

Phénomènes quantiques – 2^{ème} partie

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



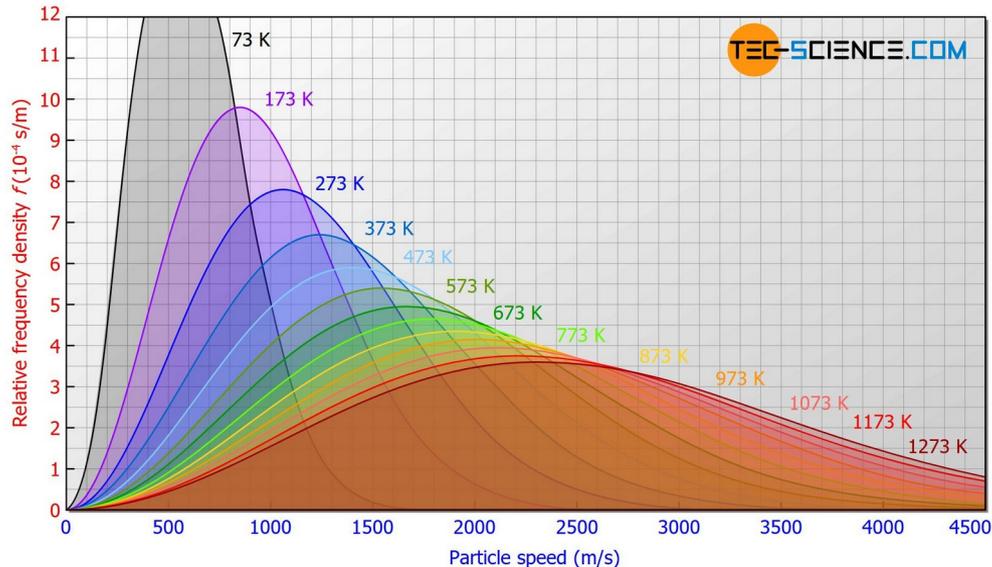
Notions utilisées :
Toutes sauf relativité générale...

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, ...

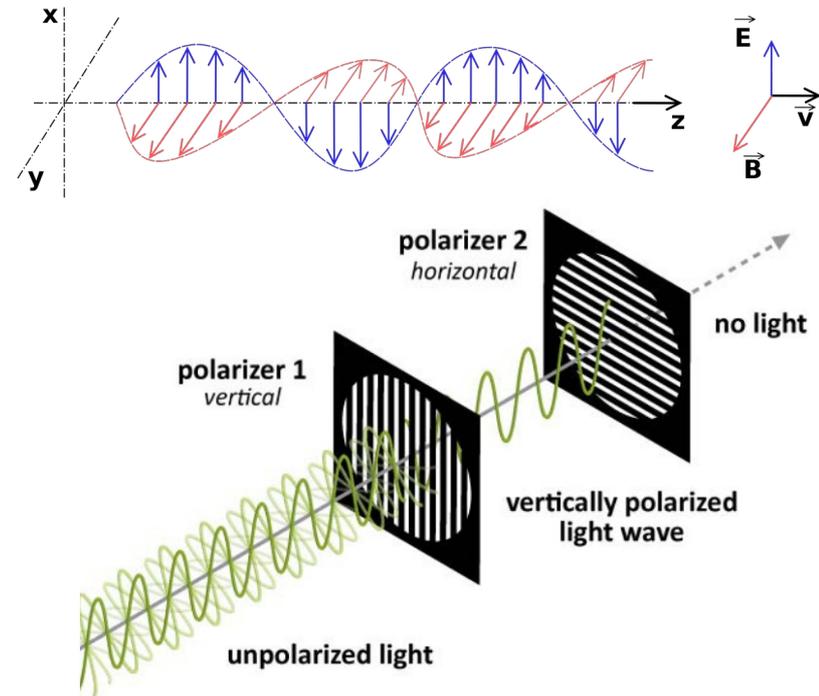


Polarisation de la lumière

- 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)

