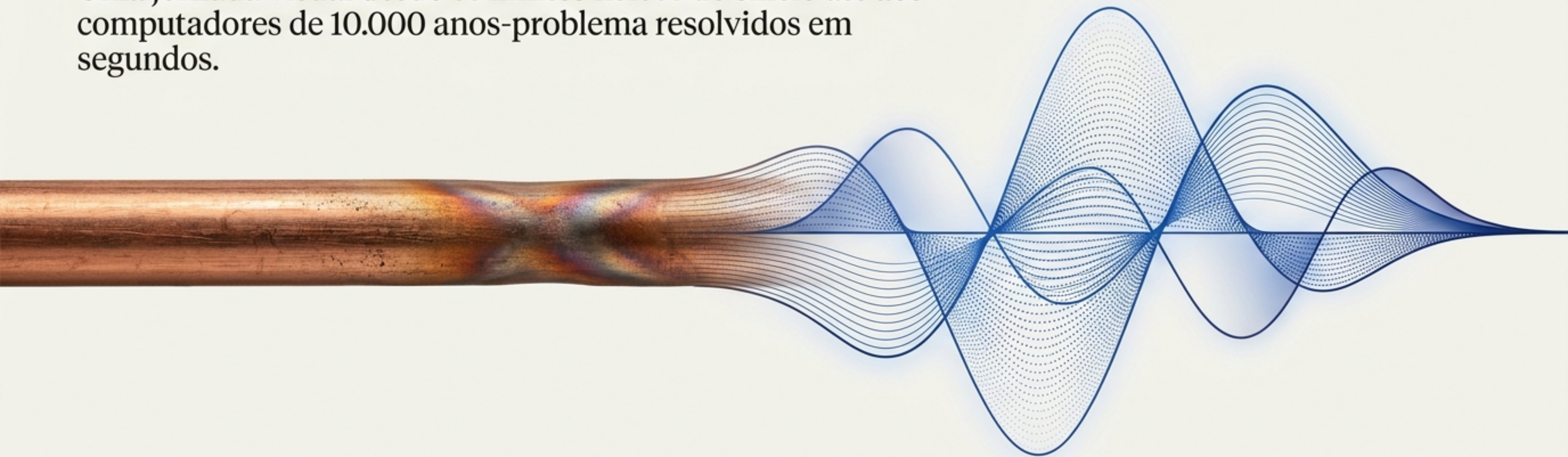


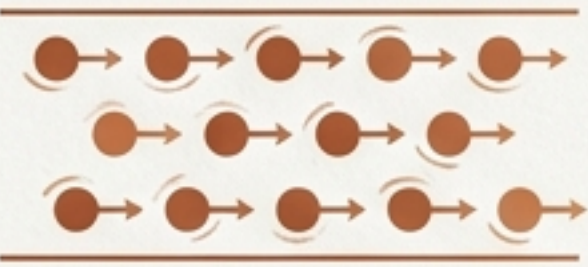
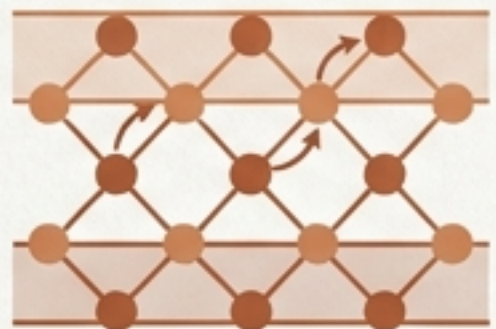
Além da resistência: a evolução da condução elétrica até à supremacia quântica

Uma jornada visual desde os limites físicos do silício até aos computadores de 10.000 anos-problema resolvidos em segundos.



