

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

Bruno Amorim¹, Eduardo V. Castro¹, João V. Lopes¹, Vítor M. Pereira¹, Pedro Ribeiro²

¹Centro de Física das Universidades do Minho e Porto, LaPMET, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

²CeFEMA, 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 transistor, 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 muito 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 carácter 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 mecânica

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 atômica. Quando, em 1928, Felix Bloch aplica a equação de Schrödinger ao problema dos elétrons 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 elétrons livres no vácuo, e têm a característica de se estenderem uniformemente por todo o material. Esta ideia está na base da mobilidade dos elétrons 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 elétron 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 eletrônicas 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 elétrons) e a banda de condução (a primeira vazia de elétrons). A investigação em semicondutores permitiria a invenção do *transistor* em 1947; um marco que valeu o Nobel a Bardeen, Brattain e Shockley em 1956. O transistor é o componente eletrônico 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 elétrons 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 elétrons 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 elétrons 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 transistor: 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 elétrons, 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 fónons). Este efeito é particularmente relevante para os elétrons responsáveis pela condução elétrica nos metais. Quando essa atração efetiva supera a repulsão de Coulomb, o estado metálico

torna-se instável e os elétrons 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 transistor, 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 elétrons 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

Retrospectivamente, 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 elétrons 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 elétrons 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 atómicamente 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). Z₂ 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 ICM-CCSIC 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 eletrónicos 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 científico no Instituto 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 Fisicos (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 eletrónicas de materiais bidimensionais e em camadas, transporte eletrónico, 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 (CeFE-MA). 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.