

Phénomènes quantiques – 2^{ème} partie

- Intrication quantique
- Le débat Bohr-Einstein et le « paradoxe » EPR
- Téléportation et communication quantiques



Notions utilisées :

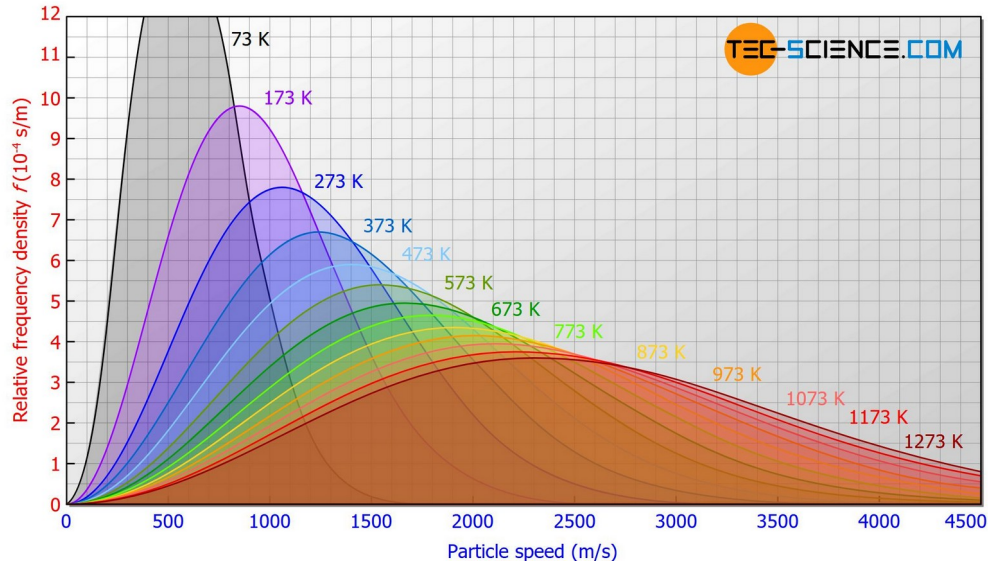
Toutes sauf relativité générale...

Pour une meilleure compréhension, certaines explications
pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire

Les variables cachées

= variables qu'on ne peut observer mais qui influencent le comportement du système

- Ex 1 : la température et la pression d'un gaz dépendent des propriétés **individuelles** des molécules, qui ne sont connues que **statistiquement**
- Ex 2 : on pourrait **prédire** le résultat du lancer si on connaissait **tous les paramètres** : matériaux, vitesse de rotation, billes, force, ...

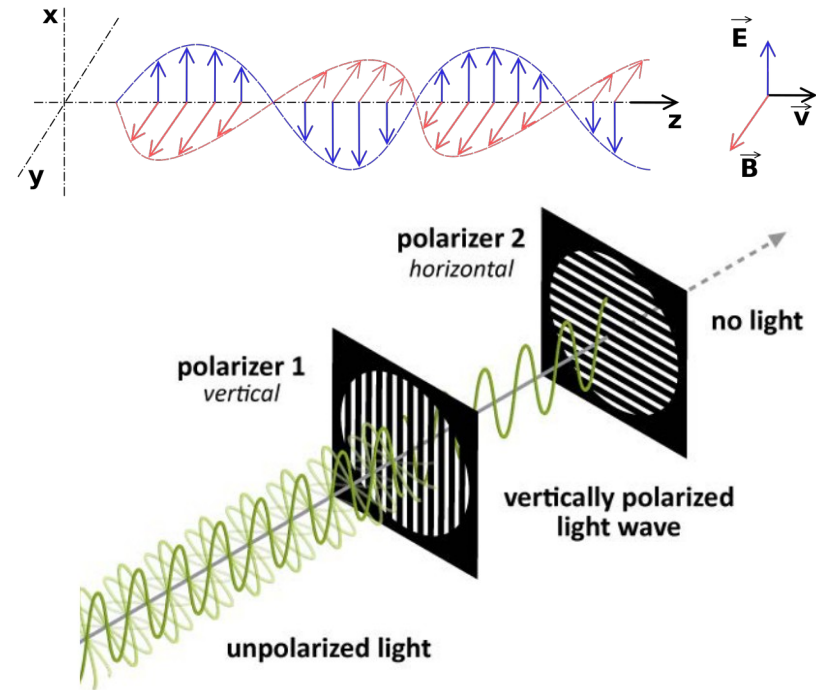


Polarisation de la lumière

- La **lumière naturelle** n'est **pas polarisée** : l'axe du champ électrique est **quelconque** (dans le plan perpendiculaire à la propagation de l'onde)
- On place des **polariseurs** : horizontal & vertical
 - En termes **ondulatoires** : ils polarisent la lumière selon une direction (et absorbent 50 % de la lumière)
 - En termes **corpusculaires** : le photon passe ou pas (1/2)
- Le photon est défini par l'**état superposé** (et)

