

PRINCÍPIOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS E
PERSPECTIVAS DE IMPLEMENTAÇÃO
COM DISPOSITIVOS SUPERCONDUTORES

MARCOS C. DE OLIVEIRA
UNICAMP



EI-IFGW - 2015

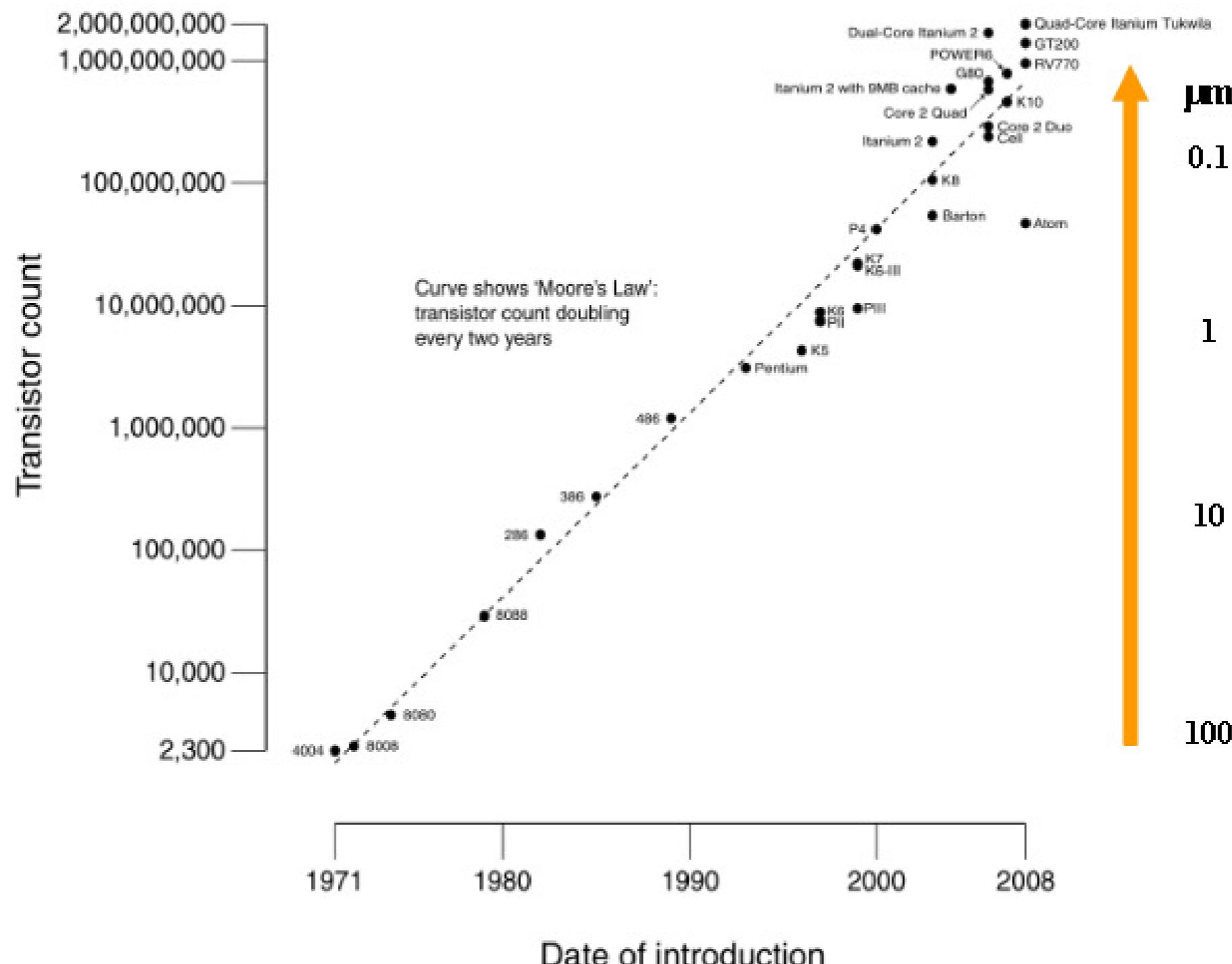


SIMULAÇÃO DE SISTEMAS QUÂNTICOS

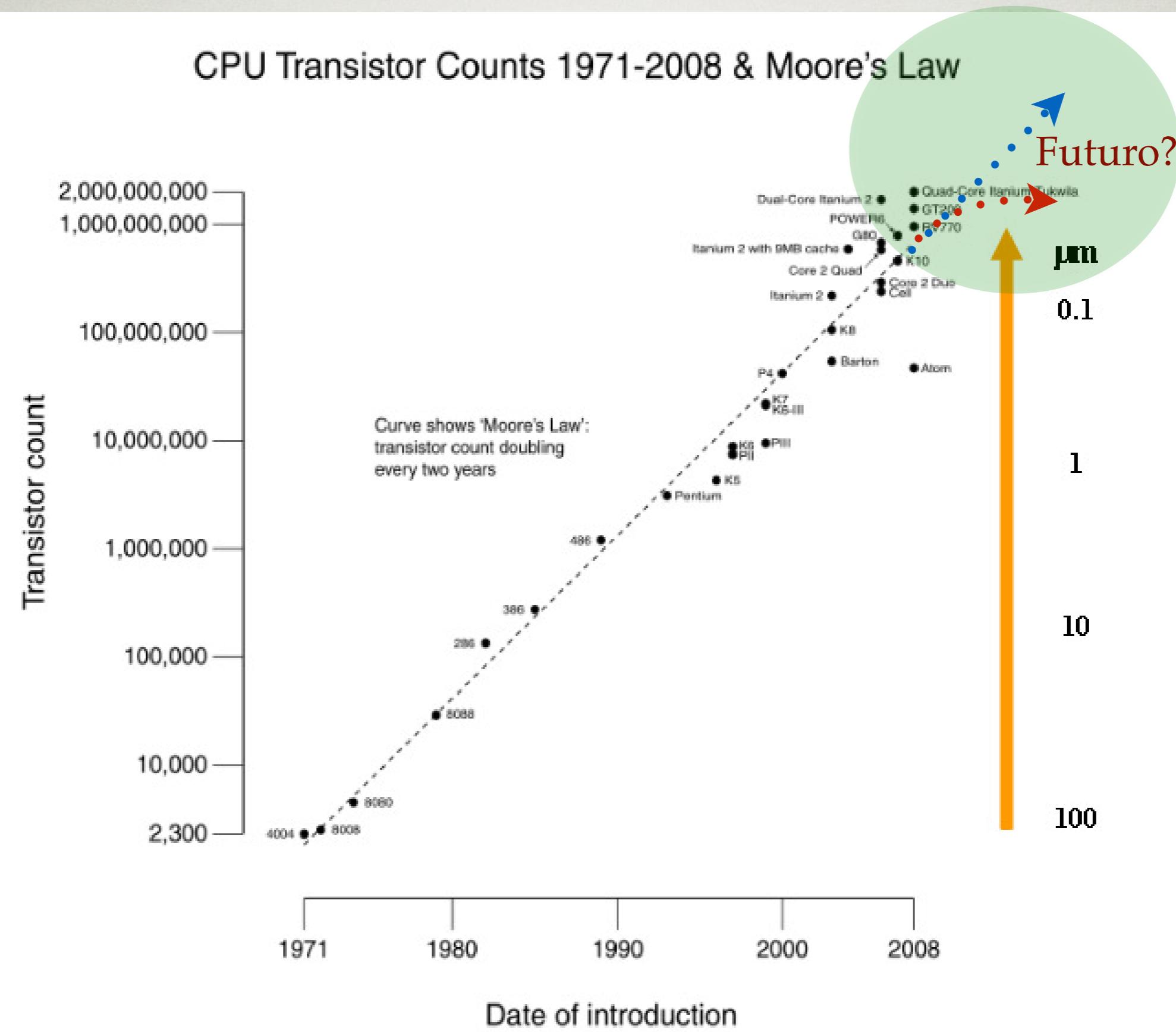
Richard Feynman (1981):

“...trying to find a computer simulation of physics, seems to me to be an excellent program to follow out...and I'm not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because *nature isn't classical*, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better *make it quantum mechanical*, and by golly it's a wonderful problem because it doesn't look so easy.”

CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law



CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law



TRÊS QUESTÕES BÁSICAS

1. O QUE É INFORMAÇÃO?

“PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÃO: AQUISIÇÃO, GRAVAÇÃO, ORGANIZAÇÃO, EXTRAÇÃO E DISSEMINAÇÃO DE DADOS.” (ENC. BRITÂNICA)



2. O QUE É COMPUTAÇÃO?

“COMPUTAR: DESENVOLVER ROTINAS DE CÁLCULO AUTOMATICAMENTE.” (ENC. BRITÂNICA)

$$f : \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$$

3. O QUE É MECÂNICA QUÂNTICA?

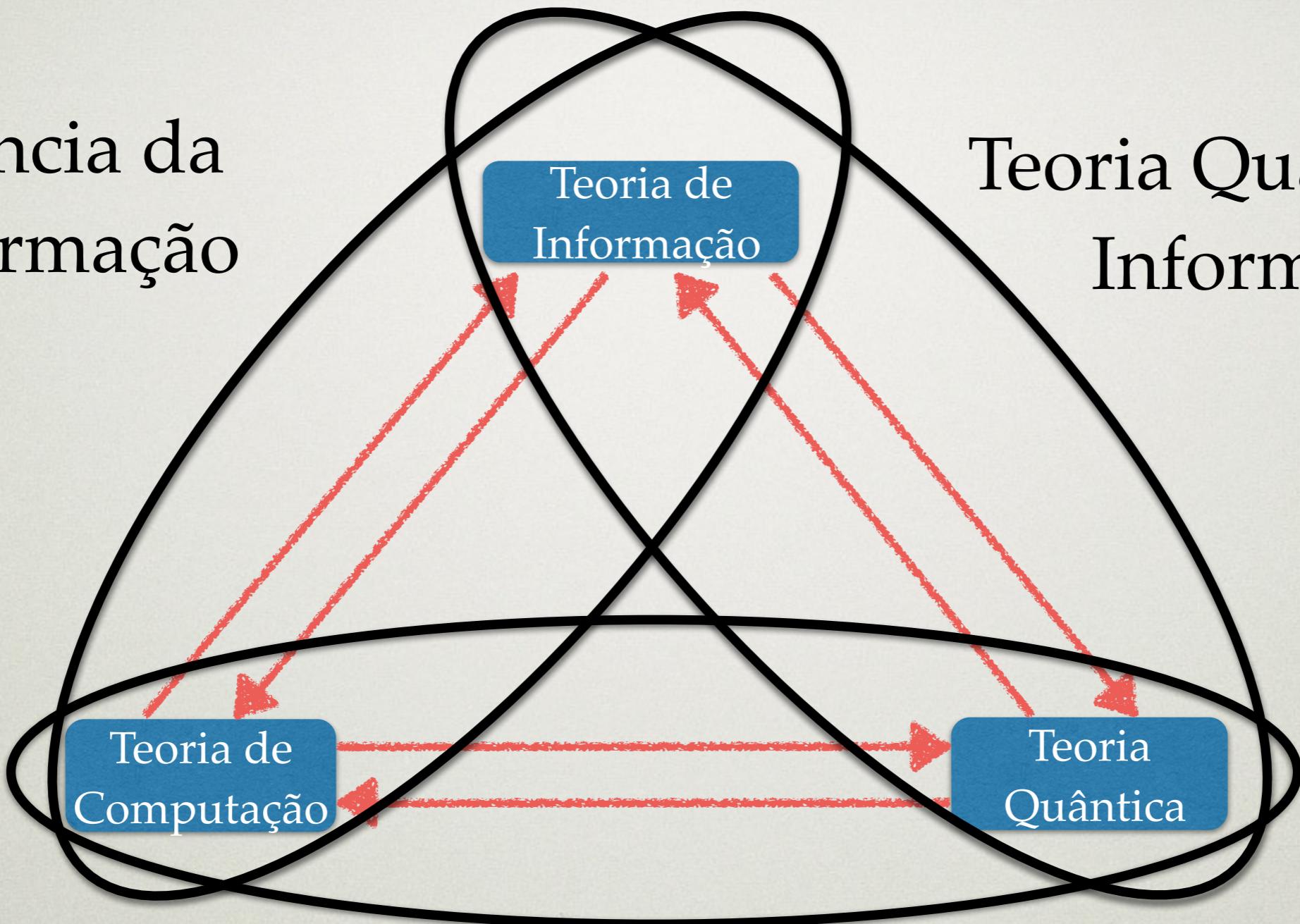
“FORMALISMO MATEMÁTICO PARA O DESENVOLVIMENTO DE TEORIAS FÍSICAS.”



Ciência da
Informação

Teoria Quântica de
Informação

Computação Quântica



TEORIA DE COMPUTAÇÃO

Computadores atuam como uma Sequência de Procedimentos Primitivos (SPP)

Seja um ábaco, ou um supercomputador de última geração, seu funcionamento via a SPP é basicamente o mesmo, independentemente do conjunto de elementos físicos que o constituem.

∀ SPP é efetuada por um conjunto finito de *elementos básicos universais*.

O que é computável e o que não é?

Existem duas maneiras diferentes, mas equivalentes, de respondermos essa questão:

- modelo de máquina de Turing
- modelo de circuitos

PROCEDIMENTOS EFETIVOS E COMPUTABILIDADE

Procedimentos efetivos são o conjunto de regras para a realização de uma tarefa, também conhecido como *Algoritmo*.

Ex.: Dado x calcule e^x

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \dots \quad (1)$$

- Substitua o valor de x ;
- Calcule cada termo;
- Some os termos \Rightarrow Resultado para qualquer x .

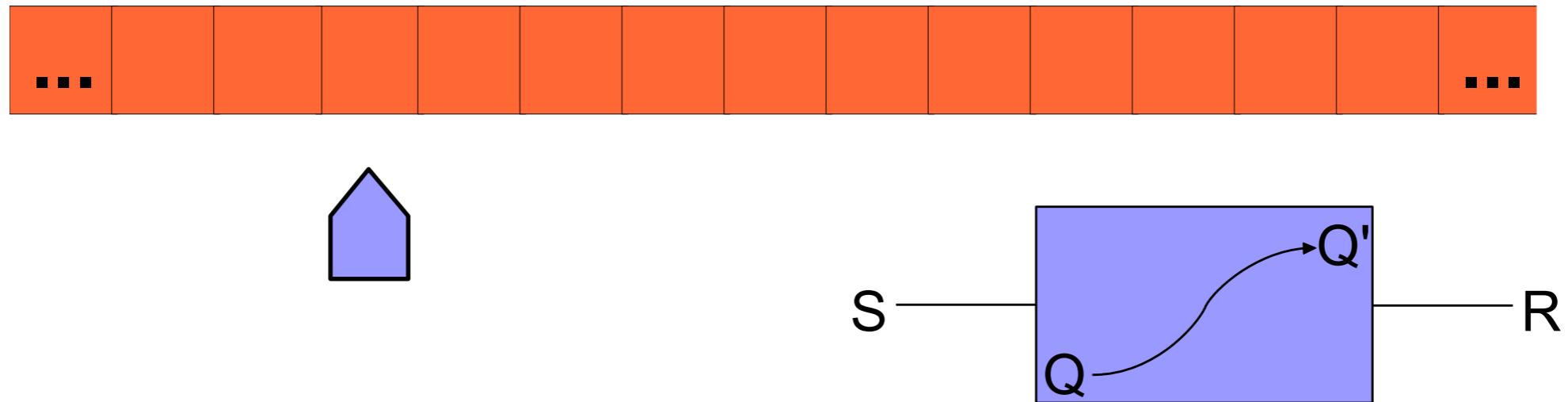
São definidos como *problemas computáveis* aqueles que podem ser resolvidos por um procedimento efetivo.

CONCEITO PRECISO DE COMPUTABILIDADE

ALAN TURING (1936)

Se uma tarefa pude ser realizada por um procedimento efetivo, então ela pode ser realizada por uma *Máquina de Turing Universal* e vice-versa, se uma máquina de Turing universal não puder resolver um problema, então não há um procedimento efetivo.

MÁQUINA DE TURING



Máquina de Turing = Máquina de estado Finito + Memória Ilimitada

- Leitura da Célula \rightarrow estímulo S
- Estado interno $\rightarrow Q$
- Estado interno após estímulo $\rightarrow Q' = F(Q, S)$
- Resposta (escrita na célula) ao estímulo
(+movimento da MEF $\rightarrow R = G(Q, S)$)

TESE DE CHURCH-TURING (1936)

Função Computável \Leftrightarrow Função computável por uma máquina de Turing

“ $F(x)$ é Turing-computável se \exists uma máquina de Turing \mathbb{T}_F tal que se x for escrito na fita (da máquina) ela eventualmente para com $F(x)$ impresso na fita.”

$$x \longrightarrow F(x)$$

“A classe de funções computáveis por uma máquina de Turing corresponde exatamente à classe de funções computáveis por um algoritmo.”

MODELO DE CIRCUITOS

Círculo

Fios (linhas) e portas, que carregam e manipulam a informação, realizando tarefas computacionais simples (individualmente) e que quando combinados permitem o cálculo de qualquer função $F(x)$ computável.

Um computador (determinístico) é compreendido dentro do modelo de circuitos como o conjunto de elementos básicos universais necessários para computar a função:

$$F : \{0, 1\}^n \longrightarrow \{0, 1\}^m, \quad (2)$$

dado um input de n -bits ele produz um output de m -bits univocamente.

Uma função com m -bit valores de output é equivalente a m -funções com cada uma produzindo um bit de output.

$$F : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}. \quad (3)$$

2^n possíveis inputs, cada um \rightarrow 2 possíveis outputs.

$\rightarrow \exists$ ao todo 2^{2^n} funções levando n -bits a 1-bit.

A avaliação de qualquer uma destas funções pode ser reduzida a uma sequência de **elementos básicos universais**.

Definição : *Uma computação é uma sequência finita de operações elementares fundamentais (um circuito) aplicada a uma palavra de bits de input.*

*Dizemos que o conjunto de **elementos básicos fundamentais são universais**, a partir do qual, funções arbitrariamente complexas podem ser computadas.*

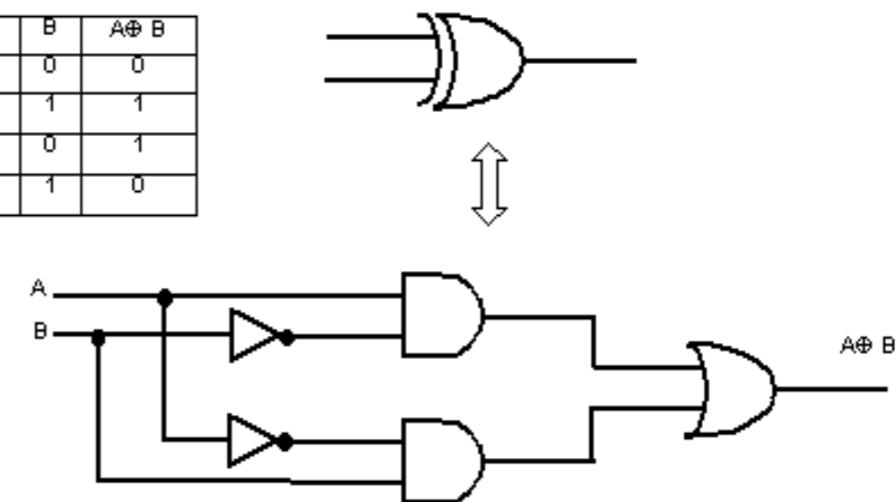
A classe de funções computáveis por uma família de circuitos uniforme é exatamente a mesma que as que podem ser computáveis por uma máquina de Turing.

XOR (Exclusive OR)

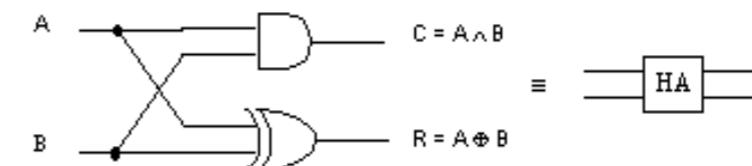
Representação

bit		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>A</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	A	0	0	1	1									
A	A																
0	0																
1	1																
FANOUT		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>A</th><th>COPY A</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	A	COPY A	0	0	0	1	1	1						
A	A	COPY A															
0	0	0															
1	1	1															
NOT		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>$\neg A$</th></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	$\neg A$	0	1	1	0									
A	$\neg A$																
0	1																
1	0																
AND		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>B</th><th>$A \wedge B$</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	B	$A \wedge B$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	$A \wedge B$															
0	0	0															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															
OR		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>B</th><th>$A \vee B$</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	A	B	$A \vee B$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	$A \vee B$															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	1															
NAND		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>B</th><th>$\neg(A \wedge B)$</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	B	$\neg(A \wedge B)$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	$\neg(A \wedge B)$															
0	0	1															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	0															
NOR		<table border="1"> <tr><th>A</th><th>B</th><th>$\neg(A \vee B)$</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	A	B	$\neg(A \vee B)$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	$\neg(A \vee B)$															
0	0	1															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	0															

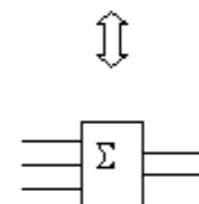
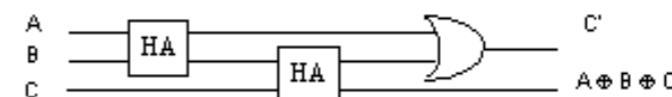
A	B	$A \oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Meio Somador (HALF-ADDER)



Somador Completo (FULL-ADDER)



PROBLEMAS DE DECISÃO E COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL

Polinomial (**P**):

- Podem ser resolvidos por algum algoritmo em tempo polinomial

Ex.: Soma, ordenação, etc.

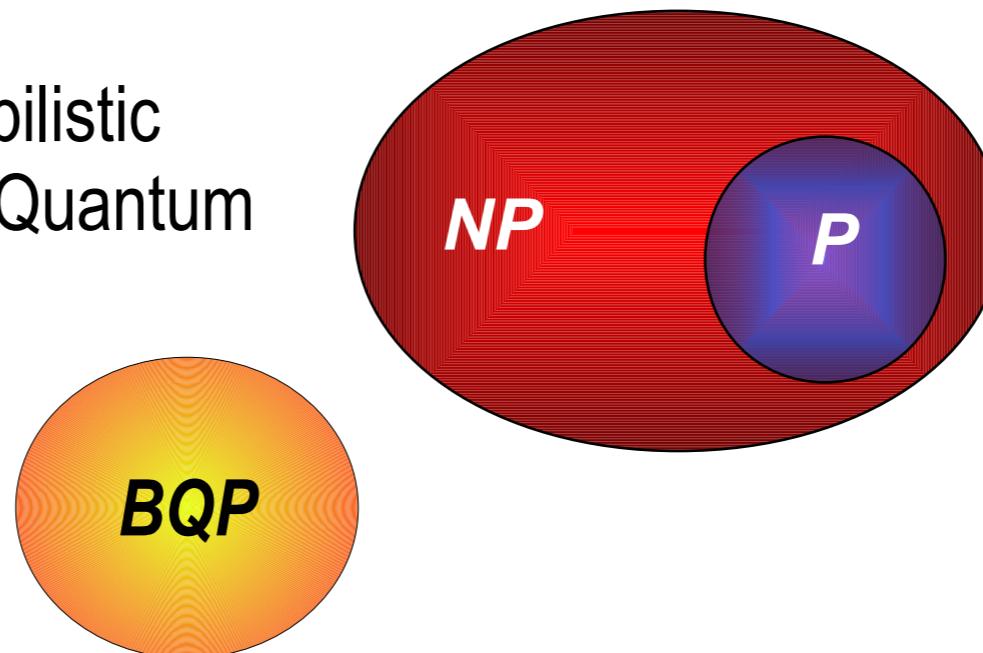
Non-deterministic polinomial (**NP**):

- Não podem ser resolvidos por algum algoritmo em tempo polinomial
- Podem ser *conferidos* em tempo polinomial.

Ex.: Decomposição em fatores primos, procura,etc

Bounded-Error Probabilistic
Polynomial Time on a Quantum
Circuit (**BQP**)

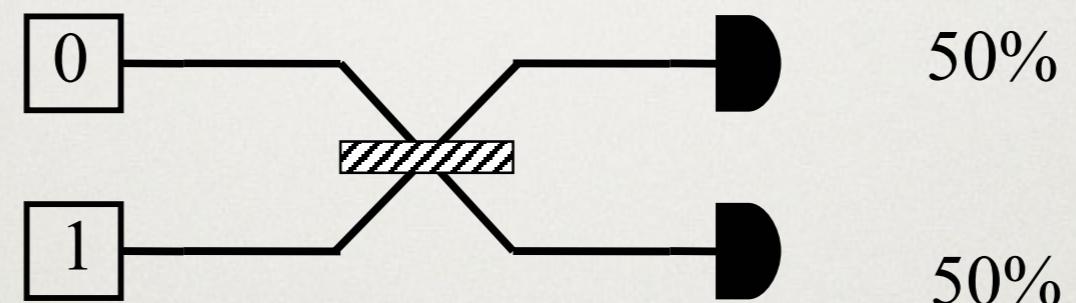
Algorítimos
quânticos



SISTEMAS QUÂNTICOS

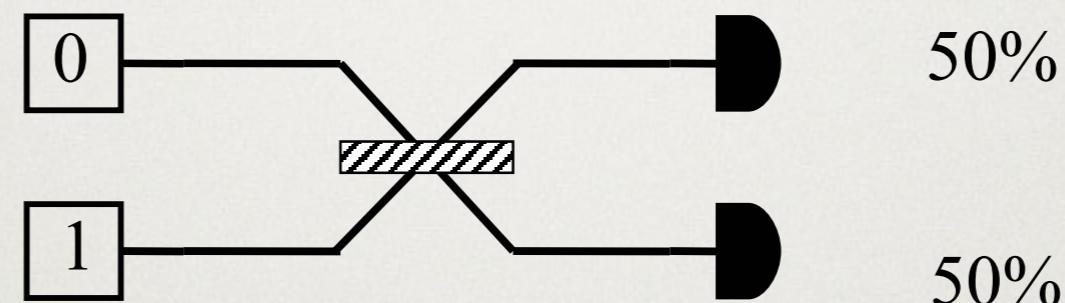
O QUE HÁ DE ESPECIAL NA FÍSICA QUÂNTICA?

Divisor de Feixes (DF): 1 fóton apenas



O QUE HÁ DE ESPECIAL NA FÍSICA QUÂNTICA?

Divisor de Feixes (DF): 1 fóton apenas

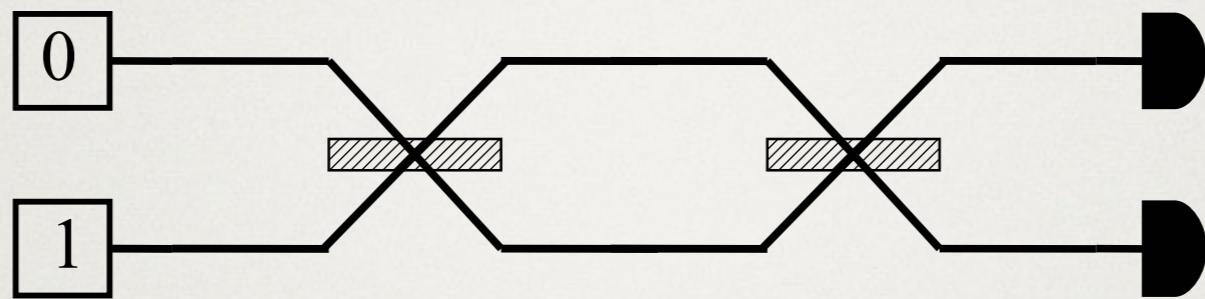


Explicação tentativa:

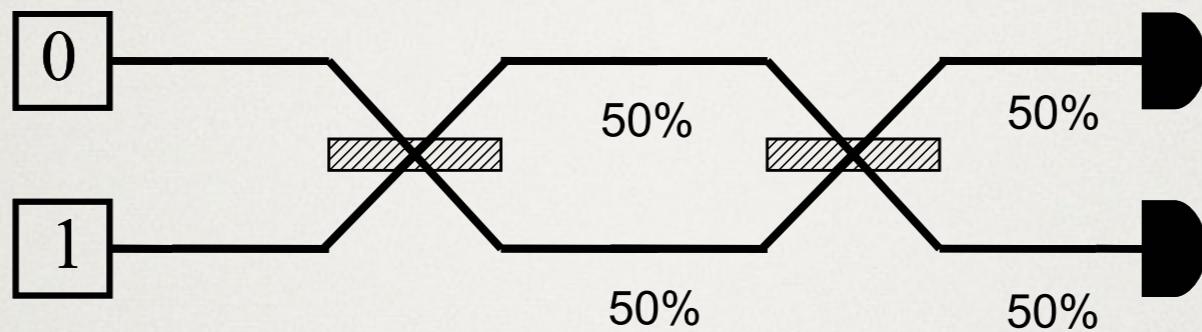
O DF atua como uma moeda clássica, enviando o fóton aleatoriamente para uma porta ou outra.