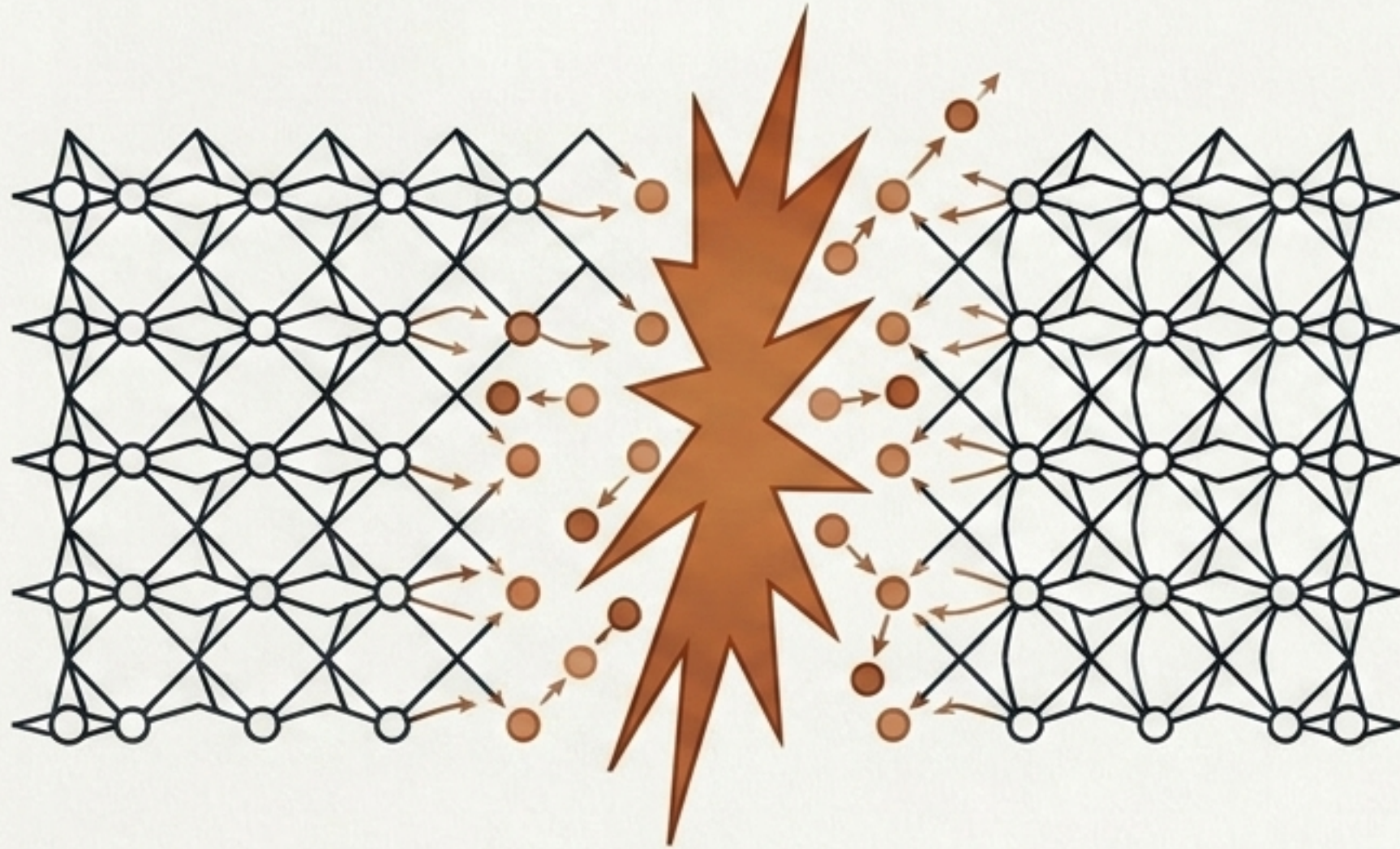
O Espectro da Condução

O espectro clássico da condução dita as regras do design eletrónico tradicional

Condutores (ex: Cobre)	Semicondutores (ex: Silício puro, Óxidos de Cobre)	Isoladores (ex: Teflon, SiO ₂)
- Resistividade: $1,68 \times 10^{-8} \Omega.m$  - Piora com o calor (ex: lâmpada de tungsténio a 2000° tem 10x mais resistência).	- Resistividade: $6,4 \times 10^4 \Omega.m$ (Si)  - Melhora com o calor (resistência diminui 10x entre 25° e 100°).	- Resistividade: $10^{21} \Omega.m$ (Teflon) a $10^{18} \Omega.m$ (SiO₂)  - Bloqueia a corrente.

A manipulação destas propriedades fundamentais permitiu a criação dos primeiros díodos retificadores de óxido cuproso (Grondahl, 1920) e do isolamento perfeito em microeletrónica.

A disrupção dielétrica destrói fisicamente a barreira isoladora sob campos elétricos extremos



Ar Seco:

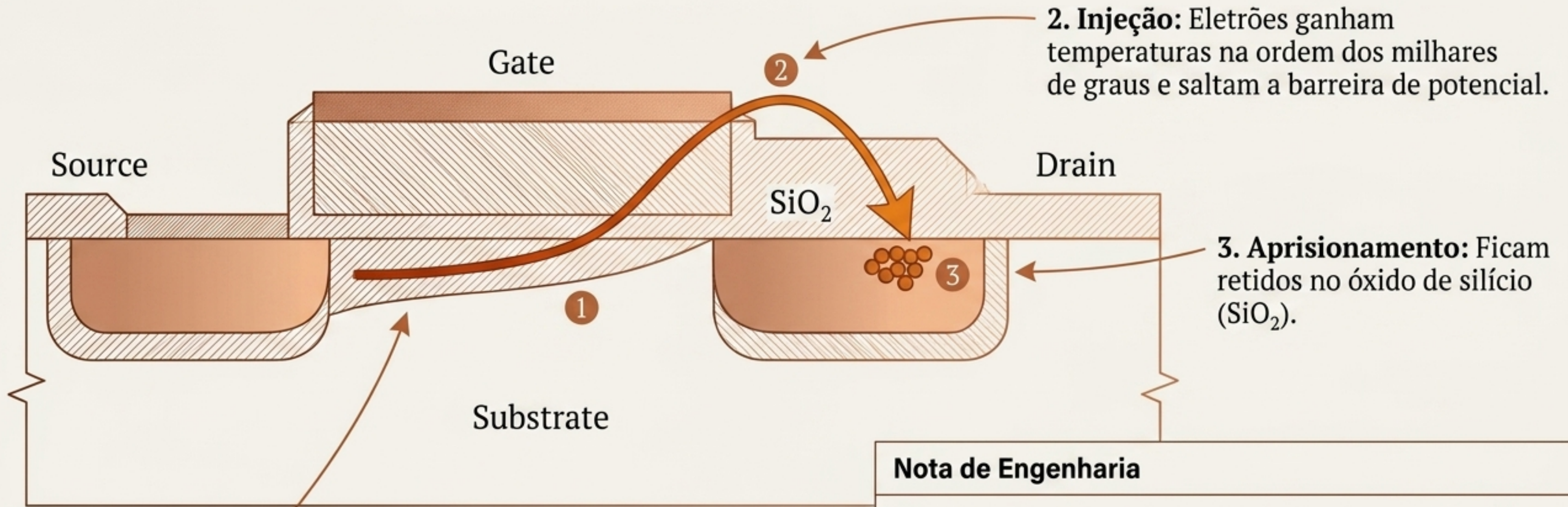
Rigidez dielétrica de
3 kV/mm.

Teflon (PTFE):

Rigidez dielétrica de
20 a 200 kV/mm.

Um processo clássico, destrutivo e regenerativo, resultando em arcos elétricos, plasmas ou motores iônicos, mas fatal para a microeletrônica.

A injeção de elétrons quentes degrada irreversivelmente os processadores de silício modernos



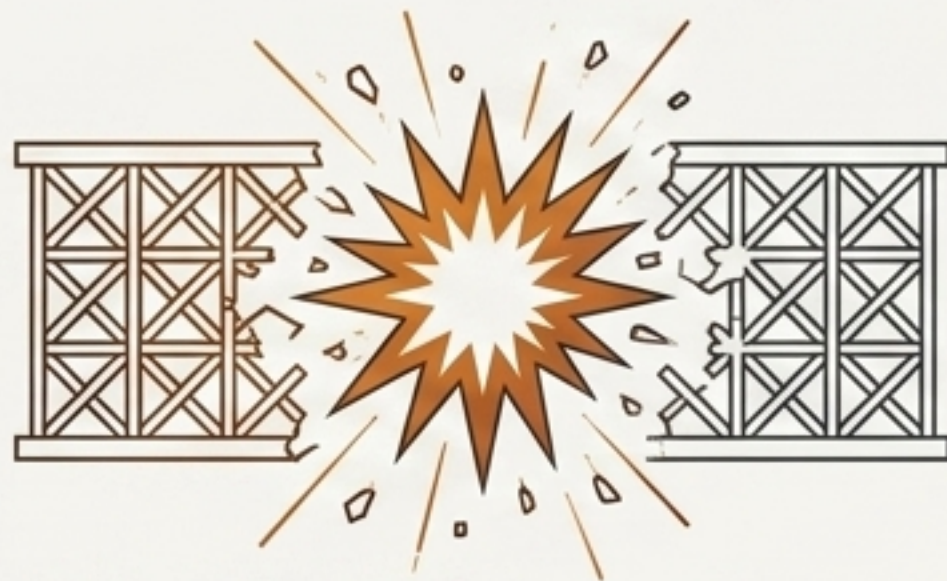
Nota de Engenharia

O aprisionamento altera permanentemente a tensão de limiar do transistor (degradação cumulativa temporal). Ao contrário efeito reversível da BTI (*Bias Temperature Instability*), a HCI causa danos permanentes, obrigando ao uso de designs mitigadores como estruturas LDD (*Lightly Doped Drain*).

