

# Férmions de Majorana e a computação quântica – aula 3/3

**Carlos Alberto dos Santos**

**Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física**

**UFERSA**

**[cas.ufrgs@gmail.com](mailto:cas.ufrgs@gmail.com)**

<http://pt.slideshare.net/casifufrgs/>

# A um passo do chip da Microsoft

A existência de fases topológicas é essencial para emergência de férmions de Majorana em supercondutores topológicos. Férmions de Majorana formados em defeitos topológicos abrem as portas para a computação quântica mais segura.



# Computador quântico topológico

## Férmions de Majorana

# Palavras exóticas e história mal contada

# Microsoft's invent Topoconductor Quantum Chip



## Quantum computing for faster enzyme discovery and engineering

[J Damborsky](#), [P Kouba](#), [J Sivic](#), [M Vasina](#), [D Bednar](#)... - Nature Catalysis, 2025 - nature.com

... In 2025, Microsoft revealed Majorana 1, a design of quantum chip expected to pave the way to a million qubits, thanks to the **topoconductor** technology based on creating and ...

☆ Salvar  Citar Artigos relacionados

# 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 °C) e sintonizado com campos magnéticos, formam nanofios supercondutores com modos de zero Majorana (MZMs) em suas extremidades.

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

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.

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

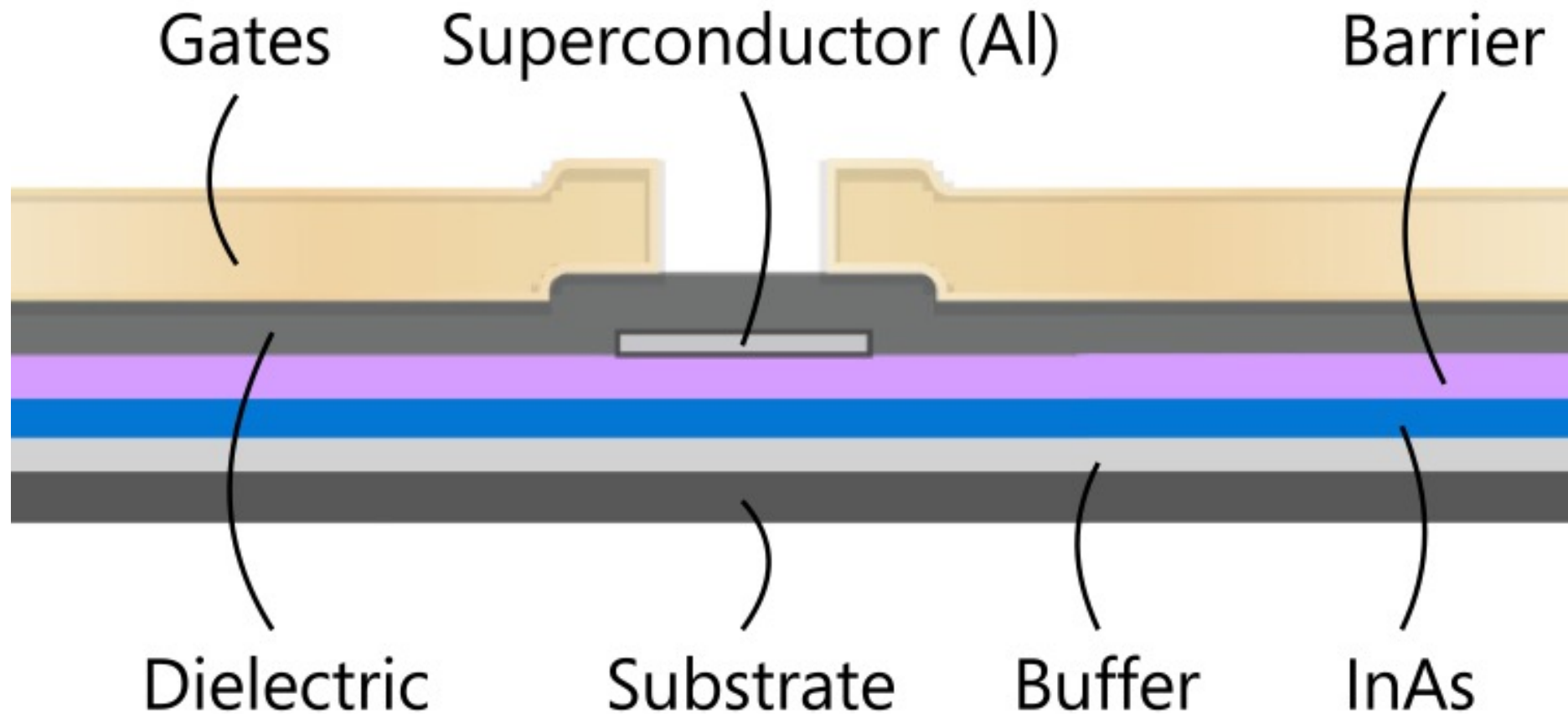
Sofia Bedeschi, 2 abr 2025, 11h28 (atualizado às 19h43): <https://www.terra.com.br/byte/a-microsoft-vem-trabalhando-ha-17-anos-em-seu-novo-e-empolgante-produto-um-computador-quantico-com-particulas-de-majorana,9bd88fbd10a0591a21ff5532ccc8789fnpr4tk7d.html>

## **InAs-Al hybrid devices passing the topological gap protocol**

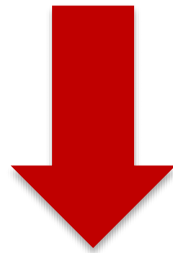
Morteza Aghaee *et al.*\*  
(Microsoft Quantum)

(Received 12 October 2022; revised 9 March 2023; accepted 10 May 2023; published 21 June 2023;  
corrected 29 March 2024)

We present measurements and simulations of  
**semiconductor-superconductor heterostructure**  
devices that are consistent with the observation of  
topological superconductivity and Majorana zero  
modes.



