

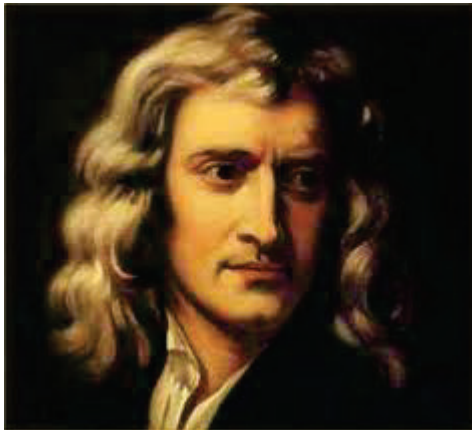
Quand la Science rejoint la science-fiction

Nicolas Gisin

Groupe de Physique Appliquée

Université de Genève

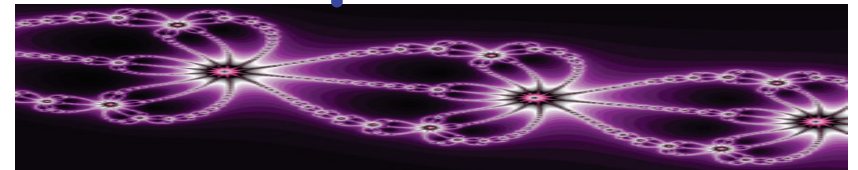
Newton



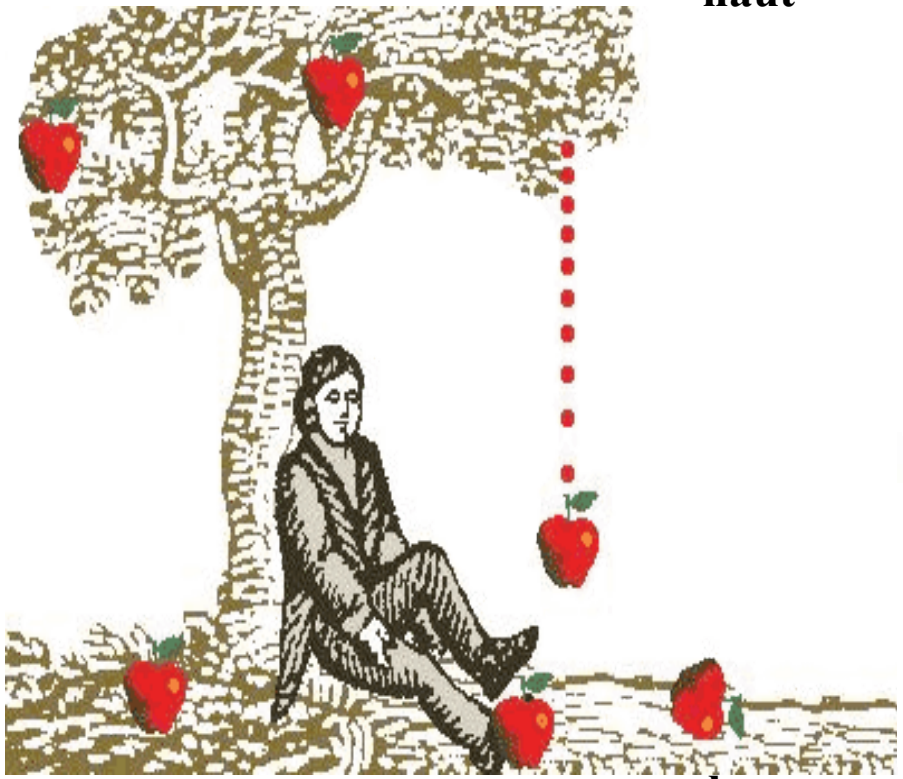
De

à la

Téléportation

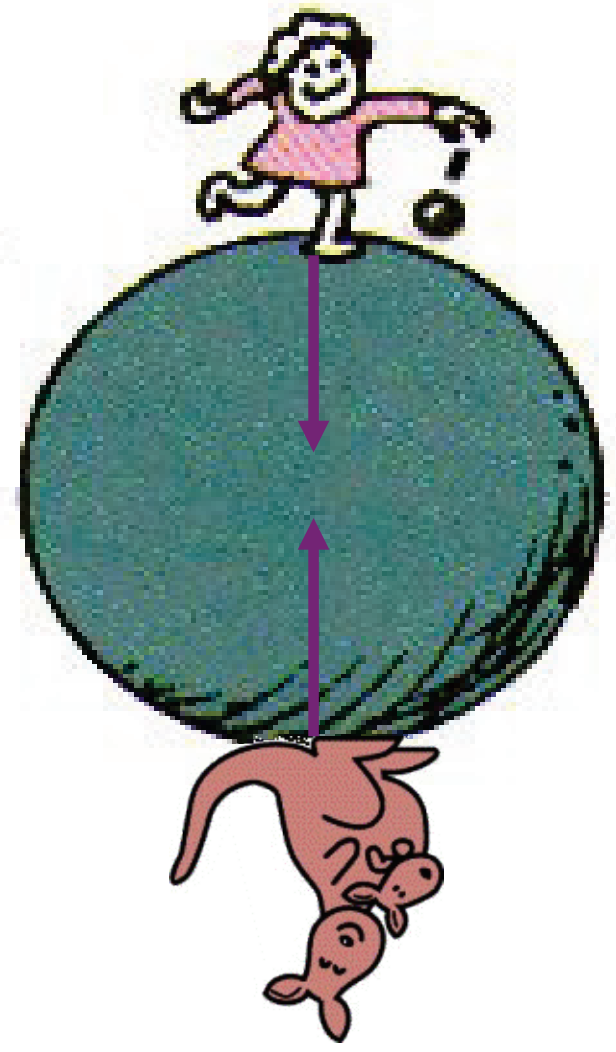


Quantique



haut

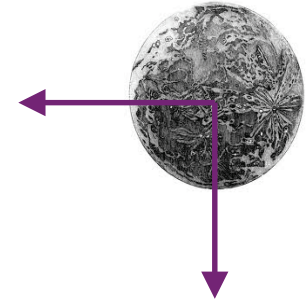
bas





Tout en tombant, la lune avance

⇒ la lune tombe à côté de la terre



Tout en tombant, la lune avance

⇒ la lune tombe à côté de la terre



$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{d^2}$$



Nos premières expériences de physique

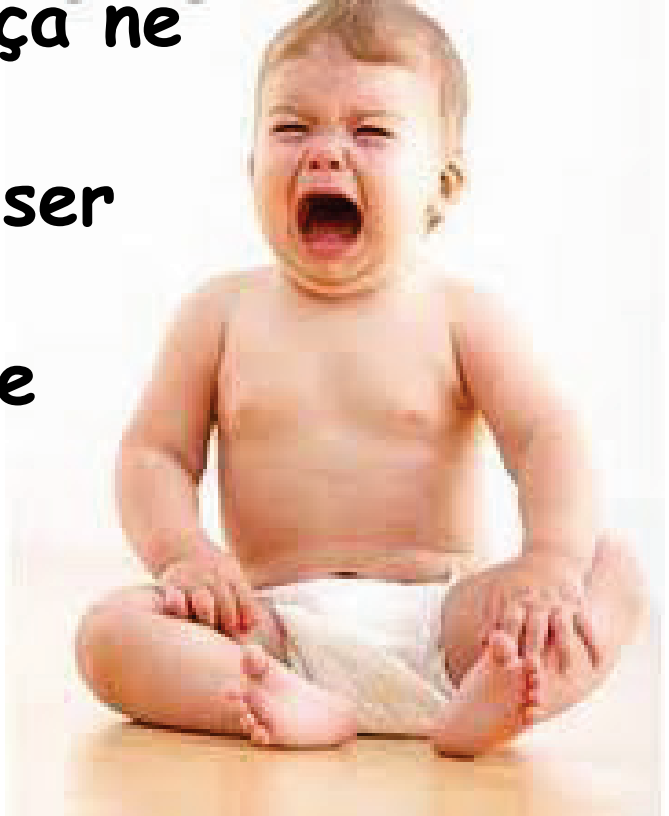


Pour interagir avec un objet on doit ramper vers lui, ou lui lancer des balles.