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

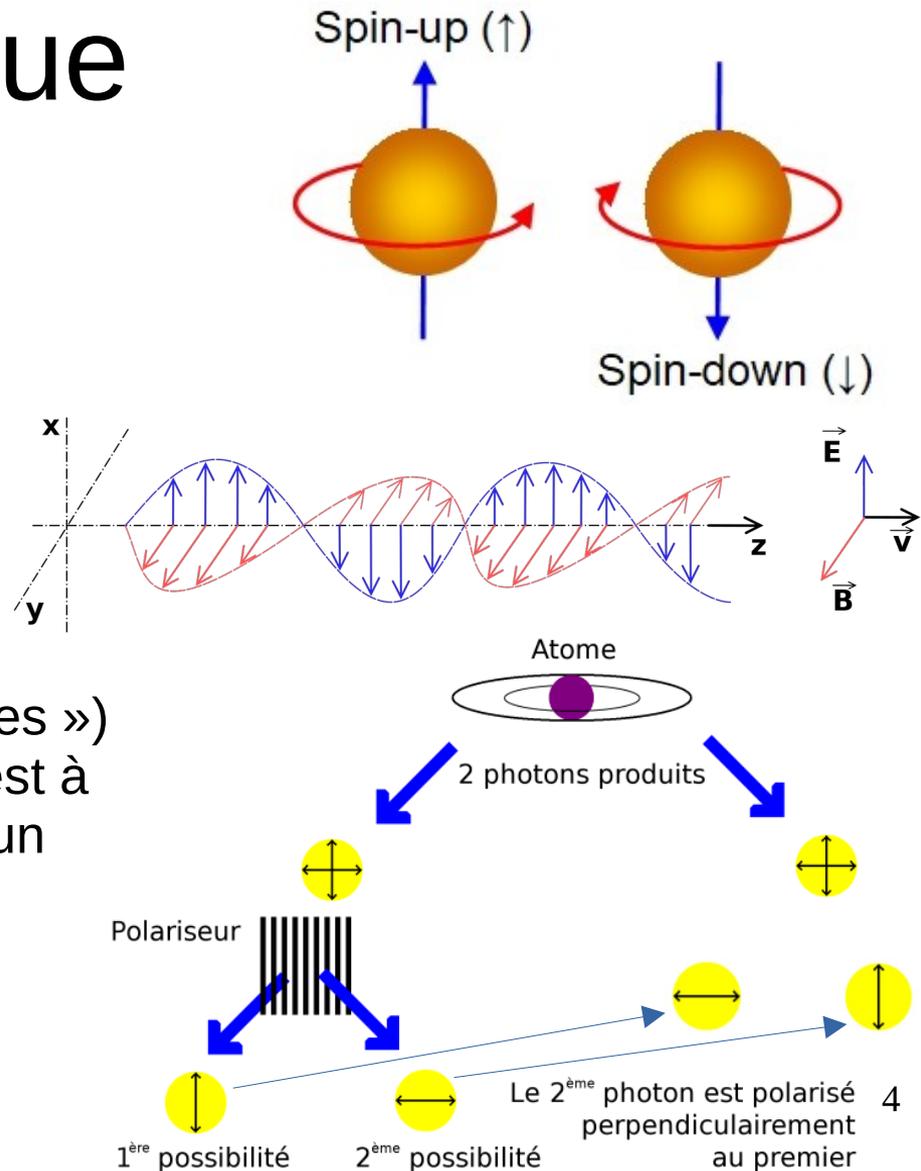
- En arrivant sur le polariseur, l'onde va prendre une polarisation : \uparrow **ou** \rightarrow
 - Si // au polariseur, l'onde/le photon **pass**e
 - Si \perp au polariseur, l'onde/le photon **ne passe pas**
- Principe du cinéma 3D



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. »



