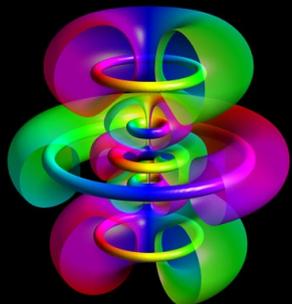
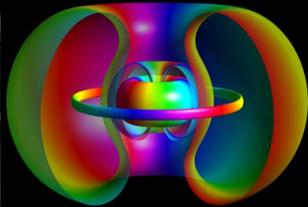
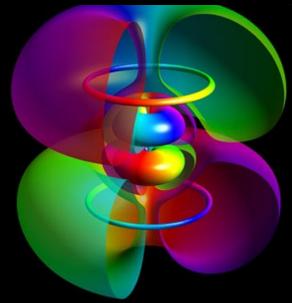


**La Cité des Sciences et de la Mer**  
à l'écoute des mondes possibles

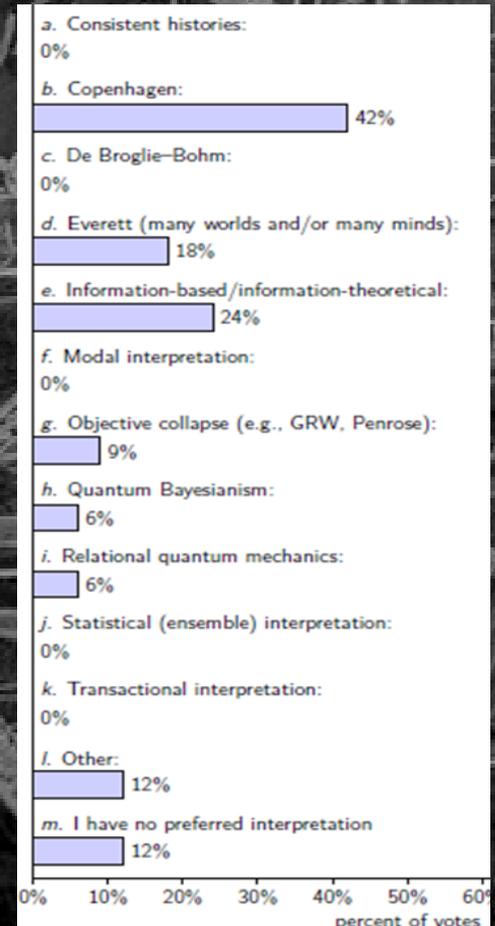


**Dessine-moi une  
particule**

**De quoi la mécanique  
quantique  
est-elle la science ?**

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interpretation	Author(s)	Deterministic?	Wavefunction real?	Unique history?	Hidden variables?	Collapsing wavefunctions?	Observer role?	Local?	Counterfactual definiteness?	Universal wavefunction exists?
Ensemble interpretation	Max Born, 1926	Agnostic	No	Yes	Agnostic	No	No	No	No	No
Copenhagen interpretation	Niels Bohr, Werner Heisenberg, 1927	No	No <sup>1</sup>	Yes	No	Yes <sup>2</sup>	Causal	No	No	No
de Broglie-Bohm theory	Louis de Broglie, 1927, David Bohm, 1952	Yes	Yes <sup>3</sup>	Yes <sup>4</sup>	Yes	No	No	No <sup>17</sup>	Yes	Yes
von Neumann interpretation	John von Neumann, 1932, John Archibald Wheeler, Eugene Wigner	No	Yes	Yes	No	Yes	Causal	No	No	Yes
Quantum logic	Garrett Birkhoff, 1936	Agnostic	Agnostic	Yes <sup>5</sup>	No	No	Interpretational <sup>6</sup>	Agnostic	No	No
Many-worlds interpretation	Hugh Everett, 1957	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes	No	Yes
Time-symmetric theories	Satosi Watanabe, 1955	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	No	Yes
Stochastic interpretation	Edward Nelson, 1966	No	No	Yes	Yes <sup>10</sup>	No	No	No	Yes <sup>10</sup>	No
Many-minds interpretation	H. Dieter Zeh, 1970	Yes	Yes	No	No	No	Interpretational <sup>7</sup>	Yes	No	Yes
Consistent histories	Robert B. Griffiths, 1984	Agnostic <sup>8</sup>	Agnostic <sup>8</sup>	No	No	No	Interpretational <sup>6</sup>	No <sup>13</sup>	No	No
Objective collapse theories	Ghirardi-Rimini-Weber, 1986, Penrose interpretation, 1989	No	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	No
Transactional interpretation	John G. Cramer, 1986	No	Yes	Yes	No	Yes <sup>9</sup>	No	No <sup>14</sup>	Yes	No
Relational interpretation	Carlo Rovelli, 1994	Agnostic	No	Agnostic <sup>10</sup>	No	Yes <sup>11</sup>	Intrinsic <sup>12</sup>	No <sup>16</sup>	No	No



