

# La physique quantique pour les nuls en 10 épisodes

Publié le [3 avril 2022](#) par [zeveigneur](#)



« Il n'y a plus rien à découvrir en physique aujourd'hui, tout ce qui reste est d'améliorer la précision des mesures. »

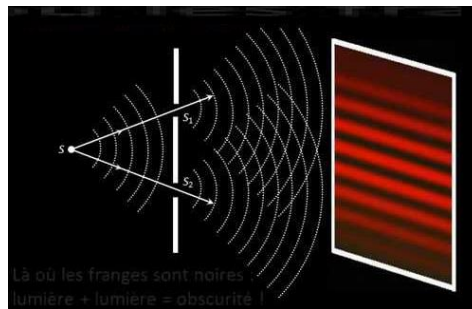
[Citation du physicien](#) Lord Kelvin en 1900.

## La physique du 19e siècle, la fin de l'histoire ?

Cette citation de l'un des plus grands physiciens du 19e siècle résume bien l'état d'esprit qui régnait dans le monde scientifique de l'époque. Nul ne s'attendait alors à ce que deux des principales théories admises comme des vérités ultimes allaient être remplacées en moins d'un quart de siècle.

On distinguait alors trois grands piliers théoriques dont un seul d'entre eux a survécu aux révolutions conceptuelles du 20<sup>ième</sup> siècle. Le premier pilier était basé sur la théorie de Newton avec la notion de matière possédant une masse et interagissant à distance à travers ce que l'on a appelé des forces. Le second introduisait le concept de champs ondulatoires immatériels dits électromagnétiques se propageant sans support apparent, la lumière visible étant une petite partie de cet ensemble. Enfin le troisième pilier qui de son côté a survécu est la [thermodynamique](#) traitant des échanges de chaleur et des conversions d'énergie.

A l'époque, les scientifiques pensaient la matière était de structure particulaire et la lumière ondulatoire comme l'indiquait la célèbre expérience des [fentes de Young en 1801](#) qui montrait des franges d'interférence lors de l'addition de deux rayons lumineux.

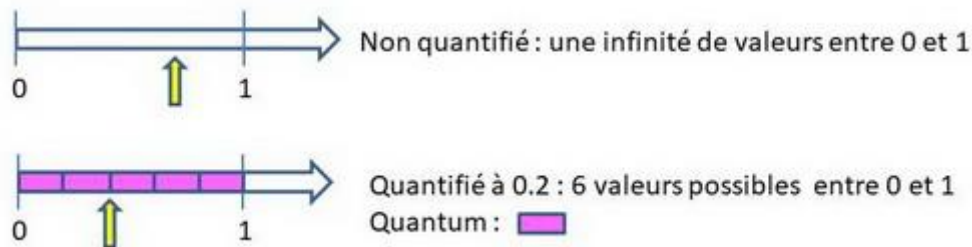


Il restait cependant quelques questions en apparence simples à élucider à savoir le mystère du [corps noir](#) et l'[effet photoélectrique](#). Et ô surprise, ces dernières, loin d'être mineures ont conduit à la remise en cause de tout l'édifice.

## Théorie quantique, une révolution de la physique au début du 20e siècle

### Épisode #1 : Max Planck et les quantas

[Max Planck](#) mit en 1900 le premier coup de boutoir à la physique ondulatoire de la lumière en introduisant la notion de [quantas lumineux](#), seule méthode permettant d'expliquer le problème du corps noir, la lumière devient donc une entité constituée d'un ensemble de petits paquets d'énergie indivisibles. Planck introduisit alors sa fameuse constante  $h$  qui est l'une des [constantes fondamentales de l'Univers](#), on la retrouve sans surprises dans toute la mécanique quantique.



### Épisode #2 : Albert Einstein introduit le photon

En 1905 à partir des travaux de Planck, [Einstein](#) poursuit dans cette voie en expliquant l'[effet photoélectrique](#).

Lorsque l'on soumet une plaque métallique à un rayon lumineux à haute fréquence, alors la plaque émet des électrons. La théorie ondulatoire donnant des résultats incohérents, Einstein explique le phénomène en introduisant la notion de particules de lumières absorbées par la plaque, le [photon](#) était né.