Síntese: As três formas físicas de atravessar uma barreira isoladora intransponível

A Fronteira do Impossível

1. Disrupção (Força Bruta)

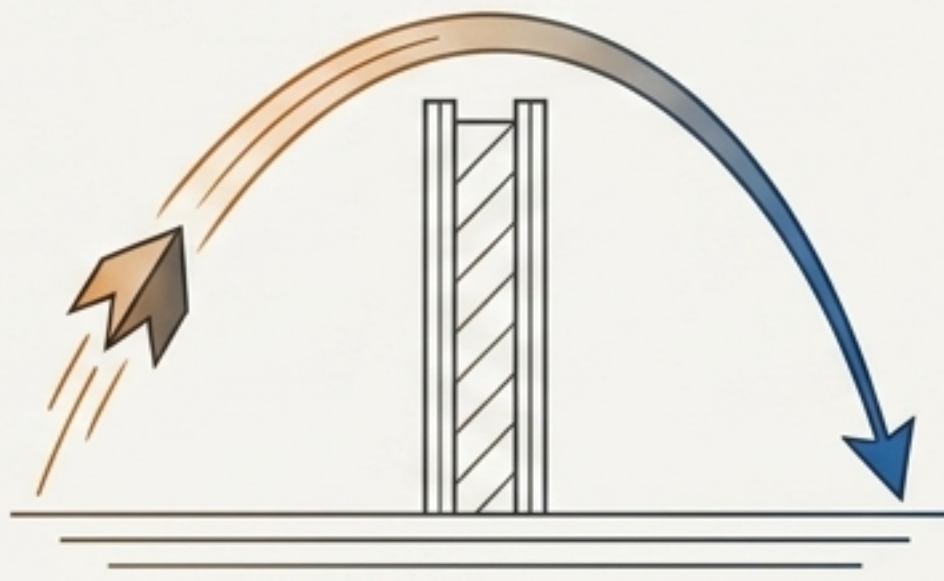


Mecanismo: Quebra de ligações atômicas.

Impacto: Destrutivo (Arcos elétricos).

Domínio: Física Clássica.

2. HCI (Energia Cinética)

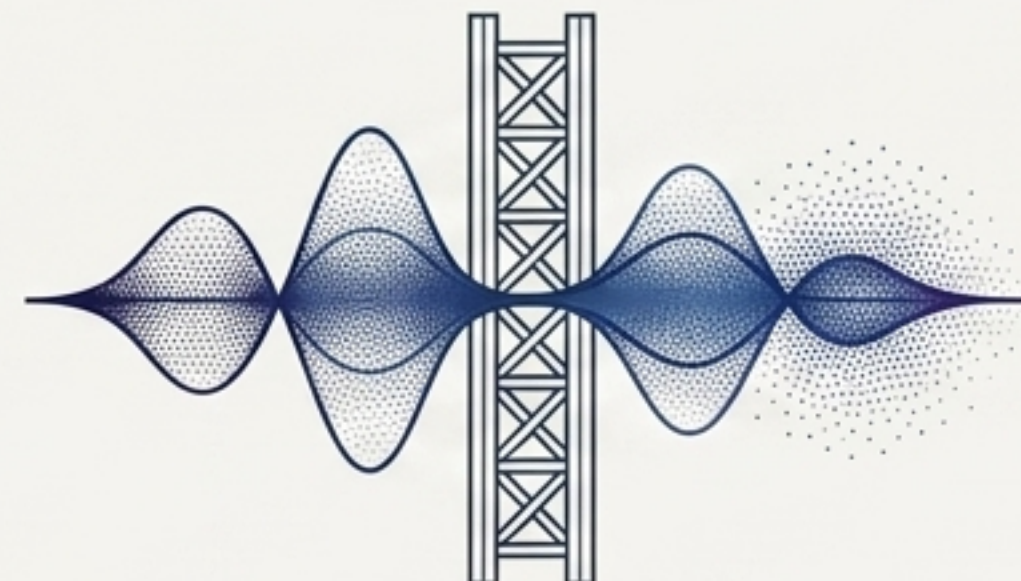


Mecanismo: Ganho de energia cinética extrema.

Impacto: Degradação temporal irreversível.

Domínio: Semicondutores clássicos.

3. Tunelamento (Probabilidade)



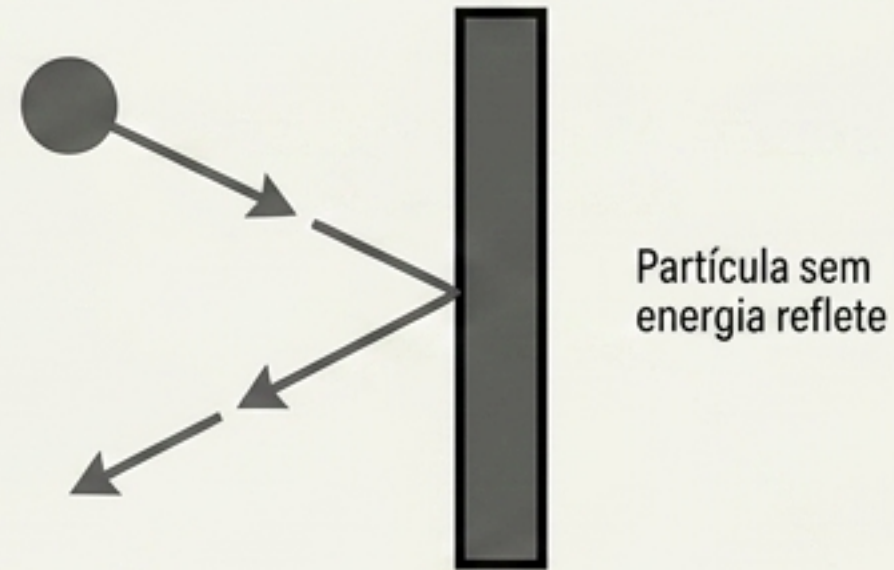
Mecanismo: Dualidade onda-partícula (sem energia suficiente para saltar).

Impacto: Base da computação quântica e STM.

