

Quando a quântica muda de escala

Físico conta sobre o estudo teórico que previu efeito quântico em um sistema macroscópico, um circuito supercondutor que rendeu o Nobel de 2025 a três pesquisadores

MARCOS PIVETTA retrato LÉO RAMOS CHAVES

Em 7 de outubro, o anúncio dos vencedores do Prêmio Nobel de Física de 2025 causou surpresa e enorme satisfação em Amir Ordacgi Caldeira, do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (IFGW-Unicamp). O prêmio foi concedido para um trio de pesquisadores experimentais que, em meados dos anos 1980, tinham medido pela primeira vez o tunelamento quântico – um efeito característico das escalas atômica e subatômica – em um sistema macroscópico, um circuito eletrônico supercondutor de cerca de 1 centímetro. No material de divulgação sobre as bases científicas dos trabalhos dos recém-laureados, a Real Academia de Ciências da Suécia citou um artigo de 1981 de Caldeira e do teórico britânico Anthony Leggett, que fora seu orientador de doutorado na Universidade de Sussex, no Reino Unido, e viria a receber o Nobel de Física de 2003 por estudos na área de superfluidez do hélio-3.

No *paper*, que tem mais de 6.200 citações na literatura científica, a dupla argumentava que era possível observar o tunelamento quântico em um tipo específico de estrutura macroscópica, um circuito eletrônico supercondutor. “Nosso trabalho teórico foi a base dos experimentos que levaram ao Nobel de 2025”, diz Caldeira, que se tornou docente da Unicamp em 1980. Oficialmente aposentado da universidade desde o fim de agosto passado, o físico continua ativo, agora na condição de pesquisador sênior.

Caldeira foi coordenador de grandes iniciativas do estado de São Paulo e do país em sua área de atuação, como o Instituto do Milênio em Informação Quântica e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) em Informação Quântica. Nesta entrevista, concedida na sala que ainda mantém na universidade, ele fala de seus estudos, da mecânica quântica (que completou 100 anos em 2025) e dos desafios para o desenvolvimento de novas tecnologias quânticas.



**ESPECIALIDADE**

Física da matéria condensada, com ênfase em dissipação quântica e efeitos quânticos macroscópicos

INSTITUIÇÃO

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

FORMAÇÃO

Graduação (1973) e mestrado em física (1976) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e doutorado em física (1980) pela Universidade de Sussex, no Reino Unido

Qual foi sua reação quando viu seu nome e o artigo com o Leggett citados no material do Nobel?

Fiz aniversário de 75 anos na véspera do anúncio do prêmio. Para mim, foi um presente. Apesar de ter consciência do grau de originalidade do nosso trabalho e até mesmo da importância dos seus possíveis desdobramentos para a fundamentação da física quântica, não imaginava que sua verificação experimental pudesse ser agraciada com um Nobel. Quando me citaram, fui tomado pela sensação de que, sim, contribuí para algo de inquestionável importância. Não ganhei o Nobel, mas a bola bateu na trave.

O artigo de 1981 surgiu em que contexto?

Fazia doutorado e pensamos em um problema interessante, ligado à junção que separa e isola as duas metades de um circuito supercondutor, capaz de transmitir corrente elétrica sem nenhuma perda de energia. Primeiro, queríamos ver se um efeito quântico que chamamos de tunelamento se manteria em um circuito supercondutor que envolvesse um número muito grande de elétrons, desde que sua junção fosse construída nas dimensões apropriadas. O tunelamento ocorre devido à sobreposição de estados que aparece nas escalas atômica e subatômica. Ele faz com que uma única partícula consiga ultrapassar uma barreira de energia que normalmente seria um obstáculo intransponível para sua movimentação. Então, no artigo, queríamos averiguar em que condições um número grande de elétrons ultrapassaria em bloco a barreira de energia. O segundo aspecto do nosso trabalho era calcular qual seria a influência do meio ambiente sobre as eventuais propriedades quânticas do circuito, além de dissipar energia.