Dans les calculs, l'énergie  $E$  du photon reste alors associée à une longueur d'onde  $\lambda$  par une [relation simple dite de Planck-Einstein](#) utilisant la constante de Planck  $h$  et  $c$  la vitesse de la lumière ( $E = h.c/\lambda$ ). Plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie du photon est grande.

*C'est à cette date que la représentation mentale de la lumière se complique avec la [notion de dualité](#), en effet cette dernière se présente « en même temps » comme une onde et comme une particule.*

Remarque : il n'y a pas de limite théorique à l'énergie véhiculée par un photon, cependant les sources les plus puissantes [détectées dans l'univers ont atteint les 450 TeV](#) (téraélectronvolt).

### Épisode #3 : Louis De Broglie subodore que la matière est aussi une onde

En 1924, [Louis De Broglie](#) va encore plus loin en présentant dans sa thèse sa [fameuse hypothèse](#) qui à l'instar des travaux d'Einstein sur la lumière associe également une onde à chaque particule matérielle de masse  $m$  comme par exemple un électron.

Cette idée est révolutionnaire.

En effet De Broglie est parti du fait que la lumière que l'on croyait purement ondulatoire s'est avérée être également de nature particulaire, il fit alors l'hypothèse que symétriquement la matière que l'on pensait purement particulaire pouvait également présenter une nature ondulatoire.

Cette hypothèse sera ultérieurement vérifiée par l'[expérience de Davisson-Germer](#) en 1927 qui réussit à faire interférer des électrons à l'identique de l'expérience des fentes d'Young avec la lumière.

### Épisode #4 : Erwin Schrödinger met tout cela en équation ( $\Psi$ )

C'est en 1925 que le physicien [Erwin Schrödinger](#) poursuit l'écriture de l'histoire, il prend la thèse de De Broglie sous le bras et, accompagné d'après la légende par l'une de ses maitresses [1] part en montagne pour réfléchir à la question de la dualité onde-particule afin de construire un formalisme mathématique.

En mécanique quantique du fait de cette dualité, la notion familière de trajectoire en mécanique classique n'existe pas. Il s'agissait alors pour Schrödinger d'imaginer des opérateurs mathématiques spécifiques basés toutefois sur un principe de correspondance avec la mécanique classique.

Partant alors de l'équation classique de la conservation d'énergie d'un système avec ses deux composantes cinétique et potentielle, il rechercha alors une fonction mathématique pour caractériser l'état quantique d'un système en fonction du temps.

Cette dernière appelée fonction d'onde fut nommée psi, elle est notée :  $\Psi$ . Elle est dite complexe car elle fait intervenir le [nombre imaginaire  \$i\$](#)  et pour chaque problème traité, il faut établir une fonction d'onde spécifique.

Pour déterminer la fonction  $\Psi$ , Schrödinger établit son [équation éponyme](#) qui est une équation complexe aux dérivées partielles en fonction du temps dont l'inconnue est la fonction d'onde  $\Psi$ .

On remarque que comme en relativité, le temps est considéré comme existant à l'extérieur du système [2].

Pour les curieux, voici la [forme mathématique](#) sous laquelle se présente cette équation dans le cas général [4] :

$$H(t) | \psi(t) \rangle = i\hbar \frac{d}{dt} | \psi(t) \rangle$$

Elle caractérise l'évolution temporelle d'un système quantique par [conservation de son énergie totale H](#) (Hamiltonien). A noter que cette équation n'est valable qu'en dehors du cadre relativiste, soit en dessous de 10% de la vitesse de la lumière.

Sans entrer dans des détails techniques, il n'y a que dans des cas simples que l'on peut résoudre cette équation par détermination de solutions ( $\Psi_1, \Psi_2$ , etc.), pour les cas complexes il faut recourir à des simulations numériques sur ordinateur.

L'évolution de cette fonction dans le temps est déterministe mais elle n'est pas exploitable directement car elle est définie dans un espace dit de Hilbert sans rapport avec l'espace-temps dans lequel nous évoluons.

Elle ne renseigne donc pas directement sur des valeurs de paramètres mesurables telles qu'une position ou une vitesse (voir ce cours [ici](#)).

