Chapitre 8

ALBERT EINSTEIN ET LA REVOLUTION QUANTIQUE

Patrice Remaud

LAII-ENSIP

(Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle – Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)

patrice.remaud@univ-poitiers.fr

http://laii.univ-poitiers.fr/remaud/

Le chat de Schrödinger !

A l'échelle de l'atome, un objet peut se trouver dans plusieurs états à la fois : pourquoi est-ce impossible d'observer cette situation à l'échelle macroscopique ?

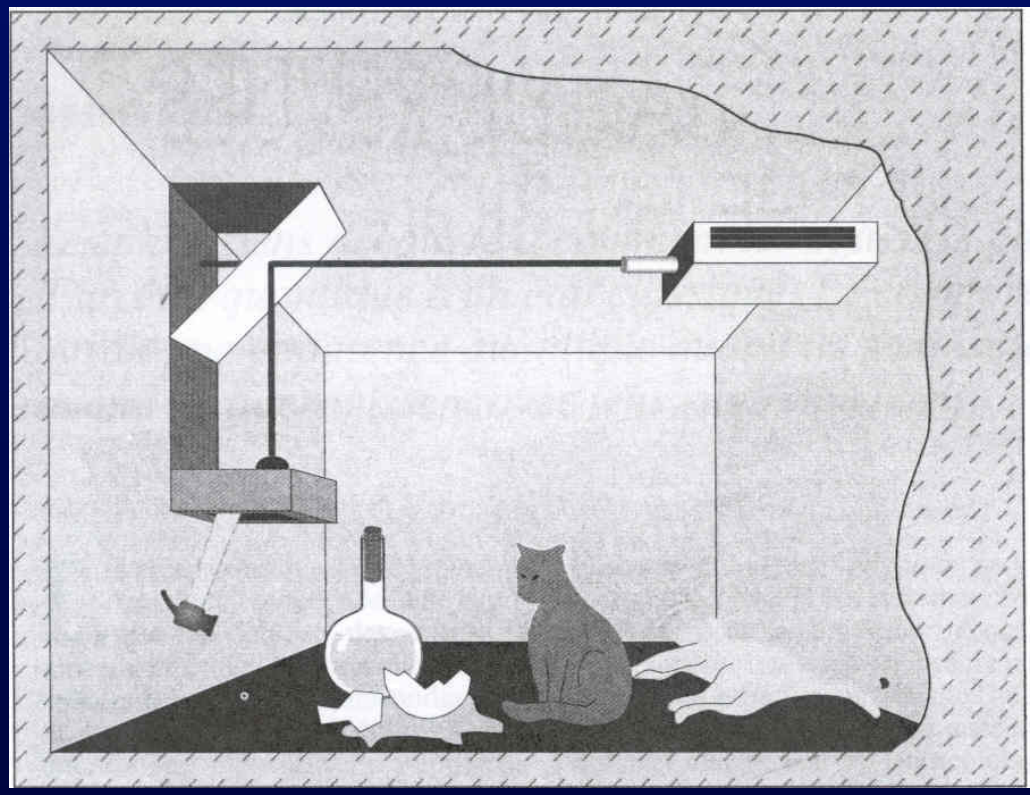
Erwin Schrödinger
(1887-1961)

Nobel 1933

Le chat de Schrödinger !

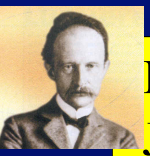
En 1935, Schrödinger imagine un chat enfermé dans une boîte. L'état de vie V ou de mort M du chat est corrélé à l'état d'un atome (e ou g). Initialement, l'atome est dans l'état e et le chat dans l'état vivant V. Lorsque l'atome se désexcite vers g, un mécanisme provoque la mort de l'animal, corrélant ainsi l'état atomique final g à l'état M du chat.

A un instant donné, on devrait avoir dans la boîte une superposition de « paires » (e,V) et (g,M), donnant lieu à des interférences quantiques entre les amplitudes associées aux états « vivant » et « mort » du chat. Or de telles interférences ne sont jamais observées, que ce soit avec un chat ou tout autre objet macroscopique.



La physique quantique, une histoire de générations !

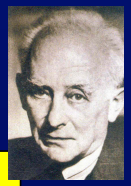
Nobel 1919



Hendrik A. Lorentz (1853-1928)
Joseph J. Thomson (1856-1940)
Max Planck (1858-1947)
Arnold Sommerfeld (1868-1951)
Ernst Rutherford (1871-1937)
Albert Einstein (1879-1955)

60 ans en 1930 !

Nobel 1954



Nobel 1921

Paul Ehrenfeld (1880-1933)
Max Born (1882-1970)
James Franck (1882-1964)
Niels Bohr (1885-1962)
Erwin Schrödinger (1887-1975)
Gustav Hertz (1887-1975)
Otto Stern (1887-1965)
Walter Gerlach (1889-1979)

Nobel 1922

45 ans en 1930 !

Nobel 1929

Nobel 1945

Louis de Broglie (1892-1987)
Arthur Compton (1892-1962)
Hendrik A. Kramers (1894-1954)

Nobel 1933

Wolfgang Pauli (1900-1958)
Werner Heisenberg (1901-1976)
Paul A. M. Dirac (1902-1984)
Pascual Jordan (1902-1980)

Nobel 1932

30 ans en 1930 !

Nobel 1933

Quelques questions ?

De quoi traite la physique quantique ?

Des phénomènes microscopiques :

- atomes
- particules (protons, neutrons, électrons, quark, …)
- photons (grains de lumière).

Pourquoi la physique quantique s'est-elle imposée ?

Les lois de la physique classique ne rendaient pas compte du comportement des atomes :

- problèmes de stabilité des atomes (radioactivité)

- problèmes d'émission-absorption de rayonnement des atomes

- problème de la trajectoire des électrons autour du noyau de l'atome pas bien définie.

Elle utilise des concepts qui n’ont pas toujours de contrepartie dans la vie courante !

Certaines de ses prédictions heurtent le sens commun !

Pourquoi la physique quantique est-elle difficile à comprendre ?

Einstein n’a jamais accepté certaines de ses conséquences, en particulier qu’elle ne permette de calculer que des probabilités !
« Dieu ne joue pas aux dés ! »

La physique classique définit deux sortes d'entités fondamentales :

- les corpuscules (les atomes, …) et les ondes

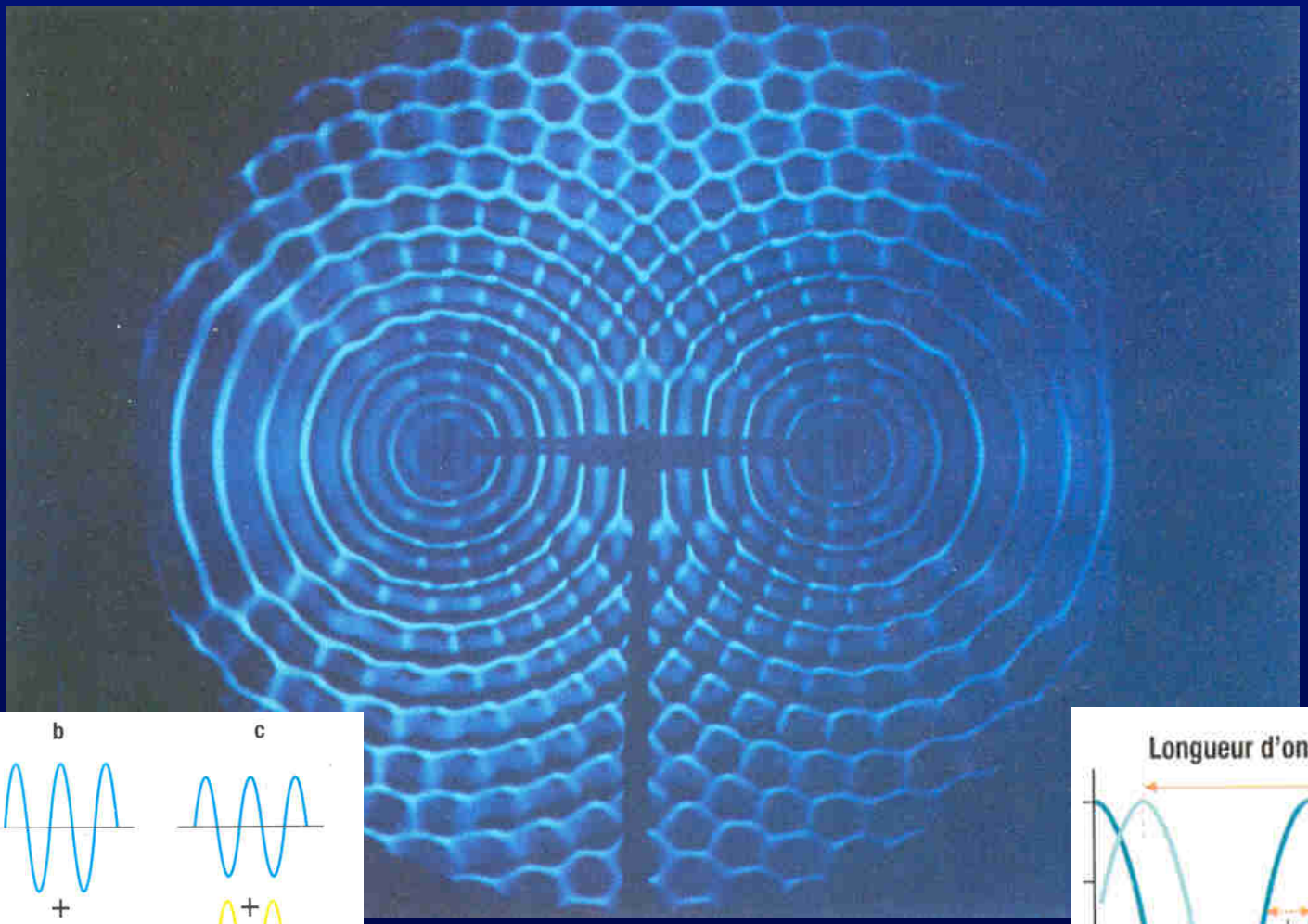
La physique quantique propose :

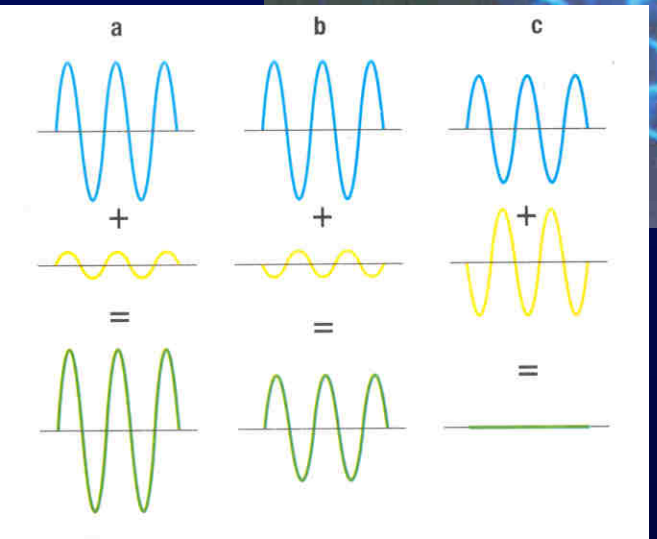
ni corpuscules, ni ondes mais « autre chose » !

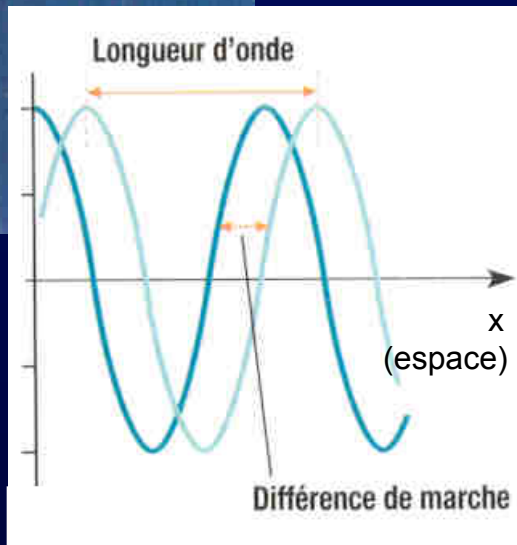
Quelle est la différence de représentation des objets physiques entre la physique classique et la physique quantique ?

Quelle est la différence de propriétés des objets physiques entre la physique classique et la physique quantique ?

Le phénomène d'interférence

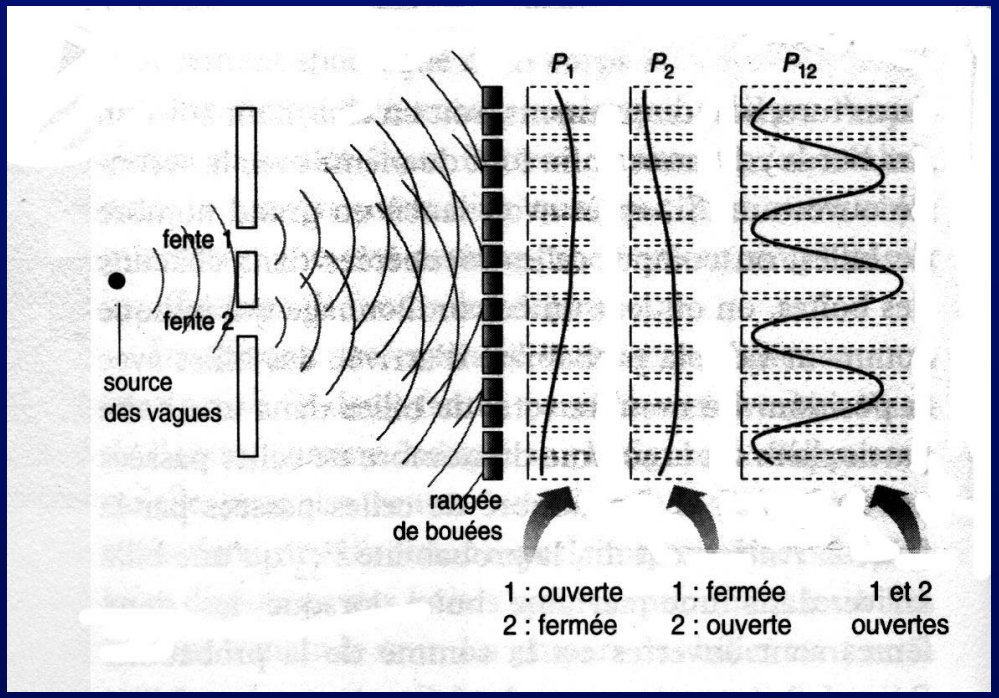






L’explication classique des interférences !

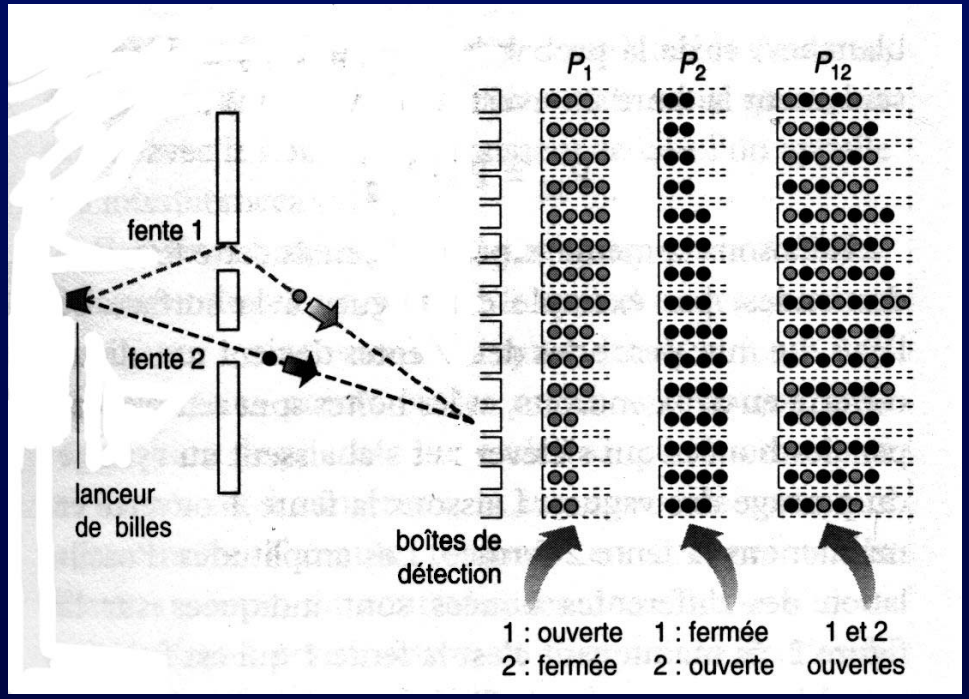
L’expérience des deux fentes avec des vagues



Présence de phénomène d’interférence !