Qual era o interesse de estudar essa questão?

Até aquele momento, era um interesse puramente teórico. Do ponto de vista experimental, não haveria por que estudar o efeito do ambiente em um sistema quântico. Não havia exemplos de que poderia existir um efeito quântico em objetos macroscópicos. O tunelamento era visto como um fenômeno que ocorria apenas com átomos, moléculas e núcleos. Então, nosso circuito não passava de um

objeto de estudo teórico. Mas, no nosso artigo, propusemos uma configuração do sistema que, mesmo sendo macroscópica, conseguia manter o tunelamento desde que o circuito eletrônico fosse isolado do meio ambiente. Vimos que era possível manter o tunelamento se a junção do circuito fosse construída com certas dimensões. Quanto mais isolado esse sistema macroscópico estivesse do ambiente, mais quântico ele se mantinha. Quanto mais sofresse o efeito destruidor, dissipativo, do ambiente em que estivesse inserido, mais ele se comportava como um sistema regido pela física clássica.

O senhor tinha ideia de que esse circuito poderia ser usado para gerar uma forma de bits quânticos, os qubit, que viriam a ser a base da computação quântica?

Não vou mentir. Claro que não. O artigo não tinha nenhum apelo aplicado. Era uma nova linha de pesquisa teórica. Um pouco depois do nosso trabalho, pesquisadores da IBM trabalharam com um sistema parecido, mas os dispositivos não tinham as características apropriadas. Mais ou menos nessa época, Richard Feynman [1918-1988, teórico norte-ame-

ricano ganhador do Nobel de Física de 1965] já difundia em palestras a ideia de usar a mecânica quântica como um recurso para desenvolver uma nova forma de computação, mas não havia nenhuma conexão com nosso trabalho. Apenas em 1984 e 1985 os físicos que ganharam o Nobel de 2025 fizeram um sistema experimental baseado nas nossas ideias. Em cinco anos, o número de citações do meu artigo com o Leggett disparou. Foi impressionante.

Vamos falar de conceitos básicos para um leigo. No que a mecânica quântica difere da física clássica?

Uma primeira diferença está na questão da escala. A mecânica quântica não trabalha com sistemas macroscópicos, como a física clássica. Ela opera em escalas moleculares, atômicas e subatômicas, ou seja, no mundo do nanômetro [1 bilionésimo do metro] para baixo. A chamada constante de Planck [calculada em 1900 pelo físico alemão Max Planck, 1858-1947] é a grandeza da natureza que separa, *grosso modo*, o que é quântico do que é clássico. Ela descreve o comportamento das partículas e das ondas, inclusive da luz, na escala atômica. E indica que a energia não é emitida ou absorvida de maneira contínua, mas em pacotes que contêm a menor quantidade indivisível de energia, denominados quanta. A constante é um número muito pequeno, de aproximadamente $6,63 \times 10^{-34}$ joules-segundo, que define a energia dos quanta. A constante foi obtida quando se mediou a radiação de um corpo negro [energia emitida por um objeto ou sistema que absorve toda a radiação incidente]. Ela é usada na teoria do efeito fotoelétrico de Albert Einstein [1879-1955] e na equação de Erwin Schrödinger [1887-1961]. Quando houver combinações de grandezas que resultem em uma unidade muito maior do que a constante de Planck, o regime de um sistema é clássico. Se for menor, os efeitos são quânticos.

A velocidade é outro fator importante que distingue o quântico do clássico?

