

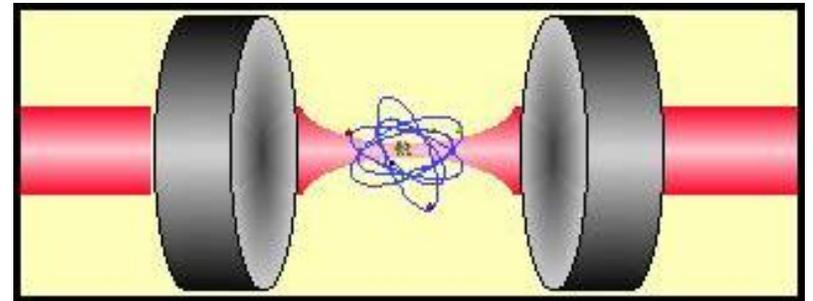
# Informação Quântica com Átomos e Fótons

## Protegendo Informação com Mecânica Quântica

Prof. Marcelo Martinelli  
Laboratório de Manipulação  
Coerente de Átomos e Luz

A página:

<http://axpfep1.if.usp.br/~mmartine>



# Conteúdo

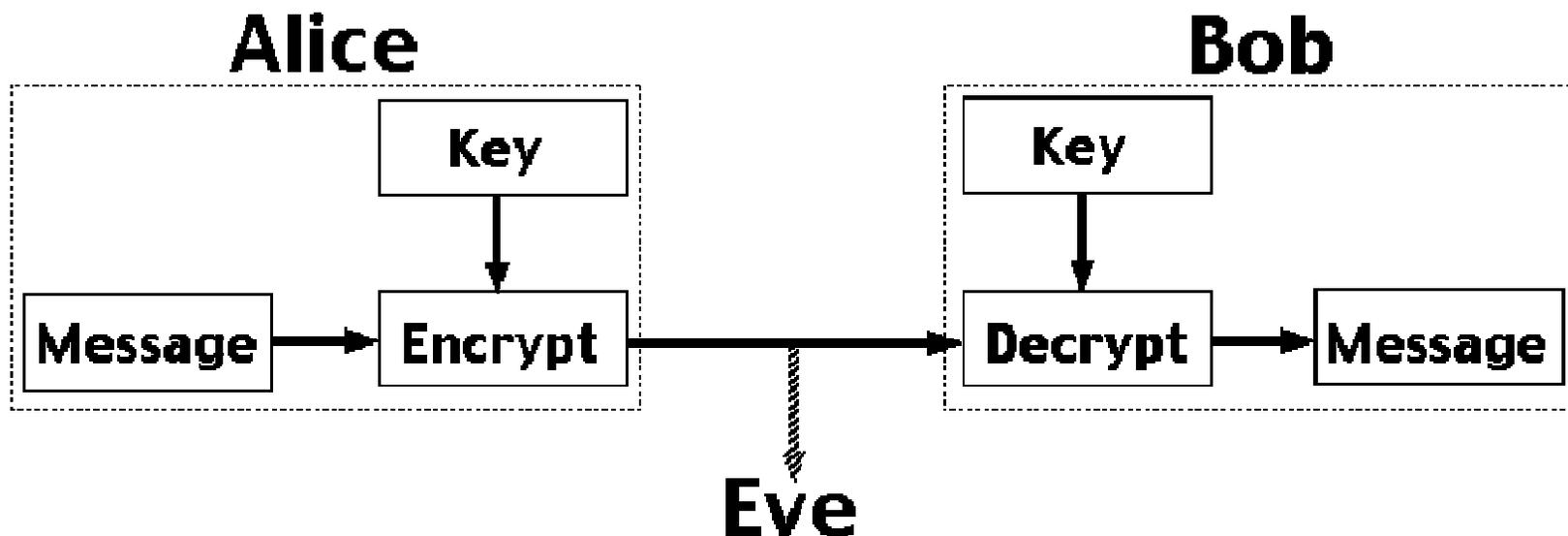
- 1ª Aula – Princípios de Criptografia.  
Computação “Clássica”  
Computação Quântica.  
Aplicações  
Sistemas experimentais
- 2ª Aula – Princípios de Criptografia Quântica  
Criptografia com um fóton  
Emaranhamento  
Criptografia com feixes intensos

# Introdução

- Vimos que computadores quânticos podem revolucionar a teoria da informação. Se praticáveis, podem levar a modelos híbridos de computação, ou a novos conceitos na arquitetura de computadores.
- Entre outras consequências, tornam obsoleto o sistema mais seguro (e prático) de criptografia.
- É possível empregar a MQ para proteger a informação transmitida entre dois pontos?

# Para lembrar... criptografia...

**Criptografia com chave simétrica:**  
a chave é comum às duas estações



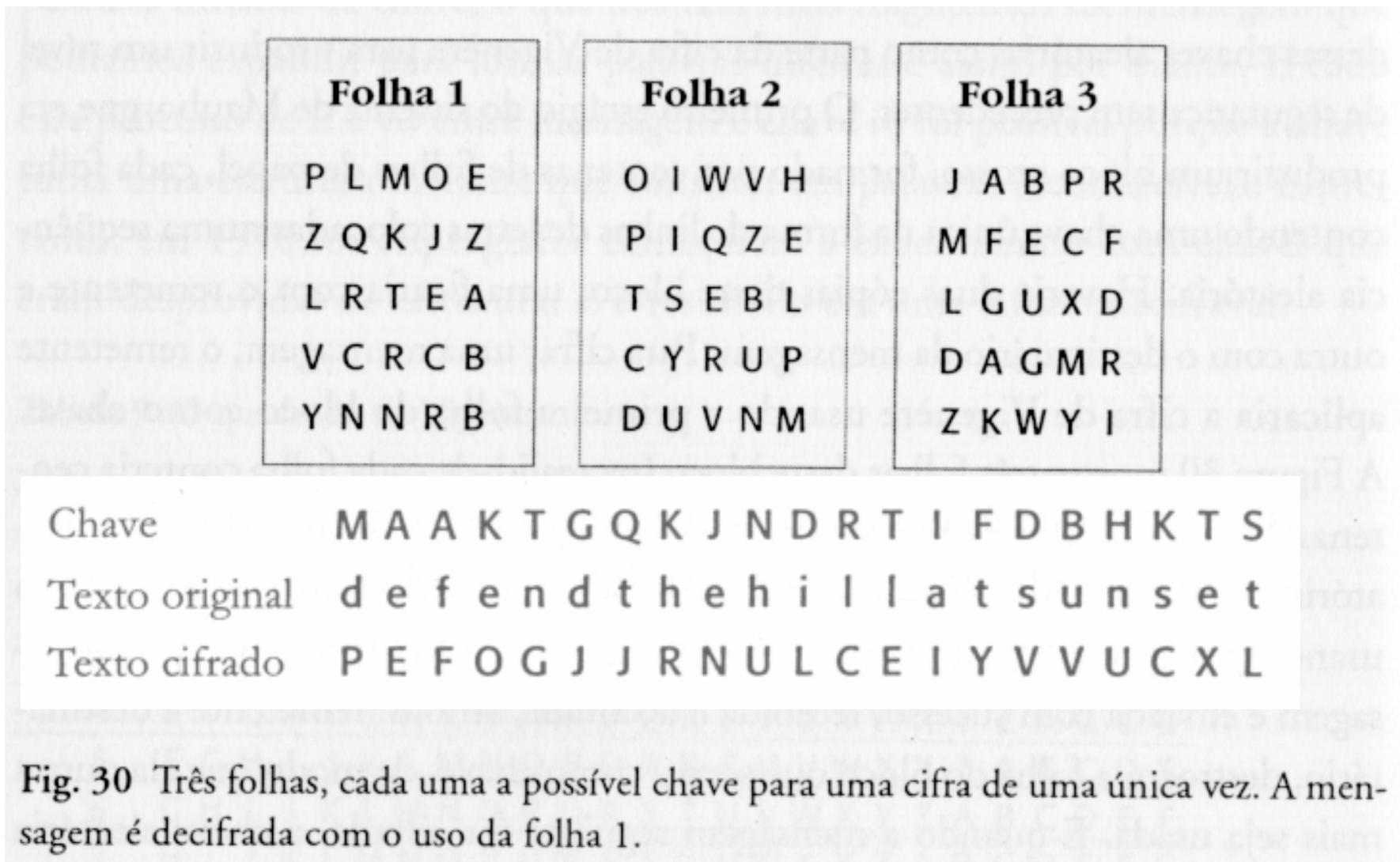
# Bloco de cifras de utilização única (1918)

| Folha 1   | Folha 2   | Folha 3   |
|-----------|-----------|-----------|
| P L M O E | O I W V H | J A B P R |
| Z Q K J Z | P I Q Z E | M F E C F |
| L R T E A | T S E B L | L G U X D |
| V C R C B | C Y R U P | D A G M R |
| Y N N R B | D U V N M | Z K W Y I |

|                |   |
|----------------|---|
| Chave          | P L M O E Z Q K J Z L R T E A V C R C B Y |
| Texto original | a t t a c k t h e v a l l e y a t d a w n |
| Texto cifrado  | P E F O G J J R N U L C E I Y V V U C X L |

**Fig. 30** Três folhas, cada uma a possível chave para uma cifra de uma única vez. A mensagem é decifrada com o uso da folha 1.

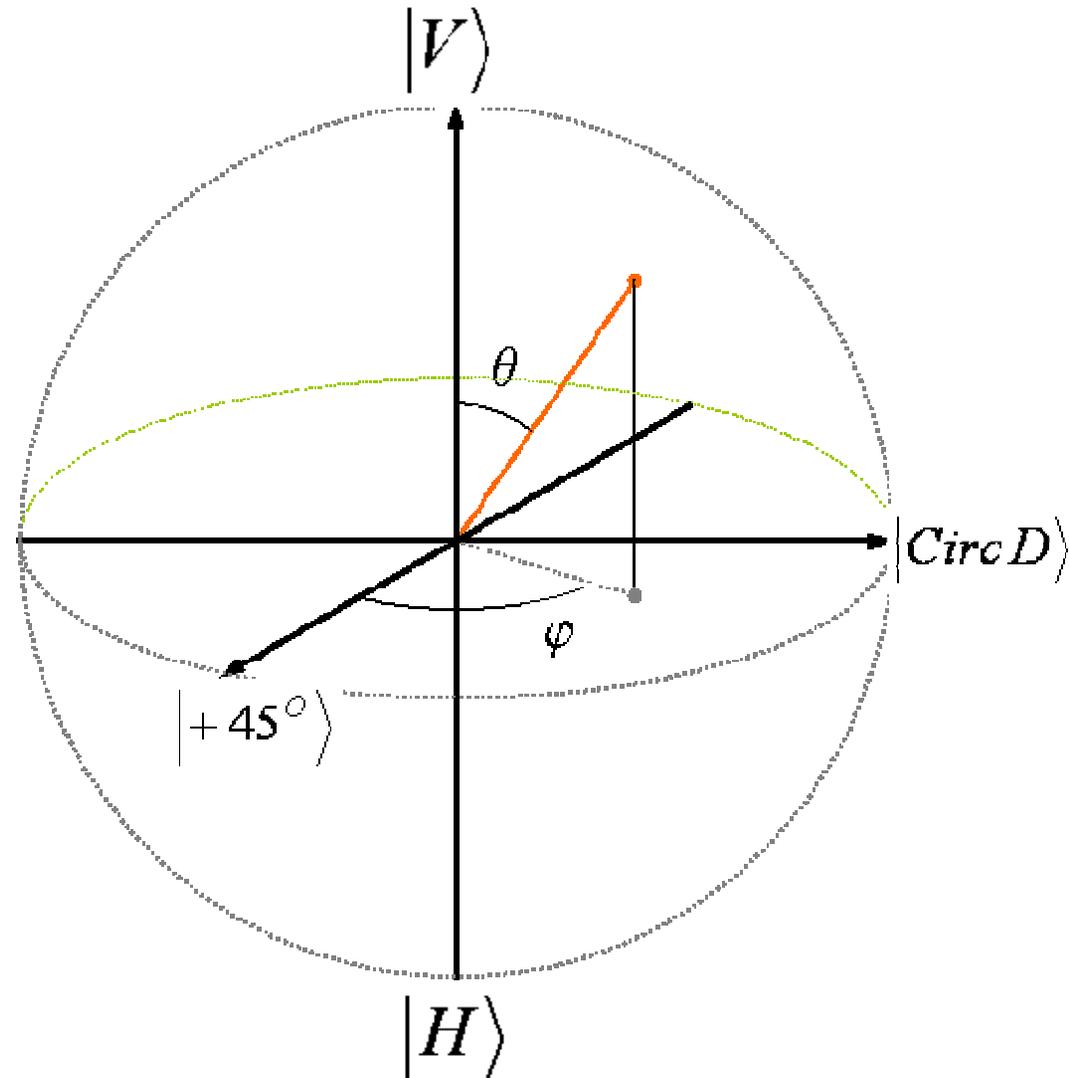
# Bloco de cifras de utilização única (1918)



Se a chave é aleatória, é usada apenas uma vez e tem o mesmo tamanho da mensagem, oferece segurança absoluta. MAS, como distribuir as chaves? Como gerar chaves aleatórias?

# Medidas em MQ - um pouco de formalismo

- Ouvimos falar muito que o observador perturba a medida em MQ. Como isso acontece?
- Função de onda  $\psi \rightarrow$  VETOR DE ESTADO  $|\psi\rangle$   
OBSERVÁVEIS  $\rightarrow$  OPERADORES (matrizes)
- Exemplos com estados de polarização da luz (sistemas de dois níveis em geral).  
POLARIZADOR: filtro de polarização, só permite a passagem de uma componente de polarização.



# Medidas de Polarização

- Polarizador serve como instrumento de medida. Como representar medida de polarização H?

$$A_H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \text{observável}$$

Autovalores e autovetores

$$1: |H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad 0: |V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## • REGRAS QUÂNTICAS

1) Resultado de uma medida é **NECESSARIAMENTE** um **AUTOVALOR** do observável (operador) sendo medido.

2) Medida é equivalente a **PREPARAR** um estado: após a medida de um autovalor, o estado do sistema é o autovetor (auto-estado) correspondente.

