



GAP Optique, Université de Genève

La non-localité quantique

Valerio Scarani

GAP-Optique, Université de Genève

www.gapoptique.unige.ch/Members/Valerio.Scarani



Plan de l'exposé

- ◆ Interférences à **une** particule
 - ◆ Aléatoire & Probabilités
 - ◆ Dualité onde-corpuscule
- ◆ Interférences à **deux** particules
 - ◆ Corrélations
 - ◆ Non-localité, ou l'échec des explications classiques
 - ◆ Plus que la dualité: l'intrication
- ◆ Conclusions



GAP Optique, Université de Genève

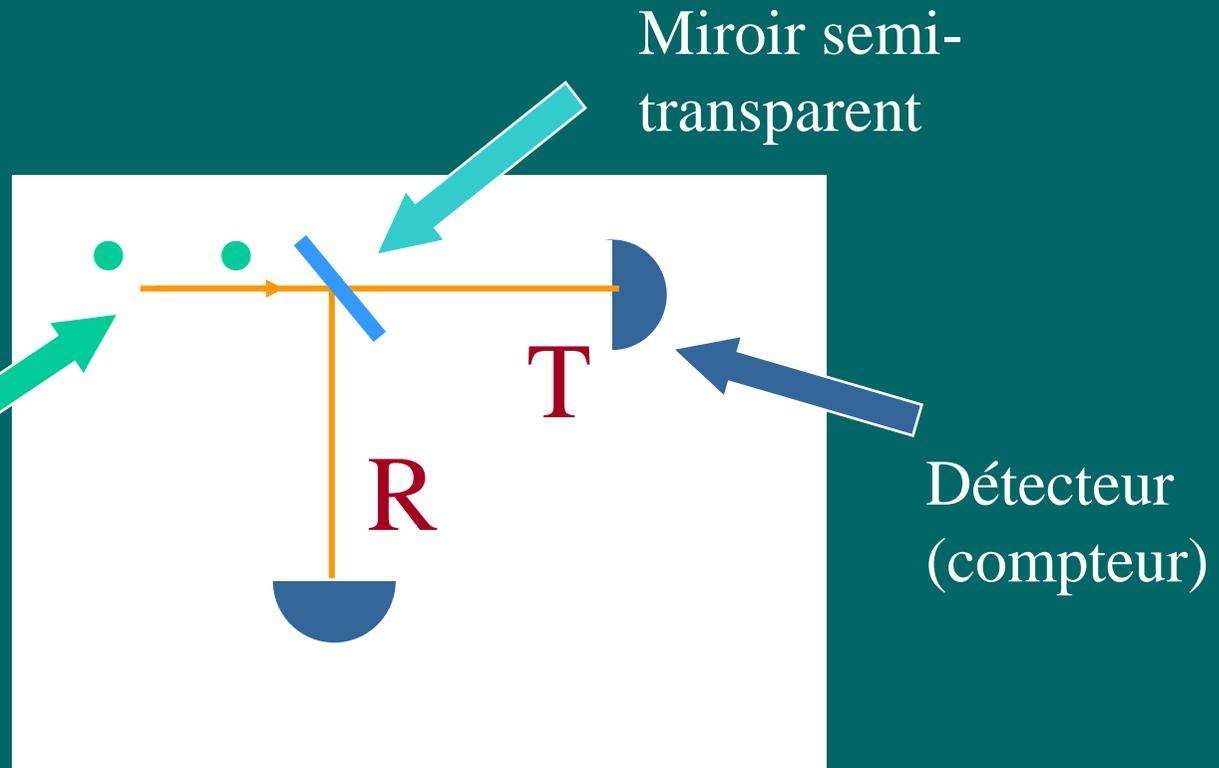
Partie 1

Interférences à **une** particule



Expérience #1

Faisceau de particules, l'une après l'autre (p.ex. photons)

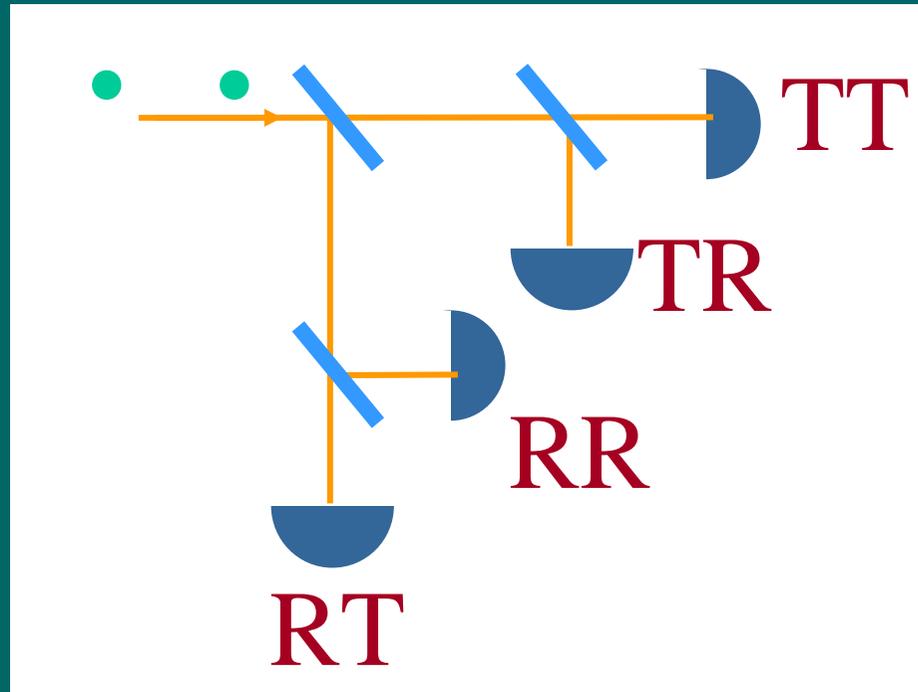


Deux chemins possibles, transmis (T) et réfléchi (R)
Chaque particule est indivisible: détectée soit en T, soit en R
Le résultat pour chaque particule est aléatoire. 
Probabilités: $P(T) = P(R) = 1/2$.

