

Un peu de Physique ... pour comprendre le monde moderne

Bernard Remaud

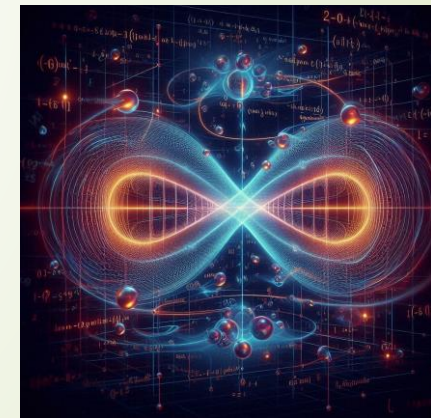
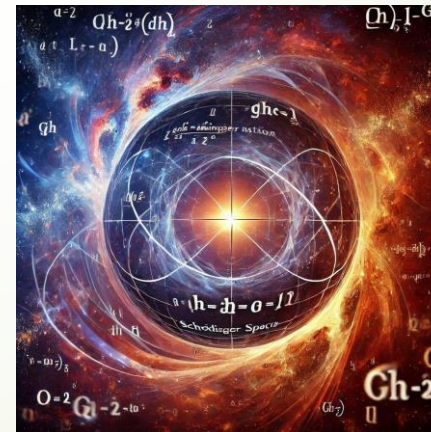
bernard.remaud@univ-nantes.fr

<https://www.un-peu-de-physique.fr>

Ch -2-

Mécanique quantique

b) Les états liés



Cette œuvre est sous licence Creative Commons Attribution - Pas
d'Utilisation Commerciale 4.0 International.



Masse (charge gravitationnelle)
 Charge électrique
 Spin : fermion $\leftrightarrow$ boson
 Charge de couleur (interaction forte)
 Charge électrofaible (interaction faible)

Symétries : parité, baryons $\leftrightarrow$ leptons, ...

Espace des fonctions d'état + temps

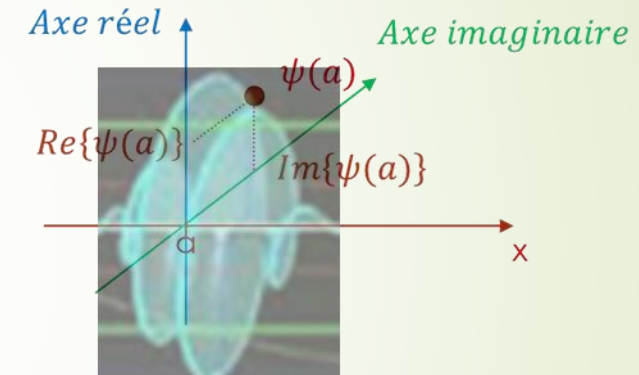
Vecteur d'état : $\psi(\vec{r}; t)$ complexe
 (partie réelle et partie imaginaire)
 Probabilité de présence :

$$\|\psi\|^2 = \psi^*(\vec{r}; t) \psi(\vec{r}; t)$$

Valeur moyenne des observables
 $A(r, p)$:

$$\langle \hat{A} \rangle = \int d\vec{r} \psi^*(\vec{r}; t) \hat{A} \psi(\vec{r}; t)$$

L'évolution au cours du temps t de
 $\psi(\vec{r}; t)$ est donnée par des
 équations, comme celle de
 Schrödinger.



$\psi(x; t_{fixe})$ d'une particule sur un axe

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

Propriétés

- **Linéarité** → **Superposition** : si Ψ_1 et Ψ_2 sont 2 solutions (états) possibles : $a \Psi_1 + b \Psi_2$ sont solutions
- **Déterminisme** : conditions initiales (ou aux limites) fixées, l'évolution est déterminée
- **Norme constante** → loi de probabilité : si $\|\Psi(t=0)\| = 1$ alors $\|\Psi(t)\| = 1$ pour tout t

Pour calculer la valeur moyenne d'une grandeur $A(x, p)$, **indépendante du temps**, on lui associe son opérateur $\hat{A}(\hat{x}, \hat{p})$, et on calcule

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} dx \Psi^*(x) \hat{A} \left(x, -i\hbar \frac{d}{dx} \right) \Psi(x)$$

