

rt Einstein

O que é a informação quântica?

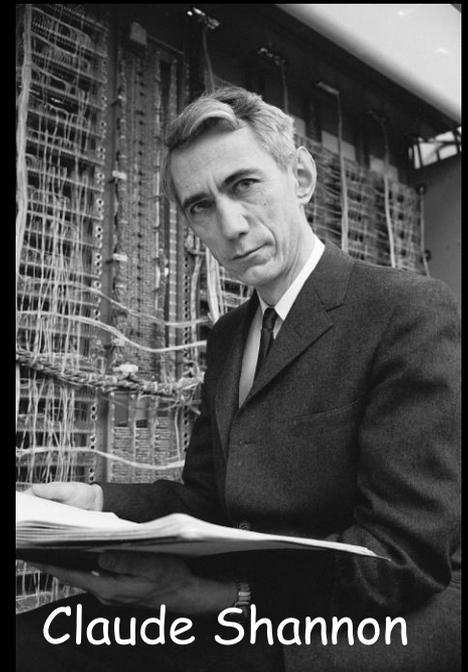
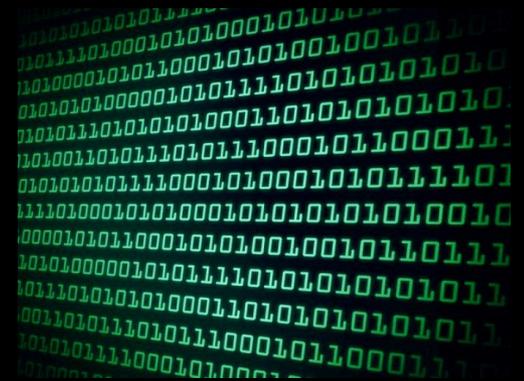
Luiz Davidovich
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro

1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110
1100111011100011001010111001101110



O QUE É INFORMAÇÃO?

- **In+formar: formar dentro, organizar**
- Claude Shannon (1948): Aquilo que reduz a incerteza
- Diferença em organização ou incerteza antes ou depois de receber uma mensagem



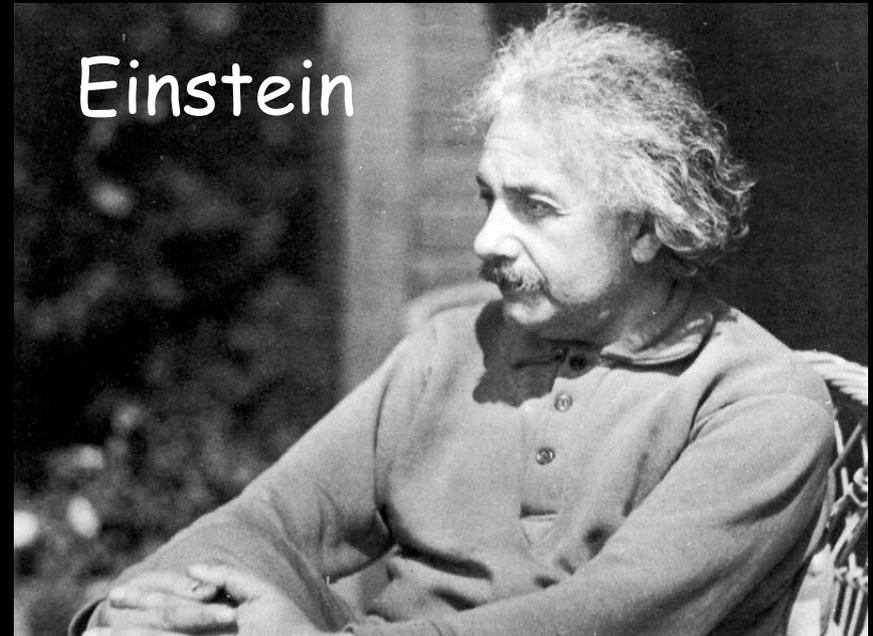
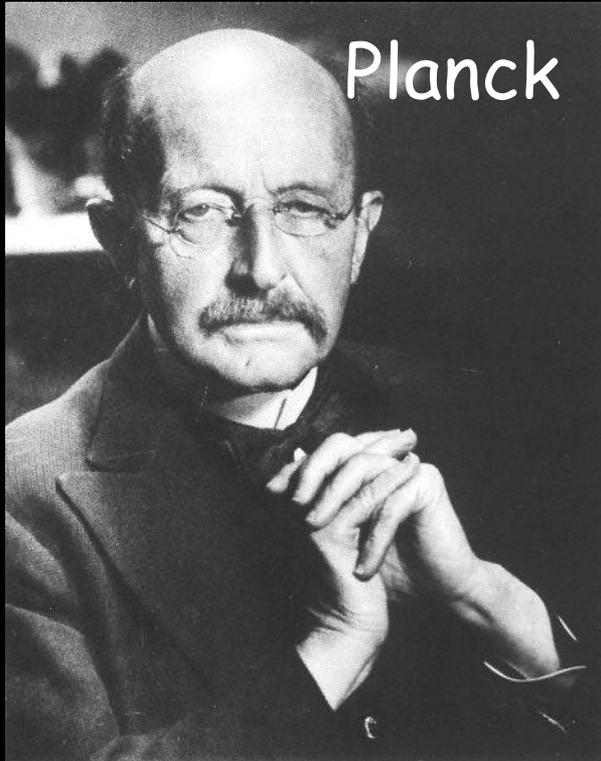
Claude Shannon

INFORMAÇÃO CLÁSSICA

A unidade elementar de informação é o bit, que tem somente dois estados 0 e 1 (sim ou não...). Qualquer texto pode ser codificado por uma sequência de bits



A revolução dos quanta



$$E = hf, \quad p = hf / c = h / \lambda$$

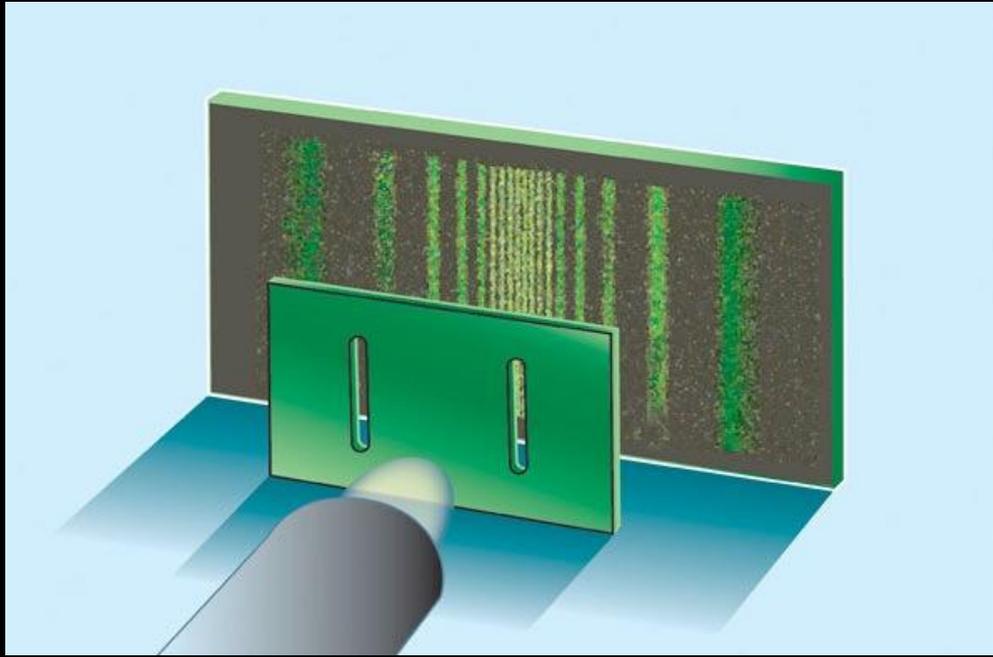
Planck, 1900, Einstein, 1905: Luz comporta-se como se fosse constituída de corpúsculos (fótons), com energia e momentum proporcionais à frequência (cor).