1984: fases de Berry



Primeiras digitais dos  
férmions de Majorana

# 2001: Cadeias de Kitaev



Primeira previsão da  
existência de férmions de  
Majorana em  
supercondutores

---

Unpaired Majorana fermions in quantum wires

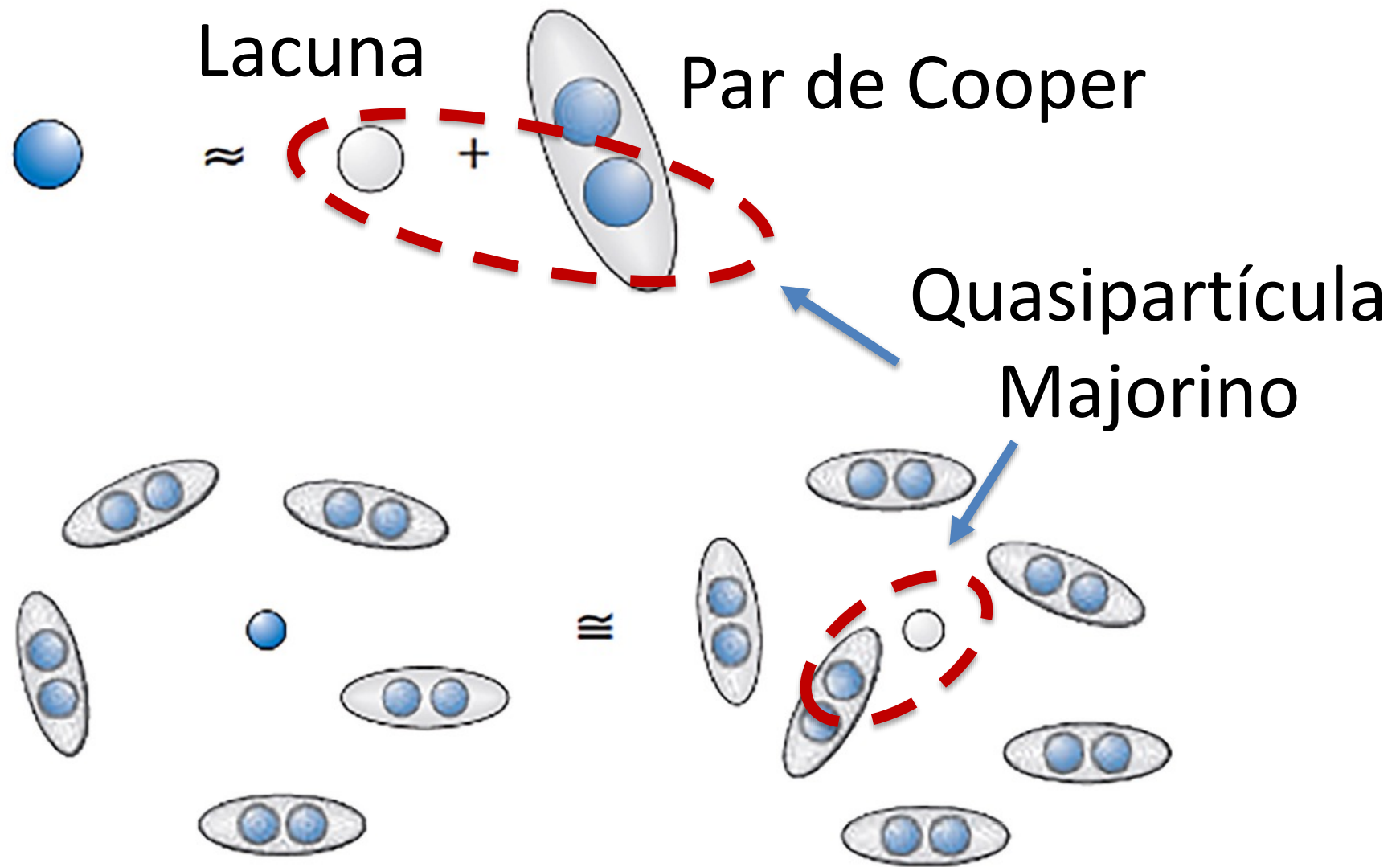
A Yu Kitaev

# Majorinos = Férmions de Majorana em supercondutores

Majorana and Condensed Matter Physics\*

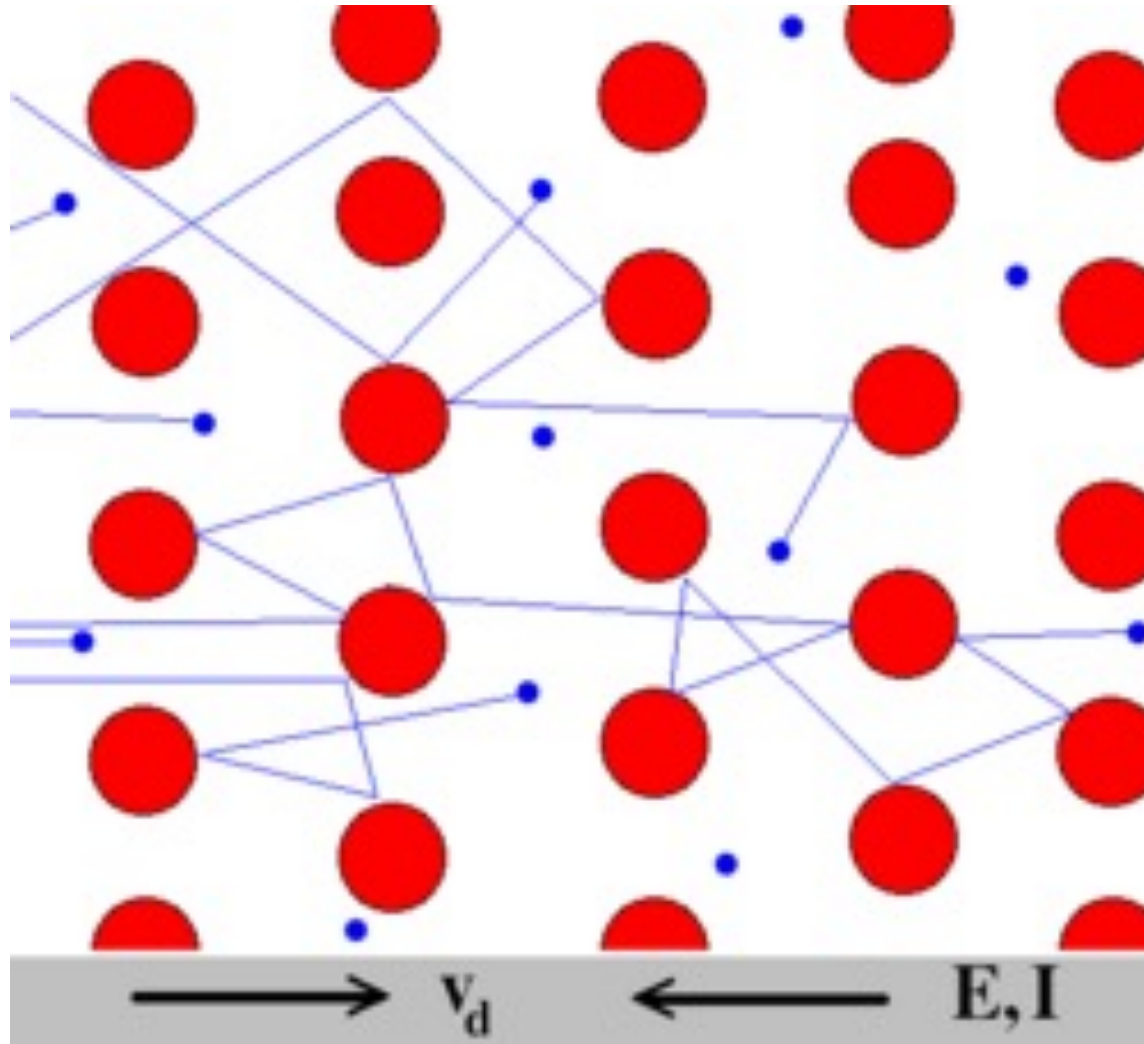
Frank Wilczek

April 3, 2014



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

# Quasipartícula? O que é isso?



Anos 1950  
Problemas de  
muitos corpos

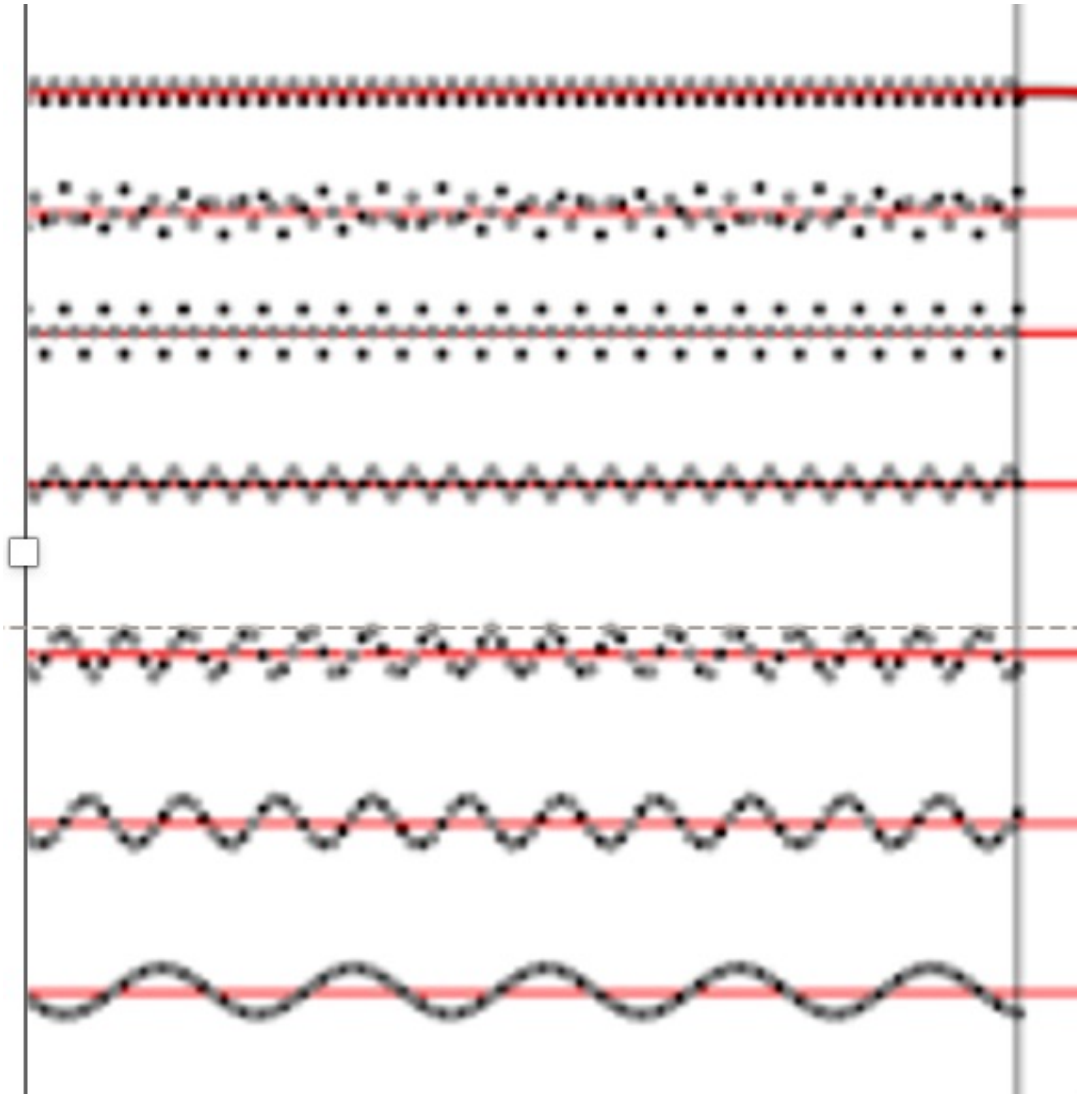
$$F = m_{efetiva} a$$



Elétron como  
quasipartícula

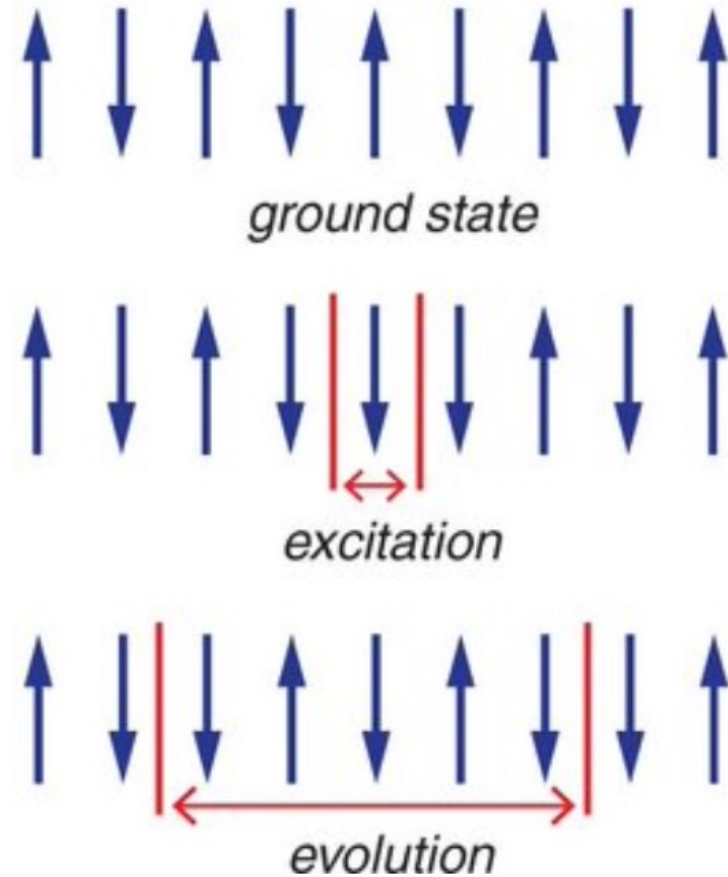
O conceito foi generalizado para representar outras circunstâncias em problemas de muitos corpos, onde surgem excitações coletivas. Por exemplo, um material em estado sólido tem seus átomos aproximadamente fixos em determinados pontos da estrutura cristalina. Dependendo de uma ação externa os átomos podem vibrar coletivamente. Essa vibração coletiva é o fónon

# Fónons



# Mágnons

Antiferromagnetic



## InAs-Al hybrid devices passing the topological gap protocol

Morteza Aghaee *et al.*\*  
(Microsoft Quantum)

