

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



www.cea.fr

LA PHYSIQUE QUANTIQUE



*Je ne sais pas comment ça a pu arriver, mais un lien s'est créé, là,
qui tient toujours malgré tout le reste, comme un pacte très solide.*

Keith Richards

Etienne KLEIN, 16 mai 2013

LES PÈRES FONDATEURS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Le « génie » est une habitude que certains prennent.
Paul Valéry

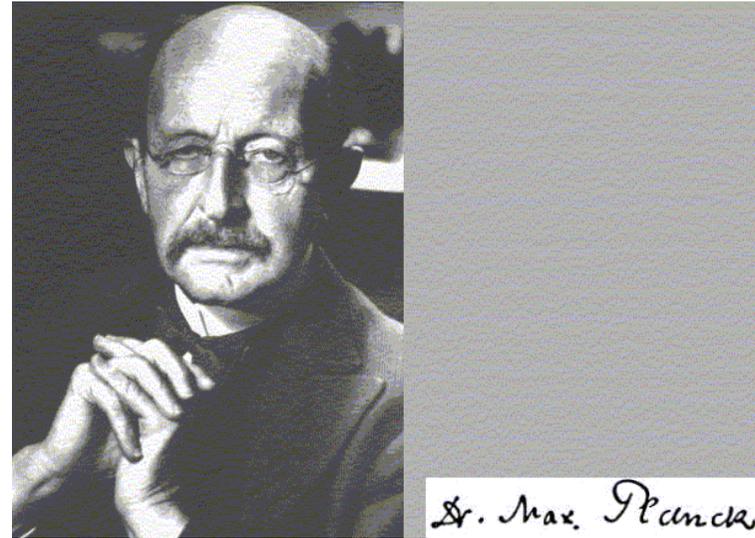


UNE « DÉCOUVERTE PHILOSOPHIQUE NÉGATIVE »

La physique en tant que science empirique ne peut pas aborder les problèmes philosophiques en toute généralité. [...] Mais si l'on peut contester qu'il soit possible de fonder des vérités philosophiques par les méthodes des physiciens, il n'est sûrement pas hors de leur compétence de mettre en évidence que certaines affirmations qui prétendent à une validité philosophique n'en ont pas en vérité. Et parfois, ces découvertes philosophiques « négatives » des physiciens ne sont pas moins importantes, ni moins révolutionnaires pour la philosophie, que les découvertes des philosophes de métier. »
Fritz London, Edmond Bauer, « La théorie de l'observation en mécanique quantique », *Exposés de Physique Générale*, III, p. 1-51, Paris, Hermann, 1939.



MAX PLANCK ET SA CONSTANTE



LE PROJET DE PLANCK

Planck était « obsédé » par le second principe de la thermodynamique, fondamental à ses yeux.

Il refusait l'interprétation statistique de l'entropie proposée par Boltzmann.

Il pensait que l'irréversibilité à l'échelle macroscopique était due aux interactions entre la matière et le rayonnement.

Comment mettre cela au clair ? Par le spectre du **corps noir**...

La physique quantique : une affaire d'état

L'idée de base de la physique quantique consiste à généraliser le principe de superposition de la mécanique ondulatoire.

Les différents états physiques d'un système sont représentés par des entités mathématiques $a, b, c \dots$ telles que :

- ✓ Si a et b sont deux états possibles du système, $(a+b)$ est *aussi* un état possible du système.
- ✓ Si a est un état possible du système, λa l'est *aussi*.

$a, b, c \dots$ sont donc des *vecteurs*, appelés *vecteurs d'état* du système.

