



Introdução

Ao longo dos tempos fomos adquirindo conhecimentos sobre o mundo em que vivemos através de experiências, e por algumas concepções teóricas visionárias que depois viriam a ser confirmadas por experiências. Todavia, conhecemos ainda muito pouco sobre o mundo em que vivemos.

Foi durante o século XIX que descobrimos as relações entre eletricidade e magnetismo e a existência de ondas eletromagnéticas e sua relação com a luz. Neste período, [Michael Faraday](#) (1791 - 1867), através de experiências bem conseguidas, consolidadas nas teorias de [James Maxwell](#) (1831 - 1879), teve contribuições fundamentais. Faraday acreditava na sua intuição de que todas as forças da natureza estavam ligadas. Faraday procurou mostrar que existia uma relação entre gravidade e eletromagnetismo através de experiências, que não tiveram sucesso, mas esta ideia abriu caminho para a investigação da [Teoria do Campo Único](#) que foi prosseguida por Einstein e por outros cientistas.

A descoberta das relações entre massa, energia e ondas são as bases da mecânica quântica que revolucionou a Física moderna e teve uma grande implicação na engenharia de nano-sistemas que hoje já fazem parte do nosso cotidiano. Diferentes mecanismos de geração de partículas para condução elétrica, de luz, interação entre ondas e materiais estão presentes nestes novos nano-sistemas.

Condução elétrica

Normalmente classificamos os materiais em condutores, semicondutores e isoladores, de acordo com a sua resistividade elétrica.

Nos condutores elétricos a resistividade sobe linearmente com a temperatura, por exemplo, numa lâmpada de filamento de tungsténio a 2000 °C, a resistência pode ser 10 vezes maior do que a resistência a 25°.

O cobre, um excelente condutor quando é puro, tem a resistividade elétrica de $1,68 \times 10^{-8} \Omega.m$, mas o seu óxido cúprico CuO (óxido preto) é um semicondutor de tipo P, com resistividade média (10^{-4} a $10 \Omega.m$) mas já o seu óxido cuproso, é um semicondutor de elevada resistividade (10 a $10^6 \Omega.m$). Na produção do cobre pode ser incorporado algum oxigénio e formarem-se pequenos núcleos internos destes óxidos que podem ter algum efeito no comportamento elétrico de um cabo de cobre, defeitos que os audiófilos procuram evitar optando por cobre “oxygen free”.

Como os óxidos de cobre são semicondutores do tipo P, a sua resistência elétrica diminui com a temperatura podendo variar cerca de 10 vezes entre 25° e 100°. A ligação entre o óxido de cobre e o cobre forma uma junção semicondutora e esta propriedade foi utilizada para construir díodos retificadores, em 1920, pelo estado-unidense Lars Olai Grondahl (1881 - 1968) que redescobriu o efeito retificador da junção entre o cobre metálico e a camada de óxido cuproso formada por aquecimento ao ar, permitia que a corrente elétrica passasse facilmente num sentido, mas bloqueava-a no sentido inverso.

Um condutor elétrico quente emite eletrões como [Thomas Edison](#) (1847-1931) verificou em 1880 (descobrendo o [efeito Edison](#) de emissão termiônica) ao tentar perceber porque é que as suas lâmpadas de filamento de carbono, no vácuo, escureciam o vidro das lâmpadas. Acabaria por ser [Owen Richardson](#) (1879 - 1959) a explicar fisicamente este fenómeno e a modelá-lo, o que lhe valeu o prémio Nobel da Física em 1928.

O silício puro é um semicondutor e a resistividade à temperatura ambiente aproxima-se de $6,4 \cdot 10^4 \Omega.m$, o que o torna simultaneamente um mau condutor e um mau isolador. A resistividade do óxido de silício (ou dióxido



de silício, SiO_2 à temperatura ambiente é extremamente elevada, entre 10^{14} e $10^{18} \Omega \cdot \text{m}$, sendo um dos melhores isoladores elétricos (dielétricos) conhecidos e, por isso, é o isolador usado na microeletrônica do silício.

O silício dopado, com boro ou com fósforo, baixa consideravelmente a sua resistividade podendo atingir valores mínimos de cerca de 100 vezes a resistividade cobre, nunca atingindo o estatuto de um condutor metálico. O bismuto é o pior metal condutor e é cerca de 70 vezes mais resistivo do que o cobre, mesmo assim é melhor condutor do que o melhor silício dopado.

O melhor isolador conhecido é o Teflon (PTFE), com a resistividade de cerca de $10^{21} \Omega \cdot \text{m}$. Mas, até os melhores isoladores conhecidos, incluindo o vácuo, podem ser percorridos por eletrões, em situações particulares, nomeadamente por tunelamento quântico microscópico, por injeção de eletrões quentes ou por disrupção dielétrica, processos que vamos referir de seguida.