(Received 12 October 2022; revised 9 March 2023; accepted 10 May 2023; published 21 June 2023;  
corrected 29 March 2024)

$$\begin{aligned} H &= H_{\text{SM}} + \Delta_{\text{ind}} O_{\text{SC}}, \\ H_{\text{SM}} &= \int_0^L dx \psi_{\sigma}^{\dagger}(x) \left( -\frac{\partial_x^2}{2m^*} - \mu + i\alpha \hat{\sigma}_y \partial_x + V_x \hat{\sigma}_x \right)_{\sigma\sigma'} \psi_{\sigma'}(x), \\ O_{\text{SC}} &= \int_0^L dx (\psi_{\uparrow}^{\dagger}(x) \psi_{\downarrow}^{\dagger}(x) + \text{H.c.}). \end{aligned} \tag{1}$$

# Frank Wilczek

## Facts

---



Frank Wilczek

Nobel Prize in Physics 2004

Born: 15 May 1951, New York, NY, USA

Affiliation at the time of the award: Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA

Prize motivation: “for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction”

# ANYONS

VOLUME 48, NUMBER 17

PHYSICAL REVIEW LETTERS

26 APRIL 1982

---

## **Magnetic Flux, Angular Momentum, and Statistics**

Frank Wilczek

*Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, California 93106*

(Received 8 January 1982)

Tem a digital, mas não tem o  
certificado de nascimento do ANYON

**CERTIFICADO DE NASCIMENTO DO ANYON**

**PHYSICAL REVIEW  
LETTERS**

---

---

VOLUME 49

4 OCTOBER 1982

NUMBER 14

---

---

**Quantum Mechanics of Fractional-Spin Particles**

Frank Wilczek

*Institute for Theoretical Physics, University of California, Santa Barbara, California 93106*

(Received 22 June 1982)

# CERTIFICADO DE NASCIMENTO DO ANYON

In a recent note I showed that charged particles orbiting around magnetic flux tubes . . .  
this phenomenon is realized for example in the vortices of a type-II superconductor . . .  
If there is a generalized spin-statistics connection, we must expect that the flux-tube-particle composites have unusual statistics, interpolating between bosons and fermions. Since interchange of two of these particles can give any phase, I will call them generically **anyons**.

# BIOGRAFIA DO JOVEM ANYON

International Journal of Modern Physics B, Vol. 5, No. 9 (1991) 1273–1312  
© World Scientific Publishing Company

## STATES OF ANYON MATTER\*

FRANK WILCZEK<sup>†</sup>

*School of Natural Sciences, Institute for Advanced Study, Princeton, NJ 08540, USA*

Received 4 March 1991

## BIOGRAFIA DO JOVEM ANYON

In two spatial dimensions, there are new possibilities for quantum statistics, that interpolate continuously between bosons and fermions. Particles carrying these generalized statistics, are called generically **anyons**.

Imagine particles carrying a charge  $q$  and magnetic flux . . .