Ehrenfest (théorème) : les valeurs moyennes des position/moment sont (presque) solutions des **équations classiques** (Hamilton/Newton)

$$\frac{d\langle x \rangle}{dt} = \frac{\langle p_x \rangle}{m}; \quad \frac{d\langle p_x \rangle}{dt} = - \left\langle \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial x} \right\rangle$$

Equation de Schrödinger à 1 dimension (pour simplifier au départ)

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

La plupart des objets quantiques qui constituent la matière qui nous entoure, sont confinés dans l'espace (liés) avec une énergie constante

Etats stationnaires

L'énergie E est constante ; on peut **factoriser** la fonction d'onde en une partie « **espace** » et une partie « **temps** » (cf. ondes stationnaires classiques)

$$\Psi(x, t) = A(x) e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

Dans ce cas, l'équation de Schrödinger devient indépendante du temps :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 A(x)}{dx^2} + V(x) A(x) = E A(x)$$

Pour les états liés, les conditions aux limites déterminent les valeurs possibles **quantifiée de E** (analogie avec les cordes vibrantes diapo suivante)

Analogues classiques

Découplage de l'espace et du temps

Une onde se propageant $u_1 \sim \cos(kx - \omega t)$ Une onde stationnaire $u_2 \sim \cos(kx) \cos(\omega t)$

État quantique lié stationnaire

- Découplage de l'espace et du temps

$$\psi(x, t) \Rightarrow A(x)e^{-i\frac{Et}{\hbar}}$$

- Probabilité de présence indépendante du temps :

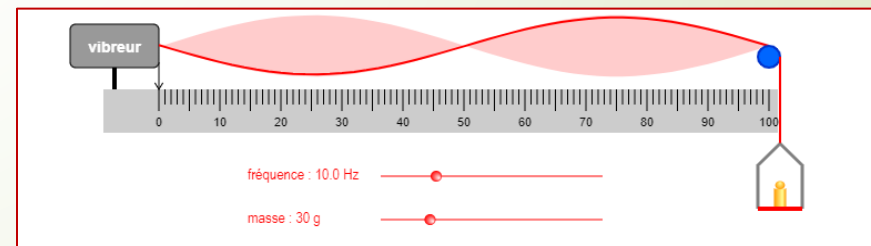
$$|\psi(x, t)|^2 = \psi^*(x, t)\psi(x, t) \Rightarrow |\psi(x, t)|^2 = A^2(x)$$

- Conditions aux frontières du domaine

→ Quantification des états stationnaires

Analogie classique

[Voir la vidéo](#)



<https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr>

Fonction d'état ψ de la particule

Libre

Extension spatiale **non limitée**

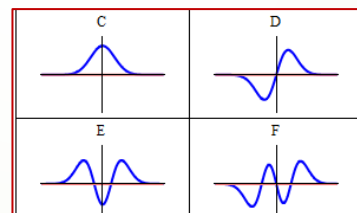
Faisceaux de particules dans les accélérateurs
Électrons dans les conducteurs
Rayons cosmiques
Photons
...

Étalement de la fonction d'état

Liée

Extension spatiale **limitée**

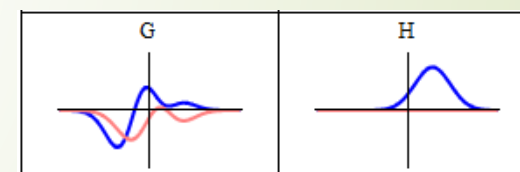
Stationnaire

Probabilité de présence spatiale **indépendante** du temps

Protons dans les noyaux
Électrons dans les atomes et molécules

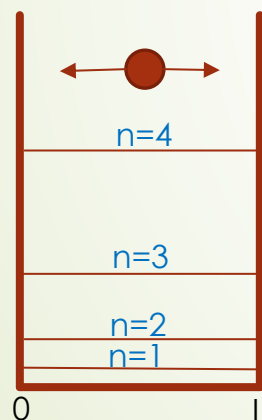
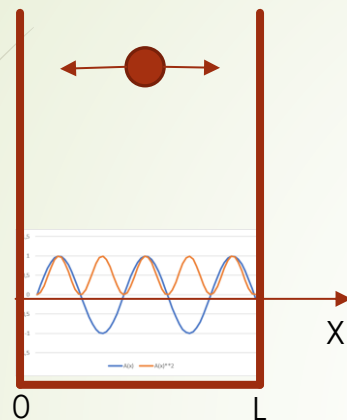
Valeurs moyennes des observables **indépendantes** du temps