## • PRINCÍPIO DE INCERTEZA DE HEISENBERG

→ impossibilidade de se medir, com precisão absoluta, simultaneamente duas grandezas cujos **OPERADORES NÃO COMUTAM**

# Criptografia quântica

Bennett e Brassard em 1984 (BB84)

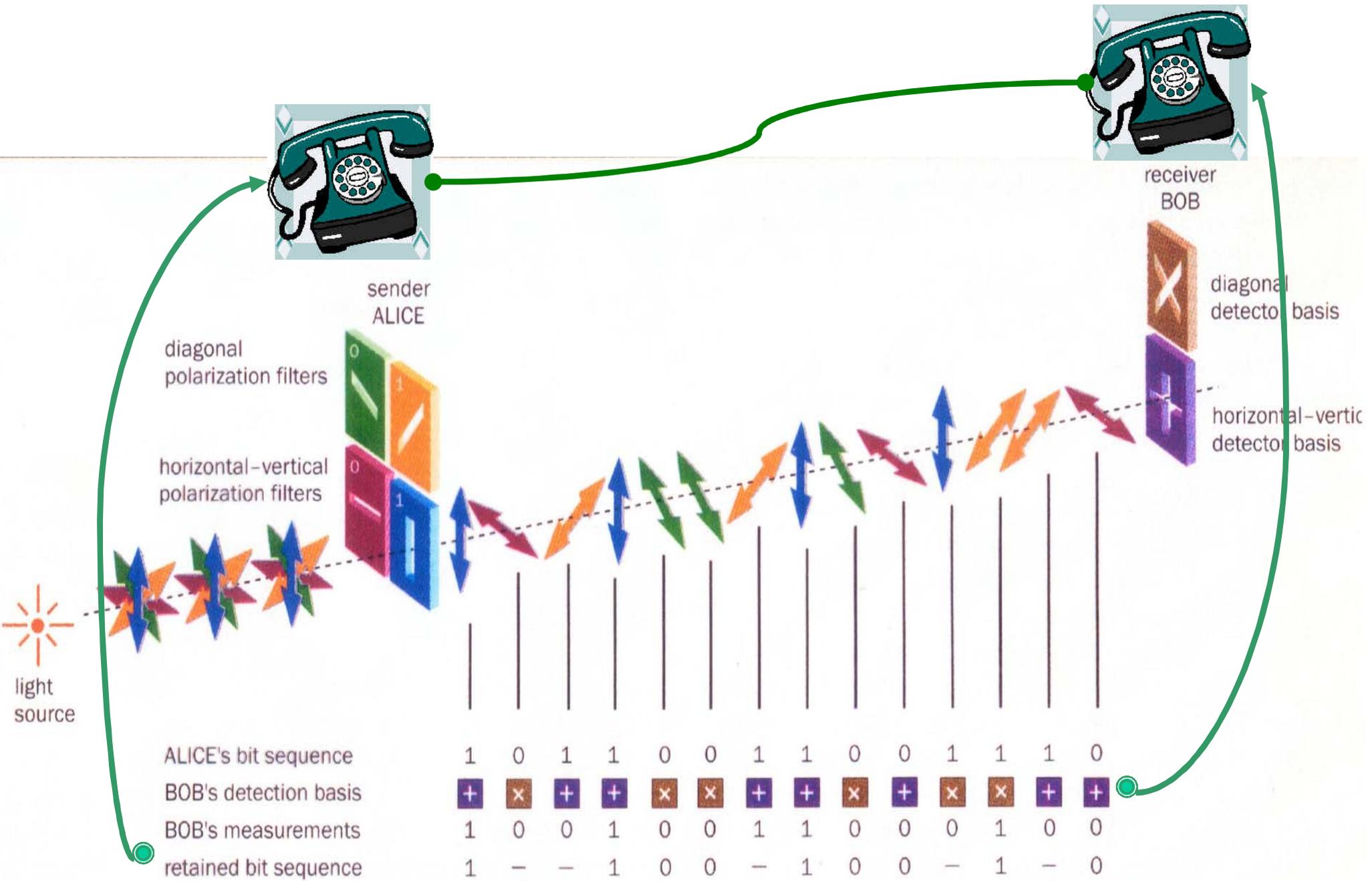


Photo: Bernard Lambert

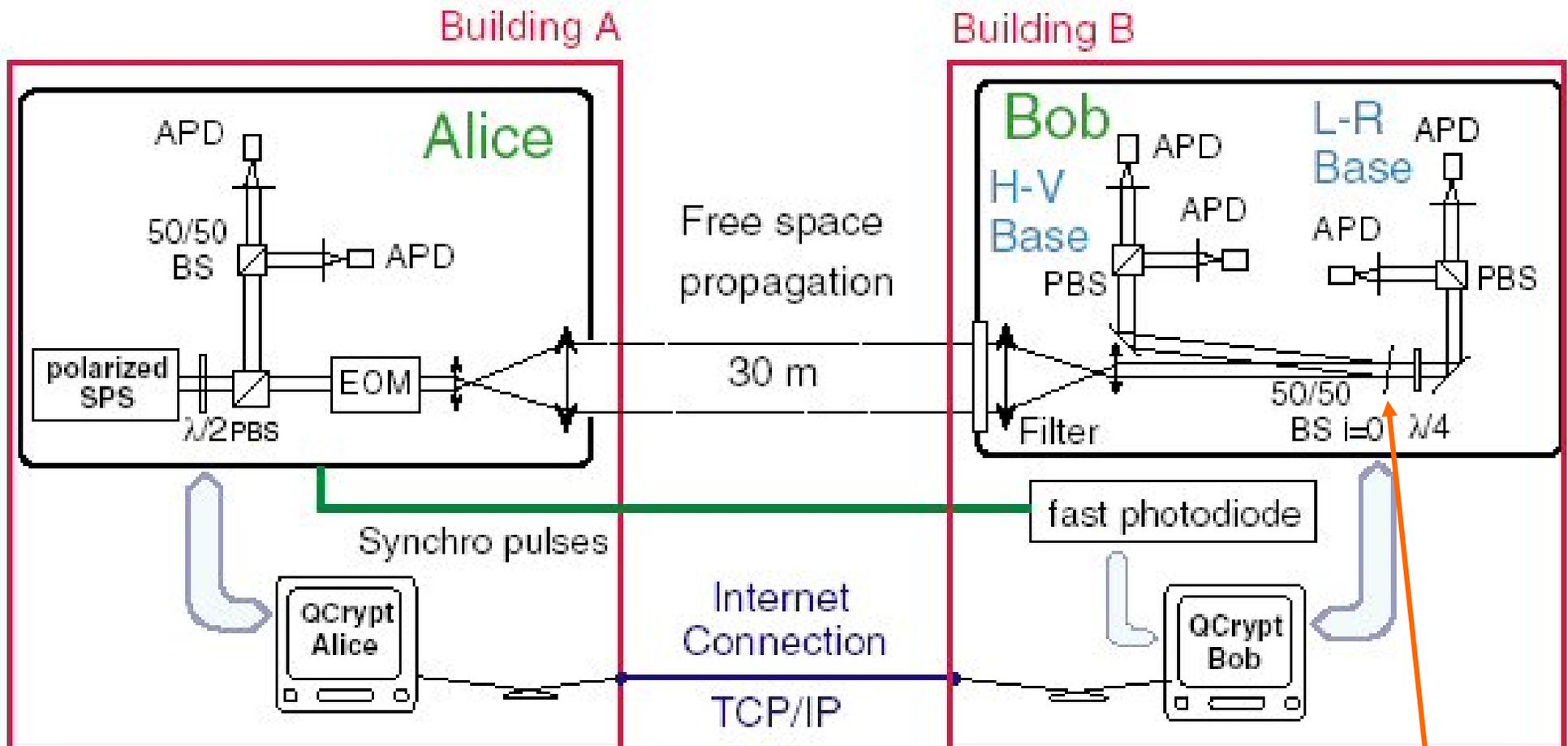
Artur Ekert em 1991  
(emaranhamento)



# BB84 - O canal quântico



# Aparato para BB84



Lab. do Prof. Ph. Grangier, Orsay

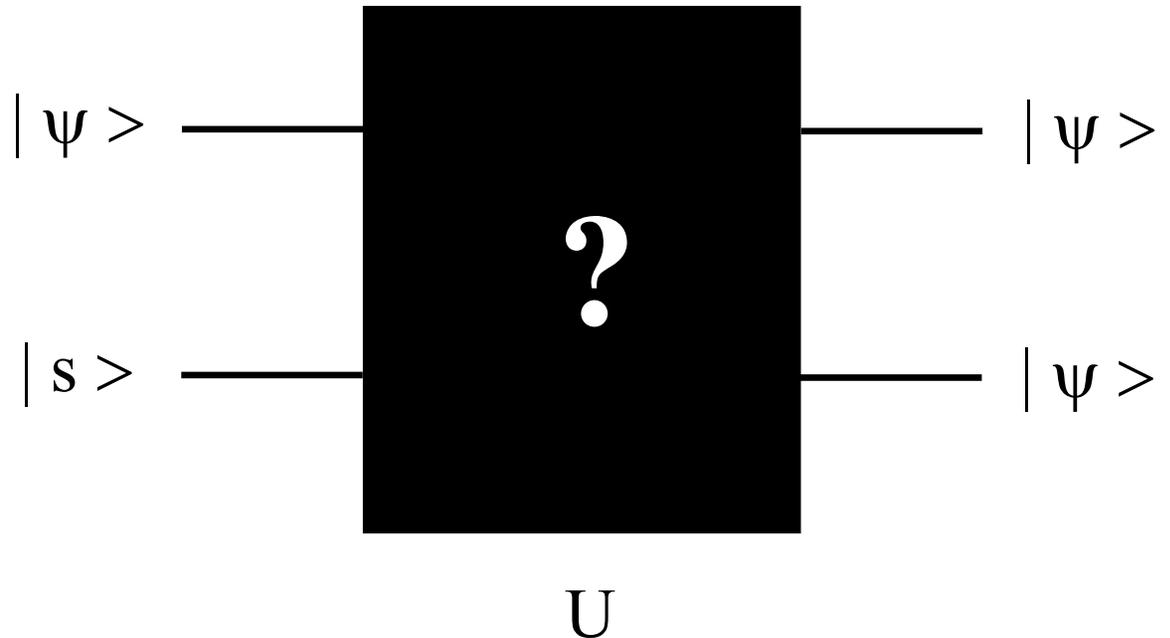
RND #

# É possível construir uma “copiadora” quântica?

Clássico



Quântico?



$$U(|\psi\rangle \otimes |s\rangle) = |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle \quad \Rightarrow \langle \phi | \psi \rangle \langle s | s \rangle = (\langle \phi | \psi \rangle)^2$$

$$U(|\phi\rangle \otimes |s\rangle) = |\phi\rangle \otimes |\phi\rangle$$

$$\Rightarrow \langle \phi | \psi \rangle = (\langle \phi | \psi \rangle)^2 \Rightarrow \langle \phi | \psi \rangle = 0 \text{ ou } 1$$

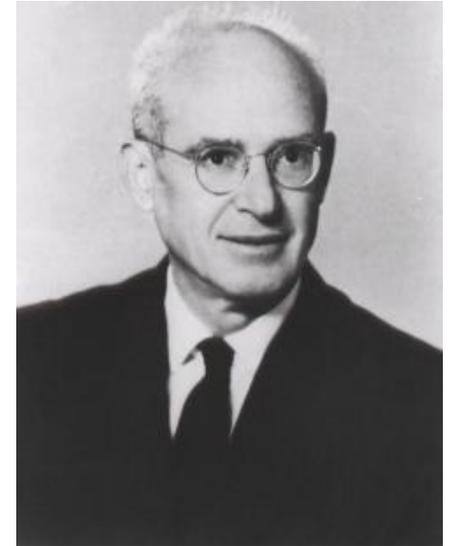
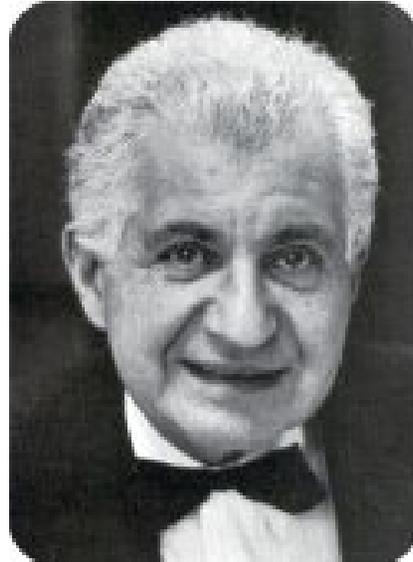
- Impossibilidade de “clonar” um bit é um resultado fundamental da Mecânica Quântica e uma das diferenças em relação à Mecânica Clássica. Resultado é consistente com o princípio de incerteza (noção de que a medida introduz, em geral, uma perturbação no sistema). É um dos ingredientes essenciais para o aumento de segurança na *criptografia quântica*.

- A Mecânica Quântica tem outro “recurso” que não está disponível na Mecânica Clássica: a possibilidade de haver *emaranhamento* entre partículas distintas, gerando correlações não-locais. A inexistência desse recurso no “mundo” clássico é demonstrada pela violação de desigualdades de Bell.

# EPR e Desigualdade de Bell

*Anybody who is not shocked by quantum theory has not understood it.*

Niels Bohr



MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality.

# O exemplo de EPR



$$|\psi\rangle \cong \delta(x_1 - x_2 - L)\delta(p_1 + p_2) \quad (\text{localizada em } x_1 - x_2 \text{ e } p_1 + p_2)$$

We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system.

Uma medida de  $x_1$  fornece  $x_2$ , assim como uma medida de  $p_1$  fornece  $p_2$ . Mas  $x_2$  e  $p_2$  *não comutam!*  $\leftrightarrow [x, p] = i \hbar$

# A conclusão de EPR

either (1) *the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete* or (2) *when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality.*

Se (1) é falso, então (2) também é falso! Portanto, (1) deve ser verdadeiro: a teoria quântica, embora forneça previsões corretas, deve ser *incompleta*. As medidas devem apenas revelar estados já pré-existentes, ainda não descritos pela teoria.

# A resposta de Bohr

OCTOBER 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 48

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?

N. BOHR, *Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen*

(Received July 13, 1935)

$$\begin{aligned} [q_1 p_1] &= [q_2 p_2] = ih/2\pi, \\ [q_1 q_2] &= [p_1 p_2] = [q_1 p_2] = [q_2 p_1] = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_1 &= Q_1 \cos \theta - Q_2 \sin \theta & p_1 &= P_1 \cos \theta - P_2 \sin \theta \\ q_2 &= Q_1 \sin \theta + Q_2 \cos \theta & p_2 &= P_1 \sin \theta + P_2 \cos \theta. \end{aligned}$$

$$[Q_1 P_1] = ih/2\pi, \quad [Q_1 P_2] = 0,$$

$$Q_1 = q_1 \cos \theta + q_2 \sin \theta,$$

$$P_2 = -p_1 \sin \theta + p_2 \cos \theta,$$

Bohr introduz a noção de *complementaridade*, mas sua resposta não contém elementos que permitam *descartar* o programa proposto por EPR.

# As desigualdades de Bell

---



Somente em 1964/1966 o “paradoxo” de EPR se tornou mais interessante para a comunidade de físicos. O irlandês John Bell conseguiu demonstrar uma desigualdade que deveria ser satisfeita por teorias de variáveis ocultas que respeitassem a condição de *localidade*. Seria possível realizar *testes experimentais*.