... ce n'est que le début... 4



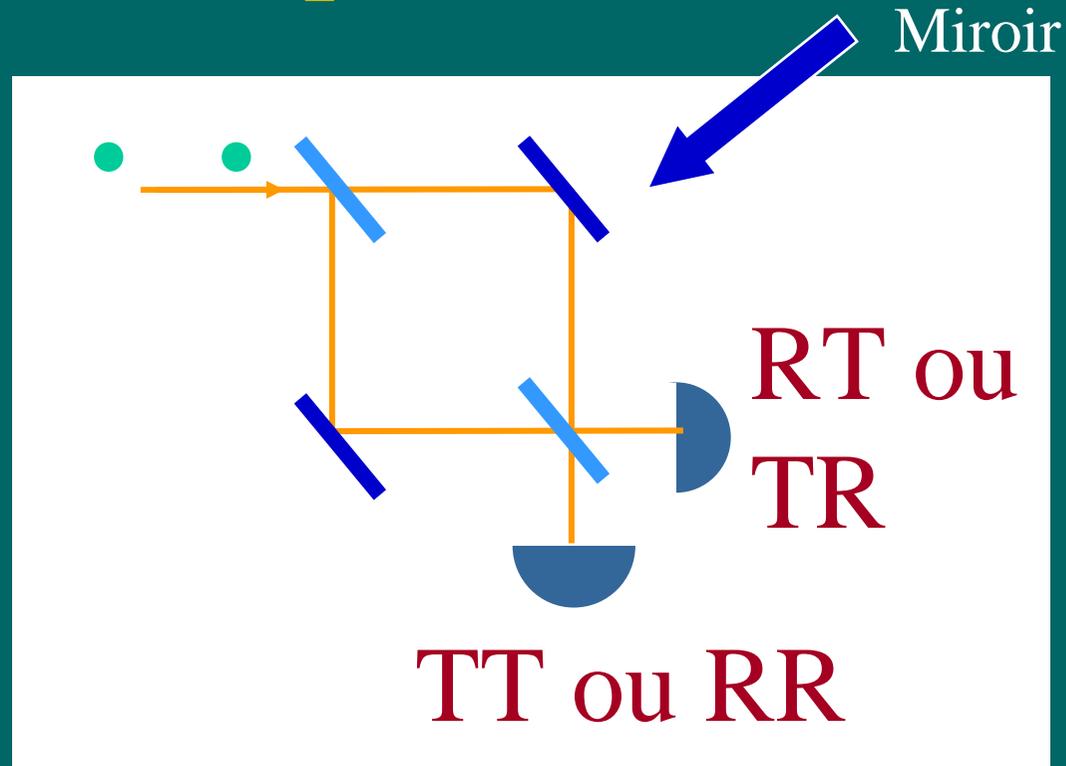
Expérience #2



Quatre chemins possibles, deux fois transmis (TT) etc.
Probabilités: $P(TT) = P(TR) = P(RR) = P(RT) = 1/4$.



Expérience #3



Encore quatre chemins possibles, deux fois transmis (TT) etc.

Probabilités: $P(TT) = P(TR) = P(RR) = P(RT) = 1/4?$

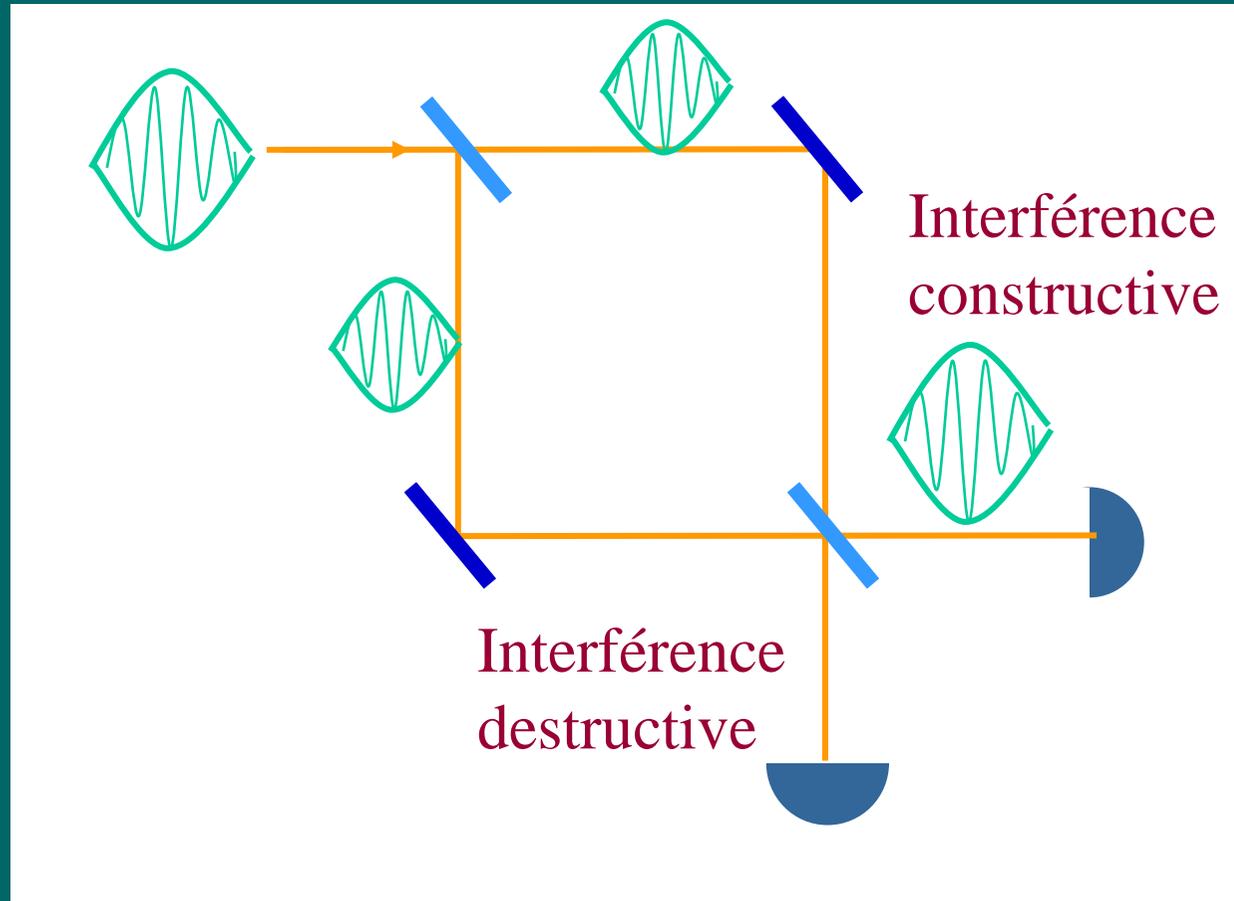
On observe $P(TT \text{ ou } RR) = 0, P(RT \text{ ou } TR) = 1.$ ← ???

