

*PEUT-ON COMPRENDRE  
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?*

Jean BRICMONT

Colloque de Physique  
7 décembre 2011

Deuxième cours :

Ce que Bell (1964) et Einstein (1935)  
ont vraiment dit

Liens pour le cours précédent:

*[http : //uclouvain.be/316482.html](http://uclouvain.be/316482.html)*

et

*[http : //pangolia.com/blog/?p = 930](http://pangolia.com/blog/?p=930)*

## Résumé du cours précédent

Comportement étrange

spin 1  $\downarrow$   $\rightarrow$  on mesure la direction 2

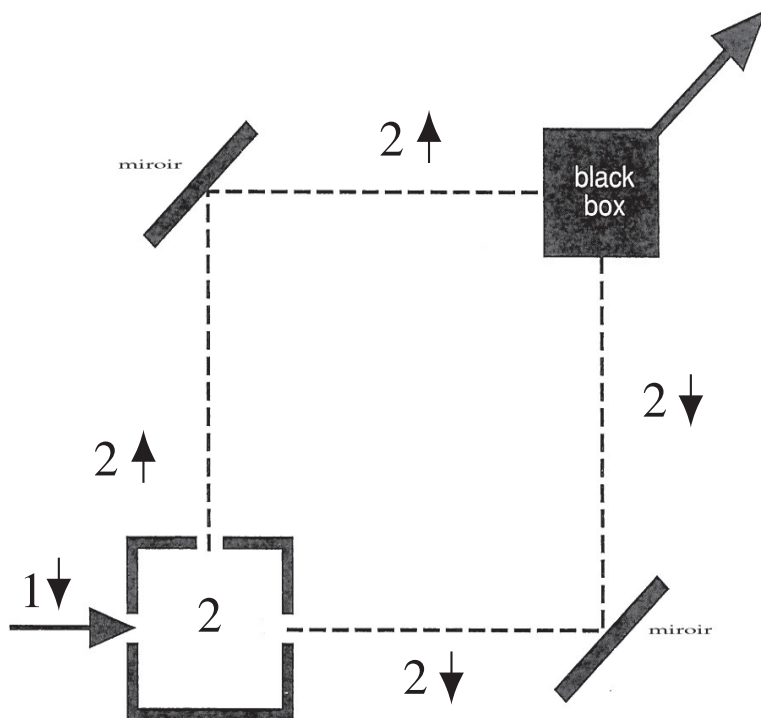
si 2  $\uparrow$   $\rightarrow$  on remesure 1

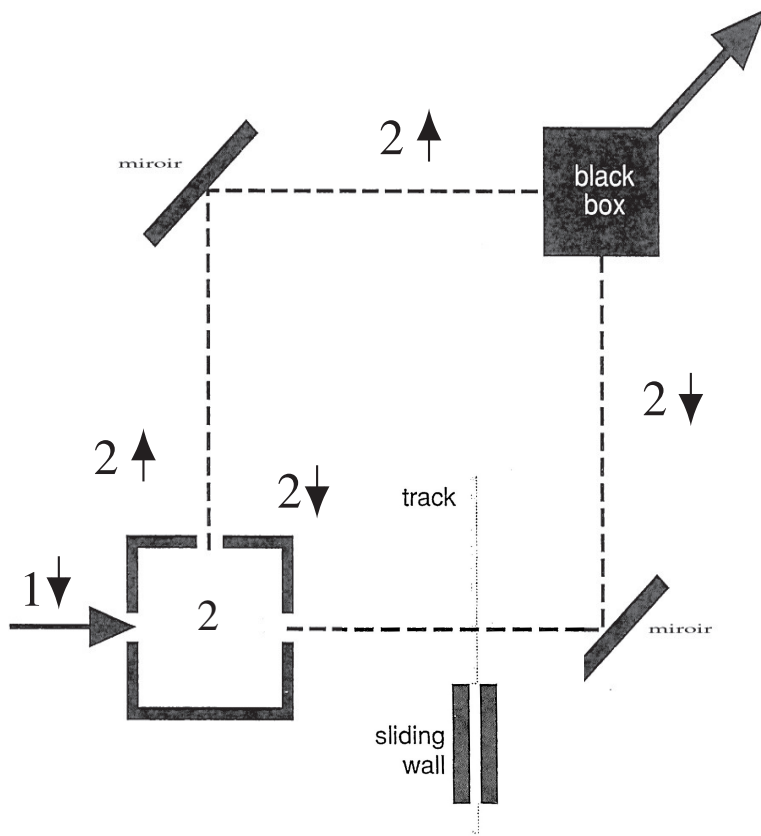
$\rightarrow$  moitié  $\uparrow$ , moitié  $\downarrow$ . On a “oublié” le spin dans la direction 1.

Mais si on recombine les “chemins” 2  $\uparrow$  et 2  $\downarrow$   $\rightarrow$  on retrouve

100 % spin 1  $\downarrow$

Donc, le spin dans la direction 1 n’a pas vraiment été “oublié”.





Si on insère un obstacle sur le chemin  $2 \downarrow \rightarrow$  on “sait” que la particule suit le chemin  $2 \uparrow \rightarrow$  on retrouve 50%  $1 \uparrow$ , 50%  $1 \downarrow$ .

L’obstacle semble influencer la particule qui suit le chemin sur lequel l’obstacle ne se trouve *pas*.

Il existe un formalisme qui permet de calculer (ou de prédire) ces phénomènes.

*MAIS*, ce formalisme utilise des règles différentes si on fait des “mesures” ou si on n’en fait pas. Le terme “mesure” n’est pas défini dans le formalisme.

SI on essaye de décrire le processus de mesure de façon quantique, on obtient des superpositions d'objets macroscopiques :

chat vivant + chat mort.

WANTED : Une théorie quantique *sans* observateurs.

Mais est-ce possible?

En effet, une interprétation “naïve” des probabilités des résultats de mesure comme révélant des propriétés (inconnues, incontrôlables) mais préexistantes du système est intenable, à cause du théorème Bell-Kochen-Specker sur les variables cachées.