Einstein e a luz

- Manifestação de Einstein no 1º Congresso de Solvay (1911):
"Insisto no caráter provisório desse conceito [quanta de luz] que não parece ser reconciliável com as conseqüências experimentalmente verificadas da teoria ondulatória".
- Proposta indicando Einstein para a Academia de Ciências Prussiana (assinada por Planck, Nerst, Rubens e Warburg), 1913:
- "Que ele tenha algumas vezes errado o alvo em suas especulações, como por exemplo em sua hipótese dos quanta de luz, não pode realmente ser usado contra ele, pois não é possível introduzir idéias realmente novas mesmo nas ciências mais exatas sem algumas vezes assumir um risco".

Luz: Comportamento ondulatório

Luz+luz=sombra!

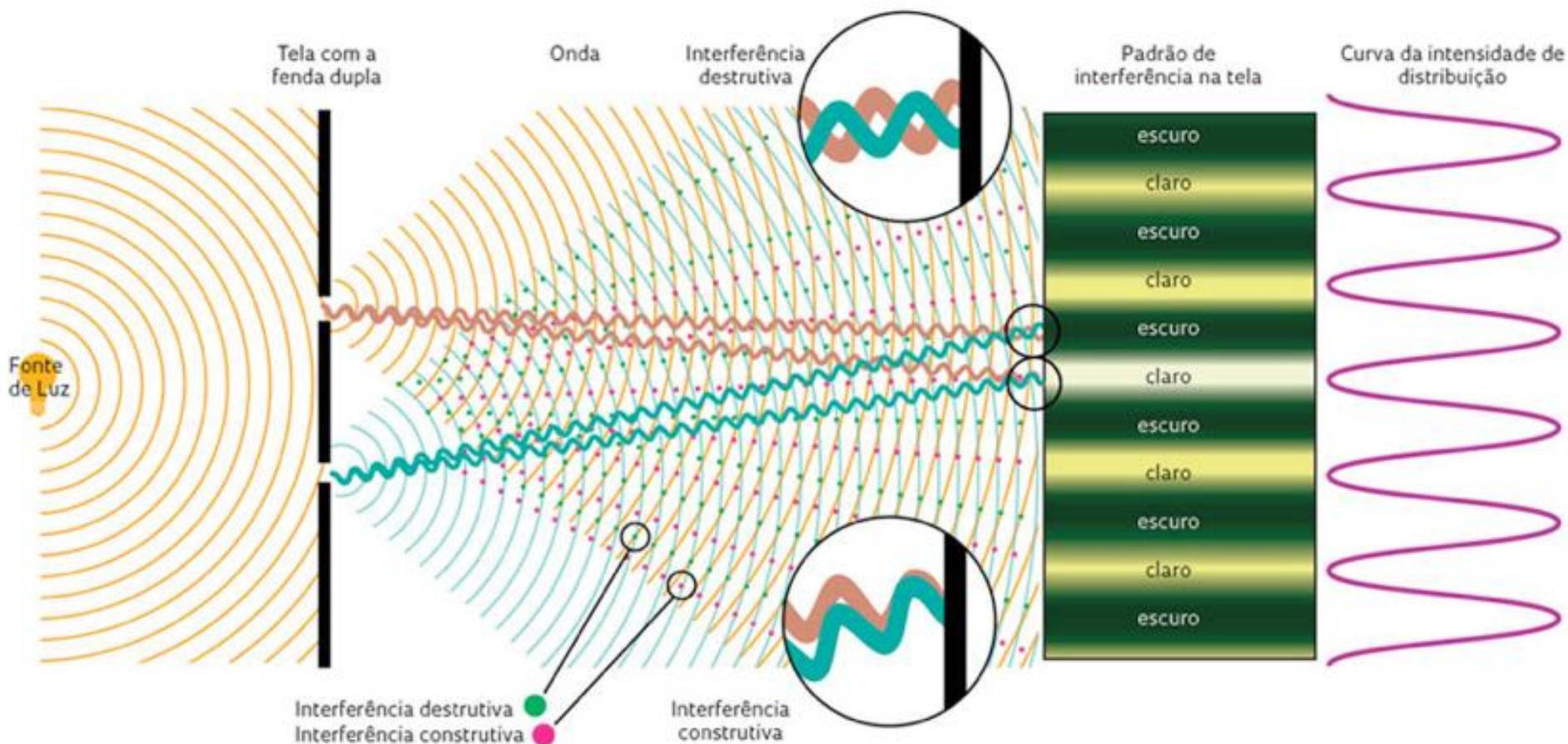


Experimento de Young (1801): Luz emitida por uma fonte passa por um anteparo com duas fendas, e produz em outro anteparo franjas claras e escuras .

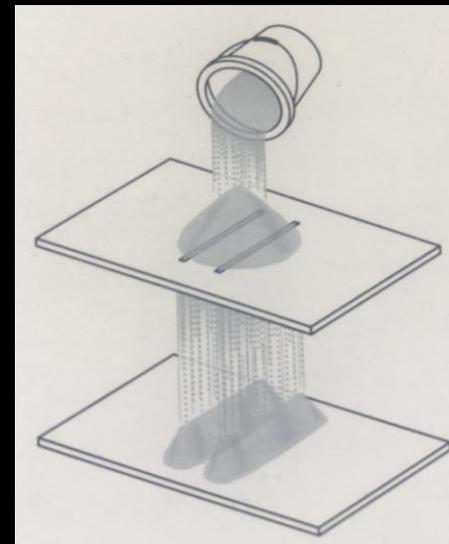
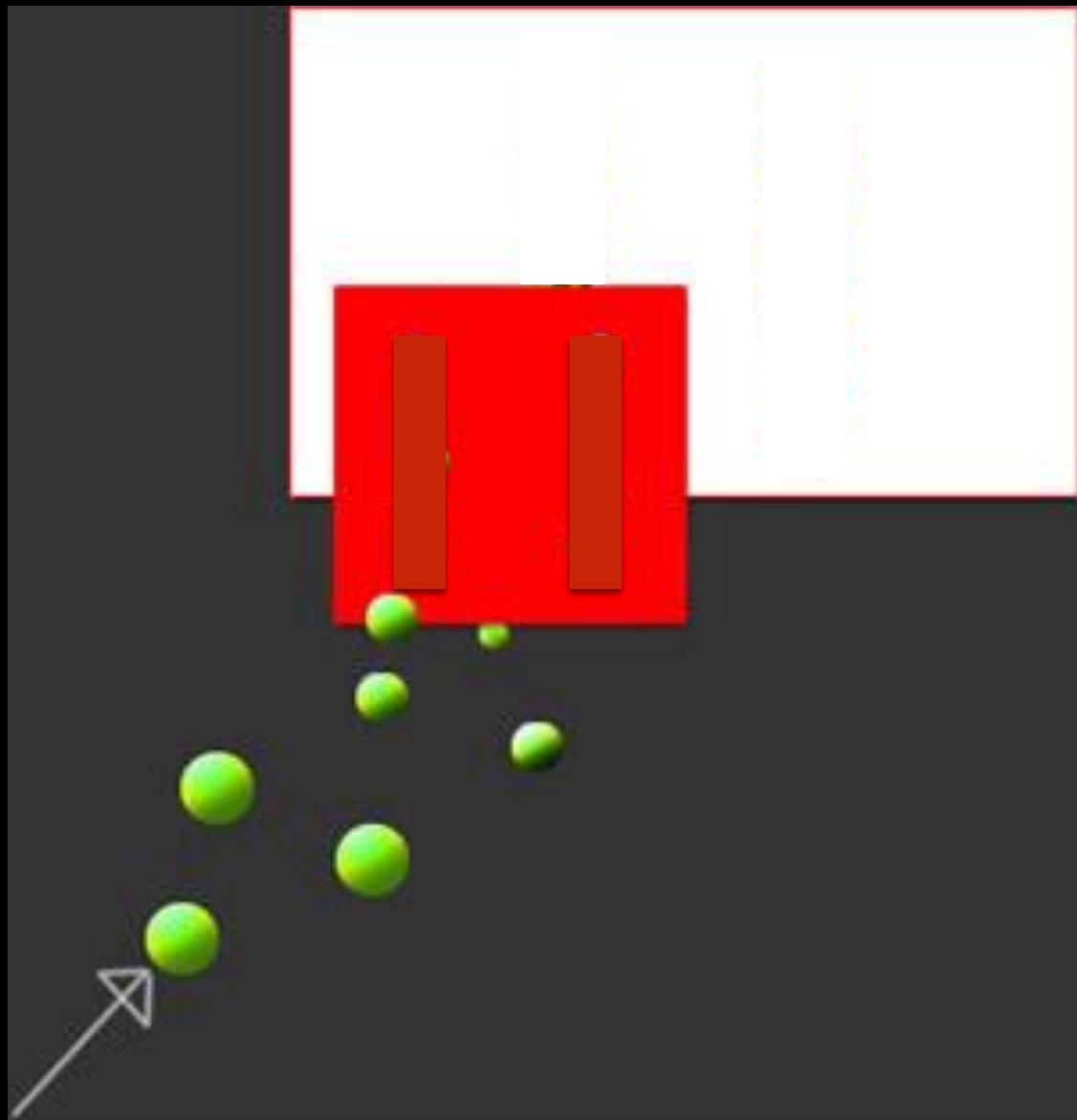
Se taparmos uma das fendas, interferência some!

