Technologies quantiques émergentes

Pascale Senellart

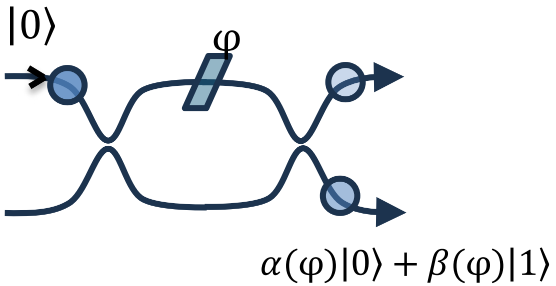
2 février 2026

Processeurs quantiques photoniques

Calcul quantique optique : deux approches

Encoder l’information

Sur des photons uniques



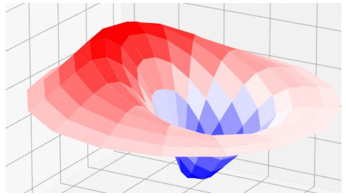
PsiQuantum

QUIX QUANTUM

ORCA Computing

QUANDELA

Sur les composantes du champ



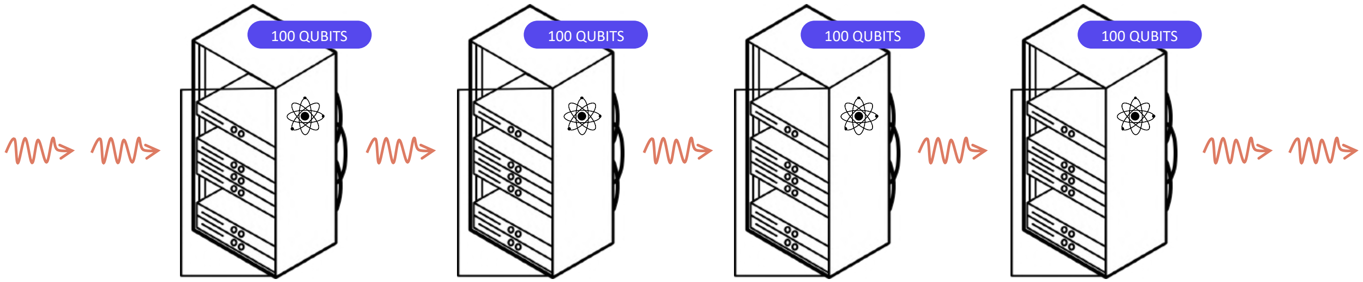
XANADU

OptQC

Même défis fondamentaux

Solutions technologiques différentes

Atouts et défis du calcul quantique optique



Atouts

- Mise en réseau de processeurs
- Compatible industrialisation semiconducteurs
- Horloge de fonctionnement élevée
- Décohérence limitée ?

Défis

- Portes logiques (non-linéaires)
- Minimisation des pertes extrêmes (~7%)

À clarifier

- Cryogénie ?

Sources de photons uniques

Ingrédients d'un ordinateur quantique photonique

Calcul quantique "linéaire"

Particules indiscernables

Premiers processeurs photoniques et applications

Calcul quantique base sur la mesure

Génération d'états intriqués à plusieurs photons

Séminaire Pr. Gerhard Rempe

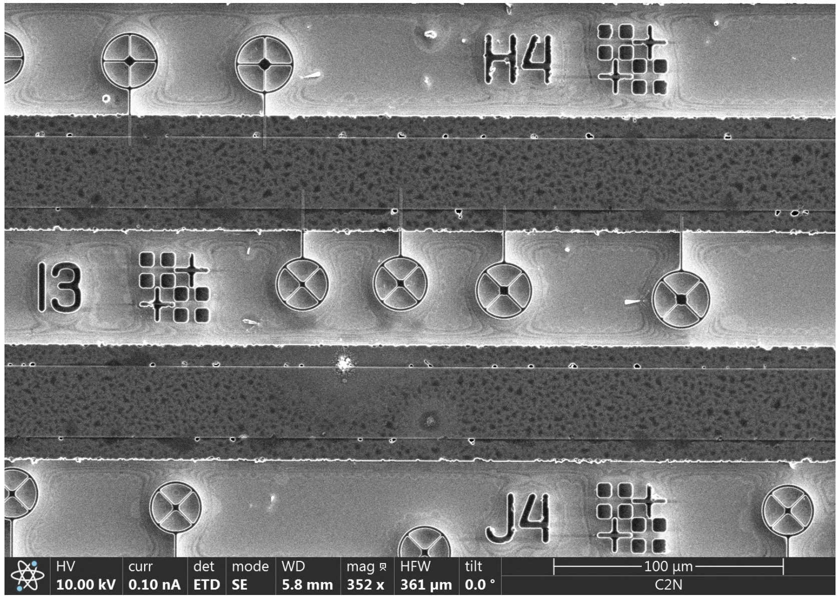
Ingrédients d'un ordinateur quantique photonique

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique

- Un système physique évolutif avec des qubits bien caractérisés
- Une capacité de mesure spécifique aux qubits
- La capacité d'initialiser l'état des qubits
- De longs temps de décohérence
- Un ensemble « universel » de portes quantiques

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Un système physique évolutif avec des qubits bien caractérisés



40 millions de photons/seconde

Composants semiconducteurs

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Une capacité de mesure spécifique aux qubits

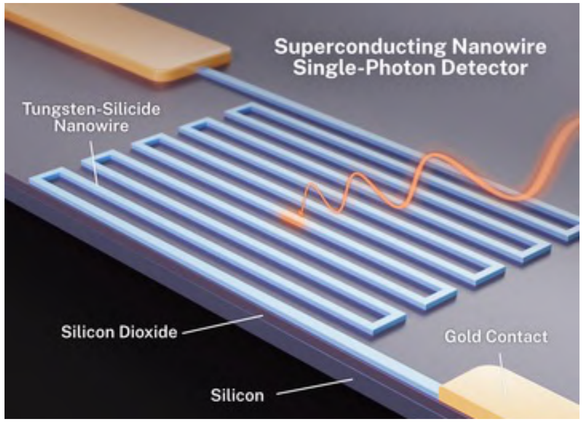
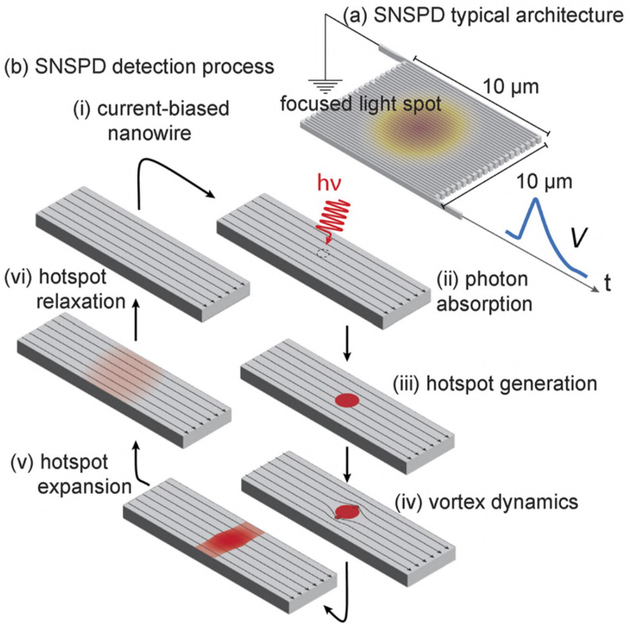


image de NIST

$$T \sim 2 - 4\ K$$

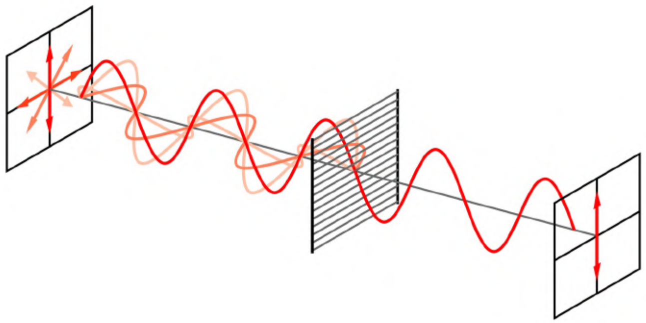


APL Photon. 10, 040901 (2025)

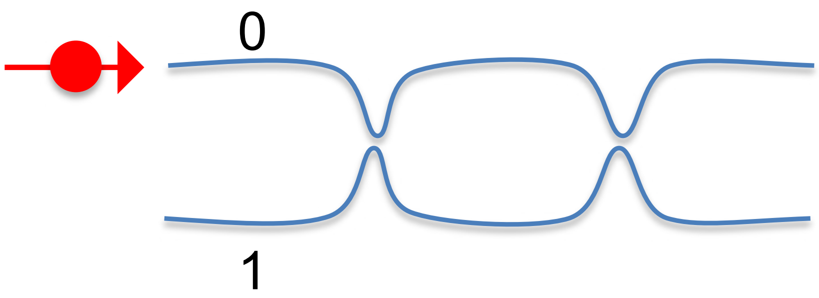
Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- La capacité d'initialiser l'état des qubits

Polarisation

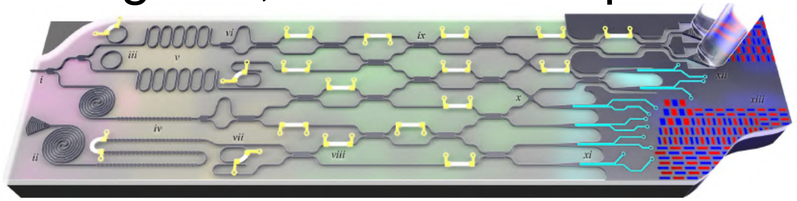


Chemin



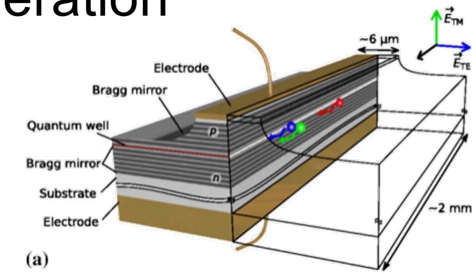
Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- De longs temps de décohérence
  - Pas de décohérence dans le vide (particule sans charge ni masse)
  - Manipulation dans des puces photoniques intégrées, fibres : absorption

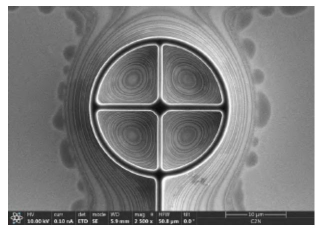


IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 22(6), 2016

  - Pureté quantique au niveau de la génération



Phys. Rev. Lett. 112, 183901 (2014)



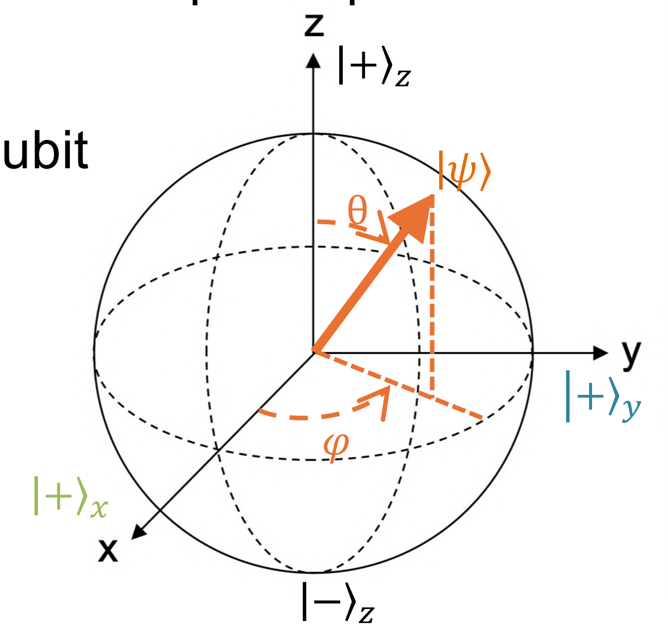
Nature Photonics 10, 340 (2016)

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique

- Un ensemble « universel » de portes quantiques

Définition : Un ensemble de portes logiques à 1 et plusieurs qubits permettant de réaliser n'importe quelle transformation d'un état à n qubits

Exemple : pour 1 qubit

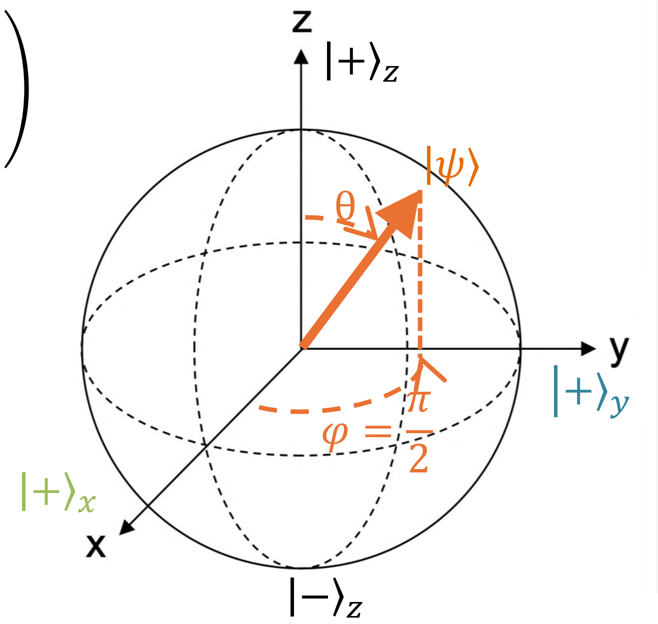


Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique

- Un ensemble « universel » pour 1 qubit

Rotation de l'état selon x : $R_x(\theta) = e^{-\frac{i\theta}{2}\hat{\sigma}_x} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\theta}{2}) & -i\sin(\frac{\theta}{2}) \\ -i\sin(\frac{\theta}{2}) & \cos(\frac{\theta}{2}) \end{pmatrix}$

Rotation dans le plan zy d'angle θ



Rotation arbitraire selon $\vec{n}$: $R_{\vec{n}}(\theta) = e^{-\frac{i\theta}{2}\vec{n}.\hat{\vec{\sigma}}}$

Exemple de jeu universelle de portes à 1 qbits - SU(2)

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Un ensemble « universel » pour N qubits

Manipulation arbitraire d'états à N qubits

Exemple de jeu universelle de portes à N qbits

- Jeu universel de porte à 1 qubit + une porte à 2 qubits qui crée de l'intrication
- Exemple:

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

+ porte CNOT

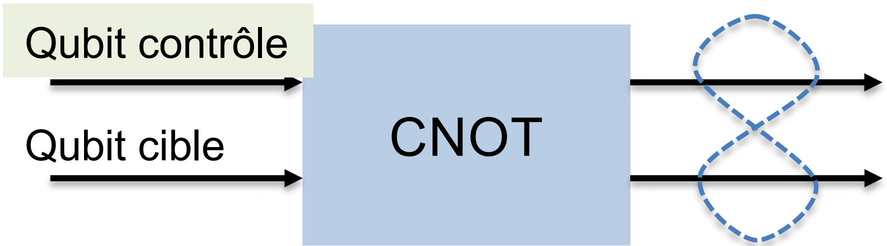
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Un ensemble « universel » pour N qubits : SU(2) + CNOT

Porte CNOT

$$\begin{array}{c|c} & |00\rangle \quad |01\rangle \quad |10\rangle \quad |11\rangle \\ \begin{array}{c} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$



$$|\psi_{\text{in}}\rangle = \boxed{|+\rangle} \otimes |0\rangle$$

$$|+\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\psi_{\text{out}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Etat de Bell

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

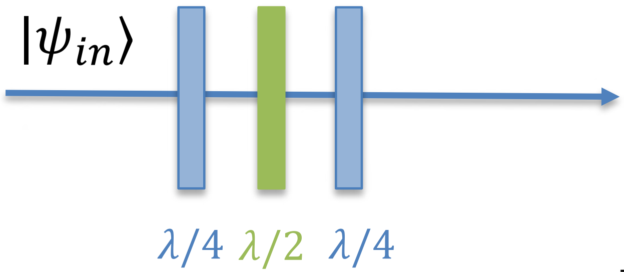
- Porte un 1 qubit photonique

Polarisation

$$U_{\lambda/2}(\theta) = e^{-\frac{i\pi}{2}\vec{n}.\vec{\sigma}}$$

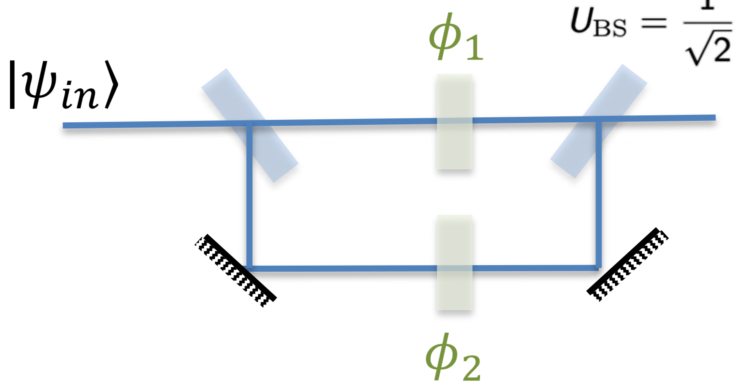
$$U_{\lambda/4}(\theta) = e^{-\frac{i\pi}{4}\vec{n}.\vec{\sigma}}$$

$$\vec{n}(\theta) = (\sin 2\theta,\ 0,\ \cos 2\theta)$$



Chemin

$$U_{\mathrm{BS}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$$



$$U_\phi = \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{pmatrix}$$

$$U = U_{\mathrm{BS}}\, U_\phi\, U_{\mathrm{BS}} \in SU(2)$$

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

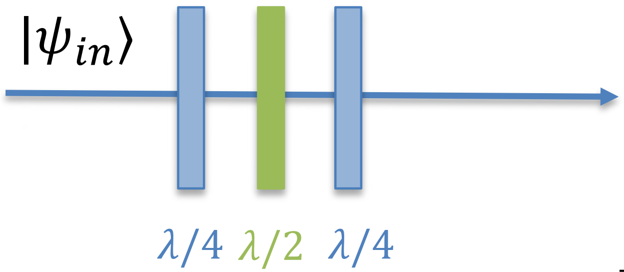
- Porte un 1 qubit photonique

Polarisation

$$U_{\lambda/2}(\theta) = e^{-\frac{i\pi}{2}\vec{n}.\vec{\sigma}}$$

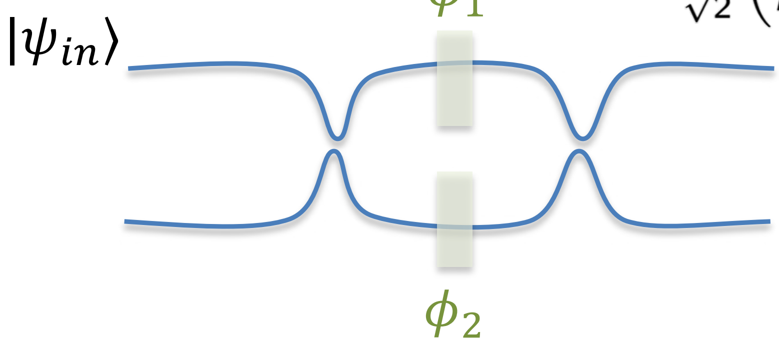
$$U_{\lambda/4}(\theta) = e^{-\frac{i\pi}{4}\vec{n}.\vec{\sigma}}$$

$$\vec{n}(\theta) = (\sin 2\theta,\ 0,\ \cos 2\theta)$$



Chemin

$$U_{\rm BS} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$$



$$U_\phi = \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{pmatrix}$$

$$U = U_{\rm BS}\, U_\phi\, U_{\rm BS} \in SU(2)$$

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Porte à deux qubits ⟺ Intriquer deux photons ?