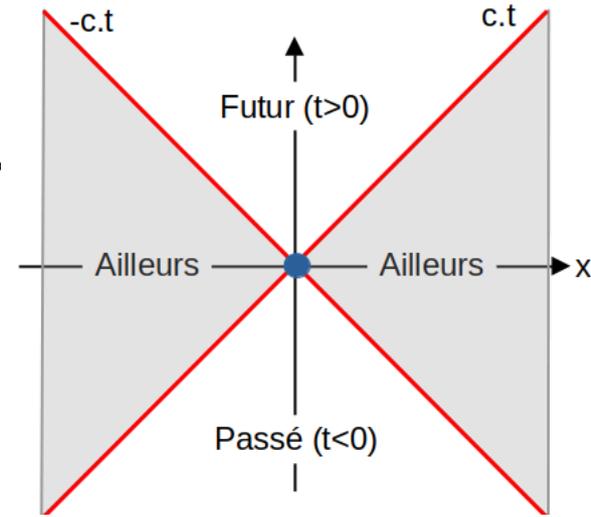
Le débat Bohr-Einstein 2

- 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**



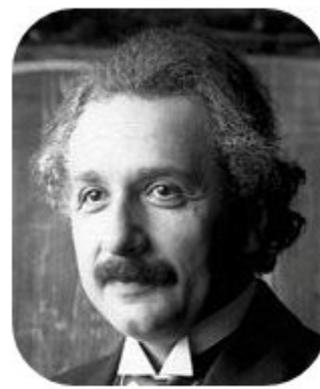
Le « paradoxe » EPR

- **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

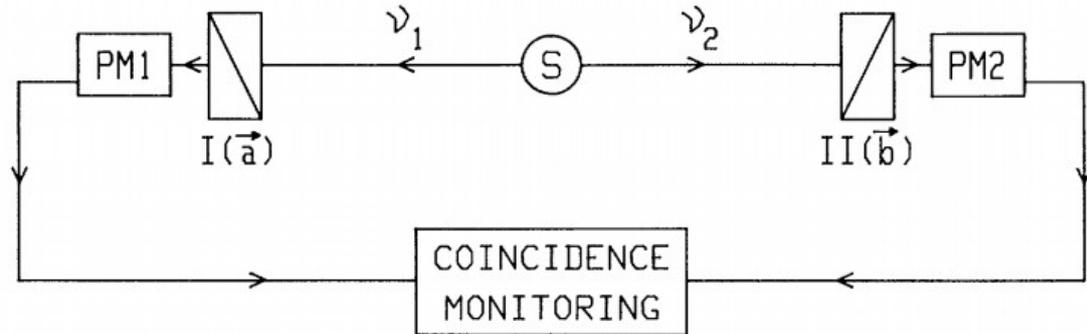
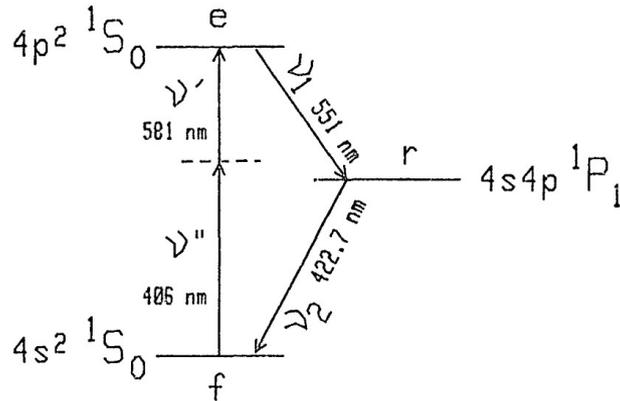
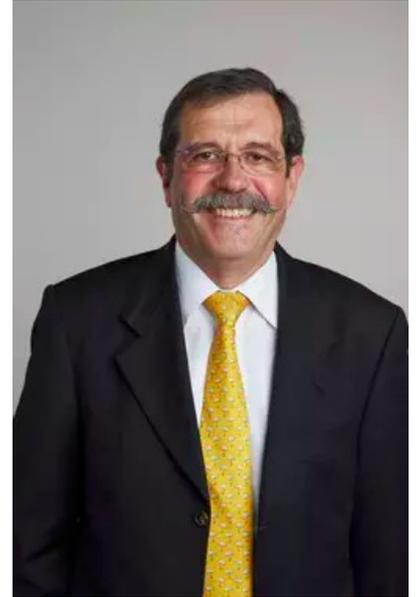
Les inégalités de Bell (1964)

