedagógica, o ISCED-Huíla desempenha um papel central na produção e disseminação do conhecimento, contribuindo de forma significativa para o fortalecimento da educação e para o avanço da ciência no país. É, pois, com grande satisfação que acolhe a 6.ª CFPLP, proporcionando um ambiente académico estimulante e propício ao intercâmbio científico e à colaboração internacional.

A cidade do Lubango, capital da província da Huíla, é uma conhecida pela sua beleza natural, clima ameno e paisagens emblemáticas, como a Serra da Leba, o Cristo Rei e a Tundavala. Para além do seu património natural, o Lubango é um importante centro urbano e académico, com crescente dinamismo cultural, científico e económico. A cidade oferece assim o cenário ideal para acolher eventos internacionais como a 6.ª CFPLP, combinando infraestruturas adequadas, um ambiente estimulante e oportunidades de intercâmbio científico e cultural.

Contamos com a vossa presença!

**Informações, inscrições em:** 6cfplp.sci-meet.net
**Contactos e pedidos de informação adicionais:** secretariado@ufplp.org
**Organização:** Instituto Superior de Ciências da Educação (ISCED) e União dos Físicos de Língua Portuguesa (UFPLP).

Pela Comissão Científica da 6.ª CFPLP
Graça M. Silveira



# Science in School




A revista online Science in School – Revista europeia para professores de ciência, está disponível em scienceinschool.org.

A Science in School é financiada e publicada pelo EIROforum, que reúne oito organizações europeias de investigação intergovernamentais (EIROs): CERN, EMBL, ESA, ESO, ESRF, EUROfusion, European XFEL e ILL. A missão do EIROforum é juntar os recursos, instalações e competências dos membros para apoiar a ciência europeia a alcançar o seu pleno potencial, incluindo trabalhar com professores de ciências, estudantes e jornalistas para comunicar a importância e a fascinação da ciência a um público amplo.

A Science in School, desde o seu início em agosto de 2006, estava alojada no Laboratório Europeu de Biologia Molecular (EMBL) em Heidelberg. A partir da sua 75.ª edição, de novembro de 2025, passou a ser publicada no CERN.

A revista tem como objetivo apoiar os professores na lecionação dos seus currículos STEM, ligando-os à ciência e tecnologia de ponta e inspiradora, de forma a fomentar atitudes positivas em relação à ciência no dia a dia e a informar os estudantes sobre carreiras nesta área.

Os conteúdos incluem experiências para sala de aula e materiais pedagógicos, informações atualizadas sobre ciência de ponta e aplicações no mundo real, projetos na educação científica e outros recursos úteis para professores de ciência. São lançadas cinco edições por ano: em fevereiro, abril, junho, setembro e novembro.

Alguns artigos estão traduzidos para várias línguas. Estas traduções dependem da boa vontade dos cientistas/professores que se disponibilizam para traduzir artigos das suas áreas. E fazemos um apelo para que mais traduções apareçam em português.

Maria da Conceição Abreu
Investigadora do LIP

# Olimpíadas de Física 2025

No ano de 2025, as atividades desenvolvidas pela Sociedade Portuguesa de Física no âmbito das Olimpíadas Regionais e Nacionais de Física 2025 e da preparação e participação de equipas de jovens estudantes do 11.º e 12.º anos na Olimpíada Internacional de Física 2025 são aqui descritas. As atividades relacionadas com as Olimpíadas de Física são promovidas, na Sociedade Portuguesa de Física (SPF), pela Comissão Nacional das Olimpíadas de Física constituída por:

- Rui Travasso, do Departamento de Física da FCTUC, Diretor das Olimpíadas de Física
- Eduardo Castro, Presidente da Delegação Regional do Norte da SPF
- Cristina Monteiro, Presidente da Delegação Regional do Centro da SPF
- Jorge Sampaio, Presidente da Delegação Regional do Sul e Ilhas da SPF
- Maria Deolinda Campos, Representante da Divisão de Educação da SPF
- Filipa Borges, do Departamento de Física da FCTUC
- José António Paixão, do Departamento de Física da FCTUC
- Orlando Oliveira, do Departamento de Física da FCTUC
- Rui Vilão, do Departamento de Física da FCTUC
- Telma Esperança, do Departamento de Física da FCTUC
- João Carlos Carvalho, do Departamento de Física da FCTUC
- Isabel Lopes, do Departamento de Física da FCTUC
- Paulo Gordo, do Departamento de Física da FCTUC
- Ricardo Gonçalo, do Departamento de Física da FCTUC