La télékinésie, ça ne marche pas

De même la télépathie ça ne marche pas: aucune information ne peut passer d'un endroit à un autre sans un support physique qui porte cette info.



doudou-shop.com

Une bonne question

Dis papa/maman, comment elle fait la lune pour savoir dans quelle direction elle doit tomber ?

Est-ce que la lune (et votre corps) utilise une sorte de bâton pour sonder la présence de la terre ? ou est-ce qu'elle lui lance des sortes de balles ?

Voici une excellente question, on va pouvoir faire de la vraie physique !



Newton se posait cette grave question



*Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à **distance**, à travers le vide, sans la médiation de quelque autre chose pour transporter l'action et la force de l'un à l'autre, cela est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence aux problèmes philosophiques ne peut y tomber.*

Isaac Newton

Papers & Letters on Natural Philosophy and related documents

Edited by Bernard Cohen, assisted by Robert E. Schofield

Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1958



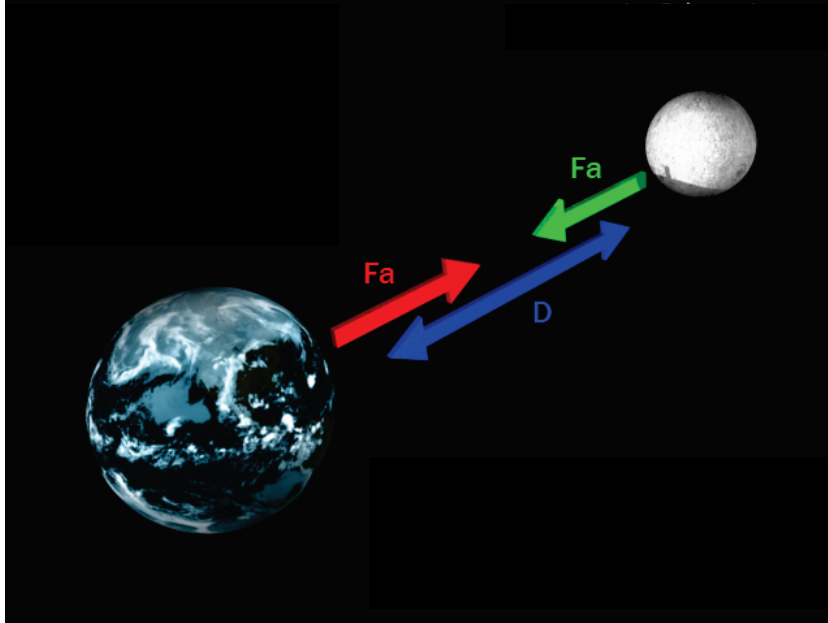
Newton



Il faut être fou pour croire en ma théorie de la gravitation Universelle!

Pourtant, cette théorie a dominé la Science pendant près de trois siècles et on l'enseigne encore aujourd'hui.

La non-localité selon Newton permet la télépathie



Selon Newton, si on déplaçait un rocher sur la lune cela aurait un effet **immédiat** sur notre poids sur Terre.

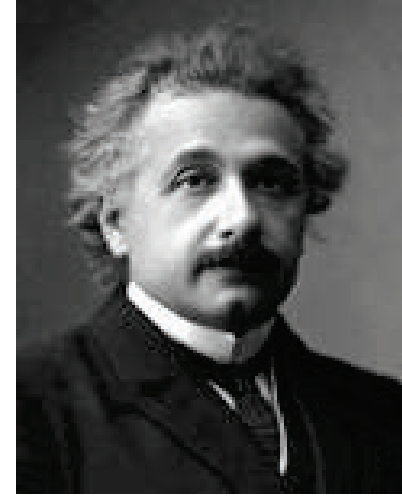
Ce serait de la télépathie!

Si on avait fait l'expérience, on aurait:

1. falsifié la théorie de Newton, et
2. trouvé que la gravitation se propage à la vitesse de la lumière.



Einstein

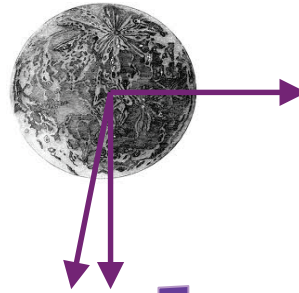


La question enfantine de « comment la lune sait dans quelle direction tomber » n'a été résolue que par Einstein et sa théorie de la relativité générale.

En gros, la Terre, la lune et tout corps (le votre, la pomme, etc) lancent en permanence de petites balles dans toutes les directions.

Ces petites balles s'appellent des gravitons.

Elles n'ont pas de masse, tout comme les particules de lumière (les photons) et elles se déplacent à la vitesse de la lumière.



C'est pas beau la physique ?



A cause du délai de propagation des gravitons, la lune « tombe » très légèrement à côté du centre de la terre.



C'est pas beau la physique ?

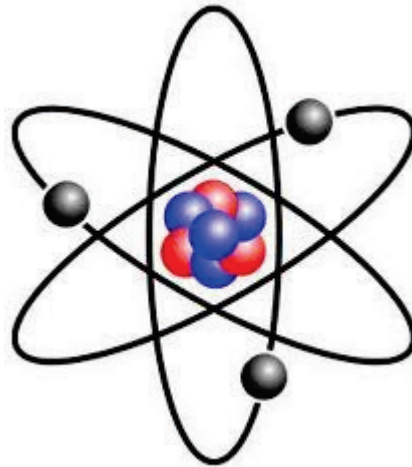
Mais ce n'est pas fini. Environ 10 ans après la relativité générale, arrive la théorie quantique qui décrit le monde des atomes et des photons (particules de lumière).



