

Introduction à la Physique Quantique



Jean Claude Van Craen
Astrovéga Club, Gembloux

26 mai 2026

jcvancraen@skynet.be

Le **déterminisme** de la mécanique classique (ou Newtonienne).

Elle s'applique aux objets macroscopiques lorsque leur vitesse est faible ($\ll$ vitesse de la lumière) ou leur masse relativement peu élevée.

Etudiée dès l'Antiquité. Exemples:

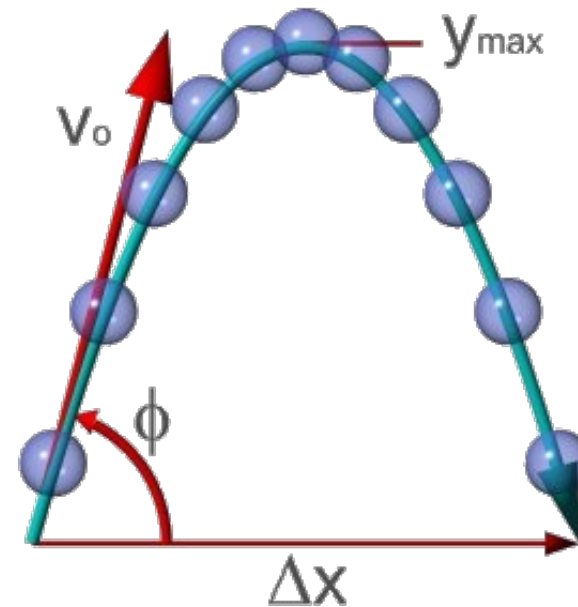
- Bras de levier d'Archimède.
- Notion de trajectoire et de force des corps (pomme de Newton).
- Mouvement des planètes. Lois de Kepler.
- Découverte de Neptune: Existence prédite par John Couch Adams (en 1843) et Le Verrier (en 1846) faisant suite à des observations indiquant des perturbations dans l'orbite d'Uranus. Elle fut découverte par l'astronome allemand Johann Galle sur base de ces calculs le 23 septembre 1846.
- Atterrissage du robot PHILAE emporté par la sonde ROSETTA sur la comète 67P/TCHOURIOUMIOV-GUERASSIMENKO à 510 millions de km de la Terre.

→ Fonctionne parfaitement bien à notre échelle. On peut par exemple prédire la position de la Lune dans le ciel sur plusieurs milliers d'années.

Physique étudiée en secondaire et qui régit notre quotidien.

Le **déterminisme** de la mécanique classique.

Si on connaît l'état d'un système au moment initial et que l'on connaît les forces qui s'y appliquent alors on peut prédire exactement son évolution au cours du temps.



La physique classique « fonctionne » parfaitement à notre échelle.

Le **déterminisme** de la mécanique classique ex: le démon de Laplace.

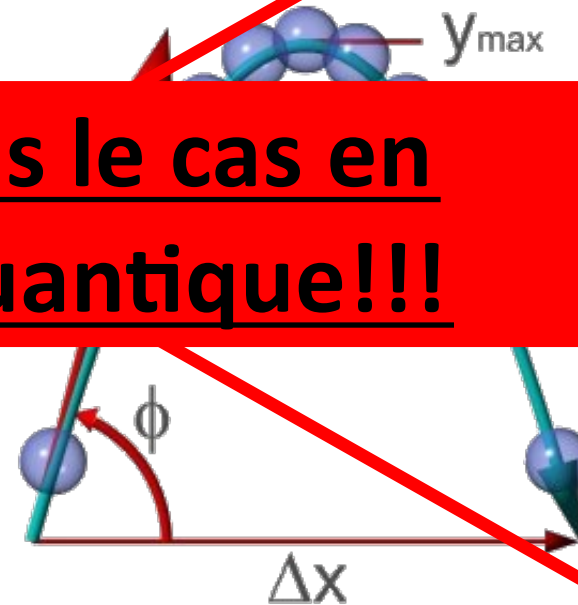
« Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était suffisamment vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome; **rien ne serait incertain pour elle et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.** »

Pierre-Simon Laplace, 1814

Le **déterminisme** de la mécanique classique.

Si on connaît l'état d'un système au moment initial et que l'on connaît les forces qui s'y appliquent alors on peut prédire exactement son évolution au cours du temps.

Ce n'est plus le cas en
physique quantique!!!



La physique classique « fonctionne » parfaitement à notre échelle.

Réalisme d'Einstein:

Le monde existe indépendamment du fait qu'on l'observe ou pas.

**Un objet ou un phénomène physique « EST » au sens le plus complet du terme:
il est fixé, déterminé, connu, bien défini en lui-même.**

Exemples:

La Tour Eiffel « **EST** » une tour métallique de 330 m de haut située à Paris.

La Lune « **EST** » toujours présente dans le ciel même si je ne l'observe pas.

Vous « **ÊTES** » indépendamment du fait que je vous regarde.

Note: le « réalisme » d'Einstein est évidemment plus compliqué que ça.

Réalisme d'Einstein:

Le monde existe indépendamment du fait qu'on l'observe ou pas.

Un objet ou un phénomène physique « EST » ou « n'est pas » le plus complet du terme.

Ce n'est plus le cas en
physique quantique!!!

La Tour Eiffel « **EST** » une tour métallique de 330 m de haut située à Paris.

La Lune « **EST** » toujours présente dans le ciel même si je ne l'observe pas.

Vous « **ETES** » indépendamment du fait que je vous regarde.

Note: le « réalisme » d'Einstein est évidemment plus compliqué que ça.

Bienvenue dans le monde fascinant de la physique quantique!

Le réalisme n'existe plus: l'**observateur** y joue un rôle clé.

«**Dieu joue aux dés**»: Le déterminisme de notre monde est remplacé par le **hasard**.



Un chat peut être **à la fois** mort et vivant.



Bienvenue dans le monde fascinant de la physique quantique!

Des propriétés telles l'énergie ne sont plus continues mais **discrètes (comme les marches d'un escalier)**.

Il y a des **petits fantômes** qui agissent à distance (intrication quantique).



Et encore bien plus que ça!!!

« La physique quantique: étrange mais pas irrationnelle ».
Alain Aspect

Quelques citations célèbres sur la physique quantique.

“Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne la comprend pas.”

Niels Bohr

“Je pense pouvoir dire sans trop me tromper que personne ne comprend la mécanique quantique.”

“Si je pouvais l'expliquer à n'importe qui, alors ça ne m'aurait pas valu le prix Nobel.”

Richard Feynman

“Le langage mathématique qui explique la mécanique quantique existe mais manque le lien avec le langage ordinaire qui, lui, ne peut en rendre compte.”

Werner Heisenberg

«La physique quantique c'est d'abord un formalisme, c'est-à-dire un ensemble abstrait d'équations et de règles mathématiques »

Etienne Klein

Quelques particularités de la physique quantique.

- Elle est **contre-intuitive**. Elle met à mal notre sens de la **réalité**. Les mots ne peuvent pas la décrire correctement → « shut up and calculate » (tais-toi et calcule).
- Basée sur un langage **mathématique complexe** dans les 2 sens: “difficile” et “basé sur les nombres imaginaires ($i = \text{racine carrée de } -1$)”. Ce formalisme s’exprime dans un espace mathématique abstrait, autre que notre espace à 3 dimensions spatiales + le temps ce qui rend son interprétation compliquée.
- La théorie donne des **probabilités de résultats** :
 - **l’aspect aléatoire est une propriété inhérente à la matière** (= pas un manque de connaissance sur le système étudié!!!). On parle de **hasard quantique**.
- La **mesure** (= le fait d’observer) joue un rôle déterminant et interfère dans le système quantique.

... mais toutes ses prédictions ont été vérifiées expérimentalement.

→ On dispose d’un outil mathématique très performant et très précis.
Le formalisme de la physique quantique n’a jamais été mis en défaut.

2025 : Année Internationale de la Science et de la Technologie quantiques (AIST) de l'UNESCO.

Il y a 100 ans que Heisenberg mettait au point les équations qui sont considérées comme fondatrice de la physique quantique sur l'île d'Helgoland où il était en villégiature pour soigner un terrible rhume des foins.

« Il était environ trois heures du matin lorsque le résultat de mes calculs apparut devant moi. Agité, je quittai la maison et me mis à marcher dans la nuit. Après avoir grimpé au sommet d'un rocher surplombant la mer, j'attendis le lever du soleil. J'étais profondément troublé. **J'avais la sensation de regarder, à travers la surface des phénomènes, vers un intérieur d'une étrange beauté.** »

Citation de Werner Heisenberg d'après Carlo Rovelli, Helgoland, 2021.



Tout grand MERCI à ALAIN ASPECT pour ses partages de connaissances.

Né le 15 juin 1947 à Agen.

Physicien Français. Professeur à l'Université de Paris-Saclay et à l'Ecole Polytechnique de Paris.

Prix Nobel de physique 2022 avec John Clauser et Anton Zeilinger « **pour leurs expériences pionnières sur l'intrication quantique, ayant ouvert la voie aux technologies quantiques** ».

Quelques références d'Alain Aspect.

Vidéos:

- Alain Aspect & Science étonnante ❤️❤️❤️
https://www.youtube.com/watch?v=OeZ_63iKPho
<https://www.youtube.com/watch?v=28UN70790Do>
- Le hasard quantique – Alain Aspect _ Prix Nobel 2022: <https://www.youtube.com/watch?v=E4k6Z7B3BqA>
- L'intrication quantique (Alain Aspect - 2017): <https://www.youtube.com/watch?v=JCfeEPTeSdA>
- INSA (Toulouse) 4 Novembre 2024 - "Des doutes d'Einstein aux bits intriqués : la seconde révolution quantique » :
<https://www.sfpnet.fr/conference-alain-aspect-prix-nobel-de-physique-2022-des-doutes-d-einstein-aux-bits-intriqués-la-seconde-revolution-quantique>
- L'histoire de l'intrication quantique (avec Frank Lalöe, Philippe Grangier, etc...)
 - 1: Le débat Bohr-Einstein: <https://www.youtube.com/watch?v=gOQGkIVxv3w>
 - 2: Les inégalités de Bell: <https://www.youtube.com/watch?v=xduUcFfIYX0>
 - 3: Les expériences d'Alain Aspect: <https://www.youtube.com/watch?v=SlwN9T010Tg>
 - 4: La 2^{nde} révolution quantique: <https://www.youtube.com/watch?v=WWL7B3XP7bU>

Livres:

« Einstein et les révolutions quantiques » _ CNRS Editions 2019.

« Si Einstein avait su » _ Odile Jacob 2025.



Pour ceux qui voudraient en savoir plus:

Manjit Kumar
« Le grand roman de la physique quantique »
(LibresChamps – 2011).



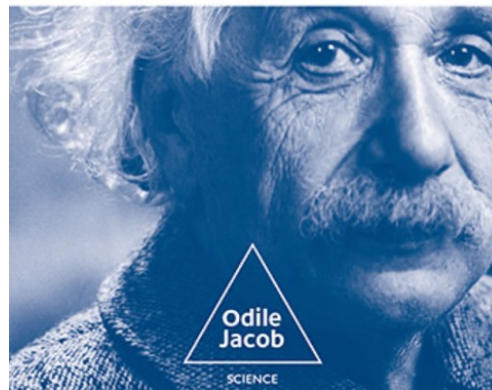
Excellent livre qui décrit de manière claire et (très) simple, sans équation, la genèse de la physique quantique. Se lit vraiment comme un roman. Les débats d'idées, parfois très virulents, entre les pères de cette physique (surtout ceux entre Bohr et Einstein) sont passionnants à lire.

Recommandation de livres pour en savoir plus.

Alain Aspect

Prix Nobel de physique

Si **Einstein** avait su



Superbe livre. Décrit magnifiquement l'intrication quantique par celui qui l'a démontrée.

Cours de physique quantique en ligne.

- **Cours de physique quantique d'Etienne Klein (2007).**
 1. Comment la physique quantique est-elle née
https://www.youtube.com/watch?v=AL_wuhy3VkM&t=0s
 2. Pourquoi les quanta sont-ils si troublants?
<https://www.youtube.com/watch?v=PFwSNC5UG4o>
 3. Comment interpréter la physique quantique?
<https://www.youtube.com/watch?v=KwmubEmHx-s>
- **MOOC Introduction à la physique quantique:**
<https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/introduction-a-la-physique-quantique/>
- **Cours d'André Nauts à Saphybru (Samedis de la Physique Bruxelles):**
<https://www.saphybru.com>

Objectifs de cet exposé.

1. Essayer d'expliquer de manière « simple » quelques concepts fondamentaux de la physique quantique:

- Différences fondamentales avec la physique classique.
- Le rayonnement du corps noir.
- Quantification de certaines propriétés physiques (énergie notamment).
- Dualité onde – particule et le hasard quantique.
- Problème de la mesure en physique quantique et superposition d'états:
le chat de Schrödinger → Interprétation S de la PQ → Intrication quantique.
- Principe d'indétermination d'Heisenberg, effet tunnel et le Principe d'exclusion de Pauli.
- *Intrication quantique _ en annexe.*

2. Faire le lien avec l'astronomie, l'astrophysique et la cosmologie parce que la physique quantique y est extrêmement importante. Elle fait également partie de notre vie quotidienne.

3. Vous motiver à en savoir plus (cfr références).

Note: pour simplifier au maximum, je fais le plus possible d'analogies avec notre monde classique. **C'est malheureusement très limité et même incorrect.** J'essayerai de souligner au maximum ces limites.

La physique quantique est la physique du monde microscopique.

Vient du latin « **QUANTUM** » = quantité déterminée.

Décrit les propriétés de la matière et de la lumière (photons) à l'échelle atomique et subatomique (protons, électrons,...) mais qui ont des effets importants au niveau macroscopique également.

[illegible]

Masse proton = $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg (0, suivi de 26 zéro suivi de 167 kg)

Diamètre atomique = 10^{-10} m (0,0000000001 m)

On verra que la physique quantique ne peut pas décrire le plus petit grain de poussière.

1^{ère} révolution quantique (20^e siècle).

Electronique (transistors), ordinateurs, lasers, CDs, téléphones portables, GPS (montres atomiques), panneaux photovoltaïques, énergie nucléaire, etc...



Centrale de Chooz



*Imagerie et radio-éléments
utilisés en médecine*



Nous utilisons la physique quantique tous les jours.

La 2^{ème} révolution quantique est en cours:

- Ordinateurs quantiques.
- Cryptographie.
- Métrologie quantique: Utile pour détecter des éruptions de volcans.
- Imagerie médicale.
- Interférométrie.
- Téléportation.
- Etc...

→ Chaque état du monde mise énormément sur la «suprématie quantique».

Ex: Quantum Technologies Flagship
Initiative phare des technologies quantiques de l'Europe (1 Mda €).

La physique quantique est aussi très importante pour l'astronomie.

- Essentielle dans le modèle du Big Bang pour la compréhension des instants primordiaux de l'Univers quand sa température et sa densité étaient (quasi) infiniment grandes et sa taille (quasi) infiniment petite.
- Détection des éléments composants les étoiles, les planètes, les comètes, etc... grâce à la spectroscopie atomique et moléculaire.
- Nucléosynthèse primordiale et stellaire:
 - Fusion des atomes d'Hydrogène.
 - Réaction triple-alpha pour fabriquer du Carbone dans les étoiles.
 - Explication de la formation des éléments lourds.
- Régulation des réactions nucléaires dans les étoiles due à l'importance des effets quantiques (effet tunnel). Sans cet effet de régulation, une étoile comme le Soleil aurait consommé tout son Hydrogène en quelques millions d'années.
- Formation des naines blanches et des étoiles à neutrons et explication de leur stabilité. Essentielle pour la compréhension des trous noirs.
- Effet Hawking pour l'évaporation des trous noirs.

! Gare aux abus ... surtout en « médecine » !

https://www.lemonde.fr/sciences/article/2022/10/10/la-medecine-quantique-de-fausses-therapies-qui-surfent-sur-les-revolutions-de-la-physique-quantique_6145232_1650684.html

<https://www.guichetdusavoir.org/question/voir/132956>

https://www.francetvinfo.fr/vrai-ou-fake/cosmetiques-guerlain-cree-la-polemique-avec-sa-creme-quantique_6301623.html



>500€ le pot de 50 ml au début (2-300 actuellement) mais, suite aux plaintes de nombreux scientifiques, la marque ne mentionne plus le terme « quantique ».

« Le côté “quantique” fait sérieux et mystérieux à la fois, donc ça permet de mieux vendre. Ils jouent sur le fait que pour le grand public, la quantique semble enrobée de mystère, alors qu’en fait c’est très bien compris scientifiquement. »

Julien Bobroff, physicien, professeur à l’université Paris-Saclay.

La physique à la fin du 19ème siècle.

La mécanique, la thermodynamique & l'électromagnétisme étaient les 3 piliers de la physique.

→ **Idée de FIN DE LA PHYSIQUE:**

Plus rien de vraiment neuf à découvrir. On va simplement améliorer la précision des mesures.

Le professeur de physique de Max Planck - le père de la physique quantique - l'a découragé d'étudier la physique car il n'y avait plus rien de neuf à découvrir! Heureusement pour nous qu'il n'ait pas écouté.

La physique à la fin du 19^{ème} siècle.

En 1900, Lord Kelvin déclara lors d'une conférence devant la Royal Institution of Great Britain : « Il y a **2 nuages** dans le ciel bleu de la physique »:

1. Invariance de la vitesse de la lumière (expérience de Michelson & Morley)

→ Théorie de la Relativité.

2. Rayonnement du corps noir

→ Physique Quantique.

(3. Effet photoélectrique – non mentionné par Kelvin).

**Ces 2 nuages dans le ciel bleu ont conduit
à deux révolutions de la physique au 20^{ème} siècle!!!**

Le rayonnement du corps noir.

Un corps chaud émet de l'énergie sous forme de rayonnement thermique (électromagnétique). Ce rayonnement est distribué sur un spectre continu de longueurs d'onde (= différentes couleurs). Ce **rayonnement thermique n'est fonction que de la température du corps** (= pas de sa composition chimique, de sa forme, etc...).

- Ex: - Dans le langage commun on dit "le métal est chauffé à blanc".
- Echelle de température des forgerons et des potiers.

Couleur de forge	°C	°F
Blanc éclatant	1200	2190
Jaune clair	1100	2010
Jaune	1050	1920
Orange clair	980	1800
Orange	930	1710
Rouge clair	870	1600
Orange rouge	810	1490
Rouge cerise clair	760	1400
Rouge cerise	700	1290
Rouge cerise foncé	650	1200
Brun rouge	540	1000

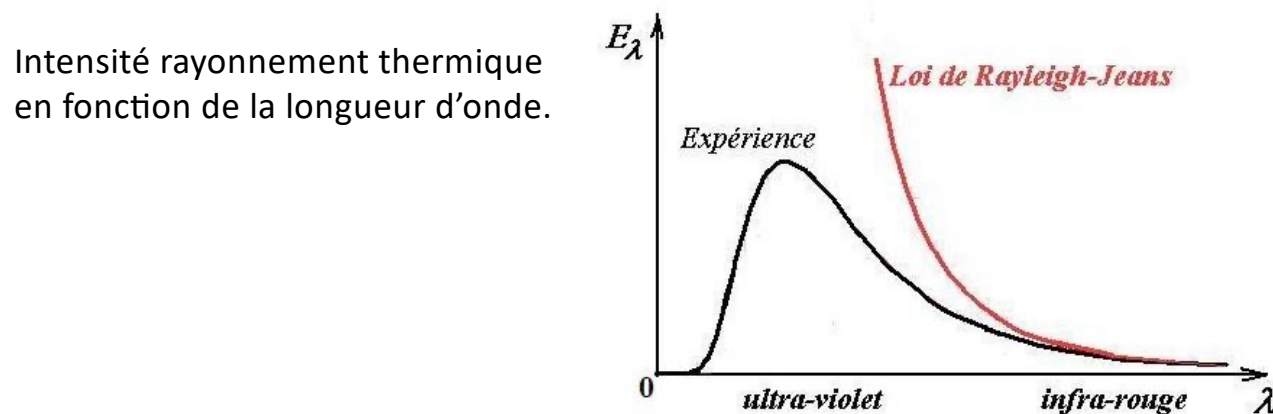
Couleur observable dans la pénombre pour apprécier correctement les températures



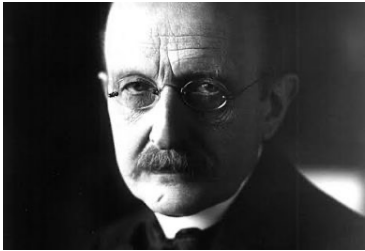
Le rayonnement du corps noir.

Un corps noir peut rayonner de l'énergie électromagnétique (= de la lumière) lorsqu'il est porté à une certaine température à cause de l'agitation thermique. Un corps noir ... peut donc être coloré!

A la fin du 19^e siècle, les industriels voulaient comprendre ce phénomène qui était primordial pour l'industrie électrique qui était en plein essor (ex les lampes à filament incandescent, le moteur électrique, la télégraphie, etc...).



Aucune loi classique ne permet d'expliquer ce rayonnement.



Le rayonnement du corps noir.

Max Planck (1858 – 1947, Prix Nobel 1918) résolut le problème en 1900 en émettant l'hypothèse que **l'énergie était quantifiée et proportionnelle à la fréquence ou inversement proportionnelle à la longueur d'onde :**

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

(ν = lettre grecque nu = fréquence de l'onde - λ = longueur d'onde – c = vitesse de la lumière).

L'énergie s'échange donc par petits paquets bien définis. Elle n'est plus continue.

La loi de Planck fait intervenir **une constante qu'il note « h »** (pour '*hilfe*' = *aide* car il émit cette hypothèse par **désespoir** selon ses mots pour trouver la bonne formule):

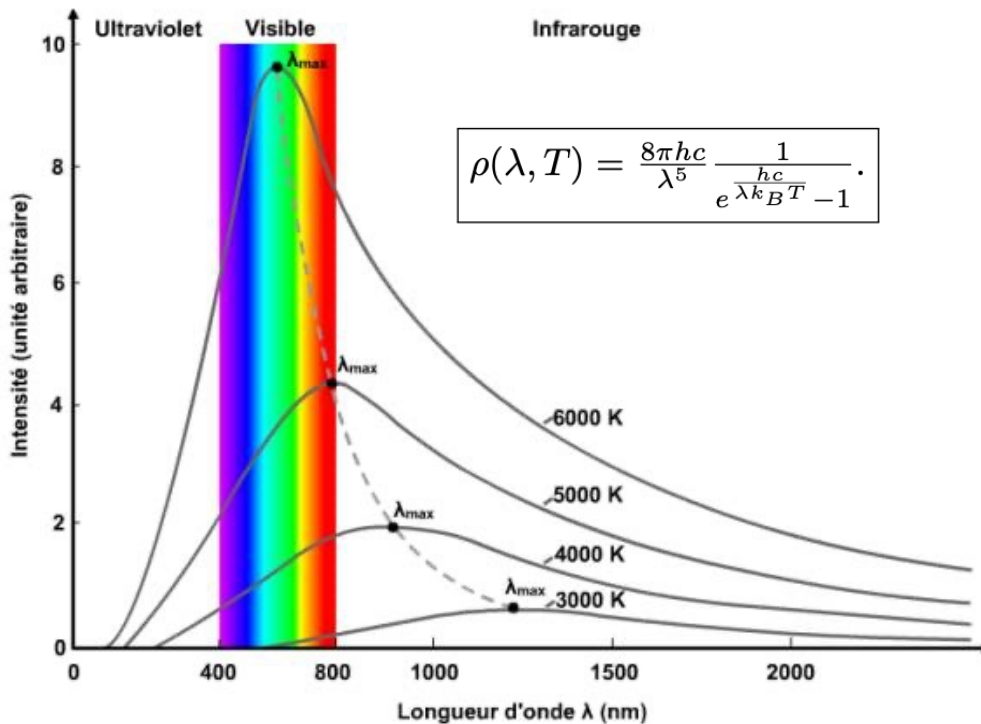
$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J.s (énergie x temps = action) } *$$

À noter l'exposant -34 (→ 0, suivi de 33 zéros et ensuite le chiffre 662607...).

La constante de Planck est omniprésente en physique quantique.

* Voir plus loin

Rayonnement du corps noir - Loi de Planck.



Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde

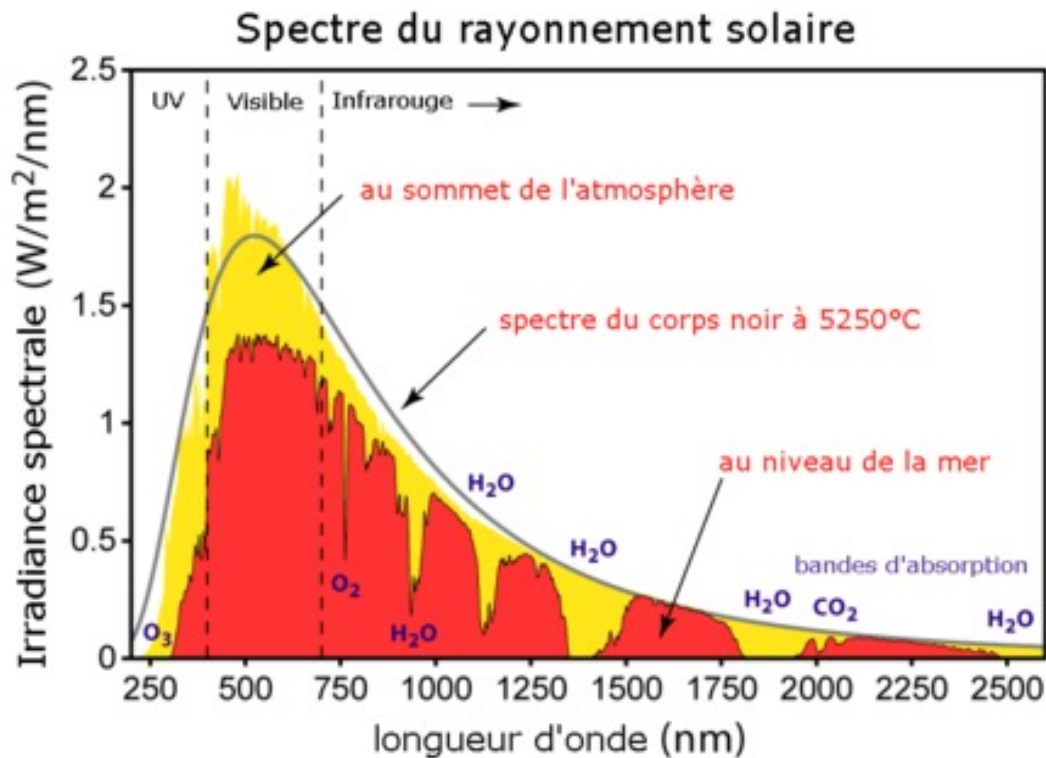
- Quantité de radiation émise pour chaque longueur d'onde. **Ne dépend que de la température du corps (pas de sa composition chimique, de sa forme, etc...).**
- Le maximum de la courbe se déplace vers les courtes longueurs d'onde (hautes énergies) quand la température augmente.
- Loi de déplacement de Wien** (Nobel 1911): le produit de la longueur d'onde maximale émise par le corps et de sa température est une constante (cfr échelle de température des forgerons)

→ classification des étoiles.

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T}$$

λ_{max} : longueur d'onde d'émission maximale en mètre (m)
 T : température absolue de surface en kelvin (K)

Le rayonnement du Soleil est celui d'un corps noir.



Quand un photon est produit dans le cœur du Soleil, il lui faut entre 400.000 et 1 million d'années pour atteindre la surface à cause des collisions → on peut considérer que le Soleil est très absorbant pour ses propres photons. **On considère donc le Soleil comme un corps noir dont le maximum d'émission est à 5800 degrés.**

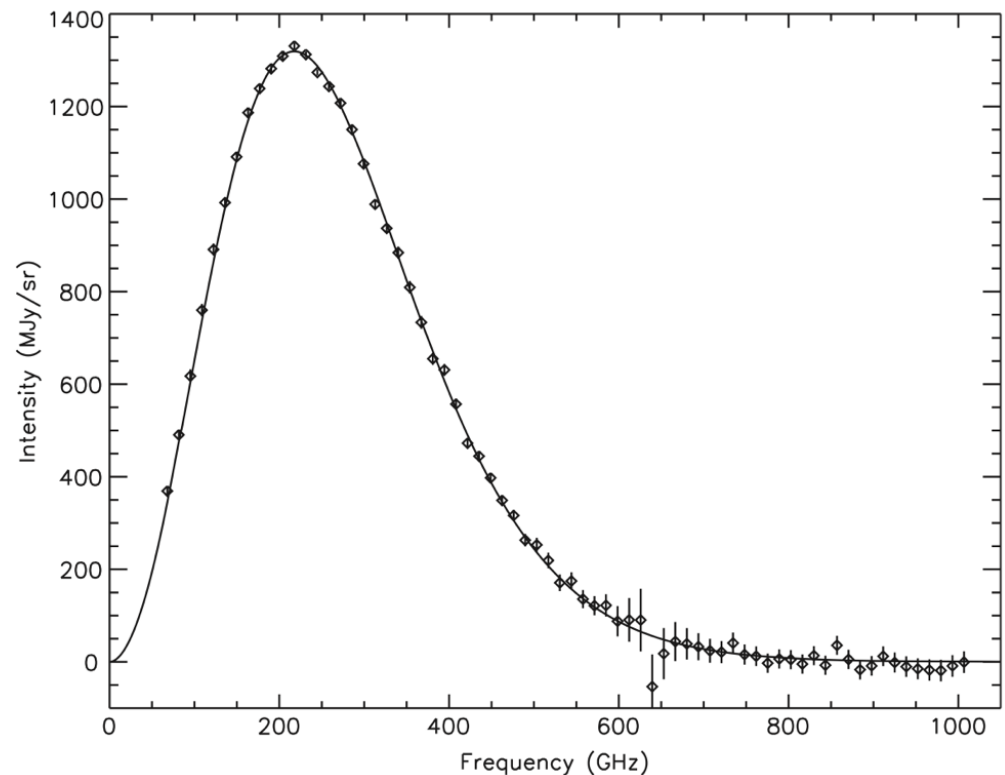
Bien entendu, le photon qui arrive à la surface n'est plus du tout le même que celui émit en son cœur à cause des collisions.

Quand le photon arrive à la surface du Soleil il lui faut 8 minutes pour nous atteindre.

Le Fond Diffus Cosmologique est aussi celui d'un corps noir.

Après le Big Bang, l'Univers était très chaud et constitué d'une mer de protons, d'électrons, de photons, de neutrinos, etc... **A cause de sa densité il était opaque:** les photons ne pouvaient pas s'échapper car ils entraient en collision avec les particules avoisinantes.

380 000 ans après le Big Bang, les atomes ont commencé à se reconstituer et la lumière a pu s'échapper. La température de l'univers était de 3000 K. A cause de l'expansion de l'univers, le Fond Diffus Cosmologique est maintenant à la température de **2,73 K (-270,42°C)**.

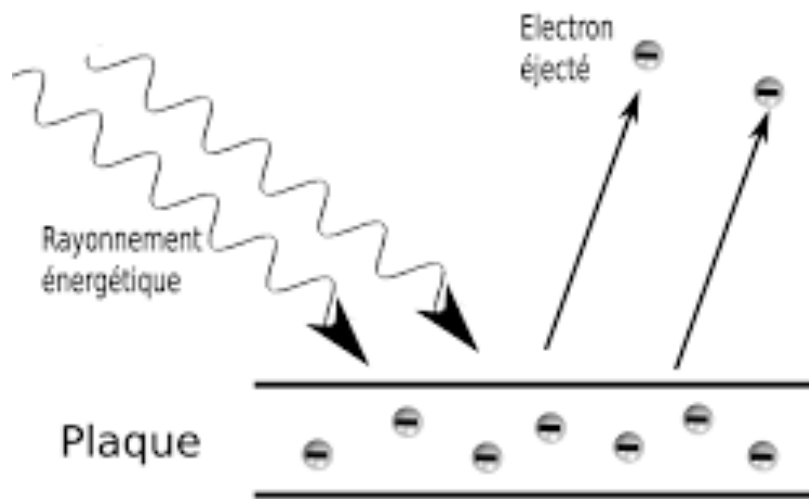


Source: D.J. Fixsen, Astrophysical Journal, 707, 916 (2009)

Einstein a expliqué l'effet photoélectrique à partir des travaux de Planck (1905).

La lumière est constituée de petits paquets de particules de masse nulle et d'énergie $E = h \nu = h c / \lambda$: **les photons = quanta d'énergie.**

(Einstein obtint le Prix Nobel en 1921 pour cette idée).



Effet photoélectrique:

En irradiant un métal avec de la lumière on peut éjecter des électrons si la lumière atteint une certaine fréquence.

Effet utilisé pour les panneaux photovoltaïques.

L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence ou inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

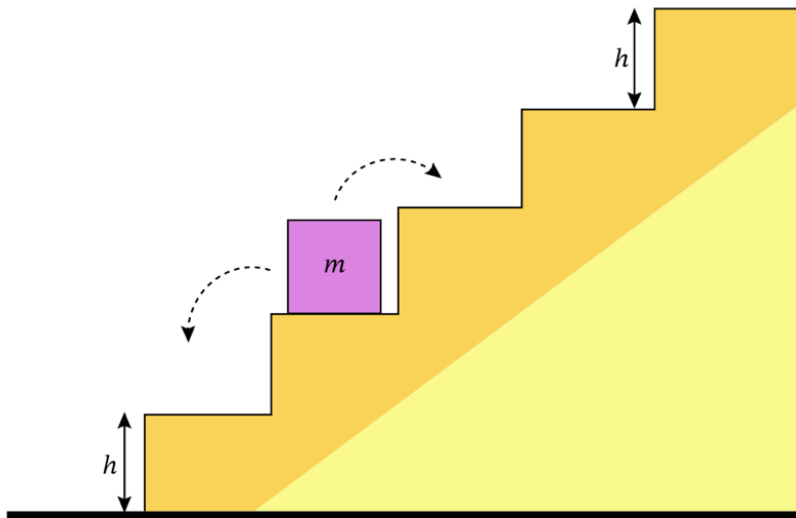
La notion de quantification.

Quantification.

Tout objet quantique (électron, proton, photon, ...) ne peut avoir que certaines valeurs discrètes (=non-continues) pour des propriétés telles l'énergie.

Analogie avec le monde classique:

On associe fréquemment la notion de quantification à un escalier ou aux barreaux d'une échelle: je peux monter ou descendre un escalier marche par marche ou une échelle barreau par barreau . Jamais par demi ou par un tiers ou par un dixième de marche ou de barreau.



L'énergie potentielle d'un objet de masse m sur un escalier dont les marches ont une hauteur h ne peut valoir qu'un multiple entier de mgh :

*1x mgh sur la 1^{ère} marche
2x mgh sur la 2^{ème} marche
etc...*

NB: dans cet exemple h représente la hauteur d'une marche et n'a rien à voir avec la constante de Planck.

Quantification.

Tout objet quantique (électron, proton, photon, ...) ne peut avoir que certaines valeurs discrètes (=non-continues) pour des propriétés telles l'énergie.

Note: je prends des exemples impliquant des vitesses. Rigoureusement je devrais choisir l'énergie qui est toujours quantifiée. Je prends la vitesse pour faire simple mais ce n'est pas toujours correct.

Analogie avec le monde classique:

- Une voiture peut avoir toutes les vitesses possibles par exemple entre 0 et 180 km/h:
Exemple: 20 ou 36 ou 75 ou 122 ou 173 km/h.
- Par contre, une particule quantique ne peut avoir que certaines valeurs bien précises pour la vitesse ou pour être plus exact l'énergie:
Exemple: si les vitesses prédites par la physique quantique pour la "voiture quantique" sont 20, 36, 72, 143 ou 1198 (sans unités)
→ on mesurera **TOUJOURS** soit 20 ou 36 ou 72 ou 143 ou 1198

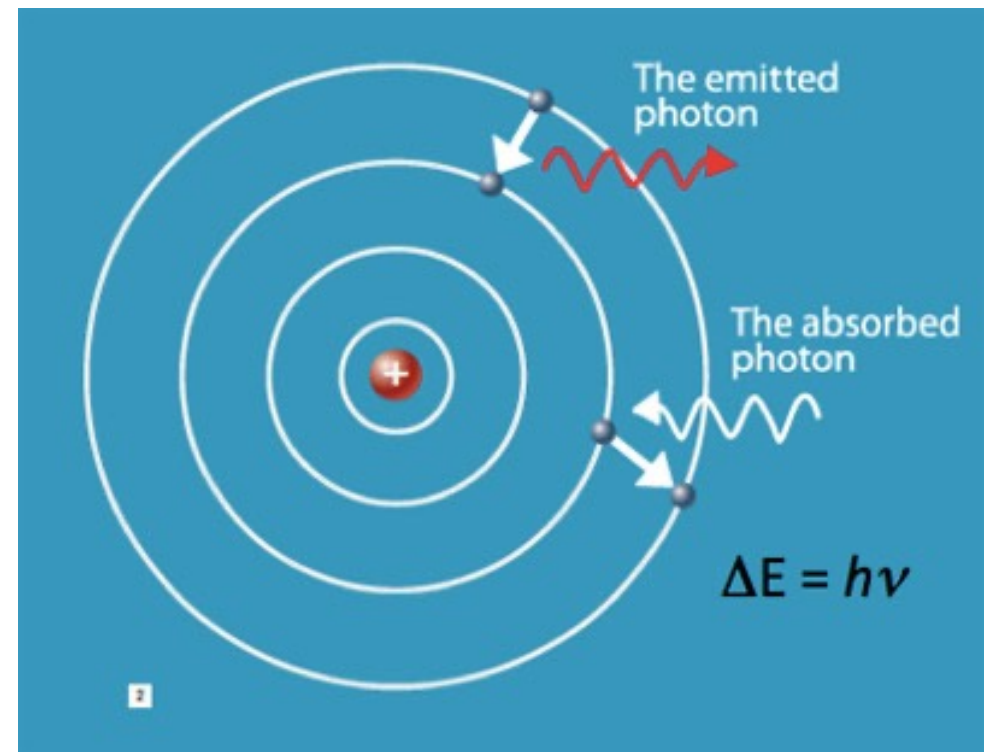
mais **JAMAIS** p.ex. 21 ou 34 ou 130 ou 729 (aux erreurs expérimentales près).

Quantification des énergies d'un électron Atome de Bohr (Hydrogène).

L'électron ne peut se déplacer que sur certaines orbites autour du noyau. Chacune de ces orbites correspond à une énergie différente de l'électron.

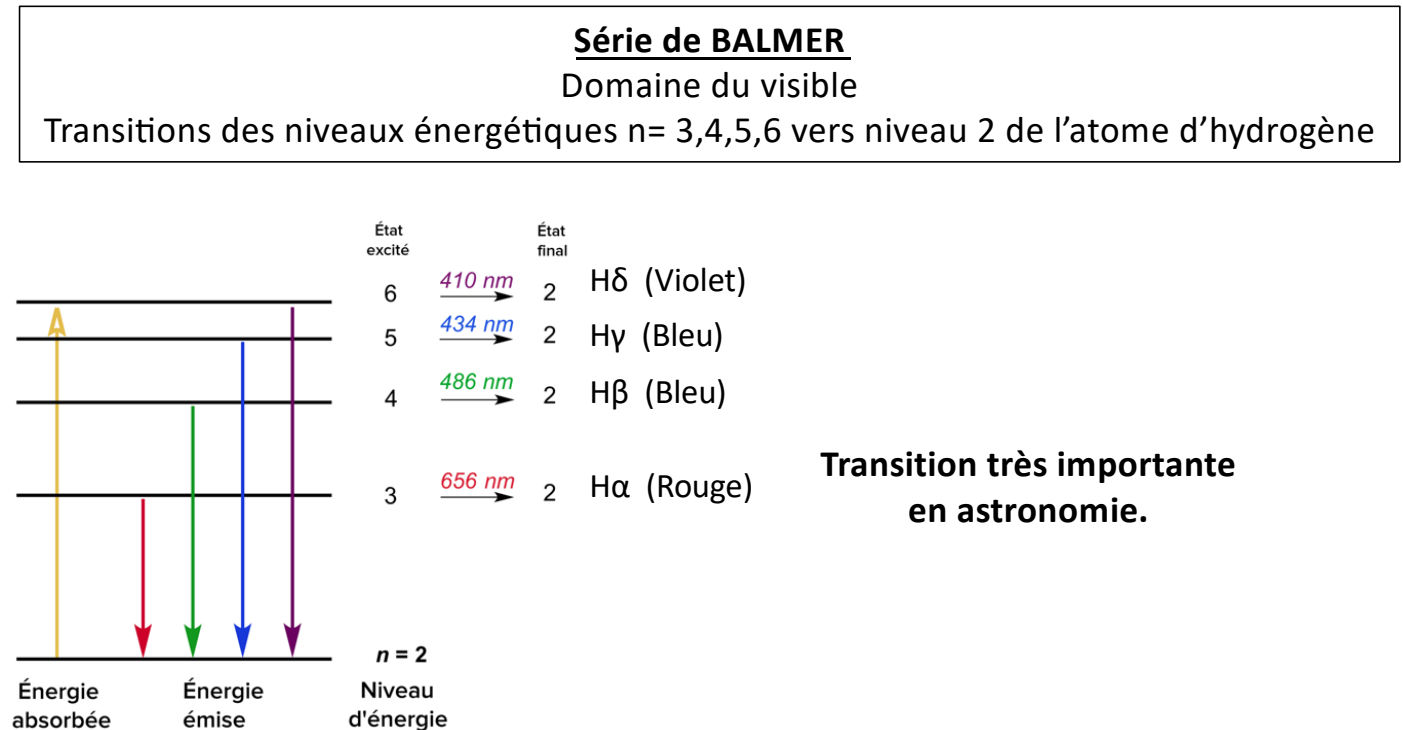
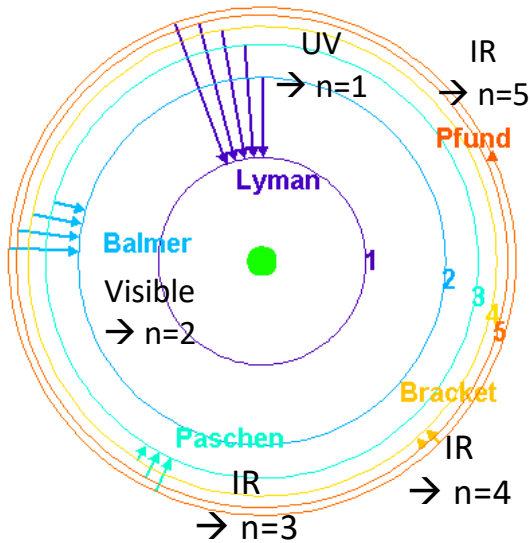
Quand un électron passe d'une orbite à une autre un photon peut être émis ou absorbé et **sa fréquence ν dépend de la différence d'énergie entre les deux orbites.**

Atome hydrogène: 1 proton et 1 électron



(On verra plus tard que ce modèle est vraiment idéalisé).

Raies spectrales de l'atome d'hydrogène.

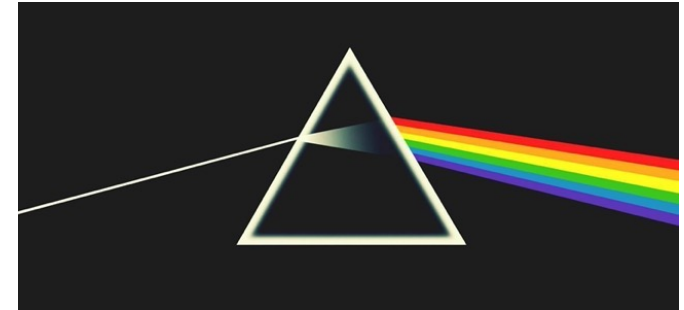


En 1913, Bohr explique les séries de Balmer avec son modèle atomique.

Application immédiate de la quantification de l'énergie : la spectroscopie.

Etude du spectre de rayonnement électromagnétique émis ou absorbé par une substance.

Chaque atome ou molécule possède '**SON**' spectre propre: c'est vraiment une **empreinte digitale de la substance**.



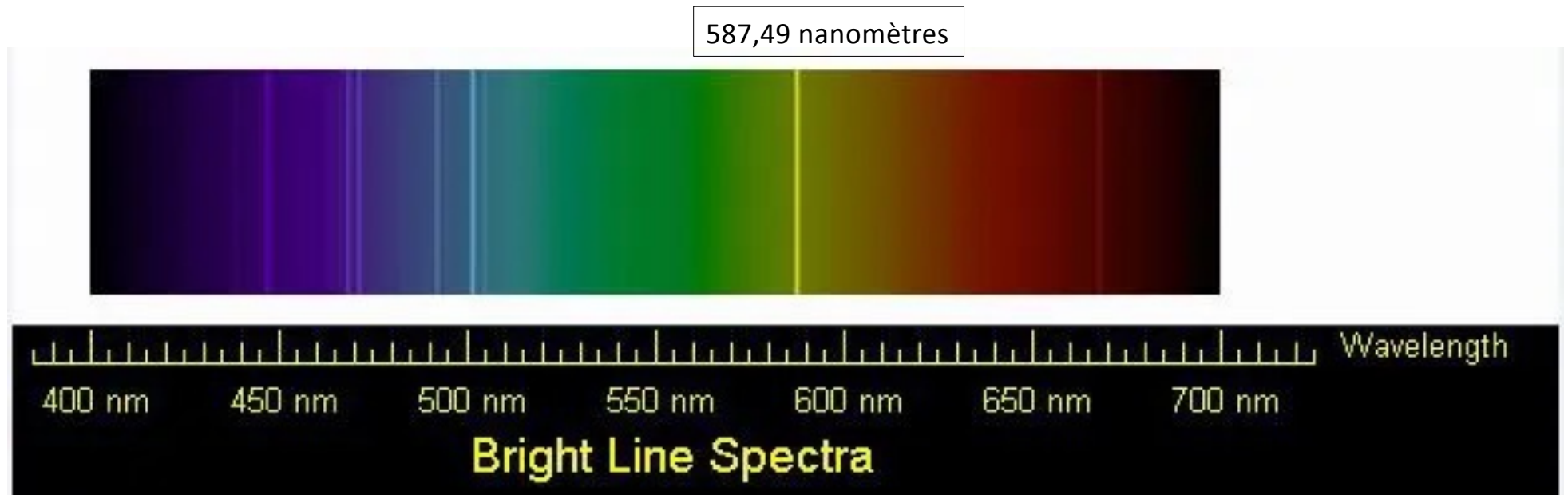
→ La spectroscopie joue un rôle primordial en astronomie.

Exemples:

- Composition chimique des planètes et des étoiles, des nuages interstellaires, etc...
- Mesure de la température et de la vitesse de déplacement des étoiles.

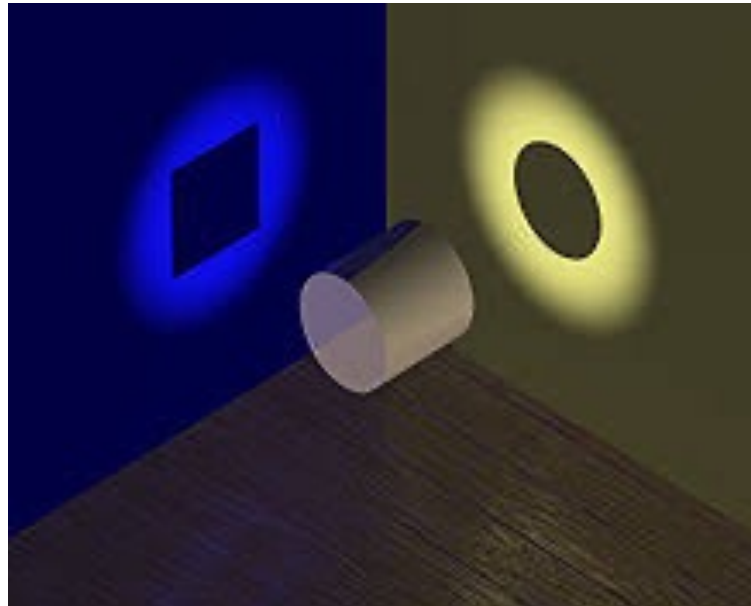
Découverte de l'Hélium grâce à la spectroscopie.

Découverte de l'Hélium (hélios) – élément alors inconnu sur Terre – dans le Soleil par Jules Janssens en 1864 lors d'une éclipse solaire.



Source: NASA

**Deux notions essentielles en physique quantique:
La dualité Onde – Particule et
le hasard quantique.**



Projection d'un cylindre sur un mur:
selon la direction d'éclairage on voit soit un rectangle soit un cercle

Dualité Onde – Particule (Einstein – Louis de Broglie).

Louis de Broglie (1892 – 1987). Prince. Mathématicien et physicien français. Prix Nobel de Physique 1929 « **pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons** ». Il a révolutionné la physique en généralisant à toute la matière la dualité onde-corpuscule proposée par Einstein pour la lumière.



Tout objet quantique (électron, proton, photon, ...) est à la fois un corpuscule, comme une petite bille, et une onde (appelée « onde de de Broglie »), comme une vague sur un lac.

https://youtu.be/JlsPC2BW_UI

(Référence: toutestquantique.fr)

(Expérience des fentes de Young).

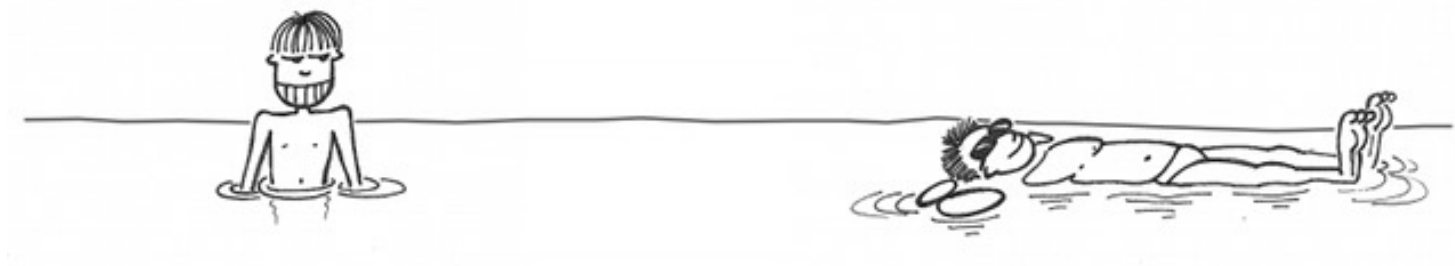


→ On ne peut plus parler de trajectoire au sens classique du terme:
on parle de **probabilité de présence dans l'espace**.

→ Perte du déterminisme et apparition des probabilités.

Qu'est-ce qu'une onde ?

Dans une piscine, un farceur veut éclabousser son copain.
Comment s'y prend-il ?



REF: Ressources libres de l'Observatoire de Paris

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=Définition,énergie%2C%20sans%20transport%20de%20matière

Crédit : B. Mollier

Qu'est-ce qu'une onde ?

Pas comme ça:

Une poussée directe projetée de l'eau... mais pas assez loin.
Le copain est toujours sec.



REF: Ressources libres de l'Observatoire de Paris

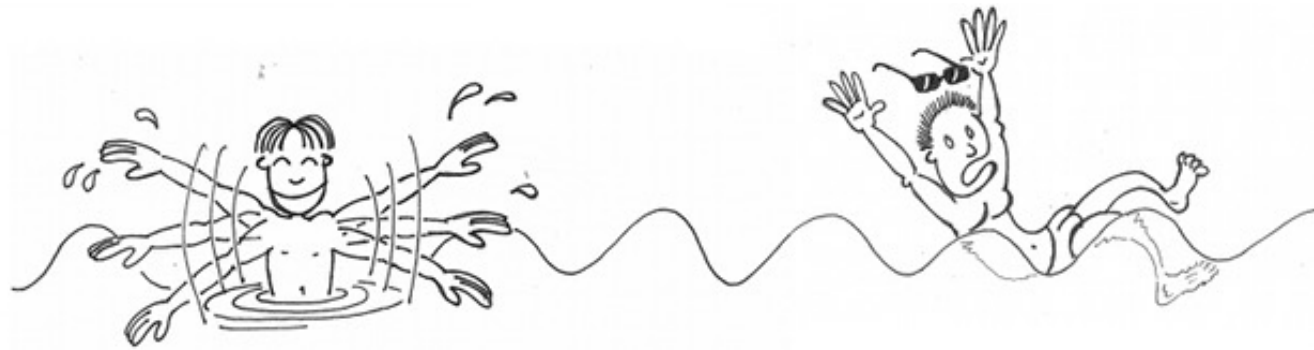
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=Définition,énergie%2C%20sans%20transport%20de%20matière

Crédit : B. Mollier

Qu'est-ce qu'une onde ?

... mais avec une onde:

s'il excite une onde, en agitant régulièrement les bras, le tour est joué !



Le train de vagues créé est une onde. Le farceur a communiqué de l'énergie à l'eau, en la mettant en mouvement de haut en bas, et celle-ci s'est propagée jusqu'au malheureux.

REF: Ressources libres de l'Observatoire de Paris

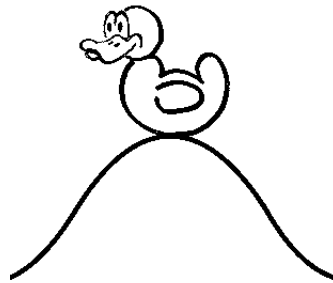
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=Définition,énergie%2C%20sans%20transport%20de%20matière

Crédit : B. Mollier

Qu'est-ce qu'une onde ?

Un enfant a oublié son canard en plastique dans la piscine. Notre victime pourra se consoler avec ce jouet, qui ira tout droit jusqu'à lui, porté par les vagues.

Et bien... non. Dommage pour lui, mais si on observe le canard, certes il oscille de haut en bas, mais il n'avance pas dans la piscine.



**C'est une propriété importante des ondes:
le transport d'énergie se fait sans transport de matière.**

REF: Ressources libres de l'Observatoire de Paris

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=Définition,énergie%2C%20sans%20transport%20de%20matière

Crédit : B. Mollier

En résumé qu'est-ce qu'une onde ?

Une onde se propage à partir de la source (le farceur) dans toutes les directions qui lui sont offertes (la piscine).

La perturbation se transmet de proche en proche avec transfert d'énergie (le canard oscille) mais sans transport de matière (le canard n'avance pas).

La vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu dans lequel elle se propage.



REF: Ressources libres de l'Observatoire de Paris

[https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=D%C3%A9finition,énergie%2C%20sans%20transport%20de%20matière](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_base-optique-geo/kezaco-onde.html#:~:text=D%C3%A9finition,%C3%A9nergie%20sans%20transport%20de%20mat%C3%A9rielle)

Dualité Onde – Particule

Principe de complémentarité (Niels Bohr).

Les aspects ondulatoire et corpusculaire de la matière sont complémentaires mais mutuellement exclusifs.

Analogie avec les 2 faces d'une pièce de monnaie:
on peut voir une face ou l'autre mais jamais les 2 à la fois.

Selon le type d'expérience que l'on réalise, on mettra une des 2 propriétés en évidence mais jamais les 2 simultanément.

Vérifié expérimentalement par Philippe Grangier et Alain Aspect en 1986!

Mise en évidence de la dualité onde-corpuscule des particules.

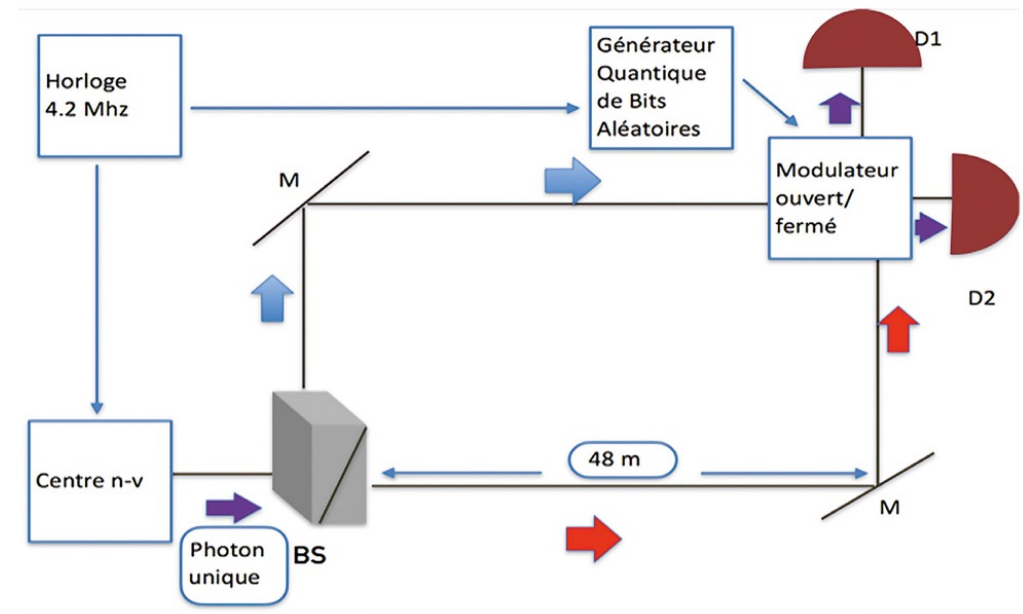
Corpuscule → Localisation → Un point sur l'écran.

Onde → Interférence, diffraction (quand une onde rencontre un obstacle ce dernier se comporte comme une source secondaire → on obtient 2 ondes qui peuvent s'ajouter ou se soustraire. Profil d'interférence sur l'écran.

Voir vidéo pg 43

Expérience sur la dualité onde-corpuscule de la lumière.

- Des photons sont envoyés 1 à 1 dans un interféromètre. La longueur totale du trajet est 48 m (160 ns pour que les photons parcourent cette distance).
- **Au tout dernier moment, bien après que le photon est parti, l'expérimentateur décide de manière aléatoire quelle propriété il va mesurer: corpuscule ou onde?**
- Selon le type de mesure choisit on trouve effectivement un corpuscule ou une onde!!!



L'observation crée le résultat de la mesure comme prédit par Bohr !

Mise en évidence de la dualité onde-corpuscule des particules.

«Ce comportement différent (càd onde ou corpuscule) peut également s'observer avec des électrons, des neutrons et même des objets plus complexes comme des atomes ou des molécules ».

Ref: Alain Aspect, "Si Einstein avait su".

Dualité Onde – Particule.

Tout se passe comme si, quand on émet une particule (ex un électron), elle se transforme et se déplace comme une onde. Quand on l'intercepte par exemple sur un écran (= on la mesure) elle se reconvertit en particule → on détecte un impact.

Selon le formalisme de Copenhague, on dit qu'au moment où elle a été mesurée, **l'onde s'effondre instantanément en un point.**

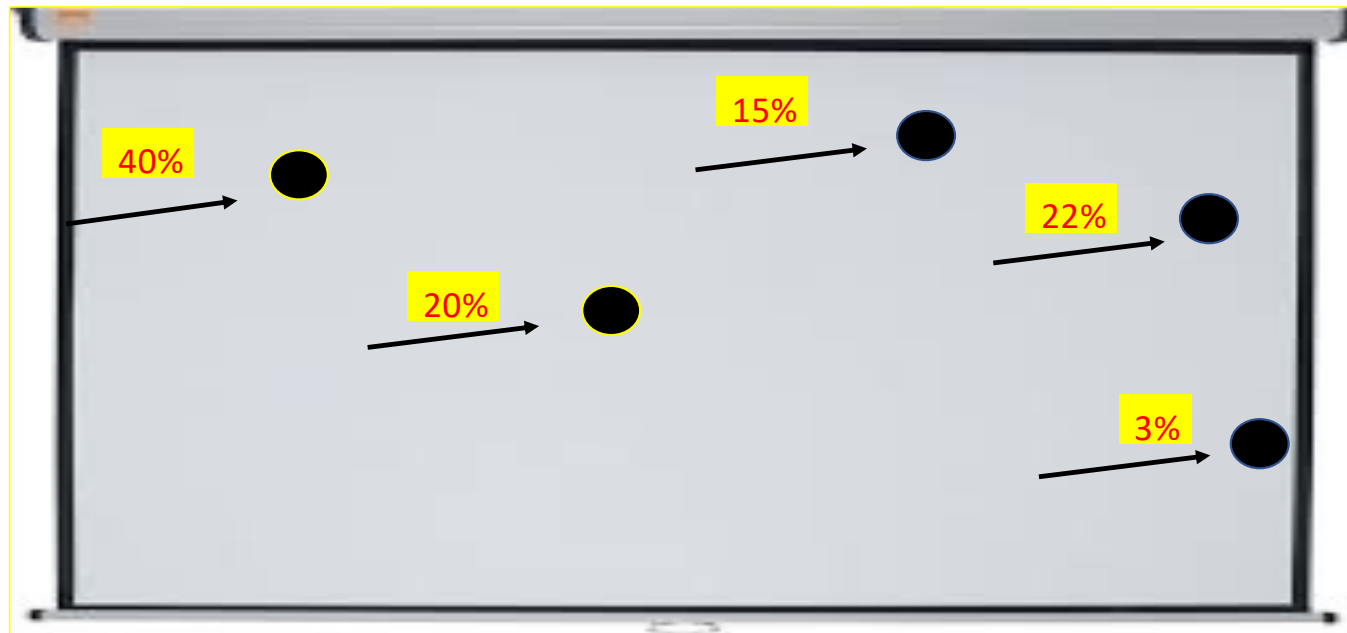


La position d'une particule dans l'espace est décrite en termes de probabilité de présence.

!!! Ceci est une analogie TRES simplifiée _ voire pas correcte _ cfr pg 70 !!!

Dualité Onde – Particule: le hasard quantique.

Le formalisme de la physique quantique de Copenhague donne des probabilités de trouver la particule à un certain endroit sur l'écran (et pas ailleurs).



**Principe
Essentiel:
HASARD
QUANTIQUE**

**Si on envoie un grand nombre d'électrons on trouvera cette distribution
mais chaque mesure donnera un résultat différent AU HASARD!!!**

Dualité Onde – Particule: le hasard quantique.

Analogie avec la voiture quantique dont j'ai parlé précédemment.

- Une voiture peut avoir toutes les vitesses possibles par exemple entre 0 et 180 km/h:
Exemple: 20 ou 36 ou 75 ou 122 ou 173 km/h.
- Par contre, une particule quantique ne peut avoir que certaines valeurs bien précises pour la vitesse ou l'énergie:

Exemple: si les vitesses prédites par la physique quantique pour la "voiture quantique" sont 20, 36, 72, 143 ou 1198 (sans unités)

→ on mesurera TOUJOURS soit 20 ou 36 ou 72 ou 143 ou 1198 **AU HASARD.**

Une probabilité est associée à chacune de ces valeurs

mais JAMAIS p.ex. 21 ou 34 ou 130 ou 729 (aux erreurs expérimentales près).

La théorie quantique donne des probabilités de résultats.

Le «hasard classique».

Il serait possible en principe de déterminer sur quelle face va tomber un dé que l'on lance si on connaissait précisément la force du lancer, la force du vent, le poids du dé, etc... Comme on ne connaît pas précisément ces paramètres, on ne peut prédire (actuellement) sur quelle face il va tomber. Peut-être qu'un jour ce sera possible.

**Hasard dû à des limitations techniques mais pas fondamental.
peut-être qu'un jour on pourra calculer précisément ces propriétés.**

Le «hasard quantique».

Le hasard est inhérent à la nature quantique des objets: on ne peut qu'obtenir des probabilités de résultats de mesure.

Niels Bohr explique la nécessité de faire appel à des probabilités dans le formalisme quantique par le principe de complémentarité: il faut tenir compte de l'interaction avec l'appareil de mesure qui induit lui-même une incertitude au système. Selon lui, **tant que l'on n'a pas mesuré la particule on ne peut rien dire sur son état.**

Hasard inhérent au formalisme → idée des variables cachées d'Einstein: ces variables donneraient une connaissance plus complète du système et élimineraient le besoin de faire appel aux probabilités.

PAUSE

Cédric Bardyn - Mécanique quantique (2024)

Je suis plein de points d'interrogation.

Je me demande

Si les choses ne sont que ce qu'elles sont,

Ou bien alors

Si je ne modifie pas leur polarité,

Si mon regard n'en change pas les photons ?

Les choses sont-elles telles que je les vois

Parce que c'est leur nature,

Ou parce que je les aborde de telle façon ?

Rien que le fait d'observer,

Quelle qu'en soit la façon...

Rien que le fait d'observer

Modifie l'équation.

C'est de la mécanique quantique.

C'est de la mécanique quantique !

Le Monde est fait de variables

Qui s'influencent entre elles,

Et dont chaque interaction

Modifie l'Équation

Nous sommes tous cause et conséquence,

Simultanément,

Comme des miroirs face à face

Qui se renvoient leurs reflets.

Comment démêler qui fait quoi ?

Qui projette ? Qui renvoie ?

Quelle est l'action que je prolonge ?

Et laquelle j'initie ?

Les choses sont-elles telles que je les vois

Parce que c'est leur nature,

Ou parce que je suis dans l'équation ?

Rien que le fait d'exister

Modifie l'équation.

Rien que le fait d'exister

Fait varier les photons.

C'est de la mécanique quantique.

La vie, c'est de la mécanique quantique !

PAUSE

Les choses ne sont pas figées
à ce que l'on voit d'elles.

Pour les humains, c'est pareil :

Mon regard peut tout changer.

Pour les humains, c'est pareil :

Mon regard peut tout changer !

Mon regard peut tout changer !

Mon regard peut tout changer !

Un regard bienveillant

Sur quelqu'un de peu avenant

Peut changer ce qu'il était.

Peut changer ce qu'il était !

La façon dont je te regarde

Peut changer qui tu es.

Les choses ne se résument pas
à ce que l'on voit d'elles.

Il y a tellement de puissance

Dans le choix de mes réactions

Si mon esprit voit plus loin

Que mes observations.

Les choses ne sont pas figées
à ce que l'on voit d'elles.

Même face à des grimaces,

Mon sourire peut tout changer.

Si la beauté est assez tenace,

Elle devient contagieuse.

Le monde est plus malléable

Que ce que l'on présume.

Si la beauté est assez tenace,

Elle devient contagieuse !

Le monde est plus malléable

Que ce que l'on présume !

C'est de la mécanique quantique !

Notion d'état ou de fonction d'onde d'un système quantique.

Un système quantique (ex: une particule) est caractérisé par son état qui contient toute l'information sur le système. C'est la fonction d'onde notée Ψ (lettre grecque PSI) ou un 'KET' (algèbre de Paul Dirac):

$| \text{ETAT} \rangle$ 'KET' (barre verticale et symbole 'plus grand que')

$| \text{ETAT 1} \rangle$ $| \text{Position 1 ; vitesse 1; spin 1 ; ...} \rangle$

$| \text{ETAT 2} \rangle$ $| \text{Position 2 ; vitesse 2; spin 2 ; ...} \rangle$

Analogie:

- Je suis à Gembloux et je me déplace à 3 km/h donc mon état est $| \text{Gembloux; vitesse 3 km/h} \rangle$.
- Vous êtes assis et votre état est $| \text{Gembloux; vitesse 0 km/h} \rangle$.

Le carré de la fonction d'onde donne la PROBABILITE DE PRESENCE de la particule en un point r de l'espace à l'instant t .

Principe de superposition

Probablement la propriété la plus importante de la mécanique quantique.

Si ETAT 1 et ETAT 2 sont des états possibles pour la particule,
alors la combinaison linéaire

$$\alpha \text{ ETAT 1} + \beta \text{ ETAT 2}$$

est AUSSI un état possible pour la particule.

→ Deux états peuvent s'additionner pour en former un 3^{ème} !!!

α , β peuvent être des nombres complexes

Principe de superposition

Probablement la propriété la plus importante de la mécanique quantique.

Une particule quantique peut exister dans plusieurs états (position, vitesse, énergie,...) avant d'être mesurée.

Chaque possibilité a une certaine probabilité et c'est au moment de la mesure que l'état de la particule est déterminé.

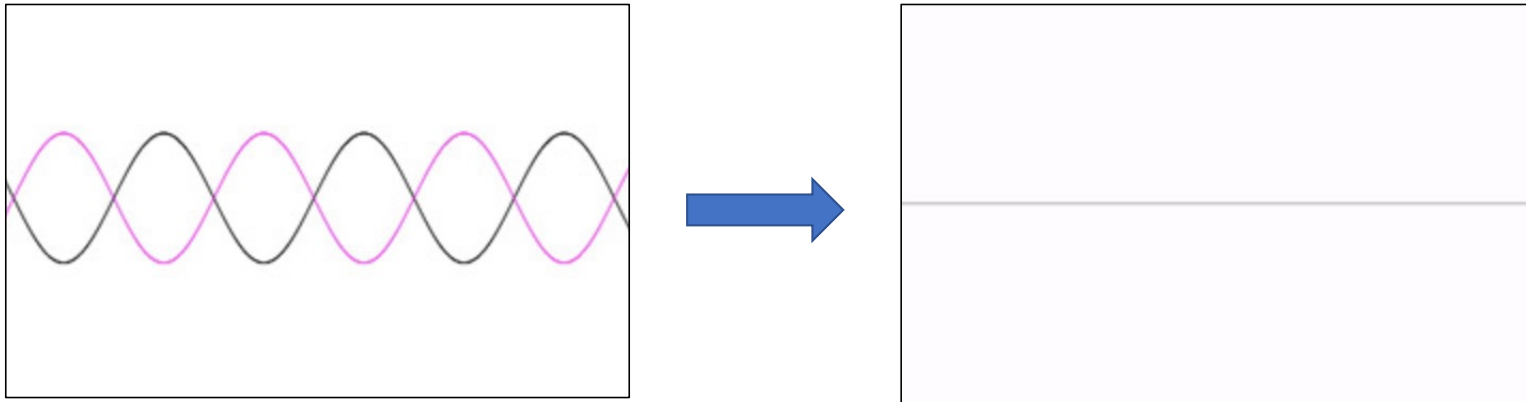
La mesure détruit la superposition.

Il n'y a bien entendu pas d'équivalent dans notre monde (physique classique).

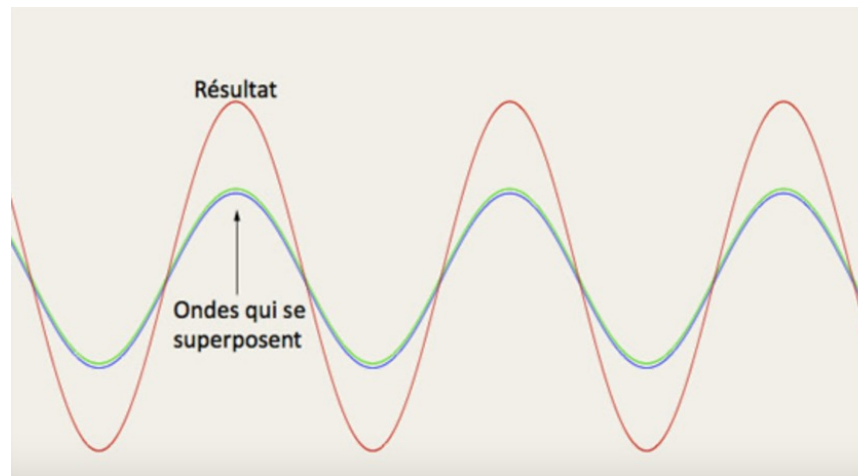
Propriétés des ondes: elles peuvent d'additionner.

Quand 2 ondes se rencontrent, elles **interfèrent**:

Elles peuvent s'annihiler:



Ou s'additionner:



Principe de superposition

Analogie avec le monde classique.

Note: je prends des exemples impliquant des vitesses. Rigoureusement je devrais choisir l'énergie qui est toujours quantifiée. Je prends la vitesse pour faire simple.

Exemples: Une particule peut avoir la vitesse de 100 km/s (ETAT 1) ou 200 km/s (ETAT 2).

ETAT 1 $| v = 100 \text{ km/s} >$

ETAT 2 $| v = 200 \text{ km/s} >$

1) Alors l'état superposé 50% ETAT 1 + 50% ETAT 2 est également possible

50% ETAT 1 + 50% ETAT 2 $\longrightarrow$ +50% $| v = 100 \text{ km/s} >$ +50% $| v = 200 \text{ km/s} >$

Note: rigoureusement il faudrait écrire $1/\sqrt{2}$ car les probabilités sont données par les coefficients au carré.

Si on fait des mesures on trouvera: 50% de fois l'ETAT 1 et 50% de fois l'ETAT 2.

Une particule quantique pourrait avoir deux positions, spins ou énergies différentes simultanément $\rightarrow$ elle est «superposée». C'est au moment de la mesure que l'état final est déterminé au hasard (avec une certaine probabilité) qui est donc impossible de prévoir avant la mesure. On dit que la fonction d'onde s'effondre sur un état particulier.

Principe de superposition Analogie avec le monde classique.

Exemple: Une particule peut avoir la vitesse de 100 km/s (ETAT 1) ou 200 km/s (ETAT 2).

ETAT 1 $| v = 100 \text{ km/s} >$

ETAT 2 $| v = 200 \text{ km/s} >$

2) On pourrait aussi avoir p.ex. 70% l'ETAT 1 + 30% ETAT 2

$70\% | v = 100 \text{ km/s} > + 30\% | v = 200 \text{ km/s} >$

Si on fait des mesures on trouvera: **70% de fois 100 km/s et 30% 200 km/s.**

Lors de chaque mesure on trouvera une des deux vitesses mais on ne pourra pas prédire laquelle → hasard quantique.



Rôle fondamental de la mesure.

Rappel parce que c'est important!

Une particule quantique pourrait avoir deux positions, spins ou énergies différentes simultanément → elle est «superposée». C'est au moment de la mesure que l'état final est déterminé au hasard (avec une certaine probabilité) qui est donc impossible de prévoir avant la mesure. On dit que la fonction d'onde s'effondre sur un état particulier.

C'est l'interprétation de l'école de Copenhague
(Niels Bohr, Werner Heisenberg, Paul Dirac,...).



Rôle fondamental de la mesure.

- Avant la mesure l'état du système est superposé entre les états 1 et 2: on dit que l'état du système n'a pas de sens avant la mesure.
- Lors de la mesure, la fonction d'onde du système «s'effondre» et un résultat bien précis est trouvé. (Rappel vidéo propagation des particules quantiques).
- Si l'on répète plusieurs mesures sur plusieurs systèmes on trouvera chaque fois un résultat bien précis mais (potentiellement) différent avec une probabilité différente:

Dans les exemples précédents on trouvera:

- 1) 50% ETAT 1 ou 50% ETAT 2
- 2) 70% ETAT 1 ou 30% ETAT 2.

MAIS on ne trouvera jamais un résultat différent (ex: jamais ETAT '7').

Note: si on mesure p.ex. ETAT 1 et qu'on re-mesure immédiatement après on retrouvera ETAT 1 → dans ce cas l'état du système est bien défini (le système s'est "effondré" sur l'état 1)

Formalisme de la physique quantique: l'école de Copenhague.

Niels Bohr (1885-1922) est un des pères fondateurs de la mécanique quantique. Il eut le Prix Nobel en 1922. En 1920, il créa l'Institut de physique théorique à Copenhague.

Lui et son équipe (Werner Heisenberg, Max Born, Paul Dirac, etc...) y ont vraiment mis au point le formalisme mathématique de la physique quantique.

Ce formalisme représente **l'interprétation orthodoxe** de la physique quantique (celui qui est enseigné majoritairement dans l'enseignement supérieur). Ce formalisme a donné des résultats impressionnants qui sont à la base de **la 1^{ère} révolution quantique** et maintenant de **la 2^{ème} révolution quantique**.



Interprétation de l'école de Copenhague.

1) La réalité n'existe pas en l'absence d'observations.

Le monde existe t'il si je ne l'observe pas? Toujours mon analogie avec la Lune ou vous. Si vous ou la Lune étiez un objet quantique, vous ou elle n'existeriez que si je vous observe!!!

Une particule quantique n'a pas de propriétés intrinsèques: cela n'a pas de sens de demander la position, la vitesse ou l'énergie d'un électron entre les mesures: ces propriétés ont un sens uniquement quand on les mesure.

Interprétation de l'école de Copenhague.

2) La **mesure** joue donc un rôle crucial dans le système:

l'interaction entre le système quantique (microscopique) et l'instrument de mesure (macroscopique) fait «s'effondrer» le système sur un état particulier **au hasard** (c'est le phénomène de «décohérence» critique notamment pour les ordinateurs quantiques).

C'est donc la mesure qui détermine le caractère **probabiliste** de la physique quantique :

Avant la mesure, le système est superposé entre plusieurs états ayant tous une certaine probabilité. On ne peut pas parler de l'état d'un système quantique sans l'avoir mesuré.

→ Différence fondamentale avec la mécanique classique:
si on mesure la vitesse d'une voiture on ne l'influence pas.

**«Ce que nous observons ce n'est pas la nature en elle-même,
mais la nature exposée à notre méthode d'interrogation».**

Werner Heisenberg



Résumé de l'interprétation de l'école de Copenhague (orthodoxe).

Une particule quantique n'a pas de propriétés intrinsèques.

Cela n'a pas de sens de demander la position ou la vitesse d'un électron entre les mesures: ces propriétés ont un sens uniquement quand on les mesure.

(c'est pourquoi l'analogie que j'avais faite précédemment page 56 est incorrecte).

Caractère **probabiliste** de la physique quantique:

avant la mesure le système est dans un état superposé. On ne peut pas parler de l'état d'un système quantique avant la mesure.

La physique quantique est précise et probabiliste.

Einstein n'était pas d'accord avec cette interprétation de Copenhague: pour lui le formalisme de la physique quantique était incomplet.

3 Raisons essentielles de son désaccord:

- 1) Il était un **REALISTE**: les choses existent en elle même, indépendamment de l'observateur.
- 2) Il contestait le caractère **PROBABILISTE** du formalisme.
- 3) Comme il était également le père de la relativité restreinte et générale, il était attaché à une propriété fondamentale de la nature: la **LOCALITE**.

A noter qu'Einstein ne s'opposait pas au formalisme de la physique quantique auquel il avait grandement contribué: pour lui, il fallait le compléter ou imaginer une autre théorie qui inclurait les acquis de cette physique quantique

→ Idée des variables cachées.

→ Entre Bohr et Einstein c'est un débat sur l'INTERPRÉTATION de la physique quantique – pas sur ses résultats.

InterprétationS de la physique quantique.

Deux points de vues opposés (cfr Congrès Solvay de 1927):

1. **Réalistes** (Einstein, De Broglie,...): **la science décrit la réalité telle qu'elle est.**

Einstein s'est toujours opposé à l'interprétation probabiliste de la physique quantique et donc à l'interprétation de Copenhague:

« Dieu ne joue pas aux dés ».

Il prétendait qu'il "manquait quelque chose" à la théorie quantique pour éliminer cet aspect probabiliste → idée des **variables cachées**: si on les trouvaient alors le besoin de faire appel aux probabilités disparaîtrait.

2. **Copenhague** (Bohr, Heisenberg ,...): **la science décrit la nature telle qu'on l'observe.**

Réponse de Bohr à Einstein: **« Ne dites pas à Dieu ce qu'il doit faire ».**

→ **Paradoxe EPR et intrication quantique.**

Le débat Einstein – Bohr en résumé.

Einstein, de Broglie, Schrödinger

La physique doit nous dire comment sont les objets et comment ils interagissent dans l'espace et le temps (réalisme).

La mécanique quantique fait appel aux probabilités → elle est incomplète.

L'effondrement de la fonction d'onde présente un caractère non-local (car elle est instantanée et donc s'oppose à la relativité).

« La physique doit être une vision du monde ».

Bohr, Pauli, Heisenberg

Impossible de décrire les objets quantiques. On ne peut que prédire les résultats des expériences que nous faisons sur eux.

La mécanique quantique est complète. Il faut tenir compte de l'appareil de mesure.

La fonction d'onde s'effondre lors de la mesure (hasard quantique).

« C'est de la métaphysique: la physique doit simplement nous dire quelle est notre interaction avec le monde ».

Congrès Solvay de 1927 à Bruxelles

- Consacré à la physique quantique.
- 17 participants sur 29 ont eu le Prix Nobel (mais une seule femme y a participé, Marie Curie qui a quand même eu 2 Prix Nobel... mais pas le droit de vote).
- Considéré comme essentiel pour l'essor de la physique quantique.
- Très grande opposition entre Einstein et Bohr sur l'interprétation de la physique quantique: sur base d'expériences de pensée, Einstein remettait en doute le caractère probabiliste du formalisme de Copenhague mais chaque fois Bohr trouvait la parade.



« La photo la plus intelligente de l'histoire ».



28, Avenue Louise, Bruxelles

	A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER		W. PAULI	W. HEISENBERG	R. H. FOWLER L. BRILLOUIN
		P. EHRENFEST			E. VERSCHAFFELT				
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN		N. BOHR
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON		O. W. RICHARDSON

InterprétationS de la mécanique quantique.

Entre les années 20 et les années 80, le débat entre l'école de Copenhague et les « réalistes » (Einstein, de Broglie,...) ne fut jamais tranché.

Points culminants de ce débat:

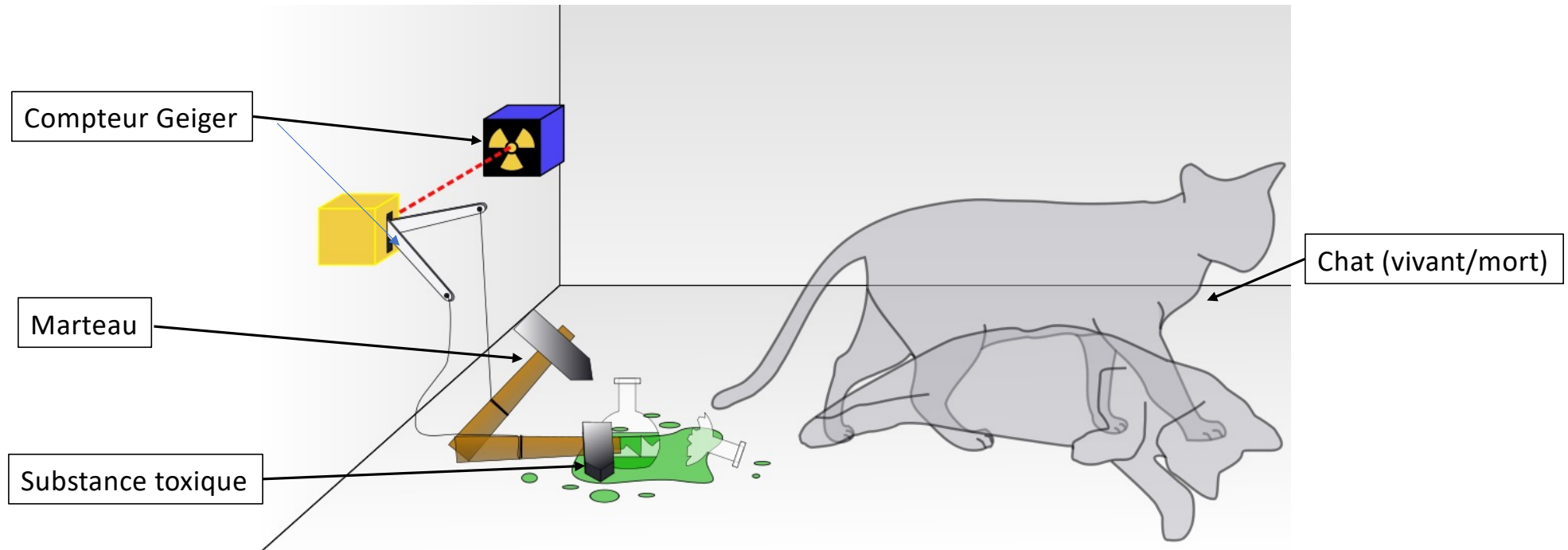
1935: Paradoxe EPR* (Einstein, Podolski, Roosen) et **Chat de Schrödinger.**

Ce sont deux expériences de pensée sensées démontrer le caractère incomplet de la physique quantique et réfuter l'interprétation de Copenhague.

* Cfr l'intrication quantique.

Le chat de Schrödinger (1935).

Expérience de pensée imaginée par Schrödinger pour démontrer que l'interprétation de Copenhague était fausse notamment sur le rôle de la mesure.



Note: Einstein avait imaginé la même expérience avec un baril de poudre.

Le chat de Schrödinger (1935).

- Un chat est enfermé dans une boîte avec un échantillon de substance radioactive qui a une chance sur 2 de voir un atome se désintégrer en une heure.
- Si l'atome se désintègre alors la particule radioactive est détectée par un détecteur de radioactivité (Geiger) qui va libérer un marteau. Ce marteau va casser une fiole contenant un produit (acide cyanhydrique) qui va tuer le chat.
- S'il n'y a pas désintégration de la particule radioactive alors bien entendu rien ne se passe.



Après une heure le chat a une chance sur deux d'être mort.

Le chat de Schrödinger – Interprétation de Copenhague.

La substance radioactive a une demi-vie de 1 heure → après une heure on a 50 % de chance d'avoir l'atome intact et 50% de chance de l'avoir désintégré:

$$\text{ETAT atome} = 50\% | \text{Intact} \rangle + 50\% | \text{Désintégré} \rangle$$

Comme la boîte est fermée on ne peut pas dire si la particule est désintégrée ou intacte et donc **le chat est dans un état superposé mort et vivant:**

$$\text{ETAT chat} = 50\% | \text{mort} \rangle + 50\% | \text{vivant} \rangle$$

Note: rigoureusement il faudrait écrire $1/\sqrt{2}$ car les probabilités sont données par les coefficients au carré.

ce qui du point de vue de Schrödinger et Einstein est évidemment totalement inepte: on n'a jamais vu de chat à la fois mort et vivant!!!

Au moment d'effectuer la mesure (ouvrir la boîte) l'état final du système est déterminé:

Atome intact → chat vivant ou Atome désintégré → chat mort

AU HASARD !!!

Ce que Schrödinger & Einstein voulaient démontrer par cette expérience.

Ils voulaient surtout mettre en question le passage du monde quantique au monde macroscopique. Qu'est-ce « **observer** »? Faut-il une « conscience »? Est-ce qu'une petite souris pourrait le faire ou faut-il un cerveau humain???

De plus les états superposés n'existent pas dans le monde macroscopique: soit le chat est mort, soit il est vivant. Ils refusent d'admettre que le chat n'ait pas d'état défini tant qu'on ne l'observe pas : le monde existe même si on ne l'observe pas. C'est toujours le **REALISME**.

(La Lune existe en elle-même en tant qu'entité physique même si je ne la vois pas).

Le chat de Schrödinger – Interprétation « plus moderne ».

- Avant d'ouvrir la boîte (faire la mesure) le chat est dans un état intriqué (superposé) = les 2 états (mort et vivant) sont possibles avec une certaine probabilité et ce n'est qu'au moment de l'ouverture de la boîte (de la mesure) que nous (observateur) allons voir si le chat est 'mort' ou 'vivant'. **Le chat lui 'sait' s'il est mort ou vivant – pas l'observateur qui, lui, ne peut que donner une probabilité de vie ou de mort.**
- En fonction du temps la probabilité va varier:
 - Temps faibles (peu de chance de désintégration de la particule radioactive) → plus de chance d'avoir le 'chat vivant'
 - Temps longs (d'avantage de chance de désintégration) → plus de chance 'chat mort'.

Le chat de Schrödinger – Interprétation d'Everett Théorie des mondes multiples.

Le monde se subdivise en 2:

1. Un monde où, pour l'observateur, le chat est mort

et

2. " " " " le chat est vivant.

Ces 2 mondes sont totalement inaccessibles l'un à l'autre.

L'équation de Schrödinger.

Donne l'évolution de la fonction d'onde càd de l'état du système au cours du temps.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Pour la petite histoire:

En 1935, Erwin Schrödinger (Autriche 1887 – 1961, Prix Nobel 1933) décide de passer les fêtes de fin d'année dans une station de ski dans les Grisons avec l'une de ses multiples maîtresses. Il fit la confidence à l'un de ses amis que c'est suite à «un épisode érotique fulgurant et tardif» qu'il découvrit cette équation.



InterprétationS de la physique quantique.

Années 1920 – 80: considérant les bons résultats produits par le formalisme de Copenhague, la plupart des physiciens ne se posaient pas de questions sur les aspects “interprétations” et faisaient de nombreuses nouvelles découvertes:

Période du «Shut up and calculate» («te pose pas de question et calcule»).

En **1964** John Bell proposa une méthode pour permettre de trancher expérimentalement le débat sur les variables cachées (« Inégalités de Bell »).

En **1982** Alain Aspect et son équipe démontrent que:

**La mécanique quantique est complète: il n’y a PAS de variables cachées
→ Einstein avait «tort» (mais c’est quand même lui qui a découvert l’intrication) et Bohr «raison».**

Conséquences de la dualité onde – particule:
1) Le principe d'indétermination d'Heisenberg.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054\,571\,628 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Δx = précision avec laquelle on mesure la position d'une particule.

Δp = précision avec laquelle on mesure la quantité de mouvement (càd masse x vitesse) d'une particule.

→ Le produit des précisions de mesure sur la position et la vitesse d'une particule ne peut être inférieur à une certaine limite.

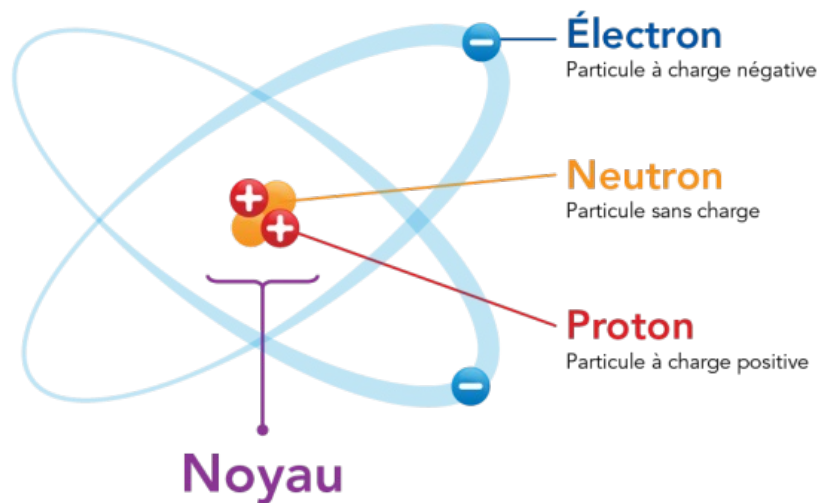
→ **On ne peut pas mesurer précisément et simultanément la position ET la vitesse d'une particule.**

**Rien à voir avec la précision expérimentale:
c'est une propriété intrinsèque des particules.**

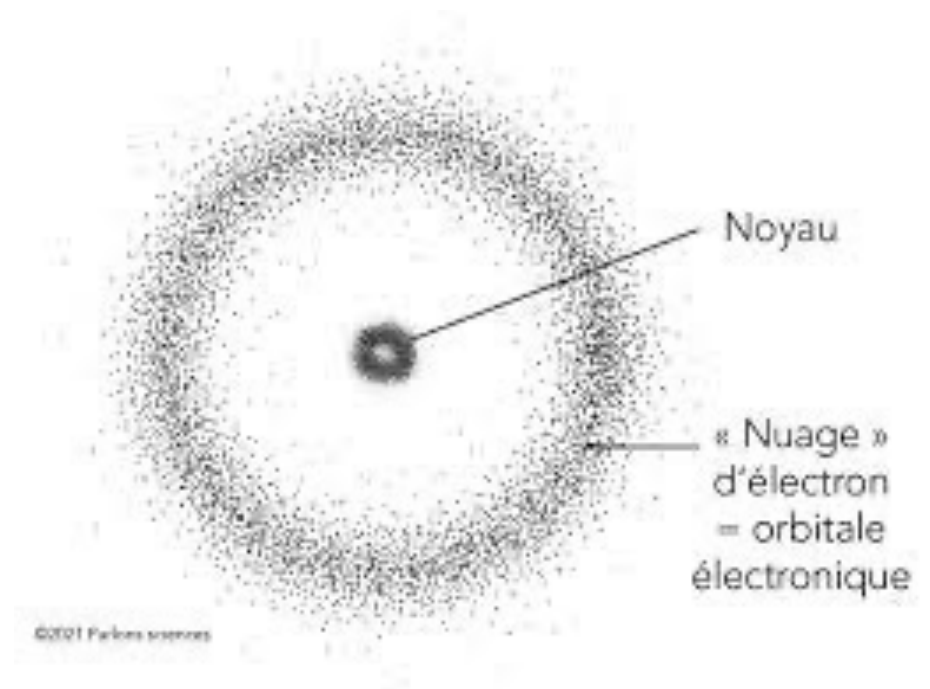
Conséquence du principe d'indétermination d'Heisenberg: Modèle atomique plus exact que celui de Bohr.

VISION TRADITIONNELLE: similarité avec le système planétaire. L'électron tourne autour du noyau sur une orbite bien définie (quantifiée).

Atome



VISION QUANTIQUE: nuage électronique. Plus forte probabilité de trouver l'électron dans les parties les plus denses.

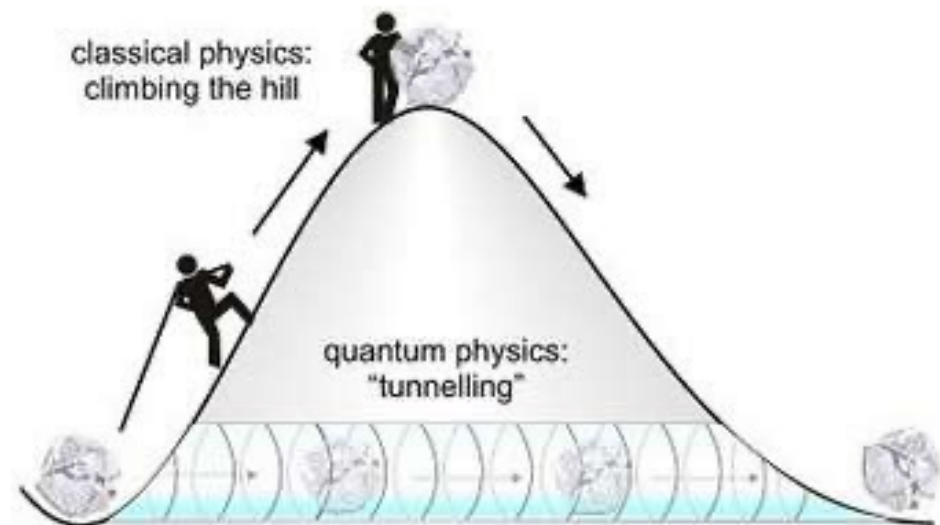


Conséquences de la dualité onde – particule: 2) L'effet tunnel quantique.

Un objet quantique peut franchir une barrière même si son énergie est inférieure à l'énergie minimale requise pour la franchir. C'est dû à l'aspect ondulatoire de la particule et au caractère probabiliste de la physique quantique.

Plus la masse de l'objet est faible et plus la barrière est petite, plus elle a une chance de passer de l'autre côté.

→ Je ne passerai jamais le Ventoux à vélo!



Futura Sciences et Max Planck Institute for Quantum Optics

Effet purement quantique – aucune analogie classique.

Importance de l'effet tunnel en astrophysique. La fusion nucléaire stellaire.

Pour fusionner l'hydrogène en hélium il faudrait une température de 15 milliards de degrés. Dans le cas du Soleil, la température du cœur n'est «que» 15 millions de degrés mais l'effet tunnel permet la fusion de l'hydrogène en hélium dans les étoiles:

- Chaque seconde 600 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent. La masse du Soleil est de $2 \cdot 10^{30}$ kg (2 suivi de 30 zéros).
→ Depuis sa naissance le Soleil a perdu environ 4% de sa masse.
- 1 m³ de Soleil dégage 0,3 Watt/seconde → **très faible** mais grâce à ce faible rendement la durée de vie du Soleil est estimée à 10 milliards d'années.

Le faible rendement de la fusion atomique dû à la rareté de l'effet tunnel explique la longévité du Soleil.

Principe d'exclusion de Pauli.

Dans un atome il ne peut y avoir deux électrons qui ont les mêmes nombres quantiques (il y a 4 nombres quantiques au total par électron). C'est ce qui définit les orbitales **s** (2 électrons), **p** (6), **d** (10),...que nous avons apprises à l'école.

→ Un atome occupe un certain volume et ne peut être compressé au-delà d'un certain niveau.

→ Explique la stabilité de la matière et pourquoi on ne passe pas à travers sa chaise.

Sans ce principe les électrons d'un atome iraient tous se loger sur l'orbitale la plus basse, celle de moindre énergie

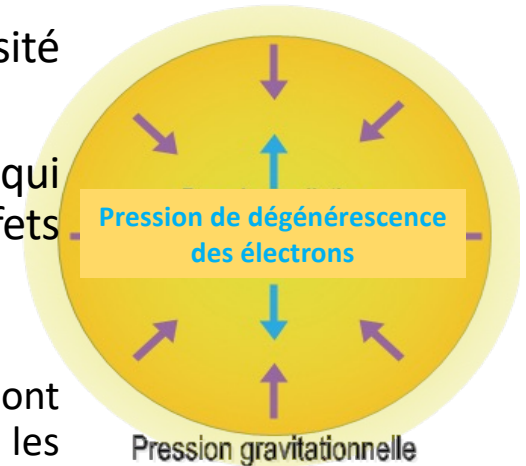
Stabilité des naines blanches.

Résidu d'une étoile ayant 8 fois la masse solaire au maximum de très forte densité ($1 \text{ tonne} / \text{cm}^3$) et de faible rayon (7000 km).

Ce sont des étoiles stables grâce à l'équilibre entre la pression gravitationnelle, qui tend à comprimer l'étoile, et la pression de dégénérescence électronique (effets quantiques):

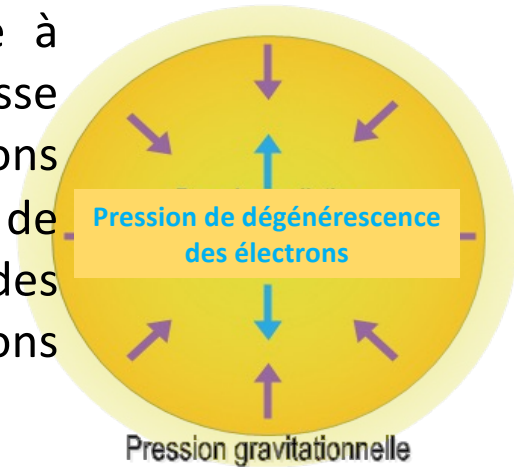
A cause des principes d'indétermination d'Heisenberg (plus les électrons sont localisés au plus ils vont vite) et d'exclusion de Pauli (2 électrons ne peuvent avoir les mêmes états quantiques) le mouvement des électrons dans le cœur de l'étoile, comme ils sont comprimés, va devenir de plus en plus frénétique.

Ils génèrent donc une pression (= pression de dégénérescence) qui va contrebalancer la gravitation. On parle de particules dégénérées (électrons occupant des niveaux de hautes énergies).



Stabilité des étoiles à neutrons.

Même principe que les naines blanches sauf qu'ici, comme l'étoile à neutron est le résidu d'une étoile très massive (entre 8 et 25 fois la masse solaire), lors de l'effondrement du cœur de l'étoile quand les réactions nucléaires ont cessé, la densité devient tellement élevée dans le cœur de l'étoile ($4 \cdot 10^{17} \text{ kg/cm}^3$ = densité nucléaire _ une cuillère à café pèse des centaines de millions de tonnes) que les électrons se combinent aux protons pour former des neutrons et des neutrinos .



A cause de la pression, les neutrons deviennent dégénérés suite aux principes d'indétermination d'Heisenberg et d'exclusion de Pauli.

→ Cette pression de dégénérescence des neutrons stabilise l'étoile.

La constante de Planck.

$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J.s (énergie x durée = action)}$$

- Constante universelle omniprésente en physique quantique.
- Relie l'énergie d'un photon à sa fréquence (**$E = h \nu = h c / \lambda$**):
Energie de l'ordre de $3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ pour un photon de lumière visible
→ **très petit** (1 Joule = énergie fournie par une puissance de 1 Watt pendant 1 seconde).
- Sa valeur a été fixée en mai 2019 et sert également à déterminer la valeur du kilogramme (qui avant cela était défini par un kg étalon détenu au Pavillon de Breteuil, siège du Bureau International des Poids et Mesures, à Paris).

La constante de Planck définit la frontière entre les mondes 'classique' et 'quantique'.

Calcul de la définition du kilogramme.

Constantes définissant le Système International (20 mai 2019)

Le kilogramme est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

- la fréquence de la transition hyperfine du césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$
- la vitesse de la lumière dans le vide c
- la constante de Planck h
- la charge élémentaire e
- la constante de Boltzmann k
- la constante d'Avogadro N_A
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique défini K_{cd}

Constante	Valeur numérique	Unité
$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
c	299 792 458	m s^{-1}
h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
k	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
N_A	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
K_{cd}	683	lm W^{-1}

Constante Planck $h = \text{J.s} \rightarrow 1 \text{ J} = h / \text{s}$ et $1 \text{ J} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$

$\rightarrow 1 \text{ kg} = h . \text{m}^{-2} . \text{s} = 6,62607015 \times 10^{-34} / (299\,792\,458)^2 \times 1/9\,192\,631\,770$

Rappel sur la relativité:

1 mètre = longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.

Limite classique.

Exemple: Longueur d'onde associée un grain de poussière d'un diamètre de 0,001 mm, d'une masse d'un dixième de microgramme (10^{-10}kg) se déplaçant à la vitesse de 1 m/s: $= 6 \cdot 10^{-24} \text{ m}$ <<< diamètre du grain.

(NB: Longueur d'onde rayon gamma de l'ordre de 10^{-12} m)

Aucun phénomène ondulatoire ne peut apparaître → le caractère ondulatoire de la matière apparaît lorsque la longueur d'onde devient de l'ordre des dimensions atomiques

→ La physique quantique n'est pas applicable à ce grain de poussière (= il suit les lois de la mécanique classique).

La physique quantique ne s'applique pas même au plus petit objet visible à l'œil nu.

Temps, longueur et température de Planck:

Valeurs limites au-delà desquelles nos théories physiques (relativité et quantique) n'ont plus de sens. Elles sont calculées directement à partir des constantes universelles (constante de Planck, vitesse de la lumière et constante de gravitation).

Temps: $t_p = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$

Longueur: $l_p = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$

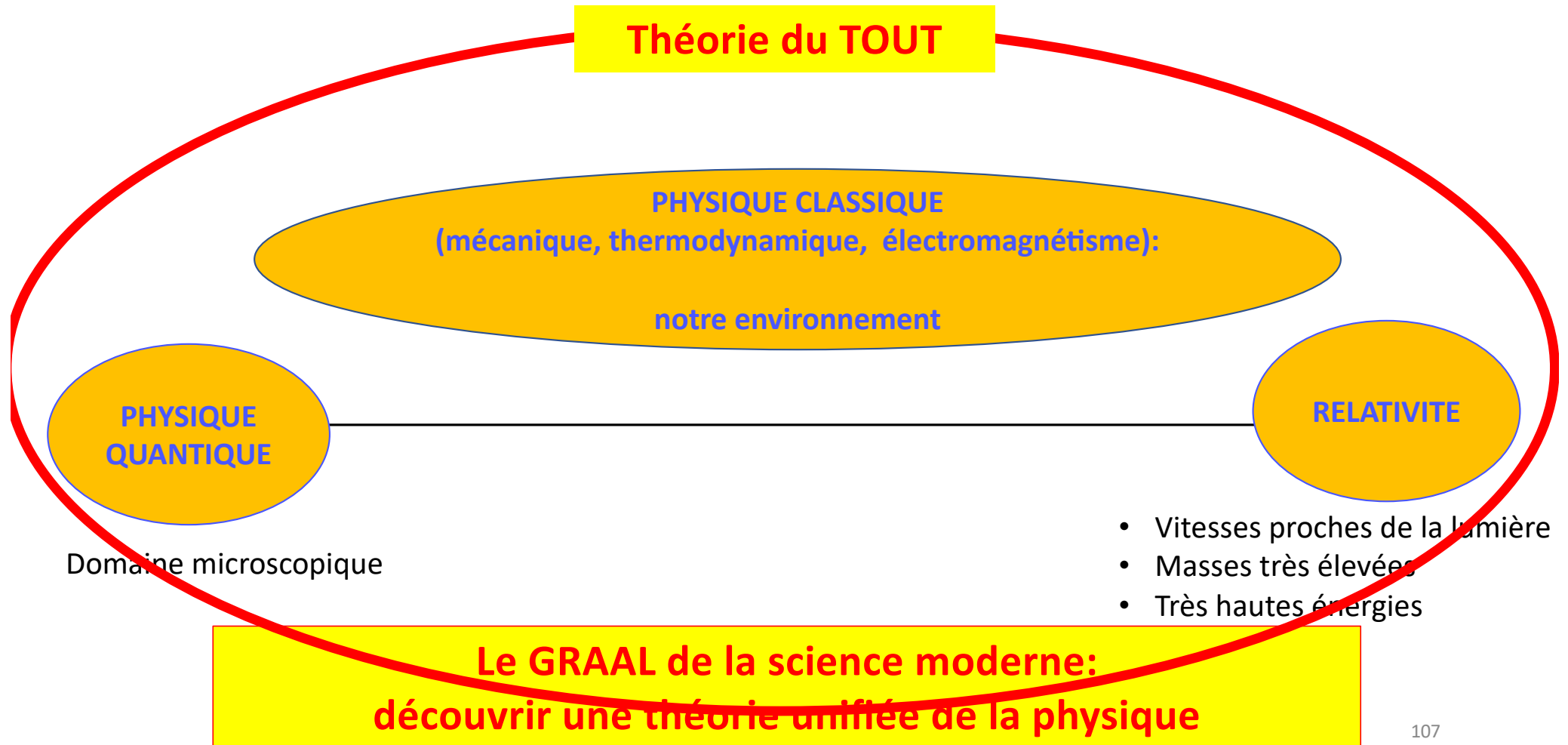
Température: $T_p = 1,4 \cdot 10^{32} \text{ K}$

**« Mur de Planck » qui nous empêche
de remonter aux origines de l'Univers.**

→ Raison pour laquelle il faut unifier les théories de la relativité générale et la mécanique quantique:

Théorie du TOUT (unification de la physique).

Domaine d'application de « nos » théories physiques actuelles.



La théorie du TOUT pour expliquer les origines de l'univers et les trous noirs.

Cette 'théorie du TOUT' combinant relativité générale et mécanique quantique pourrait:

- Nous permettre de remonter aux moments initiaux de l'univers.
- Expliquer réellement ce qui se passe à l'intérieur d'un trou noir (singularité au centre du trou noir).

Bien entendu cette physique du TOUT doit préserver les acquis des théories physiques actuelles.

Théories candidates: cordes, gravitation quantique à boucles, etc...

**Le Graal de la physique moderne:
Comment concilier les 2 piliers de la physique moderne?**

Relativité:

Espace-temps élastique
selon son contenu.

Déterministe.

Localité:

Aucune information ne peut se transmettre
plus vite que la vitesse de la lumière.

???



Mécanique quantique:

Espace-temps rigide.

Hasard inhérent à la théorie.

Non-localité:

2 objets éloignés peuvent interagir
instantanément.

Comment concilier l'inconciliable???

La théorie du TOUT pour expliquer les origines de l'univers et les trous noirs.

« L' intellect à la recherche d'une théorie intégrée ne peut pas se contenter de l'hypothèse qu'il existe deux domaines distincts totalement indépendants l'un de l'autre par leur nature ».

Albert Einstein - Discours Nobel (1923)

« On ne peut rendre compte parfaitement des trous noirs tant que nous n'avons pas élaboré une théorie de la gravité unifiée, capable de concilier les lois de la physique quantique des échelles subatomiques avec celles de la relativité générale qui rend compte de l'astronomie ».

Stephen Hawking (2014)

Ce qu'il faut retenir de cet exposé sur la physique quantique (1).

- Les problèmes que la physique classique ne pouvait résoudre comme ceux du rayonnement du corps noir, de la radioactivité ou des spectres atomiques ont été résolus grâce à la physique quantique.
- Le formalisme de cette physique a conduit à la création d'outils que nous utilisons tous les jours (ex GSM, GPS, lasers, etc...). Une seconde révolution quantique est en cours (ordinateurs, cryptographie, métrologie,...).
- Malheureusement pour notre sens commun et notre intuition, le monde microscopique, très bien décrit par ce formalisme qui n'a jamais été mis en défaut, suit des lois qui nous apparaissent très étranges (voir pg suivante).

Ce qu'il faut retenir de cet exposé sur la physique quantique (2).

- Un objet quantique tel électron, proton, photon, ... ne peut avoir que certaines valeurs discrètes (=non-continues) pour des propriétés telles l'énergie et la vitesse.
- A l'échelle microscopique, la distinction entre onde ou particule disparaît, ce sont des descriptions complémentaires. Selon le type d'expérience que l'on fait, on mettra en évidence le caractère soit ondulatoire soit corpusculaire d'une particule. Jamais les deux à la fois.
- Le déterminisme de notre monde courant est remplacé par la probabilité. Un système quantique peut être dans des états "superposés" et ce n'est que lors d'une mesure que son état final est déterminé. C'est le hasard quantique.

Le mot de la fin

Le débat sur l'interprétation de la physique quantique peut être considéré comme clos.

Le formalisme est « **exact** » (=reproduit les expériences et a permis de faire des prédictions qui se sont avérées correctes) et « **complet** » (il n'y a pas de variables cachées) ...

...mais, il faut l'admettre, le monde de l'infiniment petit obéit à des règles fondamentalement différentes de notre monde habituel.

Le formalisme de Copenhague de la physique quantique n'a jamais été mis en défaut.

Bibliographie Générale

- Richard Feynman, Robert Leighton & Matthew Sands – Le cours de physique de Richard Feynman (Dunod, 2014)
- Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë – Mécanique quantique I et II (1977)
- Michael Lobet – cours de Mécanique Quantique (Université de Namur)
- Guy Terwagne – cours d’astrophysique (Université de Namur)
- Carlo Rovelli – Helgoland (Flammarion 2020)
- Jean-Louis Basdevant – 15 leçons de mécanique quantique (Deboeck 2019)
- ♥ • Etienne Klein – Petit voyage dans le monde des quanta (Flammarion 2016)
- Julien Bobroff – Bienvenue dans la nouvelle révolution la quantique (Flammarion 2022)
- Catherine D’Oultremont et Marina Solvay – Fantaisies quantiques (Saint Simon 2020)
- ♥ • **Manjit Kumar – Le grand roman de la physique quantique (LibresChamps – 2011)**
- Stephen Hawking – Brèves réponses aux grandes questions (Odile Jacob -2018)
- Roland Lehoucq, Judith Lorne – Pourquoi le Soleil brille?
<https://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Documents/pourquoi-le-soleil-brille.pdf>
- Pour La Science _ Hors-série n° 122 02.24_ Physique quantique et réalité _

Cours en ligne et vidéos

- Science étonnante: Les inégalités de BELL & les expériences d'Alain ASPECT
<https://www.youtube.com/watch?v=28UN70790Do>
- MOOC Introduction à la physique quantique: <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/introduction-a-la-physique-quantique/>
- Christophe Galfard: Introduction à la physique quantique (4 avril 2020)
<https://www.youtube.com/watch?v=SmGsVUXRWWY>
- Science étonnante: les 7 merveilles de la mécanique quantique
<https://scienceetonnante.com/2013/09/30/les-7-merveilles-de-la-mecanique-quantique/>
- Vidéos générales:
<https://sciences.brussels/mq/#linkdown4>
- Etienne Klein: Principe de Heisenberg : "aucune incertitude, seulement de l'indétermination"
<https://www.dailymotion.com/video/x27oilm>

Sites Web de Référence

- Wikipedia
- Futura Science
- toutestquantique.fr
- Revue *Pour La Science*
- <https://scienceetonnante.com/2018/07/20/plongee-au-coeur-des-etoiles/>
- [http://www.vulgarisation-scientifique.com/wiki/Pages/Chat de Schrödinger](http://www.vulgarisation-scientifique.com/wiki/Pages/Chat_de_Schrödinger)
- Fermesdesetoiles.com
- <https://sciences.brussels/mq/>
- Astronomia – site du LAM (Laboratoire Astrophysique de Marseille) <https://www.lam.fr>