Non stationnaire

Probabilité de présence spatiale **dépendante** du temps

Particule piégée dans un puits de potentiel

Des valeurs moyennes des observables **dépendantes** du temps



Fonction d'état spatiale avec des conditions aux limites

$$A_n(x) = \sqrt{2/L} \sin \frac{\pi n x}{L}$$

Où est la mécanique quantique ?

$$\langle E \rangle_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 \quad n=1, 2, 3, 4, \dots$$

(n-1) est le nombre de nœuds de la fonction d'état.

L'énergie des états liés est quantifiée : ne peut prendre que des valeurs discrètes.
L'énergie la plus basse n'est jamais nulle

L'énergie dépend de la constante de Planck :

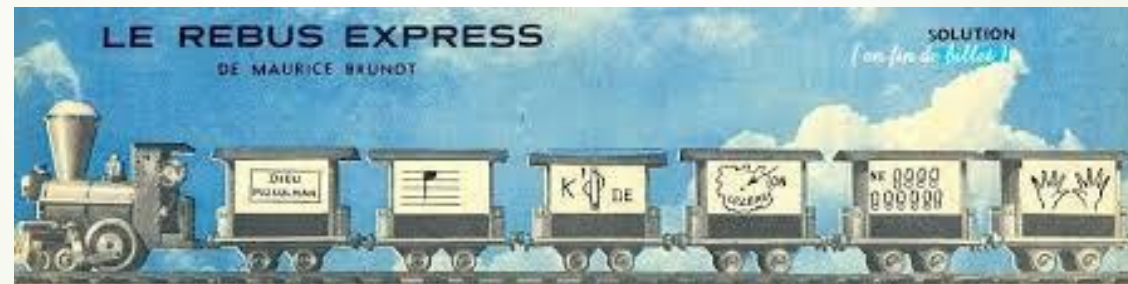
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \rightarrow h = 6,62607004 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$$

QUANTIFICATION

Toutes les animations et explications sur
www.toutestquantique.fr

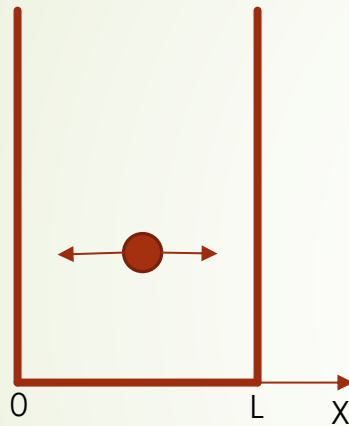
Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées

Interlude pour les matheux



Avant d'étudier en détail les propriétés des fonctions d'état des objets quantiques (voir chapitre suivant), étudions –de manière intuitive – un cas simple et aisément calculable (?)

Objet quantique de masse m et d'énergie E , dans un état stationnaire, confiné/lié dans un « puits » de potentiel de largeur « L »



$$\psi(x, t) \Rightarrow A(x)e^{-i\frac{Et}{\hbar}}$$

Sa probabilité de présence est simplement

$$|\psi(x, t)|^2 = A^2(x)$$

L'objet ne sort pas du puits :

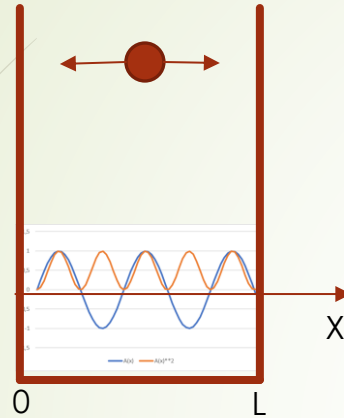
$$A(x \leq 0) = 0 ; A(x \geq L) = 0$$

Seules solutions (symétrie axiale) compatibles avec les conditions aux limites :

$$A_n(x) = \sqrt{2/L} \sin \frac{\pi n x}{L}, n = 1, 2, 3, \dots$$

La fonction d'état exacte de l'état stationnaire d'un objet de masse m , confiné dans un puits de largeur L est donc :