[https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations\\_of\\_quantum\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics)

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

## Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

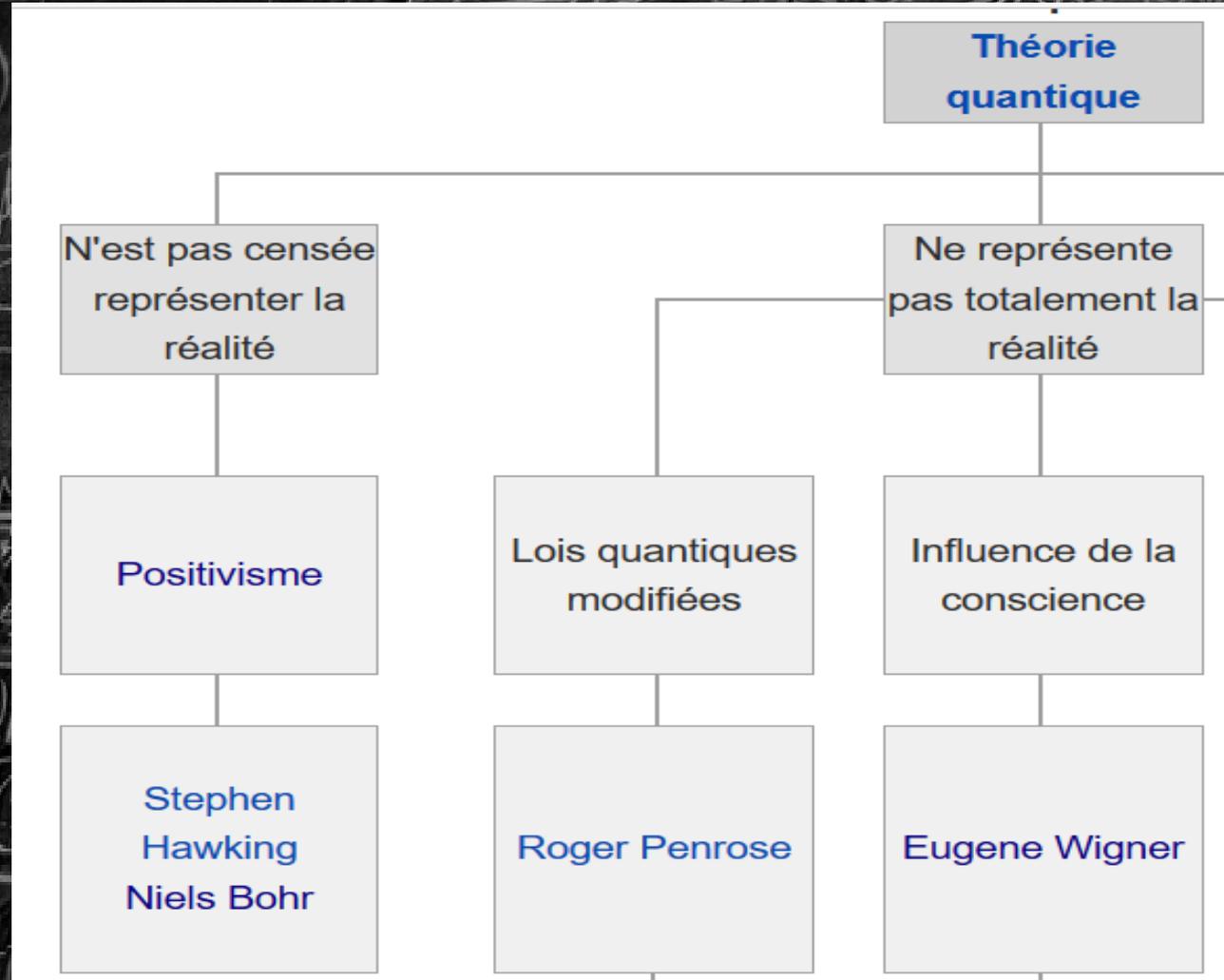
Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Chat\\_de\\_Schrödinger#Quelle\\_solution\\_3F](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chat_de_Schrödinger#Quelle_solution_3F)