Condução de um isolador por disrupção

A condução por disrupção acontece num isolador quando o campo elétrico ultrapassa a rigidez dielétrica do material. A rigidez dielétrica define o valor a partir do qual o campo elétrico exerce uma força muito grande sobre os eletrões ligados aos átomos, que os arranca e os disponibiliza como corrente elétrica; normalmente este processo é destrutivo para o material. A rigidez dielétrica do teflon, o melhor isolador conhecido, pode variar entre 200 kV/mm (para espessuras finas) e 20 kV/mm (para espessuras grossas), valores que são equivalentes ao do vácuo usado em experiências laboratoriais, enquanto a rigidez dielétrica do ar seco é só de 3 kV/mm.

Para altas temperaturas, acima de 250° , e altas pressões, a mica é melhor isolador do que o teflon.

Quando o campo elétrico ultrapassa o valor da rigidez dielétrica, o mecanismo de condução é regenerativo¹ e, usualmente conduz à queima do material. Se for pelo ar ou um gás origina-se [um arco elétrico](#) que pode ter aplicações na soldadura na fusão de materiais, na criação de lâmpadas elétricas, de plasmas, etc. No espaço, em pequenos satélites a criação de um plasma é usado para fazer pequenos motores iónicos².

Condução de um isolador por injeção de eletrões “quentes”

Este fenómeno ocorre frequentemente em porções de semicondutores com dimensões pequenas e correntes elevadas, mas ocorre também em plasmas frios, como nas lâmpadas fluorescentes.

Se o campo elétrico aplicado for muito forte, os eletrões ganham energia cinética a um ritmo muito mais rápido do que conseguem transferi-la (através de colisões) para a rede de átomos frios do material. Como resultado, a energia dos eletrões expressa em "temperatura" pode atingir milhares de graus enquanto os átomos à sua volta permanecem relativamente frios.

Nas lâmpadas fluorescentes, o gás de eletrões atinge temperaturas equivalentes muito elevadas (ex. 20.000°C), enquanto os átomos pesados de mercúrio e o próprio vidro da lâmpada permanecem praticamente à temperatura ambiente.

Num semicondutor, para estabelecer uma elevada corrente de condução, numa pequena região, pode ser necessário aplicar uma tensão elevada (elevado campo elétrico), os portadores de carga (eletrões e lacunas) podem adquirir uma energia cinética extremamente elevada, o que corresponde a terem uma temperatura

¹ A corrente elétrica é aumentada porque a energia dos eletrões vai libertar mais eletrões dos átomos, conduzindo a um fenómeno de realimentação positiva, em que a tensão é mais pequena, mas a corrente aumenta.

² Num satélite da Starlink existe um motor iónico a árgon que é usado, por vezes, para corrigir a rota do satélite.



equivalente muito elevada - os chamados portadores quentes, embora o caminho que percorrem não esteja quente. Esta elevada energia poderia permitir a injeção desses portadores quentes *Hot Carrier Injection* (HCI), rompendo a barreira de um isolador. Nos transístores MOSFET o óxido de silício (SiO_2) é normalmente usado como isolador da “gate” ou porta de comando do transístor. Se forem gerados “elétrões quentes” no transístor eles teriam tanta energia que poderiam saltar a barreira de potencial e penetrar na camada de óxido de silício onde ficariam aprisionados. Este efeito é mais nefasto no óxido que fica na região do canal que fica mais perto do dreno (potencial no canal mais elevado). Normalmente esses elétrões podem ficar presos no isolador, alterando a tensão de limiar de um transístor, degradando, num processo cumulativo, o futuro desempenho do circuito em que este está envolvido. Esta é a principal causa de degradação temporal dos atuais circuitos e processadores de tecnologia MOSFET, e muito principalmente nas memórias flash, mas não é única, pois também existe o fenómeno da BTI (Bias Temperature Instability).

A BTI ocorre quando o transístor está com tensão constante aplicada na porta durante muito tempo, por exemplo, com tensão de bloqueio permanente. Isto faz aumentar a tensão de limiar do transístor e isso afeta o comportamento do transístor em regime de comutação. Este fenómeno é reversível, o transístor recuperará lentamente, ao contrário da HCI que produz degradação irreversível.

Nos transístores MOSFET, para reduzir o efeito da HCI, nomeadamente na operação a frequências muito elevadas, os projetistas utilizam circuitos de compensação e alteram o projeto físico do transístor — ou recorrem a estruturas LDD (*Lightly Doped Drain*) para reduzir a intensidade do campo elétrico na área mais críticas do transístor junto ao dreno.