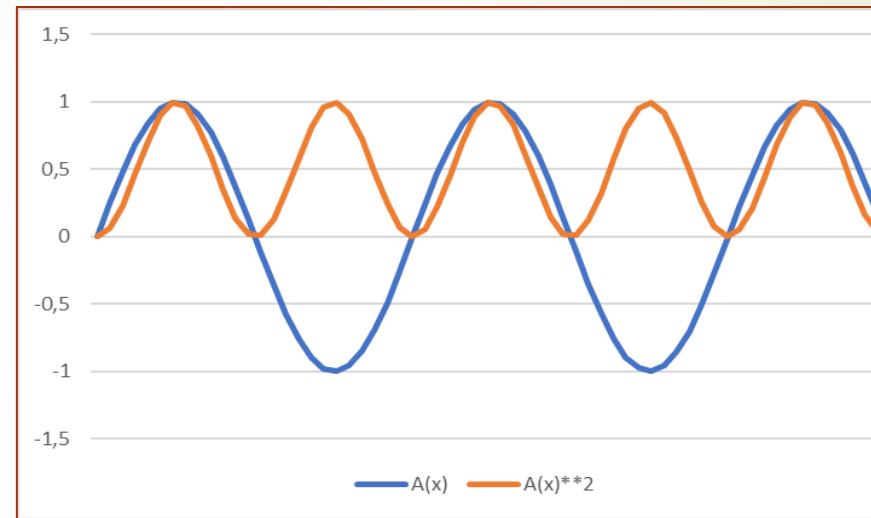
$$\psi(x, t) = A(x)e^{-i\frac{Et}{\hbar}} \Rightarrow \psi_n(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-i\left(\frac{\pi^2 \hbar n^2}{2 m L^2}\right)t}, n = 1, 2, \dots$$

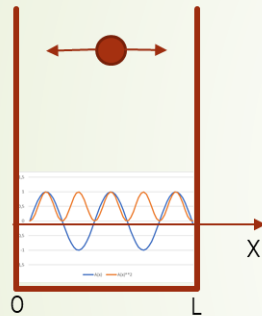


Un exemple $n=5$

Seule $A(x)^2$ est observable, statistiquement

Les seules fonctions d'état compatibles avec les conditions aux limites





Lorsque l'état quantique d'une particule est stationnaire, sa fonction d'onde est : $\psi(x; t) = A(x)e^{-i\frac{Et}{\hbar}}$; et donc sa probabilité de présence ne dépend que de la position $|\psi(x, t)|^2 = A^2(x)$

Comme c'est une densité de probabilité, la valeur moyenne d'une observable à partir de son opérateur associé est :

$$\langle Op \rangle = \langle A | \widehat{Op} | A \rangle = \int A^2(x) \widehat{Op}(x) dx$$

L'opérateur pour la position est $\hat{x}$ lui-même

L'opérateur pour la quantité de mouvement p est : $\hat{p} = i\hbar \frac{d}{dx}$

Pour une particule dans un puits de potentiel de profondeur infinie, de largeur L, la solution de l'équation de Schrödinger avec les conditions aux limites $A(0) = A(L) = 0$

$$A_n(x) = \sqrt{2/L} \sin \frac{\pi n x}{L}$$

$$\text{Donc } \langle Op \rangle = \langle A | \widehat{Op} | A \rangle = \int A^2(x) \widehat{Op}(x) dx = \frac{2}{L} \int_0^L \widehat{Op}(x) \sin^2 \left(\frac{\pi n x}{L} \right) dx$$

En prenant les opérateurs respectifs pour x et p, on trouve les valeurs moyennes :

$$\langle x \rangle = \frac{L}{2} \text{ et } \langle x^2 \rangle = \frac{L^2}{3} \left(1 - \frac{6}{(2\pi n)^2} \right)$$

$$\langle p \rangle = \langle mv \rangle = 0 \text{ et } \langle p^2 \rangle = \frac{\pi^2 \hbar^2}{L^2} n^2$$

$$\text{Donc l'énergie (ici uniquement cinétique) est } \langle E \rangle = \langle \frac{p^2}{2m} \rangle = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m L^2} n^2$$

