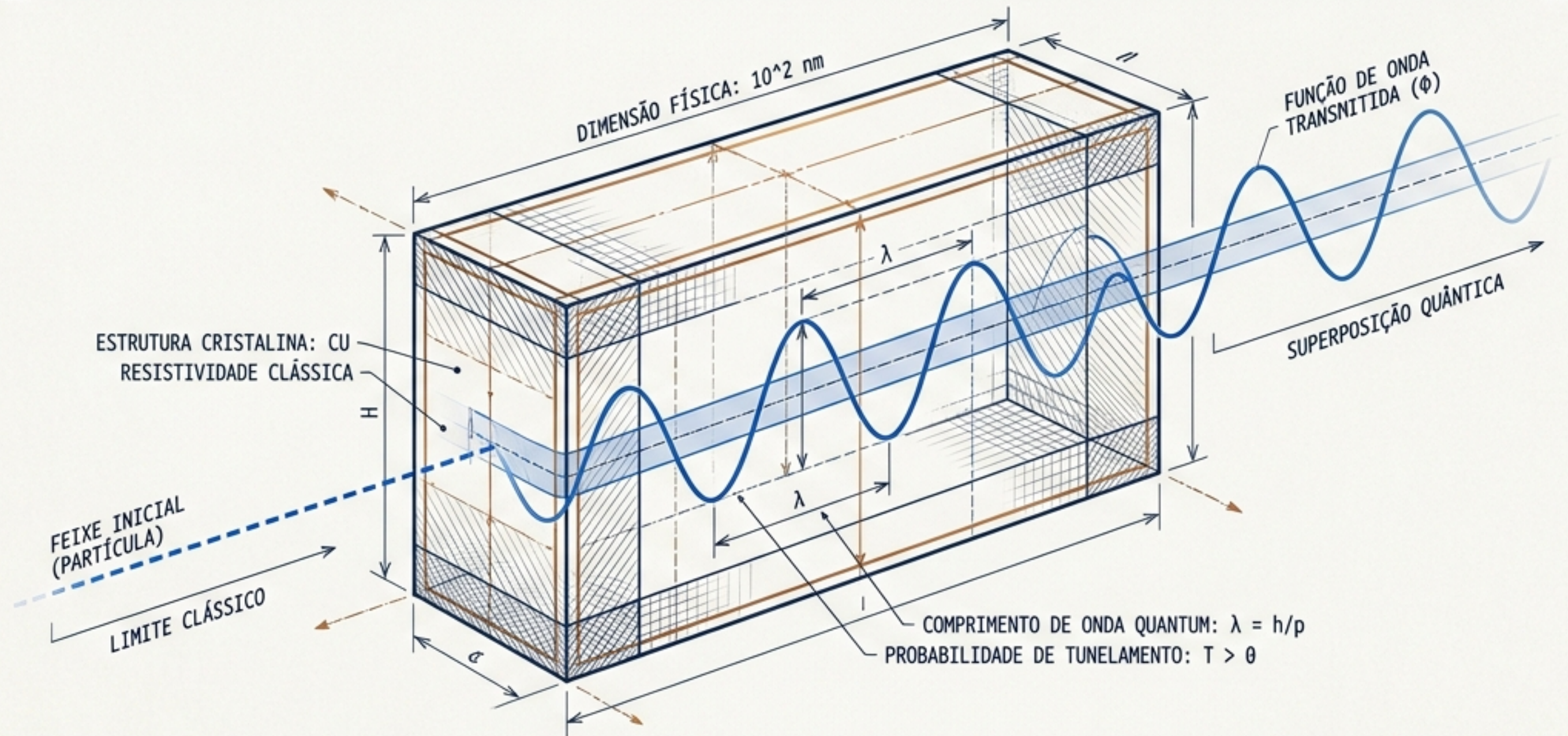


# Além da Resistência

Da Condução Clássica à Supremacia Quântica: A Evolução da Física à Escala.



TUNELAMENTO QUÂNTICO: A partícula ultrapassa a barreira de energia clássica sem perda de coerência ondulatória.

# O Espectro da Condução Clássica

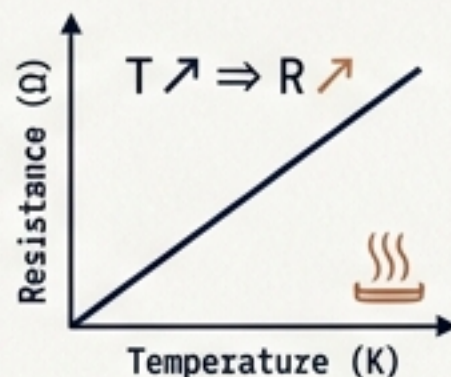


## Condutores

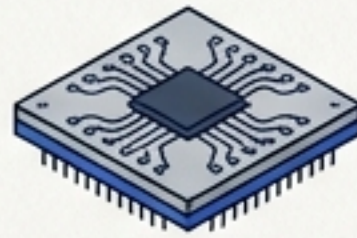
- **Resistividade Base:** Muito Baixa (Ex: Cobre a  $1.68 \times 10^{-8} \Omega.m$ ).



- **Resposta Térmica:** Linear. A resistência sobe com a temperatura.



- **Anomalia:** Impurezas criam micro-resistências.

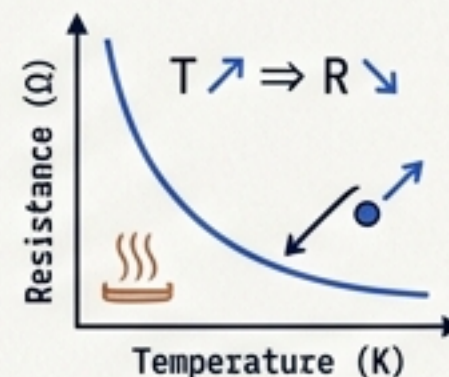


## Semicondutores

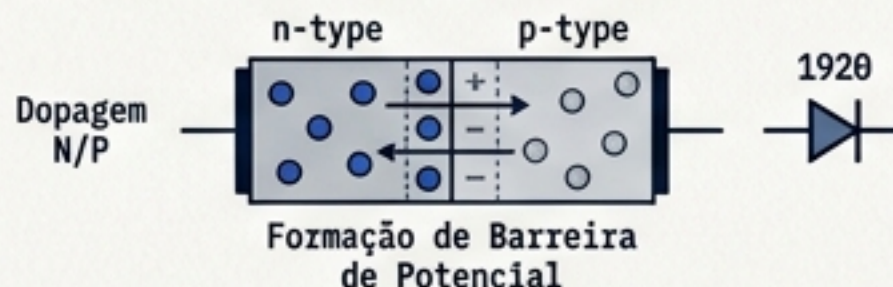
- **Resistividade Base:** Média a Elevada (Ex: Silício Puro  $6.4 \times 10^4 \Omega.m$ ).



- **Resposta Térmica:** Inversa. A resistência diminui com a temperatura.



- **Controlo:** A dopagem reduz a resistividade (Diodo, 1920).