Schrödinger



$$\dot{\Psi} = -i \cdot H \cdot \Psi$$



Découverte à
Arosa en Suisse



Schrödinger



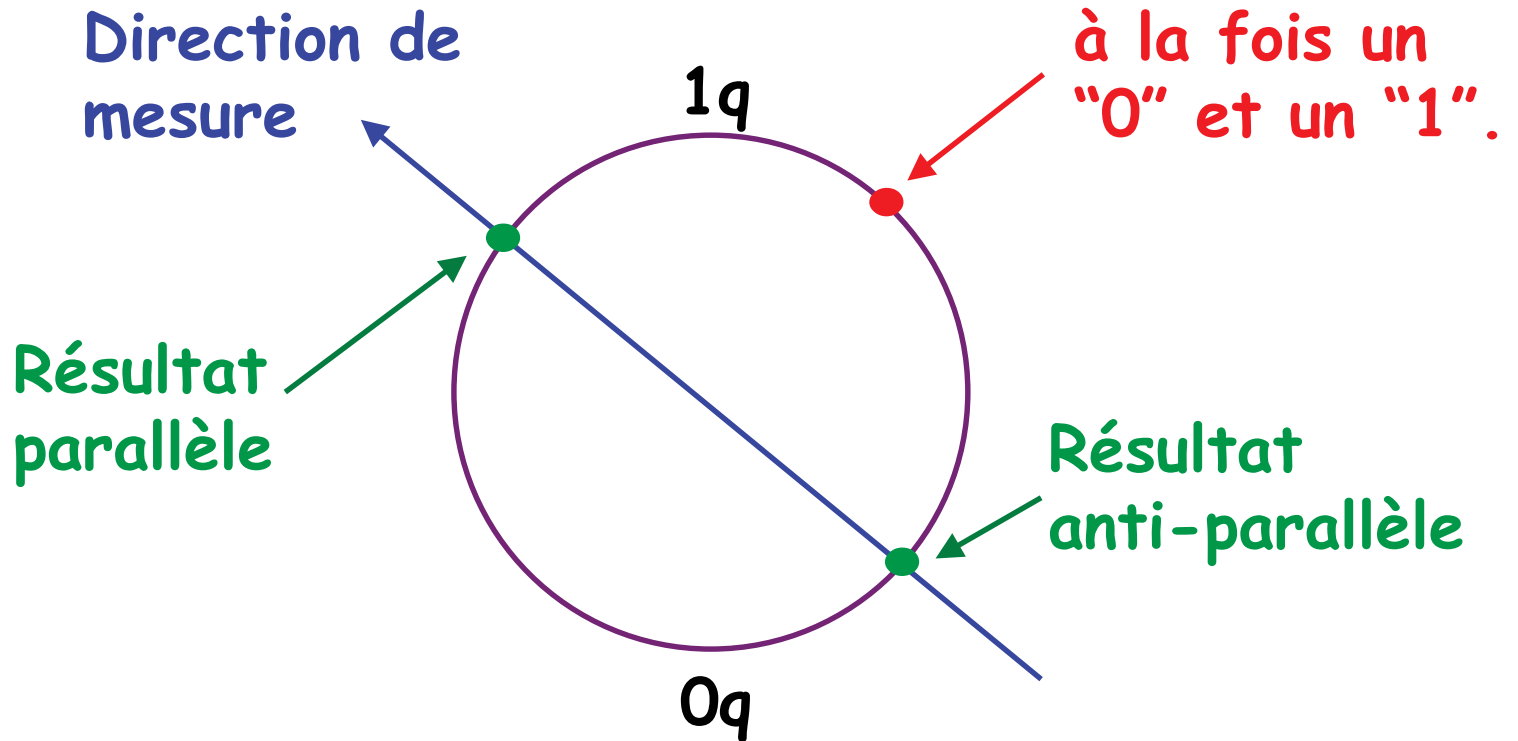
Dis papa/maman comment y font les électrons
pour savoir où est le noyau ?

On a envie de chercher les "gravitons"





Qubit = bit quantique





2 qubits

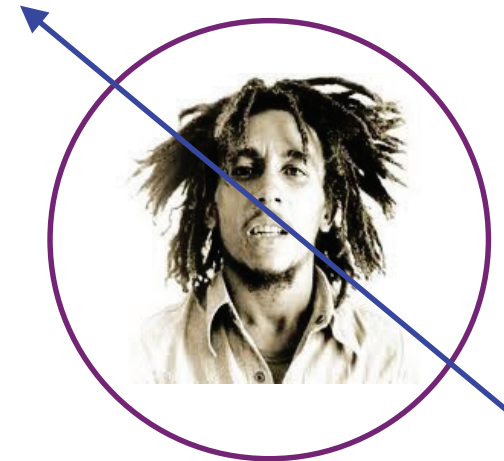
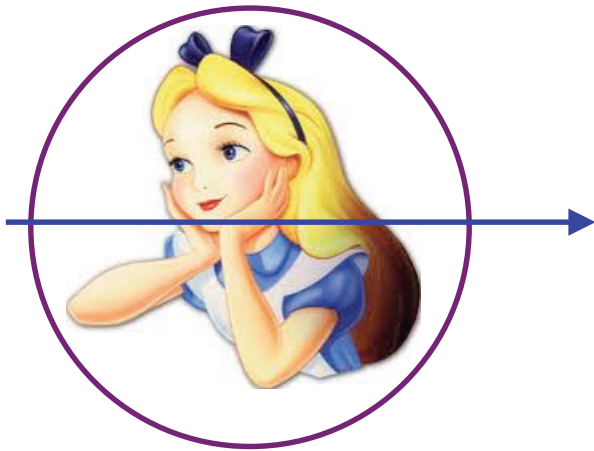
Alice

grande distance

Bob

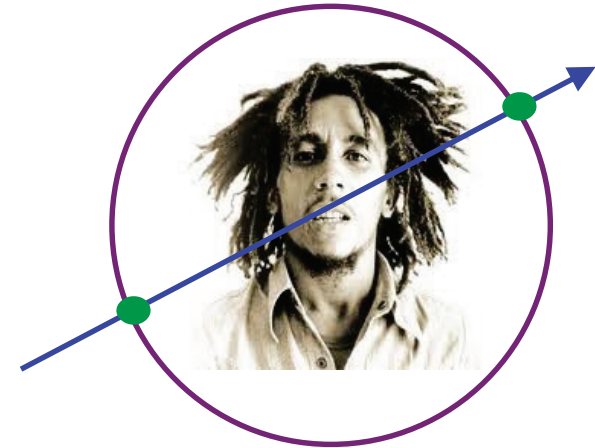
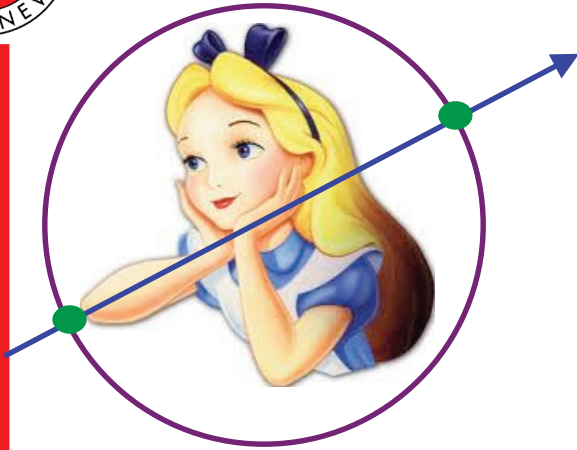
mesure a

mesure b





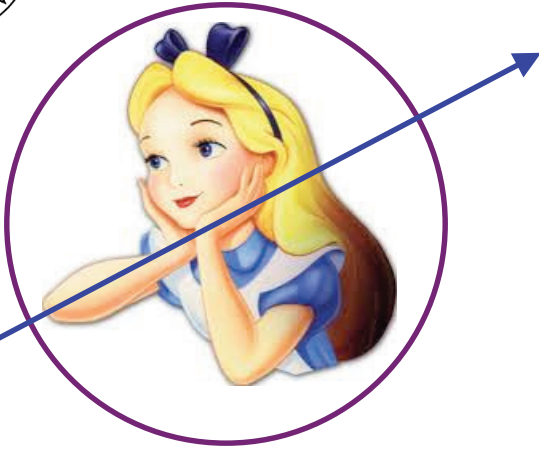
L'intrication de 2 qubits



Intrication: 1. mêmes mesures \Rightarrow mêmes résultats



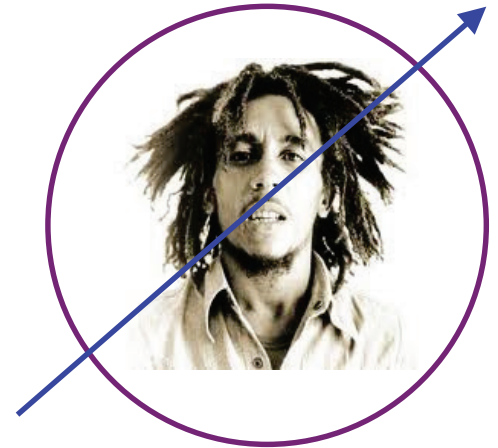
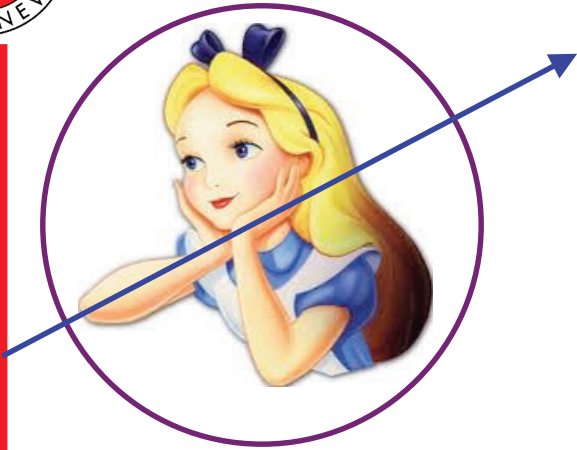
L'intrication de 2 qubits