Nos transístores de junção bipolares também sofrem com a HCI especialmente na junção base-emissor quando está inversamente polarizada e tem um campo elétrico elevado afetando a corrente inversa de base que deveria ser quase nula. Os portadores de carga quentes sendo fortemente acelerados podem criar danos na superfície de passivação do transístor, feita com óxido de silício, que se manifestará por uma degradação temporal do desempenho do transístor e no aumento do ruído eletrónico gerado.

A supercondutividade

A supercondutividade observada em certos materiais, a temperaturas muito baixas, é responsável pela condução da eletricidade sem resistência e sem perda de energia. A supercondutividade foi teorizada por [J. Bardeen](#) (1908 – 1991), [L. Cooper](#) (1930 - 1924) e [J. Schrieffer](#) (1931 - 2019) em 1957, ao proporem a chamada [teoria BCS](#). Estes cientistas foram galardoados com o prémio Nobel da Física de 1972³.

Os supercondutores exibem o efeito Messner, descoberto em 1933 por [Walther Meissner](#) (1882 - 1974) e [Robert Ochsenfeld](#) (1901 - 1993). Estes materiais exibem o diamagnetismo perfeito criando correntes internas que repelem totalmente os campos magnéticos externos. Estes supercondutores são usados nos [combóios MagLev](#) para proporcionarem [levitação magnética](#).

Normalmente, os elétrões, designados por fermiões na mecânica quântica, são dotados de carga elétrica negativa e por isso repelem-se. Com temperaturas muito baixas, o movimento dos elétrões numa rede cristalina é atraído pelos núcleos positivos diminuindo a força de repulsão entre elétrões, ao ponto de ele poder ser atraído por um segundo elétron, superando a sua repulsão natural, e unindo os dois através de uma energia de vibração da rede chamada fonão. Este par de elétrões designa-se por Par de Cooper. Ao formarem um par, designado por bosão, eles partilham o mesmo estado quântico e comportam-se de maneira diferente dos elétrões deixando de sofrer colisões com os átomos do material, permitindo que a corrente elétrica flua

³ J. Bardeen acabaria por ser o único cientista a receber duas vezes o prémio Nobel na mesma área científica. Já tinha sido um dos três do transístor.



livremente. Embora cada eletrão tenha o seu spin quando se unem num par de Cooper, os seus spins alinham-se em direções opostas, resultando num spin total inteiro ($S=0$ ou $S=1$). Os bosões não obedecem ao [Princípio de Exclusão de Pauli](#) e condensam-se no mesmo estado fundamental quântico macroscópico, movendo-se em conjunto como uma onda coerente.

Os pares de Cooper são fundamentais para o desenvolvimento de várias tecnologias, tais como o fabrico de ímanes supercondutores utilizados em máquinas de ressonância magnética, em aceleradores de partículas e em computação quântica, entre outras aplicações.

As bases da Física Quântica

Em 1900, [Max Planck](#) (1858 – 1947) introduziu uma ideia matemática de que a energia não é emitida de forma contínua, mas sim em pacotes discretos chamados quanta. Usando este conceito, Planck estabeleceu a lei da radiação do corpo negro. Planck considerava isto como um mero truque matemático, mas em 1918 foi galardoado com o prémio Nobel. Einstein, também usando esta conceção da energia discreta conseguiu explicar, em 1905, o efeito fotoelétrico que tinha sido descoberto por [Heinrich Hertz](#) (1857 - 1894) em 1887. Einstein foi galardoado com o premio Nobel de 2021 pois mostrou que a luz era realmente constituída por pacotes de energia. Estes pacotes ou partículas de luz, em 1926, acabariam por ser designados de fótons por [Gilbert N. Lewis](#) (1875 - 1946).

Planck e Einstein foram os fundadores da mecânica quântica, mas estiveram sempre desconfortáveis com a ideia de a mecânica quântica ser mais probabilística do que determinística, mas começaram a surgir provas que os contrariavam.

A Física Quântica baseia-se em cinco conceitos fundamentais: 1- Quantização - a energia não é contínua e pode ser emitida ou absorvida em pacotes discretos chamados quanta; 2- Dualidade Onda-Partícula - partículas de matéria podem se comportar como ondas. Ondas de energia (como a luz) podem se comportar como partículas (fótons); 3- Incerteza – é impossível medir com precisão absoluta, ao mesmo tempo, a posição e a velocidade de uma partícula. Uma medida muito precisa numa destas grandezas implica menos precisão na medida da outra; 4- Superposição Quântica- uma partícula pode existir em múltiplos estados ou locais simultaneamente até que seja medida ou observada. 5)- Emaranhamento ou entrelaçamento quântico - duas partículas podem se interligar de forma que o estado de uma determina instantaneamente o estado da outra, independentemente da distância entre elas.