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 38, NUMBER 3

JULY 1966

## On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics\*

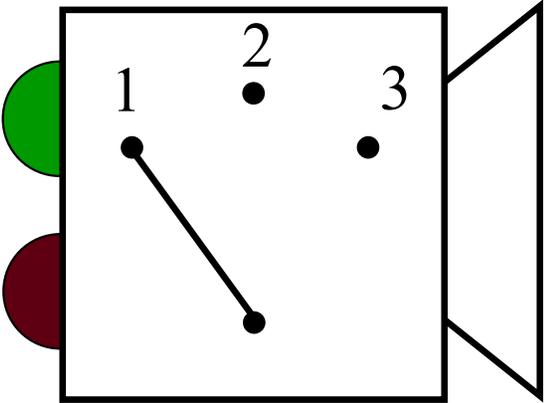
JOHN S. BELL†

# Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody

N. D. Mermin

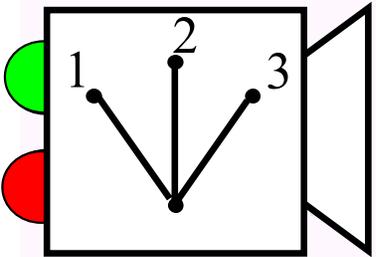
Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York 14853

(Received 19 November 1980; accepted 5 January 1981)

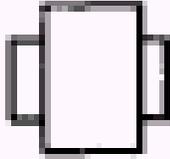


|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 23GR | 12GR | 11GG | 13GR | 23RG | 33GG | 12RG | 21GR |
| 11RR | 31RG | 22GG | 11GG | 22GG | 11RR | 32RG | 23RG |
| 31RG | 32GR | 22RR | 31RG | 13RG | 22GG | 22RR | 12GG |
| 33RR | 22RR | 21GR | 32RG | 11GG | 32GR | 33GG | 21GR |
| 32GG | 22GG | 11RR | 11GG | 23GG | 12RR | 32GR | 11GG |
| 32RG | 12RG | 13RG | 33GG | 21RG | 13GR | 31RR | 32GR |
| 31GR | 13GR | 21RG | 33RR | 13GR | 11RR | 11GG | 13RG |
| 12GG | 32GR | 33GG | 21GR | 21GG | 33RR | 23RG | 21GG |
| 13GR | 11GG | 32GG | 31GR | 32RG | 33RR | 13RR | 13RG |
| 11GG | 31RG | 33RR | 12RG | 21GR | 11GG | 22GG | 33GG |
| 33RR | 21GG | 21RG | 12RG | 11GG | 12RG | 11GG | 23GG |
| 11GG | 12RR | 12RG | 31GR | 23GR | 12GR | 33GG | 31GG |
| 11RR | 22RR | 12RG | 22GG | 23GR | 12GR | 23RG | 21RR |
| 13GR | 21RR | 33RR | 33RR | 13RG | 23RG | 33GG | 32RR |
| 13RR | 32RG | 11RR | 11RR | 11RR | 32RG | 12RG | 21RG |
| 23RG | 23RR | 21RG | 33RR | 13GR | 12GR | 23RG | 21RR |
| 13RR | 21GR | 12RR | 31GR | 12RG | 13GR | 13RG | 22RR |
| 21RG | 23GR | 11RR | 12RR | 33RR | 21RG | 13GR | 21RR |
| 31GR | 23GG | 13RG | 21RG | 11GG | 12GR | 23GR | 13GG |
| 11RR | 31RG | 11GG | 31GR | 32GR | 32RG | 32GR | 11GG |

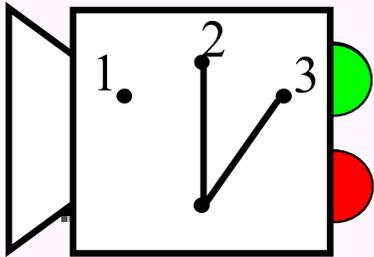
- (a) 11, 22, ou 33: RR e GG com mesma frequência; jamais RG ou GR
- (b) 12, 13, 21, 23, 31, 32: RR e GG com mesma frequência,  $\frac{1}{4}$  do total;  $\frac{3}{4}$  do tempo RG ou GR (com mesma frequência)



(A)



(C)



(B)

# Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody

940 Am. J. Phys. 49(10), Oct. 1981

N. D. Mermin

*Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York 14853*

(Received 19 November 1980; accepted 5 January 1981)

- (a) Partículas têm instrução do tipo: RRR, RRG, RGR, RGG, GRR, GRG, GGR, GGG. Para explicar o caso (a), basta supor que as partículas emitidas são sempre idênticas.
- (b) Vamos analisar o caso (b) de acordo com essa hipótese. Suponhamos que as partículas tenham a instrução RRG. Dos seis arranjos possíveis, só nos casos 12 e 21 lâmpadas de mesma cor acenderão. Como todos os arranjos são supostos aleatórios, o mesmo vale para as instruções RGR, RGG, GRR, GRG e GGR. Nos casos RRR e GGG, as lâmpadas sempre acenderão com a mesma cor. Portanto, a probabilidade de termos lâmpadas de mesma cor no caso (b) deveria ser superior a *um terço*, enquanto os resultados fornecem apenas *um quarto*!

**Conclusão: experiência é incompatível com descrição em termos de conjunto de instruções bem definidas *a priori*.**

# Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody

N. D. Mermin

*Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York 14853*

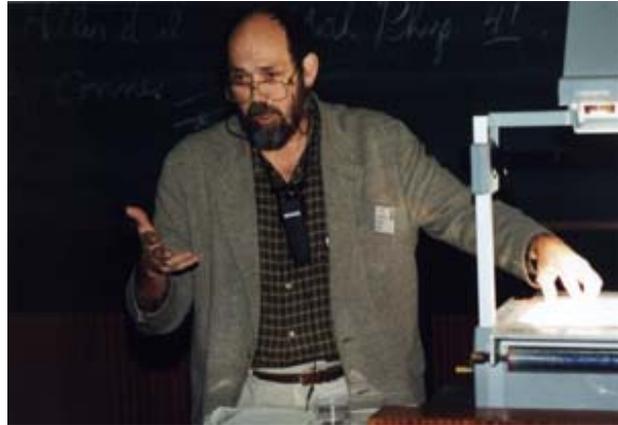
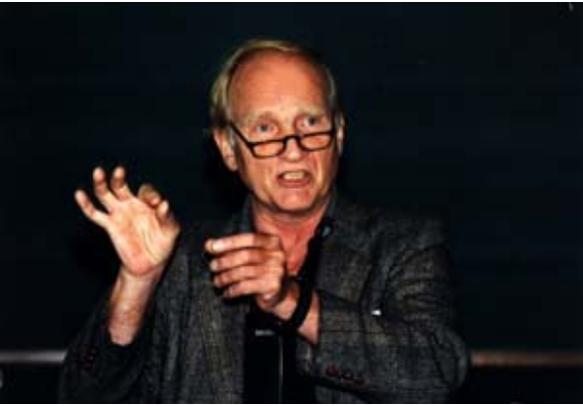
(Received 19 November 1980; accepted 5 January 1981)

Como fazer isso na prática? Podemos, por exemplo, fazê-lo com partículas de spin meio, num estado do tipo

$$\frac{|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle}{\sqrt{2}}$$

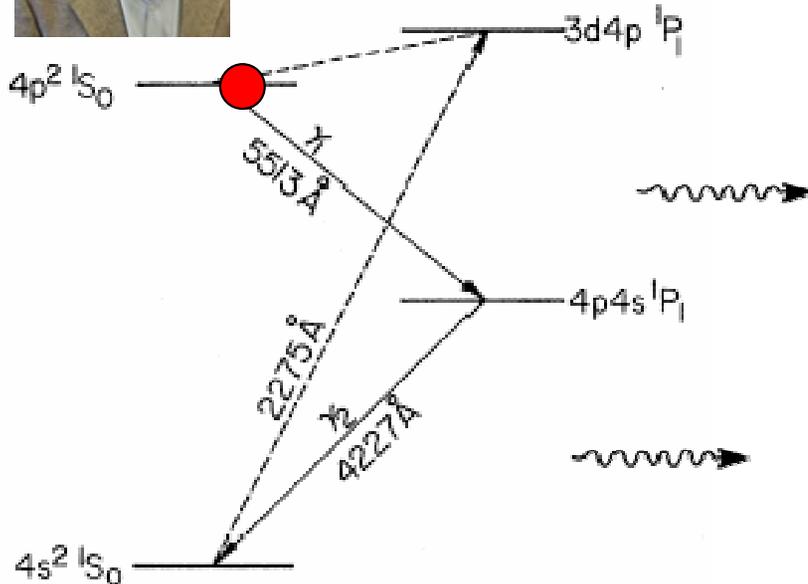
Os detetores são dispositivos tipo Stern-Gerlach com três posições possíveis: alinhados, ou a  $\pm 120^\circ$ . A probabilidade de medir spins opostos vale  $\cos^2(\theta/2)$ . Os detetores são codificados com cores invertidas. Desigualdades foram obtidas por J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964). Medidas foram feitas por: S. J. Freedman and J. S. Clauser, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938 (1972) e A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1804 (1982).

# Clauser, Horne, Shimony e Holt (CHSH)



Desigualdades em forma mais apropriada para teste experimental

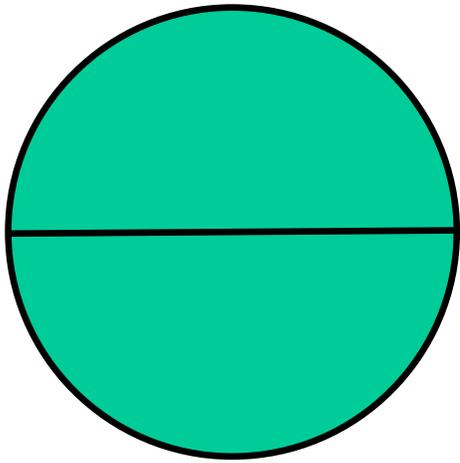
## Freedman e Clauser (PRL, 1972)



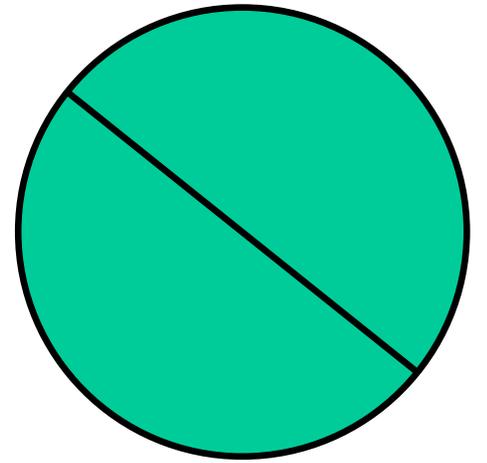
Fótons têm mesma polarização, embora a polarização de cada um não esteja bem definida.  $\Rightarrow$  estado emaranhado.

Einstein: conceito de *quanta de luz* é difícil.

Anton Zeilinger: “photons are clicks on photodetectors”.



..



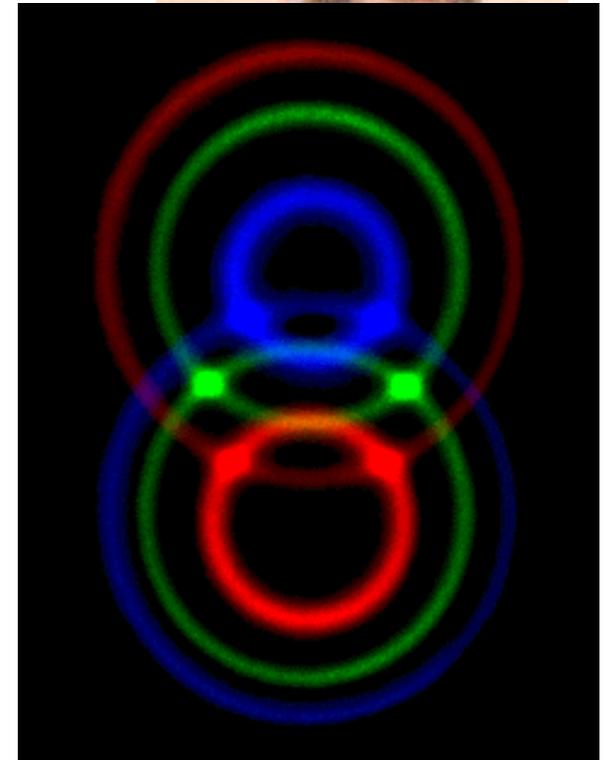
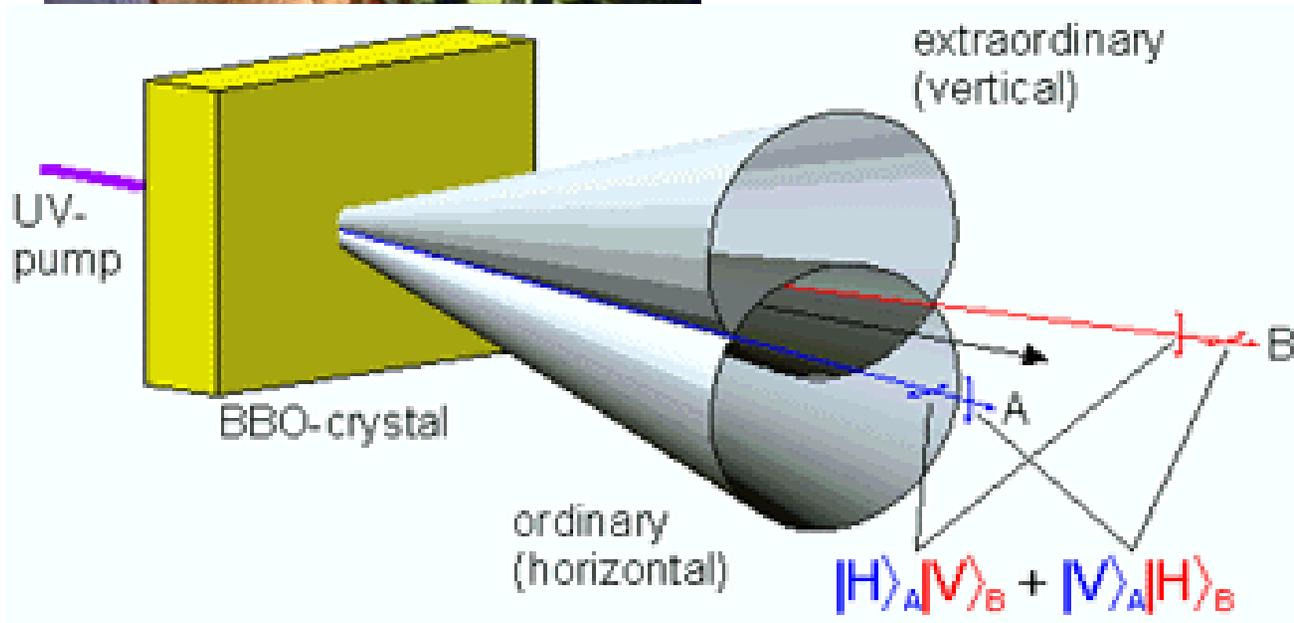
$$-1 \leq \Delta(\varphi) \leq 0$$