- Intrication:**
- 1. mêmes mesures \Rightarrow mêmes résultats**
 - 2. mesures opposées \Rightarrow résultats opposés**



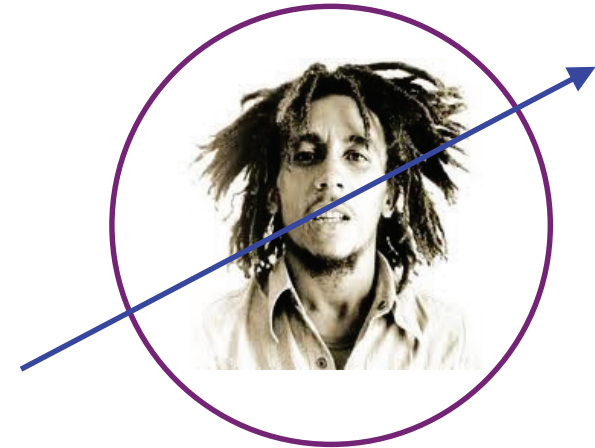
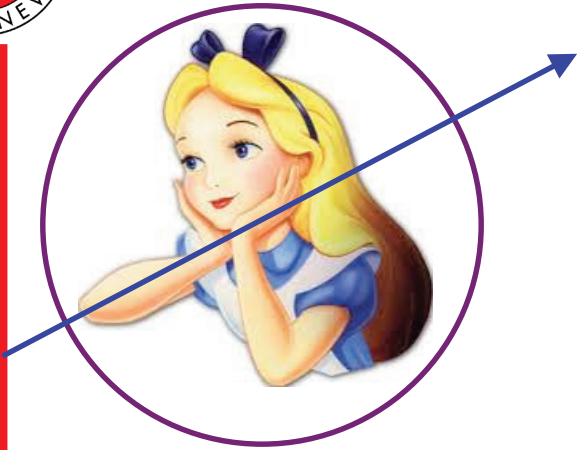
L'intrication de 2 qubits



- Intrication:**
1. mêmes mesures \Rightarrow mêmes résultats
 2. mesures opposées \Rightarrow résultats opposés
 3. mesures proches \Rightarrow grande probabilité d'obtenir les mêmes résultats



L'intrication de 2 qubits



Tout comme pour la gravitation, il y a une corrélation totale entre Alice (sur la lune) et Bob (sur la Terre).

Tout comme pour la théorie de Newton, la théorie quantique prédit que l'effet est immédiat.

Cherchons les "gravitons"

Satigny – Geneva – Jussy

Les "gravitons" devraient se propager à au moins 100'000 fois la vitesse de la lumière



Salart et al., Nature 454, 861, 2008
Cocciaro et al., PLA 375, 379, 2011
J-W Pan et al., PRL 110, 260407, 2013

Nature 454, 861, 2008



Il n'y a pas de "graviton".
L'histoire ne bégaie pas.

Dis papa/maman, comment y font
les bits quantiques pour
toujours donner la même réponse
aux mêmes questions ?

Hypothèse: ils font comme les bons étudiants:
ils apprennent une réponse pour chaque question.



Le jeu de Bell



Direction de mesure a



Direction de mesure b

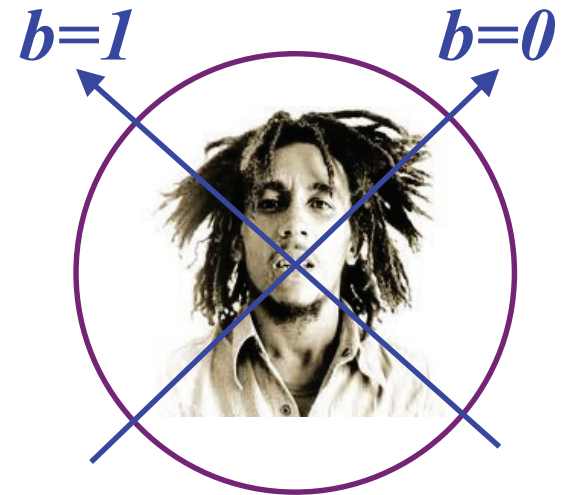
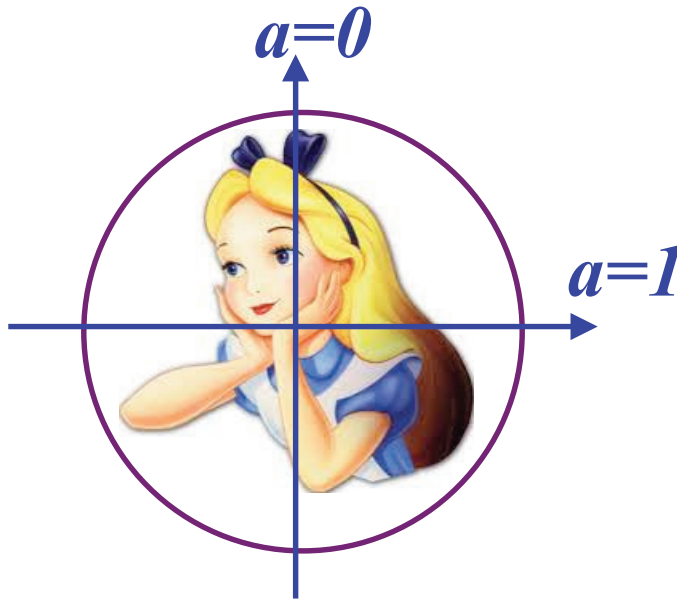




Règles du jeu de Bell:

Si $a \times b = 0$, Alice et Bob reçoivent un point s'ils donnent la même réponse.

Si $a \times b = 1$, Alice et Bob reçoivent un point s'ils donnent des réponses différentes.



Un tout petit peu de calcul



a	b	$a \times b$
0	0	$0 \times 0 = 0$
0	1	$0 \times 1 = 0$
1	0	$1 \times 0 = 0$
1	1	$1 \times 1 = 1 \Rightarrow$

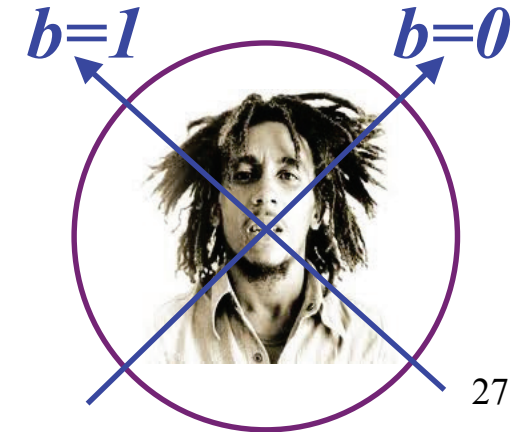
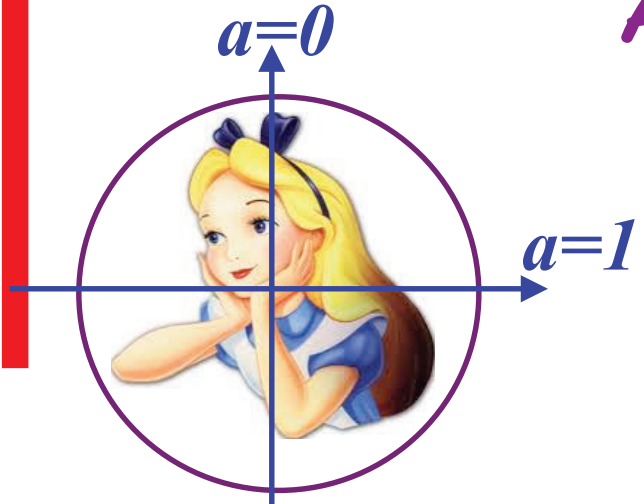
Le but du jeu de Bell

Réponses identiques

Réponses différentes

Ça a l'air très facile, ... sauf que Alice ne connaît que a et Bob que b .