A scheme for efficient quantum computation with linear optics

E. Knill*, R. Laflamme* & G. J. Milburn†

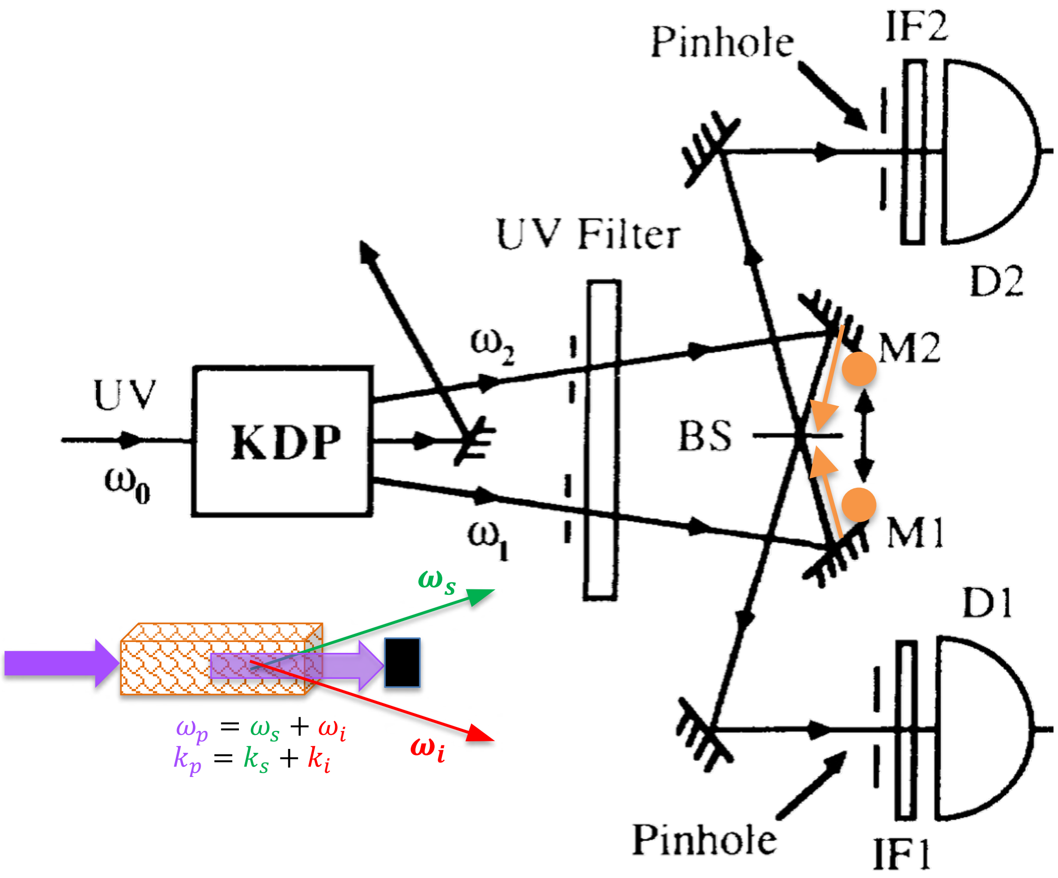
** Los Alamos National Laboratory, MS B265, Los Alamos, New Mexico 87545, USA*
† Centre for Quantum Computer Technology, University of Queensland, St. Lucia, Australia

Nature 409, 46–52 (2001)

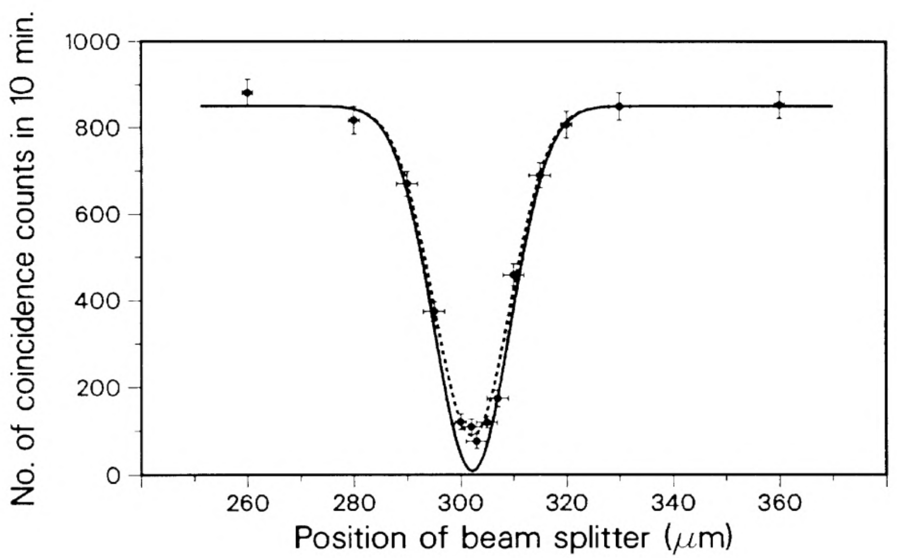
"Here we show that efficient quantum computation is possible using only beam splitters, phase shifters, single photon sources and photo-detectors. Our methods exploit feedback from photo-detectors and are robust against errors from photon loss and detector inefficiency. The basic elements are accessible to experimental investigation with current technology"

Effet Hong-Ou-Mandel

Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)

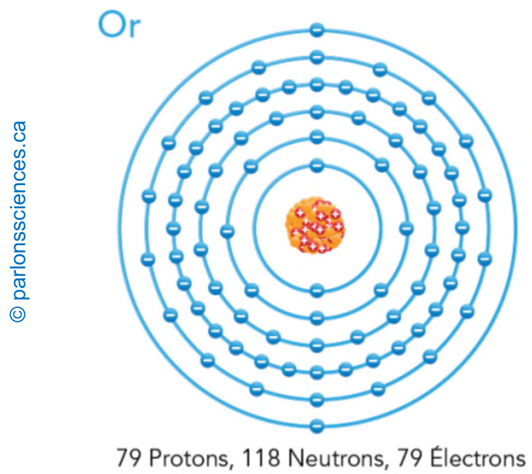


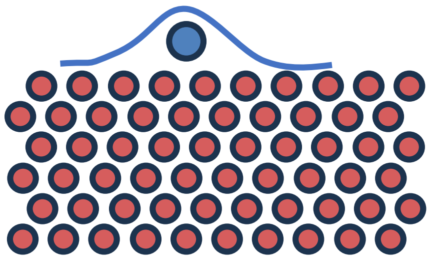
Interférence quantique utilisée pour intriquer les photons

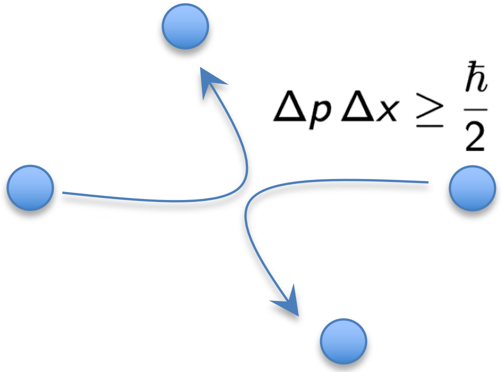


COLLÈGE DE FRANCE 1530

Rappel : indiscernabilité des particules







Postulat : état à deux particules

$|1:a,\ 2:b\rangle$ $\quad$ $\hat{P}_{12}\,|1:a,\ 2:b\rangle = |1:b,\ 2:a\rangle$ $\quad$ $[\hat{H},\hat{P}_{12}] = 0$

$\hat{P}_{12}^2 = \mathbb{I} \Rightarrow \hat{P}_{12}|\psi\rangle = \pm|\psi\rangle$

- **Bosons** : $\hat{P}_{12}|\psi\rangle = +|\psi\rangle$
- **Fermions** : $\hat{P}_{12}|\psi\rangle = -|\psi\rangle$

Rappel : indiscernabilité des particules

Etat à deux particules (1 et 2) dans deux états (a et b)

1 2

$$|1{:}\,H, 2{:}\,V\rangle \equiv |a\,,b\,\rangle$$

Si discernables :

1 2

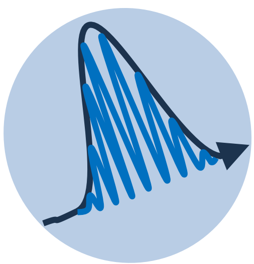
quatre états possibles

$$|a\,,a\,\rangle$$
$$|a\,,b\,\rangle$$
$$|b\,,a\,\rangle$$
$$|b\,,b\,\rangle$$

Cas indiscernables

1 2

Photon



Boson

3 états possibles

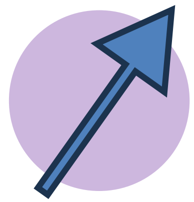
$$|H\,,H\,\rangle$$
$$\frac{|H\,,V\,\rangle + |V\,,H\,\rangle}{\sqrt{2}}$$
$$|V\,,V\,\rangle$$

Fermion

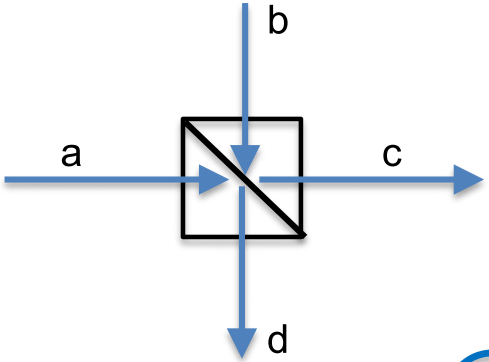
1 seul état possible

$$\frac{|+\,,-\,\rangle - |-\,,+\,\rangle}{\sqrt{2}}$$

Spin 1/2

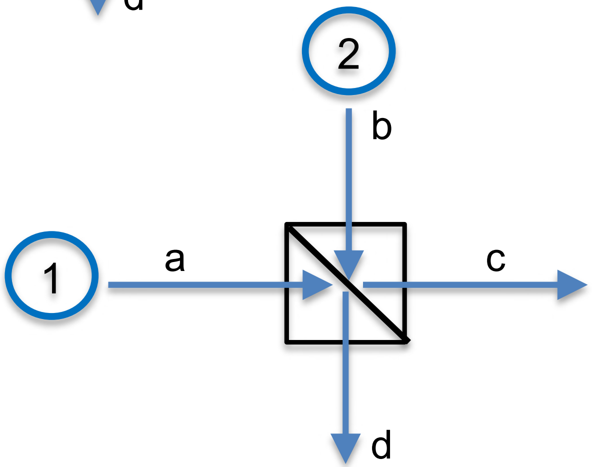


Interférence de deux photons indiscernables : coalescence



$$|\phi_a\rangle \longrightarrow \frac{|\phi_c\rangle + i|\phi_d\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\phi_b\rangle \longrightarrow \frac{i|\phi_c\rangle + |\phi_d\rangle}{\sqrt{2}}$$

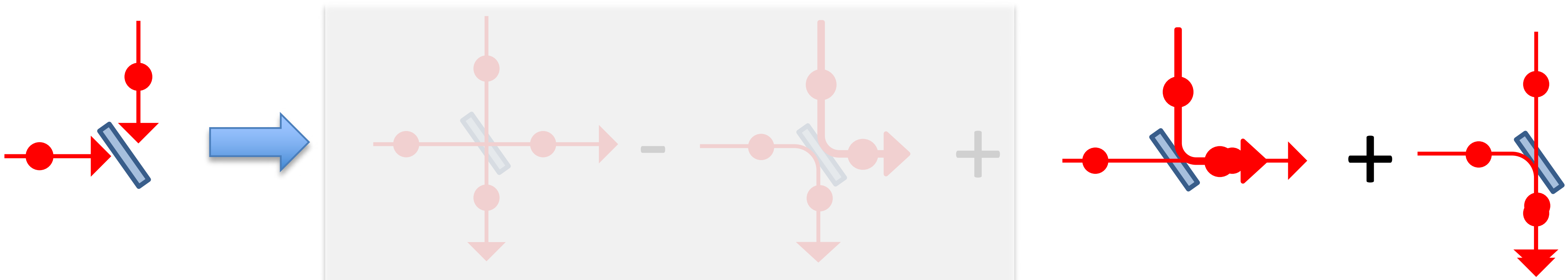


Etat de sortie

$$\longrightarrow i\frac{|\phi_c,\phi_c\rangle + |\phi_d,\phi_d\rangle}{\sqrt{2}}$$

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Interférence de deux photons indiscernables : coalescence

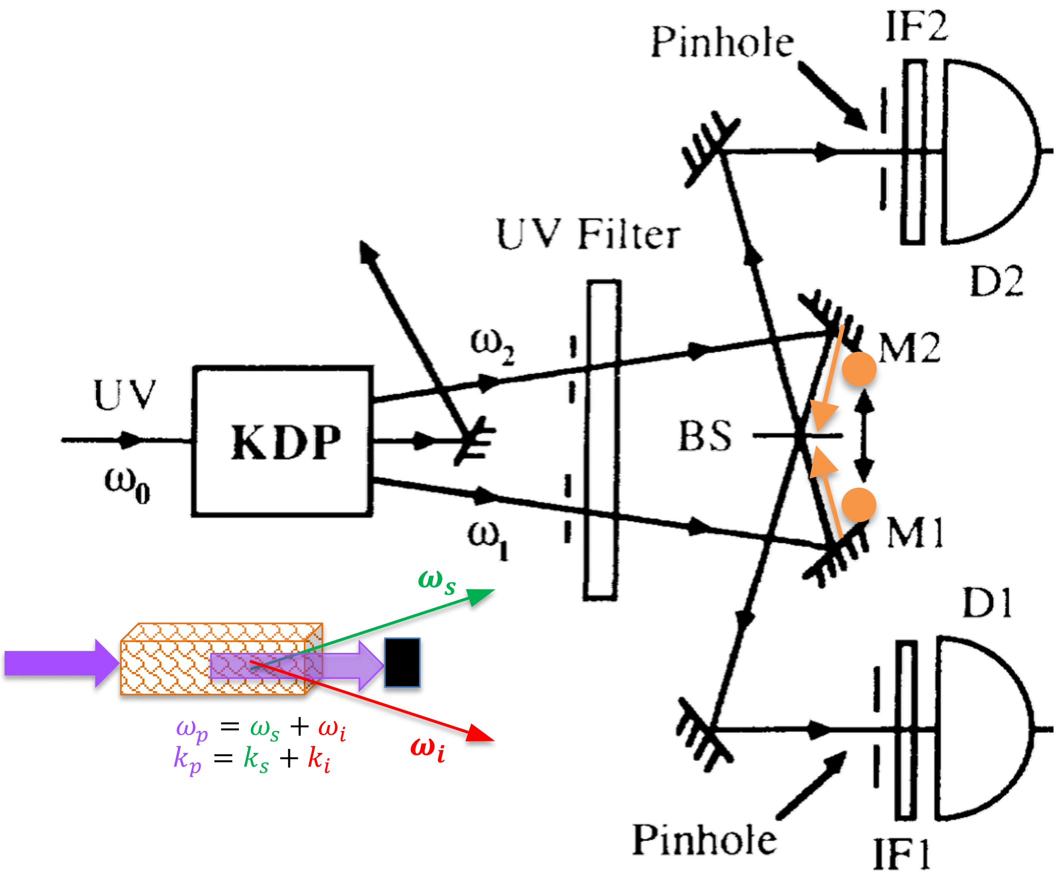


$$i\,\frac{|\phi_c,\phi_c\rangle + |\phi_d,\phi_d\rangle}{\sqrt{2}}$$

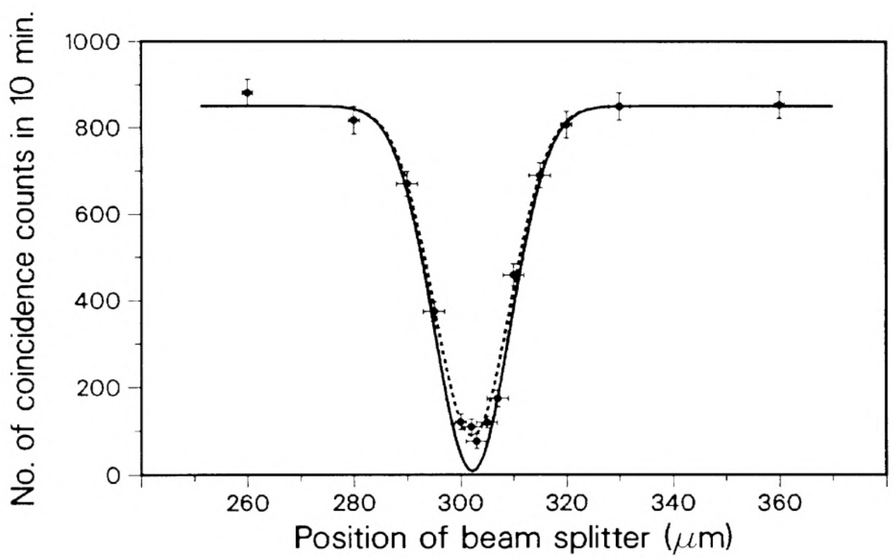
Deux photons intriqués en chemin

Effet Hong-Ou-Mandel

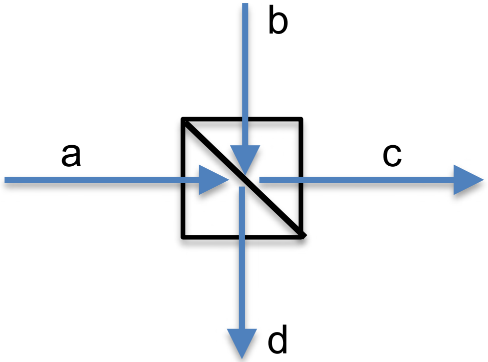
Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)



Interférence quantique utilisée pour intriquer les photons



Effet HOM : description en seconde quantification



$$\begin{pmatrix} \hat{a}_c^\dagger \\ \hat{a}_d^\dagger \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_a^\dagger \\ \hat{a}_b^\dagger \end{pmatrix}$$

$$\hat{a}_a^\dagger = \frac{\hat{a}_c^\dagger - i\hat{a}_d^\dagger}{\sqrt{2}}, \qquad \hat{a}_b^\dagger = \frac{-i\hat{a}_c^\dagger + \hat{a}_d^\dagger}{\sqrt{2}}.$$

$$|\psi_{\mathrm{in}}\rangle = \hat{a}_a^\dagger\, \hat{a}_b^\dagger\, |0\rangle \Rightarrow |\psi_{\mathrm{out}}\rangle = \frac{-i}{2}\Big((\hat{a}_c^\dagger)^2 + (\hat{a}_d^\dagger)^2 \Big)\, |0\rangle = \frac{-i}{\sqrt{2}}\Big(\,|2,0\rangle + |0,2\rangle \,\Big)$$

