

Férmions de Majorana e a computação quântica

Majorana fermions and quantum computing

Carlos Alberto dos Santos^{*1}

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 24 de junho de 2025. Aceito em 24 de junho de 2025.

O recém anunciado chip topológico da Microsoft foi denominado Majorana 1, em homenagem a Ettore Majorana, que em 1937 previu a existência de partículas cuja propriedade fundamental era de que seriam iguais às suas antipartículas. Essas partículas inicialmente foram denominadas partículas de Majorana, e depois, férmions de Majorana. Em 2001, Alexei Kitaev sugeriu a existência dessas partículas em supercondutores. A partir de 2010 diversos pesquisadores investigaram a existência de férmions de Majorana em supercondutores topológicos, e em 2014 Frank Wilczek denominou-os majorinos. No presente trabalho, será apresentada uma transposição didática sobre os férmions de Majorana, bem como sobre sua aplicação na fabricação de chips para computação quântica topológica. A narrativa é consistente com o nível de cursos de graduação em física, bem como das disciplinas ofertadas no MNPEF.

Palavras-chave: Férmions de Majorana, Majorino, Supercondutor topológico, Computador topológico.

Microsoft's recently announced topological chip was named Majorana 1, in honor of Ettore Majorana, who in 1937 predicted the existence of particles whose fundamental property was that they would be equal to their antiparticles. These particles were initially called Majorana particles, and later Majorana fermions. In 2001, Alexei Kitaev suggested the existence of these particles in superconductors. Since 2010, several researchers have investigated the existence of Majorana fermions in topological superconductors, and in 2014 Frank Wilczek named them majorinos. In this work, a didactic transposition on Majorana fermions will be presented, as well as on their application in the fabrication of chips for topological quantum computing. The narrative is consistent with the level of undergraduate courses in physics, as well as the disciplines offered at MNPEF.

Keywords: Majorana fermions, Majorino, Topological superconductor, Topological computer.

1. Introdução

Quando, em 4/5/2023, publiquei meu primeiro artigo sobre Ettore Majorana [1], descobri que 90% dos meus amigos, alunos, professores e pesquisadores da física desconheciam esse genial físico italiano, desaparecido sem deixar vestígios, em 1938, quatro meses antes de completar 32 anos. Em 2/10/2024, publiquei um longo ensaio na *Estado da Arte*¹ a respeito desse desaparecimento [2]. Logo depois, a Livraria da Física publicou meu livro, no qual foram reunidos os trabalhos que publiquei entre 2023 e 2024 [3]. Entre esses trabalhos reunidos no livro, dois foram publicados aqui na *Revista Brasileira de Ensino de Física* [4, 5].

Soube da existência de Majorana em 1991, por intermédio do livro de Leonardo Sciascia [6], mas meu interesse em estudar sua biografia só apareceu no início de 2023, quando tomei conhecimento dos livros de João Magueijo [7] e Étienne Klein [8]. Nesse período entre janeiro de 2023 e dezembro de 2024 não tive

conhecimento da existência de pesquisas referentes às aplicações dos férmions de Majorana na computação quântica com materiais topológicos. Portanto, foi uma coincidência que meu livro tenha sido lançado dois meses antes do lançamento do chip Majorana 1, anunciado pela Microsoft.

Uma consulta ao Google Acadêmico (GA) mostra que o assunto surgiu depois de 2010, embora o tema “Majorana fermions” seja objeto de estudo desde meados dos anos 1970 [9]. Todavia, a existência de férmions de Majorana em supercondutores só foi relatada em 2001, por Alexei Kitaev [10]. Foi esse artigo que abriu as portas para a entrada dos férmions de Majorana na área dos computadores quânticos topológicos. A Figura 1 mostra o crescimento quase exponencial da literatura internacional a respeito dos férmions de Majorana. Como se vê, a quantidade de artigos publicados no Brasil é irrelevante, em comparação à literatura internacional. É provável que a literatura internacional tenha outro salto no crescimento a partir deste ano, com o anúncio do chip Majorana 1. Os férmions de Majorana surgiram em um trabalho que ele publicou em 1937 [11], alguns meses antes do seu desaparecimento.

No presente trabalho, apresentarei uma transposição didática sobre os férmions de Majorana, bem como sobre

^{*}Endereço de correspondência: cas.ufrgs@gmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

¹ Estado da Arte é uma revista eletrônica do jornal o Estado de São Paulo: <https://estadodaarte.estadao.com.br>.

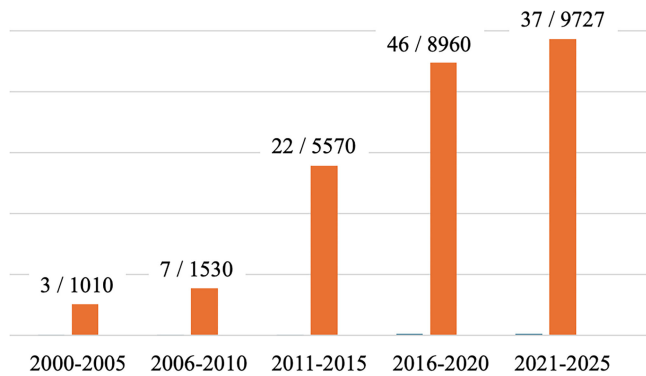


Figura 1: Quantidade de artigos recuperados pelo Google Acadêmico em 12/5/2025, com as expressões de busca “férmions de Majorana” (busca na literatura brasileira) e “Majorana fermions” (busca em qualquer idioma). Os números acima das barras representam, respectivamente, as buscas na literatura brasileira e na busca em qualquer idioma. Como se vê, é irrelevante a quantidade de artigos no Brasil, em comparação às publicações internacionais.

sua aplicação na fabricação de chips para computação quântica topológica, como o Majorana 1. A narrativa é consistente com o nível de cursos de graduação em física, bem como das disciplinas ofertadas no MNPEF.

2. Palavras exóticas e história mal contada

No dia do anúncio da Microsoft, o excelente portal Techtudo² publicou um artigo no qual afirma, sem apresentar maiores explicações:

Majorana 1: o que o chip quântico da Microsoft tem de novo?

O ponto central dos avanços tecnológicos do Majorana 1 está no desenvolvimento do primeiro topocondutor do mundo, quase-partícula, até então somente teórica, que permite a criação de supercondutividade topológica nas bordas do material. O topocondutor do novo chip combina arseneto de índio, um semicondutor, e alumínio, um supercondutor. Um conjunto que, quando resfriado a 50 miliKelvin ($-273,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) e sintonizado com campos magnéticos, forma nanofios supercondutores com modos zero de Majorana (MZMs) em suas extremidades.

Essa condição foi teorizada pela primeira vez pelo físico italiano Ettore Majorana em 1937, e implica em um estado de agitação exótico que faz com que essas quase-partículas (partículas criadas artificialmente por manipulações externas), se comportem como

suas próprias antipartículas, ficando inertes entre si e praticamente anulando eventuais interferências por proximidade.

Alguns termos na citação acima são desconhecidos até mesmo por muitos profissionais da física. O que seriam: topocondutor, quase-partícula, supercondutividade topológica, sintonizado com campos magnéticos, modos zero de Majorana? Duas observações sobre essa parte da matéria: (1) eu prefiro usar quasipartícula, o termo predominante na literatura científica; (2) como veremos mais adiante, Majorana não teorizou o que consta no primeiro parágrafo da citação. Ou seja, em 1937 ninguém sabia o que viria mais de 50 anos depois. Há um atenuante na falta de clareza conceitual na matéria do Techtudo. O assunto não apenas é amplo, mas, sobretudo, é muito complexo. É praticamente impossível em poucas laudas, abordar todas as particularidades dos conceitos físicos que desembocaram no chip Majorana 1. Há que se definir um contexto compreensível e relevante, o que já não é tarefa simples.

Vejamos mais dois textos com palavras exóticas e história mal contada. O primeiro é o anúncio no portal da Microsoft³:

A Microsoft apresentou hoje o Majorana 1, o primeiro chip quântico do mundo alimentado por uma nova arquitetura de Núcleo Topológico que, segundo a empresa, permitirá que computadores quânticos resolvam problemas significativos em escala industrial em anos, não décadas.

Ele aproveita o primeiro topocondutor do mundo, um tipo inovador de material que pode observar e controlar partículas de Majorana para produzir qubits mais confiáveis e escaláveis, que são os blocos de construção dos computadores quânticos.