Se algo se move muito lentamente em relação à velocidade da luz, que é de aproximadamente 300 mil quilômetros por segundo, estamos no domínio da física clássica, da mecânica newtoniana. Se

“

Contribuí para algo de inquestionável importância. Não ganhei o Nobel, mas a bola bateu na trave

sua velocidade for muito alta e próxima à da luz, começam a aparecer efeitos que não vemos no nosso dia a dia. Mas a mecânica quântica vai ainda além disso. A teoria é um sucesso do ponto de vista da matemática. Mas há o problema das interpretações. O que exatamente a mecânica quântica mede? Há 100 anos essa questão permeia a comunidade de físicos. Há até renomados pesquisadores que dizem que a mecânica quântica está errada e discordam em geral de sua interpretação probabilística. Particularmente, considero essa atitude um desserviço. Se alguém diz que algo está errado, deve oferecer uma alternativa, e ainda não há essa alternativa à mecânica quântica. Esse pessoal quer que a mecânica quântica seja uma descrição ontológica da realidade, mas não é esse o papel que ela desempenha. A mecânica quântica funciona muito bem dentro do que se propõe a responder.

A revista *Nature* publicou uma reportagem em 2025 que diz que os próprios físicos não estão de acordo sobre o que exatamente a quântica retrata e onde termina o mundo clássico e começa o quântico. Como analisa essa situação?

Quando se passa da escala do nano para o micro, entre um bilionésimo e um milionésimo do metro, aparecem sistemas que, se suficientemente bem escolhidos e trabalhados, vão apresentar efeitos quânticos. Mas, nessa escala, também há a possibilidade de esses sistemas sofrerem a influência do meio ambiente, o que destrói os efeitos quânticos. Esses sistemas ultrapassam a escala do átomo, mas as grandezas que os descrevem ainda estão na escala de energia quântica. É uma terra de ninguém. Então, nessa escala, pode haver sistemas que apresentem características tanto clássicas como quânticas. Esse é o caso do sistema que apresentamos no artigo de 1981.

Mas quais são os efeitos típicos da mecânica quântica que não podem ser vistos em sistemas clássicos?

A dualidade partícula/onda é um deles. O problema da incerteza da medida também. Na mecânica quântica, uma partícula pode estar em uma superposição de estados. É o que ocorre com a direção do momento angular, o spin, de um elé-

“

É difícil explicar que um fóton ou um elétron pode ser considerado partícula em um contexto e onda em outro

tron ou a polarização de um fóton, uma partícula de luz. Mas depois de feita a medição, apenas um dos estados se materializa com uma dada probabilidade. Então, não há uma evolução contínua do estado físico da partícula ao longo do processo de medida.

Por que é muito difícil para as pessoas entenderem os efeitos quânticos?

Nossa percepção é clássica. Tudo que percebemos é clássico. Está no nosso dia a dia. Eu sei o que é uma partícula ou uma onda. Mas é difícil explicar para as pessoas que um fóton ou um elétron pode ser considerado partícula em um contexto e onda em outro. Na mecânica quântica, criamos objetos, como elétrons ou fôtons, que descrevem uma situação que não entendemos muito bem, mas cujo resultado podemos calcular com enorme precisão com a ajuda desses objetos. A mecânica quântica é a teoria mais precisa que há. Mas não conhecemos as interações, os processos, que levam a esse resultado final. Esse, de fato, é o problema.

Por que se costuma dizer que a mecânica quântica é uma teoria incom-

pleta por não conseguir incluir a ação da gravidade como descrita na teoria geral da relatividade de Einstein? Todas as forças [a eletromagnética, a nuclear forte e a nuclear fraca] são quantizáveis, ou seja, podem ser medidas por meio dos quanta, esse pacote mínimo de energia. Todas, menos a força gravitacional, que, na verdade, não é uma força. Sua formulação é diferente. Todas as forças são carregadas por um campo, que transmite energia de um corpo para outro. É, por exemplo, o que ocorre com o campo eletromagnético. Apesar de todo mundo sempre falar em campo gravitacional, a teoria da relatividade geral não trabalha com esse conceito. Segundo a teoria, a gravitação não tem um campo, que faz uma massa atrair outra. A relatividade trabalha com a noção de que a gravidade é uma curvatura do espaço-tempo. A mecânica quântica não sabe como quantizar essa curvatura. O pessoal da teoria das cordas tenta fazer isso, mas com uma abordagem excessivamente teórica. Estamos no centenário da mecânica quântica e não conseguimos avançar nessa questão. Precisamos de uma nova revolução quântica, como a de 100 anos atrás.