*Théorème Bell-Kochen-Specker sur les variables cachées.*

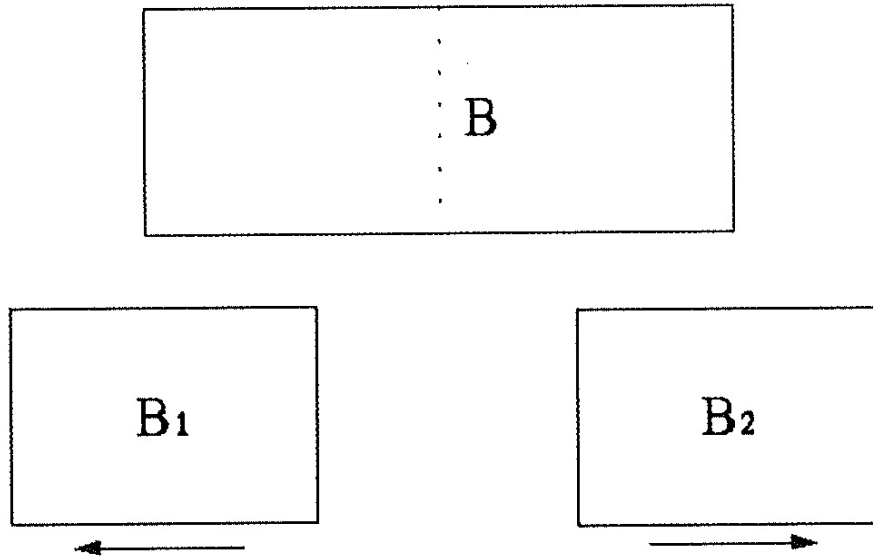
Soient  $\sigma_x^1, \sigma_y^1, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ , des “matrices de spin” (matrices de Pauli) dans les directions  $x$  et  $y$  pour des particules 1 et 2. Alors, il est impossible d’assigner simultanément à chacune de ces variables une valeur  $v(\sigma_\alpha^i) = \pm 1$   $\alpha = x, y, i = 1, 2$ , de façon à ce que la règle

$$v(AB) = v(A)v(B) \text{ si } [A, B] = 0$$

soit respectée pour toutes matrices  $A$  et  $B$  obtenues en multipliant entre elles les matrices  $\sigma_\alpha^i$ .

$\Rightarrow$  (même) le spin n’est pas “réel”.

## Les boîtes d'Einstein



Une unique particule se trouve dans la boîte  $B$ , dans laquelle on insère une barrière qui coupe la boîte en deux,

$$|\text{état}\rangle = |B\rangle$$

L'état de la particule devient

$$\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|B_1\rangle + |B_2\rangle)$$

où  $|B_1\rangle =$  la particule est dans la boîte  $B_1$

Les deux demi-boîtes résultantes,  $B_1$  et  $B_2$  sont ensuite séparées, aussi loin que l'on veut. Si on ouvre une des boîtes (mettons  $B_1$ ), et qu'on n'y trouve *pas* la particule, on *sait* qu'elle se trouve en  $B_2$ . Par conséquent, l'état se "réduit" instantanément et de façon non locale.

On ouvre la boîte  $B_1 \longrightarrow$  rien

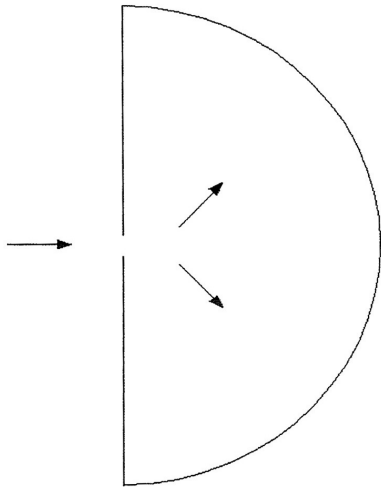
c'est une mesure, donc

état  $\longrightarrow |B_2 \rangle$

(et si on ouvre la boîte  $B_2$ , on y trouve la particule !).



Le problème était déjà soulevé, sous une autre forme, par Einstein en 1927.



Dans cette situation, la fonction d'onde “s'étale” sur le demi-cercle, mais on trouve toujours la particule en un point donné. Si la particule *n'est pas* localisée avant la mesure, alors elle doit se “condenser” instantanément en un point, et, à nouveau, de façon non-locale.

| état  $\rangle$  = physique ou épistémique ?

Si physique  $\longrightarrow$  non localité

Si épistémique  $\longrightarrow$  MQ = incomplète, c'est-à-dire qu'il existe des "variables cachées", qui complèteraient la description quantique et qui, ici, détermineraient *dans quelle boîte se trouve la particule avant qu'on ouvre une des boîtes ou à quel endroit du demi-cercle elle se trouve.*

Mais les théorèmes sur l'inexistence des variables cachées rendent douteuse la possibilité d'une telle complé-tion.

Envisageons donc la possibilité de la non-localité.

## Qu'est-ce que la Localité ?

PAS D'ACTION À DISTANCE. QU'EST-CE QU'UNE ACTION À DISTANCE ?

Propriétés

1. Instantanée
2. a. A portée arbitrairement longue  
b. L'effet ne décroît pas avec la distance
3. Individué
4. Permet de transmettre des messages

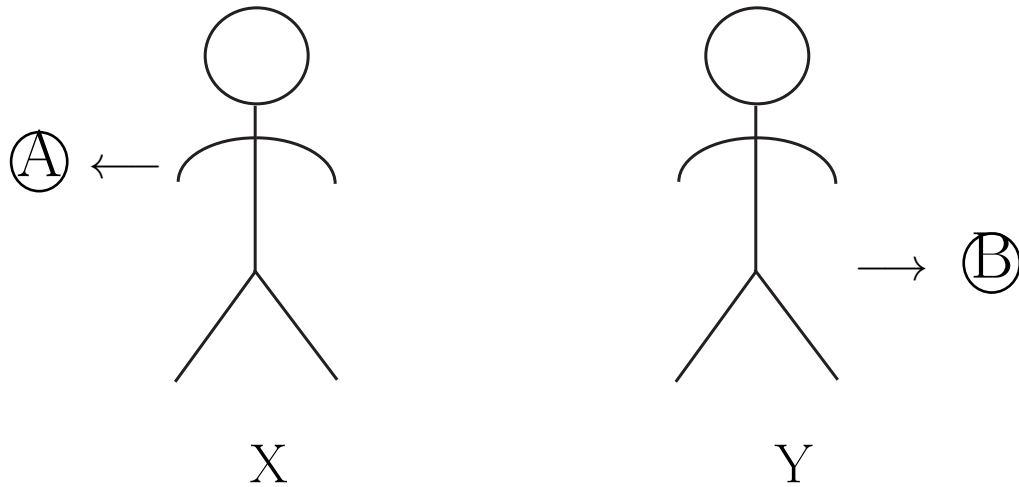
La gravitation de Newton : 1, 2a et 4 : la force de gravitation universelle dépend *instantanément, à chaque instant*, de la distribution des masses dans tout l'univers.