O segundo texto é uma matéria recente no portal Terra⁴:

O resultado dessa longa pesquisa, publicado na revista Nature, é o Majorana 1 – o primeiro processador quântico baseado nessa nova arquitetura. Diferente dos chips tradicionais, que usam elétrons, a Microsoft utiliza a partícula de Majorana.

Para isso, os pesquisadores da empresa criaram o que chamam de “o primeiro topocondutor do mundo”: um novo tipo de

² <https://www.techtudo.com.br/noticias/2025/02/majorana-1-novo-chip-da-microsoft-torna-realidade-teoria-criada-ha-100-anos-edsoftwares.ghtml>.

³ <https://news.microsoft.com/source/latam/ia-pt-br/chip-majorana-1-da-microsoft-abre-um-novo-caminho-para-a-computacao-quantica/?lang=pt-br>.

⁴ Sofia Bedeschi, 2 abr 2025, 11h28 (atualizado às 19h43): <https://www.terra.com.br/byte/a-microsoft-vem-trabalhando-ha-17-anos-em-seu-novo-e-empolgante-produto-um-computador-quantico-com-particulas-de-majorana,9bd88fbd10a0591a21ff5532ccc8789fnpr4tk7d.html>.

semicondutor que também atua como supercondutor e permite observar e controlar partículas de Majorana com um objetivo principal – criar qubits mais estáveis e menos sensíveis ao ruído, um dos grandes desafios da computação quântica.

A exótica palavra topocondutor, mencionada nos dois textos, surgiu na propaganda da Microsoft. Não conheço artigo científico que a mencione. O que se tem no chip Majorana 1, é o que se chama de heteroestrutura, consistindo em uma camada de alumínio (Al), um material que pode ser supercondutor, entre uma camada de arseneto de índio (InAs), um material semicondutor, e uma camada de um material condutor. O alumínio é supercondutor em temperaturas próximas do zero absoluto. A equipe de propaganda da Microsoft está chamando esse material de topocondutor, mas a comunidade científica ainda não consagrou o nome. Portanto isso é um tipo de desinformação científica para o público em geral.

No portal Terra, há um equívoco conceitual, provavelmente derivado da palavra topocondutor: *um novo tipo de semicondutor que também atua como supercondutor*. Como foi dito acima, o material usado no Majorana 1 não é um tipo de material que também atua como supercondutor. É uma mistura de um semicondutor (InAs) e um supercondutor (Al).

Outro equívoco nos dois textos é sobre a partícula de Majorana no chip. Não é a partícula que atua no chip. É a quasipartícula de Majorana, conforme explicado mais adiante. Ou seja, o férmion de Majorana em um supercondutor não é uma partícula, é uma quasipartícula.

O objetivo daqui em diante é tornar mais palatável toda essa terminologia exótica, começando pelo conceito de quasipartícula.

3. As Palavras Exóticas no Formalismo da Física

3.1. Quasipartículas

O conceito de quasipartícula [12] surgiu nos anos 1950 para resolver problemas de muitos corpos [13]. Inicialmente eram denominadas partículas efetivas, mas o nome que pegou foi o de quasipartículas. No caso da condução elétrica, tem-se o elétron interagindo com milhares de elétrons e núcleos atômicos. Então, para explicar o movimento do elétron no interior de um metal ou semicondutor, sob a ação de um campo elétrico externo, foi necessário imaginá-lo movimentando-se no espaço livre com uma massa diferente, a *massa efetiva*, e obedecendo à segunda lei de Newton.

O conceito foi generalizado para representar outras circunstâncias em problemas de muitos corpos, onde surgem excitações coletivas. Por exemplo, um material em estado sólido tem seus átomos aproximadamente fixos em determinados pontos da estrutura cristalina.

Se a temperatura ambiente aumentar, os átomos vibram coletivamente, formando ondas com determinadas frequências. Em vez de tratar esse tipo de excitação coletiva com as ferramentas da teoria ondulatória, é mais simples tratá-lo a partir da teoria corpuscular, associando uma quasipartícula, o fônon, a cada tipo de movimento ondulatório da estrutura cristalina. Isso é muito complicado para entender, porque não temos uma imagem clássica para visualizar o fenômeno.

Nos semicondutores, quando o elétron salta da banda de valência (BV) para a de condução (BC), ele deixa uma lacuna na BV. Essa lacuna é uma quasipartícula. É algo que se comporta como se fosse um elétron com carga positiva, mas não é um objeto real. Como cargas elétricas de sinais contrários se atraem, em determinadas circunstâncias o par elétron-lacuna permanece unido por algum tempo e se comporta como se fosse outro objeto, uma quasipartícula, que recebeu o nome de *éxciton*. O nome vem do processo de excitação no semicondutor, que resulta no salto do elétron da BV para a BC. Para muitos pesquisadores, a imagem do éxciton é similar a um átomo de hidrogênio, composto por um núcleo positivo (lacuna) em torno do qual gira um elétron.

No caso dos supercondutores, a situação é ilustrada na Figura 2. Na figura vemos elétrons, representados por círculos azuis, lacunas, círculos cinzas, e pares de elétrons, também conhecidos como pares de Cooper. Há duas possibilidades de surgimento de uma quasipartícula. A primeira, ilustrada na parte superior da figura, surge quando uma lacuna está nas proximidades de um par de Cooper, esse conjunto (lacuna + par de Cooper) atua como se fosse um elétron. Isso é consequência da associação de um dos elétrons do par com a lacuna. Essa associação (elétron+lacuna) resulta em uma quasipartícula neutra, ou seja, um férmion de Majorana. É um férmion de Majorana porque se trata de uma partícula neutra que é a sua própria antipartícula, como havia previsto Majorana no trabalho de 1937 [11]. Ou seja,

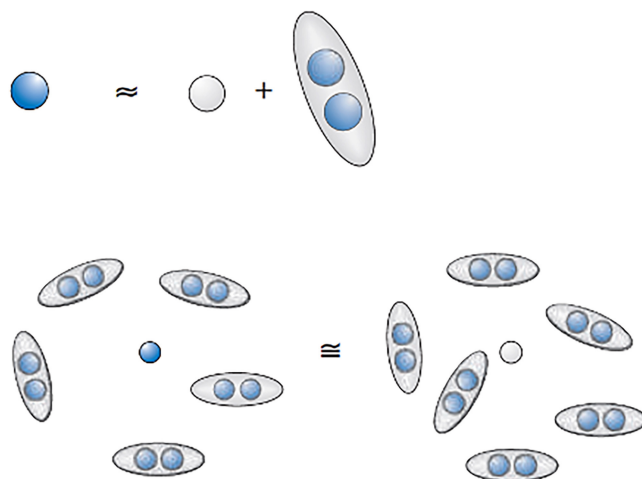


Figura 2: Elétrons, lacunas e pares de elétrons em um supercondutor. Figura extraída de Wilczek [14].

aquilo que Majorana descreveu como uma partícula, aparece nos supercondutores como uma quasipartícula. De qualquer modo, usarei indistintamente os dois termos, férmions ou quasipartículas de Majorana.

Não há necessidade de entrar em detalhe, mas é importante saber que a existência de pares de Cooper é a principal responsável pelo mecanismo de condução elétrica em supercondutores.

A segunda possibilidade de surgimento de uma quase quasipartícula é ilustrada na parte inferior da Figura 2. Isso ocorre quando um grupo de pares de Cooper circunda um elétron. Esse elétron gera um par de Cooper e uma lacuna, como ilustrado na parte superior da figura. Essa lacuna vai se associar a um elétron, como no caso anterior, e criar um férmion de Majorana. Vejamos agora como surgiu essa ideia de um férmion denominado férmion de Majorana.

3.2. Férmions de Majorana

A palavra *férmion* foi sugerida por T.S. Chang, em 1947 [15]:

Em 1942, Dirac apresentou, em conexão com uma nova formulação da eletrodinâmica quântica, uma segunda quantização relativística de bósons, ou seja, partículas que satisfazem à estatística de Bose. Nessa quantização, partículas de energias negativas são consideradas, mas parece bastante natural que elas estejam presentes em uma teoria relativística de segunda quantização. É óbvio que se pode realizar uma quantização semelhante em partículas que satisfazem à estatística de Fermi-Dirac, e tal quantização será útil em uma teoria na qual as partículas interagem por meio da emissão e absorção de partículas de Fermi-Dirac. Nesta nota, tal quantização é apresentada. Ela é muito semelhante à quantização de bósons, mas é apresentada aqui para comparação e referência futura. A notação de Dirac para os vetores bra e ket será usada aqui, e espera-se que o seguinte ilustre mais uma vez o poder, por demais óbvio, de tal notação [Tradução minha].