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\rightarrow\rangle)$$

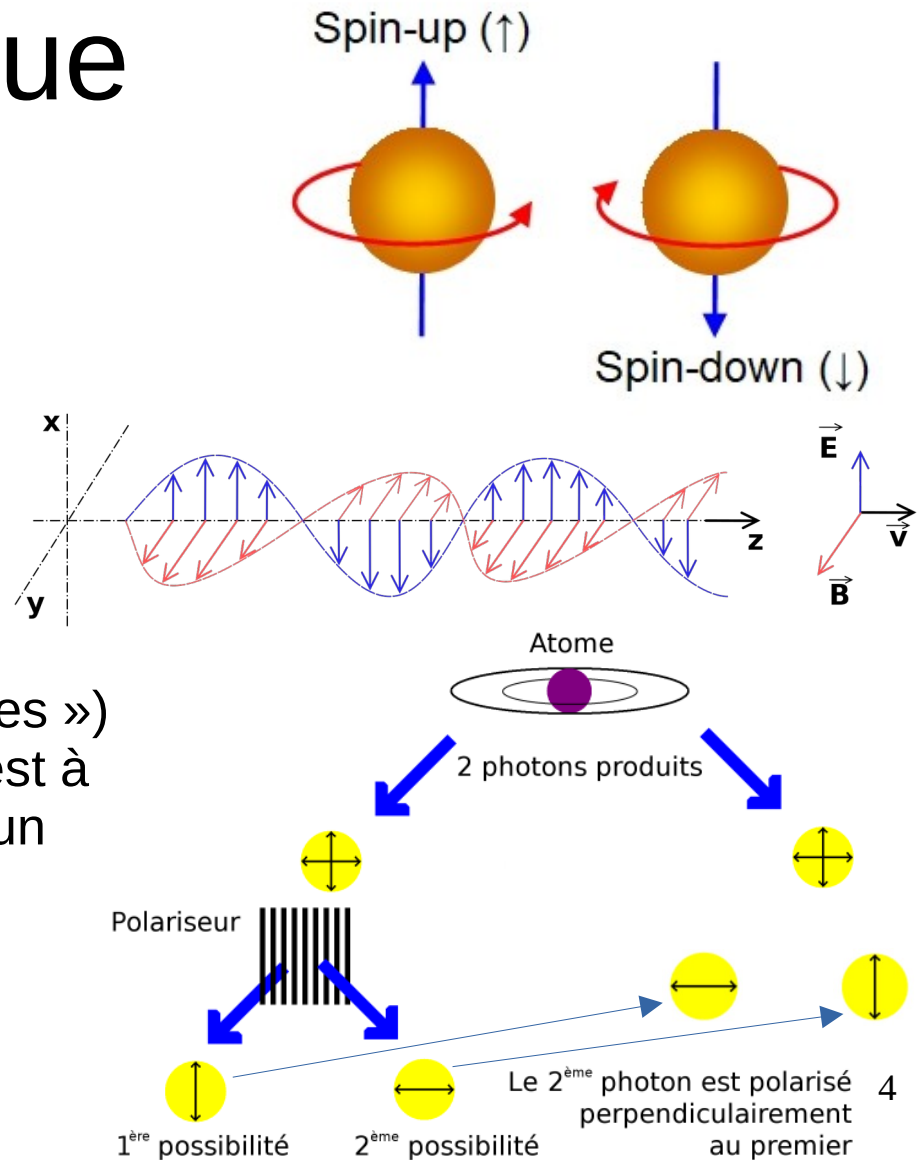
- En arrivant sur le polariseur, l'onde va prendre une polarisation : \uparrow **ou** \rightarrow
 - Si // au polariseur, l'onde/le photon **pass**e
 - Si \perp au polariseur, l'onde/le photon **ne passe pas**
- Principe du cinéma 3D



L'intrication quantique

- Ou « enchevêtrement quantique »
- Théorisée par Erwin Schrödinger en 1935
- Phénomène dans lequel plusieurs particules forment un **système lié** : leurs états quantiques **dépendant l'un de l'autre** (« **corrélés** »)
- Ex : la somme des spins (e^-) est nulle, les polarisations sont liées (γ)
- Les particules sont « intriquées » (« enchevêtrées ») **quelle que soit la distance qui les sépare**, c'est à dire qu'elles forment un **système unique** avec un **état global**
 - (pas de notion de position dans les équations)

$$|\Psi_{int}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_1 |\rightarrow\rangle_2 - |\rightarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2)$$



Le débat Bohr-Einstein 1

- Débat **épistémologique** (l'épistémologie est la discipline qui prend la connaissance scientifique pour objet (larousse.fr))
- Albert Einstein : « Dieu ne joue pas aux dés »
- Niels Bohr : « Mais qui êtes-vous pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? »
- A. Einstein : « Il semble difficile de voir les cartes que Dieu a en main. Mais je ne peux pas croire un seul instant qu'il joue aux dés et utilise des méthodes "télépathiques". »
- N. Bohr : « Si la mécanique quantique ne vous a pas encore profondément choqué, alors vous ne l'avez pas encore comprise. Tout ce que nous appelons réel est fait de choses qui ne peuvent pas être considérées comme étant réelles. »