Faltariam avanços tecnológicos para que essa limitação seja superada?

Na história da ciência, a ajuda da instrumentação foi tremenda. Com o microscópio eletrônico de varredura, foi possível descrever a superfície de cristais e deslocar moléculas de um ponto para outro de uma superfície. Há 50 anos, começamos a atuar nos sistemas em uma escala até então inimaginável. Isso é muito interessante. Podemos criar dispositivos que poderão interferir em uma dada escala e desafiar determinadas teorias. Muitos pesquisadores acreditam que novidades poderão surgir se conseguirmos trabalhar com energias cada vez mais altas ou em escalas de comprimento cada vez menores. Por outro lado, surpresas ocorreram nos últimos anos, quando passamos a trabalhar na faixa entre o nano e o micro, com dispositivos supercondutores.

Algumas empresas dizem ter desenvolvido computadores quânticos, como a IBM, a Microsoft, o Google e a D-Wave. É fato ou mais uma ação de marketing?

Uma questão precisa ficar clara: não existem ainda computadores quânticos universais. As máquinas convencionais que usamos em casa ou no trabalho são universais. São computadores que podem desempenhar qualquer tarefa. Podem ser usados, por exemplo, para escrever textos, realizar cálculos, ver imagens e em muitas outras tarefas. Os computadores quânticos que existem são destinados a realizar funções específicas, como fazer uma busca. Cada um deles se baseia em um sistema diferente e, possivelmente, não conversam um com o outro. Ainda não há máquinas quânticas que consigam fazer mais do que vários computadores clássicos juntos fazem. Ainda não se alcançou a chamada vantagem quântica. Ninguém sabe como vão ser os futuros computadores quânticos ou como serão acessados. Veja a história do laser. Ninguém sabia para que servia aquele feixe de luz monocromática colimada. Era uma solução em busca de um problema. Hoje o laser é usado em várias aplicações. Alguém imaginava que uma operação de catarata seria feita com laser?

Por que é tão complicado fazer um computador quântico?

Há várias dificuldades. A mais elementar é, evidentemente, criar qubits estáveis, que tenham um tempo de operação longo. Um fato fundamental para o efeito quântico como recurso computacional é o fenômeno de coerência, a habilidade de um sistema evoluir no tempo simultaneamente em múltiplos estados. Se essa coerência é perdida, o sistema deixa de ser quântico. Há várias formas de destruir a coerência, por exemplo, por meio da dissipação decorrente da influência do meio ambiente. Por isso, tentamos isolar o máximo possível um sistema quântico do meio ambiente. Além disso, quando criamos vários qubits, podem surgir efeitos de interação entre eles, o que também pode ser deletério. Temos de tentar controlar tudo isso. Toda a teoria da informação depende de sabermos codificar algo em uma base binária, o bit: uma sucessão de zeros e uns. Na computação clássica, 1 bit é 0 ou 1 e está ligado ou desligado. Na quântica, 1 qubit pode ser 0 e 1 simultaneamente, estar em uma sobreposição de estados de 0 e 1. Isso aumenta brutalmente sua capacidade de processamento. Mas, além do pro-

blema da estabilidade do qubit quântico, há ainda a questão de que precisamos de melhores algoritmos que saibam extrair informação dos qubits.

Vamos voltar ao início de sua vida na cidade do Rio de Janeiro, onde o senhor nasceu. Como surgiu seu interesse pela física?