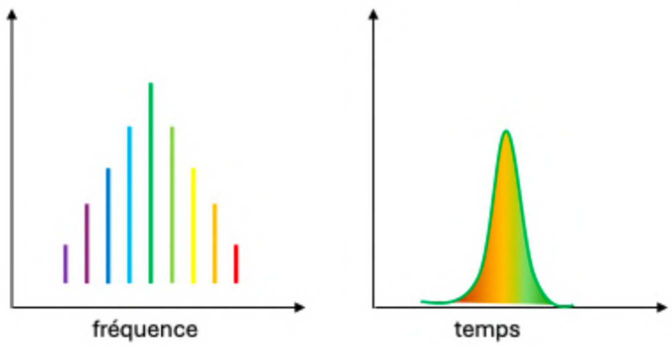
Générer des photons indiscernables

Impulsion à un photon

$$|1\rangle = \sum_{\ell} C_\ell \, |0, \ldots, 0, n_\ell = 1, 0, \ldots.\rangle$$

avec

$$\sum_{\ell} |C_\ell|^2 = 1$$

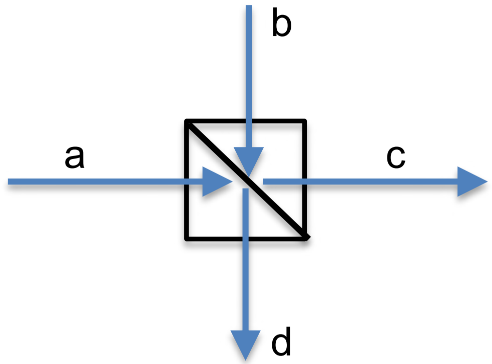


$$\hat{b}^+ = \textstyle\sum_\ell C_\ell \hat{a}_\ell^+$$

$$[\hat{b}, \hat{b}^+] = \textstyle\sum_\ell |C_\ell|^2 = 1$$

$$|1\rangle = \hat{b}^+ |0\rangle$$

$$|\psi_{in}\rangle = \hat{b}_a^+ \hat{b}_b^+ |0\rangle$$



Indiscernables : Photons dans un état pur en fréquence

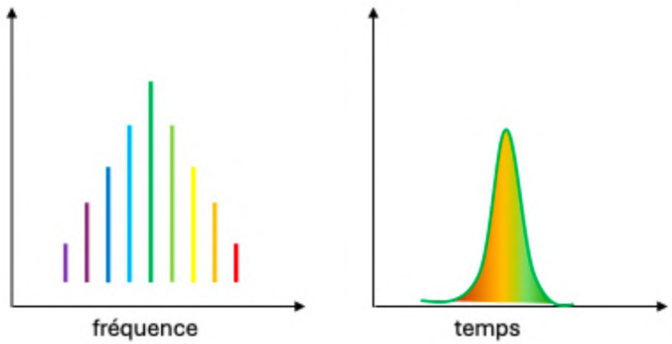
Générer des photons indiscernables

Impulsion à un photon

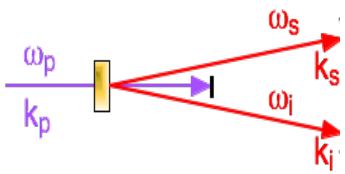
$$|1\rangle = \sum_{\ell} C_\ell \, |0, ..., 0, n_\ell = 1, 0, ...\rangle$$

avec

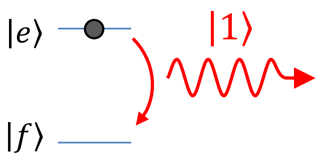
$$\sum_{\ell} |C_\ell|^2 = 1$$



Indiscernables : Photons dans un état pur en fréquence



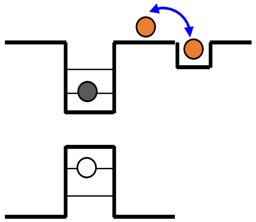
Pas de corrélations entre les deux photons

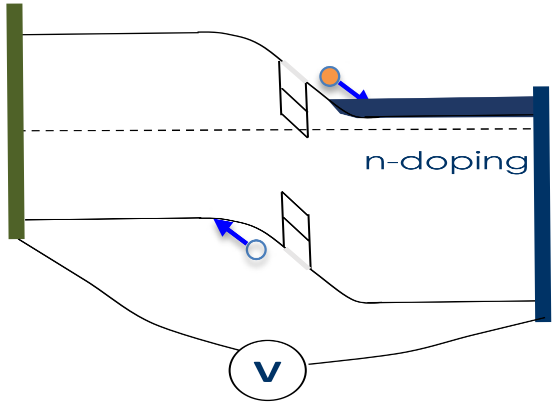


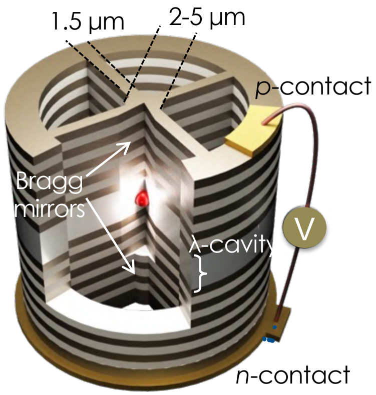
Pas de décohérence pendant l'émission

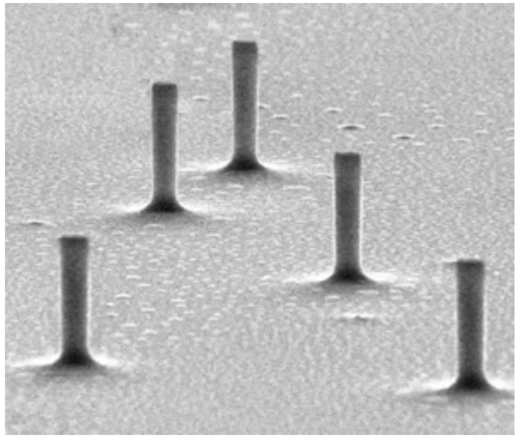
Générer des photons indiscernables

Réduction du bruit électrique

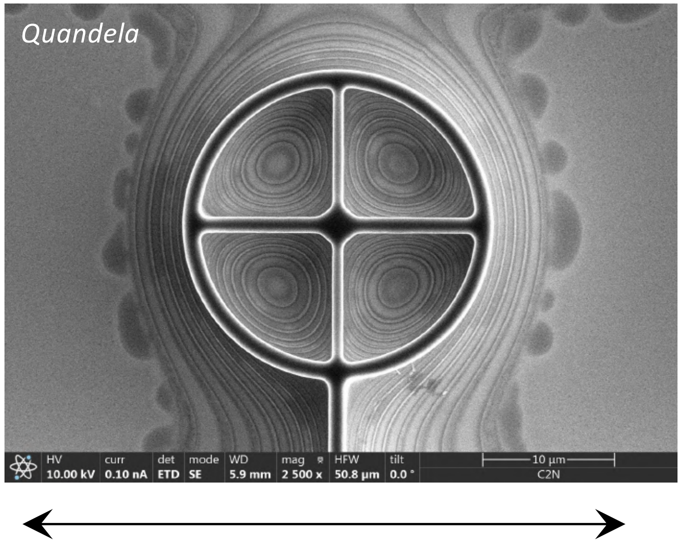








Nature Communications 4, 1425 (2013)



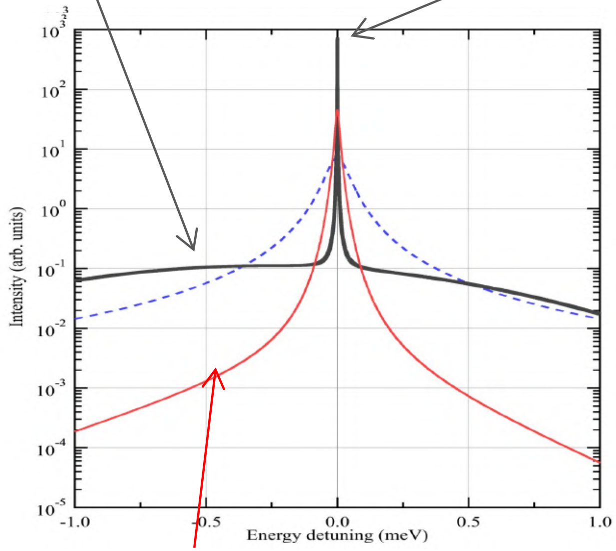
40 µm

Générer des photons indiscernables

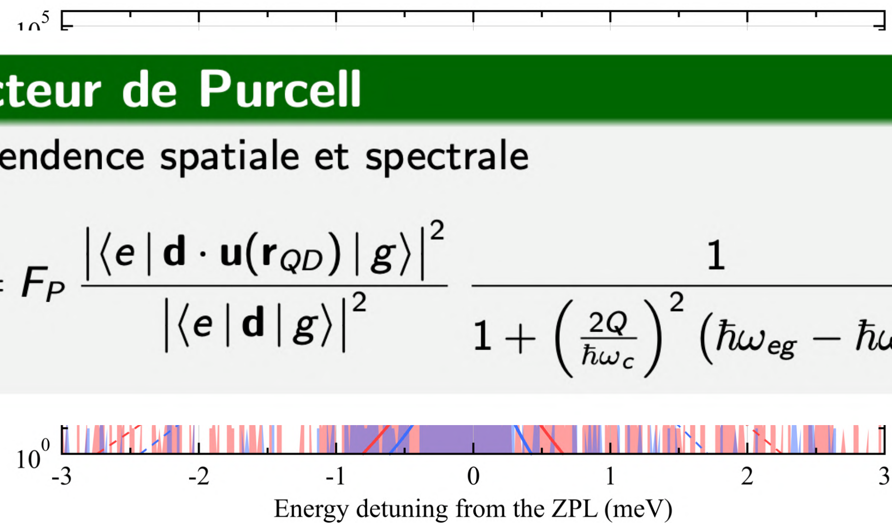
Réduction l'influence des vibrations

Emission d'un photon ± 1 phonon

Emission d'un photon



Réduction de l'interaction avec les phonons



Facteur de Purcell

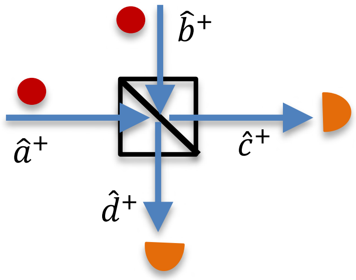
Dépendence spatiale et spectrale

$$F = F_P \frac{|\langle e \,|\, \mathbf{d} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r}_{QD}) \,|\, g \rangle|^2}{|\langle e \,|\, \mathbf{d} \,|\, g \rangle|^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{2Q}{\hbar\omega_c}\right)^2 (\hbar\omega_{eg} - \hbar\omega_c)^2}$$

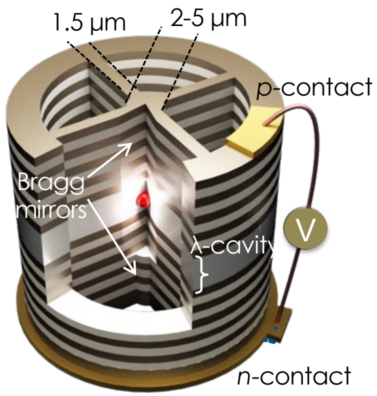
Phys. Rev. Lett. 118, 253602 (2017)

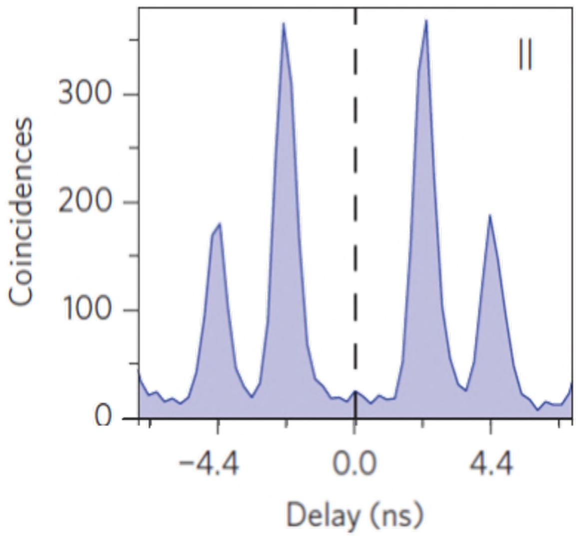
Photons indiscernables : mise en évidence

Interférence de Hong Ou Mandel

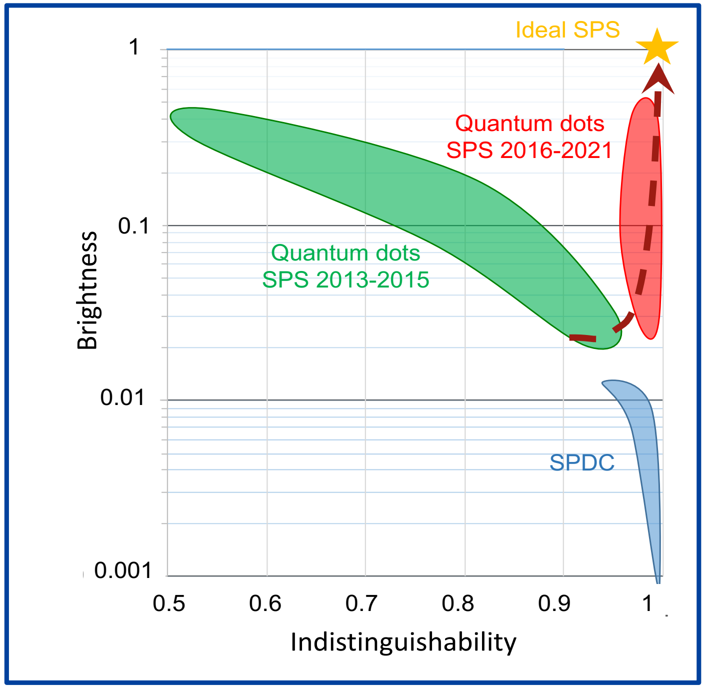


$$|\psi_{\text{out}}\rangle = \frac{-i}{\sqrt{2}}\left(|2,0\rangle + |0,2\rangle\right)$$





Nature Photonics 10, 340-345, (2016)



Photoniques 107 (2021) 40-43

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

- Porte à deux qubits ⟺ Intriquer deux photons ?

A scheme for efficient quantum computation with linear optics

E. Knill*, R. Laflamme* & G. J. Milburn†

** Los Alamos National Laboratory, MS B265, Los Alamos, New Mexico 87545, USA*
† Centre for Quantum Computer Technology, University of Queensland, St. Lucia, Australia

Nature 409, 46–52 (2001)

"Here we show that efficient quantum computation is possible using only beam splitters, phase shifters, single photon sources and photo-detectors. Our methods exploit feedback from photo-detectors and are robust against errors from photon loss and detector inefficiency. The basic elements are accessible to experimental investigation with current technology"

Critères de Di Vicenzo pour le calcul quantique photonique

COLLÈGE DE FRANCE 1530

A scheme for efficient quantum computation with linear optics

E. Knill*, R. Laflamme* & G. J. Milburn†

* *Los Alamos National Laboratory, MS B265, Los Alamos, New Mexico 87545, USA*
† *Centre for Quantum Computer Technology, University of Queensland, St. Lucia, Australia*

Nature 409, 46–52 (2001)

Porte CNOT

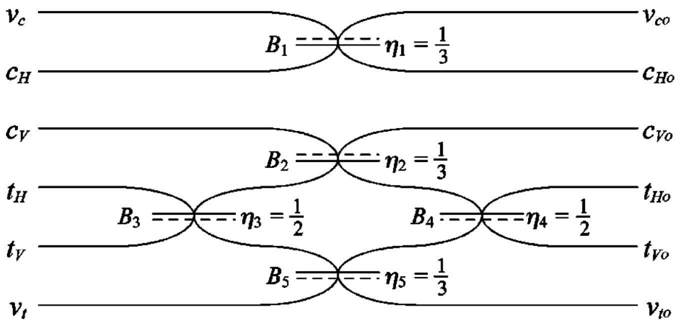


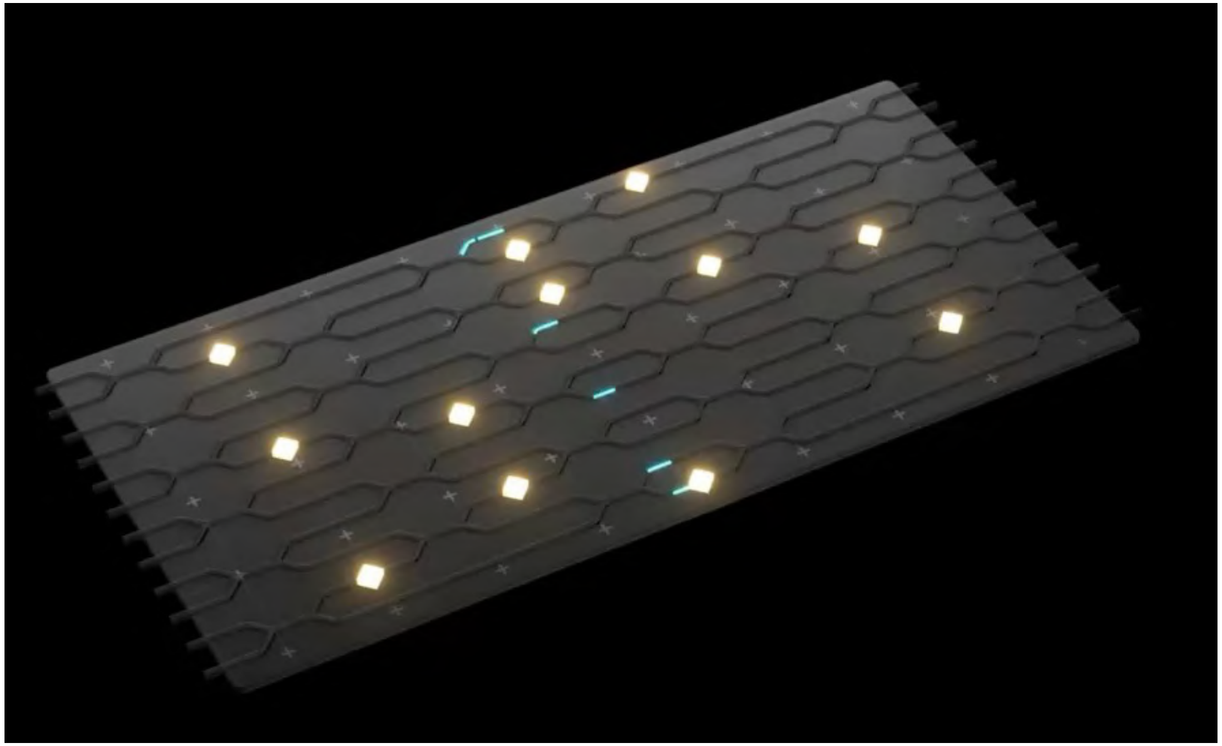
FIG. 1. Schematic of the coincidence controlled-NOT gate. Dashed line indicates the surface from which a sign change occurs upon reflection. The control modes are c_H and c_V. The target modes are t_H and t_V. The modes v_c and v_t are unoccupied ancillary modes.