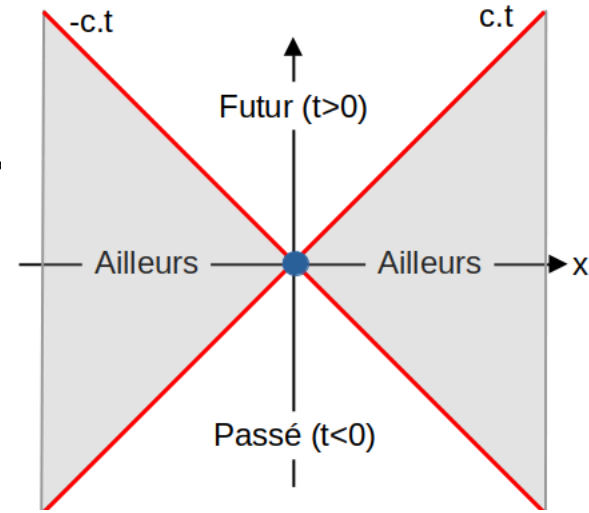
Le débat Bohr-Einstein 2

- Années 1920-1950
- Deux postures philosophiquement très différentes :
 - Einstein est « réaliste » : le monde a des propriétés **indépendamment de l'observation**
 - La physique quantique est provisoire car **une théorie fondamentale ne peut pas être probabiliste** : il doit y avoir une **théorie sous-jacente plus aboutie**
 - A voulu trouver des **contradictions** internes
 - Bohr (École de Copenhague)
 - La physique quantique est **probabiliste** et il n'y a **rien au-delà de l'indéterminisme quantique**
 - Un objet n'a **pas de propriétés intrinsèques**, il va prendre un état au moment de la mesure : seules les propriétés observées comptent
 - Bohr répond de façon satisfaisante à chacune des objections d'Einstein
- **Désaccord sur l'interprétation, mais accord sur les résultats**



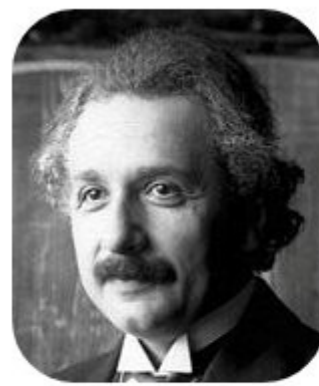
Le « paradoxe » EPR

- **Expérience de pensée** publiée 1935 par Einstein-Podolsky-Rosen
 - « Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ? »
- **But : réfuter l'interprétation de l'école de Copenhague, qui s'oppose à l'existence d'un quelconque état d'un système quantique avant toute mesure**
- Popularise la notion d'**intrication quantique**
- Si deux particules P1 et P2 sont intriquées, la mesure de l'état de P1 nous informe **instantanément** et **sans mesure** de l'état de P2
- Problème : P2 peut, à l'instant de la mesure, se trouver **aussi loin qu'on le veut** de P1
 - Donc P2 ne peut pas être « informée » de l'état dans lequel se trouvait P1 après la mesure
 - (Problème de causalité, elle se trouve dans l'« ailleurs » de P1)
- Comment croire alors que l'état dans lequel est trouvée la seconde particule après la mesure n'était pas **déterminé dès le départ** par une propriété de P2 **non prise en compte par la mécanique quantique (variable cachée)**, ce qui serait donc en contradiction avec la représentation de Copenhague ?



Le « problème » EPR

- Ce problème semble révéler une **contradiction dans la mécanique quantique**, ou du moins son incompatibilité avec au moins l'une des 3 hypothèses suivantes :



A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen

- la mécanique quantique est **complète** et décrit **entièrement** la réalité (**pas de variables cachées** locales)
- deux objets séparés spatialement sont **indépendants l'un de l'autre** et il n'y a **pas d'influence instantanée** à distance (**principe de localité**)
- impossibilité pour un signal de **dépasser la vitesse c** (**causalité relativiste**)
- Cette question va peu à peu **tomber dans l'oubli**
 - En raison de l'aura de Bohr malgré une réponse moins pertinente que d'habitude
 - Les physiciens se consacrent plutôt à la **pratique** qu'à ce **débat épistémologique** et se rallient à l'école de Copenhague

Les inégalités de Bell (1964)