A interferência quântica

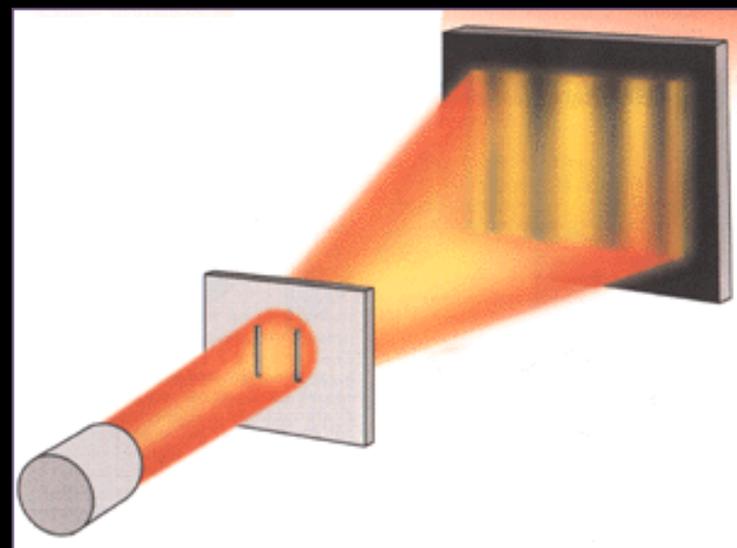
De forma similar a ondas na superfície de um lago, a luz atravessa uma fenda dupla e se recombina como se em cada buraco houvesse uma fonte luminosa. Essa interação gera os chamados padrões de interferência



Como seria com partículas?



Em vez de:



De Broglie: Ondas de matéria

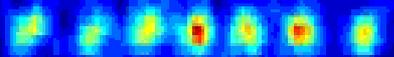
- ▣ De Broglie, 1923:
Estendeu a dualidade onda-partícula para partículas subatômicas, como os elétrons.
- ▣ Deve-se associar ondas a partículas!



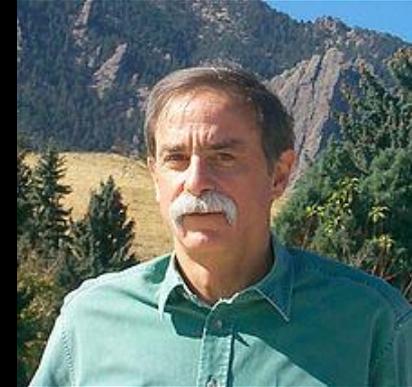
FINAL DO SÉCULO 20: SEGUNDA REVOLUÇÃO QUÂNTICA

Átomos e ions aprisionados

R. Blatt, D. Wineland

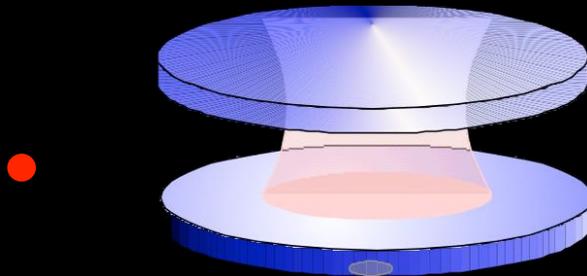


R. Blatt



David Wineland
(Nobel 2012)

Eletrodinâmica quântica
em cavidades



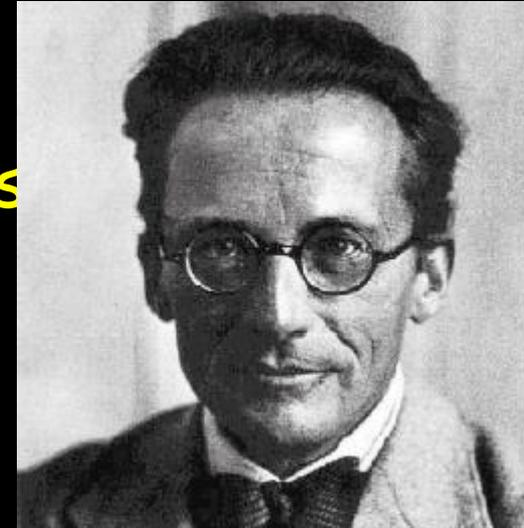
Chapman, Haroche, Kimble,
Rempe, Walther



Serge Haroche
(Nobel 2012)

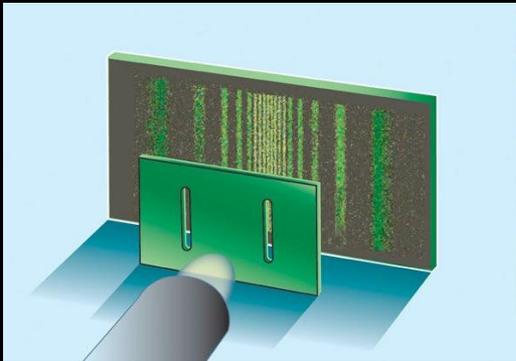
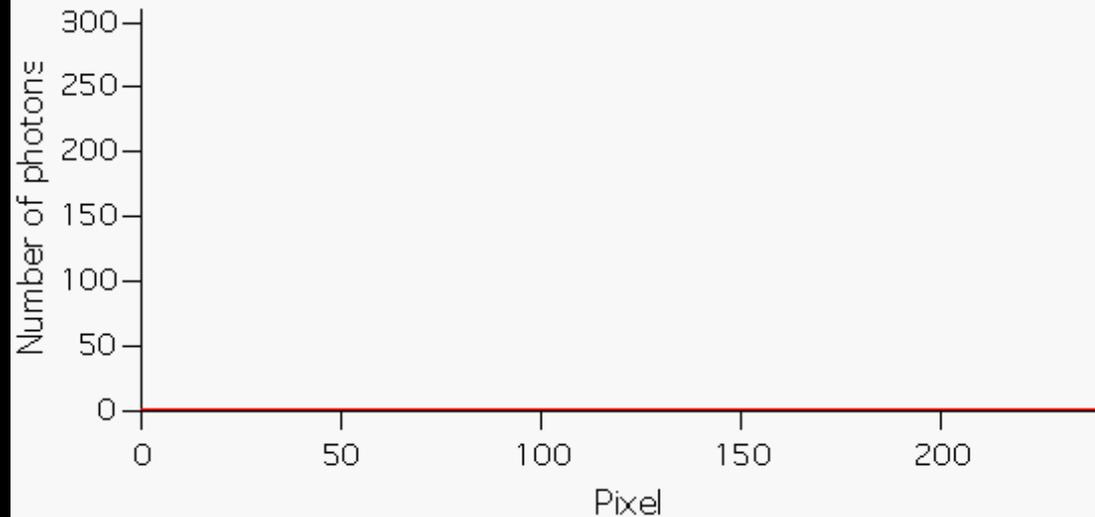
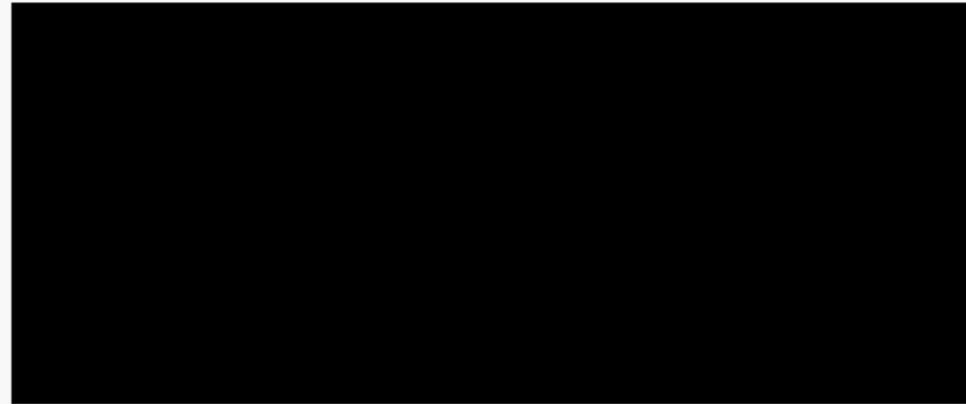
50 ANOS ANTES...