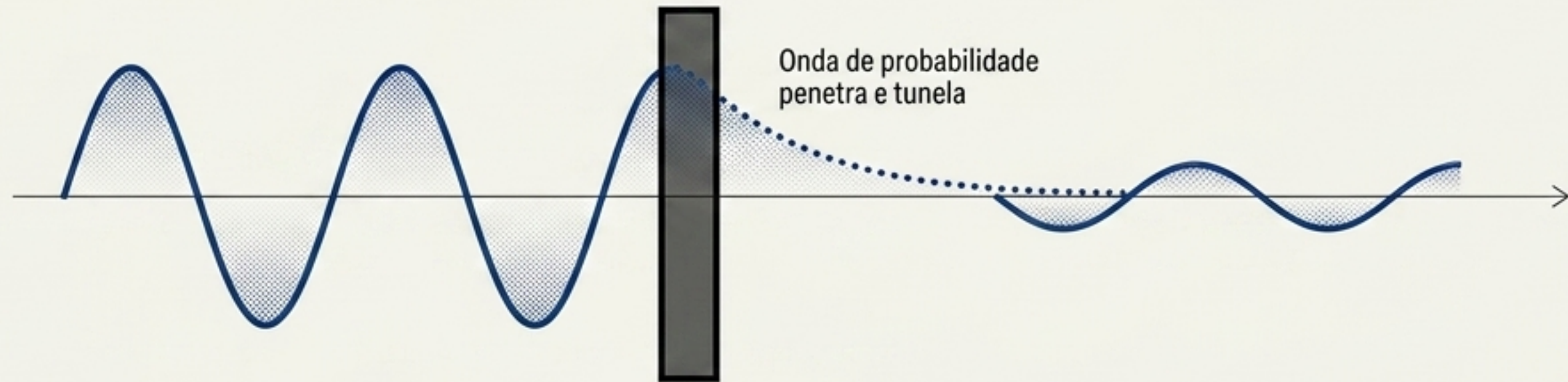
Domínio: Mecânica Quântica.

A anomalia quântica revela que os elétrons atravessam barreiras como ondas de probabilidade

Física Clássica:
Energia insuficiente



Física Quântica:
Função de onda
probabilística



1900: Planck
(Pacotes/Quanta).

1905: Einstein
(Fotões provam energia discreta).

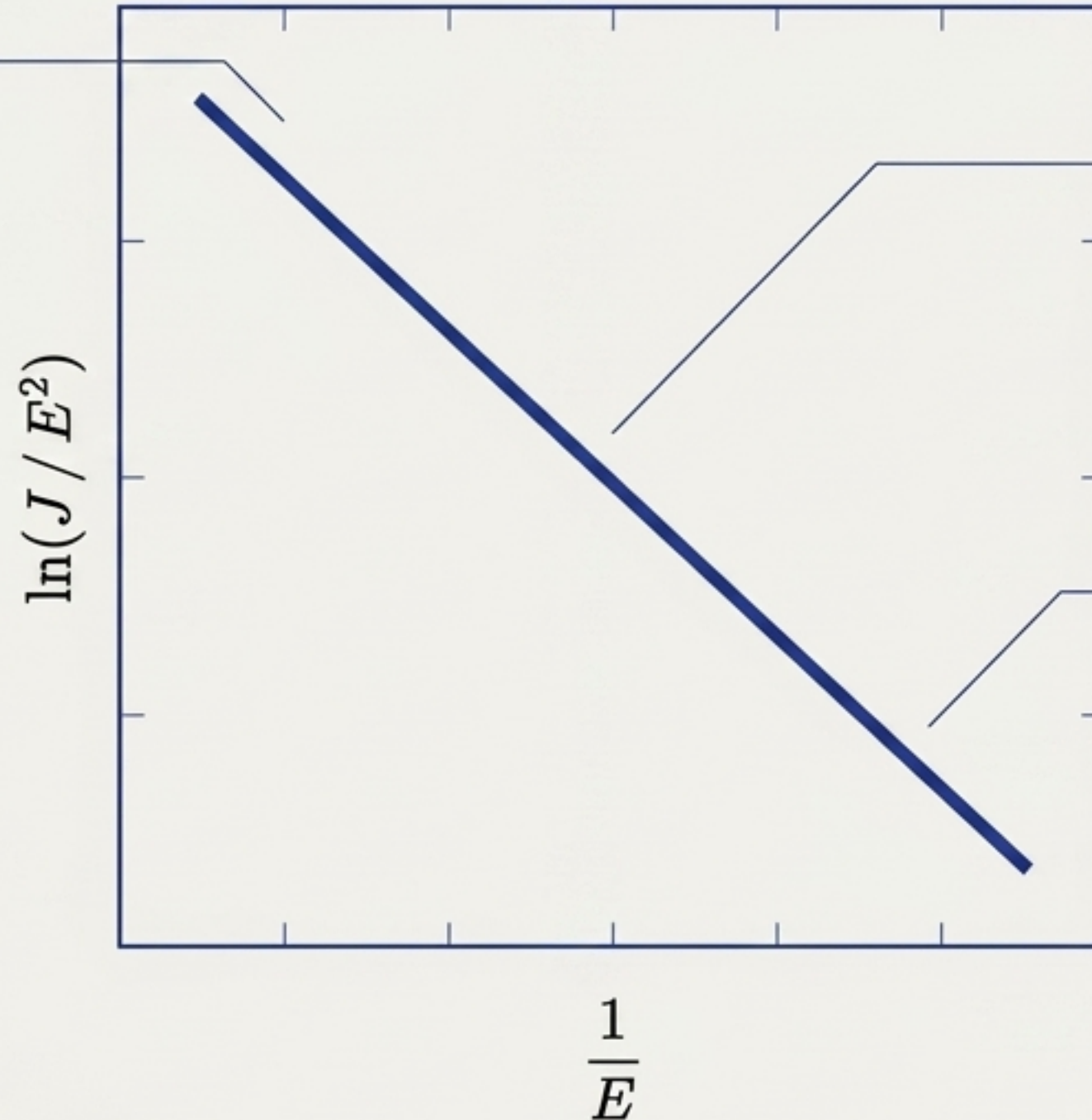
1924: De Broglie
(Matéria ondulatória).

1927: Experiência Davisson-Germer
(Difração de elétrons em níquel, provando a onda).

O gráfico de Millikan-Lauritsen modelou matematicamente a extração de elétrons frios no vácuo

A Experiência (1925):

Millikan e Eyring sujeitaram uma ponta metálica fria no vácuo a um campo elétrico extremo. Elétrons emergiram com energia muito inferior ao trabalho de extração.