## Olimpíadas Regionais de Física

A XLI edição das Olimpíadas de Física, decorreu de forma presencial no dia 29 de março de 2025 nas cidades do Porto, Vila Real (provas agregadas às realizadas no Porto), Coimbra, Covilhã, Lisboa, Faro (provas agregadas às realizadas em Lisboa), Funchal e Ponta Delgada. Contou com uma componente teórica e uma componente experimental. O número de alunos foi semelhante ao ano passado, estando envolvidos nesta atividade 423 alunos do 9º ano (escalão A), e 407 alunos do 11.º ano (escalão B). A prova foi elaborada pela Delegação Centro da SPF. A participação no escalão B foi feita a título individual, enquanto no escalão A os alunos concorreram em equipas com um máximo de três elementos. Em 2015 foi introduzida a etapa de escola na qual as escolas têm a possibilidade de escolher os seus representantes nas Olimpíadas Regionais de Física através de uma prova teórica fornecida pela

SPF. Apesar de não se ter ainda conseguido quantificar o número de estudantes que realizam esta prova de escola, é certo que as Olimpíadas de Física chegaram a muitos mais alunos do que os que participaram na fase regional.

Os vencedores da Olimpíada Regional seguem nas tabelas abaixo. As provas podem ser consultadas em https://olimpiadas.spf.pt/regionais/regionais.shtml.

## Escalão A

| Vencedores do Escalão A - Região Norte | | | |
|---|---|---|---|
| Afonso Freitas Fernandes<br>Pedro Peixoto de Sousa<br>Francisco Daniel Guimarães Assunção | E.B. 2,3 Abel Salazar | Ronfe | 1 |
| Ana Filipa Tavares Fernandes Pereira<br>Pedro Santos Silva<br>Miguel Duarte Tavares | E.B.+S. Dr. Ferreira da Silva | Oliveira de Azeméis | 2 |
| Lidia Iskruk<br>Vicente Maria Miranda Valente e Almeida<br>Clara Barreira Gomes | E.B.+S. Dr. Manuel Gomes Almeida | Espinho | 3 |

| Vencedores do Escalão A - Região Sul | | | |
|---|---|---|---|
| Henrique Matos Rosa da Cunha Coimbra<br>Vicente Proença Agostinho Rodrigues Antunes | Colégio Salesiano Oficinas de S. José | Lisboa | 1 |
| Filipe Ribeiro da Silva<br>Gabriel Krempel de Sousa Varela<br>Tomás dos Santos Parreira | E.B. 2,3 D. João II | Caldas da Rainha | 2 |
| Afonso Pereira de Sequeira Leonor Chambino Ferrão Rodrigues e Vasconcelos<br>Miguel Neto Valente | E.S. du Bocage | Setúbal | 3 |

| Vencedores do Escalão A - Madeira | | | |
|---|---|---|---|
| Miguel Afonso Caires Aleixo<br>José Simão Nóbrega Pinto | E.B. 2,3 Bartolomeu Perestrelo | Funchal | 1 |
| Semen Shubin<br>Vasilina Titova<br>Carolina Raquel Almeida Camacho | Colégio Salesianos do Funchal | Funchal | 2 |
| Tiago Melim Pestana<br>Hélio André Jardim Lourenço Antunes<br>Matias Gouveia Brites | E.B.+S. Bispo D. M. F. Cabral | Santana | 3 |

| Vencedores do Escalão A - Região Centro | | | |
|---|---|---|---|
| Leonor Inês Branco de Castro<br>Francisco Diogo Serra Santos<br>Beatriz Domingues Santiago | E.B.+S. Quinta das Flores | Coimbra | 1 |
| Pedro Braga Ventura Seco<br>Simão Gomes de Almeida<br>Ana Beatriz de Almeida Sousa | E.S. Adolfo Portela | Águeda | 2 |
| Catarina Correia Gil<br>Margarida Castro Silva Assunção<br>Vitória Isabel Ferreira de Moura Sousa e Brito | E.B. 2,3 Grão Vasco | Viseu | 3 |

| Vencedores do Escalão A - Açores | | | |
|---|---|---|---|
| Tomás Cristino Pereira<br>Margarida Botelho França Gouveia<br>Gabriel Alberto do Couto Gonçalves | E.S. Domingos Rebelo | Ponta Delgada | 1 |
| Caetana de Oliveira Aguiar Soares<br>Matilde Menezes da Rocha | E.S. Vitorino Nemésio | Praia da Vitória | 2 |
| Laura Lemos dos Santos<br>Inês Candeias de Oliveira<br>Camila Ávila Melo | E.B.+S. Tomás de Borba | Angra do Heroísmo | 3 |