Schrödinger, 1952: "... Nunca realizamos experimentos com um único elétron ou átomo ou uma pequena molécula. Em experimentos pensados supomos às vezes que isso é possível; invariavelmente, isso leva a ridículas consequências. {...} Dizer que se realizam experimentos com partículas únicas é equivalente a dizer que se criam Ictiossáurios no Jardim Zoológico". (British Journal of the Philosophy of Sciences, vol. 3, 1952)



Fantástica premonição!

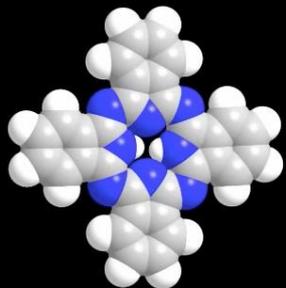
Luz: Corpúsculos ou ondas?



Real-time single-molecule imaging of quantum interference

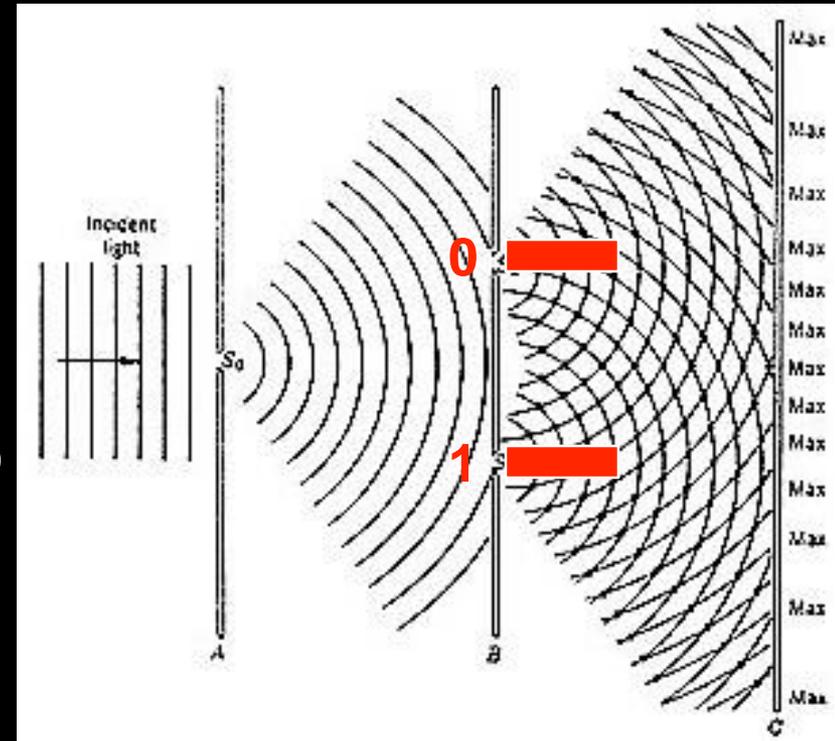
Thomas Juffmann, Adriana Milic, Michael Müllneritsch, Peter Asenbaum, Alexander Tsukernik, Jens Tüxen, Marcel Mayor, Ori Cheshnovsky & Markus Arndt

Single molecules in a quantum movie



Ondas de probabilidade (Max Born - 1926): Renúncia ao determinismo clássico

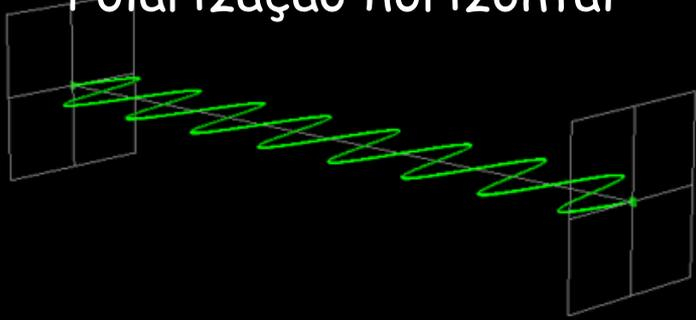
- Onda associada à partícula descreve **a probabilidade** de que a partícula seja encontrada em determinada região.
- **Dois caminhos possíveis: interferência!**
- E a partícula, passa por um caminho ou pelo outro? Quem sabe ela se divide, e passa pelos dois ao mesmo tempo?



Detetores mostram que partícula passa por uma fenda ou outra. Mas ao identificarmos por qual fenda passou a partícula, interferência some! → Complementaridade

Polarização da luz

Polarização horizontal



Polarização a 45°



Polarização vertical



- Luz emergente polarizada ao longo do eixo do polarizador

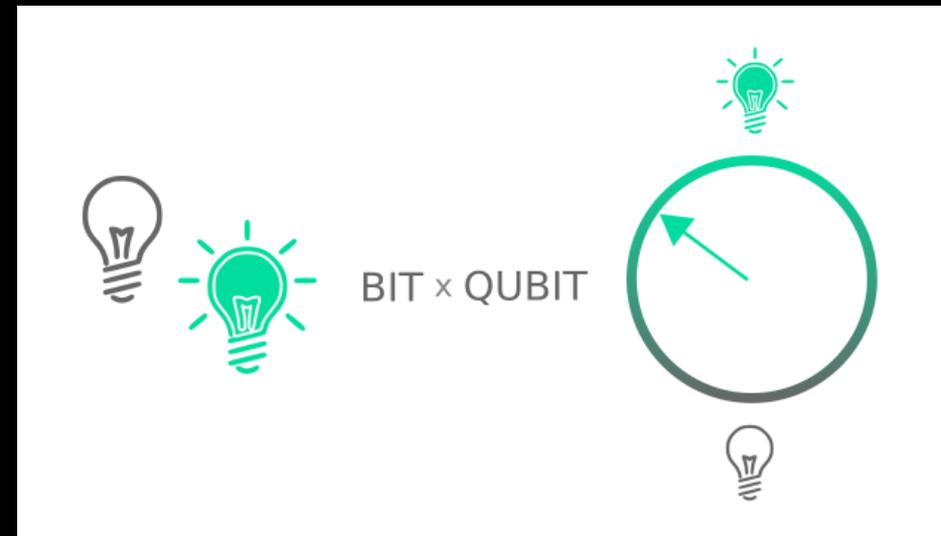
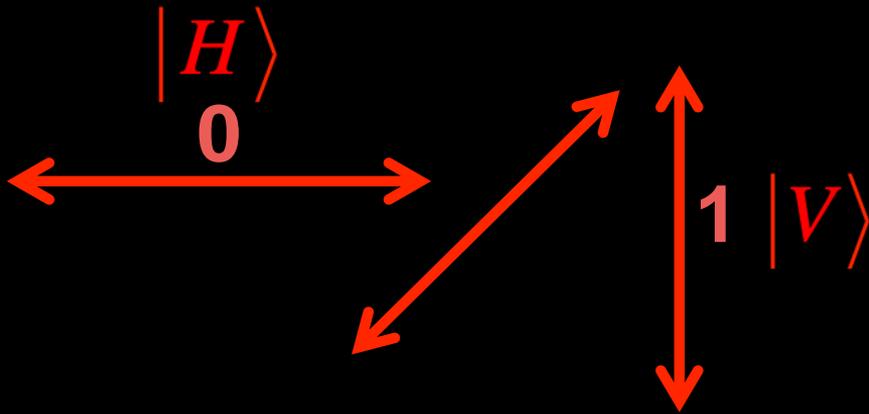