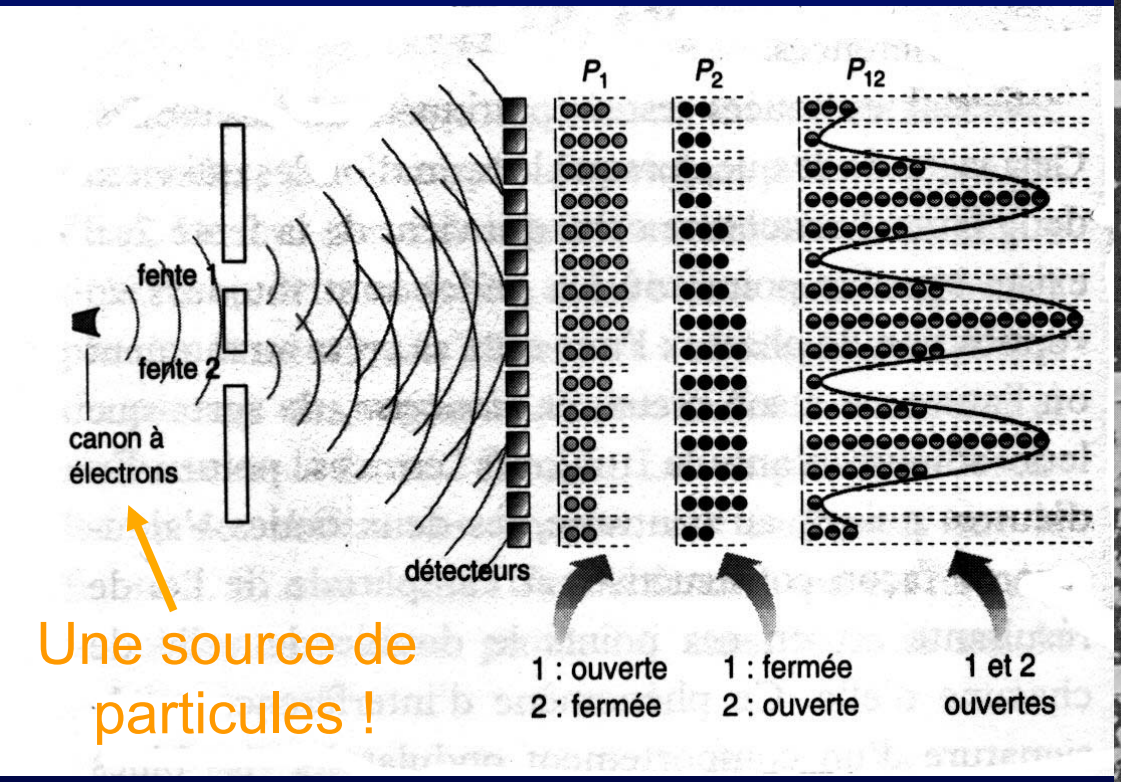
L'explication classique des interférences !

Absence de phénomène d'interférence !

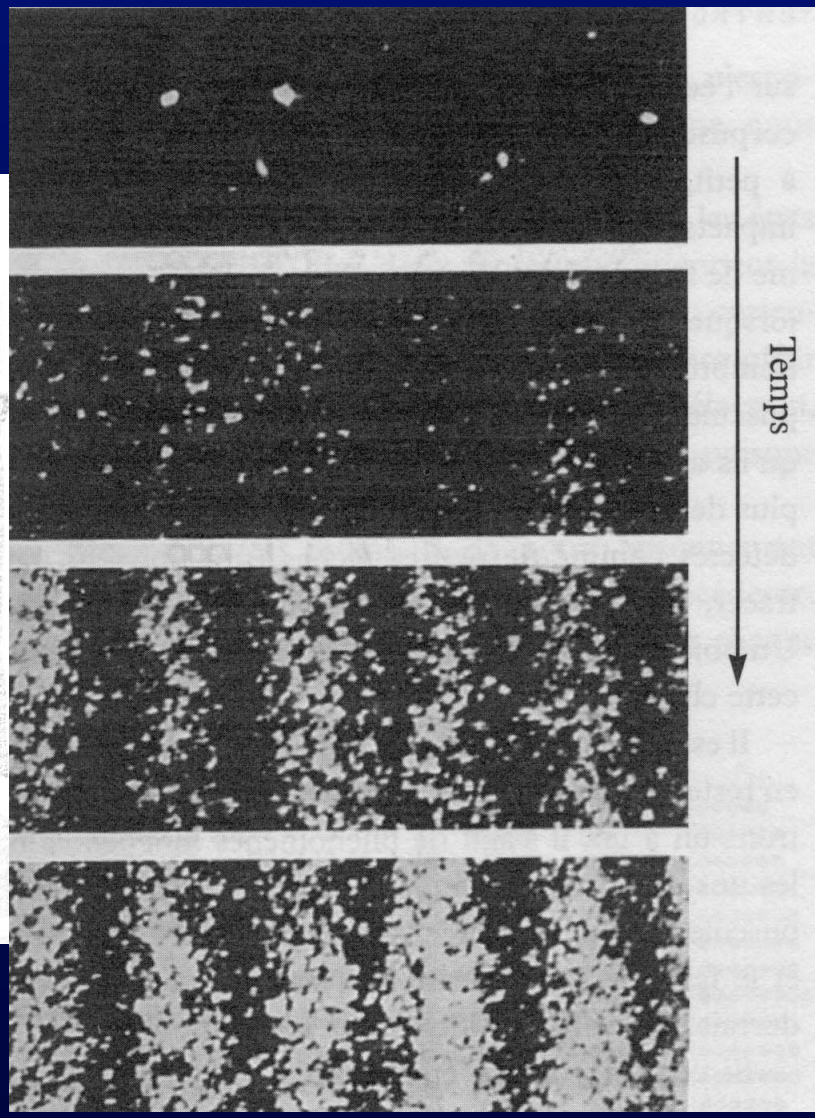


L'expérience des deux fentes avec des billes

Apparition de curieuses interférences ?
L'expérience des fentes d'Young avec des électrons : réalisée pour la première fois en 1961 par le physicien allemand Claus Jönsson

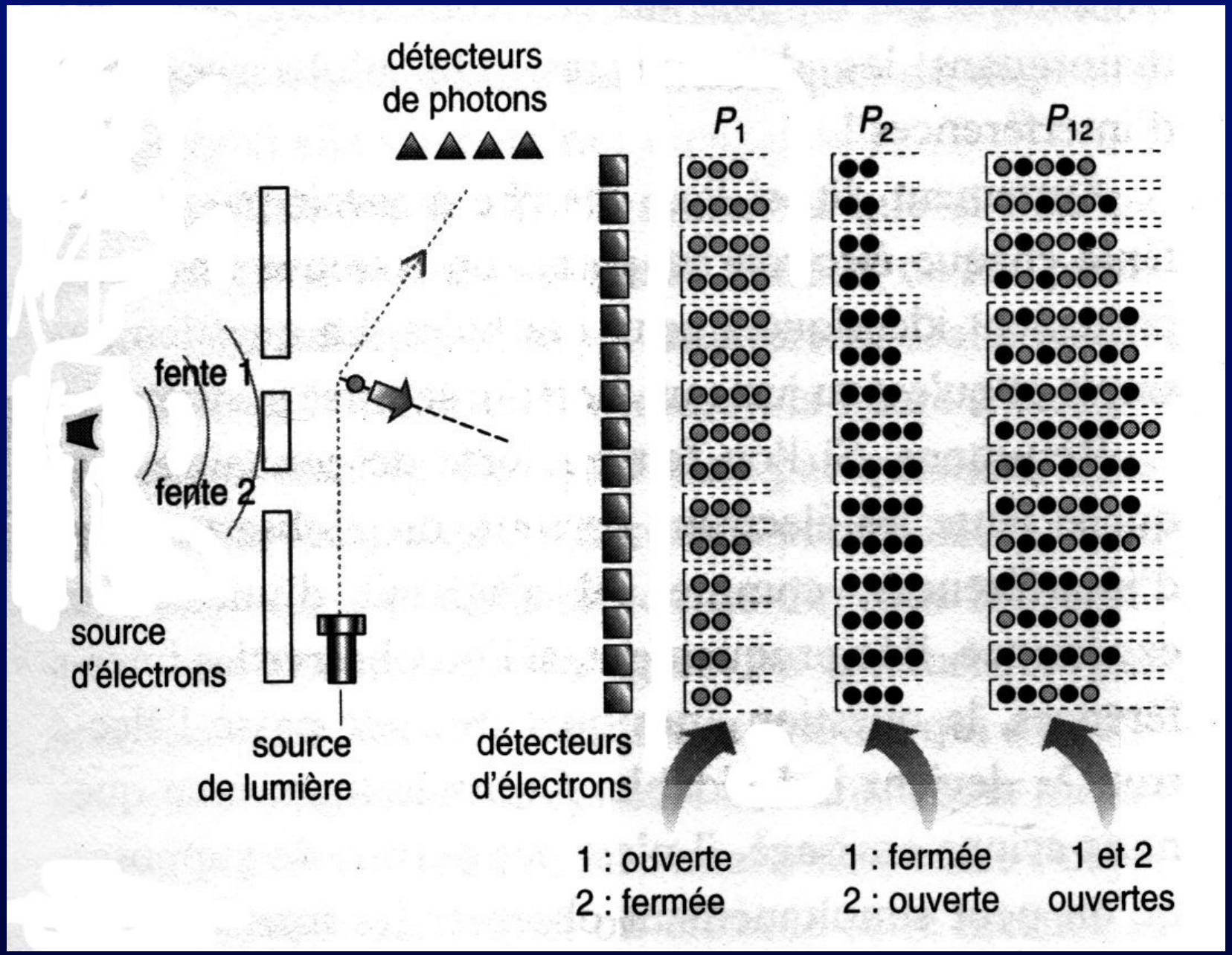


Une source de particules !



Tout est onde et corpuscule !

La perturbation apportée par la mesure ?

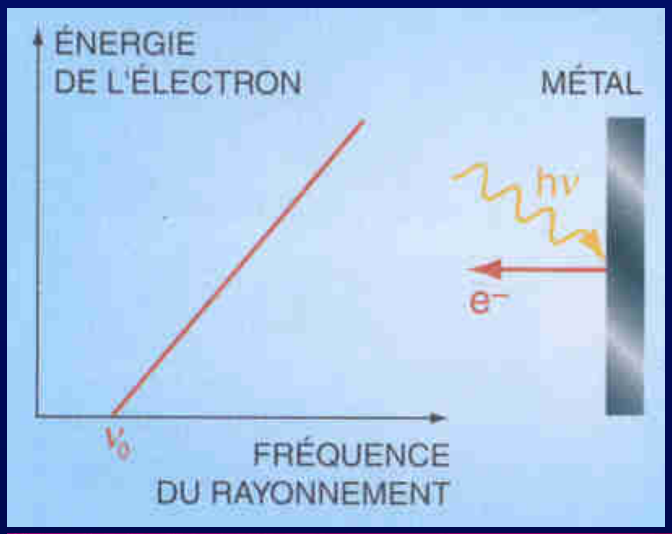


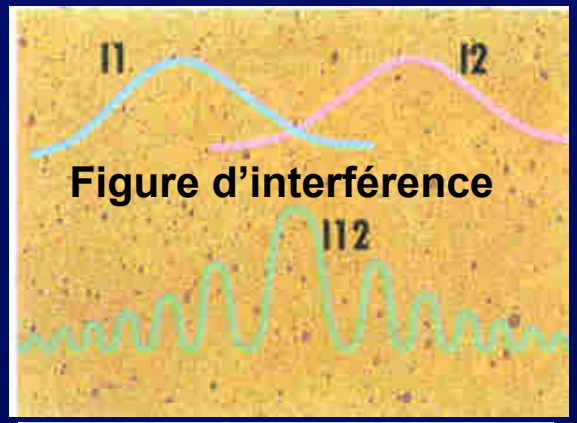
Description d'un comportement aberrant de la lumière
Ondes et corpuscules … et autre chose encore !

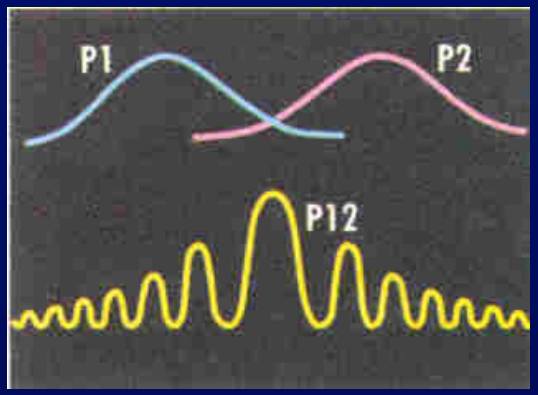
Phénomène corpusculaire : explication de l'effet photoélectrique !

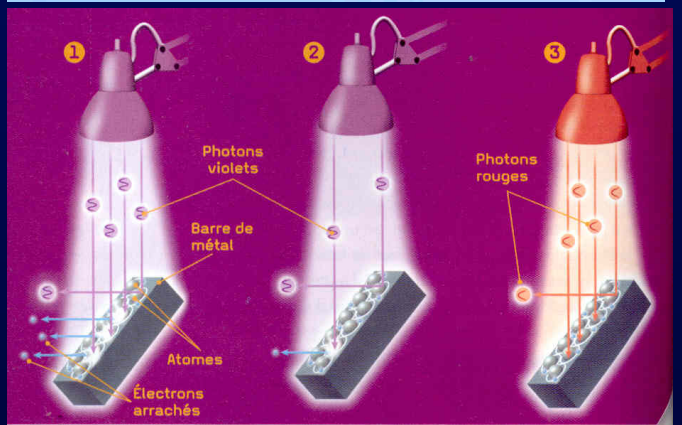
Phénomène ondulatoire : explication des interférences

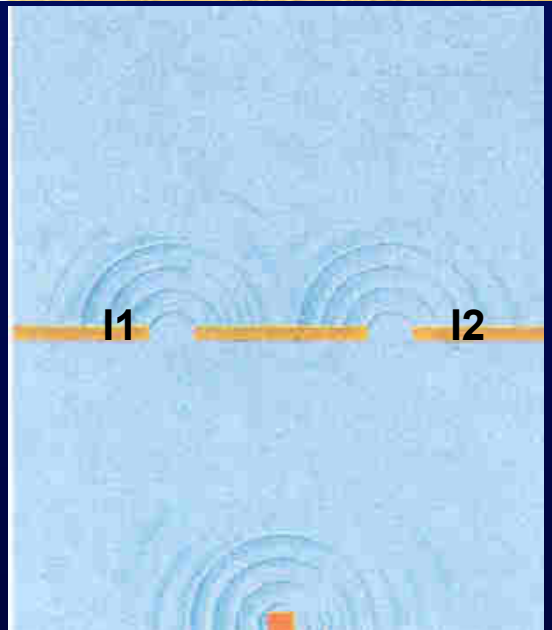
La lumière est … et la matière est … ?

