

6. Introduction au concept du « rien »

Qu'est-ce que rien ?

« Rien ne se compare à rien. Rien, c'est de là que tout se crée.

On ne le voit pas, mais rien est partout. Rien, c'est toujours un bon début.

On peut vivre de rien ou ne croire en rien.

Rien pour rien.

Rien, c'est souvent ce que nous faisons de mieux. Ne rien dire veut souvent tout dire.

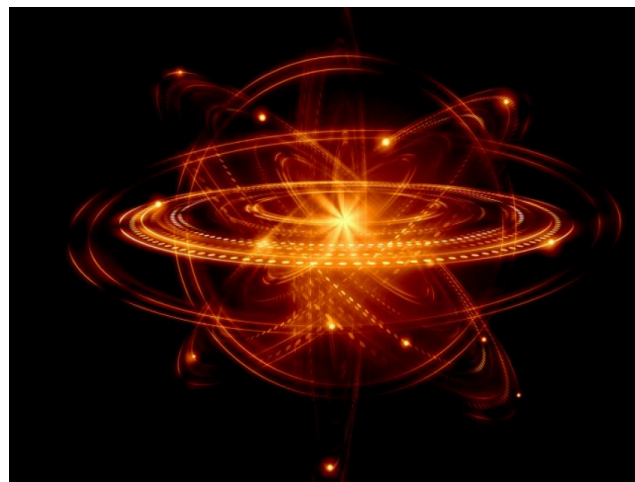
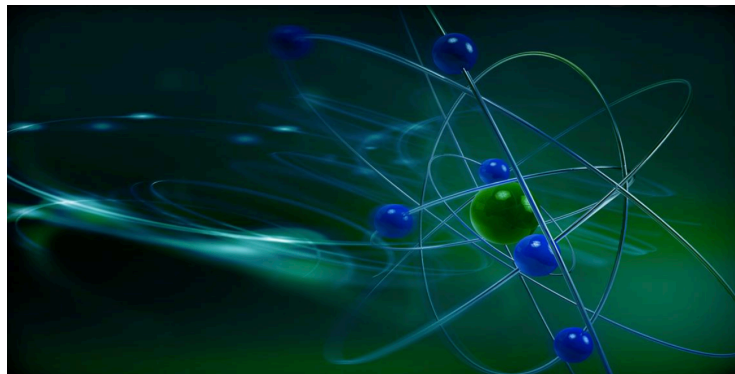
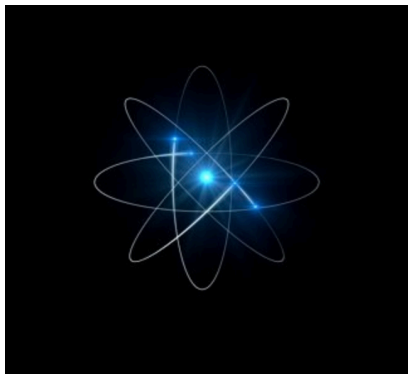
Rien, c'est quelque chose, c'est même la meilleure chose qui puisse nous arriver ! »

Si l'on y pense, « rien » est une question extrêmement difficile parce que, où que l'on regarde autour de soi, il semble toujours y avoir quelque chose. Le simple fait d'essayer d'imaginer le véritable néant semble être une tâche impossible.

On pourrait se demander pourquoi ceci est important dans notre quotidien ? N'est-ce pas plutôt une question philosophique ?

Le problème est que ce qui compose pratiquement la totalité de l'univers, c'est le vide.

Même les atomes qui constituent notre corps ou le monde physique autour de nous sont essentiellement faits d'espace vide. Toute la matière est constituée d'atomes, les plus petits composants de la matière. Or même un atome, c'est un peu de matière et beaucoup de vide.



https://www.youtube.com/watch?v=WXg1qAw-r_o

A quoi ressemble vraiment un atome ? (19 minutes)

Il en est de même de l'univers : beaucoup de vide et un peu de matière.



Comment avons-nous commencé à comprendre ce que l'on nomme : le rien, le vide ou le néant ? Pendant presque 2 000 ans, notre compréhension de l'espace vide a été définie par un homme, le philosophe grec Aristote. Pour lui, le concept du néant était profondément perturbant, cela semblait présenter toutes sortes de problèmes et de paradoxes. Il en est venu à croire que la nature combattrait éternellement le véritable néant. Selon lui, « la nature a horreur du vide ». Ses paroles sont restées vraies pendant de nombreux siècles parce qu'après lui, ceux qui ont voulu démontrer l'inverse n'ont pas eu la tâche facile. Il semblait en effet que la nature faisait son possible pour les décourager.

Ce mystère du néant peut être expliqué dans une simple paille.

Si j'aspire l'air par le haut d'une paille, de l'air se précipite à l'intérieur pour remplir l'espace laissé vacant. Et plus bizarre encore, si je bouche le bas de la paille et que j'aspire, les parois de la paille se collent l'une à l'autre. C'est comme si l'univers ne m'autorisait pas à créer du néant. Et voici qui est encore plus étrange. Si j'aspire une gorgée et que je pince le haut de la paille, on dirait alors que la nature veut tellement arrêter la possibilité du vide que même la loi de la gravité est suspendue. Le liquide reste dans la paille.

Il n'est donc pas difficile de comprendre pourquoi les gens ont cru qu'il était impossible de faire réellement de l'espace vide.

Mais il existe une explication très simple au comportement de la paille. Une raison qui est apparue tel un choc profond à ceux qui l'ont découverte.

Au XVII^e siècle, un jésuite italien Torricelli allait pour la première fois capturer de l'espace qu'il croyait vide. Avec un tube rempli de mercure et un doigt fermement enfoncé à l'extrémité, le tube est retourné et placé dans un bain de mercure. Relâché, on peut voir le mercure descendre. Puis avant de se vider, il stoppe. On est parti d'un tube rempli de mercure et on l'a simplement laissé se vider. Mais il ne s'est pas entièrement vidé. Arrivé à un certain niveau, il s'arrête. La paille semble donc à moitié vide. Ainsi Torricelli a d'abord cru avoir prouvé que l'on peut faire le vide.

Mais en fait, il avait démontré que le vide n'est pas vide, c'est de l'atmosphère et elle a un poids particulier. Le niveau est, bien sûr, déterminé par le poids du mercure d'un côté et celui de l'air de l'autre côté. Le tube s'équilibre comme une échelle.

Il avait trouvé un moyen de peser l'atmosphère, ce qu'il a compris. Il écrira cette phrase fantastique : « Nous vivons submergés au fond d'un océan d'air »

Tout à coup, l'air était vraiment une substance en révélant que l'air a un poids et qu'elle exerce constamment une pression sur nous en remplissant tout l'espace qu'elle peut.

Torricelli a réussi à créer un espace vide mais plein !

Ensuite le véritable mystère fut : qu'y a-t-il dans cet air ?

Désormais il existait un type de néant que l'on pouvait examiner.

Ce fut le philosophe et scientifique Blaise Pascal qui développa et précisa le travail de Torricelli. Il découvrit des propriétés encore plus particulières. Il mit le tube de mercure en haut d'une tour

très haute et remarqua que le mercure descendait à un niveau plus bas qu'il ne l'avait fait au sol. Il semblait que la pression de l'air était moindre en hauteur. Les expériences de Pascal conduisirent à s'apercevoir que la Terre est enveloppée d'une atmosphère qui se réduit rapidement au fur et à mesure que l'on monte, pour finir par devenir l'étendue froide et silencieuse qu'est le vide de l'espace. Torricelli et Pascal s'étaient attaqués à une vérité profonde. Le néant est partout autour de la Terre. La nature n'a pas horreur du vide. Le vide est l'état de la nature par défaut. Alors, qu'était cet immense espace vide dans l'univers ? Les scientifiques devinrent extrêmement curieux. Qu'étaient exactement les attributs du vide de l'espace ?

Avec l'aide de technologies ingénieuses, les humains ont transcendé leurs sens physiques et ont trouvé des moyens de comprendre et sonder l'univers à la plus petite des échelles. Et aujourd'hui, les physiciens sont persuadés que le vide abrite les secrets les plus profonds de la nature. Il pourrait même expliquer la raison de notre existence. Avec le temps et de nouvelles techniques, l'étude de ses propriétés a mis en évidence des choses très étranges. Par exemple, placer une sonnette dans le vide rend celle-ci silencieuse. Parce qu'en l'absence d'air, il n'y avait plus rien pour transporter les ondes sonores. Plus intrigant encore, alors qu'on ne peut entendre la sonnette, on peut la voir bouger. Ceci signifie que la lumière voyage dans le vide. Mais comment est-ce possible ? Pour les scientifiques qui ont mené ces expériences sur le vide, une seule conclusion s'imposait. Le vide n'était pas vide en fin de compte. Tout comme l'air transporte les ondes sonores, ils se sont dits qu'il devait exister un médium transportant les ondes lumineuses. Et si cette substance existait dans nos vides sur Terre, elle existait aussi à l'extérieur, dans l'espace. Il semblait, une nouvelle fois, que le vide ne puisse exister dans la nature. Dans l'univers, tout paraissait reposer sur un médium invisible. Ce que les scientifiques ont appelé l'éther. Comment expliquer que l'essentiel de la masse de l'univers se dérobe à notre vue ? Avec le temps, il est devenu clair pour un grand nombre de raisons que la lumière est une sorte de vague mais dans quoi est-elle ? Les ondes sonores sont les ondes dans l'air. Les ondes lumineuses sont les ondes dans l'éther. La lumière est transportée par un fluide qui remplit tout l'espace. S'il y a un fluide qui remplit l'espace et si la lumière est une vague, ce n'est le vide nulle part puisque la lumière voyage partout. C'était évident que l'espace vide n'existait pas. Le problème étant que cet éther paraissait si subtil et si intangible qu'il échappait à toute tentative de le mesurer. Petit à petit une technique pour obtenir le vide s'est développée. Mais le terme vide signifiait dorénavant vide d'air. Cette technique est devenue monnaie courante, elle fut utilisée pour les ampoules, la télévision, les premiers ordinateurs. Cette technique servit aussi d'outil de recherche aux scientifiques du monde entier. Dans l'espace vide, les plus infimes composants de la nature peuvent désormais être étudiés sans interférence de l'air contaminé du monde extérieur. Ceci révolutionna la physique. Grâce au « vide », on découvrit les rayons X en 1895. L'année suivante, l'électron fut identifié pour la première fois. En 1909, on met à jour la structure de l'atome. Ce sera le début de la physique quantique.

Au grand drame d'Einstein lui-même, cette nouvelle physique a obligé à rompre ou en tout cas à dépasser l'einsteinisme c'est-à-dire d'arrêter pour comprendre le monde de s'appuyer uniquement sur les mathématiques.

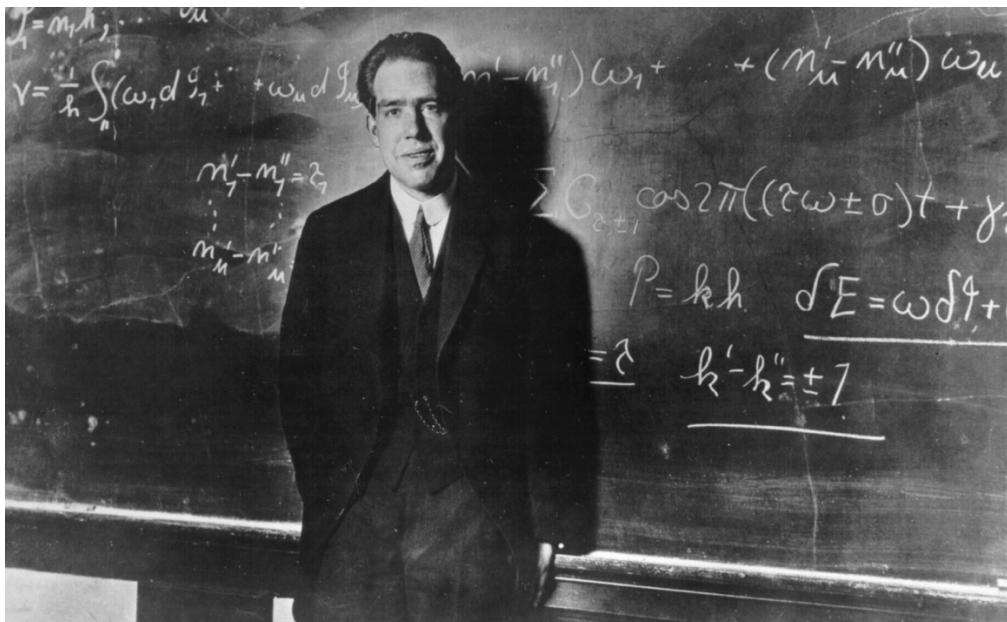
7. La physique quantique en 8 idées

Pour comprendre l'évolution du rien, il faut assimiler ce qu'est la physique quantique.

Dans le monde classique, il y a action et réaction, cause et effet, tout est sensible, certain et connaissable.

Mais le monde quantique s'est avéré très différent. Ce monde microscopique est un monde où on ne peut jamais être sûr de ce qui va arriver. Pas parce que les mesures ne sont pas assez précises, simplement parce qu'au niveau le plus fondamental, la nature elle-même est basée sur l'incertitude, sur l'indétermination. C'est un monde où, de toute évidence, il est impossible qu'il n'y ait rien dans le vide de par toutes ses interventions et prouesses.

Niels Bohr, physicien danois, prix Nobel de physique en 1922 et père de la physique quantique



Il était convaincu que la réponse à ce mystère se trouvait au cœur de la matière, dans la structure même de l'atome.

C'est cette certitude qui a initialement motivé le passage de la physique classique à une nouvelle physique dite quantique. C'est en poussant à l'extrême la physique classique, en descendant dans l'échelle des atomes et la structure des atomes qu'il y a eu une série d'indices montrant que quelque chose n'allait pas dans notre physique classique.

Et il faut l'avouer, la mécanique quantique est la meilleure théorie dont on dispose à l'heure actuelle pour comprendre et expliquer le comportement de la matière au niveau microscopique. Microscopique signifie : au niveau des atomes. Mais aussi tout ce qu'il y a de plus petit que les atomes, notamment toutes les particules comme les protons, les électrons, les photons, les gluons, les gravitons, les bosons,...

Il y a 8 grandes idées qui sont vraiment au cœur de la mécanique quantique et vous allez voir qu'elles sont toutes fortement contre-intuitives.

Elles nous montrent que le monde au niveau sous-microscopique fonctionne d'une manière bien différente de ce dont on a l'habitude à notre échelle.

Il faut pour rentrer dans ce monde-là, oublier tout ce que l'on sait parce que notre intelligence, nos intuitions, nos émotions par rapport au quotidien sont basées sur nos sens. Or, dans le très petit, nos sens n'ont pas accès. Les lois de la nature n'y sont pas les mêmes que celles auxquelles nous sommes habitués. C'est peut-être le chapitre le plus difficile à assimiler.

Si je vous demande de sauter jusqu'au plafond pour le toucher, vous me direz que ce n'est pas possible. Eh bien dans le très petit, on peut emprunter l'énergie qui est autour de nous pour faire tout ce qu'on veut. On peut faire des choses qui n'ont pas d'équivalent dans notre quotidien. La physique quantique, c'est d'abord une révolution dans la façon de décrire les objets physiques et surtout, même si on ne la comprend pas, elle a donné lieu à un nombre incroyable de découvertes et aussi à de multiples applications techniques. On ne comprend pas la physique quantique mais elle fonctionne dans toutes les technologies qui l'utilisent !

1. Le principe de superposition

C'est l'idée la plus importante, celle dont tout découle, c'est peut-être aussi la plus choquante. On l'appelle le principe de superposition.

Pour comprendre ce que c'est, on va commencer par considérer des objets qui sont macroscopiques.

Par exemple, une balle de tennis, la lune ou bien même un grain de sable qui voltige.

Tous ces objets sont trop gros pour obéir aux lois de la physique quantique.

On dit que ce sont des objets classiques.

Prenons une balle de tennis à un instant donné, elle a une certaine vitesse et elle se trouve dans une certaine position de l'espace.

On dit qu'elle est dans un état bien défini.

Eh bien au niveau quantique, ce n'est plus vrai c'est-à-dire que les **objets quantiques peuvent être dans plusieurs états à la fois.**

Un électron peut être à la fois, ici et là
ou bien aller, en même temps, à 1000km/s et à 2000km/s.

Un électron peut être dans deux états à la fois.

C'est bizarre, non?

Mais il va falloir vous y habituer parce que, dans le monde quantique, ça se passe comme ça.

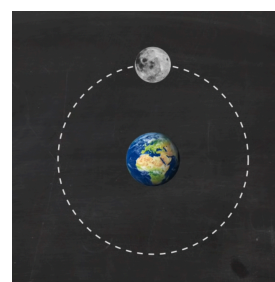
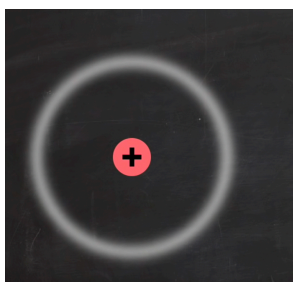
Les objets peuvent être dans plusieurs états à la fois, des états superposés et c'est pour cela qu'on appelle ça le principe de superposition.

Et on n'est pas du tout obligé de se limiter à superposer deux états, on peut en superposer 3, 4, 5 et même une infinité.

Un exemple classique, c'est l'électron tournant autour d'**UN proton** dans l'atome d'hydrogène, il **est sur tous les points de son orbite à la fois !**

Cela contraste avec ce qu'on a l'habitude de voir au niveau macroscopique, par exemple, la lune est sur un point de son orbite et pas sur tous les points en même temps :

Un proton sur tous les points de son orbite en même temps La lune sur un point de son orbite



Voilà l'idée centrale de la mécanique quantique : le principe de superposition.

Des conséquences bizarres en découlent :

2. L'indéterminisme de la mesure

La première conséquence est ce qui se passe quand on essaye de mesurer les objets quantiques. Reprenons un objet classique, une balle de tennis.

Si je la lance, je peux mesurer sa vitesse. C'est possible en utilisant une espèce de radar que l'on trouve parfois sur les courts de tennis, dans les tournois.

Maintenant, prenons notre électron qui va à la fois à 1000km/s et à 2000km/s et imaginons ce qui se passe si on le fait passer dans une sorte de radar à électrons.

Est-ce qu'on va trouver 1000, est-ce qu'on va trouver 2000, est-ce qu'on va trouver la moyenne des deux, 1500 ?

Et bien en fait, rien de tout cela exactement.

On va avoir une chance sur deux de trouver 1000 et une chance sur deux de trouver 2000.

En mécanique quantique quand on a des états superposés, les résultats des mesures dépendent en partie du hasard, on dit qu'il y a un indéterminisme.

C'est-à-dire que si je refais 100 fois la même expérience avec un électron exactement dans le même état, je vais trouver 1000, un certain nombre de fois, mais aussi 2000.

Cette situation est évidemment totalement différente de ce qui se passe avec les objets normaux comme les balles de tennis.

Si vous mesurez 100 fois la même balle de tennis lancée exactement de la même manière, vous allez trouver cent fois à peu près la même vitesse.

Ce qu'il faut comprendre c'est que ce **hasard quantique** est vraiment intrinsèque, fondamental. Il n'y a aucun moyen de savoir à l'avance quel va être le résultat de la mesure.

Vous savez peut-être que cette idée de hasard quantique choquait beaucoup Einstein qui n'était pas du tout d'accord avec ça et qui, un jour, avait lancé à Niels Bohr, le père de la physique quantique : « Dieu ne joue pas aux dés ! »

Ce à quoi Bohr avait malicieusement répondu : « Mais qui êtes-vous pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? »

On a pris l'exemple de la vitesse d'un électron mais c'est vrai pour toutes les propriétés des particules au niveau quantique.

Si on essayait de mesurer la position, l'énergie ou la rotation d'une particule, cela se produirait aussi.

En mécanique quantique, c'est intrinsèque, les résultats des mesures dépendent toujours en partie du hasard.

3. La réduction des états quantiques

Continuons avec les conséquences un peu étranges du principe de superposition sur la mesure.

On va reprendre notre électron qui va à la fois à 1000km/s et à 2000km/s.

On imagine qu'on le fait passer dans un radar et imaginons qu'on trouve 1000.

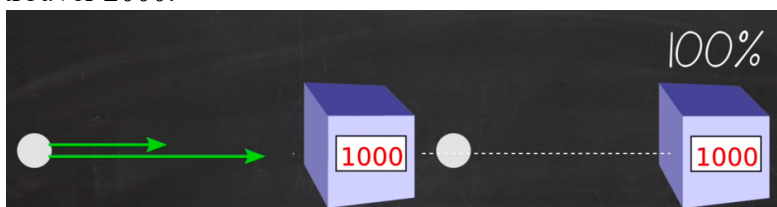
Maintenant, supposez que juste derrière, je refasse passer cet électron dans un deuxième radar.

A votre avis, qu'est-ce que je vais trouver ?

Est-ce que je vais trouver à nouveau 1000 ou 2000 à une chance sur deux ?

Et bien non, en fait je vais trouver exactement la même chose que ce que j'avais dans la première mesure.

Si j'avais trouvé 1000, je vais toujours trouver 1000, si j'avais trouvé 2000, je vais toujours trouver 2000.



A la deuxième mesure, il n'y a plus d'indéterminisme.

C'est comme si la première mesure avait forcé l'électron à choisir son camp et à décider quelle vitesse il allait vraiment prendre.

La manière dont on l'interprète, c'est qu'on dit qu'avant la première mesure, l'électron est dans son état superposé (1000 et 2000) et que la première mesure le force à aller dans un état qu'il gardera.

Donc dans ce cas-là, il sera ensuite uniquement dans l'état 1000.

Et si on essaye de le remesurer avec un deuxième radar, on trouvera 1000 à tous les coups.

On dit que l'électron n'est plus dans un état superposé, on dit que son état a été projeté ou réduit.

Ce qui est bizarre dans cette histoire, c'est que le fait de mesurer la vitesse de l'électron a, en fait, considérablement affecté son état et c'est quelque chose de très général en mécanique quantique.

On ne peut pas mesurer les états des objets quantiques sans les perturber fondamentalement.

4. La dualité onde-corpuscule

Nous allons nous intéresser à ce que les physiciens considèrent comme la plus belle expérience de toute la physique. Il s'agit d'une expérience spectaculaire, emblématique de la mécanique quantique.

A la fin du XVII^e siècle, les physiciens s'affrontaient pour comprendre la nature profonde de la lumière. Certains étaient persuadés que la lumière était faite de particules tandis que d'autres étaient convaincus que la lumière était une onde.

Presque un siècle plus tard, une expérience mit fin au débat.

Une expérience faisant intervenir une double fente.

On va commencer par des choses simples.

Imaginez une planche de bois dans laquelle on a percé deux fentes de quelques centimètres et derrière laquelle se trouve un mur.

Et supposez que vous tiriez sur la planche avec une mitraillette.

Un certain nombre des balles se retrouve arrêté par la planche tandis que le reste passe par les fentes, et va se loger dans le mur.

Et sur ce mur, l'impact de l'ensemble des balles forme deux taches allongées côte à côte qui reproduisent à peu près la forme des fentes. Normal !



Imaginons que l'on fasse la même expérience, non pas avec des balles de mitraillette, mais avec des ondes.

Autour de nous, il existe plein d'ondes : les ondes radios, les ondes sonores, les micro-ondes... Mais elles ne sont pas forcément simples à se représenter.

On va donc prendre un autre type d'onde que tout le monde connaît : les vagues.

Imaginez une série de vagues qui se propagent à la surface de l'eau.

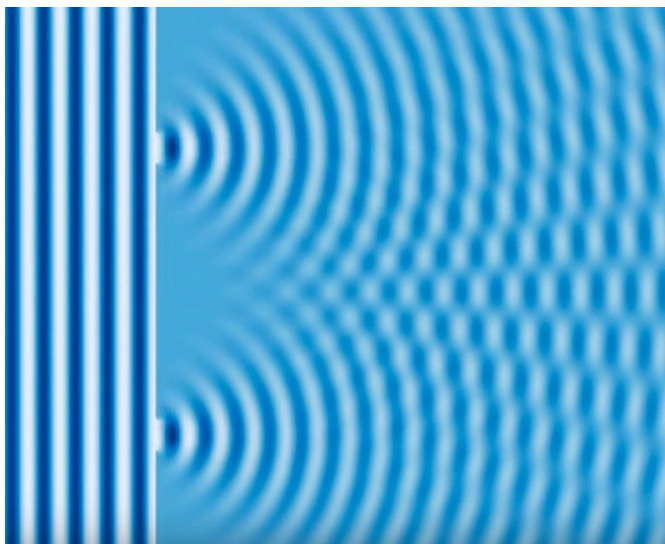
Une simulation numérique permet de calculer la propagation des vagues :
quand c'est sombre c'est un creux de la vague et quand c'est clair c'est un sommet.



Qu'est ce qui se passe si je balance une onde d'eau de ce genre à travers une fente

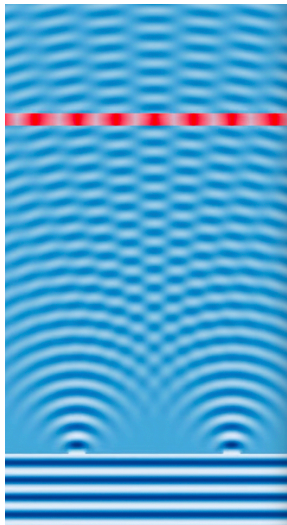


On constate que derrière la fente, l'onde devient circulaire.
Refaisons la même expérience, mais cette fois avec 2 fentes.

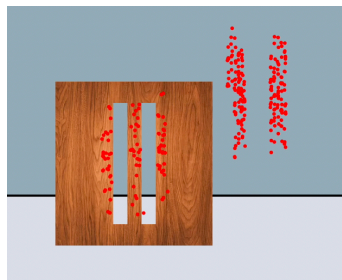


Comme on pouvait s'y attendre, on observe deux ondes circulaires qui émergent de chacune des fentes et, dans la zone où les ondes se rencontrent, les deux ondes s'ajoutent. Les deux sommets se cumulent et forment un sommet plus élevé, et inversement, juste après les deux creux, ils coïncident, et ainsi de suite. Globalement, en ce point, on a des vagues dont l'amplitude est doublée ou annulée.

Si on s'amuse à tracer l'amplitude (la hauteur) des vagues en fonction de la position, ici on a une oscillation de ce genre :



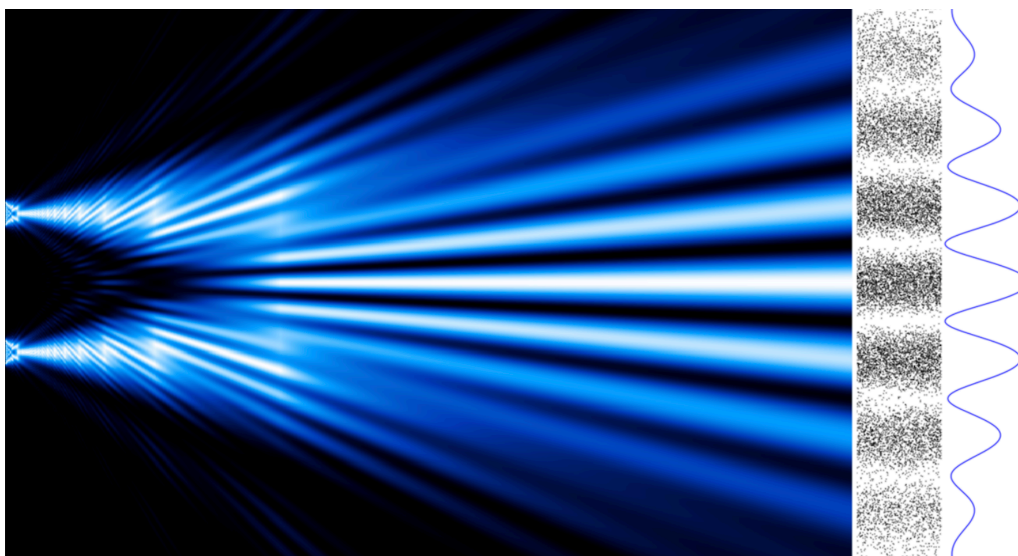
Cette figure d'**interférences** (en rouge) qu'on obtient, quand une onde rencontre une double fente, est donc très différente de ce qu'on avait avec des balles de mitraillette où on avait deux zones bien localisées.

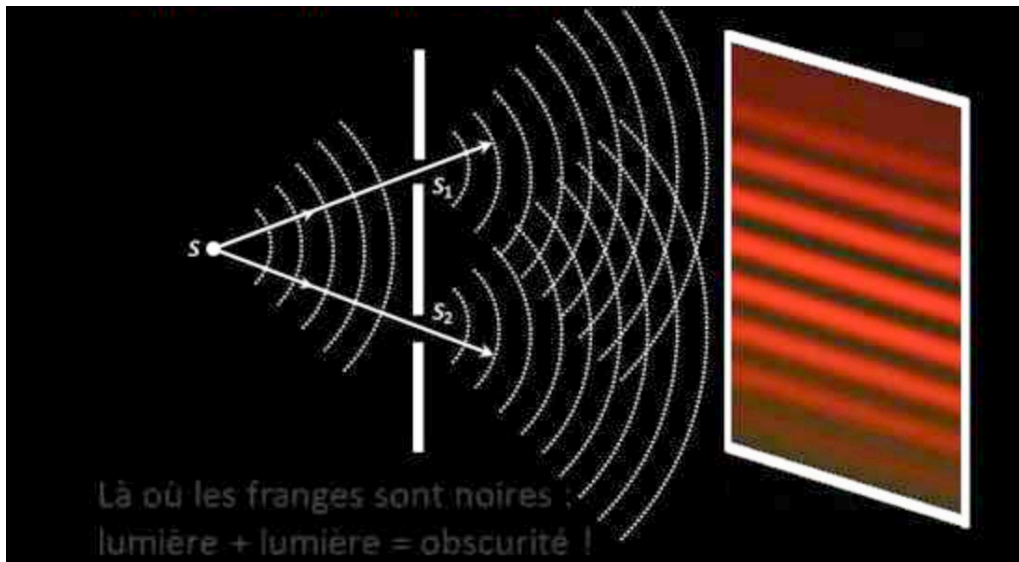


Et la figure d'interférences est bien un phénomène typique des ondes.
Revenons au débat sur la nature de la lumière "onde ou particule ?"

En 1801, Thomas Young s'y intéresse et il se demande ce qui se passerait si l'on faisait aussi passer de la **lumière** par une double fente.

Il a donc fait la même expérience avec la lumière du soleil et il obtient de belles interférences.





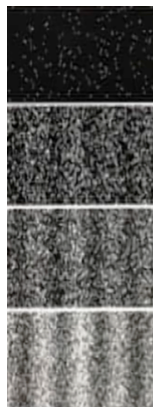
Young conclut donc que la lumière est une onde.

Maintenant rentrons dans le vif du sujet : à votre avis, qu'est ce qui se passe si on fait l'expérience de la double fente avec des électrons, aux lieux des balles de mitraille ? De nos jours, nous sommes capables de la faire.

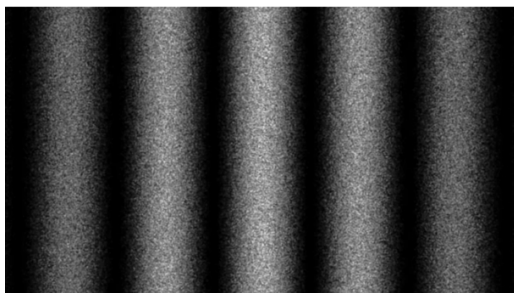
Pour bien tester, mieux le comprendre, on peut faire une chose : envoyer les électrons un par un, de telle sorte qu'un électron ait le temps d'arriver sur l'écran avant que le suivant soit émis.

Et là il se passe une chose bizarre : si on tire les électrons 1 par 1, on constate effectivement que chacun provoque une tâche lumineuse sur l'écran.

Vous voyez que les particules se déposent sur la plaque photographique comme des points, ce qui laisse penser que ce sont des **particules**.



Mais à mesure que le temps passe et que l'on continue à lancer les électrons un par un, on voit peu à peu se construire une alternance de bandes claires et sombres, il se dessine des **franges d'interférences, donc ce sont des ondes**.



Comment expliquer cette sorte de dualité ?

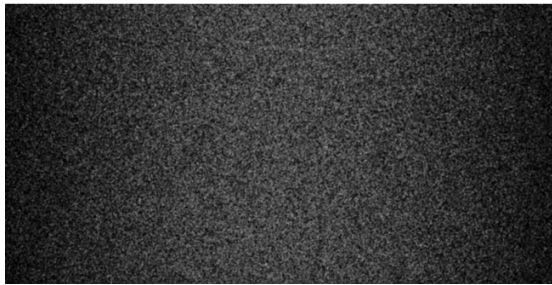
En lançant les électrons individuellement, on peut difficilement soutenir qu'ils s'influencent entre eux pour venir former des interférences.

Quels sont les électrons passés par la première fente et par la seconde.

Est-ce qu'à droite, ce sont les électrons passés par la fente de droite et à gauche par la fente de gauche ?

Pour ça, il y a une façon simple de procéder : il suffit de boucher alternativement une fente, puis l'autre, pour obtenir les deux parties de la figure.

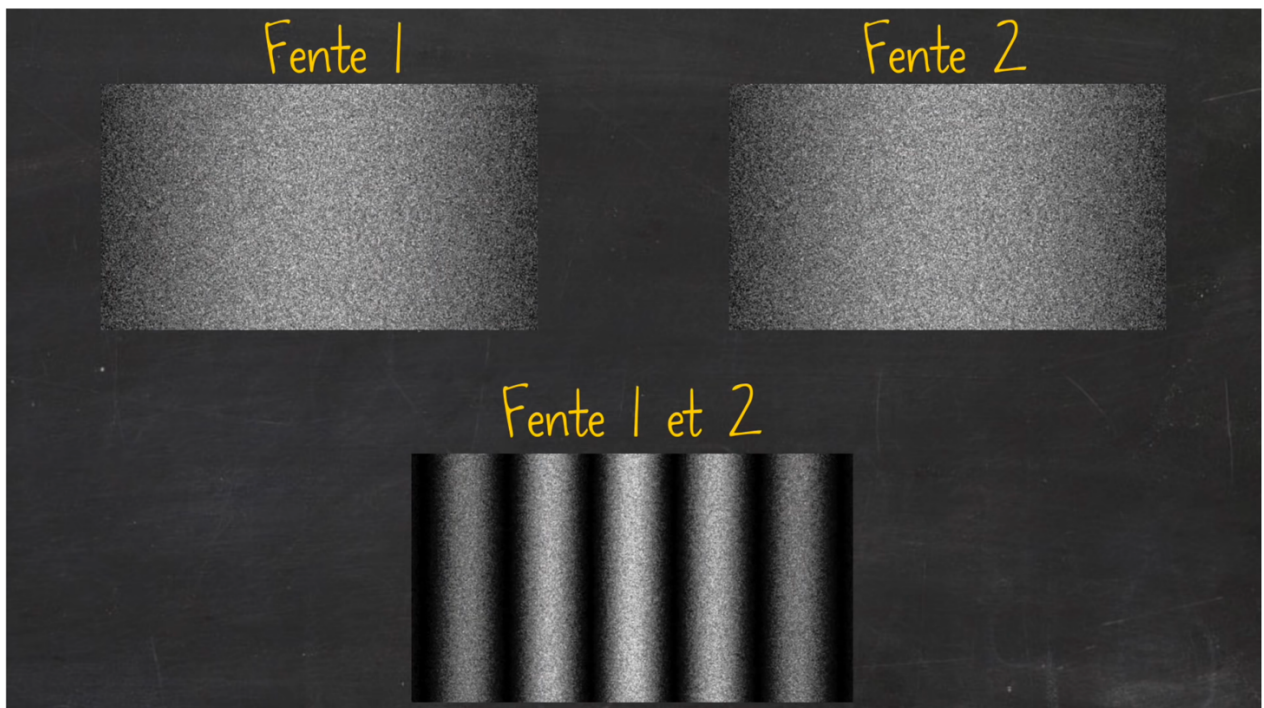
Si on n'ouvre qu'une seule des deux fentes, voilà le genre de figure qu'on obtient :



Pas d'interférence mais une seule tache assez étalée, donc particules !

Et pareil si c'est l'autre fente qu'on ouvre.

Mais avec les deux fentes ouvertes en même temps, on a un résultat complètement inattendu, la figure n'est pas égale à celle qu'on obtient en additionnant les deux figures obtenues avec une seule fente.



Pour comprendre à quel point ce résultat est anormal, revenons au cas de la mitraillette :

Quand on tire sur les deux fentes, chaque balle passe soit par une fente, soit par l'autre.

Quand une balle passe par la fente 1, que la fente 2 soit bouchée ou pas, ça ne change rien.

Et bien dans le cas des électrons, ce n'est pas pareil et cela semble indiquer que, quand un électron passe par la fente 1, son comportement va dépendre du fait que la fente 2 soit ouverte ou pas.

Et l'effet est vraiment critique puisqu'on a carrément des zones de l'image qui, quand on débouche la fente 2, vont devenir plus sombres, c'est-à-dire recevoir moins d'électrons que quand elle était fermée.

Je rappelle que les électrons arrivent 1 par 1 : cela veut dire que le point d'arrivée de chaque électron dépend de l'état des deux fentes.

Comment peut-on expliquer ça ?

On pourrait dire que quand un électron passe par une fente, il est influencé par l'état de l'autre fente.

Cela veut dire qu'il "sait" ou qu'il "sent" si elle est ouverte ou fermée !

Une façon encore plus imagée de se le représenter, c'est de dire carrément que quand les deux fentes sont ouvertes, les électrons passent tous par les deux fentes à la fois. Après tout, c'est ce que fait une onde.

Et c'est cela qui explique qu'on obtienne des interférences.

D'accord sauf qu'un électron, ce n'est pas une onde, c'est une particule !

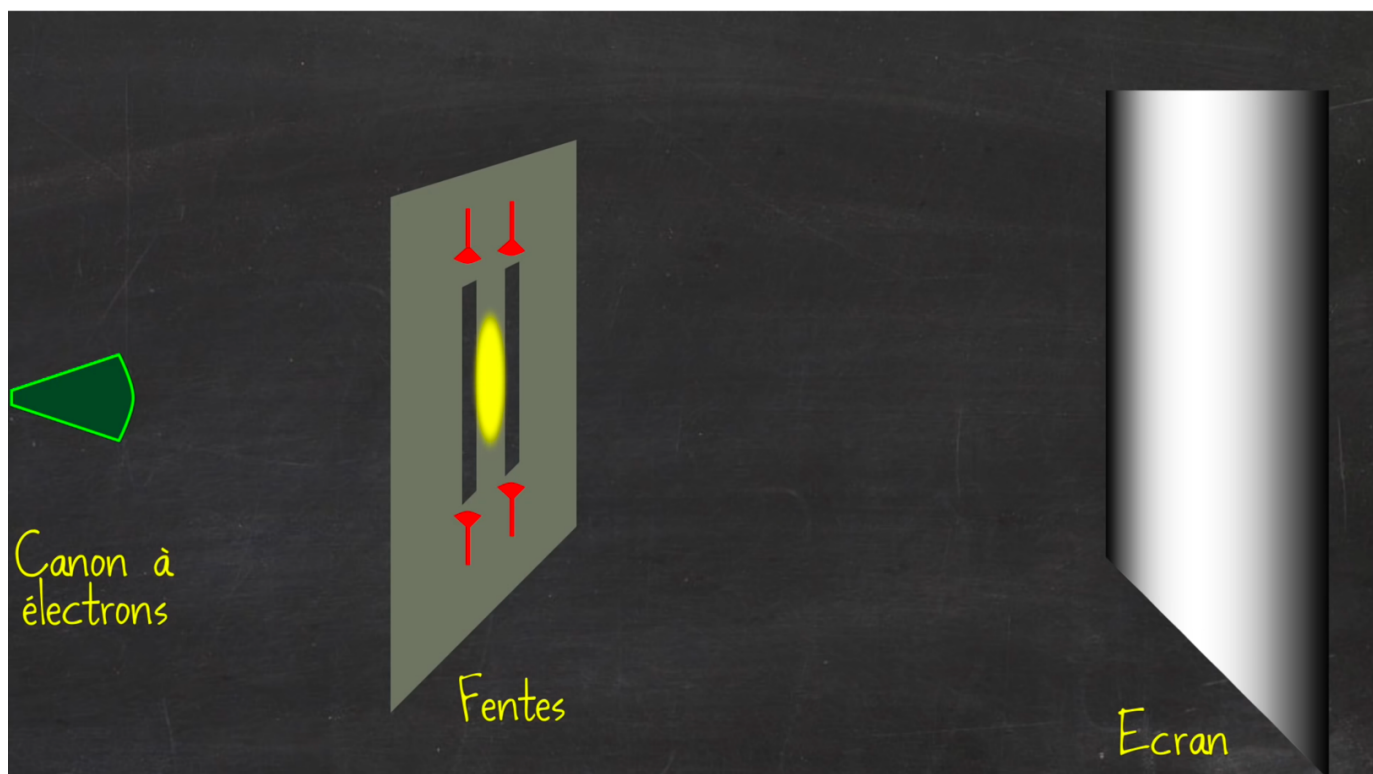
Et une particule qui passe par deux chemins à la fois, c'est quand même un peu difficile à avaler.

Pour lever le mystère, on peut peut-être laisser les deux fentes ouvertes, pour avoir des interférences et **placer un détecteur (Détecteurs en rouge ci-dessous)** qui permettent de savoir quand même par quelle fente est passé chaque électron.

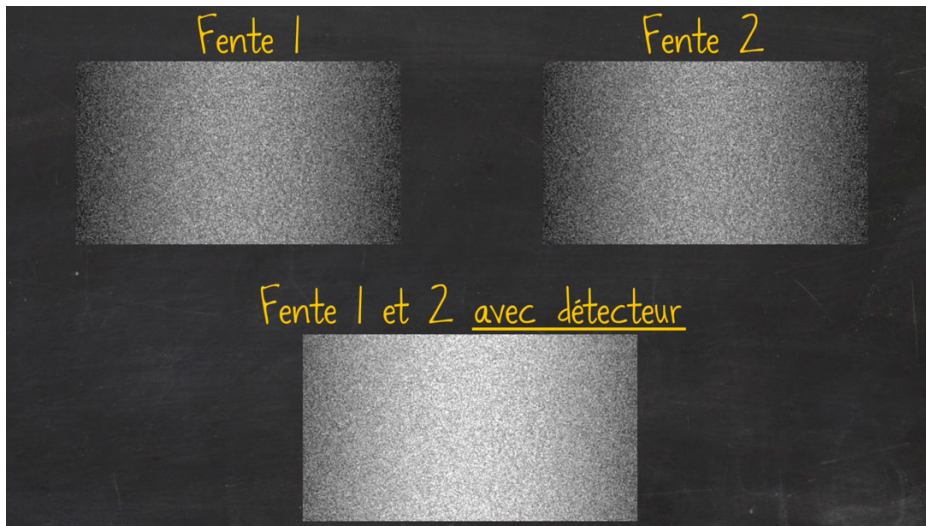
Eh bien si on ajoute effectivement un système de détection, nouvelle surprise :

la figure d'interférences disparaît !

On a bien les deux fentes ouvertes, mais on se retrouve seulement avec une grosse tâche grise !



Qui, en fait, est la somme des deux expériences quand on n'ouvre qu'une seule fente.



Conclusion : avec les détecteurs, on arrive effectivement à dire par quelle fente est passée chaque électron, mais du coup il n'y a plus d'interférences.

Il est impossible d'avoir à la fois les interférences et de savoir par quelle fente passe chaque électron. C'est l'un ou l'autre.

Donc non seulement les électrons semblent passer par les deux fentes à la fois, mais en plus, si on essaie de savoir par quelle fente ils passent effectivement, leurs comportements changent.

Ces expériences peuvent vous paraître un peu folles, et d'ailleurs c'est le cas, c'est pour ça qu'elles fascinent autant les physiciens.

Si on met un détecteur pour essayer de révéler sa trajectoire, on détruit les interférences, ce n'est plus une onde car on force l'électron à se localiser et à "devenir une particule" si vous voulez.

A ce moment-là, il "choisit" donc, un peu aléatoirement, la fente par laquelle il est passé.

C'est bizarre non ?

Cette expérience est vraiment fabuleuse car elle nous montre les ingrédients essentiels de la mécanique quantique.

La mécanique quantique est fondamentalement probabiliste.

Et cette dualité onde-corpuscule est aussi un vertige pour le cerveau :

La lumière est constituée de **particules**, appelées photons, qui sont des entités microscopiques. Tous les photons portent chacun une information.

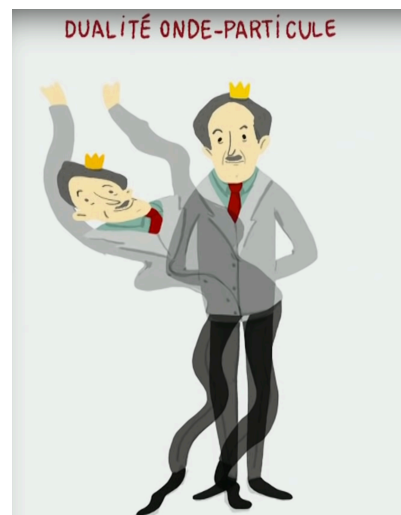


Mais la lumière se comporte aussi comme une **onde** qui se propage dans l'espace.



Cette expérience nous montre donc que **l'on ne peut pas observer certains phénomènes, comme par exemple la position d'une particule, sans perturber l'expérience de façon dramatique.**

J'espère que vous comprenez maintenant pourquoi cette version de l'expérience de la double fente est considérée comme la plus belle de toute la physique par beaucoup.

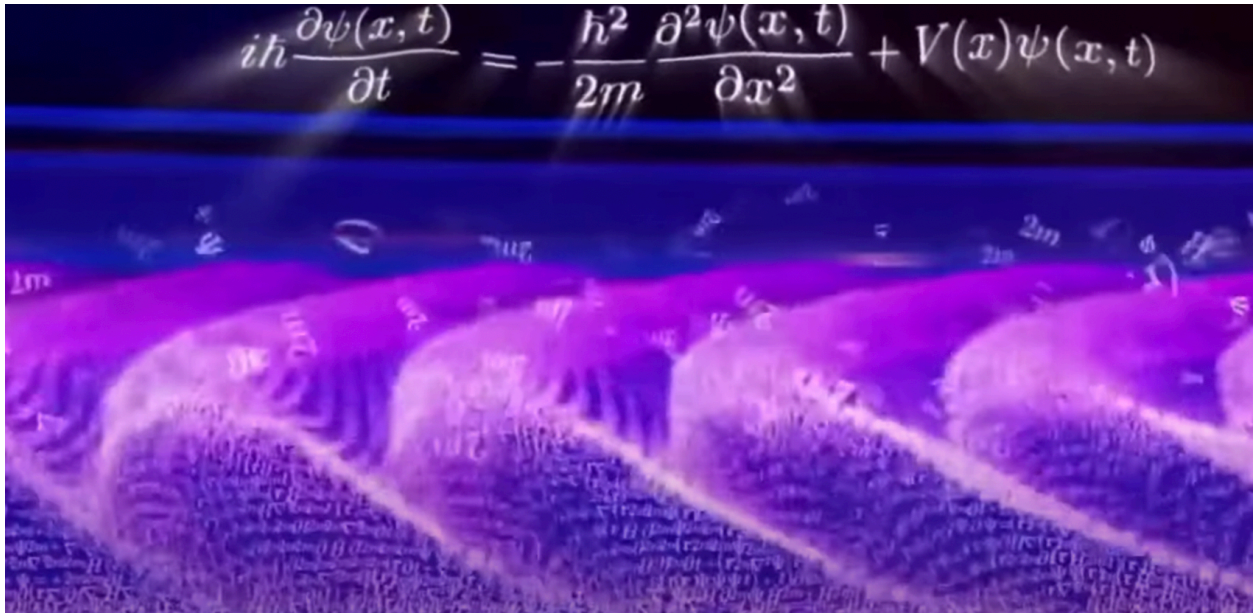


Comment expliquer cette dualité ?

Tout simplement en disant que les particules quantiques ne sont ni des ondes ni des corpuscules ni même un mélange des deux, elles sont autre chose ?

Il s'agirait d'une onde de probabilité.

Cela semble indiquer qu'une particule est une multitude de possibilités.



La mécanique quantique est la théorie la plus remarquable que les physiciens n'aient jamais découverte. Et pourtant, ils ne sont toujours pas d'accord sur sa signification et ce qu'elle nous apprend sur la nature de la réalité.

Ce n'est qu'au moment où l'on observe et à ce moment seulement, que l'incertitude concernant sa position est levée.

D'après la **théorie** de Bohr, l'action de mesurer une particule, contraint celle-ci à abandonner toutes les autres positions qu'elle aurait pu avoir, pour une position définie.

C'est l'acte de mesure qui force la particule à faire ce choix.

Niels Bohr a accepté la conclusion de cette théorie : la réalité est par nature floue.

Mais pas Einstein. Ce qui l'agaçait, c'est que dans ce cas, la réalité de l'univers dépend du fait qu'on la regarde. C'était bizarre.

Il dira : « J'aime à penser que la lune est là, même si je ne la regarde pas. »

Cette expérience n'a vraiment été réalisée sous cette forme-ci qu'en 1981 par Alain Aspect, un physicien français.

Le débat philosophique entre Einstein et Bohr fut ainsi définitivement tranché de par cette expérience en laboratoire. Bohr avait gagné.

Cela a produit un véritable choc puisque les expériences ont montré que c'était cette physique absurde, la physique quantique, qui se confirmait.

Cette action fantôme à distance existe bel et bien.

Ne demandez pas pourquoi, ni comment cela marche. C'est une question sans réponse.

Tout ce que l'on sait, en tout cas, c'est que le microcosme fonctionne comme ça

Un petit aphorisme paradoxal correspond à la situation quantique :

La théorie et la pratique, c'est exactement la même chose sauf qu'en pratique, ce n'est pas vrai !

5. L'effet tunnel

Il y a une autre conséquence très bizarre du comportement ondulatoire de la matière au niveau microscopique, c'est ce qu'on appelle l'effet tunnel.

Reprenons nos balles de tennis qu'on lance et imaginons qu'on les balance cette fois contre un mur sur lequel il n'y a pas de fenêtre.

Si je lance une balle, elle va rebondir et si j'en lance 10, 100 ou 1 million, elles vont toutes rebondir.

A votre avis, qu'est-ce qui se passe si on fait ça avec des électrons ?

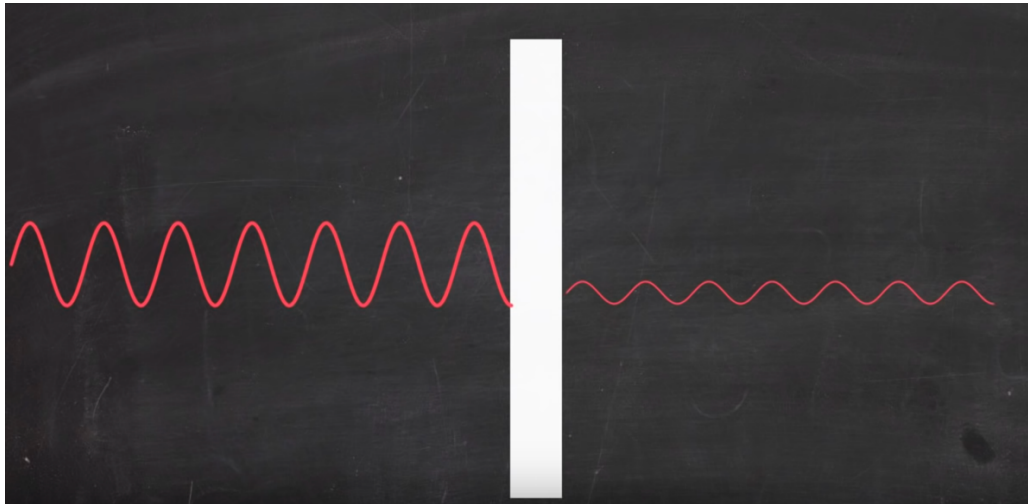
Il faut se souvenir qu'un électron, au niveau microscopique est décrit notamment par une onde.

Qu'est-ce qu'il se passe quand je balance une onde contre un obstacle ?

Vous pouvez penser par exemple aux ondes sonores. Imaginez, vous êtes chez vous, vous écoutez de la musique un peu forte, et vous avez un mur qui vous sépare de chez le voisin.

L'onde sonore qui arrive sur le mur, que va-elle faire ?

Elle va être en partie absorbée, en partie réfléchiée et il y en a toujours une toute petite partie qui va traverser le mur, qui va être transmise et donc votre voisin va entendre votre musique.

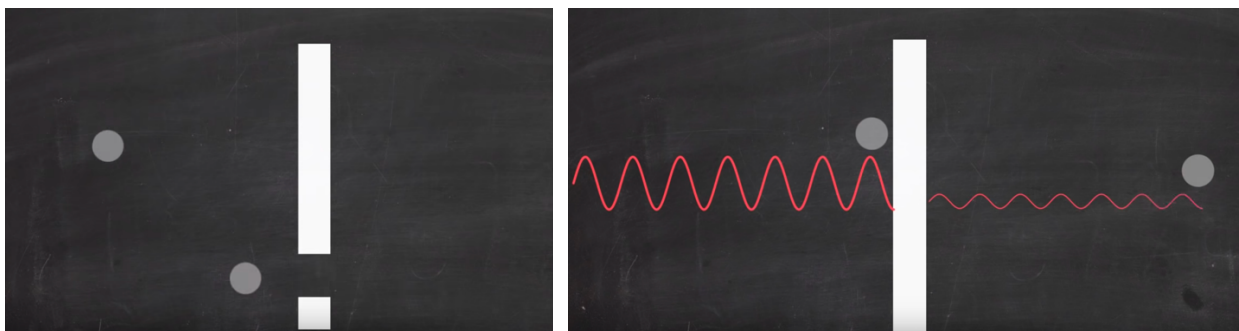


Ondes sonores

Maintenant, si on transpose cela avec l'onde qui décrit un électron que l'on lance contre un obstacle.

Cela veut dire qu'il y a une toute petite partie de l'onde qui va être transmise de l'autre côté et donc cela veut dire qu'il y a une petite probabilité que l'électron se retrouve de l'autre côté de l'obstacle.

Cette probabilité est généralement faible mais cela veut dire que si vous lancez un grand nombre d'électrons contre un obstacle, de temps en temps, tout se passe comme si, pour l'un de ces électrons, il y avait un petit tunnel qui s'ouvrait dans le mur et le laissait passer.



C'est pour cela qu'on appelle ce phénomène : l'effet tunnel.

Cet effet tunnel désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel, même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière. C'est un effet purement quantique qui ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique.



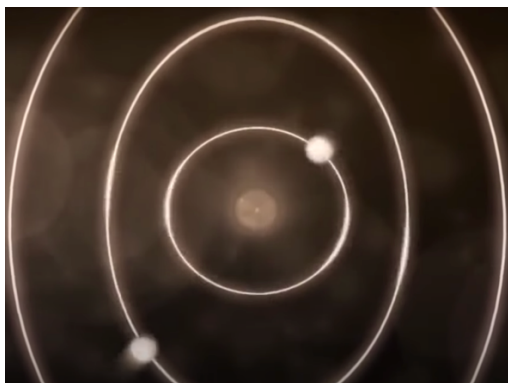
6. La quantification des propriétés physiques

Les particules quantiques ont quand même une restriction : certaines de leurs propriétés sont quantifiées.

Pourquoi la mécanique ou physique quantique s'appelle « quantique ».

Quantum signifie « combien », « quantité déterminée » en latin et le pluriel s'écrit quanta. Un quantum en physique quantique représente **la plus petite mesure indivisible** que ce soit celle de l'énergie, de la quantité de mouvement ou de la masse.

Dans la vision de Niels Bohr, l'atome ressemblait à un mini système solaire avec des particules, les électrons, tournant autour d'un noyau, un peu comme les planètes tournent autour du soleil.



Atome



Système solaire

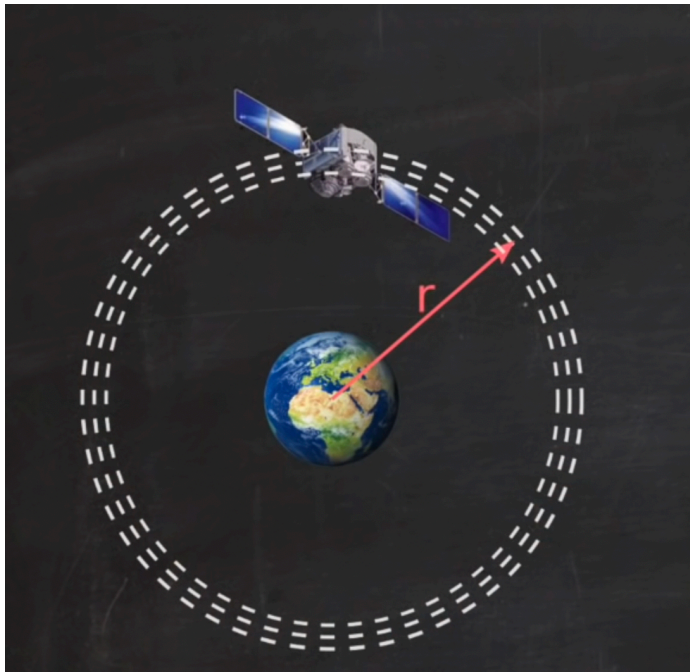
Mais selon lui, à la différence du système solaire, les électrons ne peuvent pas se trouver sur n'importe quelle orbite.

Pour comprendre, nous retournons à nouveau à l'exemple d'un objet classique.

Considérons un satellite en orbite autour de la Terre, il est sur une certaine orbite, on peut mesurer le rayon entre le centre de la Terre et l'orbite du satellite.

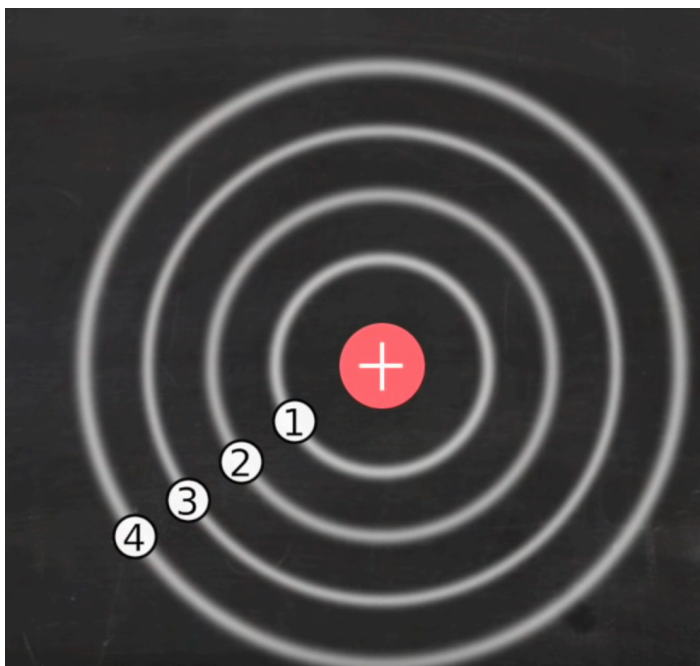
Le satellite placé à une certaine orbite a une certaine énergie.

Mais on aurait très bien pu le mettre sur une orbite qui était juste un peu plus haute ou juste un peu plus basse.



Et donc son énergie aurait été juste un peu plus élevée ou juste un peu plus faible mais il n'y a pas d'orbite interdite ou il n'y a pas d'énergie interdite dans l'espace.

Au niveau microscopique, ça ne marche plus : un électron qui tourne autour d'un proton ne peut pas avoir n'importe quelle énergie, en fait il n'y a même que quelques valeurs d'énergie qui sont possibles. L'énergie rayonnante est discontinue et les quanta sont les quantités minimales, les « grains » composant cette énergie, **l'énergie est transmise par paquets, elle est quantifiée**, c'est la physique « quantique ».



C'est comme si l'électron n'avait que certaines orbites possibles et que cela lui soit absolument interdit d'aller sur les orbites intermédiaires. Ces orbites, ou plutôt ces niveaux d'énergie, on leur donne des numéros : 1, 2, 3, 4 et donc le niveau d'énergie le plus faible, c'est le numéro 1.

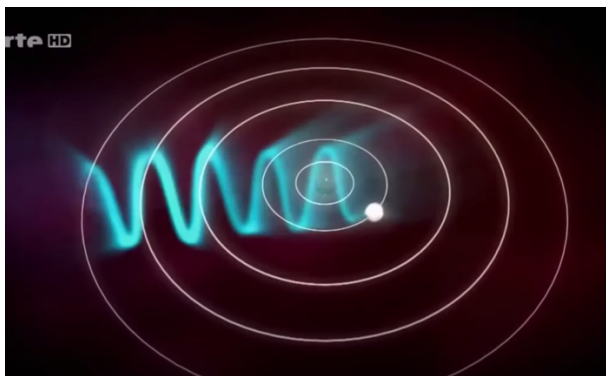
C'est-à-dire qu'il est impossible d'avoir une énergie qui soit plus faible que cela et, autrement dit, cela veut dire aussi qu'il est impossible pour l'électron d'aller sur une orbite différente. Ainsi un électron qui tourne autour d'un proton a une énergie quantifiée c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs possibles, ce qu'on appelle « **le saut quantique** ». Pour changer d'orbite, elle doit avoir un quanta bien précis.

Ce qui est évidemment différent de ce qu'on a généralement en mécanique classique où, à priori, toutes les énergies sont possibles, on peut prendre une énergie de n'importe quelle valeur.

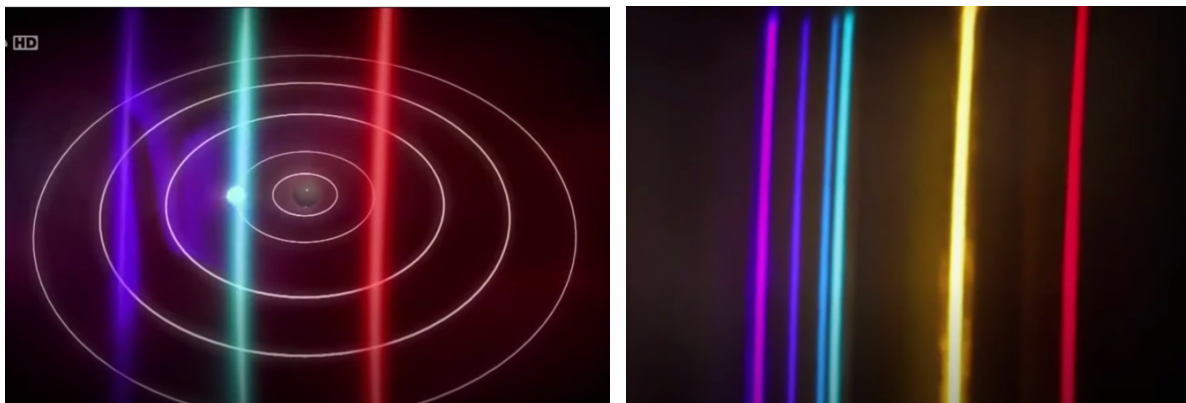
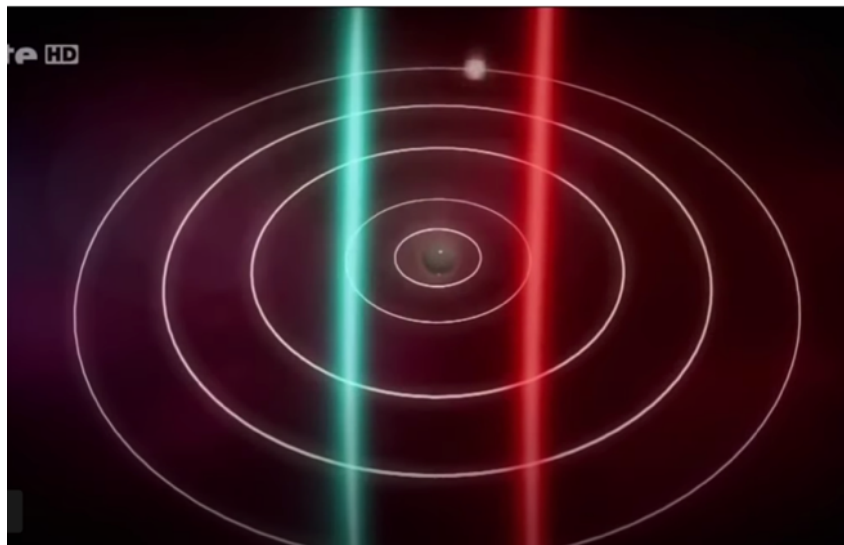
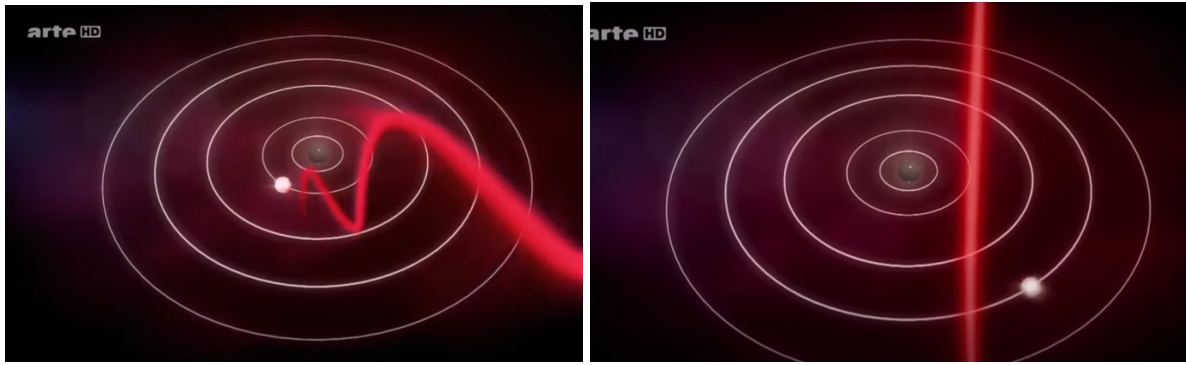
Bohr postule que lorsqu'on chauffe un atome, ses électrons deviennent excités et sautent d'une orbite fixe à une autre.



A chaque saut vers une orbite de niveau d'énergie inférieure, de l'énergie est libérée sous la forme d'un rayonnement lumineux avec une longueur d'onde très précise.



C'est pour cela que les atomes émettent une couleur spécifique et c'est de là que vient l'expression saut quantique.



Sans le saut quantique, on aurait une couleur mal définie émise par un atome passant d'un état excité à désexcité. Or, au contraire, on observe des couleurs très franches. C'est grâce au saut quantique que les couleurs sont ainsi.

Ce qui est surprenant, c'est que l'électron passe directement d'une orbite à une autre, apparemment sans traverser l'espace qui les sépare. Un peu comme si Mars sautait brusquement de son orbite à celle de Jupiter.

Pour Bohr, le saut quantique résulte d'une propriété fondamentale et totalement bizarre des électrons dans les atomes. Ils émettent ou absorbent des paquets d'énergie indivisibles, des quantités minimums spécifiques appelée quanta.



Les expériences ont montré que Bohr avait encore une fois raison.

C'est pour cela que les électrons ne peuvent occuper que des orbites spécifiques. Un électron doit être ici ou là, pas entre les deux. L'énergie des électrons dans un atome est quantifiée. C'est un phénomène extrêmement mystérieux.

Les électrons obéissent à un ensemble de lois différent de celui qui régit les planètes.

Ce phénomène de quantification semble bizarre.

Mais vous allez voir que c'est finalement une conséquence assez naturelle si l'on considère les particules au niveau quantique comme des ondes.

Pour comprendre cela, vous pouvez penser aux ondulations d'une corde de guitare.

Une corde de guitare, si elle est bien attachée à ses deux extrémités, ne peut vibrer que de certaines manières.

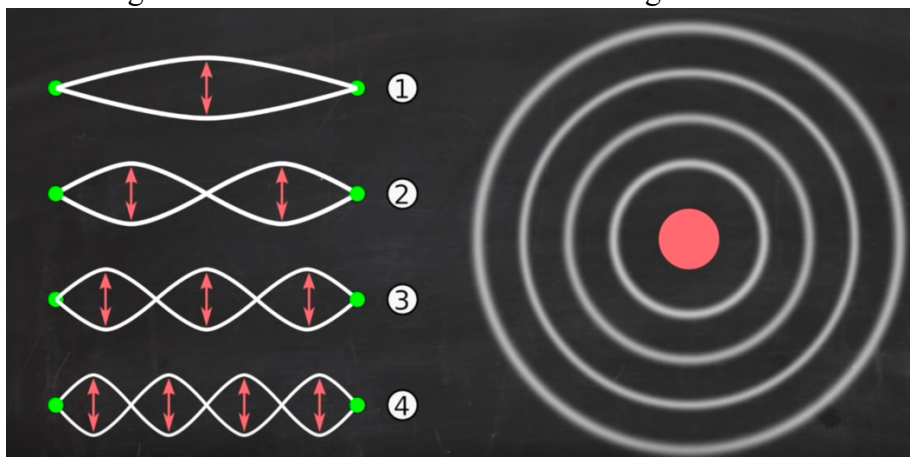
La manière la plus simple correspond à la fréquence la plus grave possible mais elle peut aussi vibrer à une fréquence deux fois plus élevée ou trois fois plus élevée, etc...

Pour la corde de guitare, il n'y a que certaines fréquences de vibrations qui sont permises pour obtenir des notes et c'est absolument impossible de la faire vibrer à des fréquences qui seraient intermédiaires.

Comparaison des vibrations de cordes de guitare et des énergies d'électrons autour d'un proton.

Corde de guitare

Énergie d'électron



On peut dire que les vibrations de la corde de guitare sont quantifiées.

C'est à peu près pour la même raison que les niveaux d'énergie de l'atome sont quantifiés eux aussi.

7. Le principe d'incertitude de Heisenberg

Cette idée est l'une des plus connues mais aussi l'une des plus insaisissables.

En 1928, il y eut une découverte particulièrement troublante. Elle est connue sous le nom de principe d'incertitude d'Heisenberg.

On peut décrire les objets quantiques par des états comme, par exemple, la vitesse est égale à 1000km/s ou bien la position est égale à 42.

Comme un objet classique est généralement décrit à la fois par sa vitesse et sa position, on pourrait se demander s'il serait possible de fabriquer un état quantique qui corresponde à la fois à une vitesse et une position donnée, par exemple, $X=42$ et $V=1000$.

Et bien non, ce n'est pas possible à cause du principe d'incertitude de Heisenberg qui nous dit qu'en mécanique quantique, **on ne peut pas avoir un état qui décrive une particule dont la position et la vitesse soient toutes les deux parfaitement définies.**

Et même, plus vous êtes précis sur la définition de la vitesse, moins vous pouvez l'être sur celle de la position.

En gros, plus on sait à quelle vitesse elle va et moins on sait où elle est, et réciproquement.

Il faut choisir.

Utilisons une analogie non mathématique pour le comprendre.

Prenons deux clés USB identiques.

La première contient une **photo en haute résolution** d'une boule de billard. On voit qu'elle est très détaillée et en zoomant, même très fort, on voit encore précisément l'objet. Mais ce qu'on ignore, c'est la vitesse à laquelle elle se déplace ou quand elle s'arrête.

La seconde clé contient un autre dossier très différent. C'est **un film**.

Il est à noter que les deux dossiers ont le même poids, ne peuvent contenir qu'un certain nombre de méga.

C'est la même scène mais maintenant on voit la boule se déplacer, on voit l'action. Mais si je zoome sur un détail, très vite la boule devient floue.

Donc, à quantité de capacité de stockage égale, on perd de l'information quant à sa description détaillée.

Donc, plus je veux détailler l'objet, moins je peux connaître son déplacement, son environnement. Il faut choisir à quoi j'utilise la capacité de la clé USB.

Dans le monde quantique, c'est pareil : je ne peux pas, au même moment, connaître précisément ces deux informations. Il faut choisir. Ou bien j'ai une vue d'ensemble des actions ou une vue très précise d'une chose mais pas du contexte autour. Il n'y a pas moyen de faire autrement.

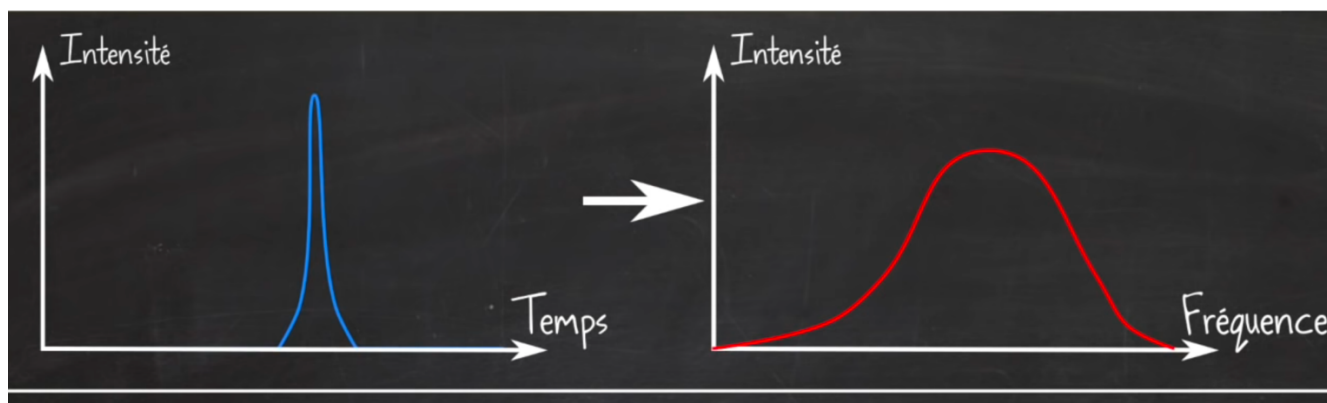
Heisenberg a montré dans ses mathématiques qu'à cette échelle, c'est un trait incontournable de la réalité.

Ce principe d'incertitude de Heisenberg peut sembler complètement incompréhensible.

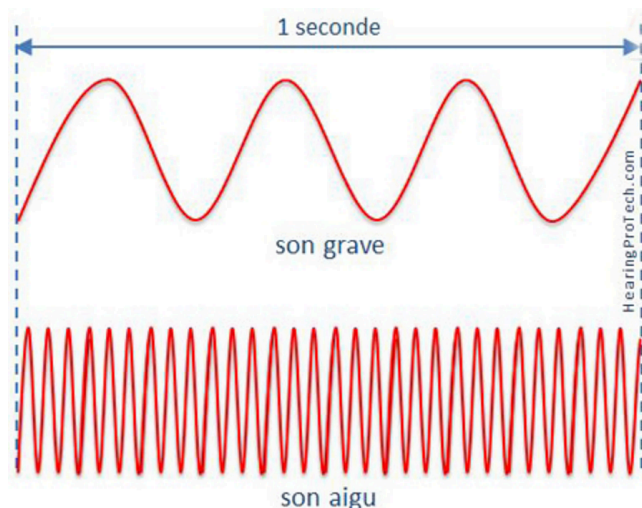
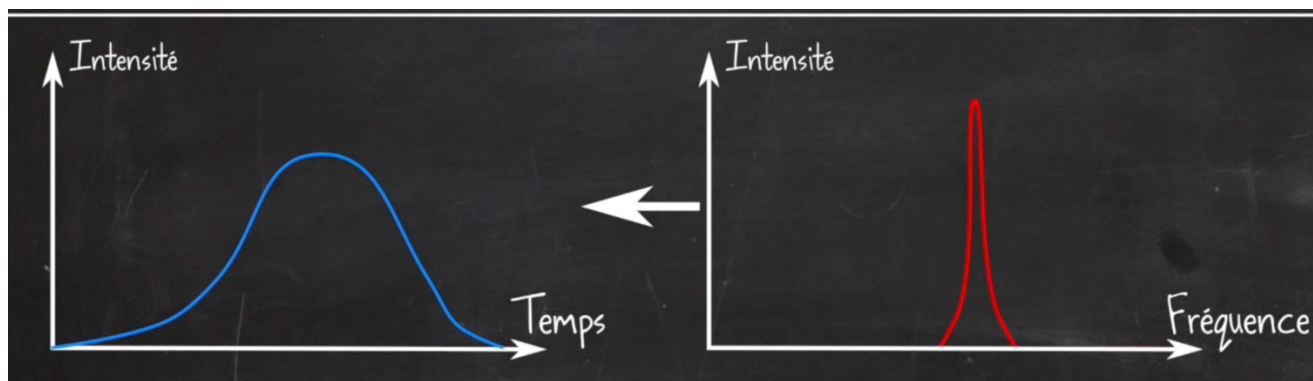
On peut encore essayer de le comprendre par un autre exemple : en s'en référant à nouveau aux ondes sonores.

Vous savez que le son est composé de fréquences et vous voyez généralement l'intensité du son en fonction du temps. Si on utilise un logiciel de traitement du son, il y a une chose que l'on peut observer, c'est que plus un son est bref, plus il va contenir de fréquences.

Par exemple, un son de percussion sera très, très court dans le temps mais il sera très étalé en fréquence :



Et inversement si vous voulez un son qui soit très pur en fréquence, c'est-à-dire qu'il ne contienne qu'une fréquence ou presque, ce son devra nécessairement être suffisamment long :



Relation entre le son et la période

-son grave: la fréquence est basse, la période est longue



-son aigu: la fréquence est élevée, la période est courte



On ne peut pas avoir à la fois un son qui serait très court dans le temps et très pur en fréquence. La raison est que la durée et la fréquence d'un son sont deux choses qui sont irrémédiablement liées.

Il se passe exactement la même chose avec la vitesse et la position des particules qu'on décrit comme des ondes de probabilité.

Comme la position et la vitesse d'une particule sont les deux facettes de la même réalité, on ne peut pas choisir à la fois parfaitement la position et la vitesse.

8. L'intrication quantique

Dans les années 80, les recherches en physique quantique ont débouché sur une autre découverte expérimentale que l'on appelle la non-séparabilité quantique ou l'intrication quantique grâce, à nouveau, au physicien Alain Aspect.

Le principe d'intrication stipule que deux particules ayant interagi à un moment de leur existence peuvent former à jamais un système intriqué, même lorsque les particules sont séparées. Ce qui signifie qu'en effectuant une mesure sur l'une, on peut connaître à distance l'état de l'autre et ce même à des milliers de km... et sans que les deux photons échangent d'informations. En fait, elles ne forment qu'un seul système.

La compréhension de ce phénomène a suscité de nombreux débats au cours des premières décennies du 20^e siècle. Einstein lui-même était circonspect face à cette intrication qu'il a pourtant contribué à faire découvrir, estimant que les deux photons intriqués devaient forcément partager de l'information supplémentaire pour se déterminer l'un par rapport à l'autre. *Il a appelé cette hypothèse : la "variable cachée".*

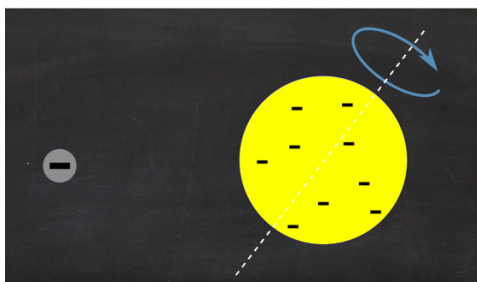
Or, l'intrication se fait instantanément et la physique interdit toute transmission d'information plus rapidement que la lumière. Et pourtant le fait est que le phénomène a lieu sans échange d'information entre les deux photons.

Cela n'est possible qu'en physique quantique : **un événement se produisant à un endroit affecte instantanément un autre événement ailleurs** et ce principe s'appelle la "non-localité".

Détaillons le phénomène :

Une particule, comme beaucoup d'autres, a ce qu'on appelle un spin.

Le spin, c'est un moment cinétique intrinsèque, c'est une sorte de rotation sur lui-même, comme par exemple le lifting d'une balle au tennis, même si cette image, en fait, est fautive car un électron n'est fait de rien, il n'a pas de taille mais c'est une image facile à comprendre.

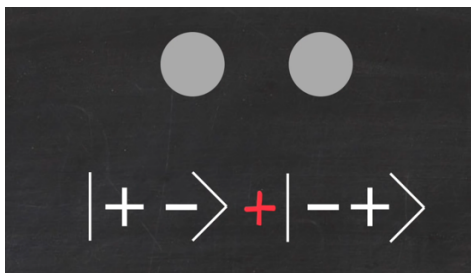


Le spin a deux états possibles : positif et négatif.

Quand deux particules sont intriquées, chacune a ces deux états superposés tant que la première mesure n'a pas été faite, le résultat est indéterminé.

On a toujours un état superposé pour les deux particules et c'est la première mesure qui, en quelque sorte, choisit le résultat au hasard entre + et - mais après, automatiquement, la deuxième particule se met en accord avec la première.

On a envie de penser qu'il faut que quelque chose se transmette pour communiquer le résultat entre elles mais une fois qu'on a mesuré le spin de l'un, l'autre a irrémédiablement la valeur opposée.



Si on éloigne suffisamment les électrons et que l'on fait les mesures simultanément, cette transmission doit aller plus vite que la vitesse de la lumière pour parvenir à se mettre en accord. Or Einstein, dans sa théorie de la Relativité restreinte, dit que rien ne peut aller plus vite que la vitesse de la lumière !

Einstein et ses comparses concluent qu'il y a un problème.

Pour lui, une manière plus raisonnable d'envisager les choses est qu'il y a forcément de l'information supplémentaire quelque part, qu'il y a de l'information cachée, des variables cachées, que la théorie est incomplète.

Les choses auraient pu en rester là, sauf que dans les années 60, un mathématicien du nom de Bell a démontré par la théorie qu'il n'y avait pas de variables cachées.

Et à Orsay en 1982, Alain Aspect, à nouveau, spécialiste de l'optique et des lasers, l'a prouvé expérimentalement.



<https://www.youtube.com/watch?v=SIwN9T010Tg>

Intrication quantique (3/4) : les expériences d'Aspect (18 minutes)

D'après les lois de la mécanique quantique, le monde entier serait un jeu de hasard car toute la matière qui constitue l'univers est faite d'atomes et de particules subatomiques gouvernées par la probabilité et non par la certitude. La nature est décrite par une théorie intrinsèquement probabiliste.

Mais c'est absolument contraire à l'intuition. La plupart des gens ont du mal à l'accepter.

Souvenez-vous, Einstein lui-même pensait qu'il devait y avoir une variable cachée, encore à découvrir pour comprendre ces lois quantiques. Pour lui, l'univers n'était pas un jeu de hasard,

« Dieu ne joue pas aux dés ».

La première image de deux photons intriqués fut obtenue par une équipe de l'Université de Glasgow, le 14 août 2019.

Première photo d'une intrication quantique

Par Azar Khalatbari le 14.08.2019 à 12h08

Pour la première fois une équipe a obtenu une image d'une paire de photons intriqués, cet étrange phénomène qui constitue la base des communications quantiques de demain, objet d'une course technologique mondiale.



Deux lobes identiques comme la trace d'un baiser !

La lumière est constituée de particules, appelées photons, qui portent chacun une information. Dans cette situation d'intrication, deux particules qui ont interagi dans le passé forment un tout inséparable, quelle que soit la distance qui les sépare.

Aujourd'hui bien que démontré, prouvé expérimentalement et accepté par toute la communauté scientifique, surtout depuis les expériences menées par Alain Aspect, ce phénomène quantique reste étrange et n'a rien perdu de son caractère décoiffant.

On a du mal à trouver les bons mots pour décrire l'intrication mais on peut l'utiliser et c'est ça la deuxième révolution quantique.

Elle constitue aujourd'hui un domaine de recherche très actif puisqu'elle promet beaucoup, en matière de sécurité informatique et de communication grâce aux nouveaux ordinateurs quantiques.

Cette intrication est une ressource qui va nous donner très bientôt des moyens d'agir, de calculer, de transmettre des informations avec une rapidité et une puissance, jamais égalées par nos ordinateurs actuels, en utilisant ce qu'on appelle les qubits.

Les qubits ne peuvent pas être clonés, on ne peut pas copier l'information du qubit parce qu'en le manipulant, on le détruit grâce au principe d'intrication. Les physiciens ont réussi à tirer parti de ce phénomène pour transmettre des messages cryptés de façon parfaitement inviolable. Ce sera une sécurité totale pour les informations sur ordinateur.

C'est quoi un ordinateur quantique ?



Un ordinateur classique, même s'il travaille très vite, ne fait qu'une seule chose à la fois, le bit peut avoir la **valeur de 0 ou de 1**.

Dans un ordinateur quantique, un qubit peut prendre simultanément les valeurs **de 0 et de 1**, ce qui en fait un élément multitâche.

Un qubit peut faire deux choses à la fois,

2 qubits quatre choses à la fois,

et 10 qubits, 1024 choses à la fois

et 3000 qubits pourraient effectuer simultanément plus de choses qu'il n'y a de particules élémentaires dans l'univers !!!

Il teste toutes les possibilités au même moment.

Cela veut dire qu'on peut effectuer des calculs d'une complexité inimaginable, notre puissance de calcul pourrait exploser de façon exponentielle si on parvenait à en faire travailler plusieurs ensemble à la résolution d'un problème. Imaginez un problème qui comporte des millions, des milliards de variables. On pourrait, par exemple, prévoir la météo à long terme ou anticiper les catastrophes naturelles comme les séismes et les ouragans.

Un ordinateur quantique pourrait faire ce travail avec seulement quelques centaines d'atomes et le cerveau de cet ordinateur serait plus petit qu'un grain de sable !

En se libérant du langage binaire classique d'un ordinateur actuel, cette machine du futur centuple sa puissance, même bien d'avantage.

Concrètement, un calcul qui demanderait 10.000 ans à un ordinateur de la NASA sera assuré en... 200 secondes par un ordinateur quantique !

<https://www.youtube.com/watch?v=rNdWOXQ8V4A>

Comment ça marche ? Un ordinateur quantique (5,30 minutes)

Dans le domaine de la santé, la vitesse de calcul du quantique permettra de développer de nouveaux médicaments en créant des simulations génétiques bien plus nombreuses qu'avec les machines actuelles.

Ses champs d'application mobilisent tous les géants du numérique comme Microsoft, Huawei, Alibaba, HP, IBM, Microsoft, Google et des chercheurs du monde entier.

Niels Bohr, le père de la physique quantique, a dit : « Quiconque n'est pas choqué par la physique quantique, ne la comprend pas. »

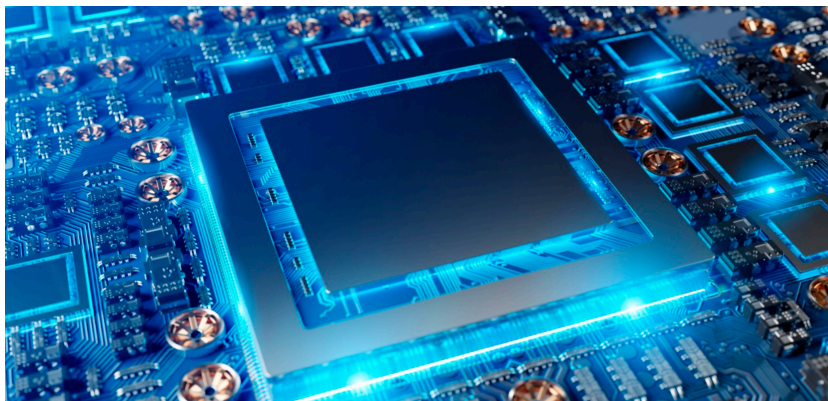
On peut dire que personne aujourd'hui ne la comprend, ce qui n'empêche pas de l'utiliser à grande échelle.

La physique quantique a déjà débouché sur une multitude d'inventions technologiques qui a bouleversé notre vie quotidienne.

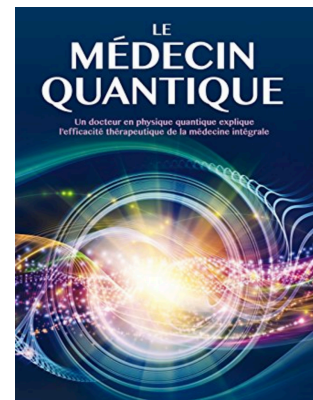
A l'échelle atomique, les propriétés de la matière changent et ouvrent de nouvelles perspectives dans les domaines de l'informatique, de la physique ou encore de la médecine. Toute l'électronique actuelle découle de la mécanique quantique qu'il s'agisse du transistor, du laser ou des microprocesseurs. La liste est longue : le GPS, les disques durs, les clés USB, le lecteur DVD, les téléphones portables, le laser, tous les circuits intégrés, toute l'électronique. Nous nous en servons tous les jours sans y prêter attention.

Si la mécanique quantique se mettait en grève, pratiquement toutes nos machines tomberaient en panne.

Les enjeux sont colossaux pour les générations à venir, pour se déplacer en voiture autonome, communiquer, se soigner...



Ordinateur quantique



Recharge ultra rapide des voitures électriques

Même si, au départ, la physique quantique semblait sortir de l'imagination de quelques scientifiques hurluberlus, elle est devenue bien réelle...

Bohr n'a jamais réellement expliqué pourquoi l'incertitude du monde quantique paraissait disparaître à mesure que les choses augmentaient en taille.

Les scientifiques n'ont toujours pas résolu ce mystère.

Si les possibilités sont immenses dans le monde de l'infiniment petit, il y a des explications manquantes car, à mesure que l'on passe du niveau des atomes au niveau des objets, les lois, les actions et réactions semblent différentes. Dans notre vision du monde « macro », il est clair que de toutes les possibilités, une seule est visible, les autres disparaissent. Nous ne voyons qu'un seul résultat défini.

Certains sont convaincus qu'il manque des subtilités dans les équations quantiques.

D'autres physiciens pensent que toutes les possibilités qui existent dans le monde quantique ne disparaissent jamais mais que chaque possibilité trouve son aboutissement, même au niveau macro. Ces autres alternatives aboutiraient dans des univers parallèles au nôtre, il se pourrait que la réalité dépasse le cadre de l'univers que nous voyons et qu'elle se ramifie constamment en créant des mondes nouveaux où chaque possibilité se matérialise.

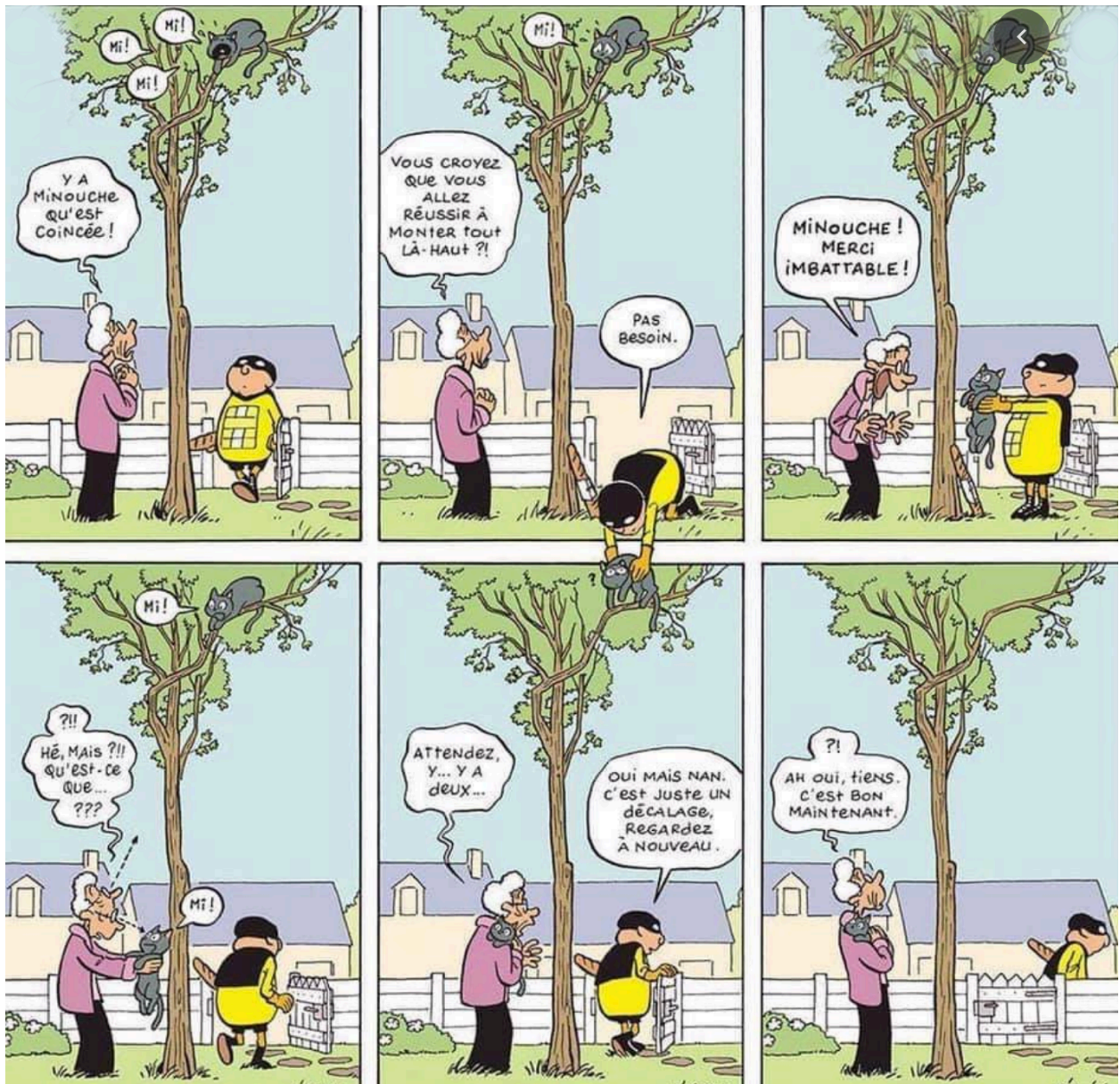
La mécanique quantique est un territoire encore presque vierge et nul ne peut prédire où son exploration nous entraînera.

Aussi étrange la mécanique quantique soit-elle, il devient de plus en plus de claire pour les scientifiques qu'il n'y a pas de frontière entre les mondes de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Ses lois s'appliquent partout, la seule différence est que ses caractéristiques les plus bizarres sautent plus aux yeux quand les objets sont petits.

La découverte de la mécanique quantique a révélé une réalité qui est à la fois surprenante et fascinante, qui nous permet de comprendre un peu mieux la magie du cosmos et peut-être de la vie.

Le plus beau dans la science, c'est qu'elle nous permet d'apprendre des choses qui dépassent nos rêves les plus fous, la mécanique quantique en est l'illustration parfaite.





Pour terminer le sujet, voici un lien :

<https://www.youtube.com/watch?v=twRyNEvfhNo>

La loi du saut quantique (28 minutes)

Emmanuel Ransford, diplômé de l'École Polytechnique et spécialiste de physique quantique explique avec un rare talent de vulgarisateur, très simplement et clairement les secrets du monde quantique. Après ses explications, à chaque fois que vous verrez une tortue, un œuf poché ou une fleur de lotus, vous penserez à la physique quantique.