Medindo a polarização da luz

Polarizador

BITS → QBITS

Polarização de um único fóton como bit clássico: $H \leftrightarrow 0, V \leftrightarrow 1$



Direção geral de polarização:
qbit — superposição de H e V

1935

The New York Times

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

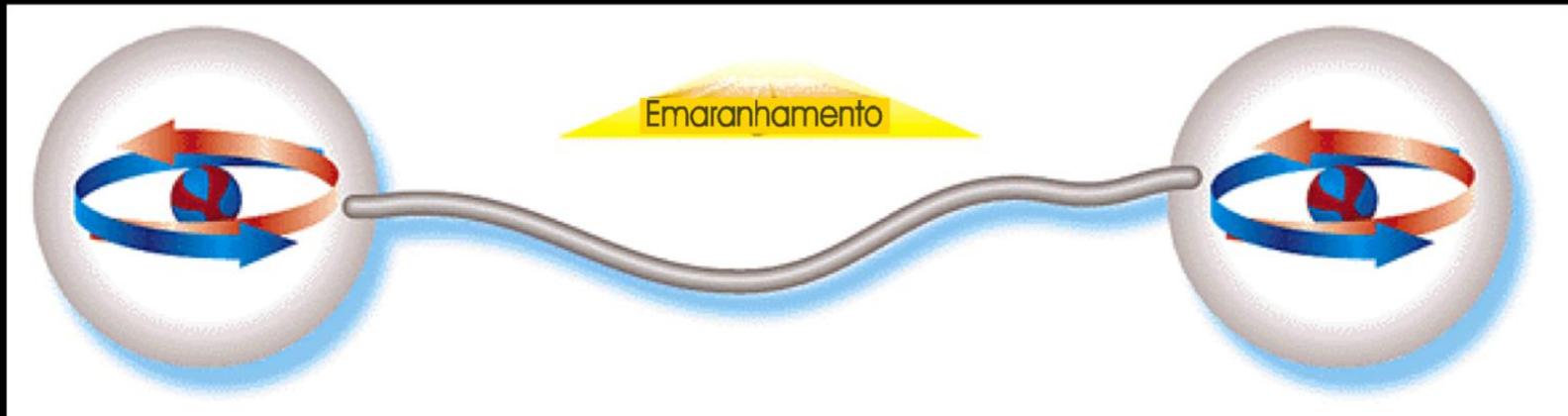
Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

PRINCETON, N. J., May 3.—Professor Albert Einstein will attack science's important theory of quantum mechanics, a theory of which he was a sort of grandfather. He concludes that while it is "correct" it is not "complete."

With two colleagues at the Institute for Advanced Study here, the noted scientist is about to report to the American Physical Society what is wrong with the theory of quantum mechanics, it has been learned exclusively by Science Service.

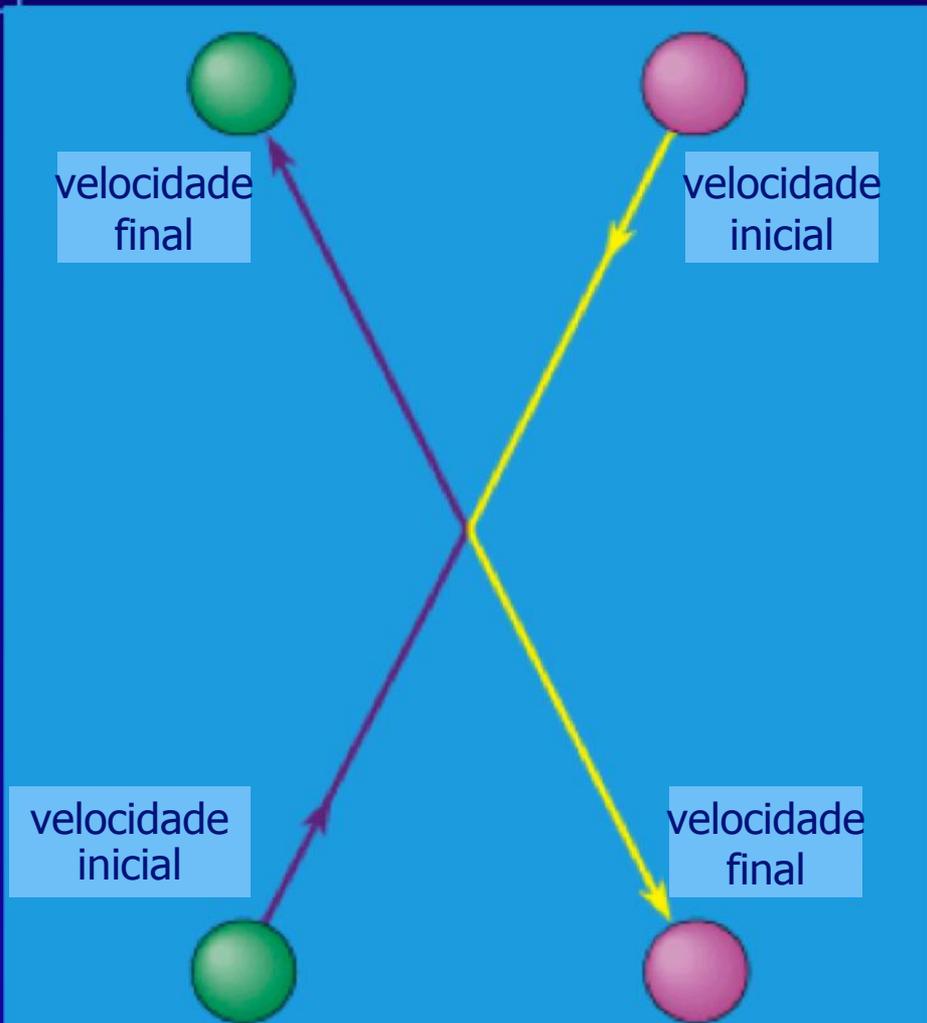
The quantum theory, with which science predicts with some success inter-atomic happenings, does not meet the requirements for a satisfactory physical theory, Professor Einstein will report in a joint paper with Dr. Boris Podolsky and Dr. N. Rosen.

ESTADOS EMARANHADOS



Estado individual de cada sistema não é conhecido: apenas estado global

Situação clássica X situação quântica



Propriedades individuais:

- ◆ Velocidade de cada partícula
- ◆ Posição de cada partícula

Propriedades globais:

- ◆ Soma das velocidades
- ◆ Posição relativa

Schrödinger e o emaranhamento

Naturwissenschaften 23, 807 (1935)

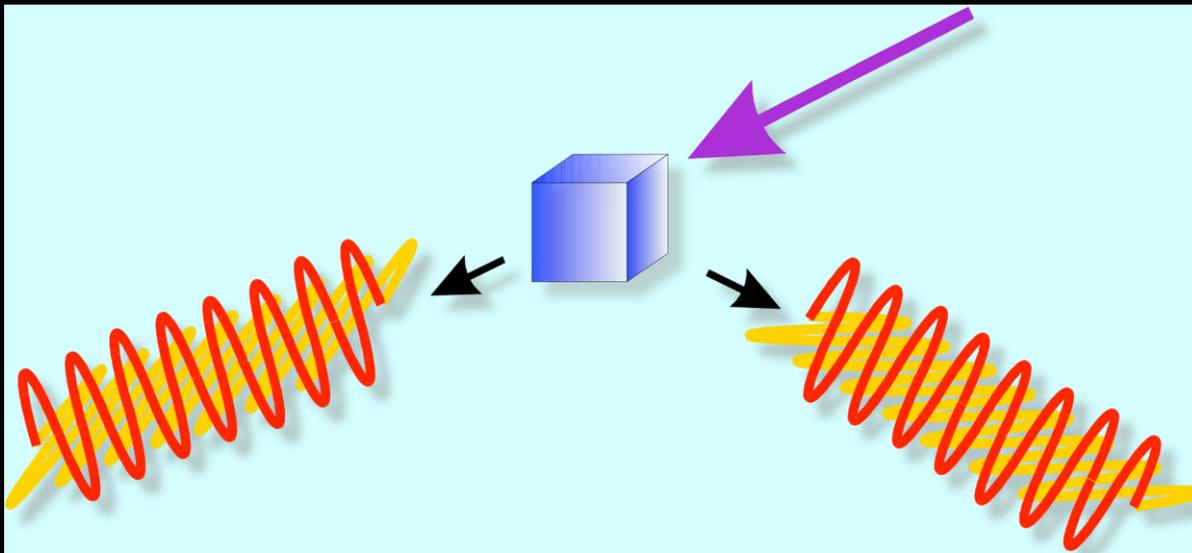


- " O conhecimento dos sistemas individuais pode ser nulo, enquanto o do sistema combinado permanece máximo. O melhor conhecimento possível do todo não inclui o melhor conhecimento possível de suas partes - e é isso que vem continuamente nos assombrar".