Phys. Rev. A 65, 062324 (2002)

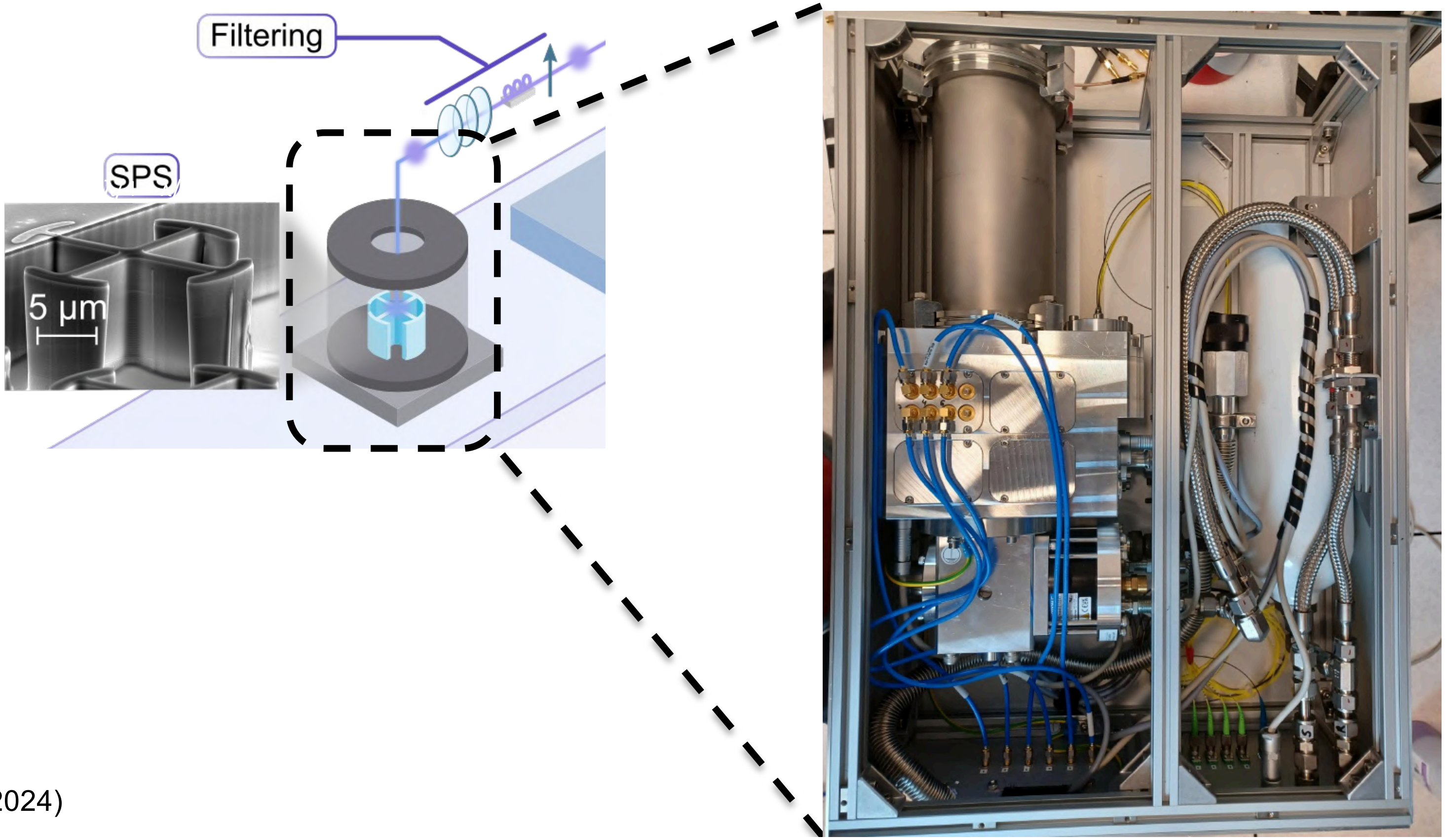
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Calcul quantique linéaire

Premières machines de calcul : architecture



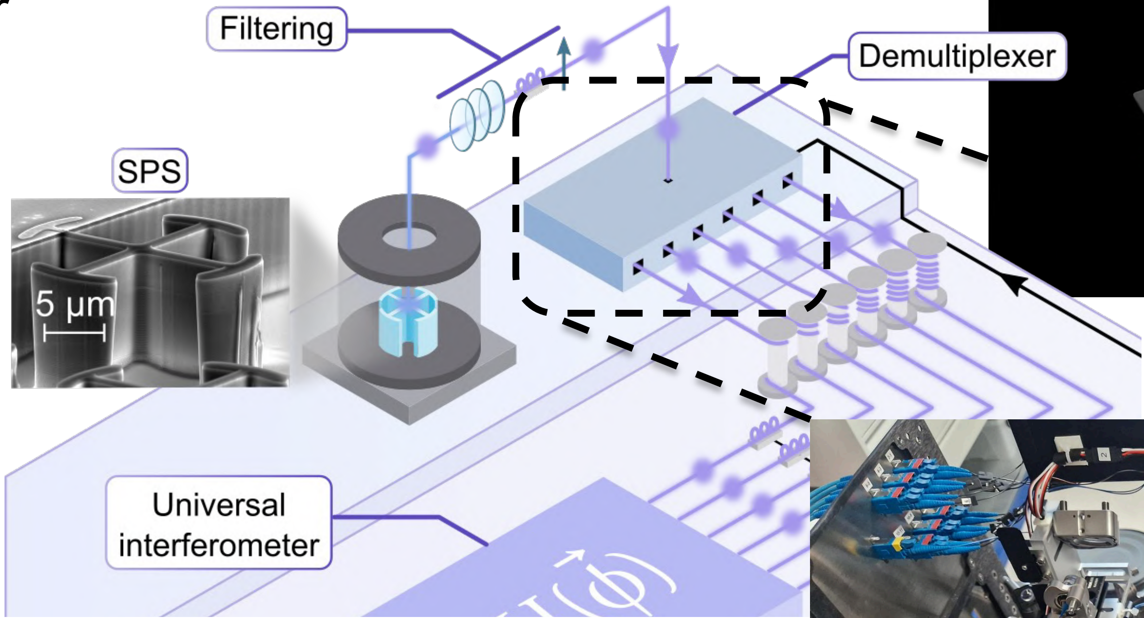
Source de photons uniques et détecteurs

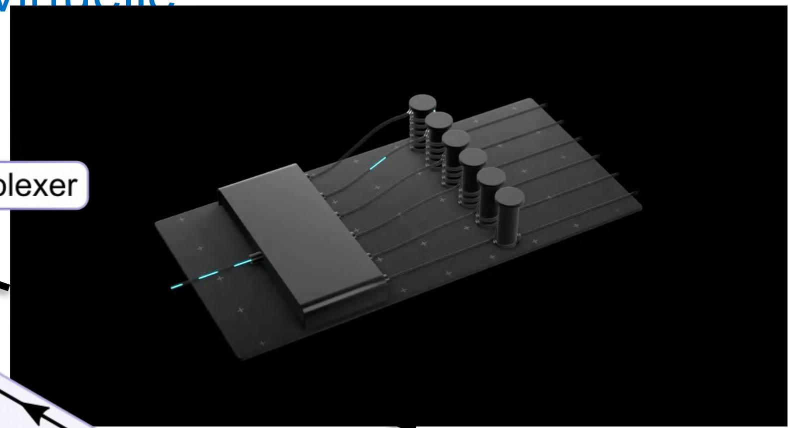


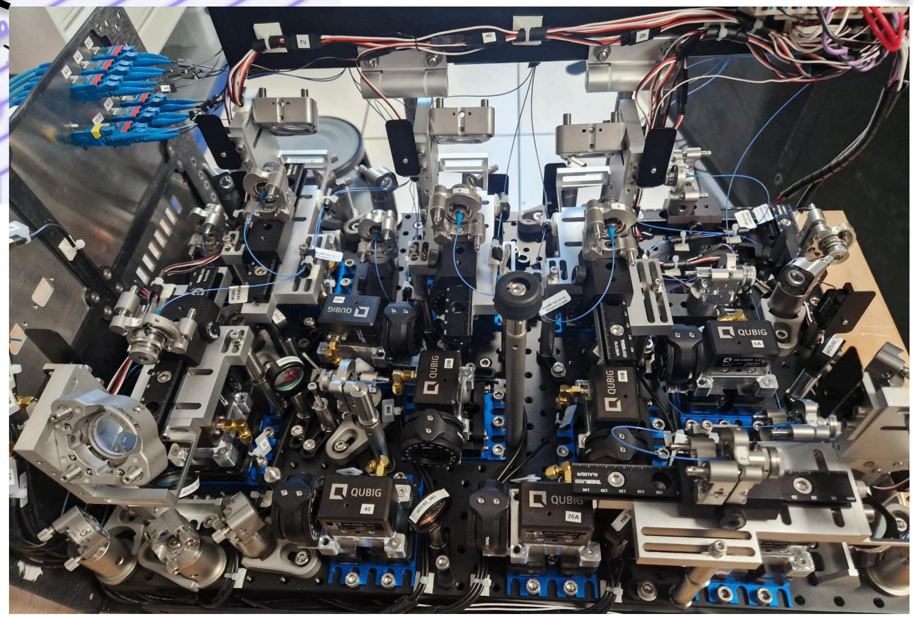
Nature Photonics 18, 603–609 (2024)

Premières machines de calcul : visite virtuelle

Démultiplexeur



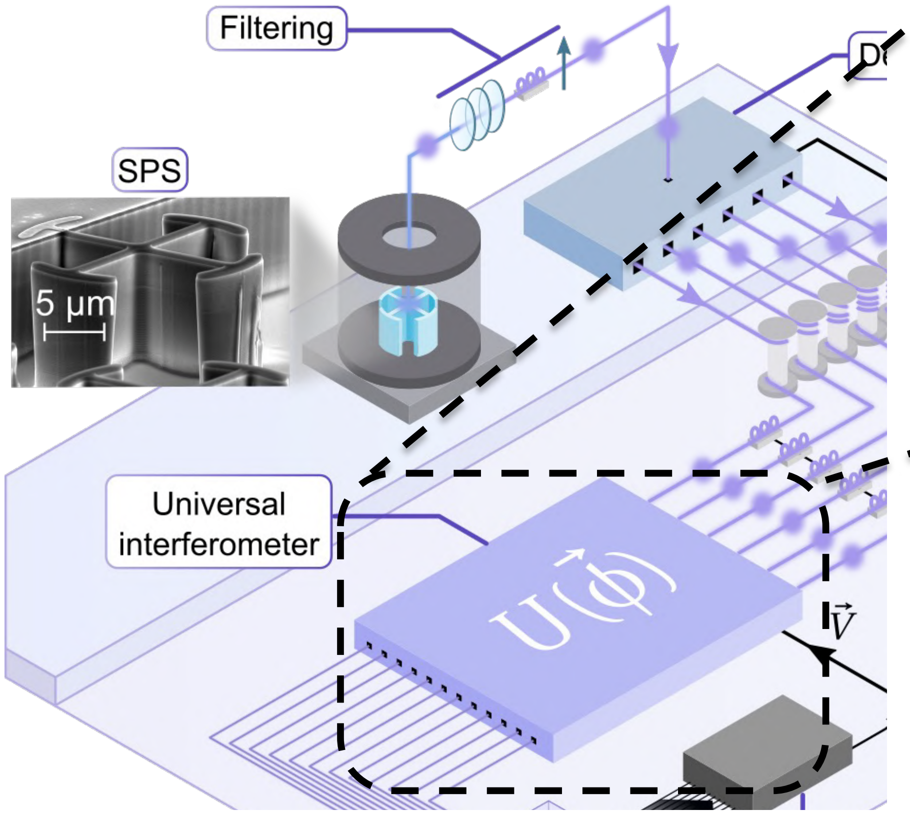


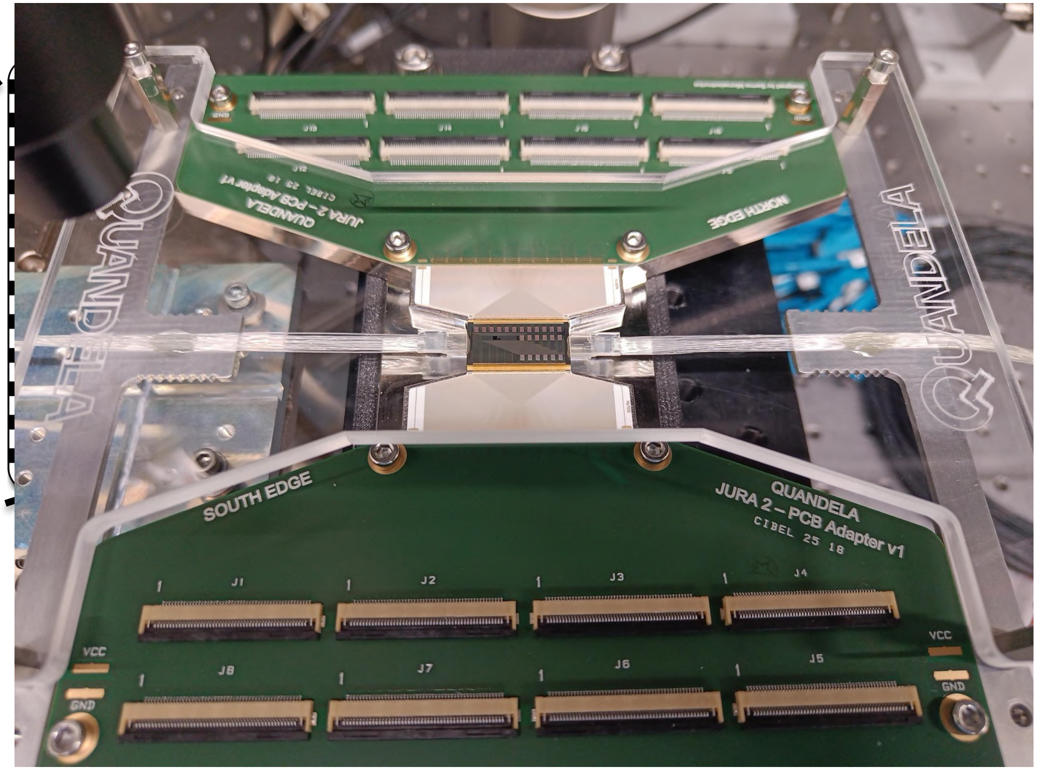


Nature Photonics 18, 603–609 (2024)

Premières machines de calcul : visite virtuelle

Circuit photonique intégré





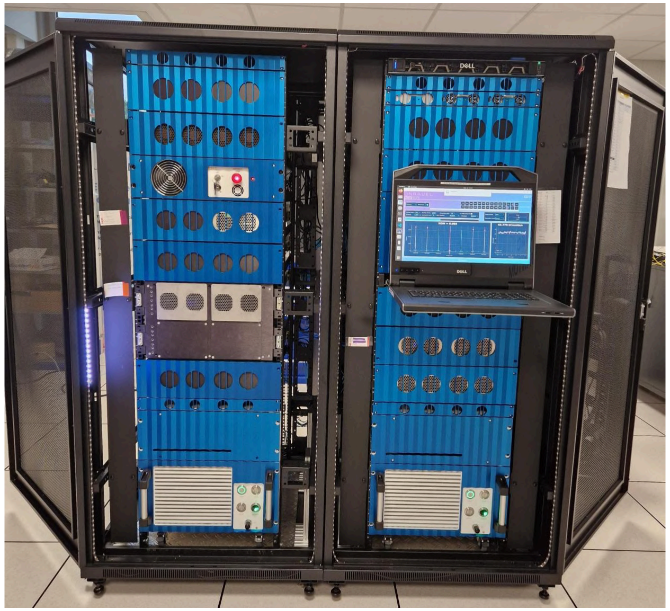
Nature Photonics 18, 603–609 (2024)

- interferometer 24x 24 reconfigurable

COLLÈGE DE FRANCE 1530

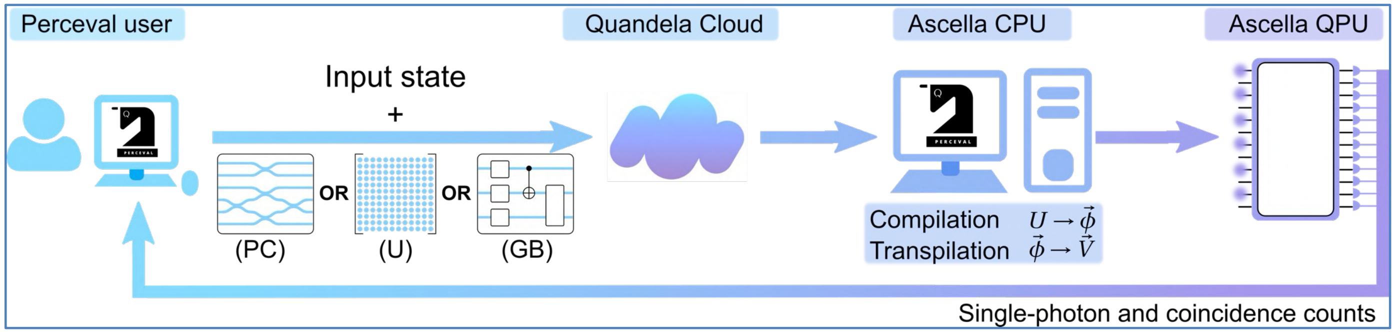
Premières machines de calcul : visite virtuelle

QUANDELA



```python
def computation(params):
    global current_loss
    global computation_count
    "compute the loss function of a given differential equati
    computation_count += 1
    f_theta_0 = 0  # boundary condition
    coefs = lambda_random  # coefficients of the M observable
    # initial condition with the two universal interferometer
    U_1 = pcvl.Matrix.random_unitary(m, params[:2 * m ** 2])
    U_2 = pcvl.Matrix.random_unitary(m, params[2 * m ** 2:])
```