La physique post-newtonienne, fondée sur l'idée de *champs* (électromagnétique ou gravitationnel) “se propageant dans le vide” : 2a et 4

Existe-t-il un phénomène avec les propriétés : 1-3 ?

(Pas 4 → pseudoscience).

# NON LOCALITÉ



Questions      1, 2 ou 3

2 réponses      oui/non

Observation : quand on pose la même question  
en A et B on a toujours la même réponse

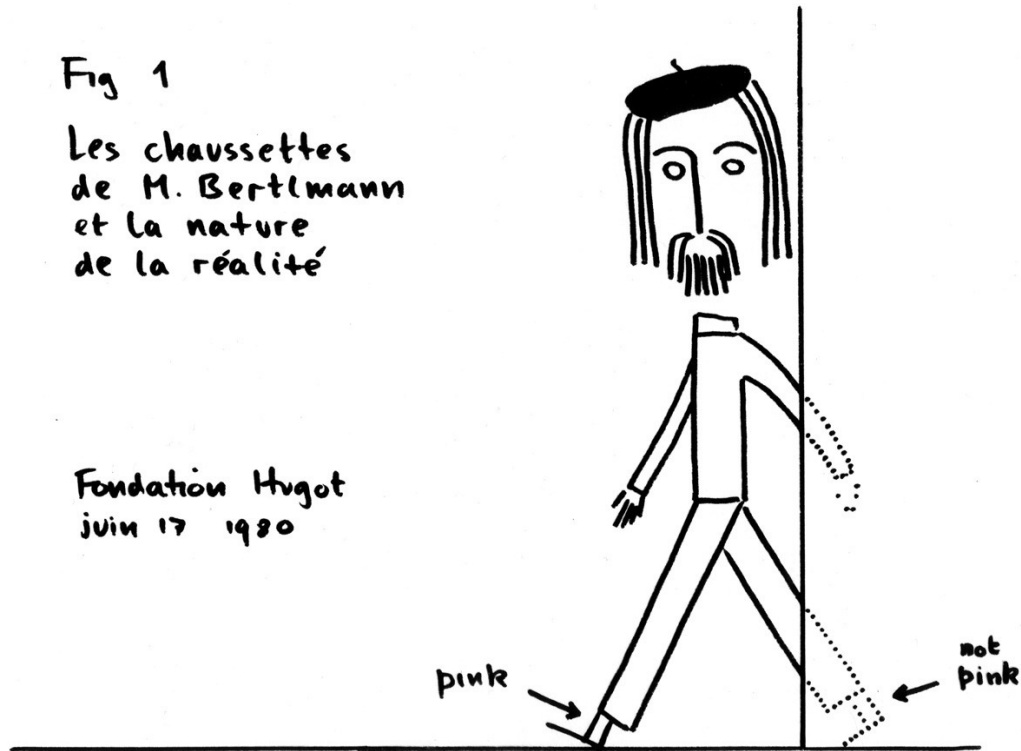
Comment expliquer cela ? Pensons au cas plus simple où la *même* question est posée à chaque fois, et les réponses sont toujours les mêmes des deux côtés.

Seules possibilités : les réponses sont prédéterminées  
*ou* il existe une forme de communication entre A et B  
*après* que les questions aient été posées !

Fig 1

Les chaussettes  
de M. Bertlmann  
et la nature  
de la réalité

Fondation Hugot  
juin 17 1980



La couleur des chaussettes *existe* indépendamment du fait qu'on les regarde ou non. Mais que diriez-vous si LA SCIENCE vous affirmait que la couleur des chaussettes *n'existe pas* avant qu'on ne les regarde et que, néanmoins, le fait de regarder une chaussette sur un pied vous permet de connaître *instantanément* la couleur de la chaussette sur l'autre pied ? Et que, de plus, cela restait vrai si les deux chaussettes (qui ne doivent pas être attachées aux pieds) étaient aussi éloignées l'une de l'autre que l'on veut ? Que le monde n'est pas local ?

DONC,

X en A, Y en B	Très éloignés
1, 2, 3	3 Questions
Oui/Non	2 Réponses

Quand on pose la *même* question des deux côtés (1, 2 ou 3)  $\Rightarrow$  on obtient toujours la *même* réponse des deux côtés OUI ou NON.

Corrélation à distance parfaite + **AUCUNE** sorte d'action à distance ou “localité”

$\Rightarrow \exists$  des valeurs prédéterminées (aléatoires), comme la couleur des chaussettes, qui sont des “variables cachées”.

$$v_A(\alpha), v_B(\alpha), = \text{Oui/Non} \quad \alpha = 1, 2, 3.$$

Ce qui précède est la partie Einstein Podolsky et Rosen (EPR-1935) de l'argument.

**MAIS**

Cette supposition

**(à elle seule)**

est contredite par des observations faites quand les questions sont différentes.

Partie Bell (1964) de l'argument.

## PREUVE

3 Questions      1, 2, 3

2 Réponses      Oui / Non

Si les réponses sont données à l'avance, il existe 8  
( $= 2^3$ ) possibilités pour l'ensemble des réponses aux  
questions (ou pour l'ensemble des valeurs possibles pour  
les “variables cachées”) :

1	2	3
<i>O</i>	<i>O</i>	<i>O</i>
<i>O</i>	<i>O</i>	<i>N</i>
<i>O</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
<i>O</i>	<i>N</i>	<i>N</i>
<i>N</i>	<i>O</i>	<i>O</i>
<i>N</i>	<i>O</i>	<i>N</i>
<i>N</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>

Dans *tous les cas* il existe au moins *deux questions*  
avec la même réponse.