Pour les cas relativistes, [Paul Dirac](#) partant du formalisme de Schrödinger a établi une équation compatible avec la relativité restreinte nommée « [Équation de Dirac](#) ». Il a été récemment démontré en 2018 par Nathalie Deberg (lien [Journal Of Physics](#)) que cette équation était compatible avec les énergies négatives du [modèle cosmologique Janus](#) [5].

Lorsque Schrödinger a construit sa fonction d'onde, il n'a cependant pas immédiatement appréhendé sa signification exacte et ses implications.

### ***Épisode #5 : Max Born et Niels Bohr donnent un sens physique à la fonction d'onde***

Peu de temps après sa publication, [Max Born](#) et [Niels Bohr](#) donnent un sens à la fonction  $\Psi$  établie par Schrödinger.

A partir de conditions initiales définies  $\Psi(r_0, t_0)$ , la valeur de la fonction à un instant  $t$  décrit l'état quantique du système étudié dans l'espace de Hilbert où il est défini. Il ne dit rien à ce niveau concernant des valeurs de mesures possibles.

Afin de pouvoir mesurer quelque chose et faire le lien avec l'expérience, il faut introduire la notion d'[observables](#). Ces observables seront de deux types, soit elles ne peuvent prendre qu'un nombre fini de valeurs (ex : polarisation, spin), soit elles peuvent avoir n'importe quelle valeur (ex : vitesse, position). Dans ce second cas, on ne considérera un résultat de mesure possible qu'à l'[intérieur d'une plage de valeurs](#) (utilisation des écarts-types) car en physique quantique, tout est décrit par nature à l'aide de quantas.

Une observable est obtenue en effectuant une opération mathématique qui va décomposer la fonction  $\Psi$  en un ensemble de valeurs possibles qui seront alors susceptibles d'être mesurées, on parle de combinaison linéaire d'états propres. A chacune de ces valeurs pourra alors être évaluée une probabilité d'être mesurée par calcul du carré du module de l'état propre et la somme des probabilités de toutes ces valeurs sera de 100% (normalisation). C'est la même chose que pour un lancement de dé, il y a 6 valeurs possibles mais on ne peut pas déterminer celle du prochain lancer.

Il y a ensuite un aspect fondamental à considérer sur la question de la mesure d'un paramètre physique. *En effet, toute mesure provoque une interaction entre l'objet mesuré et l'appareillage de mesure.*

Comme on vient de le voir, avant la mesure le système est dans un état dit non déterminé, c'est à dire que cette dernière sera susceptible de prendre plusieurs valeurs possibles. Lors de la mesure, on dit que la fonction d'onde  $\Psi$  « s'effondre » en une valeur particulière.

Cette mesure va ensuite changer les conditions initiales de  $\Psi$  qui devra donc être mise à jour.  $\Psi(r, t)$  va ensuite recommencer à évoluer selon ce nouvel état initial jusqu'à la prochaine mesure ou interaction.

[Max Born](#) établit également un principe fondamental de la physique quantique avec sa relation de [non commutativité des vitesses et positions](#) :  $pq - qp = -i\hbar$

En clair cette relation indique que selon l'ordre dans lequel on effectue les mesures de vitesses et de positions, les résultats obtenus seront différents.

Cette formule fondamentale fut [gravée sur la tombe de Max Born](#).

D'après ce qui précède et selon l'[interprétation dite de Copenhague](#), le comportement à très petite échelle est gouverné par le hasard, Einstein ayant une vision classique ne peut accepter cela et ainsi [nait une controverse](#) :

*Einstein* : « – Dieu ne joue pas aux dés ! »

*Bohr* : « – Einstein, arrêtez de dire à Dieu ce qu'il doit faire ! »

### **Épisode #6 : Principe de superposition**

Nous venons de voir que les équations ne permettent pas de calculer la valeur d'un paramètre de manière déterministe mais seulement de lui attribuer une probabilité de mesure parmi un ensemble de valeurs possibles. La question qui se pose et qui continue de faire débat plus d'un siècle après est de se représenter l'état du système juste avant l'opération de mesure.

Le système étant totalement indéterminé avant cette opération, il est supposé que ce dernier est constitué par la superposition de tous les états possibles, la mesure réduira cette situation en un seul état.