A Equação:

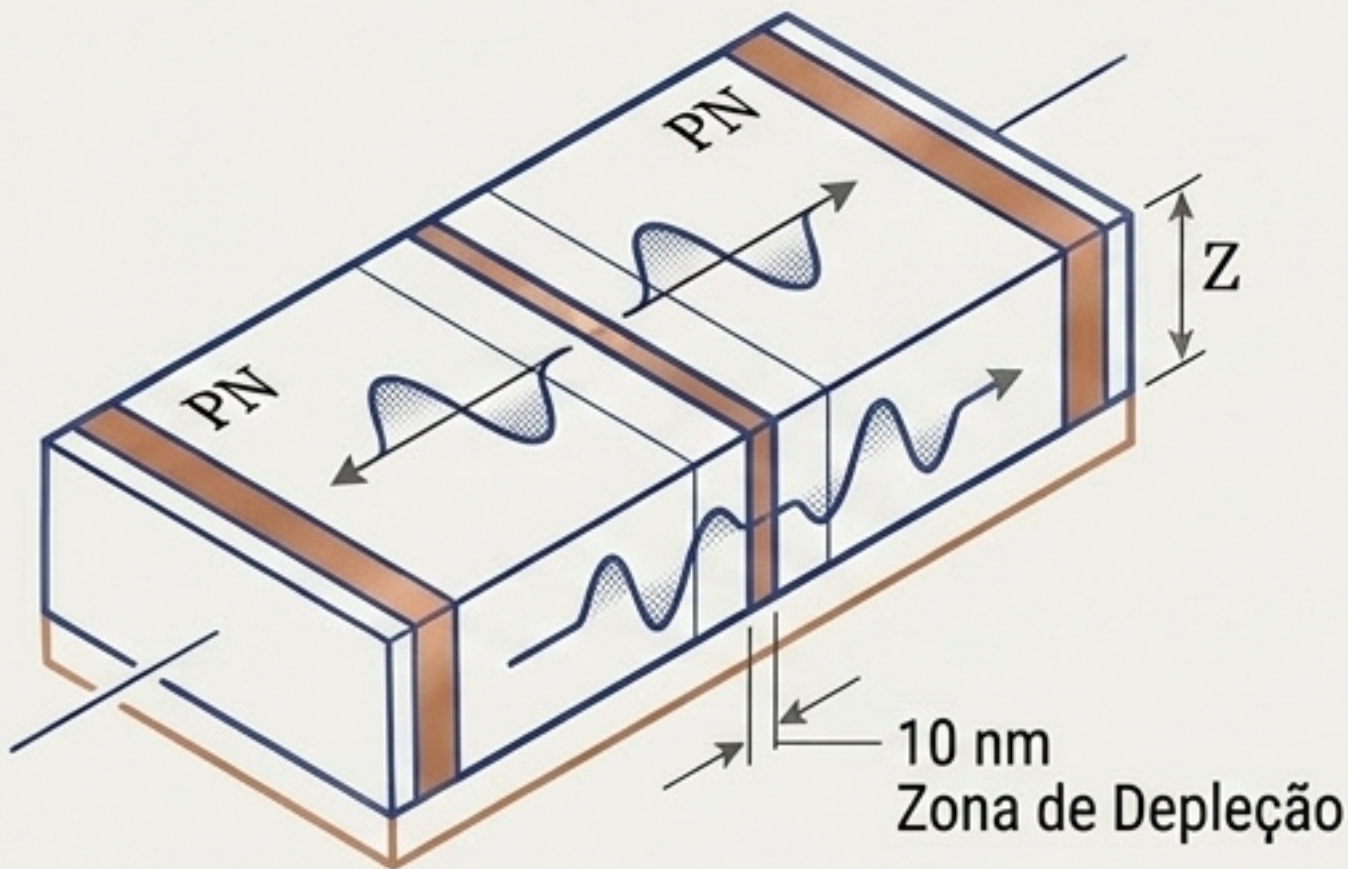
$$\ln\left(\frac{J}{E^2}\right) = A - \frac{B}{E}$$

A Teoria (1928):

Fowler e Nordheim usaram a mecânica quântica para explicar este gráfico, revelando que a barreira de energia se deforma num decaimento triangular, permitindo o tunelamento.

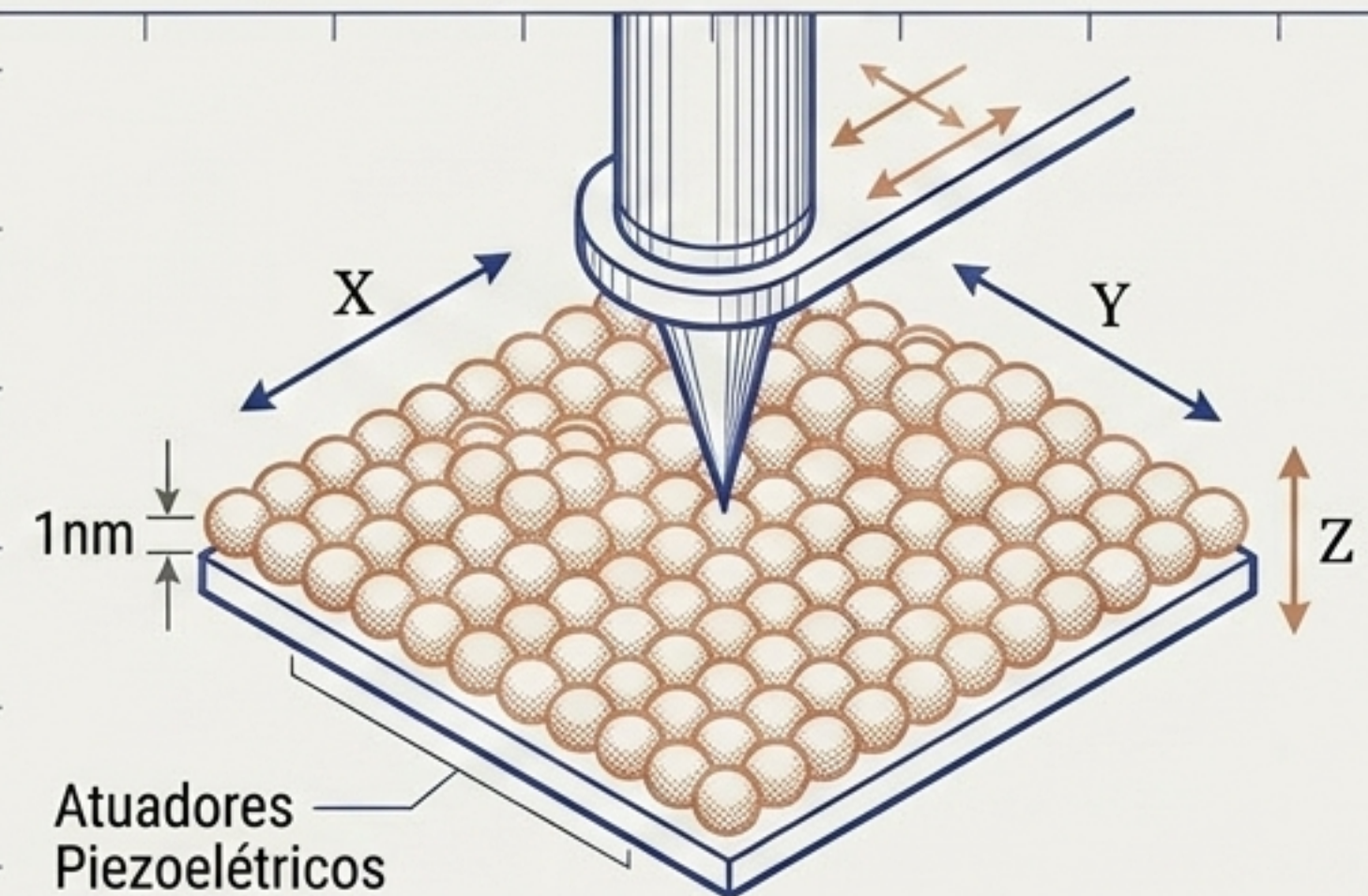
O tunelamento microscópico prático inaugurou a era do controlo atómico e das frequências Tera Hertz

