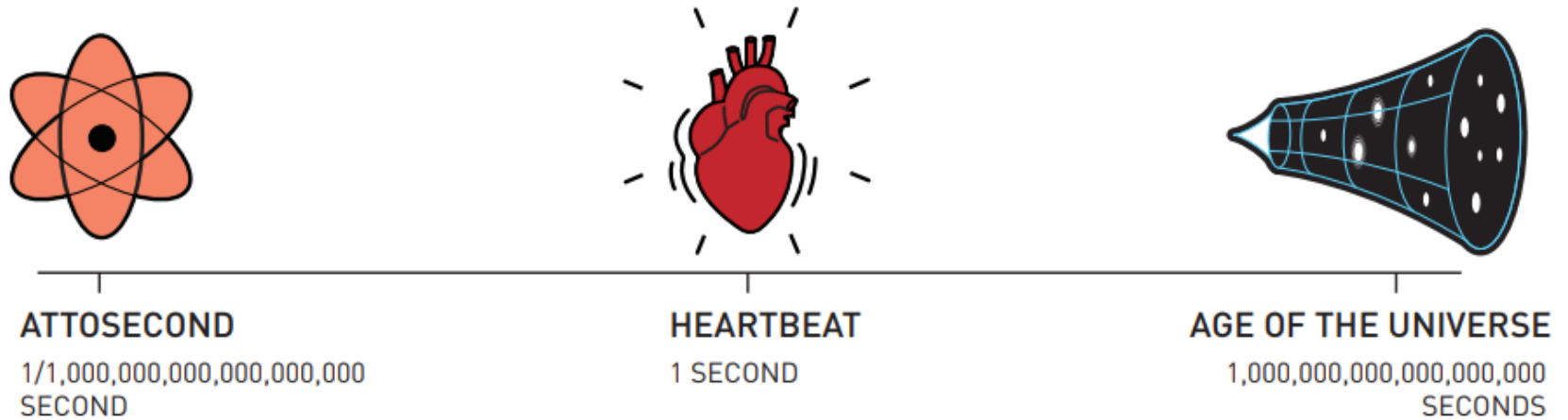
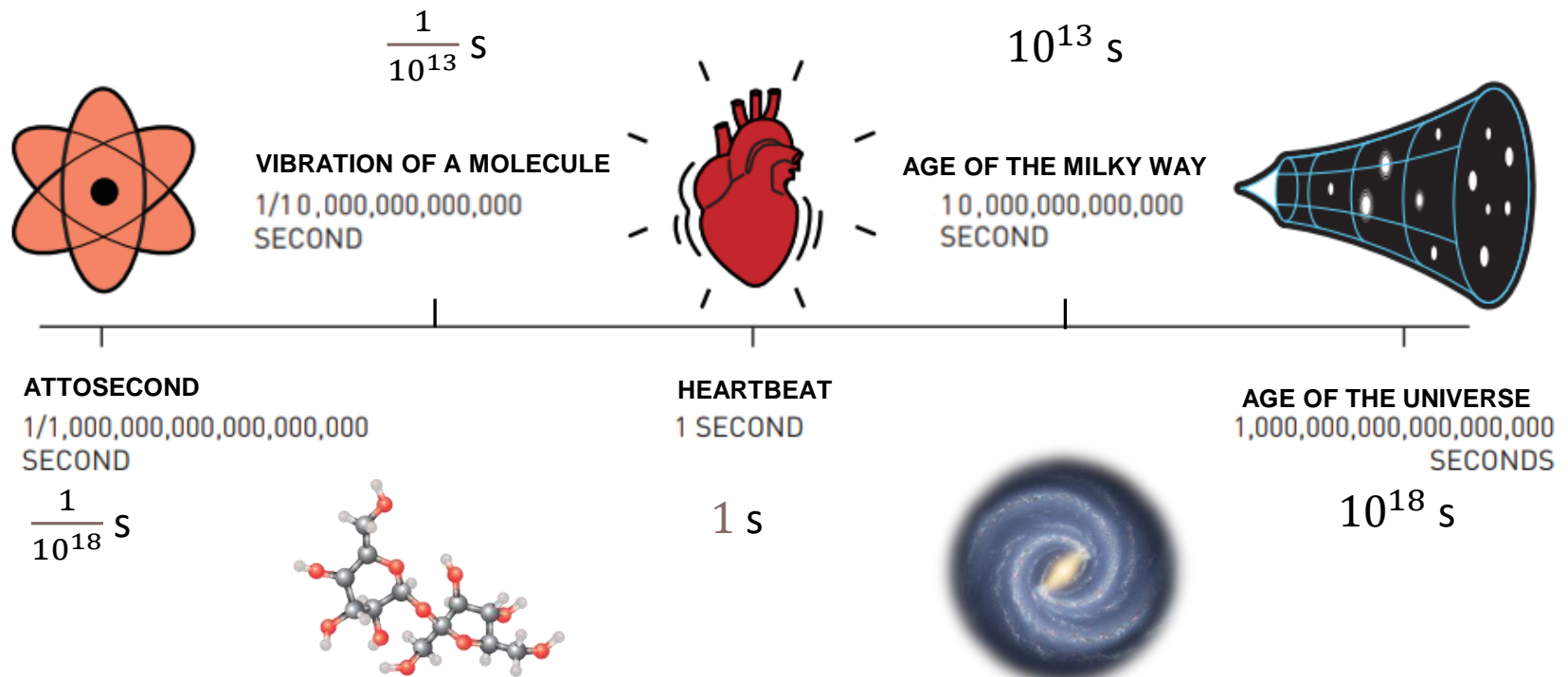


Mécanique quantique 1 (2 hours)

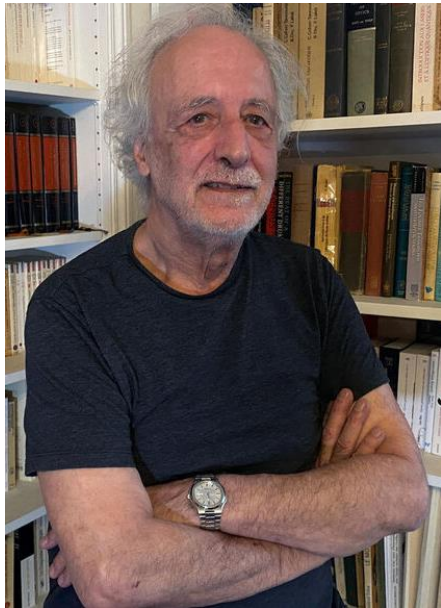
Joaquín Bermejo Ortiz



Crédits:Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



Prix nobel physique 2023



Pierre Agostini



Anne L'Huillier



Ferenc Krausz

“for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter”

I. Introduction historique

- Le comportement corpusculaire des ondes lumineuses
Le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique
- Le comportement ondulatoire de la matière
- La stabilité mystérieuse de l'atome (de Démocrite à Schrödinger)
Pourquoi l'électron ne s'effondre-t-il pas sur le noyau?

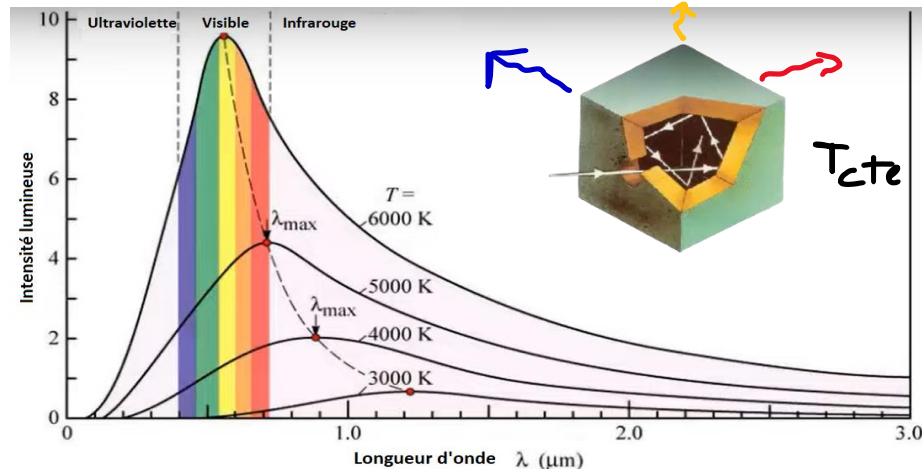
II. Fondements de la Mécanique quantique

- La fonction d'onde
- Le principe d'incertitude
- La superposition d'états
- L'effet tunnel
- Le problème de la mesure

Extra. Les attosecondes

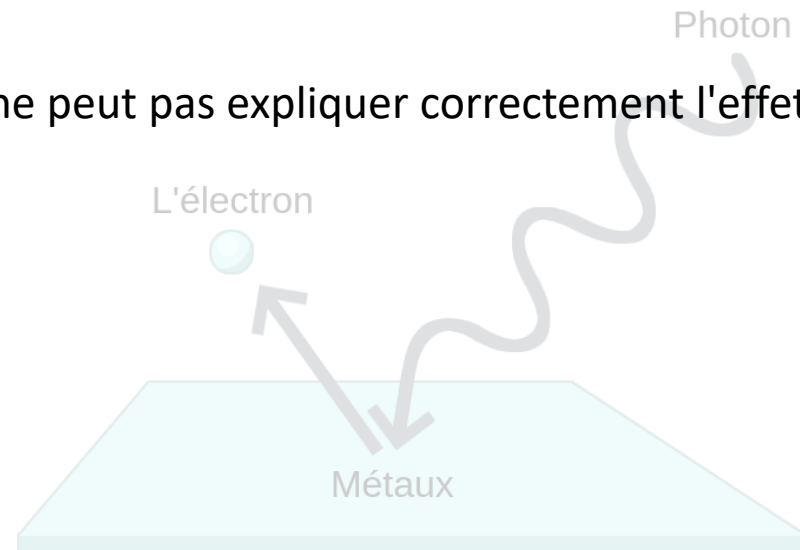
Le rayonnement du corps noir : Les Quantas d'Énergie de Planck

- Un corps noir est un objet idéal qui absorbe toute la radiation sans n'en refléter aucune
- La théorie classique prévoit une divergence de l'intensité lumineuse à de très courtes longueurs d'onde (catastrophe ultraviolette).
- En 1900, Planck imagina l'énergie du champ distribuée en "quanta", paquets d'énergie