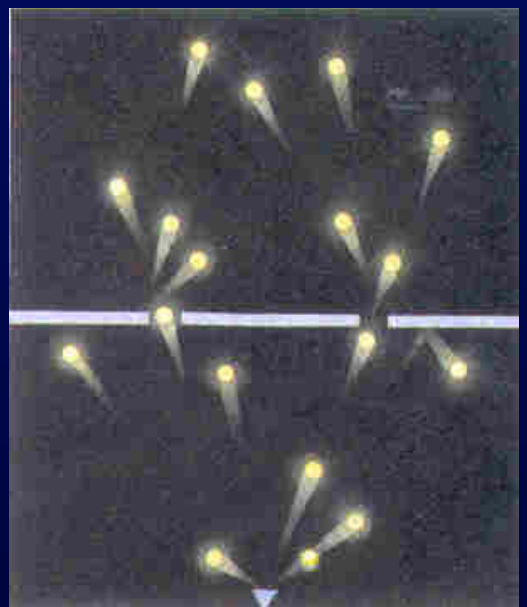












Quelles conséquences cette représentation a-t-elle entraîné ?

Les particules ne sont pas toujours bien localisées dans l'espace !

Les particules n'ont pas une trajectoire bien définie !

Richard Feynman
(1918-1988)
Prix Nobel de physique
en 1965

Cours de physique
1963

« La mécanique quantique est la description du comportement de la matière dans tous ses détails et en particulier des évènements à l'échelle atomique.

Les objets, à une petite échelle, se comportent comme rien de ce dont nous avons une expérience directe;

ils ne se comportent pas comme des ondes,

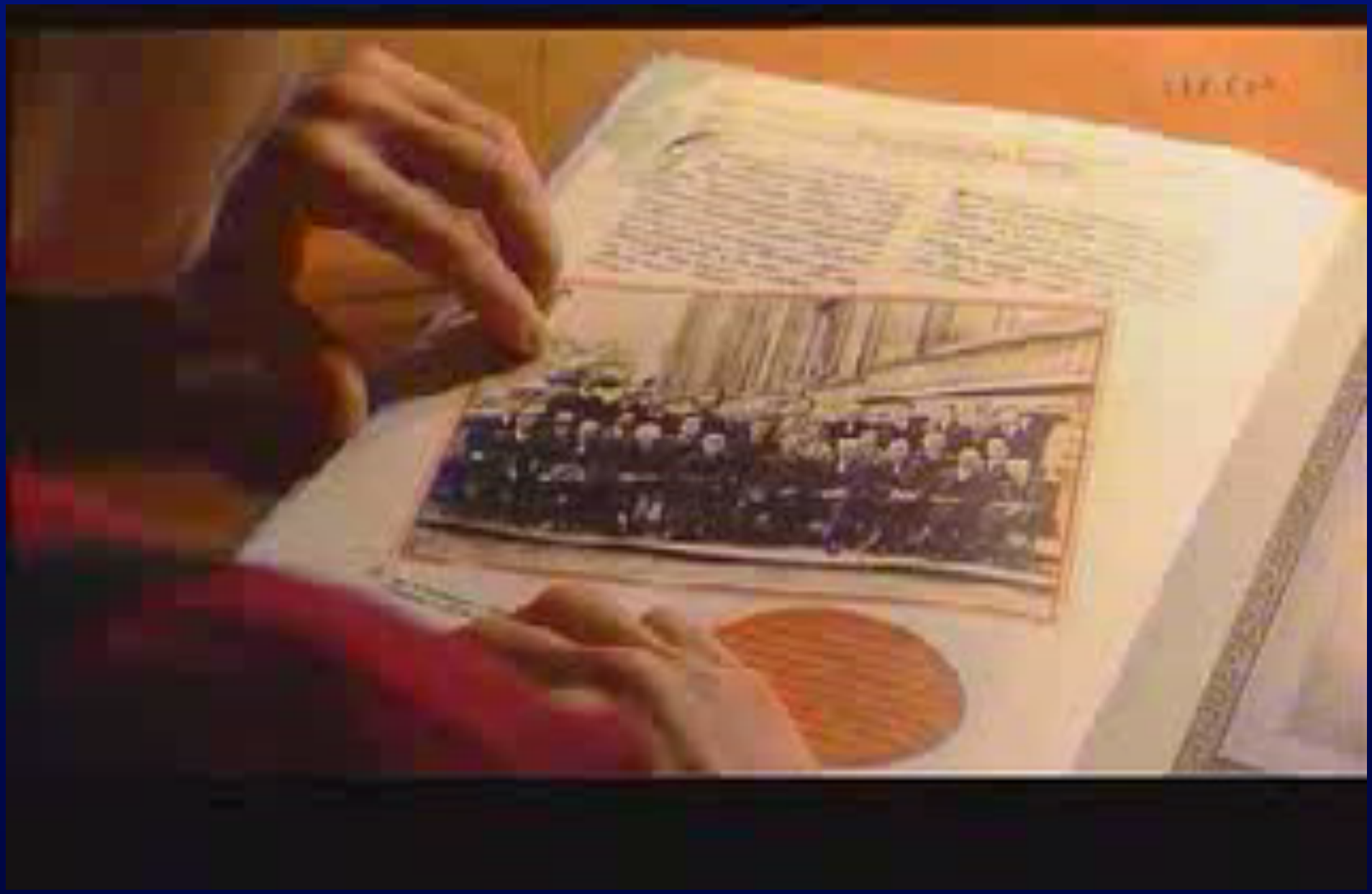
ils ne se comportent pas comme des particules,

ils ne se comportent pas comme des nuages,

ou des boules de billard,

ou des poids sur des ressorts ou quoi que ce soit d'autre que vous puissiez avoir déjà vu. »

Discussion avec Françoise Balibar, physicienne et spécialiste de l'œuvre d'Albert Einstein, autour de la physique quantique



Extrait du documentaire : « Ceci n'est pas Einstein » de Catherine Fol

Et bien parlons sexe et physique quantique !

Q&R

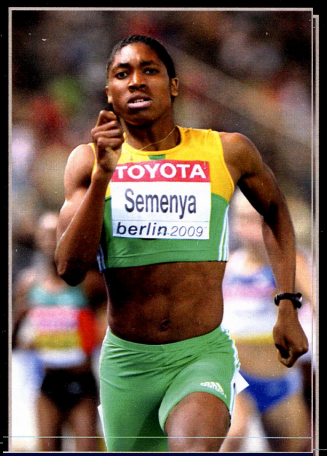
Pourquoi est-il parfois si difficile de définir le sexe d'une personne ?

Question de Jean-Roch Sauvé, Paris

Votre interrogation fait sans doute référence à la triste polémique autour de Caster Semenya, athlète sud-africaine dont le titre mondial obtenu cet été à Berlin sur 800 mètres a été remis en question. En effet, selon un journal australien, elle posséderait des testicules intra-abdominaux secrétant de la testostérone susceptible d'améliorer ses performances. Comment peut-on avoir un doute sur le genre d'une personne ? Simplement parce que l'identité sexuelle est définie uniquement à partir d'une déclaration, à la naissance, sur l'apparence des organes génitaux externes.

"TROIS SEXES"

Or, s'ils sont dans la plupart des cas caractéristiques du sexe biologique, il arrive que pour une naissance sur 1 000, cela ne soit pas clairement le cas. "*Il est important de comprendre que le sexe de l'état civil n'est représentatif que d'une des parties constitutives du sexe biologique,* note René Habert, spécialiste du développement des gonades à l'Inserm et au CEA. *Le sexe biologique se définit à 3 niveaux qui sont : le sexe génétique (la 46e paire de chromosome est XX pour une fille, XY pour un garçon), le sexe gonadique (présence d'ovaires ou de testicules) et enfin le sexe phénotypique (apparence des organes génitaux à la naissance, nature du tractus génital interne, caractères →*



> C'est à la 6e semaine de développement embryonnaire que les gonades primitives se différencient en testicules ou en ovaires.

< Parfois, la différenciation ne se fait pas correctement. Ainsi, l'athlète sud-africaine Caster Semenya posséderait des testicules intra-abdominaux.

→ *pubertaires tels que la forme du corps, la voix, la masse musculaire ou la pilosité).*" A ces 3 "sexes", on peut même en ajouter un 4e, le sexe psychique, et un 5e, le sexe sociétal. De là vient le problème de l'intersexualité : il arrive que ces cinq "sexes" ne soient pas tous de la même nature. Comme le sexe de l'état civil se base uniquement sur un des critères, les erreurs sont multiples, et peuvent apparaître à tous les niveaux.

Car si le sexe génétique est effectivement différencié dès la rencontre de l'ovocyte et du spermatozoïde, l'appareil génital qui se met en place au début de la vie embryonnaire est en revanche identique pour tous, future fille ou futur garçon.

HORMONES OU PAS ?

A la 6e semaine du développement, les gonades primitives se différencient soit en testicules, sous le contrôle d'un gène présent sur le chromosome Y, soit, en son absence, en ovaires. Ensuite, si les gonades sont des testicules, ils sécrètent des hormones qui provoquent la formation des organes génitaux mâles. A défaut d'hormone

^ L'apparence des organes génitaux externes, (ici, fœtus mâle de 12 semaines) ne suffit pas à établir le sexe biologique.

(les ovaires ne sécrètent pas d'hormone avant la puberté), les organes deviendront automatiquement féminins. C'est donc à partir de la même ébauche embryonnaire que l'appareil génital se différencie, sous l'influence des hormones, en organes génitaux mâles ou femelles. Mais si les hormones ou leurs récepteurs fonctionnent mal, la différenciation ne se fera pas correctement. Les organes génitaux peuvent alors être ambigus, voire complètement inversés par rapport au sexe génétique et au sexe gonadique.

Tout n'est donc pas vraiment joué dès la fécondation. Si les testicules d'un embryon mâle ne produisent pas, ou pas assez d'hormones mâles, alors l'appareil génital sera féminin. De même lorsque ce sont les récepteurs de ces hormones qui sont endommagés (1 cas sur 100 000 naissances). A la naissance, les organes génitaux externes sont totalement féminins, et personne ne se doute que cette petite fille possède des testicules internes et un sexe génétique masculin. A l'inverse, il est possible qu'un embryon génétiquement féminin soit exposé aux androgènes : un appareil génital mâle se développe alors. Toutes les situations intermédiaires sont possibles et des dysfonctionnements génétiques ou hormonaux peuvent aboutir à des conséquences plus ou moins visibles : masculinisation ou féminisation incomplète, organes génitaux ambigus ou différents du sexe gonadique (pseudo-hermaphrodisme), sexe gonadique ambigu (vrai hermaphrodisme, avec la présence de tissus ovariens et testiculaires). Chaque cas est donc unique. Un problème lorsque cet individu unique doit entrer dans une case… ou dans l'autre. E.Ch.

Tableau de René Magritte (1898-1967) : l'image et la réalité

L’effet photoélectrique et la quantification de la lumière

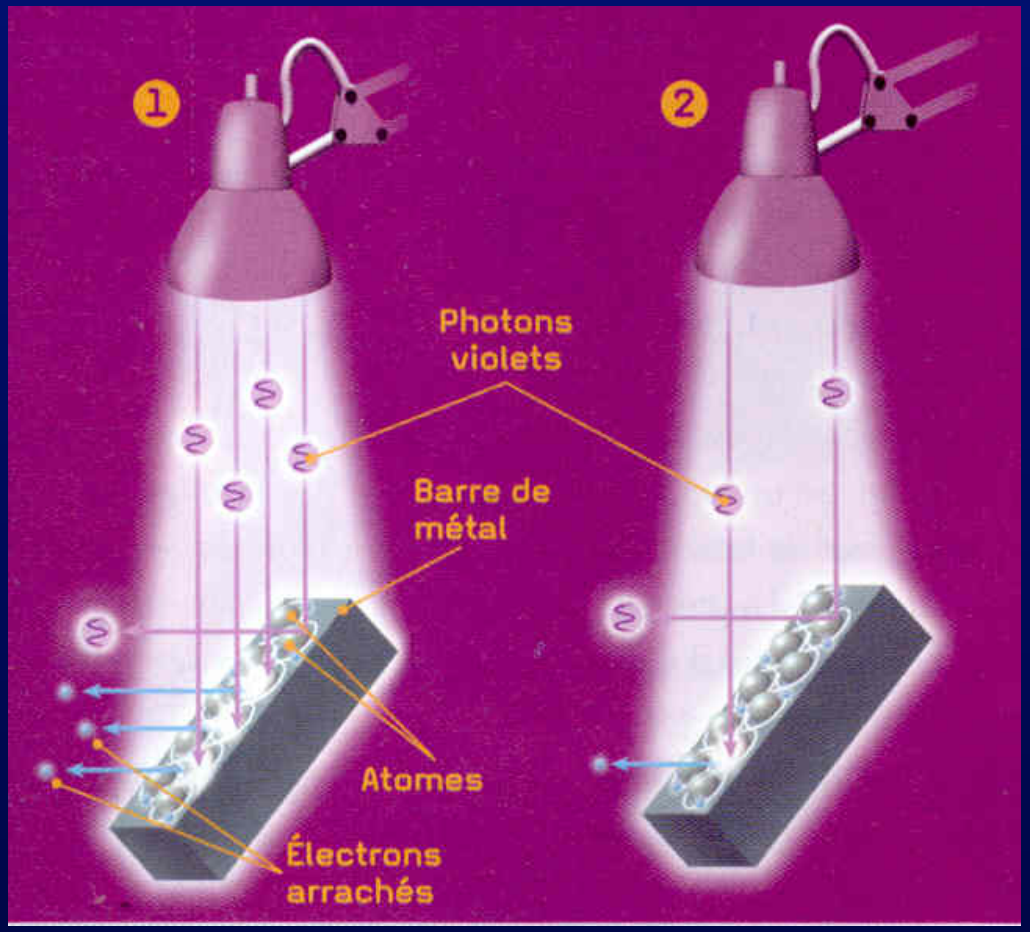
Premier article :
Sur une interprétation heuristique de la génération et de la transformation de la lumière

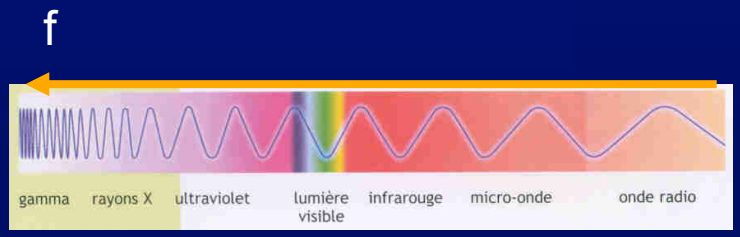
La **théorie ondulatoire de la lumière** opérant avec des **fonctions continues de l'espace**, s'est avérée parfaite pour la représentation des phénomènes purement optiques et **ne sera probablement jamais remplacée par une autre théorie**. Il faut cependant garder à l'esprit que les observations optiques concernent des moyennes dans le temps et non pas des valeurs instantanées et qu'en dépit de la parfaite confirmation de la théorie de la courbure, réflexion, réfraction, dispersion, etc. [de la lumière] par l'expérience, on conçoit parfaitement que la théorie de la lumière opérant avec des fonctions continues de l'espace conduise à **des contradictions avec l'expérience**, quand on l'applique aux phénomènes de **production et de transformation de la lumière** …

Selon l'hypothèse à retenir ici, lors de **la propagation d'un rayon lumineux** à partir d'un point, **l'énergie** n'est pas distribuée dans des espaces de plus en plus grands, mais elle est constituée **d'un nombre infini de quanta d'énergie** localisés en des points de l'espace, qui **se déplacent sans se dissocier** et qui **ne peuvent être absorbés et produits que d'un coup**.