## Escalão B

| Vencedores do Escalão B - Região Norte | | | |
|---|---|---|---|
| David Margarido Montenegro | E.S. João Gonçalves Zarco | Matosinhos | 1 |
| José Miguel Cavadas da Silva | Colégio Efanor | Matosinhos | 2 |
| Luís Soares de Albergaria Morais | E.S. da Maia | Maia | 3 |
| Daniel Filipe Barbosa Fonseca | E.S. de Valongo | Valongo | |
| Guilherme Rodrigues Soares de Pinho | E.B.+S. de Santa Maria da Feira | Santa Maria da Feira | |
| João Guilherme Alves Dinelli | E.S. Almeida Garrett | V.N. de Gaia | |
| Luís Miguel Oliveira Tadeu Silva | Colégio Casa Mãe | Paredes | |
| Rui Francisco Ventura Araújo | Colégio Efanor | Matosinhos | |
| Samuel Mouta Soares | E.S. João Gonçalves Zarco | Matosinhos | |
| Tiago Samuel Moreira Duarte | E.S. de Penafiel | Penafiel | |

| Vencedores do Escalão B - Região Centro | | | |
|---|---|---|---|
| Manuel Maia Rodrigues | E.B. 2,3+S. de José Falcão | Miranda do Corvo | 1 |
| Mafalda Filipa Duarte Pombo | E.S. Alves Martins | Viseu | 2 |
| Salvador Rodrigues Lourenço | E.S. Emídio Navarro | Viseu | 3 |
| Afonso Teixeira Barbosa | E.S. Quinta das Palmeiras | Covilhã | |
| Andrei Alekseevich Fatkulin | E.S. Infanta Dona Maria | Coimbra | |
| Guilherme Manuel Calado de Oliveira | E.S. José Estevão | Aveiro | |
| Guilherme Pereira Branco | Colégio da Rainha Santa Isabel | Coimbra | |
| João Bernardo Duarte Martins | E.S. Quinta das Palmeiras | Covilhã | |
| Leonardo Correia Pereira de Aguiar Aires | E.S. Dr. Mário Sacramento | Aveiro | |
| Martim Costa Carvalho | E.S. Alves Martins | Viseu | |

| Vencedores do Escalão B - Região Sul | | | |
|---|---|---|---|
| Nicholas Martinez Cuevas Biondi Carvalho | E.S. Pedro Nunes | Lisboa | |
| Filipa Marques Costa | E.S. Henriques Nogueira | Torres Vedras | |
| Mirela Eremia | E.B.+S. da Bem-posta | Portimão | |
| Carolina Inglês Luís | Externato de Penafirme | Torres Vedras | |
| Filipa Rocha Galveias | E.S. Sebastião e Silva | Oeiras | |
| Ignat Pavlovich Riazanov | E.S. Emídio Navarro | Almada | |
| João Miguel Mendonça | Colégio de S. João de Brito | Lisboa | |
| Levi Miranda da Costa Gomes | E.S. Sebastião e Silva | Oeiras | |
| Nimai Govinda Periard Sena Russo Alves | E.S. Sebastião e Silva | Oeiras | |
| Tomás Miguel Duarte Correia | Colégio Pedro Arrupe | Lisboa | |

| Vencedores do Escalão B - Região Açores | | | |
|---|---|---|---|
| Isabel Vilela de Carvalho Benevides Sousa | E.S. Domingos Rebelo | Ponta Delgada | |
| Vasco Ferreira de Meneses | E.S. Vitorino Nemésio | Praia da Vitória | |
| Rodrigo D' Almeida Lima Canêdo dos Santos | E.S. Domingos Rebelo | Ponta Delgada | |

| Vencedores do Escalão B - Região Madeira | | | |
|---|---|---|---|
| Diogo Luís Gama Ferreira de Mendonça | E.B.+S. Bispo D. M. F. Cabral | Santana | |
| Maria Leonor de Abreu Omelas Câmara | E.S. Francisco Franco | Funchal | |
| Tomás Manuel Figueira Nunes | Escola da APEL | Funchal | |

# Olimpíadas Nacionais de Física

A segunda e última etapa das XL Olimpíadas de Física, as Olimpíadas Nacionais de Física, decorreu a 31 de maio de 2025 no Departamento de Física da Universidade de Coimbra. Contou com uma componente teórica e uma componente experimental.