Então

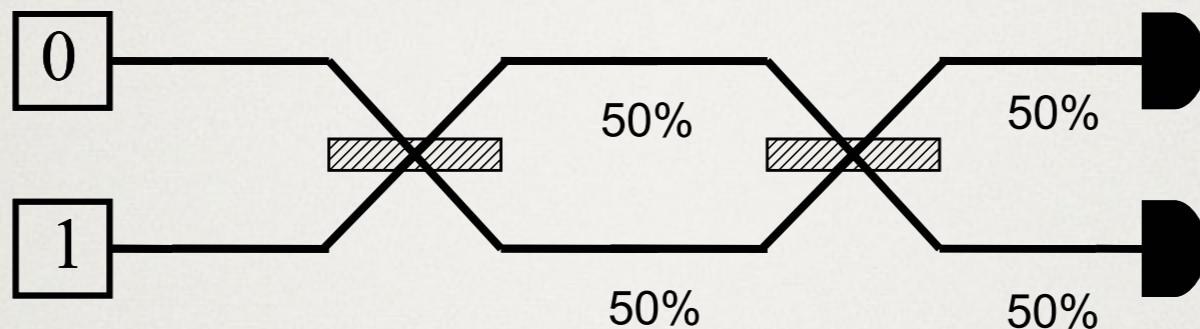
Então



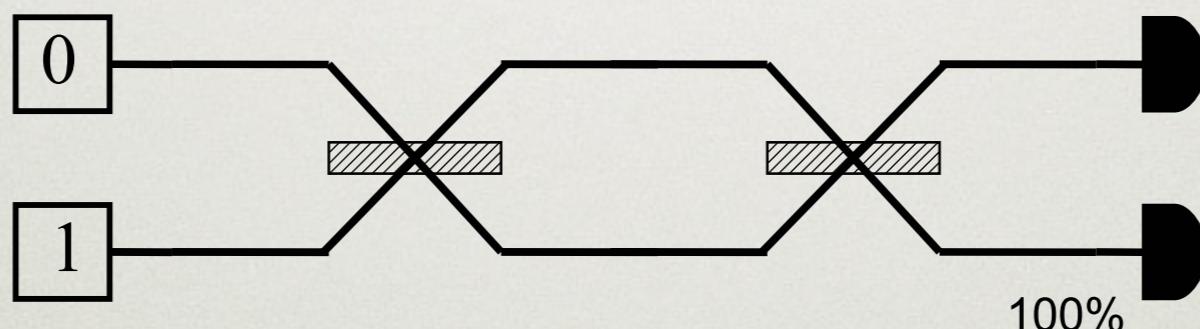
Então



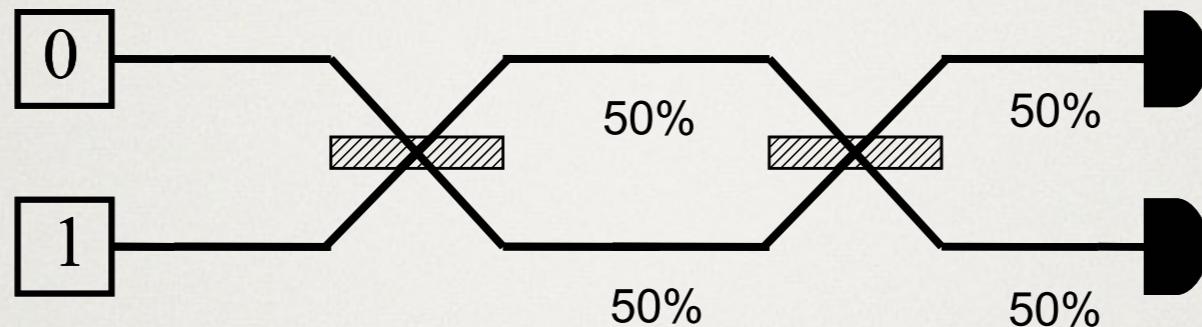
Então



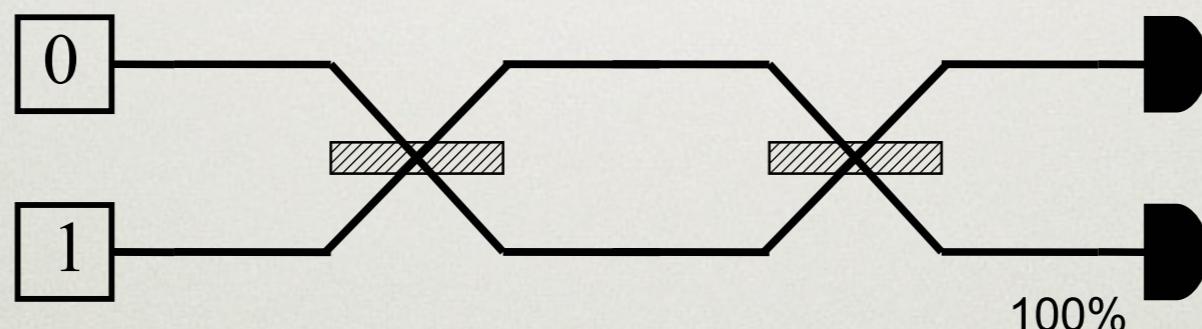
Mas experimentalmente:



Então



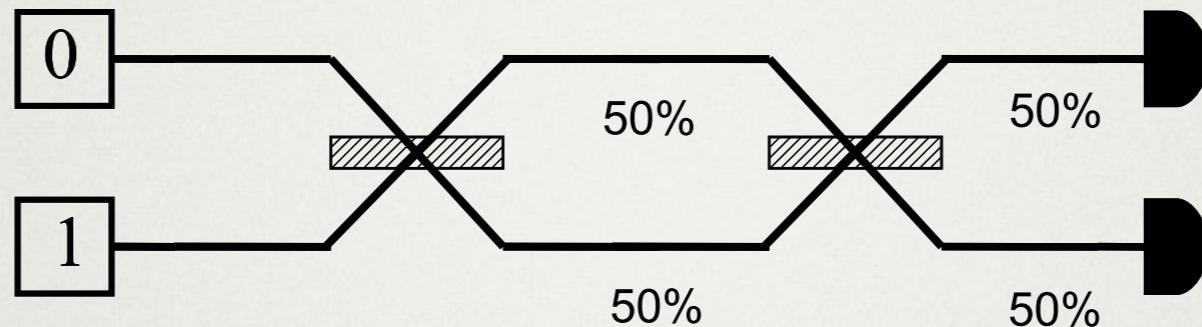
Mas experimentalmente:



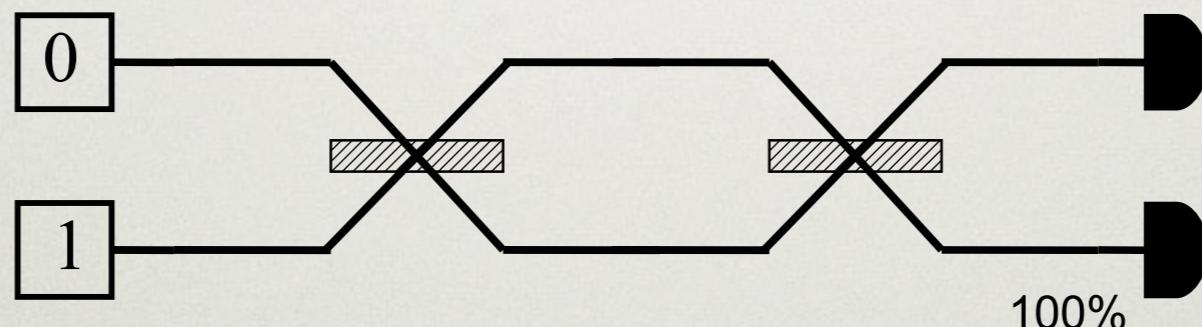
Explicação tentativa:

O DF atua como uma moeda clássica, enviando o fóton aleatoriamente para uma porta ou outra.

Então



Mas experimentalmente:



Explicação tentativa:

O DF atua como uma moeda justa, enviando o fóton aleatoriamente para uma porta ou outra.

POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

POSTULADO 1: ESPAÇO DE ESTADOS

$$|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$$

POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

POSTULADO 1: ESPAÇO DE ESTADOS

$$|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$$

POSTULADO 2: EVOLUÇÃO DE SISTEMAS QUÂNTICOS

$$\frac{d}{dt} |\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar} H |\psi\rangle$$

POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

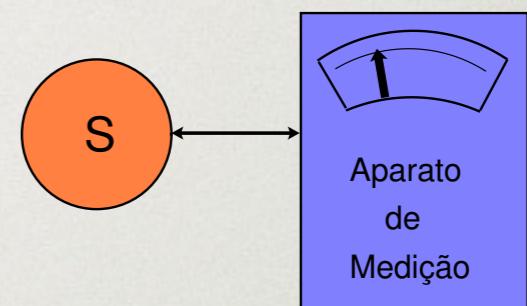
POSTULADO 1: ESPAÇO DE ESTADOS

$$|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$$

POSTULADO 2: EVOLUÇÃO DE SISTEMAS QUÂNTICOS

$$\frac{d}{dt}|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar}H|\psi\rangle$$

POSTULADO 3: MEDIÇÕES QUÂNTICAS



POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

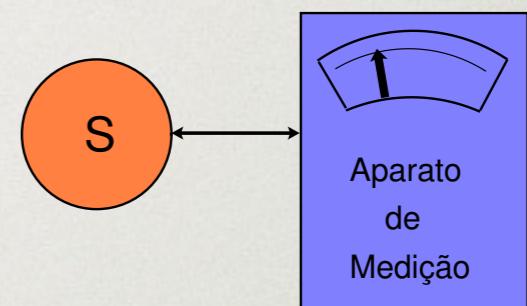
POSTULADO 1: ESPAÇO DE ESTADOS

$$|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$$

POSTULADO 2: EVOLUÇÃO DE SISTEMAS QUÂNTICOS

$$\frac{d}{dt}|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar}H|\psi\rangle$$

POSTULADO 3: MEDIÇÕES QUÂNTICAS



POSTULADO 4 - SISTEMAS COMPOSTOS

$$|\chi_{12}\rangle \in \mathbb{C}^n \otimes \mathbb{C}^n$$

POSTULADOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

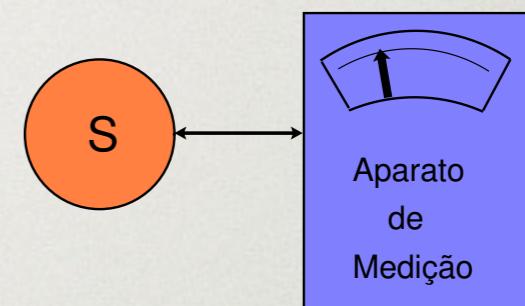
POSTULADO 1: ESPAÇO DE ESTADOS

$$|\psi\rangle \in \mathbb{C}^n$$

POSTULADO 2: EVOLUÇÃO DE SISTEMAS QUÂNTICOS

$$\frac{d}{dt}|\psi\rangle = -\frac{i}{\hbar}H|\psi\rangle$$

POSTULADO 3: MEDIÇÕES QUÂNTICAS



POSTULADO 4 - SISTEMAS COMPOSTOS

$$|\chi_{12}\rangle \in \mathbb{C}^n \otimes \mathbb{C}^n$$

Existem sistemas compostos cujo estados parciais não podem ser descritos por: $|\psi_i\rangle$.

Ex.: $|\chi_{12}\rangle = a|\psi_1\rangle|\psi_2\rangle + b|\phi_1\rangle|\phi_2\rangle$. ← ESTADOS EMARANHADOS

Não existe decomposição de $|\chi_{12}\rangle = |\chi_1\rangle \otimes |\chi_2\rangle$:

$|\chi_1\rangle$ - Estado do sistema 1 e $|\chi_2\rangle$ - Estado do sistema 2.

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

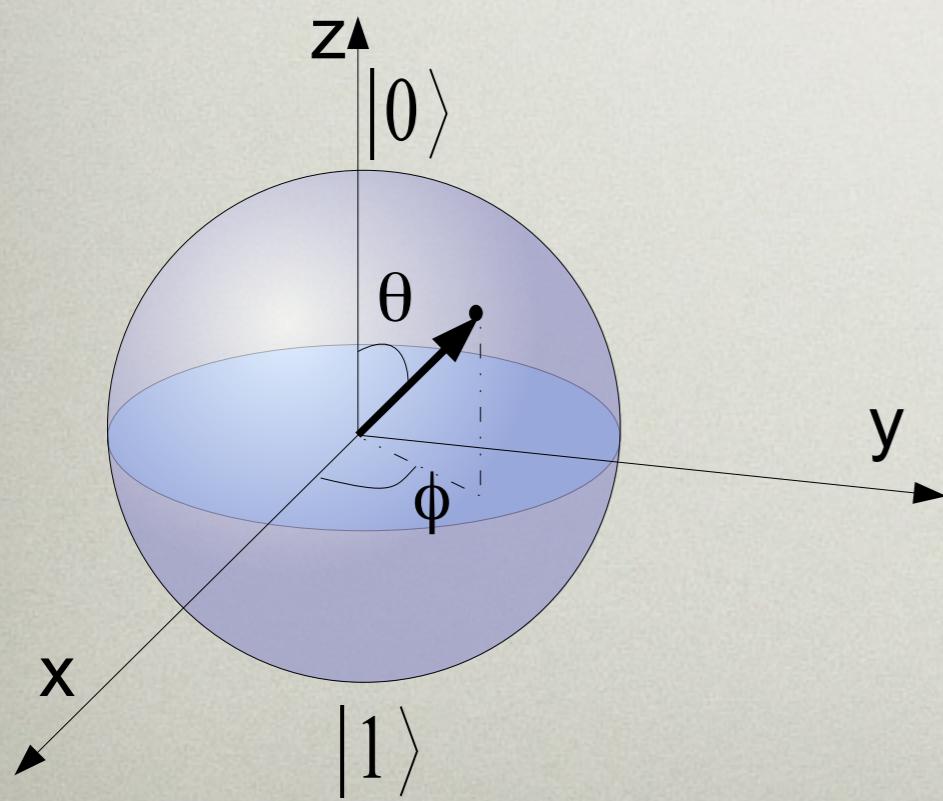
Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch



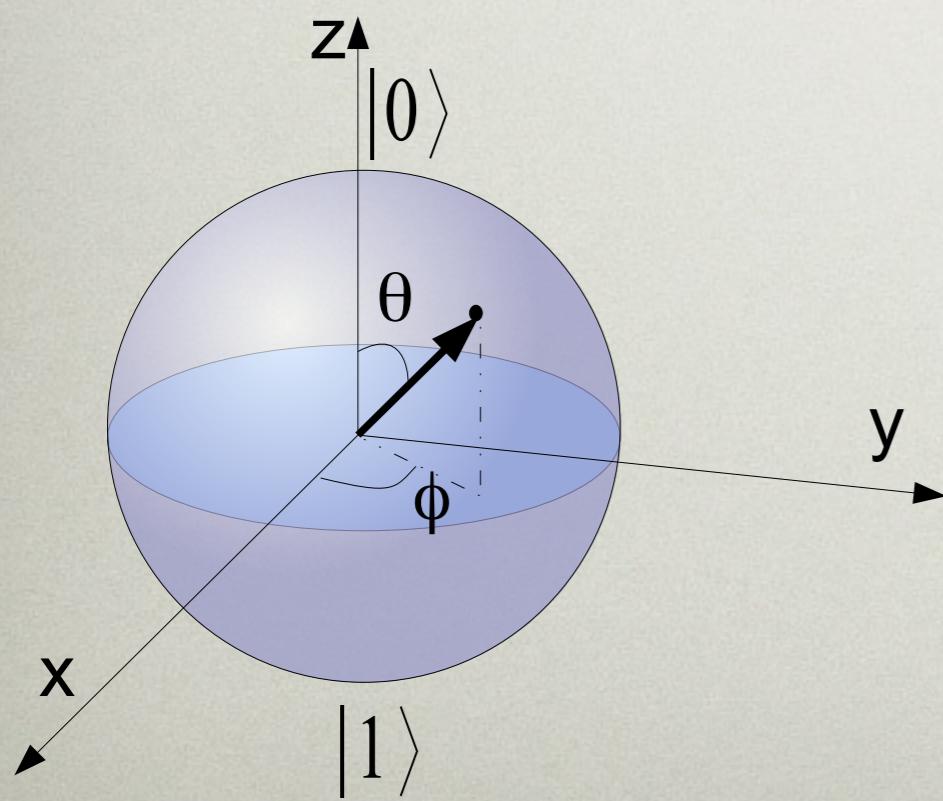
ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

Operações de 1-qubit

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch

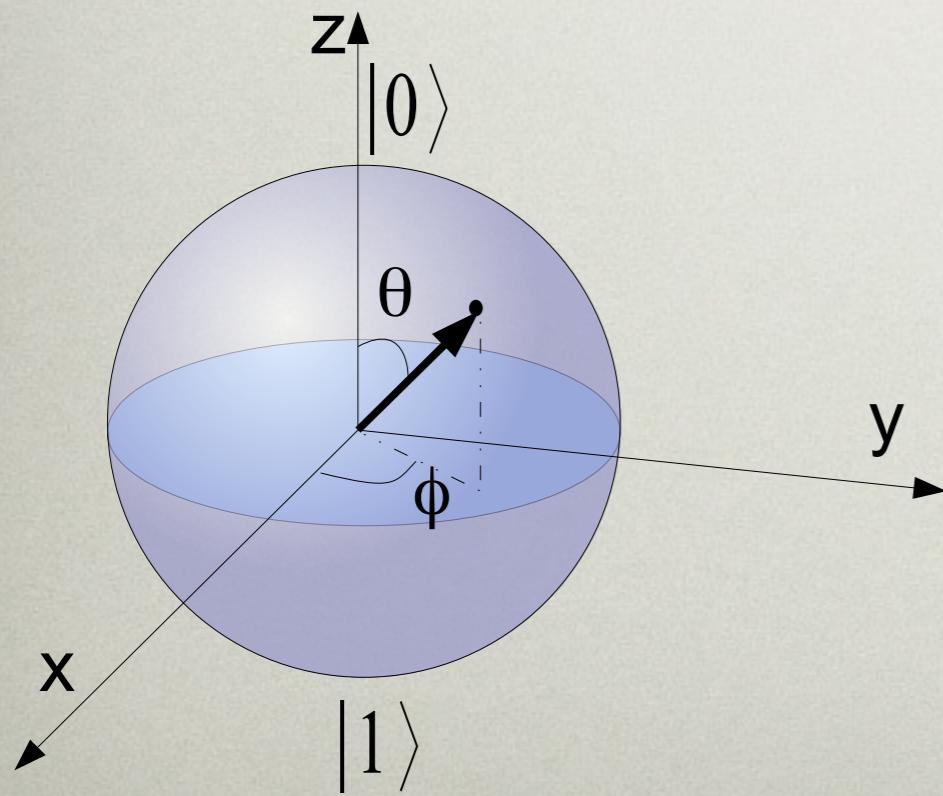


ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch



Operações de 1-qubit

Operações de Pauli

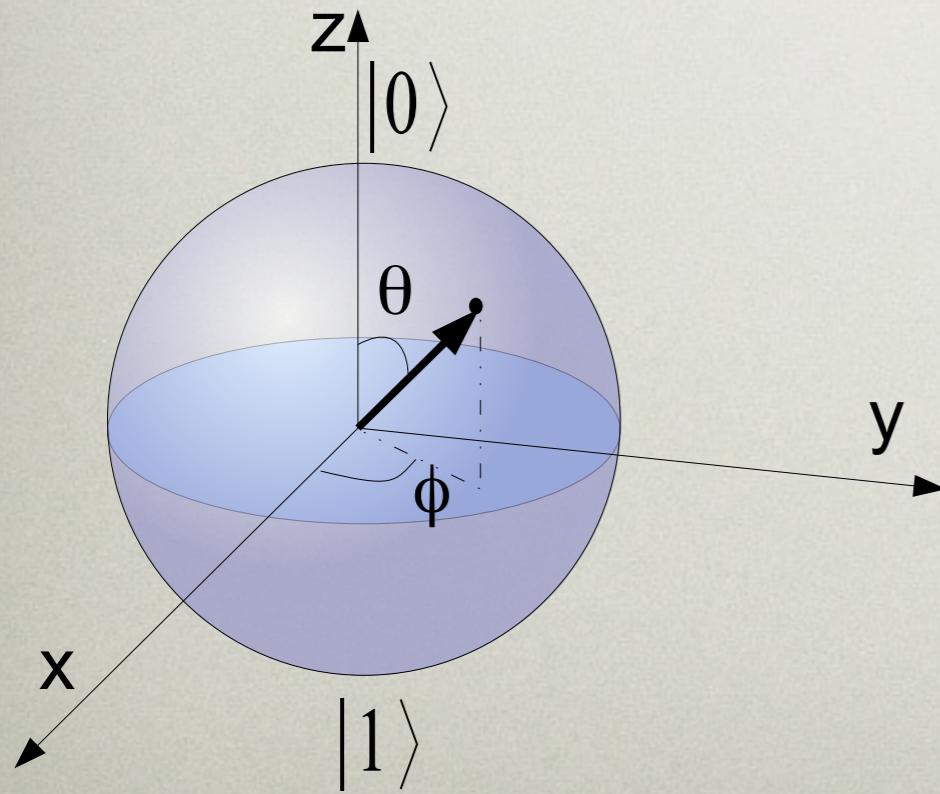
$$x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch



Operações de 1-qubit

Operações de Pauli

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Hadamard

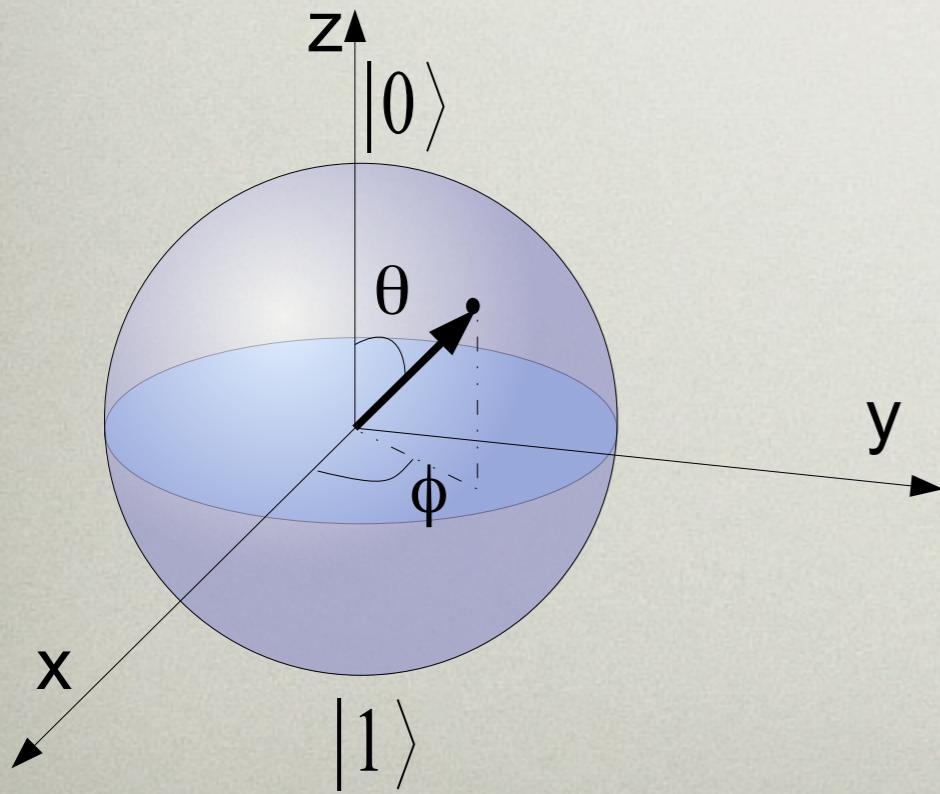
$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch



Operações de 1-qubit

Operações de Pauli

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Hadamard

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Fase

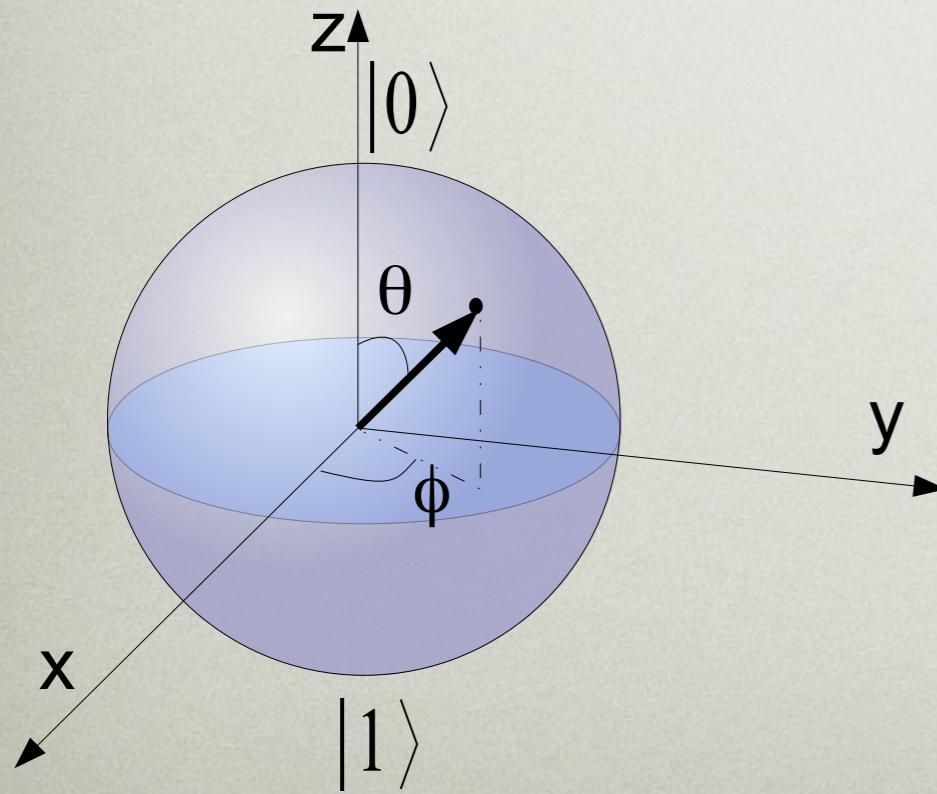
$$P|0\rangle = |0\rangle; P|1\rangle = e^{i\phi}|1\rangle; P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Qubit: $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

$$a = \cos \frac{\theta}{2}; b = e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2}$$

Esfera de Bloch



Operações de 1-qubit

Operações de Pauli

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \quad z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Hadamard

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}; \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Fase

$$P|0\rangle = |0\rangle; P|1\rangle = e^{i\phi}|1\rangle; P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

UNITÁRIAS

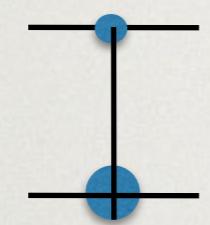


ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

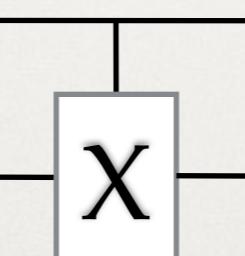
c	t	c	
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Porta Control-not (CNOT) (2-qubits)