Quando era criança, mudei muito de escola no primário [hoje parte do ensino fundamental ao lado do antigo ginásio]. A partir do ginásio, entrei no Colégio de Aplicação da então Universidade do Estado da Guanabara, que hoje é a Universidade do Estado do Rio de Janeiro [Uerj]. Cursei ali também o colegial [atual ensino médio]. Fiz ainda um curso pré-vestibular e entrei na PUC-Rio [Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Na época não sabia exatamente como funcionava o curso de física. Para mim, a engenharia era a área onde se executava muito do que era, na realidade, da alcada da física. Tanto que entrei na PUC para fazer engenharia elétrica, não física. Nos dois primeiros anos o curso na PUC era bem geral, um ciclo básico autêntico, com disciplinas das engenharias, da física, da química e da matemática. No

meio do segundo ano, me dei conta de que o meu negócio era a física. O departamento de física da PUC-Rio era muito bom. Tinha ótimos pesquisadores, como Nicim Zagury, que foi meu orientador de mestrado.

Trabalhou com o que no mestrado?

Queria trabalhar com transições de fase, assunto que estava na moda. Mas o Nicim sugeriu que eu estudasse o problema da dissipação em mecânica quântica. Foi a primeira vez que trabalhei com sistemas quânticos abertos, não isolados do meio ambiente. Essa experiência foi de fundamental importância para o meu doutorado na Universidade de Sussex, Reino Unido, onde trabalhei sob a orientação de Tony Leggett, e, novamente, me vi envolvido com sistemas quânticos dissipativos.

Como foi sua volta ao Brasil e entra- da na Unicamp?

Voltei para o Brasil e vim para a Unicamp em outubro de 1980. Naquela época, a contratação era de uma forma diferente. Era preciso mandar seu currículo e o conselho departamental aprovava ou não a sua contratação. Era muito parecido com o sistema norte-americano. A Unicamp só passou a ter concurso depois de 1985.

Sua ideia inicial era continuar na área de dissipação quântica?

Quando retornei ao país, o artigo feito em Sussex já estava pronto, mas ele só foi publicado em janeiro de 1981. Não sabia da repercussão que ele teria em seguida. Logo depois que o estudo foi publicado, surgiu um trabalho experimental de um grupo da IBM sobre ele. Percebi que as pesquisas na área cresciam. Fui de novo para a Inglaterra em 1982 para terminar um *paper* longo e lá permaneci por dois meses. Em 1984, fiquei de janeiro a setembro no então Instituto de Física Teórica da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (UCSB), nos Estados Unidos, trabalhando com efeitos quânticos macroscópicos. Depois, fui para o Thomas J. Watson Research Lab da IBM, no estado de Nova York, onde eu fiquei um ano.

Como foi a experiência na IBM?

Muito interessante. Parte das ideias da



Ainda não há máquinas quânticas que consigam fazer mais do que vários computadores clássicos juntos fazem

computação quântica estava sendo gestada ali, naquele momento. Alguns pesquisadores já estavam começando a pensar no assunto. Mas, infelizmente, eu não tinha interesse em computação naquela época. Estava interessado em outros problemas de dissipação quântica. Poucos anos depois, com a ideia da computação quântica indo de vento em popa, percebi que alguns dos candidatos a se tornarem qubits eram exatamente os dispositivos com que eu tinha trabalhado no doutorado. Em vários momentos, tive a chance de dar contribuições mais específicas e pioneiras também na área de computação quântica. Mas, como disse, não era exatamente o meu interesse.

Como estavam então as pesquisas no Brasil nessas novas áreas da física quântica?

Quando voltei para o Brasil, apenas algumas pessoas sabiam exatamente qual problema eu tinha resolvido. A maioria dos físicos trabalhava em outras áreas. No momento em que meu estudo começou a ser citado, as pessoas passaram a se interessar mais pelo que eu havia feito. O artigo de 1981 acabou se tornando muito conhecido. Outras ideias oriundas do nosso trabalho também foram testadas, alguns anos depois, por outros grupos importantes do exterior, como os de Serge Haroche, do Collège de France, e do norte-americano David Wineland, do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia [Nist], dos Estados Unidos [Haroche e Wineland dividiram o Nobel de Física de 2012 por terem criado metodologias para medir e manipular partículas individuais sem provocar a perda de suas propriedades quânticas]. Nos anos 1990, inúmeros pesquisadores brasileiros, em particular da área de óptica quântica, voltaram seu interesse para o desenvolvimento da área de informação quântica. Dentre eles, estavam Paulo Henrique Souto Ribeiro, hoje docente da Universidade Federal de Santa Catarina [UFSC], e Luiz Davidovich, da Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ]. Interagi bastante com esses pesquisadores e muitos outros no Instituto do Milênio e no INCT de informação quântica.