GAP Optique Geneva University



Un tout petit peu de calcul



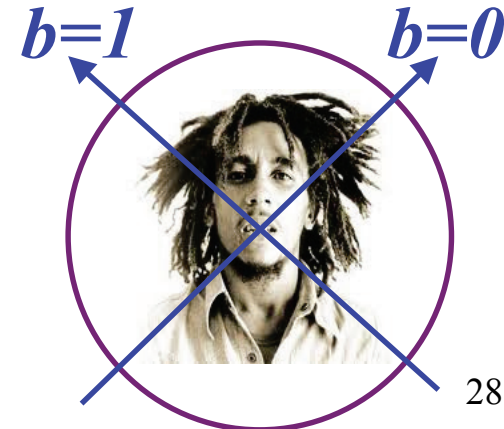
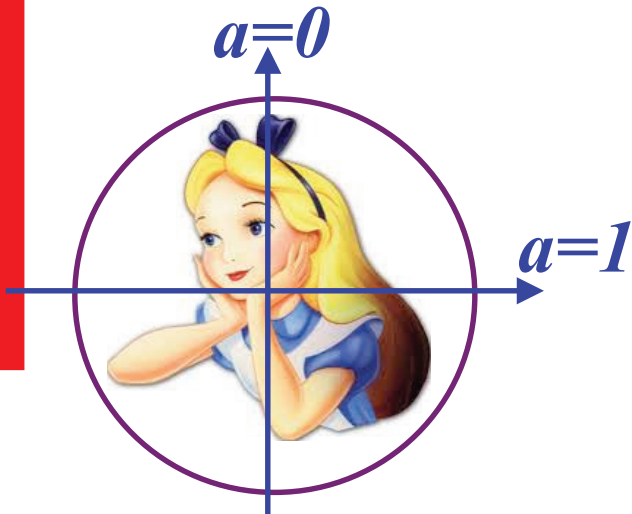
a	b	$a \times b$
0	0	$0 \times 0 = 0$
0	1	$0 \times 1 = 0$
1	0	$1 \times 0 = 0$
1	1	$1 \times 1 = 1 \Rightarrow$

Le but du jeu de Bell

Réponses identiques

Réponses différents

Dis papa/maman, comment peuvent-ils calculer $a \times b$ si aucun ne connaît à la fois a et b ?



Dis papa/maman, comment peuvent-ils calculer $a \times b$ si aucun ne connaît à la fois a et b ?

Comme $a \times b$ est égal à zéro 3 fois sur 4, Alice et Bob peuvent parier sur $a \times b = 0$ et s'arranger pour toujours produire des réponses identiques. Ainsi ils gagnent 3 fois sur 4.

Devoirs à domicile:

Montrer qu'Alice et Bob ne peuvent pas gagner plus souvent que 3 fois sur 4, (ni perdre plus souvent que 3 fois sur 4).



Alice et Bob ne peuvent pas gagner plus souvent que 3 fois sur 4

C'est assez intuitif, puisque Alice ne connaît pas b et que Bob ne connaît pas a .

Pour faire mieux il faudrait qu'Alice se faufile discrètement jusqu'à Bob, ou qu'elle lui envoie des balles avec sa question inscrite dessus.

Alice et Bob ne peuvent pas gagner plus souvent que 3 fois sur 4

C'est assez intuitif, puisque Alice ne connaît pas b et que Bob ne connaît pas a .

Aucun étudiant ne peut gagner plus souvent que 3 fois sur 4.

Sauf si les étudiants sont quantiques !





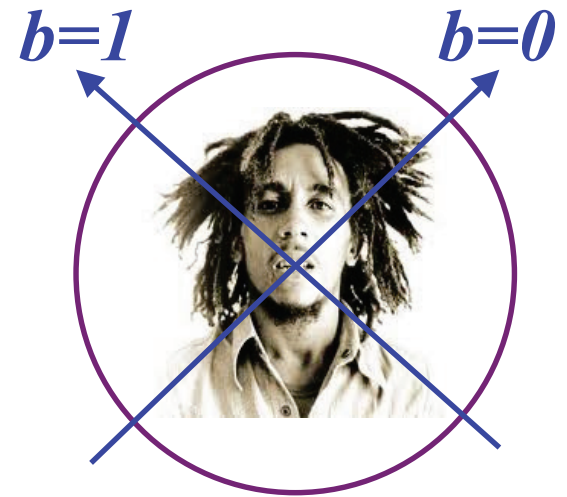
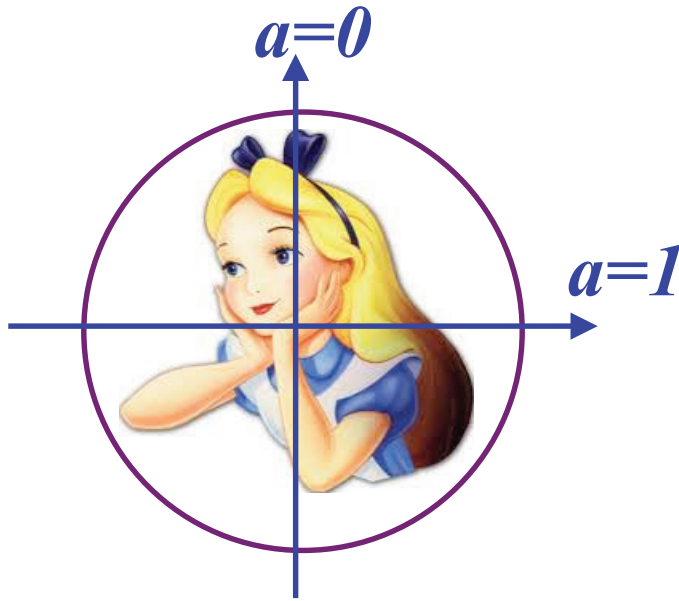
En effet ...

la théorie quantique prédit qu'on peut gagner au jeu de Bell plus souvent que 3 fois sur 4 !

Dis papa/maman, comment elle fait la Nature pour calculer $a \times b$ alors que a et b n'existent nulle part ensemble ?

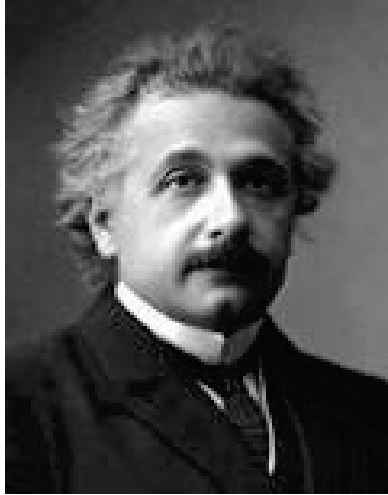


Prédictions quantiques: on peut gagner plus souvent que 3 fois sur 4 !