Control $|c\rangle$ 

Target $|t\rangle$ $|t \oplus c\rangle$

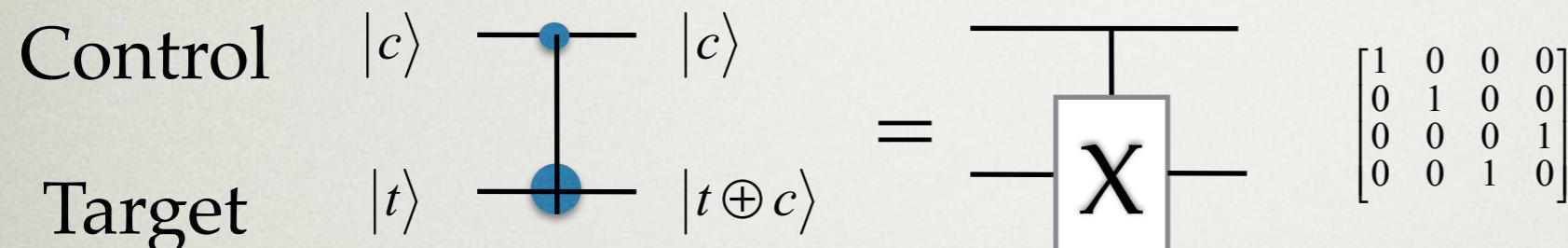
= 

$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

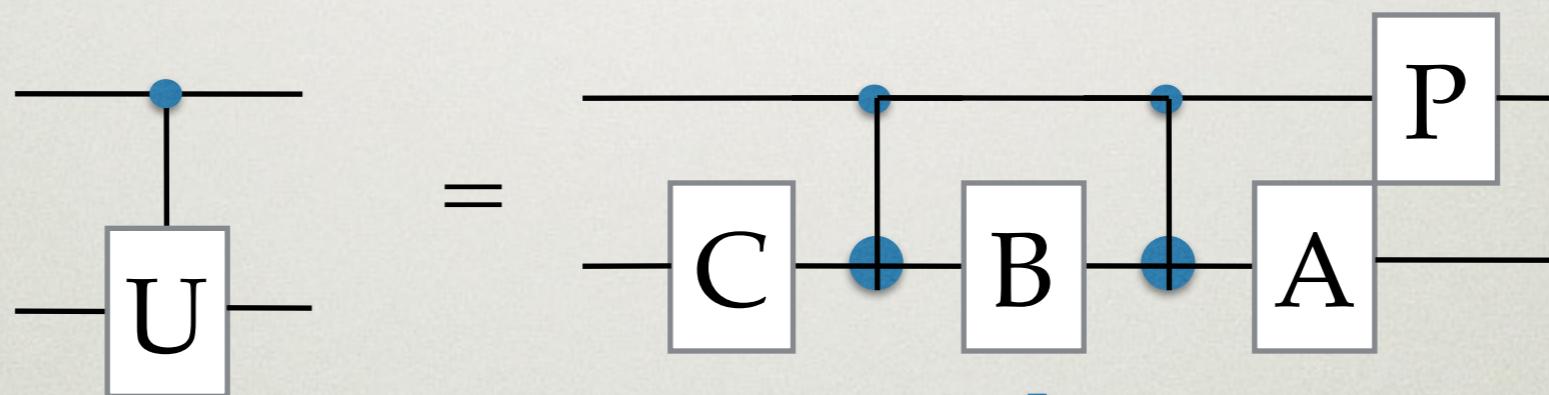
c	t	c	
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

ELEMENTOS DE COMPUTAÇÃO QUÂNTICA

Porta Control-not (CNOT) (2-qubits)



c	t	c	$ t \oplus c\rangle$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

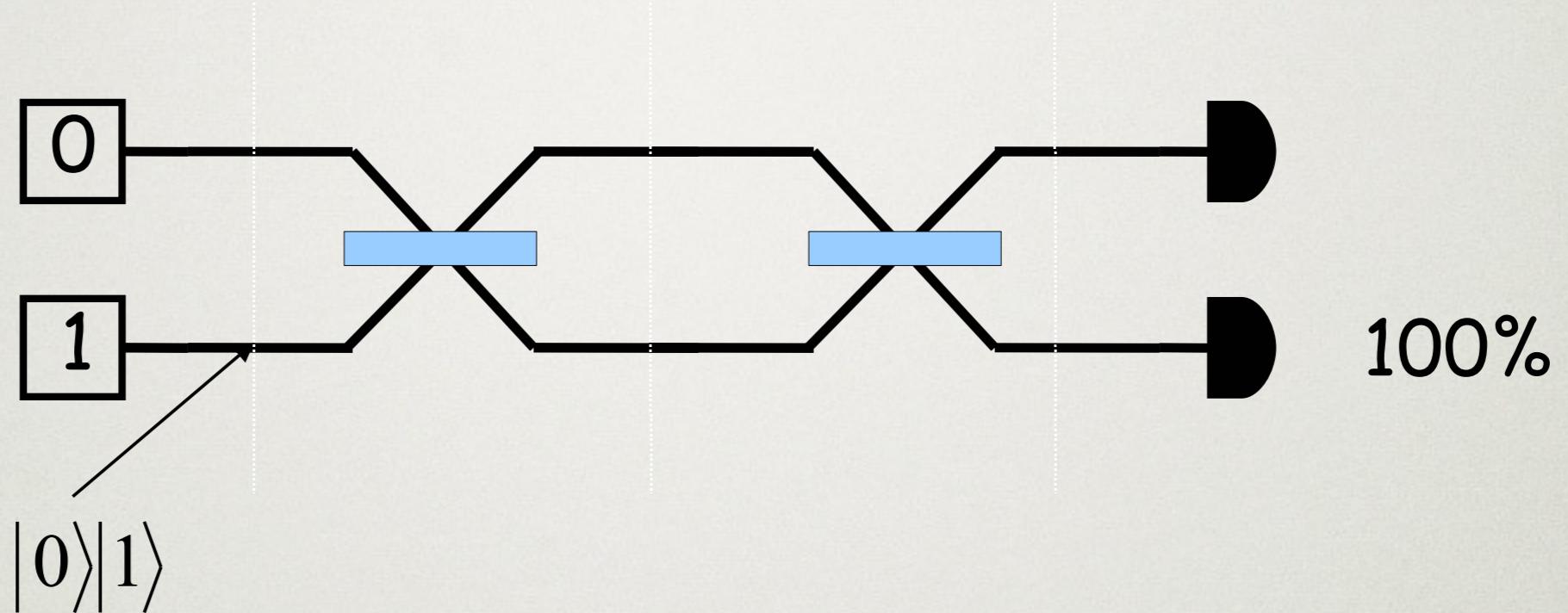


$$U = e^{i\phi} AXBXC$$

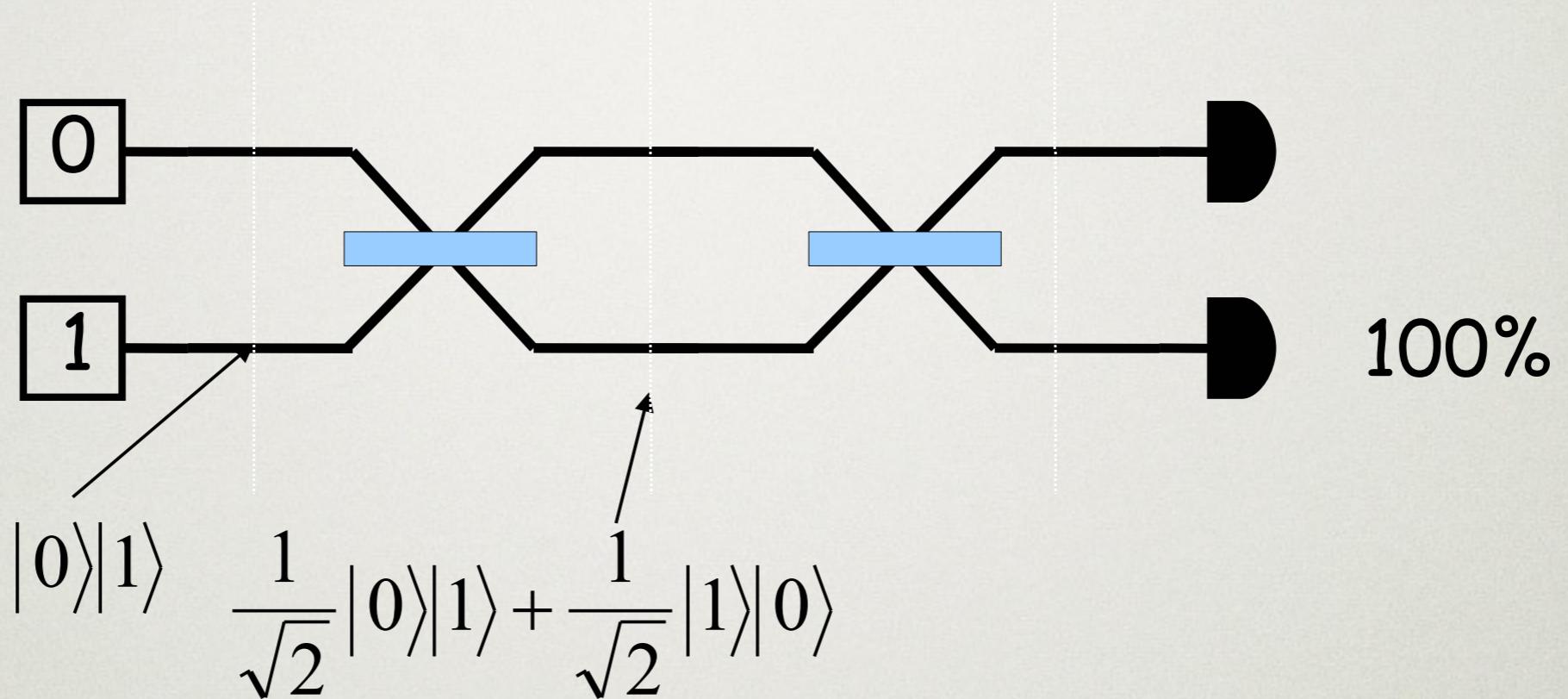
UNIVERSALIDADE

Retornando ao nosso problema

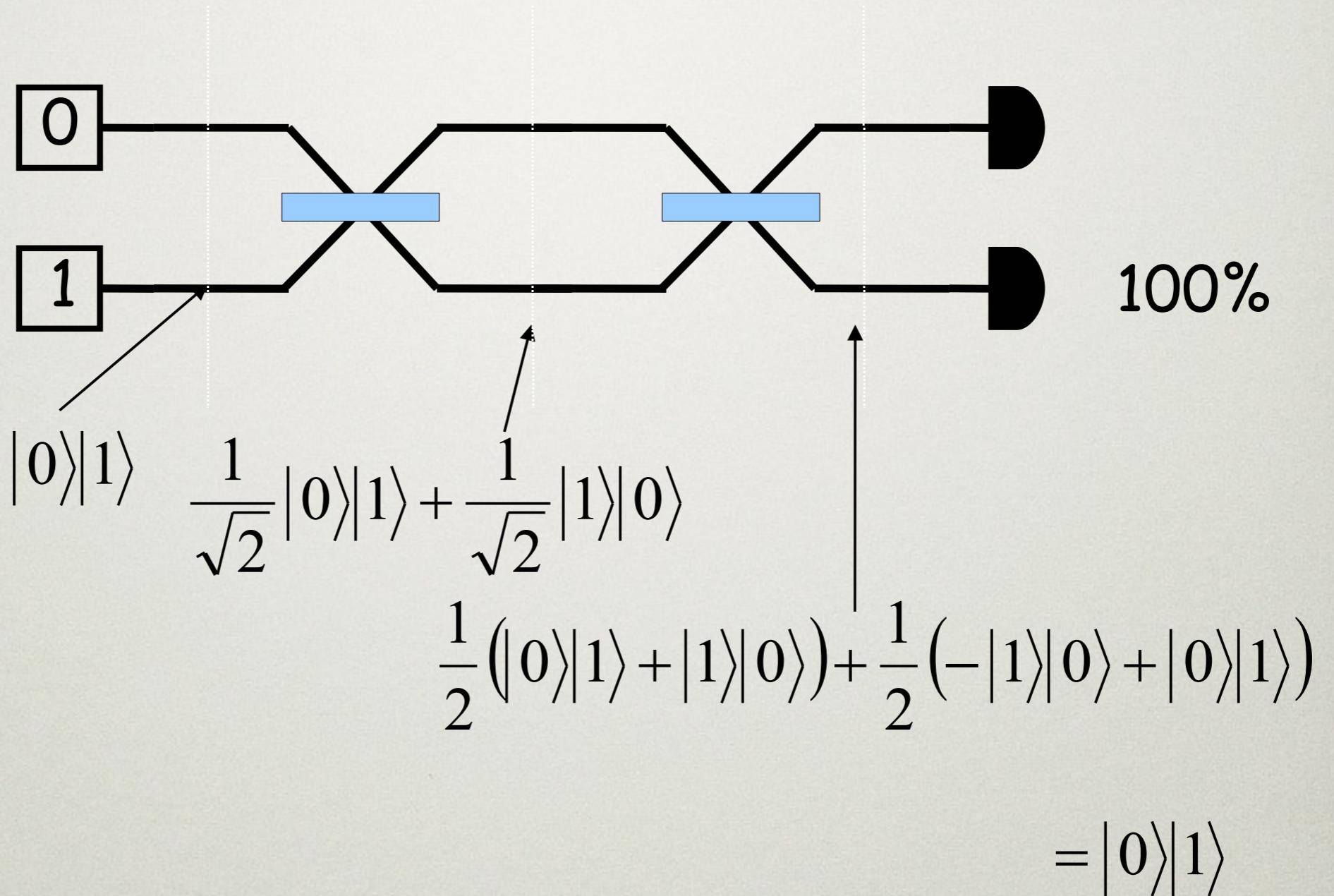
Retornando ao nosso problema

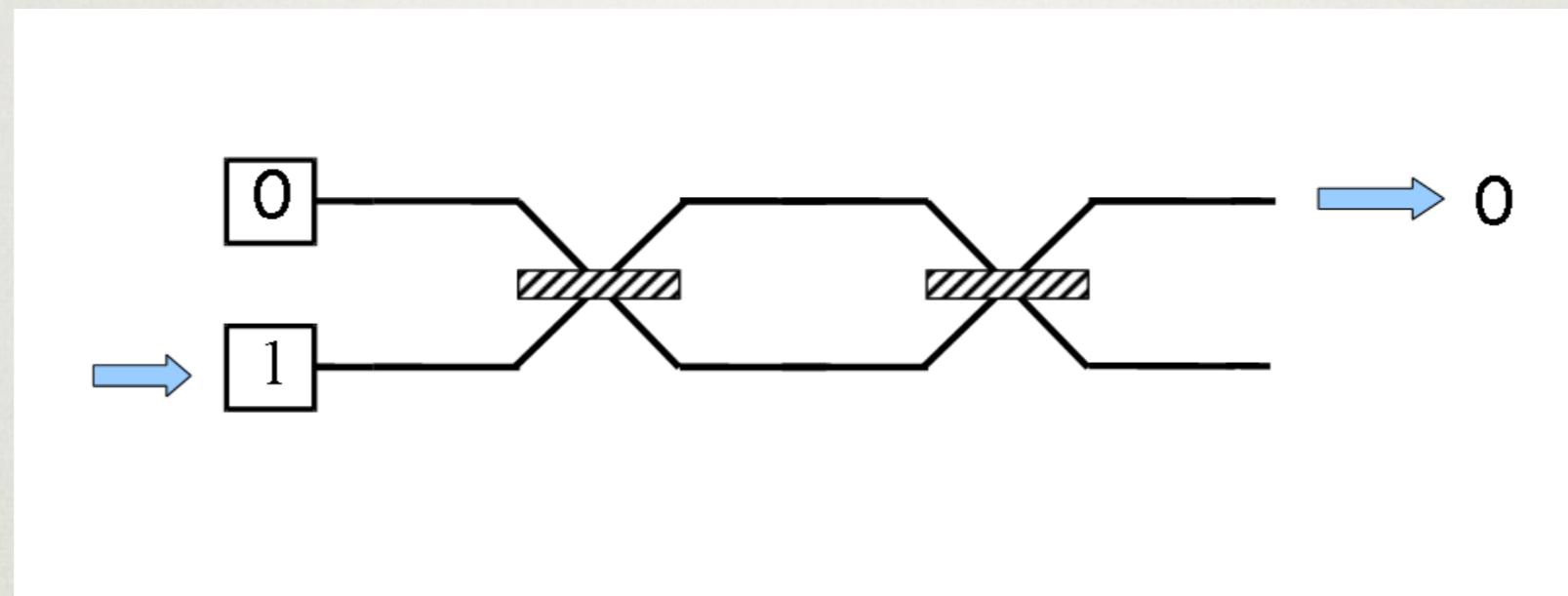


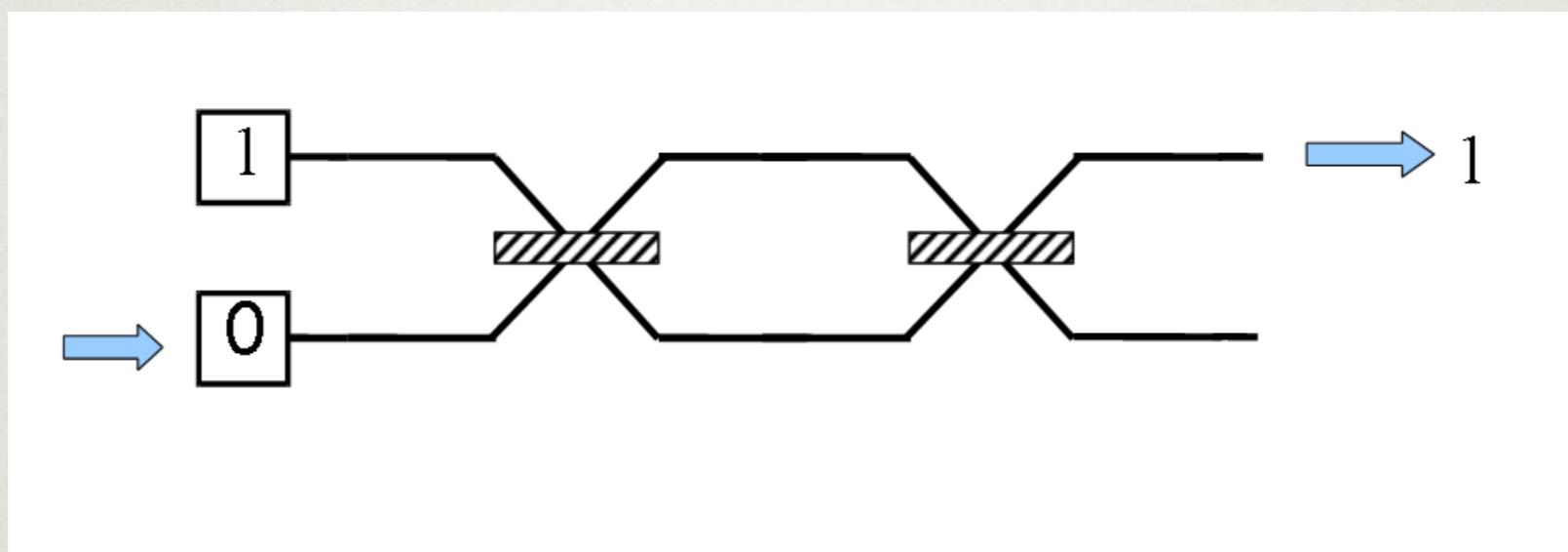
Retornando ao nosso problema

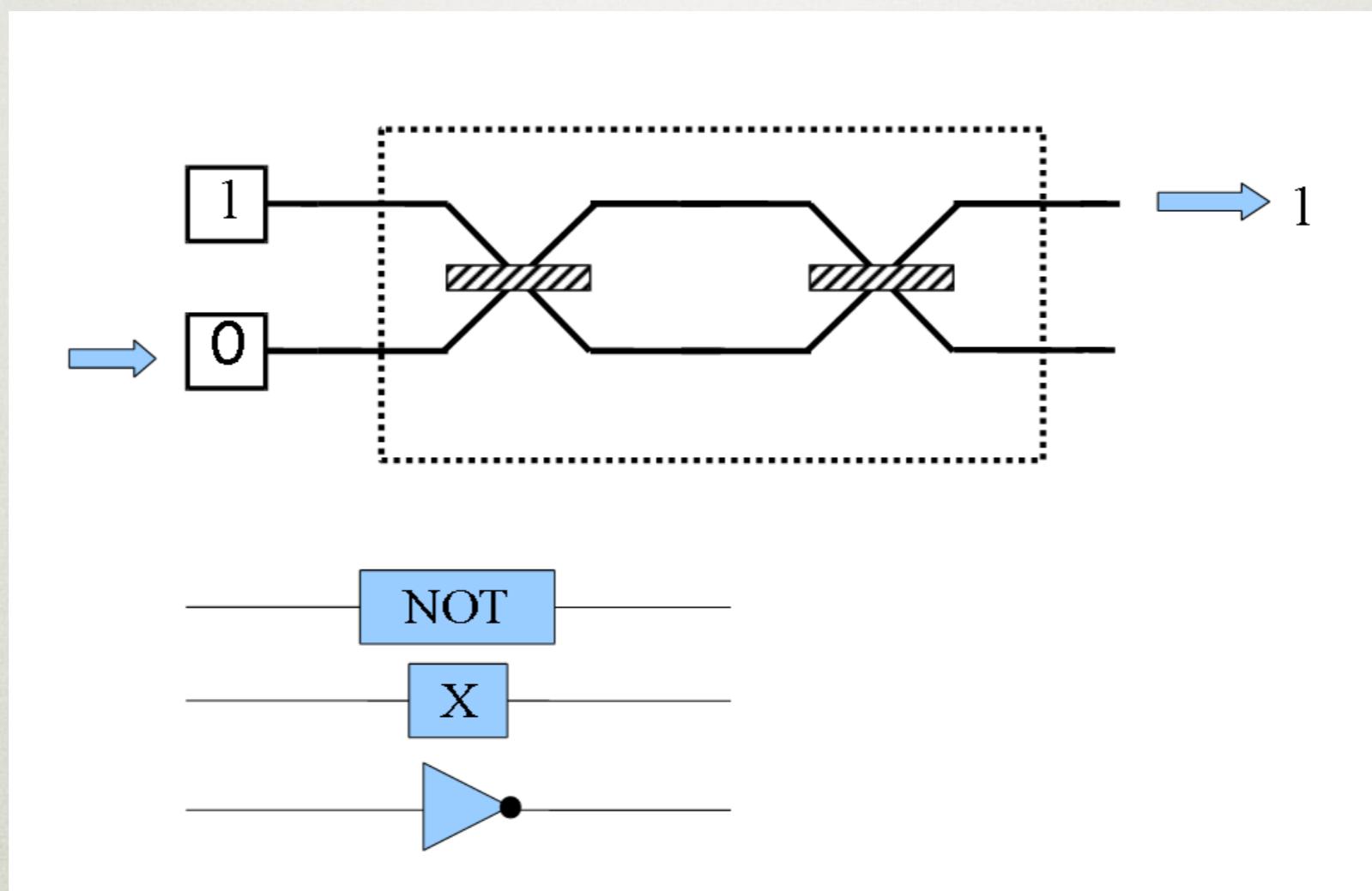


Retornando ao nosso problema







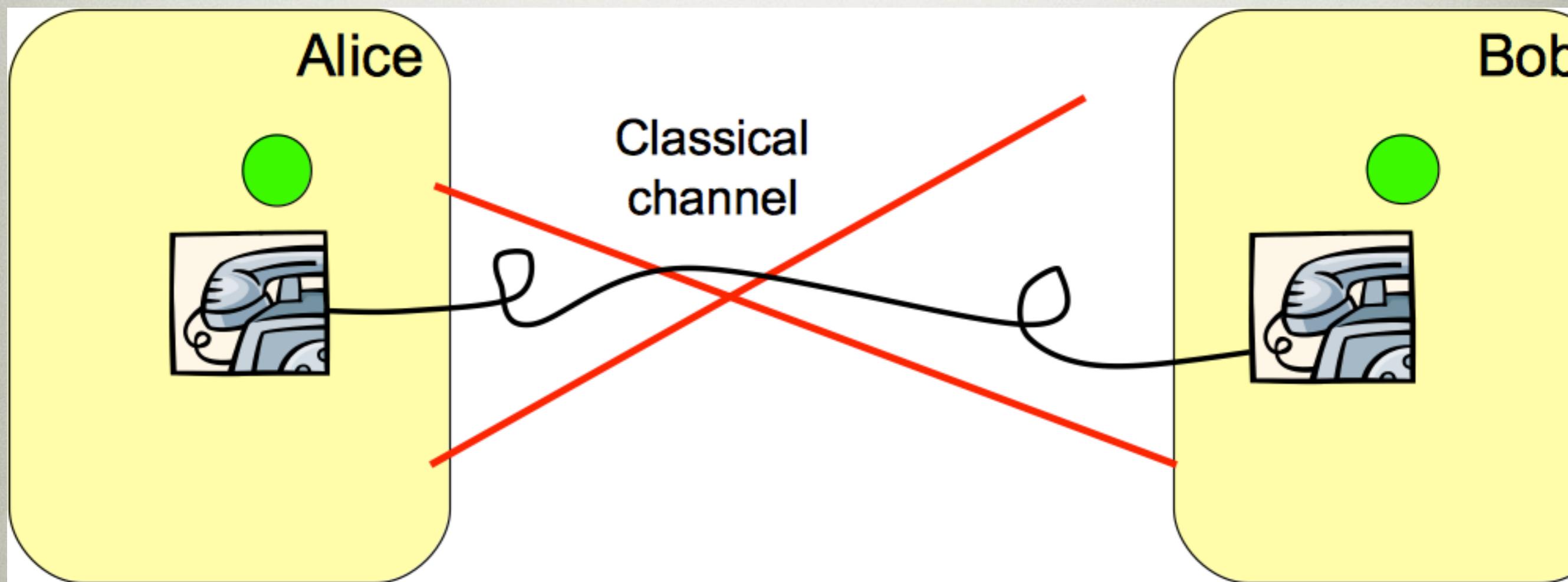


ALGORITMOS

- Problema de Bernstein-Vazirani e complexidade exponencial
- Problema de Simon - Período de função
- Algoritmo de Shor (Decomposição em potências de fatores primos)
- Algoritmo de Busca de Grover

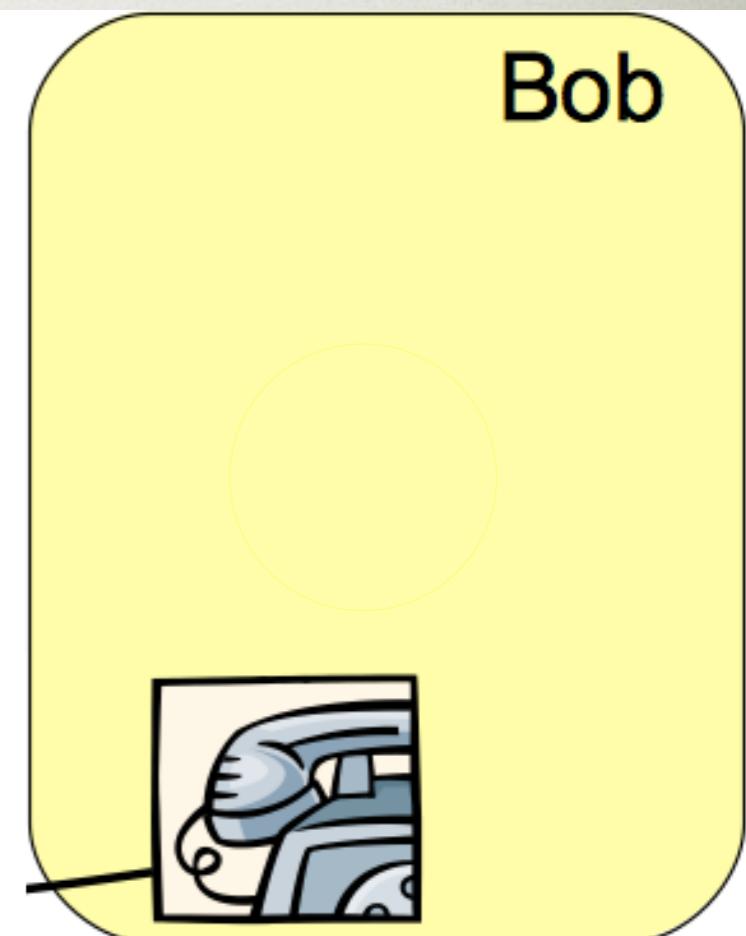
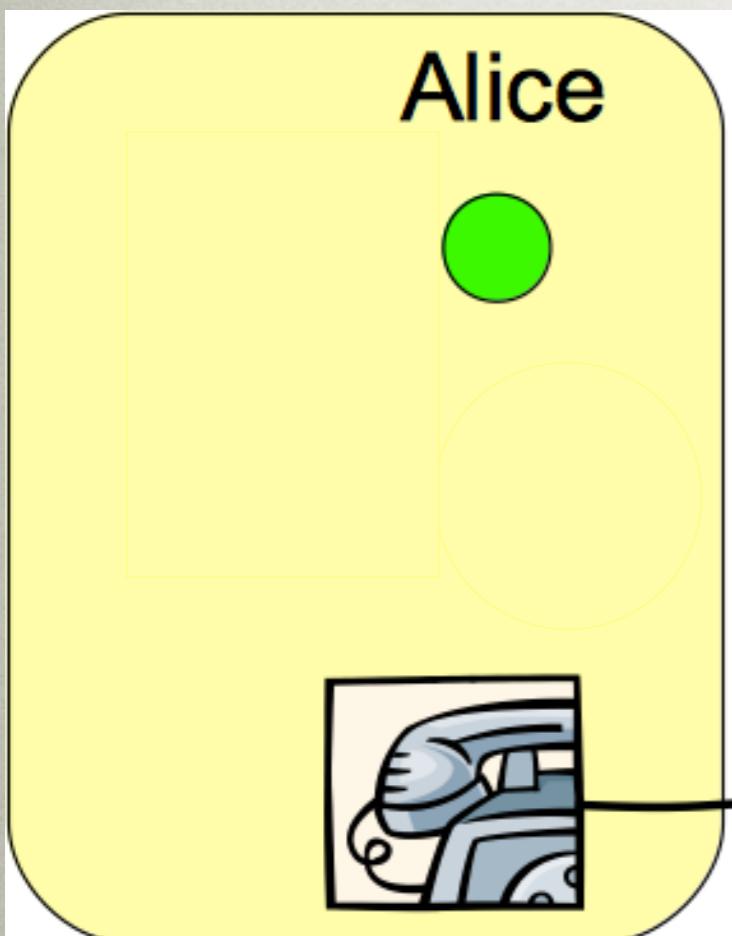
STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$