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

**Déterminisme**

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

Interpretation	Author(s)	Deterministic?	Wavefunction collapse?	Hidden variables?	Local?	Realistic?	Other
Ensemble interpretation	Max Born, 1926	Agnostic	No	Yes	Agnostic	No	No
Copenhagen interpretation	Niels Bohr, Werner Heisenberg, 1927	No	No <sup>1</sup>	Yes	No	Yes <sup>2</sup>	Causal, No, No, No
de Broglie-Bohm theory	Louis de Broglie, 1927, David Bohm, 1952	Yes	Yes <sup>3</sup>	Yes <sup>4</sup>	Yes	No	No
von Neumann interpretation	John von Neumann, 1932, John Archibald Wheeler, Eugene Wigner	No	Yes	Yes	No	No	No
Quantum logic	Garrett Birkhoff, 1936	Agnostic	Agnostic	Yes <sup>5</sup>	No	No	No
Many-worlds interpretation	Hugh Everett, 1957	Yes	Yes	No	No	No	No
Time-symmetric theories	Satosi Watanabe, 1955	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Stochastic interpretation	Edward Nelson, 1966	No	No	Yes	Yes <sup>10</sup>	No	No
Many-minds interpretation	H. Dieter Zeh, 1970	Yes	Yes	No	No	No	No
Consistent histories	Robert B. Griffiths, 1984	Agnostic <sup>6</sup>	Agnostic <sup>6</sup>	No	No	No	Interpretation, No
Objective collapse theories	Ghirardi-Rimini-Weber, 1986, Penrose interpretation, 1989	No	Yes	Yes	No	Yes	No
Transactional interpretation	John G. Cramer, 1986	No	Yes	Yes	No	No	No
Relational interpretation	Carlo Rovelli, 1994	Agnostic	No	Agnostic <sup>11</sup>	No	No	No

On ne se prononce pas sur l'existence du déterminisme

Il existe bien du déterminisme en mécanique quantique

Il n'existe pas de déterminisme en mécanique quantique

[https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations\\_of\\_quantum\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics)

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

**Déterminisme**

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

**Déterminisme:**

**Les mêmes causes  
produisent les mêmes effets  
dans les mêmes  
circonstances.**



**La mécanique quantique  
est-elle déterministe ?**

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

**Déterminisme**

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

D'où vient ce flou?