- 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**

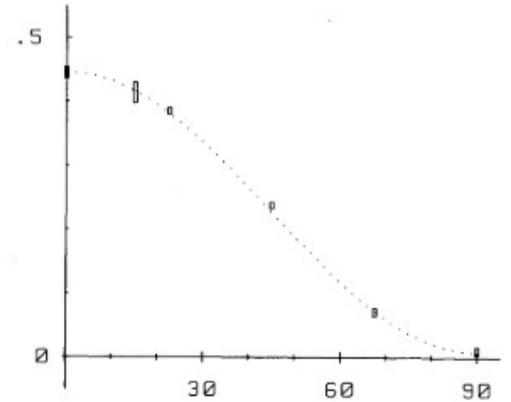


FIG. 4. Average normalized coincidence rate as a function of the relative orientation of the polarizers. Indicated errors are ± 1 standard deviation. The dashed curve is not a fit to the data but the predictions by quantum mechanics for the actual experiment.

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

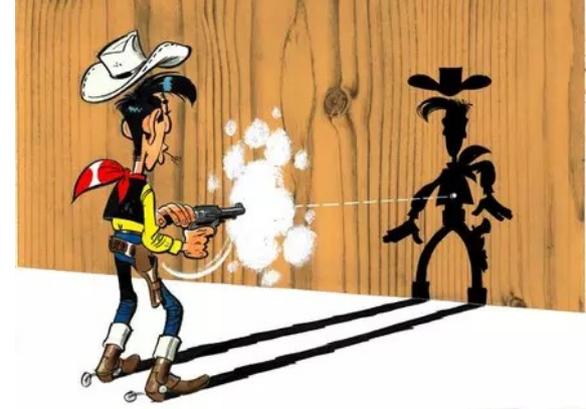
(Received 27 September 1982)