$$\Delta(22\frac{1}{2}^\circ) = 0.104 \pm 0.026$$

$$\Delta(67\frac{1}{2}^\circ) = -1.097 \pm 0.018$$

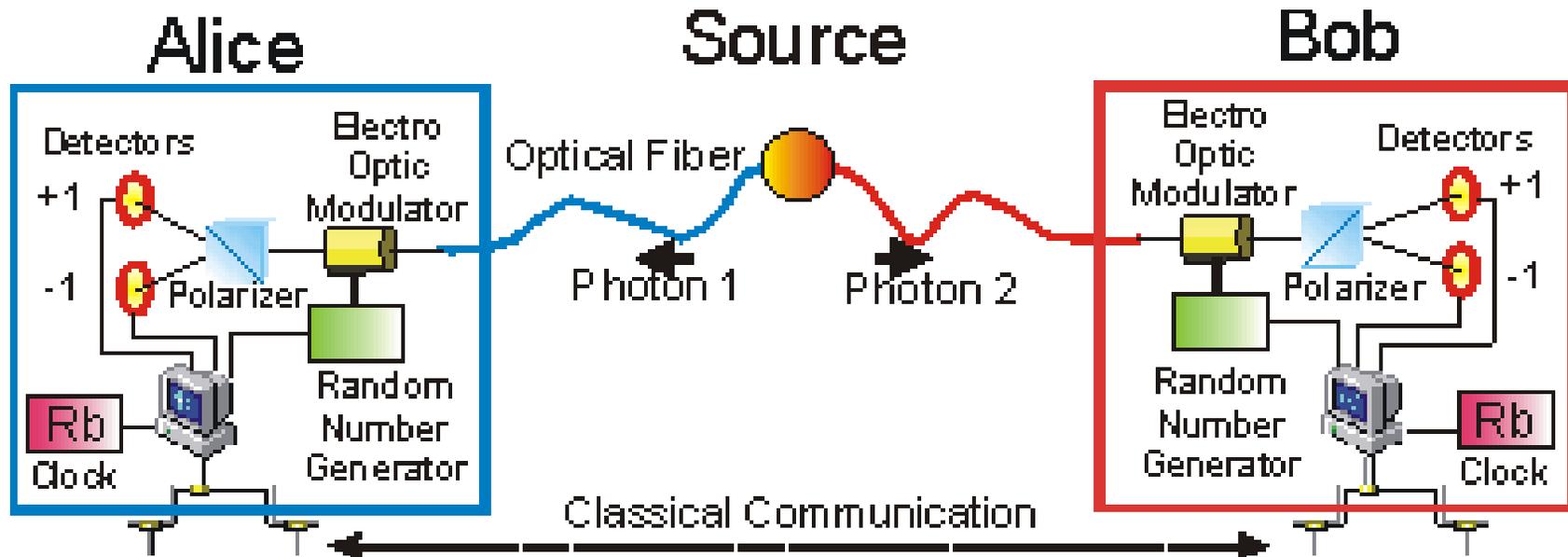
# Experiências mais recentes nos grupos de Anton Zeilinger e Nicolas Gisin

## Geração de Fótons Gêmeos por PDC (tipo II)



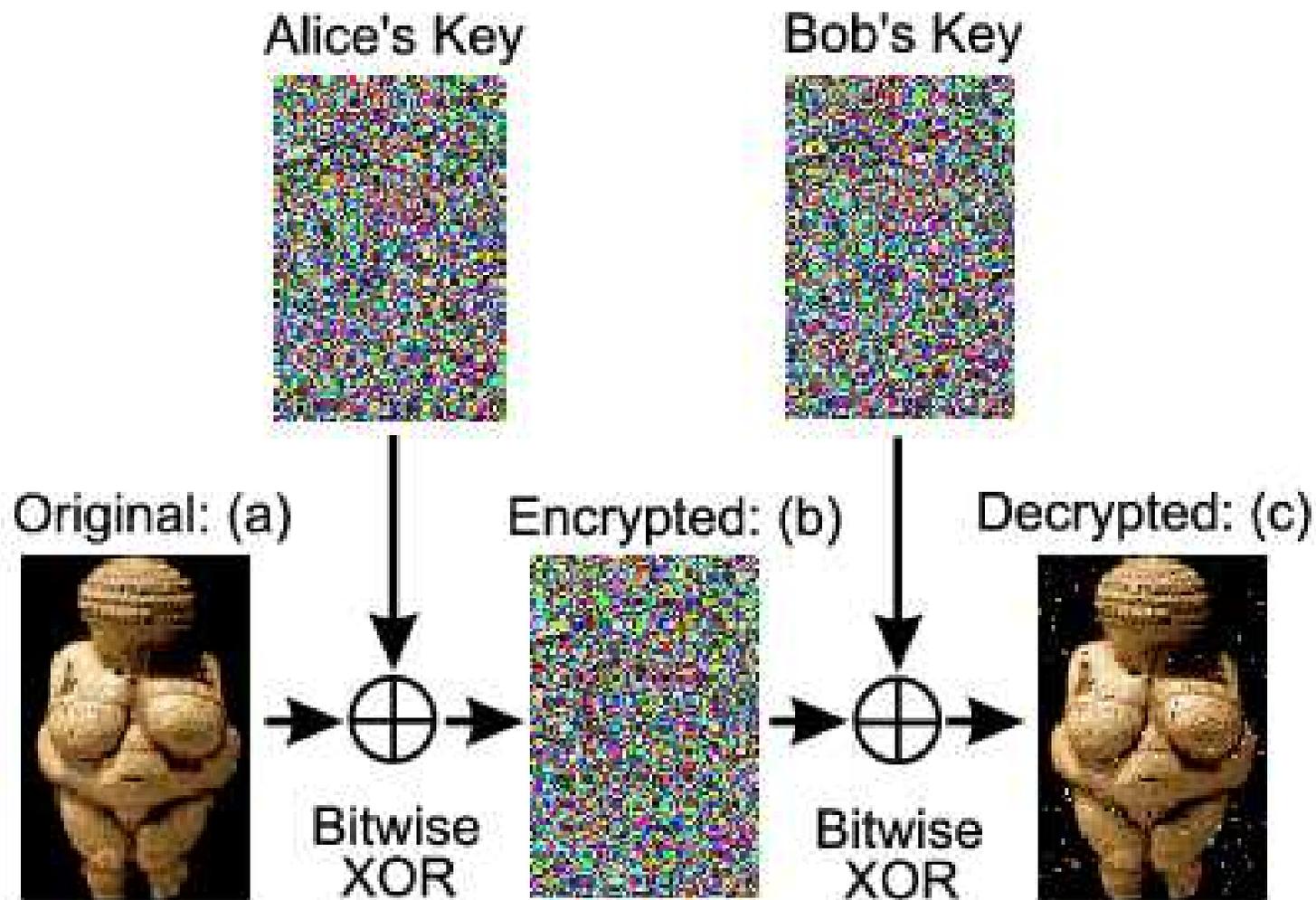
Estado gerado é *emaranhado*.

# Criptografia Quântica com fótons emaranhados



Alice e Bob recebem fótons de pares emaranhados em estados do tipo  $\frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}$   
Eles fazem medidas de polarização variando aleatoriamente o eixo do polarizador. Comparando as direções por um canal clássico, conseguem extrair a “chave”.

Finalmente, Alice manda uma mensagem codificada a Bob através de um canal clássico: só ele pode ler, pois é o único a possuir a chave.



“Venus von Willendorf”

T. Jennewein, C. Simon, G. Weihs, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, Phys. Rev. Lett. **84**, 4729 (2000)



• **Main features**

- First commercial quantum key distribution system
- Key distribution distance: up to 60 km
- Key distribution rate: up to 1000 bits/s
- Compact and reliable

[www.idquantique.com](http://www.idquantique.com)

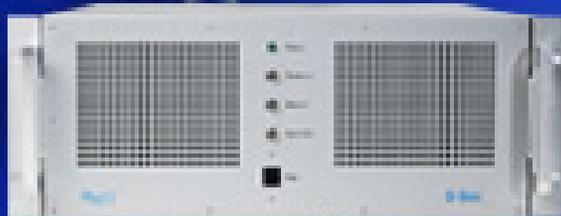


Quantum Information Solution for the Real World.

[www.magiqtech.com](http://www.magiqtech.com)



MagiQ QPN  
QPN datasheet



Q-Box  
Q-box datasheet

Presenting the first  
commercial quantum  
cryptography solutions.

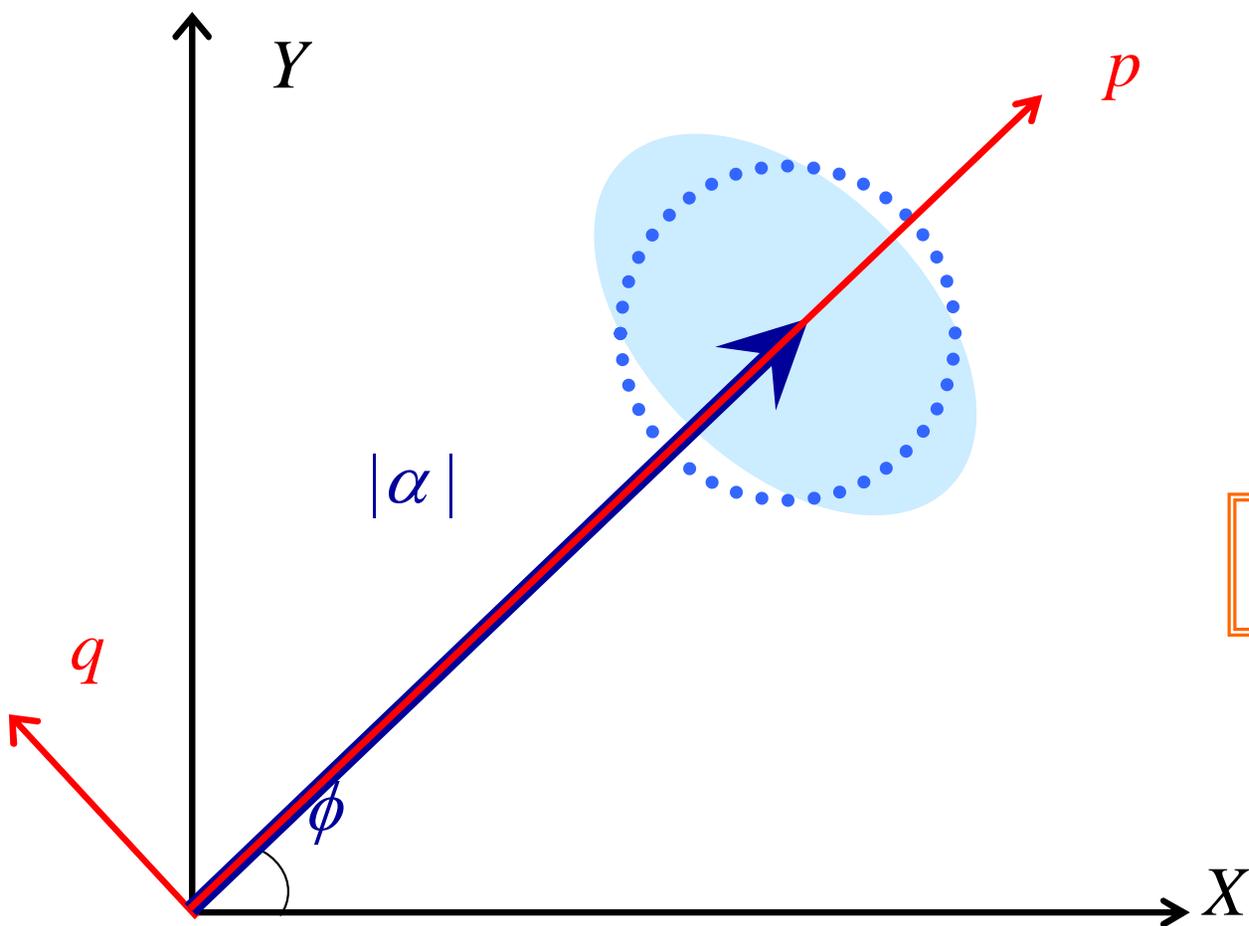
Mas a proposta original de EPR envolvia variáveis contínuas, posição e momento.

Variáveis contínuas do campo EM

$$\alpha = X + i Y$$

$$E(t) = \text{Re}[\alpha \exp(i\omega t)]$$

$$E(t) = X \cos(\omega t) + Y \sin(\omega t)$$



observáveis

$$\Delta^2 X \Delta^2 Y = \Delta^2 p \Delta^2 q > 1$$

Heisenberg

# Vantagens de variáveis contínuas

- Preparação “incondicional” de estados (a cada inverso de largura de banda).
- Medidas com alta eficiência de detecção (eficiência maior que 95%).
- “Complete Bell detection” com detecção homodina e beamsplitters.
- “Drawbacks”: estados não são perfeitos, dependem do grau de squeezing; maioria dos experimentos envolvem estados gaussianos, com função de Wigner  $\geq 0$ .