Em nota de rodapé, Chang escreve: Sugere-se que tais partículas sejam chamadas de férmions.

Quando Majorana publicou seu trabalho, em 1937, os férmions eram conhecidos simplesmente como partículas de Fermi-Dirac, ou partículas que obedecem à estatística de Fermi-Dirac. Majorana começou a estudar essas partículas em 1932, mas logo depois, em janeiro de 1933, partiu para uma temporada de seis meses entre Leipzig (visitando Heisenberg) e Copenhague (visitando Bohr). No retorno, em agosto de 1933, se isolou em sua residência durante quase três anos. Não queria receber visitas, nem ia ao Instituto de Física da Universidade de Roma (IFUR). Acredita-se que tenha sido uma estafa

mental, ou consequência de uma gastrite aguda, mas ninguém sabia ao certo a razão do seu isolamento. Em meados de 1936 ele começa a frequentar o IFUR, quando foi informado da abertura de um concurso nacional para as universidades de Milão, Palermo e Pisa⁵. Para se inscrever no concurso, Majorana enviou para o Nuovo Cimento o artigo que trata das partículas que anos depois foram denominadas *partículas de Majorana*, e depois dos anos 1960 passaram a ser conhecidas como *férmions de Majorana*.

Esse trabalho publicado em 1937, teve origem no incômodo de Majorana com a teoria relativística do elétron, proposta por Dirac [16–18]. Na abertura do seu artigo de 1930 [17], Dirac escreve:

A teoria quântica relativística de um elétron em movimento em um dado campo eletromagnético, embora bem-sucedida na previsão das propriedades de spin do elétron, apresenta uma séria dificuldade que demonstra que alguma alteração fundamental é necessária antes que possamos considerá-la uma descrição precisa da natureza. Essa dificuldade está relacionada ao fato de que a equação de onda (...) tem, além das soluções desejadas para as quais a energia cinética do elétron é positiva, um número igual de soluções indesejadas com energia cinética negativa para o elétron, que parecem não ter significado físico.

Em seu artigo de 1937, Majorana inicia se referindo ao trabalho de Dirac:

A interpretação dos chamados “estados de energia negativa” proposta por Dirac leva, como é bem sabido, a uma descrição substancialmente simétrica de elétrons e pósitrons. A simetria substancial do formalismo consiste precisamente em que a própria teoria fornece resultados completamente simétricos.

As prescrições necessárias para moldar a teoria em uma forma simétrica, em conformidade com seu conteúdo, não são, no entanto, inteiramente satisfatórias, seja porque sempre se parte de uma forma assimétrica, seja porque resultados simétricos só são obtidos após a aplicação de procedimentos apropriados, como o cancelamento de constantes divergentes, que possivelmente se deveria evitar. Por essas razões, tentamos uma nova abordagem, que leva mais diretamente ao resultado desejado.

Na sequência, Majorana afirma que é possível formular uma teoria de partículas elementares neutras, com spin

⁵ Detalhes sobre esse concurso são apresentados no capítulo 8 do livro “Majorana: o oráculo da física contemporânea” [3].

$\frac{1}{2}$, que não possuem estados de energia negativa, e são suas próprias antipartículas. Na época, a partícula neutra visada era o neutrino, mas cada tipo de neutrino tinha um antineutrino. Portanto o neutrino não correspondia ao resultado básico de Majorana. Seria necessária haver um *neutrino de Majorana*. Até hoje inúmeras pesquisas encontram-se em andamento para verificar se há na natureza neutrinos de Majorana. Do ponto de vista formal, esse posicionamento de Majorana decorre do fato que no tratamento de Dirac as propriedades do sistema são representadas por números complexos. Majorana questionou e provou que para partículas com spin $\frac{1}{2}$ isso não era uma condição *sine qua non*.

Para melhor apreciarmos essa história, é importante definirmos o cenário no qual ela se insere, que começa a se formar em 1928, quando Dirac publica o artigo sobre a teoria quântica do elétron [16]. No ano seguinte, Weil [19, 20] publica um estudo similar para férmions sem massa. Exatamente naquele período pesquisadores da área estavam se debatendo com a interpretação do espectro de energia no decaimento beta. As energias das partículas beta eram sistematicamente menores do que aquelas previstas pela equação de Einstein, $E = mc^2$. Energia estava desaparecendo e ninguém sabia para onde ia. Chegaram até a imaginar que a lei da conservação de energia talvez não valesse naqueles experimentos. Foi nesse contexto que, em total desespero, Pauli escreveu para Lise Meitner, em dezembro de 1930, propondo a existência de uma nova partícula no núcleo, com massa desprezível, que ele denominou nêutron, e que seria responsável por transportar parte da energia prevista pela equação de Einstein. Dois anos depois, essa partícula seria denominada neutrino. Logo se imaginou que os neutrinos seriam férmions de Weyl [19]. Mas, os neutrinos mudaram de mão, porque no início dos anos 1960 muitos pesquisadores da área de partículas elementares começaram a investigar as consequências da existência de neutrinos com massa diferente de zero. Neste caso, os neutrinos seriam férmions de Majorana.

É ampla a literatura a respeito do tema *férmions e neutrinos de Majorana*, mas manterei o foco nos férmions de Majorana em materiais supercondutores, e usarei como referência para a transposição didática dessa parte da história, os artigos de Pal [19], Wilczek [21] e Parrochia [22]. Interessados em uma abordagem didática mais detalhada do que essa apresentada aqui, sugiro o artigo de Pal, no qual ele apresenta os férmions de Majorana por meio de uma jornada imaginária sem precisar conhecer os férmions de Dirac. Embora nenhuma partícula conhecida ou mesmo conjecturada possa ser um férmion de Weyl, Pal mostra que esses férmions podem ser usados como blocos de construção de qualquer campo de férmions. Wilczek e Parrochia apresentam a equação de Dirac e os férmions de Majorana na notação covariante, sendo que o primeiro faz uma investida maior nos supercondutores, e o segundo apresenta um enfoque filosófico.

Na teoria quântica não relativística, o movimento do elétron é descrito pela equação de Schrödinger dependente do tempo [23]:

$$-\frac{1}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = i\frac{\partial\psi}{\partial t}, \quad (1)$$

onde, V é a energia potencial, e

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2)$$

A equação (1) é a expressão da conservação de energia,

$$\frac{p^2}{2m} + V = E, \quad (3)$$

onde,

$$p \rightarrow -i\nabla; E \rightarrow i\frac{\partial}{\partial t}. \quad (4)$$

A conservação da energia relativística é dada pela expressão (fazendo $\hbar = c = 1$)

$$E^2 - p^2 - m^2 = 0 \rightarrow -\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} + \nabla^2\Psi - m^2 = 0. \quad (5)$$

Em notação covariante [24], similar àquela que está na placa comemorativa na Abadia de Westminster, nas proximidades do túmulo de Newton, a equação (5) fica assim:

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0. \quad (6)$$

As complexas expressões matemáticas na forma original publicada por Dirac foram reduzidas a uma matriz 4×4 (γ^μ) e a um vetor de quatro componentes (spinor ∂_μ), com $\mu = 0, 1, 2, 3$. Como as matrizes γ têm elementos reais e imaginários, ψ deve ser representada por um número complexo.

A partir do uso de método variacional com uma lagrangiana que ele formulou, Majorana mostrou que é possível resolver esse problema com todas as matrizes γ^μ imaginárias. Então, sua equação, similar à de Dirac fica assim:

$$(i\bar{\gamma}^\mu\partial_\mu - m)\bar{\psi} = 0. \quad (7)$$

A solução da equação (7) será representada por números reais. Ou seja, partículas neutras com spin $1/2$ podem ser representadas por números reais. Essas partículas são os férmions de Majorana. Apenas a título de ilustração apresentarei as quatro matrizes $\bar{\gamma}^\mu$ de Majorana:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}^0 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \bar{\gamma}^2 &= \begin{pmatrix} i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i \end{pmatrix} \\ \bar{\gamma}^1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \end{pmatrix} & \bar{\gamma}^3 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Como Majorana mostrou, o sistema que ele investigou para partículas neutras com spin $1/2$ tem como solução uma matriz hermitiana simétrica, e consequentemente os operadores de criação e aniquilação são iguais:

$$\bar{\psi} = \psi^\dagger. \quad (8)$$

Esse resultado significa que a partícula é igual à sua antipartícula. Os férmions de Majorana são suas próprias antipartículas.