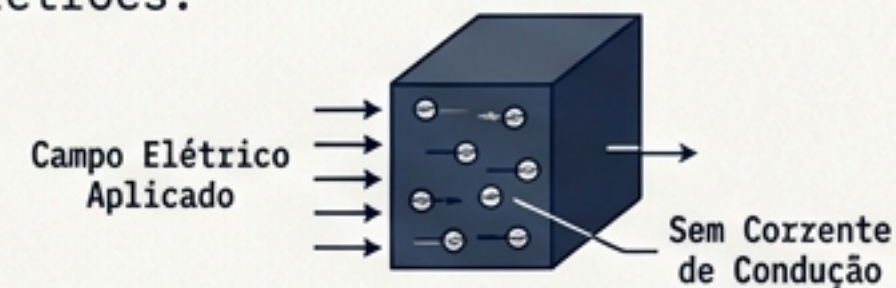


## Isoladores (Dielétricos)

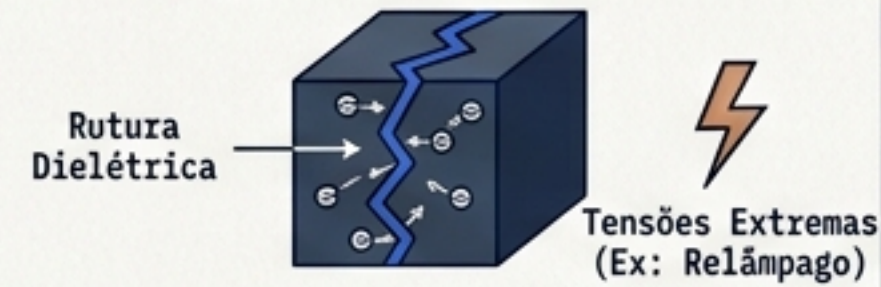
- **Resistividade Base:** Extrema (Ex: Teflon  $10^{21} \Omega.m$ ).



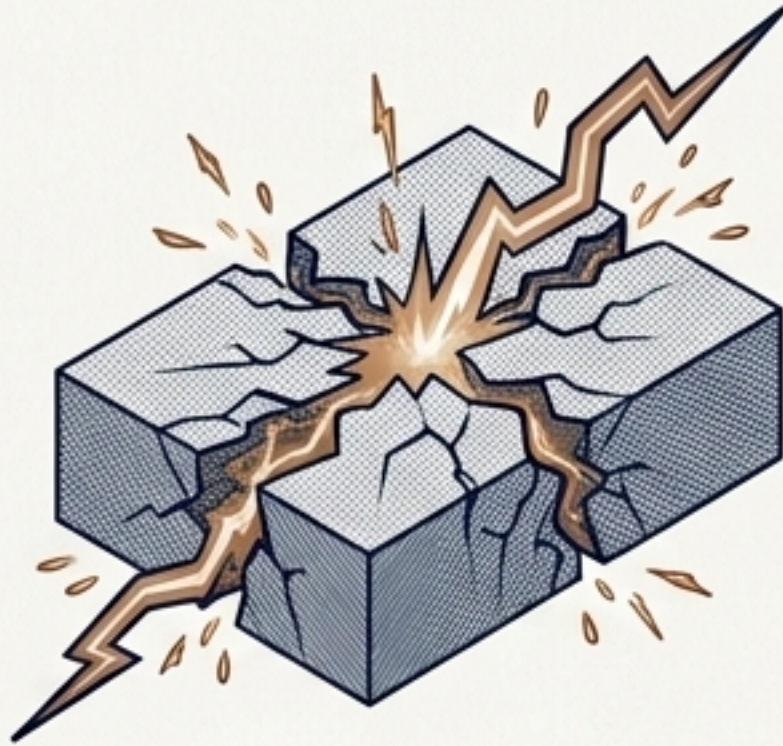
- **Função:** Bloqueio total do fluxo de elétrons.



- **O Paradoxo:** Em condições extremas, os elétrons podem atravessar.

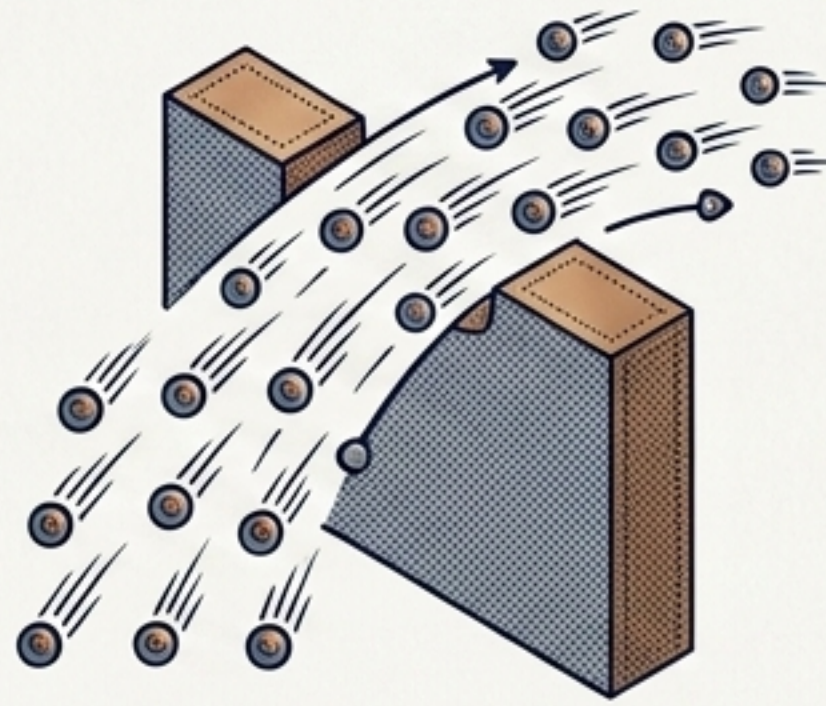


# Quando o Isolador Falha: Três Vetores de Transposição



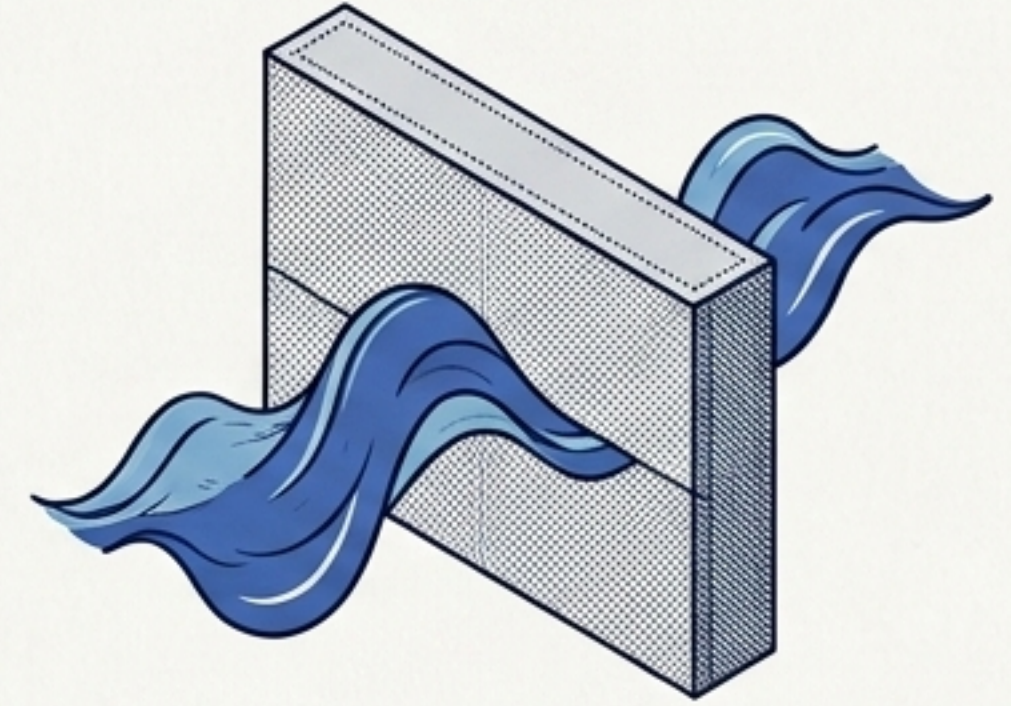
**Disrupção Dielétrica  
(Força Bruta)**

- **Mecanismo:** O campo elétrico arranca violentamente elétrons (processo destrutivo).
- **Limite:** O ar falha a 3 kV/mm. O Teflon a 20-200 kV/mm.
- **Aplicações:** Soldadura, lâmpadas de plasma, motores iônicos.