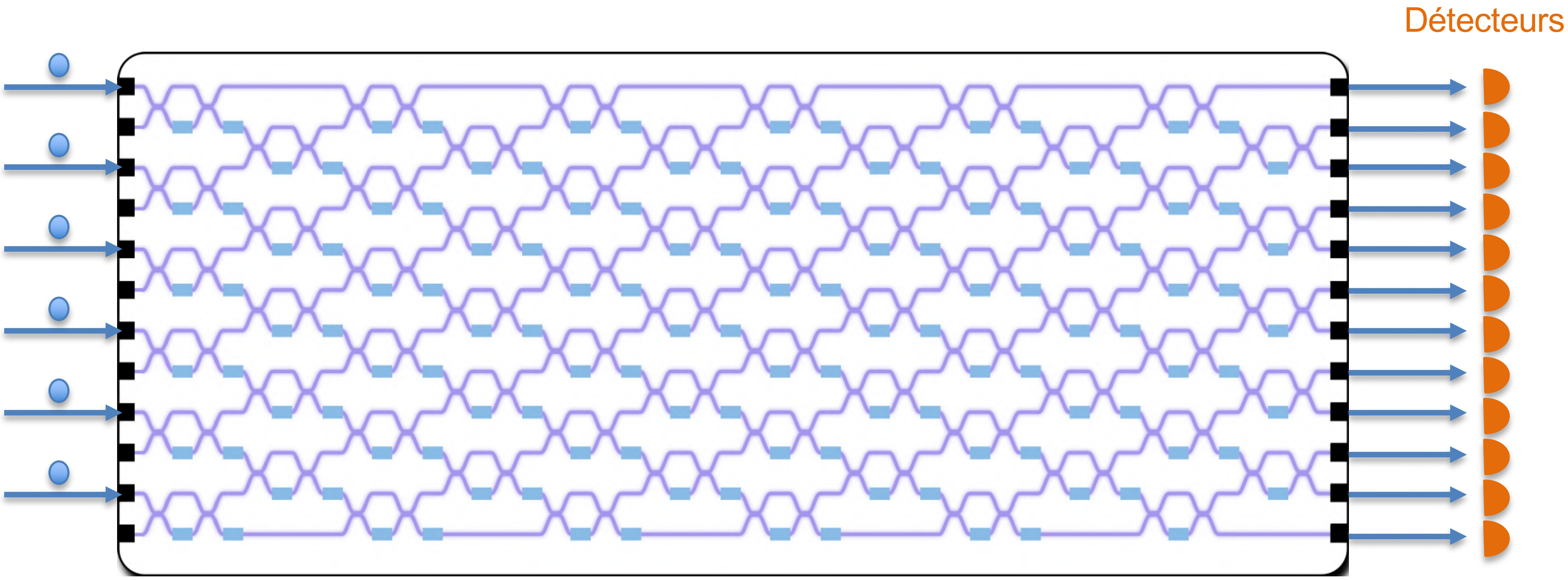
12 photons



Nature Photonics 18, 603–609 (2024)

COLLÈGE DE FRANCE 1530

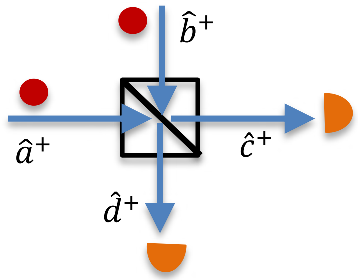
Premières machines de calcul : calcul linéaire simple



Interference quantique à N photons
Intrications multiparticules

S. Aaronson and A. Arkhipov,“The computational complexity of linear optics,” in Proc. 43rd Annu. ACM Symp. Theory of Comput., A. Press, Ed., pp. 333–342 (2011)

Premiers processeurs photoniques : échantillonnage de bosons



$$\begin{pmatrix}\hat{c}^+\\ \hat{d}^+\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & ir \\ ir & t\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\hat{a}^+\\ \hat{b}^+\end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix}\hat{a}^+\\ \hat{b}^+\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & -ir \\ -ir & t\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\hat{c}^+\\ \hat{d}^+\end{pmatrix}$$

$$\hat{a}^+\hat{b}^+ \to -irt\left((\hat{c}^+)^2 + (\hat{d}^+)^2\right) + (i^2r^2 + t^2)\hat{c}^+\hat{d}^+$$

Permanent d'une matrice

$$\text{perm}\begin{pmatrix} t & ir \\ ir & t\end{pmatrix} = i^2r^2 + t^2$$

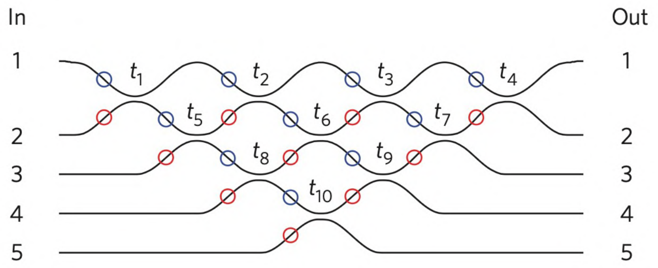
Probabilités des photons en sortie

Configurations possibles $\boxed{\mathcal{S}_{2,2} = \{(2,0),(1,1),(0,2)\}}$

$$P(1,1) = |\mathrm{Perm}(U)|^2$$

Premiers processeurs photoniques : échantillonnage de bosons

3 photons dans 5 modes

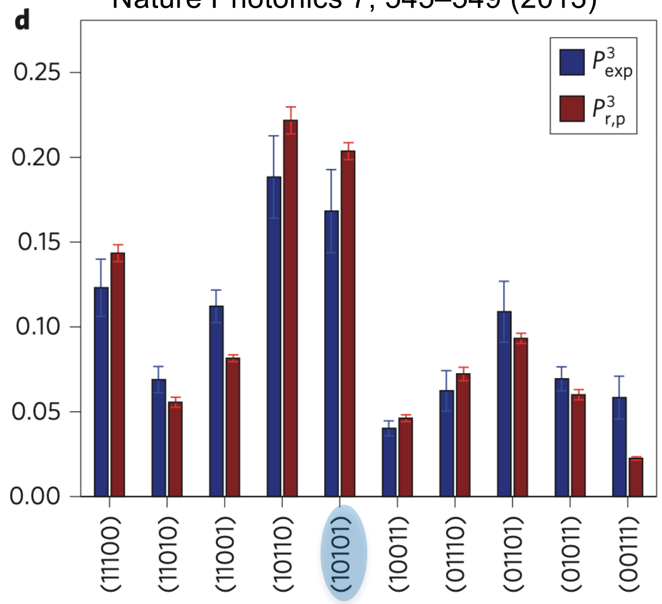


$$U = \begin{pmatrix} U_{1,1} & U_{1,2} & U_{1,3} & U_{1,4} & U_{1,5} \\ U_{2,1} & U_{2,2} & U_{2,3} & U_{2,4} & U_{2,5} \\ U_{3,1} & U_{3,2} & U_{3,3} & U_{3,4} & U_{3,5} \\ U_{4,1} & U_{4,2} & U_{4,3} & U_{4,4} & U_{4,5} \\ U_{5,1} & U_{5,2} & U_{5,3} & U_{5,4} & U_{5,5} \end{pmatrix}$$

Entrée $S = |1,1,1,0,0\rangle$

Exemple sortie $T = |1,0,1,0,1\rangle$

Nature Photonics 7, 545–549 (2013)



$$\Pr[S \to T] = |\mathrm{Per}(U_{S,T})|^2$$

$$U_{S,T} = \begin{pmatrix} U_{1,1} & U_{1,2} & U_{1,3} \\ U_{3,1} & U_{3,2} & U_{3,3} \\ U_{5,1} & U_{5,2} & U_{5,3} \end{pmatrix}$$

- lignes : $(1,3,5)$
- colonnes : $(1,2,3)$

Permanent d'une matrice

Matrice n x n

$$A = (a_{i,j})$$

Permanent

$$\mathrm{perm}(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \prod_{i=1}^{n} a_{i,\sigma(i)}$$

Exemple matrice 3 x 3

$$\mathrm{perm}\begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} = aei + bfg + cdh + ceg + bdi + afh.$$

Temps de calcul d'un permanent O($n^2 2^n$)

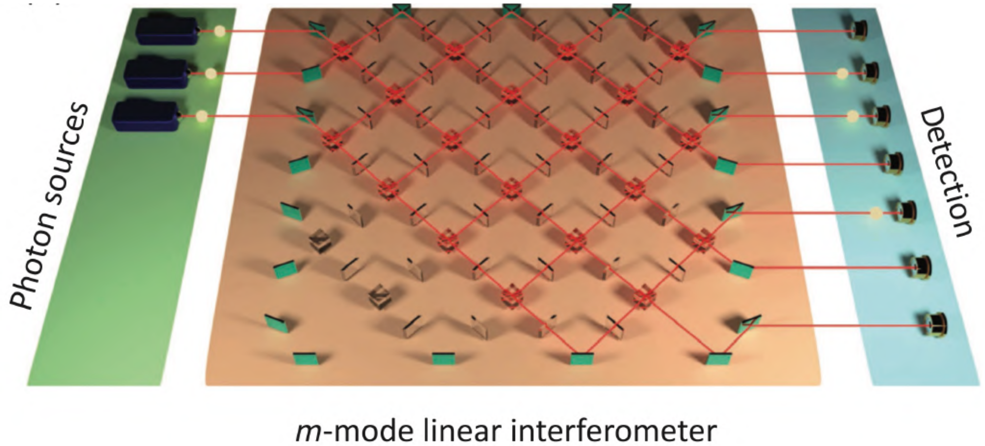
Complexité #P- complet (calcul exact) #P-difficile (approximation)

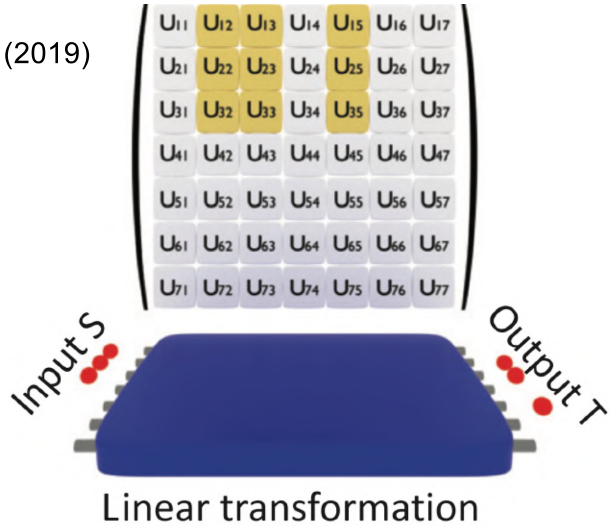
Theory of Comput., A. Press, Ed., pp. 333–342 (2011)

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Premiers processeurs photoniques : échantillonnage de bosons

Advanced Photonics 1 (3), 034001-034001 (2019)





$$|S\rangle = |s_1 s_2 \ldots s_m\rangle = \prod_{i=1}^{m} \frac{(a_i^\dagger)^{s_i}}{s_i!} |0\rangle$$

$$a_i^\dagger \to \sum_{j=1}^{m} U_{ij} a_j^\dagger.$$

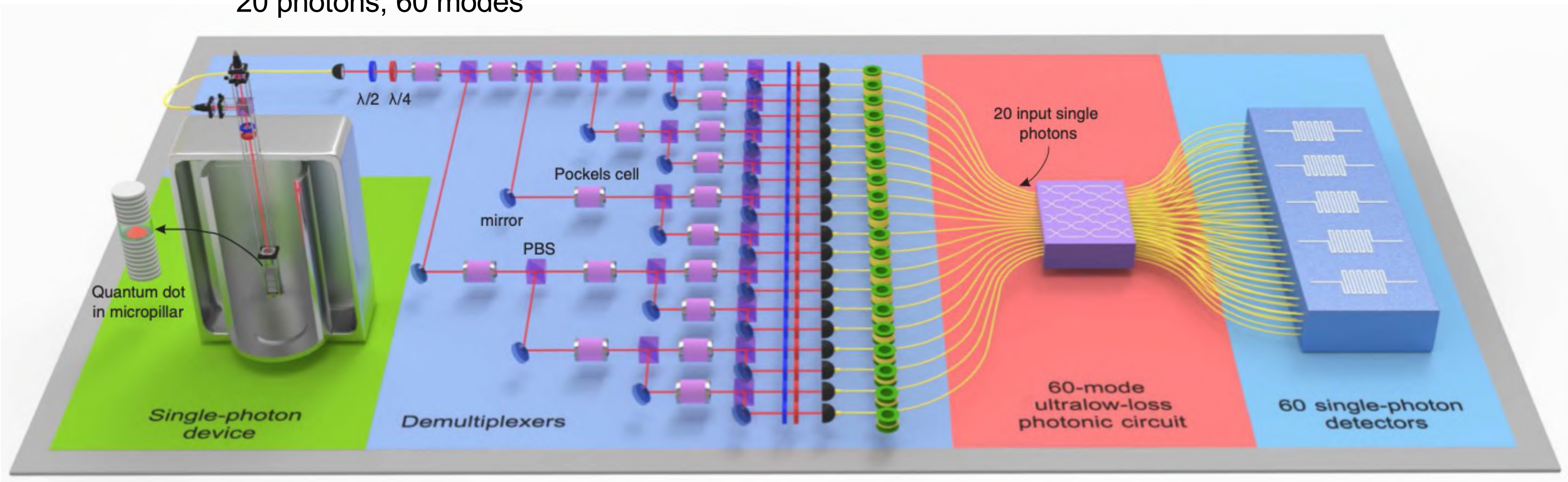
$$\Pr[S \to T] = \frac{|\mathrm{Per}(U_{S,T})|^2}{s_1! \ldots s_m! t_1! \ldots t_m!}$$

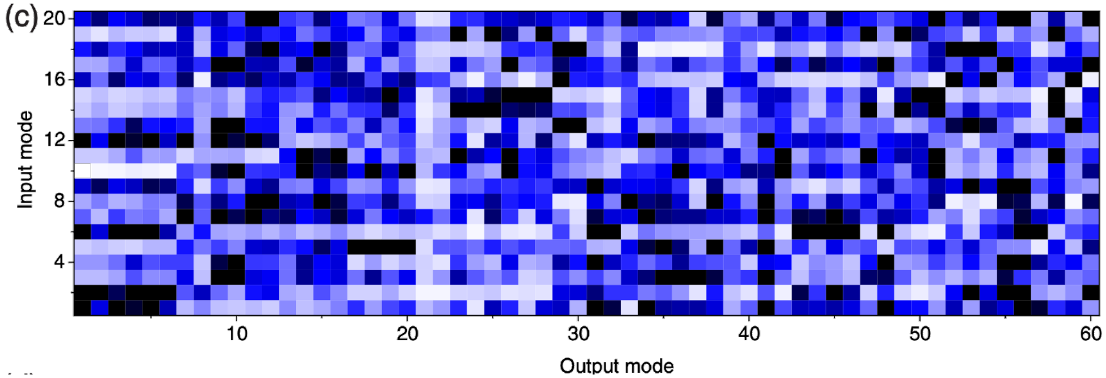
COLLÈGE DE FRANCE 1530

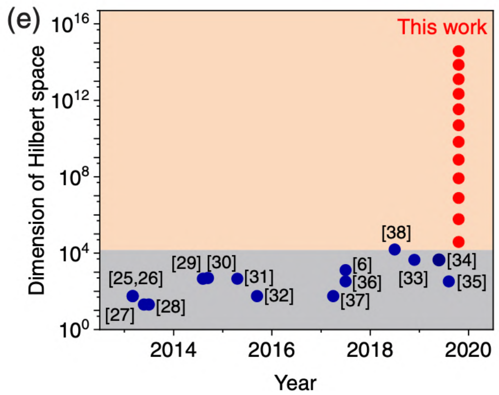
Echantillonnage de bosons : photons uniques

Phys.Rev. Lett. 123, 250503 (2019)

20 photons, 60 modes



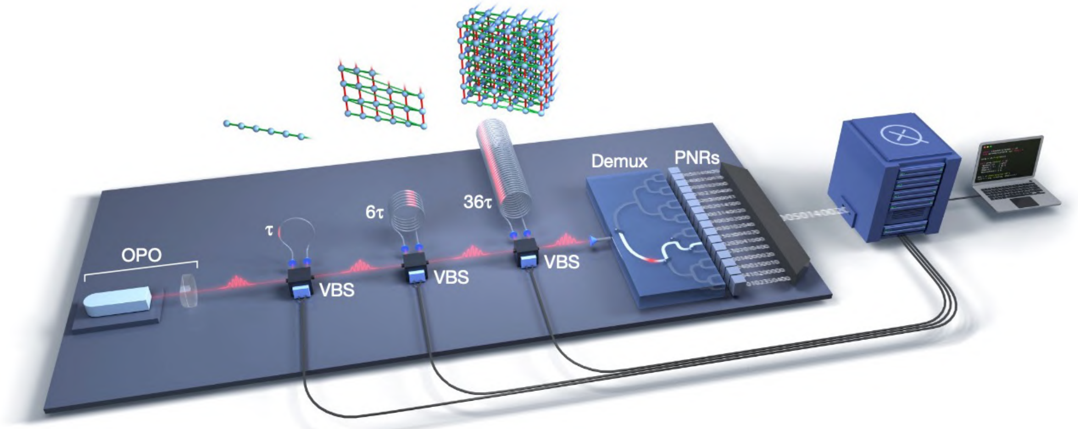


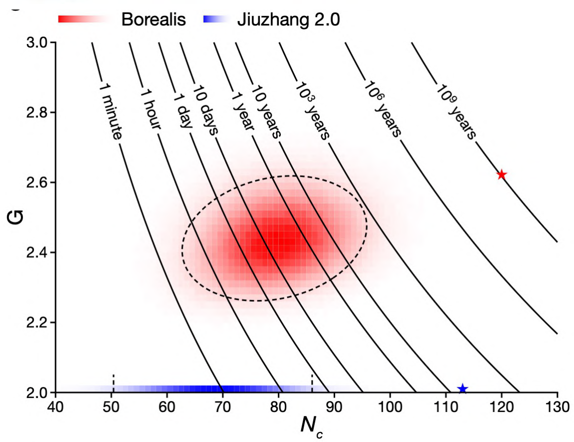


COLLÈGE DE FRANCE 1530

Boson sampling : Premiers avantages quantiques

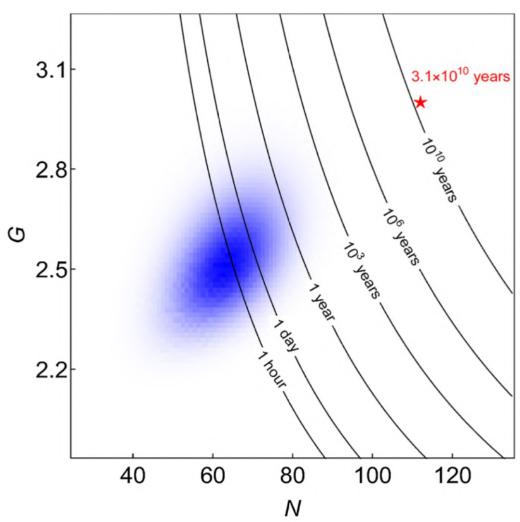
Nature 606, pages 75–81 (2022)





XANADU

Phys. Rev. Lett. 131, 150601 (2023)



Jiŭzhāng 3.0

Temps d'un échantillonnage 1.26 µs

$$\boxed{T(\vec{N}) = \frac{1}{2}\, C_{\text{Frontier}}\, M\, N^3\, G^{N/2}}$$

- M = nombre de modes,
- N = nombre de **modes cliqués**,
- $\vec{N} = (n_1, \ldots, n_M)$ = pattern de clics

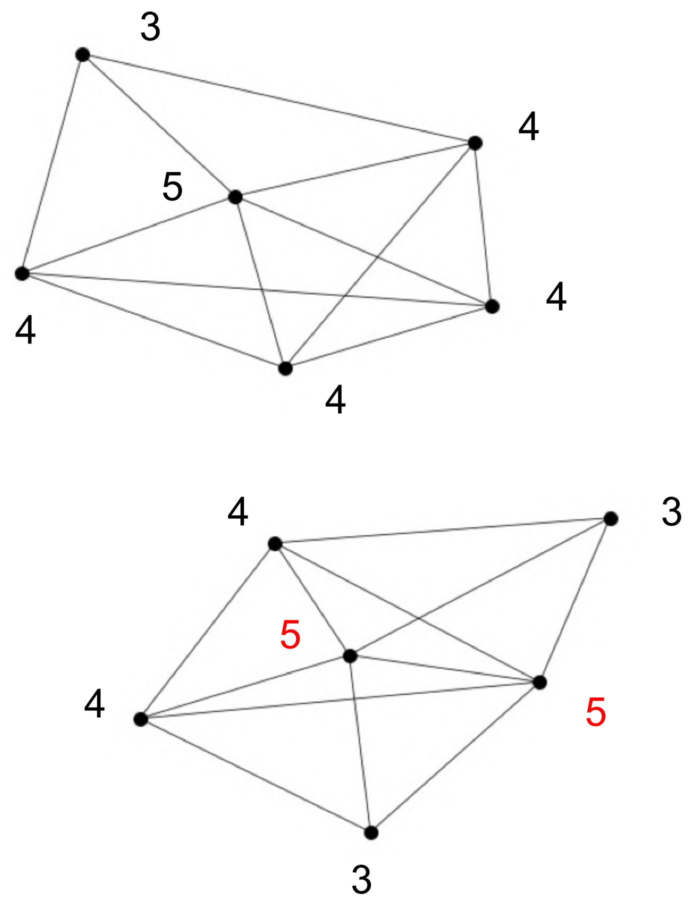
$$G = \left(\prod_{i=1}^{M}(n_i+1)\right)^{1/N}$$

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Exemple d'application : isomorphisme de graphes

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

- Est-ce que deux ces graphes sont identiques ?
  - Est-ce qu'ils ont le même nombre de noeuds ?
  - Est-ce que chaque noeud à le même degré ?



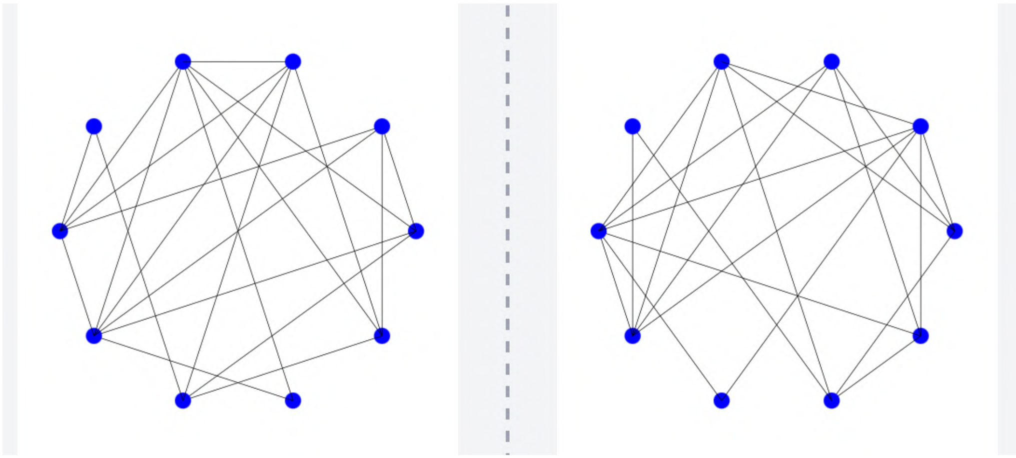
Phys. Rev. A 108, 032405 (2023)

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Exemple d'application : isomorphisme de graphes

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

- Est-ce que deux ces graphes sont identiques ?
  - Est-ce qu'ils ont le même nombre de noeuds ?
  - Est-ce que chaque noeud à le même degré ?
  - …
  - Plus généralement, il faut considérer l'ensemble des permutations des sommets permettant de transformer un graphe en un autre.



C'est exactement ce que l'on fait dans le calcul du permanent !

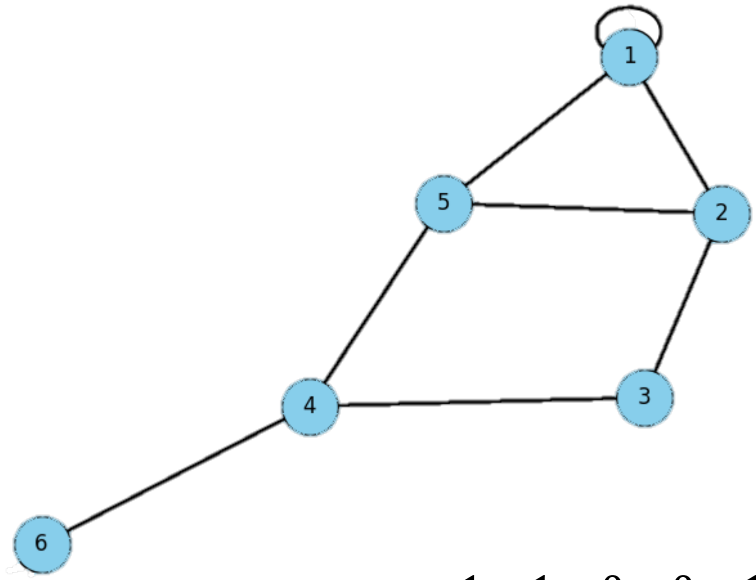
Phys. Rev. A 108, 032405 (2023)

Exemple d'application : isomorphisme de graphes

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

La démarche :

1. Utilisation des matrices d'adjacence A et B de deux graphes
2. On peut montrer que si les deux graphes sont isomorphes, alors $per(A) = per(B)$



$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

A n'est pas unitaire

Phys. Rev. A 108, 032405 (2023)

Exemple d'application : isomorphisme de graphes

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

- La matrice d'adjacence est symétrique => valeurs propres réelles

$$A_s = \frac{1}{\sigma} A \text{ avec } \sigma = \sigma_{\max}(A),\ \|A_s\| \leq 1$$

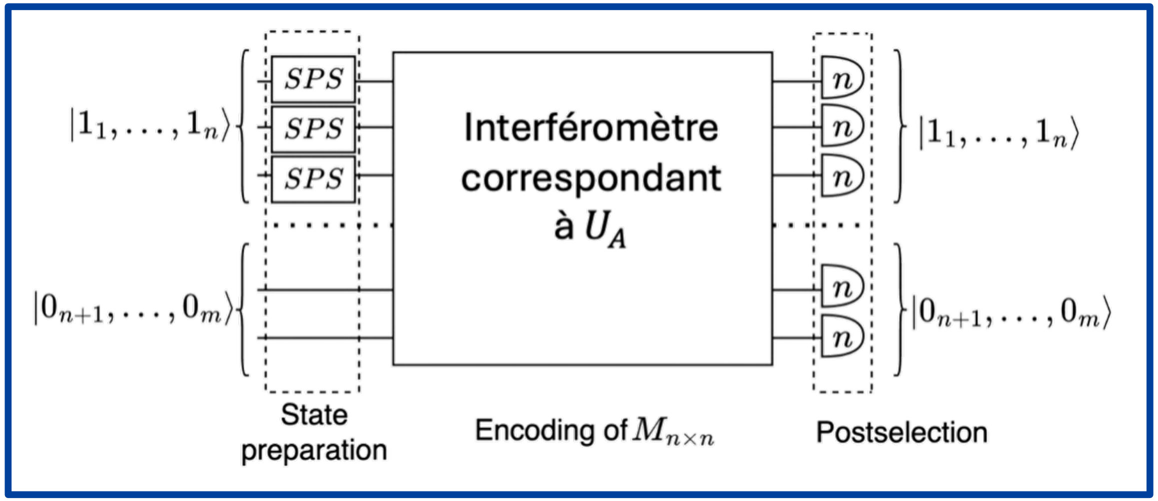
- On applique le théorème de "unitary dilation"

$$U_A = \begin{pmatrix} A_s & \sqrt{\mathbb{I}_{nxn} - A_s (A_s)^\dagger} \\ \sqrt{\mathbb{I}_{nxn} - A_s (A_s)^\dagger} & -(A_s)^\dagger \end{pmatrix}$$

- U_A est unitaire

P. R. Halmos, Summa Brasil. Math 2, 134 (1950).

$$p(s_{out}|s_{in}) = |per(A_s)|^2$$

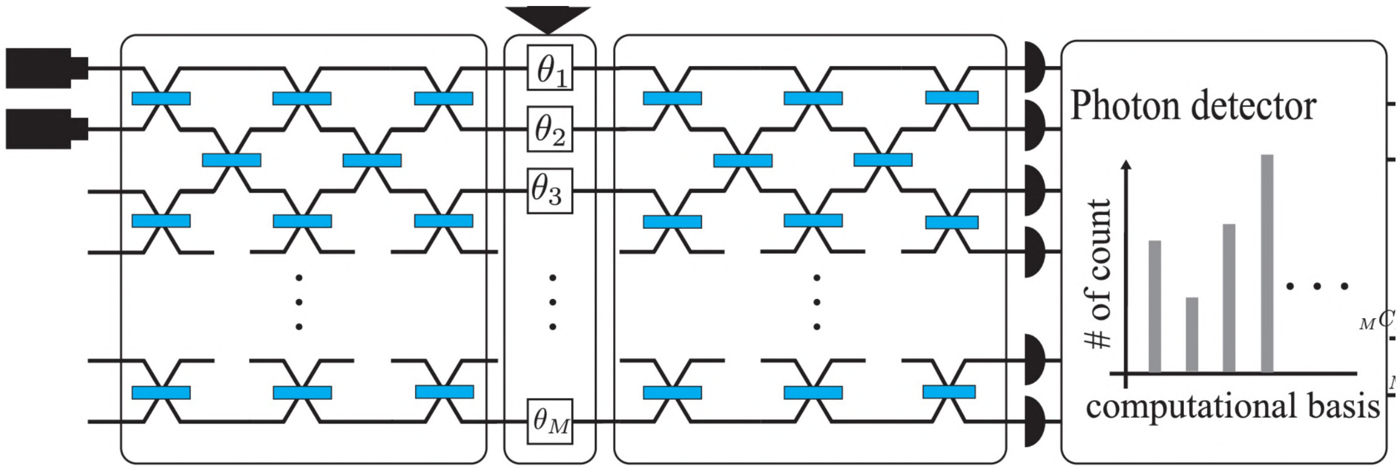


Phys. Rev. A 108, 032405 (2023)

Exemple d'application : apprentissage hybride

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

circuit photonique avec n photons dans M modes :



$$p_D = f(\theta_1, \dots, \theta_M)$$

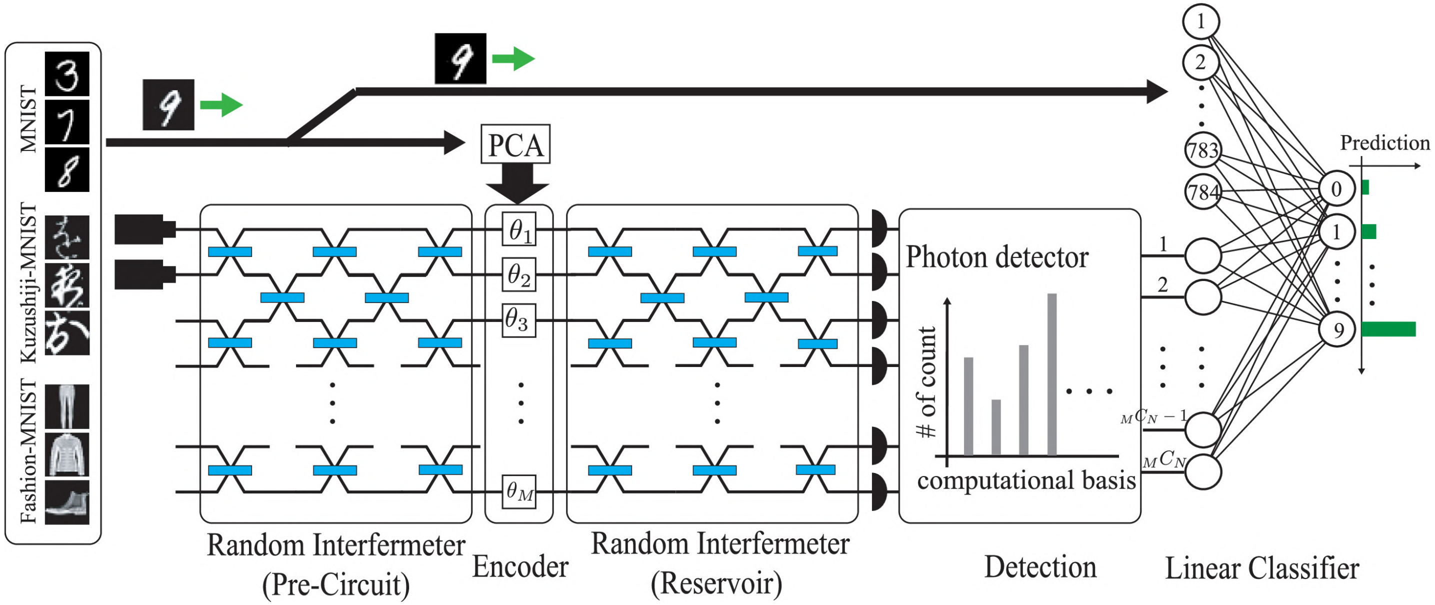
On projette de manière continue un espace de dimension M dans l'espace de Fock.

La distribution des états de sortie p_D est de dimension $\binom{M+n-1}{n}$.

Exemple d’application : apprentissage hybride

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

Calcul par réservoir photonique quantique (tâche de classification)



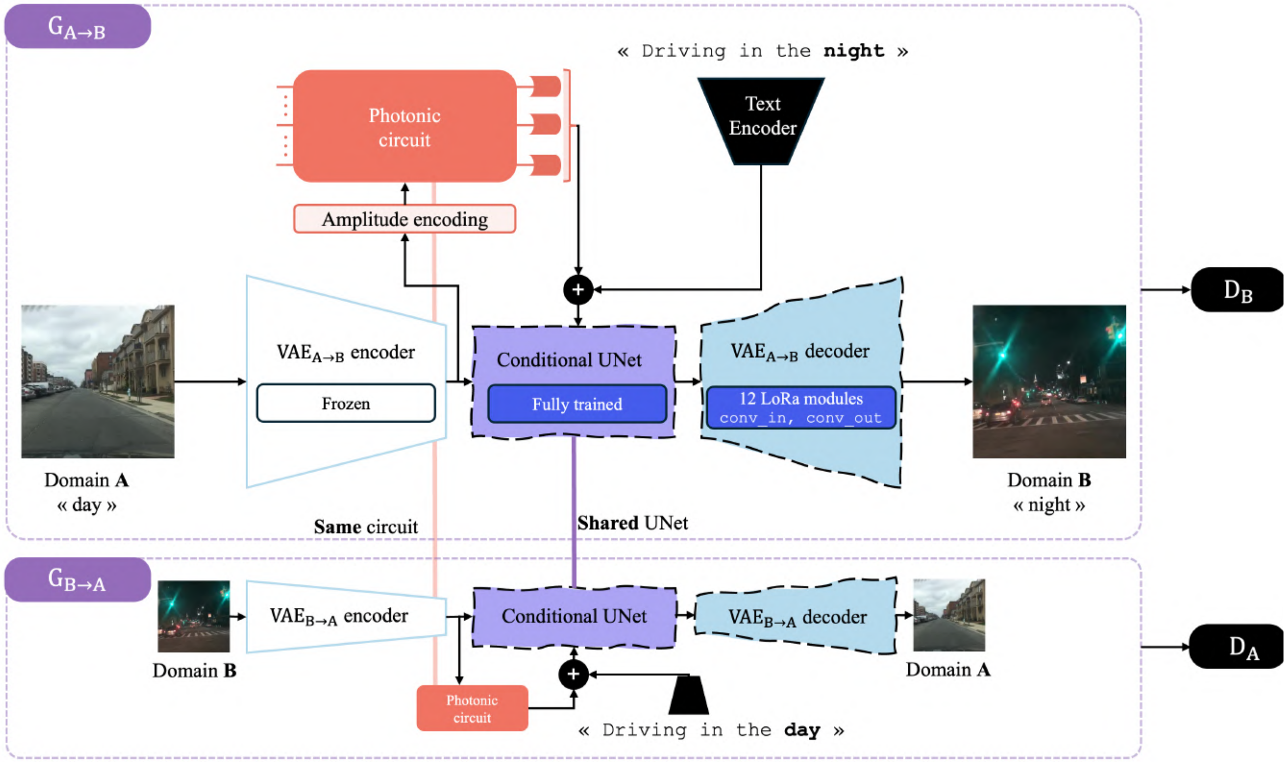
La projection dans l’espace de Fock enrichit l’information accessible au classifieur et améliore sa précision.

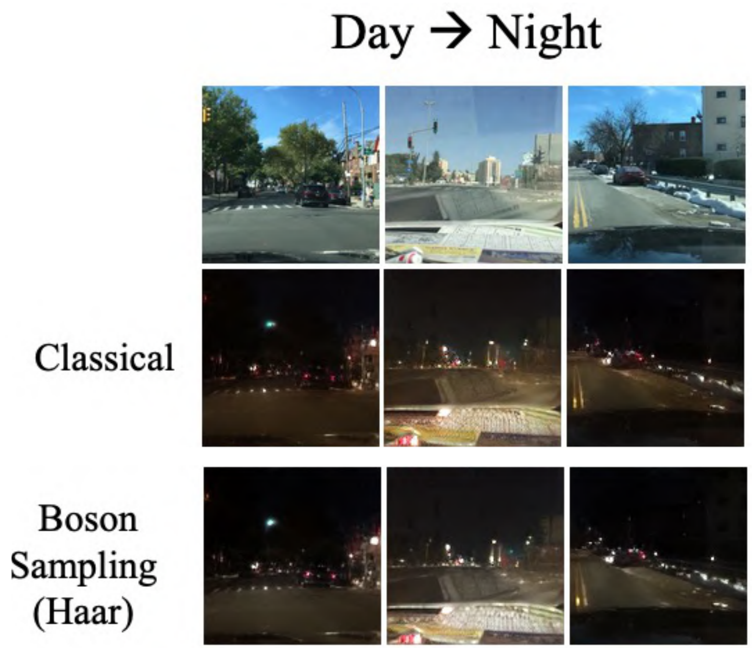
COLLÈGE DE FRANCE 1530

Exemple d'application : apprentissage hybride

Courtoisie de J. Senellart - Quandela

Utilisation d'annotations quantiques comme information auxiliaire





La projection dans l'espace de Fock enrichit l'information accessible au modèle génératif.

Portes logiques linéaires : exemple CNOT

$$
\begin{array}{c|cccc}
 & |00\rangle & |01\rangle & |10\rangle & |11\rangle \\
\hline
\begin{array}{c}|00\rangle\\|01\rangle\\|10\rangle\\|11\rangle\end{array} & \multicolumn{4}{c}{\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\0 & 1 & 0 & 0\\0 & 0 & 0 & 1\\0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}}
\end{array}
$$

Qubit contrôle

Qubit cible

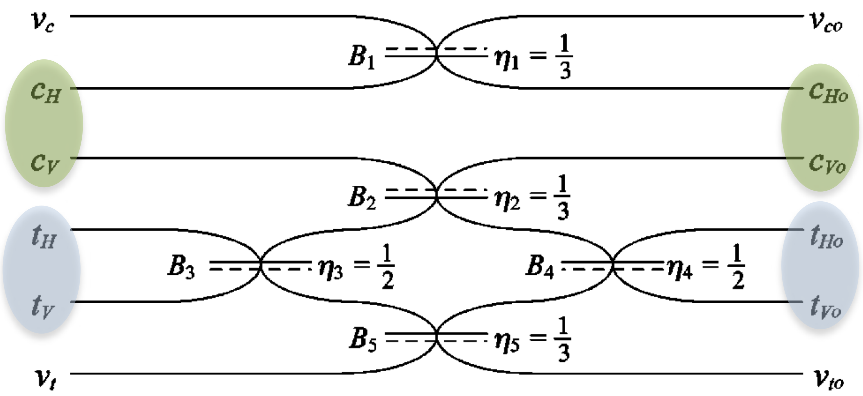


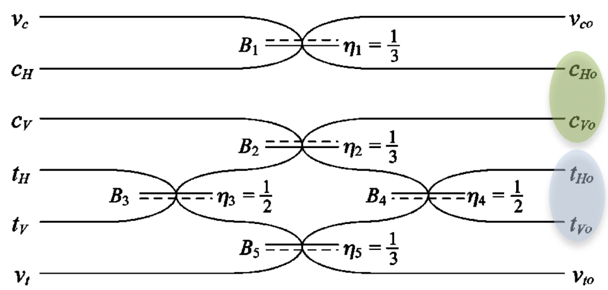
FIG. 1. Schematic of the coincidence controlled-NOT gate. Dashed line indicates the surface from which a sign change occurs upon reflection. The control modes are c_H and c_V. The target modes are t_H and t_V. The modes v_c and v_t are unoccupied ancillary modes.

Phys. Rev. A 65, 062324 (2002)

$$
\begin{aligned}
c_{H_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\sqrt{2}v_c + c_H) \\
c_{V_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-c_V + t_H + t_V \\
t_{H_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(c_V + t_H + v_t) \\
t_{V_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(c_V + t_V - v_t) \\
v_{c_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-v_c + \sqrt{2}c_H) \\
v_{t_O} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(t_H + t_V - v_t)
\end{aligned}
$$

COLLÈGE DE FRANCE 1530

Portes logiques linéaires : exemple CNOT



Notations $|n_{cH} n_{cV} n_{tH} n_{tV}\rangle |n_{vc} n_{vt}\rangle$ avec $n_{cH} = c_H^\dagger c_H$

Etat d'entrée

$$\begin{aligned}|\phi\rangle &= (\alpha|HH\rangle + \beta|HV\rangle + \gamma|VH\rangle + \delta|VV\rangle)|00\rangle \\ &= (\alpha c_H^\dagger t_H^\dagger + \beta c_H^\dagger t_V^\dagger + \gamma c_V^\dagger t_H^\dagger + \delta c_V^\dagger t_V^\dagger)|0000\rangle|00\rangle\end{aligned}$$

Etat sortie

$$\begin{aligned}|\phi\rangle_{out} &= (\alpha\, c_{H_O}^\dagger t_{H_O}^\dagger + \beta\, c_{H_O}^\dagger t_{V_O}^\dagger + \gamma\, c_{V_O}^\dagger t_{H_O}^\dagger + \delta\, c_{V_O}^\dagger t_{V_O}^\dagger)|0000\rangle|00\rangle \\ &= \frac{1}{3}\{\alpha|HH\rangle + \beta|HV\rangle + \gamma|VV\rangle + \delta|VH\rangle\end{aligned}$$

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

Cas rejetés

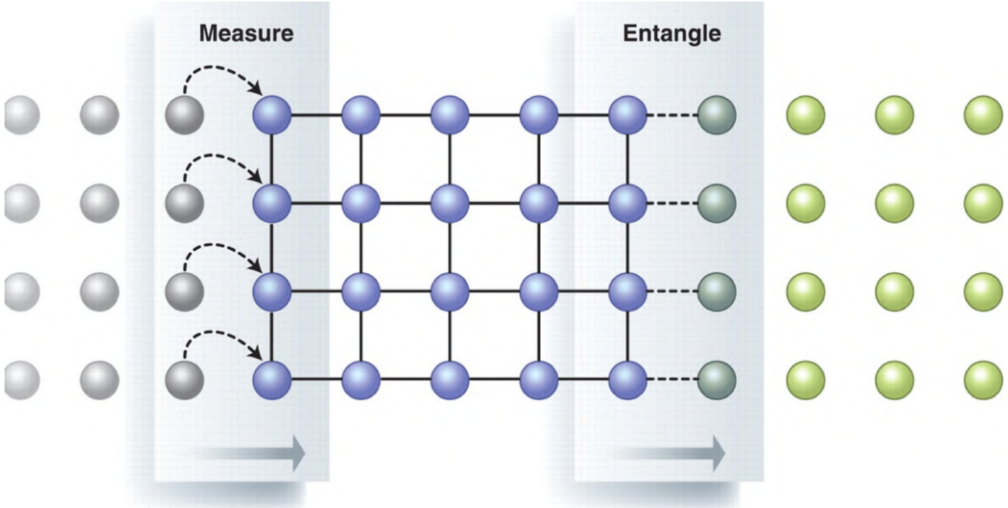
Portes probabilistes (marche 1/9 fois !)

COLLÈGE DE FRANCE 1530

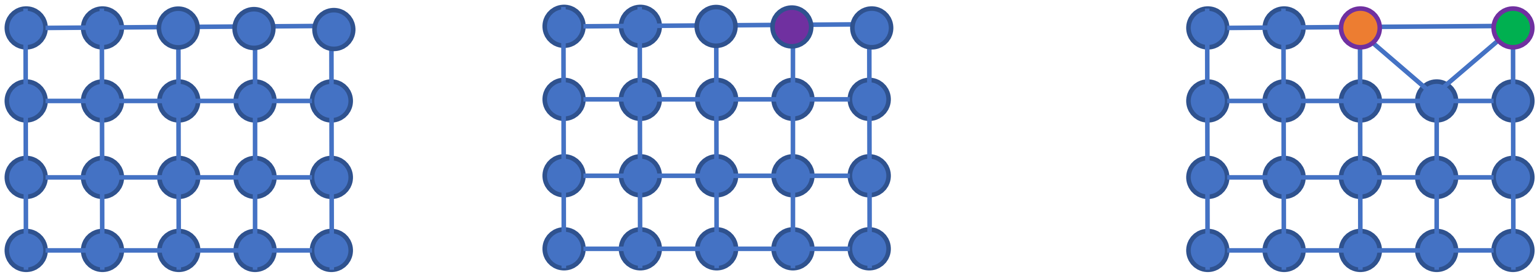
Calcul quantique basé sur la mesure

Calcul basé sur la mesure : principe général

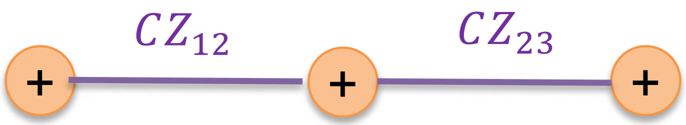
Phys. Rev. Lett. 86, 5188 (2001)
Phys. Rev. A 68, 022312 2003



Science 318,1567-1570(2007)



Calcul basé sur la mesure : exemple de création d’état



$$|+\rangle = \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}. \quad |+\rangle^{\otimes 3} = \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{x_1, x_2, x_3 \in \{0,1\}} |x_1 x_2 x_3\rangle.$$

$$|C_3\rangle = CZ_{12}\, CZ_{23}\, |+\rangle_1 |+\rangle_2 |+\rangle_3,$$

$$CZ_{ij} |x_i x_j\rangle = (-1)^{x_i x_j} |x_i x_j\rangle$$

$$|C_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{x_1, x_2, x_3} (-1)^{x_1 x_2 + x_2 x_3} |x_1 x_2 x_3\rangle$$

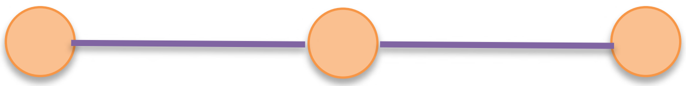
$$|C_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{x_1, x_3} \left(|x_1\, 0\, x_3\rangle + (-1)^{x_1 + x_3} |x_1\, 1\, x_3\rangle \right)$$

Porte CZ

$$\begin{array}{c c} & \begin{array}{cccc} |00\rangle & |01\rangle & |10\rangle & |11\rangle \end{array} \\ \begin{array}{c} |00\rangle \\ |01\rangle \\ |10\rangle \\ |11\rangle \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Calcul basé sur la mesure : transfert d'intrication

Mesure X_2



$$|C_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{x_1, x_3} \left(|x_1\, 0\, x_3\rangle + (-1)^{x_1 + x_3} |x_1\, 1\, x_3\rangle \right)$$

$$|\phi_s\rangle_{13} \propto (\langle \pm|_2 \otimes I_{13})|C_3\rangle .$$

Résultat dans base logique $\quad s = 0\ (|+\rangle), \quad s = 1\ (|-\rangle).$

$$\langle \pm | 0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \langle \pm | 1 \rangle = (-1)^s \frac{1}{\sqrt{2}},$$

$$\boxed{|\phi_s\rangle_{13} = \frac{1}{4} \sum_{x_1, x_3} \left(1 + (-1)^s (-1)^{x_1 + x_3} \right) |x_1 x_3\rangle .}$$

Cas $s = 0$

$$1 + (-1)^{x_1 + x_3} \neq 0 \iff x_1 + x_3 \text{ pair.}$$

$$\boxed{|\phi_0\rangle_{13} = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} = |\Phi^+\rangle}.$$

Cas $s = 1$

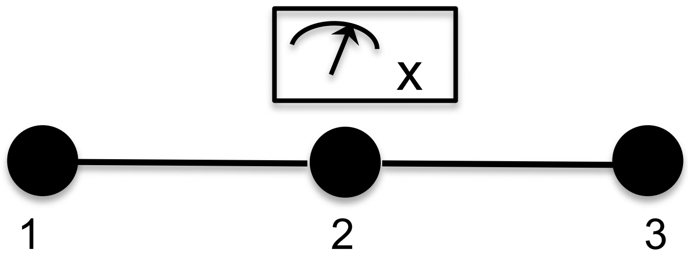
$$1 - (-1)^{x_1 + x_3} \neq 0 \iff x_1 + x_3 \text{ impair.}$$

$$\boxed{|\phi_1\rangle_{13} = \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} = |\Psi^+\rangle}.$$

Téléportation à une rotation près sur un photon

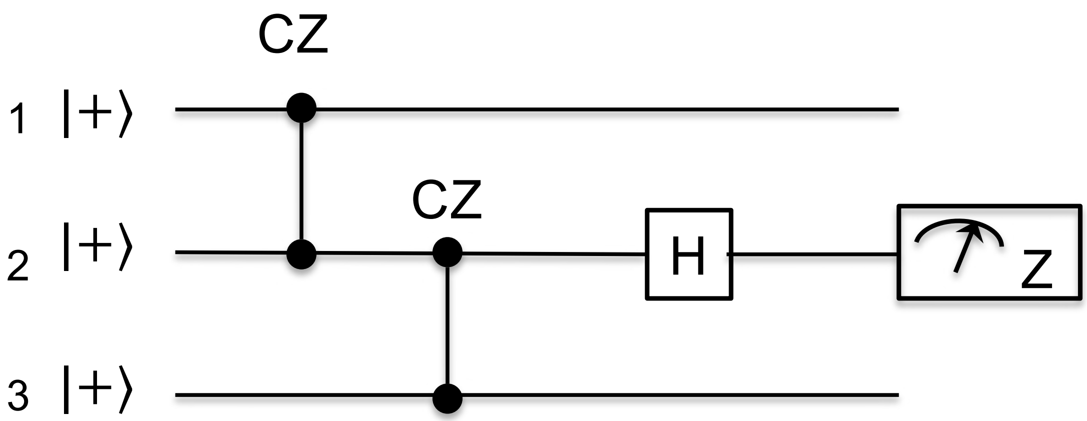
Calcul basé sur la mesure : équivalence avec circuit logique

Calcul basé sur la mesure



Ressources : état à 3 photons intriqués
Calcul : mesure du photon 2

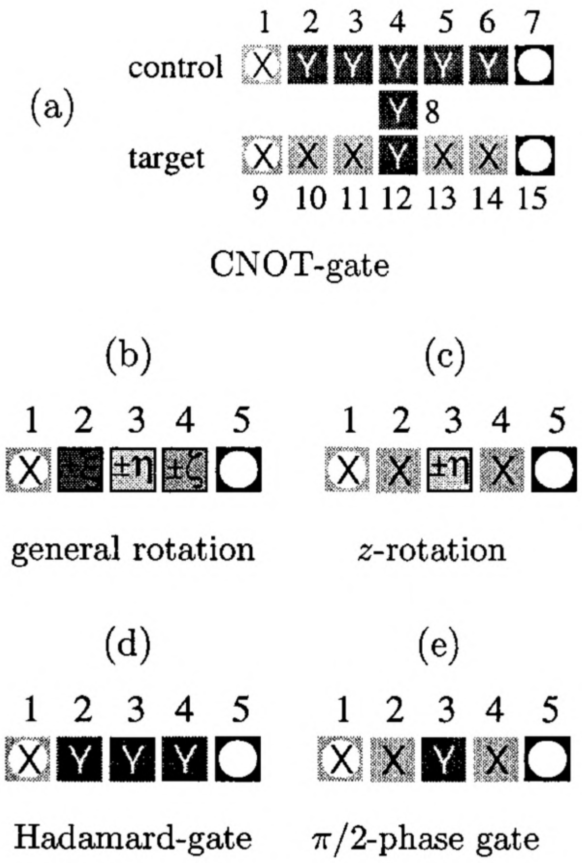
Calcul basé sur des portes logiques

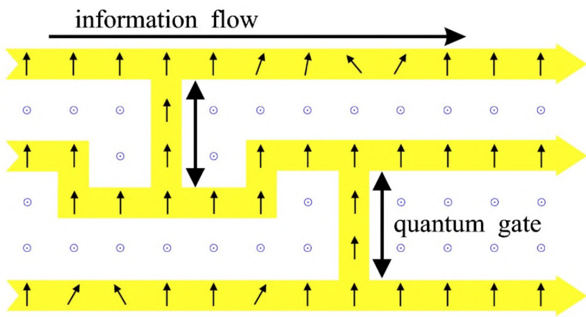


Ressources : 3 photons + circuit
Calcul : porte logiques entre photons et mesure du photon 2

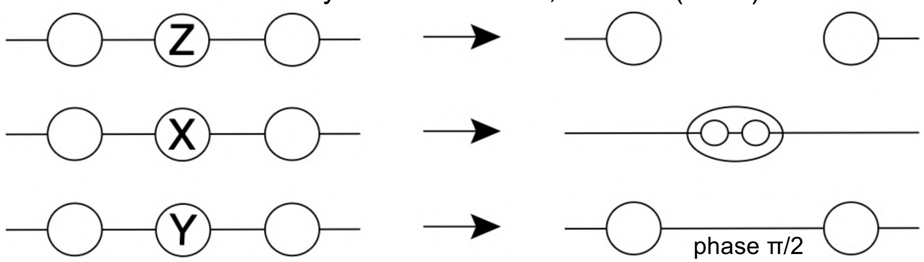
Calcul basé sur la mesure : équivalence circuits

Phys. Rev. A 68, 022312 2003





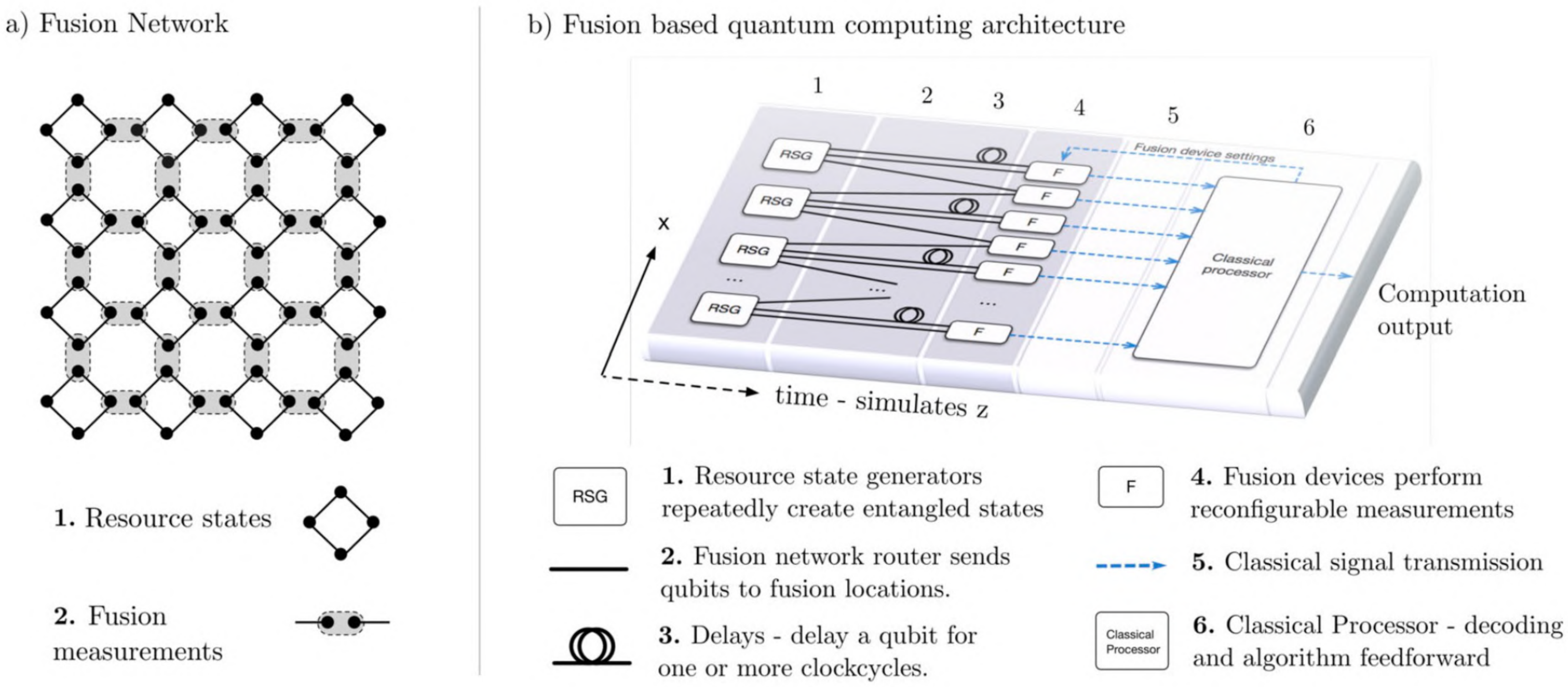
Phys. Rev. Lett. 95, 010501 (2005)