Aristote avait établi un principe dit du [tiers exclus](#) qui lui semblait être un dogme intangible, en effet une porte peut être soit ouverte soit fermée, il n'y a pas de possibilité « tierce ».

En physique quantique, ce principe est en apparence violé, en effet si l'on prend l'image de la porte, alors tant qu'on ne la regarde pas cette dernière est dans un état indéterminé, elle est en même temps ouverte et fermée !

Selon la notation dite « [bra-ket](#) », la fonction d'onde de la porte s'écrit :  $|\Psi(\text{porte})\rangle = |\text{porte ouverte}\rangle + |\text{porte fermée}\rangle$

Si l'on tourne la tête vers la porte ce qui revient à faire une observation ou une mesure si l'on préfère, alors elle se fige en un seul état : « ouverte » ou « fermée ».

*D'où une interprétation -qui continue à faire débat- en considérant que c'est l'action de prise de conscience d'une situation qui permet de fixer un système constitué d'états superposés à un état déterminé.*

### **Épisode #7 : selon Werner Heisenberg, il est impossible de prévoir en même temps la vitesse et la position**

En 1927, [Werner Heisenberg](#) énonce son fameux [principe d'indétermination](#) qui contribua à son tour largement au débat sur la [signification profonde](#) de la théorie quantique.

Nous avons vu plus haut que pour les paramètres pouvant prendre une valeur quelconque (continue) comme la position ou la vitesse, alors il faut raisonner sur une plage de valeurs possibles ou écart-type  $\sigma$  (sigma).

*Le principe d'indétermination d'Heisenberg indique que pour les paramètres vitesse (v) et position (x) d'une particule, la précision avec laquelle on peut connaître simultanément ces deux paramètres est proportionnelle à la masse de la particule ( $\sigma_x \cdot \sigma_v = \hbar/m$ ).*

Puisque les masses des particules élémentaires sont très faibles, cela signifie par exemple que si l'on connaît la vitesse avec précision (+- 0.0001 m/s) alors on perd la précision sur la position (+- 1 km).

Ce principe correspond à une propriété physique, il n'est pas inhérent aux imprécisions de mesures.

Pour un objet macroscopique, sa masse étant très élevée alors la précision sur les deux paramètres peut être très grande, ce qui montre la compatibilité de ce principe avec la physique classique à notre échelle.

Terminons en précisant que ce principe est vrai également pour d'autres couples de paramètres que la vitesse et la position (Ex : énergie/temps).

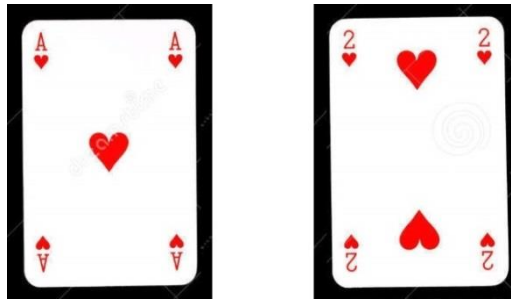
### **Épisode #8 : Principe d'exclusion de (Wolfgang) Pauli, le mystère du « spin »**

Pour comprendre le principe d'exclusion de Pauli, il faut évoquer la notion de [spin](#) qui est l'un des paramètres quantique les plus étranges ([Wiki](#)). Il fut introduit par [Wolfgang Pauli](#) en 1924 dans les équations pour modéliser un comportement inexplicable de l'électron ([effet Zeeman](#)).

Chaque particule quantique possède donc un spin qui conditionnera le comportement de cette dernière. Ce paramètre est très difficile à interpréter car il ne possède pas d'équivalent en physique classique. Cependant pour se faire une idée approximative, on peut le comparer à une sorte de moment cinétique via une rotation de la particule sur elle-même selon une certaine vitesse et selon une certaine direction. Puisque c'est un paramètre quantique, ce dernier est quantifié et il ne peut prendre qu'une valeur multiple de  $1/2$  et proportionnelle à la constante de Planck.

Une autre manière de représenter le spin consiste à le mettre en relation avec la notion de symétrie. La valeur du spin sera liée aux caractéristiques de symétrie spatiale de la particule considérée comme fraction d'un tour complet en rotation.

Par exemple, un as de cœur possède un spin de 1 car il faut un tour complet de la carte pour la retrouver dans le même état, le 2 de cœur quand à lui ne requiert qu'un demi tour, son spin sera donc de  $1/2$ .