**Injeção de Elétrons Quentes  
(Energia Cinética)**

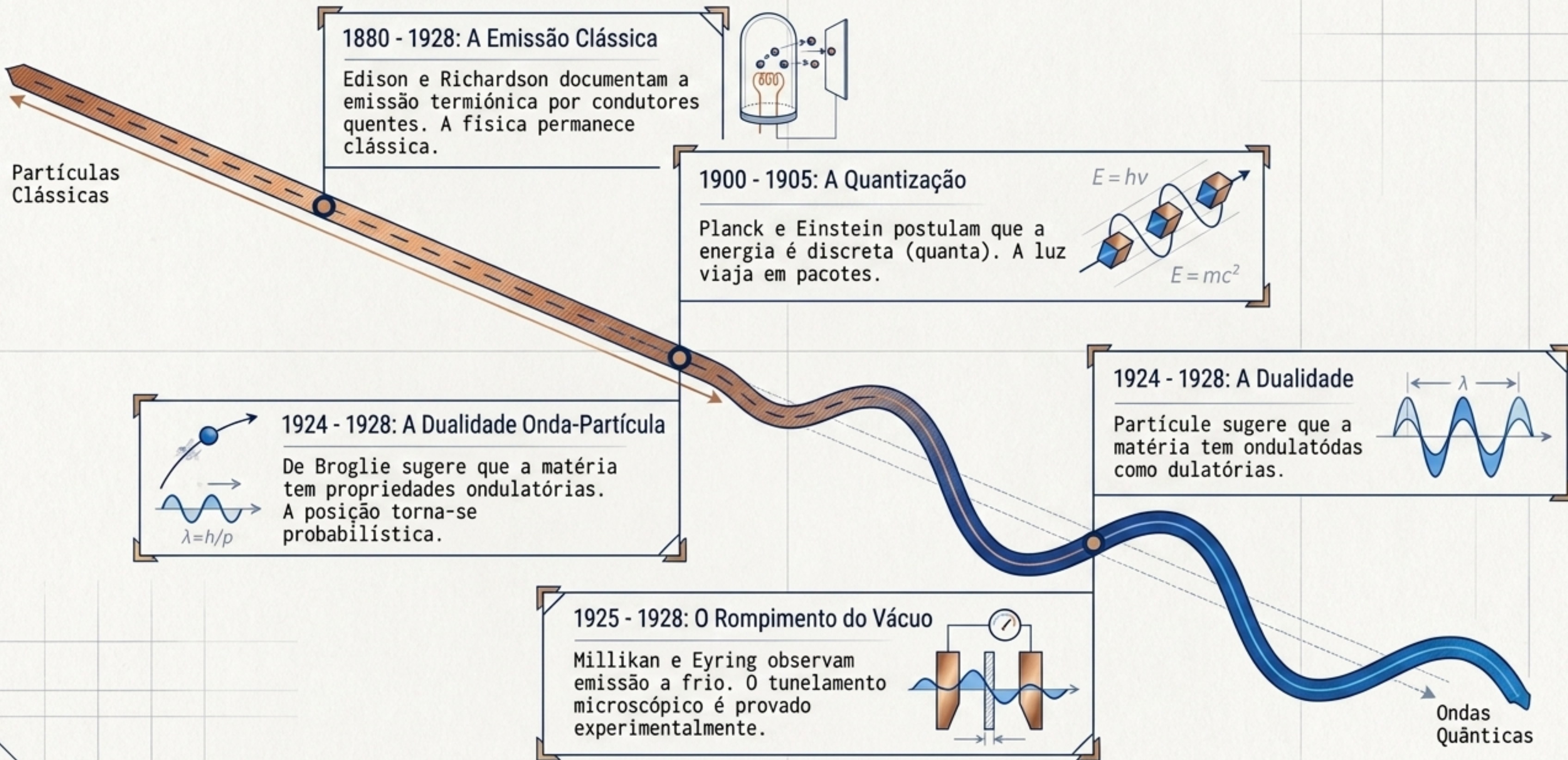
- **Mecanismo:** Elétrons aquecem a milhares de graus, enquanto a rede atômica permanece fria.
- **Gatilho:** Campos elétricos intensos em microchips.
- **Resultado:** Hot Carrier Injection (HCI). Ficam presos no isolador e degradam o circuito.