Condução de um isolador por tunelamento quântico microscópico

O tunelamento eletrónico (ou tunelamento quântico) é um fenómeno da mecânica quântica em que cada eletrão, de forma independente dos outros, atravessa uma barreira de energia potencial que, pelas leis da física clássica, seria impossível de transpor, por não terem energia suficiente para o fazer. A mecânica quântica explica este fenómeno à custa da dualidade onda-partícula, em que o eletrão também se comporta como uma onda. Como a sua posição é probabilística (descrita por uma função de onda), existe uma probabilidade de a "onda" do eletrão “penetrar” e aparecer do outro lado da barreira de energia.

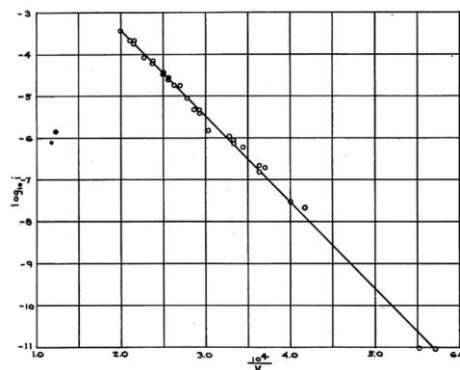
As primeiras observações experimentais de tunelamento quântico microscópico foram realizadas por [Robert Millikan](#) (1868 - 1953), o cientista da experiência da carga do eletrão que lhe deu o prémio Nobel em 1923, e [Carl Eyring](#) (1889 - 1951): Estes dois cientistas verificaram, por volta de 1925, que mesmo à temperatura ambiente, uma ponta metálica fria no vácuo emitia eletrões (frios) se fosse submetida a um campo elétrico extremamente elevado. Os eletrões saíam do filamento, ou da ponta metálica, com uma energia muito inferior à exigida pelo trabalho de extração eletrónica do condutor. No artigo publicado, em [janeiro de 1926, na Physical](#)



[Review](#), Millikan e Eyring experimentalmente concluíram a existência de uma relação exponencial entre a corrente e o inverso da intensidade do campo aplicado. Em maio de 1928, Millikan e Eyring e [Samuel S. Mackeown](#) (1895 – 1952) publicaram o artigo “[Fields Currents from Points](#)” com a teoria destas correntes e a respetiva confirmação experimental.

O gráfico da Fig. 1 pode ser modelado pela expressão matemática: $\ln\left(\frac{J}{E^2}\right) = A - \frac{B}{E}$

Em que A e B são constantes que dependem do material da ponta metálica J é a densidade de corrente resultante do campo elétrico E .



O célebre gráfico de Millikan Lauritsen

Em 1928, Millikan e [Charles Lauritsen](#) (1862 – 1968) estudaram o relacionamento entre a emissão termiônica e a emissão de eletrões frios e concluíram que não existe interação, sendo dois fenómenos independentes.

Publicaram o artigo “[Relations of Field Currents to Thermionic Currentes](#)” na *Physical Review*, vol 14 n.8, onde reuniram todos os dados que a equipa tinha obtido experimentalmente desde 1925 e desenvolveram expressões empíricas que são válidas para quando os dois efeitos estão simultaneamente presentes.

Ao desenharem o gráfico do logaritmo da corrente elétrica em função do inverso da tensão aplicada, obtiveram uma linha reta perfeita. Estes investigadores não conseguiram explicar este comportamento, mas o gráfico ficou conhecido por gráfico de Millikan-Lauritsen.

Todavia, antes da publicação deste artigo, [Robert Oppenheimer](#) (1904 - 1967), em 1927, já tinha descoberto esta relação $I(V)$ ao analisar os dados experimentais resultantes dos trabalhos dos investigadores anteriores. Oppenheimer publicou [isso no artigo](#) da *Physical Review* de janeiro de 1928.

Entretanto, [Luís De Broglie](#) (1882 – 1997) (Luís Raymond, duque de Broglie), sugeriu e postulou em 1924, na sua tese de doutoramento, que toda a matéria tinha uma característica ondulatória. Esta hipótese foi confirmada, em 1928, para os eletrões, pelos cientistas [Clinton Davisson](#) (1881 - 1957) e [Lester Germer](#) (1896 - 1971) através da [experiência Davisson-Germer](#), ensaiada entre 1923 e 1927, que provou que os eletrões se difratavam como as ondas eletromagnéticas. Nesta experiência, um feixe de raios de eletrões foi dirigido para um alvo de níquel cujo ângulo relativo ao feixe podia ser alterado. Estes investigadores obtiveram figuras de interferência típicas das ondas eletromagnéticas, em especial da luz, provando que à partícula eletrão está associada uma onda eletromagnética. Em 1937, Davisson e [George Thomson](#) (1892 - 1975), filho do célebre cientista [J.J. Thomson](#) (1856 – 1940), ganharam o prémio Nobel pelos trabalhos realizados sobre difração de eletrões em cristais.