1792, **Wegwood** : tous les corps chauffés deviennent rouges à la même température

1859, **Kirchhoff** : le spectre du corps noir ne dépend que de la température T

1879, **Stefan** : la densité d'énergie d'un corps noir est proportionnelle à T^4

1893, **Wien** : $u(\nu, T) = \nu^3 g(\nu/T)$

1896, **Wien** : $u(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp(\beta \nu/T)^{-1}$

Juin 1900, **Jeans** : $u(\nu, T) = 8 \pi \nu^3 kT/c^3$ (catastrophe ultraviolette)

19 octobre 1900, **Planck** : $u(\nu, T) = \alpha (\nu/c)^3 [\exp(\beta \nu/T) - 1]^{-1}$

14 décembre 1900, **Planck** : $u(\nu, T) = 8\pi h (\nu/c)^3 [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$

Soit une particule libre d'impulsion p . On peut la représenter (de Broglie) par une onde plane monochromatique. Par analogie avec le champ électrique :

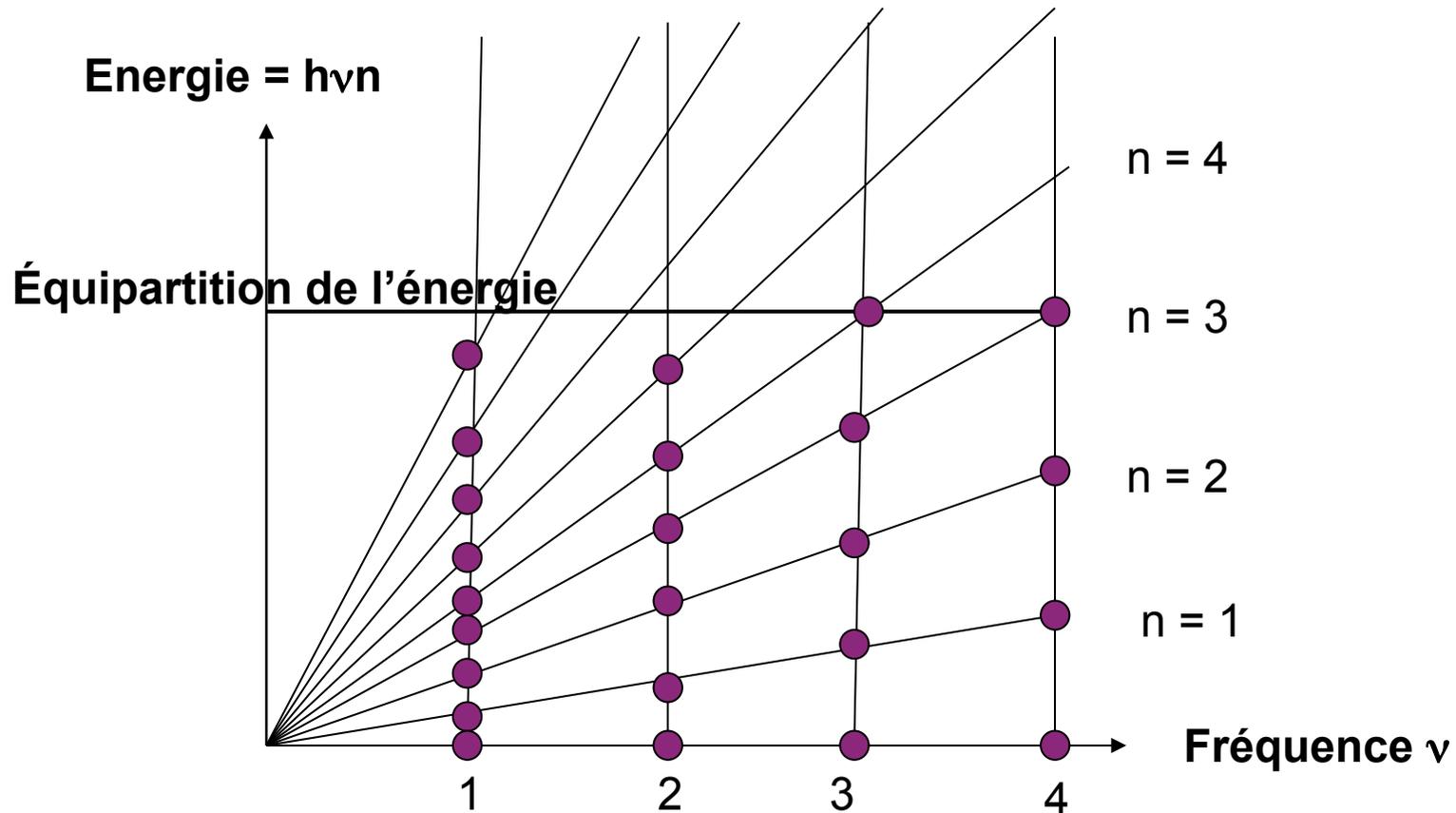
$$\Psi(x, t) = A \cos\{(p \cdot x - Et)/\hbar - \alpha\}$$