L'effet photoélectrique : constatations expérimentales

Quand une surface métallique est soumise à un rayonnement électromagnétique de fréquence υ suffisamment élevée, les photons sont absorbés et un courant est produit (ou des électrons sont émis).





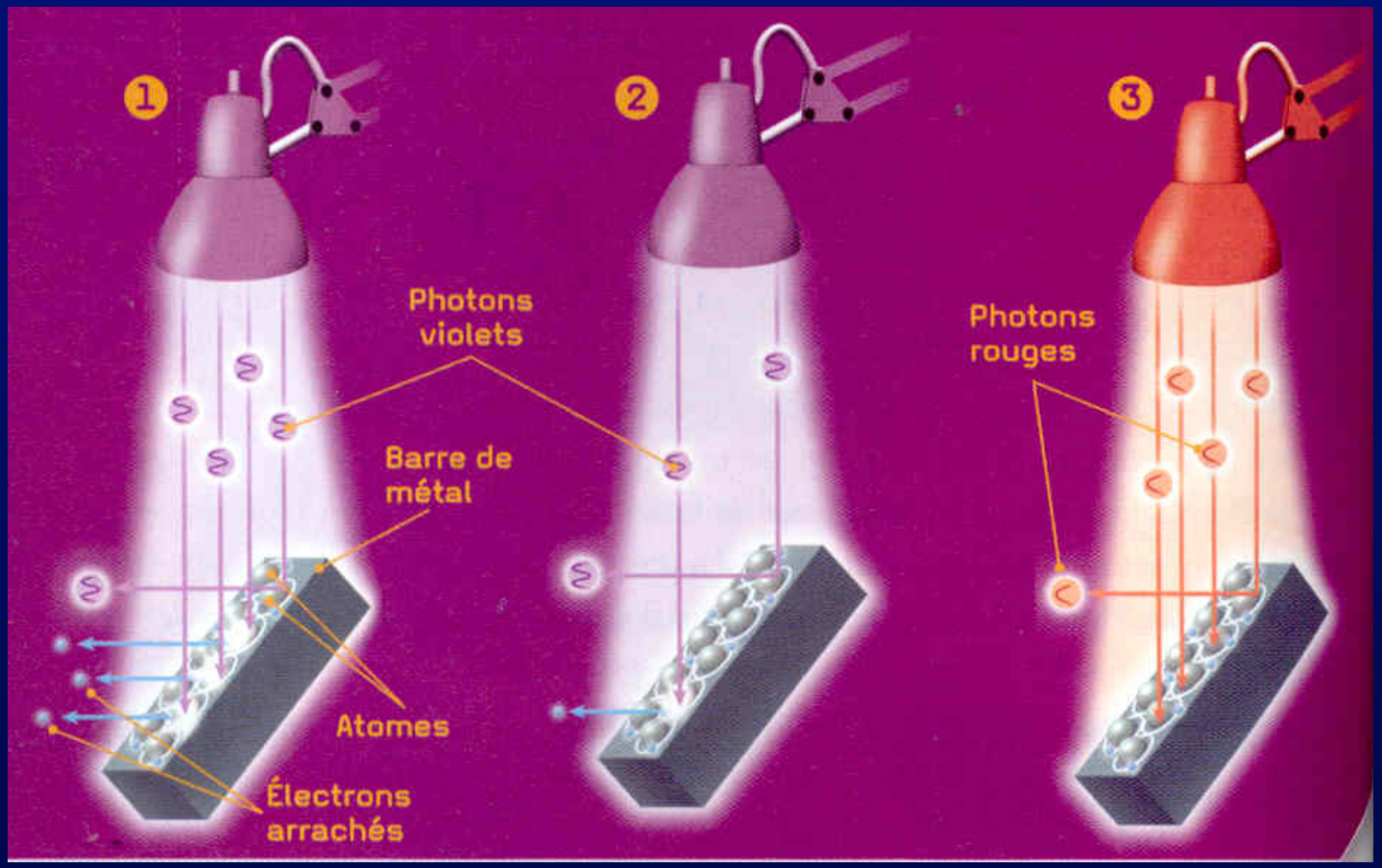
$$E = h\upsilon$$

$h = 6{,}626.10^{-34}$ Js

<u>Première constatation</u> : le nombre d'électrons éjecté est directement proportionnel à l'intensité de l'onde incidente !

L'effet photoélectrique : constatations expérimentales

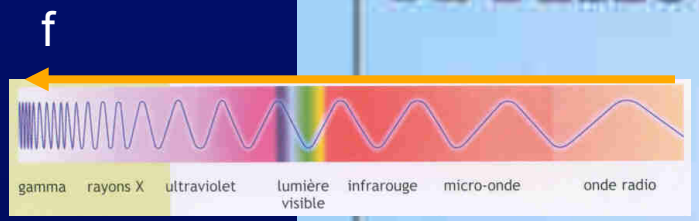
Un métal soumis à un rayonnement de fréquence υ suffisamment élevée émet des électrons.

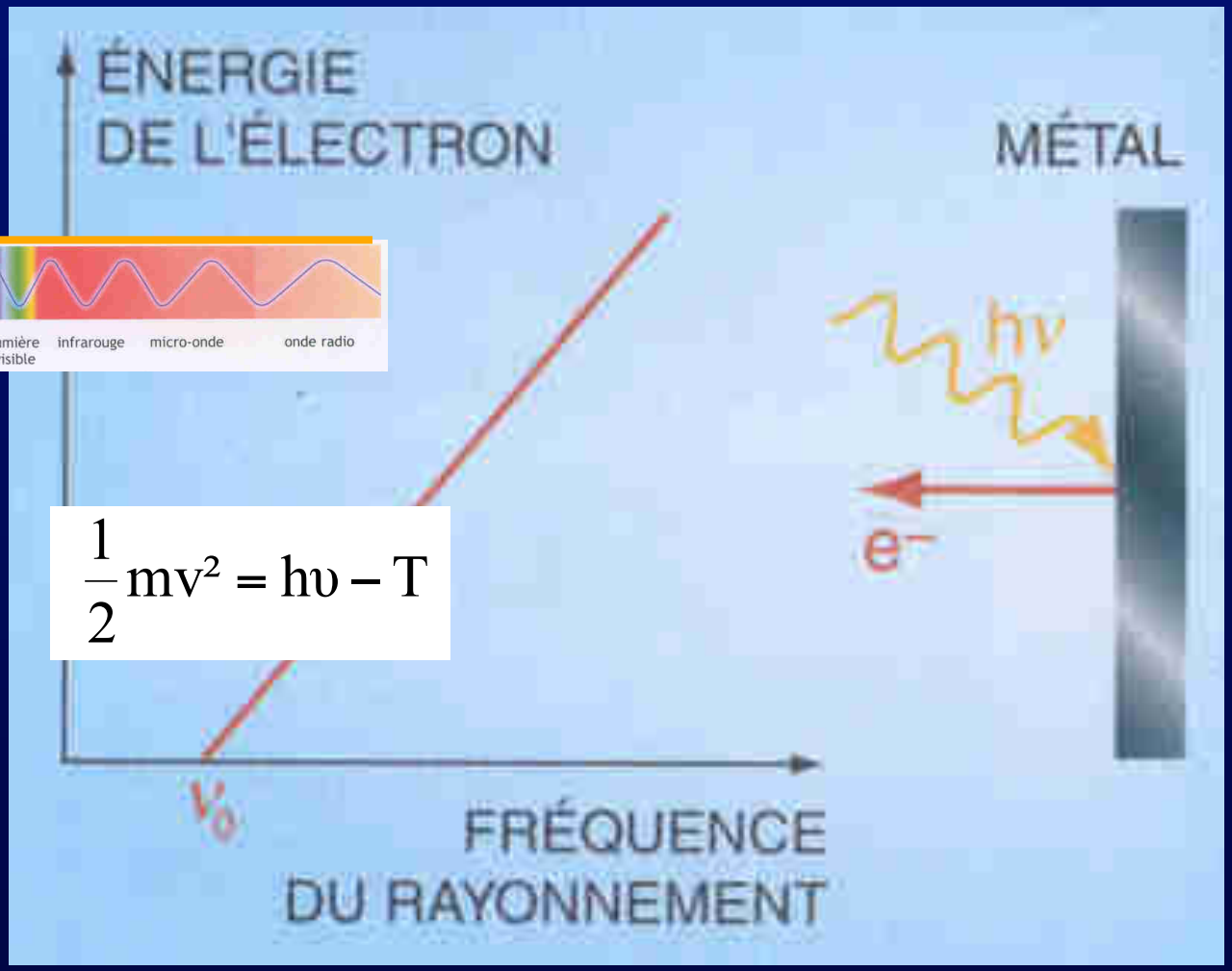


<u>Deuxième constatation</u> : la vitesse d'éjection des électrons ne dépend pas de l'intensité du rayonnement ? Elle ne dépend que de la fréquence du rayonnement. Au dessous d'une fréquence minimum, aucun électron n'est éjecté, même si l'intensité augmente ?

L'effet photoélectrique : l'hypothèse des quanta de lumière !

Un métal soumis à un rayonnement de fréquence υ suffisamment élevée émet des électrons (de travail d'extraction T).

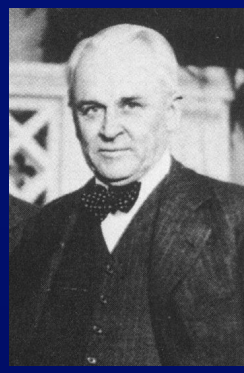




$$\frac{1}{2}mv^2 = h\upsilon - T$$

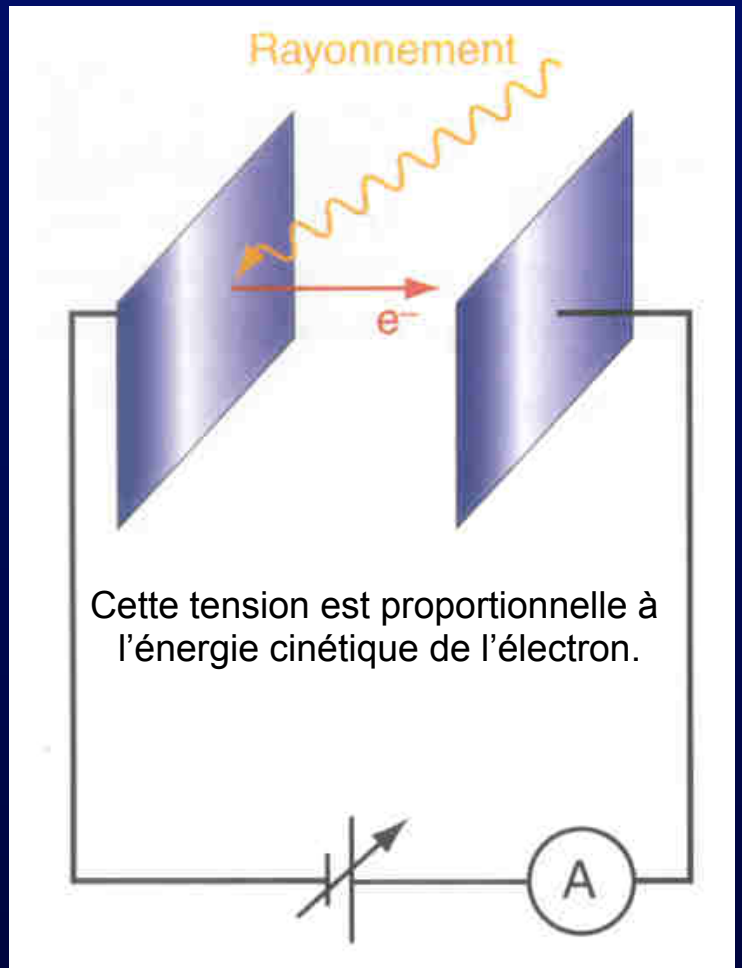
Einstein interprète ce phénomène nommé effet photoélectrique à l'aide de quanta de lumière.

La vérifications expérimentales de l'interprétation einsteinienne de l'effet photoélectrique par Robert Millikan en 1914

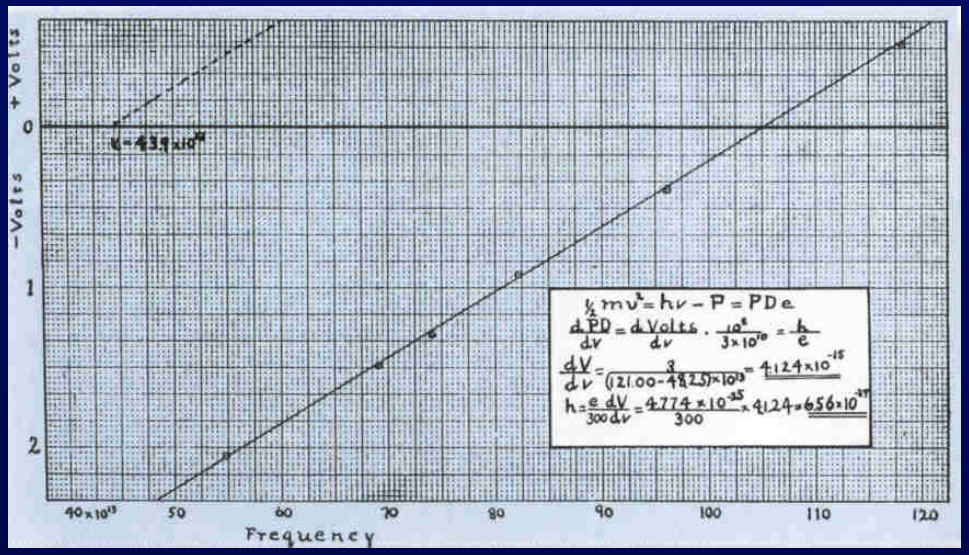


Robert Millikan
(1868-1953)
Nobel 1918

Millikan mesure, pour différentes fréquences du rayonnement incident, la tension limite nécessaire entre les deux électrodes pour empêcher un électron éjecté de la première électrode par effet photoélectrique d'atteindre la seconde.