# CERTIDÃO DE NASCIMENTO DO MAJORINO

PRL **111**, 226402 (2013)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
27 NOVEMBER 2013

## Algebra of Majorana Doubling

Jaehoon Lee and Frank Wilczek

*Center for Theoretical Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA*

(Received 20 August 2013; published 27 November 2013)

No próximo artigo (2014), Wilczek diz  
que cunhou a palavra **majorino** aqui,  
mas ele se enganou.

# CERTIDÃO DE NASCIMENTO DO MAJORINO

## Majorana and Condensed Matter Physics\*

Frank Wilczek

April 3, 2014

\*Chapter for “The Physics of Majorana”, to be published by Cambridge University Press.

A very special and unusual kind of Majorana fermion has been the focus of much recent attention, both theoretical and experimental.

These are zero energy excitations that are localized around specific points, such as the ends of wires, or nodes within circuits of specially designed superconducting materials.

They have zero mass. Since they are so small both in extent and in weight, I have proposed [2013] to call them Majorinos.

Majorinos have remarkable properties, including unusual quantum statistics, and might afford an important platform for quantum information processing.

## ANYONS & MAJORINOS

Férmions de Majorana (majorinos)  
surgem em supercondutores como  
anyons

Como, se majorinos são  
neutros e anyons são  
eletricamente carregados?

## ANYONS NEUTROS: WILCZEK (1991)

Another perspective on the superfluidity of the neutral anyon gas, which becomes superconductivity if the anyons are charged

## ANYONS

1. Carga fracionária ou neutro;
2. Estatística abeliana ou não abeliana;
3. Na CQT anyons não abelianos são mais poderosos do que os abelianos.

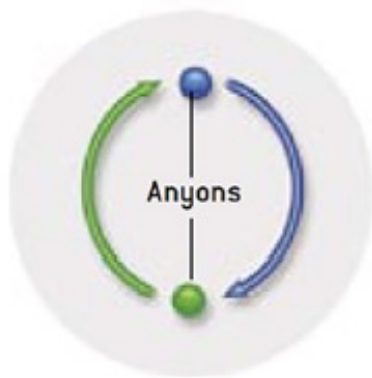
## MAJORINOS

1. Neutros;
2. Estatística não abeliana;

Todo majorino é um anyon, mas nem todo anyon é um majorino

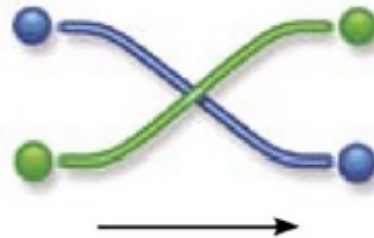
A ordem segundo a qual dois objetos são trocados de posição resulta em soluções diferentes

Troca no sentido  
horário



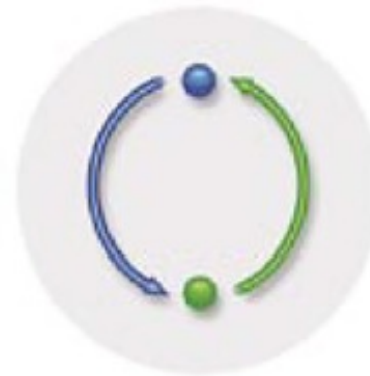
=

Cruzamento  
por cima



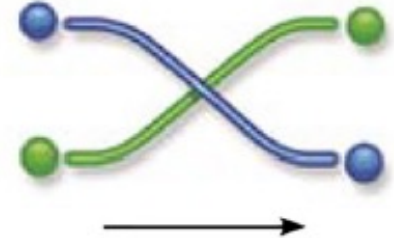
→  
Evolução  
temporal

Troca no sentido  
anti-horário



=

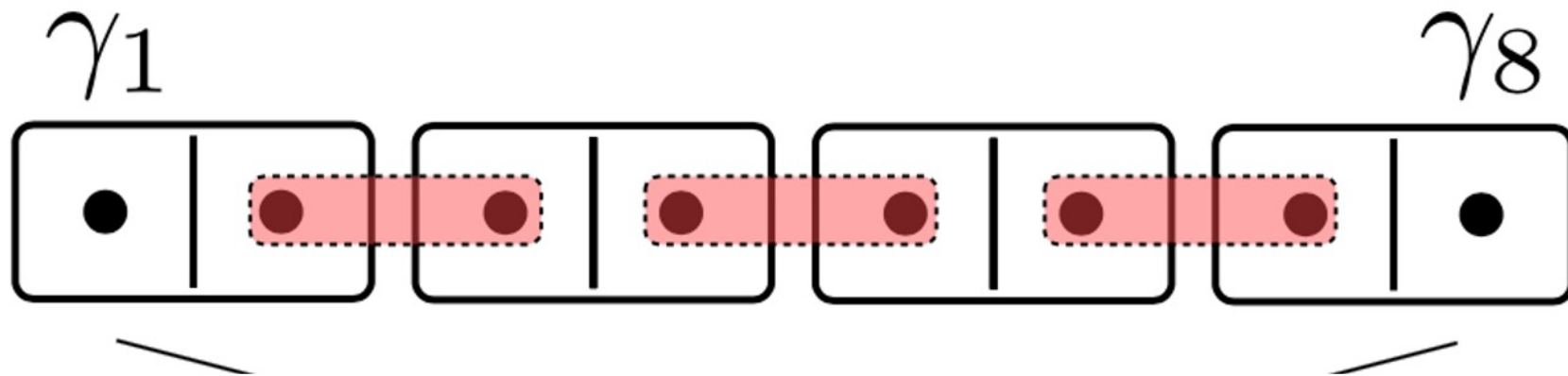
Cruzamento  
por baixo



→  
Evolução  
temporal

Esses dois estados quânticos são representados por duas funções de onda diferentes. Pares de anyons formam qubits.