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

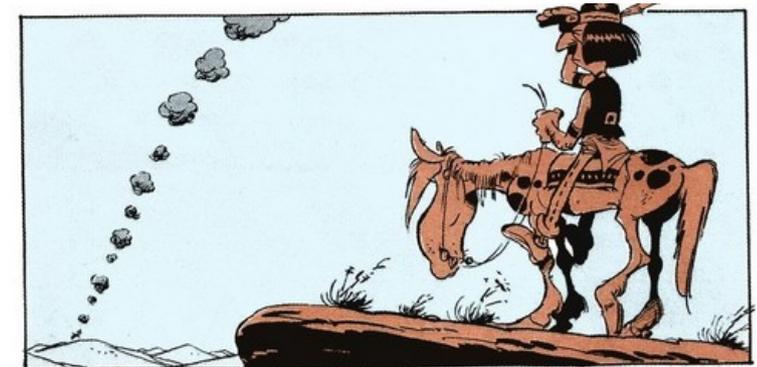


- **Théorème de non-communication**

- 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**

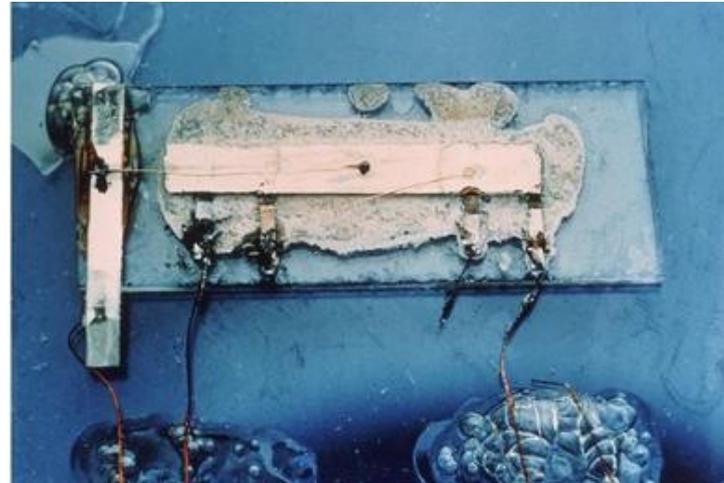
- Pour vérifier, il faut s'appeler et utiliser un signal « classique » qui voyage moins vite que la lumière...



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.

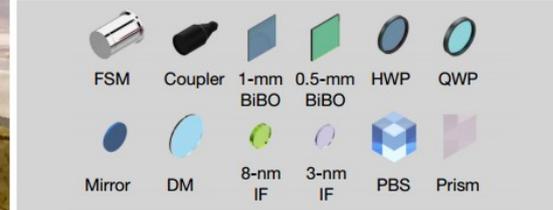
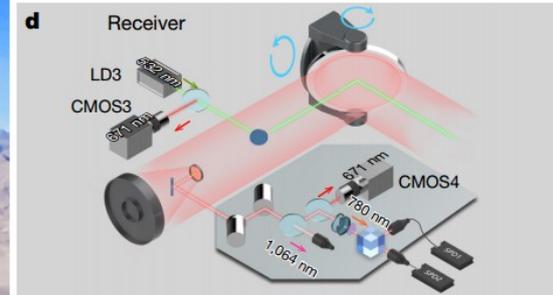
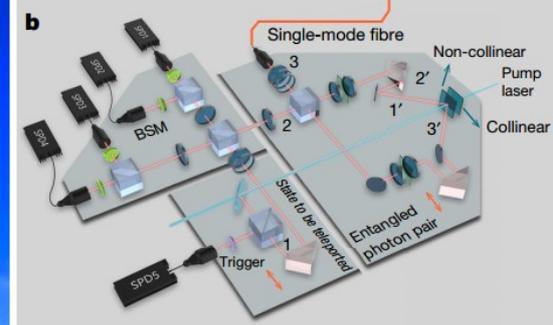
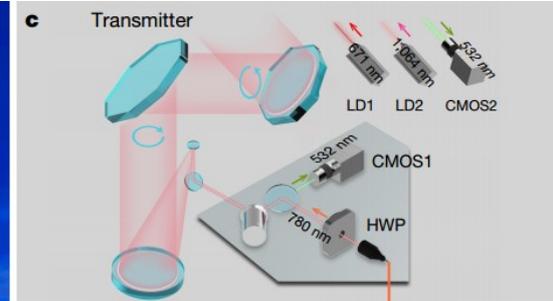
Téléportation quantique

- 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

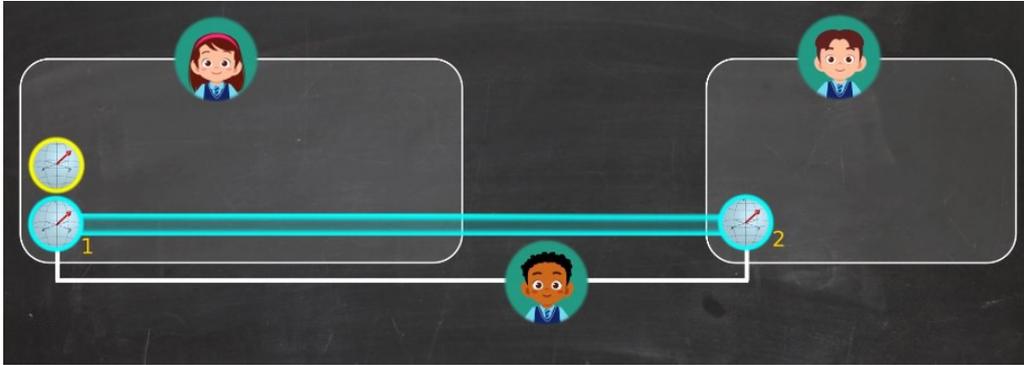
- Travaille avec des éléments de base appelés « **qubits** »
 - Plus petite unité de **stockage d'information quantique**
 - = **superposition quantique de deux états de base**
 - **S'écrit $\alpha \cdot |0\rangle + \beta \cdot |1\rangle$** (où α et β sont tels que $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, ce qui 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