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

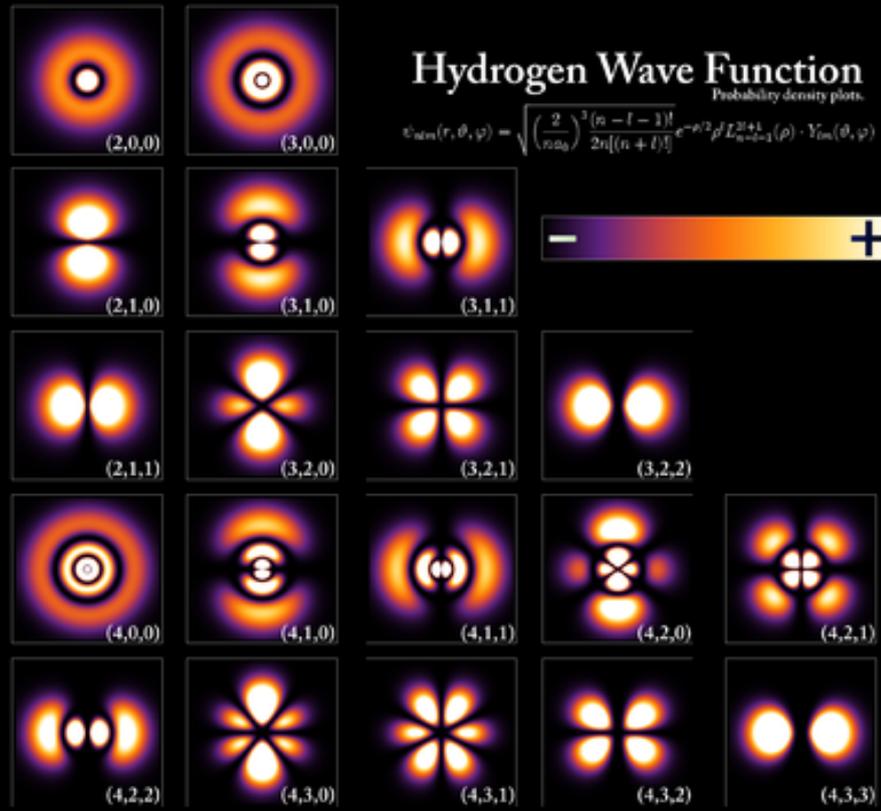
Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

$$\begin{cases} i\hbar\partial_t\psi = H\psi \\ \psi_0 \end{cases}$$



Erwin Schrödinger

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

**Probabilités (1)**

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées



$$\int_R |\psi(x, t)|^2 dx$$

Max Born

**La probabilité de trouver l'objet quantique au temps  $t$  dans la région  $R$  de l'espace.**

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

F.C.P. Universeness

Lumière =  
corpuscul  
e

Lumière =  
onde

Lumière =  
corpuscul  
e

Dualité onde-  
corpuscule  
de la matière

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

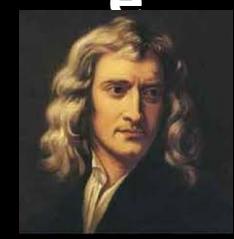
Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

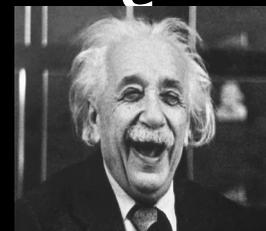
Variables  
cachées



Newton



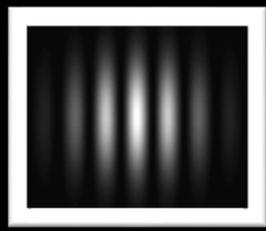
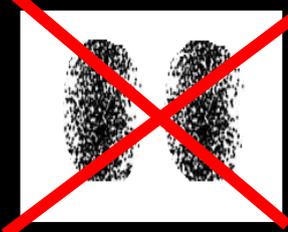
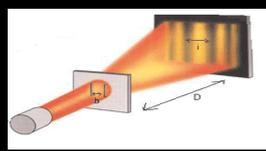
Young



Einstein



de Broglie



Expérience  
de Compton

Expérience  
de Davisson-  
Germer et  
Thomson

1801

1905

1925

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

Akira Tonomura (1989)  
(Vidéo Hitachi)