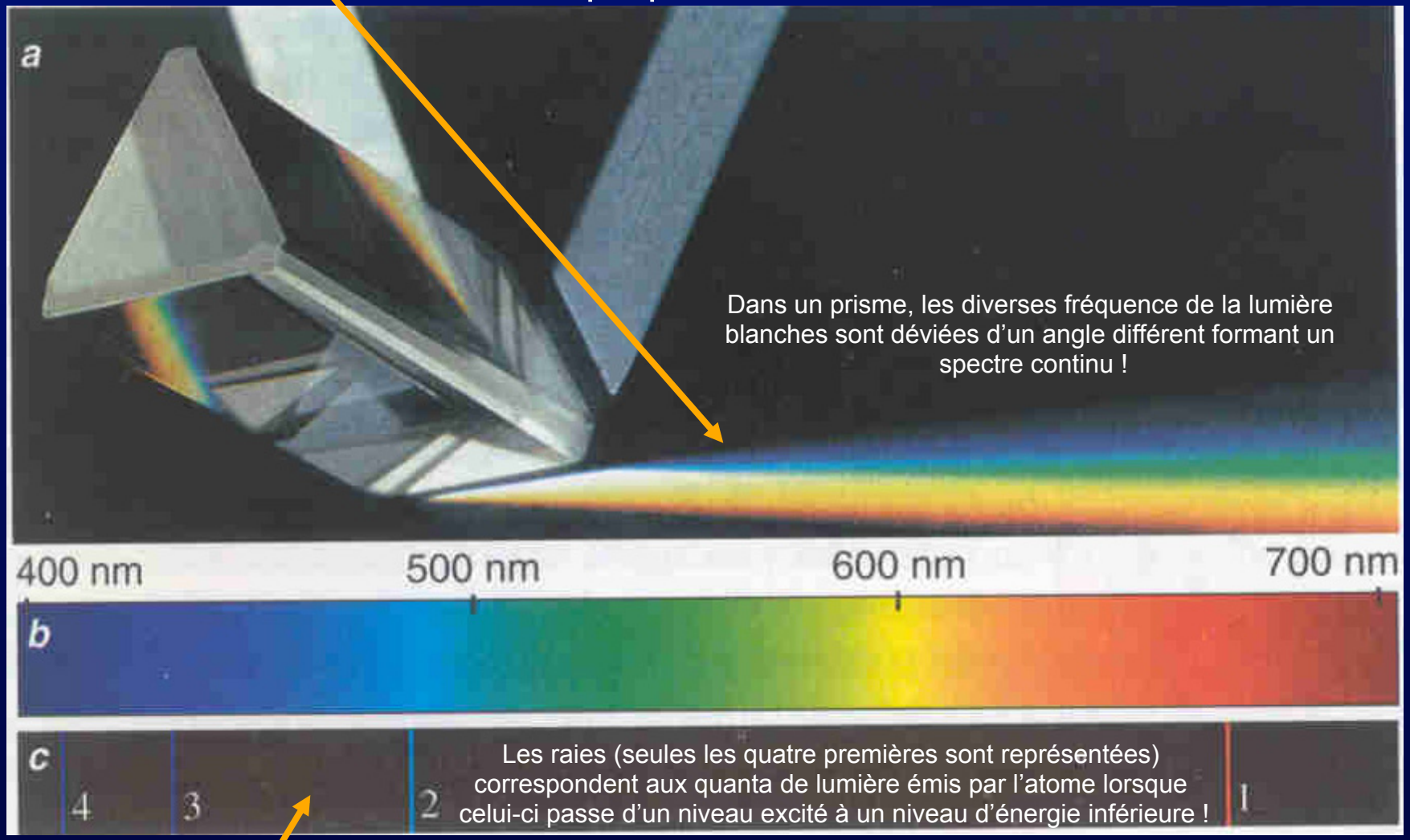
Cette tension est proportionnelle à l'énergie cinétique de l'électron.



Le calcul de l'énergie cinétique avec laquelle s'échappe l'électron montre que l'énergie de l'électron est fonction de la fréquence du rayonnement incident et non de son intensité (c'est le nombre d'électrons qui est proportionnel à l'intensité) !

La lumière est à la fois ondes et quanta

Le spectre de la lumière blanche contient toutes les longueurs d'onde visibles : propriété ondulatoire !

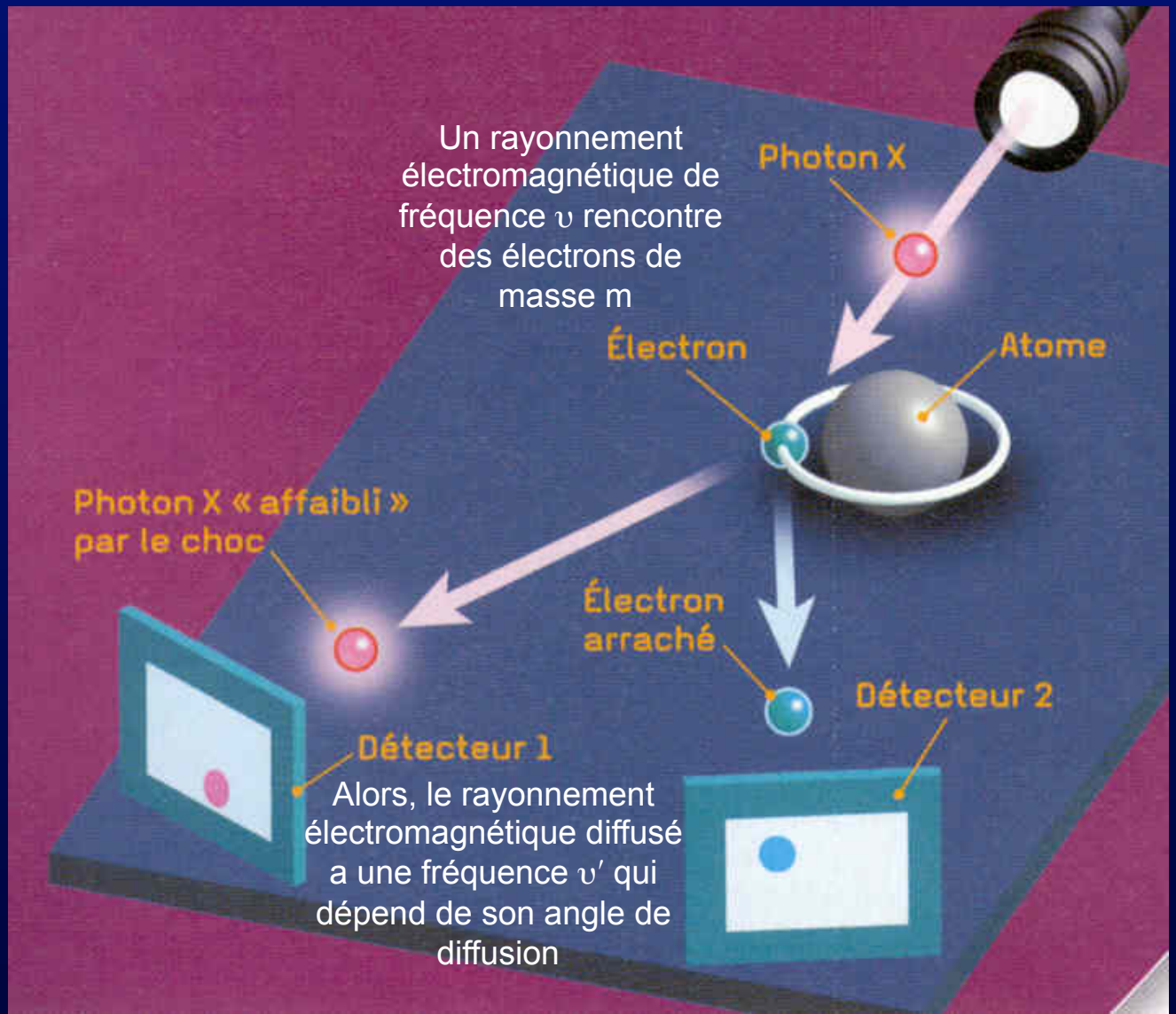


Le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène est une série de raies colorées sur un fond noir : propriété corpusculaire !

La preuve de l’existence des quanta de lumière !

La diffusion ou l'effet Compton : 1922
La preuve de l'existence des quanta de lumière ?

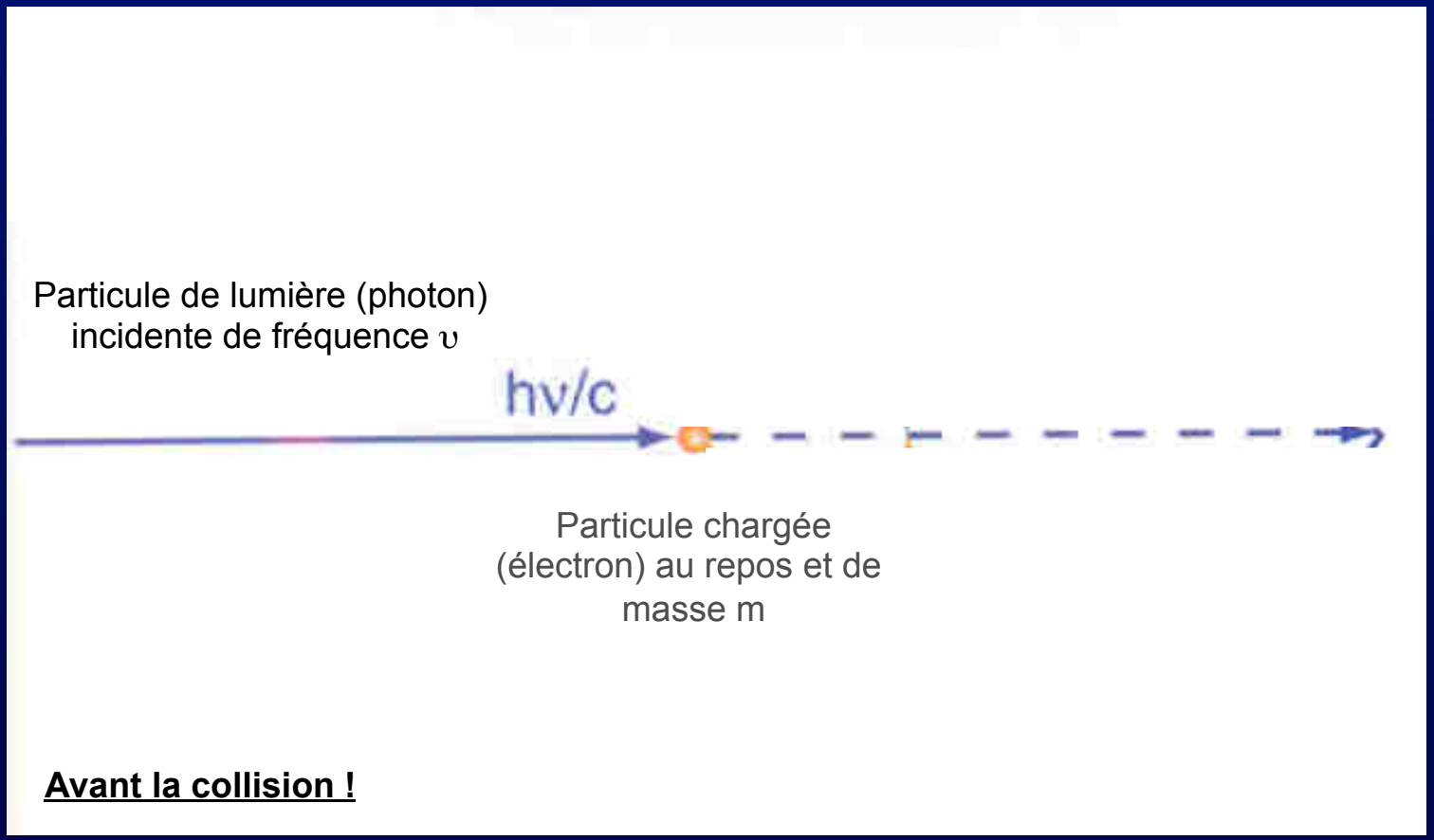
La diffusion d'un rayonnement sur des particules chargées



Arthur Compton
(1892-1962)
Nobel 1927

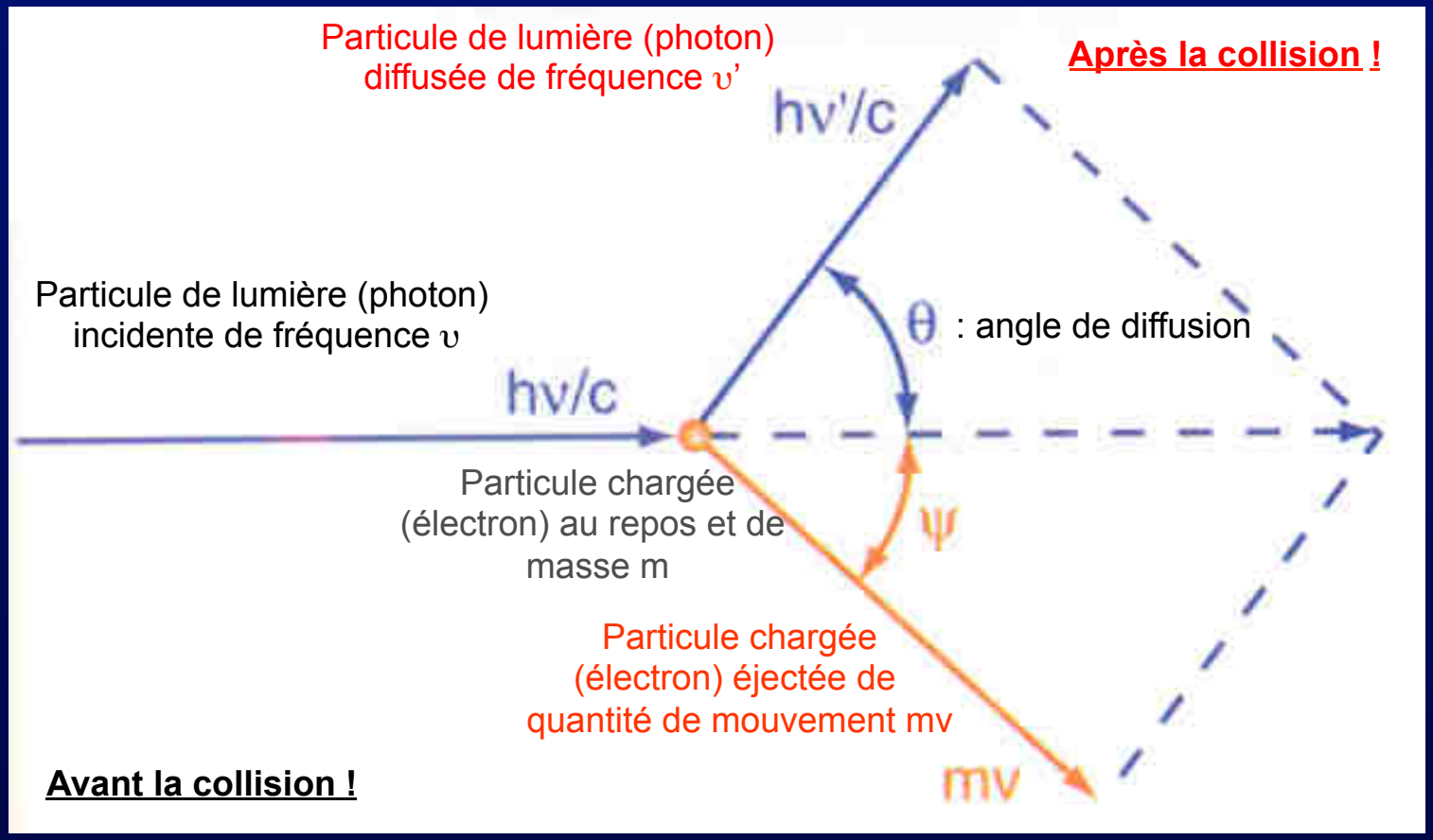
Diffusion ou effet Compton : 1922
La preuve de l'existence des quanta de lumière ?

La collision d'une particule de lumière sur une particule chargée



Diffusion ou effet Compton : 1922
La preuve de l'existence des quanta de lumière ?