ESTADOS EMARANHADOS DE FÓTONS

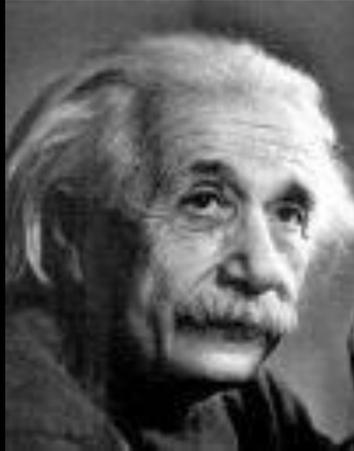
Feixe ultravioleta de luz atravessa um cristal e gera dois feixes de frequência menor: cada fóton ultravioleta gera dois fótons - fótons gêmeos

Sob certas condições, os dois fótons têm polarizações ortogonais, mas não sabemos qual é a polarização de cada um



Medida da polarização do fóton 1 determina a polarização do fóton 2!

Fantasmagóricas ações à distância



Max Born

"Eu não posso acreditar seriamente ... [na teoria quântica] porque a teoria não pode ser reconciliada com a idéia de que a física deve representar uma realidade no tempo e no espaço, livre de fantasmagóricas ações à distância".

Carta de Einstein para Born, 3 de março de 1947 (The Born-Einstein Letters, Macmillan, NY, 2005)

Emaranhamento multifotônico

letters to nature

NATURE | VOL. 430 | 1 JULY 2004 | www.nature.com/nature

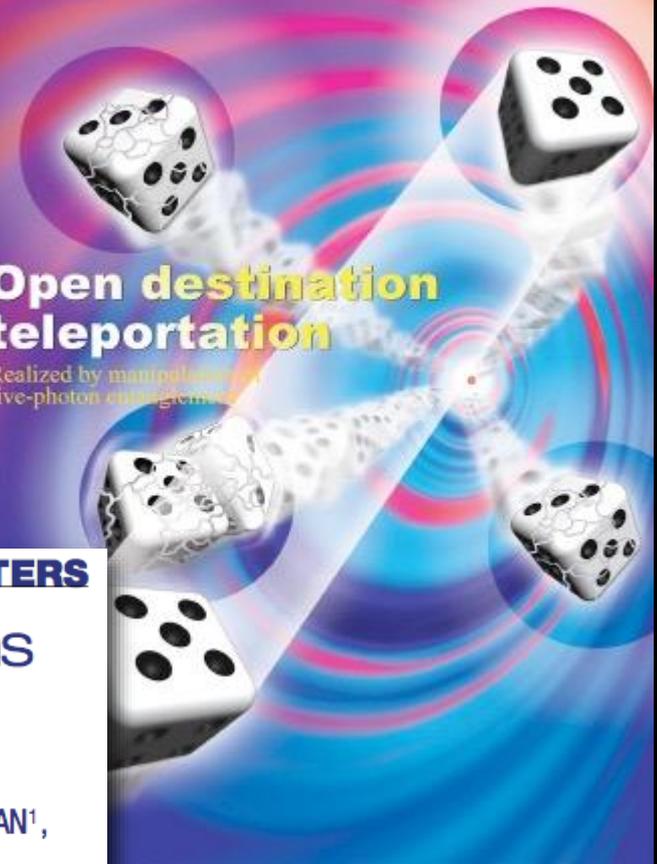
Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation

Zhi Zhao¹, Yu-Ao Chen¹, An-Ning Zhang¹, Tao Yang¹, Hans J. Briegel² & Jian-Wei Pan^{1,3}

¹Department of Modern Physics and Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei,

Open destination teleportation

Realized by manipulating five-photon entanglement



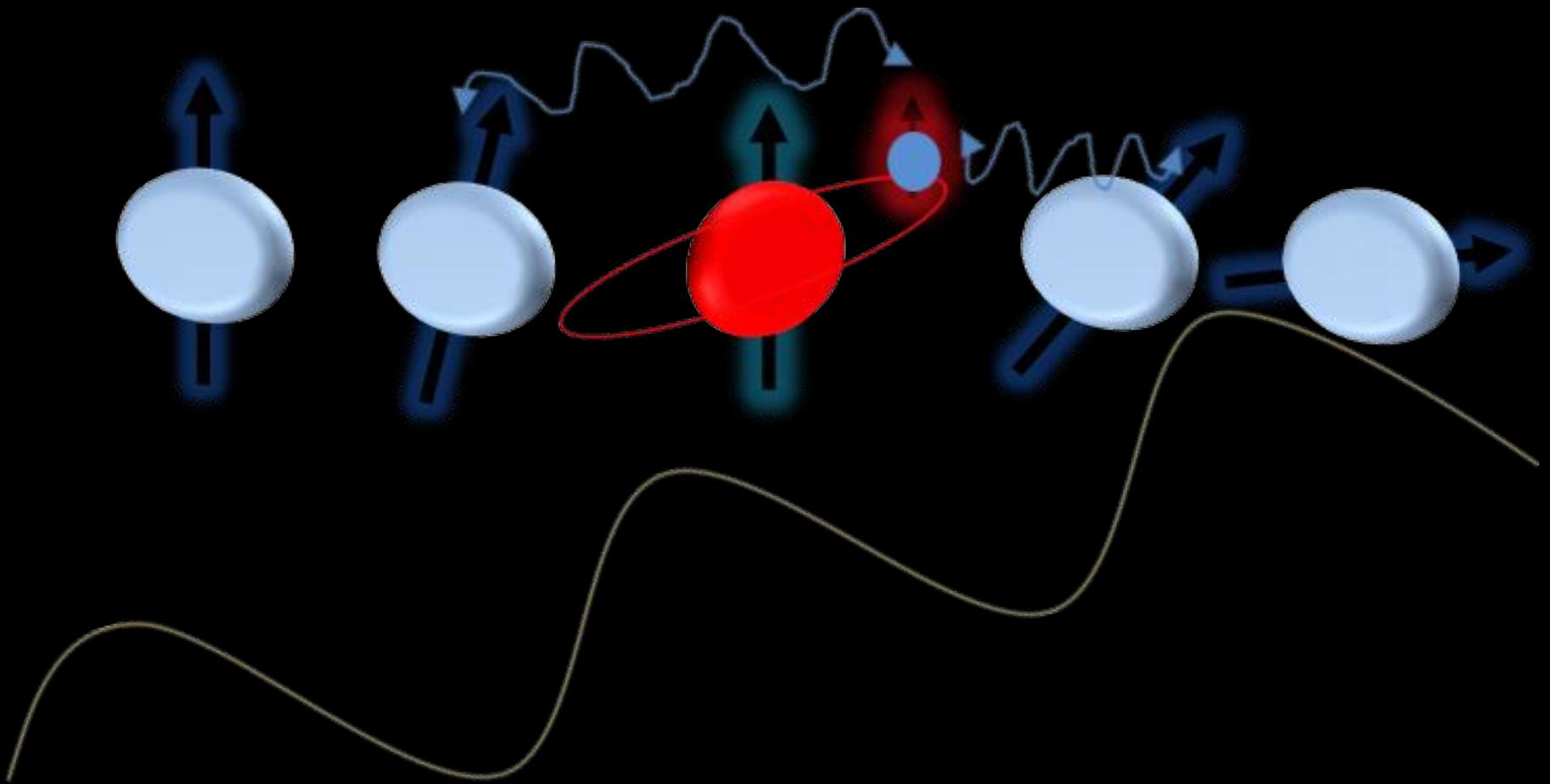
nature physics | VOL. 3 | FEBRUARY 2007 | www.nature.com/naturephysics