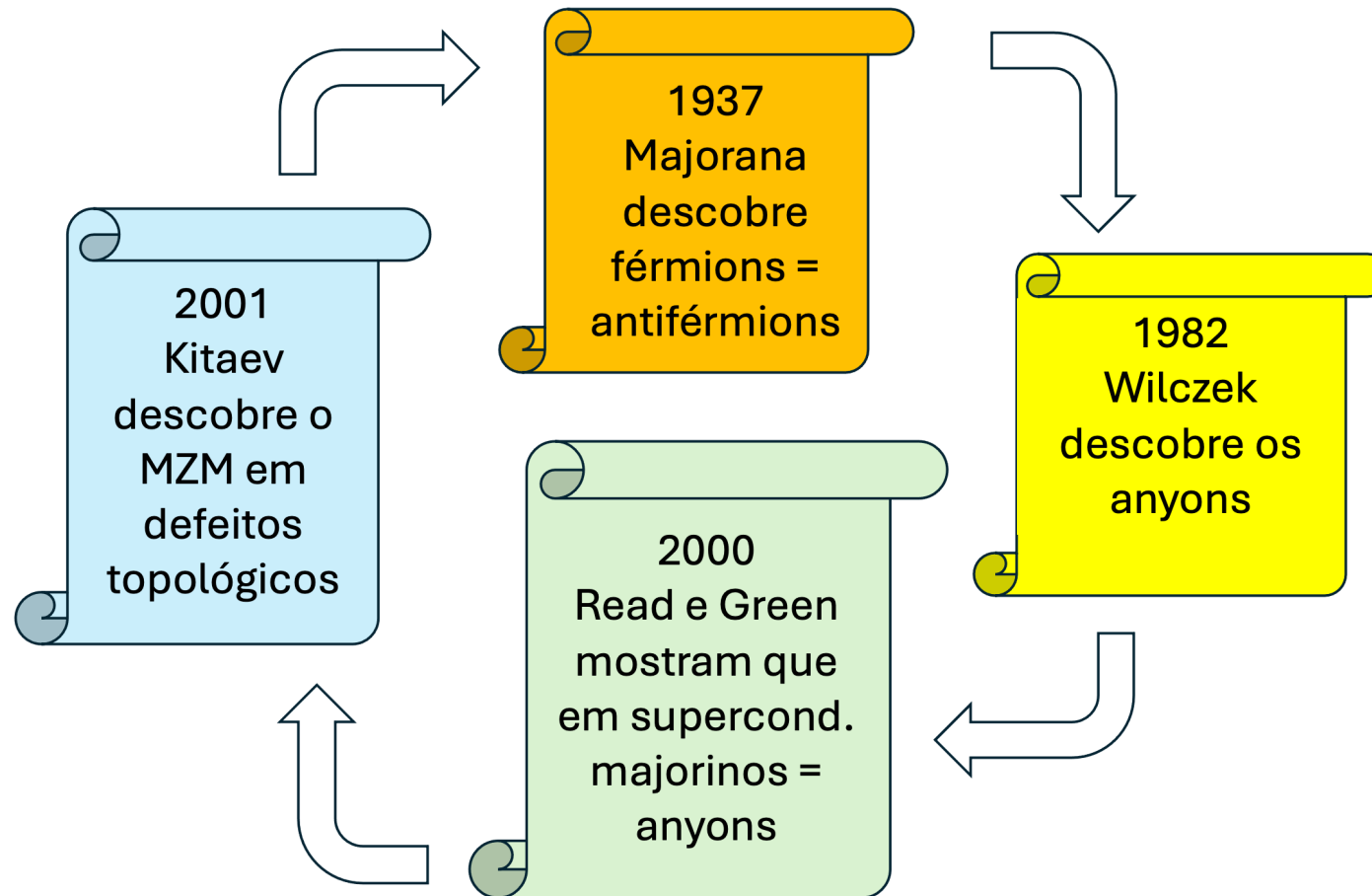
## MODO ZERO DE MAJORANA (MZM): KITAEV (2001)



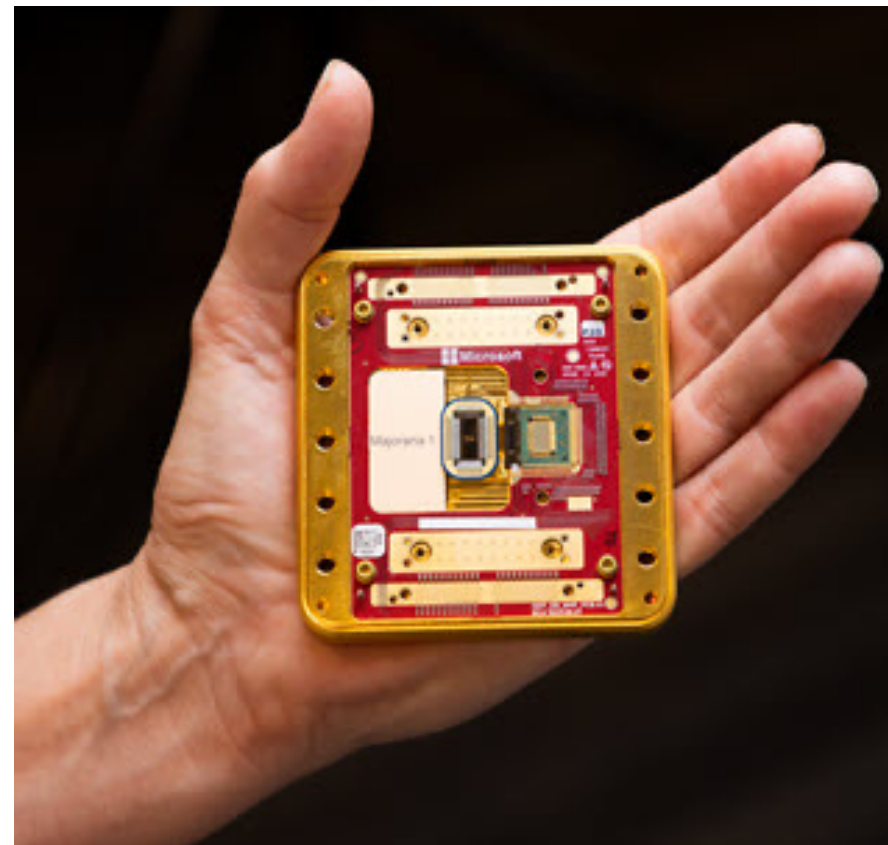
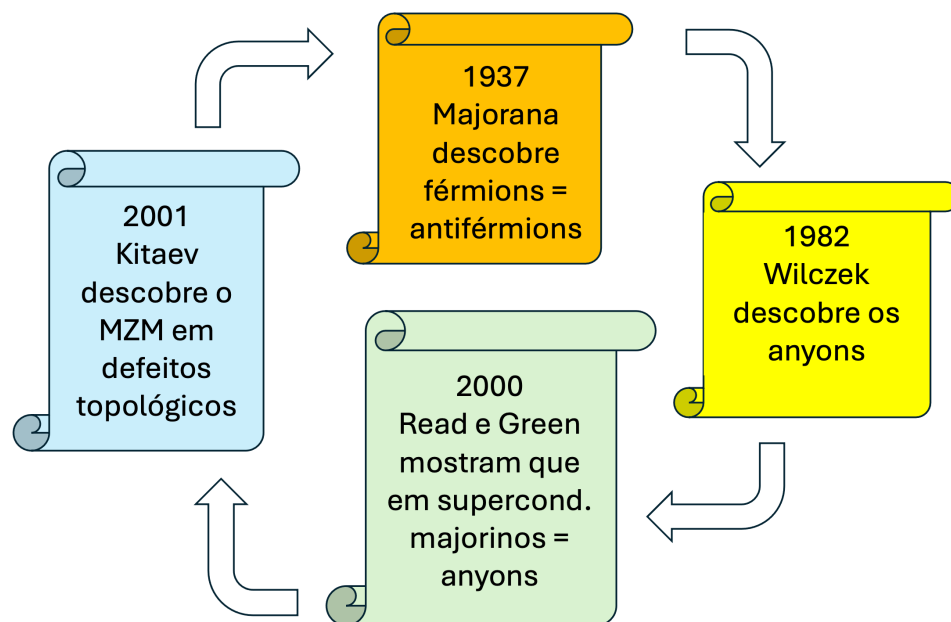
Modos de  
Majorana desemparelhados