3.3. Majorinos

O objetivo deste artigo é mostrar como os férmions de Majorana chegaram aos materiais supercondutores topológicos, com forte indicação para seu aproveitamento na fabricação de chips para computação quântica. No entanto, é interessante mencionar, nem que seja brevemente, a caminhada desde a formulação da equação (7) até os dias atuais. Majorana especulou que sua equação poderia ser aplicada ao neutrino [24], que naquela época não passava de uma partícula hipotética, e que por definição deveria ter massa desprezível. No entanto, para a formulação de Majorana o neutrino deveria ter massa, e ser sua própria antipartícula. Quando os neutrinos foram descobertos em 1956, os resultados indicavam que neutrinos e antineutrinos eram diferentes. Portanto, o neutrino não poderia ser um férmion de Majorana. No final dos anos 1990, observações de neutrinos vindos do Sol sugeriam que essas partículas tinham massa não desprezível, e que havia a possibilidade de serem iguais os neutrinos e os antineutrinos. Essa é uma questão que continua em aberto, e não faz parte do escopo deste artigo⁶.

Por outro lado, como já foi mencionado, a questão objeto deste artigo, ou seja, a existência de férmions de Majorana em supercondutores foi aventada pela primeira vez em 2001, no artigo *Férmions de Majorana desacoplados em fios quânticos*, publicado por Alexei Kitaev [10]. De acordo com Sato e Ando [25], “A emergência dos férmions de Majorana é a característica mais proeminente dos supercondutores topológicos”. Esses férmions constituem um tipo especial de quasipartícula surgida de um estado quântico conhecido como *modo zero de Majorana* (MZM), geralmente observado em defeitos topológicos.

Em seu artigo de 2014, *Majorana e a física da matéria condensada*, Wilczek [24] afirma ter sido ele quem propôs o nome *majorino* para os férmions de Majorana em supercondutores. Ele indica que a sugestão teria sido feita nesse artigo de 2013 [26]. Todavia, não há qualquer menção à palavra *majorino* nesse artigo. O primeiro documento no GA contendo essa palavra é o artigo de Wilczek de 2014. Talvez ele seja o criador da palavra *majorino*; talvez ele tenha pensado nisso antes do artigo

de 2013, mas provavelmente a primeira vez que ele escreveu a palavra em artigo publicado tenha sido em 2014. Para além dessa questão histórica, o importante é compreendermos o formalismo que está por trás da presença de *majorinos* em supercondutores topológicos. A Figura 2 ilustra as duas possibilidades do surgimento de um *majorino*.

3.4. Ânions

Em 1982, Wilczek mostrou que partículas carregadas orbitando em torno de um fluxo magnético funcionam como quasipartículas que ele denominou *ânions* [27]. Em 1991, ele publicou um extenso artigo sobre as propriedades dessa quasipartícula [21]. Essas quasipartículas só existem em espaços bidimensionais. No espaço tridimensional no qual vivemos, só existem dois tipos de partículas, conhecidas como férmions (elétron, próton, nêutron, neutrino e quark), e bósons (fóton, glúon, bóson W, bóson Z e bóson de Higgs). A denominação *férmion* vem do fato de que elas são tratadas com a estatística de Fermi-Dirac, enquanto os bósons são tratados com a estatística de Bose-Einstein. Tanto férmions, quanto bósons, apresentam a seguinte propriedade. Se as posições de duas partículas de um par forem trocadas duas vezes, a função de onda do par será a mesma no caso de bósons, e será a mesma com sinal negativo no caso de férmions.

Em um espaço bidimensional pode existir um tipo de partícula que não corresponde a nenhuma dessas estatísticas. Ou seja, nem é férmion, nem bóson. Essa partícula é o *ânion*. Como foi já dito, o *ânion* é uma quasipartícula. Ela surge em experimentos do efeito Hall quântico fracionário. Não precisamos saber o que significa esse efeito. Basta sabermos que há uma situação, na qual o elétron se comporta estranhamente, e esse comportamento pode ser atribuído a uma quasipartícula negativa com carga elétrica igual a uma fração da carga do elétron, e que não obedece a nenhuma das estatísticas conhecidas, daí porque o nome *ânion*. Férmions de Majorana surgem em supercondutores como essas quasipartículas, *ânions*. Depois de 1982, a literatura sobre *ânions* cresceu consideravelmente. Para uma abordagem formal, além do artigo de Wilczek, sugiro a leitura dos artigos de Stern [28] e Rao [29]. Um texto interessante, em linguagem de grande público, foi recentemente publicado por Andersen [30]. No início do seu artigo, Andersen (2023) faz uma imagem muito instrutiva:

Imagine que lhe mostrem dois objetos idênticos e, em seguida, pedem para você fechar os olhos. Ao abrir os olhos, você vê os mesmos dois objetos na mesma posição. Como você pode determinar se eles foram trocados? A intuição e as leis da mecânica quântica concordam: se os objetos são realmente idênticos, não há como saber.

⁶ Uma discussão detalhada dessa questão, em linguagem de grande público, é apresentada em [3].

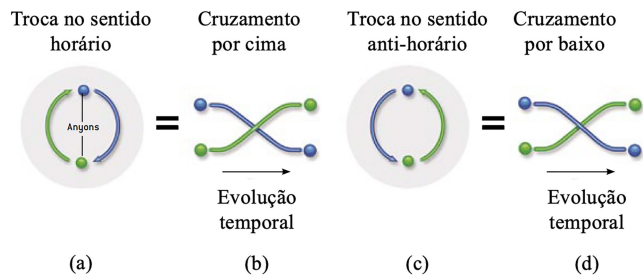


Figura 3: Representações pictóricas das interações entre ânions não-abelianos. Em (a) o ânion “verde” substitui o “azul” com um movimento no sentido horário, enquanto em (b) a troca é feita no sentido anti-horário. A troca em (a) resulta no cruzamento por cima (b), enquanto a troca em (c) resulta no cruzamento por baixo (d).

A mecânica quântica e a intuição correspondem à realidade quando se trata de objetos em nosso mundo tridimensional. No entanto, como já foi discutido em seções anteriores, quando os objetos estão em um espaço bidimensional a mecânica quântica mostra que a realidade é diferente, surgem os ânions descritos acima. Existem dois tipos de ânions: abelianos e não-abelianos. Os primeiros obedecem a uma estatística que varia continuamente entre a de Fermi-Dirac e a de Bose-Einstein. Essa é uma estatística abeliana, para a qual a ordem em que dois objetos são trocados de posição não importa. Por outro lado, a estatística para descrever os majorinos é do tipo não-abeliano. Neste caso, a ordem segundo a qual dois objetos são trocados de posição resulta em soluções diferentes. A Figura 3 ilustra essa situação. A troca no sentido horário resulta em uma função de onda diferente da troca no sentido anti-horário, como ilustra a figura. Quando a troca é feita no sentido horário, o cruzamento dos caminhos percorridos ao longo do tempo é dito por cima, tendo como referência o ânion “verde”, ao passo que a troca no sentido anti-horário resulta no cruzamento por baixo. Esses dois estados quânticos são representados por duas funções de onda diferentes. Veremos mais adiante que pares de ânions formam qubits.

O que foi dito nos três parágrafos anteriores representa uma imagem muito simplificada daquilo que resulta da teoria quântica de campos. No artigo em que Wilczek propõe o nome de ânion para a quasipartícula que surge quando uma partícula carregada orbita em torno de um fluxo magnético [27], ele calcula a função de onda de um par de ânions idênticos, em termos das coordenadas do centro de massa, R e θ e das coordenadas relativas, r e φ :

$$\Psi(R, \theta; r, \varphi + \pi) = e^{2\pi i \Delta s_a} \Psi(R, \theta; r, \varphi). \quad (9)$$

onde, s_a é o spin do ânion,

$$s_a = \text{inteiro} + \Delta + s, \quad (10)$$

onde s representa o spin da partícula que forma o ânion, sendo $\Delta = 0$ para bósons e $\Delta = 1/2$ para férmions.

Δ é o momento angular anômalo que depende do fluxo magnético em torno do qual gira a partícula.