LETTERS

Experimental entanglement of six photons in graph states

CHAO-YANG LU^{1*}, XIAO-QI ZHOU¹, OTFRIED GÜHNE², WEI-BO GAO¹, JIN ZHANG¹, ZHEN-SHENG YUAN¹, ALEXANDER GOEBEL³, TAO YANG¹ AND JIAN-WEI PAN^{1,3*}

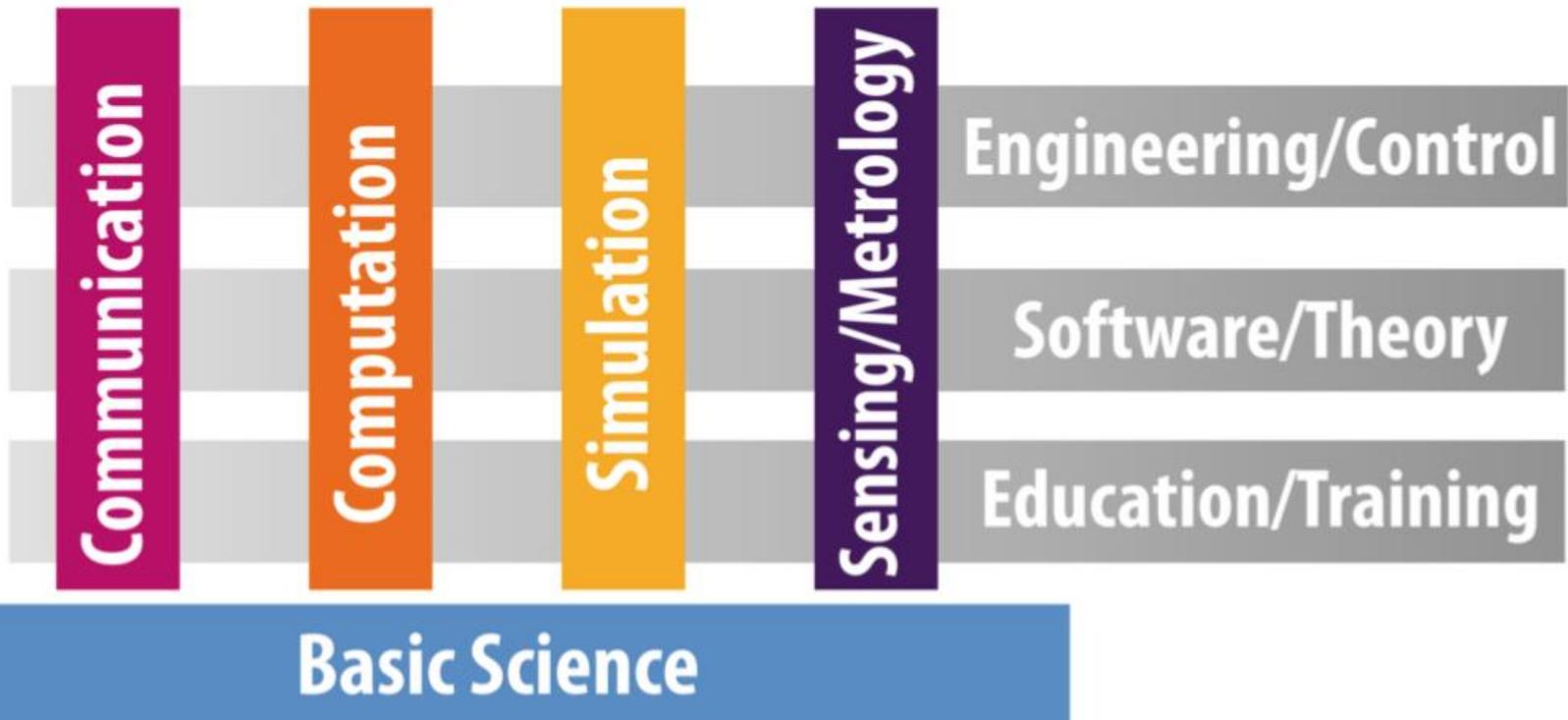
Emaranhamento de átomos



EMARANHAMENTO COMO UM RECURSO

- Emaranhamento é útil para comunicação e computação quântica

ROTEIRO PARA TECNOLOGIAS QUÂNTICAS



The quantum technologies roadmap: a European community view

EMARANHAMENTO COMO UM RECURSO



RESEARCH ARTICLE

QUANTUM OPTICS

Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers

Juan Yin,^{1,2} Yuan Cao,^{1,2} Yu-Huai Li,^{1,2} Sheng-Kai Liao,^{1,2} Liang Zhang,^{2,3} Ji-Gang Ren,^{1,2} Wen-Qi Cai,^{1,2} Wei-Yue Liu,^{1,2} Bo Li,^{1,2} Hui Dai,^{1,2} Guang-Bing Li,^{1,2} Qi-Ming Lu,^{1,2} Yun-Hong Gong,^{1,2} Yu Xu,^{1,2} Shuang-Lin Li,^{1,2} Feng-Zhi Li,^{1,2} Ya-Yun Yin,^{1,2} Zi-Qing Jiang,³ Ming Li,³ Jian-Jun Jia,³ Ge Ren,⁴ Dong He,⁴ Yi-Lin Zhou,⁵ Xiao-Xiang Zhang,⁶ Na Wang,⁷ Xiang Chang,⁸ Zhen-Cai Zhu,⁵ Nai-Le Liu,^{1,2} Yu-Ao Chen,^{1,2} Chao-Yang Lu,^{1,2} Rong Shu,^{2,3} Cheng-Zhi Peng,^{1,2*} Jian-Yu Wang,^{2,3*} Jian-Wei Pan^{1,2*}

Yin *et al.*, *Science* **356**, 1140–1144 (2017) 16 June 2017

NEWS | IN DEPTH

QUANTUM PHYSICS

Spooky action achieved at record distance

Entangled photons from Chinese satellite foreshadow space-based quantum network

METROLOGIA QUÂNTICA

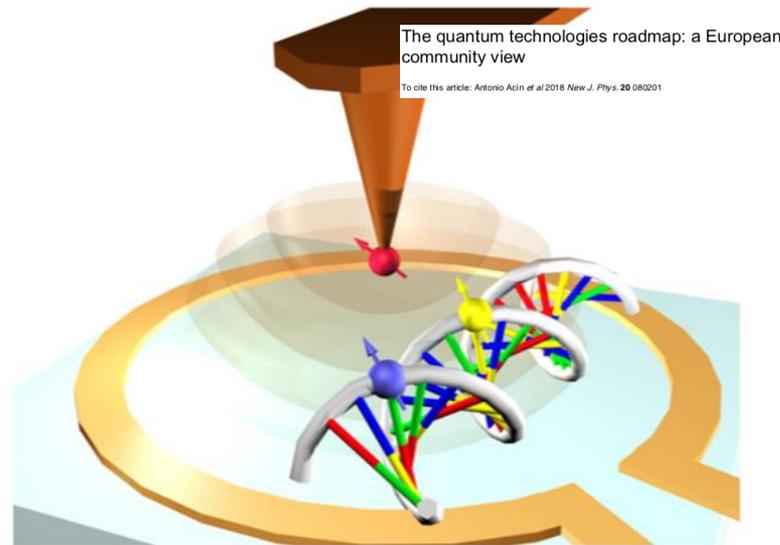


Figure 5. Artistic depiction of a spin based quantum sensor for unravelling structure of single biomolecules.

nature
photonics

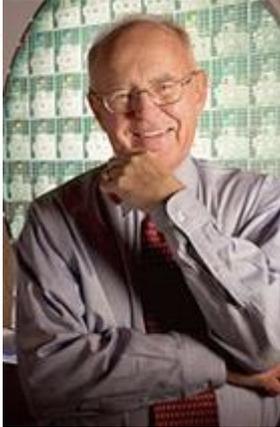
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 21 JULY 2013 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.177

