

Física quântica

Trabalho sugere caminho para viabilizar o uso de estados de Majorana em computação quântica

Modelo teórico indica como excitações quânticas protegidas topologicamente podem sustentar qubits menos sensíveis a ruídos e imperfeições do ambiente

30 de janeiro de 2026

X



José Tadeu Arantes | Agência FAPESP – No dia 27 de março de 1938, aos 31 anos, o físico italiano Ettore Majorana ocultou-se do mundo sem deixar vestígios. Intelectualmente brilhante e emocionalmente em conflito, esse gênio, que seu professor Enrico Fermi (Prêmio Nobel de Física de 1938) colocava no mesmo patamar de grandeza do inglês Isaac Newton (1642-1727), havia publicado no ano anterior, 1937, o artigo “Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone”. Foi um dos poucos textos de Majorana que sobreviveram à sua tendência de rasgar e jogar fora tudo o que escrevia. Nele, como solução para a Equação de Dirac,

Ettore Majorana, fotografado em 1930 por fotógrafo desconhecido (imagem: [Wikimedia Commons](#))

que une mecânica quântica e relatividade especial e prevê a existência da antimateria, o jovem italiano apresentou a ideia de uma partícula que seria idêntica à sua antipartícula. Esse par, partícula-antipartícula, recebe, atualmente, o nome de férmons de Majorana.

O artigo de 1937 foi lido em pequenos círculos de especialistas e considerado matematicamente elegante, mas sem conexão com o mundo real. Sua importância só se tornou clara nos anos 1950-60, no contexto da física de neutrinos, e, principalmente, a partir dos anos 2000, na física da matéria condensada. Neste caso, verificou-se que, embora a existência dos férmons de Majorana não tenha sido confirmada experimentalmente, um análogo poderia surgir em materiais sólidos, especialmente em certos tipos de supercondutores. Ele não é composto por partículas reais, mas por quase-partículas, isto é, por excitações coletivas do sistema, que passa a se comportar como se o férion de Majorana estivesse presente.

Os estados de Majorana aparecem tipicamente nas extremidades de fios ou cadeias supercondutoras (materiais que, abaixo de uma temperatura crítica, conduzem corrente elétrica sem resistência). Tudo se passa como se as excitações eletrônicas se descompusessem matematicamente em dois “meios férmons”, cada qual situado em uma ponta. O conjugado quântico não local que eles formam corresponde a um estado de energia zero, no sentido de que não altera a energia total do sistema.

Os estados ligados de Majorana constituem hoje um dos eixos centrais da pesquisa em computação quântica topológica. A busca por computadores quânticos capazes de operar de forma confiável – mesmo na presença inevitável de ruídos, defeitos e flutuações do ambiente – tem levado físicos de diferentes áreas a investigar essas excitações quânticas não convencionais, cujo interesse decorre de seu potencial para servir de base a qubits topológicos – uma arquitetura alternativa de computação quântica que promete maior robustez frente a perturbações externas.

“Em plataformas quânticas convencionais, a informação é codificada em graus de liberdade locais e, por isso, torna-se extremamente sensível a imperfeições microscópicas, o que leva à rápida perda de coerência. Já em sistemas que hospedam estados de Majorana, a informação quântica é armazenada de forma não local, distribuída entre regiões espacialmente separadas do dispositivo e protegida por propriedades topológicas globais do sistema, reduzindo a dependência de detalhes locais e tornando esses estados candidatos particularmente promissores para a implementação de qubits mais estáveis”, diz a pesquisadora [Poliana Heiffig Penteado](#), do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC-USP).

Em conjunto com [José Carlos Egues de Menezes](#), professor titular do IFSC-USP, e o ex-estudante de doutorado [Rodrigo Abreu Dourado](#), ela coordenou estudo [publicado](#) como “Editors’ Suggestion” no periódico *Physical Review B*.