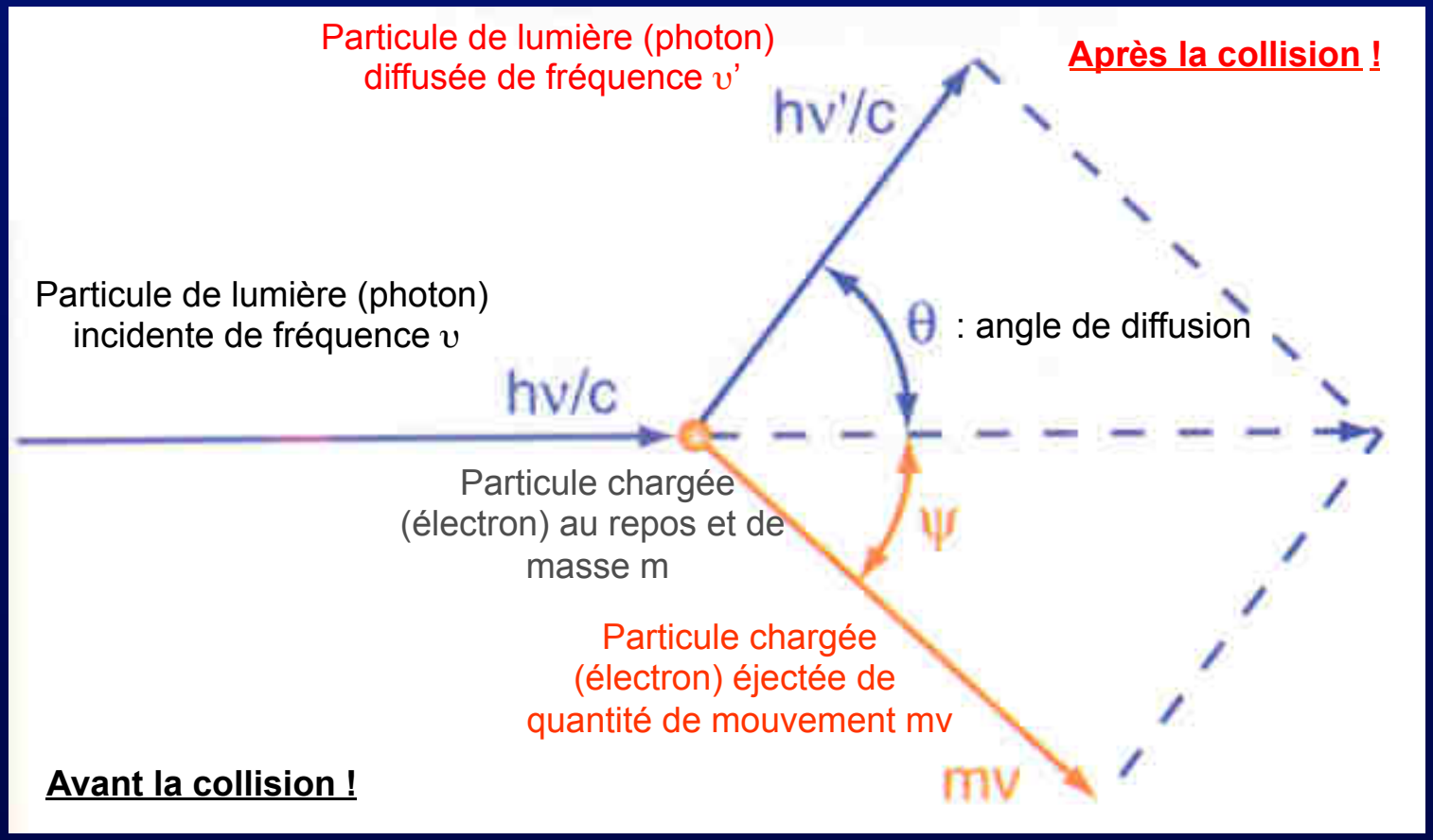
La collision d'une particule de lumière sur une particule chargée



La fréquence du rayonnement diffusé ν' dépend de l'angle de diffusion : cette relation empirique est celle que l'on obtient par le calcul (relativiste) en considérant la collision entre une particule en mouvement d'énergie $h\nu$ et de quantité de mouvement $h\nu/c$, et une particule au repos de masse m.

Diffusion ou effet Compton : 1922
La preuve de l'existence des quanta de lumière ?

La collision d'une particule de lumière sur une particule chargée



Dans l'effet Compton, tout se passe comme si le rayonnement était constitué de particules de lumière : il y a conservation de la quantité de mouvement !

Mais il faudrait mesurer la quantité de mouvement de l'électron éjecté !

Soleil
Venus
Mercure
Jupiter
Terre
Mars
Saturne
La dualité onde/corpuscule !
Uranus
Neptune
Pluto

L'idée géniale de De Broglie en 1924

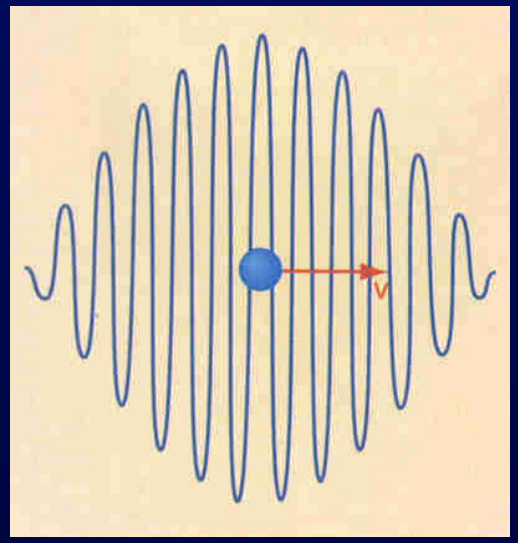
Louis de Broglie
(1892-1987)
Nobel 1929

Puisque les ondes électromagnétiques peuvent être considérées comme des corpuscules qui interagissent avec la matière … réciproquement …

De Broglie propose d'associer à toute particule de matière une onde dont la longueur d'onde est :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

La particule est associée à un groupe (paquet) d'ondes dont le maximum se déplace à la vitesse de la particule !



Controverse sur la nature corpusculaire de la lumière
Première phase du dialogue entre Bohr et Einstein en 1924

L'idée de Bohr, H. Kramers et J. Slater : l'hypothèse que l'interaction entre le rayonnement et les électrons dans l'effet Compton ne conserve pas la quantité de mouvement, et réfuter ainsi l'interprétation corpusculaire d'Einstein !

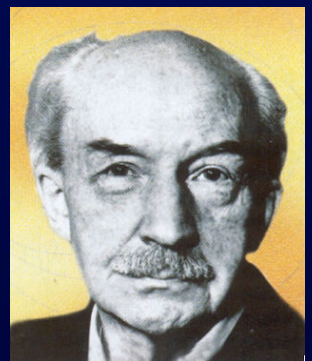
Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Albert Einstein
(1879-1955)
Nobel 1921

En mesurant l'impulsion des électrons diffusés lors de l'effet Compton, Bothe et Geiger confirment que le rayonnement incident se comporte comme un flux de particules : Einstein a raison !

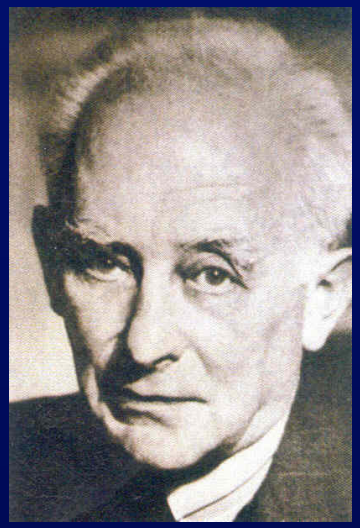
Hans Geiger
(1882-1945)

Walther Bothe
(1891-1957)
Nobel 1954



La « Mécanique matricielle » d'Heisenberg et de Born, Jordan en 1925

Max Born
(1882-1970)
Nobel 1954



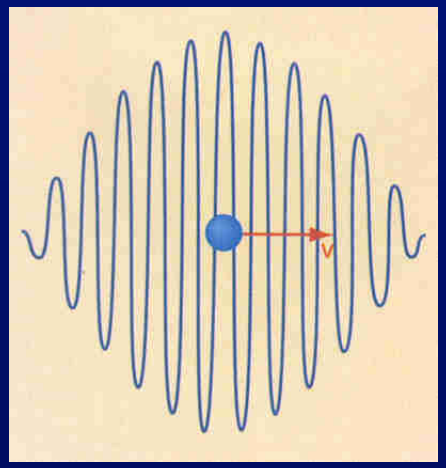
Werner Heisenberg
(1901-1976)
Nobel 1932

Pascual Jordan
(1902-1980)

Le mathématicien anglais Arthur Cayley invente le calcul matriciel en 1858 !

La « Mécanique ondulatoire » de Schrödinger publiée en 1926

On associe à chaque particule un paquet d'ondes, c'est-à-dire un ensemble d'ondes concentrées dans l'espace, et se propageant dans celui-ci :



Erwin Schrödinger
(1887-1961) Nobel 1933

L'équation de propagation de ce paquet d'ondes est :

$$i\hbar\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)\Psi(r,t) = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\Delta\Psi(r,t) + V(r)\Psi(r,t)$$

Fonction d'onde de la particule (avec sa position r)

Energie cinétique de la particule

Energie potentielle de la particule

Une particule est ainsi représentée par une fonction d'onde :

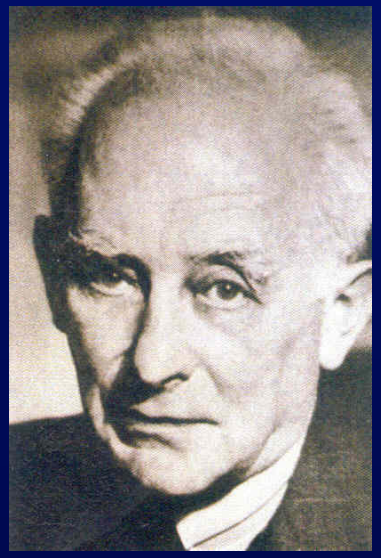
$$\Psi(r,t)$$

L'interprétation des fonctions d'onde par Max Born fin 1926

Le carré de la fonction d'onde en un point donné représente la probabilité de trouver la particule en ce point à l'instant considéré.

Les ondes ne sont rien d'autre que l'expression probabiliste de la position des particules : les ondes associées aux particules sont des ondes de probabilité.

Max Born
(1882-1970)
Nobel 1954

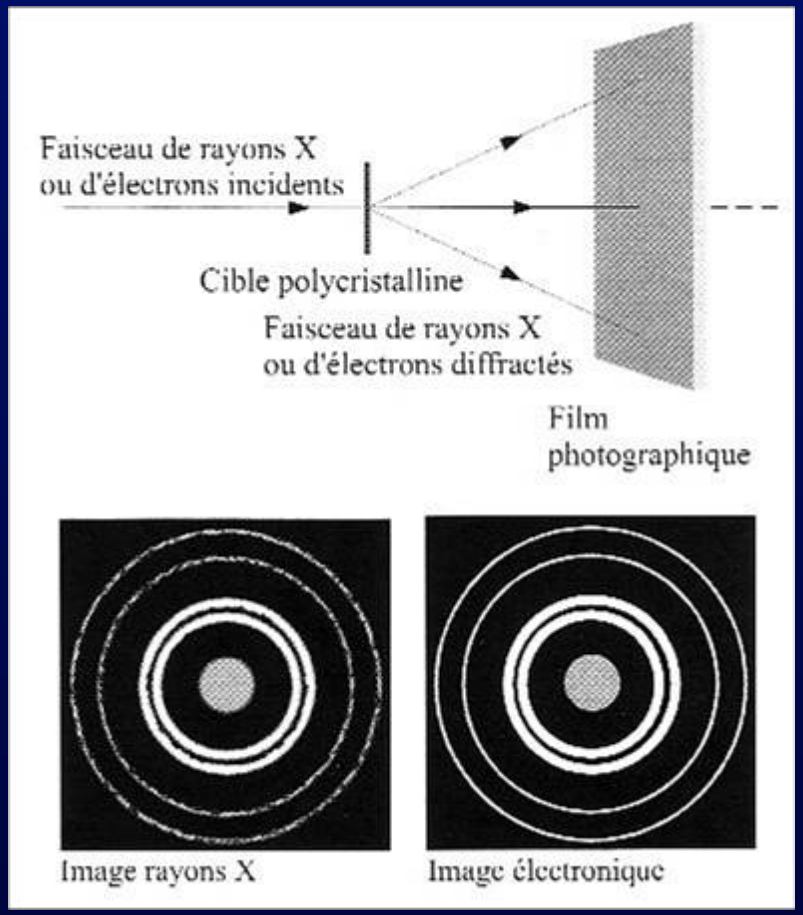


La vérification expérimentale de l'idée de De Broglie en 1927

Clinton Davisson
(1892-1987)
Nobel 1937

Davisson et Thomson prouvèrent l'exactitude de l'idée de L.-V. de Broglie en observant la diffraction d'électrons sur une cible polycristalline (cristal de Nickel).

Georges Thomson
(1892-1987) Nobel
1937



La relation d'indétermination de Werner Heisenberg en 1927
Les discussions entre Heisenberg et Einstein

Werner Heisenberg
(1901-1976)
Nobel 1932

q : position

$$\Delta p \Delta q \geq h$$

h : constante de Planck

p : quantité de mouvement

Certains couples de grandeurs en interaction constante, comme vitesse-position ou temps-énergie, ne peuvent être déterminés simultanément avec le même degré de précision

La relation d'indétermination de Werner Heisenberg en 1927
Les discussions entre Heisenberg et Einstein

Le produit des incertitudes affectant la position et la quantité de mouvement d'une particule doit être inférieur à une certaine valeur, qui n'est autre que la constante de Planck.

Cela ne signifie pas qu'il est impossible de localiser une particule avec précision, ni de déterminer la quantité de mouvement d'une particule; les deux opérations sont cependant incompatibles !

La notion de trajectoire perd son sens … puisqu'il faut connaître la position et la vitesse (et, par conséquent, la quantité de mouvement) d'une particule pour déterminer sa trajectoire !

Remise en cause du déterminisme !

La relation d'indétermination de Werner Heisenberg en 1927
Les discussions entre Heisenberg et Einstein

Une conséquence de ce principe est qu'il est impossible de construire un appareil qui détermine la position d'une particule sans la perturber (dans l'expérience des fentes d'Young, mesurer par quel trou est passé un électron perturbe les électrons au point de détruire les phénomènes d'interférence).

Un nouvel aspect apparaît dans les rapports entre l'homme et le monde physique : pour explorer le monde ***microscopique***, l'homme utilise des outils, qui sont comme lui, ***macroscopiques***.

Toute tentative d'approcher une vérité du monde microscopique conduit donc inévitablement à une modification de celui-ci : en cherchant à déterminer, avec une précision donnée, la position d'une particule, nos mesures lui communiquent nécessairement une quantité de mouvement, et nous perdons ainsi de la précision sur son éventuelle quantité de mouvement réelle.

Le congrès de Côme en septembre 1927
Niels Bohr introduit la notion de « complémentarité »

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Des propriétés sont complémentaires lorsqu'elles concourent à définir entièrement une entité, tout en restant dans des contextes distincts : les aspects corpusculaire et ondulatoire sont de cette nature.

Les objets décrits par la mécanique quantique sont, du point de vue logique, ondes ***ou*** corpuscules, mais aussi ondes ***et*** corpuscules.

Le congrès de Côme en septembre 1927
Niels Bohr présente le concept d'« interprétation de Copenhague »

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

- l'indétermination de Heisenberg,
- la complémentarité onde et/ou corpuscule,
- la notion de probabilité de présence de la particule,
- la perturbation de l'expérience par l'observateur.

Le cinquième congrès Solvay d'octobre 1927

Deuxième phase des discussions entre Bohr et Einstein

Les propriétés de la lumière : ondes et/ou corpuscules ?