Ceux qui ne croyaient pas possible de gagner plus souvent que 3 fois sur 4:

Einstein



Schrödinger



de Broglie



et celui qui affirmait que c'est évident:



Bohr: « y a qu'à tenir compte de tous les appareils présents dans l'expérience. »



Et tous les autres qui considéraient cette petite bizarrerie comme anodine.

Genève a joué un grand rôle dans l'histoire de la non-localité quantique:

1964: John Stewart Bell, physicien au CERN, a inventé le jeu de Bell.

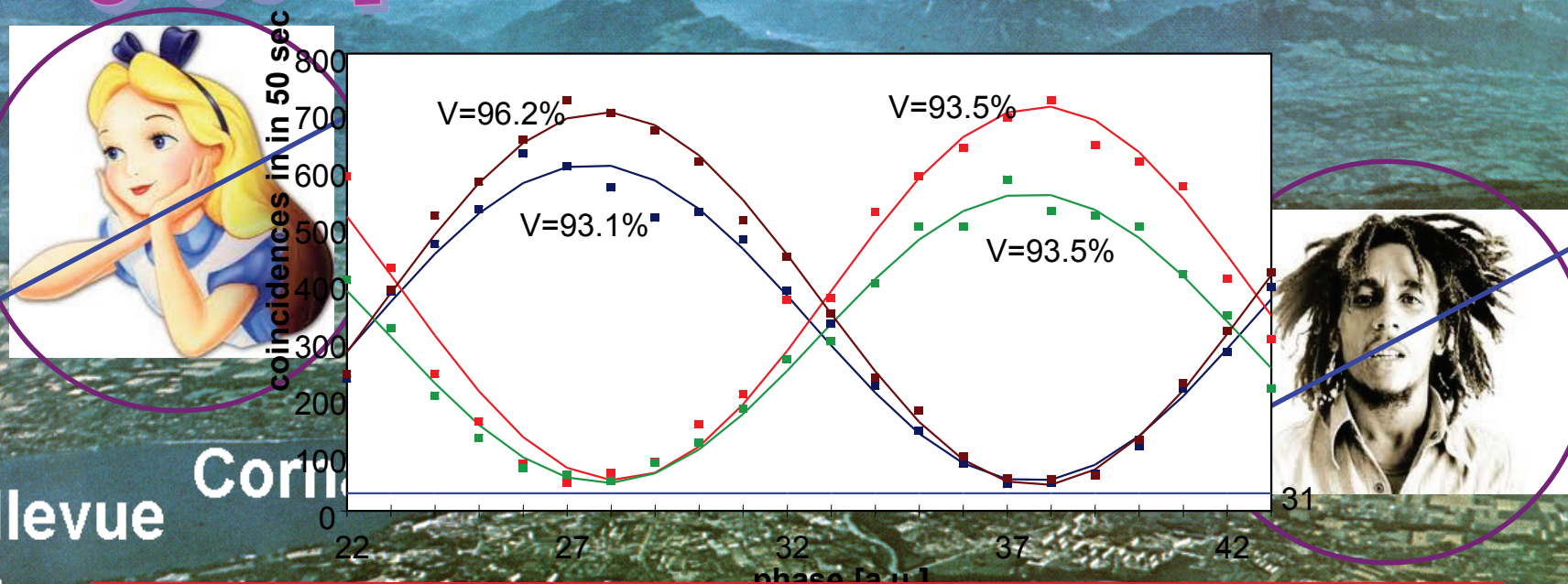
1991: J'ai démontré que pratiquement tous les états quantiques Ψ permettent de gagner plus souvent que 3 fois sur 4 au jeu de Bell.

1997: Mon équipe a réalisé la 1^{ère} démonstration du jeu de Bell hors laboratoire entre les villages de Bernex et de Bellevue.



Violation des inégalités de Bell sur 10 km, Genève, 1997

C'est pas beau la physique ?



Donc les qubits n'ont pas appris une réponse par question.

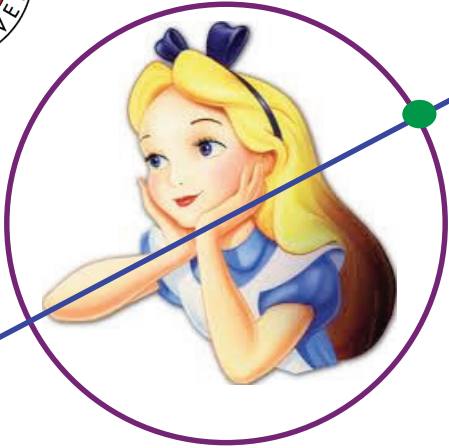




Dis papa/maman, mais alors, on peut utiliser l'intrication quantique pour faire de la télépathie ?



Le Hasard non local



Si le résultat d'Alice était prédéterminé, Bob pourrait le connaître.

Mais alors, Bob pourrait en déduire le choix de mesure fait par Alice.

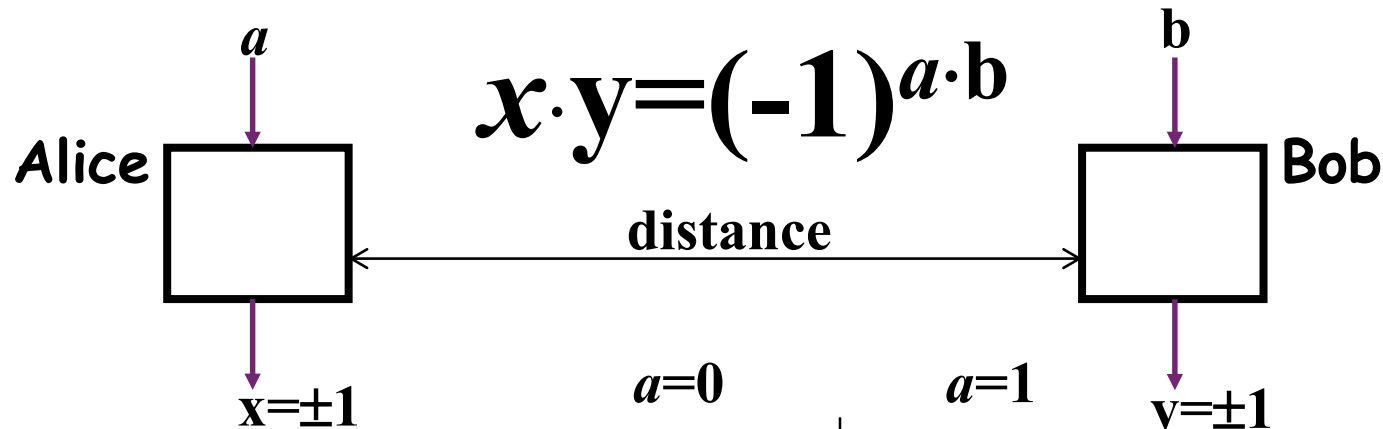
Ce serait de la télépathie (de la télékinésie d'information)!

Comme la télépathie est impossible,
le résultat d'Alice doit être produit au hasard.



Non local Randomness

- Assume that distances really exist.
- Assume there is no hyper-determinism conspiracy.