Participaram na etapa nacional os premiados da etapa regional, isto é, 31 alunos do escalão A (Covilhã, Funchal e Ponta Delgada enviaram apenas a equipa que tinha ganho a medalha de ouro) e 36 alunos do escalão B. Os vencedores desta etapa foram:

| Vencedores do Escalão A | | | |
|---|---|---|---|
| Filipe Ribeiro da Silva<br>Gabriel Krempel de Sousa Varela<br>Tomás dos Santos Parreira | E.B. 2,3 D. João II | Caldas da Rainha | |
| Miguel Afonso Caires Aleixo<br>José Simão Nóbrega Pinto | E.B. 2,3 Bartolomeu Perestrelo | Funchal | |
| Leonor Inês Branco de Castro<br>Francisco Diogo Serra Santos<br>Beatriz Domingues Santiago | EB+S Quinta das Flores | Coimbra | |

| Vencedores do Escalão B | | | |
|---|---|---|---|
| Salvador Rodrigues Lourenço | E.S. Emídio Navarro | Viseu | |
| David Margarido Montenegro | E.S. João Gonçalves Zarco | Matosinhos | |
| Andrei Alekseevich Fatkulin | E.S. Infanta D. Maria | Coimbra | |
| Ignat Pavlovich Riazanov | E.S. Emídio Navarro | Almada | |
| José Miguel Mendonça | Colégio de São João de Brito | Lisboa | |
| Luís Miguel Oliveira Tadeu Silva | Colégio "Casa Mãe" | Paredes | |
| Mafalda Filipa Duarte Pombo | E.S. Alves Martins | Viseu | |
| Martim Costa Carvalho | E.S. Alves Martins | Viseu | |
| Rodrigo D'Almeida Lima Canêdo dos Santos | E.S. Domingos Rebelo | Ponta Delgada | |
| Vasco Ferreira de Meneses | E.S. Vitorino Nemésio | Praia da Vitória | |



Da esquerda para a direita Dra. Catarina Ramos, Coordenadora Nacional, DGE, Tomás dos Santos Parreira, Gabriel Krempel de Sousa Varela e Filipe Ribeiro da Silva, da Escola Básica 2,3 D. João II das Caldas da Rainha, Miguel Afonso Caires Aleixo da Escola Básica 2,3 Bartolomeu Perestrelo, Funchal, Professor Joaquim Santos da Universidade de Coimbra, José Simão Nóbrega Pinto da Escola Básica 2,3 Bartolomeu Perestrelo, Funchal, Doutor Tiago Leite, da Delegação Regional Sul e Ilhas, Leonor Inês Branco de Castro, Francisco Diogo Serra Santos da Escola B+S Quinta das Flores, Coimbra.




Da esquerda para a direita, Dra. Catarina Ramos, Coordenadora Nacional, DGE, Salvador Lourenço, da Escola Secundária Emídio Navarro de Viseu, Doutor Pedro Abreu, Presidente da Sociedade Portuguesa de Física, David Montenegro, da Escola Secundária João Gonçalves Zarco, de Matosinhos, Doutora Cristina Monteiro, Presidente da Delegação Regional do Centro da SPF, e Andrei Fatkulin da Escola Secundária Infanta D. Maria, de Coimbra.



O Professor Fernando Nogueira, da Universidade de Coimbra, no lado esquerdo, acompanha a cerimónia de distribuição das menções honrosas do escalão B nas Olimpíadas Nacionais de Física.

As provas podem ser consultadas em http://olimpiadas.spf.pt/nacionais/nacionais.shtml.

Os vencedores do escalão B da etapa nacional ficaram pré-selecionados para uma preparação a decorrer durante o próximo ano letivo que os poderá levar a representar Portugal, em 2026, na LVI Olimpíada Internacional de Física (Colômbia) ou na XXIX Olimpíada Ibero-Americana de Física, no Brasil. Os alunos seguintes foram pré-selecionados para esta preparação:

Afonso Teixeira Barbosa (E.S. Quinta das Palmeiras, Covilhã)
Andrei Alekseevich Fatkulin (E.S. Infanta D. Maria, Coimbra)
David Margarido Montenegro (E.S. João Gonçalves Zarco, Matosinhos
Diogo Luís Gama Ferreira de Mendonça (EB+S Bispo D. M. F. Cabral, Santana
Filipa Rocha Galveias (E.S. Sebastião e Silva, Oeiras)
Guilherme Manuel Calado de Oliveira (E.S. José Estevão, Aveiro)
Guilherme Pereira Branco (Colégio Rainha Santa Isabel, Coimbra)
Ignat Pavlovich Riazanov (E.S. Emídio Navarro, Almada)
José Miguel Canadas da Silva (Colégio Efanor Matosinhos)
José Miguel Mendonça (Colégio de São João de Brito, Lisboa)
Luís Miguel Oliveira Tadeu Silva (Colégio "Casa Mãe", Paredes)
Luís Soares de Albergaria Morais (E.S. da Maia Maia)
Mafalda Filipa Duarte Pombo (E.S. Alves Martins, Viseu)
Martim Costa Carvalho (E.S. Alves Martins, Viseu)
Mirela Eremia (EB+S da Bemposta, Portimão)
Rodrigo D'Almeida Lima Canêdo dos Santos (E.S. Domingos Rebelo, Ponta Delgada)
Rui Francisco Ventura Araújo (Colégio Efanor, Matosinhos)
Salvador Rodrigues Lourenço (E.S. Emídio Navarro, Viseu)
Tomás Manuel Figueira Nunes (Escola da APEL, Funchal)
Vasco Ferreira de Meneses (E.S. Vitorino Nemésio, Praia da Vitória)