# Como medir emaranhamento?

- Critério “EPR” [M. D. Reid, PRA **40**, 913 (1989), M. D. Reid and P. D. Drummond, PRL **60**, 2731 (1988) & PRA **40**, 4493 (1989)]

$$\Delta^2 \hat{p}_{\text{inf}} = \Delta^2 \hat{p}_1 \left( 1 - \frac{\langle \delta \hat{p}_1 \delta \hat{p}_2 \rangle^2}{\Delta^2 \hat{p}_1 \Delta^2 \hat{p}_2} \right) \quad \delta \hat{p}_i = \hat{p}_i - \langle \hat{p}_i \rangle$$

$$\Delta^2 \hat{p}_{\text{inf}} \Delta^2 \hat{q}_{\text{inf}} \geq 1$$

## • Critério DGCZ

Lu-Ming Duan, G. Giedke, J.I. Cirac, P. Zoller,

*Inseparability criterion for continuous variable systems*, Phys. Rev. Lett. **84**, 2722 (2000).

$$\rho = \sum_i p_i \rho_i = \sum_i p_i \rho_i^1 \otimes \rho_i^2$$

$$[\hat{x}_j, \hat{p}_{j'}] = 2i \delta_{jj'}$$

$$\hat{u} = |a| \hat{x}_1 + \frac{1}{a} \hat{x}_2$$

$$\hat{v} = |a| \hat{p}_1 - \frac{1}{a} \hat{p}_2$$

Separability  $\Rightarrow$

$$\langle (\Delta \hat{u})^2 \rangle_\rho + \langle (\Delta \hat{v})^2 \rangle_\rho \geq 2 \left( a^2 + \frac{1}{a^2} \right)$$

# Como gerar emaranhamento?

## Estados comprimidos

$$\hat{X}(\theta) = \hat{a}e^{-i\theta} + \hat{a}^\dagger e^{i\theta}$$

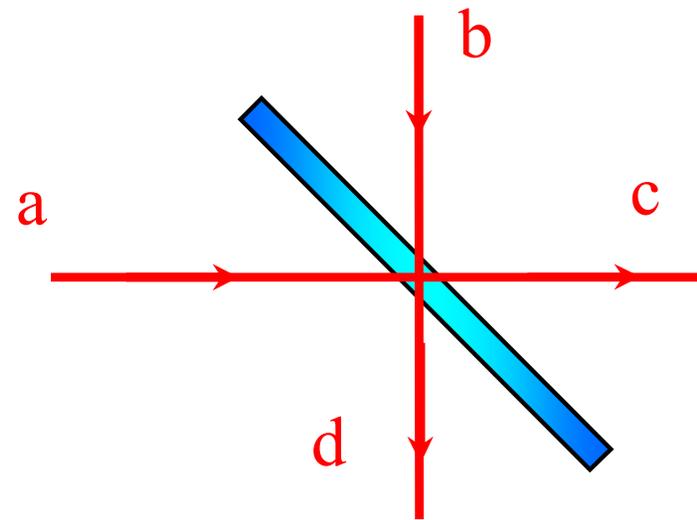
$$\left[ \hat{X}(\theta), \hat{X}\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \right] = 2i$$

$$\hat{c} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{a} + \hat{b})$$

$$\hat{d} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{b} - \hat{a})$$

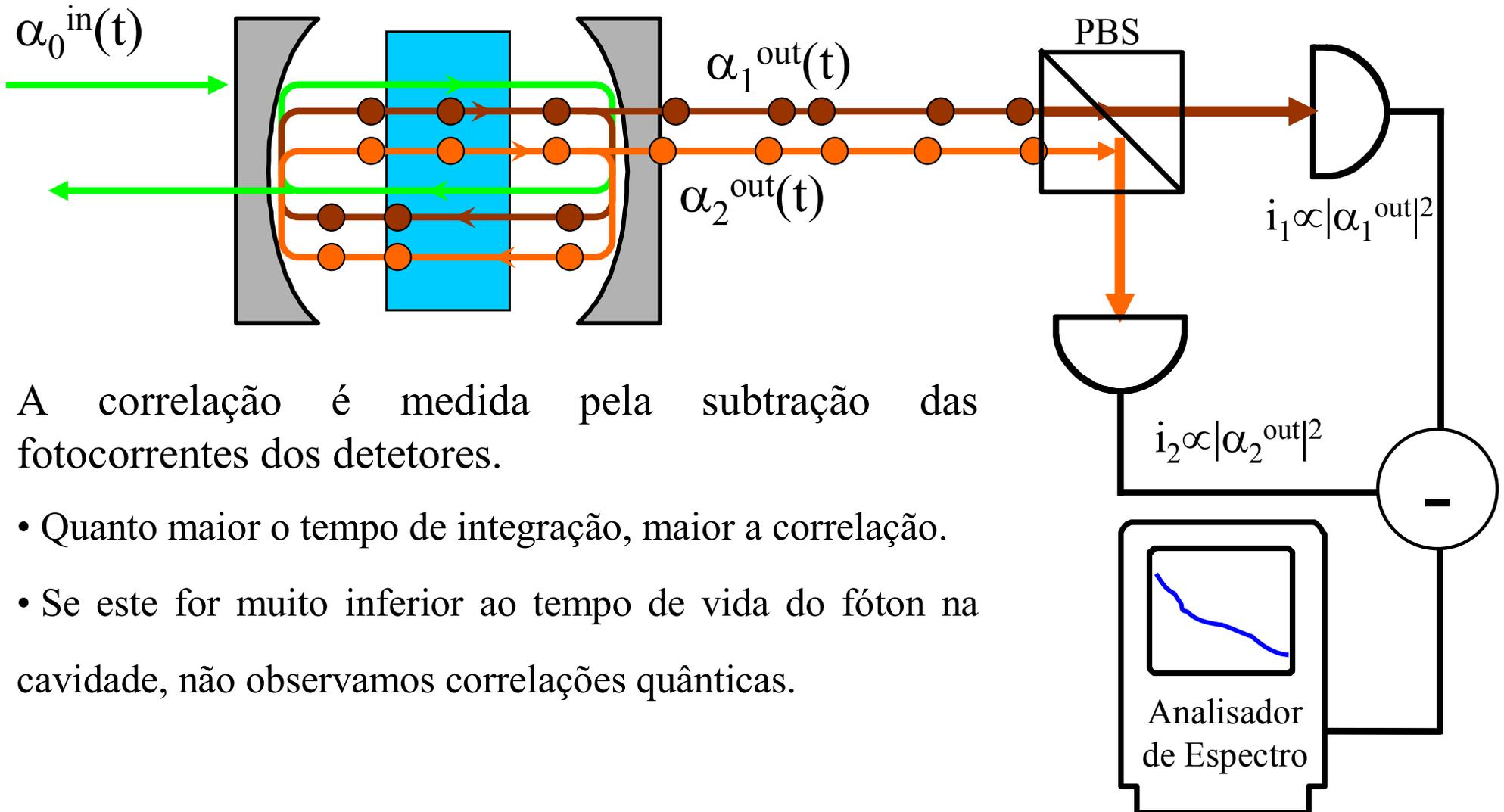
$$\hat{u} = \sqrt{2} (\hat{b} + \hat{b}^\dagger)$$

$$\hat{v} = i\sqrt{2} (\hat{a}^\dagger - \hat{a})$$



# Oscilador Paramétrico Ótico

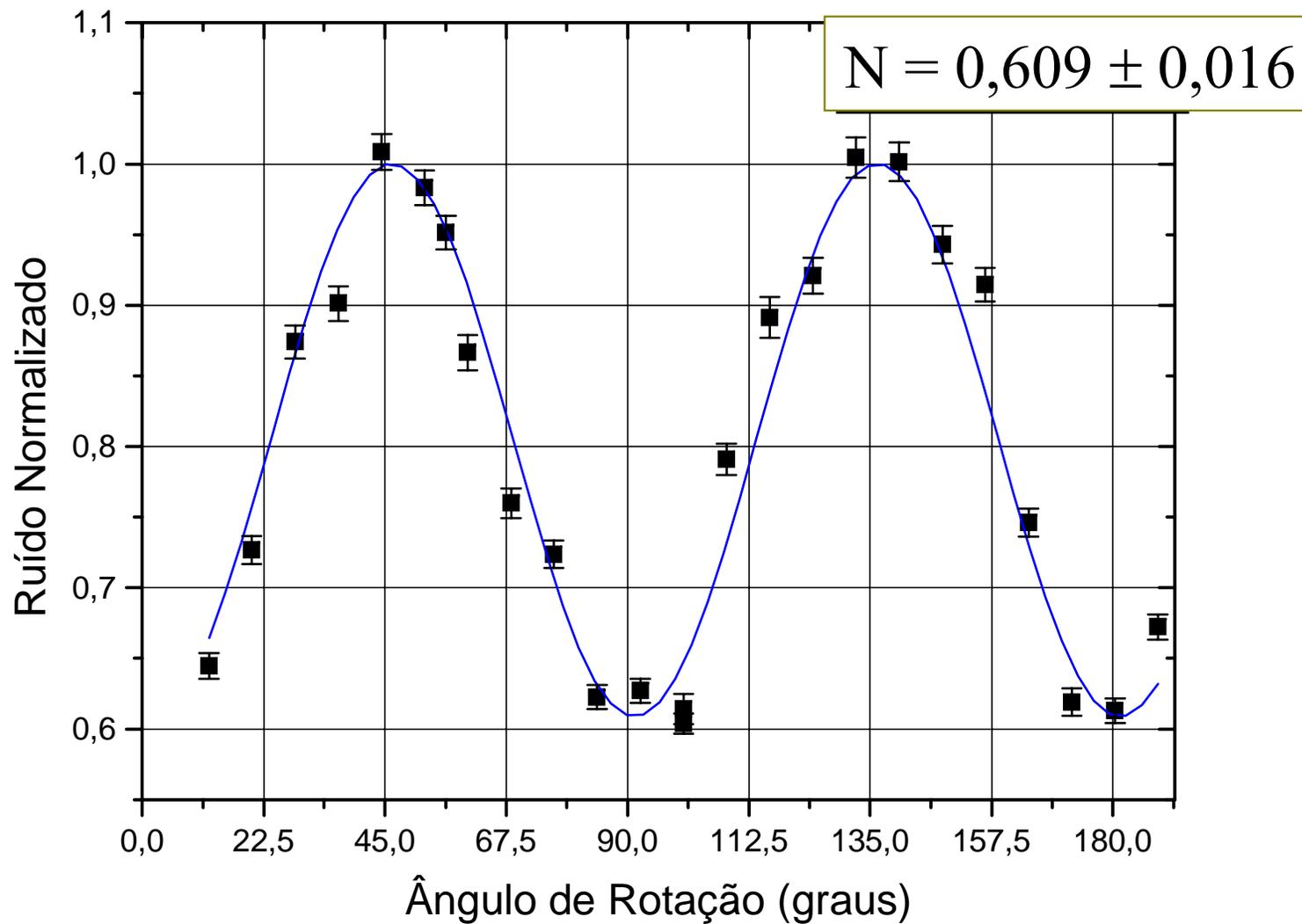
O bombeio gera pares de fótons (sinal e complementar) no interior da cavidade.



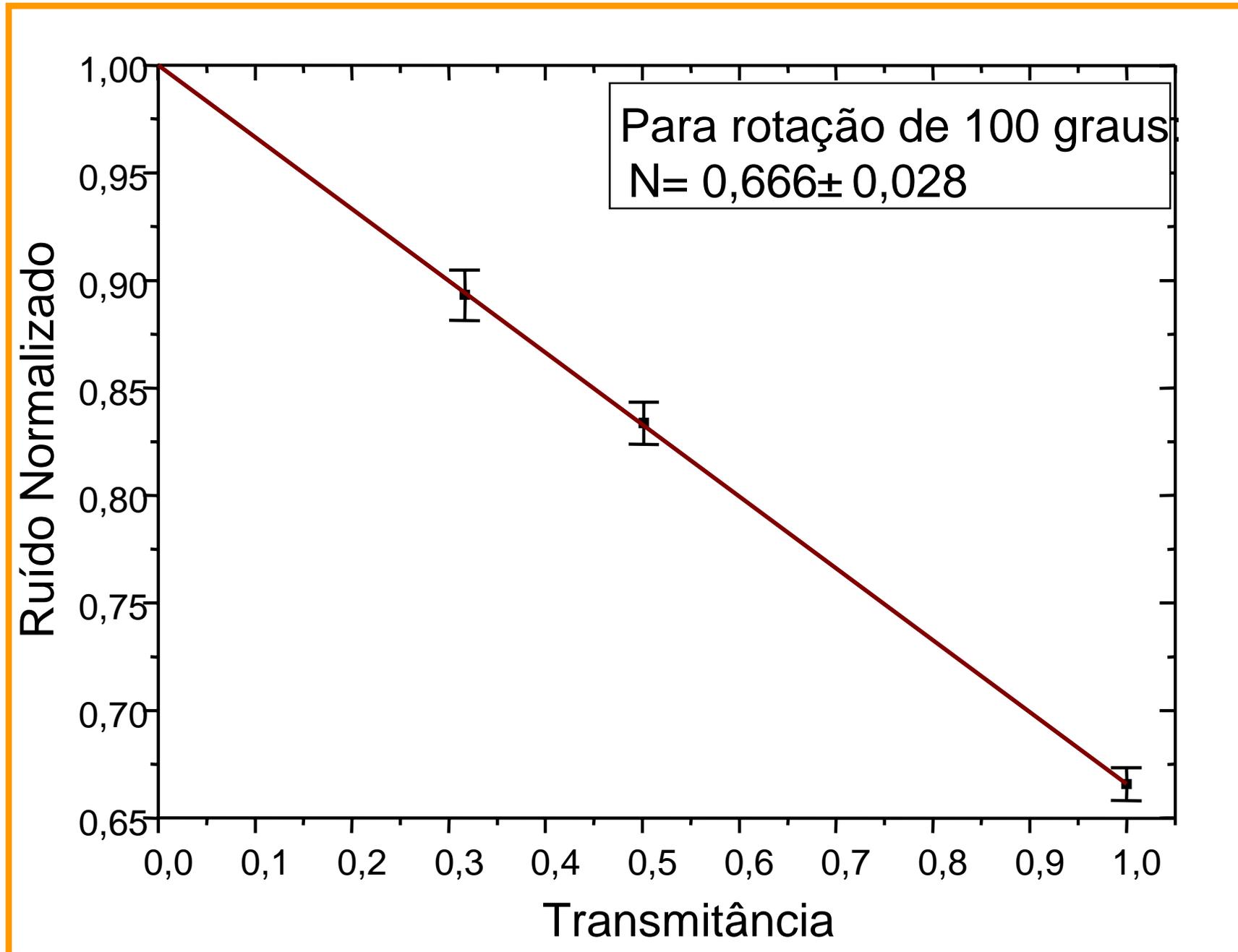
A correlação é medida pela subtração das fotocorrentes dos detetores.

- Quanto maior o tempo de integração, maior a correlação.
- Se este for muito inferior ao tempo de vida do fóton na cavidade, não observamos correlações quânticas.