« Principe d'indiscernabilité »: RT est indiscernable de TR etc.

2 fois « aléatoire » = certain!



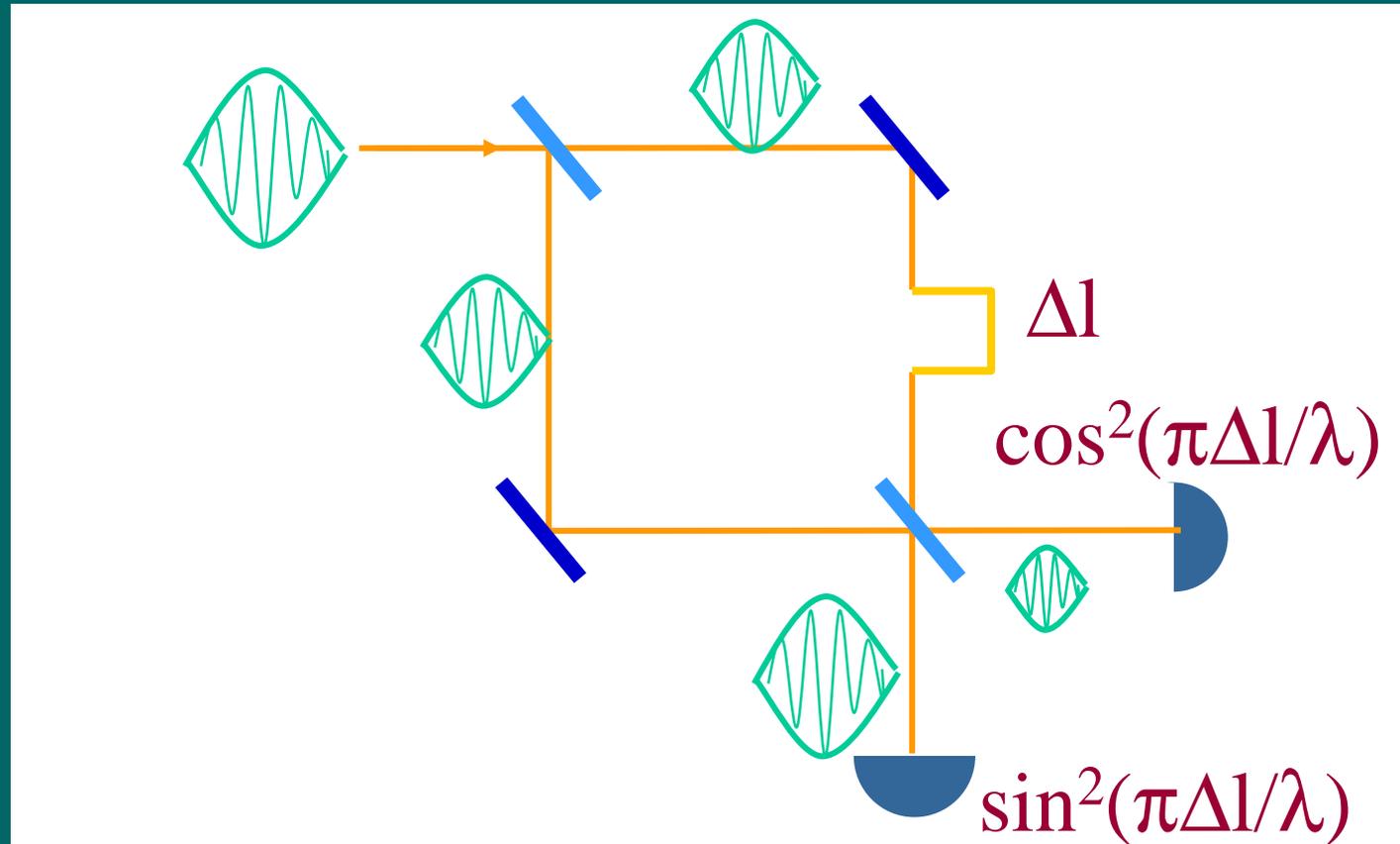
Description ondulatoire (1)



Phénomène d'interférence (Mach-Zehnder)



Description ondulatoire (2)



Exemple: $\Delta l = \lambda/2$: **$P(\text{TT ou RR}) = 1$, $P(\text{RT ou TR}) = 0$** .