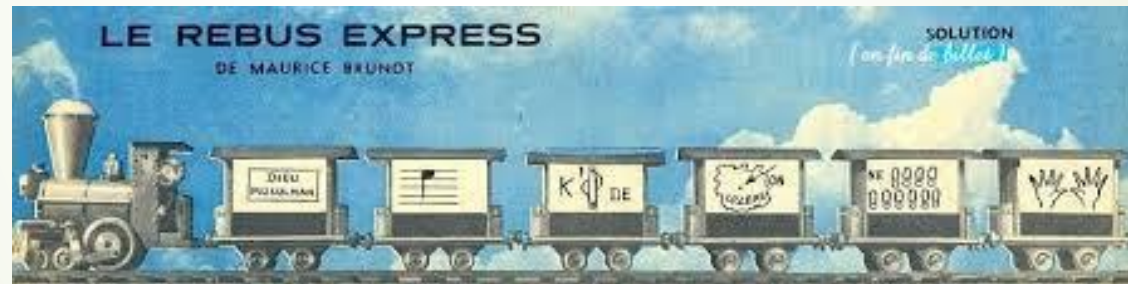
Les fluctuations quantiques autour des moyennes sont calculées par les écarts-types

$$\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2; \Delta x = \frac{L}{\sqrt{12}} \sqrt{1 - \frac{6}{\pi^2 n^2}}$$

$$\Delta p^2 = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2; \Delta p = \frac{n\pi\hbar}{L}$$

$$\text{On vérifie la relation d'incertitude d'Heisenberg : } \Delta x \Delta p = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\left(\frac{n^2 \pi^2}{3} - 2 \right)} > \frac{\hbar}{2}; n = 1, 2, \dots$$

Fin d'interlude

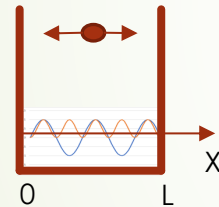
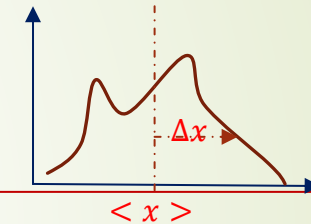


- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés stationnaires des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.

Inégalités d'Heisenberg

- Les mesures de l'observable x (idem pour p_x) sont déterminées par une loi de probabilité, de valeur moyenne $\langle x \rangle$ et de dispersion $\Delta x = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$
- Les mesures simultanées de x et p_x satisfont l'inégalité (indétermination) d'Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} ; \hbar = \frac{h}{2\pi} (6,6 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s})$$
- La précision des mesures de x et p_x est limitée



$$\Delta x \Delta p = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{n^2 \pi^2}{3} - 2}$$

$$\Rightarrow n=1$$

$$\Delta x \Delta p = 1,136 \frac{\hbar}{2} > \frac{\hbar}{2}$$

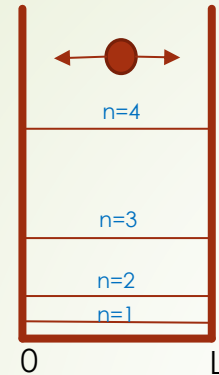
Il existe une autre relation reliant le temps et l'énergie (moins universelle que la précédente)

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

Pendant des durées très courtes, le principe de conservation de l'énergie peut être –très temporairement- violé → création de particules virtuelles.