Là où cela se corse c'est qu'il existe des particules de spin 2 comme l'hypothétique graviton, ce qui signifie qu'il lui faut 2 tours pour se retrouver dans le même état. Le boson de Higgs quant à lui est de spin 0, ce qui pourrait évoquer pour ce dernier la topologie d'une sphère.

Le [modèle standard de la physique des particules](#) [3] classe alors ces dernières en deux grandes catégories selon leur valeur de spin avec des propriétés très différentes.

Les particules de spin entier ou nul sont appelées bosons et celles ayant un spin demi-entier ( $1/2, 3/2, 5/2\dots$ ) sont nommées fermions.

Et nous en arrivons enfin au principe d'exclusion de Pauli qui indique que deux fermions ne peuvent posséder simultanément les mêmes paramètres quantiques, en particulier pour leur position spatiale. Ce principe permet d'expliquer parfaitement la répartition des électrons en couche autour du noyau ainsi que toutes les règles sur la construction des atomes de tous les éléments possibles de la nature ([tableau de Mendeleïev](#)).

Plus trivialement, ce principe explique que puisque deux fermions (en gros « de la matière ») ne peuvent occuper la même position physique, alors si l'on s'assoit sur une chaise on ne passera pas au travers à cause d'interactions fortement répulsives entre les électrons des atomes !

A l'inverse, les bosons peuvent sans problème occuper un même point de l'espace, cela est illustré par le laser qui concentre une grande énergie en un seul point. Par ailleurs, ce sont des bosons qui servent de liants aux protons et neutrons constituant les noyaux atomiques.

Notons enfin que le photon sans masse qui est le boson de l'interaction électromagnétique possède l'équivalent du spin appelé polarisation, cette dernière peut prendre deux valeurs :  $+1$  ou  $-1$ , l'électron quand à lui est un fermion avec également deux valeurs de spin possible :  $+1/2$  ou  $-1/2$ .

Une vidéo sur le spin [ici](#).

### ***Épisode #9 : Intrication quantique, la distance n'a aucune influence***

L'intrication est un autre phénomène particulièrement contre-intuitif. Si deux particules (P1 et P2) ont été en interaction comme par exemple si elles sont issues de la désintégration d'une autre particule, alors ces dernières seront liées quelle que soit la distance qui les séparent, elles sont dites intriquées.

La mesure d'un état quantique sur l'une va certes obéir au calcul probabiliste avec les états superposés, cependant dès que l'on aura le résultat de la mesure de P1 alors on connaîtra à coup sûr la valeur du même paramètre sur la particule P2. Si les particules n'étaient pas intriquées, alors les valeurs de P1 et P2 seraient indépendantes.

Prenons un exemple basé sur des photons, nous avons vu que le spin appelé polarisation pour ces particules peut être +1 ou -1. Pour deux photons quelconques, si l'on mesure la polarisation de l'un d'eux à 1, alors celle du second pourra être 1 ou -1. Si les [deux photons sont intriqués](#), alors leur valeur de spin sera systématiquement inversée. Par exemple une mesure du spin à 1 sur le premier impliquera dans 100% des cas une mesure du spin à -1 pour le second.

Comment le photon mesuré peut-il communiquer instantanément avec l'autre sachant qu'aucun signal ne peut dépasser la vitesse de la lumière ?

### *Épisode #10 : Effet tunnel, une particule peut passer à travers un mur !*

L'[effet tunnel](#) consiste en la possibilité pour une particule de traverser ce que l'on appelle une barrière de potentiel même si l'énergie de cette particule est inférieure à ladite barrière, la probabilité de traverser se calcule à l'aide de la fonction d'onde de la particule. En termes plus clairs cela signifie qu'une particule peut comme par magie « passer au travers » une sorte de mur *sans briser ce dernier*.

La [radioactivité alpha](#) de l'[Uranium 238](#) est un bon exemple d'effet tunnel. Le noyau U238 est constitué de 92 protons et 146 neutrons ( $92+146=238$ ), à chaque composant de ce noyau est associée une fonction d'onde  $\Psi$  qui indique une probabilité de présence forte dans le noyau mais également faible à l'extérieur du noyau. On constate alors que des morceaux du noyau peuvent se retrouver spontanément éjectés à l'extérieur, ces morceaux sont constitués de 2 protons et 2 neutrons « collés », soit des [noyaux d'hélium](#) (4He). L'atome U238 sera alors transformé en [thorium 234](#) constitué de 90 protons et 144 neutrons.