O trabalho investigou como criar e tornar mais estáveis estados de Majorana, com vista à aplicação futura em computação quântica. “Estudamos um modelo teórico conhecido como cadeia de Kitaev, que pode ser implementado na prática usando arranjos de pontos quânticos acoplados a supercondutores. Em cadeias muito curtas, especialmente com apenas dois pontos quânticos, é possível obter estados semelhantes aos de Majorana, mas apenas em condições muito específicas de ajuste fino dos parâmetros do sistema. O principal objetivo do estudo foi entender o que acontece quando aumentamos o número de pontos quânticos da cadeia. O estudo demonstrou que aquilo que antes aparecia como um ponto isolado de estabilidade evolui, gradualmente, para uma ‘ilha topológica’, uma região extensa de parâmetros onde os estados de Majorana permanecem protegidos”, relata Egues.

Existe hoje um debate internacional intenso sobre como distinguir, de forma inequívoca, os majoranas genuínos de excitações quânticas triviais que produzem sinais semelhantes nos experimentos. O estudo insere-se nesse debate. Seu ponto de partida é um modelo teórico conhecido como cadeia de Kitaev. Tal modelo foi proposto em 2001 pelo físico russo Alexei Kitaev, nascido em Moscou em 1962 e atualmente sediado no California Institute of Technology (Caltech). Ele mostrou que um sistema unidimensional de elétrons, acoplados por emparelhamento supercondutor, pode entrar em uma fase topológica na qual um férnion eletrônico do conjunto se decompõe matematicamente em dois modos de Majorana espacialmente separados e hospedados nas extremidades. O estado quântico não local formado por esse par tem energia zero em relação ao estado fundamental. A cadeia de Kitaev fornece o alicerce conceitual para a produção de qubits topológicos protegidos contra perturbações locais.

“O problema é que, em cadeias muito curtas, como aquelas formadas por apenas dois pontos quânticos, esses estados só aparecem em condições extremamente específicas, conhecidas como *sweet spots*. Qualquer pequena flutuação nos parâmetros do sistema faz com que a energia desses estados deixe de ser exatamente zero, destruindo a proteção desejada e inviabilizando a observação experimental”, afirma Egues.

A ideia dos pesquisadores foi, então, aumentar o número de pontos quânticos da cadeia e ver o que acontece. “Mostramos que, quando a cadeia fica maior, os *sweet spots* deixam de ser pontos isolados e passam a se agrupar, formando uma região contínua no espaço. Para cadeias suficientemente longas, com cerca de 20 pontos quânticos ou mais, essa região se transforma em uma verdadeira ilha topológica. Dentro dela, os estados de Majorana permanecem rigorosamente com energia zero, bem localizados nas extremidades da cadeia e resistentes até mesmo à presença de flutuações aleatórias nos parâmetros do sistema. Esse comportamento marca a transição de um regime frágil para um regime genuinamente topológico, no qual a proteção não depende mais de ajuste fino”, informa Penteado.

Além de caracterizar teoricamente essa transição, o estudo propôs uma forma concreta de detectar as ilhas topológicas em experimentos. Motivados por um trabalho anterior do grupo do IFSC-USP, realizado com apoio da FAPESP e que se tornou uma [referência](#) clássica na área, os pesquisadores acoplaram lateralmente à cadeia um ponto quântico conectado a contatos metálicos (ver *figura 1*) e mediram a condutância elétrica do sistema (a medida de quão facilmente a corrente elétrica atravessa um material, sendo o inverso da resistência elétrica). Quando um estado de Majorana está presente e protegido, a condutância assume um valor característico e quantizado, formando um platô em torno da voltagem zero. Esse platô funciona como uma assinatura elétrica robusta do estado topológico.