3.5. Fases topológicas

Nas mais elementares disciplinas de ciências no ensino fundamental, aprendemos que a matéria pode ter três fases: gasosa, líquida e sólida. Em disciplinas mais avançadas aprendemos que existem muito mais do que essas três fases. No caso da água, essas três fases são visualmente perceptíveis. Materiais metálicos, como o ferro, costumam apresentar diferentes fases, dependendo das condições de temperatura e pressão. Essas fases ditas cristalográficas não podem ser visualizadas a olho nu. Há que se fazer uso de microscópios óticos ou eletrônicos, e algumas vezes de técnicas sofisticadas, como difração de raios-X. Em materiais semicondutores ou supercondutores, há casos em que nem mesmo microscópios eletrônicos e difração de raios-X permitem a visualização de algumas fases. Há que se fazer uso de difração de nêutrons, e de medidas magnéticas [3].

O problema fica bem mais complicado no caso de materiais em condições nas quais a física clássica é substituída pela física quântica. Ou seja, nas condições em que temos as fases quânticas. Nessas condições, o comportamento dos materiais pode ser descrito a partir da equação de Schrödinger, cuja solução fornece a função de onda que descreve o comportamento quântico do material:

$$H\psi = E\psi \quad (11)$$

Essa equação, representa a ação do operador hamiltoniano, H , sobre a função de onda de determinado estado quântico, cujo resultado é a determinação da energia, E , do estado quântico. Sabe-se que na solução da equação (11) há um termo, denominado fator de fase, que não altera a forma da função de onda [23, 31]. Por exemplo, se determinado sistema quântico evolui no tempo, desde o tempo zero até o tempo t , tem-se que

$$\psi(x, t) = e^{i\varphi} \psi(x - \omega t, 0), \quad (12)$$

onde, $e^{i\varphi}$ é o fator de fase.

Temos algo similar na física clássica. Uma onda não tem sua forma alterada quando há uma diferença de fase, como ilustra a Figura 4. As duas ondas coincidirão, se uma delas for deslocada, em relação à outra, pela diferença de fase θ .

Em 1984, Michael Berry [32] mostrou que a evolução temporal de qualquer sistema sujeito a um processo adiabático cíclico apresenta um fator de fase adicional. Ou seja,

$$\psi(x, t) = e^{i\Phi} e^{i\varphi} \psi(x - \omega t, 0) = e^{i(\Phi + \varphi)} \psi(x - \omega t, 0), \quad (13)$$

onde o termo Φ , que aparece no fator de fase adicional é atualmente denominado fase de Berry, ou fase topológica.

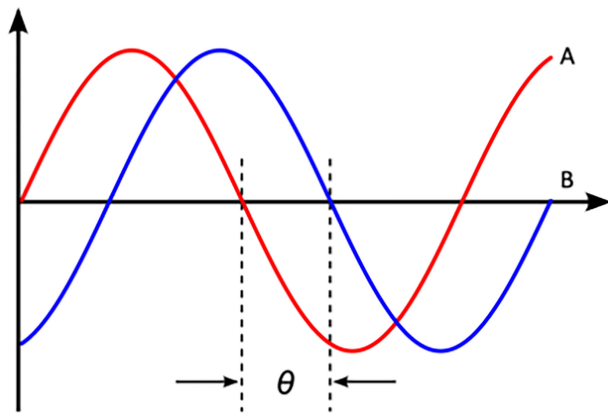


Figura 4: As ondas senoidais A e B são absolutamente idênticas, apesar da diferença de fase θ . Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_shift.svg.

Berry mostrou que essa fase geométrica possibilita explicações elegantes de vários fenômenos quantum-mecânicos em sistemas cujo ambiente é submetido a uma mudança cíclica [33]. O problema é que não há como visualizar as fases de Berry. Sua observação é realizada indiretamente, por meio de determinados comportamentos conhecidos como assinaturas da fase topológica. Mas, se sabe que essas fases aparecem em regiões de defeitos em alguns materiais. São os defeitos topológicos que surgem nas transições de fase. Não é uma coisa simples de explicar. Para se ter ideia da extensão temática, o GA recupera mais de 17 mil documentos com a sentença de busca “topological defect”. Trata-se de um tema antigo da matemática, que entrou para a física no início dos anos 1980, e rendeu o Nobel de Física de 2016 a David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane e J. Michael Kosterlitz.

A forma mais simples de ilustrar o que seja um defeito topológico vem da metalurgia. Por exemplo, o resfriamento de um material cristalino pode introduzir defeitos conhecidos como discordâncias, como ilustrado na Figura 5. Esse defeito surge, no caso da ilustração, porque o plano cristalino do meio foi interrompido. Por outro lado, sabe-se que precipitados (nitretos e carbetos, entre outros) que melhoram as propriedades mecânicas de aços são aprisionados nos defeitos topológicos ilustrados nessa figura. Esses defeitos topológicos em materiais metálicos podem ser observados com o auxílio de um microscópio eletrônico.

Como já foi mencionado, as fases topológicas surgem em defeitos topológicos, de modo similar aos precipitados nas proximidades das discordâncias. Em linguagem figurada, podemos dizer que as fases topológicas preferem se alojar nas proximidades de defeitos topológicos. A existência de fases topológicas é essencial para a emergência de férmions de Majorana em supercondutores topológicos. Férmions de Majorana formados em defeitos topológicos abrem as portas para a computação quântica mais segura. Veremos mais adiante por que esse dispositivo aumenta a segurança da computação.

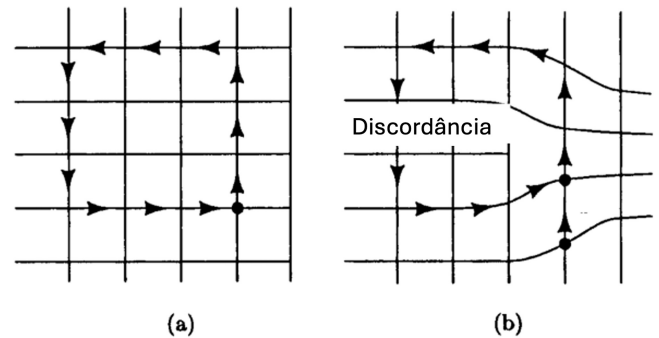


Figura 5: (a): Estrutura cristalina perfeita. (b): Estrutura cristalina com um defeito, conhecido como discordância. Trata-se de uma falha no plano central [34].

3.6. Modos zero de Majorana – MZM

Afirmar na introdução, que o primeiro trabalho a respeito do uso de férmions de Majorana em supercondutores foi apresentado por Kitaev em 2001 [10]. Essa é uma informação recorrente na literatura. No entanto, esse trabalho de Kitaev tem um significado mais importante do que o de ter introduzido férmions de Majorana desacoplados em fios quânticos. É nesse trabalho que nasce a ideia dos *modos zero de Majorana* (MZM) que a partir dali passou a ter posição de destaque na literatura pertinente. Para se ter ideia do impacto que esse trabalho de Kitaev teve, veja, na Figura 6, a evolução da quantidade de trabalhos recuperados pelo GA entre 2000 e 2025, para a sentença “Majorana zero modes”.

No dia 21.5.2025, o GA recuperou um total de mais de sete mil e quinhentos documentos para a referida sentença de busca. A literatura também cita, em menor frequência, a cadeia de Kitaev. Na mesma data acima, o GA recuperou aproximadamente três mil e quinhentos documentos com a sentença de busca “Kitaev chain”. Em suma, a cadeia de Kitaev consistindo de férmions

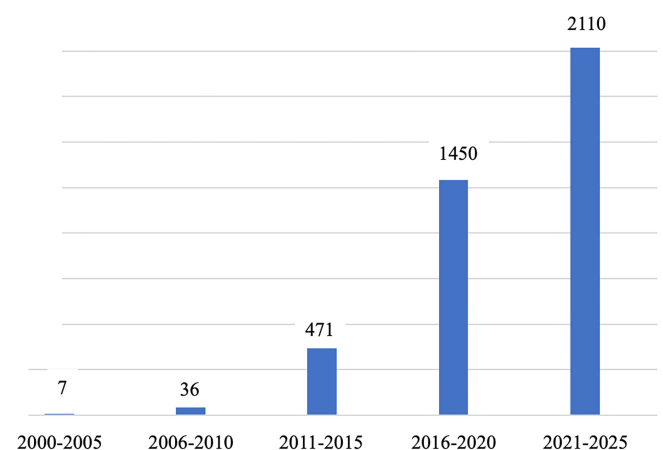


Figura 6: Evolução temporal da quantidade de artigos recuperados pelo Google Acadêmico para a sentença de busca “Majorana zero modes”, no período 2000–2025.

de Majorana no estado de energia zero é, atualmente, o principal mecanismo para a fabricação de computadores topológicos.