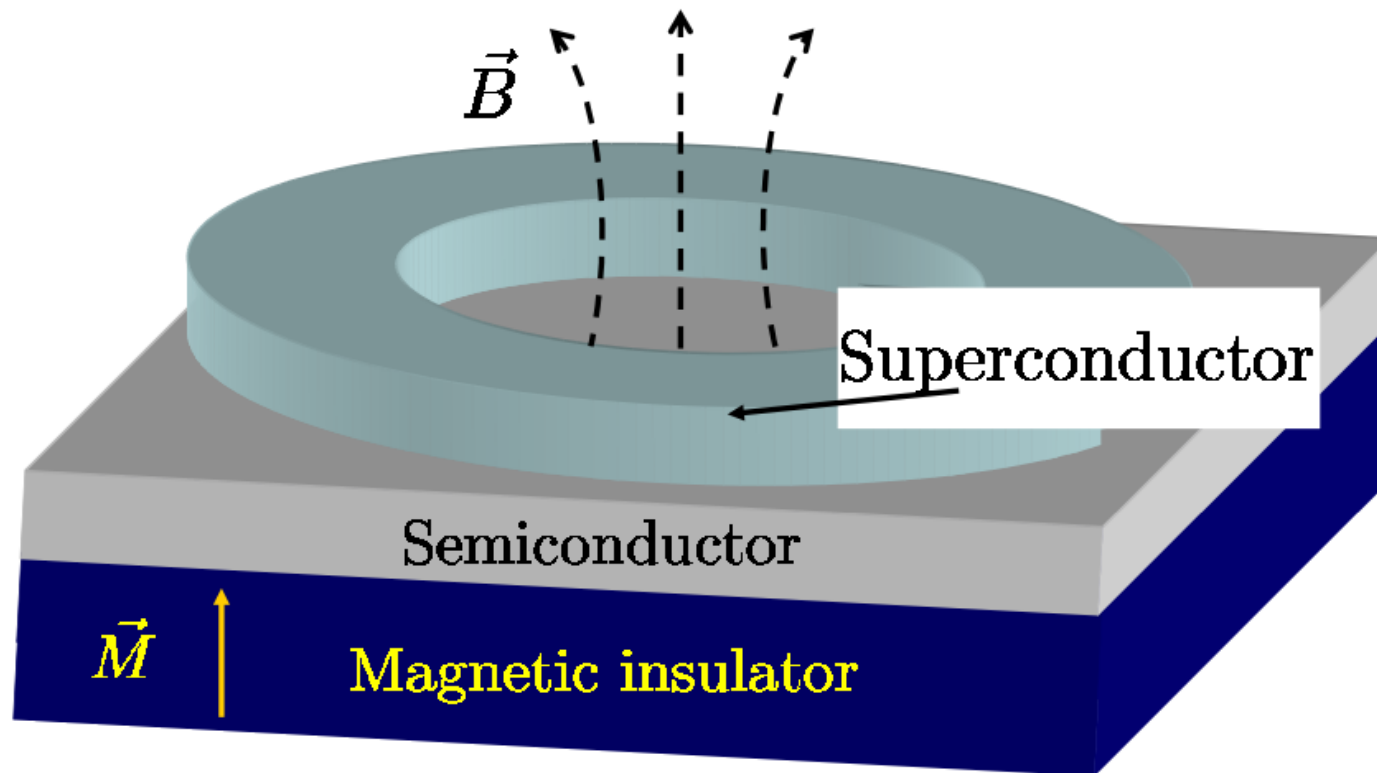
$\gamma_1$  e  $\gamma_8$  são dois MZM, que aparecem como anyons não-abelianos e interagem formando tranças.