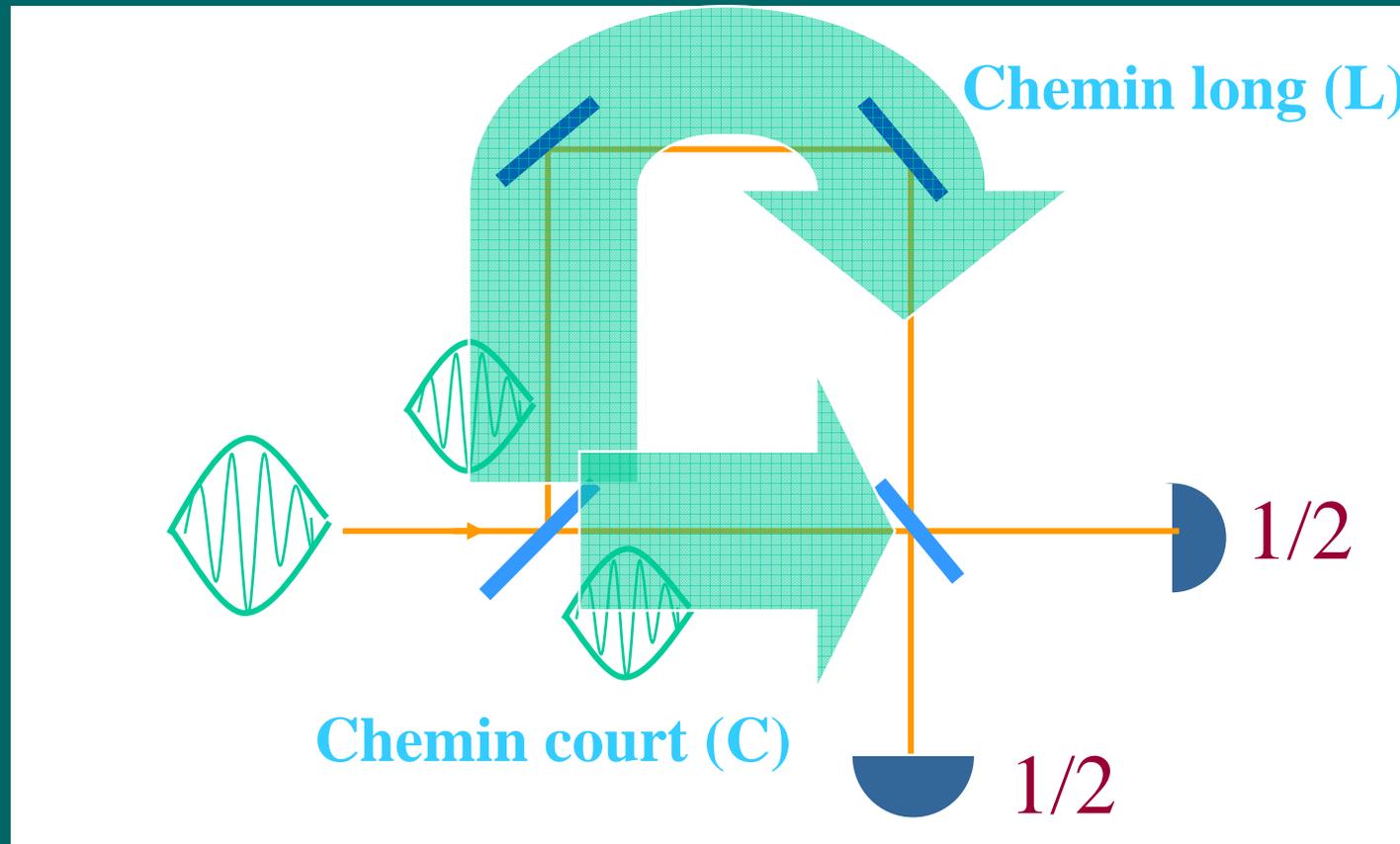
← ???

Modifier un seul chemin influence toutes les particules!

Dualité onde-corpuscule: chaque particule explore tous les chemins possibles, cependant elle est indivisible à la détection.



Description ondulatoire (3)



L'interférence existe tant que les paquets d'onde se rencontrent à nouveau: notion de **longueur de cohérence** (largeur du paquet d'onde). Pas d'interférence si l'interféromètre est déséquilibré. **Discernabilité en temps**: une onde arrive avant l'autre.



Conclusions de la Partie 1

- ◆ Chaque particule est indivisible lors de la détection, comme un **corpuscule**.
- ◆ Chaque particule explore tous les chemins possibles (délocalisation), comme une **onde**.
- ◆ Si certains chemins sont **indiscernables** (en particulier, si la particule n'a laissé aucune « trace »), on observe des interférences. Puisqu'il y a une seule particule à la fois, on parle d'**interférence à une particule**.

