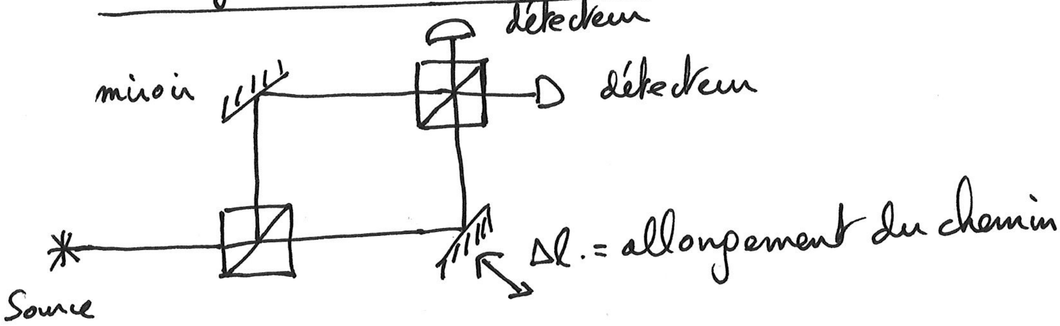
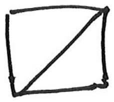
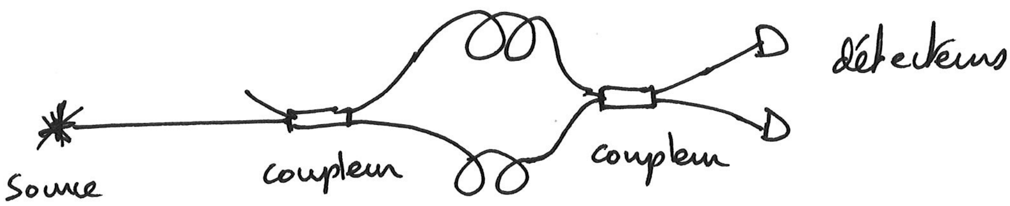
Interféromètre de Mach-Zehnder



 = beam splitter = miroir semi réfléchissant.

---

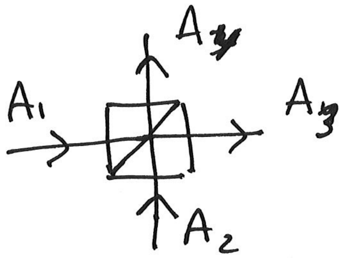
implémentation en fibres optiques



→ interférences en fonction de la longueur relative des chemins.

Lumière classique

beam splitter :



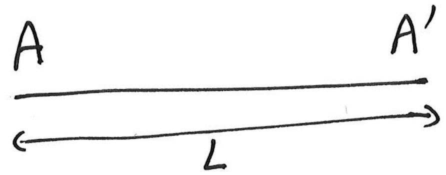
$$\begin{cases} A_1(t) = A_1 e^{-i\omega t} \\ A_2(t) = A_2 e^{-i\omega t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_3(t) = C A_1(t) + i S A_2(t) \\ A_4(t) = i S A_1(t) + C A_2(t) \end{cases}$$

avec $C = \cos\theta$
$S = \sin\theta$

convention : l'onde transmise ne subit aucun déphasage
l'onde réflechie subit un déphasage de $\pi/2$
(Remarque : d'autres conventions sont possibles)

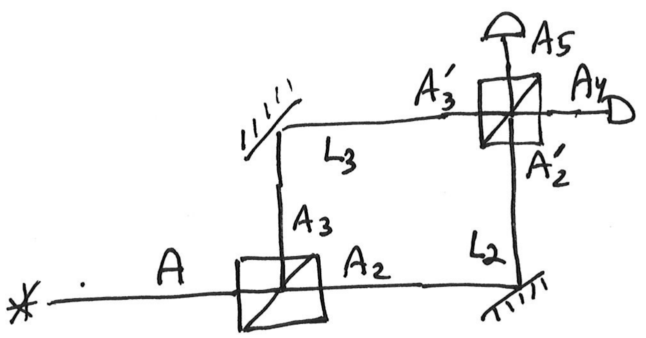
propagation :