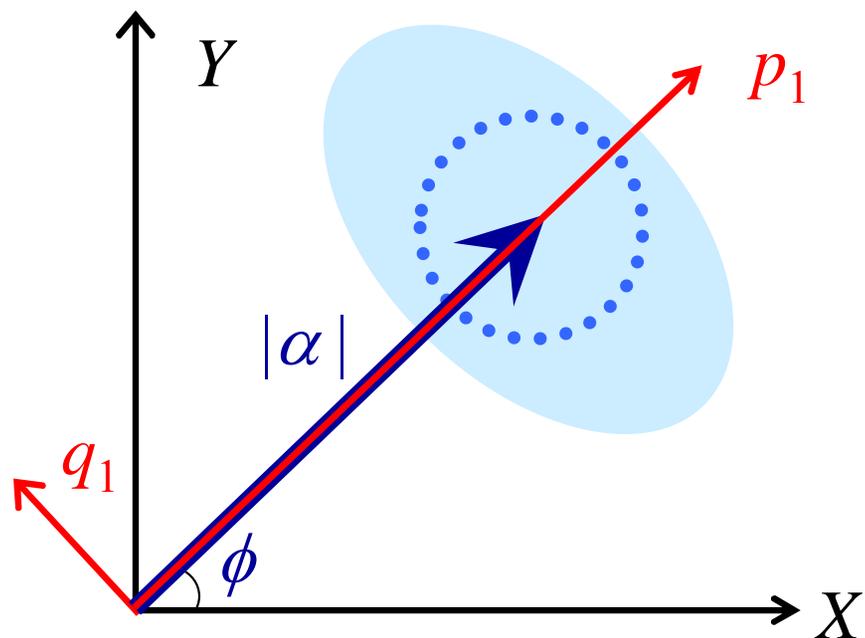
# Compressão de Ruído em Feixes Gêmeos



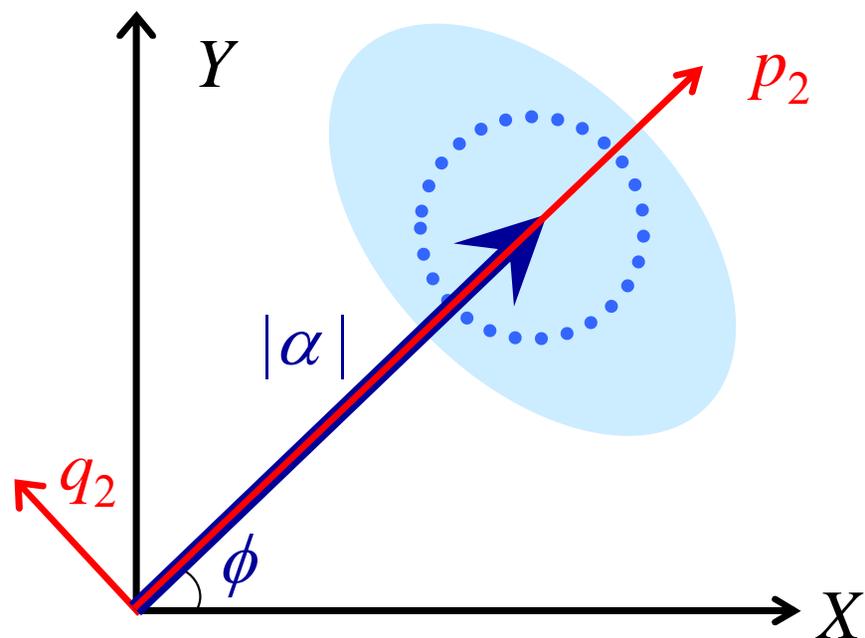
# Compressão de Ruído em Feixes Gêmeos



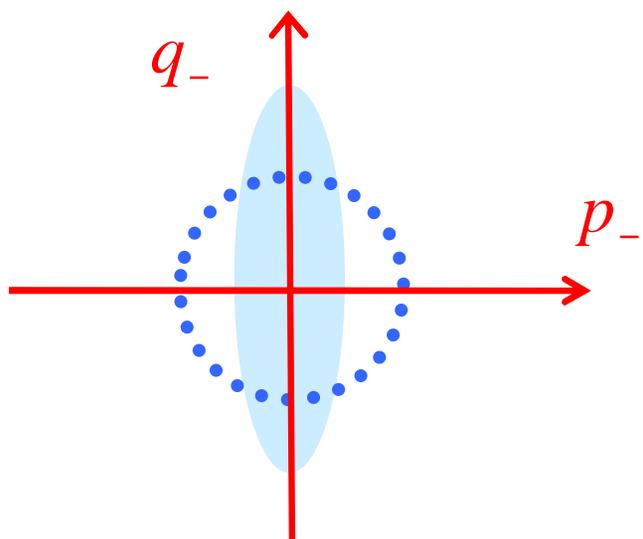
Signal



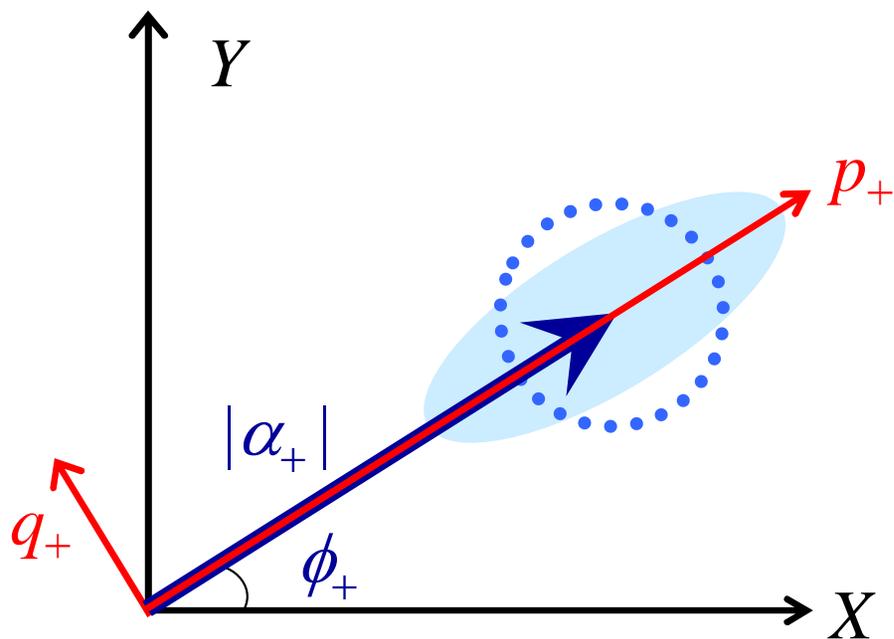
Idler



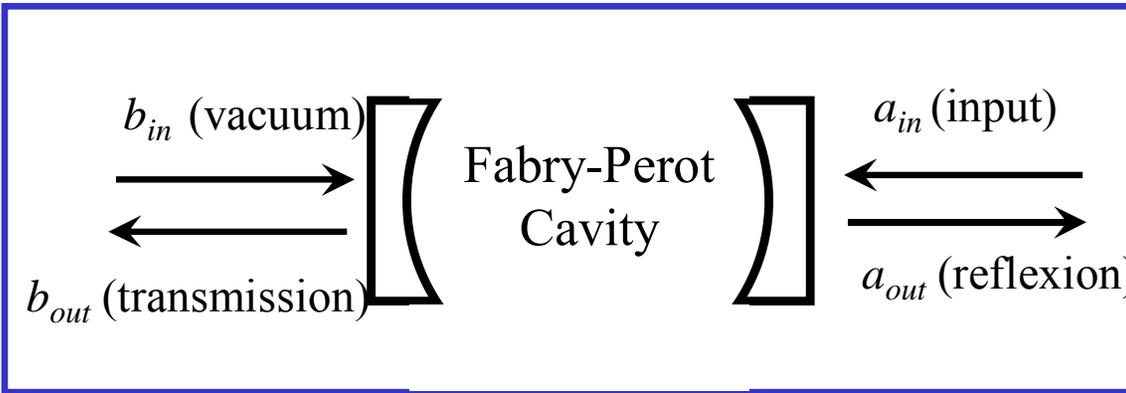
Signal - Idler



Signal + Idler

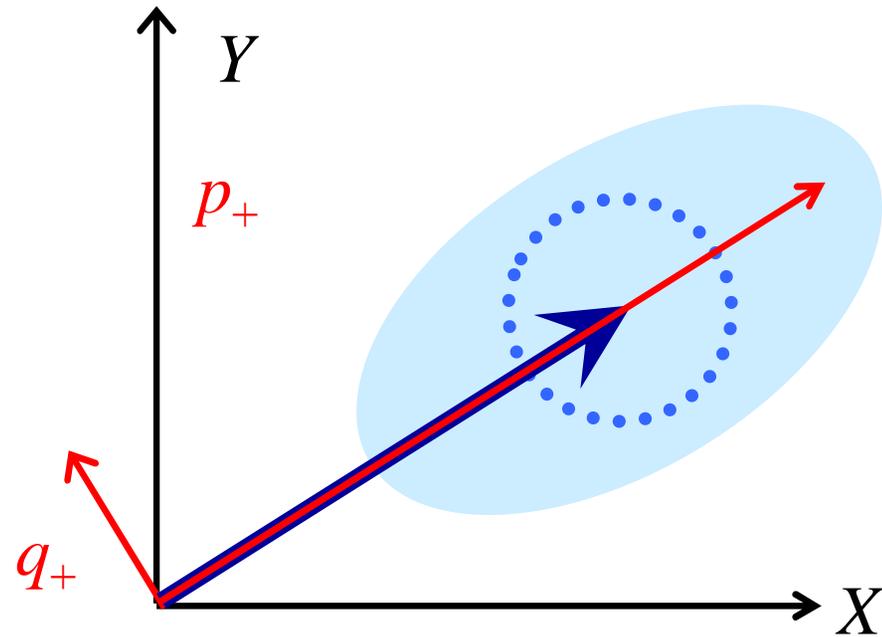


# Medindo a quadratura fase do feixe

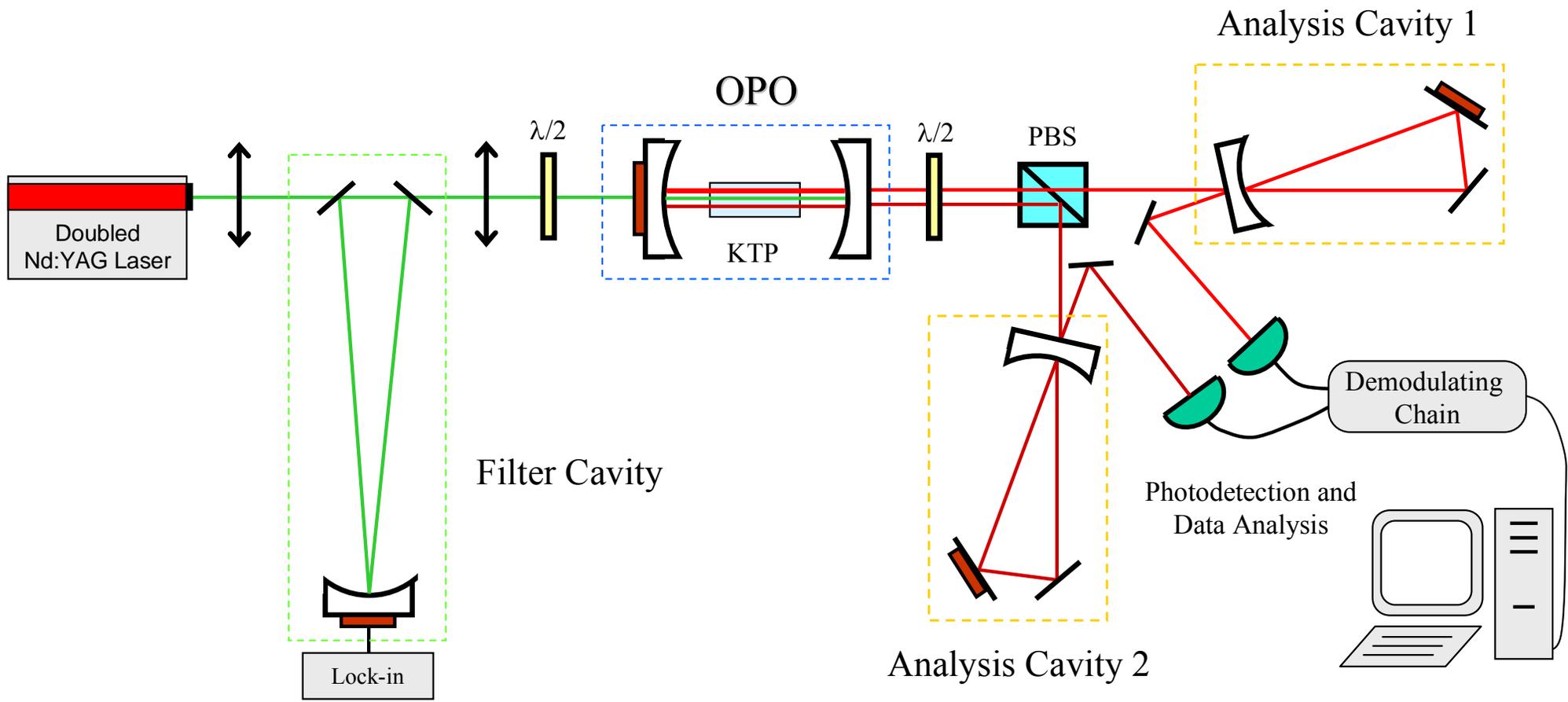


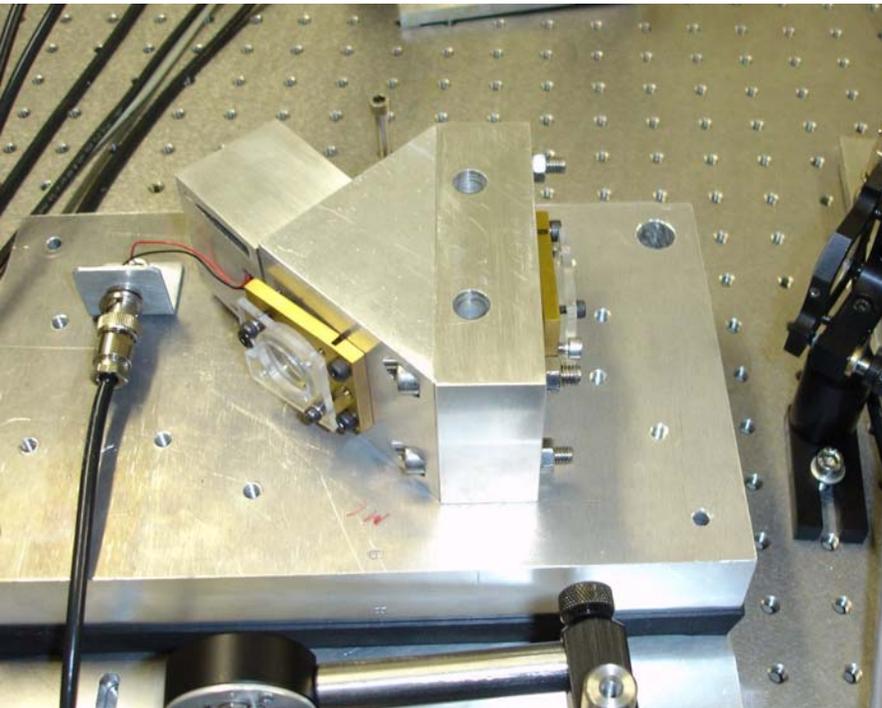
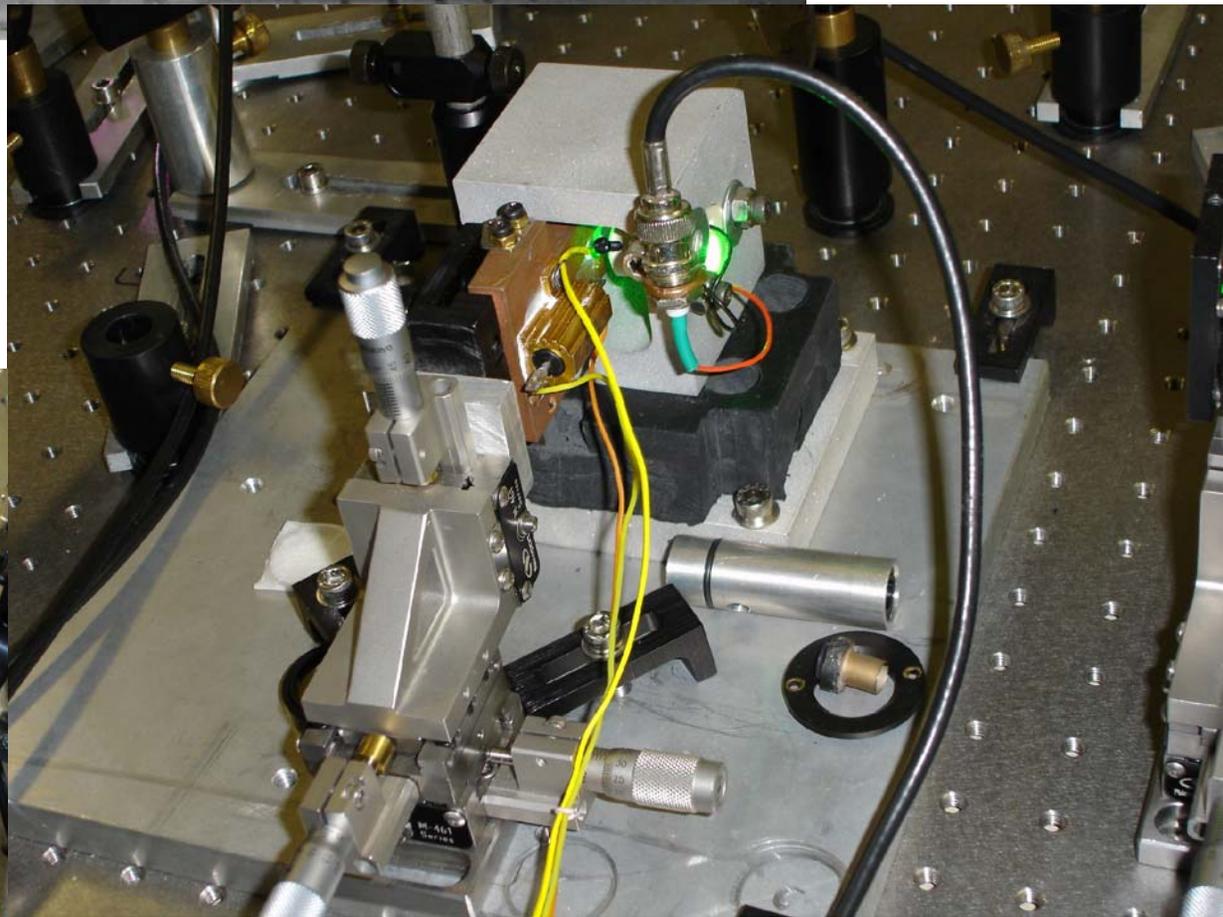
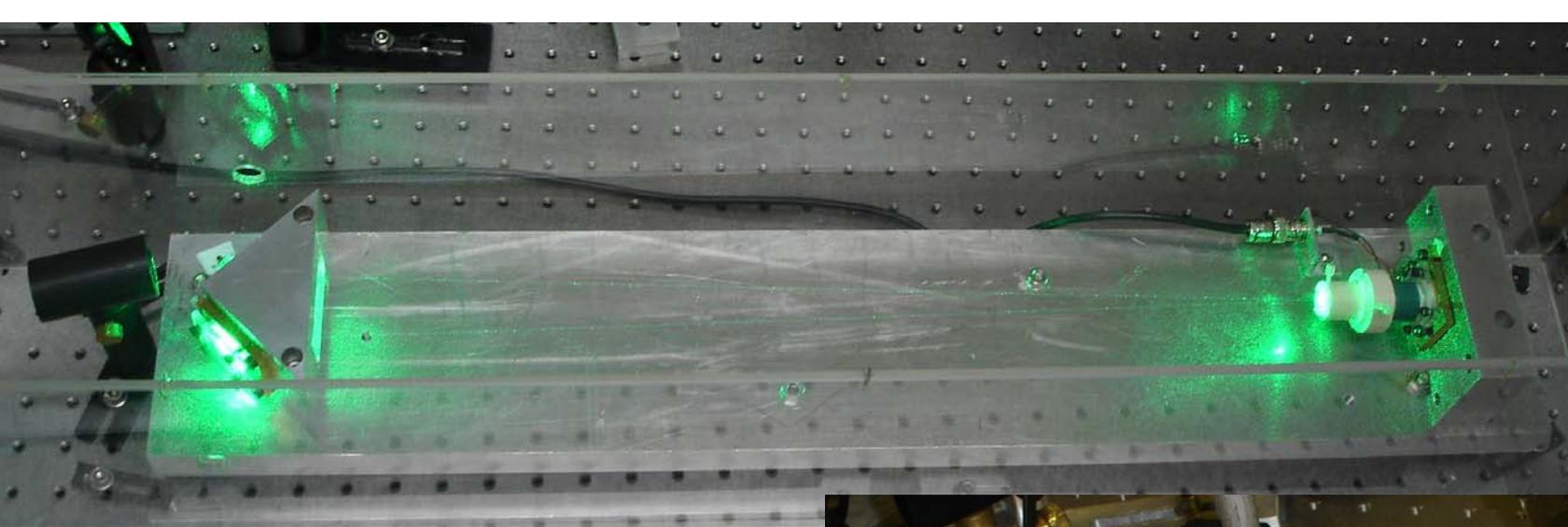
Flutuações de fase  
→ intensidade