Ernest Solvay, industriel belge, finance une rencontre entre tous les plus grands physiciens de cette époque travaillant sur les phénomènes quantiques

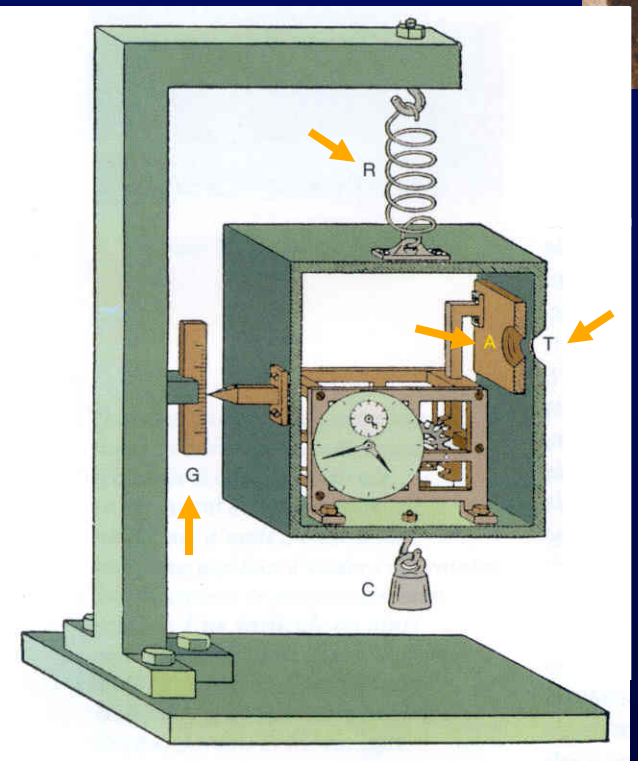
1er rang de gauche à droite : Langmuir, Planck, Marie Curie, Lorentz, Einstein, Langevin, Guye, Wilson, Richardson
2e rang : Debye, , Knudsen, Bragg, Kramers, Dirac, Compton, De Broglie, Born, Bohr
3e rang : Picard, Henriot, Ehrenfest, Herzen, De Donder, Schröedinger, Vershaffelt, Pauli, Heisenberg, Fowler, Brillouin

Le congrès Solvay de 1930
Poursuite des discussions entre Bohr et Einstein
L'expérience de pensée opposée au principe d'indétermination

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Albert Einstein
(1879-1955)
Nobel 1921

La pendule dans la boîte



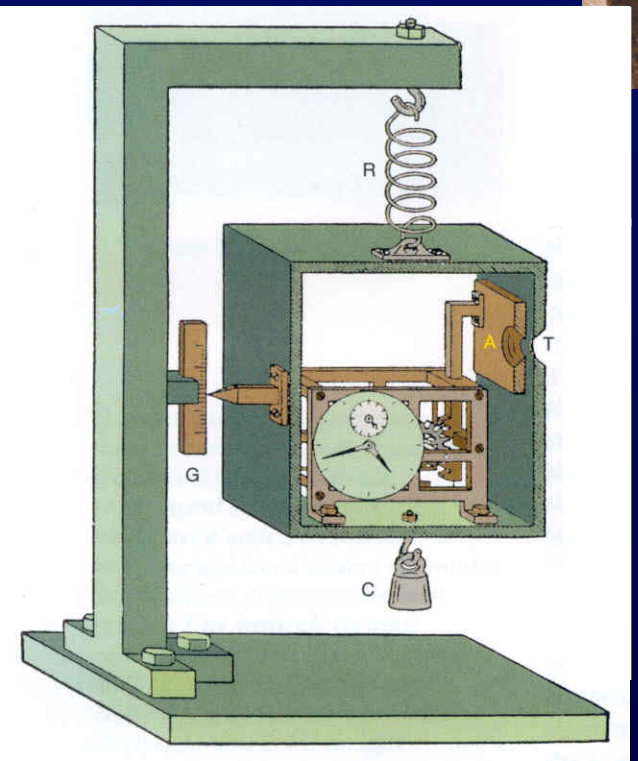
Einstein considère une boîte percée d'un trou T, que l'on peut ouvrir ou fermée à l'aide d'un obturateur A contrôlé par une horloge, placée dans la boîte. Celle-ci, fermée et contenant un rayonnement, est pesée avec le ressort R servant de balance au moyen de la graduation G. Puis l'obturateur est ouvert, le temps de laisser sortir un seul photon. La boîte est alors pesée à nouveau. L'on mesurerait ainsi l'énergie du photon et l'instant exact de son passage à travers le trou, ce qui est en contradiction avec le principe d'incertitude ?

Le congrès Solvay de 1930
Poursuite des discussions entre Bohr et Einstein
L'expérience de pensée opposée au principe d'indétermination

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Albert Einstein
(1879-1955)
Nobel 1921

La pendule dans la boîte



« Ce fut un véritable choc pour Bohr […] Il ne vit pas immédiatement la solution. Durant toute la soirée, il fut extrêmement malheureux, allant de l'un à l'autre pour les convaincre que ce ne pouvait être vrai, que ce serait la fin de la physique si Einstein avait raison; mais il ne put trouver aucune réfutation. […]

Le lendemain, ce fut le triomphe de Bohr. »

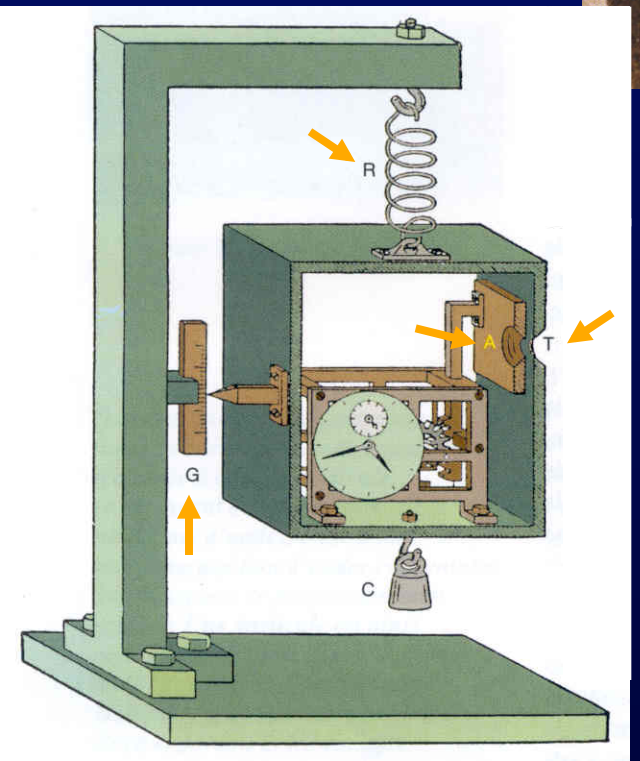
Léon Rosenfeld (collaborateur de Bohr)

Le congrès Solvay de 1930
Poursuite des discussions entre Bohr et Einstein
L'expérience de pensée opposée au principe d'indétermination

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Albert Einstein
(1879-1955)
Nobel 1921

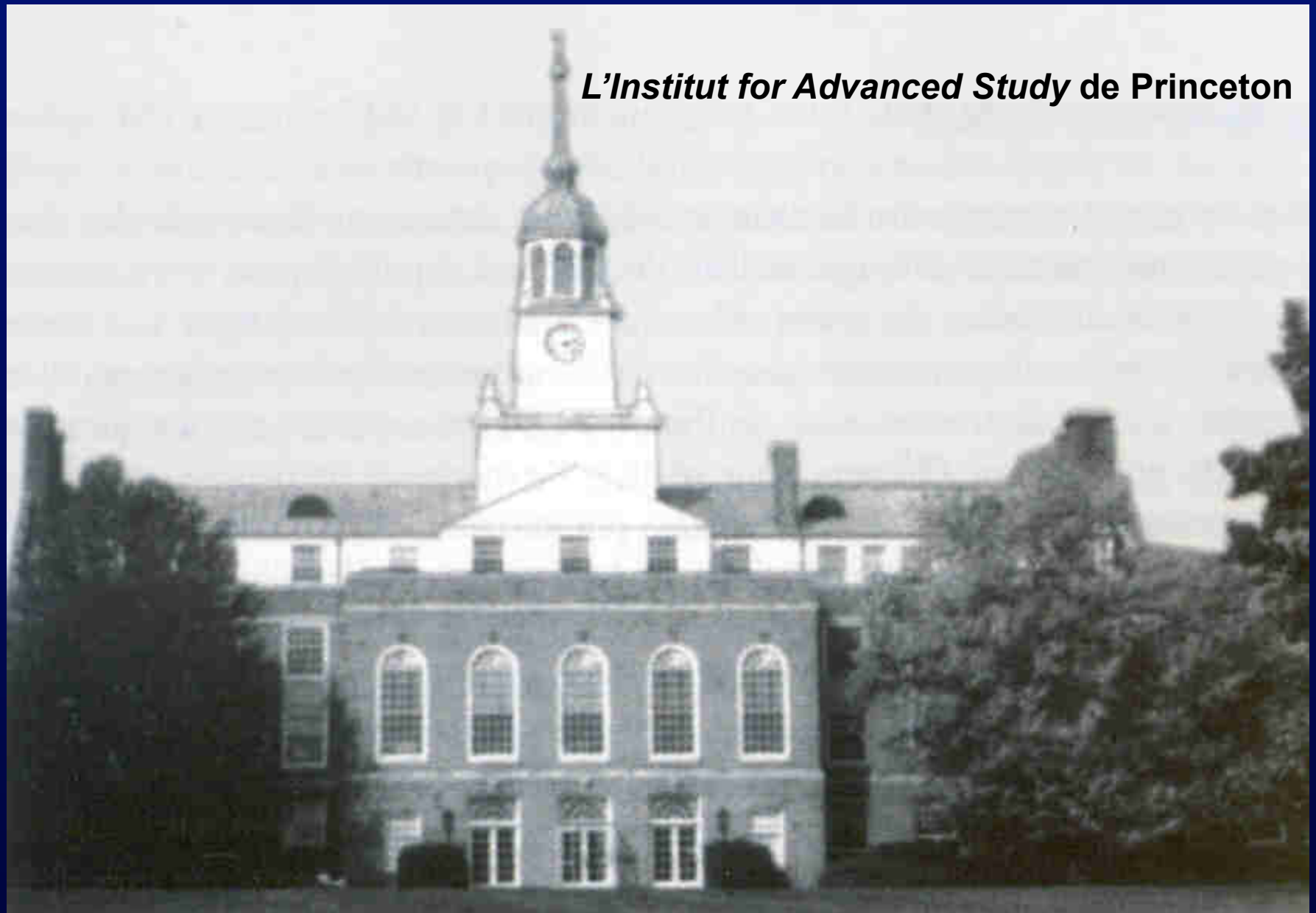
La pendule dans la boîte



Einstein considère une boîte percée d'un trou T, que l'on peut ouvrir ou fermée à l'aide d'un obturateur A contrôlé par une horloge, placée dans la boîte. Celle-ci, fermée et contenant un rayonnement, est pesée avec le ressort R servant de balance au moyen de la graduation G. Puis l'obturateur est ouvert, le temps de laisser sortir un seul photon. La boîte est alors pesée à nouveau. L'on mesurerait ainsi l'énergie du photon et l'instant exact de son passage à travers le trou, ce qui est en contradiction avec le principe d'incertitude ?

Bohr démontrera que les mesures de l'énergie et du temps introduisent une incertitude sur le résultat en accord avec le principe d'incertitude !

Einstein arrive à Princeton en 1933
(il y restera jusqu'à sa mort en 1955)



Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.
Troisième et dernière phase des débats entre Einstein et Bohr.

Albert Einstein
(1879-1955)
Nobel 1921

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

Une étrange conséquence de la mécanique quantique : lorsque deux particules interagissent, leurs propriétés se couplent et restent corrélées même après que l'interaction est terminée.

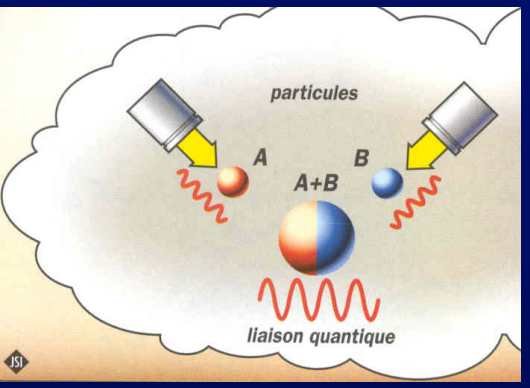
Ainsi, en mesurant une grandeur physique de l'une des deux particules couplées - « intriquées » -, on connaît automatiquement la valeur de cette grandeur physique pour l'autre particule.

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.
Troisième et dernière phase des débats entre Einstein et Bohr.

Article paru en 1935 dans la « *Physical Review* » sous le titre : *La description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?*

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.
Troisième et dernière phase des débats entre Einstein et Bohr.

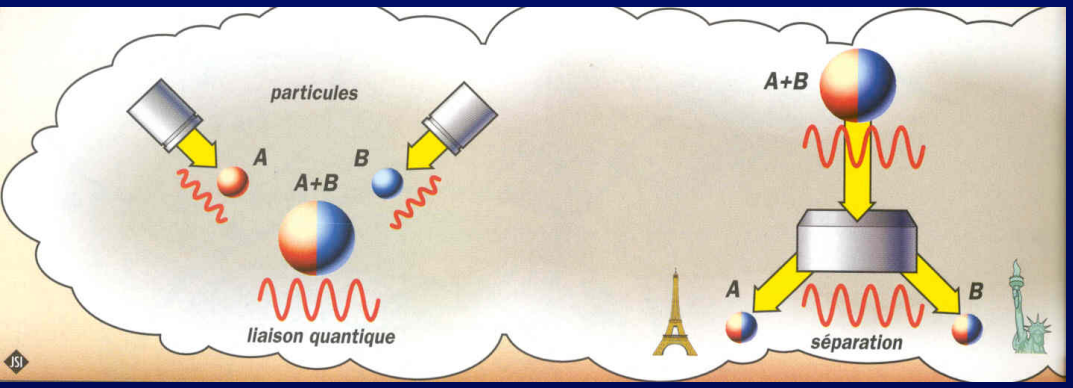
Article paru en 1935 dans la « *Physical Review* » sous le titre : *La description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?*

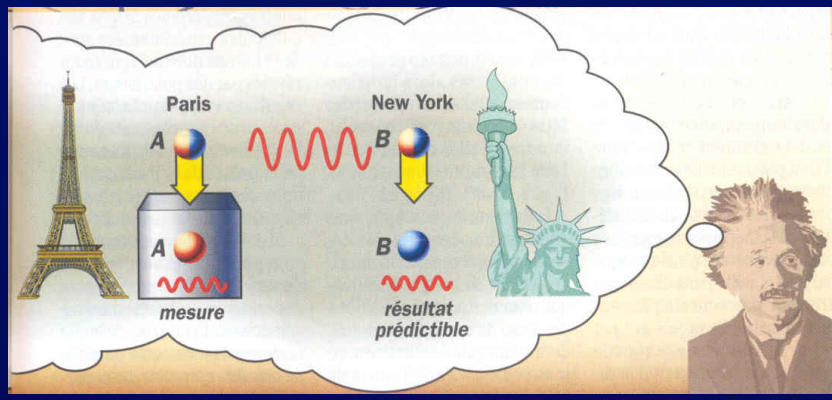


L'intéraction de deux particules A et B forme un système unique avec une seule fonction d'onde !

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.
Troisième et dernière phase des débats entre Einstein et Bohr.

Article paru en 1935 dans la « *Physical Review* » sous le titre : *La description de la réalité physique par la mécanique quantique peut-elle être considérée comme complète ?*





L'intéraction de deux particules A et B forme un système unique avec une seule fonction d'onde !

Séparées, elles conservent malgré tout leur inséparabilité et indétermination quantique !

Si enfin on mesure la « couleur » de l'une d'elles (A), on peut en déduire instantanément la couleur de l'autre (B).!

Pour Einstein, la couleur était définie avant la mesure mais restait cachée à une théorie complète, d'où son idée « d'incomplétude » de la mécanique quantique et des grandeurs cachées !

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935. La même année, la manifestation la plus célèbre avec le chat de Schrödinger !