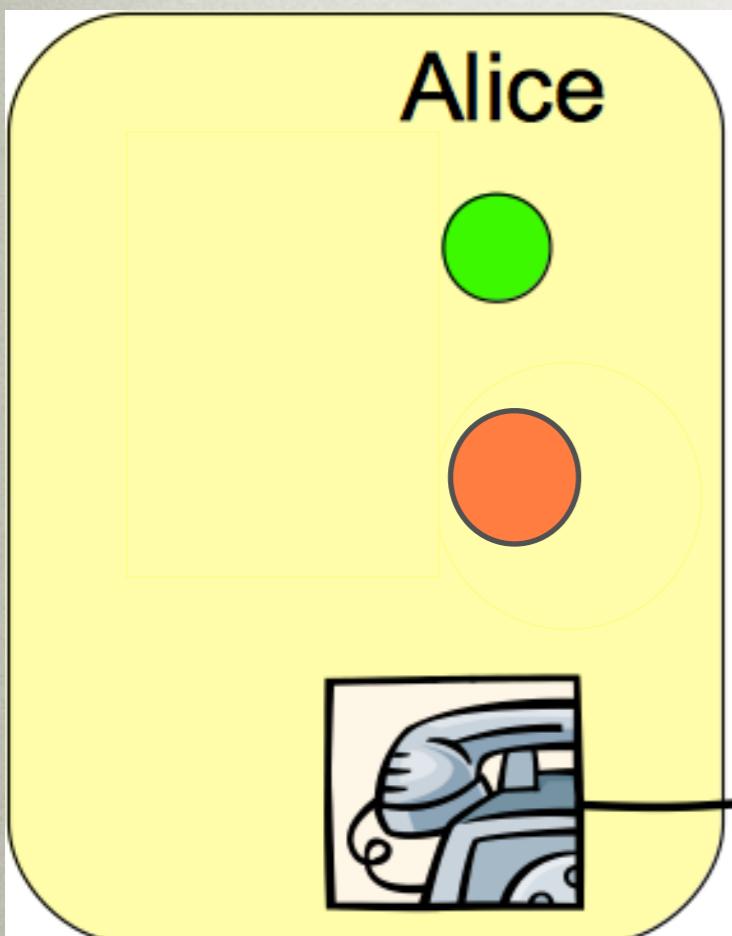
STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$

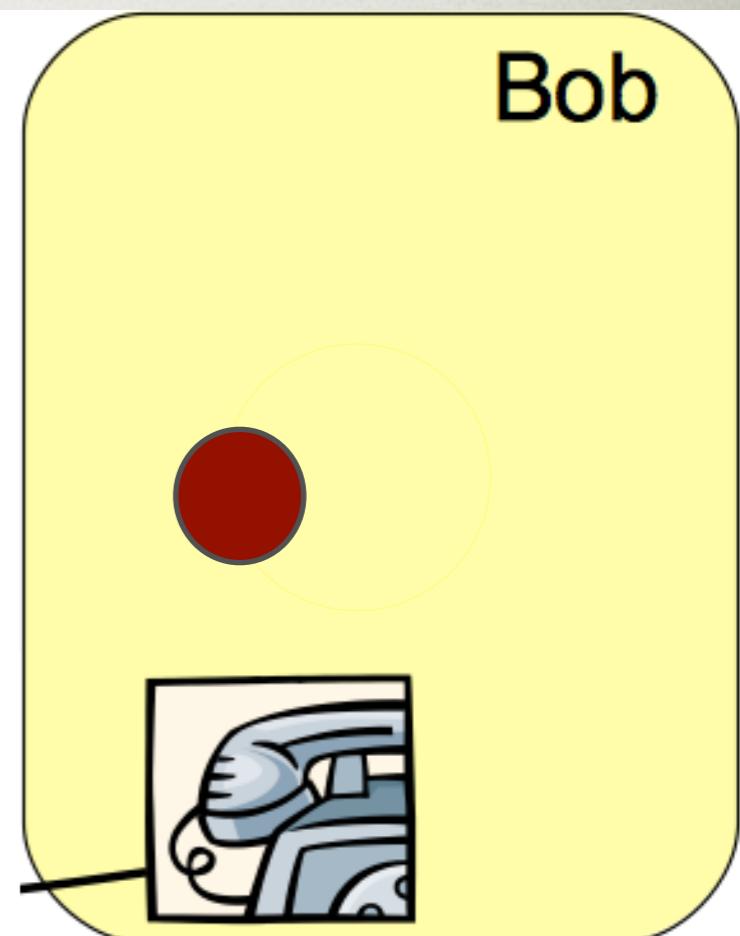


STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$

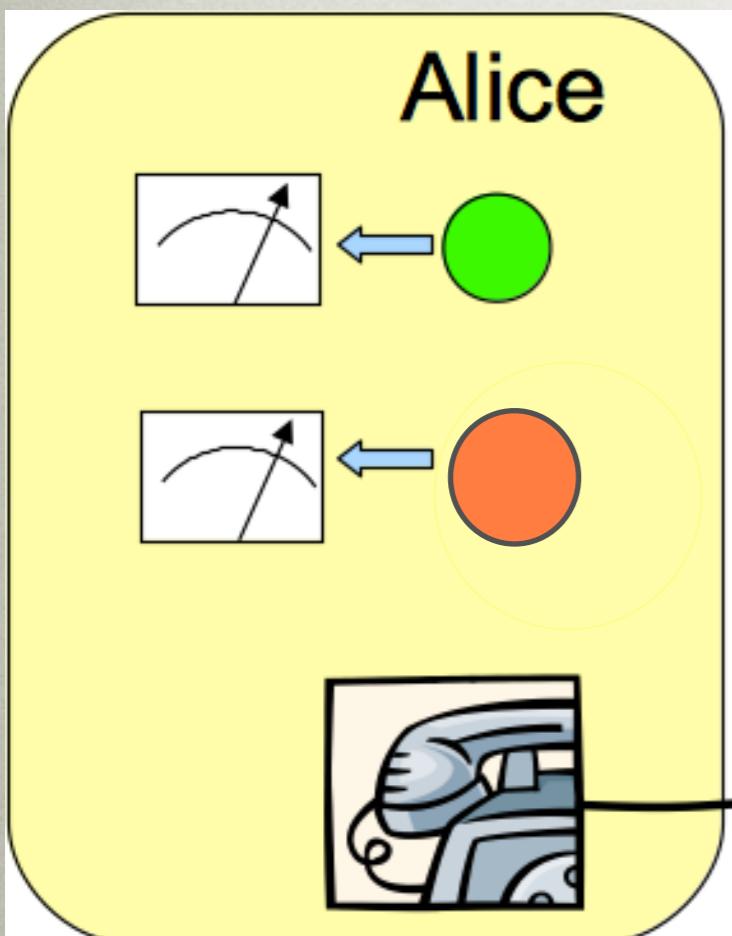


$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B)$$

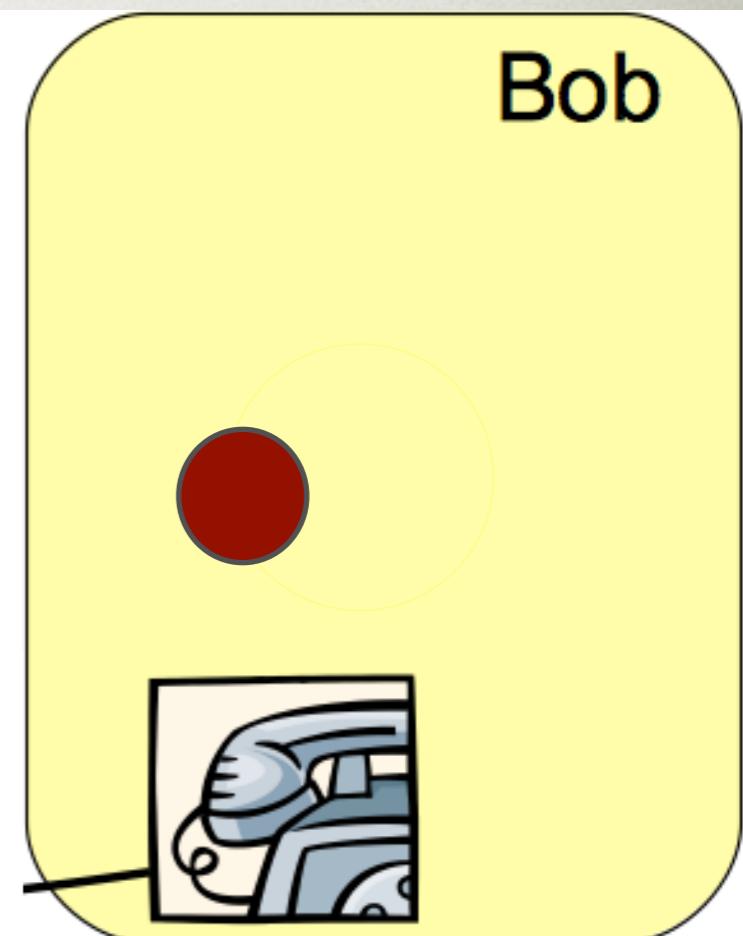


STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$

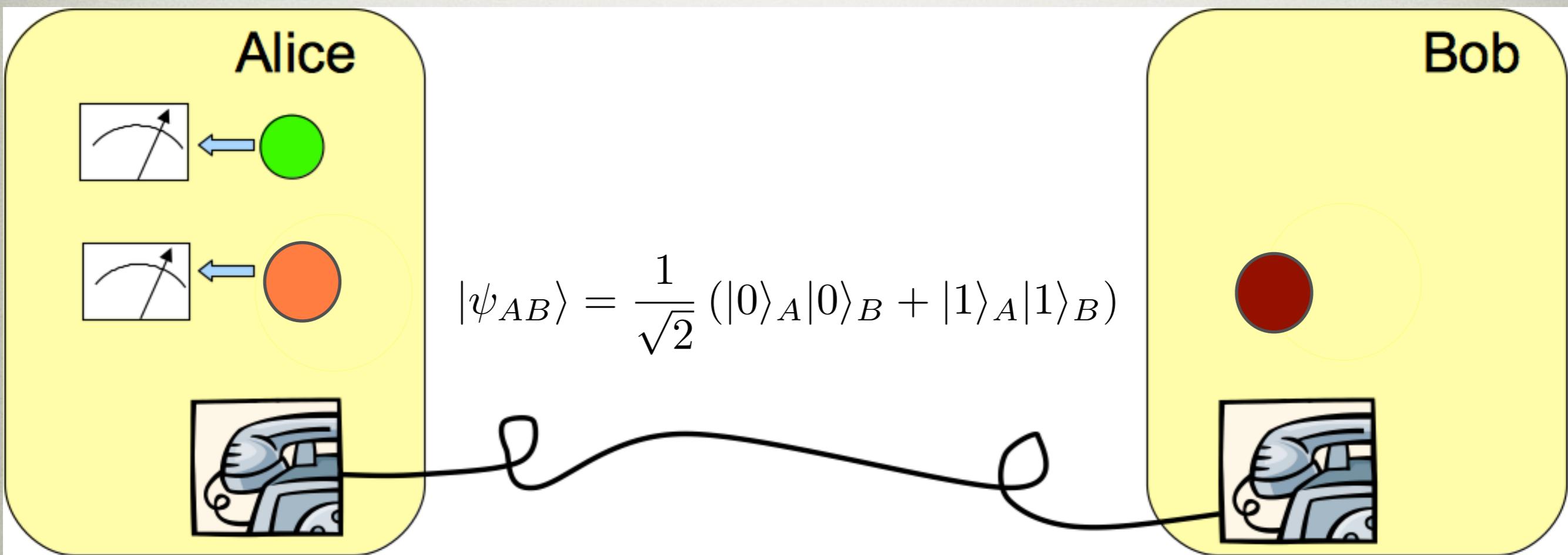


$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B)$$



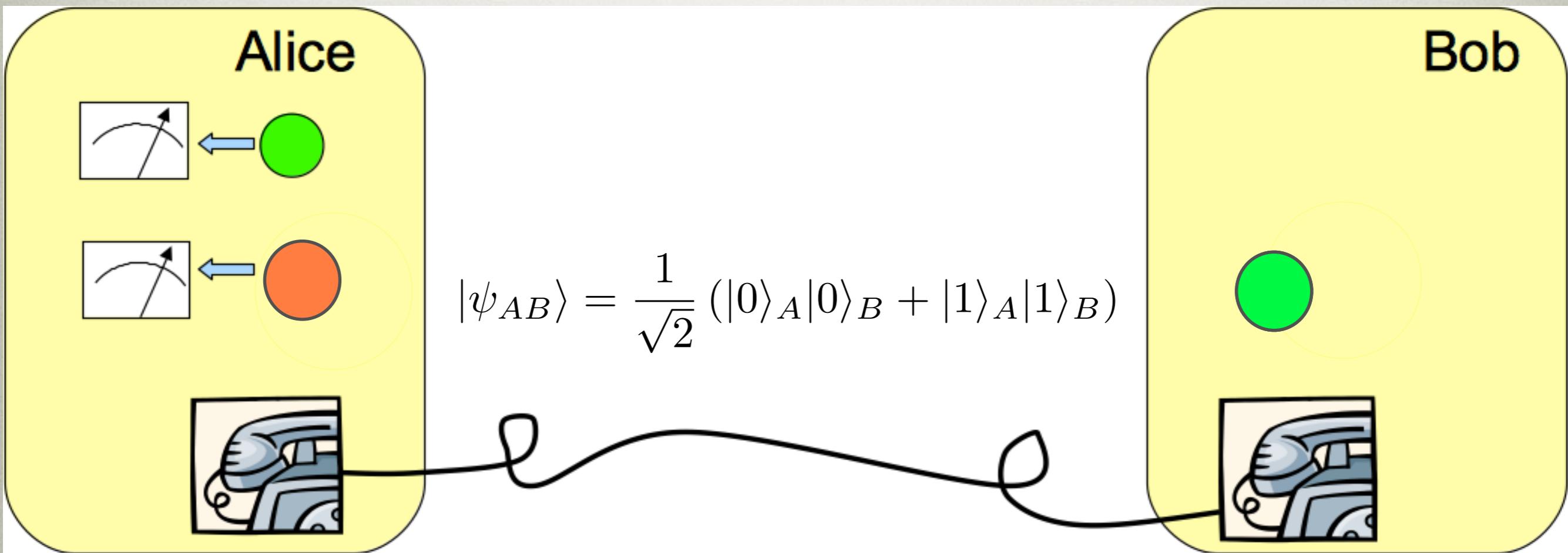
STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$



STATE TELEPORTATION

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, a, b?$$



$$|\Psi\rangle_T = a|0\rangle_T + b|1\rangle_T : a, b ?$$

Canal Quântico

$$|\phi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B)$$

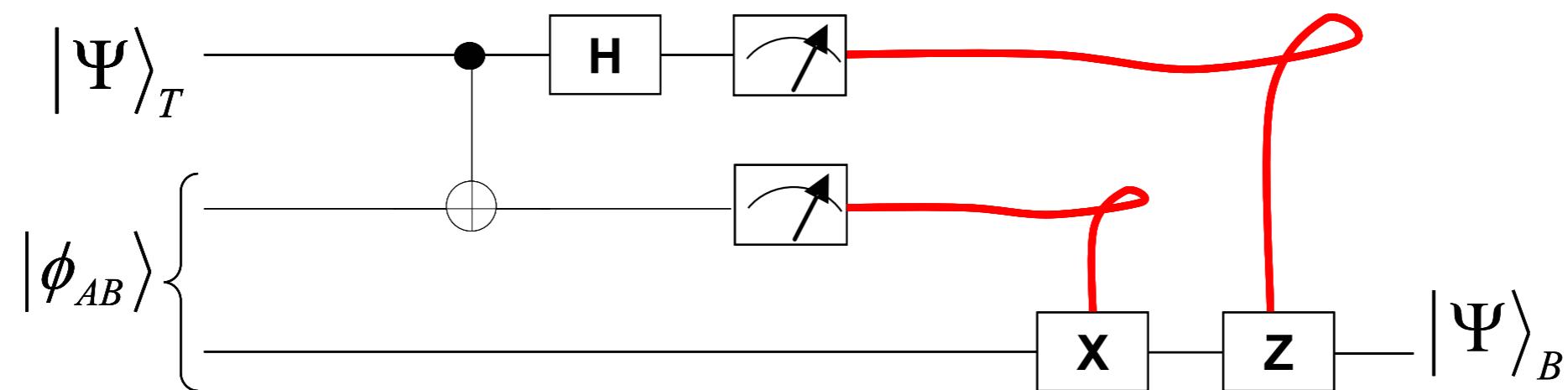


Figure : Transmissão de informação quântica por canal quântico.

$$\begin{array}{ll}
 \left| 0 \right\rangle_T \left| 0 \right\rangle_A \left(a \left| 0 \right\rangle_B + b \left| 1 \right\rangle_B \right) & (0,0) \quad I_B \\
 \left| 0 \right\rangle_T \left| 1 \right\rangle_A \left(a \left| 1 \right\rangle_B + b \left| 0 \right\rangle_B \right) & (0,1) \quad X_B \\
 \left| 1 \right\rangle_T \left| 0 \right\rangle_A \left(a \left| 0 \right\rangle_B - b \left| 1 \right\rangle_B \right) & (1,0) \quad Z_B \\
 \left| 1 \right\rangle_T \left| 1 \right\rangle_A \left(a \left| 1 \right\rangle_B - b \left| 0 \right\rangle_B \right) & (1,1) \quad Z_B X_B
 \end{array}$$

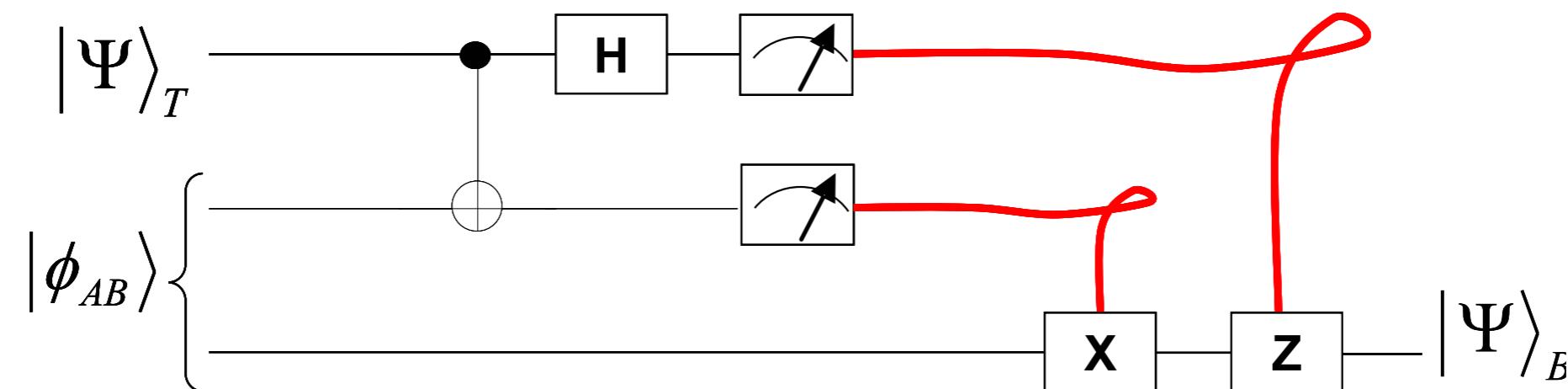


Figure : Transmissão de informação quântica por canal quântico.

IMPLEMENTAÇÃO

REQUISITOS (DIVINCENZO)

Locais

- Caracterizar um sistema escalável com conjunto bem definido de estados quânticos para serem utilizados como **qubits**;
- Preparar estados puros apropriados neste conjunto (**inicialização**);
- Realizar evoluções quânticas requeridas (**portas universais**);
- Tempo de **decoerência** longo o suficiente para realizar computação;
- **Leitura** dos resultados;

Não-locais

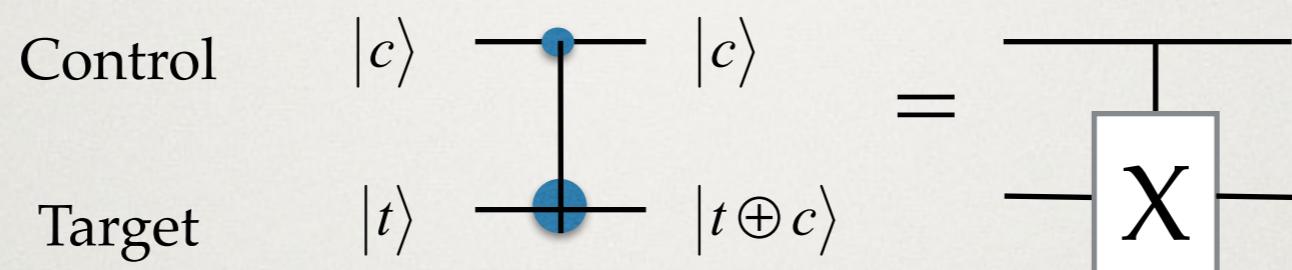
- **Conectividade**;
- Transmissão a longa distância (**flying qubits**),

DECOERÊNCIA

$|t \oplus c\rangle$

DECOERÊNCIA

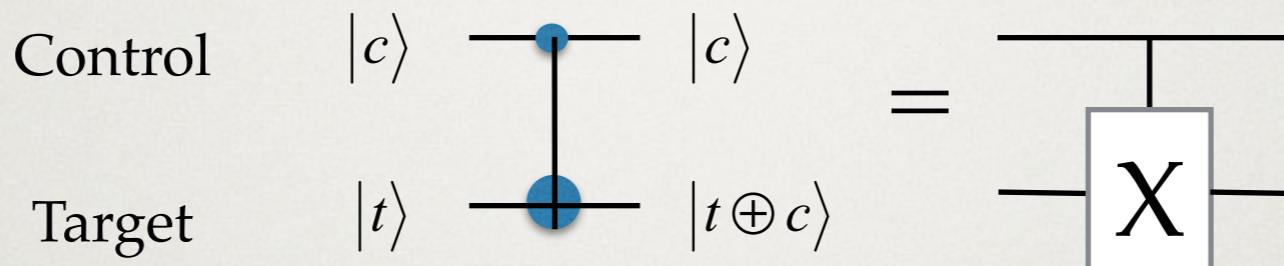
Porta Control-not (CNOT)



c	t	c	$ t \oplus c\rangle$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

DECOERÊNCIA

Porta Control-not (CNOT)



c	t	c	$ t \oplus c\rangle$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

$$|c\rangle = a|0\rangle_c + b|1\rangle_c$$

$$|t\rangle = |0\rangle_t$$

$$|c\rangle|t\rangle = a|0\rangle_c|0\rangle_t + b|1\rangle_c|0\rangle_t \Rightarrow a|0\rangle_c|0\rangle_t + b|1\rangle_c|1\rangle_t$$

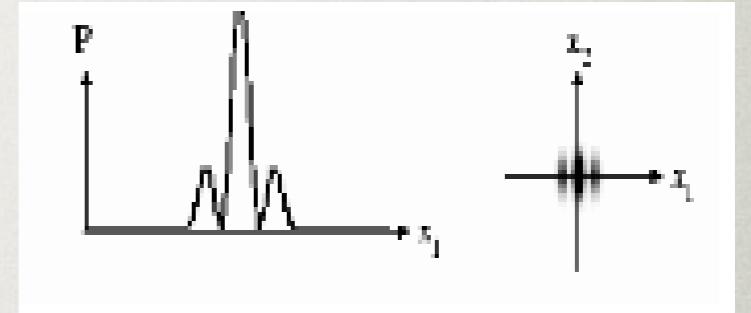
$$\rho_c = |c\rangle\langle c| = |a|^2 |0\rangle\langle 0|_c + |b|^2 |1\rangle\langle 1|_c + a^*b|1\rangle\langle 0|_c + ab^*|0\rangle\langle 1|_c$$

$$\rho_{ct} = |c,t\rangle\langle c,t| = |a|^2 |0,0\rangle\langle 0,0| + |b|^2 |1,0\rangle\langle 1,0| + a^*b|1,0\rangle\langle 0,0| + ab^*|0,0\rangle\langle 1,0|$$

$$\Rightarrow \rho'_{ct} = |a|^2 |0,0\rangle\langle 0,0| + |b|^2 |1,1\rangle\langle 1,1| + a^*b|1,1\rangle\langle 0,0| + ab^*|0,0\rangle\langle 1,1|$$

DECOERÊNCIA

$$\rho'_{ct} = |a|^2 |0,0\rangle\langle 0,0| + |b|^2 |1,1\rangle\langle 1,1| + a^*b|1,1\rangle\langle 0,0| + ab^*|0,0\rangle\langle 1,1|$$



DECOERÊNCIA

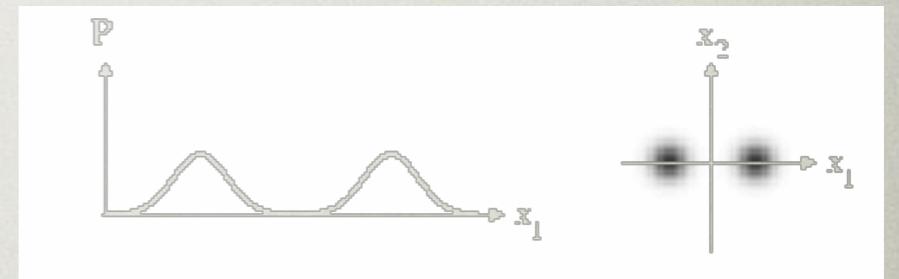
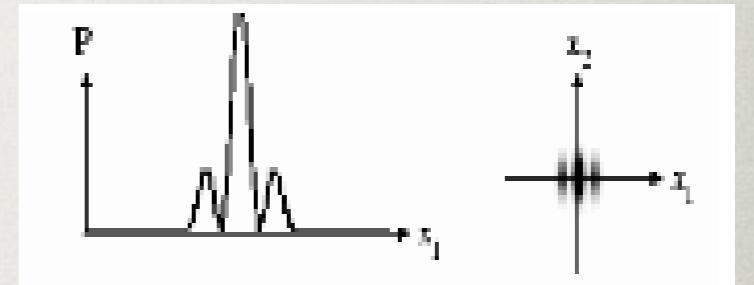
$$\rho_{ct} = |a|^2 |0,0\rangle\langle 0,0| + |b|^2 |1,1\rangle\langle 1,1| + a^*b|1,1\rangle\langle 0,0| + ab^*|0,0\rangle\langle 1,1|$$

$$\rho_{cmix} = p_0 |0\rangle\langle 0|_c + p_1 |1\rangle\langle 1|_c$$

$$|t\rangle = |0\rangle_t$$

$$\rho_{ctmix} = |c,t\rangle\langle c,t| = p_0 |0,0\rangle\langle 0,0| + p_1 |1,0\rangle\langle 1,0|$$

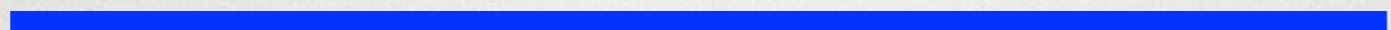
$$\Rightarrow \rho_{ctmix} = p_0 |0,0\rangle\langle 0,0| + p_1 |1,1\rangle\langle 1,1|$$



DECOERÊNCIA

Interações mais
fracas

Interações mais
fortes

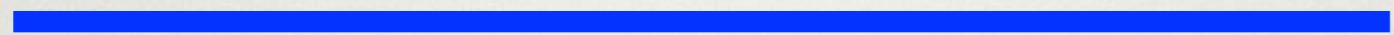


DECOERÊNCIA

Interações mais
fracas



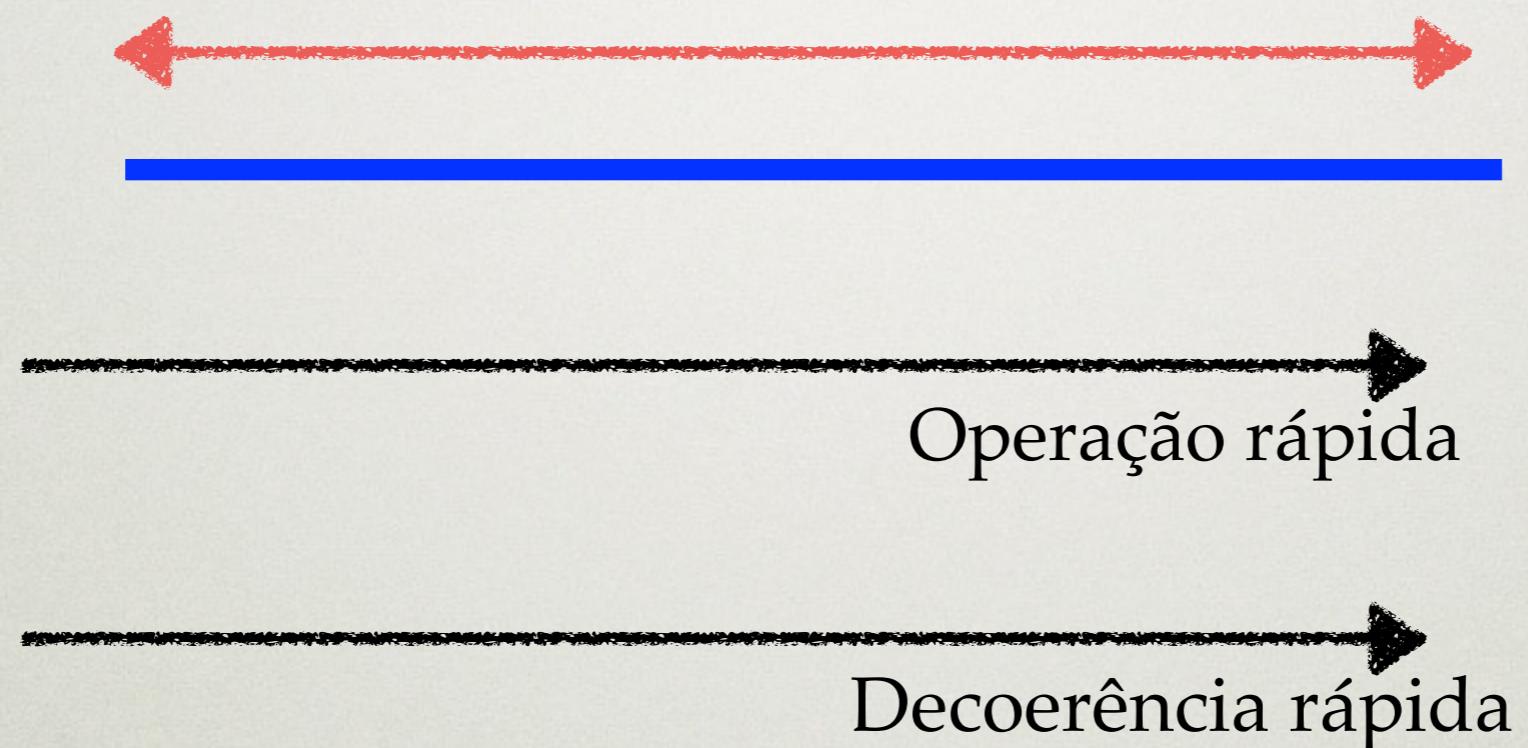
Interações mais
fortes



DECOERÊNCIA

Interações mais
fracas

Interações mais
fortes



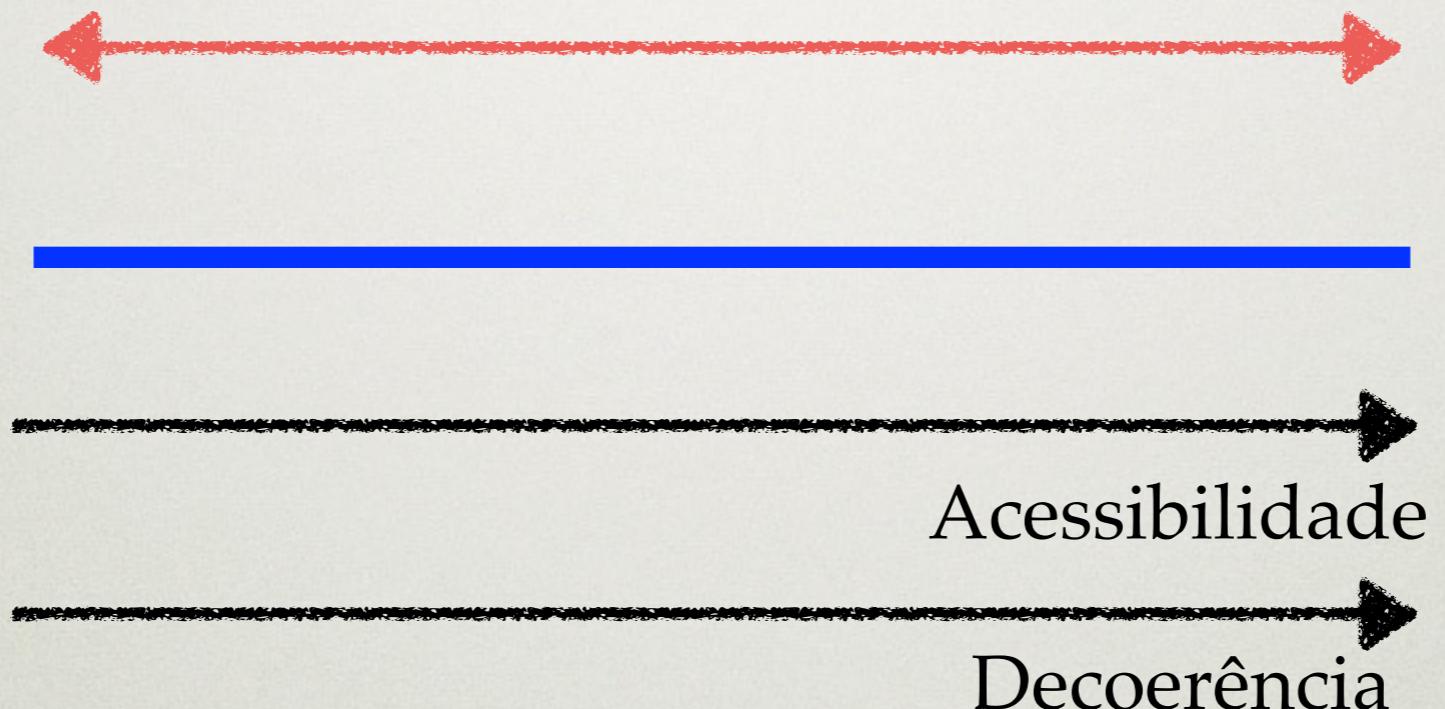
ACESSIBILIDADE



ACESSIBILIDADE

Acoplamento
fraco com meio
externo

Acoplamento
forte com meio
externo



	qubit	inicialização	decoerência	quates	leitura	transmissão	t. longa distância
NMR	Red	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red
Íons Aprisionados	Blue	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Blue
Átomos em Cavidades	Blue	Green	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Óptica	Green	Blue	Green	Blue	Blue	Blue	Blue
Semicondutores	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red
Supercondutores	Blue	Green	Blue	Blue	Blue	Red	Red
		Há um procedimento viável suficientemente comprovado					
		Há um procedimento viável, mas não suficientemente comprovado					
		Não há procedimento viável conhecido.					

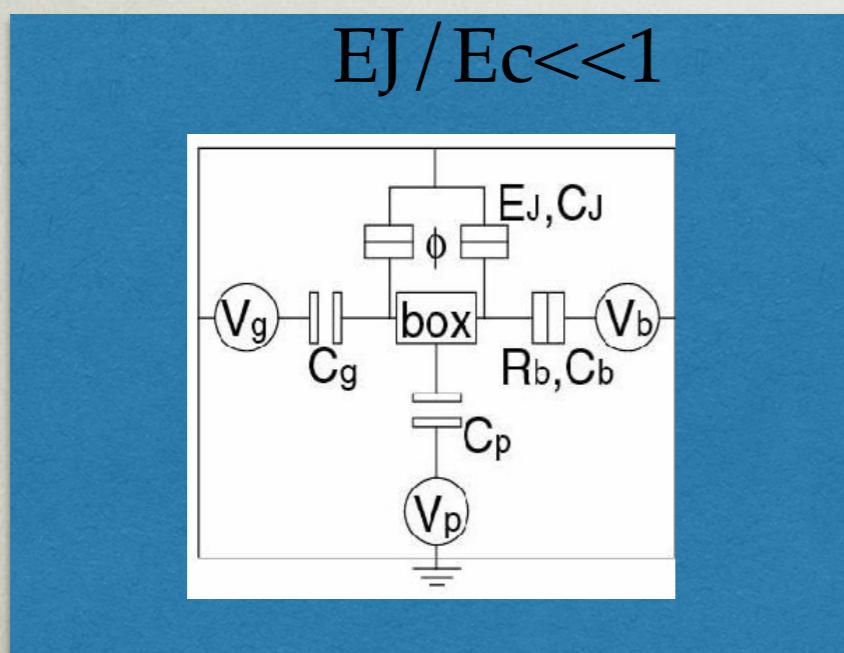
CIRCUITOS SUPERCONDUTORES

- Acoplamento forte com o meio– tempo de coerência curto
- Acoplamento qubit-qubit forte – portas rápidas
- Fácil acesso via sinais elétricos
- Facilmente projetada com capacitores, indutores e junções Josephson
- Fácil de fabricar e integrar

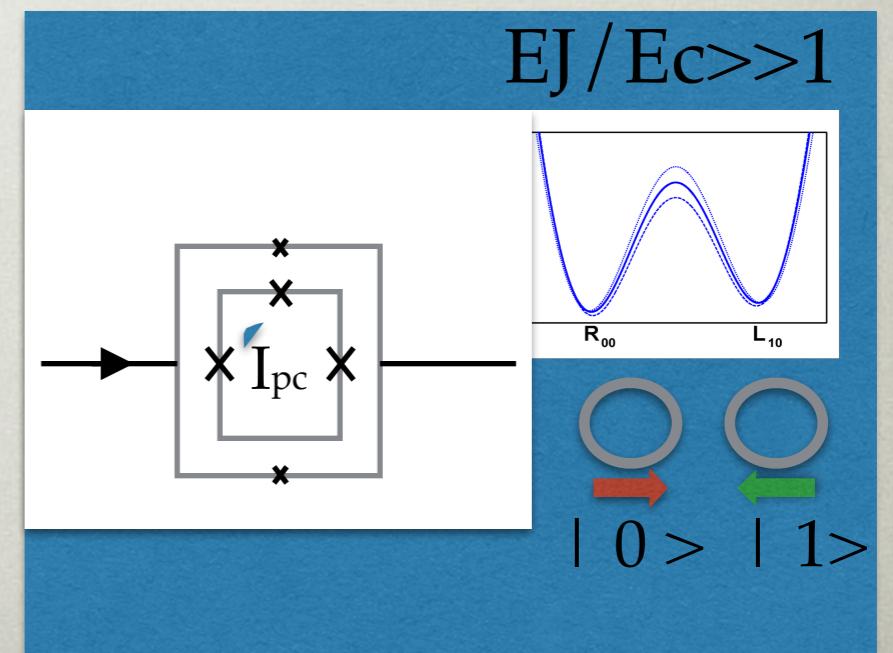
CIRCUITOS SUPERCONDUTORES

- Acoplamento forte com o meio – tempo de coerência curto
- Acoplamento qubit-qubit forte – portas rápidas
- Fácil acesso via sinais elétricos
- Facilmente projetada com capacitores, indutores e junções Josephson
- Fácil de fabricar e integrar

Qubit de Carga



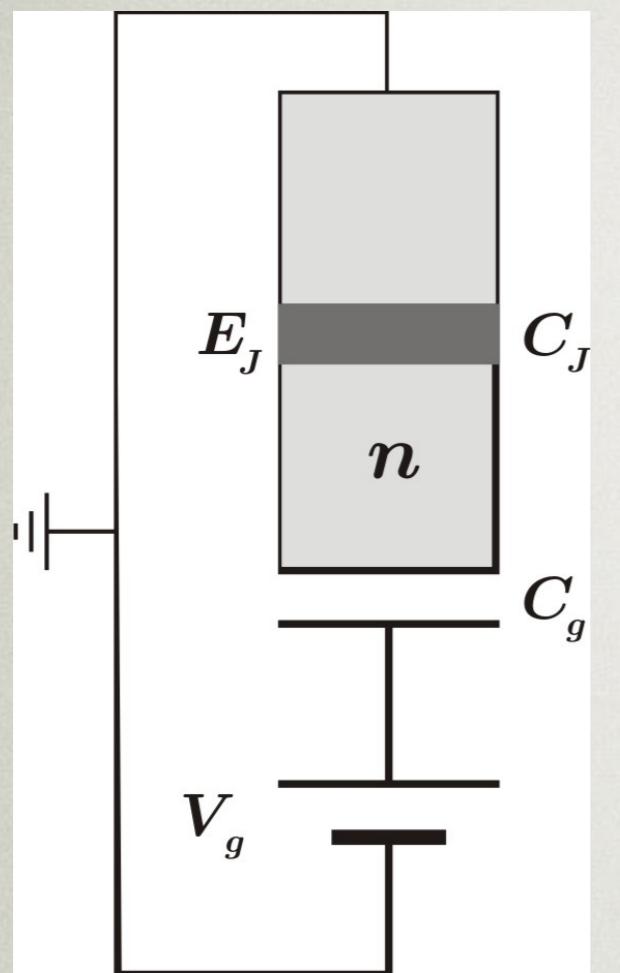
Qubit de Fluxo



Nakamura..., Nature (1999)

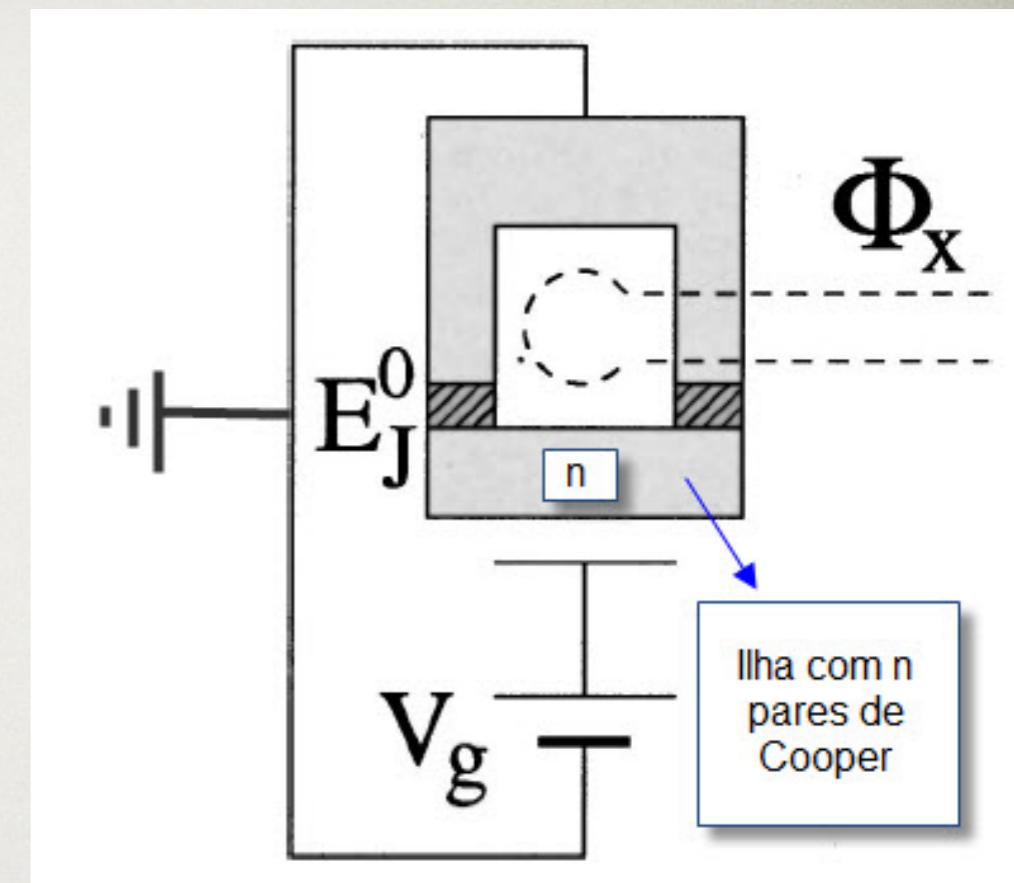
Mooij, Orlando..., Science (1999)

QUBIT DE CARGA

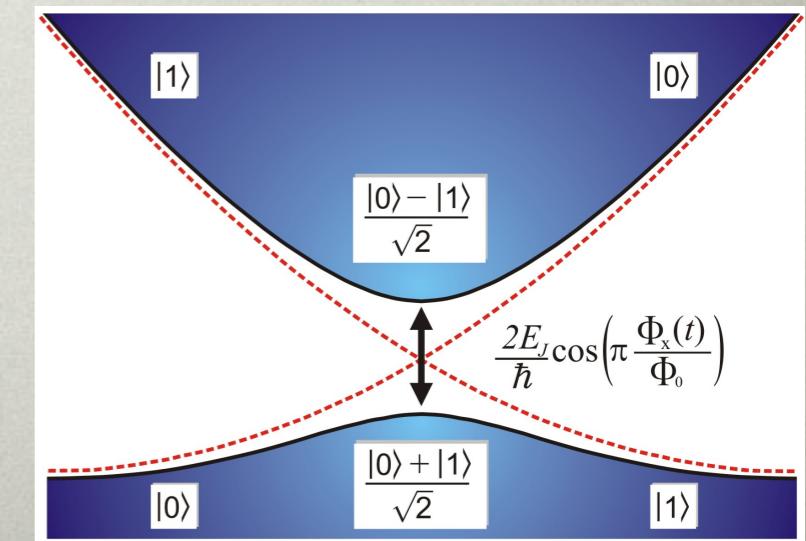
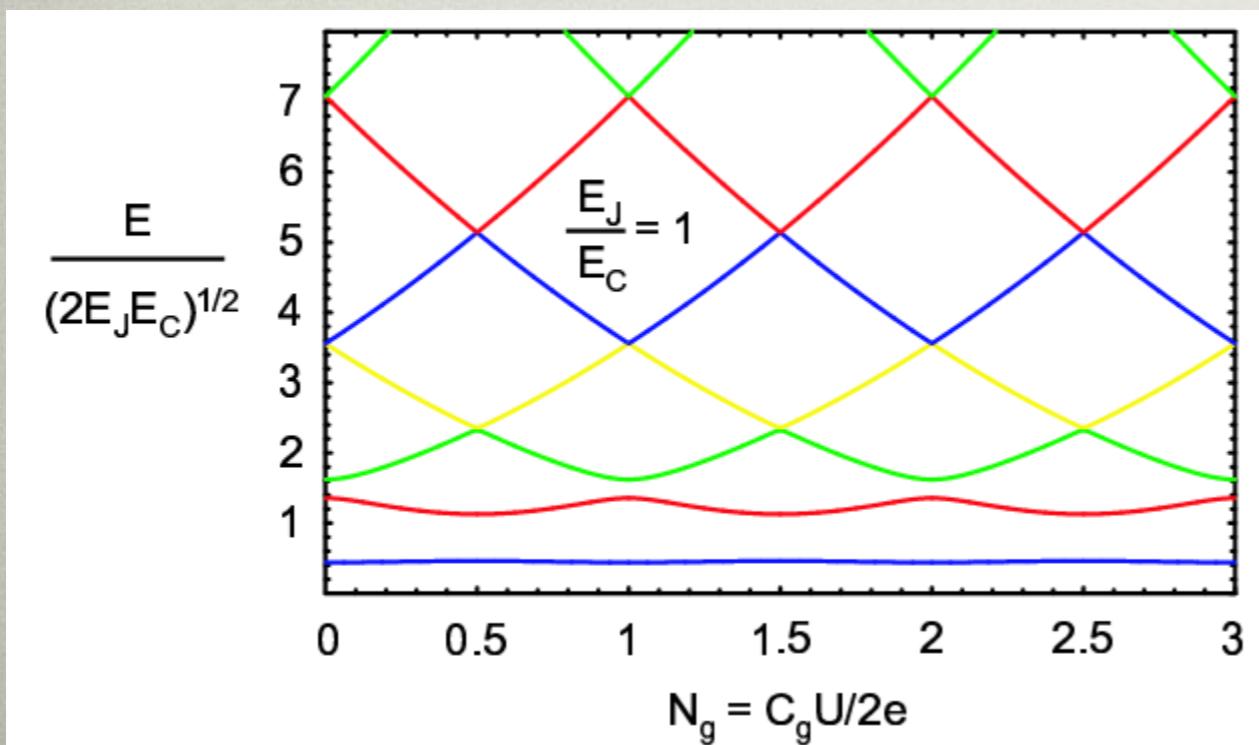


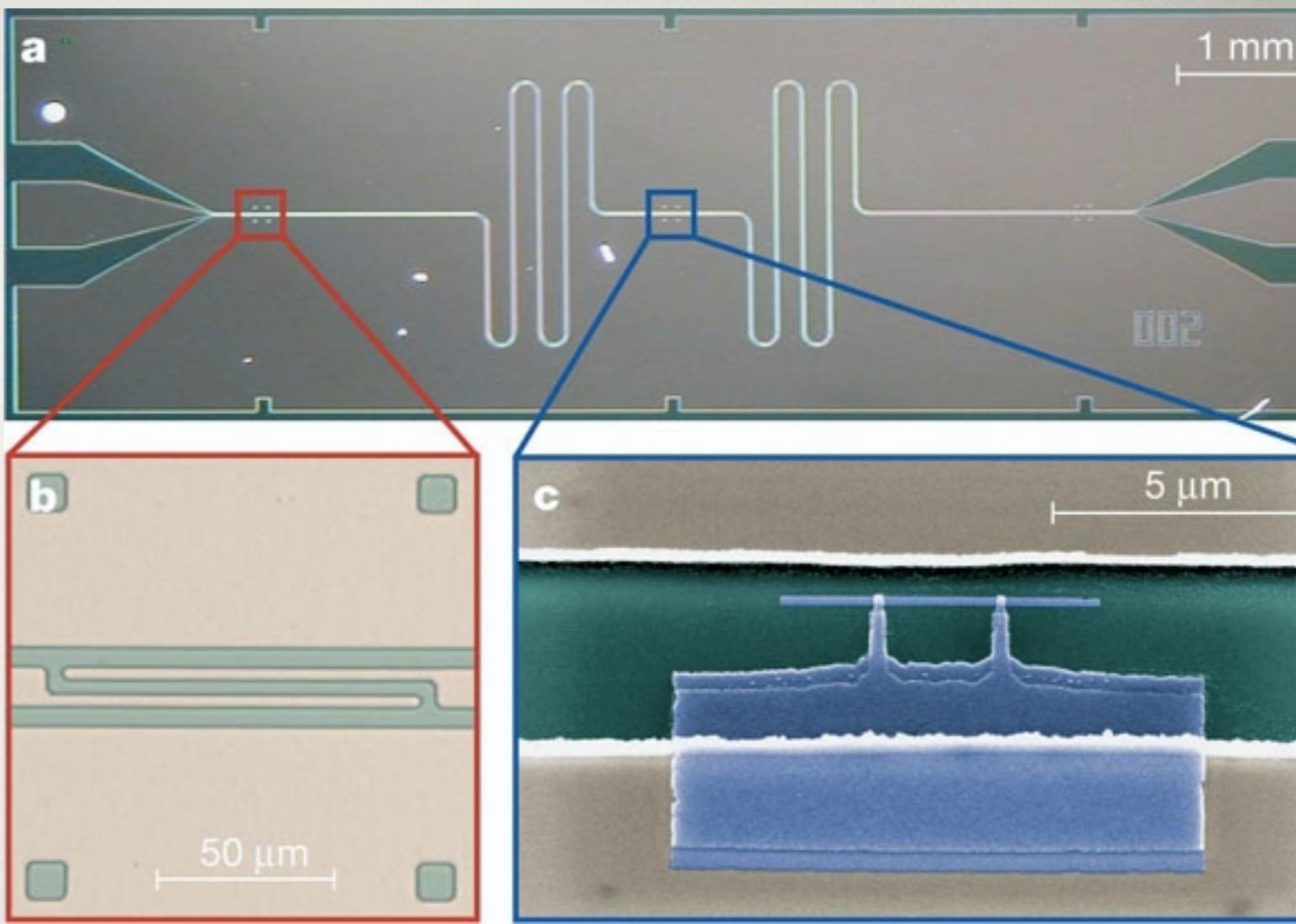
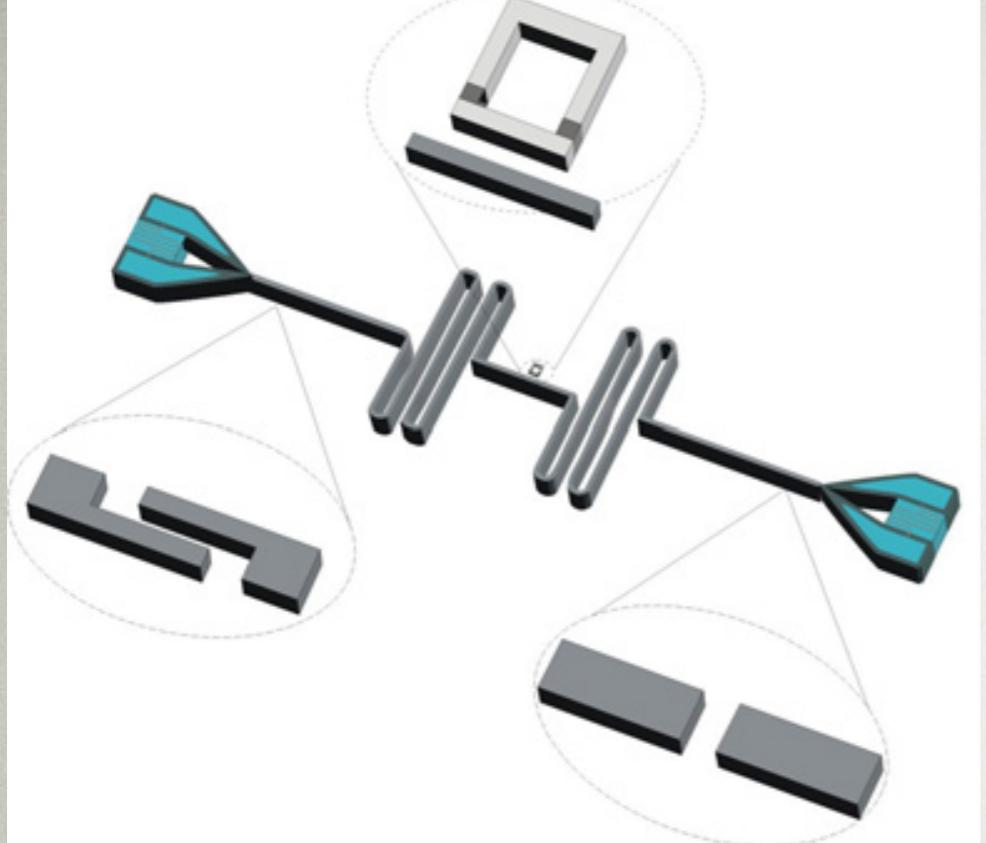
$$E_J$$

$$E_C = \frac{(2e)^2}{2(C_g + C_J)}$$

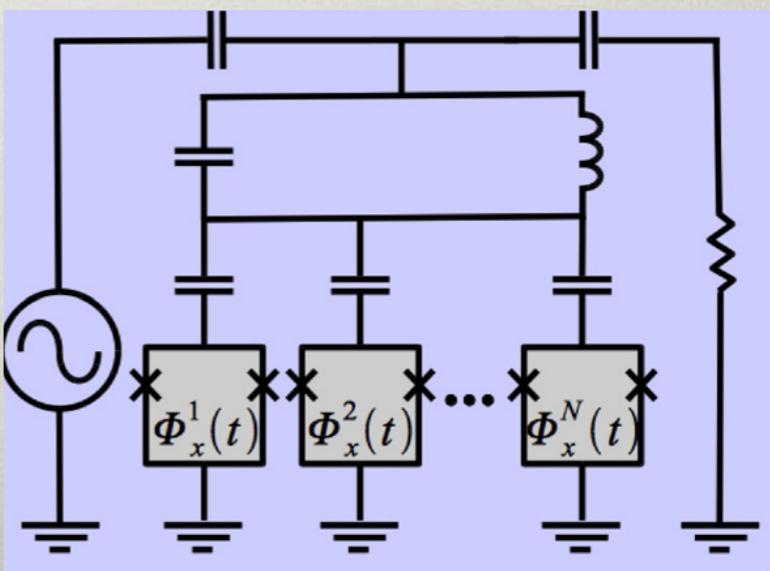
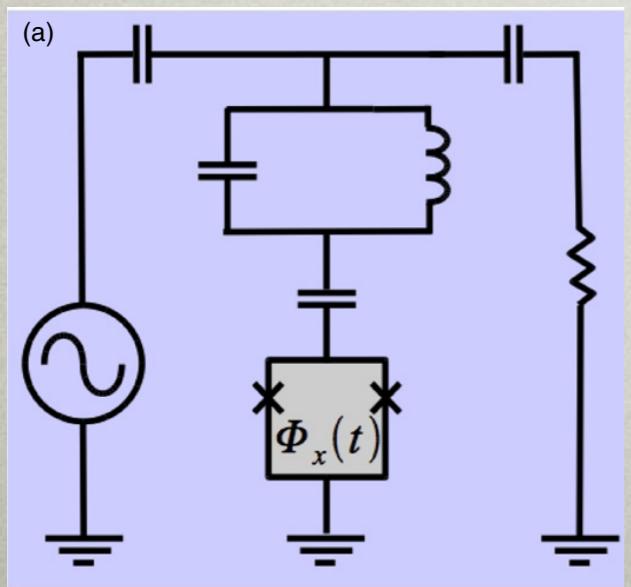


$$E_J \Rightarrow 2E_J \cos\left(\pi \frac{\Phi_x(t)}{\Phi_0}\right)$$



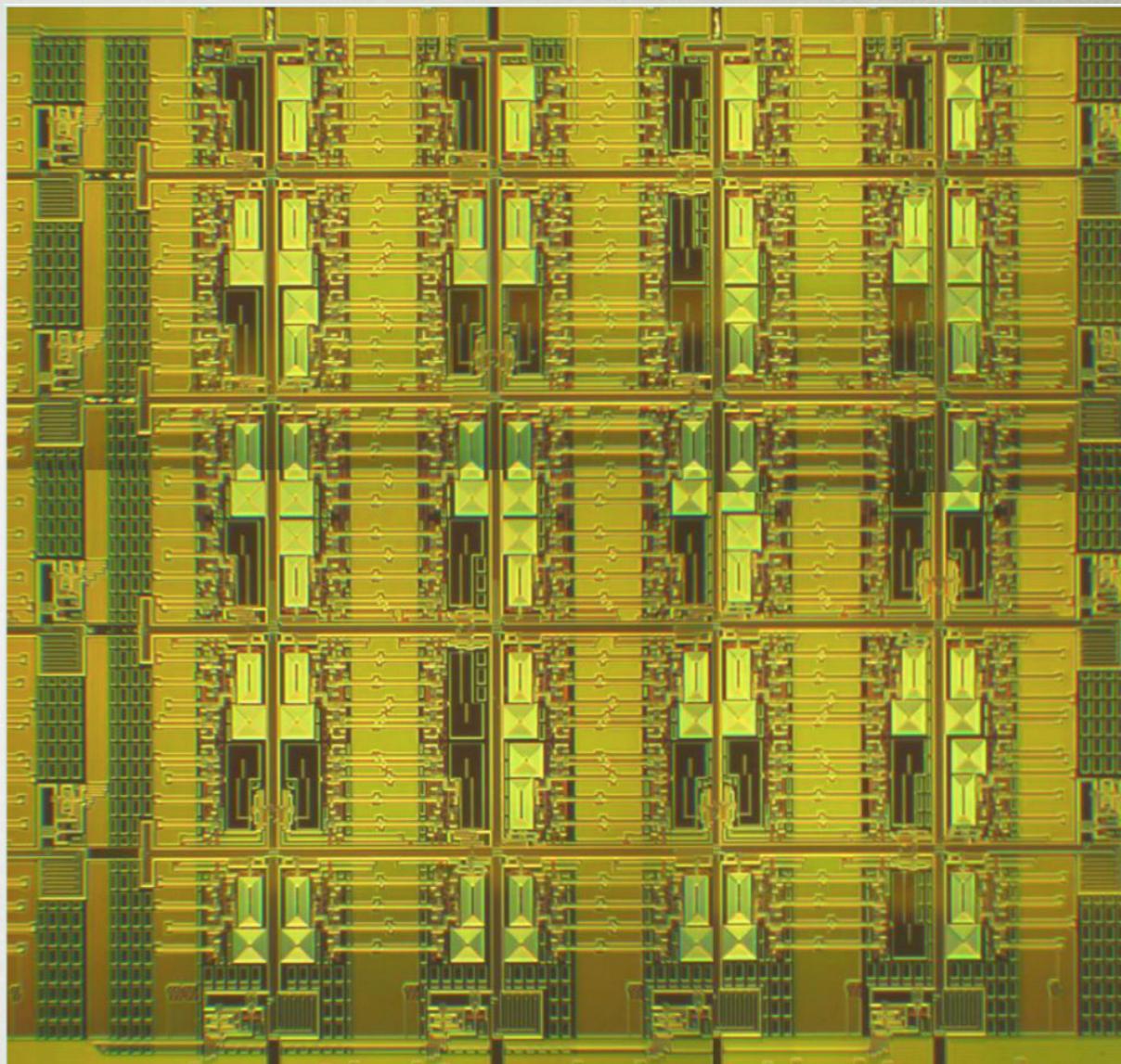
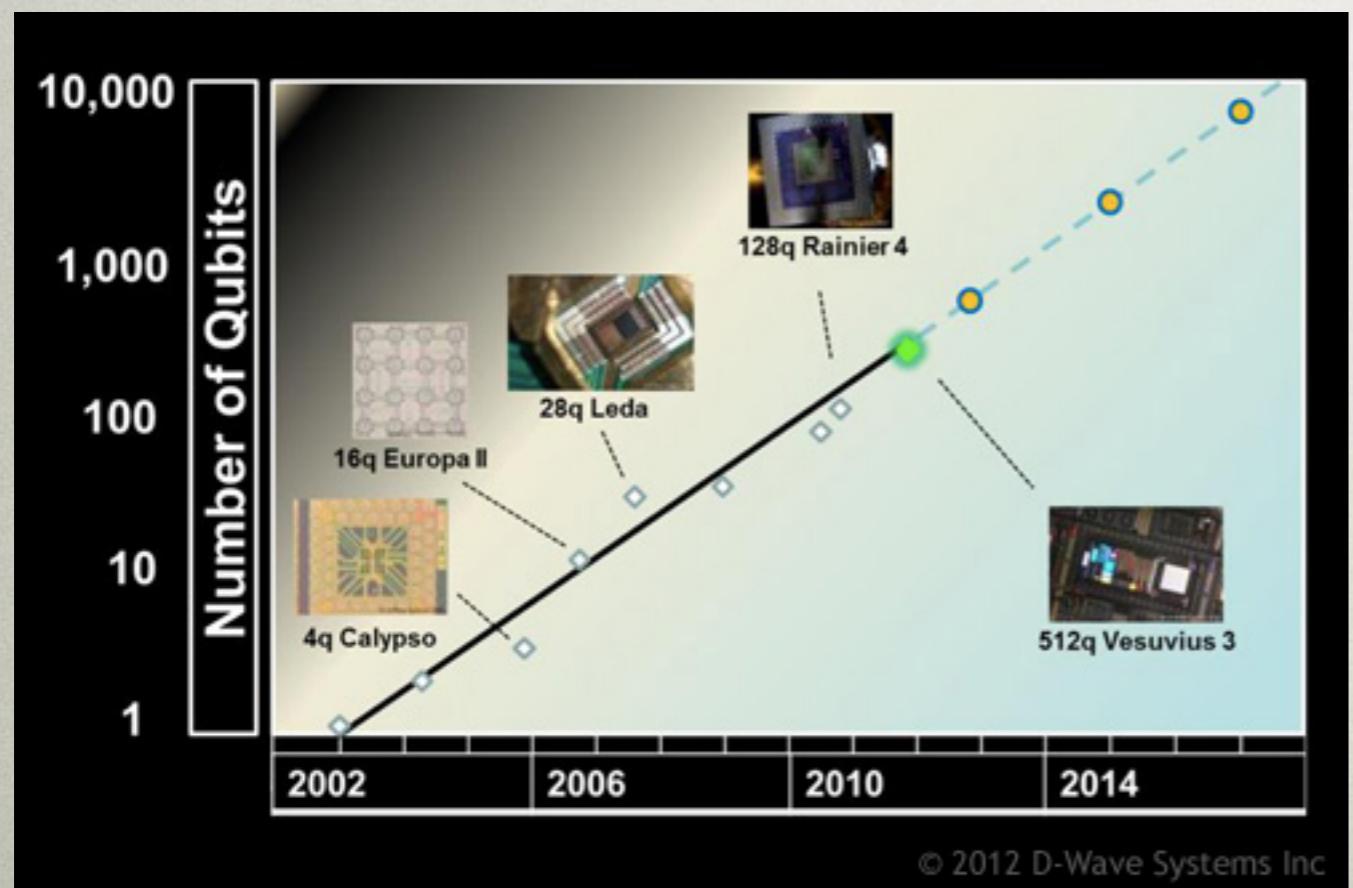


R. J. Schoelkopf and S. M. Girvin, Yale





512-qubit D-Wave Two™ quantum computer



[Home](#) [Publications](#) [Theses](#) [People](#) [Alumni](#) [Contact](#)

[Links](#) [Photos](#) [Movies](#) [Electronics](#) [Software](#) [Tutorials](#)

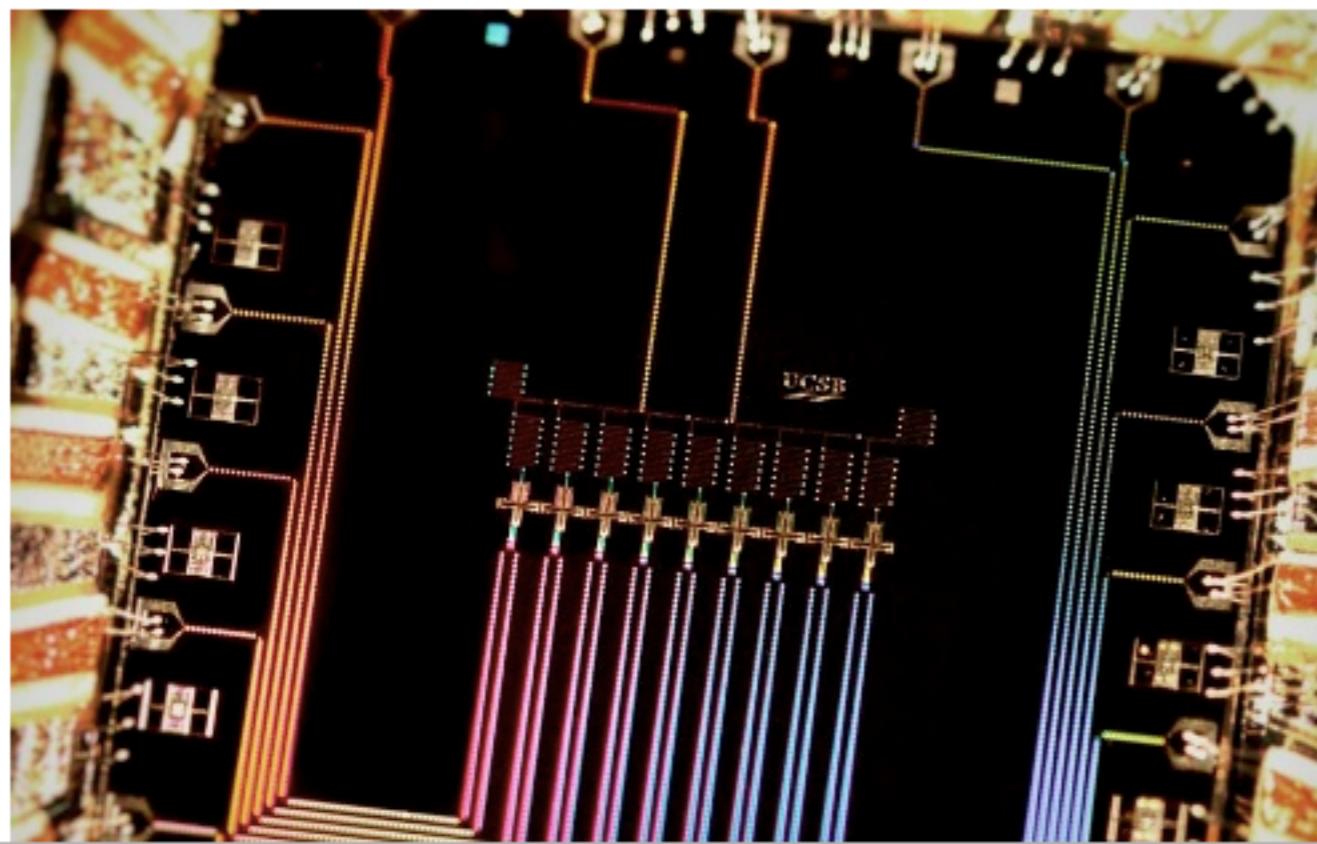
UCSB to partner with Google to build a quantum computer



[Quantum AI Google+ page](#), [Google Research Blog](#)

[Wired](#), [Wall Street Journal](#), [IEEE Spectrum](#), [MIT Tech Report](#)

State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit

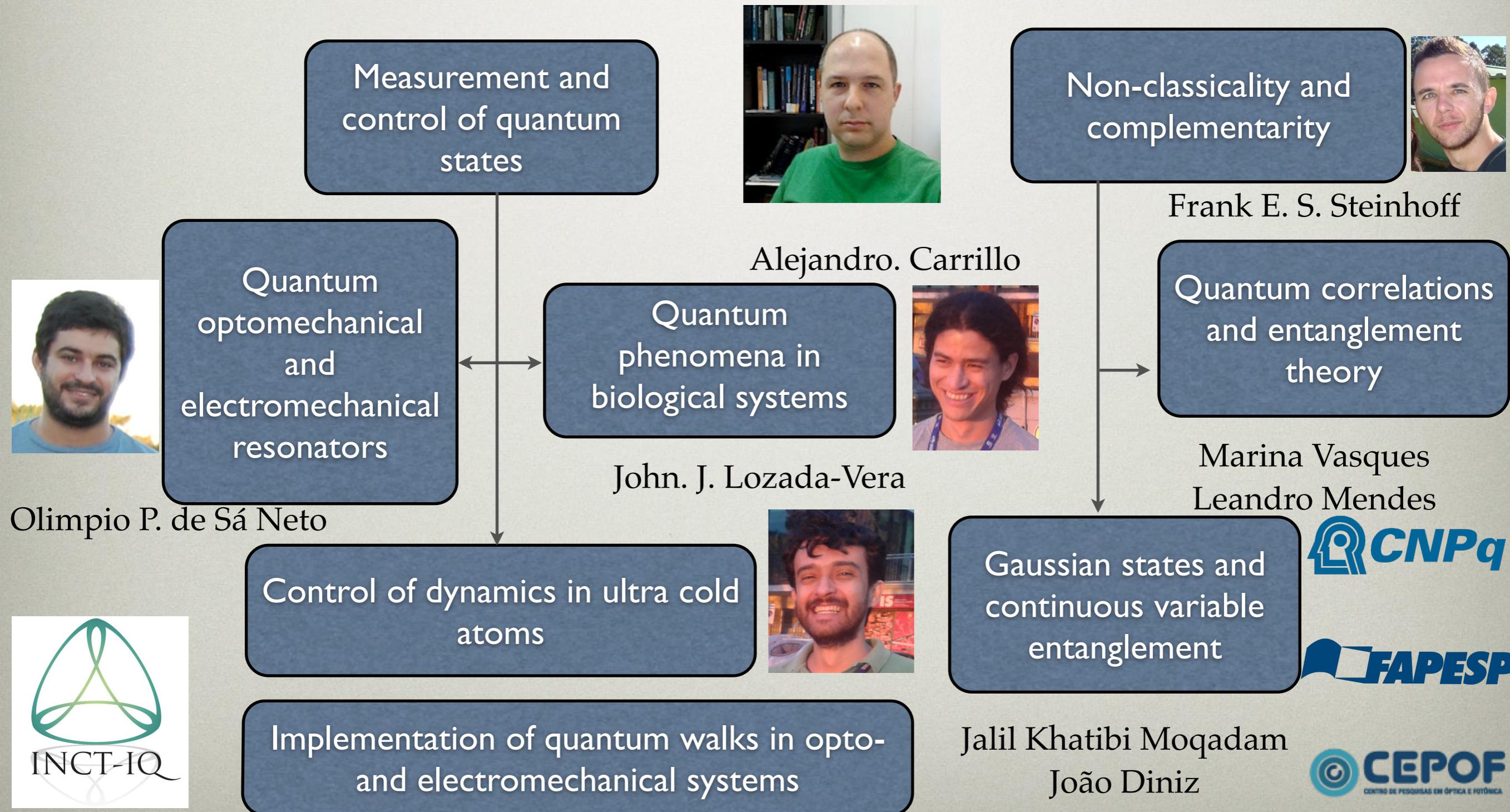


RESUMO

- Computação quântica é mais eficiente do que a computação clássica para resolver certos problemas.
- É mais eficiente para o desenvolvimento de simuladores universais.
- Muito mais eficiente para desenvolvimento de simuladores dedicados.

- Sistemas supercondutores oferecem grandes perspectivas para implementação de computadores quânticos, universais ou dedicados.

QUANTUM INFORMATION THEORY



OUTLINE

- Coupling of electromechanical resonator to transmission line radiation
- QND phonon number detection and phonon number dependent beam-splitter
- Phonon-number statistics though pulsed linear detection scheme.

Temperature Measurement and Phonon Number Statistics of a Nanoelectromechanical Resonator

O. P. de Sá Neto^{1,2}, M. C. de Oliveira² and G. J. Milburn³

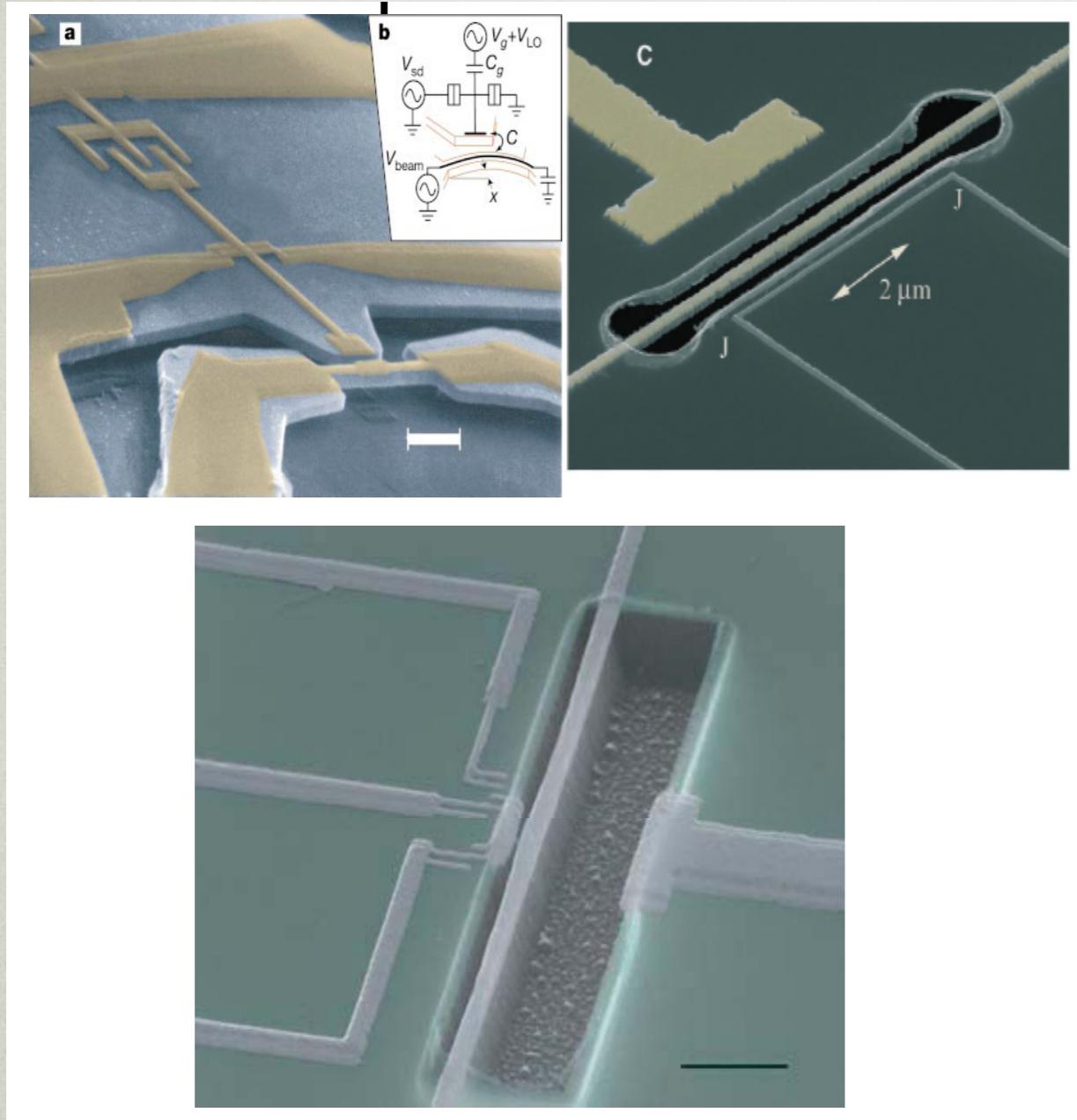
¹ Coordenação de Ciência da Computação, Universidade Estadual do Piauí, CEP: 64202220, Parnaíba, Piauí, Brazil.

² Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas, 13083-970, Campinas, São Paulo, Brazil. and

³ Centre for Engineered Quantum Systems, School of Mathematics and Physics.,

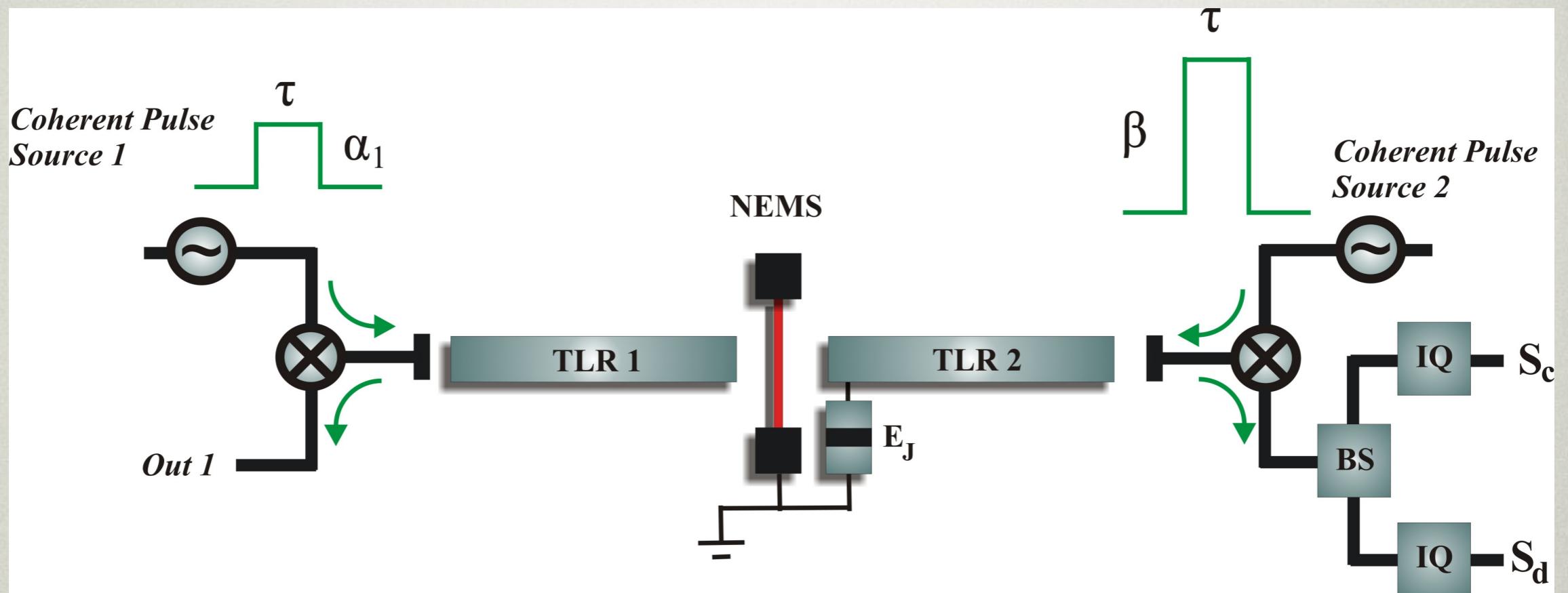
University of Queensland, QLD 4072, Brisbane, Australia.