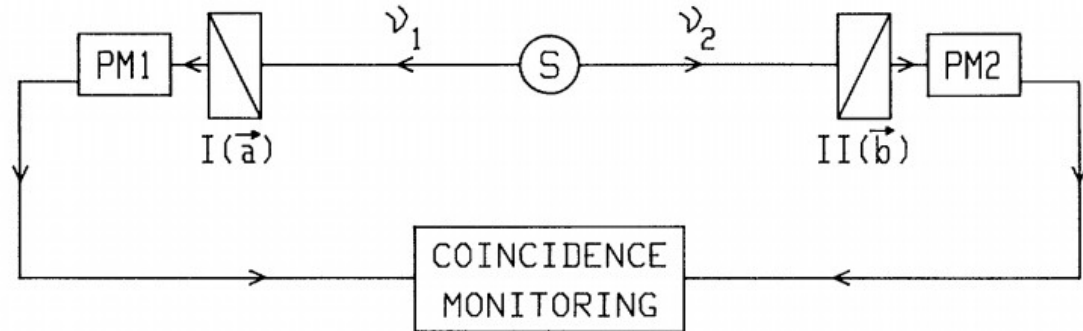
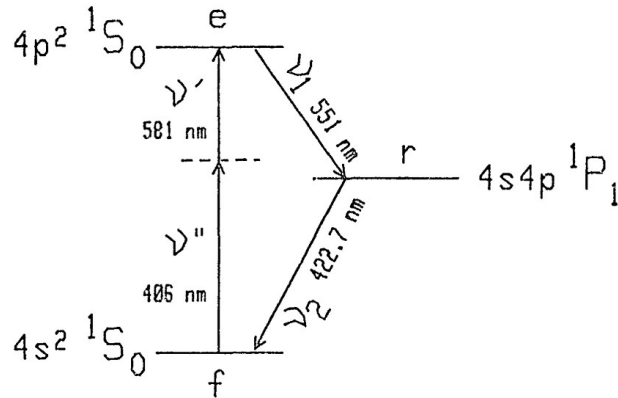
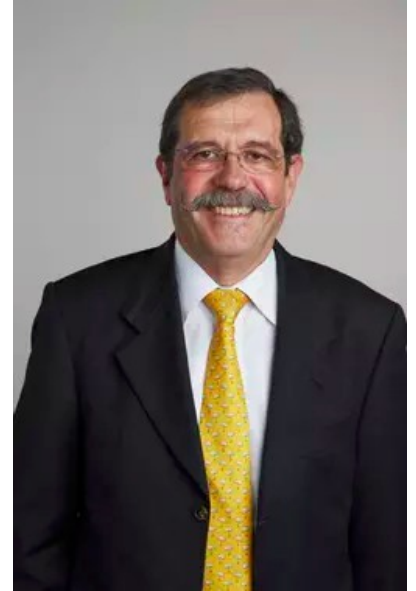
- Bell se réintéresse au problème EPR (~30 ans après)
- **Dans certaines situations**, les prédictions de la mécanique quantique sont **incompatibles avec l'existence de variables cachées**
 - Dans ces cas, les visions d'Einstein et Bohr sont en **contradiction expérimentale**
- Une expérience avec des photons intriqués peut **permettre de conclure**
 - Permet de **transformer un débat épistémologique en une question expérimentale**
 - Si les inégalités sont **respectées**, alors **il existe des variables cachées et la mécanique quantique est mise en défaut**
 - Si les inégalités **ne sont pas respectées**, la mécanique quantique **décrit correctement ces expériences** et il est **impossible qu'il existe des variables cachées (locales)**



L'expérience d'Aspect – protocole expérimental

• Alain Aspect, 1974 :

- Situation assez rare où les hypothèses d'Einstein et Bohr donnent des **résultats numériques différents**
- Améliore des expériences précédentes non décisives
- On excite un atome de Ca, qui se désexcite en émettant **2 photons intriqués** ν_1 et ν_2 , qui rencontrent chacun un **polariseur**
- Chaque polariseur **laisse passer le photon ou pas**
- On étudie le nombre d'événements **en fonction de l'angle entre les polariseurs**



L'expérience d'Aspect – résultats

- Apporte une réponse expérimentale au problème EPR soulevé ~50 ans plus tôt
- Résultat en 1982 : **violation des inégalités de Bell**
- **Significativité statistique énorme** (40-50 σ)
- Conclusion : il faut **abandonner l'hypothèse de localité**
 - **il existe des influences instantanées à distance**
- Prix Nobel de physique 2022
 - (avec J. Clauser et A. Zeilinger)
 - « Pour leurs expériences avec des photons intriqués, établissant la violation des inégalités de Bell et ouvrant la voie à la science de l'information quantique. »
- Prouve également la **réalité de l'intrication quantique**

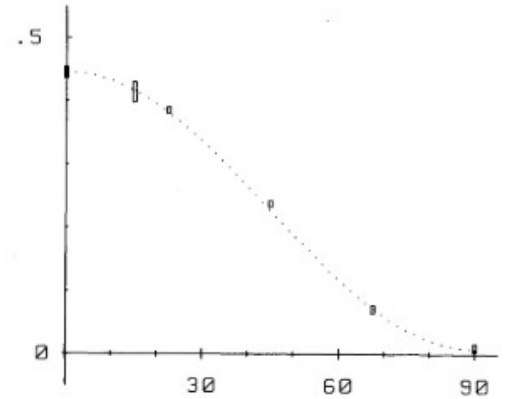


FIG. 4. Average normalized coincidence rate as a function of the relative orientation of the polarizers. Indicated errors are ± 1 standard deviation. The dashed curve is not a fit to the data but the predictions by quantum mechanics for the actual experiment.

Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers

Alain Aspect, Jean Dalibard,^(a) and Gérard Roger

Institut d'Optique Théorique et Appliquée, F-91406 Orsay Cédex, France

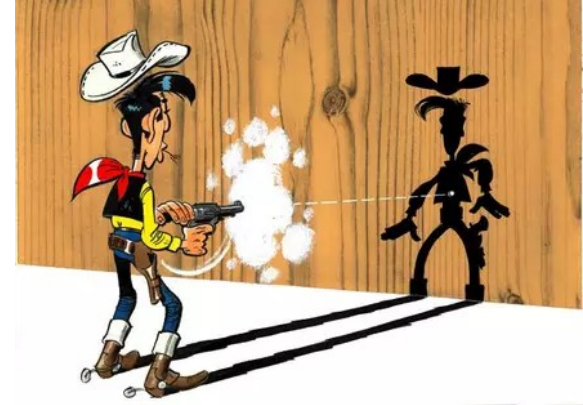
(Received 27 September 1982)

Correlations of linear polarizations of pairs of photons have been measured with time-varying analyzers. The analyzer in each leg of the apparatus is an acousto-optical switch followed by two linear polarizers. The switches operate at incommensurate frequencies near 50 MHz. Each analyzer amounts to a polarizer which jumps between two orientations in a time short compared with the photon transit time. The results are in good agreement with quantum mechanical predictions but violate Bell's inequalities by 5 standard deviations.