Donc,

$$\begin{aligned} & \text{Fréquence (la réponse à 1 = la réponse à 2)} \\ & + \text{Fréquence (la réponse à 2 = la réponse à 3)} \\ & + \text{Fréquence (la réponse à 3 = la réponse à 1)} \geq 1 \end{aligned}$$

MAIS,

dans certaines expériences,

$$\begin{aligned} & \text{Fréquence (la réponse à 1 = la réponse à 2)} \\ & = \text{Fréquence (la réponse à 2 = la réponse à 3)} \\ & = \text{Fréquence (la réponse à 3 = la réponse à 1)} \\ & = \frac{1}{4} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{3}{4} \geq 1$$

ce qui est FAUX !

$\Rightarrow$  CONTRADICTION

⇒ Contradiction via un théorème sur l'inexistence de "variables cachées".

## LOGIQUE

Corrélations parfaites

+ ⇒ valeurs

Localité préexistantes

(Partie EPR de l'argument), ce qui est un exemple de "variables cachées".

Théorème sur les variables cachées.

⇒ ces valeurs préexistantes n'existent pas (partie Bell de l'argument).

En combinant EPR+Bell :

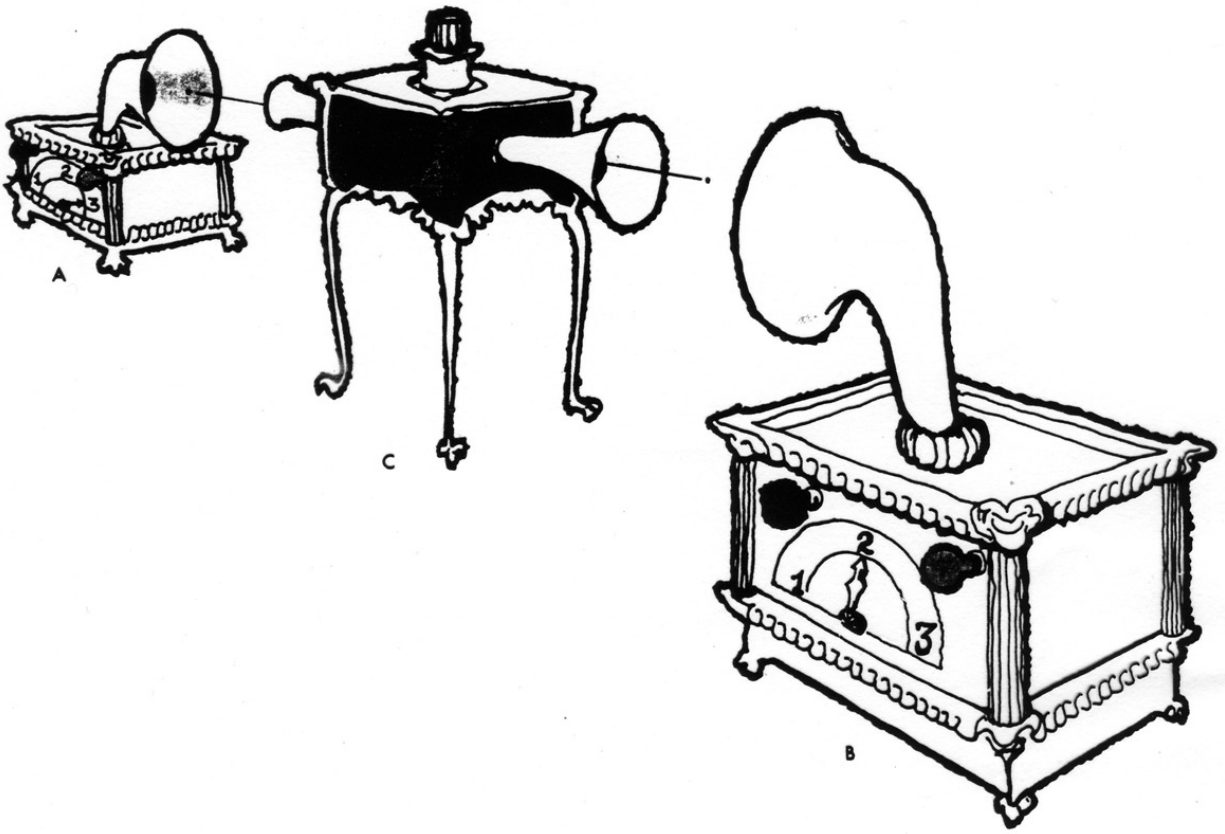
⇒ Localité

PAS *d'hypothèses* sur le

"déterminisme"

"les variables cachées"

"le réalisme"



1, 2, 3 =

QUESTIONS

(left/right)