A explicação do tunelamento microscópico pela física quântica

Pouco tempo depois de serem conhecidos os trabalhos experimentais da equipa de Millikan, no dia 1 de maio de 1928, [Ralph. H. Fowler](#) (1889 - 1944) e [Lothar Nordheim](#) (1899 - 1985), depois de analisarem os resultados obtidos por Millikan e a sua equipa, e publicaram uma teoria baseada na mecânica quântica que explicava o gráfico de Millikan-Lauritsen do tunelamento microscópico. Posteriormente, este gráfico também ficou conhecido como gráfico de Fowler-Nordheim. Esta teoria foi modificada ao longo dos anos, para ser cada vez mais precisa ([ver, por exemplo estes trabalhos](#)). A teoria baseia-se na deformação da barreira de energia que deixa de ser retangular abrupta para ter um decaimento triangular.



As primeiras aplicações do efeito do tunelamento quântico microscópico

I – O díodo de túnel

O primeiro dispositivo prático que foi baseado no tunelamento quântico microscópico foi o díodo túnel, criado em agosto de 1957, pelo físico japonês [Leo Esaki](#) (1925 - 1973) enquanto trabalhava na Tokyo Tsushin Kogyo (que hoje é a Sony). Em 1973, Esaki foi galardoado com o prêmio Nobel da Física, juntamente com [Ivar Giaever](#) (1929 – 2025) e [Brian Josephson](#) (1940 - ...) pelos trabalhos realizados sobre o tunelamento quântico microscópico, nos casos de Esaki e de Giaever (meio prêmio Nobel) e pela descoberta do tunelamento eletrônico macroscópico, no caso da descoberta de Josephson do efeito [Josephson](#) (meio prêmio Nobel).

Até ao aparecimento do díodo Esaki, o tunelamento quântico era apenas uma teoria matemática abstrata. O díodo Esaki foi a primeira prova física que resultou num dispositivo comercial de que os elétrons podiam realmente "atravessar", como ondas, barreiras eletrônicas sólidas.

O díodo de Esaki foi obtido a partir de uma dopagem muito forte de germânio. Esta dopagem gerou uma junção PN extremamente abrupta, para a época que, por sua vez, resultou numa zona de depleção extremamente fina (cerca de 10 nm). É nesta zona vazia de cargas que se dá o efeito de túnel. O tunelamento, em si, é atômico e ocorre com elétrons individuais (por isso se designa por tunelamento microscópico). Os elétrons atravessam a barreira de potencial, sem terem energia suficiente para poderem saltar essa barreira, mesmo à temperatura ambiente.

A principal característica do díodo de túnel é a de que a sua característica $i(V)$ apresenta uma região de resistência incremental negativa, essencial para poder amplificar sinais e criar oscilações elétricas. Como isso acontece na região de depleção extremamente fina (nanométrica) o díodo de túnel pode operar em frequências extremamente elevadas (Giga e Tera Hertz) pois o tempo de transito dos elétrons na barreira é extremamente pequeno.

Os díodos túnel são atualmente os dispositivos eletrônicos mais rápidos para realizar amplificadores e osciladores eletrônicos capazes de operar em frequências da ordem dos Tera Hertz, nomeadamente com os díodos de túnel ressonantes.

Os [díodos de túnel ressonantes](#) são constituídos por várias barreiras eletrônicas resultantes de diferentes camadas de materiais. São compatíveis com as atuais tecnologias microeletrônicas baseadas em silício (Si) e em silício-germânio (Si/SiGe). Na sua característica $i(V)$, apresentam várias regiões de resistência positiva e de resistência negativa o que pode promover oscilações eletrônicas internas em frequências extremamente elevadas ([até 170 GHz com consumos de frações de mW](#)). Pode [ver aqui um exemplo experimental](#) de aplicação de um díodo de túnel ressonante embora, neste caso, seja numa frequência relativamente baixa.

II – O microscópio de Varrimento por Tunelamento (STM).

Em 1981, dois investigadores da IBM Research em Zurique, [Gerd Binnig](#) (1947 - ...) e [Heinrich Rohrer](#) (1933 – 2013) construíram o primeiro STM tendo sido galardoados com o Prêmio Nobel de Física de 1986.