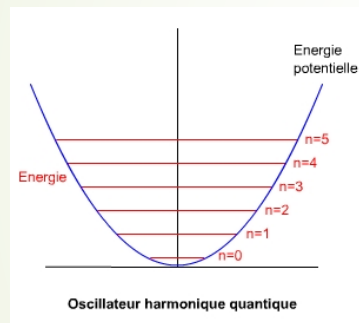
Exemple : création d'une paire électron-antiélectron $\Delta E = 1\,022 \text{ eV} \Rightarrow \Delta t \approx 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ s}$

- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg



Puits de potentiel infini

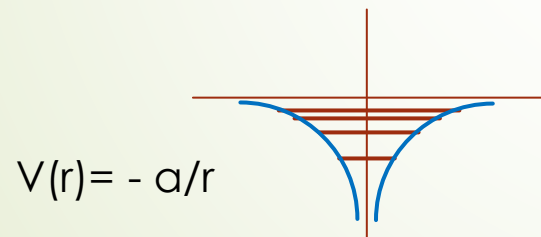
$$\langle E_{cin} \rangle = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 \quad n=1, 2, 3, 4, \dots$$



Puits parabolique (oscillateur harmonique)

$$\langle E_T \rangle = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \Omega \quad n=0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

Niveaux équidistants



Puits coulombien (atome hydrogène)

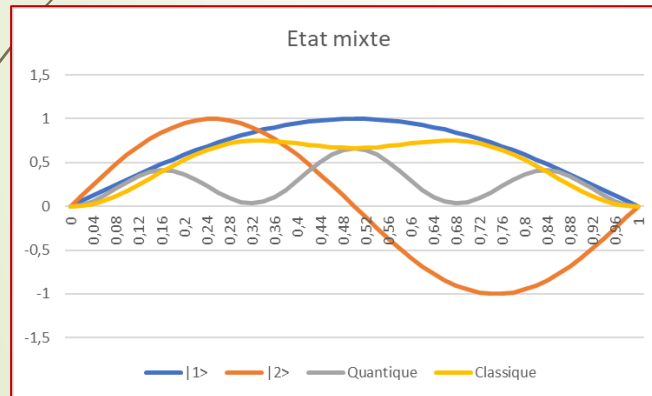
$$\langle E_T \rangle \approx - \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2} \quad n=1, 2, 3, 4, \dots$$

Une particule peut être soit :

- Être dans un état **pur** : occuper un niveau d'énergie quantifié, noté $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$, ...
- Être dans un état **mixte** : occuper **simultanément** plusieurs états
- Par exemple, un mélange du fondamental et du premier niveau excité

$$|\psi\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}}|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|2\rangle ; \quad \text{avec} \quad |n\rangle = A_n(x)e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}}$$

Les coefficients assurent que la probabilité totale (norme) est 1.



Superposition d'états
et décohérence

Principe de superposition

- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)

L'atome – la chimie, la lumière et le temps

Le quantum d'énergie (ici **cinétique**) est $\Delta E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$ -m en kg, L en m

$$\Delta E = \frac{5,5 \cdot 10^{-68}}{mL^2} \text{ Joule}$$

$$\Delta E = \frac{3,44 \cdot 10^{-49}}{mL^2} \text{ eV (electron-volt)}$$

$$mL^2 = 10^{-4}$$

Physique « classique » (bille dans boîte allumettes)

$$M = 10 \text{ g} = 10^{-2} \text{ kg}$$

$$L = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 5,5 \cdot 10^{-64} \text{ J (quasi continu)}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 3,4 \cdot 10^{-45} \text{ eV}$$

Physique atomique (électron dans un atome)

$$M(\text{électron}) = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$L(\text{diam atome}) = 1,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 4 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 26 \text{ eV}$$

$$mL^2 = 1,33 \cdot 10^{-50}$$

$$mL^2 = 2,67 \cdot 10^{-56}$$

Physique nucléaire (proton dans un noyau)

$$M(\text{proton}) = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$L(\text{diam noyau}) = 4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 1,3 \cdot 10^7 \text{ eV} = 13 \text{ MeV}$$

Physique des particules (quark dans un proton)

$$M(\text{quark u}) = 3,6 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

$$L(\text{rayon proton}) = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 5,3 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

$$\Rightarrow \Delta E = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ eV} = 33 \text{ GeV}$$

$$mL^2 = 1,05 \cdot 10^{-59}$$

Les états stationnaires des électrons liés dans l'atome sont caractérisés par des nombres quantiques 1 nombre à une dimension; 3 à trois dimensions.