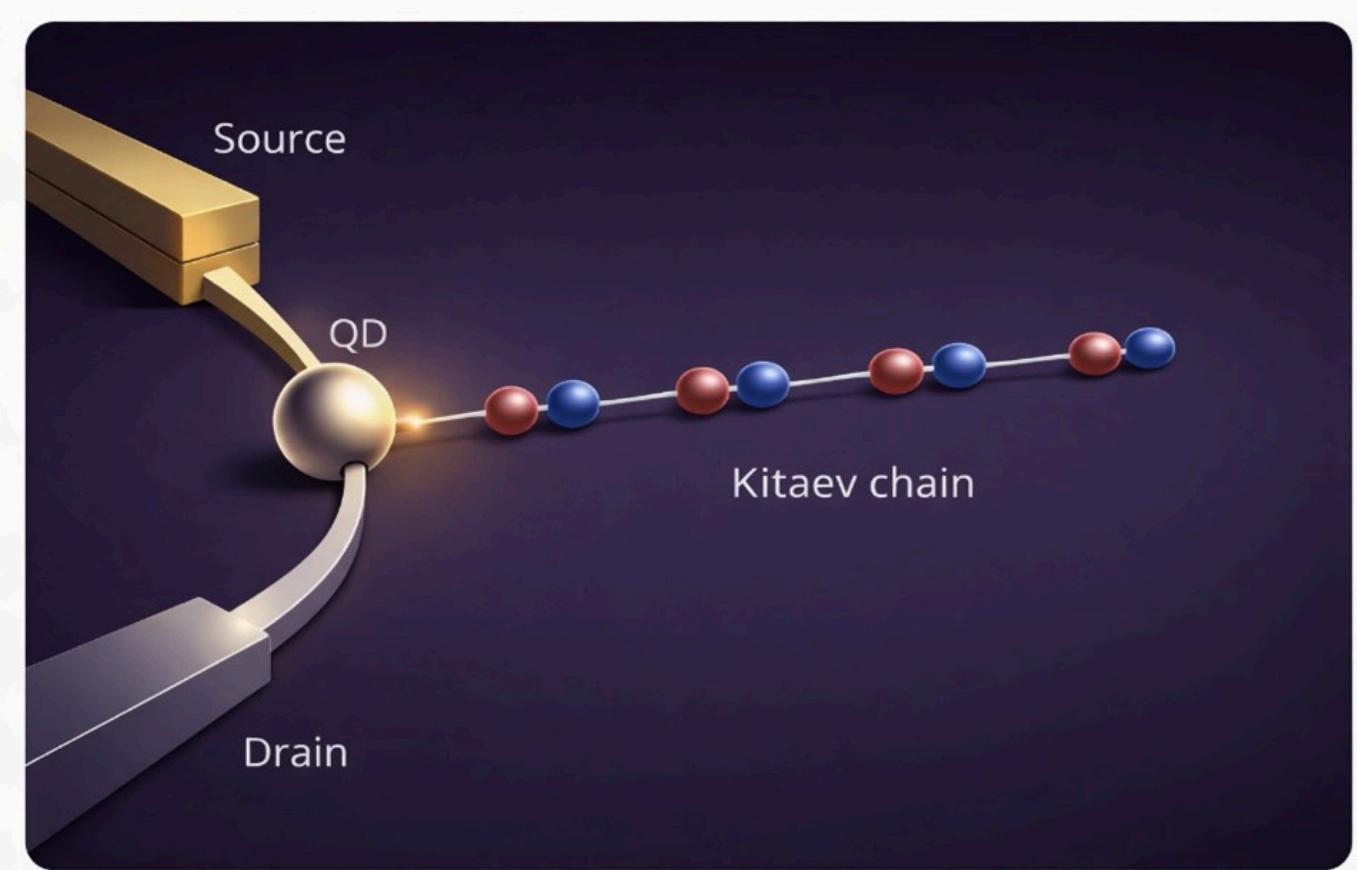


Figura 1: Ponto quântico (QD) conectado a contatos metálicos e acoplado a uma cadeia de Kitaev. Cada sítio da cadeia está representado por dois majoranas (vermelho e azul) (imagem: Poliana Heiffig Penteado/ChatGPT)

Além disso, o estudo mostrou também que a condutância está diretamente relacionada à estatística de troca dos majoranas (“braiding”), mostrando que o seu operador ao quadrado, γ^2 é $\frac{1}{2}$ e não zero, como no caso dos férmiões usuais, os quais obedecem ao princípio de Pauli (ver figura 2a). Os estados de borda de Majorana em sistemas de matéria condensada não possuem uma distribuição de Fermi-Dirac (ver figura 2b).