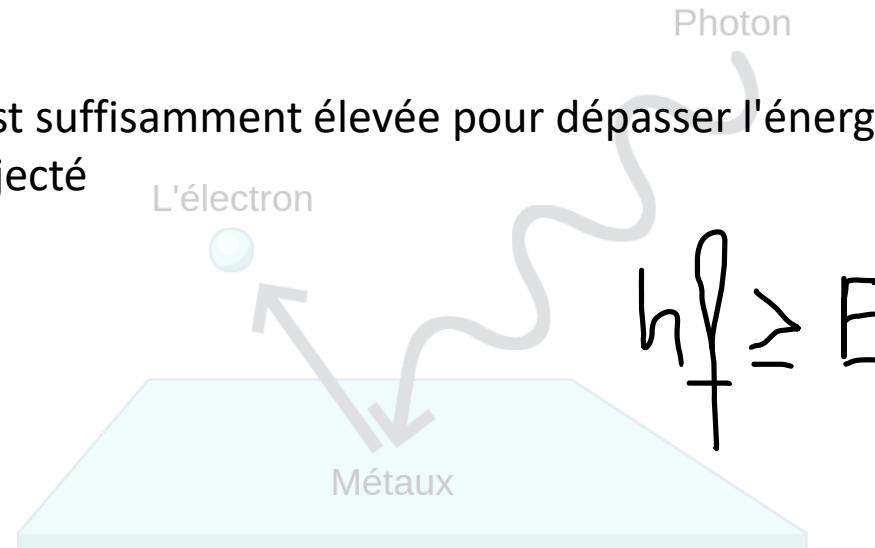
L'Effet Photoélectrique et la Naissance de la Physique Quantique

- L'effet photoélectrique a été observé par Hertz en 1887
- Des électrons sont émis lorsque la lumière atteint certains métaux
- L'énergie cinétique des électrons émis dépend de la fréquence de la lumière incidente, pas de son intensité
- Il y a un seuil de fréquence en dessous duquel aucun électron n'est émis, même avec une lumière intense
- La physique classique ne peut pas expliquer correctement l'effet photoélectrique!!



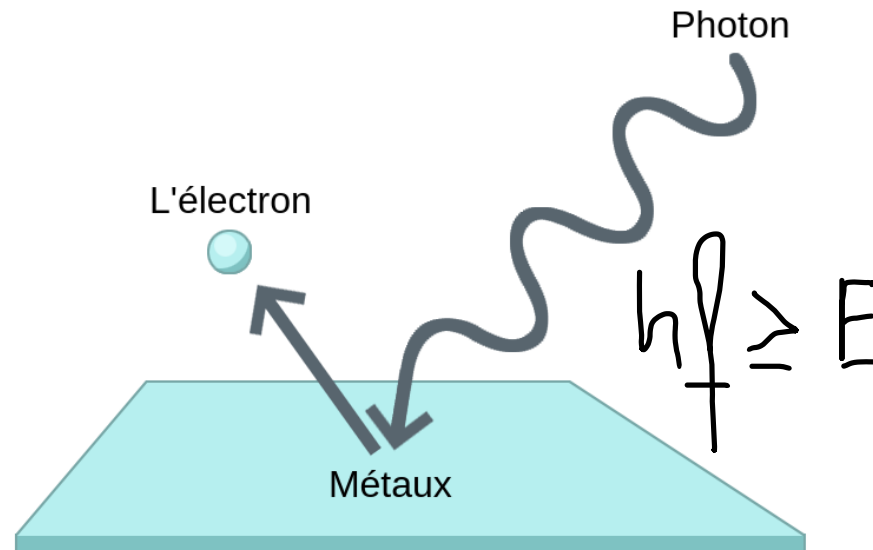
L'Effet Photoélectrique et la Naissance de la Physique Quantique

- La physique classique ne peut pas expliquer correctement l'effet photoélectrique!!
- Albert Einstein a proposé la théorie des photons en 1905
- Les photons sont de petits paquets d'énergie, chacun portant une quantité discrète d'énergie proportionnelle à la fréquence de la lumière, $E = hf$
- Lorsque la lumière frappe le matériau, elle interagit avec les électrons à l'intérieur
- Si l'énergie du photon est suffisamment élevée pour dépasser l'énergie de liaison d'un électron, l'électron est éjecté



L'Effet Photoélectrique et la Naissance de la Physique Quantique

- Les photons de faible énergie ($hf < E_e$) ne peuvent pas libérer d'électrons, même en grand nombre.
- Seuls les photons à haute énergie ($hf \geq E_e$) peuvent arracher les électrons



L'Effet Photoélectrique et la Naissance de la Physique Quantique

•**Prix Nobel en 1921: *Pour ses contributions à la physique théorique, spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique***

Concerning an Heuristic Point of View Toward
the Emission and Transformation of Light

A. Einstein

Bern, 17 March 1905

(Received March 18, 1905)

Translation into English

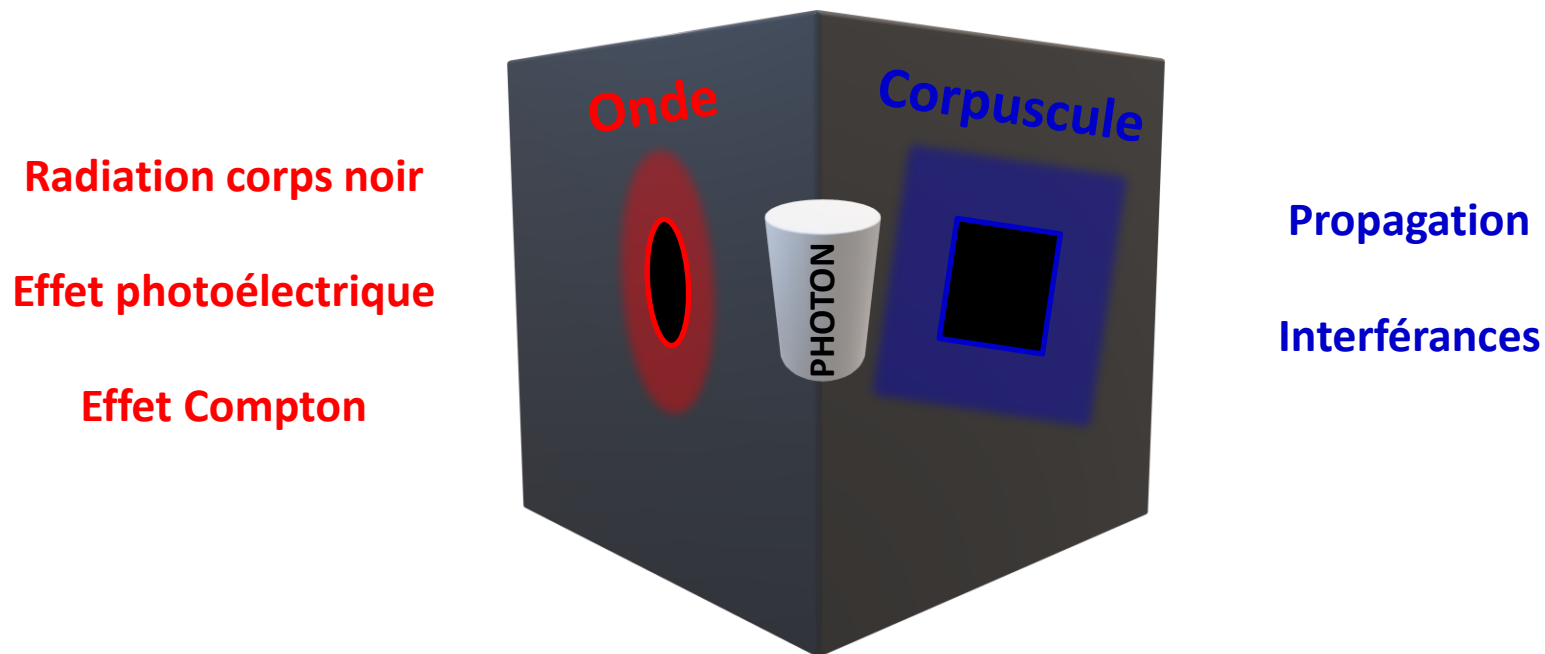
American Journal of Physics, v. 33, n. 5, May 1965



It seems to me that the observations associated with blackbody radiation, fluorescence, the production of cathode rays by ultraviolet light, and other related phenomena connected with the emission or transformation of light are more readily understood if one assumes that the energy of light is discontinuously distributed in space. In accordance with the assumption to be considered here, the energy of a light ray spreading out from a point source is not continuously distributed over an increasing space but consists of a finite number of 'energy quanta' which are localized at points in space, which move without dividing, and which can only be produced and absorbed as complete units.

Dualité onde-corpuscule de la lumière

- La lumière se comporte comme **une onde** quand elle se propage
- La lumière se comporte comme **une particule** quand elle interagit avec la matière



Les ondes de Broglie

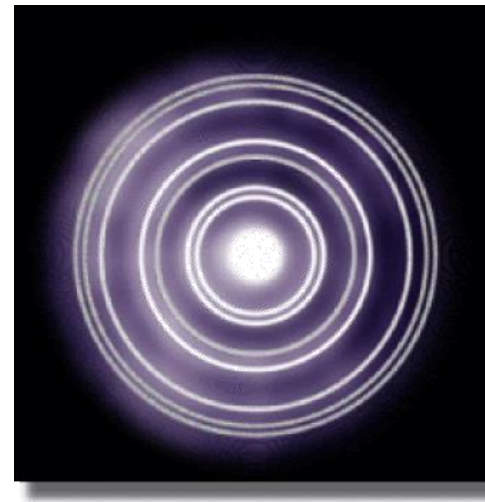
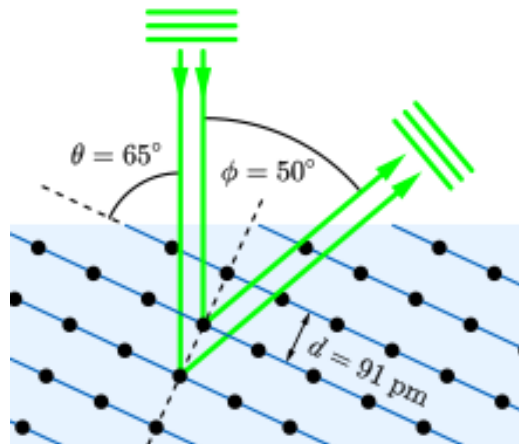
- En 1923, Louis de Broglie, inspiré par la dualité onde-corpuscule de la lumière, fait l'hypothèse que les particules matérielles peuvent avoir un comportement ondulatoire
- Il associe à un corpuscule matériel d'impulsion \vec{p} la longueur d'onde « de Broglie » :

$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|} \quad E = hf$$

- **On rétablit ainsi la symétrie entre onde et particule**

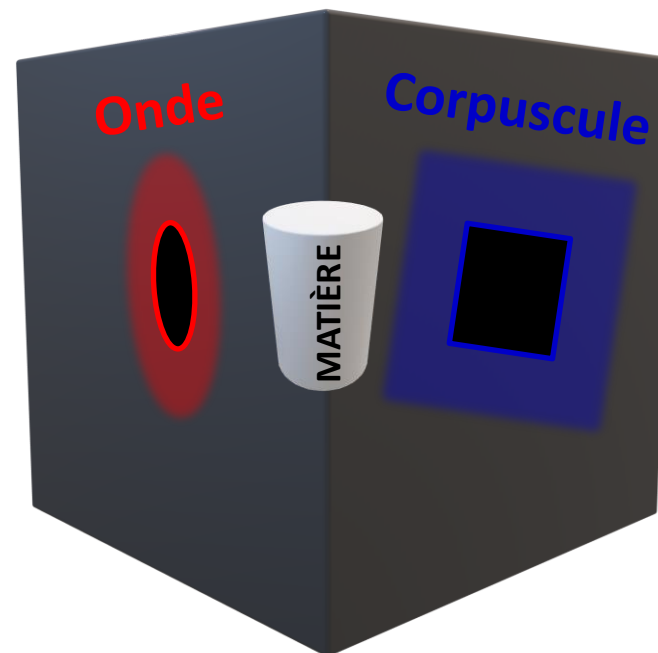
Les ondes de Broglie: confirmation expérimentale

- Davisson et Germer en 1927: Diffraction des électrons confirme l'aspect ondulatoire de la matière
- Faire passer un faisceau d'électrons à travers un cristal de nickel, qui agit comme un réseau de diffraction pour les électrons.
- Lorsque les électrons frappent les atomes du cristal, ils diffusent et interfèrent les uns avec les autres.
- **Cela crée un motif de diffraction caractéristique, similaire à ce que l'on observe avec la lumière lorsqu'elle passe à travers une fente ou un réseau**



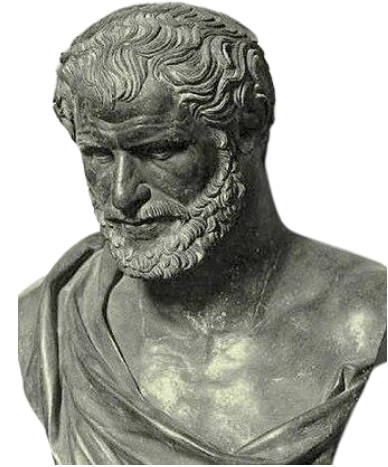
Dualité onde-corpuscule de la matière

La symétrie entre **onde** et **particule** est rétablie



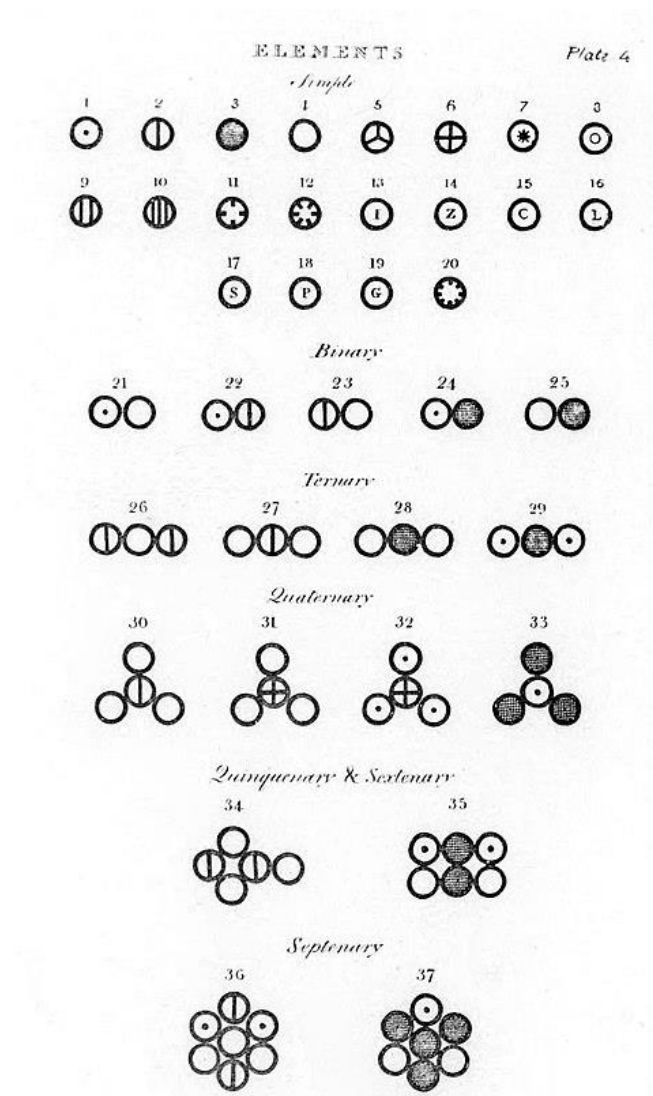
Premières idées sur les atomes

- Un atome : de l'ancien grec *ἄτομος*
 - “*ἄ*” (sans) + (“*τομος*”) section = insécable
 - *ἄτομο* (personne) en grec moderne
- Idée introduite par Démocrite (460 av-370. J.-C.)
 - les atomes sont les plus petits éléments constitutifs indivisibles de la matière



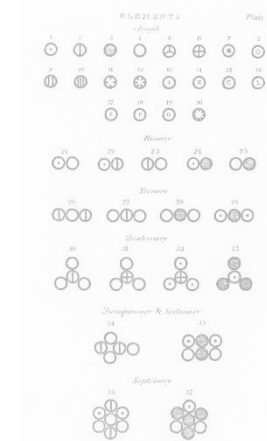
Premiers modèles atomiques

- Modèle atomique de Dalton (1766-1844)
 - La matière est constituée des atomes
 - Il existe différents types : les éléments
 - Un élément diffère d'un autre par la forme et la taille de ses atomes

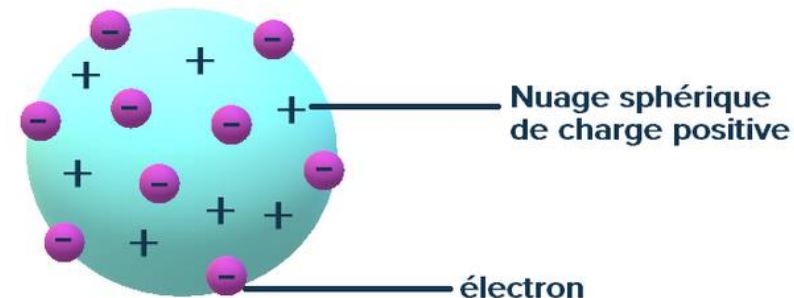


Premiers modèles atomiques

- Modèle atomique de Dalton (1766-1844)
 - La matière est constituée des atomes
 - Il existe différents types: les éléments
 - Un élément diffère d'un autre par la forme et la taille de ses atomes

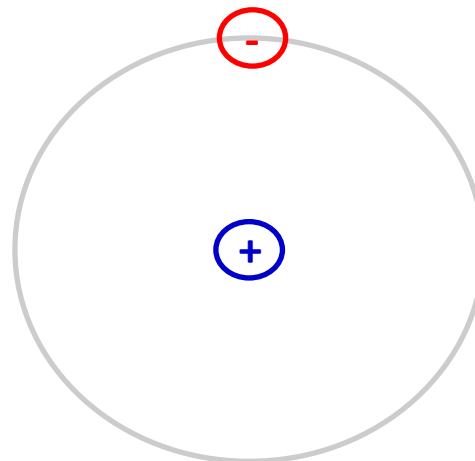


- Modèle atomique de Thomson (1856-1940)
 - Thomson propose l'idée qu'un atome peut être encore divisé
 - Il est constitué d'électrons (chargés négativement) plongés dans une « soupe » de charge positive comme des prunes dans un pudding



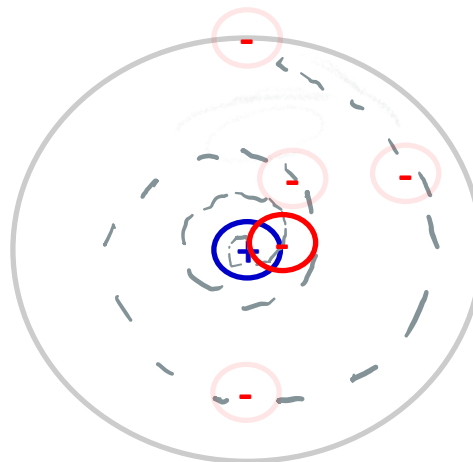
Modèle atomique de Rutherford

- En 1911, Ernest Rutherford a découvert que la charge positive de l'atome est concentrée dans un espace minuscule, le noyau
- Ils ont bombardé une feuille d'or avec des particules alpha et ont constaté que la plupart des particules passaient à travers la feuille sans être déviées
- Cependant, certaines particules ont été fortement déviées
- Les électrons gravitaient autour du noyau, comme les planètes autour du soleil



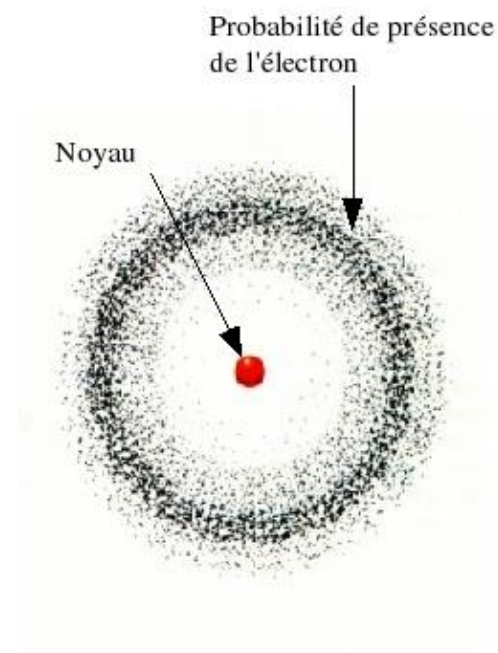
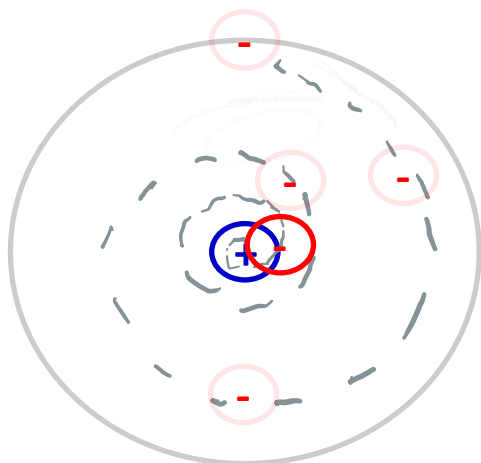
Instabilité classique de l'atome

- Selon la physique classique, un électron en orbite autour d'un noyau devrait perdre de l'énergie et s'effondrer sur le noyau
- Le temps d'effondrement est calculé à moins d'une seconde (10^{-11} s pour réduire le rayon de l'orbite à la moitié)
- Si l'univers était purement classique (modèle planétaire), **les atomes n'existeraient pas!**



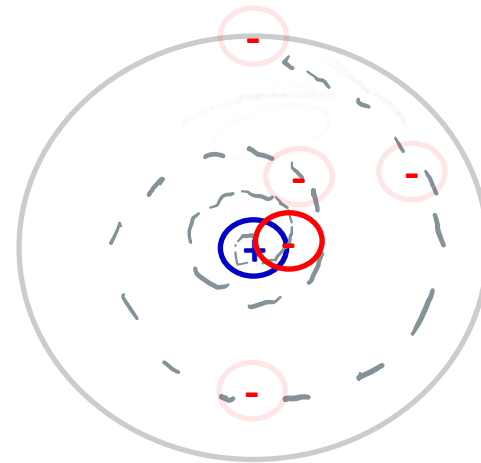
Pourquoi l'électron ne s'effondre-t-il pas sur le noyau?

- L'électron n'est pas une particule ponctuelle, mais une onde (**Schrödinger, 1925**)
- L'onde a une probabilité d'être trouvée à un endroit donné
- Cette probabilité est maximale dans une région appelée orbitale
- L'électron peut être trouvé n'importe où dans l'orbitale



Idée pour exposé I: Pourquoi l'électron ne s'effondre-t-il pas sur le noyau?

- Calculer le temps d'effondrement de l'électron sur le noyau si l'univers était classique
- (Sans démonstration mathématique :D). Application numérique de la formule de Larmor



I. Introduction historique

- Le comportement corpusculaire des ondes lumineuses
Le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique
- Le comportement ondulatoire de la matière
- La stabilité mystérieuse de l'atome (de Démocrite à Schrödinger)
Pourquoi l'électron ne s'effondre-t-il pas sur le noyau?

II. Fondements de la Mécanique quantique

- La fonction d'onde
- Le principe d'incertitude
- La superposition d'états
- L'effet tunnel
- Le problème de la mesure

Extra. Les attosecondes

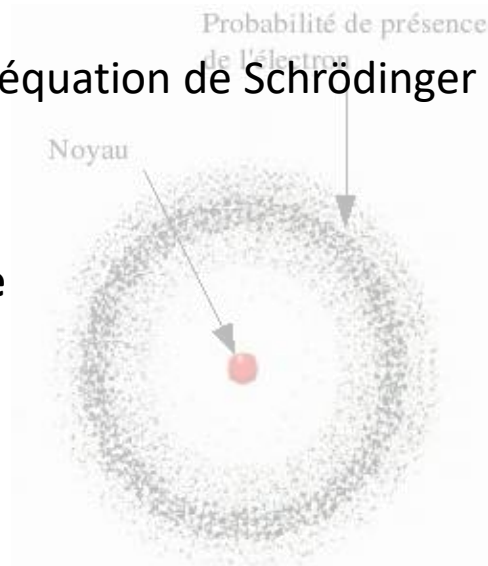
Equation de Schrödinger

- L'électron n'est pas une particule ponctuelle, mais une onde (**Schrödinger, 1925**)

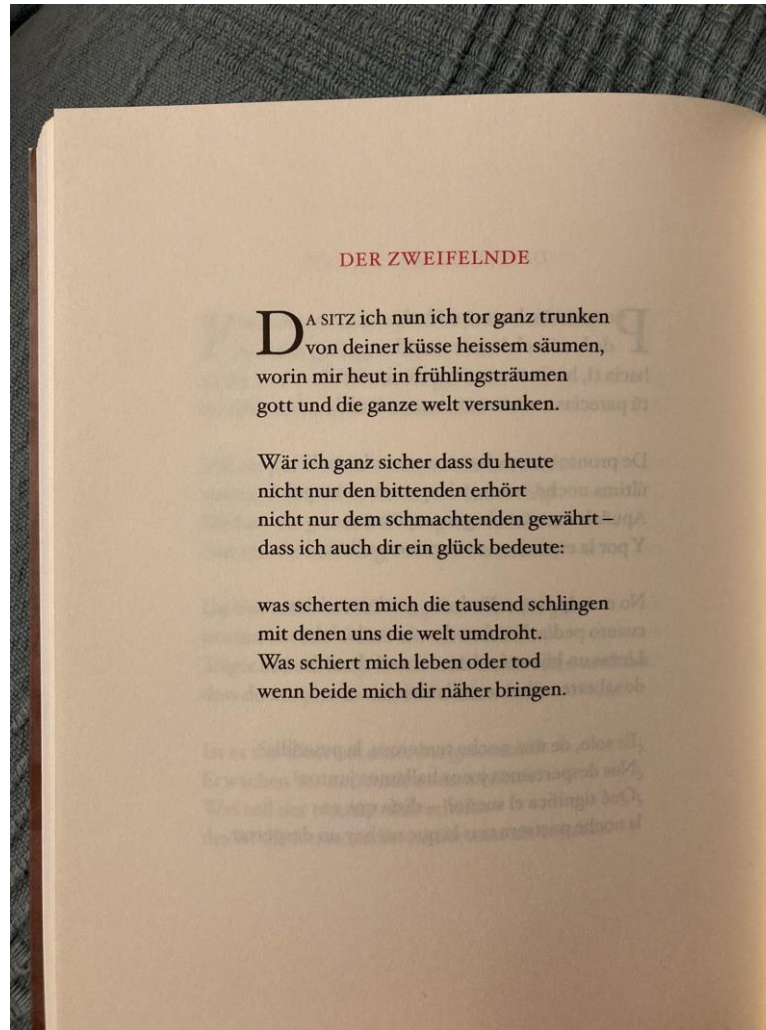
$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t, \vec{r})}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(t, \vec{r}) + V(\vec{r}) \Psi(t, \vec{r})$$

- Quelques conséquences de l'équation de Schrödinger

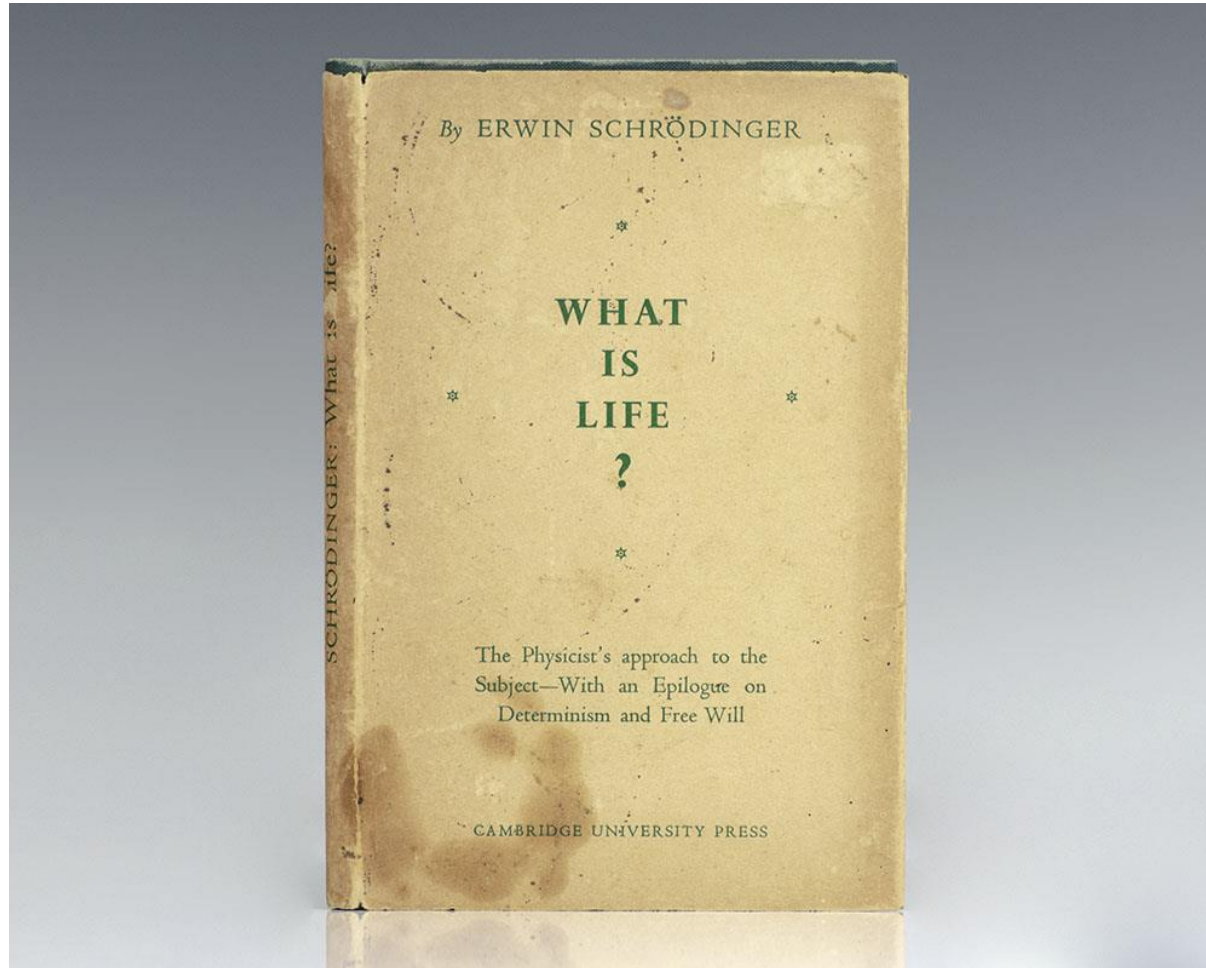
- **La fonction d'onde**
- **Le principe d'incertitude**
- **La superposition d'états**
- **L'effet tunnel**
- **Le problème de la mesure**



Erwin Schrödinger



Erwin Schrödinger (1944)



La fonction d'onde

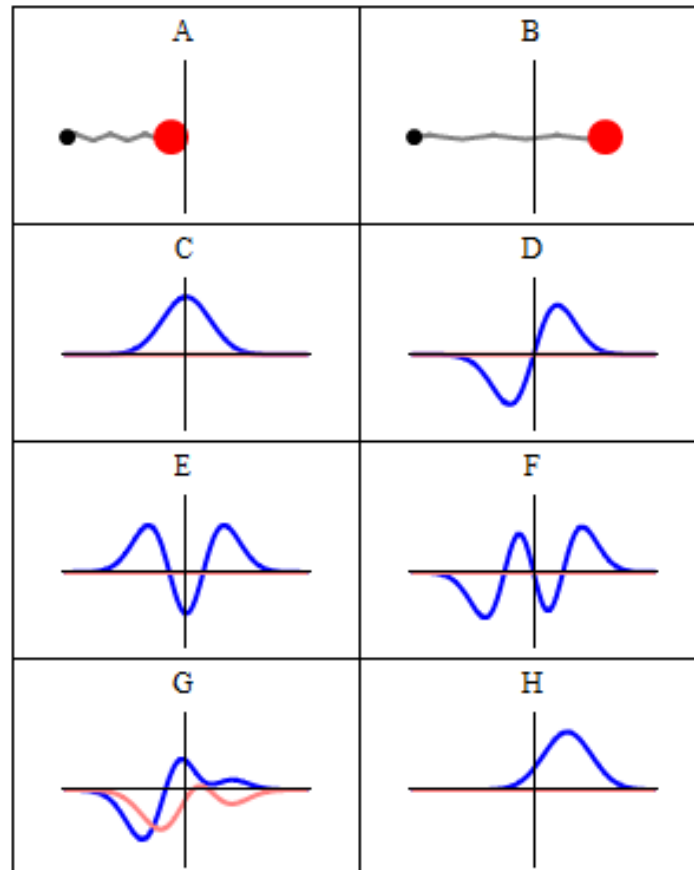
- L'électron (plus généralement, une particule quantique) n'est pas une particule ponctuelle, mais une onde (**Schrödinger, 1925**)

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

- L'équation de Schrödinger décrit l'évolution temporelle de la fonction d'onde
- La fonction d'onde représente l'état d'une particule quantique
- La fonction d'onde a une interprétation probabiliste. Le carré de la valeur absolue de la fonction d'onde ($|\psi(t, \vec{r})|^2$) en un point de l'espace \vec{r} à un instant t représente la probabilité de trouver la particule à ce point

La fonction d'onde

- La fonction d'onde a une interprétation probabiliste. Le carré de la valeur absolue de la fonction d'onde ($|\psi(t, \vec{r})|^2$) en un point de l'espace \vec{r} à un instant t représente la probabilité de trouver la particule à ce point



Le principe d'incertitude

- Le principe d'incertitude (**Werner Heisenberg, 1927**): il existe une limite fondamentale à la précision avec laquelle il est possible de connaître simultanément deux propriétés physiques d'une même particule

$$\Delta_a \Delta_b \geq \frac{\hbar}{2}$$

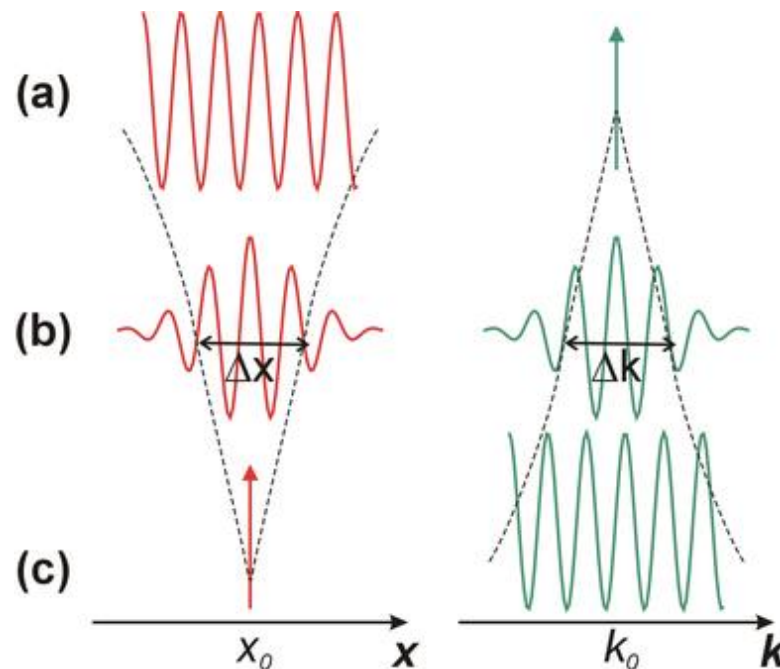
- Un exemple est le **principe d'incertitude position-moment**
- Il est impossible de connaître avec précision totale la position et le moment d'une particule quantique au même temps

$$\Delta_x \Delta_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Le principe d'incertitude position-moment

- Il est impossible de connaître avec précision totale la position et le moment d'une particule quantique au même temps

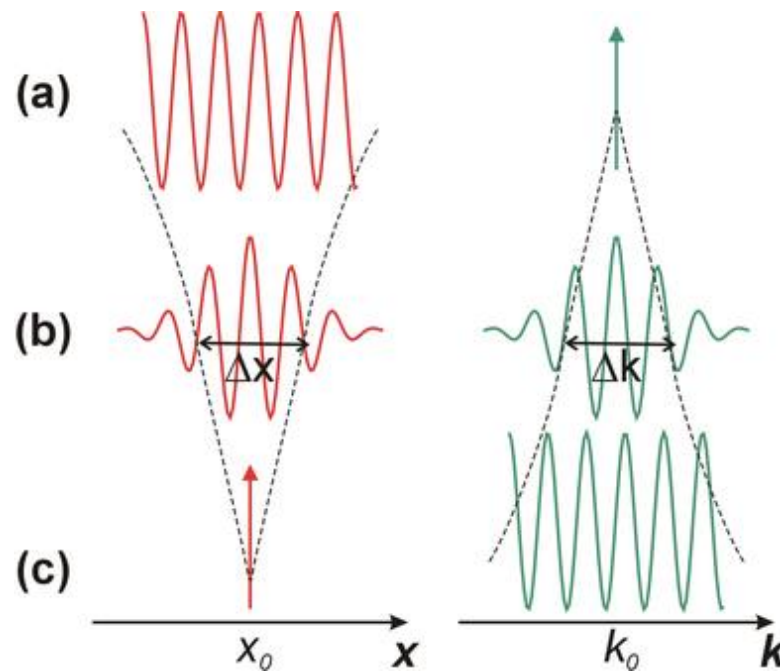
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



Le principe d'incertitude position-moment

- Le principe d'incertitude est une conséquence mathématique de la dualité onde-corpuscule

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



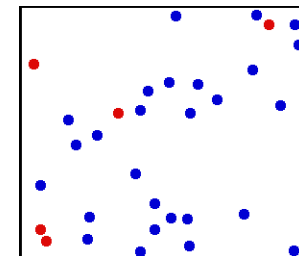
Le principe d'incertitude et les lois du vivant

Une intelligence qui, à un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la compose 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 (1749-1827)

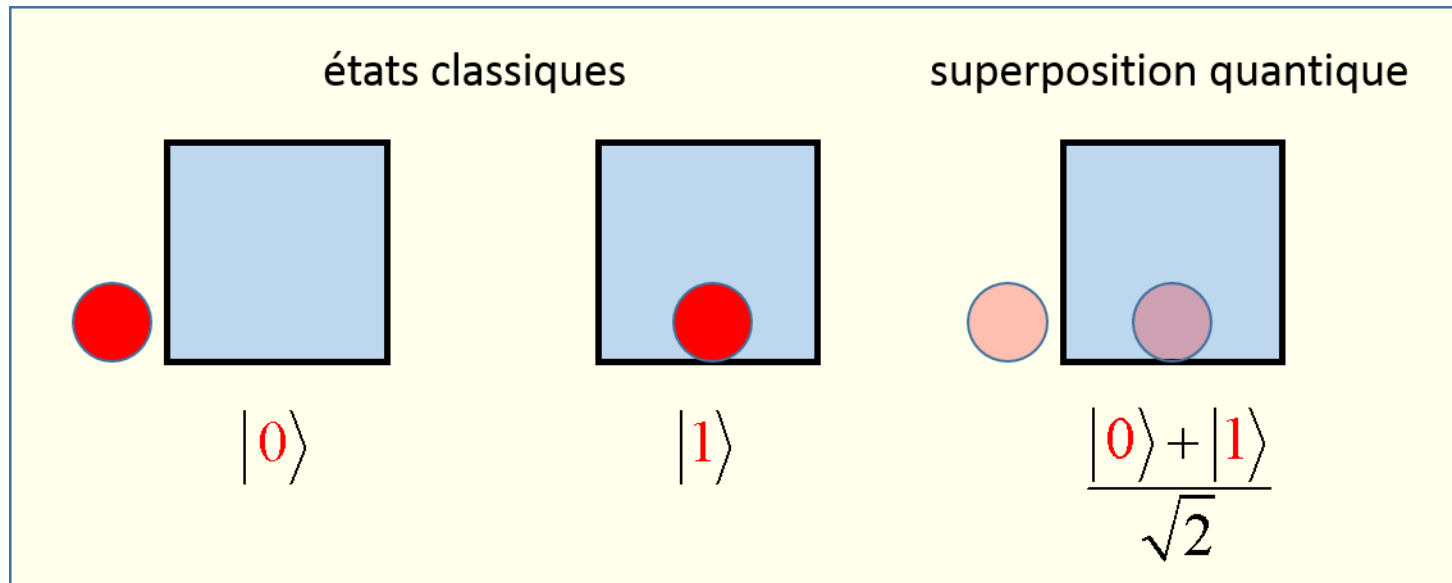
- La réponse à cette question est complexe et fait l'objet de débats entre les scientifiques.
- Cependant, cette perspective mécaniciste a été remise en question en biologie en raison de trois notions:

1. **L'incertitude**
2. Le chaos
3. Le bruit thermique



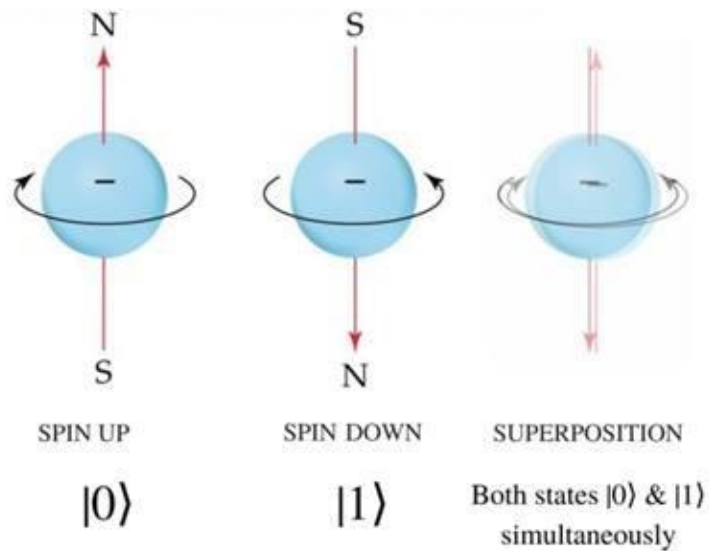
La superposition d'états

- Une autre conséquence de l'équation de Schrödinger est la superposition d'états
- En mécanique classique, un système ne peut être que dans un seul état à la fois. Par exemple, une balle peut être soit en haut, soit en bas, mais pas les deux à la fois
- Un système quantique peut être dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'il peut avoir plusieurs valeurs possibles pour une même propriété

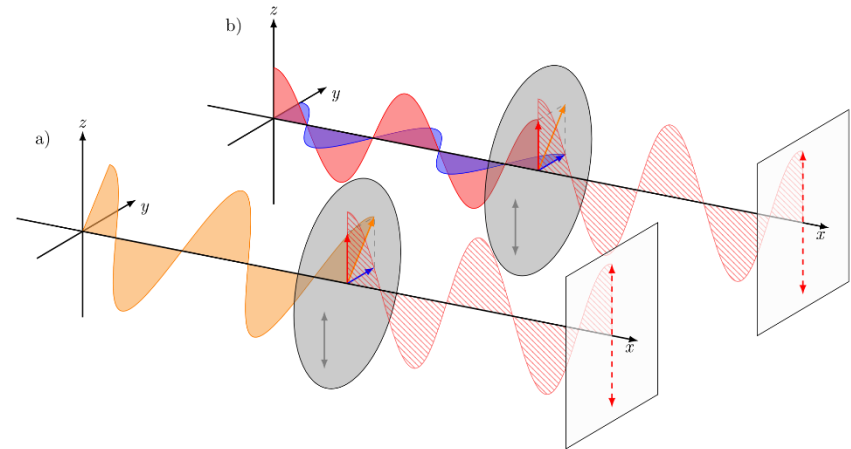


La superposition d'états : exemples

Le spin de l'électron

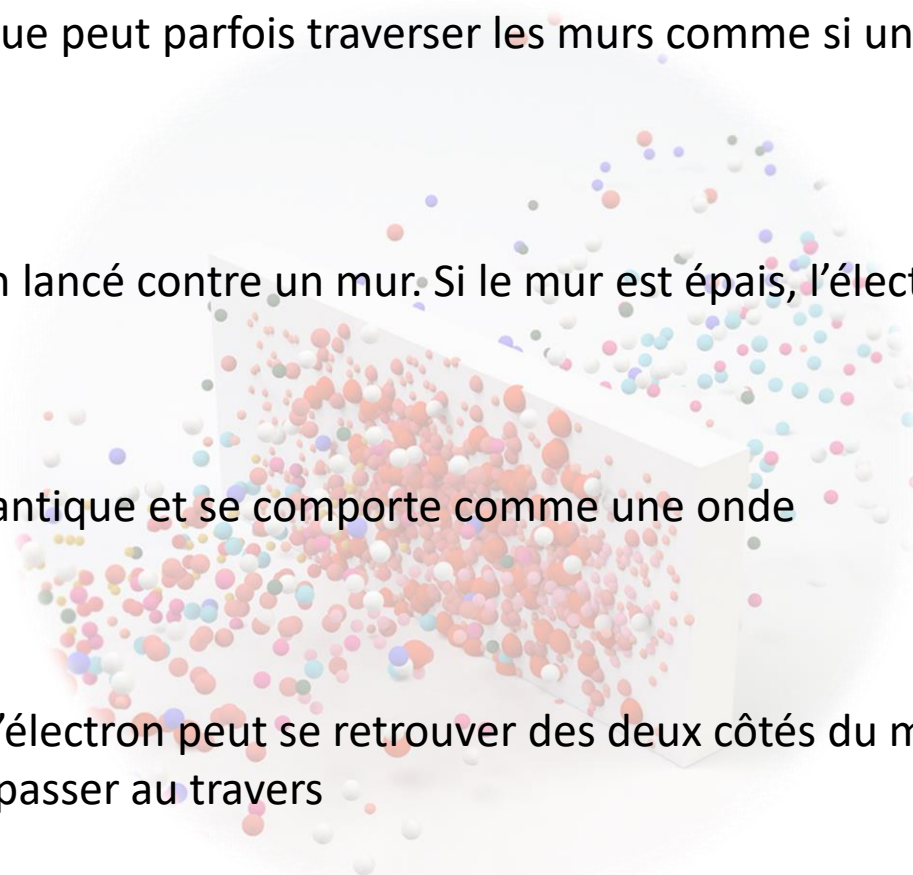


La polarisation de la lumière



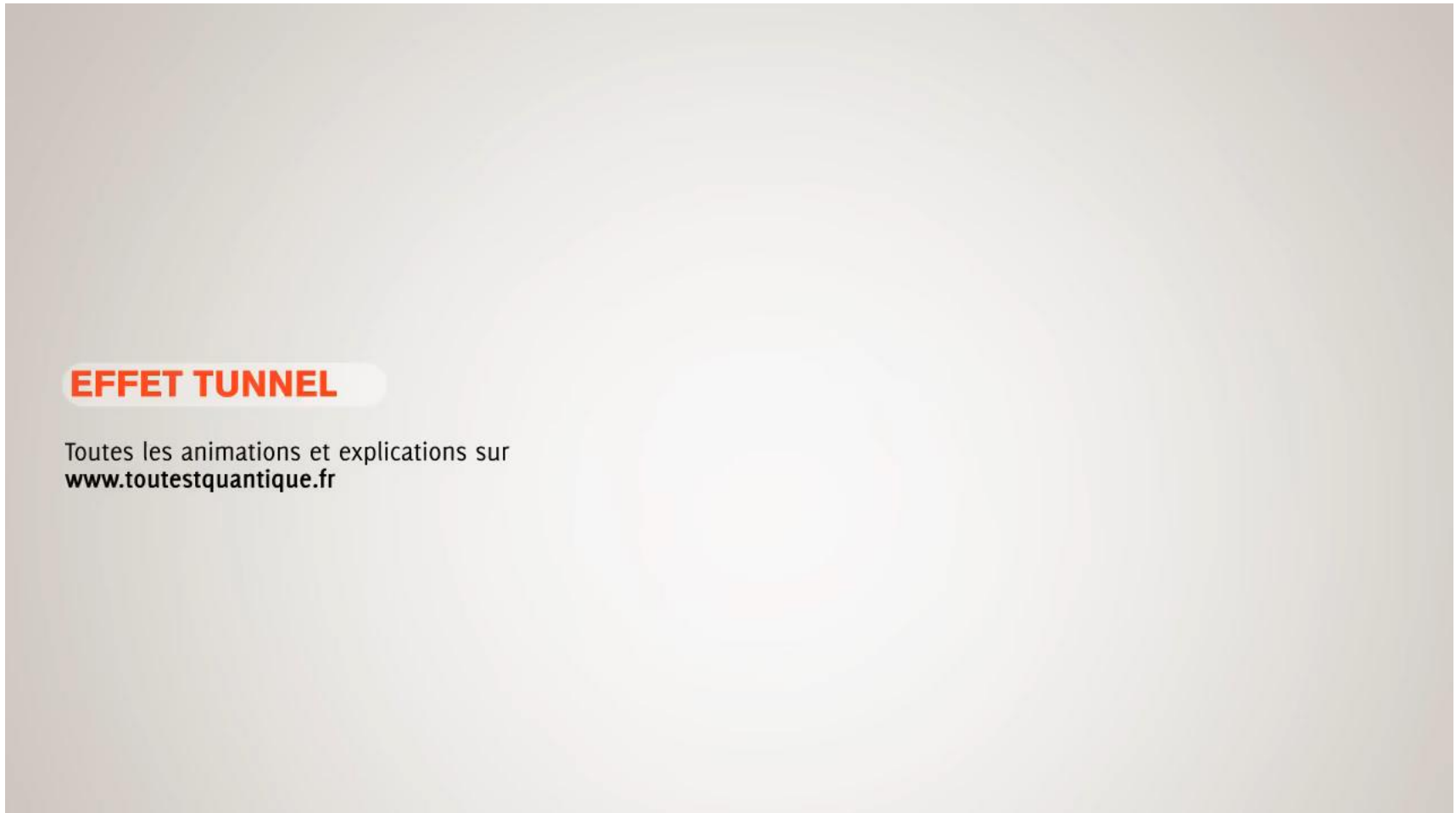
L'effet tunnel

- Une particule quantique peut parfois traverser les murs comme si un tunnel s'ouvrait à elle
- Imaginons un électron lancé contre un mur. Si le mur est épais, l'électron rebondit
- Mais l'électron est quantique et se comporte comme une onde
- Si le mur est très fin, l'électron peut se retrouver des deux côtés du mur à la fois, ce qui parfois lui permet de passer au travers



L'effet tunnel

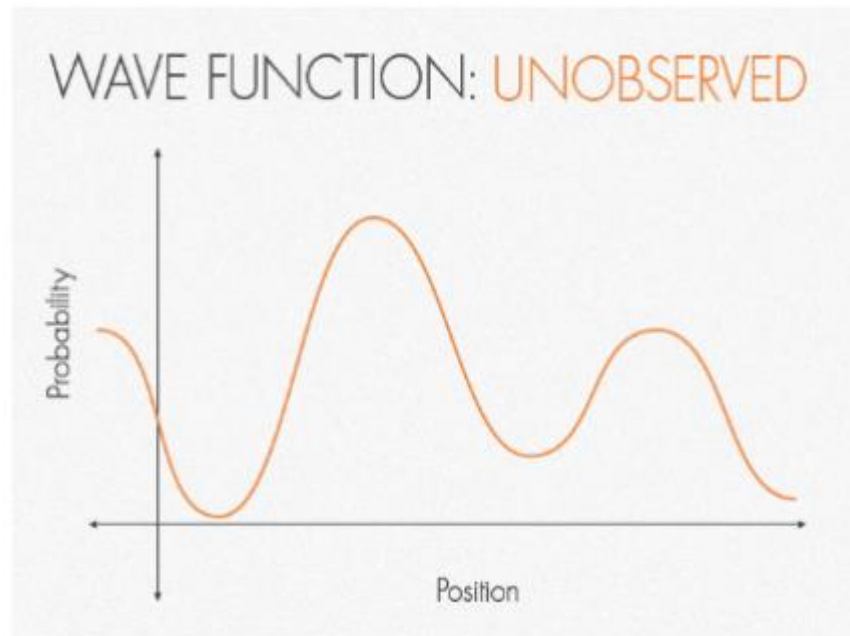
- Une particule quantique peut parfois traverser les murs comme si un tunnel s'ouvrait à elle



L'effet tunnel quantique et microscope à effet tunnel (Crédits: <https://toutestquantique.fr/tunnel/>)

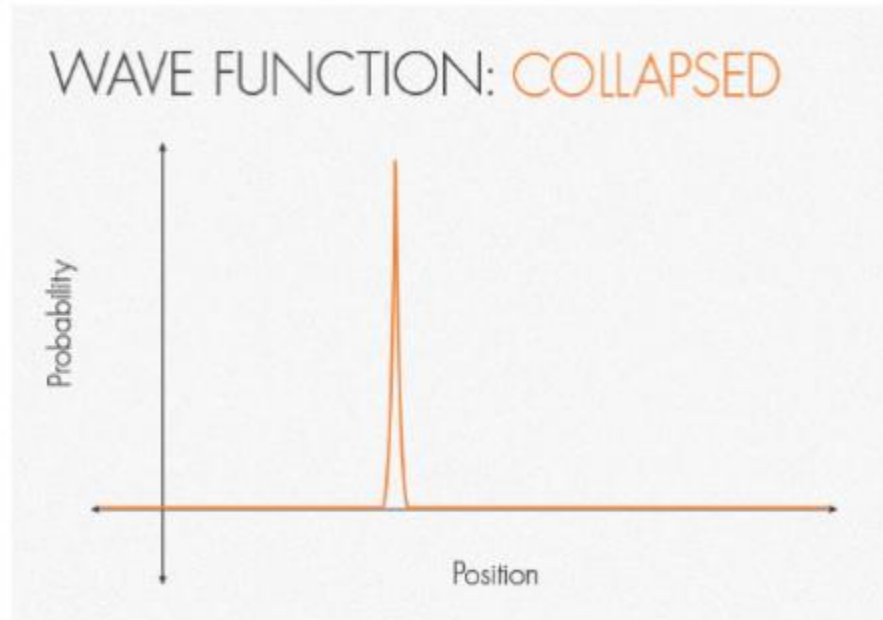
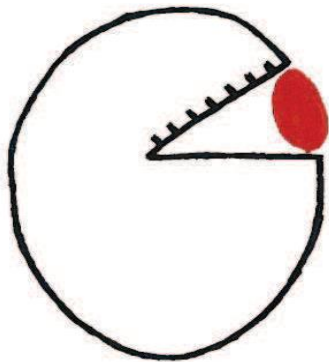
La superposition d'états et le problème de la mesure

- Un système quantique est dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'il peut avoir plusieurs valeurs possibles pour une même propriété
- La mesure d'une propriété d'un système quantique "effondre" son état, ce qui signifie que le système se trouve dans un seul état possible



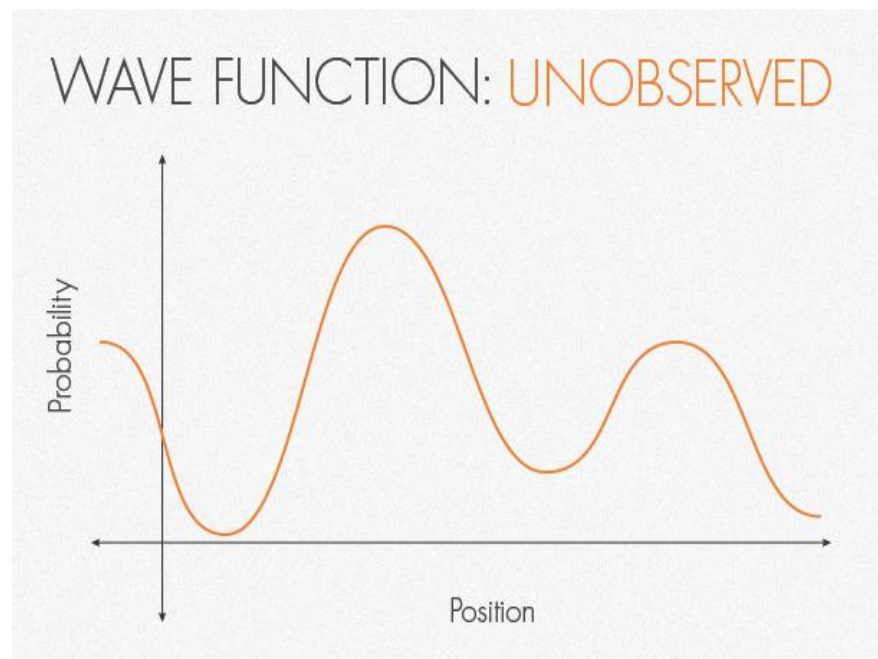
La superposition d'états et le problème de la mesure

- Un système quantique est dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'il peut avoir plusieurs valeurs possibles pour une même propriété
- La mesure d'une propriété d'un système quantique "effondre" son état, ce qui signifie que le système se trouve dans un seul état possible



La superposition d'états et le problème de la mesure

- Si l'état de l'objet dépend du sujet de l'observateur, la réalité de l'objet est-elle définie ?
- Existe-t-il une réalité objective à l'échelle quantique ?

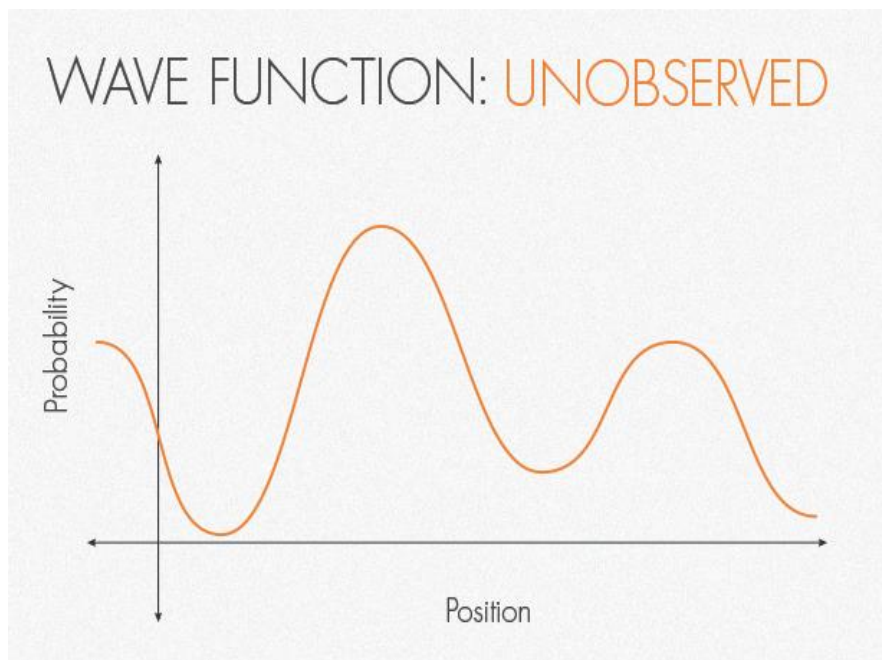


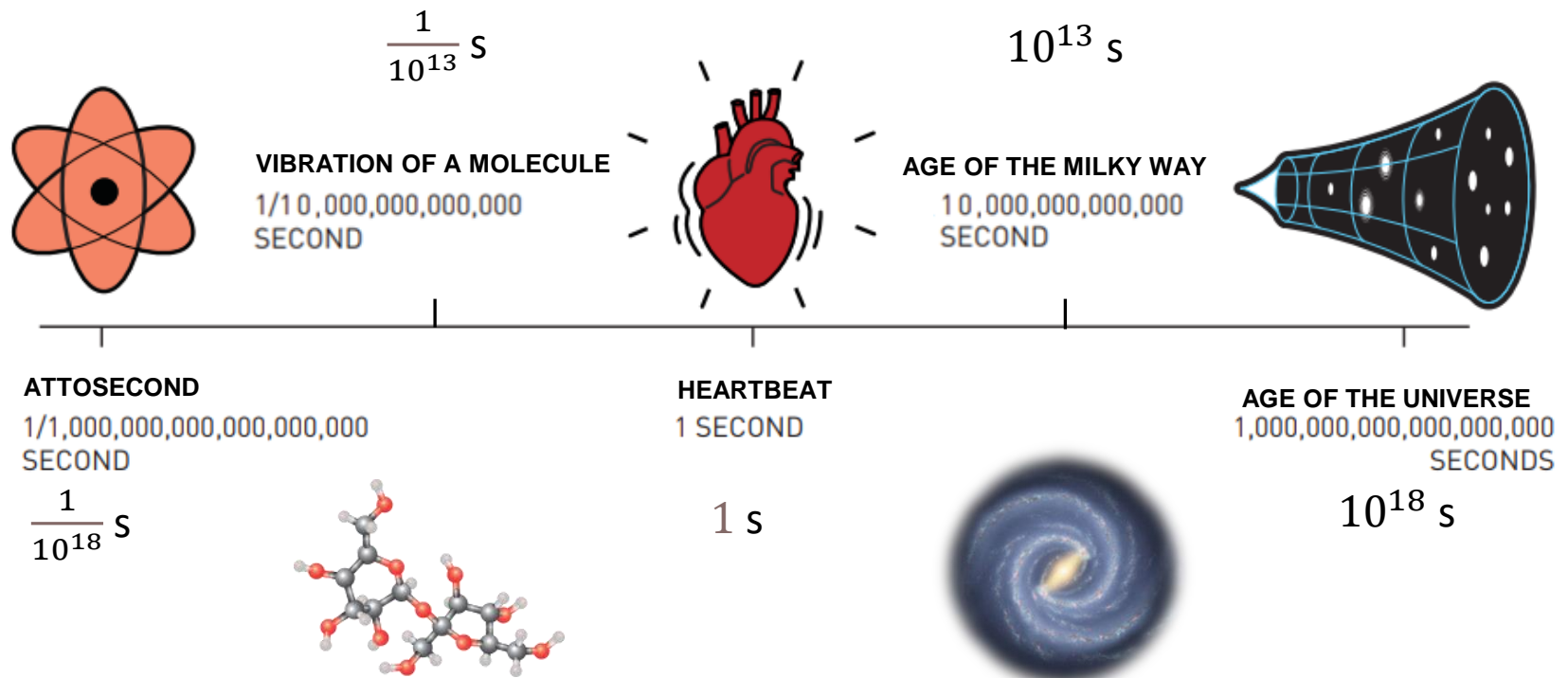
Idée pour exposé II: Le problème de la mesure et la conscience

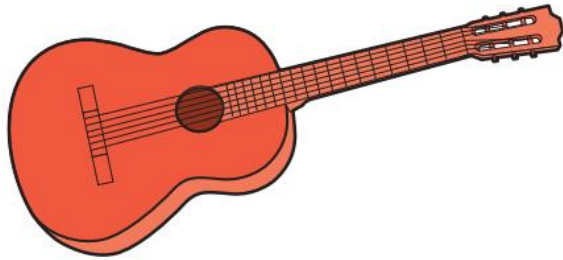
Quelques questions ouvertes (La lune existe-t-elle quand personne ne la regarde ?)

- Si la mesure est faite par un sujet inanimé (non-conscient, p.e. un atome), est-ce que l'effondrement se produit encore? Qu'est-ce que la conscience ?

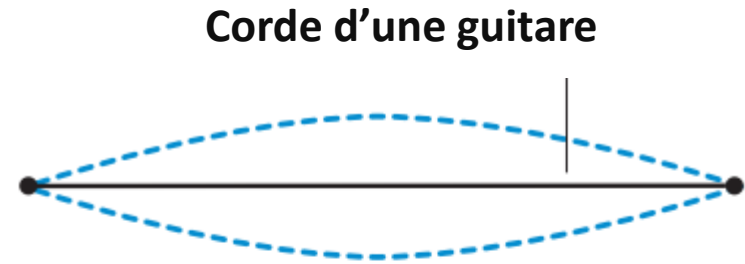
E.P. Wigner (1967) Remarks on the mind-body question



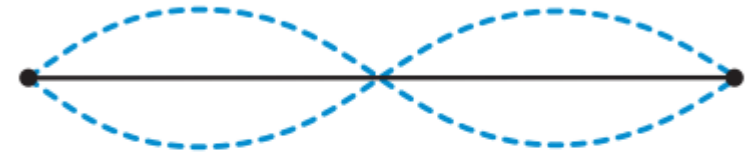




Ton fondamental



Premier harmonique



Deuxième harmonique

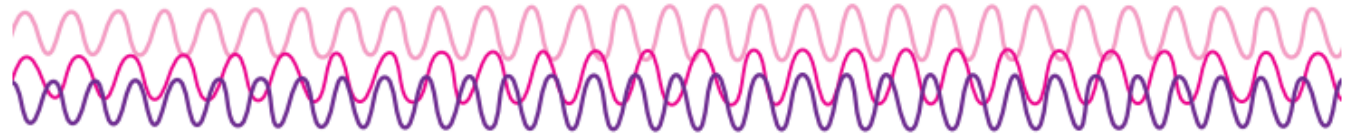


Troisième harmonique



- Les harmoniques sont un multiple entier de la fréquence correspondante au ton fondamental. Les harmoniques fonctionnent de la même manière dans les ondes lumineuses

LES HARMONIQUES SONT
SUPERPOSÉS



ILS SE RENFORCENT OU S'ANNULENT
LES UNS LES AUTRES

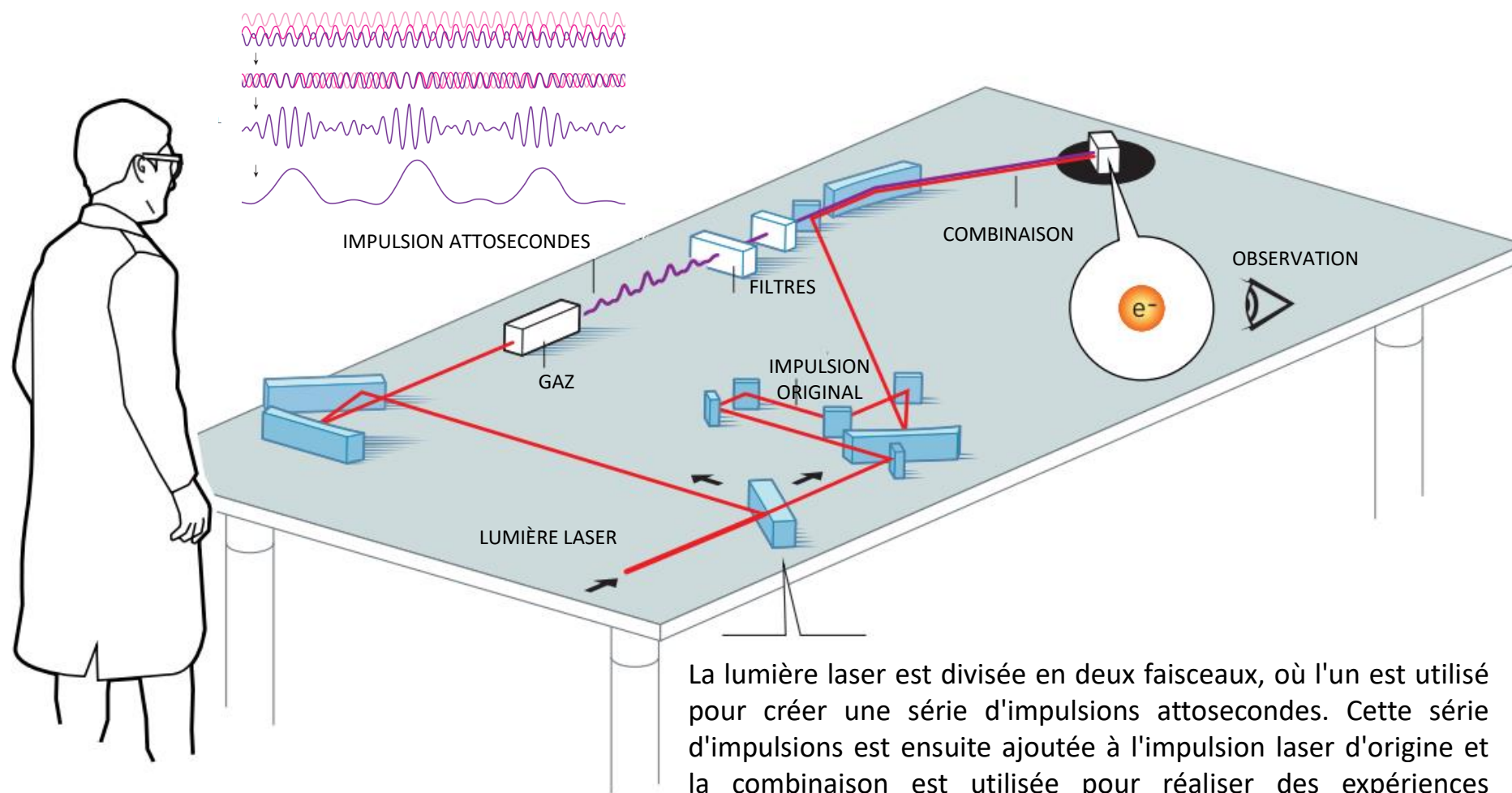


IMPULSIONS ATTOSECONDES



- Le monde des électrons est exploré avec les impulsions lumineuses les plus courtes

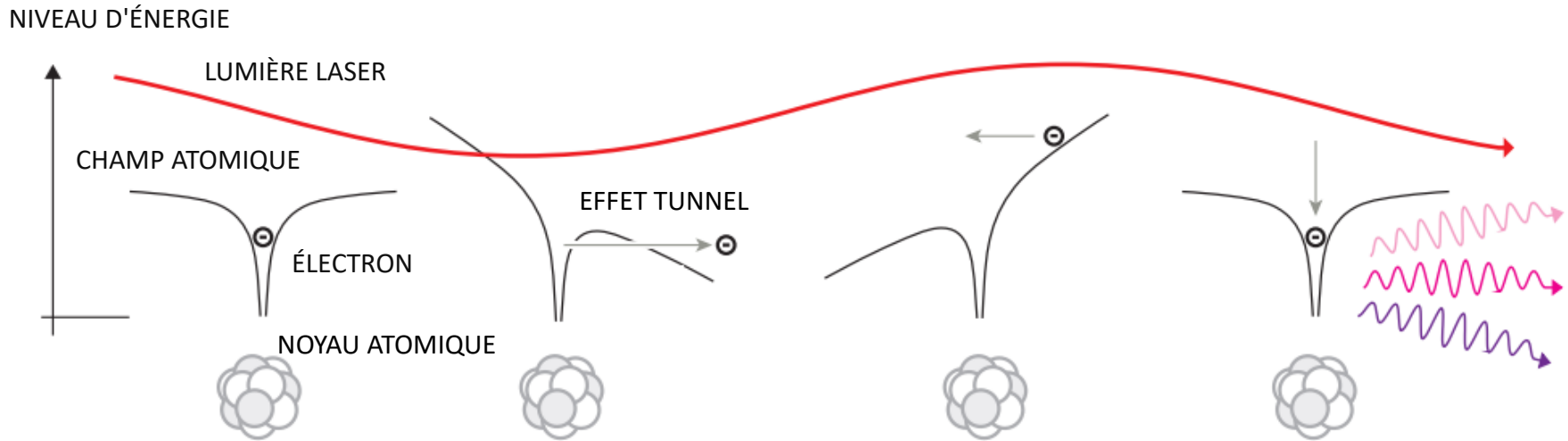
Quand la lumière laser est transmise à travers un gaz, des harmoniques ultraviolettes émergent des atomes dans le gaz. Dans les bonnes conditions, ces harmoniques peuvent être en phase. Lorsque leurs cycles coïncident, des impulsions **attosecondes** concentrées sont formées



La lumière laser est divisée en deux faisceaux, où l'un est utilisé pour créer une série d'impulsions attosecondes. Cette série d'impulsions est ensuite ajoutée à l'impulsion laser d'origine et la combinaison est utilisée pour réaliser des expériences extrêmement rapides

- Le monde des électrons est exploré avec les impulsions lumineuses les plus courtes

- La lumière laser interagit avec les atomes du gaz, comment?



1

Un électron lié au noyau d'un atome ne peut normalement pas quitter son atome ; il n'a pas suffisamment d'énergie pour sortir du puits créé par le champ électrique de l'atome

2

Le champ de l'atome est déformé lorsqu'il est affecté par l'impulsion laser. Lorsque l'électron est retenu uniquement par une barrière étroite, la mécanique quantique lui permet de se frayer un chemin à travers cette barrière et de s'échapper

3

L'électron libre est toujours affecté par le champ laser et gagne une certaine énergie supplémentaire. Lorsque le champ tourne et change de direction, l'électron est attiré en arrière dans la direction d'où il vient

4

Pour se réattacher au noyau de l'atome, l'électron doit se débarrasser de l'énergie supplémentaire acquise pendant son trajet. Celle-ci est émise sous forme d'un éclair ultraviolet, dont la longueur d'onde est liée à celle du champ laser et diffère en fonction de la distance parcourue par l'électron