# 55.ª Olimpíada Internacional de Física (IPhO)

As Olimpíadas Internacionais de Física decorreram de 18 a 24 de julho de 2025, em Paris, França, tendo participado na competição estudantes do ensino secundário de 89 países. Nesta competição os estudantes sujeitam-se a duas provas (uma experimental e uma teórica) que decorrem em dois dias diferentes e têm uma duração de 5 horas cada. O vencedor absoluto foi Hyeokjoon Lee, da Coreia do Sul, com uma pontuação de 43,2 pontos em 50. Os participantes portugueses foram acompanhados por Sagar Pratapsi e por pedro Borlido, Professores Convidados da Universidade de Coimbra. A prestação da equipa de Portugal resultou na obtenção de três menções honrosas nesta competição, por Tiago Oliveira, Gustavo Sousa e Ricardo Prata.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Tiago Filipe Neves Oliveira | E.B.+S. de Ourém | Ourém | |
| Gustavo Rebelo de Sousa | Colégio de Nossa Sra. da Bonança | V.N. de Gaia | |
| Ricardo Filipe Coelho Prata | E.S. Alves Martins | Viseu | |
| João Pedro Sá Neves | E.S. Lima-de-Faria | Cantanhede | |
| Pedro Miguel Guerreiro Pereira Pinto Mazeda | E.S. Alves Martins | Viseu | |




Da esquerda para a direita, Sagar Pratapsi, Tiago Oliveira, Gustavo Sousa, Ricardo Prata, João Pedro Neves, Pedro Mazeda, e Pedro Borlido.

# FÍSICA 2026 – 25.ª Conferência Nacional de Física e 36.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

A 25ª Conferência Nacional de Física e o 36º Encontro Ibérico para o Ensino da Física irão decorer no Instituto de Educação da Universidade de Lisboa, de 9 a 12 de setembro de 2026. Esta conferência bienal, organizada pela Sociedade Portuguesa de Física, reúne toda a comunidade nacional de físicos, abrangendo docentes do Ensino Básico, Investigadores e Professores Universitários, alunos de doutoramento e alunos de mestrado, numa partilha do estado atual do conhecimento em Física nas suas diversas vertentes. O 36º Encontro Ibérico para o Ensino da Física será organizado em colaboração com a Real Sociedad Española de Fisica.

A FÍSICA 2026 terá sessões plenárias, sessões paralelas e pósteres, cobrindo as áreas de todas as suas Divisões Científicas: Astronomia e Astrofísica, Divulgação e Educação, Física Aplicada à Engenharia e em Empresas, Física Atómica e Molecular, Física da Matéria Condensada, Física Médica, Física Nuclear, Física das Partículas, Física dos Plasmas, Geofísica, Oceanografia e Meteorologia, História da Física, Óptica e Lasers.

Para mais informações, consultar: https://fisica2026.sci-meet.net/

# O encanto das ondas hertzianas: o Emissor Radiofónico do Laboratório de Física




Inserido na 28.ª Semana Cultural da Universidade de Coimbra (UC) - www.uc.pt/semanacultural, o Departamento de Física da UC e o Rómulo - Centro de Ciência da UC organizam uma exposição com instrumentos e equipamento que pertenceu ao Emissor Radiofónico do Laboratório de Física, montado em 1932.

Este pequeno emissor de TSF, que não atingia inicialmente uma potência de mais de 10 watts na antena, permitia emissões experimentais em ondas médias, com boa audição num raio de dez quilómetros. No decurso de 1937, com a aquisição de novos equipamentos com vista a montar um novo emissor, realizaram-se emissões regulares em onda curta, a partir do fim desse ano. Com o início da 2.ª Guerra Mundial, através do decreto-lei n.º 29937 de 21 de Setembro de 1939, foi suspenso o funcionamento de todas as emissoras amadoras. O posto radiofónico instalado no Laboratório de Física ainda emitiu pontualmente, após uma grande tempestade que atingiu Coimbra em 15 de Fevereiro de 1941. Durante alguns dias os CTT utilizaram este emissor, após repararem a antena que tinha ficado danificada e desta forma foi possível assegurar as comunicações da cidade com o exterior. Depois deste episódio as emissões cessaram, servindo apenas para a audição de outros radiotransmissores.