Red

Green

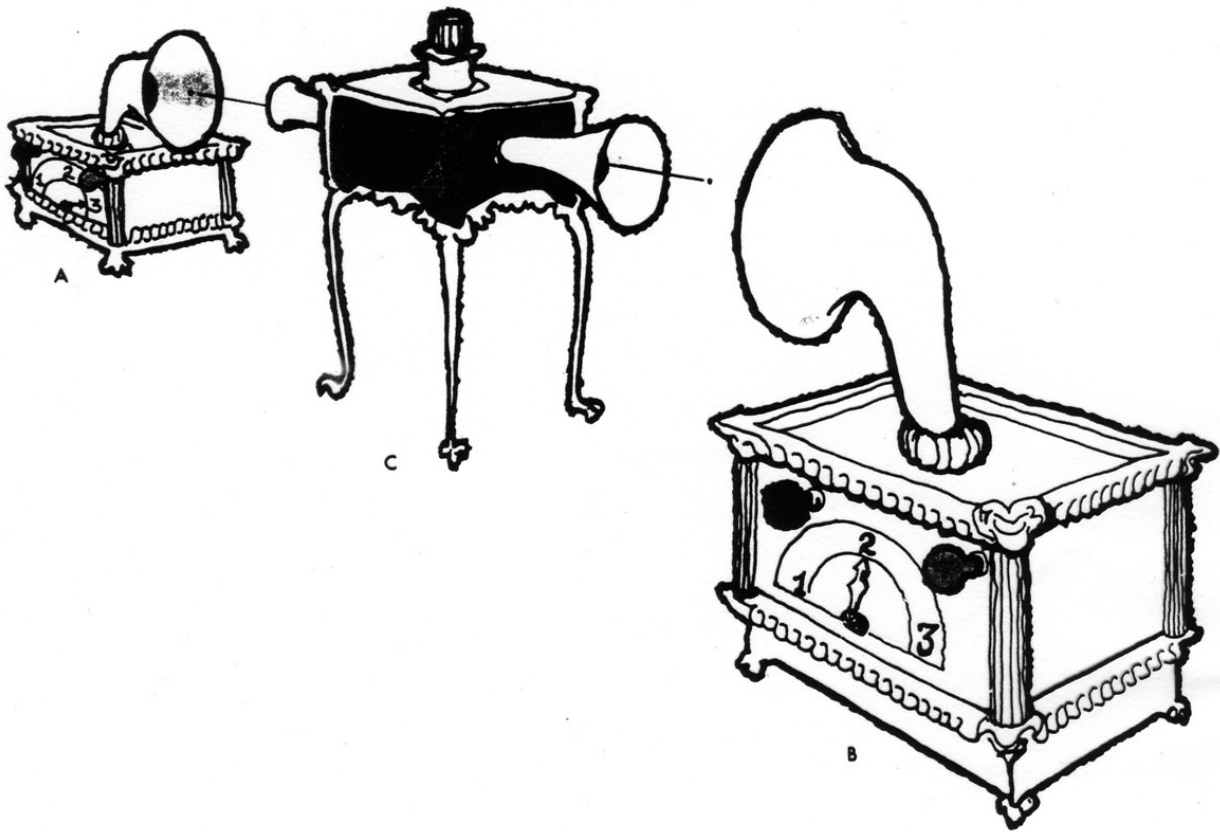
= 2 ANSWERS

(Yes/No)

<u>31 RR</u>	<b>2200</b>	<b>33 GG</b>
<b>3300</b>	<b>11 RR</b>	21 GR
<b>33 RR</b>	<b>3300</b>	13 GR
12 GR	31 GR	23 GR
<b>3300</b>	<u>12 GG</u>	<b>22 RR</b>
21 GR	21 GR	<b>11 RR</b>
<u>21 RR</u>	<b>3300</b>	21 GR
<b>22 RR</b>	<u>21 RR</u>	<u>21 RR</u>
<b>3300</b>	12 GR	<u>23 GR</u>
<b>1100</b>	<b>22 RR</b>	32 GR
<u>23 RR</u>	13 RG	<b>33 RR</b>
32 GR	12 RG	<b>33 GG</b>
12 GR	<u>23 GG</u>	<b>33 GG</b>
12 RG	<b>1100</b>	23 GR
<b>1100</b>	13 RG	21 GR
31 RG	21 RG	<u>12 RR</u>
12 RG	<b>33 RR</b>	32 GR
13 GR	32 GR	32 GR
<b>2200</b>	<u>32 GG</u>	<b>33 GG</b>
12 RG	<b>3300</b>	31 RG
12 GR	<u>21 RR</u>	13 RR
<b>2200</b>	12 RG	13 RG
23 GR	<b>2200</b>	32 RG
<b>33 RR</b>	<b>1100</b>	31 GR
<b>3300</b>	23 GR	<u>23 RR</u>
31 RG	<b>22 RR</b>	<b>33 RR</b>
<u>31 RR</u>	<b>1100</b>	13 GR
<b>33 RR</b>	32 GR	<b>11 GG</b>
32 RG	13 RG	31 GR
31 RG	13 GR	31 RG
<b>11 RR</b>	<u>23 GG</u>	13 GR
23 GR	<b>33 RR</b>	23 RG
<u>12 GG</u>	31 GR	<u>31 GG</u>
<b>1100</b>	13 RG	23 RG
13 RG	<u>23 RR</u>	<u>21 RR</u>
31 RG	12 GR	23 RG
23 GR	31 RG	<b>1100</b>
31 GR	32 RG	<b>2200</b>
23 RG	21 GR	<b>1100</b>
<b>22 RR</b>	<b>2200</b>	<b>1100</b>
12 GR	<b>22 RR</b>	21 RG
32 GR	13 RR	<b>11 RR</b>
<b>22 RR</b>	21 GG	12 RG
<u>12 GG</u>	<u>23 GR</u>	23 GR
<b>33 RR</b>	<b>2200</b>	32 GR
<b>11 RR</b>	<b>2200</b>	<u>21 GG</u>
<u>23 GG</u>	<u>31 GG</u>	21 RG
<u>23 GG</u>	13 GR	13 RG
<b>33 RR</b>	21 GR	13 RG
23 GR	<b>33 RR</b>	13 RG
<u>21 GG</u>	<u>23 RR</u>	13 GR
13 GR	<b>22 RR</b>	23 RG
<b>3300</b>	<u>12 RR</u>	<b>2200</b>
<b>1100</b>	23 RG	<b>11 RR</b>
<u>12 RR</u>	23 RG	31 RG
<u>12 GG</u>	32 GR	<u>23 RR</u>
<u>31 GG</u>	31 RG	<u>23 RG</u>
32 RG	<b>2200</b>	<b>11 RR</b>
21 GR	<b>1100</b>	32 RG
<b>2200</b>	<b>1100</b>	32 GR
<b>22 RR</b>	21 RG	<u>13 GG</u>
<u>13 RR</u>	<b>11 RR</b>	<u>23 GR</u>
<u>21 GG</u>	12 RG	32 GR
23 GR	23 GR	<b>22 RR</b>

35 out of ~ 130

# DESCRIPTION QUANTIQUE



$|\Psi\rangle \equiv |\text{état des deux particules}\rangle$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A\ 1\uparrow\rangle |B\ 1\downarrow\rangle - |A\ 1\downarrow\rangle |B\ 1\uparrow\rangle)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A\ 2\uparrow\rangle |B\ 2\downarrow\rangle - |A\ 2\downarrow\rangle |B\ 2\uparrow\rangle)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|A\ 3\uparrow\rangle |B\ 3\downarrow\rangle - |A\ 3\downarrow\rangle |B\ 3\uparrow\rangle)$$

On “mesure” le spin dans la direction 1 en A et on voit  $\uparrow$ ,

l’état devient  $\Rightarrow |A\ 1\uparrow\rangle |B\ 1\downarrow\rangle$ ; on voit  $\downarrow$ , l’état devient

$\Rightarrow |A\ 1\downarrow\rangle |B\ 1\uparrow\rangle$ .