# La Cité des Sciences et de la Mer

à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-corpuscule

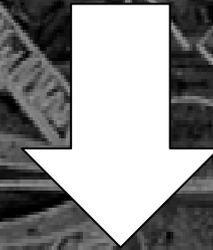
**Probabilités (2)**

Complétude

Variables cachées

Fonction d'onde

$$|\psi(x, t)|^2$$



~~Présence de l'électron~~

(Densité de)  
**Probabilité**  
de présence  
de l'électron

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

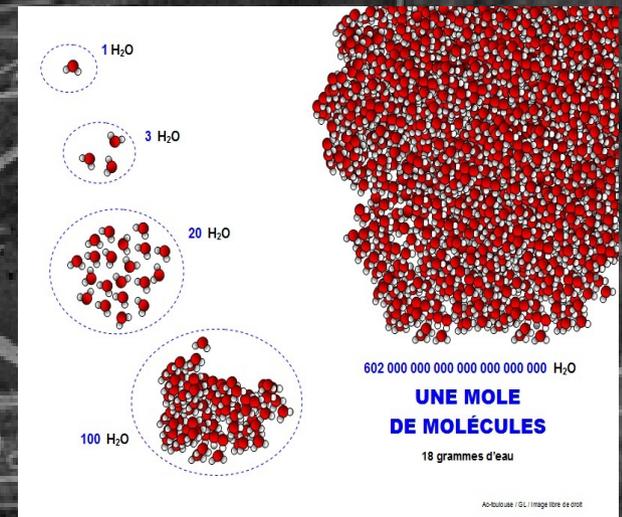
Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

En mécanique newtonienne :  
*Les probabilités s'appliquent  
lorsqu'on a un nombre important  
d'objets à étudier (une mole !).*



**En mécanique quantique :**  
*Les probabilités s'appliquent même si on  
n'a qu'un seul objet.*



Dieu ne joue pas aux dés

Qui êtes-vous pour dire à  
Dieu ce qu'il doit faire !

Niels Bohr et Albert  
Einstein

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

New York Times  
(04/05/1935)

## EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues  
Find It Is Not 'Complete'  
'Even Though 'Correct.'

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

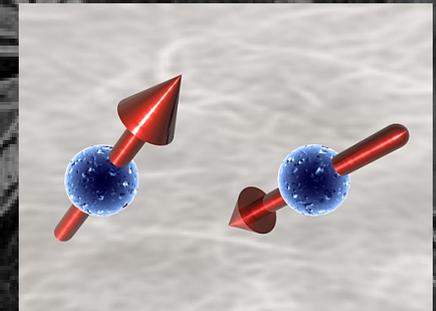
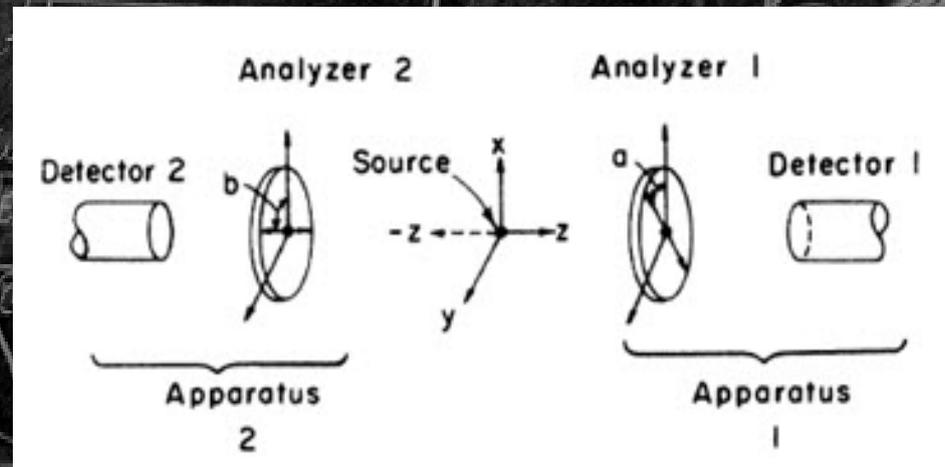
Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables  
cachées

Expérience EPR



Spin

Singulet

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{\uparrow} \otimes \psi_{\downarrow} - \psi_{\downarrow} \otimes \psi_{\uparrow})$$

# La Cité des Sciences et de la Mer

## à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

Variables cachées

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

### Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

One could object to this conclusion on the grounds that our criterion of reality is not sufficiently restrictive. Indeed, one would not arrive at our conclusion if one insisted that two or more physical quantities can be regarded as simultaneous elements of reality *only when they can be simultaneously measured or predicted*. On this point of view, since either one or the other, but not both simultaneously, of the quantities  $P$  and  $Q$  can be predicted, they are not simultaneously real. This makes the reality of  $P$  and  $Q$  depend upon the process of measurement carried out on the first system, which does not disturb the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this.