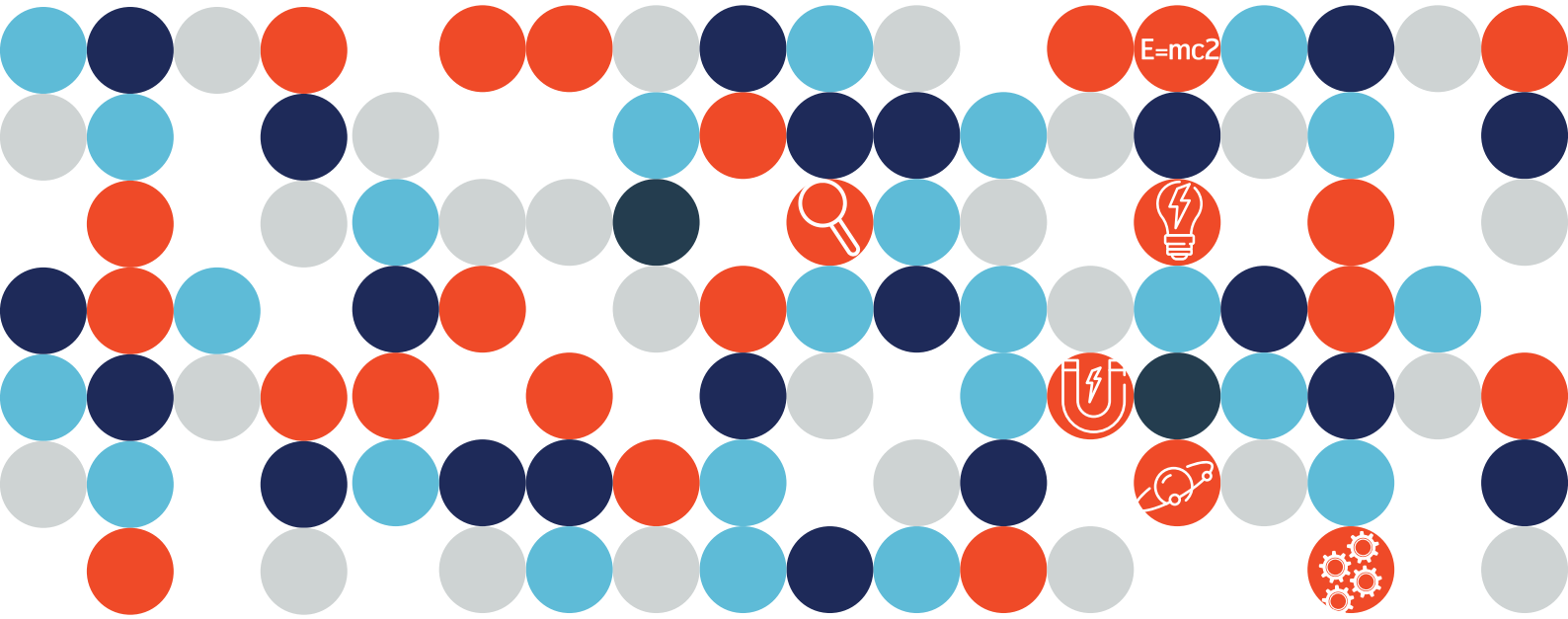
No dia da inauguração da exposição, 4 de Março de 2026, será proferida por Gilberto Pereira a palestra "O Emissor Radiofónico do Laboratório de Física (1932)".




Altifalante, marca S. G. Brown Ltd., modelo E, Londres (FIS.2734). Altifalante estilo corneta que proporciona um volume elevado, numa determinada direcção. Fabricado a partir de 1927-1928.

# PRÉMIOS DE INCENTIVO
# DA EXCELÊNCIA
## no ensino da física no 3.º ciclo e secundário

- PRÉMIO RÓMULO DE CARVALHO
- PRÉMIO ANDRÉ FREITAS
- PRÉMIO LÍDIA SALGUEIRO




www.spf.pt/premios

Com o apoio de:

BPI | Fundação "la Caixa"

sp física SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

**Ajude a Sociedade Portuguesa de Física. Faça-se Sócio !**
**Formulário de Inscrição** (preencher e enviar para morada da Sociedade Portuguesa de Física, abaixo)
Formulário de inscrição também em https://www.spf.pt/adesao