**Tunelamento Quântico  
(Anomalia Probabilística)**

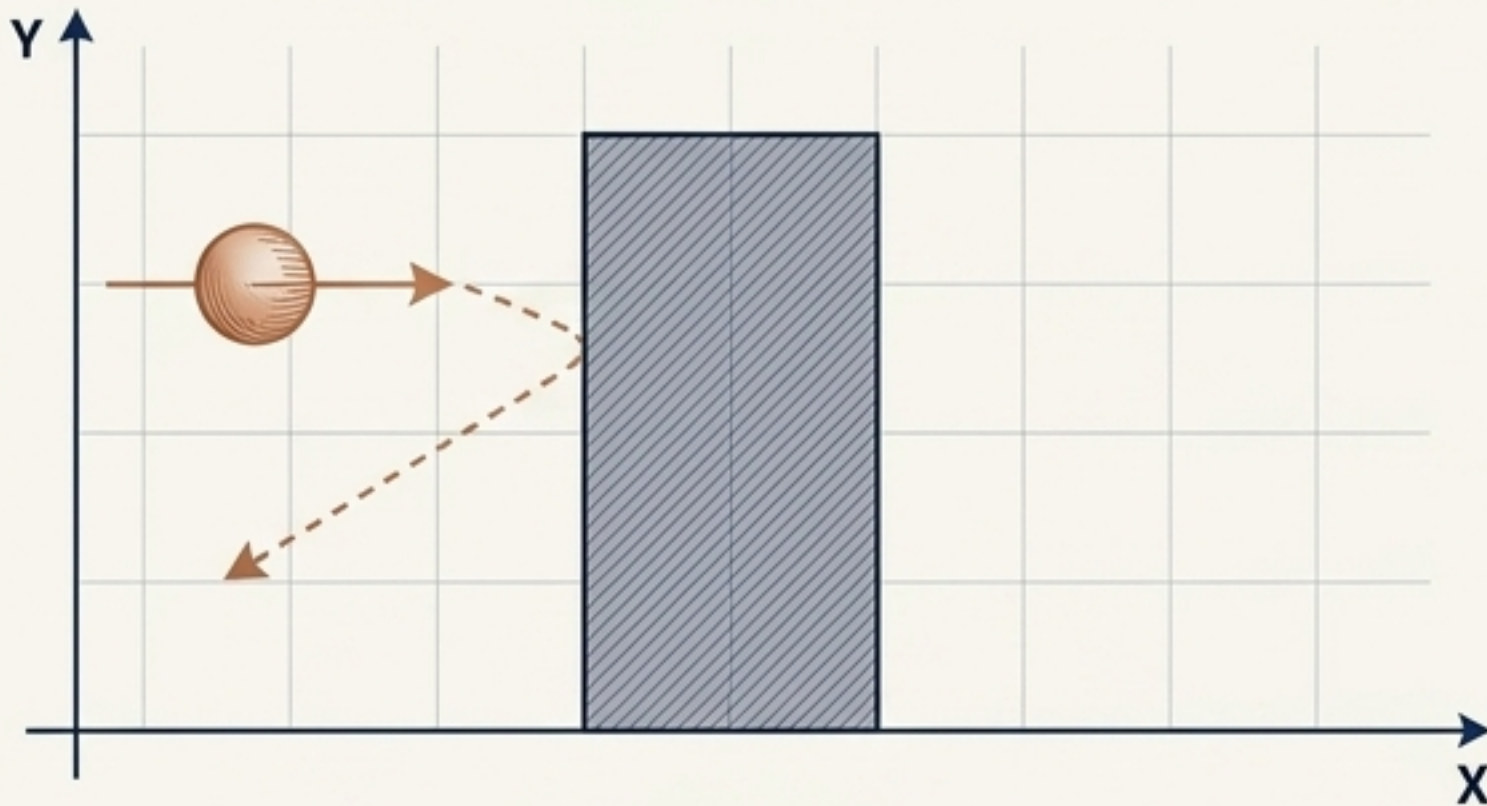
- **Mecanismo:** Elétrons atravessam a barreira sem energia suficiente para a saltar.
- **Gatilho:** A dualidade onda-partícula torna a posição probabilística.
- **Resultado:** Transição quântica, independente da temperatura.

# A Descoberta do Tunelamento Microscópico



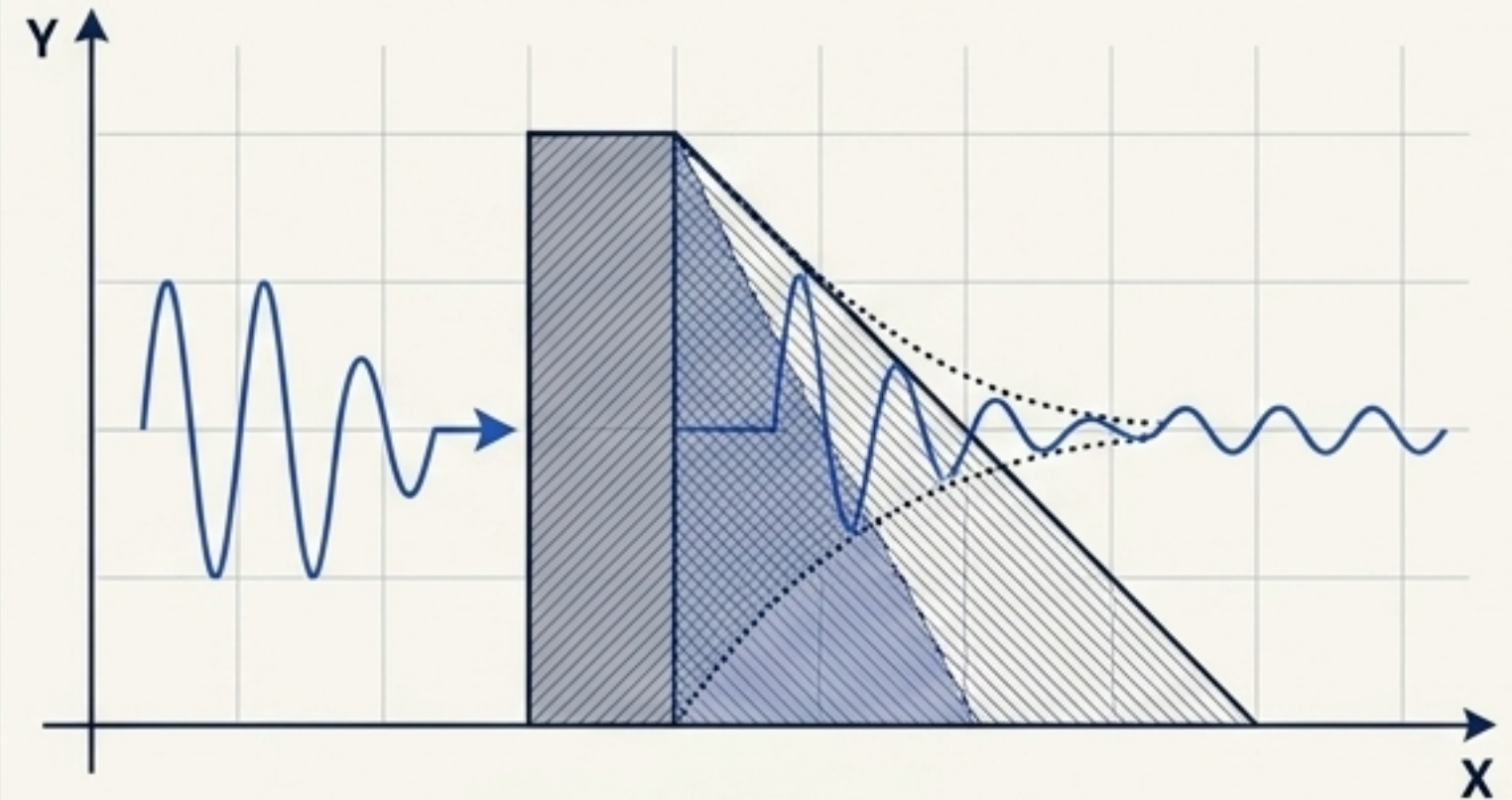
# A Teoria Fowler-Nordheim: Redesenhando a Barreira

## A Visão Clássica (A Parede Abrupta)



A barreira é retangular e abrupta. Sem energia suficiente para passar por cima, a passagem do elétron é matematicamente impossível (Probabilidade = 0).