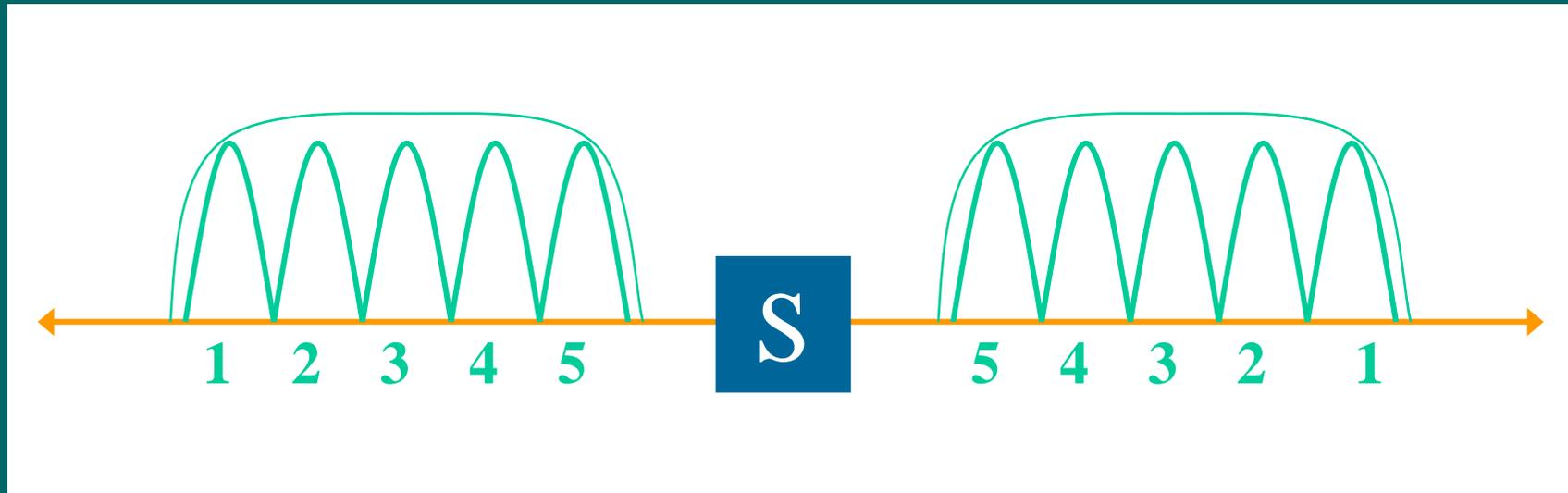


Partie 2

Interférences à **deux** particules



Production de deux particules corrélées



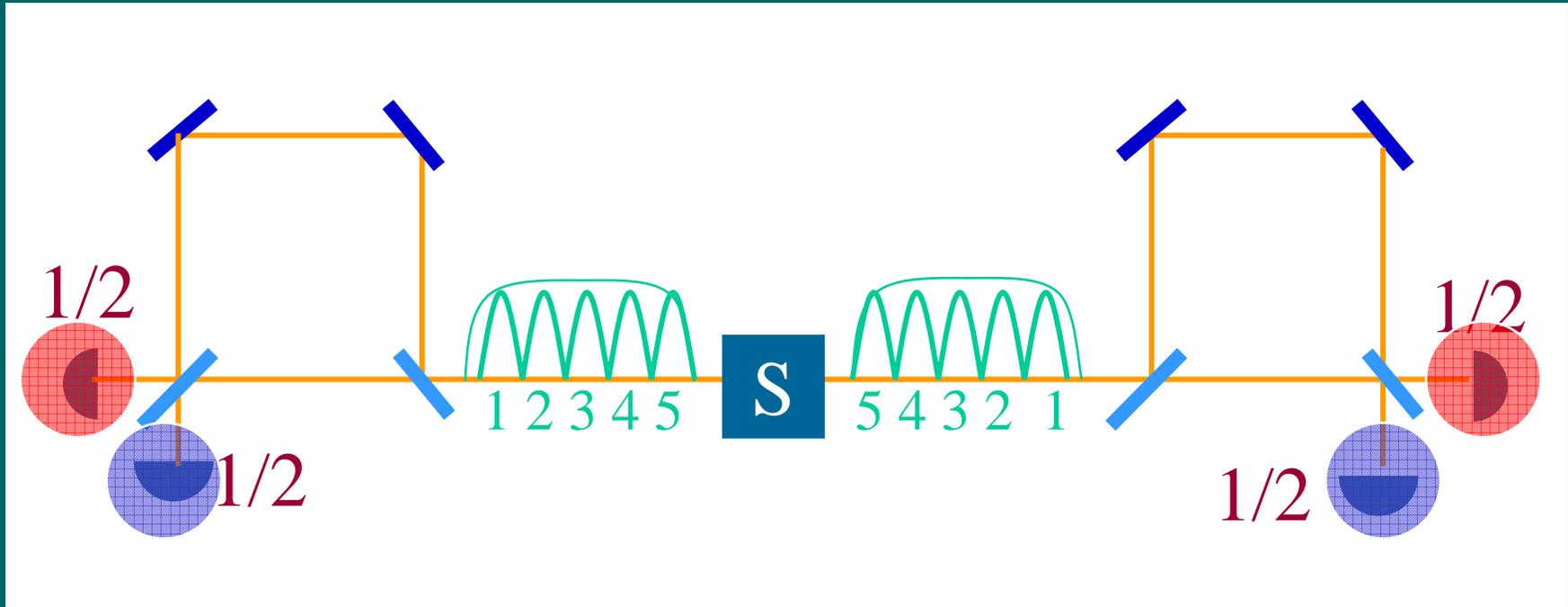
Le temps d'émission est incertain: **grande cohérence de la paire** (temps pendant lequel le processus est possible).

Mais si on détecte une particule, on sait avec précision quand l'autre a été émise: **petite cohérence des particules**.

