Expérience à Choix Retardé de Wheeler sur Ordinateur Quantique

Basé sur l'article de Chandarana et al. [1]

Théotim Barbier

7 mars 2025

Sommaire

Sommaire

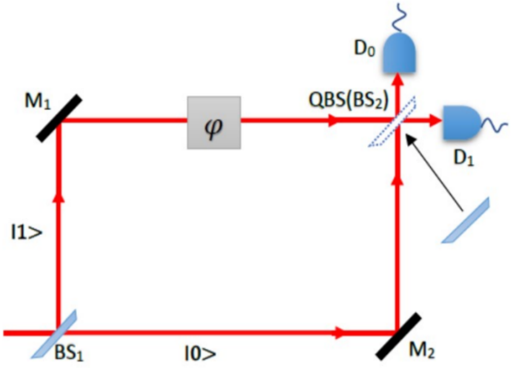
Introduction

- Mécanique quantique connue pour ces propriétés non intuitives :
  - **Dualité onde-corpuscule**
  - **Intrication quantique**
  - **Mesures**
- Expériences à **choix retardé quantique**: un choix est effectué a posteriori d'un phénomène quantique.
- **Exemples** : Gomme Quantique, Expérience de Wheeler, ...

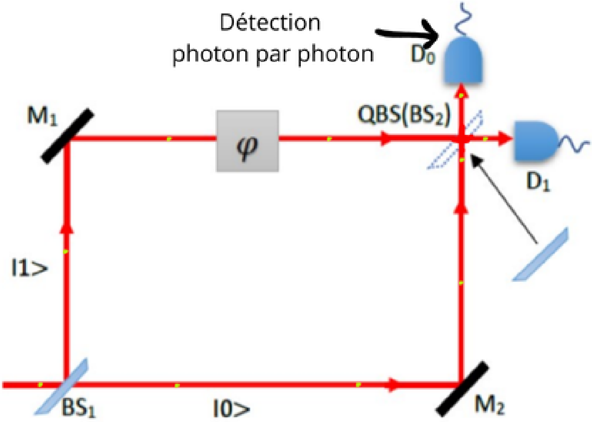
Sommaire

Description de l'Expérience de Wheeler

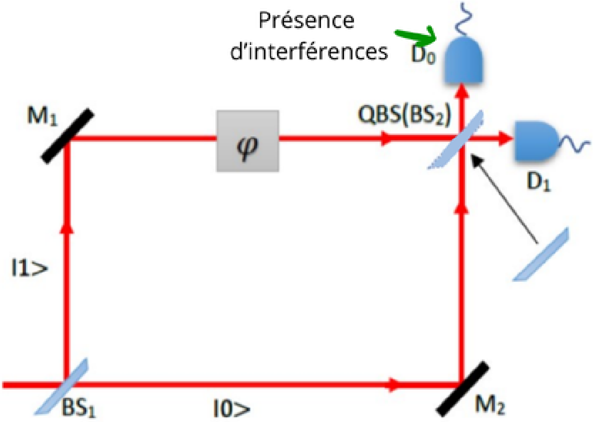
- Utilisation d'un interféromètre de Mach-Zehnder
- BS1 et BS2 : miroir semi-réfléchissant
- Contrôle de la présence de BS2



Cas 1 : Sans BS2



Cas 2 : Avec BS2



Implications de l'expérience

- Démonstration de la **dualité onde corpuscule**.
- Expérience réalisé de manière cosmique. Le choix retardé est effectué par un élément lointain (particule cosmique) $\Longrightarrow$ pas de **variable caché locale**.

Sommaire

Contribution de l'article

- L'article [1] propose une version de cette expérience sous ordinateur quantique.
- **photon** représenté par un **bit quantique** q_0.
- chemin du photon représenté par l'état du bit quantique. L'opérateur de Hadamard représente le **miroir semi-réfléchissant**.
- Un opérateur de déphasage est appliqué sur l'état $|1\rangle$.
- Une mesure est appliqué :
  - Un état $|0\rangle$ mesuré correspond au détecteur D_0.
  - Un état $|1\rangle$ mesuré correspond au détecteur D_1.
- Possibilité du contrôle de BS2 de manière **quantique**.

Dualité Onde-Corpuscule

- Présence du deuxième miroir BS2 par un qubit ancillaire en état superposé.
- L'état du qubit ancillaire q_1 va être régie par une variable α qui va effectuer une rotation selon l'axe Y.