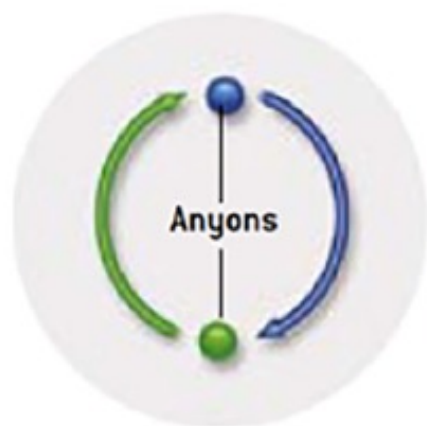
# Até aqui a história é assim



ENTÃO . . .





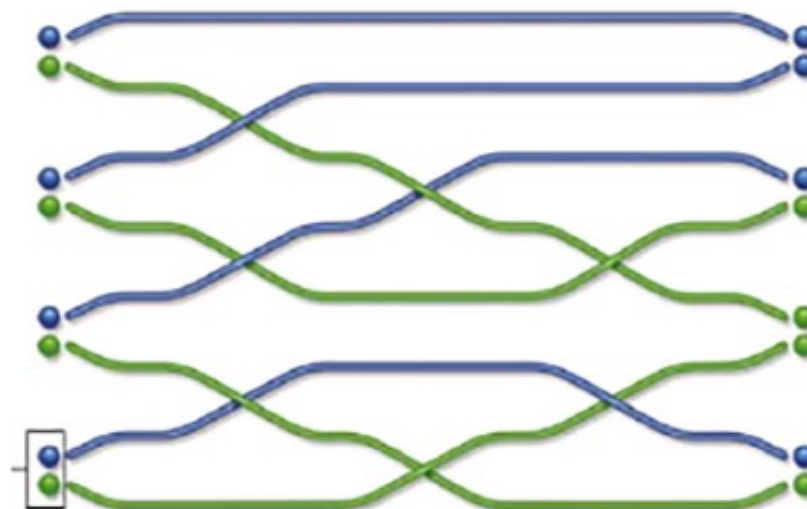


=

(a)



qubits código resposta

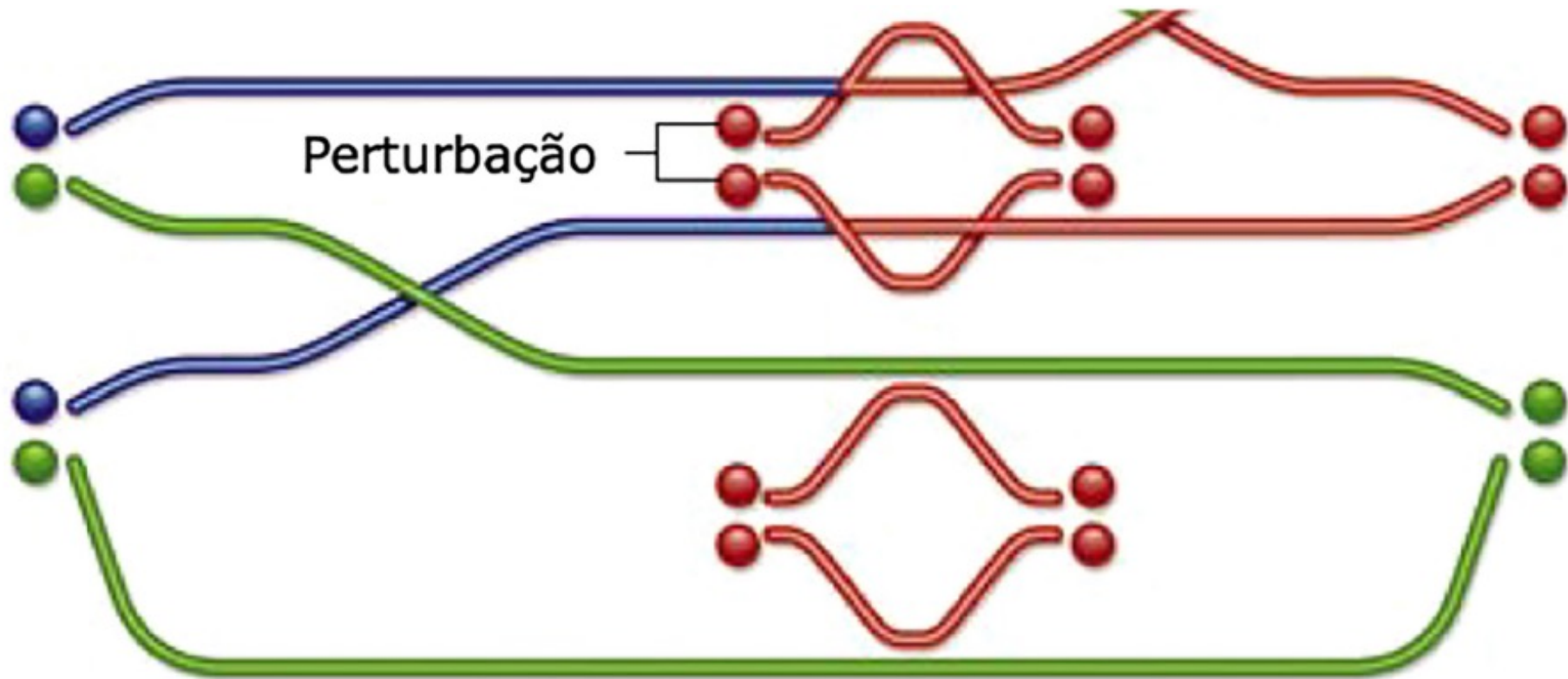


(b)

qubits

código

resposta



Não vamos ter um computador desse em casa.  
Compraremos serviços de meia-dúzia de grandes indústrias:

1. Durante o funcionamento o chip deve estar em uma temperatura próxima do zero absoluto, porque é nessa zona de temperatura que o anyon se manifesta.
2. O material deve estar imerso em um campo magnético de 10 mT.
3. É necessário ter sensores sofisticados para observação dos anyons e dos qubits.

# Estação Q da Microsoft: Universidade da Califórnia (Santa Barbara)