« La théorie du rayonnement et des quanta »

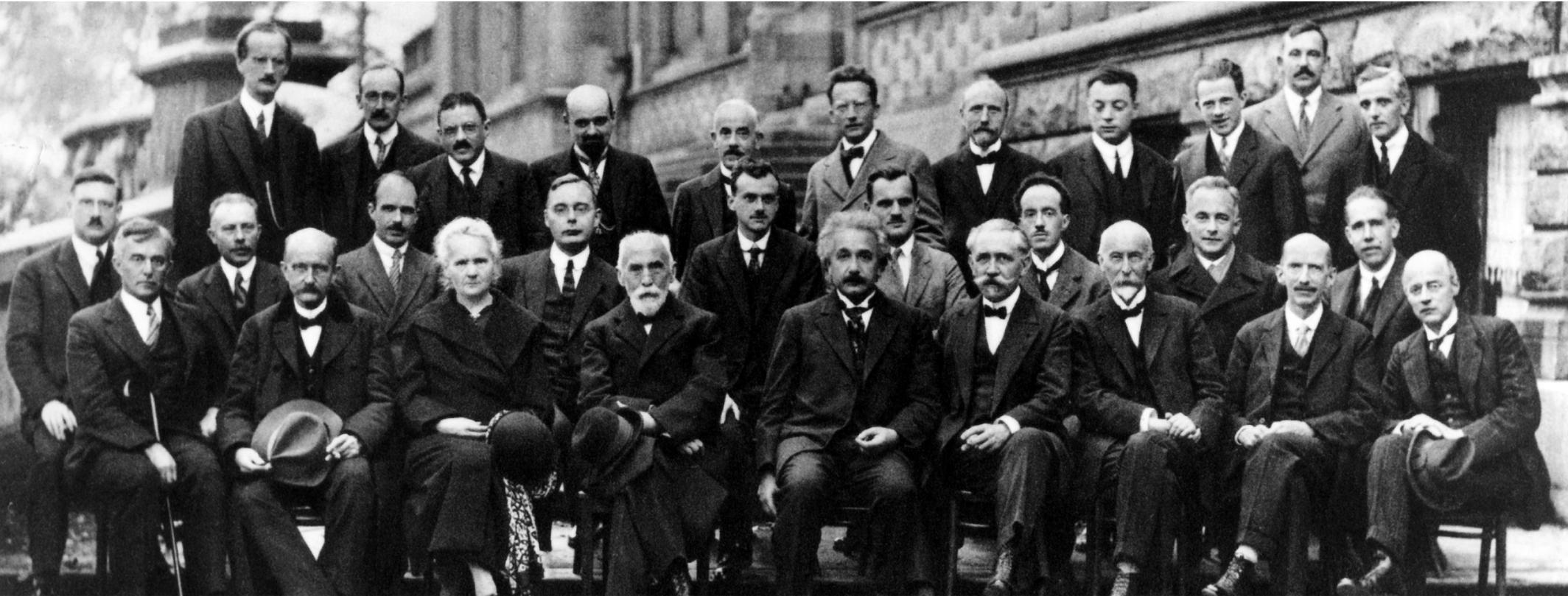
9 prix Nobel sur 24
Physique
Chimie



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**

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