A empresa IBM aplicou o tunelamento microscópico na criação do [Microscópio de Varrimento por Tunelamento](#) (STM), em que se usa o tunelamento microscópico de elétrons através de uma agulha muito afiada (idealmente só com um átomo na ponta) para "ver a topologia da superfície" e, até, mover átomos individuais de um dado material.

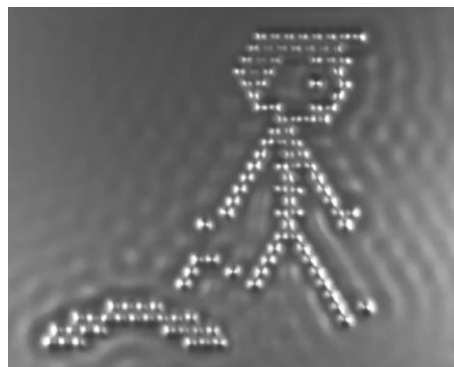


O princípio de funcionamento do STM usa as bases teóricas do tunelamento de Fowler, Nordheim e de Oppenheimer. Um sistema mecânico ultra preciso, controlado por atuadores piezoelétricos, move, no vácuo, uma agulha em 3 eixos (x, y, z) sobre a superfície do material a uma distância de cerca de 1 nm. A aplicação de uma tensão elétrica entre a agulha e a superfície a analisar, gera um campo elétrico muito intenso e origina uma corrente. Controlando o eixo Z (distância à superfície do material) e procurando manter a corrente constante, manter-se-á a distância entre a ponta e a superfície do material; a leitura da posição no eixo dos Z dá o relevo da superfície da substância a analisar. A leitura das 3 tensões de controlo dos atuadores piezoelétricos dá as coordenadas X, Y, Z do ponto em análise da superfície a analisar.

A manipulação de átomos com o STM pode ser executada, a temperaturas próximas do zero absoluto para que os átomos praticamente não vibrem, aproximando a agulha do átomo e puxá-lo com um pulso de tensão para a agulha que o pode levar para outro lado, ou empurrá-lo no sítio.

Em 1989, na IBM, um grupo de cientistas usaram um STM para mover 35 átomos individuais de Xénon, escrevendo o logótipo "["IBM" átomo por átomo](#)"⁴.

Mais tarde, cientistas da IBM, foram mais longe e fizeram um filme usando o STM para manipular e mostrar a nova posição dos átomos. Foi feita uma ampliação de 100 milhões de vezes para que hoje possamos ver esse filme "[A Boy and His Atom](#)". Os átomos de monóxido de carbono, (CO, um átomo de carbono e outro de oxigénio) são os pontos brilhantes e foram movidos sobre uma placa de cobre (o fundo cinzento). [Foram feitos 242 quadros de exposição STM](#) e cada quadro demorou entre 1 e 10 minutos a posicionar os cerca de 40 átomos de CO. A figura do rapaz tem a altura de 5 nm. O filme foi lançado oficialmente no dia 1 de maio de 2013 e foi logo certificado como Recorde Mundial do Guinness como o menor filme de animação do mundo.



Filme "A Boy and its Atom" (IBM).

[Veja aqui a construção de um STM caseiro](#)

O tunelamento macroscópico

O tunelamento macroscópico pode ser observado a baixas temperaturas pois estas ajudam a que o efeito térmico não mascare o fenómeno de tunelamento.

Na década de 1930, [Albert Einstein](#) (1879 - 1955) e [Erwin Schrödinger](#) (1887 - 1961), descobriram teoricamente um fenómeno estranho que designaram por entrelaçamento ou emaranhamento quântico de partículas. O entrelaçamento, implica que duas partículas separadas permanecem conectadas sem estarem em contato direto. Einstein chamou ao entrelaçamento uma "ação fantasmagórica à distância", pois as partículas pareciam comunicar mais rápido que a velocidade da luz. Einstein acreditava que as teorias da mecânica quântica não estavam completas pois não se conseguia explicar o entrelaçamento de partículas.

Em 1935, Albert Einstein, [Boris Podolsky](#) (1896 – 1966), [Nathan Rosen](#) (1909 – 1986), publicaram um artigo que ficou conhecido pelo paradoxo EPR, onde tentavam provar que a mecânica quântica estava incompleta e que deveriam existir "variáveis ocultas", locais, ainda não descobertas, que determinavam o comportamento das partículas. Seis meses depois, [Niels Bohr](#) (1895 – 1962) salientou que os argumentos dos cientistas do EPR não

⁴. Este feito foi [há 37 anos](#).



eram válidos pois duas partículas interagindo formam um sistema indivisível até que uma medição seja feita, logo não se pode isolar uma partícula sem considerar o contexto experimental completo.