$$A(t) = A e^{-i\omega t}$$
$$A'(t) = A e^{-i\omega t} e^{ikL}$$

détecteur $A(t) \longrightarrow D$ $I(t)$ = courant électrique

$$I(t) = e\,|A(t)|^2$$



$$A(t) = A e^{-i\omega t} \qquad I_{initial} = |A(t)|^2 = |A|^2$$

$$\begin{cases} A_2(t) = \dfrac{A(t)}{\sqrt{2}} \\ A_3(t) = i\,\dfrac{A(t)}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2'(t) = A_2(t)\, e^{ikL_2} \\ A_3'(t) = A_3(t)\, e^{ikL_3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_4(t) = \dfrac{A_3'(t)}{\sqrt{2}} + i\,\dfrac{A_2'(t)}{\sqrt{2}} \\ A_5(t) = i\,\dfrac{A_3'(t)}{\sqrt{2}} + \dfrac{A_2'(t)}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

$$\Delta\phi = kL_3 - kL_2$$

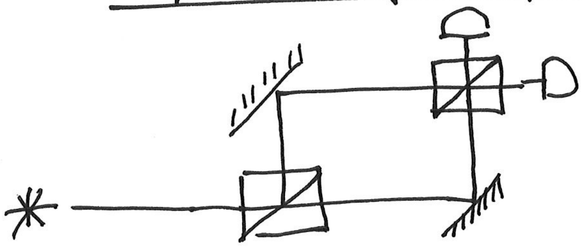
$$\rightarrow \begin{cases} A_4(t) = \dfrac{A}{2}\left(i\,e^{ikL_3} + i\,e^{ikL_2}\right) \\ A_5(t) = \dfrac{A}{2}\left(-e^{ikL_3} + e^{ikL_2}\right) \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} I_4 = \dfrac{|A|^2}{4}\left|e^{ikL_3} + e^{ikL_2}\right|^2 = |A|^2 \cos^2 \dfrac{k(L_3 - L_2)}{2} = |A|^2 \cos^2 \dfrac{\Delta\phi}{2} \\ I_5 = |A|^2 \sin^2 \dfrac{\Delta\phi}{2} \end{cases}$$

Note : $I_4 + I_5 = I_{initial}$
garantit par notre convention.

V MZ D

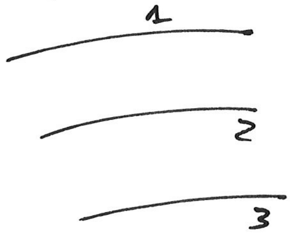
Expérience Quantique



détecteurs de photons unique.

Source de photons unique

état quantique



si le photon peut suivre plusieurs chemins, l'état est

$$|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle + \gamma|3\rangle$$

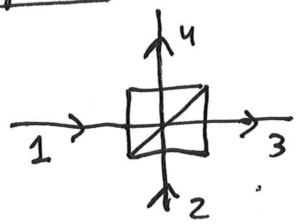
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 = 1$$

$|1\rangle$ = photon dans le chemin 1

$|2\rangle$ = ———— 2

$|3\rangle$ = ———— 3

beam splitter



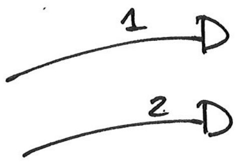
un beam splitter induit une évolution donnée par

$$|1\rangle \longrightarrow c|3\rangle + is|4\rangle$$

$$|2\rangle \longrightarrow is|3\rangle + c|4\rangle$$

La matrice $\begin{pmatrix} c & is \\ is & c \end{pmatrix}$ est unitaire.

détecteur de photon unique



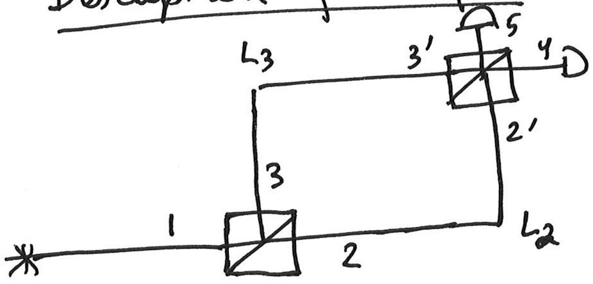
mesure dans la base $|1\rangle$, $|2\rangle$

si l'état est $|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle$

$P(\text{click } 1) = |\alpha|^2$

$P(\text{click } 2) = |\beta|^2$

Description Quantique



initialement $|\psi\rangle = |1\rangle$: 1 photon dans chemin 1.