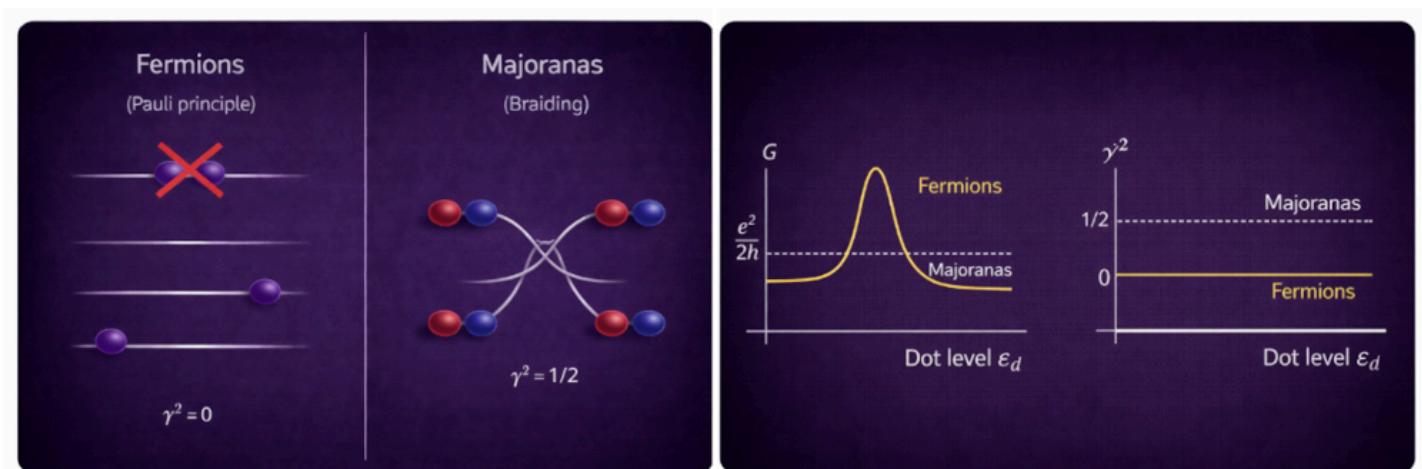


Figura 2: a) Ilustração do princípio de Pauli para férmiões usuais: dois férmiões não podem ocupar o mesmo estado quântico. Esse conceito de ocupação não existe para férniões de Majorana com energia zero em matéria condensada. Esses estados de Majorana apresentam uma característica fundamentalmente distinta dos férniões usuais: seus estados quânticos se entrelaçam de forma não trivial quando são trocados de posição, tornando a informação codificada nos mesmos imune às perturbações. b) Em contraste com os férniões usuais, que exibem uma condutância ressonante (pico), a condutância G para um modo de Majorana apresenta um platô que sinaliza o estado topológico com $\gamma^2 = \frac{1}{2}$ (imagem: Poliana Heiffig Penteado/ChatGPT)

“A beleza do resultado foi relacionar uma medida elétrica simples, a condutância, com uma propriedade fundamental da partícula [sua estatística]. Se a condutância assume esse valor quantizado, isso indica que a corrente está sendo transportada por um modo de Majorana, e não por uma excitação trivial”, argumenta Egues. Penteado acrescenta que esse ponto é crucial em um campo de investigação marcado por controvérsias: “Desde os primeiros experimentos, ficou claro que outros fenômenos, como o efeito Kondo, podem gerar sinais parecidos. O desafio sempre foi mostrar que aquele pico na condutância vinha mesmo de um majorana. Nossa trabalho contribui justamente para essa distinção”.

Embora o estudo seja teórico, ele utilizou parâmetros realistas, extraídos de experimentos recentes, e dialoga diretamente com esforços internacionais para a construção de qubits topológicos. Empresas como a Microsoft têm investido pesadamente nessa linha de pesquisa, na expectativa de que majoranas possam viabilizar computadores quânticos mais estáveis. O trabalho dos pesquisadores brasileiros mostra que não é necessário um controle absolutamente perfeito dos parâmetros para observar estados de Majorana robustos. Basta aumentar o tamanho do sistema – algo que já está ao alcance das plataformas experimentais atuais.

O estudo foi apoiado pela FAPESP por meio de auxílio regular ao projeto “[Oscilações de Shubnikov-de-Haas em sistemas eletrônicos de isolantes topológicos e não topológicos](#)”, conduzido por Egues.

O artigo *Two-site Kitaev sweet spots evolving into topological islands* pode ser lido em: link.aps.org/doi/10.1103/wptk-lvc5.