Ce type de corrélation n'a aucun analogue avec des ondes classiques. On parle d'**intrication** (*entanglement*).



Interférence à deux particules (1)

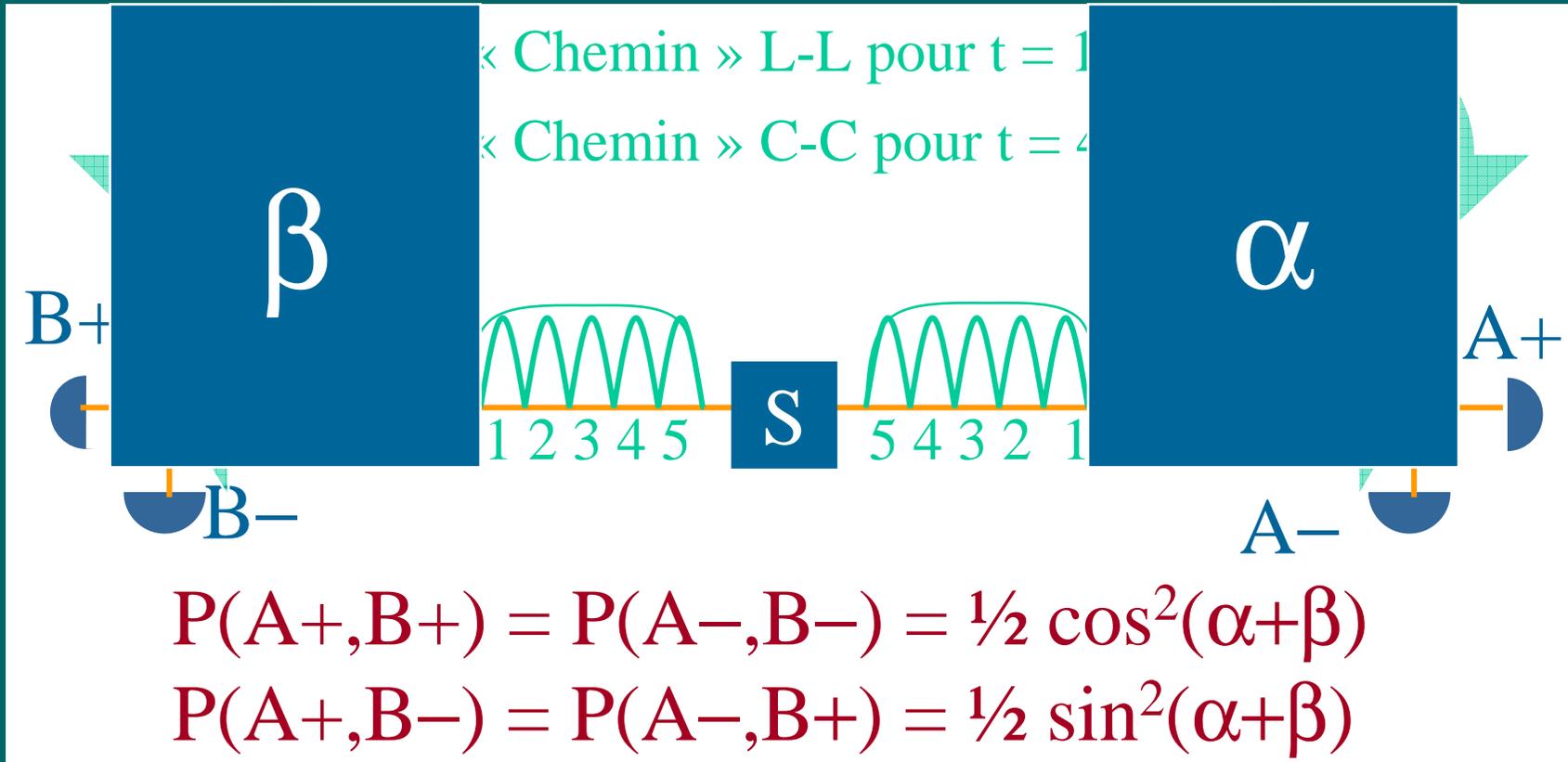


Dans le cas où les deux particules arrivent en même temps:
A droite, pas d'interférence: juste du hasard...
à gauche, pas d'interférence: juste du hasard...
... mais c'est le même hasard!



Interférence à deux particules (2)

Y a-t-il des chemins indiscernables? ($L-C=3$)