Idem si on “mesure” le spin dans la direction 2 ou 3 (Réduction de l’état lors d’une mesure). Mais alors on a changé aussi *non localement* l’état en  $B$ .

Reposons la question posée à propos des boîtes :

| état  $\rangle$  = physique ou épistémique ?

Si physique  $\longrightarrow$  non localité

Si épistémique  $\longrightarrow$  MQ = incomplète, c’est-à-dire qu’il existe des “variables cachées” , qui complèteraient la description quantique et qui, ici, détermineraient *si la particule en B est*  $1\uparrow$  ou  $1\downarrow$ ,  $2\uparrow$  ou  $2\downarrow$ ,  $3\uparrow$  ou  $3\downarrow$  .

Or, ce que montre Bell, c’est que la simple supposition de l’existence de ces propriétés mène à des contradictions.

## D'où vient le 1/4?

Calculons  $\mathbf{E}_{\mathbf{a},\mathbf{b}} \equiv \langle \Psi | \sigma_{\mathbf{a}}^A \otimes \sigma_{\mathbf{b}}^B | \Psi \rangle$ , où  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  sont des vecteurs unitaires dans les directions (1, 2 ou 3) selon lesquelles on “mesure” le spin en A ou en B.

Cette quantité est bilinéaire en  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  et invariante sous rotation, donc elle est de la forme  $\lambda \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ , pour un certain  $\lambda \in \mathbf{R}$ .

En prenant  $\mathbf{a} = \mathbf{b}$ , à cause des anti-corrélations parfaites, on trouve  $\lambda = -1$ , et donc  $\mathbf{E}_{\mathbf{a},\mathbf{b}} = -\cos \theta$ , où  $\theta$  est l'angle entre les directions  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{b}$ . Comme  $v_A(\mathbf{a})$ ,  $v_B(\mathbf{b}) = \pm 1$ ,  $P(v_A(\mathbf{a}) = -v_B(\mathbf{b})) = \frac{1 - \mathbf{E}_{\mathbf{a},\mathbf{b}}}{2} = \frac{1 + \cos \theta}{2}$ .

On choisit ensuite les directions:

$$1 \Rightarrow \theta = 0 \text{ degré,}$$

$$2 \Rightarrow \theta = 120 \text{ degrés,}$$

$$3 \Rightarrow \theta = 240 \text{ degrés. (} \cos 120 = \cos 240 = -1/2 \text{).}$$

Finalement, on change de conventions en A et B:  $v_A(\mathbf{a}) = +1$  égal “oui”,  $v_A(\mathbf{a}) = -1$  égal “non”, mais  $v_B(\mathbf{b}) = +1$  égal “non”,  $v_A(\mathbf{b}) = -1$  égal “oui”.

## **Pourquoi cela ne justifie pas les superstitions**

Problème : si on peut envoyer des messages instantanément, alors, si la relativité est vraie,  $\Rightarrow$  on peut en envoyer dans son propre passé.

— Chaque côté observe une suite parfaitement aléatoire de lumières Rouge/Verte

— Aucun message ne peut être transmis

— MAIS si chaque personne, de chacun des côtés de l'expérience, dit à l'autre quelles expériences elle a faite (1, 2 ou 3), ou, plus simplement, si elles font tout le temps la même expérience, alors elles savent toutes les deux quel résultat a été obtenu de l'autre côté quand la même expérience a été faite des deux côtés.

$\Rightarrow$  Elles ont alors une suite commune de Rouge ou Vert ou de Oui et de Non, c'est-à-dire qu'une certaine information a bien été transmise plus vite que la lumière.



## **Est-ce que ceci entre en conflit avec la théorie de la relativité ?**

Bien sûr !

Du moins avec *l'esprit de la relativité*

R. Penrose : “une tension avec la relativité ”

Si une quelconque action à distance existe, alors la relativité implique l'existence d'une action sur le passé.

*Aucune solution satisfaisante*

Quid de la théorie quantique des champs ou de la mécanique quantique relativiste ?

On n'y parle jamais de la réduction de l'état de façon relativiste  $\longrightarrow$  la question posée par EPR et Bell n'y est même pas discutée.

## RÉSUMÉ

*Premier mystère:* un rôle apparemment essentiel de la “mesure”, qui, de plus, ne peut pas être comprise de façon naïve comme mesure d’une propriété préexistante.

*Deuxième mystère:* Appliquée à la situation EPR, cette non existence de propriétés préexistantes implique que le monde est non local, en ce sens qu’il existe une forme subtile mais réelle d’action instantanée à distance.

Il existe néanmoins une théorie de “variables cachées”, qui ne sont nullement cachées (ce sont les seules variables réellement visibles), qui élimine complètement la référence essentielle, dans la mécanique quantique usuelle, à “l’observateur”, qui explique la non existence des variables cachées (du moins celles concernées par les théorèmes Kochen-Specker-Bell) et, dans la mesure où c’est possible, la nonlocalité de l’univers.

Êtes-vous prêts à écouter?

*Troisième mystère*

Non bien sûr!

Si oui, à la semaine prochaine!

## HISTOIRE

Qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide et sans la médiation de quelque'autre corps . . . me paraît être une telle absurdité que je pense qu'aucune personne possédant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire.

ISAAC NEWTON

Ce qui existe réellement en un point  $B$  ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point  $A$  de l'espace ; cela devrait également être indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en  $A$ .

ALBERT EINSTEIN

Si les résultats d'une expérience sur la chute libre ici à Amsterdam devaient dépendre de façon appréciable de la température au Mont Blanc, de la hauteur de la Seine à Paris, ou de la position des planètes, nous n'irions pas très loin.

H.B.G. CASIMIR

## REACTIONS

Le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science

H. STAPP

La seule partie de cet article [celui d'EPR] qui survivra, je pense, est une phrase ...