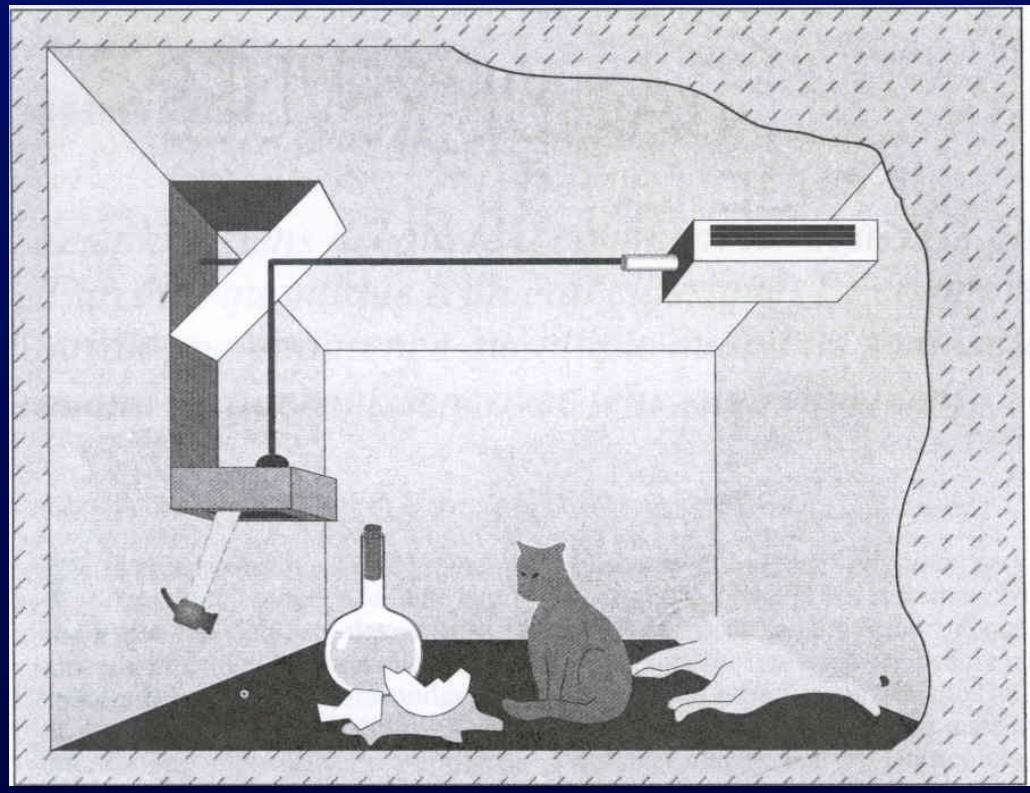
A l'échelle de l'atome, un objet peut se trouver dans plusieurs états à la fois : pourquoi est-ce impossible d'observer cette situation à l'échelle macroscopique ?

Erwin Schrödinger
(1887-1961) Nobel 1933

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935. La même année, la manifestation la plus célèbre avec le chat de Schrödinger !

En 1935, Schrödinger imagine un chat enfermé dans une boîte. L'état de vie V ou de mort M du chat est corrélé à l'état d'un atome (e ou g). Initialement, l'atome est dans l'état e et le chat dans l'état vivant V. Lorsque l'atome se désexcite vers g, un mécanisme provoque la mort de l'animal, corrélant ainsi l'état atomique final g à l'état M du chat.

A un instant donné, on devrait avoir dans la boîte une superposition de « paires » (e,V) et (g,M), donnant lieu à des interférences quantiques entre les amplitudes associées aux états « vivant » et « mort » du chat. Or de telles interférences ne sont jamais observées, que ce soit avec un chat ou tout autre objet macroscopique.



Une version moderne du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.

Les inégalités de John Bell dans son article « *Sur le paradoxe d'Einstein, Podolski et Rosen* » en 1964 :

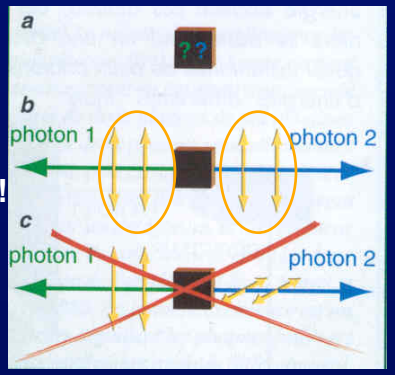
John Bell
(1928-1990)

La question de l'existence de variables cachées était susceptible d'être soumise (moyennant une hypothèse supplémentaire) au verdict de l'expérience.

Une version moderne du paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen de 1935.

L'expérience de pensée des photons intriqués à partir des années 1970 :

Deux photons intriqués (??) s'éloignent !



Polarisations identiques !

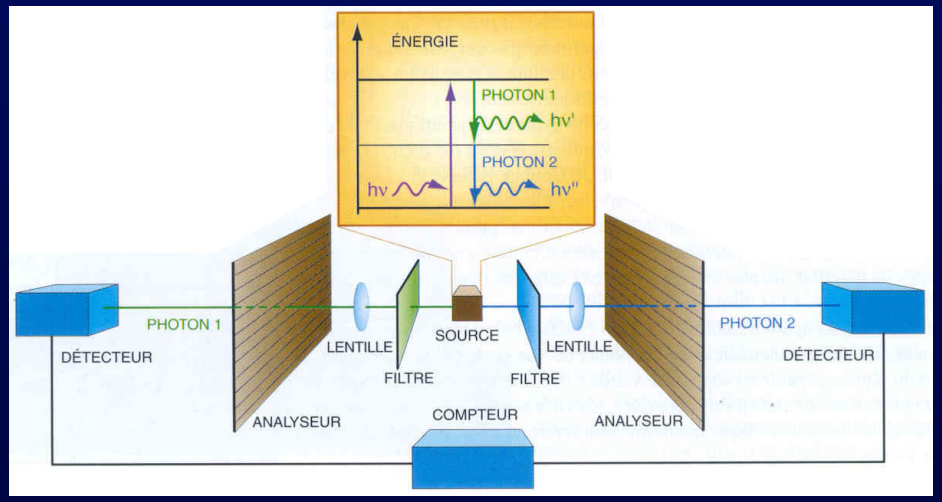
Pas la peine de mesurer, le photon 2 n'est pas polarisé horizontalement !

La preuve de la réalité paradoxale du monde quantique !

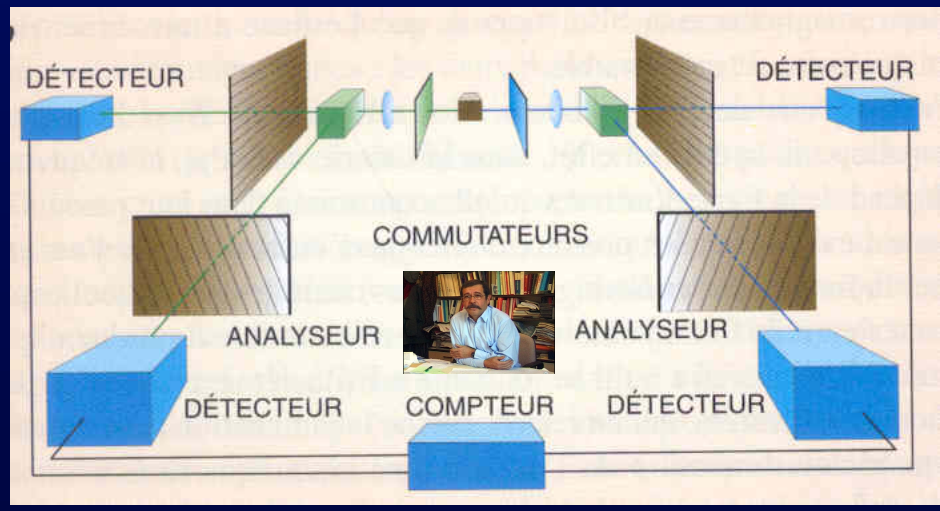
Le second photon « sait » quelle polarisation adopter ?

Les deux photons transportent-ils donc une propriété commune, indépendante de toute mesure ?

La vérification expérimentale :



Expérience des années 1970



Expérience d'Alain Aspect de 1982

Les interprétations de la physique quantique …

Niels Bohr présente le concept d'« interprétation de Copenhague »

Niels Bohr
(1885-1962)
Nobel 1922

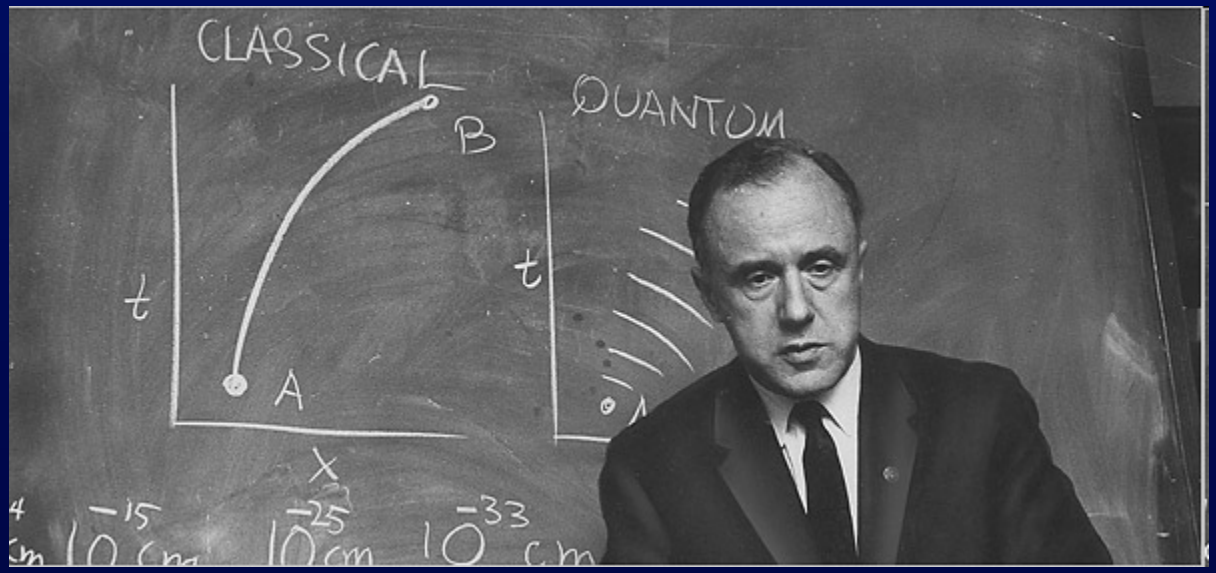
- l'indétermination de Heisenberg,
- la complémentarité onde et/ou corpuscule,
- la notion de probabilité de présence de la particule,
- la perturbation de l'expérience par l'observateur.

On devrait se contenter de prédire les résultats des mesures !

La théorie du flou de John Weeler

C’est la pensée humaine qui crée la réalité !

Sans conscience, l’univers n’a aucun sens !



John Wheeler
(1911-2008)

Le travail de Hugh Everett, diplômé de l'université de Princeton, sur la « multiplicité des mondes » en 1957

Une nouvelle interprétation de la physique quantique reconnue qu'à partir des années 1970 :

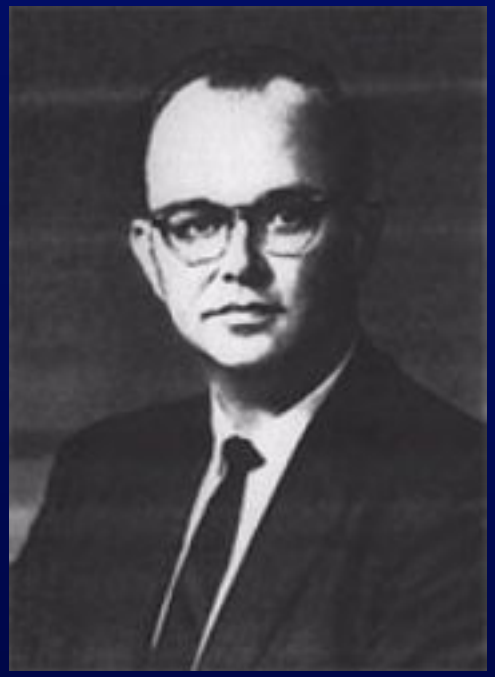
- la division de l'Univers en des mondes multiples,

- la physique quantique ondulatoire propose une superposition d'états,

- un état est indifférent aux autres,

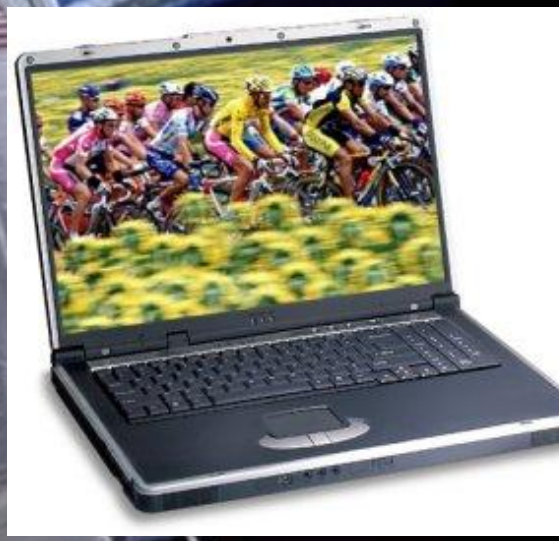
- donc nul observateur ne peut être conscient du processus de division.

Hugh Everett
(1930-1982)

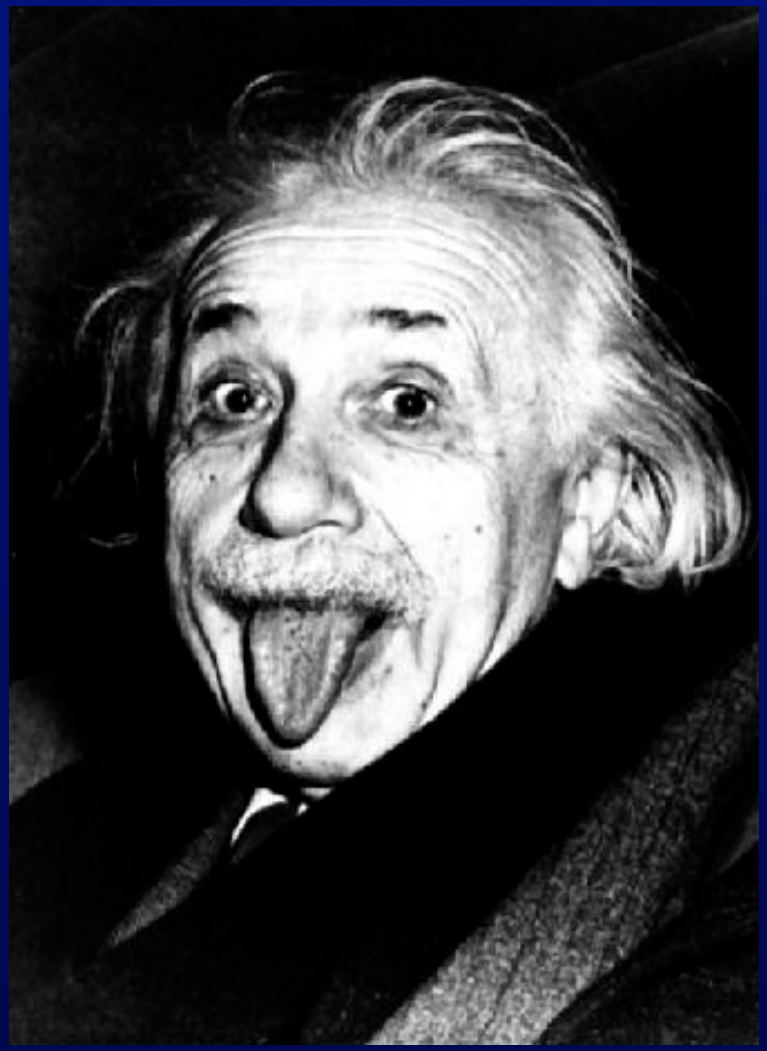


De la réalité quantique à la réalité classique !
La réduction du paquet d’ondes !

La compréhension de la structure des atomes et de leurs interactions avec les photons ont permis une multitude d'applications !



Albert meurt le 18 avril 1955



Une citation d'Albert : « Deux choses sont infinies : l'Univers et la bêtise humaine ; mais en ce qui concerne l'Univers, je n'en ai pas encore acquis la certitude absolue. »

Chapitre 8

ALBERT EINSTEIN ET LA REVOLUTION QUANTIQUE

Patrice Remaud

LAII-ESIP

(Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle – Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers)

patrice.remaud@univ-poitiers.fr

http://laii.univ-poitiers.fr/remaud/