## A Intervenção Quântica (1928)



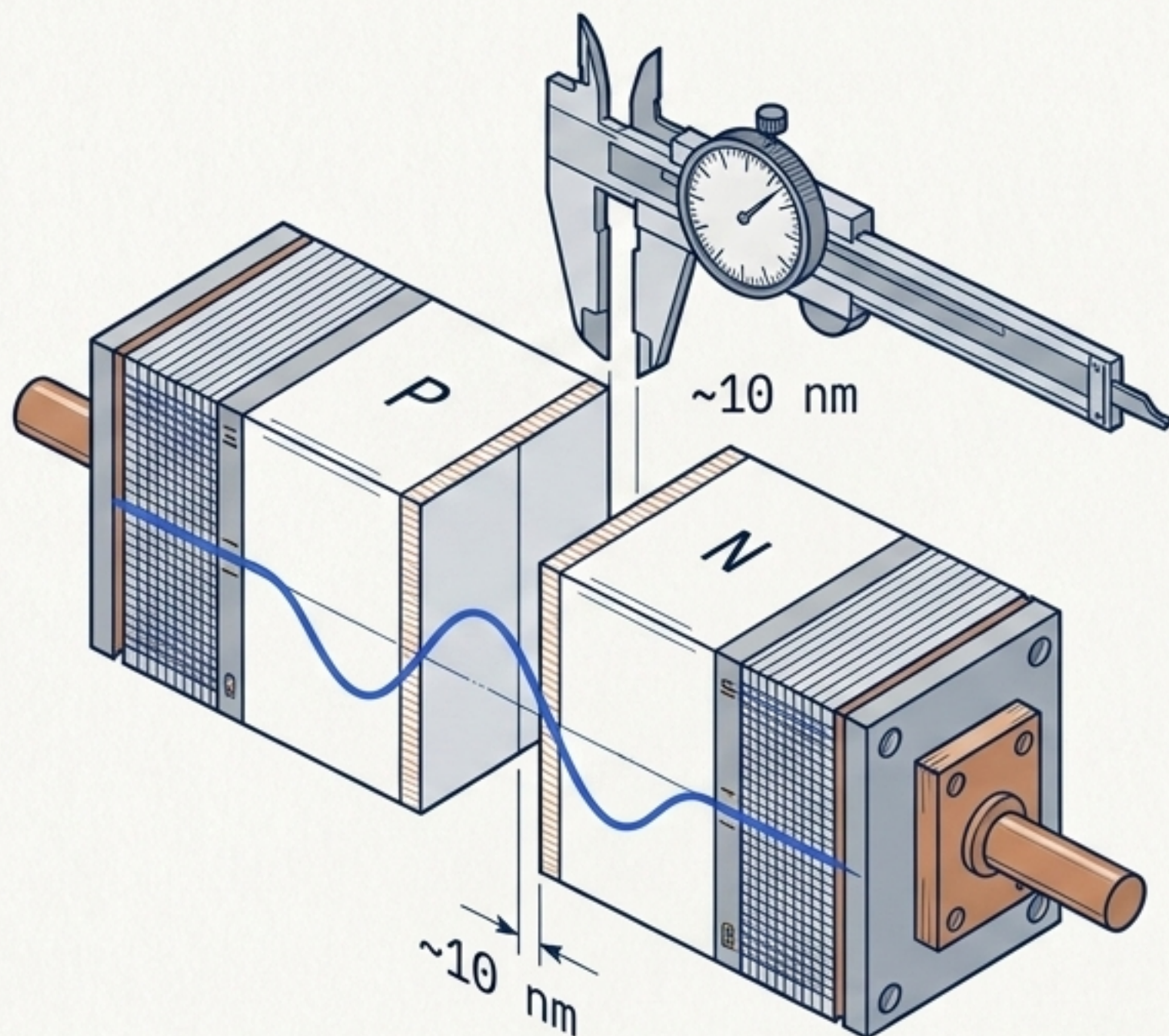
Fowler & Nordheim modelam a solução: o campo elétrico deforma a barreira num decaimento triangular. A função de onda penetra.

A Assinatura Matemática:

$$\ln(J/E^2) = A - B/E$$

Relação exponencial entre densidade de corrente (J) e o inverso do campo elétrico (E).

# Aplicação Atômica I: O Díodo de Túnel



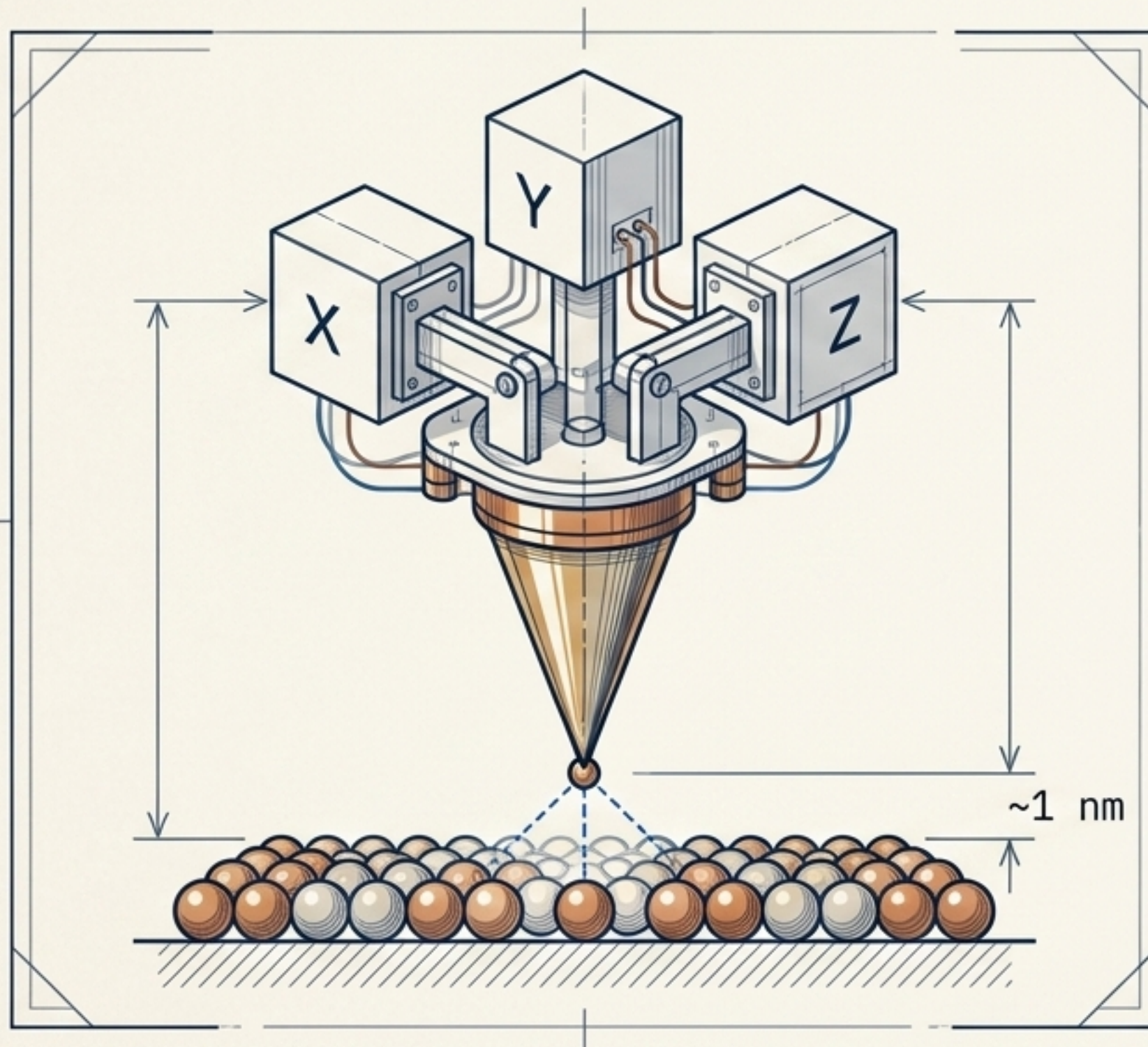
## A Primeira Prova Comercial (1957)

Criado por Leo Esaki (Nobel 1973). Provou definitivamente que elétrons individuais podem atravessar barreiras sólidas comportando-se como ondas, à temperatura ambiente.