A subida quase exponencial a partir de 2010 não é por acaso. Entre 2008 e 2010, pesquisadores associados à *Station Q* da Microsoft (Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara, EUA), publicaram uma dezena de artigos, todos relacionados com férmions de Majorana em materiais supercondutores topológicos. No total, esses artigos receberam mais de oito mil citações. Como veremos mais adiante, esse empreendimento científico resultou no anúncio pela Microsoft, do primeiro chip quântico topológico. Para bem apreciar essa história, voltemos à apresentação do artigo seminal de Kitaev.

Kitaev analisa a seguinte situação: uma grande quantidade de sítios, vazios ou ocupados por um elétron com spin em uma direção fixa, formam uma cadeia linear. O hamiltoniano para esse sistema é:

$$H = \sum_j \left[-w \left(a_j^\dagger a_{j+1} + a_{j+1}^\dagger a_j \right) - \mu \left(a_j^\dagger a_j - \frac{1}{2} \right) + \Delta (a_j a_{j+1} + a_{j+1}^\dagger a_j^\dagger) \right], \quad (14)$$

Apresentar os cálculos realizados por Kitaev está fora do escopo deste artigo, mas, dada a sua importância para o desenvolvimento da computação quântica é instrutivo examinarmos algumas das suas conclusões [10, 35].

No hamiltoniano apresentado em (14), w é a amplitude do salto entre sítios vizinhos, μ é o potencial químico, Δ é o gap de estados supercondutores induzidos. $a_j^\dagger$ é o operador que cria um férmion, a_j é o operador que destrói o férmion. O termo $w(a_j^\dagger a_{j+1} + a_{j+1}^\dagger a_j)$ representa o salto de um férmion do sítio j para o sítio $j+1$. O termo $\mu(a_j^\dagger a_j - \frac{1}{2})$ controla o número de férmions no sistema.

Kitaev introduziu novos operadores, γ_j^A e γ_j^B , relacionados aos operadores $a_j^\dagger$ e a_j pelas seguintes relações:

$$a_j = \frac{1}{2} (\gamma_j^A + i\gamma_j^B), a_j^\dagger = \frac{1}{2} (\gamma_j^A - i\gamma_j^B). \quad (15)$$

Como $\gamma_j = \gamma_j^\dagger$, segue-se que γ_j^A e γ_j^B são operadores de Majorana. A partir dessas relações, é possível escrever o hamiltoniano em termos dos operadores de Majorana:

$$H = \sum_j \left[-\frac{i\mu}{2} \gamma_j^A \gamma_j^B + \frac{i}{2} (\omega_+ \gamma_j^B \gamma_{j+1}^A + \omega_- \gamma_j^A \gamma_{j+1}^B) \right], \quad (16)$$

sendo, $\omega_+ = \Delta + w$, e $\omega_- = \Delta - w$.

Os resultados obtidos a partir de (16) mostram que o surgimento dos modos zero de Majorana (MZM) dependem dos valores de μ , w e Δ , e que eles aparecem nas duas extremidades da cadeia, quando $|\mu| < 2w$. Agora temos conhecimento de todos os ingredientes para analisarmos os elementos básicos de uma plataforma de computação quântica topológica.

4. Computação Quântica

A característica mais importante de um chip topológico é que as quasipartículas se alojam nas proximidades dos defeitos topológicos. Se for possível preparar qubits com quasipartículas de Majorana no interior de defeitos topológicos, o tempo de coerência das informações quânticas crescerá consideravelmente. E o acesso a essas informações por um intruso é praticamente impossível, o que significa dizer que a quebra de criptografia fica praticamente impossível. Na medicina tem um fenômeno parecido. Quando uma bactéria consegue se encapsular, dificilmente os antibióticos conseguem atingi-la. Se a quasipartícula fosse uma bactéria, o defeito topológico seria seu encapsulamento.

Existem três tipos de computação eletrônica. O primeiro tipo é a Computação Eletrônica Clássica (CEC), baseada em materiais semicondutores, que geram sinais binários, “0” ou “1”. Esses sinais são conhecidos pelo nome bit. A corrente em um transistor é o exemplo mais simples do que seja um bit. Se o transistor deixa passar corrente podemos associar o efeito ao bit “1”. Se não passa corrente, teremos o bit “0”. Portanto, nesse exemplo simples, manipular bits consiste em controlar a corrente na saída de um transistor. Qualquer informação na computação clássica consiste em uma sequência de bits, zero e um. Ou seja, a linguagem é binária. Por exemplo, o número dois nessa linguagem é 10. O número 10 é 1010. O número 20 é 10100. A letra “a” é 01000001. Pode ser aparentemente trabalhosa, mas não é difícil quebrar a criptografia na computação clássica. Por exemplo, para descobrir uma palavra de dois dígitos basta fazer quatro tentativas: 00, 01, 10, 11. Para descobrir o número 10, já teremos que testar 16 alternativas. A regra geral é: para descobrir um número de n dígitos, formado com uma combinação de 0 e 1, devemos testar 2^n combinações. Na mão isso é muito trabalhoso, mas com um computador isso é fácil.

Os outros dois tipos de computação eletrônica pertencem à categoria da computação quântica: computação quântica que chamaremos de clássica (CQC), e computação quântica topológica (CQT).

4.1. Computação Quântica Clássica – CQC

Apresentações dessa computação, em nível de graduação em física, constam em artigos publicados na Ciência Hoje [36, 37]. Embora a discussão da CQC não faça parte dos objetivos deste artigo, é conveniente fazer uma breve introdução [38], uma vez que persistem dúvidas no grande público a respeito das diferenças entre CQC e CQT.

A CQC não tem na sua base de comunicação uma estrutura binária como na CEC. Em vez de ter dois bits, costuma-se dizer que a computação quântica pode ter “0” ou “1”, como na computação clássica, “0” e “1”, simultaneamente, ou uma mistura deles. São essas diferentes formas de juntar “0” e “1”, que dificultam, ou

impedem a quebra da criptografia. Neste caso, os sinais são conhecidos pelo nome qubit (*quantum bit*).

A CQC baseia-se em um comportamento quântico denominado emaranhamento, proposto por Schrödinger em 1935 [39], em resposta a um artigo de Einstein, Podolski e Rosen, publicado alguns meses antes [40]. Basicamente o fenômeno é assim. Quando dois sistemas quânticos (fótons, elétrons ou íons) são preparados de forma que haja interação entre eles, favorecendo a formação de um sistema composto, suas propriedades individuais deixam de ser independentes. As propriedades de um sistema dependem do outro. Por isso, esse sistema é dito entrelaçado ou emaranhado. Por exemplo, se afastarmos dois elétrons criados com spins orientados em sentidos contrários, a necessidade de que os spins apontem em sentidos opostos persistirá. Se, mais adiante, por algum mecanismo, alguém inverter o sentido do spin de um dos elétrons, o outro elétron também terá seu spin invertido.

O fato importante aqui, em termos tecnológicos, é que qualquer tentativa de observar ou medir o estado de um sistema quântico altera esse estado. Essa propriedade de entrelaçamento tem a ver com o comportamento estatístico dos sistemas quânticos, uma coisa com a qual Einstein não concordava e que o levou a publicar o artigo com Podolski e Rosen, e que ficou conhecido como Paradoxo EPR. O artigo também está na origem da sua famosa frase: “Deus não joga dados”. O caráter estatístico do comportamento quântico e a correlação entre as propriedades físicas (spin, polarização, entre outras) de dois sistemas entrelaçados são os fundamentos da comunicação quântica.

Uma dificuldade na CQC, é que os bits são facilmente destruídos pelo ambiente em que se encontram, incluindo aí oscilações térmicas. Tecnicamente isso é medido pelo tempo de coerência do qubit. Ou seja, em quanto tempo o qubit mantém sua integridade. Tudo indica que esse tipo de dificuldade será superado, ou consideravelmente reduzida, pela CQT.