PACS numbers: 03.65.Bz, 35.80.+s

Plus vite que la lumière ??

Non ! L'intrication quantique est parfaitement compatible avec la relativité



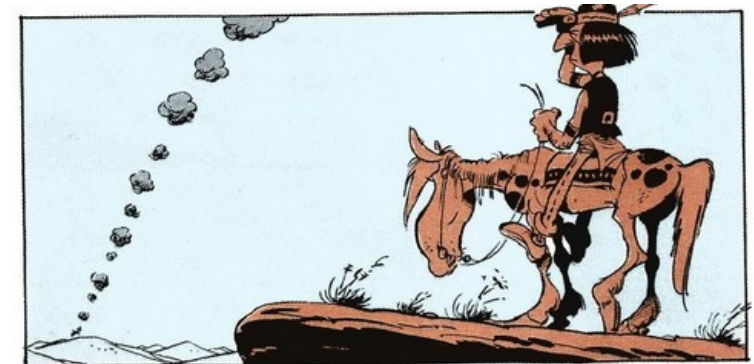
- **Théorème de non-communication**

- En raison du caractère **indéterministe** de la physique quantique, il est impossible de **transmettre de l'information** à un autre observateur **par un système intriqué**
- Même l'**information que je mesure** ma partie du système ne peut être transmise car l'autre doit regarder sa partie du système pour vérifier, mais **est-ce une vérification ou une mesure** ? D'ailleurs, étais-je vraiment le premier à mesurer ma partie du système ??

- **Il est impossible de communiquer de l'information plus vite que la lumière**

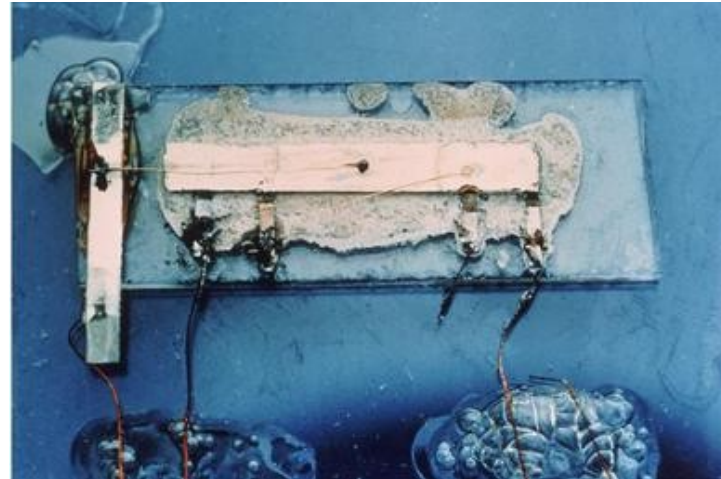
- Pour vérifier, il faut s'appeler et utiliser un signal « classique » qui voyage moins vite que la lumière...

L'intrication ne respecte pas le principe de localité mais elle respecte la causalité



Applications pratiques de l'intrication quantique

- L'expérience d'Aspect a donné du **crédit** à l'intrication quantique et suscité de l'**intérêt** pour ce sujet
 - **Communication et téléportation quantiques**
- La science fondamentale n'a pas pour but d'avoir des applications
 - Mais ça arrive !
 - Circuits intégrés (1958)
 - Laser (1960)
 - Internet



Premier circuit intégré

Le clonage

- 3 ingrédients :
 - L'élément à copier
 - L'élément qui va recevoir la copie
 - La procédure de copie
- **Cas classique facilement réalisable**
 - C'est la façon dont cette vidéo / ce fichier vous sont transmis
- La copie peut être **différente de l'original**
 - En biologie, on clone l'**ADN**, pas l'**être vivant lui-même**
 - Dolly : première mammifère cloné
 - La croissance/l'expérience de l'être n'est pas reproductible
 - Ex : les jumeaux homozygotes n'ont pas exactement les mêmes empreintes digitales



Dolly (5 July 1996 – 14 February 2003 !!)