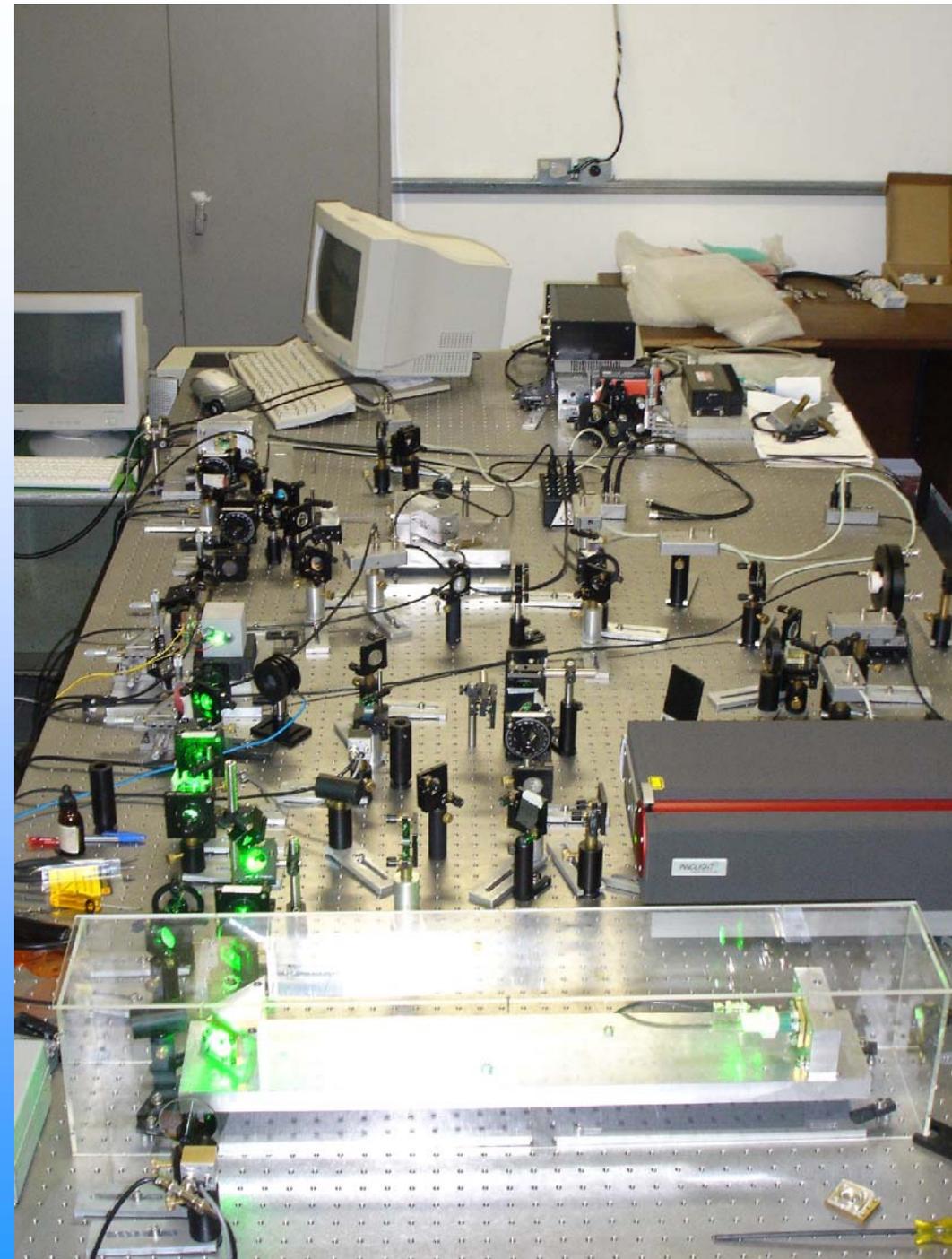
$$\Omega \geq \sqrt{2} \delta\omega$$



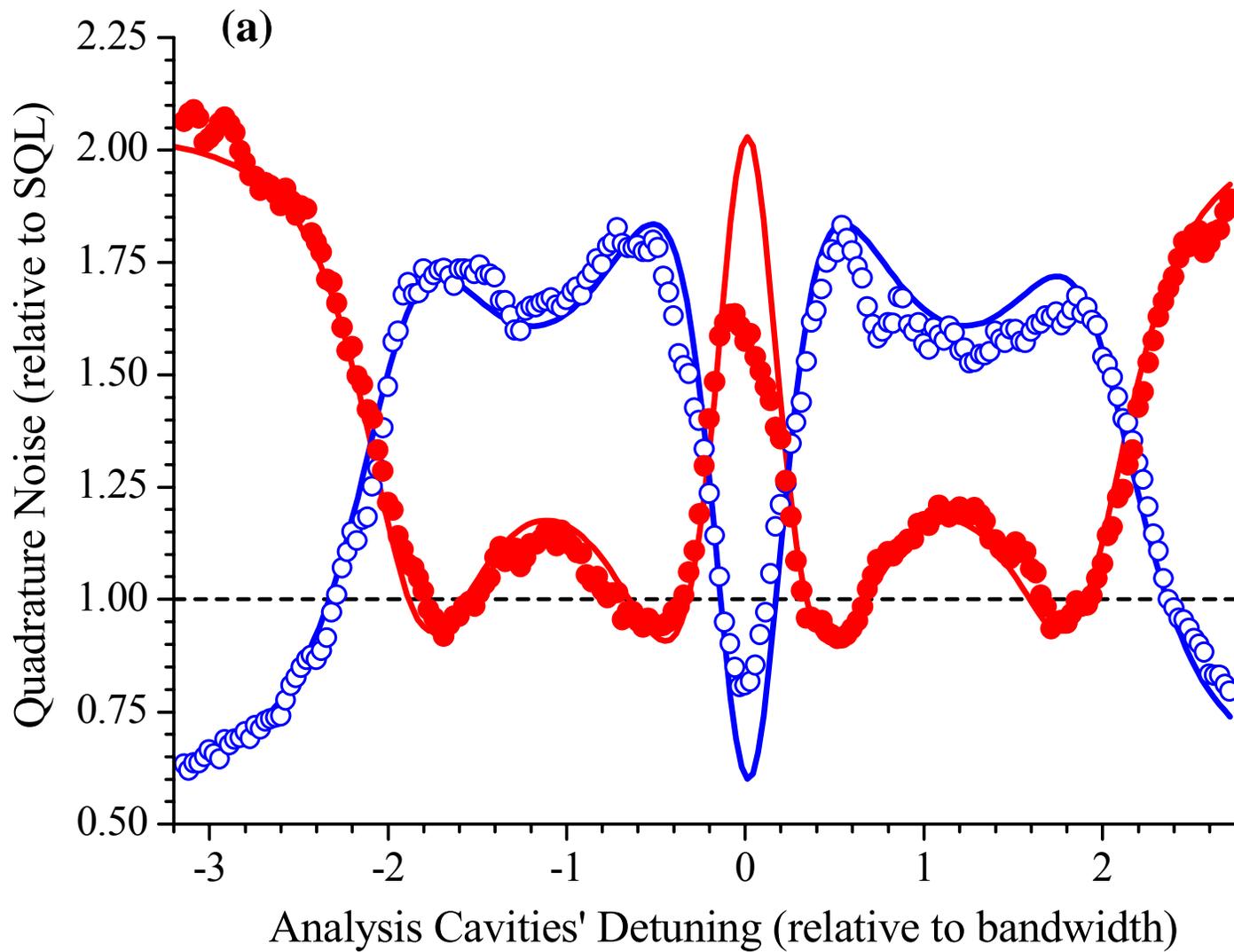
# Montagem



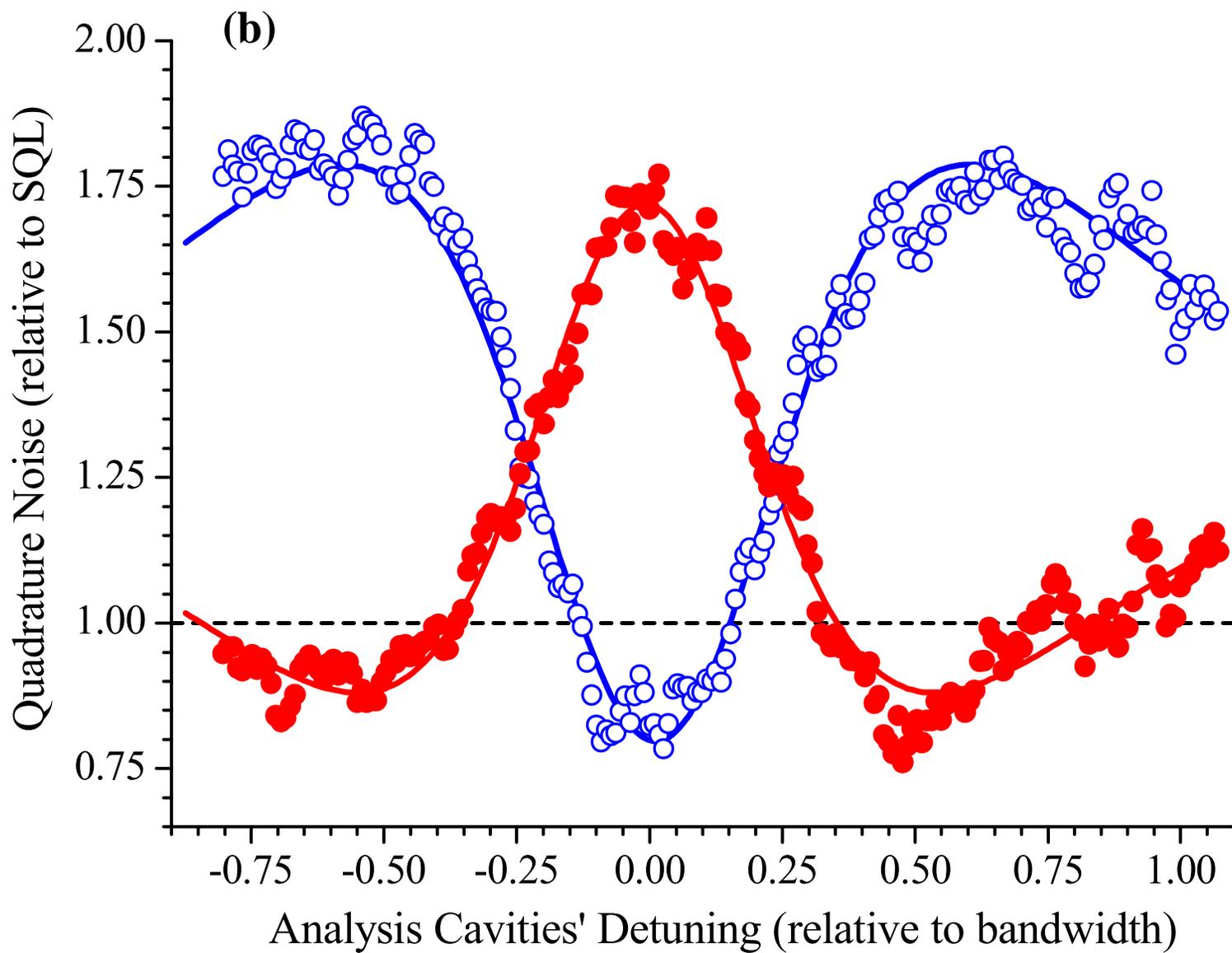




# Resultados - 27MHz Low DC



# Resultados - 27MHz Low DC



## Generation of Bright Two-Color Continuous Variable Entanglement

A. S. Villar, L. S. Cruz, K. N. Cassemiro, M. Martinelli, and P. Nussenzveig\*

*Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 66318, 05315-970 São Paulo, São Paulo, Brazil*

(Received 16 June 2005; revised manuscript received 16 September 2005; published 9 December 2005)

EPR

$$\Delta^2 \hat{p}_{\text{inf}} \Delta^2 \hat{q}_{\text{inf}} = 0.95(-3/ + 6)$$

Duan

$$\Delta^2 \hat{p}_- + \Delta^2 \hat{q}_+ = 1.41(2) < 2$$

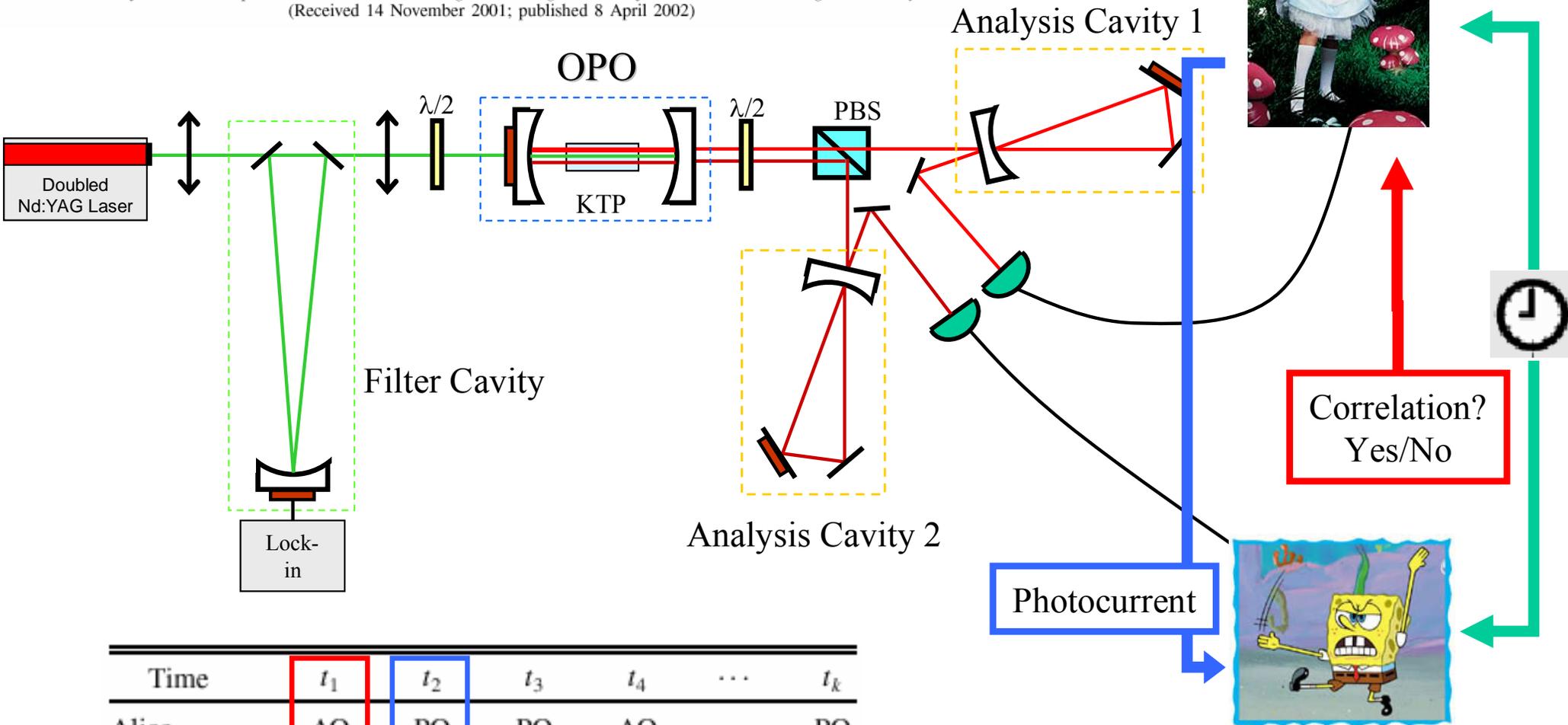
# Quantum Key Distribution

## Quantum Key Distribution with Bright Entangled Beams

Ch. Silberhorn, N. Korolkova, and G. Leuchs

Zentrum für Moderne Optik an der Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstraße 7/B2, D-91058 Erlangen, Germany

(Received 14 November 2001; published 8 April 2002)



| Time        | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ | $t_4$ | ... | $t_k$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| Alice       | AQ    | PQ    | PQ    | AQ    | ... | PQ    |
| Bob         | AQ    | AQ    | PQ    | PQ    | ... | PQ    |
| Correlation | Yes   | No    | Yes   | No    | ... | Yes   |
| Key         | 1     | ...   | 0     | ...   | ... | 0     |

# Conclusão

- o Demonstramos o OPO como uma fonte de feixes *EMARANHADOS, INTENSOS, e de CORES DISTINTAS !*
- o Previsto desde 1987!
- o Consequências:
  - Criptografia em redes de fibra ótica.
  - Teleportação de estados quânticos entre diferentes regiões do espectro.
  - Problemas abertos em Ótica Quântica e Não-Linear!

Emaranhamento de três corpos!

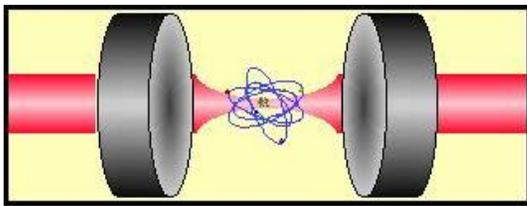
## Conclusão

## Informação Quântica

- ✓ Manipulação dos estados quânticos do campo eletromagnético.
- ✓ Aprisionamento de átomos pelo campo EM, controle do estado vibracional dos átomos nas armadilhas.
- ✓ Controle do estado atômico por campo EM. Emaranhamento átomo-campo.
- ✓ Testes fundamentais em Mecânica Quântica:  