O Díodo de Túnel (Leo Esaki, 1957)



Apresenta “resistência incremental negativa”. Os elétrons individuais atravessam a barreira nanométrica instantaneamente, permitindo amplificadores e osciladores em frequências extremas (GHz e THz).

Microscópio STM (Binnig & Rohrer, 1981)



Ao manter a corrente de tunelamento constante no vácuo, o eixo Z mapeia a topologia exata e permite mover átomos individuais da superfície do material.

O debate sobre a ‘ação fantasmagórica’ culminou na prova do tunelamento macroscópico

O Ceticismo

Einstein, Podolsky, Rosen (1935)
Paradoxo EPR: Argumentavam a existência de “variáveis ocultas”.
“Ação fantasmagórica à distância.”

A Matemática

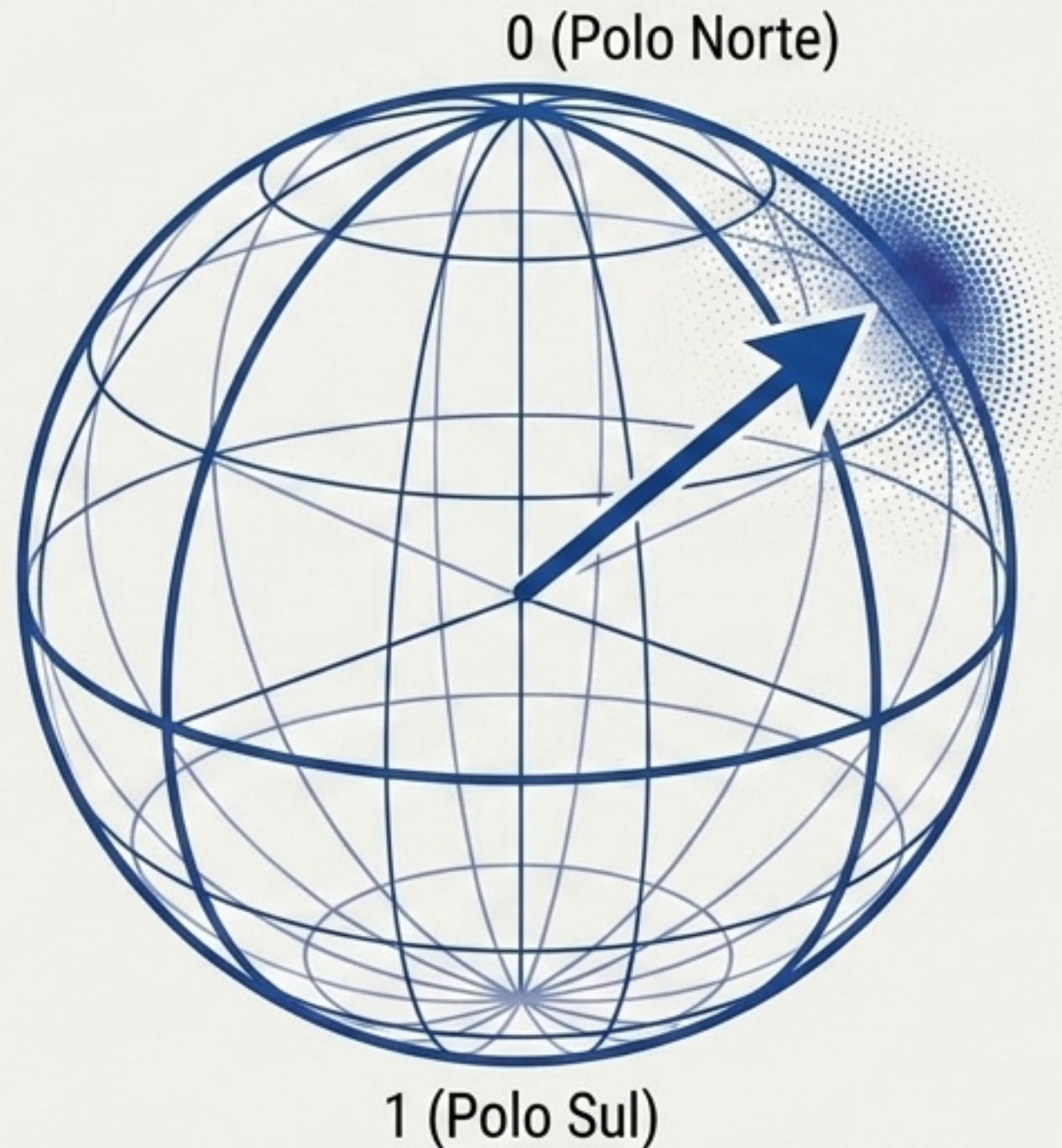
Teorema da Desigualdade de Bell (1964)

A Prova Experimental

Clauser (1972) → Aspect (1982) → Zeilinger (1997, teletransporte de informação).

Tunelamento Macroscópico: Em 2025, o Prémio Nobel reconheceu Clarke, Devoret e Martinis. Milhões de elétrons emparelhados (Pares de Cooper) movem-se sincronicamente como uma única partícula através de uma barreira num supercondutor—a base física dos computadores quânticos modernos.