Impossibilité du clonage quantique

- **Théorème de mécanique quantique (1982)**
 - Il est impossible de faire des **copies identiques** (des clones) d'**états quantiques inconnus** (superposés)
 - On ne peut pas **copier un état superposé** en le mesurant (on réduirait le système à l'un de ses états propres et perdrait une partie de l'information)

UNIVERSAL OPTIMAL CLONING OF QUBITS AND QUANTUM REGISTERS *

V. Bužek^{1,2} and M. Hillery³

¹ Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská cesta 9, 842 28 Bratislava, Slovakia

² Department of Mathematics and Physics, Comenius University, Mlynská dolina F2, 842 15 Bratislava, Slovakia

³ Department of Physics and Astronomy, Hunter College, CUNY, 695 Park Avenue, New York, NY 10021, USA

(31 December 1997)

- **Mais possibilité de faire des copies imparfaites**
 - Possibilité de **cloner un qubit** avec une **fidélité** de $5/6=83\%$

We review our recent work on the universal (i.e. input state independent) optimal quantum copying (cloning) of qubits. We present unitary transformations which describe the optimal cloning of a qubit and we present the corresponding quantum logical network. We also present network for an optimal quantum copying "machine" (transformation) which produces $N + 1$ identical copies from the original qubit. Here again the quality (fidelity) of the copies does not depend on the state of the original and is only a function of the number of copies, N . In addition, we present the machine which universally and optimally clones states of quantum objects in arbitrary-dimensional Hilbert spaces. In particular, we discuss universal cloning of quantum registers.

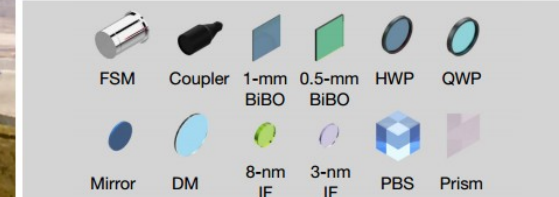
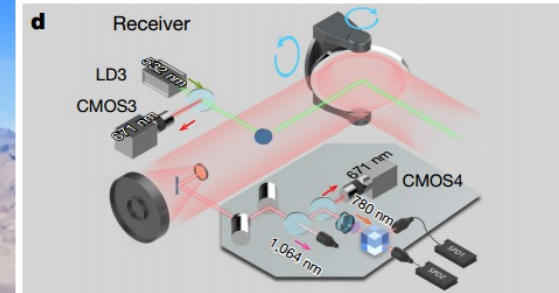
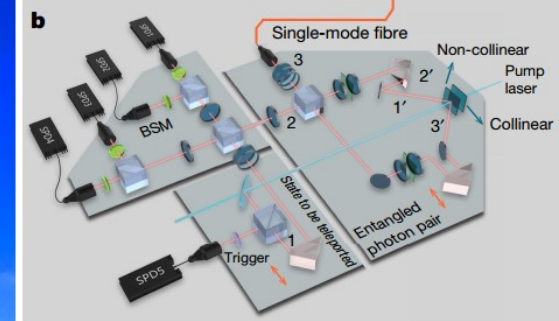
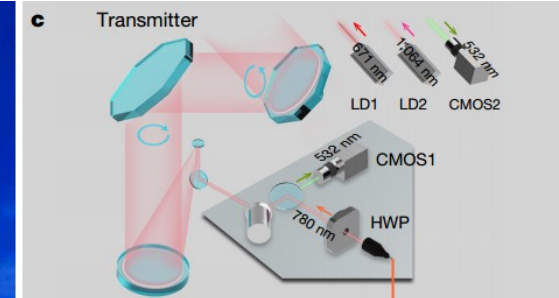
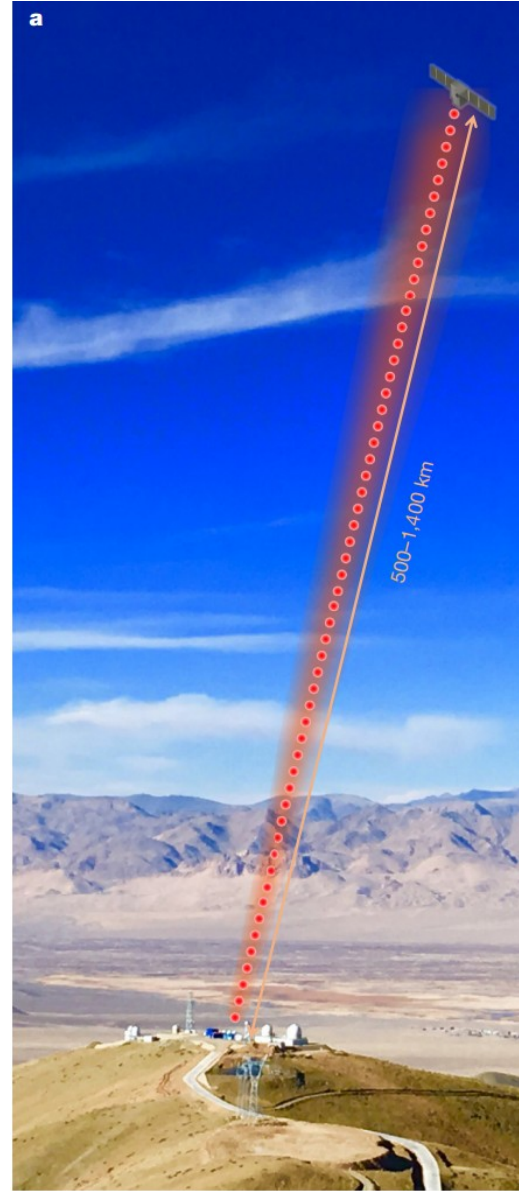
Téléportation quantique