A. PAIS

Quiconque n'est pas préoccupé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête

ANONYME

## Ce que Bell a *vraiment* dit

Laissez moi résumer une fois de plus le raisonnement qui a mené à l'impasse. Les corrélations EPRB sont telles que le résultat de l'expérience d'un côté prédit immédiatement celui de l'autre côté, quand les analyseurs sont parallèles. Si nous n'acceptons pas l'idée selon laquelle l'intervention d'un côté a un effet causal sur l'autre, nous sommes, semble-t-il, obligés d'admettre que les résultats des deux côtés sont de toute façon déterminés à l'avance, indépendamment de l'intervention d'un côté, par des signaux venant de la source et par les dispositions locales des aimants. Mais cela a des conséquences sur des dispositifs non-parallèles qui sont en conflits avec la mécanique quantique. Donc, on *ne peut pas* nier que l'intervention d'un côté a une influence causale sur l'autre côté.

J. BELL

Bien que j'aie toujours insisté sur le fait que le déterminisme était déduit plutôt que supposé, vous pouvez peut-être soupçonner que le problème vient d'une préoccupation à propos du déterminisme. Notez que l'argument qui suit ne mentionne absolument pas le déterminisme. . . . Finalement, vous pouvez peut-être soupçonner que c'est la notion de particule, ou d'orbite d'une particule . . . qui nous égare . . . Aussi, l'argument qui suit ne mentionnera pas les particules . . . ni aucune image de ce qui se passe au niveau microscopique. Il n'utilisera pas non plus l'expression "système quantique", qui peut avoir un effet déplorable sur la discussion. La difficulté ne provient pas de telles images ou d'une telle terminologie, mais des prédictions concernant les corrélations entre des résultats visibles d'expériences concevables.

J. BELL



Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées semblent exiger une sorte d'hypothèse "génétique" (des jumeaux identiques, qui ont des gènes identiques). Pour moi, il est si raisonnable de supposer que les photons dans ces expériences emportent avec eux des programmes, qui sont corrélés à l'avance, et qui dictent leur comportement. Ceci est si rationnel que je pense que quand Einstein a vu cela et que les autres refusaient de le voir, il était l'homme rationnel. Les autres, bien que l'histoire leur ait donné raison, se cachaient la tête dans le sable. Je pense que la supériorité intellectuelle d'Einstein sur Bohr, dans ce cas-ci, était énorme ; un immense écart entre celui qui voyait clairement ce qui était nécessaire, et l'obscurantiste. Aussi, pour moi, il est dommage que l'idée d'Einstein ne marche pas. Ce qui est raisonnable ne marche tout simplement pas.

J. BELL

La nonlocalité de la mécanique quantique ne peut pas être attribuée à son caractère incomplet, mais est d'une certaine façon irréductible (p. 244).

Que la mécanique quantique ordinaire n'est pas localement causale a été montré en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen (p.256).

Pour moi, voici le véritable problème avec la théorie quantique: le conflit apparemment essentiel entre une formulation précise [de cette théorie] et la relativité à un niveau fondamental. C'est-à-dire que nous avons une incompatibilité apparente, au niveau le plus profond, entre les deux piliers fondamentaux des théories contemporaines... (p. 172).

## Incompréhensions

... un travail théorique de John Bell a montré que le dispositif expérimental de EPRB pouvait être utilisé pour distinguer la mécanique quantique de théories hypothétiques de variables cachées. ... Après la publication du travail de Bell, plusieurs équipes de physiciens expérimentateurs ont réalisé l'expérience EPRB.

Le résultat fut attendu avec impatience, bien que presque tous les physiciens pariaient sur le caractère correct de la mécanique quantique, qui a été, en fait, justifiée par les résultats.

M. GELL-MANN

La situation est comme celle des chaussettes de Mr Bertlmann, décrite par John Bell dans un de ses articles. Bertlmann est un mathématicien qui porte une chaussette rose et une chaussette verte. Si vous voyez seulement un de ses pieds et que vous voyez une chaussette verte, vous savez immédiatement que la chaussette sur l'autre pied est rose. Néanmoins, aucun signal ne passe d'un pied à l'autre. De même, aucun signal ne passe d'un photon à l'autre dans l'expérience qui confirme la mécanique quantique. Aucune action à distance n'a lieu.

M. GELL-MANN

Fig 1  
Les chaussettes  
de M. Bertlmann  
et la nature  
de la réalité

Fondation Hugot  
juin 17 1980



Qui pensons-nous que *nous* sommes?

*Nous* qui pouvons faire des “mesures”, *nous* qui pouvons manipuler des “champs externes”, *nous* qui pouvons “signaler”, même si ce n’est pas plus vite que la lumière? Est-ce que le *nous* inclut les chimistes ou seulement les physiciens, est-ce que cela inclut les plantes ou seulement les animaux, les calculettes de poches ou les gros ordinateurs?

J.S. Bell

La preuve qu'il [von Neumann] a publiée . . . , bien qu'elle ait été rendue bien plus convaincante plus tard par Kochen et Specker, se base sur des hypothèses qui, à mon avis, peuvent raisonnablement être mises en question . . . A mon avis, l'argument le plus convaincant contre la théorie des variables cachées a été présenté par J. S. Bell . . . L'argument montre que toute théorie de variables cachées qui se conforme au postulat de la localité est en conflit avec la mécanique quantique.

E. WIGNER

Mon premier article sur le sujet commence par résumer l'argument d'EPR inférant à partir de la localité l'existence de variables cachées déterministes. Mais les commentateurs ont presque tous considéré que l'argument partait de variables cachées déterministes.

J. BELL (p.157)

Les physiciens contemporains sont divisés en deux classes. Ceux de type 1 sont préoccupés par EPR et Bell. Ceux de type 2 (la majorité), ne le sont pas, mais on doit distinguer deux sous-classes; Ceux de types 2a expliquent pourquoi cela ne les préoccupe pas. Leurs explications tendent soit à être complètement à côté de la question (comme Born répondant à Einstein) ou à se baser sur des assertions dont on peut montrer qu'elles sont fausses. Ceux de type 2b ne sont pas préoccupés et refusent de dire pourquoi. Leur position est inattaquable. (Il existe une variante du type 2b qui disent que Bohr a arrangé tout cela, mais refusent d'expliquer comment).

D. MERMIN



Mais le même Mermin écrit aussi :

Pour ceux pour qui la nonlocalité est anathème, le théorème de Bell signifie la mort du programme des variables cachées.