4.2. Computação Quântica Topológica – CQT

É preciso ter em mente que três grandes tarefas devem ser executadas para colocar a CQC e a CQT em prática. A primeira delas é a elaboração de algoritmos e programas para a solução de problemas específicos. Uma vez definido, o algoritmo precisa ser programado para cada tipo de máquina. A segunda tarefa é preparar o sistema quântico que servirá como ferramenta para a solução do problema e, finalmente, a terceira é a construção da máquina. Recentemente, o portal *techtarget* selecionou 12 companhias responsáveis por uma ou mais dessas tarefas. Entre essas companhias encontram-se as populares Amazon, Google, IBM, Intel e Microsoft⁷.

⁷ <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/feature/Companies-building-quantum-computers>.

A CQT também é conhecida como computação quântica adiabática, porque o princípio físico que está por trás tem a ver com as fases topológicas discutidas acima, e que aparecem em processos adiabáticos. O chip Majorana 1 é do tipo adiabático, ou topológico, o que dá no mesmo. É aqui que os férmions de Majorana entram na história do chip topológico. Eles entram como um ânion não-abeliano. A definição de ânion não-abeliano já foi apresentada na seção 3.4.

Dado um par de ânions em um espaço bidimensional, um pode ficar girando em volta do outro, e a ordem em que esses giros ocorrem define funções de onda diferentes. Ou seja, definem objetos quânticos diferentes, como ilustra a Figura 3. Com a evolução temporal, esses movimentos formam uma espécie de trança (Figura 7a). Pares de ânions formam qubits. Ou seja, um ânion representado pelo ponto azul ao lado de um verde é um qubit. Na solução de um problema, o algoritmo faz com que um ânion de um qubit se misture com um ânion de outro qubit para produzir a resposta (Figura 7b). Veja que tem todo tipo de combinação. Azul com azul, verde com verde, e azul com verde. Para a concretização de tudo isso, três tarefas devem ser executadas.

A primeira tarefa é encontrar o lugar onde ficarão os qubits. Pelo que foi dito acima, você já deve estar imaginando corretamente: os lugares são os defeitos topológicos. A segunda tarefa é formar os qubits (Figura 7b), e a terceira tarefa é providenciar um detector de ânions, para ler esses qubits. Durante esse processo, eventualmente ocorre uma perturbação no sistema, e qubits intrusos são criados (ânions vermelhos na Figura 7c). Esses intrusos podem quebrar algumas tranças e provocar erros na resposta do sistema. O qubit vermelho na coluna à direita da Figura 7c representa um erro na solução. Tem como evitar isso. Basta criar pares

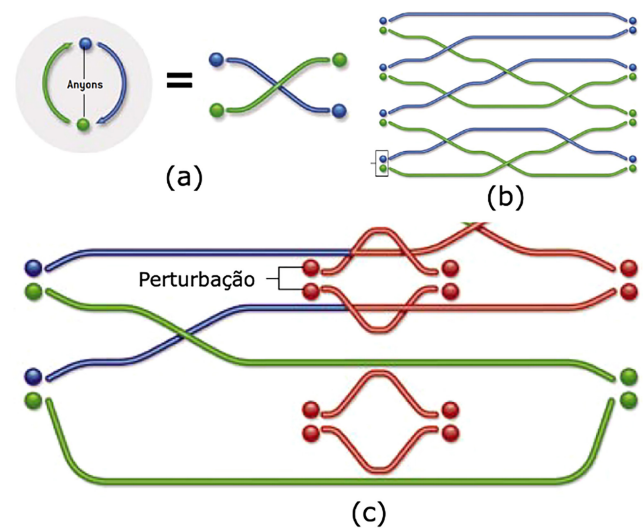


Figura 7: (a) Ânions e trança de ânions; (b) qubits e respostas da computação; (c) qubits perturbativos. Fonte: G. P. Collins, *Scientific American*, abril 2006, p. 57.

de ânions mais afastados, como ilustra a parte inferior da Figura 7c.

Como já foi dito, o espaço para criar ânions tem que ser bidimensional. Os melhores locais para se encontrar defeitos topológicos são materiais supercondutores. Os cientistas da Microsoft conseguiram isso usando uma camada nanométrica de alumínio, que é supercondutor em temperaturas próximas do zero absoluto, e uma camada do semicondutor arseneto de índio, que obriga elétrons a ficarem restritos ao espaço bidimensional da camada de alumínio. O sanduíche é completado com uma camada de um material metálico. Aí está o palco do Majorana 1, que foi montado na *Q Station* da Microsoft, criada em 2005 na Universidade da Califórnia, em Santa Bárbara (EUA), precisamente para construir computadores topológicos.

5. Comentários Finais

Não é simples, para o leitor não especializado no assunto, reconhecer e distinguir todas as facetas deste cenário, razão pela qual considero importante organizar o que foi narrado em uma espécie de contextualização histórica.

A computação eletrônica é fruto direto dos avanços da mecânica quântica a partir do início dos anos 1940. O primeiro computador comercial, Univac, foi lançado em 1951, pela empresa *Eckert-Mauchly Computer Corporation*. J. Presper Eckert e John Mauchly são os inventores do famoso ENIAC, construído durante a Segunda Guerra Mundial. Veja na Figura 8 o espaço enorme ocupado pelas instalações do Univac. Mais de 20 anos depois surgiu Altair, o primeiro computador de mesa, lançado em 1974 pela empresa *Micro Instrumentation and Telemetry Systems*. Na fotografia, o computador mesmo é apenas a caixa com painel escuro. O que se vê à direita é uma máquina de teletipo, que até meados dos anos 1980 foi usada em laboratórios de pesquisa com equipamentos informatizados. Popularmente conhecida como TTY, ela era um periférico de entrada e saída de dados. Os dados entravam e saíam por meio de uma fita de teletipo, e podiam ser impressos. Da fita de teletipo os dados eram enviados para o computador.

Dez anos depois do surgimento do Altair, a tecnologia de computação pessoal foi revolucionada com o Macintosh, o primeiro computador da Apple. Dois anos depois a IBM lança o primeiro computador pessoal compacto. Ainda não dava para colocar sobre as pernas, como os atuais *notebooks*, mas já era um equipamento com CPU e periféricos integrados em um único aparelho.

Ao longo das três primeiras décadas, a computação era uma atividade concentrada. Nas universidades tudo era feito nos centros de processamento de dados, os famosos CPD, que tiveram suas existências ameaçadas a partir de meados dos anos 1980, e são praticamente inexistentes hoje em dia. Havia grandes empresas, algumas estatais, ou mistas, como a SERPRO (Serviço Federal de Processamento de Dados) e a PROCERGS (Centro de

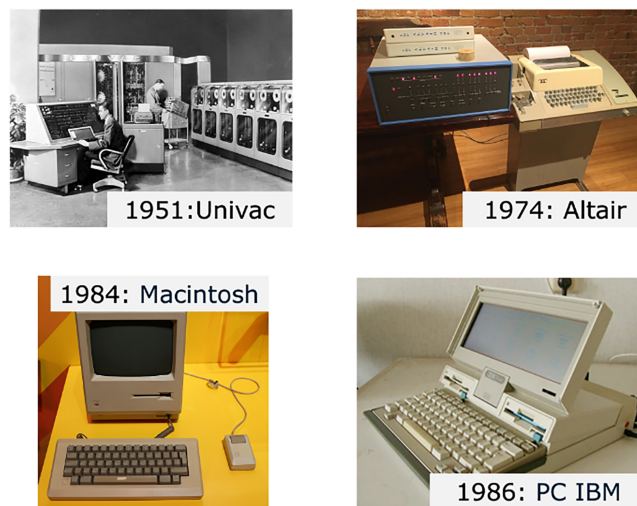


Figura 8: Linha do tempo dos principais computadores, até o surgimento do PC da IBM. Fontes: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Univac_I_Census_dedication.jpg; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altair_8800_and_Model_33_ASRT_Teletype.jpg; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apple_computers,_macintosh_128,_1984_\(fond._natal_e_cappellaro\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apple_computers,_macintosh_128,_1984_(fond._natal_e_cappellaro).jpg); <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ibm-convertible.jpg>.

Tecnologia da Informação e Comunicação do Estado do Rio Grande do Sul) que desempenhavam papel preponderante nos serviços de informática. As que existem nos dias de hoje atuam em segmentos muito restritos. Com o advento dos computadores pessoais, e sobretudo com a rede mundial de computadores (internet) o sistema de informática passou a ser largamente descentralizado. Com um computador de mesa podemos ter em casa um verdadeiro CPD.