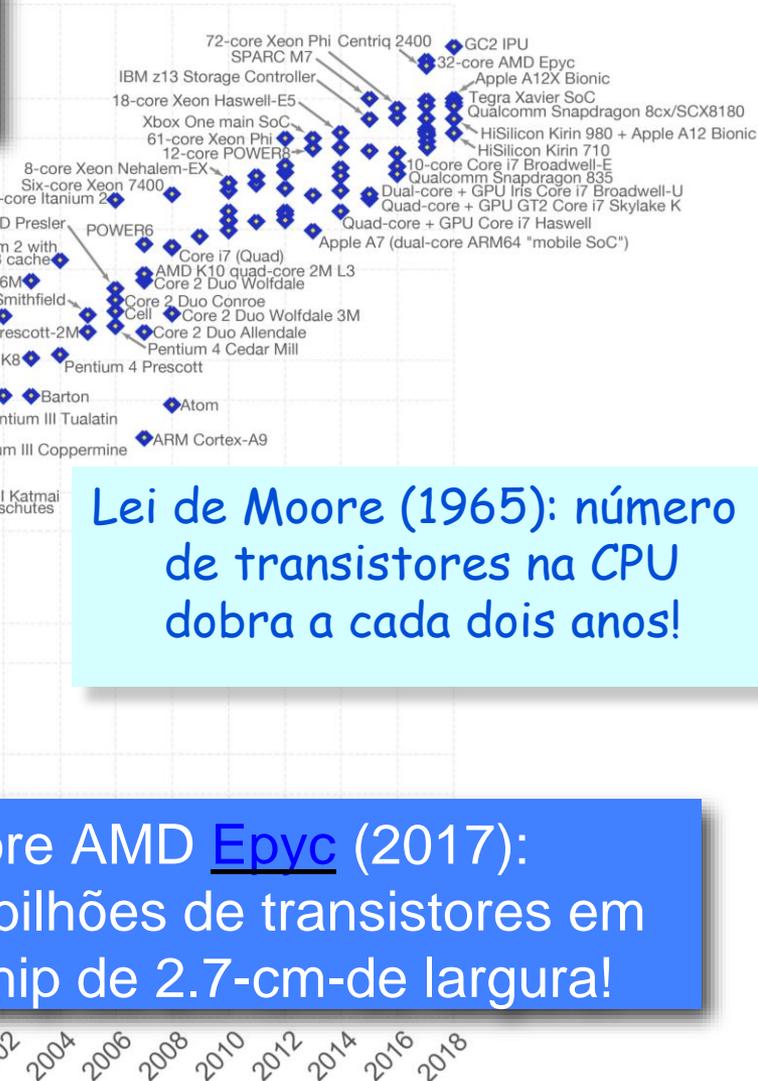
Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light

The LIGO Scientific Collaboration*

LIMITES DA COMPUTAÇÃO CLÁSSICA



Aproximando-se de um átomo por bit!



1970 1972 1974 1976 1978 1980 1982 1984 1986 1988 1990 1992 1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 2018

OUTRAS MOTIVAÇÕES...

Problema de fatoração: difícil!

Melhor algoritmo de fatoração conhecido:

Exponencial no comprimento do número

Método criptográfico RSA de chave pública (bancos, embaixadas, internet...)

Algoritmo de Shor - 1994 (computação quântica):

Exponencialmente mais rápido → Quebra de códigos!

Busca em banco de dados (dado um número de telefone, encontrar o usuário!): clássico proporcional a N , quântico proporcional a \sqrt{N}

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

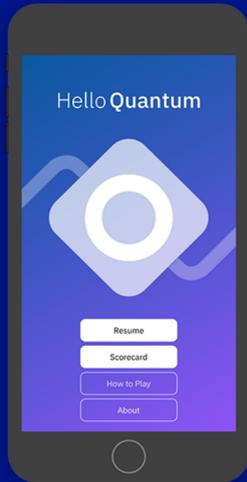
Accepted: 20 September 2019

Published online: 23 October 2019

Frank Arute¹, Kunal Arya¹, Ryan Babbush¹, Dave Bacon¹, Joseph C. Bardin^{1,2}, Rami Barends¹, Rupak Biswas³, Sergio Boixo¹, Fernando G. S. L. Brandao^{1,4}, David A. Buell¹, Brian Burkett¹, Yu Chen¹, Zijun Chen¹, Ben Chiaro⁵, Roberto Collins¹, William Courtney¹, Andrew Dunsworth¹, Edward Farhi¹, Brooks Foxen^{1,5}, Austin Fowler¹, Craig Gidney¹, Marissa Giustina¹, Rob Graff¹, Keith Guerin¹, Steve Habegger¹, Matthew P. Harrigan¹, Michael J. Hartmann^{1,6}, Alan Ho¹, Markus Hoffmann¹, Trent Huang¹, Travis S. Humble⁷, Sergei V. Isakov¹, Evan Jeffrey¹, Zhang Jiang¹, Dvir Kafri¹, Kostyantyn Kechedzhi¹, Julian Kelly¹, Paul V. Klimov¹, Sergey Knysh¹, Alexander Korotkov^{1,8}, Fedor Kostritsa¹, David Landhuis¹, Mike Lindmark¹, Erik Lucero¹, Dmitry Lyakh⁹, Salvatore Mandrà^{3,10}, Jarrod R. McClean¹, Matthew McEwen⁵, Anthony Megrant¹, Xiao Mi¹, Kristel Michielsen^{11,12}, Masoud Mohseni¹, Josh Mutus¹, Ofer Naaman¹, Matthew Neeley¹, Charles Neill¹, Murphy Yuezhen Niu¹, Eric Ostby¹, Andre Petukhov¹, John C. Platt¹, Chris Quintana¹, Eleanor G. Rieffel³, Pedram Roushan¹, Nicholas C. Rubin¹, Daniel Sank¹, Kevin J. Satzinger¹, Vadim Smelyanskiy¹, Kevin J. Sung^{1,13}, Matthew D. Trevithick¹, Amit Vainsencher¹, Benjamin Villalonga^{1,14}, Theodore White¹, Z. Jamie Yao¹, Ping Yeh¹, Adam Zalcman¹, Hartmut Neven¹ & John M. Martinis^{1,5*}

"Our Sycamore processor takes about 200 seconds to sample one instance of a quantum circuit a million times—our benchmarks currently indicate that the equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take

IBM QUANTUM COMPUTER



Hello Quantum →

Explore the building blocks of quantum mechanics through puzzles.

Welcome to the IBM Q Experience!

Explore the world of quantum computing! Check out our User Guides and interactive Demos to learn more about quantum principles. Or, dive right in to create and run algorithms on real quantum computing hardware, using the Quantum Composer and QISKit software developer kit.



[Start experimenting with a quantum computer](#)

50 QBITS



THE WALL STREET JOURNAL.

U.S. Edition ▾

March 7, 2019

Print Edition

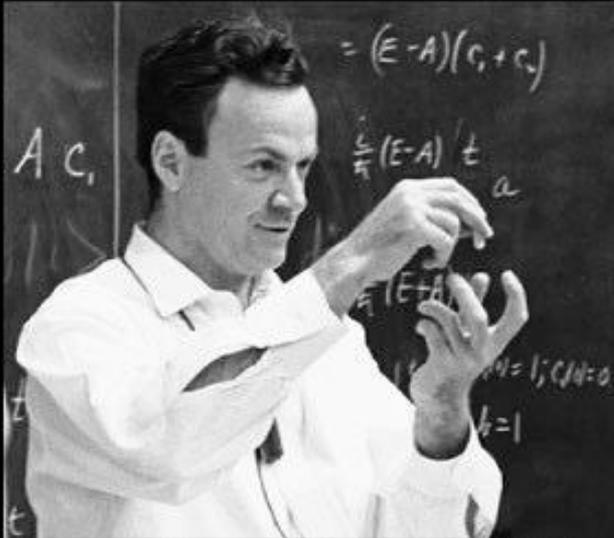
Video

Mercedes Enlists Quantum Computing to Build a Better Electric Vehicle Battery

Auto maker, working with IBM quantum experts, sees 'huge opportunity' in the technology



SIMULADORES QUÂNTICOS



Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

N spins $\rightarrow 2^N$ states!

300 spins: Mais estados do que o número de átomos no Universo!

OBRIGADO!