L'effet tunnel est très utilisé en électronique comme par exemple dans les transistors, composants de base des puces des ordinateurs. Il a également permis la technologie des disques SSD et autres clés USB où l'on fait entrer ou sortir par effet tunnel des électrons dans une cavité isolante (électrons présents  $\rightarrow$  bit = 1, électrons absents  $\rightarrow$  bit = 0).

Après cette présentation assez complète de la théorie quantique en une série d'épisodes, nous pouvons synthétiser tout cela en une dizaine de lignes.

## **La physique quantique en 10 lignes**

A la fin du 19<sup>e</sup> siècle, les physiciens croyaient à la fin de l'histoire avec la théorie de Newton basée sur des particules matérielles possédant une masse et l'électromagnétisme qui modélisait la lumière sous la forme d'ondes énergétiques pures. Deux problèmes en apparence mineurs ont induit l'élaboration d'une nouvelle théorie dite quantique complètement différente des précédentes avec des particularités très surprenantes. Selon cette dernière, la lumière n'est plus seulement ondulatoire mais également particulaire, soit une nature duale. Ces particules de lumière ou quantas appelées photons présentent la caractéristique de pouvoir occuper un même point de l'espace. Les photons font partie de la famille des bosons qui servent de « colle » pour lier les particules de matière.

La dualité de la lumière fut étendue aux particules massiques de matière appelées fermions qui présentent également un comportement ondulatoire, il leur est cependant interdit d'occuper un même point de l'espace. Une propriété étrange des particules de matière est l'effet tunnel qui leur permet parfois de traverser une barrière sans la briser.

Ces concepts ont été modélisés mathématiquement avec la fonction d'onde  $\psi$  qui a permis de prédire des résultats de mesures sous la forme de probabilités comme pour la météo signifiant ainsi la fin du déterminisme en microphysique.

Avant toute mesure ou interaction c'est à dire tant qu'on ne regarde pas, on considère qu'un système est constitué par la superposition de toutes les valeurs de mesures possibles et selon l'ordre dans lequel on effectue les mesures, les résultats seront différents.

Des particules ayant interagissent ensemble sont dites intriquées, elles seront irrémédiablement et instantanément liées quelle que soit la distance qui les séparent.

L'interprétation de tous ces concepts continue de [faire débat](#).

# Conclusion

Depuis des milliers d'années, il a été considéré comme évident que la matière était l'un des composants fondamentaux de l'Univers. Cependant, avec la science moderne qui a fait des pas de géants vers la connaissance du monde en profondeur, on s'est aperçus que plus on cherche la matière, moins on la trouve. Il serait sans doute temps de revenir en arrière sur des croyances bien ancrées et de réfléchir à un changement majeur de paradigme en se posant les bonnes questions.

En effet, de quoi sommes-nous vraiment certains dans notre expérience quotidienne ?

La réponse est dans la question, la conscience est le seul élément de réalité dont l'existence ne peut être remise en question. Et donc si les matérialistes pensent que la conscience est une propriété émergente de la matière et que cette dernière ne semble correspondre à aucune réalité ontologique, ne serait il pas temps d'envisager une inversion de la cause et de l'effet [6] ?

## Références

[1] « Helgoland » – Carlo Rovelli – 2021

[2] « L'Ordre du Temps » – Carlo Rovelli – 2017

[3] [Le Modèle standard de la physique](#) (Sur ce site)

[4] Cours de physique en E-Learning (Chaine Youtube [ici](#)).

[5] « [On evidence for negative energies and masses in the Dirac equation through a unitary time-reversal operator](#) » – Journal Of Physics 2018 (Deberg, Petit, D'Agostini)

[6] « Physique quantique – L'esprit de la matière » – Vahé Zartarian ([son site](#)) – 2014

URL de l'article :

<https://zevengeur.wordpress.com/2022/04/03/la-physique-quantique-pour-les-nuls-en-10-episodes/>