O Qubit abandona a lógica binária em favor de uma paisagem de probabilidade multidimensional



Cunhado por Schumacher e Wootters (1992), o Qubit processa informação de forma analógica.

Através da Superposição, o sistema existe em estados múltiplos simultâneos, onde a informação é governada por leis de probabilidade até ser medida.

As matérias-primas do universo quântico exigem o controlo das subpartículas mais pequenas



Circuitos Supercondutores

Fluxos magnéticos controlados a temperaturas próximas do zero absoluto (usados por Google/IBM).



Fotões

Manipulação do ângulo de polarização da luz.



Átomos/Iões Presos

Partículas isoladas em armadilhas magnéticas.



Fermiões (Majorana)

Subpartículas propostas por Ettore Majorana (1937), investigadas pela Microsoft pela sua elevada estabilidade topológica.



Spin Eletrónico

Controlo da rotação fundamental de um eletrão individual.

A corrida tecnológica global mapeia o caminho para processar o impossível

A Corrida Tecnológica Quântica

Google (2019) | Sycamore

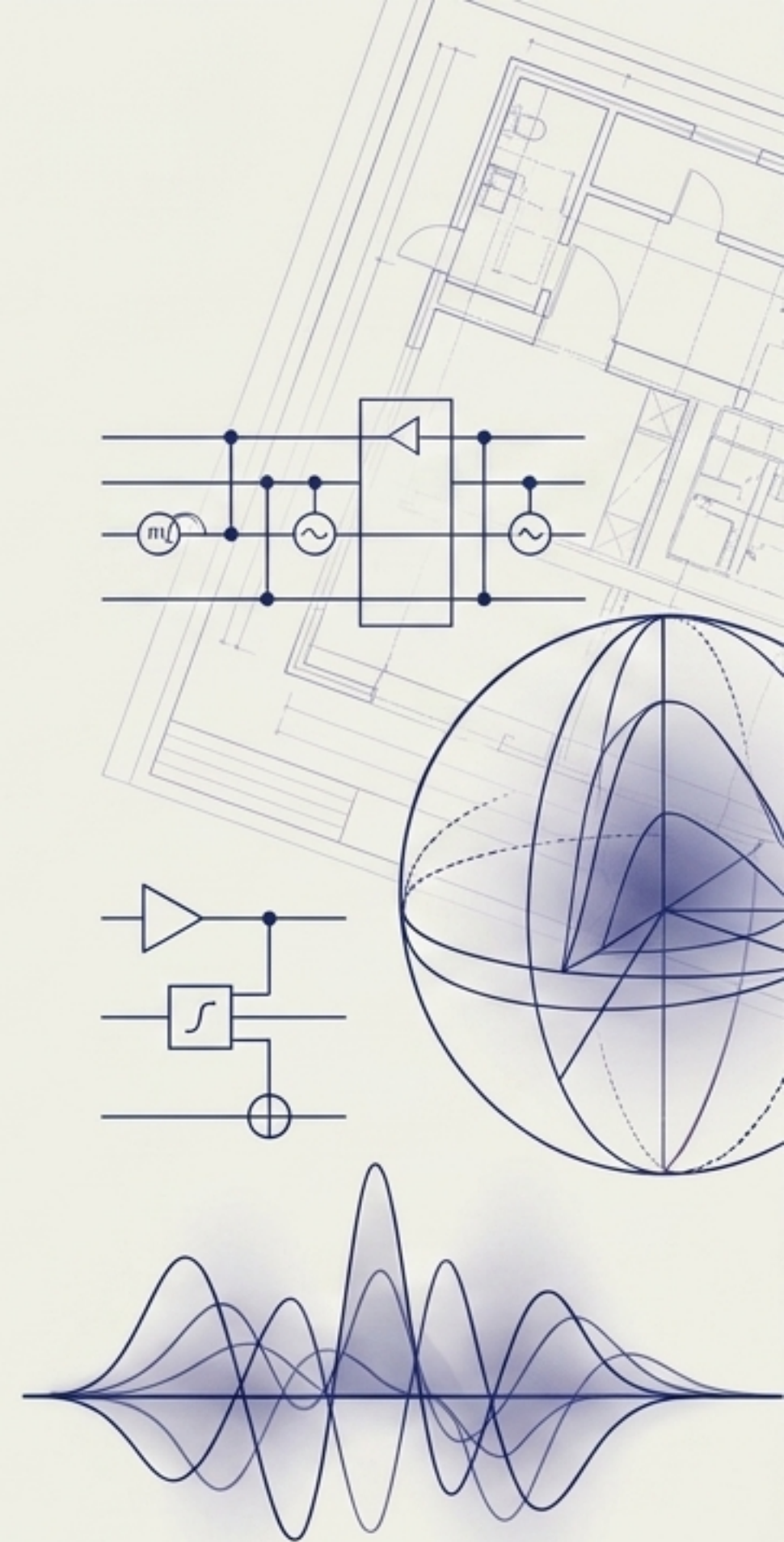
53 qubits supercondutores. Resolveu em 200 segundos um problema de 10.000 anos clássicos (Supremacia Quântica).

China / Equipa Pan Jianwei (2021-2026)