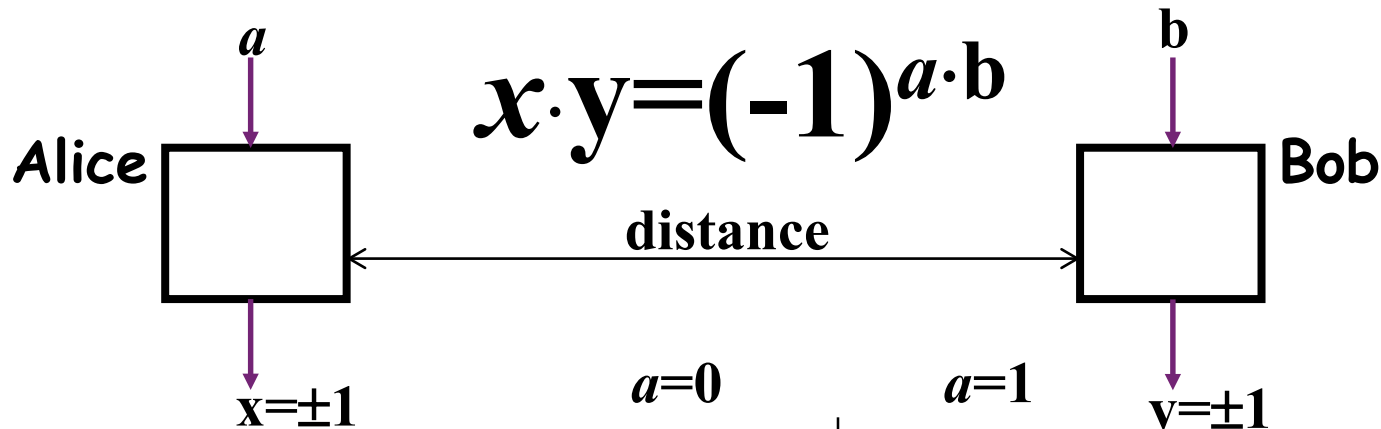
$P(x, y | a, b)$

	$a=0$	$a=1$
$b=0$	$x=1$ $x=-1$	$x=1$ $x=-1$
$b=1$	$y=1$	$y=1$
	$y=-1$	$y=-1$



Non local Randomness

- Assume that distances really exist.
- Assume there is no hyper-determinism conspiracy.



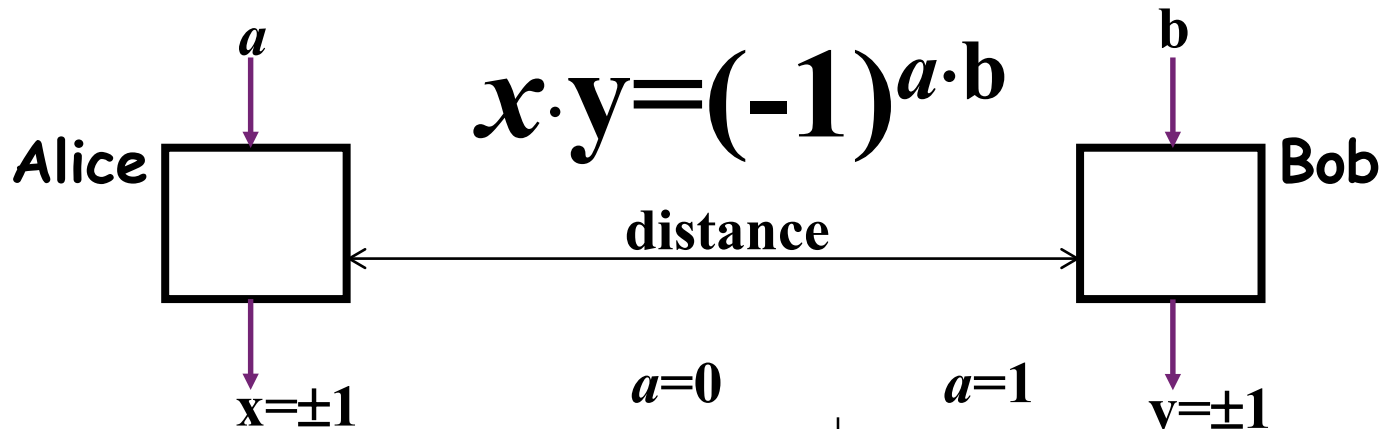
		$a=0$		$a=1$		
		$x=1$	$x=-1$	$x=1$	$x=-1$	
$b=0$	$y=1$	p	0	p	0	
	$y=-1$	0	p	0	0	
$b=1$	$y=1$		0	0		
	$y=-1$	0	p	p	0	

$P(x, y | a, b)$



Non local Randomness

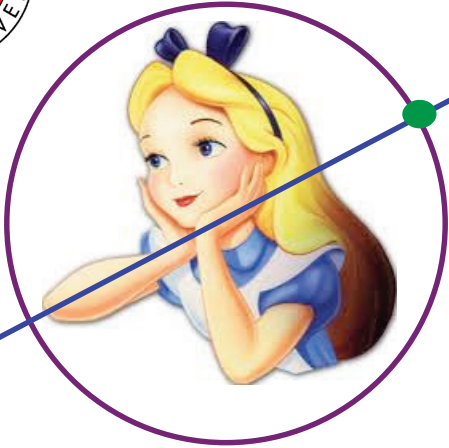
- Assume that distances really exist.
- Assume there is no hyper-determinism conspiracy.



		$a=0$		$a=1$	
		$x=1$	$x=-1$	$x=1$	$x=-1$
$b=0$	$y=1$	1/2	0	1/2	0
	$y=-1$	0	1/2	0	1/2
		$a=0$		$a=1$	
$b=1$	$y=1$	1/2	0	0	1/2
	$y=-1$	0	1/2	1/2	0

$P(x, y | a, b)$

Le Hasard non local



Dis papa/maman, c'est quoi le hasard ?

C'est un événement intrinsèquement non prévisible: un acte de pure création.

le résultat d'Alice doit être produit au hasard.



Le Hasard non local



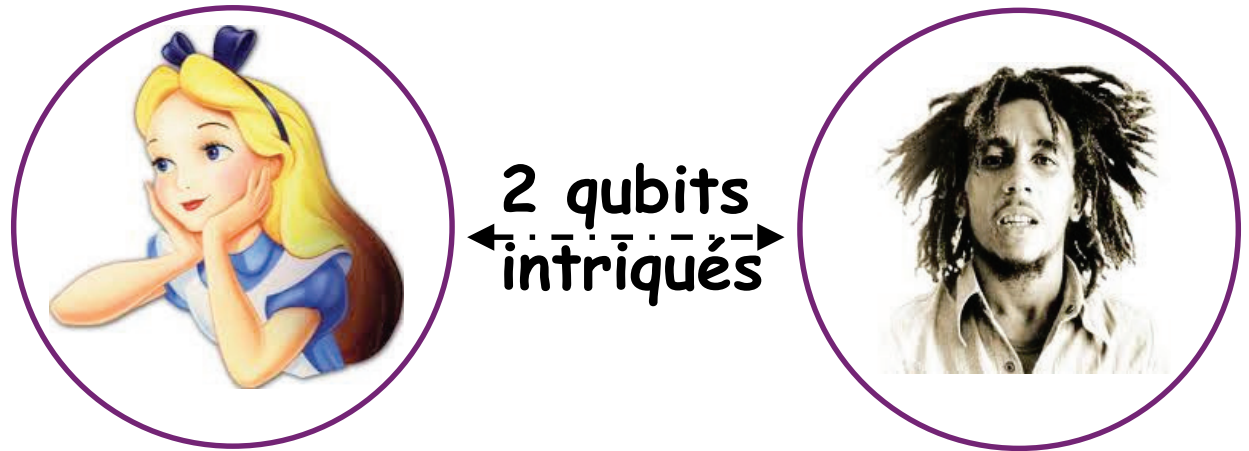
**Le hasard est ce qui différencie la non-localité quantique de la non-localité de Newton:
Le hasard est ce qui empêche d'utiliser la non-localité quantique pour des communications sans support physique:
Le hasard empêche la télépathie !**



Un petit peu de philosophie

- L'intrication - le hasard non local - est une nouvelle forme de causalité. Elle est la cause de corrélations: même question \Rightarrow même réponse.
- Une fois que l'on admet l'existence d'un vrai hasard (acte de pure création), rien n'empêche ce vrai hasard de se manifester en plusieurs endroits, du moment que cela ne permet pas la télépathie.
- Le vrai hasard, en particulier le hasard non local, surgit, en quelque sorte, de l'extérieur de l'espace et du temps, dans le sens qu'aucune histoire se déroulant dans l'espace au cours du temps ne peut le raconter.