Mais cette hypothèse, apparemment naturelle, contredit le principe de relativité. En effet, la probabilité de présence de la particule s'annulerait partout où le cosinus s'annule, c'est-à-dire en des points séparés par la distance $L = \pi\hbar / p$. Pour un observateur se déplaçant à la vitesse V par rapport au premier, la particule se déplace à $v' = v - V$, $p' = p - mV$, $E' = p'^2/2m$. La fonction d'onde devient $A' \cos\{(p' \cdot x - E't)/\hbar - \alpha'\}$. Les points où elle s'annule sont distants de $L' = \pi\hbar / p'$, différent de L . Ce résultat viole le principe de relativité. La réponse de la physique quantique à ce problème est :

$$\Psi(x, t) = A \exp[i\{(p \cdot x - Et)/\hbar - \alpha\}]$$

La probabilité de présence $|\Psi(x, t)|^2 dx$ est désormais la même partout !

AU FAIT, QU'IMPLIQUE LA FORMULE DE PLANCK ?



Le fait que l'énergie ne peut s'échanger entre la matière et le rayonnement que par paquets d'énergie de valeur $h\nu$ empêche la catastrophe ultraviolette : grâce aux quanta, on peut faire chauffer un four sans qu'il nous explose à la figure...

Le principe de superposition est sous-jacent au formalisme quantique.

Si on postule en outre l'homogénéité et l'isotropie de l'espace, ainsi que le caractère homogène du temps (pour les lois physiques, tous les instants se valent), alors on peut montrer (Feynman) que l'équation d'évolution de la fonction d'onde (du vecteur d'état) est nécessairement l'équation de Schrödinger :

$$i\hbar\partial\Psi/\partial t = -(\hbar^2/2m) \Delta\Psi + V\Psi$$

AVEC, DANS LE DÉSORDRE...

Le spectre de l'atome d'hydrogène

L'oscillateur harmonique

Le principe d'indétermination de Heisenberg (gare aux vulgates...)

Le principe d'exclusion de Pauli

L'effet tunnel

Les lois quantiques doivent demeurer invariantes dans tout changement de référentiel inertiel. Or ces changements résultent tous de la combinaison de trois types de transformations :

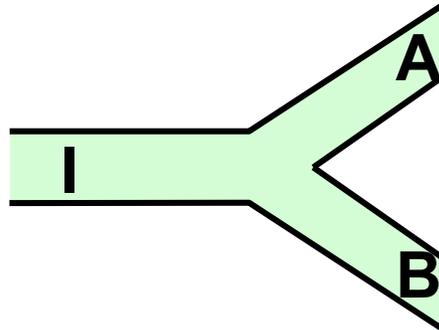
- Les translations dans l'espace-temps.
- Les rotations des axes d'espace.
- Les transformations de Lorentz.



Toutes ces transformations forment un groupe, le groupe « de Poincaré ». Wigner se demanda comment ce groupe peut agir dans un espace de Hilbert décrivant un système quantique. Il chercha les grandeurs invariantes et découvrit qu'il y en avait deux : la masse et le spin.