“gedankenexperiment” → laboratório!
- ✓ Aplicações em Computação e Criptografia Quânticas.

## **Para Saber Mais:**

- ❑ O Livro dos Códigos (The Code Book); Simon Singh.
- ❑ Quantum Information and Quantum Computation; Nielsen and Chuang
- ❑ Quantum Cryptography, N. Gisin, R. W. Tittel, H. Zbinden (Rev. Mod. Phys, **74**, 145 (2002)).
- ❑ SSH Communications Security  
(<http://www.ssh.com/support/cryptography/introduction/>)
- ❑ Seminários do Convite à Física (<http://fma.if.usp.br/convite/>)
  - Paulo Teotônio (Computação);
  - Luis Davidovich (Descoerência);
  - Paulo Nussenzeig (EPR + Criptografia).



# Laboratório de Manipulação Coerente de Átomos e Luz

<http://axpfep1.if.usp.br/~lmcsl>

Paulo A. Nussenzveig – MS5

Marcelo Martinelli – MS3

Paulo Valente – Pos-Doc

Alessandro de Sousa Villar – Dr

Katiúscia Nadyne Cassemiro – Dr

Hélio Zhang He – MSc

Clodoaldo José da Silva - IC

Márcio Lopes - IC

Fábio Moreira da Silva – IC

Vitor Manfrinato - IC

Douglas Canducci – IC

José Gabriel Aguirre Gómez → Un. de Concepción

Carlos Leonardo Garrido Alzar → Un. Paris-Nord

Luciano Soares da Cruz → Unicamp

Daniel Felinto → Caltech

Antônio Z. Khoury, Kaled Dechoum (IF - UFF)

Arturo Lezama (Universidad de la República, Uruguai)

M. Carolina Nemes, Carlos H. Monken,

Sebastião de Pádua, Marcelo França (DF - UFMG)

Flávio Caldas da Cruz, Luis de Araújo (IFGW - UNICAMP)

Maria Aparecida G. Martinez (Mackenzie)

Paulo H. Souto Ribeiro (IF - UFRJ)

Sandra Sampaio Vianna (DF - UFPE)

Lab. Kastler-Brossel - UPMC- Paris VI

Inst. of Optics – Un. Erlangen – Max Planck Research Group

ICFO - Institut de Ciències Fotòniques

Information Physics Group - Un. of New Mexico

# Com a valio\$ a contribuição...



Projetos de auxílio individual

05/13587-0 (MM) e 04/07167-9 (PN) + bolsas



Institutos do Milênio Informação Quântica  
2001-2005 e 2006-2008



PADCT



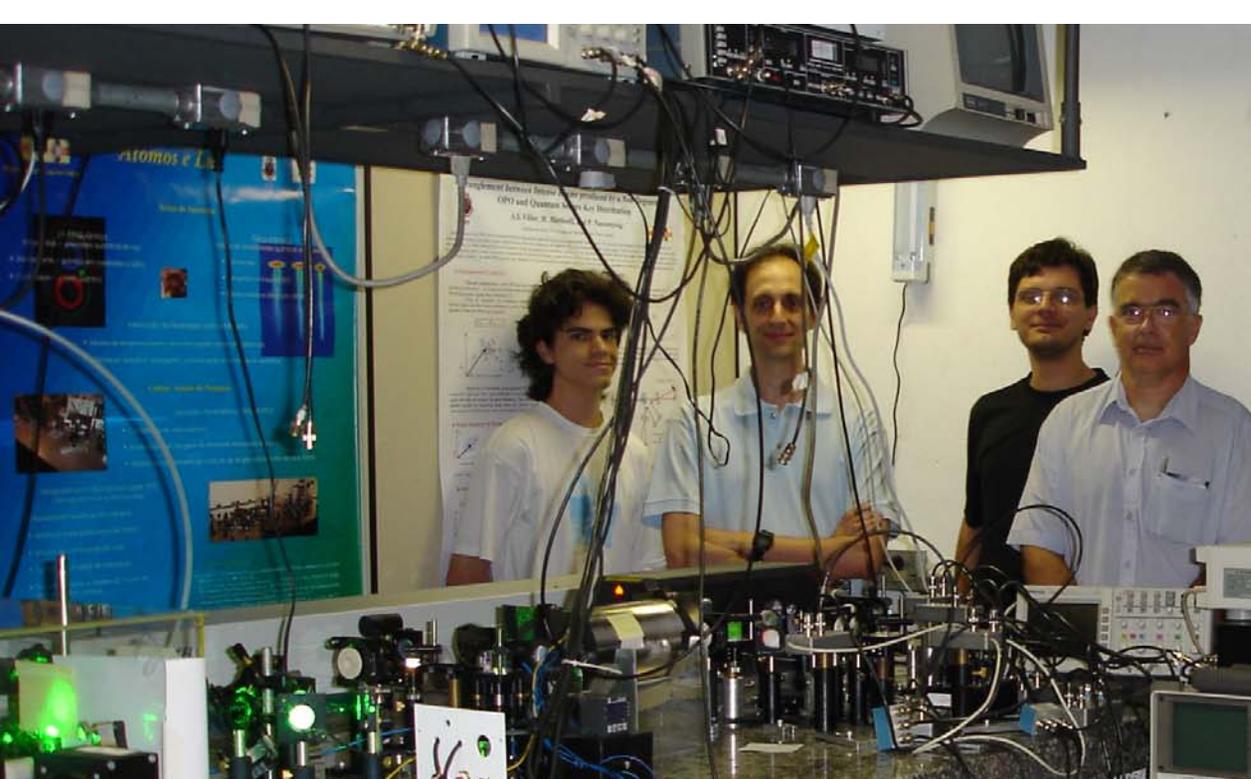
Capes-Cofecub (2003-2005)  
PROCAD



**Universidade de São Paulo**  
**Pró-Reitoria de Pesquisa**

R. da Reitoria, 109 - Sala 10 - 05508-900-Cid.Universitária - SP  
Tel. (55) (11) 3091-3548/Fax: 3816-7831 - prp@usp.br





**Aguardamos**  
**sua visita!**