Mais pas pour Bell. Aucun théorème sur l'inexistence de variables cachées ne l'a persuadé que les variables cachées étaient impossibles. Ce que le théorème de Bell a suggéré à Bell était que nous devrions réexaminer notre compréhension de l'invariance sous Lorentz ...

D. MERMIN

RETOUR SUR L'HISTOIRE  
AVANT BELL  
QUE PENSAIT VRAIMENT EINSTEIN ?

Si on se demande, indépendamment de la mécanique quantique, ce qui est caractéristique du monde des idées en physique, on est frappé de prime abord par ceci : les concepts de la physique se réfèrent à un monde extérieur réel... Il est, de plus, caractéristique que ces objets physiques sont pensés comme étant disposés dans un continuum d'espace-temps. Un aspect essentiel de cette disposition des choses en physique est qu'elles prétendent avoir, à un instant donné, une existence indépendante les unes des autres, pourvu que ces objets soient "situés dans des parties différentes de l'espace".

L'idée suivante caractérise l'indépendance relative des objets éloignés dans l'espace (A et B) : l'influence externe sur A n'a aucune influence sur B ...

Je ne doute pas du fait que les physiciens qui considèrent les méthodes descriptives de la mécanique quantique comme en principe définitives réagiraient ainsi à cette façon de penser : ils abandonneraient l'exigence . . . d'une existence indépendante pour la réalité physique présente dans différentes parties de l'espace; et ils auraient raison de faire remarquer que nulle part la mécanique quantique ne requiert explicitement ce fait.

J'admets cela, mais je soulignerais ceci : quand je considère les phénomènes physiques qui me sont connus et particulièrement ceux qui sont incorporés avec succès dans la mécanique quantique, je ne trouve nulle part de fait qui rendrait plausible l'abandon de cette exigence.

Je suis par conséquent enclin à croire que la description de la mécanique quantique . . . doit être vue comme une description incomplète et indirecte de la réalité, qui devra être remplacée à une époque future par une description plus complète et plus directe.           A. EINSTEIN (1948)

## L'INCOMPRÉHENSION DE M. BORN

Le fond de la différence entre Einstein et moi était l'axiome que des évènements se produisant à des endroits différents A et B sont indépendants l'un de l'autre en ce sens que l'observation de la situation en A ne peut rien nous apprendre sur la situation en B.

M. BORN

## COMMENTÉE PAR J. BELL

L'incompréhension était totale. Einstein n'avait aucune difficulté à admettre que des situations à des endroits différents soient corrélées. Ce qu'il n'acceptait pas, c'est que l'action en un endroit puisse *influencer*, immédiatement, la situation en un autre endroit.

Ces références à Born n'ont pas pour but de diminuer une des figures majeures de la physique moderne. Elles veulent illustrer la difficulté qu'il y a à mettre de côté ses préjugés et à écouter ce qui est réellement dit. Et à vous encourager, *vous* chers auditeurs, à écouter un peu mieux.

J. S. BELL

ET PAR W. PAULI

J'étais incapable de reconnaître Einstein quand vous parliez de lui, dans vos lettres ou votre manuscrit. Il me semble que vous avez érigé pour vous-même un Einstein en carton-pâte que vous abattez ensuite en grande pompe. En particulier, Einstein ne considère pas le concept de "déterminisme" comme aussi fondamental qu'on ne le pense fréquemment (comme il me l'a dit plusieurs fois avec emphase) . . . il conteste l'affirmation selon laquelle il utilise comme critère d'admissibilité d'une théorie "est-elle rigoureusement déterministe ?" . . . Il n'était pas fâché contre vous, mais a dit seulement que vous étiez quelqu'un qui n'écoutait pas.

W. PAULI à M. BORN (lettre)

## LA RÉPONSE DE BOHR À EPR

“Si, sans perturber d’aucune façon un système, on peut prédire avec certitude la valeur d’une quantité physique, alors il existe un élément de la réalité physique qui correspond à cette quantité physique” (EPR).

L’énoncé du critère ci-dessus . . . contient une ambiguïté en ce qui concerne l’expression “sans perturber d’aucune façon un système”. Bien sûr, dans le cas considéré, il n’est pas question d’une perturbation mécanique du système analysé durant la dernière étape critique du processus de mesure. Mais, même à cette étape, il y a essentiellement la question de *l’influence sur les conditions mêmes qui définissent les types possibles de prédictions concernant le comportement futur du système* . . . leur argumentation ne justifie pas leur conclusion selon laquelle la description quantique est essentiellement incomplète . . . Cette description peut être caractérisée comme l’utilisation rationnelle de toutes les possibilités d’une interprétation non-ambigüe des mesures, comptable avec l’interaction finie et non contrôlable entre les objets et les instruments de mesure dans le champ de la théorie quantique.

N. BOHR

Est-ce que :

“La position de Bohr triomphe sur toute la ligne”

I. STENGERS

Pas si vite!



## COMMENTÉE PAR J. BELL

Je ne comprends que très peu ce que cela veut dire. Je ne comprends pas en quel sens le mot “mécanique” est utilisé, pour caractériser les perturbations que Bohr n’envisage pas, par opposition à celles qu’il envisage. Je ne comprends pas ce que le passage en italique signifie “ l’influence sur les conditions mêmes ...”. Est-ce que cela veut dire simplement que différentes expériences faites sur le premier système donnent différentes sortes d’information sur le second ? Mais c’était justement un des principaux arguments d’EPR ... De plus, je ne comprends pas la référence finale à “l’interaction finie et non contrôlable entre les objets et les instruments de mesure”, qui semble justement ignorer le point essentiel de EPR, à savoir que, en l’absence d’action à distance, seul le premier système peut supposément être affecté par la première mesure, et néanmoins des prédictions bien définies deviennent possibles pour le second système. Est-ce que Bohr rejette simplement la prémisse – pas “d’action à distance” – plutôt que de réfuter l’argument ?

J. S. BELL

Je sais que la plupart des hommes, même ceux qui sont à l'aise avec les problèmes de la plus haute complexité, peuvent rarement accepter les plus simples et les plus évidentes des vérités, si les accepter les forcerait à admettre la fausseté de conclusions qu'il se sont plus à expliquer à des collègues, qu'ils ont fièrement enseignées à d'autres et qu'il ont insérées, fil après fil, dans le tissu de leur vie.

TOLSTOY