- Transfert d'un **état quantique (information) inconnu** d'un système vers un autre
 - **similaire et distant (localisation inconnue)**
 - **Pas de transport de masse ou d'énergie ni du système lui-même**
- Ce n'est pas un clonage quantique
 - Opération **destructive** : l'information du système initial est perdue (par une mesure)
 - L'expéditeur **ne connaît pas l'état du système**
 - On utilise l'**intrication quantique**
 - Nécessité d'utiliser un **canal classique (causal donc vitesse subluminaire)** pour transmettre les informations permettant de terminer la téléportation de l'information
 - Le système récepteur doit être parfaitement **isolé** de son environnement



Expériences de téléportation

- Prouesses technologiques mais phénomène **prévu par la théorie**
- 1993 : premier article
- 1997 : première expérience
- 2017 : Téléportation sur 1400 km entre la Terre et le satellite chinois Mozi
- 2020 : au Fermilab (USA), téléportation prolongée de qubits lumineux avec une fidélité $>90\%$



<http://www-labs.iro.umontreal.ca/~brassard/cours/6155/Micius/nature23675.pdf>
<https://news.fnal.gov/2020/12/fermilab-and-partners-achieve-sustained-high-fidelity-quantum-teleportation/>

L'ordinateur quantique

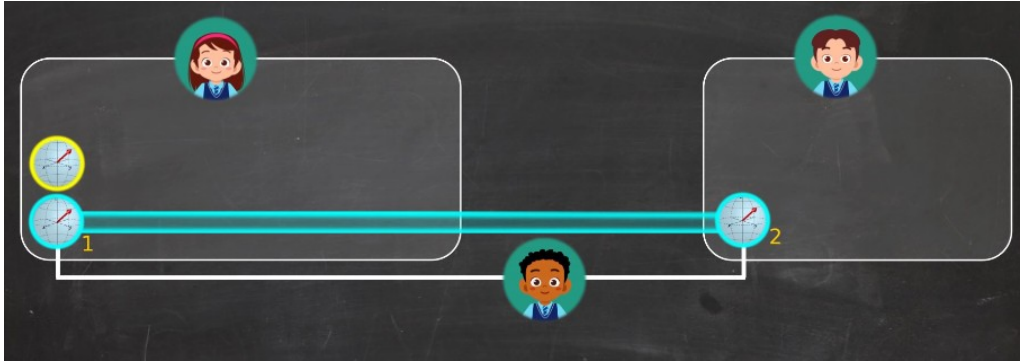
- Travaille avec des éléments de base appelés « **qubits** »
 - Plus petite unité de **stockage d'information quantique**
 - = **superposition quantique de deux états de base**
 - **S'écrit $\alpha \cdot |0\rangle + \beta \cdot |1\rangle$** (où α et β sont tels que $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, ce qui assure que le qubit est entièrement présent - $p=1$), alors qu'un bit classique est numérique et a toujours pour valeur **0 ou 1**
- Utilise les propriétés quantiques (**superposition** et **intrication**) afin d'effectuer des opérations parallèles sur des données
→ **très grande puissance de calcul**
- La **réalisation physique du qubit** s'est heurtée au phénomène de **décohérence** (perte des effets quantiques lors du passage à l'échelle macroscopique)
- De grandes capacités de **factorisation** d'un ordinateur quantique lui permettraient de **casser de nombreux systèmes cryptographiques actuels**
 - Factorisation d'un nombre en nombre premiers : $1\ 010\ 021 = 17 \times 19 \times 53 \times 59$



Ordinateur quantique IBM

Cryptographie quantique

- Utilise la téléportation quantique et donc un système intriqué



Alice, Bob et Charlie

- Seules transitent par des voies classiques les informations sur le système initial qui permettent de reconstruire l'état téléporté (grâce à une des particules intriquées)

- Vise à construire des algorithmes cryptographiques utilisant des **propriétés physiques** plutôt que mathématiques pour sécuriser les échanges
- Si l'information est lue par un tiers, on le sait instantanément :
 - Pas de cryptographie quantique dans Star Trek : « Nous avons intercepté un message de la flotte ennemie. »
- **Cryptographie post-quantique** : discipline visant à garantir la sécurité de l'information face à un tiers disposant d'un ordinateur quantique
 - distincte de la cryptographie quantique