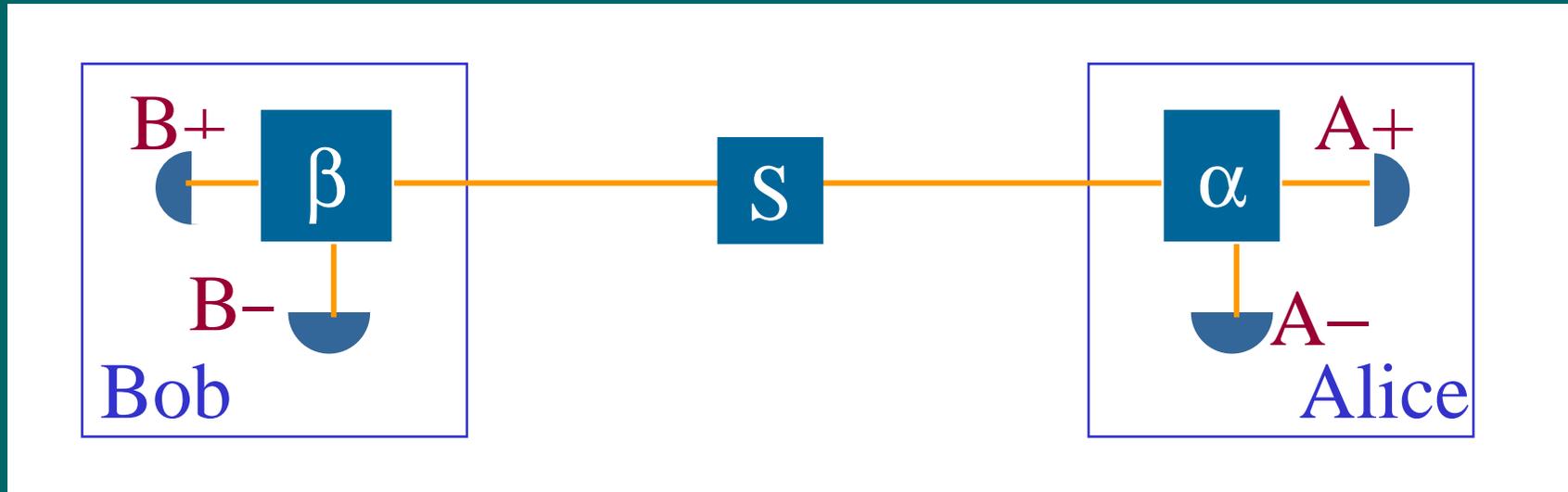
Dans le cas où les deux particules arrivent en même temps:

Interférences dans les **corrélations**!

Interférences **non-locales** (dépendent de la **somme $\alpha + \beta$**)!



Interférence à deux particules (3)



Alice et Bob sont séparés spatialement l'un de l'autre.

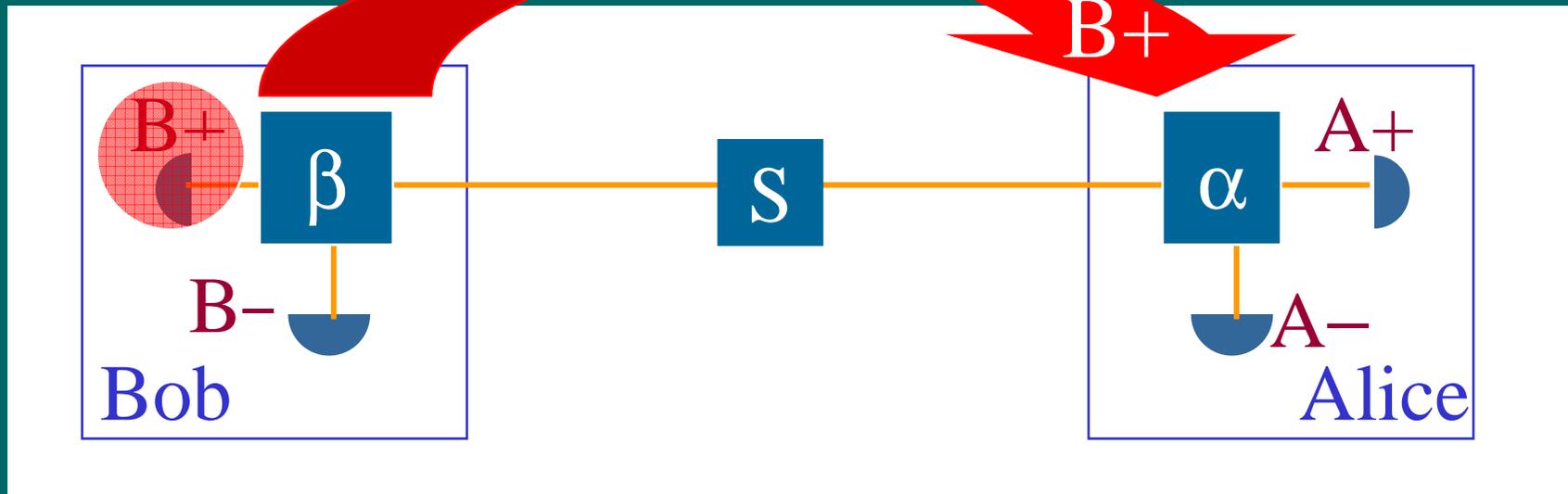
En recevant des particules quantiques intriquées, ils peuvent établir des corrélations.

Les corrélations dépendent de manière non-locale des valeurs de α (qu'Alice peut choisir) et de β (que Bob peut choisir).

Mais ne peut-on pas trouver un mécanisme? Essayons!



Explication 1: signal?