[Niels Bohr](#) (1895 – 1962), Schrödinger e [Wendell Furry](#) (1907 - 1984), tentaram explicar o fenômeno de entrelaçamento que resultava da teoria da mecânica quântica, como uma propriedade essencial, que teimava em não ser experimentalmente demonstrável.

A luz ao fundo do túnel apareceu quando o físico, [John Stewart Bell](#) (1928 - 1990), em 1964, estabeleceu, através [de um teorema](#), agora designado por teorema de Bell, que apesar de a mecânica quântica não permitir enviar sinais com velocidade superior à da luz, o entrelaçamento poderá manifestar-se e ser detetado experimentalmente através da medição de correlação entre objetos distantes. Seguiram-se vinte e cinco anos de experiências conclusivas por três cientistas J. Clauser; A. Aspect e A. Zeilinger que lhe valeram o prêmio Nobel da Física em 2022, pelas razões referidas de seguida.

Em 1969, [John F. Clauser](#) (1942 - ...) e os seus colegas, [Michael Horne](#) (1943 - 2019), [Abner Shimony](#) (1928 – 2015) e Richard Holt idealizaram a [desigualdade CHSH](#) que permitiria verificar experimentalmente infrações à desigualdade de Bell. Clauser, e o seu estudante de PhD [Stuart Freedman](#) (), durante 1970 e 1971 [realizaram a primeira experiência](#) de laboratório onde observaram uma violação da desigualdade de Bell. Concluiu-se que a medição de propriedades de partículas entrelaçadas permitiria provar que a mecânica quântica estava completa e não necessitava da hipótese das "variáveis ocultas locais" que foram propostas por Einstein e outros.

Em 1982, [Alain Aspect](#) (1947 - ...) aperfeiçoou a experiência de Clauser, eliminando algumas críticas sob o procedimento usado, criando a [experiência Aspect](#) entre 1980 e 1982, provando que a não localidade quântica é real e que o emaranhamento quântico é um fenómeno real.

Em 1997, [Anton Zeilinger](#) (1945 - ...) e a sua equipa de investigação conseguiram demonstrar, também pela primeira vez, o teletransporte quântico, transferindo informação entre partículas distantes. Concluíram que é possível transferir a informação de um estado quântico de uma partícula para outra à distância, sem mover qualquer matéria física; com isto, inicia-se o caminho para a realização de computadores e internet quânticos.

Em 2016, uma equipa chinesa liderada por [Pan Jianwei](#) (1970 - ...) lançou o satélite de comunicações [Micius](#), para provar que é possível transmitir chaves quânticas de segurança “*Quantum Key distribution*” (QKD), utilizando o entrelaçamento quântico entre fótons separados por milhares de quilómetros, envolvendo as comunicações por satélite. Com o Micius demonstrou-se a vantagem da computação quântica, transformando a perspetiva teórica de uma rede quântica global numa realidade. Empresas dos EUA e da China estão muito interessadas na computação e nos centros de [dados colocados no Espaço](#).

Em 2025, o prêmio Nobel da Física foi atribuído a três cientistas que desenvolveram o tunelamento macroscópico e deram contributos fundamentais para a mecânica quântica. Conseguiram que milhões de eletrões emparelhados, os chamados [pares de Cooper](#) da supercondutividade, a moverem-se juntos, como se fossem uma única partícula, num supercondutor. É uma corrente ou um fluxo magnético que coletivamente faz o efeito de túnel numa barreira isolante. Isto é a base dos [qubits](#) supercondutores usados nos computadores quânticos da IBM e da Google, que lhes valeu o Prémio Nobel da Física de 2025. Mais detalhadamente:

[John Clarke](#) (1942 - ...) desenvolveu dispositivos quânticos supercondutores nomeadamente os [SQUID](#) supersensíveis.

[Michele Devoret](#) (1953 - ...) desenvolveu várias arquiteturas [de computação quântica supercondutoras](#).



[John Martinis](#) (1958 - ...) liderou uma equipa que desenvolveu um computador quântico supercondutor no Laboratório de IA Quântica da Google. O [Sycamore](#) é um processador quântico programável desenvolvido pela divisão de IA Quântica da Google. O processador utiliza 53 qubits supercondutores funcionais para processar cálculos incrivelmente complexos e específicos, muito mais rápido do que os melhores computadores clássicos. Segundo a Google, o Sycamore resolveu em 200 segundos um problema que demoraria 10 000 anos a resolver por um computador clássico⁵. A equipa alegou ter obtido a primeira [evidência de supremacia quântica em 2019](#).

Estas duas últimas afirmações, feitas pela Google, foram contestadas por vários cientistas.

Já em 2026, o cientista chinês Pan Jianwei [foi premiado pela UNESCO](#) pelos seus trabalhos na área da computação quântica.