While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.

# La Cité des Sciences et de la Mer

à l'écoute des mondes possibles

Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

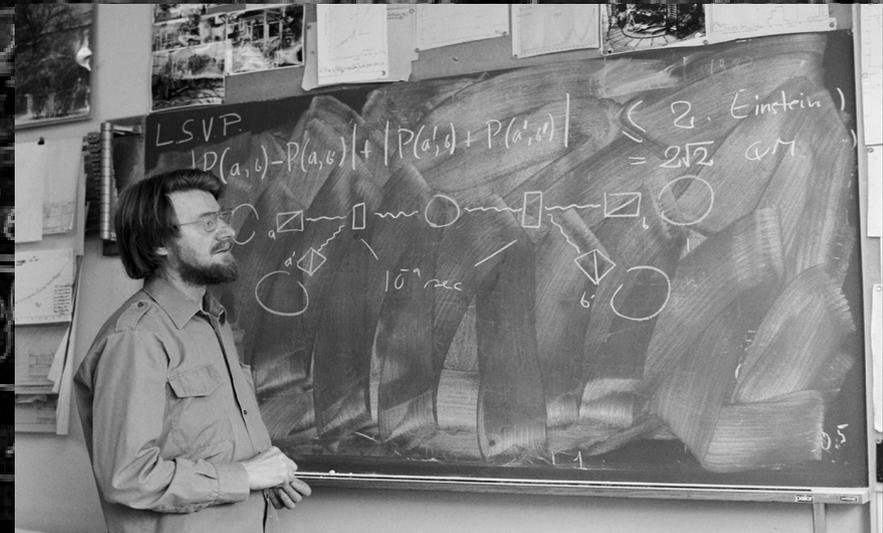
**Variables  
cachées**

$$\underbrace{\langle S_a \otimes S_b \rangle_\psi}_{D(a,b)} = \int f_{S_a \otimes S_b} d\rho_\psi = \int \underbrace{f_{S_a} f_{S_b}}_{E(a,b)} d\rho_\psi$$

**Variables cachées**

**Localité**

**John Bell**



**Inégalité de Bell**

$$-2 \leq E(a, b) + E(a', b') + E(a', b) + E(a, b') \leq 2$$

# La Cité des Sciences et de la Mer à l'écoute des mondes possibles

Alain Aspect



Interprétations

Déterminisme

Fonction d'onde

Probabilités (1)

Dualité onde-  
corpuscule

Probabilités (2)

Complétude

**Variables  
cachées**

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

Alain Aspect, Jean Dalibard,<sup>(a)</sup> 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.

« Les physiciens d'aujourd'hui existent en deux variétés:  
Le physicien de **type 1** est intrigué par EPR.  
Le physicien de **type 2** (qui constitue la majorité) ne l'est pas, mais il faut distinguer deux sous-variétés:  
Le physicien de **type 2a** explique pourquoi il ne l'est pas. Son explication est typiquement complètement hors sujet ... ou contient des hypothèses physiques clairement erronées.  
Le physicien de **type 2b** n'est pas intrigué et refuse de dire pourquoi. Leur position est inattaquable.  
(Il existe une variante du **type 2b** qui prétend que Bohr avait déjà réglé cette affaire tout en refusant d'expliquer comment). »

**D. Mermin (1985)**

**La Cité des Sciences et de la Mer**  
à l'écoute des mondes possibles



**Congrès Solvay de physique, 1927**

W. Aschbacher & O. Nanniéri - Université de  
Toulon

**La Cité des Sciences et de la Mer**  
à l'écoute des mondes possibles

**Merci de votre attention !**



**Congrès Solvay de physique, 1927**

W. Aschbacher & O. Nannipieri - Université de  
Toulon