Les atomes

Les électrons de l'atome sont soumis au champ électrique du noyau (Z protons)

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

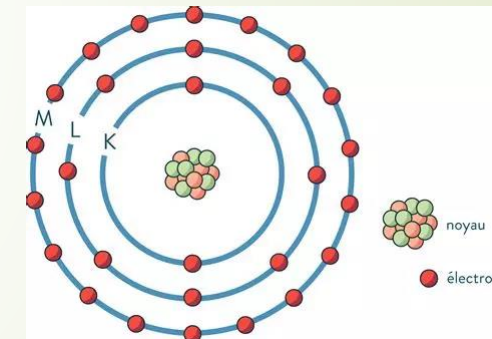
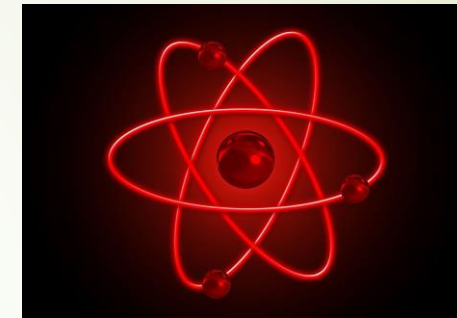
Ce sont des fermions, dont les états sont caractérisés par 3 nombres quantiques (n, l, m) et 2 états de spin $s = \pm 1/2$

Les niveaux d'énergie quantifiés

$$E_n = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{me^4}{n^2 \hbar^2} ; n = 1, 2, 3, \dots$$

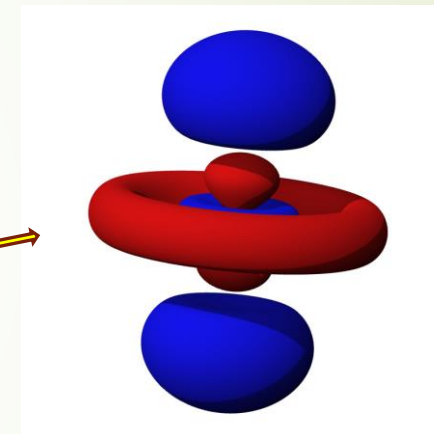
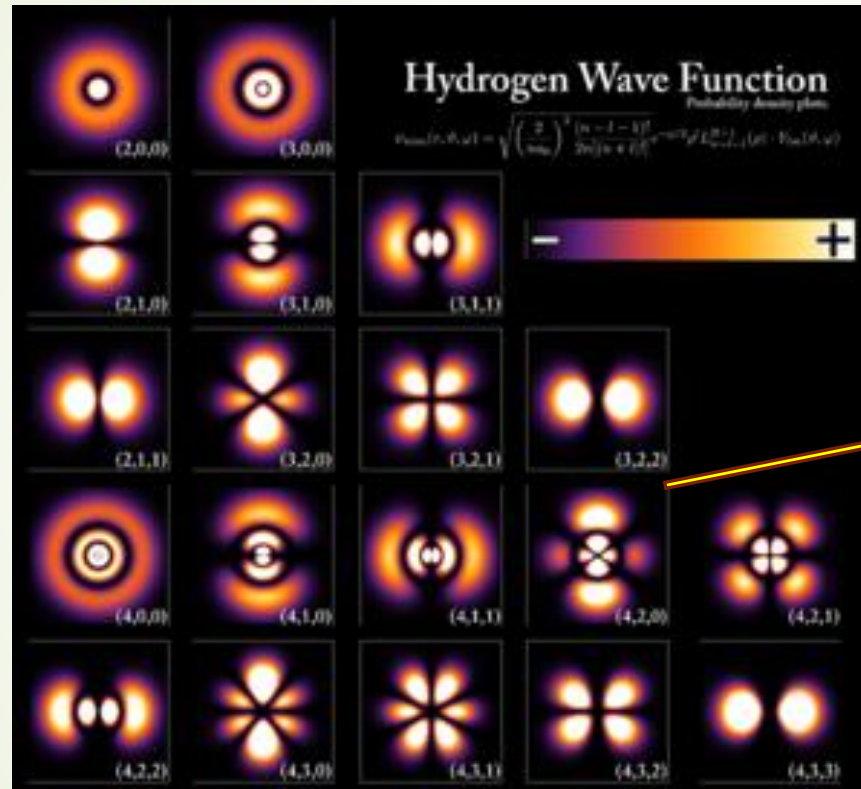
dépendent uniquement (à discuter) du nombre quantique n .