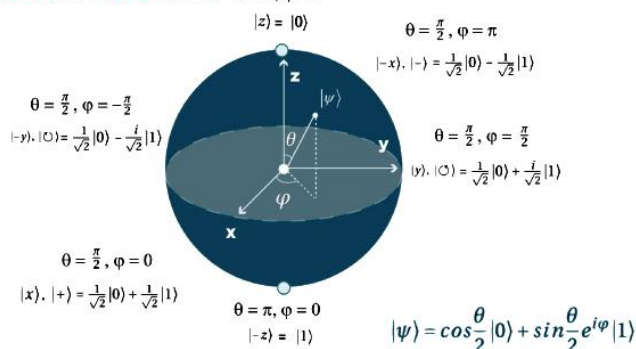
No reino dos qubit

O termo “qubit” é atribuído aos físicos [Benjamin Schumacher](#) () e [William Wootters](#), em 1992.

O qubit para [a computação quântica](#) é o que o termo [bit](#) é para a computação tradicional.. Qubits são geralmente criados pela manipulação e pela medição de partículas quânticas. Um qubit é uma unidade abstrata de informação quântica. Pode ser codificado em diferentes graus de liberdade de um sistema físico, por exemplo na polarização de uma onda. Estas partículas quânticas são os mais pequenos elementos conhecidos do universo físico, nomeadamente átomos, fótons, elétrons, íões presos, e os circuitos supercondutores para os quais se aplicam as leis da mecânica quântica.

Os qubit tem a informação de “0” ou “1”, afetadas de uma probabilidade. O qubit pode estar simultaneamente em dois estados chamado “superposition”. A representação geométrica de um qubit pode ser feita pela [esfera de Bloch](#) proposta por [Felix Bloch](#) (1905 - 1983) pois esta permite visualizar tridimensionalmente um qubit. Ela serve para visualizar o estado de um sistema quântico de dois níveis. “0” (polo Norte) e “1” (polo Sul). O qubit é representado por um vetor que parte do centro da esfera para a superfície e pode estar em qualquer dos estados com probabilidades diferentes. O qubit pode ser o estado de partículas elementares pode ser, por exemplo, o spin de um elétron ou o ângulo de polarização da luz de um fóton, ou o estado de um fermião, por exemplo a majorana.

Qubit na esfera de Bloch $\theta = 0, \varphi = 0$



Os computadores quânticos são computadores analógicos, digitais ou híbridos, que processam os qubits. Atualmente, a computação quântica está o rubro e alguns observadores consideram que é liderada pela China. Em 2021, as equipas de Pan Jianwei construíram dois computadores quânticos, um baseado em circuitos supercondutores e o outro baseado em fótons. O computador Zuchongzhi 2.1, que usou supercondutores, foi considerado um milhão de vezes mais rápido que o [Sycamore](#) do Google.

Há diferentes tipos de tecnologia que podem ser usadas na realização dos computadores quânticos. A Microsoft, por exemplo, [investiga os computadores quânticos](#) usando as subpartículas fermiões propostas em 1937 por

⁵ embora essa estimativa tenha sido contestada e ser reduzida com o uso de algoritmos clássicos posteriores. Segundo a IBM isso poderia ser feito em 2,5 dias.



[Ettore Majorana](#) (1906 - 1938). A Microsoft conseguiu aproximar-se deste conceito, criando as partículas designadas por majoranas que serão a base dos [computadores quânticos da Microsoft](#).

Em 2025, o [computador quântico, construído pelo Caltech](#) tinha 6100 qubits e operava à temperatura ambiente. Pode ver aqui uma pequena explicação da organização deste computador trabalhando com átomos.

Já em 2026, o computador [Jiuzhang 4.0](#), o mais poderoso computador quântico fotónico Chinês fez um cálculo complexo em 25 microssegundos, quando o mais poderoso computador clássico, o [El Capitan](#), demoraria 10^{42} anos.

Na China, em 2026, foi desenvolvido o Hanywuan-2, o [primeiro computador quântico “dual core”](#), em que cada núcleo tem 100 qubit, podendo os núcleos trabalhar em paralelo ou em série. Todavia, não existe confirmação científica independente deste feito.

Podemos pensar que a computação quântica está no início, mas têm sido obtidos resultados extraordinários por computadores experimentais. Talvez, um dia, o nosso computador de secretária seja um computador quântico.

Agradecimentos

Os meus agradecimentos ao Prof Emanuel Cruzeiro do IST, investigador do IT, que corrigiu muitos erros existentes na versão original deste texto.

[Este documento visto pela AI da Google](#)

Podcast .-. [10000 anos num piscar de olhos](#)

Powerpoint - [Beyond Classical Resistance](#)

Vídeo - [Evolução da Condução](#)