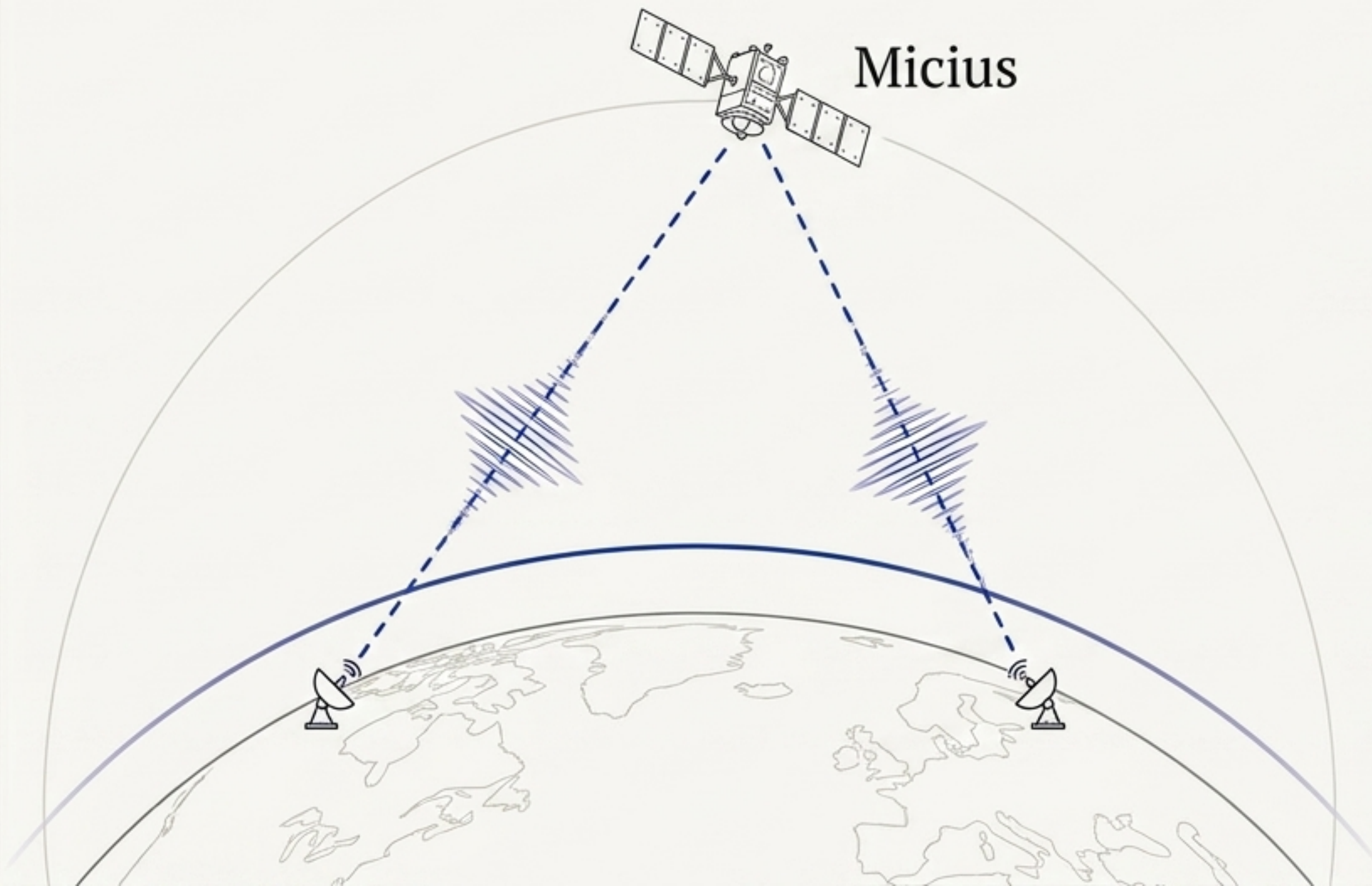
- Zuchongzhi 2.1 (Supercondutor, 1M vezes mais rápido que o Sycamore).
- Jiuzhang 4.0 (Fotónico, calculou em 25 microssegundos o que o supercomputador clássico El Capitan faria em 10^4 anos).
- Hanywuan-2 (Primeiro dual core, 2×100 qubits).

Caltech (2026)

Computador de 6100 qubits atômicos, com a capacidade inédita de operar à temperatura ambiente.



O satélite Micius transformou a rede quântica global de teoria matemática em realidade táctica



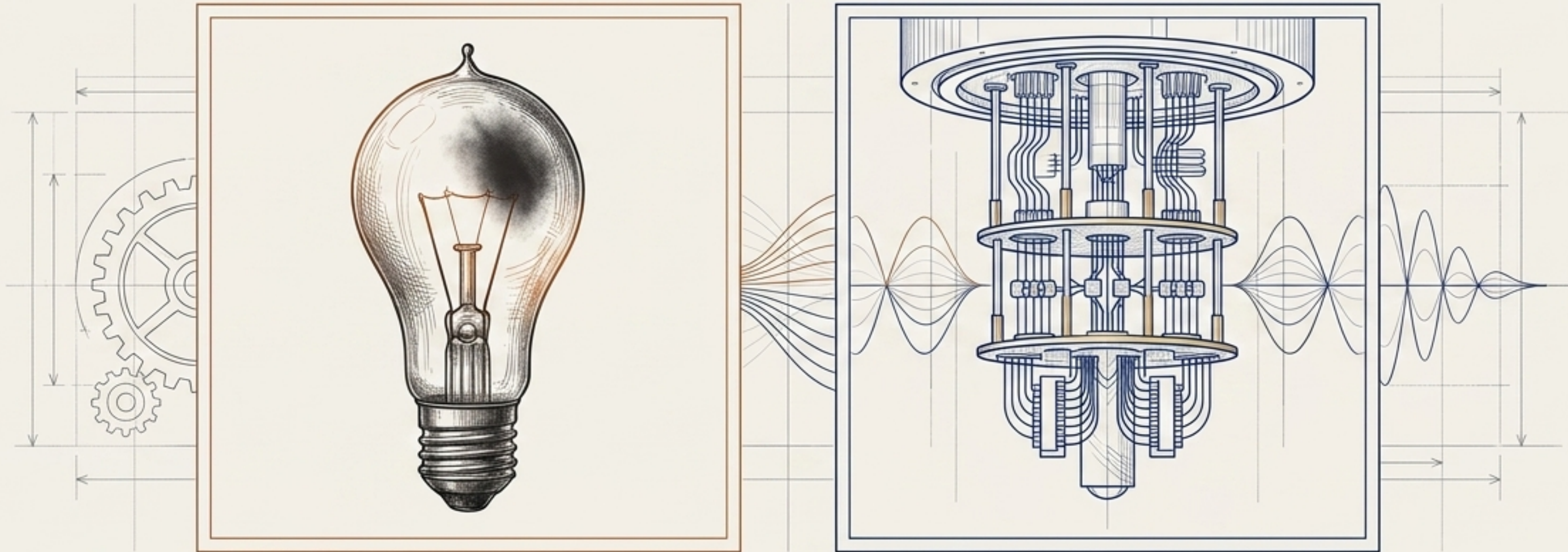
Micius

Lançamento: 2016 (Equipa de Pan Jianwei, China).

Objetivo: Criptografia Quântica inviolável via Quantum Key Distribution (QKD).

O Paradoxo Superado: O teletransporte quântico transfere a informação de um estado para outro, através de grandes distâncias, sem a deslocação física de qualquer matéria.

Conclusão: As anomalias que frustraram o passado são o motor computacional do futuro



1880: Efeito Edison (Emissão termiônica clássica e misteriosa).

Presente: Supremacia Quântica (Controlo probabilístico subatômico).

Os limites clássicos que causavam o escurecimento do vidro de Edison e a fuga de elétrons nos transístores de silício não eram barreiras absolutas. Eram portas de entrada para uma nova era onde processar o impossível se tornou o padrão.