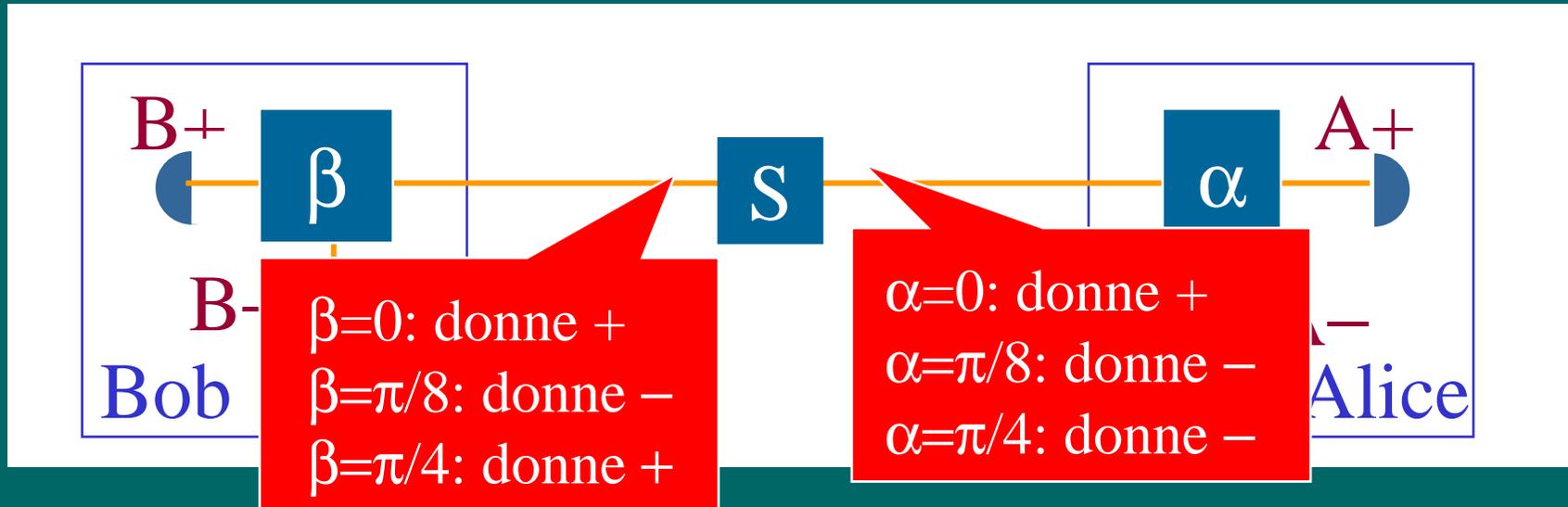
« C'est simple: la première particule qui arrive à la détection envoie de l'information à l'autre! »

Cependant...

Alice et Bob peuvent être à grande distance et les détections peuvent être presque simultanées: **un hypothétique signal devrait se propager plus vite que la lumière!**



Explication 2: corrélations à la source?



« Les corrélations étaient déjà décidées à la source. Il est facile d'établir des corrélations à distance, si on s'est mis d'accord auparavant (exemple: lever le bras droit ou gauche, selon qu'on rencontre un homme ou une femme). »

Cependant...

Un argument assez simple mais très profond permet d'exclure aussi cette explication: c'est le **théorème de Bell (1964)**.



Et qu'en dit la Nature?

- ◆ Les corrélations quantiques ont été observées dans un grand nombre d'expériences:
 - ◆ 1982, Orsay: Alain Aspect réussit la première série d'expériences concluantes (photons).
 - ◆ 1998, Innsbruck: le groupe de Zeilinger perfectionne les expériences d'Aspect (photons).
 - ◆ 1998, Genève: corrélations observées sur des distances de 10km par Gisin-Zbinden (photons).
 - ◆ Depuis lors: intrication à plus que deux particules, avec d'autres particules que les photons, téléportation etc.



Conclusions de la Partie 2

- ◆ La non-localité quantique consiste dans la possibilité d'établir des **corrélations à distance** (pas préparées à l'avance), sans qu'il y ait échange d'un signal.
- ◆ Cela est possible en préparant des particules quantiques « **intriquées** ».
- ◆ L'intrication est à l'origine d'autres phénomènes remarquables, p.ex. la **téléportation**.



GAP Optique, Université de Genève

Conclusion



Qu'est-ce que la matière?

- ◆ Une particule explore plusieurs chemins (délocalisation).
- ◆ Deux particules se comportent comme un seul objet délocalisé (non-localité).
 - ◆ La notion de dualité onde-corpuscule montre ses limites ici: une particule, c'est bien plus qu'une onde et/ou un corpuscule!
- ◆ Nous avons parlé de **phénomènes**, pas de mathématiques: c'est la nature qui est « étonnante », pas la théorie quantique.



« Le commencement de la réflexion philosophique, pour les hommes d'aujourd'hui comme pour ceux d'antan, a été l'étonnement »

Aristote, Métaphysique, Livre 1 Partie 2

« Human kind / cannot bear very much reality »

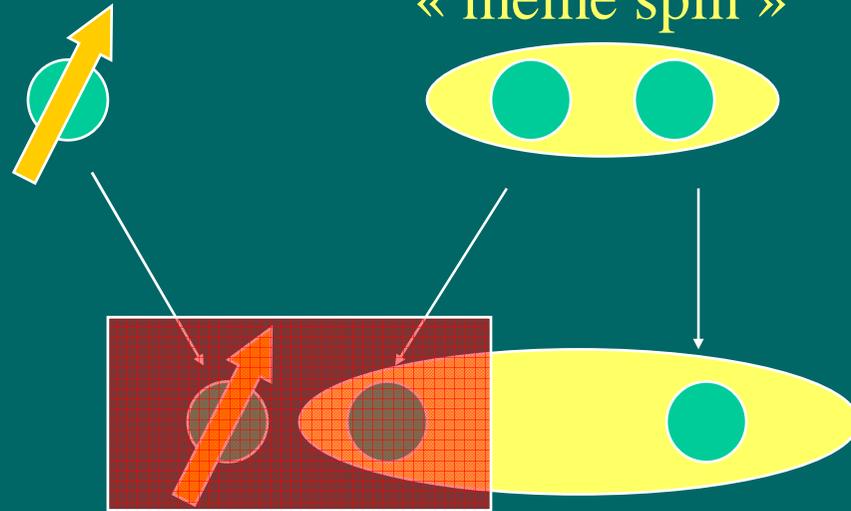
T.S. Eliot, Four Quartets (Burnt Norton vv. 42-43)



Appendice: téléportation

Préparation

« même spin »



Mesure « intriquante »

Résultat = « Mêmes »:



Résultat = « Opposés »:



En connaissant le résultat de la mesure, on peut tourner le spin pour réussir toujours la téléportation.