## Engenharia Extrema

- **0 Design:** Uma dopagem extremamente forte de germânio cria uma junção PN com uma zona de depleção nanométrica ( $\sim 10 \text{ nm}$ ).
- **Resistência Negativa:** A curva  $i(V)$  apresenta uma região de resistência incremental negativa, permitindo a amplificação de sinais.
- **Velocidade:** O tempo de trânsito é quase instantâneo, permitindo operar em frequências extremas ( $>170 \text{ GHz}$ ).

# Aplicação Atômica II: O Microscópio de Varredura por Tunelamento (STM)



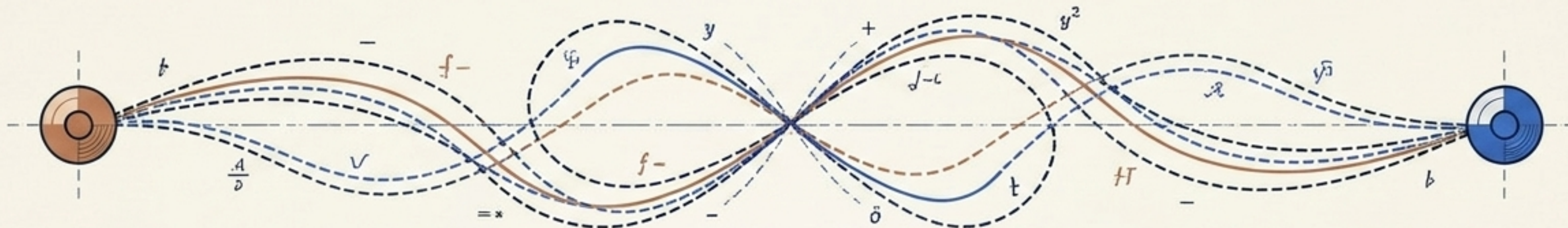
## Ver o Invisível (1981)

Criado na IBM (Nobel 1986). Utiliza as bases de Fowler-Nordheim para mapear a topologia à escala atômica.

## O Mecanismo de Precisão:

- 1. A Agulha:** Uma ponta ultra-afiada posiciona-se no vácuo a  $\sim 1$  nm da superfície.
- 2. A Corrente:** A aplicação de tensão gera um campo elétrico intenso e uma corrente de tunelamento através do vazio.
- 3. O Mapeamento (Z):** Atuadores piezoelétricos sobem e descem a agulha para manter a corrente estritamente constante, criando um mapa 3D.

## A Escala Macroscópica: 0 Emaranhamento Quântico



## Ação Fantasmagórica

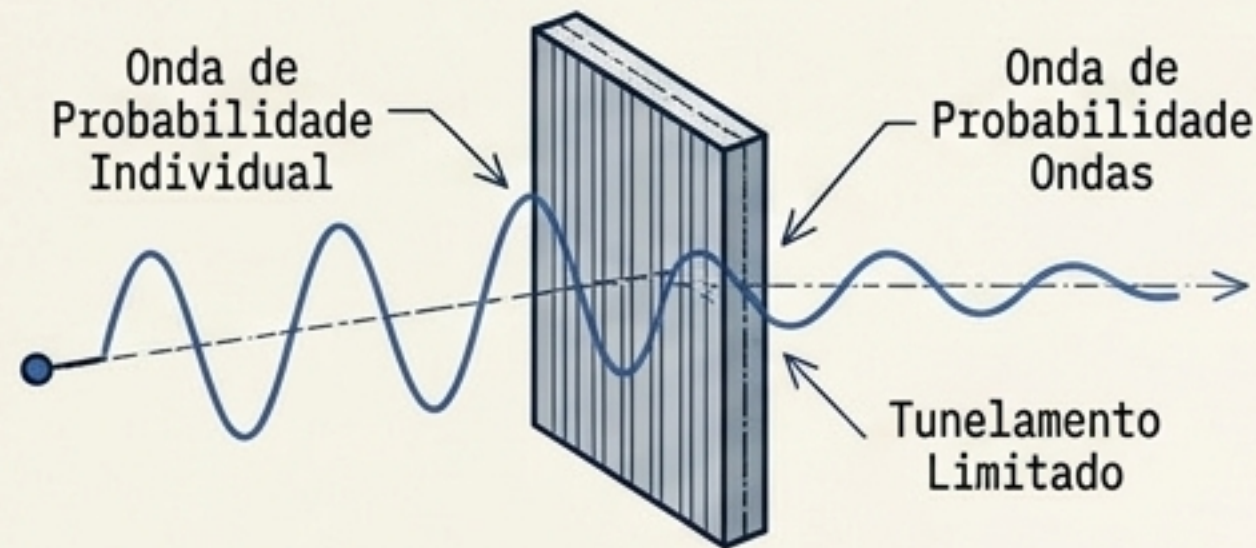
Na década de 1930, Einstein e Schrödinger debateram o emaranhamento: partículas separadas permanecem conectadas sem contacto físico.

Einstein considerava a teoria incompleta (Paradoxo EPR), enquanto Niels Bohr defendia a validade da mecânica quântica.

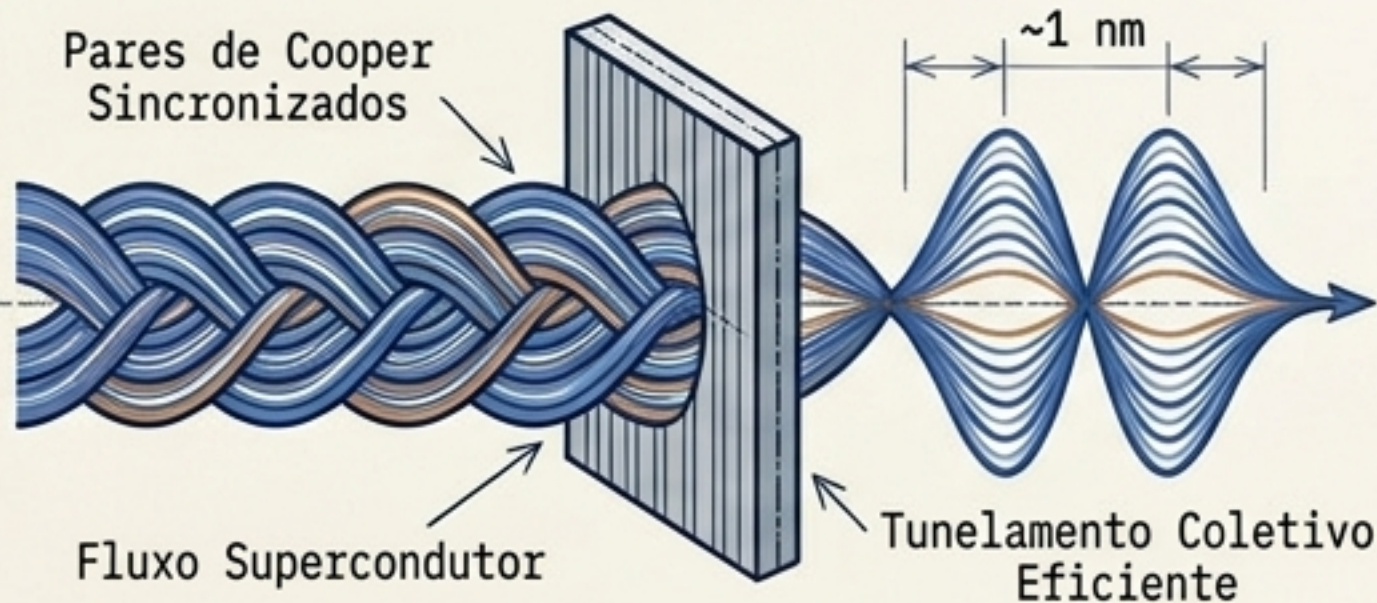
## 0 Caminho para o Teletransporte:

- **1964:** John Bell formula a Desigualdade de Bell. O emaranhamento pode ser medido.
- **1972 - 1982:** Clauser e Aspect provam experimentalmente a violação de Bell.
- **1997:** Anton Zeilinger transfere um estado quântico entre partículas distantes, transferindo informação sem mover matéria física.
- **2016:** A China lança o satélite Micius, transmitindo chaves de segurança (QKD) através de milhares de quilómetros.

# Tunelamento Macroscópico: A Corrente Coletiva



**Microscópico (Individual)**



**Macroscópico (Pares de Cooper)**

## Pares de Cooper e Supercondutividade

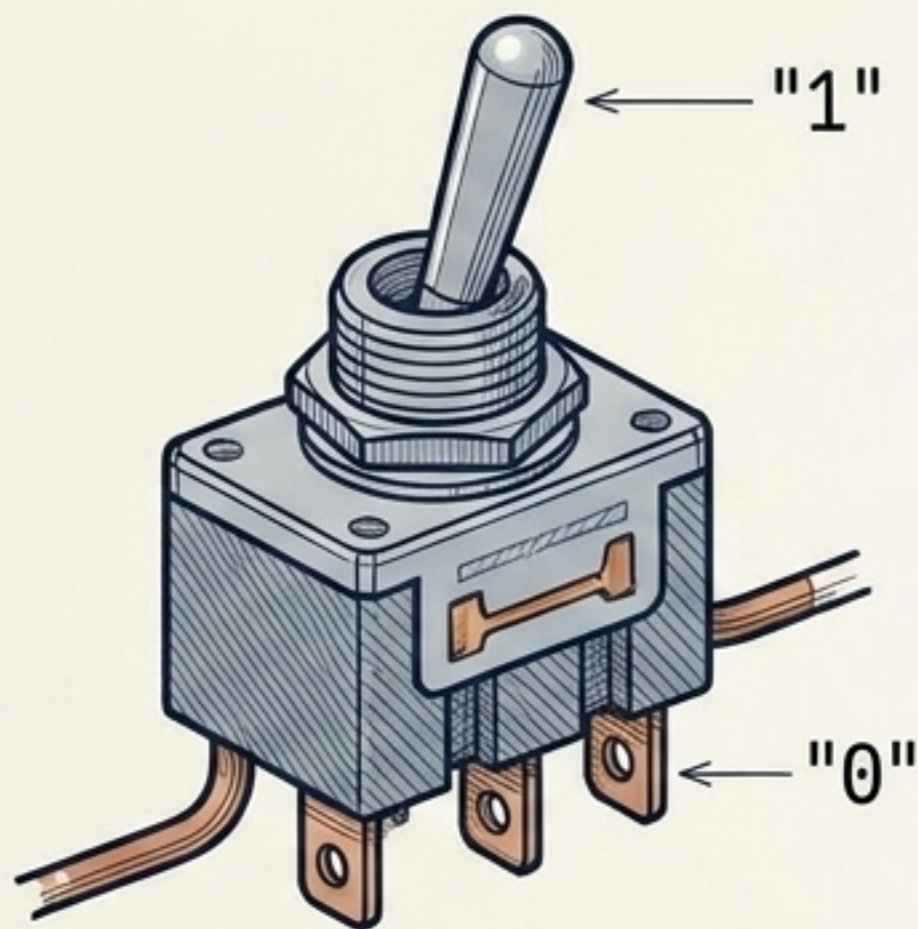
A baixas temperaturas, os elétrons emparelham-se e sincronizam as suas ondas. Comportam-se como um agregado maciço e único, em vez de partículas individuais.

## O Prémio Nobel da Física de 2025

- Atribuído pelo desenvolvimento prático do tunelamento macroscópico.
- **O Feito:** Milhões de elétrons emparelhados efetuam tunelamento coletivo através de uma barreira isolante.
- **A Aplicação:** Este fluxo é a base física dos Qubits Supercondutores.
- **A Supremacia Quântica:** O processador programável Sycamore da Google (53 qubits) utiliza esta arquitetura para cálculos extremos.

# No Reino do Qubit: A Geometria da Probabilidade

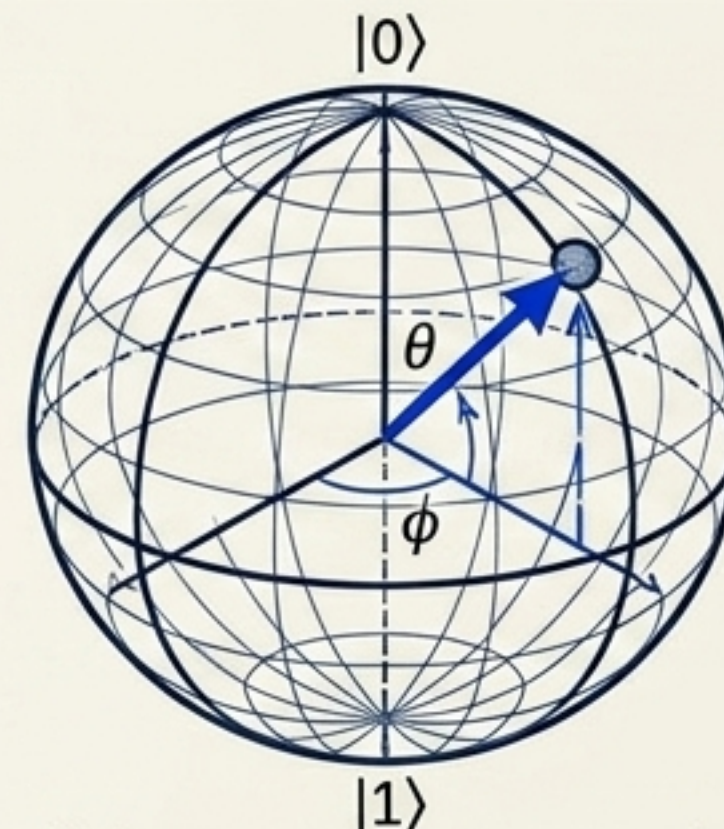
## 0 Bit Clássico



**Lógica:** Determinística.

**Estado:** Exclusivo. O valor é obrigatoriamente 0 ou 1, sem posições intermédias.

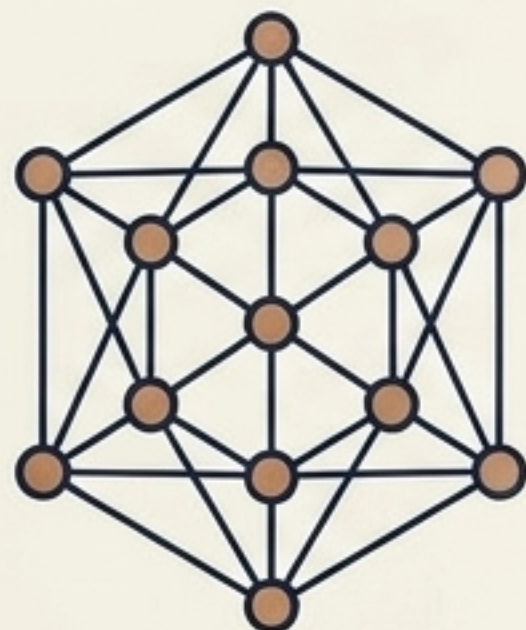
## 0 Qubit (Esfera de Bloch)