Nome Completo: _____

Data de Nascimento: ___/___/_____

Morada: _____

Cód. Postal: _____-____ Localidade: _____

N. Contribuinte: _____ País: _____

Telefone: _____ E-mail: _____

Habilitações Literárias: _____ Ano de obtenção grau. _____

Instituição Ensino: _____

Profissão: _____ Cargo: _____ Categoria: _____

Empresa/Instituição: _____

Morada: _____ Cód. Postal: _____-____ _____

Correspondência: □ Casa □ Trabalho; Delegação: □ Norte □ Centro □ Sul e Ilhas

**Divisões/Secções/Grupos**

| SPF | EPS |
|---|---|
| □ Educação<br>□ Física Atómica e Molecular<br>□ Física da Matéria Condensada<br>□ Física de Plasmas<br>□ Física Médica<br>□ Física Nuclear<br>□ Meteorologia, Geofísica e Oceanografia<br>□ Ótica e Lasers<br>□ Física de Partículas<br>□ História da Física<br>□ Física Aplicada à Engenharia<br>□ Física em Empresa | □ Grupo - Physics Education<br>□ Grupo - History of Physcs<br>□ Grupo - Experimental Physics Control Systems<br>□ Grupo - Computational Physics<br>□ Grupo - Accelerators<br>□ Grupo - Physics for development<br>□ Astrophysics - Solar Physics<br>□ Atomic and Molecular Physics - Atomic Spectroscopy (EGAS)<br>□ Atomic and Molecular Physics - Chemical Physics<br>□ Atomic and Molecular Physics - Electronic and Atomic Colisions<br>□ Atomic and Molecular Physics - Molecular Physics<br>□ Condensed Matter - Surfaces and Interfaces<br>□ Condensed Matter - Liquids<br>□ Condensed Matter - Low Temperature Physics<br>□ Condensed Matter - Macromolecular Physics<br>□ Condensed Matter - Magnetism<br>□ Condensed Matter - Semiconductors and Insolators<br>□ Condensed Matter - Metals<br>□ High Energy and Particle Physics<br>□ Nuclear Physics<br>□ Plasma Physics<br>□ Quantum Electronics and Optics |

**Valor anual da quota**

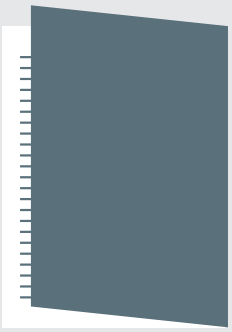
| | |
|---|---|
| Sócio Efetivo | 40,00 EUR |
| Sócio Efetivo - web (acesso online à Gazeta de Física) | 30,00 EUR |
| Sócio Estudante | 20,00 EUR |
| Sócio Estudante - web (acesso online à Gazeta de Física) | 10,00 EUR |
| Sócio Cônjuge - web (acesso online à Gazeta de Física) | 10,00 EUR |
| Sócio Coletivo Escola (Escolas Básicas e Secundárias) | 40,00 EUR |
| Sócio Coletivo Empresa, Departamentos e Centros de Investigação | 200,00 EUR |

**Modos de Pagamento das quotas**
**IBAN**: PT50 0033 0000 0008 5208 9720 5 (Millennium Bcp)
**Cheque/vale postal**
Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45, 3ESQ - 1050-187 LISBOA
+351 217993665 / 964531520

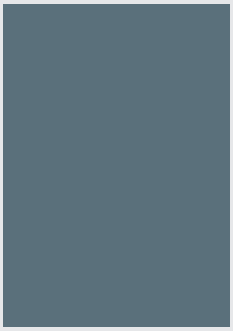
# TABELA PUBLICIDADE GAZETA DE FÍSICA



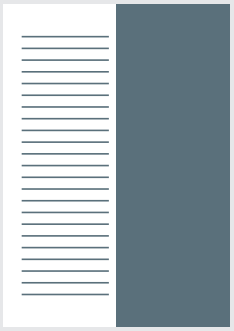
1 - Verso Capa

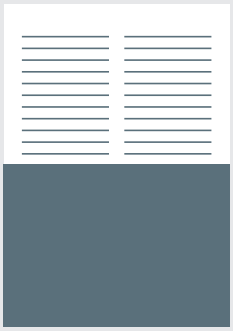


2 - Contracapa

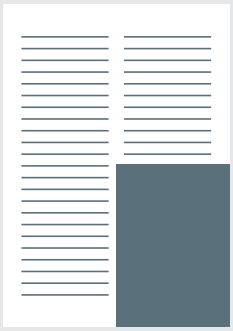


3 - Página



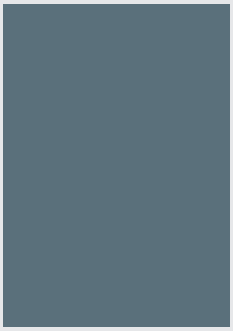


4 - 1/2 Página



5 - 1/4 Página





6 - Destacável/folha



7 - Rodapé

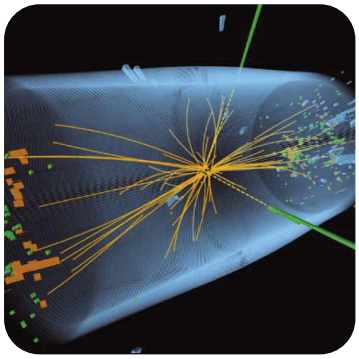
## Tabela (acresce IVA)