Electromechanical Resonators

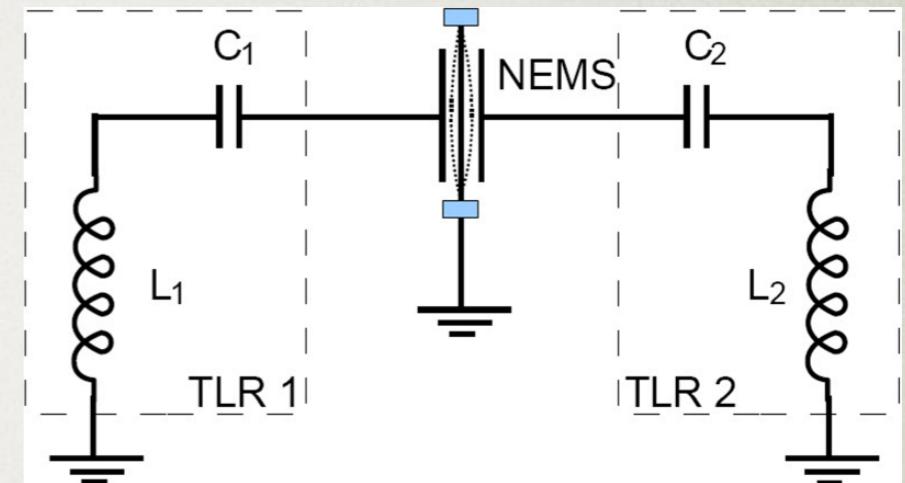
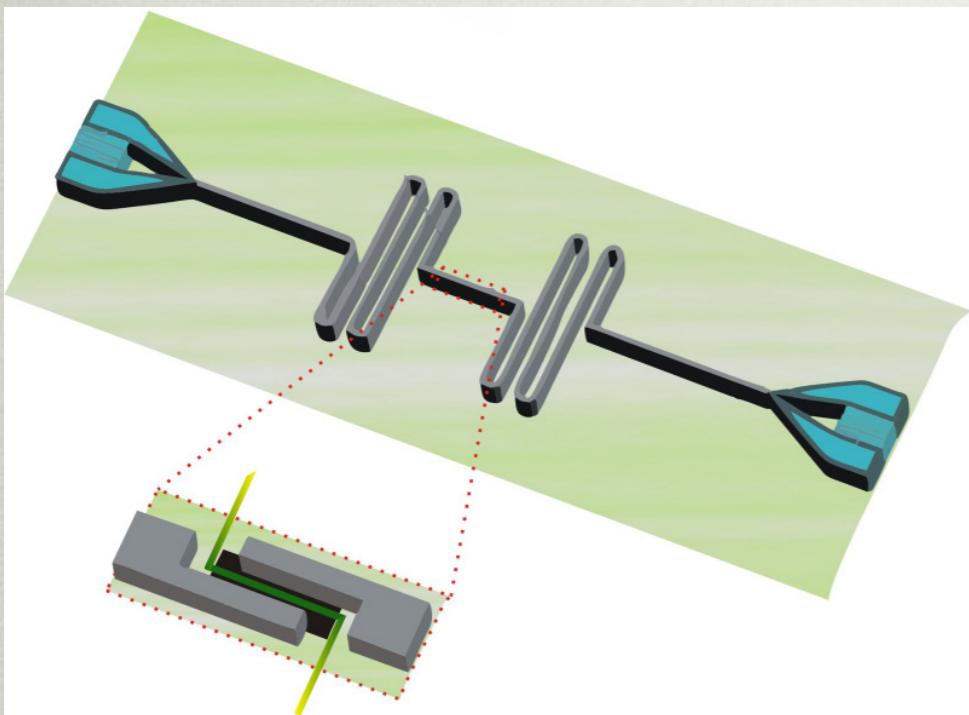


$$\hbar\nu > k_B T$$

A. Gaidarzhy et al., Phys. Rev. Lett. 94, 030402 (2005); 95, 248902 (2005); K. C. Schwab et al., ibid. 95, 248901 (2005); R. L. Badzey and P. Mohanty, Nature (London) 437, 995 (2005); W. K. Hensinger et al., Phys. Rev. A 72, 041405(R) (2005); M. D. LaHaye et al., Science 304, 74 (2004); X. M. H. Huang et al., Nature (London) 421, 496 (2003); R. G. Knobel and A. N. Cleland, Nature (London) 424, 291 (2003).



Capacitive coupling of two transmission line resonators mediated by an electromechanical oscillator



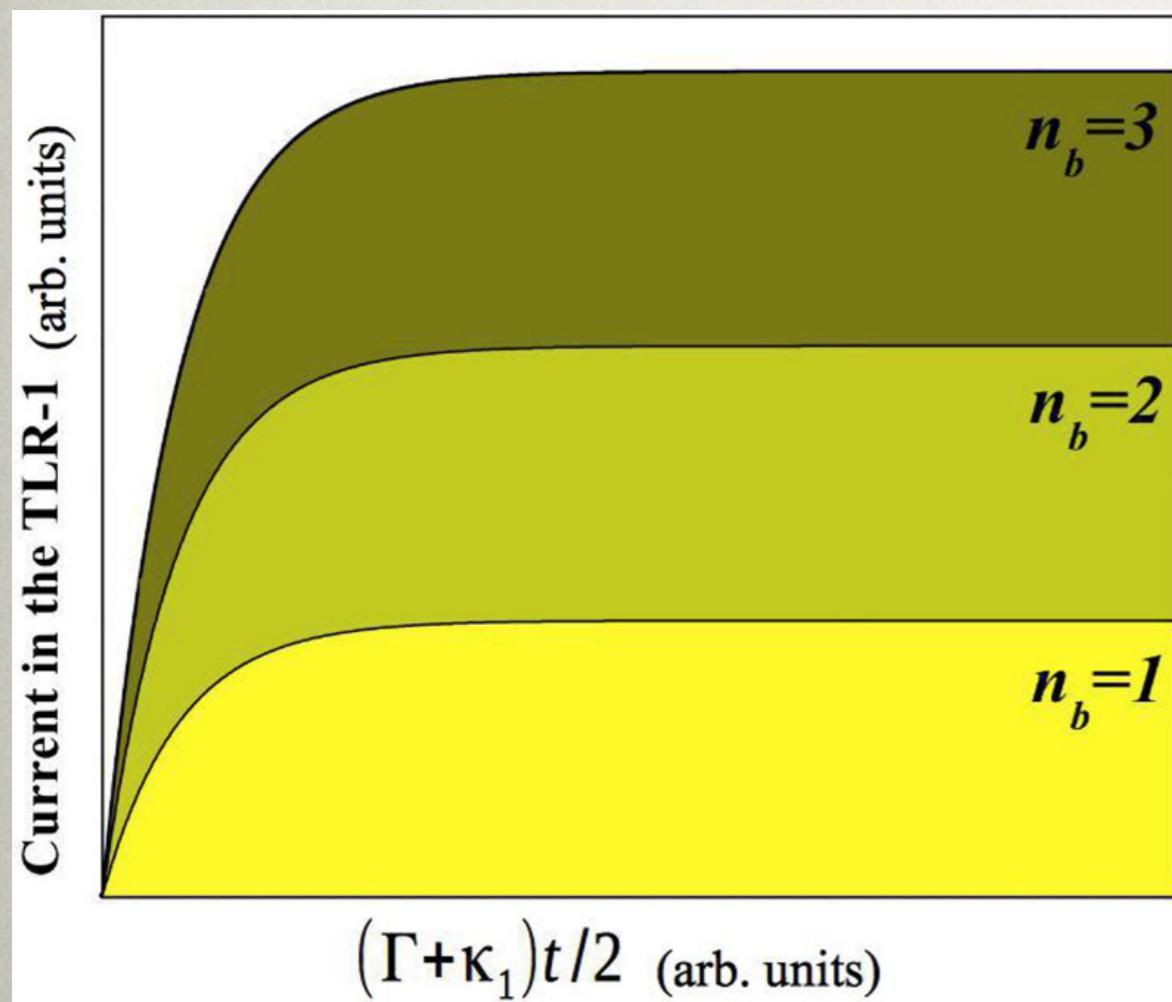
$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{L_i} P_i^2 + \frac{1}{\tilde{C}_i} Q_i^2 \right) + \frac{(d^2 - x^2(t))}{2d\epsilon_0 A} Q_1 Q_2 - \sum_{i=1}^2 \left[\frac{((-1)^i d + x(t))}{2d} V_{C_T}(t) \right] Q_i,$$

$$x^2(t) = \frac{\hbar}{2m\nu} (b^2 e^{-i2\nu t} + (b^\dagger)^2 e^{i2\nu t} + 2b^\dagger b + 1)$$

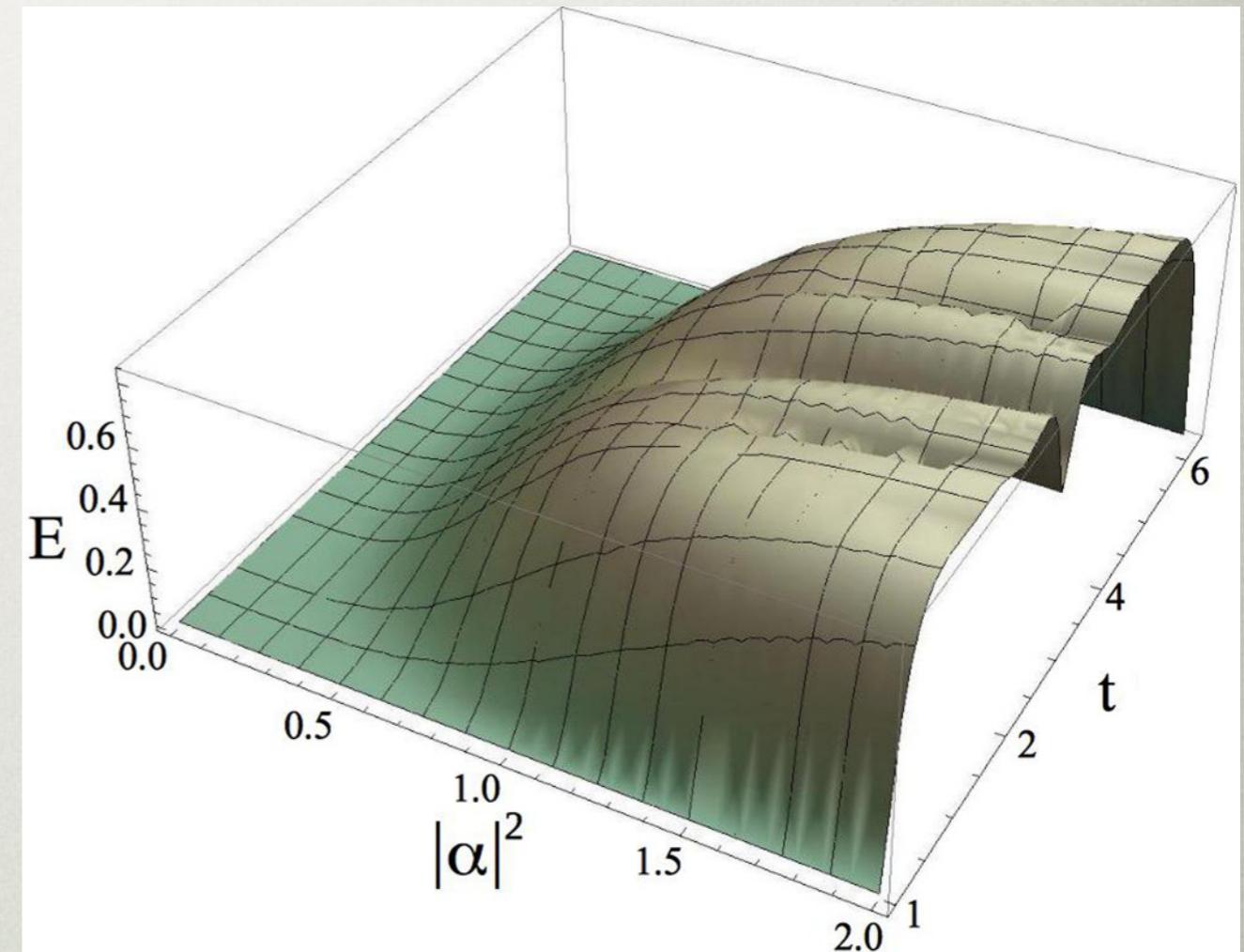
$$H_{\text{int}}^I = \hbar (\theta_0 + \theta b^\dagger b) (a_1^\dagger a_2 + a_1 a_2^\dagger)$$

Capacitive coupling of two transmission line resonators mediated by an electromechanical oscillator

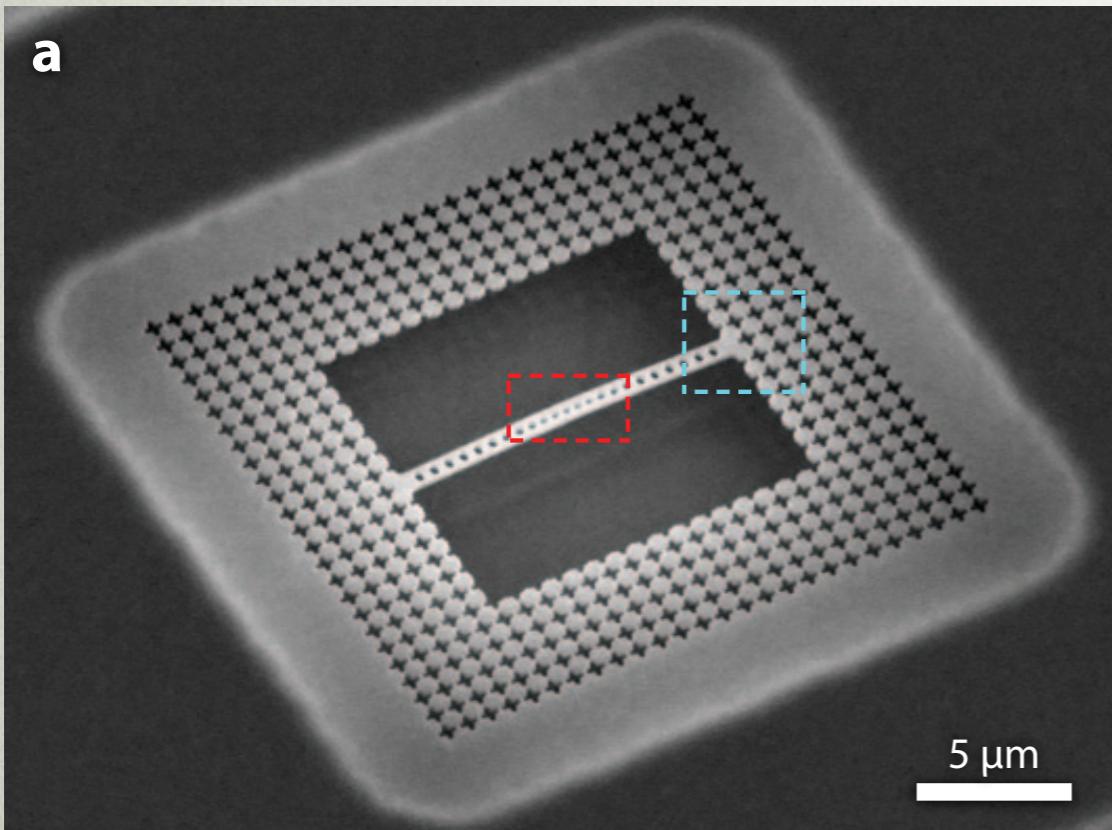
$$(i) \ H_I = -\hbar\alpha(t)b^\dagger b(a + a^\dagger)$$



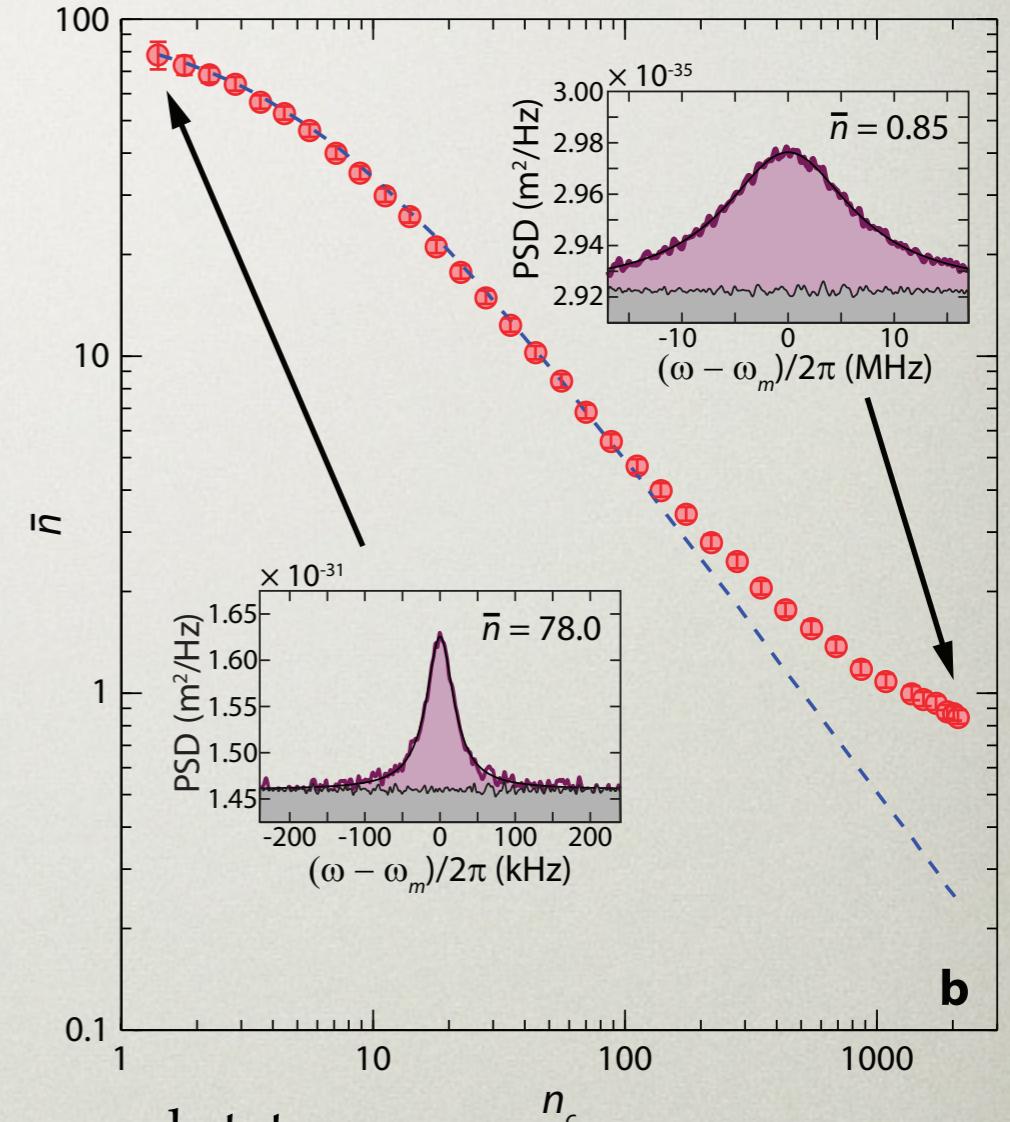
$$(ii) \ H_I = \hbar\theta b^\dagger b \left(a_1^\dagger a_2 + a_1 a_2^\dagger \right)$$



TEMPERATURE MEASUREMENT

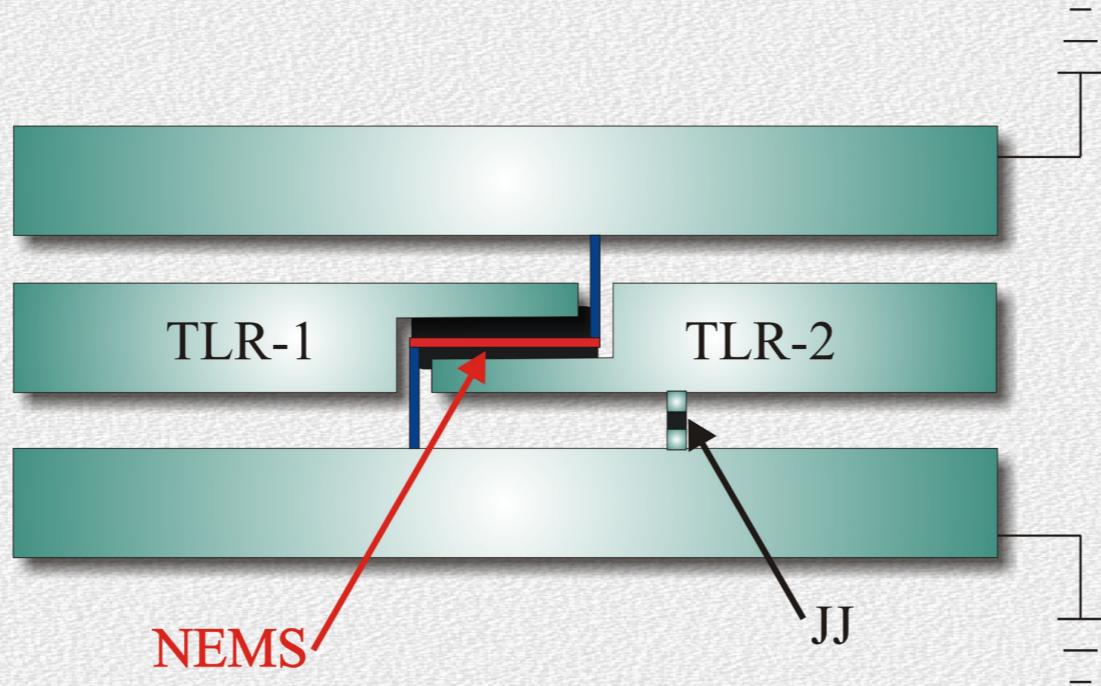


Mechanical noise power spectrum



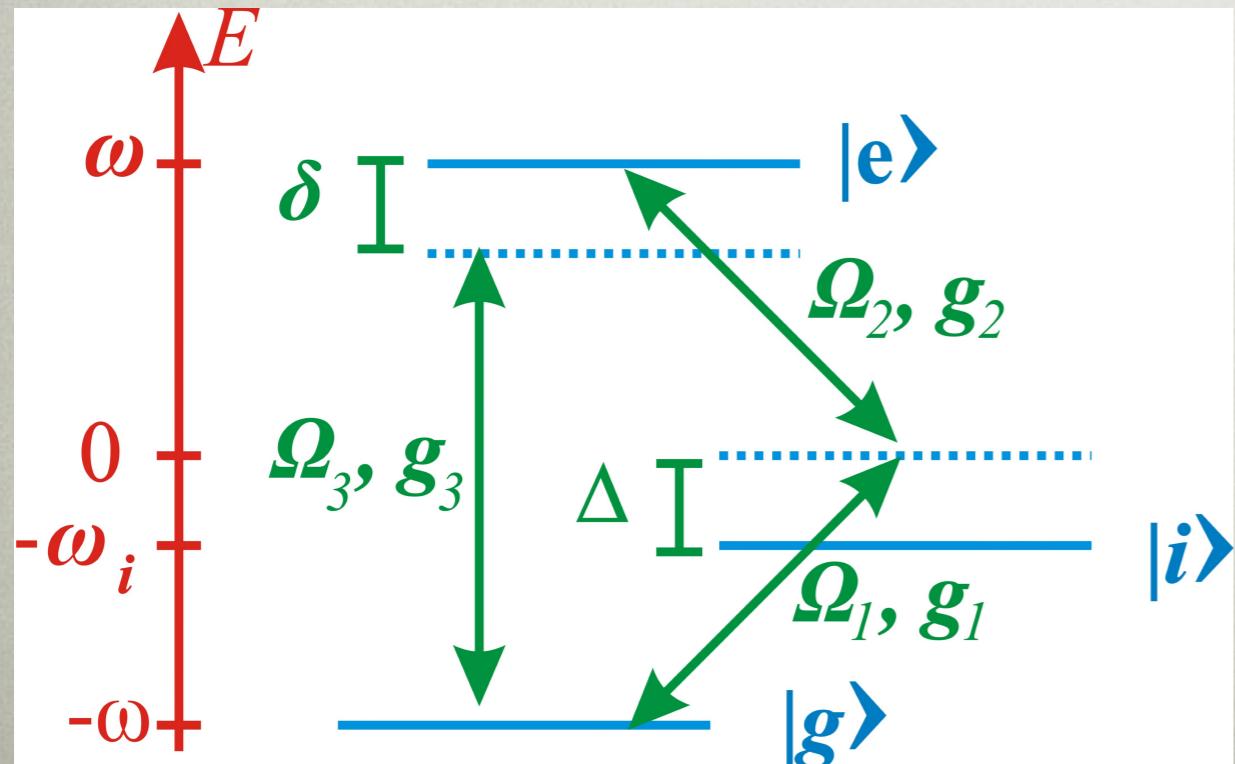
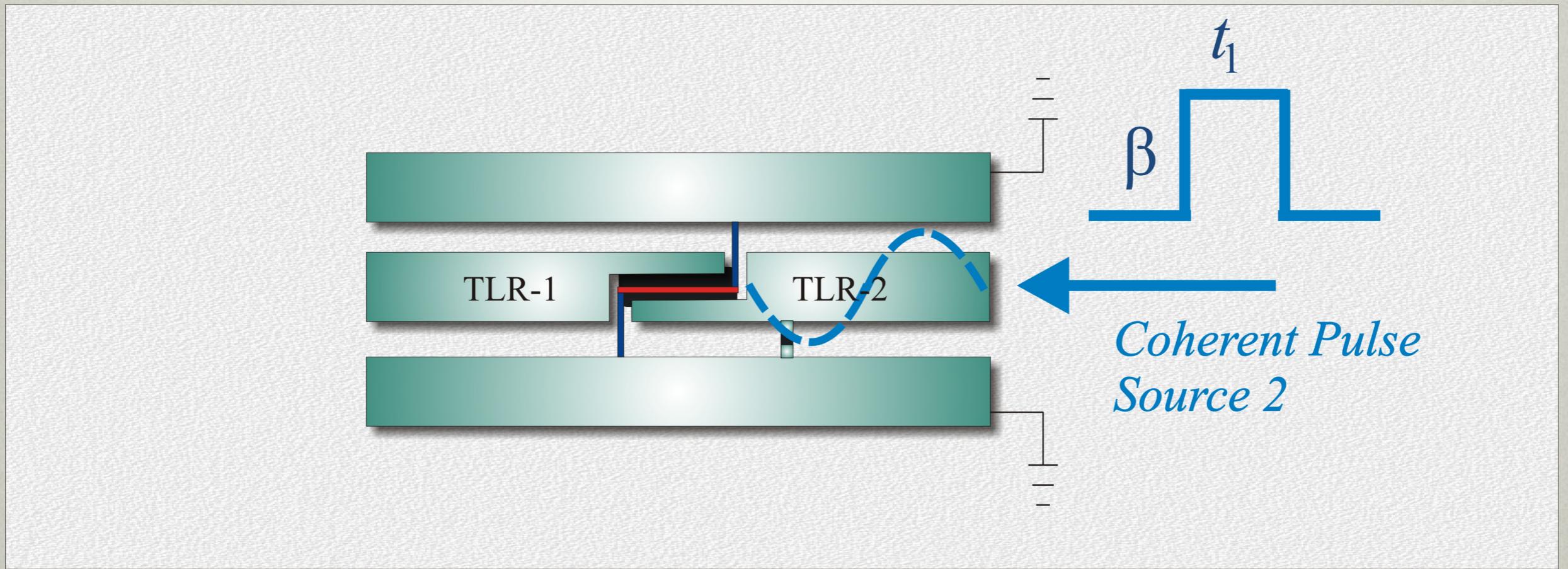
Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state

J. Chan, T. P. Mayer Alegre, A H. Safavi-Naeini, J. T. Hill, A. Krause, S. Groeblacher, M. Aspelmeyer, O. Painter, Nature 478, 89-92 (2011)