$$\longrightarrow |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |2\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} |3\rangle$$

$$\longrightarrow |\psi\rangle = \frac{e^{ikL_2}}{\sqrt{2}} |2'\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} e^{ikL_3} |3'\rangle$$

$$= \frac{1}{2}\left(e^{ikL_2} - e^{ikL_3}\right)|5\rangle + \frac{i}{2}\left(e^{ikL_2} + e^{ikL_3}\right)|4\rangle$$

Proba détection en 4 $= P(\text{click } 4) = \cos^2 \frac{\Delta\phi}{2}$

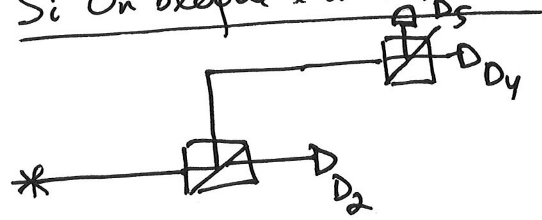
——— 5 $= P(\text{click } 5) = \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2}$

$(\Delta\phi = kL_2 - kL_3)$

Le photon est simultanément dans les chemins 2 et 3

~~Delayed Choice Experiment : on peut changer la phase $\Delta\phi$ lorsque le photon soit dans l'interféromètre.~~

Si On bloque l'un des chemins

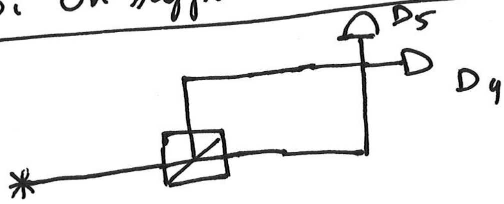


$P(D_2 = \text{click}) = \frac{1}{2}$

$P(D_4 = \text{click}) = \frac{1}{4}$

$P(D_5 = \text{click}) = \frac{1}{4}$

Si On supprime le beam splitter de sortie



$P(D_4 = \text{click}) = \frac{1}{2}$

$P(D_5 = \text{click}) = \frac{1}{2}$

Delayed Choice experiment (Wheeler 1978)

$\left.\begin{array}{l} \text{On peut } \left\{\begin{array}{l}\text{enlever}\\ \text{remettre}\end{array}\right\} \text{ le beam splitter} \\ \text{On peut changer la phase } \Delta\phi \end{array}\right\}$ après que le photon soit entré dans l'interféromètre.

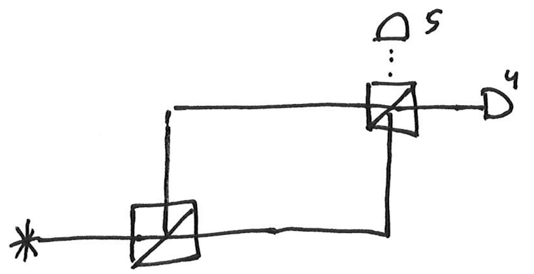
($\Rightarrow$ toute interprétation où l'on suppose que le photon "sait à l'avance ce qu'il doit faire" ne tient pas).

Elitzur-Vaidman bomb tester (1993)

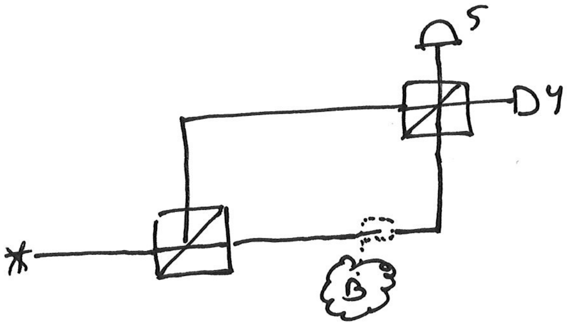
= bombe armée, prête à exploser.
la bombe explose si 1 seul photon touche le senseur.

= bombe non-armée.
le senseur n'est pas présent.

On dispose de bombes armées, et de bombes non-armées.
Comment sélectionner une bombe armée ?



on règle $\Delta\phi = 0$ $\longrightarrow$ $P(\text{click } 4) = 1$ $\quad P(\text{click } 5) = 0$



si la bombe n'est pas armée : $P(\text{click } 4) = 1$ $\quad P(\text{click } 5) = 0$

si la bombe est armée : $P(\text{BOUM}) = \frac{1}{2}$

$P(\text{click } 4) = \frac{1}{4}$

$P(\text{click } 5) = \frac{1}{4}$

$\longrightarrow$ un click en 5 signale qu'on a une bombe armée, et elle n'a pas explosé !