1 - 1 500,00 €
2 - 2 000,00 €
3 - 800,00 €
4 - 600,00 €
5 - 400,00 €
6 - 1 500,00 €
7 - 100,00 €

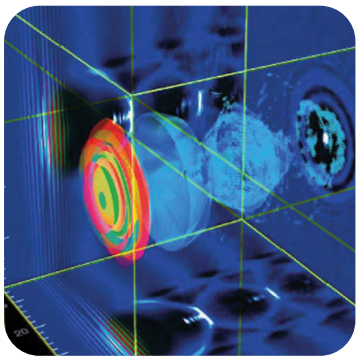
Descontos
Sócios coletivos - 20 %
Quantidade
2 x 20 % | 3 x 30 % | 4 x 40 %
Tiragem: 3000 exemplares
Consulta online 15000 (C/CPLP)
Facebook ~40000 (C/CPLP)

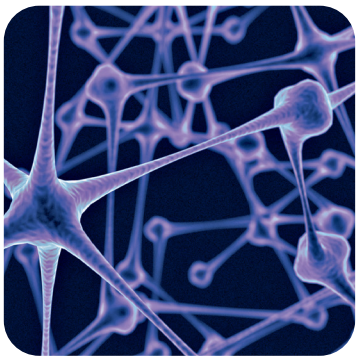
GAZETA DA física

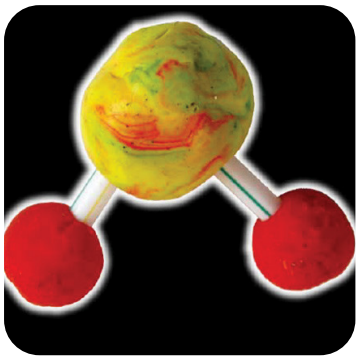
Para os físicos e amigos da física.
WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT





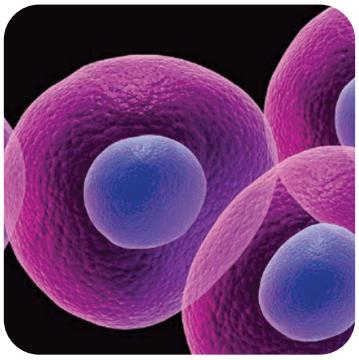













CONTACTOS:

Sociedade Portuguesa de Física
Av. Prof. Gama Pinto, nº 2 | 1649-003 Lisboa
Telef.: 217 993 665 | spf@spf.pt

EXpT

SISTEMAS DE ENSINO E PESQUISA PARA LABORATORIO

www.expt.pt
info@expt.pt
+351 927 631 786

# EXpT exclusive distributor of PHYWE in Portugal presents some of the Nobel Prize experiments

## X - ray





## Specific charge





### XR 4.0 expert unit, 35 kV

Item no.: 09057-99

The PHYWE X-ray unit offers you a precise and safe demonstration of the penetration of matter by X-rays, a ground-breaking concept that Röntgen discovered in 1895 and for which he was awarded the Nobel Prize in 1901.

Learning objectives:

- Structural analysis
- Characteristic radiation
- Bragg reflection
- Radiology
- Dosimetry
- Computed tomography




### Specific charge of the electron - e/m

Item no.: P2510200

With the PHYWE e/m experimental setup, you can experimentally determine the specific electron charge based on Thomson's discovery in 1897, which brought him the Nobel Prize in 1906.

Learning objectives:

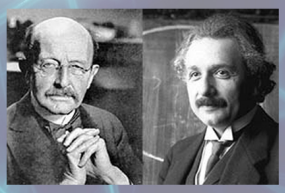
- Cathode rays
- Lorentz force
- Electron in crossed fields
- Electron mass
- Electron charge

## Michelson interferometer





## Planck's quantum of action





### Michelson interferometer - High Resolution

P2220911

The Michelson interferometer, an innovation from the 1880s, enables high-precision measurements of the smallest changes in path length.

Applications include, for example, the Michelson-Morley experiment and gravitational wave detection.

Michelson was honoured with the Nobel Prize for this in 1907.

Learning objectives:

- Interference
- Wavelength
- Diffraction index
- Speed of light
- Phase
- Virtual light source

### Planck's "quantum of action" and photoelectric effect

Item no.: P2510402

The PHYWE experimental set-up for Planck's radiation formula enables the demonstration of Planck's quantum theory, which was introduced in 1900 and for which he was awarded the Nobel Prize in 1918.

Albert Einstein received the Nobel Prize in 1921 for his explanation of the photoelectric effect, which is closely linked to Planck's quantum hypothesis.

Learning objectives:

- External photoelectric effect
- Work function
- Absorption
- Photon energy
- Anode / Cathode