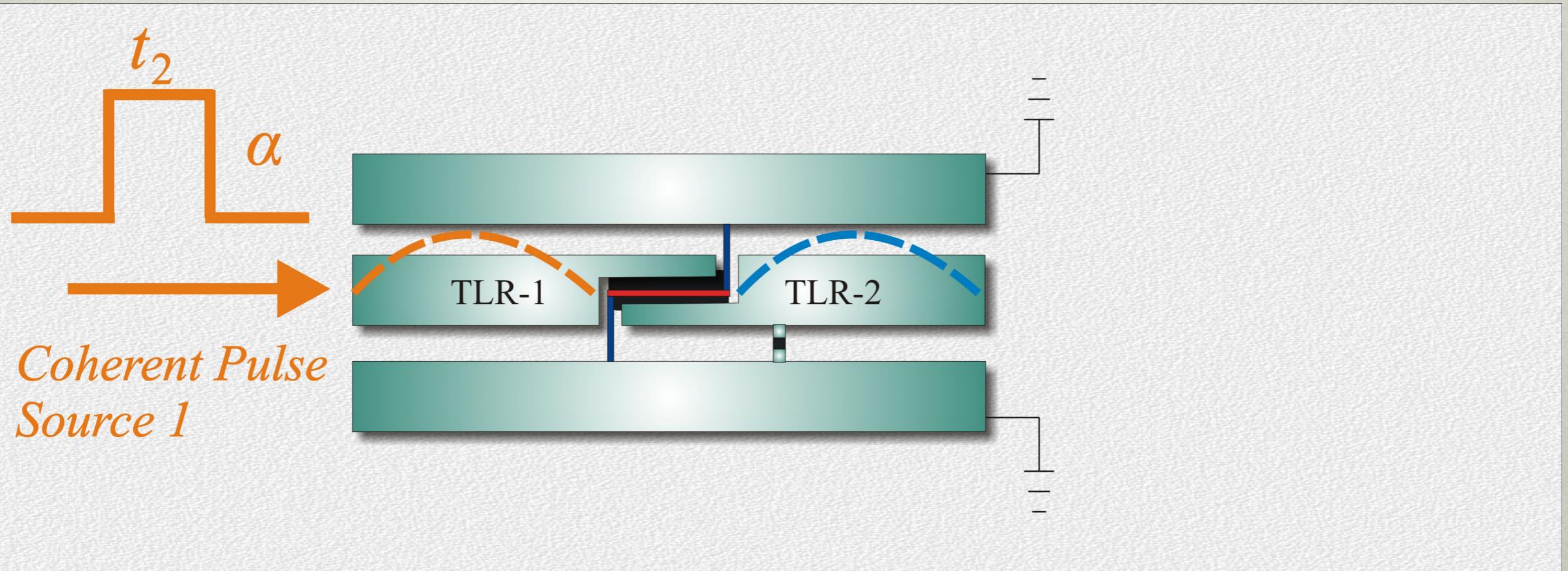


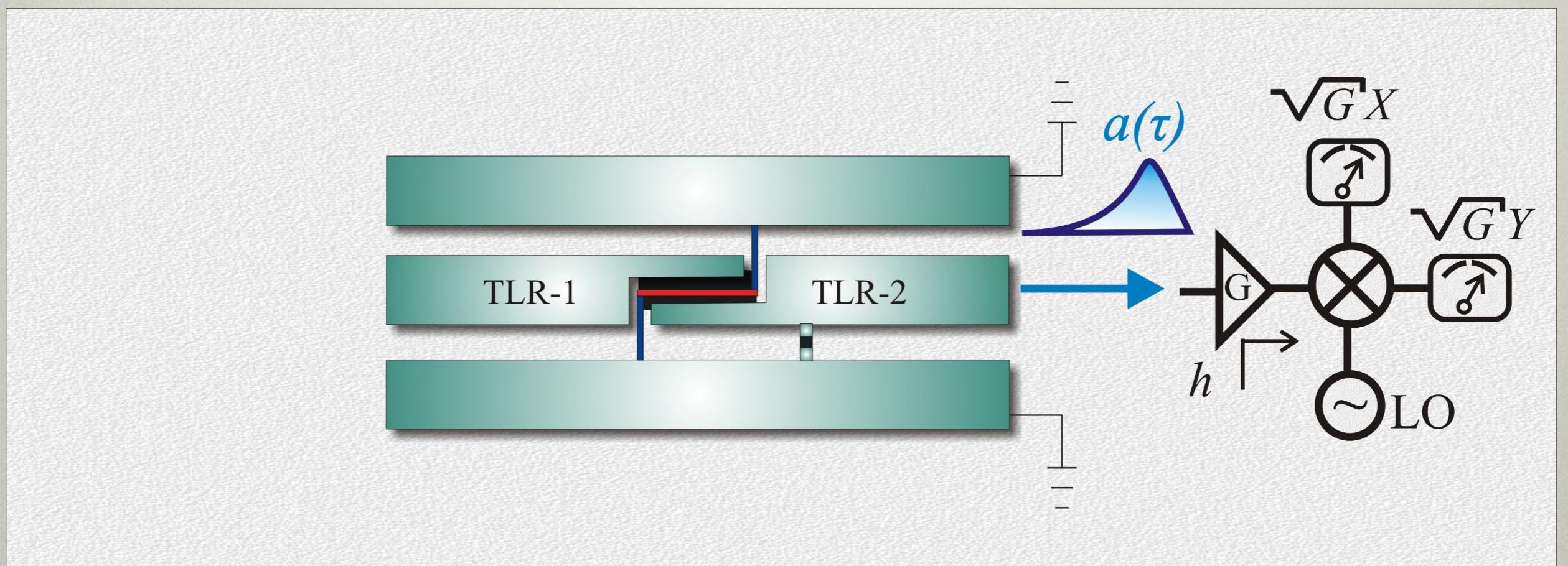
$$H_I = -\hbar\alpha(t)b^\dagger b(a + a^\dagger) \quad H_p = -i\hbar\frac{\gamma}{2}(a^2 - a^{\dagger 2})$$

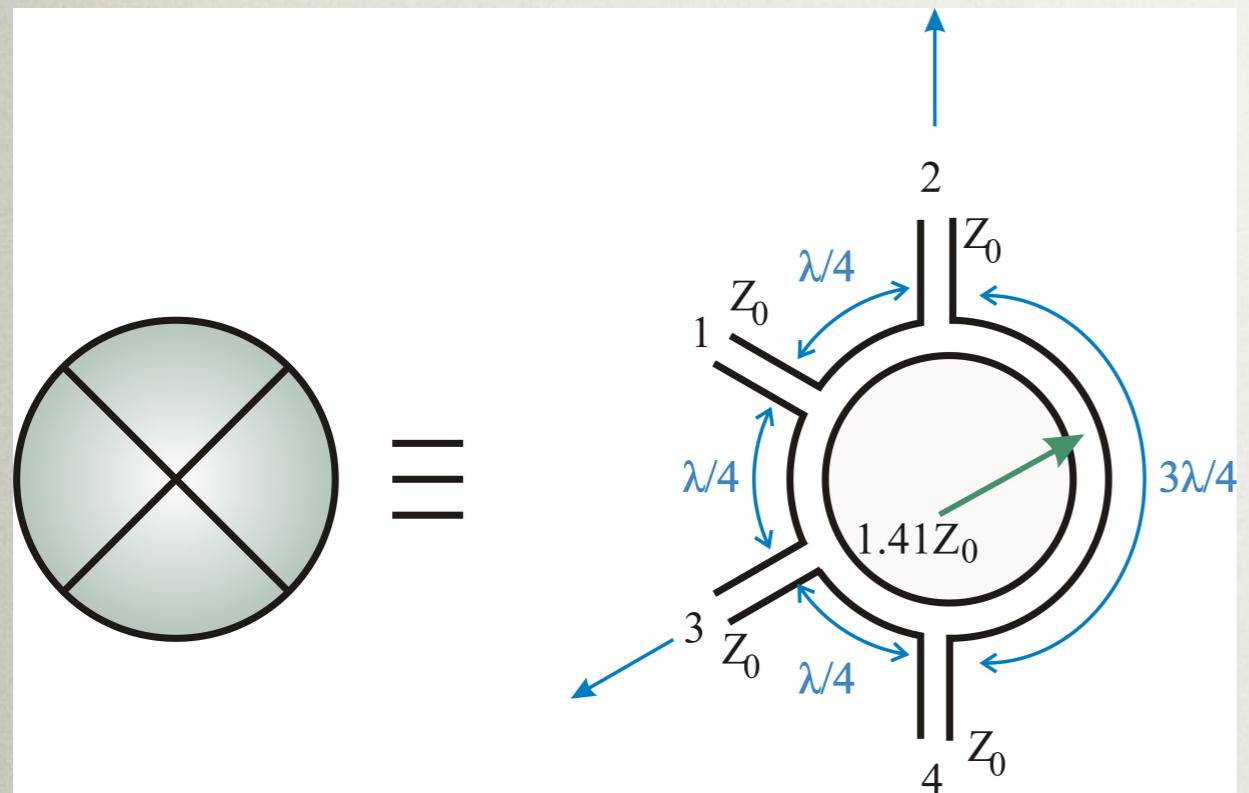
$$\rho(0) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) |n\rangle \langle n|_b \otimes |0\rangle \langle 0|_a$$



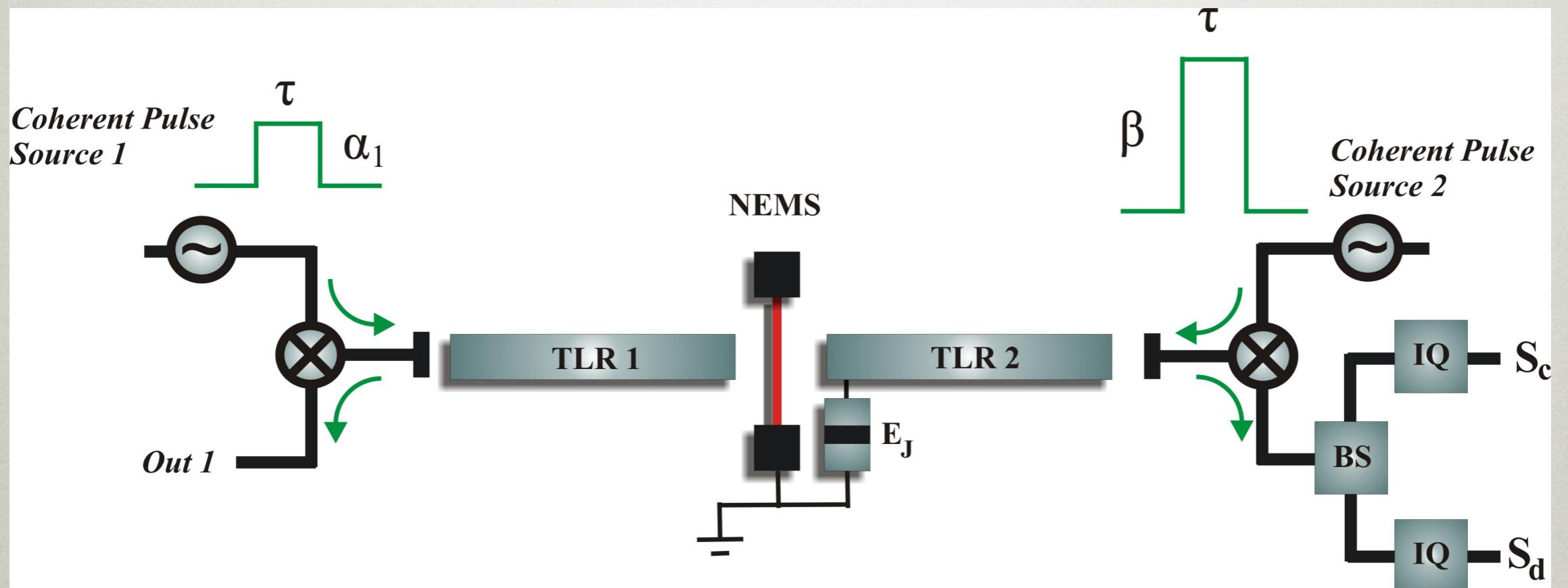
$$H_p = -i\hbar \frac{\gamma}{2} (a^2 - a^{\dagger 2})$$

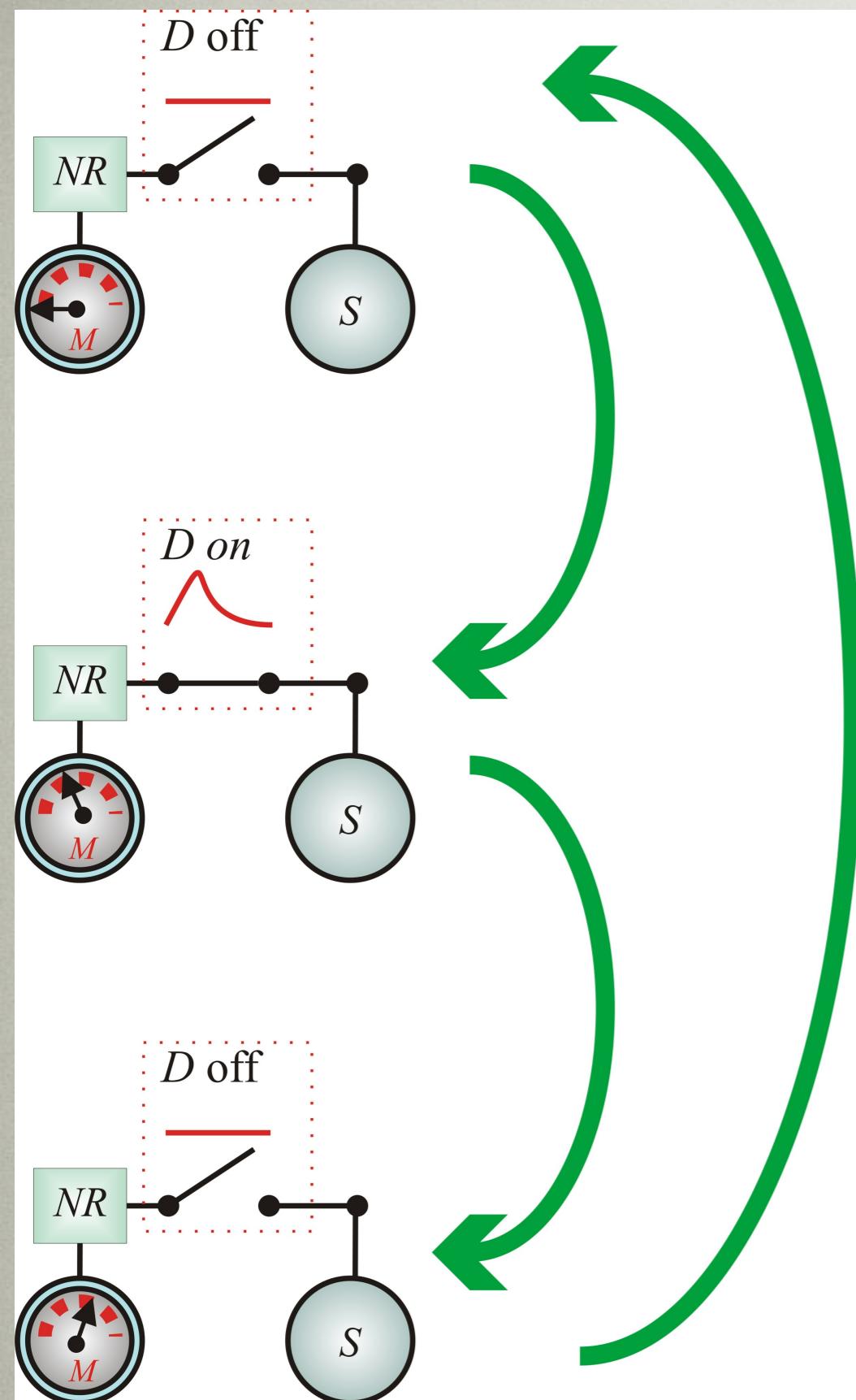






$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & i & 0 \\ 1 & 0 & 0 & i \\ i & 0 & 0 & 1 \\ 0 & i & 1 & 0 \end{bmatrix}$$





$$\rho(0) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) |n\rangle \langle n|_b \otimes |0\rangle \langle 0|_a$$

$$\rho(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) |n\rangle \langle n|_b \otimes |\alpha_n, \gamma\rangle \langle \alpha_n, \gamma|_a$$

$$\alpha_n(\tau) = i n \int_0^{t_2} \alpha(t) dt \equiv i n A$$

$$|\alpha_n, \gamma\rangle_a = \mathcal{D}(\alpha_n) \mathcal{S}(\gamma) |n, 0\rangle$$

$$\mathcal{D}(\alpha_n) = \exp [i n A (a + a^\dagger)]$$

$$\mathcal{S}(\gamma) = \exp [(\gamma t_1/2)(a^{\dagger 2} - a^2)]$$

POST-SELECTED STATE

$$\rho_a^{(m)}(\tau) = \frac{Tr_b \{\Pi_m \rho(\tau) \Pi_m\}}{Tr_{ab} \{\Pi_m \rho(\tau) \Pi_m\}}$$

$$Tr_{ab} \{\Pi_m \rho(\tau) \Pi_m\} = P(m); \quad \Pi_m = |m\rangle \langle m|_b$$

$$\langle Y \rangle_{(m)} (\tau) = \langle \alpha_m, \gamma | Y | \alpha_m, \gamma \rangle$$

$$\langle (\Delta Y)^2 \rangle_{(m)} (\tau) = e^{-2\gamma t_1}.$$

PRE-SELECTED STATE

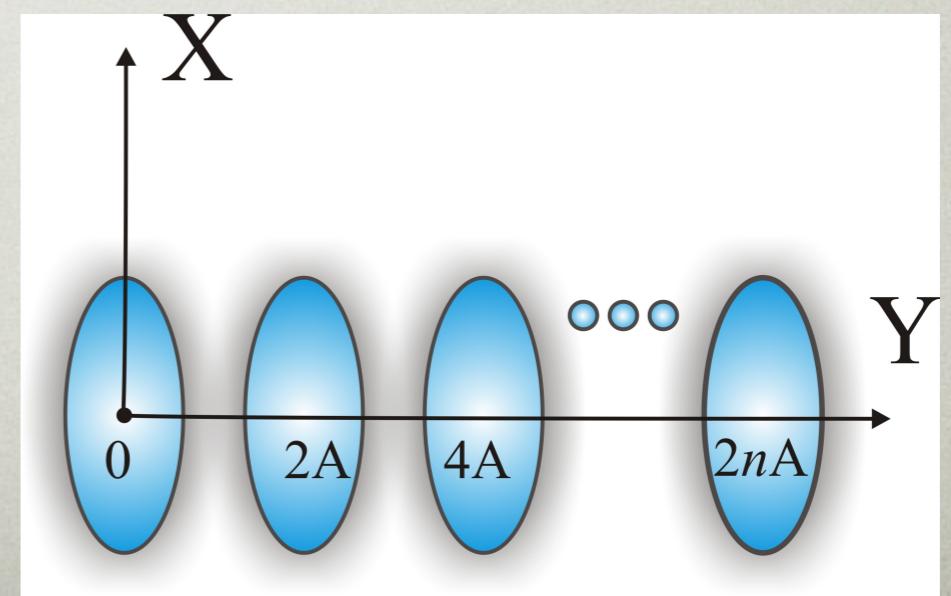
$$\rho_a(\tau) = \sum_m P(m) \rho_a^{(m)}(\tau)$$

$$\langle Y \rangle (\tau) = \sum_m P(m) \langle Y \rangle_{(m)} (\tau) = Tr \{ i (a^\dagger - a) \rho(\tau) \} = 2AN$$

$$\langle (\Delta Y)^2 \rangle = 4A^2 N (N+1) + \langle (\Delta Y)^2 \rangle_{(m)} (\tau)$$

$$T = \hbar\nu/[k_B \ln(N^{-1} + 1)]$$

$$\gamma t_1 > -\ln[\sqrt{2A}]$$



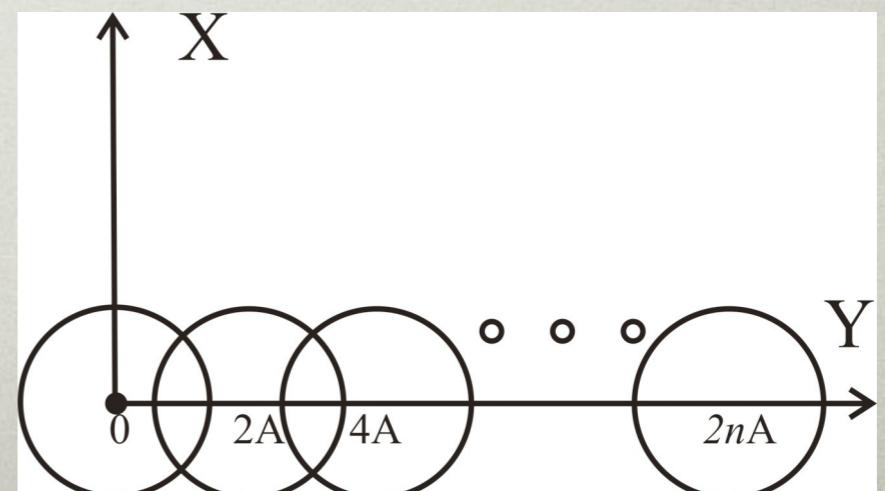
PRE-SELECTED STATE

$$\rho_a(\tau) = \sum_m P(m) \rho_a^{(m)}(\tau)$$

$$\langle Y \rangle (\tau) = \sum_m P(m) \langle Y \rangle_{(m)} (\tau) = Tr \{ i (a^\dagger - a) \rho(\tau) \} = 2AN$$

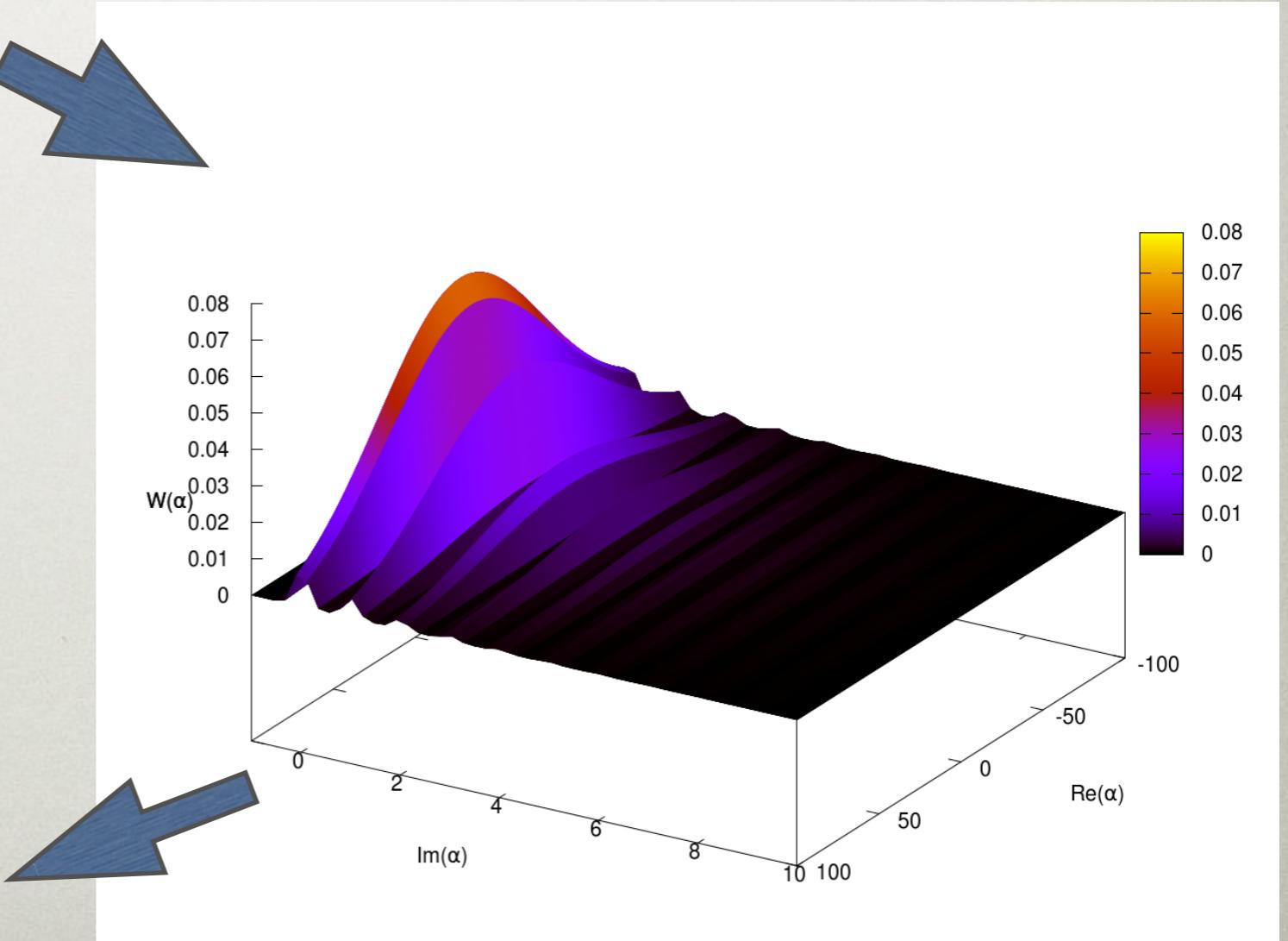
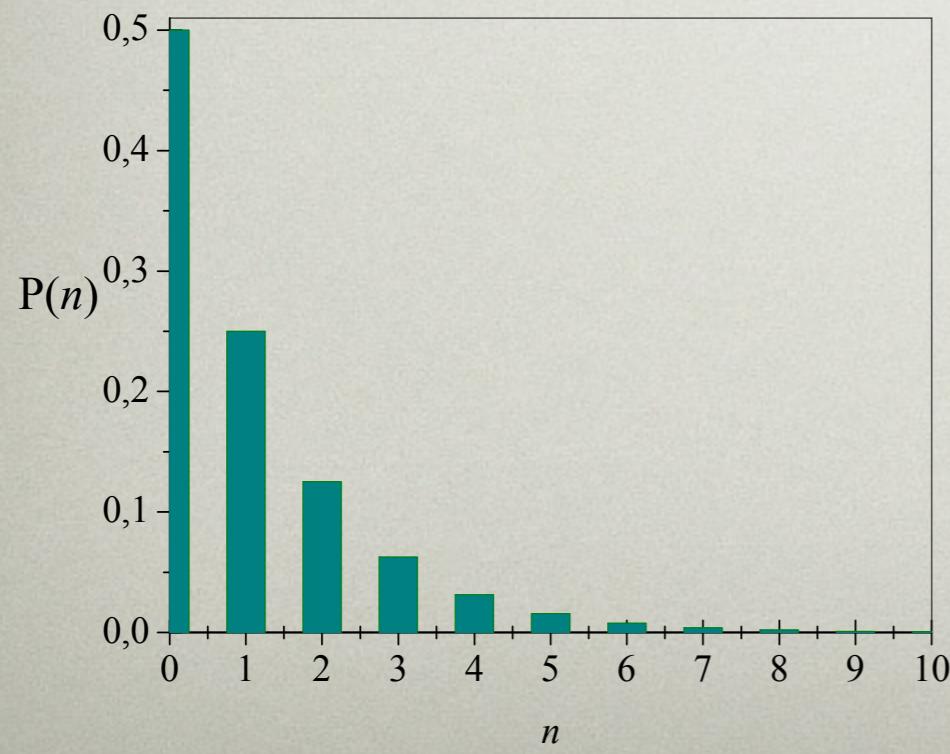
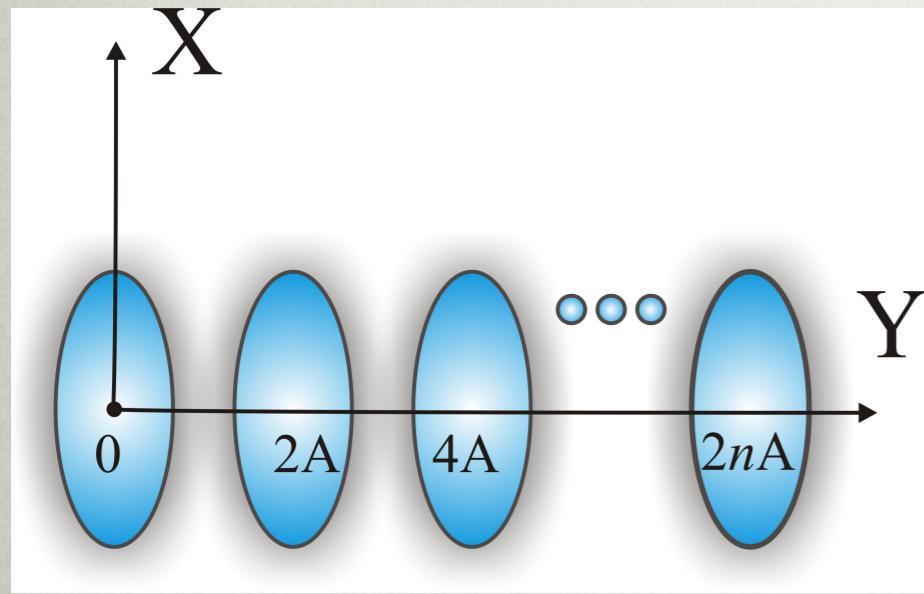
$$\langle (\Delta Y)^2 \rangle = 4A^2 N (N+1) + \langle (\Delta Y)^2 \rangle_{(m)} (\tau)$$

$$T = \hbar\nu/[k_B \ln(N^{-1} + 1)]$$



Wigner distribution

$$\mathcal{W}(\alpha) = \sum_{m,n} \int d^2\lambda \frac{\langle (a^\dagger)^n a^m \rangle (-\lambda^*)^m \lambda^n}{\pi^2 n! m!} e^{-\frac{1}{2}|\lambda|^2 + \alpha \lambda^* - \alpha^* \lambda}$$



CONCLUSIONS

- Reliable method for phonon number QND measurement.
- Access to the mechanical resonator statistics.