Tudo indica que a computação quântica é uma volta às origens. Ninguém vai ter um computador quântico em casa. A rede de serviços de informática na era quântica será dominada por meia dúzia de grandes corporações.

O chip Majorana 1 cabe na palma de uma mão (excerto na Figura 9), mas as instalações para fazê-lo funcionar necessitam de uma sala de aproximadamente dez metros quadrados. Os equipamentos básicos são apresentados na Figura 9. Vejamos como tudo isso é feito.

Vários materiais foram testados por diversos grupos de pesquisa para a fabricação de chips topológicos. Neste artigo mencionei apenas o material usado no Majorana 1. A preparação desse tipo de material atualmente é corriqueira em milhares de laboratórios ao redor do mundo, incluindo alguns em universidades brasileiras, mas a aparelhagem é formidavelmente complexa, como mostra a Figura 9.

O funcionamento básico do chip é o seguinte. Em primeiro lugar, durante o funcionamento ele deve estar em uma temperatura próxima do zero absoluto, porque é nessa zona de temperatura que o elétron apresenta

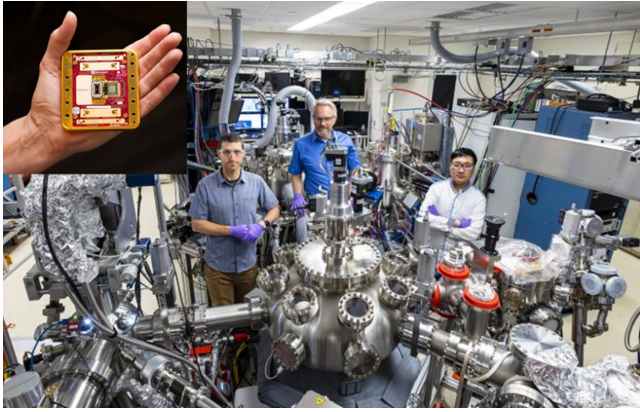


Figura 9: Chip Majorana 1 (no excerto). Foto de John Brecher para a Microsoft (<https://news.microsoft.com/source/la-tam/ia-pt-br/chip-majorana-1-da-microsoft-abre-um-no-vo-caminho-para-a-computacao-quantica/?lang=pt-br>). Instalações do *Oak Ridge National Laboratory* (EUA) para investigação de supercondutores para uso em computadores quânticos topológicos. A partir da esquerda: Matthew Brahlek, Robert Moore e Qiangsheng Lu (<https://www.ornl.gov/news/researchers-advance-topological-superconductors-quantum-computing>).

propriedades típicas de um ânion. Para ser mais preciso, isso acontece quando o dispositivo é submetido a uma temperatura de 1,2 K, e a um campo magnético em torno de um centésimo de Tesla, ou 10 militesla (10 mT). Atingir a temperatura próxima do zero absoluto não é tarefa simples. Poucos laboratórios estão habilitados para isso, mas o valor do campo magnético pode ser alcançado em qualquer laboratório que se dedica ao magnetismo. Para se ter ideia desse valor, basta lembrar que equipamentos de ressonância magnética podem criar campos que variam de 0,2 a 3 Tesla. Esse campo magnético pode ser considerado extremamente alto quando comparado ao campo na superfície terrestre, que varia de 25 a 65 microtesla. Enfim, o problema não é exatamente preparar o ambiente para a produção de ânions e a formação de qubits. O problema mesmo é conseguir detectar essas quasipartículas e os qubits.

No computador clássico, à base de semicondutores, a eletrônica é relativamente simples. Grosso modo podemos dizer que o sistema se baseia simplesmente na medida de corrente nas saídas de transistores. Se passa corrente, o registro marca 1, se não passa, marca 0. No computador topológico, há que se ter um detector que possa registrar qubits, consistindo em grupos de ânions. Na verdade, é necessário medir o estado quântico em que se encontram esses ânions depois da solução de um problema. Os detectores de ânions ainda estão em fase experimental, e não podem ficar a mais do que dois quilômetros da fonte emissora. Em distâncias superiores a essa o sinal perde a coerência e a quantidade de erros inviabiliza a transmissão. Ou seja, com a tecnologia atual nem pensar em uma rede mundial de computadores topológicos.

Agradecimentos

Agradecimento ao prof. Luiz Fernando Ziebell, do IF-UFRGS, pela cuidadosa revisão do texto original.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados apresentados nesse estudo está disponível na literatura citada.

Referências

- [1] Majorana desapareceu antes de ganhar o Nobel, *Tribuna do Norte*, Natal, 11 de maio de 2023.
- [2] O desaparecimento de Ettore Majorana: fatos e boatos, *Estadão: Estado da Arte*, São Paulo, 2 de outubro de 2024.
- [3] C.A. Santos, *Majorana: O oráculo da física contemporânea* (LF Editorial, São Paulo, 2024).
- [4] C.A. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **46**, e20240020 (2024).
- [5] C.A. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **46**, e20240093 (2024).
- [6] L. Sciascia, *Majorana Desapareceu* (Rocco, Rio de Janeiro, 1991).
- [7] J. Magueijo, *A Brilliant Darkness* (Basic Books, Nova York, 2009).
- [8] E. Klein, *En Cherchant Majorana: Le Physicien Absolu* (Flammarion, Paris, 2013).
- [9] A. Salam e J. Strathdee, *Physics Letters B* **51**, 353 (1974).
- [10] A.Y. Kitaev, *Physics-Uspekhi* **44**, 131 (2001).
- [11] E. Majorana, *Il Nuovo Cimento* **14**, 171 (1937).
- [12] C.A. Santos, *As exóticas quasipartículas*, disponível em: <https://cienciahoje.org.br/coluna/as-exoticas-quasipartículas/>.
- [13] A.S. Blum e C. Joas, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **53**, 1 (2016).
- [14] F. Wilczek, *Nature Physics* **5**, 614 (2009).
- [15] T.S. Chang, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **43**, 183 (1947).
- [16] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A* **117**, 610 (1928).
- [17] P.A.M. Dirac, *Proc. R. Soc. Lond. A* **126**, 360 (1930).
- [18] P.A.M. Dirac, em: *Prêmio Nobel* (Estocolmo, 1933).
- [19] P.B. Pal, *American Journal of Physics* **79**, 485 (2011).
- [20] H. Weyl, *Zeitschrift Für Physik* **56**, 330 (1929).
- [21] F. Wilczek, *International Journal of Modern Physics B* **5**, 1273 (1991).
- [22] D. Parrochia, arXiv:1907.11169 (2019).
- [23] E. Merzbacher, *Quantum Mechanics* (John Wiley, Nova York, 1970).
- [24] F. Wilczek, arXiv:1404.0637v1 (2014).
- [25] M. Sato e Y. Ando, *Report Progress in Physics* **80**, 076501 (2017).
- [26] J. Lee e F. Wilczek, *Physical Review Letters* **111**, 226402 (2013).
- [27] F. Wilczek, *Physical Review Letters* **49**, 957 (1982).

- [28] A. Stern, *Annals of Physics* **323**, 204 (2008).
- [29] S. Rao, em: *Topology and Condensed Matter Physics* (Springer Nature, Singapore, 2017).
- [30] T. Andersen e Y. Lensky, *The World's First Braiding of Non-Abelian Anyons*, disponível em: <https://research.google/blog/the-worlds-first-braiding-of-non-abelian-anyons/>.
- [31] A. Messiah, *Quantum Mechanics* (North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1961).
- [32] M.V. Berry, *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences* **392**, 45 (1984).
- [33] M. Berry, *Scientific American* **259**, 46 (1988).
- [34] R. Moessner e J.E. Moore, *Topological Phases of Matter* (Cambridge University Press, Cambridge, 2021).
- [35] R. Aguado, *La Rivista Del Nuovo Cimento* **40**, 523 (2017).
- [36] C.A. Santos, *Alice, Bob e a comunicação quântica*, disponível em: <https://cienciahoje.org.br/coluna/alice-bob-e-a-comunicacao-quantica/>.
- [37] C.A. Santos, *Será quântico o computador comprado pelo Google?*, disponível em: <https://cienciahoje.org.br/coluna/sera-quantico-o-computador-comprado-pelo-google/>.
- [38] G. Rigolin e A.A. Rieznik, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 517 (2005).
- [39] E. Schrödinger, *Die Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935).
- [40] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Physical Review* **47**, 777 (1935).