- **Pólos Magnéticos:** Polo Norte (0) e Polo Sul (1).
- **Superposição:** Existe simultaneamente nos estados 0 e 1, mapeado geometricamente por um vetor tridimensional.
- **Natureza Física:** Pode ser o spin de um elétron, a polarização de um fóton, ou o estado de um fermião.

# A Arquitetura do Futuro (2025 - 2026)

## Caltech (2026)



### Escala a Átomos Frios

Desenvolveu o maior computador quântico atual com 6.100 qubits. Opera à temperatura ambiente, processando e manipulando átomos individuais numa rede estruturada.

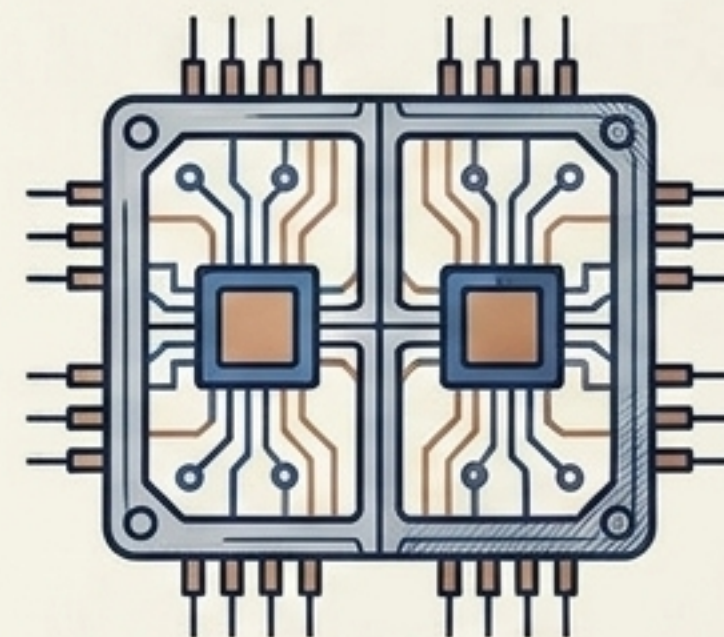
## Microsoft



### A Aposta Topológica

Utiliza Fermiões de Majorana (teorizados em 1937) para criar qubits topológicos intrinsecamente imunes a interferências e erros ambientais.

## China (2026)



### Hanywuan-2 (Dual Core)

Reportou o desenvolvimento do primeiro computador quântico de duplo núcleo. Cada núcleo processa 100 qubits, com capacidade de operar em série ou em paralelo.

# Síntese: A Escala da Evolução Física

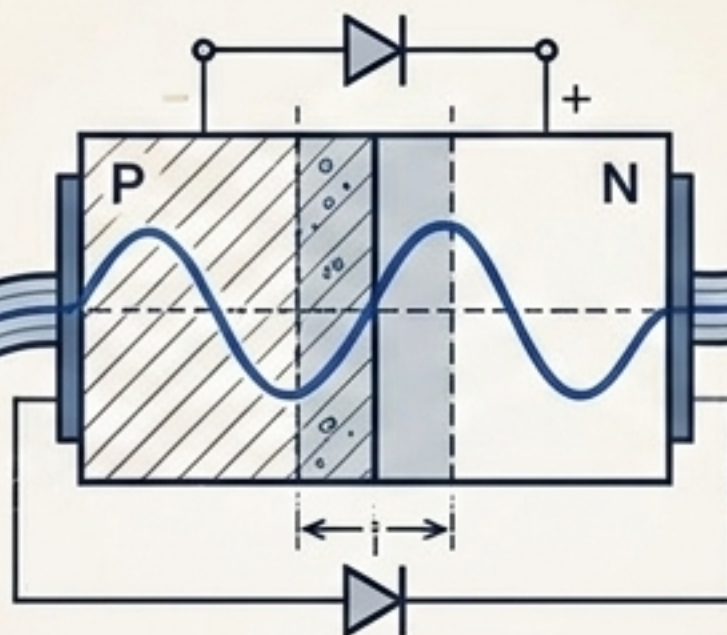
## Fase 1: Domínio Macroscópico Clássico



**A Matéria Resistente:** Da lâmpada de Thomas Edison aos primeiros retificadores.

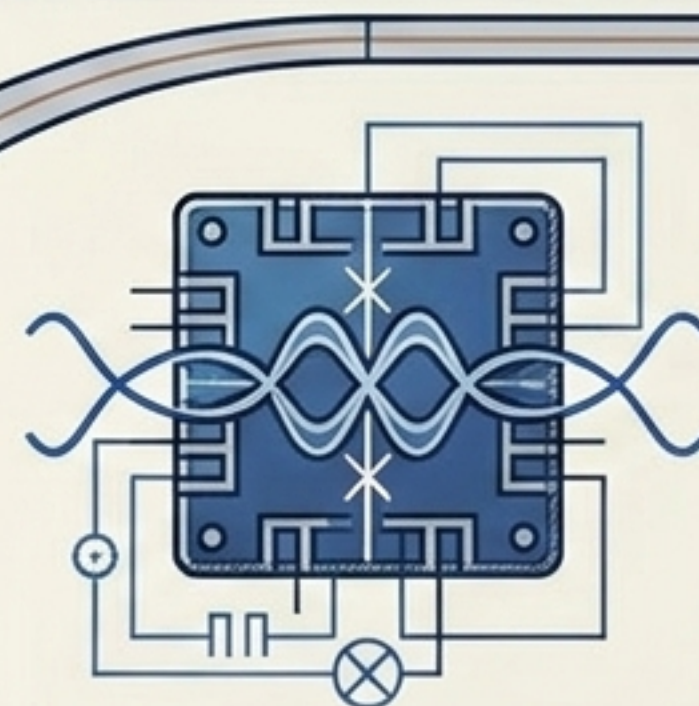
**O Paradigma:** A condução depende da temperatura e as barreiras são intransponíveis. Física determinística.

## Fase 2: Domínio Microscópico Quântico



**A Quebra das Regras:** Millikan, Fowler e Nordheim provam que o isolador perfeito não existe.  
**O Paradigma:** Eletrões individuais atravessam barreiras como ondas (Díodo Esaki, STM).

## Fase 3: Domínio Macroscópico Quântico



**A Sincronização Coletiva:** Pares de Cooper efetuam tunelamento como entidade única.

**O Paradigma:** O hardware humano (Google Sycamore, Microsoft) opera agora inteiramente nas regras probabilísticas de 1928, redefinindo o limite do processamento.