Dualité Onde-Corpuscule

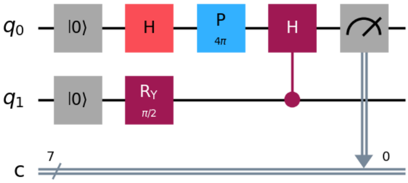


Figure: Circuit quantique représentant l'expérience 1 pour $\phi = 4\pi$ et $\alpha = \pi/2$. L'opérateur P est l'opérateur de phase sur le qubit du système et l'opérateur R_Y est l'opérateur de rotation sur le qubit ancillaire. Image tiré de mon code qiskit.

Dualité Onde-Corpuscule

- Si $\alpha = 0$ alors, BS2 n'est pas présent et l'état final est :

$$|\psi_p\rangle = \frac{1}{2}(|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle).$$

- Si $\alpha = \pi/2$ alors, BS2 est présent et l'état final est :

$$|\psi_w\rangle = \cos(\phi/2)|0\rangle + \sin(\phi/2)|1\rangle.$$

Dualité Onde-Corpuscule

- Si $\alpha \in]0; \pi/2[$ alors la présence de BS2 est quantique.
- L'article montre que la valeur d'énergie aux détecteurs (proportion de photon) est donné par :

$$E_{D_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{2} + \sin^2 \alpha \cos^2(\phi/2)$$

$$E_{D_1} = \frac{\cos^2 \alpha}{2} + \sin^2 \alpha \sin^2(\phi/2)$$

Non existence de variable caché locale

- Ajout d'un deuxième qubit ancillaire q_2 intriqué au premier q_1.
- On applique la rotation α à q_2 après avoir fait intéragir q_0 et q_1.

Non existence de variable caché locale

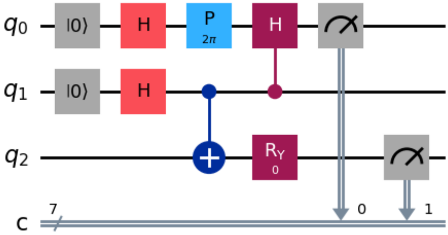


Figure: Circuit quantique représentant l'expérience 2. L'opérateur P représente l'opérateur de phase sur le qubit du système et l'opérateur R_Y représente la rotation effectué sur le deuxième qubit ancillaire. Image tiré de mon code qiskit.

Non existence de variable caché locale

- L'article montre que dans les hypothèse d'une variable caché locale, l'état final de q_0 serait indépendant de q_2. L'énergie aux 2 détecteurs serait donc égale et vaudrait :

$$E_{D_1} = E_{D_0} = \frac{1}{4} + \frac{\cos^2(\phi/2)}{2}$$

- Si l'on utilisait la théorie quantique, on trouverait :

$$E_{D_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{4} + \frac{\sin^2 \alpha}{2} \cos^2(\phi/2)$$

$$E_{D_1} = \frac{\sin^2 \alpha}{4} + \frac{\cos^2 \alpha}{2} \cos^2(\phi/2)$$

Sommaire

Circuit Quantique 1

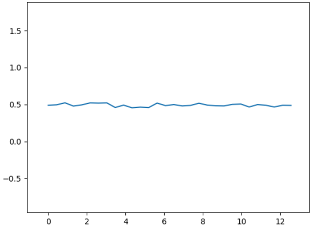
```
qreg_q = QuantumRegister(2, 'q')
creg_c = ClassicalRegister(7, 'c')
circuit = QuantumCircuit(qreg_q, creg_c)

circuit.reset(qreg_q[0])
circuit.reset(qreg_q[1])
circuit.h(qreg_q[0])
circuit.ry(alpha, qreg_q[1])
circuit.p(phi, qreg_q[0])
circuit.ch(qreg_q[1], qreg_q[0])
circuit.measure(qreg_q[0], creg_c[0])
```

Circuit Quantique 2

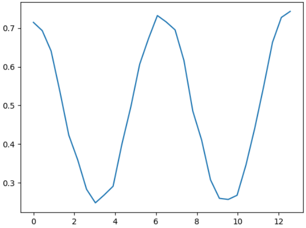
```
qreg_q = QuantumRegister(3, 'q')
creg_c = ClassicalRegister(7, 'c')
circuit = QuantumCircuit(qreg_q, creg_c)

circuit.reset(qreg_q[0])
circuit.reset(qreg_q[1])
circuit.h(qreg_q[0])
circuit.h(qreg_q[1])
circuit.cx(qreg_q[1],qreg_q[2])
circuit.p(phi, qreg_q[0])
circuit.ch(qreg_q[1], qreg_q[0])

circuit.ry(alpha, qreg_q[2])

circuit.measure(qreg_q[0], creg_c[0])
circuit.measure(qreg_q[2], creg_c[1])
```

Sommaire

Expérience 1



(a) $\alpha = 0$



(b) $\alpha = \pi/2$

Figure: Résultats de l'expérience 1 sur ordinateur quantique. On retrouve en abscisse les valeurs de ϕ de 0 à 4π et en ordonnée les valeurs de l'énergie (i.e la probabilité d'être observé sur le détecteur D_0).