L'existence du spin des particules apparaît ainsi comme une « opportunité que les lois offrent à la nature et dont celle-ci s'est emparée ».

La source du débat quantique



$$a.I \longrightarrow a.A$$

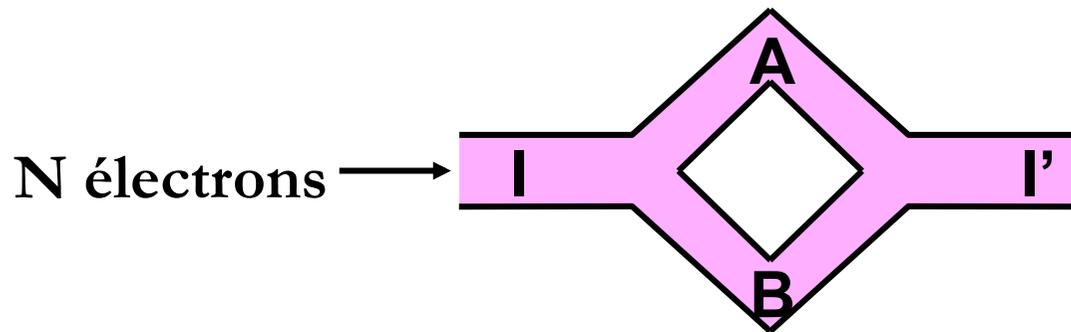
$$b.I \longrightarrow b.B$$

En vertu du principe de superposition, on peut aussi préparer des électrons dans l'état $(a+b)I$.

Que deviennent-ils?

$$(a+b)I \longrightarrow \underbrace{a.A+b.B}$$

Qu'est cette chose?



N électrons \longrightarrow

$$\langle \sigma_x \rangle_{(a+b)I'} \neq \langle \sigma_x \rangle_{\text{mélange}}$$

Une superposition quantique n'est pas un mélange...

LA CONTROVERSE ENTRE EINSTEIN ET BOHR

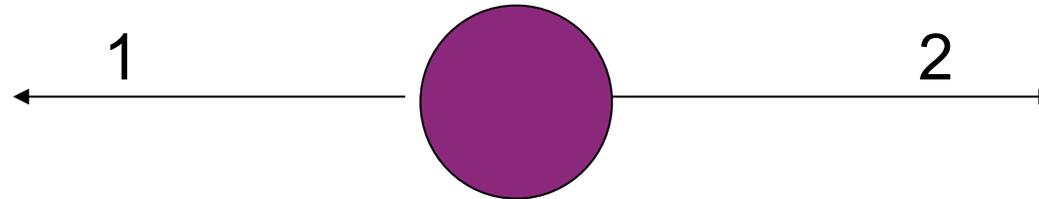


À la question : La physique quantique est-elle un aboutissement ou simplement une étape décisive mais « *dépassable* » de l'évolution de la physique ? Einstein et Bohr ne répondent pas de la même façon. Leurs arguments s'appuient sur deux conceptions radicalement différentes de la physique :

Einstein : « Ce que nous appelons science a pour unique but de déterminer ce qui *est*. »

Bohr : « « C'est une erreur de croire que la tâche de la physique est de découvrir comment est la nature. La physique traite de ce que nous *pouvons dire* de la nature. »

Quand on passe à deux particules, c'est pire...



$$\Psi_{12} = \Psi_1(a) \times \Psi_2(b)$$

$$\Psi_{21} = \Psi_2(a) \times \Psi_1(b)$$

Mais à cause de l'indiscernabilité des particules :

$$\Psi_{\text{paire}} = \Psi_{12} + \Psi_{21}$$

La description du tout n'est pas équivalente à celle de ses parties...

On parle d' «intrication quantique »

Ce critère s'appuie sur trois hypothèses

(a) Les prédictions de la physique quantique sont justes

(b) Aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière (principe de localité d'Einstein)

(c) Si, en ne perturbant aucunement un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique.