

Phénomènes quantiques – 1^{ère} partie

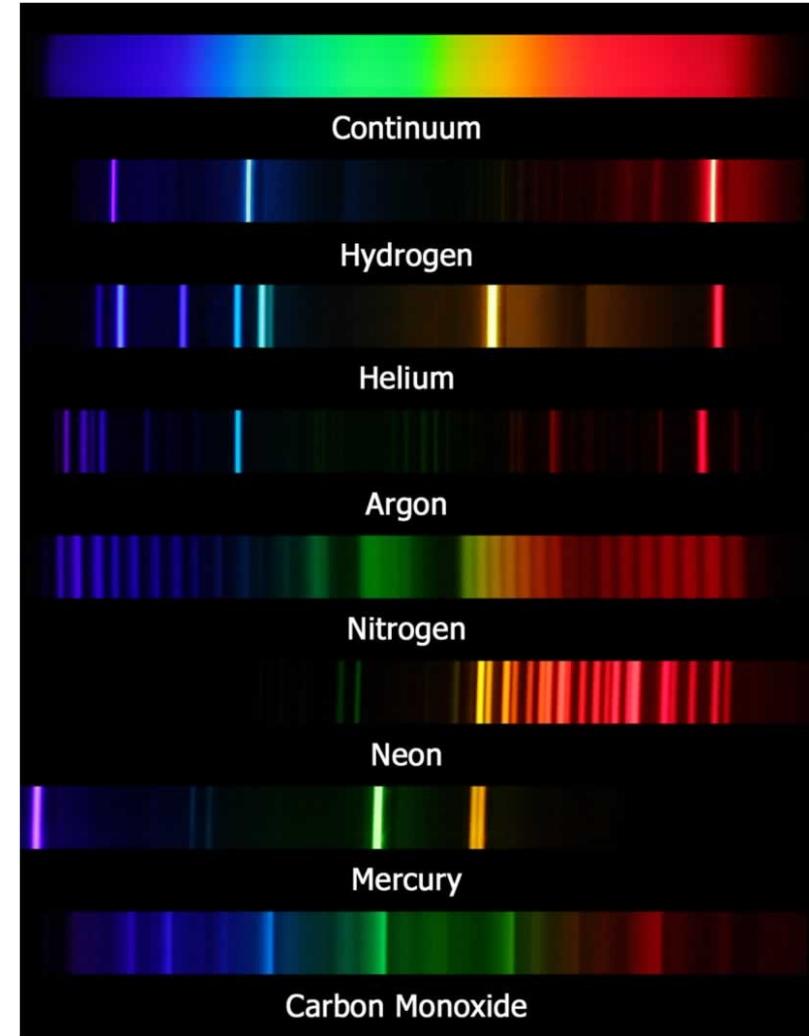
- Phénomènes problématiques à la fin du XIXe
- Interférences quantiques
- L'effet tunnel
- Principe d'incertitude
- Energie du vide et évaporation des trous noirs
- Décohérence

Notions utilisées :

Toutes sauf relativité générale...

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées

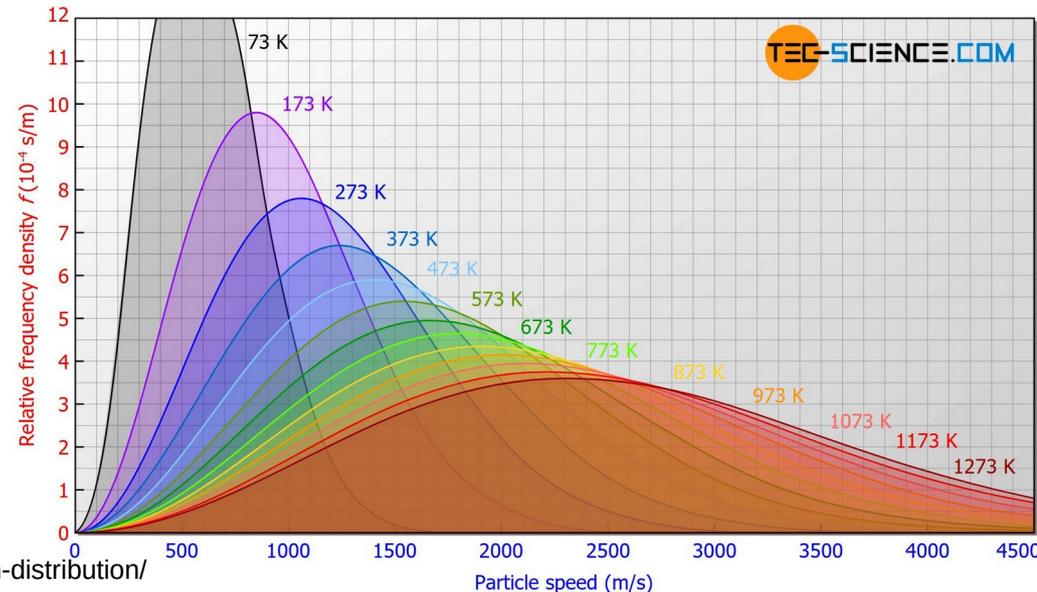
Images : Wikipedia sauf mention contraire



Un peu d'histoire

- Fin XIX^e, la physique classique comprend :
 - La **mécanique newtonienne** (Newton, 1687)
 - La **théorie de l'électromagnétisme** (Maxwell 1865, Lorentz 1895)
 - La **thermodynamique** (Clausius, 1850), ainsi qu'une première version de la **physique statistique : théorie cinétique des gaz**, (Maxwell / Boltzmann) – notion de **densité de probabilité**

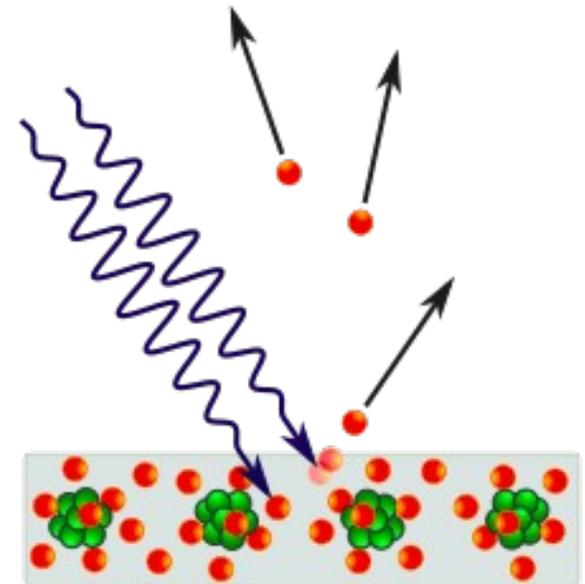
$$f(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{k_B T} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$



L'effet photoélectrique

Problème expérimental à la fin du XIX^e siècle : lorsque l'on éclaire un métal avec de la **lumière**, celui-ci peut **émettre des électrons**

- **Interaction onde-matière**
- L'**énergie cinétique** dépend de la **fréquence** ; le nombre, de l'**intensité**
- Se déclenche à partir d'un certain **seuil de fréquence** – incompréhensible si on considère la lumière comme une **onde**
- Article d'Einstein (1905)
 - **le rayonnement électromagnétique est lui-même quantifié**
 - Un grain de lumière (« **photon** ») porte une **énergie** $E = h \cdot \nu$ ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s : constante de Planck)
 - Titre de docteur en physique et prix Nobel de physique en 1921



Modèle de Rutherford de l'atome

- **Modèle « planétaire »**, 1911 (après la découverte du noyau)
- **Problème de stabilité** de cet atome
 - Une charge électrique accélérée rayonne (« **Bremsstrahlung** »)
 - Propriété utilisée dans les **synchrotrons**
 - → le noyau devrait **capturer l'électron (10 ns)**

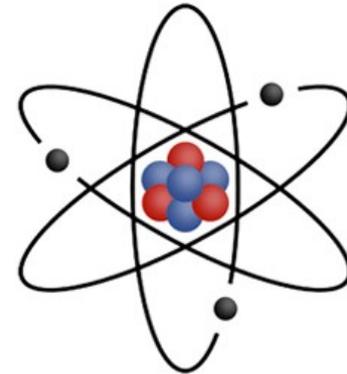
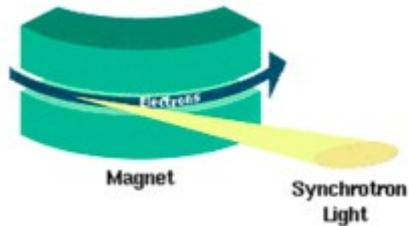
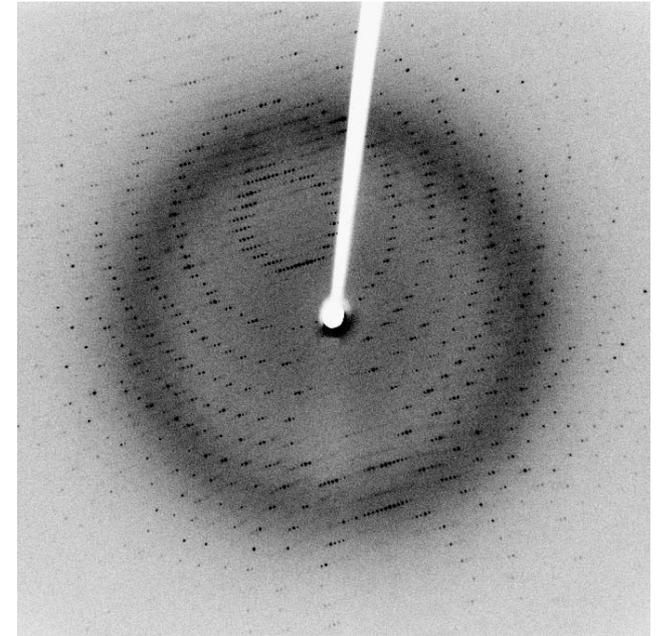


Image : CNRS



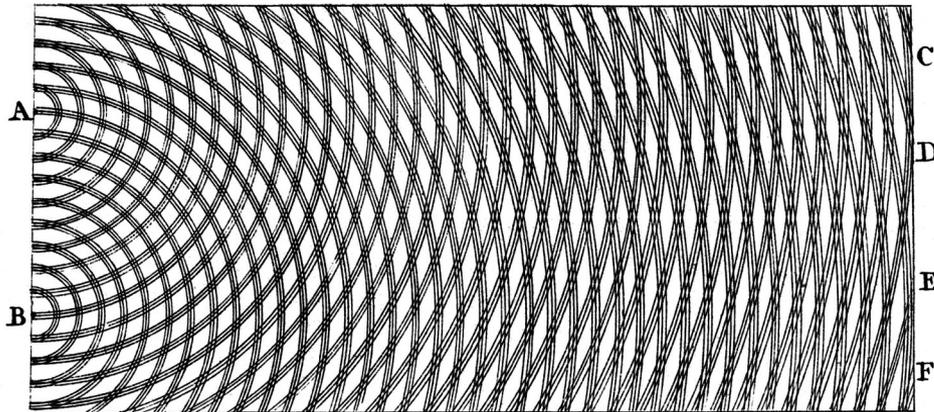
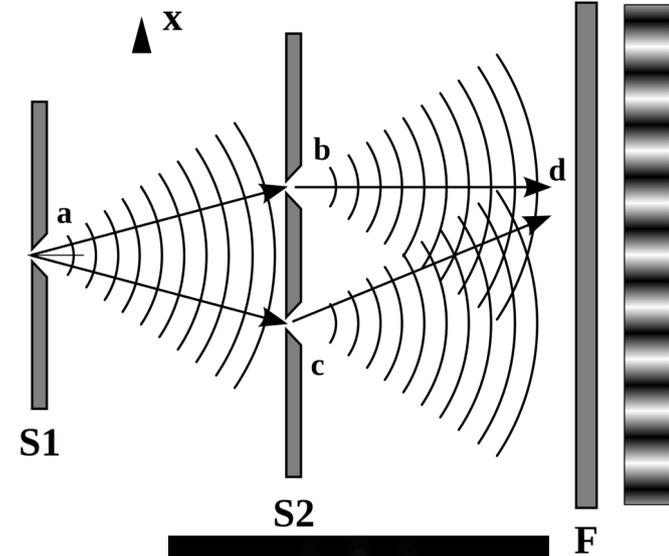
ESRF de Grenoble (European Synchrotron Radiation Facility)



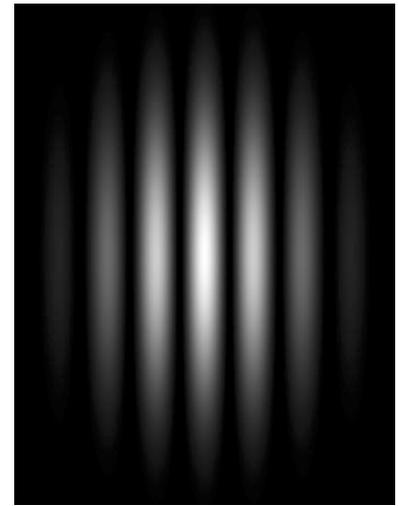
Cliché de diffraction de la protéase virale 3CLpro cristallisée

Expérience des fentes de Young

- Expérience d'optique (1801) qui met en évidence la **nature ondulatoire de la lumière**
- **Interférence** de deux faisceaux lumineux secondaires issus de la **diffraction** par les fentes (source **monochromatique**)
- On calcule la **figure d'interférences** grâce à la physique classique (lois de Fresnel)

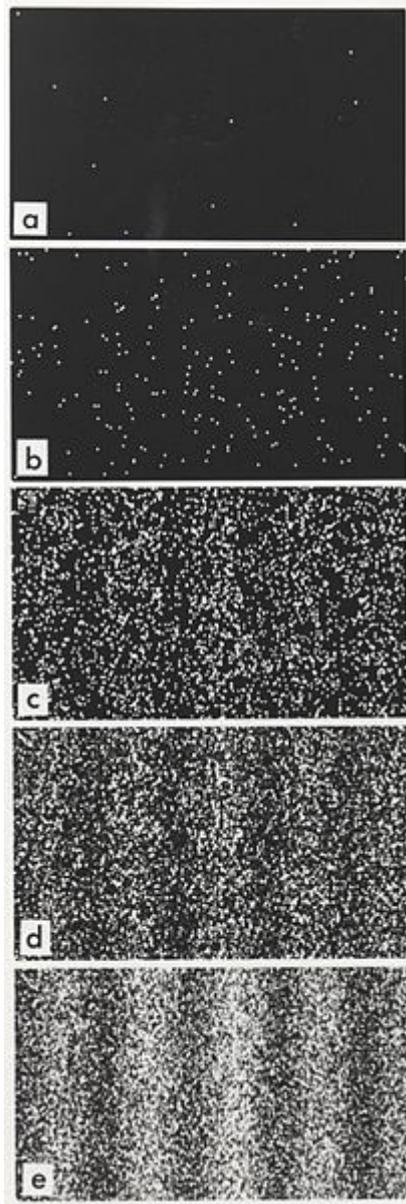


Représentation par Thomas Young de l'interférence par analogie avec des vagues à la surface de l'eau



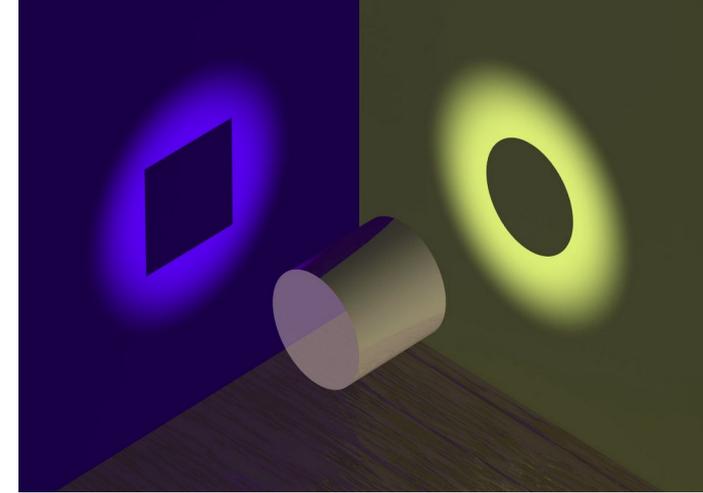
Phénomènes quantiques

- Emission d'un *quantum* à la fois & détection unitaire sur l'écran
- La figure d'interférences apparaît petit à petit avec les impacts
 - Impossible à interpréter avec la physique classique
- Interprétation quantique : le quantum émis prend un **état superposé** lors du franchissement des fentes
 - $\alpha | \text{quantum passe par } S1 \rangle + \beta | \text{quantum passe par } S2 \rangle$
 - On peut calculer en tout point de l'écran la probabilité que le quantum y soit détecté. Elle **suit la figure d'interférences**.
 - \rightarrow le quantum **passé par les deux fentes** à la fois et « **interfère avec lui-même** » (Dirac, années 30)
- Si on masque une des 2 fentes, pas d'interférence
 - **Figure à 2 fentes \neq somme des 2 figures à une fente**

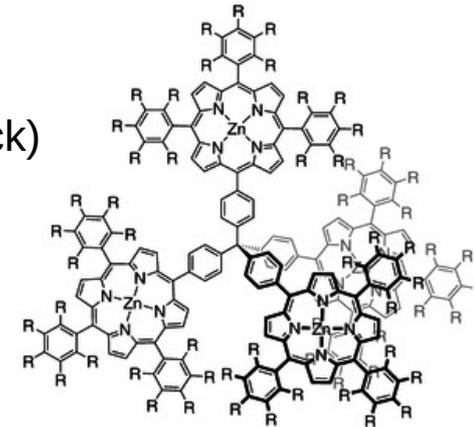
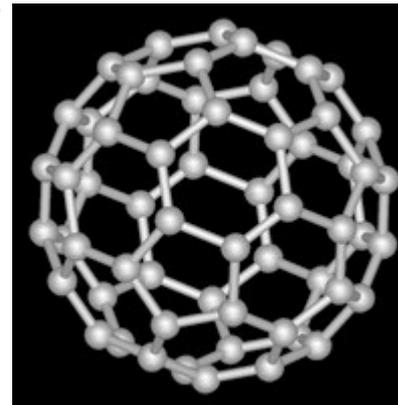


La dualité onde–corpuscule

- Principe selon lequel **tous les objets physiques** peuvent présenter parfois les **propriétés d'une onde** et parfois les **propriétés d'un corpuscule**
- Expérience des fentes de Young :
 - Les **interférences** montrent un comportement **ondulatoire**
 - La **détection** sur un écran montre un comportement **particulaire**
- Exprimée pour le photon par Einstein en 1905,
 - Relation de Planck-Einstein : $E = h \cdot \nu$ ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s : constante de Planck)
- Généralisée aux particules par De Broglie en 1924
 - Longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{p}$
 - Expérience des fentes de Young effectuées avec :
 - Des électrons (1927)
 - Des fullérènes (C_{60})
 - Des macromolécules (2019, Yaakov Fein et al.)



Métaphore du cylindre



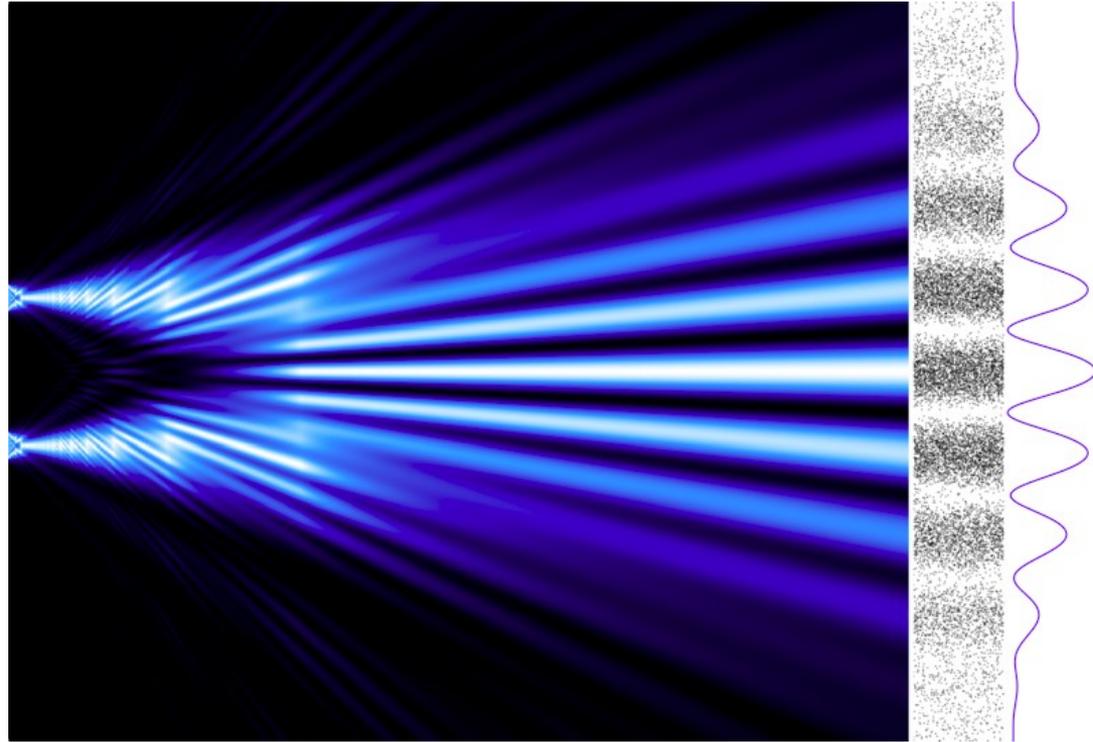
R = F or $C_{10}H_4F_{17}S$

M= 25 000g/mol

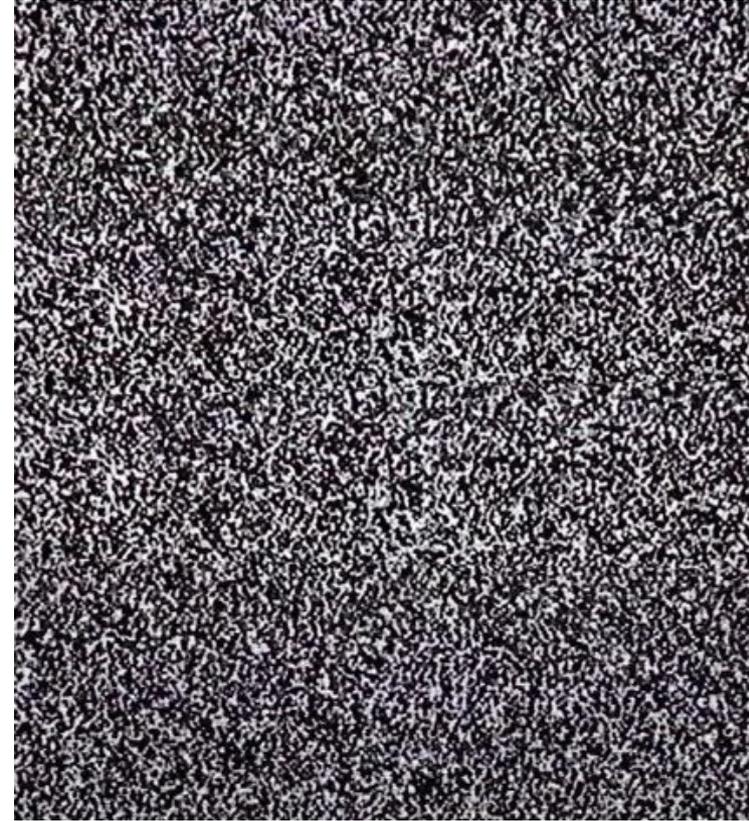
Expérience des fentes de Young II

Version **corpusculaire** (avec des électrons)

- Simulation (Claus Jönsson, 1961) :
 - Gauche : évolution de l'**intensité du jet d'électrons** (plus l'intensité / la probabilité de présence importante, plus la couleur est bleu clair)
 - Centre : **impacts des électrons** sur l'écran de détection
 - Droite : **densité des électrons**



Problème de la mesure



- Rappel : dans l'interprétation quantique, une particule **passé par les 2 fentes en même temps**
- Que se passe-t-il si on cherche à détecter **par quelle fente** la particule est « réellement » passée ?
- Expérience avec des électrons :
 - On peut détecter par quelle fente l'électron passe mais alors **la figure d'interférences disparaît !**
 - L'interaction électron / photon provoque un « **effondrement de la fonction d'onde** » et **de l'état superposé** à cause de l'interaction avec un photon qui permet la mesure (même si on regardait la fente par laquelle il n'est pas passé...)
- Il n'existe **aucun moyen de savoir** par quelle fente le *quantum* est passé **sans éliminer le phénomène d'interférence** (postulat 5 sur la réduction du paquet d'onde)
- L'incertitude quantique concernant le passage par l'une ou l'autre fente est **caractéristique de l'état du système**, elle n'est **pas une simple ignorance de l'observateur**

L'effet tunnel (1)

C'est le franchissement d'une **barrière de potentiel** par une particule même si son **énergie** est **inférieure** à **l'énergie minimale requise pour franchir cette barrière**



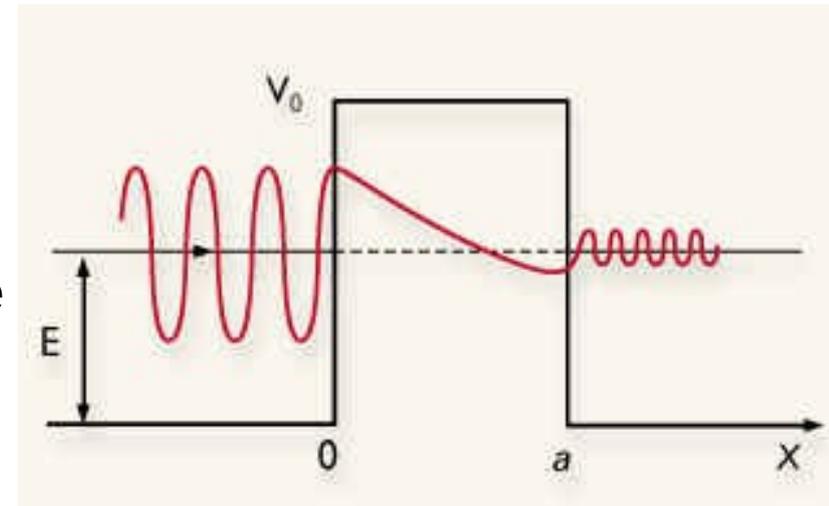
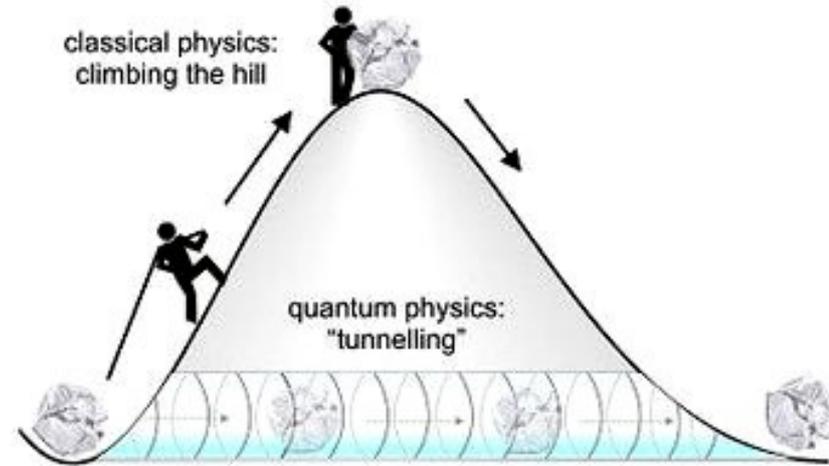
L'effet tunnel (2)

- Effet **purement quantique**

- ne peut pas s'expliquer par la mécanique classique

- La **fonction d'onde**, dont le carré du module représente la **densité de probabilité** de présence s'**atténue** à l'**intérieur** de la barrière mais ne **s'annule pas**

- → la particule peut avoir une **probabilité de présence non nulle** à la sortie de la barrière de potentiel, c'est-à-dire qu'elle **peut traverser cette barrière** !
 - Ce serait plus simple pour Sisyphe !
 - Mais **aléatoire**...



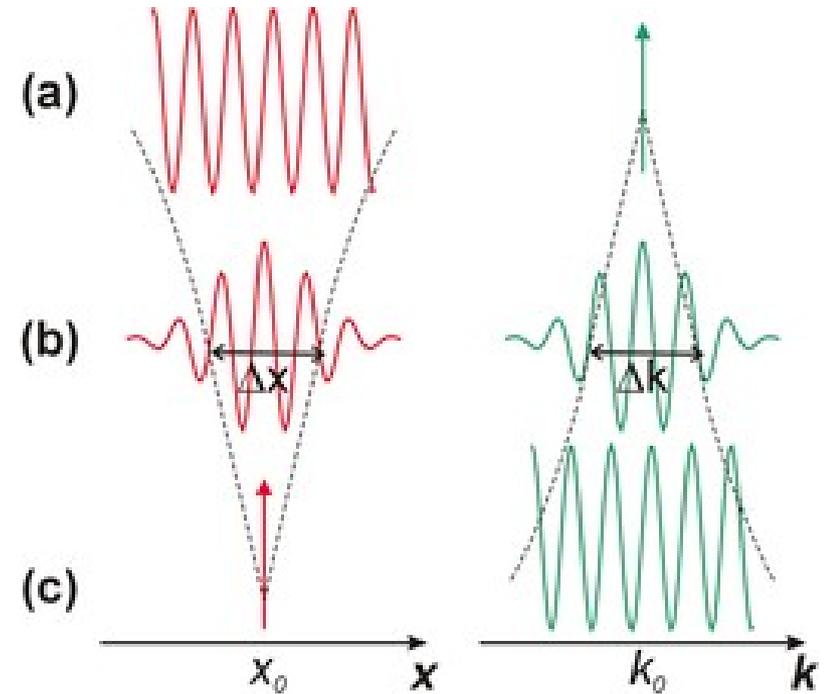
Le principe d'incertitude de Heisenberg

- On ne peut déterminer avec une **précision infinie** la **position** et la **vitesse (impulsion)** d'une particule (variables « **corrélées** »)

$$\sigma_x \cdot \sigma_p \geq \hbar/2$$

« sigma » = écart-type

- Blague d'étudiant (en physique) : j'ai parfaitement déterminé la quantité de mouvement de ma copie, alors elle peut se trouver n'importe où dans l'Univers...

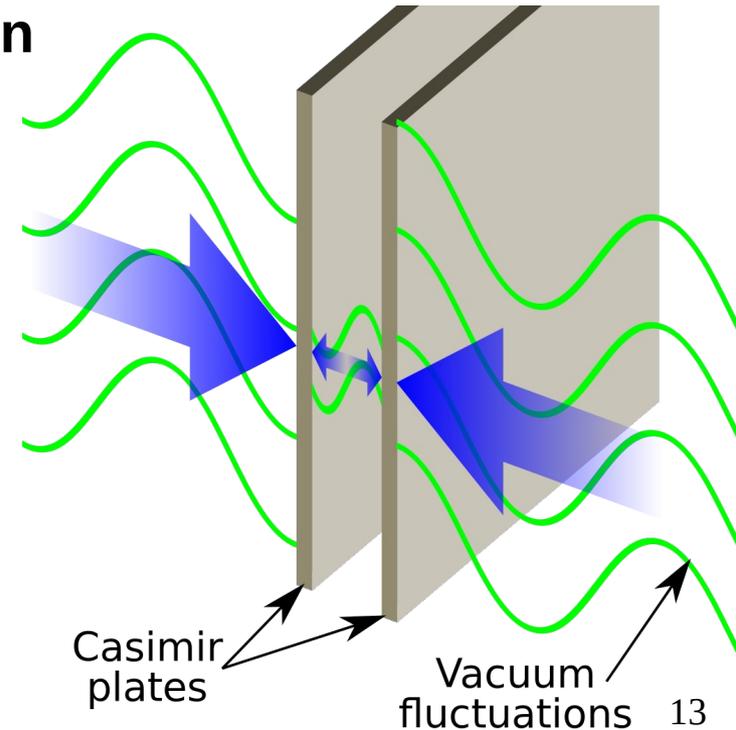


- Fonctions d'onde décrivant la position (x_0) ou la quantité de mouvement (k_0) de
 - (a) une **onde** (fréquence pure, donc impulsion connue mais non localisée)
 - (b) un **paquet d'onde** (distribué en fréquence et dans l'espace)
 - (c) un **corpuscule** localisé (localisé mais pas de fréquence déterminée)
- Étalement spatial inversement proportionnel à l'étalement de l'impulsion

L'énergie du vide

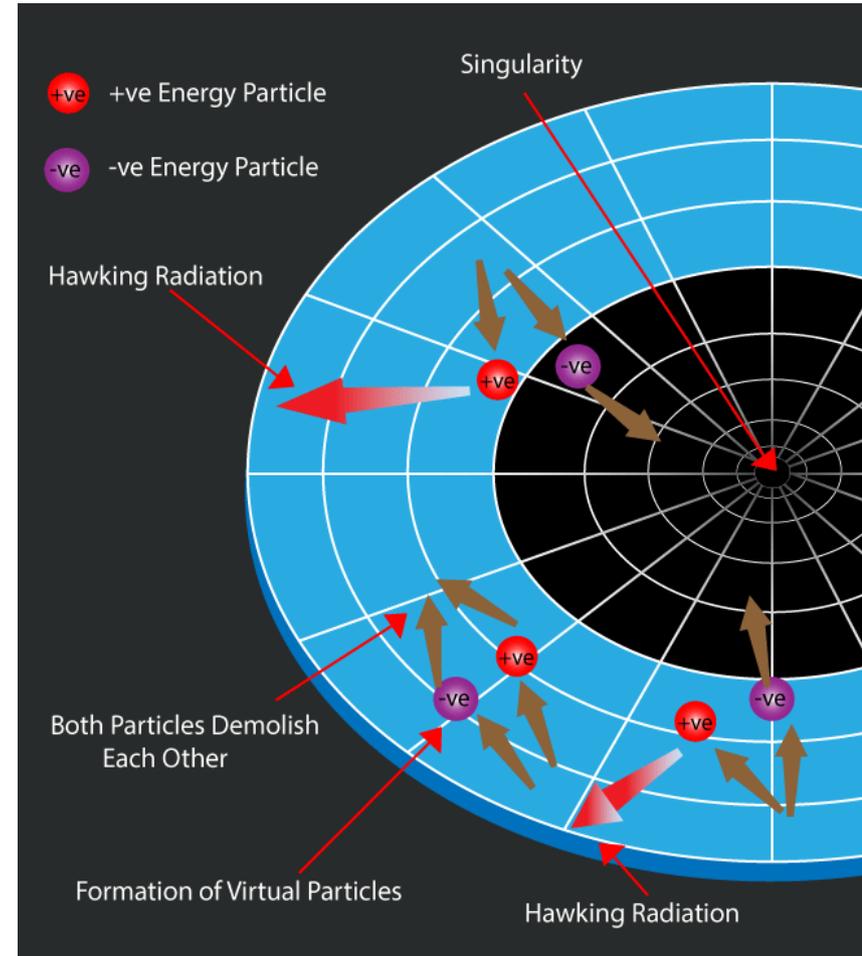
- Principe d'incertitude appliqué au couple **énergie/temps**
- Les **fluctuations du champ quantique** peuvent faire apparaître des **paires particule-antiparticule** pendant des temps **très courts** (particules « **virtuelles** » **non observables**)
 - **Effet Casimir** (force attractive entre deux plaques parallèles conductrices et non chargées)
 - **Déplacement de Lamb** (niveaux d'énergie d'un électron dans l'atome d'hydrogène)
- → « **énergie du vide** » (énergie du **point zéro** = énergie de l'**état fondamental**)
 - Détectable uniquement à **très petite échelle**
 - **Négligeable à l'échelle macroscopique** car les fluctuations s'annulent sur de grands volumes

$$\sigma_E \cdot \sigma_t \geq \hbar/2$$



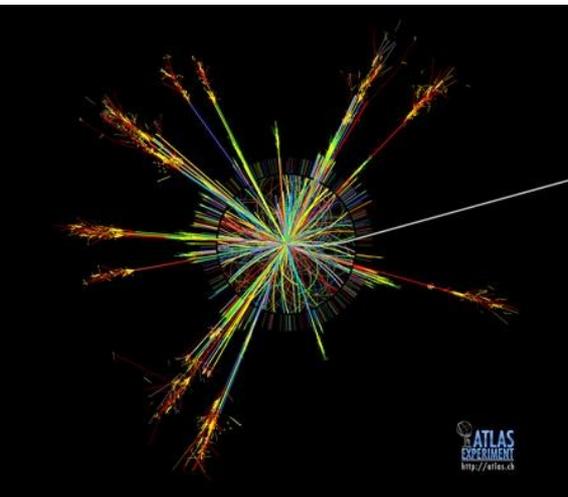
L'évaporation des trous noirs

- Ou « **rayonnement de Hawking** » (1975)
 - **Infime rayonnement** (de corps noir) émis à **proximité de son horizon des événements**
 - **Effet quantique** (aucun rayonnement au niveau classique)
- À proximité de l'horizon, les **forces de marée** peuvent **empêcher l'annihilation des particules virtuelles** issues des fluctuations du vide
 - Paires particules/anti-particules piégées dans le **puits de potentiel** du trou noir : énergie « négative »
 - Mais l'une des particules peut avoir une énergie « positive » et **échapper à l'attraction gravitationnelle du trou noir**
 - Le trou noir absorbe alors la particule d'énergie « négative » → **diminution de son énergie / sa masse**

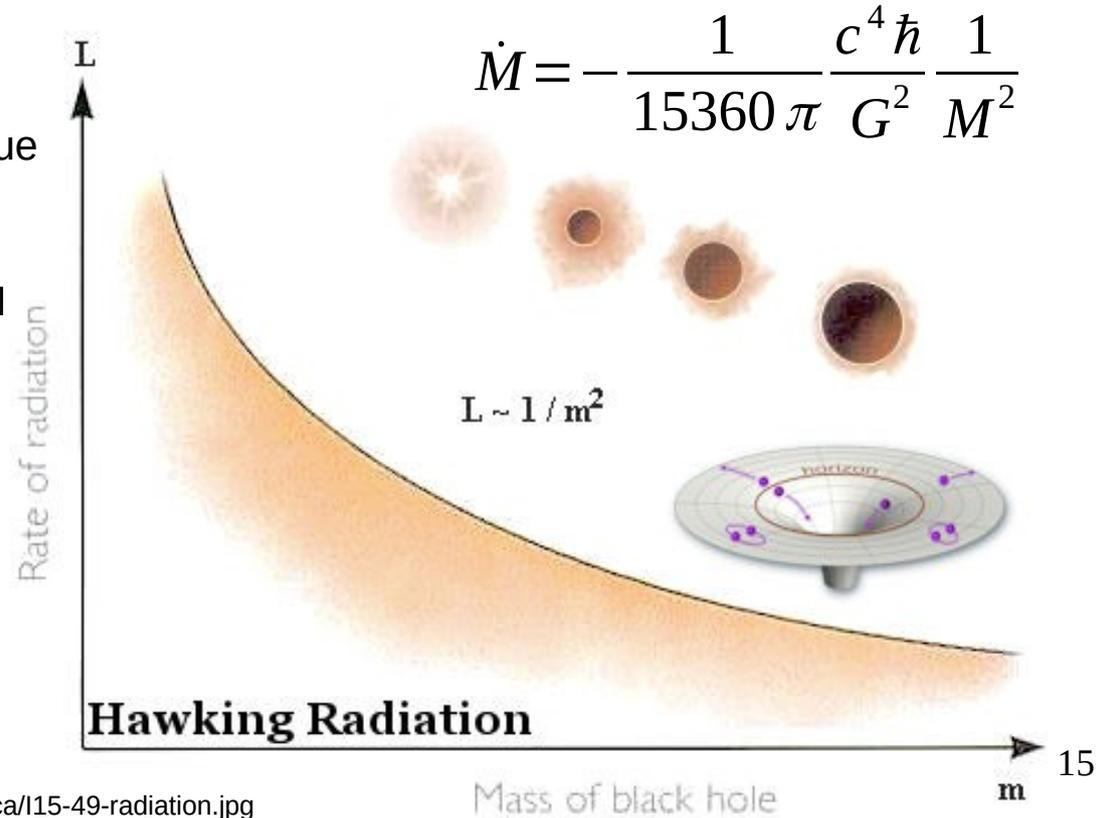


L'évaporation des trous noirs (2)

- Autre interprétation (**conservation de l'énergie**) : le rayonnement de Hawking perçu provient d'une **perte d'énergie** du trou noir
- Effet **plus important pour les petits trous noirs**
 - (Effets de marée plus importants)
 - Pour un trou noir d'une masse solaire, la durée d'évaporation est environ 10^{57} fois plus grande que l'âge de l'Univers
 - Provoque la disparition ~instantanée (10^{-27} s) de micro-trous noirs éventuellement créés au CERN

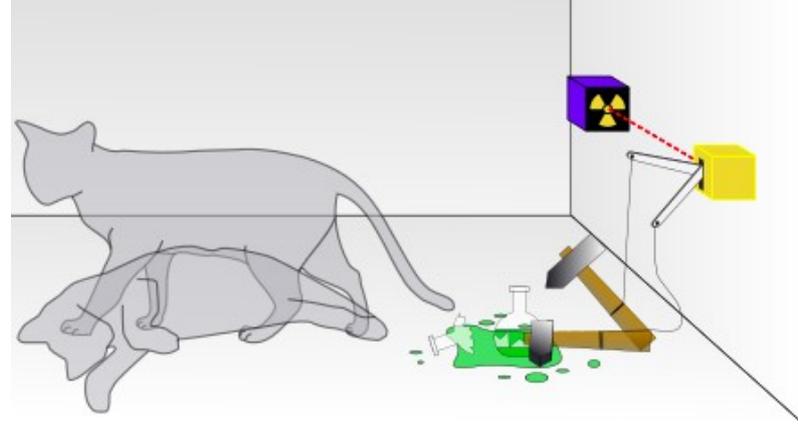


Simulation de production d'un trou noir dans ATLAS



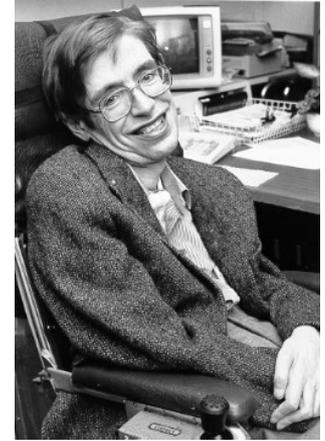
Le chat de Schrödinger (1935)

- Expérience de pensée visant mettre en évidence le problème de l'**émergence de lois macroscopiques** (à l'échelle d'un chat) **à partir des lois** (microscopiques) **de la physique quantique**
 - Pourquoi est-ce impossible dans le monde macroscopique ?
- Montage expérimental :
 - un chat est **dans une boîte** avec un dispositif qui tue l'animal dès la désintégration d'un atome radioactif
- État du système au bout de $T_{1/2}$ (probabilité de désintégration = 50%) :
 - tant que l'observation n'est pas faite (ouverture de la boîte), l'atome est dans une **superposition de deux états équiprobables** : intact et désintégré
 - Or l'état du chat (**mort ou vivant**) est **lié à l'état de l'atome** donc le chat serait aussi dans une **superposition d'états (mort et vivant)**, l'observation déclenchant le choix entre les deux états → « **paradoxe** » car ce n'est pas le cas
- L'expérience n'est pas réalisable :
 - Techniquement : il est très difficile de préserver l'état superposé d'un système macroscopique (le chat)
 - Sur le principe : On ne pourra jamais mesurer que le chat est à la fois mort et vivant car cela provoquerait l'effondrement de la fonction d'onde

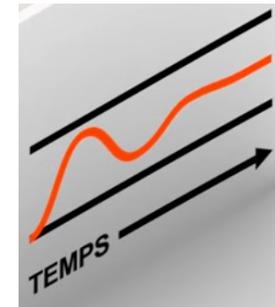
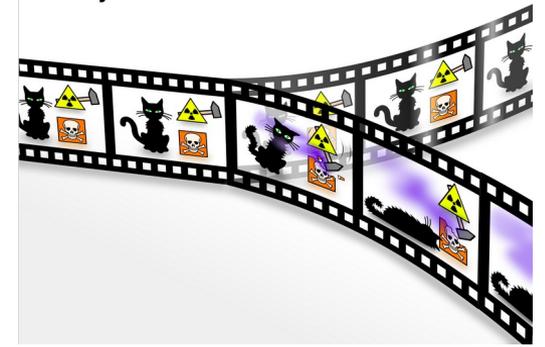


Le chat de Schrödinger

Explications et interprétations



« Quand j'entends "chat de Schrödinger",
je sors mon revolver »



- Le chat et le détecteur **produisent des observations** qui réduisent la fonction d'onde et font disparaître la superposition (question de la conscience, expériences de Dean Radin – voir lien)
- **Approche positiviste** (Heisenberg, Hawking, Kant) : la fonction d'onde **ne décrit pas la réalité (noumène)** mais **ce que nous en connaissons (phénomène)**, l'état superposé du chat n'est **pas réel**
- Théorie des « **univers parallèles** » (ou plutôt « mondes multiples », H. Everett), **inverse du positivisme** : la fonction d'onde décrit bien toute la réalité. Les états superposés sont réels et l'Univers va se **scinder en 2 branches** au moment de la mesure
- Théorie de la **décohérence**
 - Un système quantique est en **interaction avec son environnement** et **ne peut pas être considéré comme isolé**
 - Ces interactions entraînent la **disparition rapide des états superposés**

Pour aller plus loin

- Chat de Schrödinger :
 - [youtube.com/watch?v=cuW0jQqc6sQ](https://www.youtube.com/watch?v=cuW0jQqc6sQ)
 - [youtube.com/watch?v=44ya-DSF6fw](https://www.youtube.com/watch?v=44ya-DSF6fw)
- Influence de la conscience :
 - https://www.researchgate.net/profile/Dean-Radin/publication/258707222_Consciousness_and_the_double-slit_interference_pattern_Six_experiments/links/54ebb5850cf2ff89649e4058/Consciousness-and-the-double-slit-interference-pattern-Six-experiments.pdf?origin=publication_detail
- Théorie des mondes multiples
 - [youtube.com/watch?v=TjhTXruha6M](https://www.youtube.com/watch?v=TjhTXruha6M)
 - [youtube.com/watch?v=tyMogehEZ74](https://www.youtube.com/watch?v=tyMogehEZ74)