Expérience 1

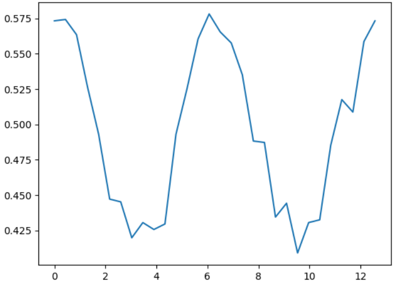


Figure: Résultats de l'expérience 1 sur ordinateur quantique. On retrouve en abscisse les valeurs de ϕ de 0 à 4π et en ordonnée les valeurs de l'énergie (i.e la probabilité d'être observé sur le détecteur D_0). $\alpha = \pi/4$.

Résultats de l'article

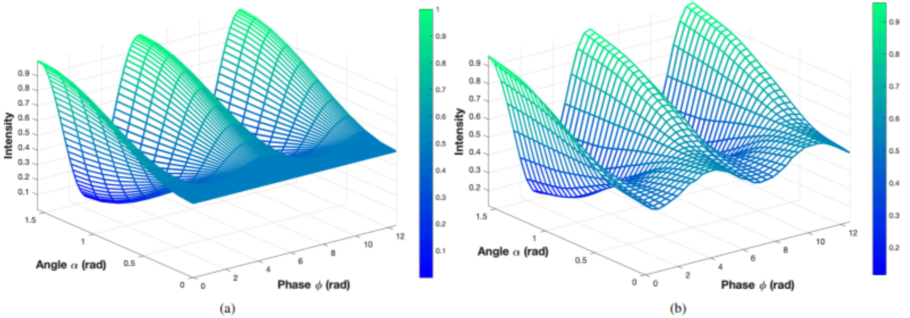


Figure: Comparaisons des résultats théoriques et expérimentaux pour l'expérience 1. (a) présente les résultats théorique selon l'équation (1). (b) présente les résultats expérimentaux de l'article pour différentes valeurs de α et ϕ.

Expérience 2

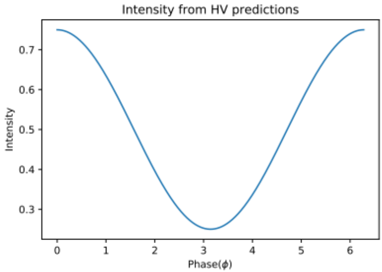
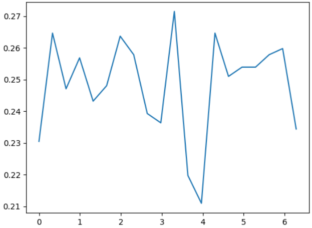
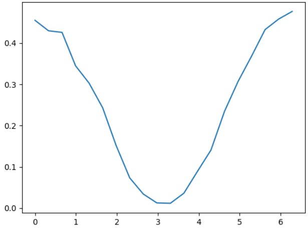


Figure: Valeur de l'intensité pour la deuxième expérience dans le contexte d'une variable caché locale.

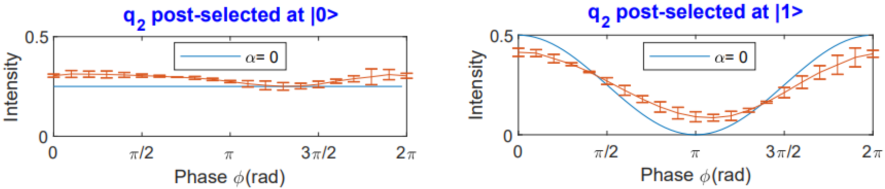
Expérience 2



(a) Mes résultats pour $q_2 = |0\rangle$



(b) Mes résultats pour $q_2 = |1\rangle$



(c) Résultats de l'articles

Conclusion

- Confirmation expérimentale de la dualité onde-corpuscule
- Absence de variable cachée locale démontrée
- Intérêt des ordinateurs quantiques pour la vérification de principes fondamentaux

Pranav D Chandarana, Angela Anna Baiju, Sumit Mukherjee, Antariksha Das, Narendra N Hegade, and Prasanta K Panigrahi.
Demonstration of quantum delayed-choice experiment on a quantum computer.
arXiv preprint arXiv:2004.04625, 2020.