Como avalia os resultados dessas duas iniciativas?

Grupos brasileiros de pesquisa em in-

“

Nossa verba pode até ser suficiente para fazer pesquisa básica, mas não para desenvolver tecnologia quântica

formação e computação quântica foram formados em vários lugares, principalmente por meio do Instituto do Milênio. Eu mesmo me juntei ao pessoal de óptica dessas iniciativas. Mais tarde, o INCT foi muito útil para o desenvolvimento de laboratórios nessas novas áreas da física quântica no país. Mais recentemente todo mundo começou a falar do desenvolvimento de computadores quânticos e de redes de pesquisa para focar na área de desenvolvimento de produtos quânticos. Mas sou um pouco crítico a respeito disso.

Por quê?

O montante da nossa verba pode até ser adequado para fazer pesquisa fundamental, montar laboratórios, mas não para fazer desenvolvimento. Seria preciso multiplicar o investimento por 10 para criar dispositivos quânticos. O governo federal anunciou recentemente que pretende investir R\$ 5 bilhões no desenvolvimento da área de tecnologias quânticas até 2034. Isso dá US\$ 1 bilhão em aproximadamente uma década. É pouco. A China está investindo 30 vezes mais, os Estados Unidos, 10 vezes. Temos de mandar nossos alunos para se aperfei-

çoar no exterior, mas também escolher a dedo pessoas de fora para vir para cá. O desenvolvimento da China foi parcialmente assim. Primeiro, mandaram seus pesquisadores para aprender no exterior. Em seguida, começaram a importar pesquisadores para lá. Hoje continuam levando ótimos cientistas e, com a situação atual dos Estados Unidos, vão levar ainda mais. É preciso ter uma política clara e investir pesado, de modo contínuo. O projeto de ciência e tecnologia da China é do final dos anos 1970 ou meados dos anos 1980.

O que daria para fazer no Brasil?

Sinceramente, o que quisermos! Vou dar um exemplo. Quem diria 50 anos atrás que o Brasil teria uma fonte de luz sincrotron como o Sirius, um dos melhores aceleradores de elétrons do mundo? É preciso ter conhecimento e uma indústria de alta tecnologia para fazer algo assim. Mais de 80% do conteúdo do Sirius foi produzido aqui. Qualquer estrangeiro que visita o laboratório fica surpreso com o Sirius. Outro exemplo é a Embraer. Esses dois projetos são de médio e longo prazo. Não podemos ser assolados pelo imediatismo e pessimismo. Salvo segunda ordem, o mundo não vai acabar amanhã. Temos competência, mas é preciso foco. Também há pesquisadores que, por outro lado, são excessivamente otimistas. Eles dizem que vão desenvolver produtos comerciais baseados em tecnologias quânticas com as verbas disponíveis, que, como já disse antes, são valores apropriados para fazer pesquisa básica, mas não desenvolvimento tecnológico.

Quem seria responsável por fazer esse desenvolvimento?

Pode até ser uma universidade ou uma instituição de interesse público, mas sobretudo são as empresas. O Sirius não é uma empresa, mas investiu no recrutamento de pessoas certas para um grande projeto. Sou conservador nesse quesito. Acho que o físico tem de saber física, conhecer os fundamentos e avanços recentes da sua área de atuação. Ele pode, mas não precisa ser empreendedor. O que ele tem de fazer, se optar por uma área de desenvolvimento tecnológico, é se juntar a alguém que entenda de fato desse processo. ●