Congrès de Solvay 1911

9 prix Nobel sur 24
Physique
Chimie

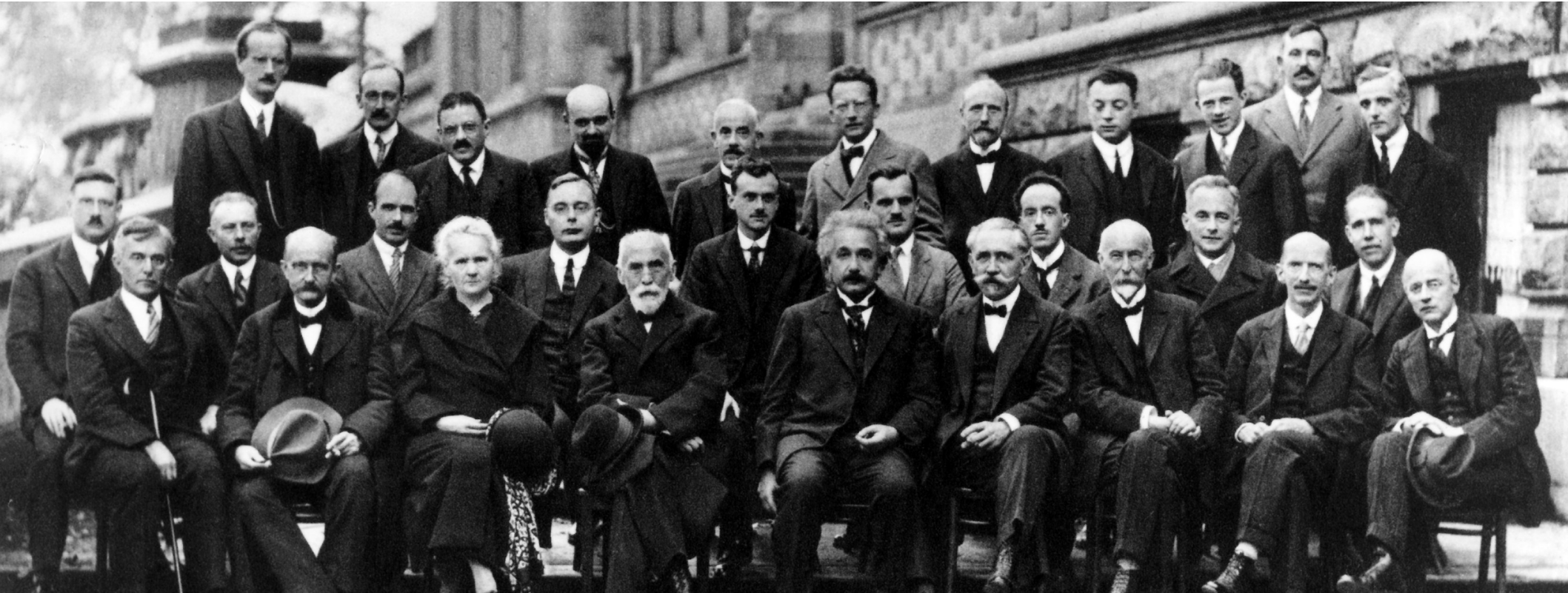
« La théorie du rayonnement et des quanta »



Assis (de gauche à droite) : Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, **Hendrik Lorentz**, Emil Warburg, **Jean-Baptiste Perrin**, **Wilhelm Wien**, **Marie Skłodowska-Curie**, Henri Poincaré

Debout (de gauche à droite) : Robert Goldschmidt, **Max Planck**, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, **Maurice de Broglie**, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhrl, Georges Hostelet, Édouard Herzen, James Jeans, Ernest Rutherford, **Heike Kamerlingh Onnes**, **Albert Einstein**, Paul Langevin 20

Congrès de Solvay 1927 « électrons et photons »



17 prix Nobel sur 29 (**physique & chimie**)

De l'arrière vers l'avant et de gauche à droite :

A. Piccard, É. Henriot, P. Ehrenfest, É. Herzen, T. de Donder, **Erwin Schrödinger**, J-É. Verschaffelt, **Wolfgang Pauli**, **Werner Heisenberg**, R. H. Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, **William Lawrence Bragg**, Hendrik Kramers, **Paul Dirac**, **Arthur Compton**, **Louis de Broglie**, **Max Born**, **Niels Bohr**, **Irving Langmuir**, **Max Planck**, Marie Curie, **Hendrik Lorentz**, **Albert Einstein**, Paul Langevin, Charles E. Guye, **Charles Thomson Rees Wilson**, **Owen W. Richardson**

Congrès de Solvay 1933



H. A. KRAMERS

N. F. MOTT

G. GAMOW P. BLACKETT

M. COSYNS

Aug. PICCARD

E. STAHEL P. A. M. DIRAC

J. ERRERA

C. D. ELLIS

E. O. LAWRENCE

E. HENRIOT

F. JOLIOT W. HEISENBERG

E. T. S. WALTON P. DEBYE B. CABRERA W. BOTHE Ed. BAUER J. E. VERSCHAFFELT J. D. COCKROFT

L. ROSENFELD

F. PERRIN

E. FERMI

M. S. ROSENBLUM W. PAULI

E. HERZEN

R. PEIERLS

E. SCHRÖDINGER

M^{lle} I. JOLIOT

N. BOHR

A. JOFFÉ

M^{lle} CURIE

O. W. RICHARDSON Lord RUTHERFORD

M. de BROGLIE

M^{lle} L. MEITNER

J. CHADWICK

P. LANGEVIN

Th. DE DONDER

L. de BROGLIE

Pour aller plus loin

- Chaîne scienceetonnante.com/
 - Interview d'Alain Aspect : youtube.com/watch?v=OeZ_63iKPho
 - Expérience des fentes de Young : youtube.com/watch?v=zPoITp0ddRg
- Chaîne Photon jumeau
 - Le débat Bohr-Einstein : youtube.com/watch?v=gOQGkIVxv3w
 - Les inégalités de Bell : youtube.com/watch?v=xduUcFflYX0
 - Les expériences d'Alain Aspect : youtube.com/watch?v=SlwN9T010Tg
- Téléportation
 - Passe-science : youtube.com/watch?v=OMpXKcKf0SM
 - youtube.com/watch?v=lmBy8ZUtY2g
- En anglais :
 - Faster-than-Light Communication? : youtube.com/watch?v=3IbYilh00m0
 - The No Cloning Theorem : youtube.com/watch?v=owPC60Ue0BE