COLLÈGE DE FRANCE 1530

Génération de graphes photoniques : approche linéaire

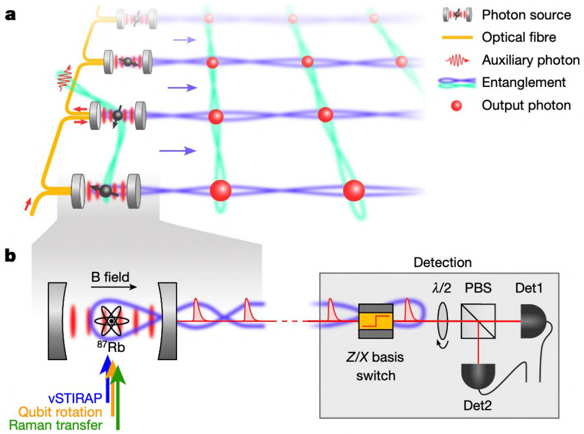
"Fusion-based quantum computation" PsiQuantum

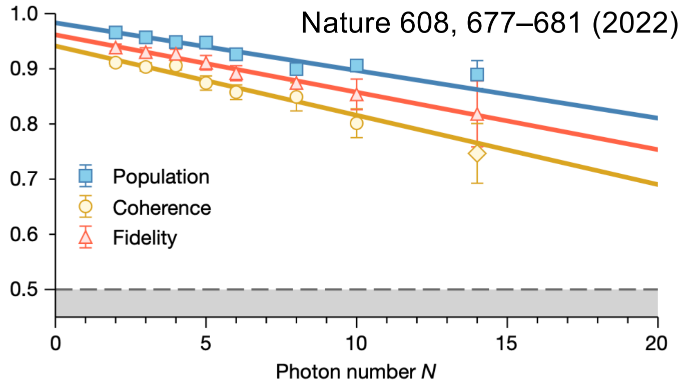


COLLÈGE DE FRANCE 1530

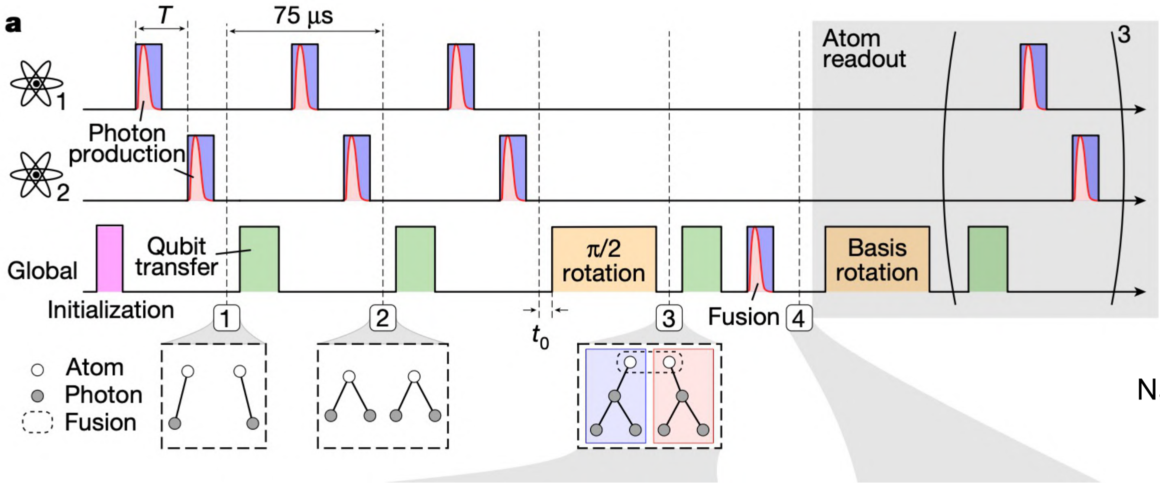
Génération de graphes photoniques : approche déterministe

Séminaire Pr. Gerhard Rempe





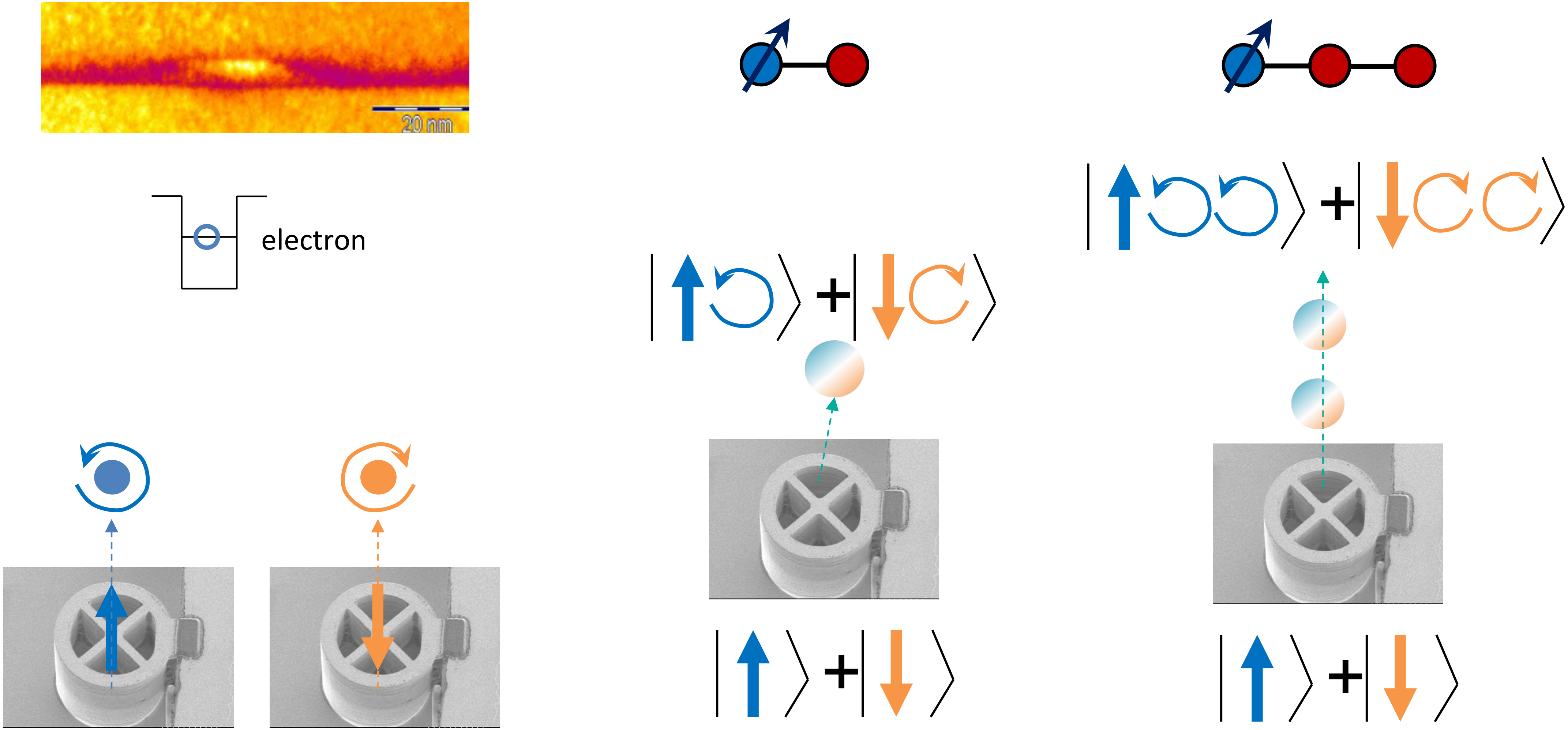
Nature 608, 677–681 (2022)



Nature 629, 567–572 (2024)

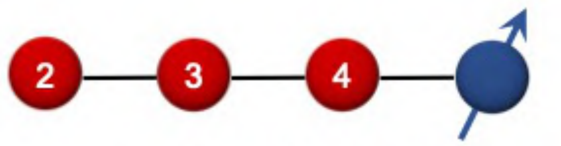
Génération de graphes photoniques : approche déterministe

Phys. Rev. Lett. 103, 113602 (2009)



Nature Photonics 17, 582 (2023)

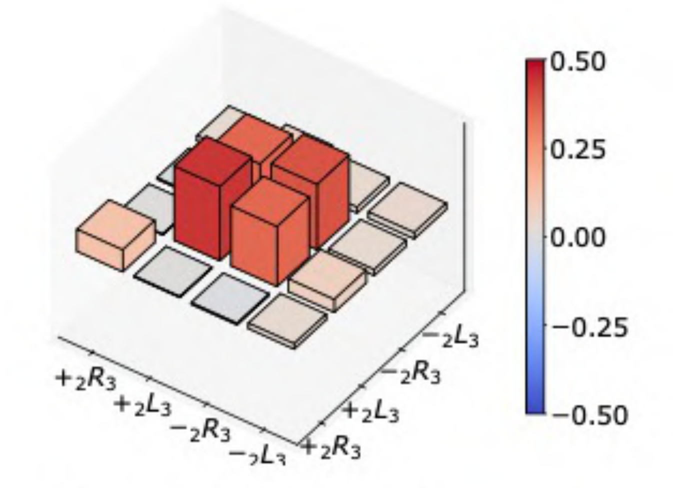
Génération de graphes photoniques : approche déterministe



$$|\psi\rangle = (|-_2\rangle|R_3\rangle - |+_2\rangle|L_3\rangle)|\uparrow\rangle|R_4\rangle + (|-_2\rangle|R_3\rangle + |+_2\rangle|L_3\rangle)\boxed{|\downarrow\rangle|L_4\rangle}$$

$$|\pm\rangle = \frac{|R\rangle \pm |L\rangle}{\sqrt{2}}$$

Measuring the spin down



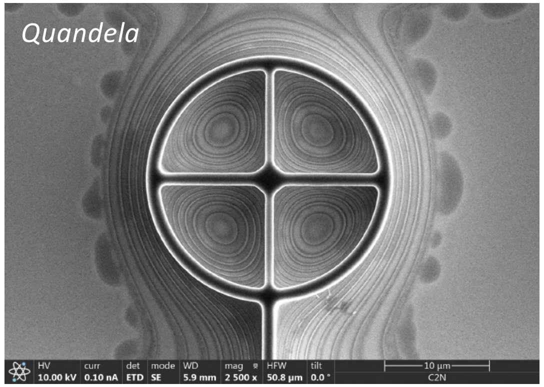
$$|-_2, R_3\rangle + |+_2, L_3\rangle$$

Fidelity 0.78 ± 0.04
Concurrence 0.69 ± 0.09

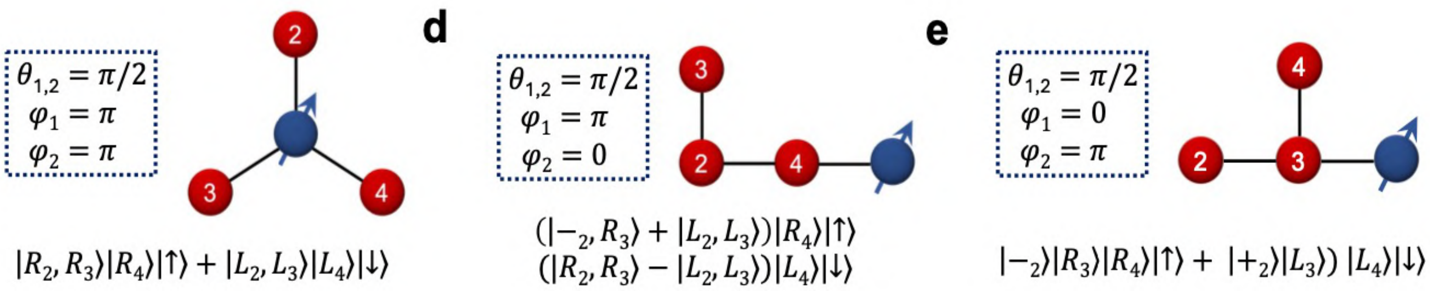
Nature Communications 16, 4337 (2025)

Génération de graphes photoniques : approche déterministe

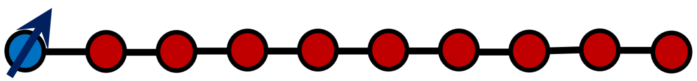
COLLÈGE DE FRANCE 1530

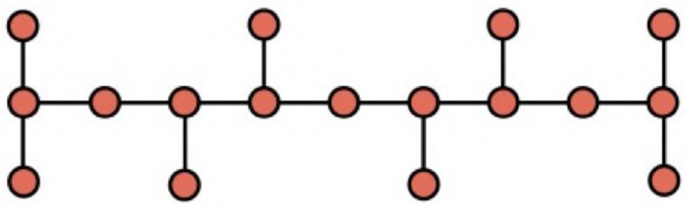


Nature Communications 16, 4337 (2025)



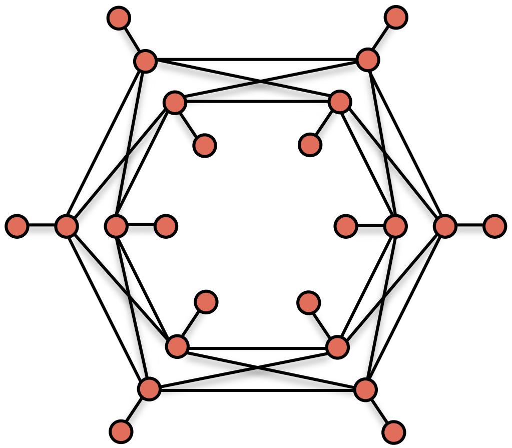
En cours : > 10 particules intriquées – états ”chenilles”



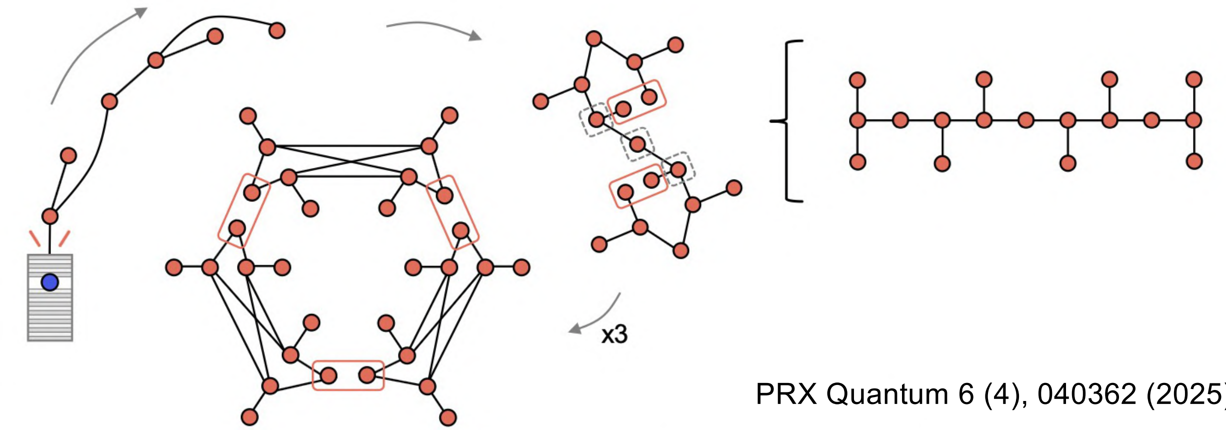


COLLÈGE DE FRANCE 1530

Génération de graphes photoniques : vers la correction d’erreur



arXiv:2303.16122

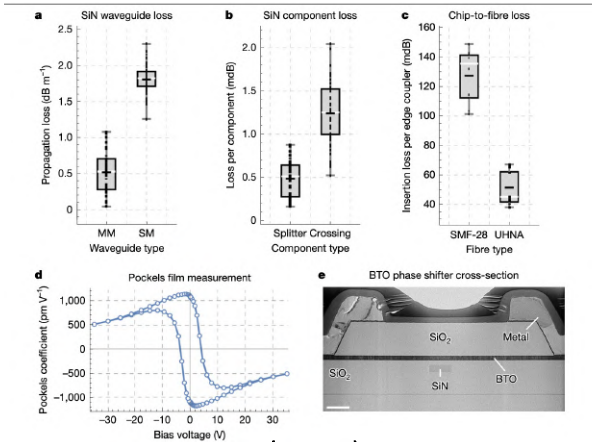


PRX Quantum 6 (4), 040362 (2025)

COLLÈGE DE FRANCE 1530

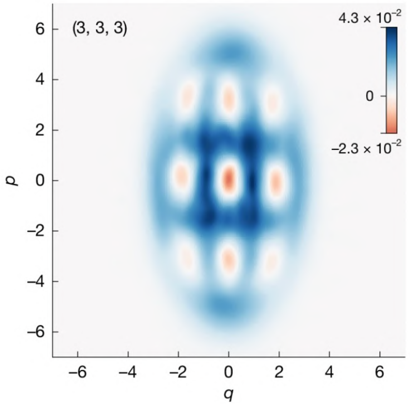
Calcul quantique photonique : levée de verrous importants

Réduction des pertes



Nature 641, 876 (2025)

PsiQuantum

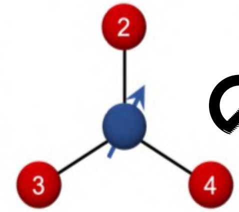


XANADU

Nature 642, 587 (2025)

Portes déterministes

$$\theta_{1,2} = \pi/2 \quad \varphi_1 = \pi \quad \varphi_2 = \pi$$



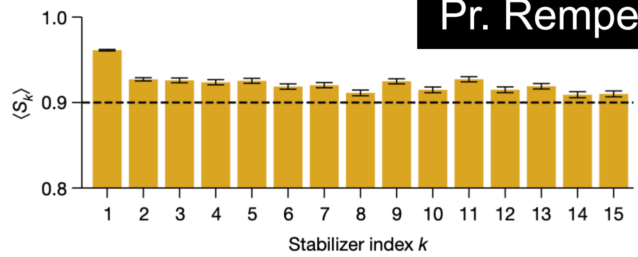
QUANDELA

$$|R_2, R_3\rangle |R_4\rangle |\uparrow\rangle + |L_2, L_3\rangle |L_4\rangle |\downarrow\rangle$$

Nature Photonics 17, 582 (2023)

Nature Communications 16, 7553 (2025)

Pr. Rempe



Nature 608, 677–681 (2022)