Téléportation quantique



Mêmes questions \Rightarrow mêmes réponses
(au hasard, mais mêmes réponses)



Téléportation quantique

qubit à
téléporter



2 qubits
intriqués



Si je vous posais la même
question, me donneriez-
-vous la même réponse ?

!! Les 2 qubits peuvent
répondre "oui" en se mettant
ensemble dans un état intriqué !!



Téléportation quantique

qubit à
téléporter



2 qubits
intriqués



Si je vous posais la même question, me donneriez-vous la même réponse ?

Si la réponse est « oui », alors toute mesure sur le qubit de Bob donnera le même résultat que si la mesure avait été effectuée sur le qubit à téléporter.
C'est ça, la TELEPORTATION QUANTIQUE



Téléportation quantique

qubit à téléporter



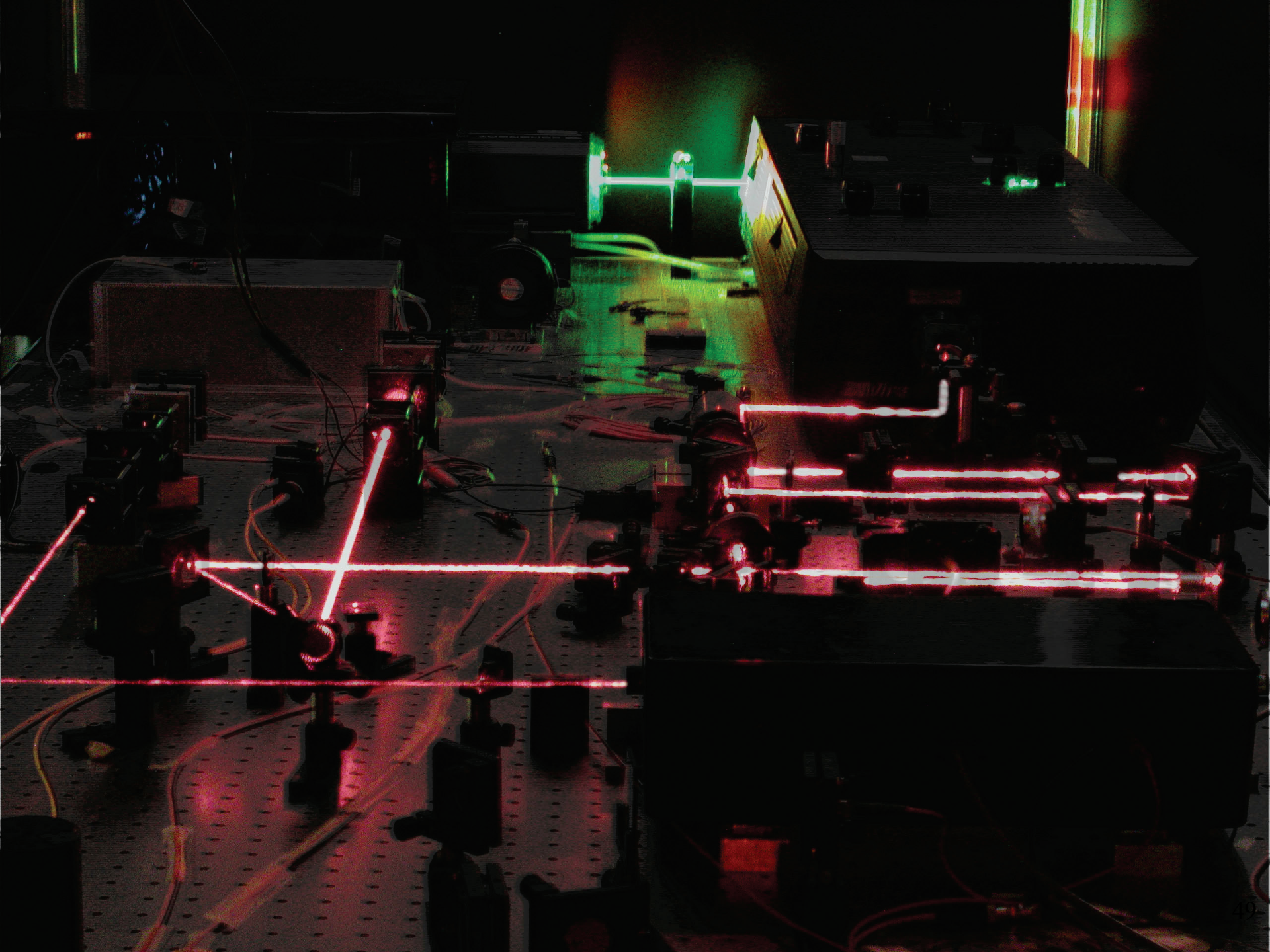
2 qubits
intriqués



Si je vous posais la même question, me donneriez-vous la même réponse ?

oui/non

Si la réponse est « non », alors Bob doit « retourner » son qubit. Comme Alice doit lui communiquer la réponse, la TELEPORTATION QUANTIQUE ne va pas plus vite que la lumière.





Dis papa/maman, comment elle fait la
Nature pour produire un hasard
non local ?

La réponse de la physique d'aujourd'hui est:

Tais-toi et mange ta soupe !
(shut-up and calculate !)

Réponse moderne: **L'intrication !**



Est-ce qu'un jour on comprendra?

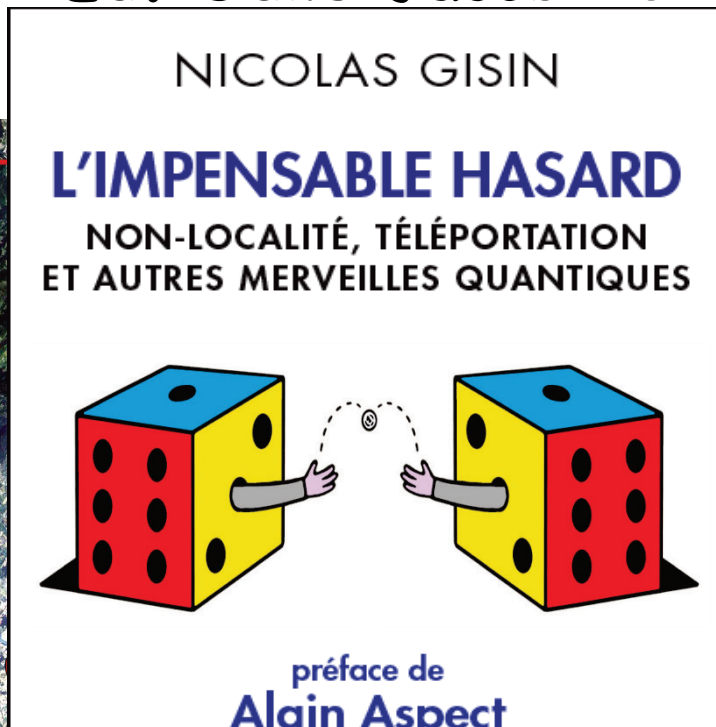
Je parie que oui,
Quand les technologies quantiques seront banales,
Quand la téléportation quantique sera courante,
On comprendra le hasard non local un peu comme
on comprend la gravitation
... peut-être ...

Application: cryptographie quantique



Lectures:

1. *The Age of Entanglement*, par Louisa Gilder, Ed. Knopf 2008.
2. *Initiation à la Physique Quantique*, par Valerio Scarani, Edition Vuibert, 2003.
3. *L'Impensable Hasard*, par Nicolas Gisin, Ed. Odile Jacob 2012.



id Quantique



www.idquantique.com