Chaque niveau d'énergie ne peut être occupé que par $2n^2$ électrons.



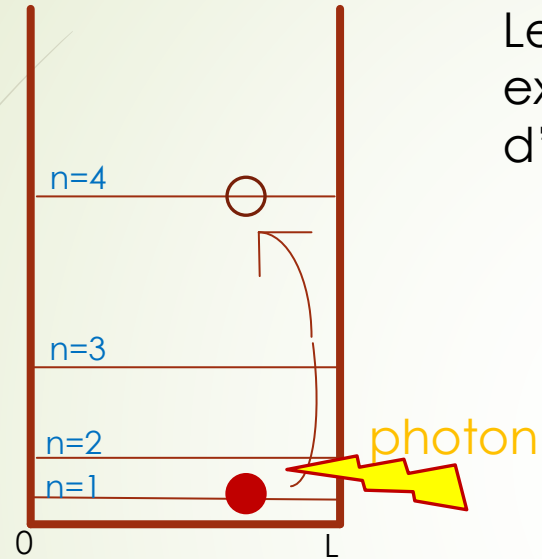
Représentations imagées, mais fausses

Les états stationnaires des **particules liées** sont caractérisés par des nombres quantiques 1 nombre à une dimension; 3 à trois dimensions.



Orbitales (probabilité de présence tirée de la fonction d'onde) de l'atome d'hydrogène ($Z=1$)
(wikipedia)

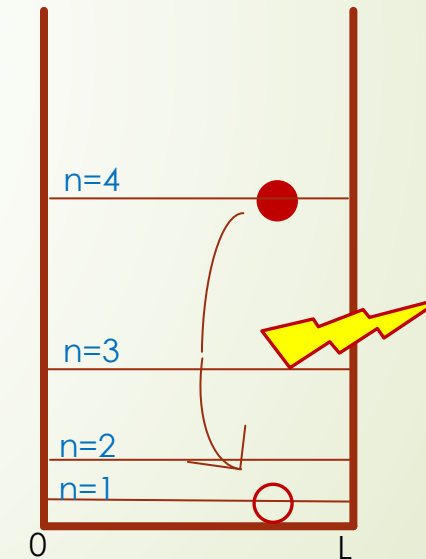
- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)
- Les règles d'occupation des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes sont à l'origine des propriétés chimiques.



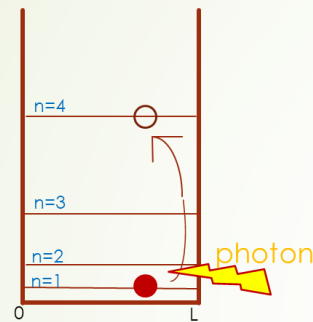
Le passage de l'état fondamental ($n=1$) à l'état excité ($n=4$) nécessite une énergie (**absorption** d'un photon) de

$$E_4 - E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (4^2 - 1^2) = 15 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

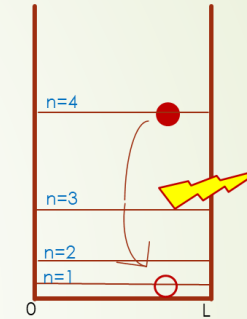
Pour le processus inverse, le passage de l'état excité au fondamental va donner lieu à l'**émission** d'un photon de la même énergie



Les électrons (chargés) interagissent avec les ondes électro-magnétiques (photons)



Absorption/émission spontanée
d'un photon entre 2 niveaux
d'énergie E_1 et E_2



Ce mécanisme est soumis aux lois de conservation :

- **Énergie** : $h\nu = E_2 - E_1$ (approx)
- **Impulsion** : le photon émis à une impulsion $p = \frac{h\nu}{c}$ qui provoque le recul de l'atome émis
- **Spin** : le photon a un spin 1 ; le spin (moment cinétique) de l'atome avant et après émission/absorption doit être compatible.

Les niveaux **excités** se désexcitent spontanément;
ils ont une **durée de vie limitée**

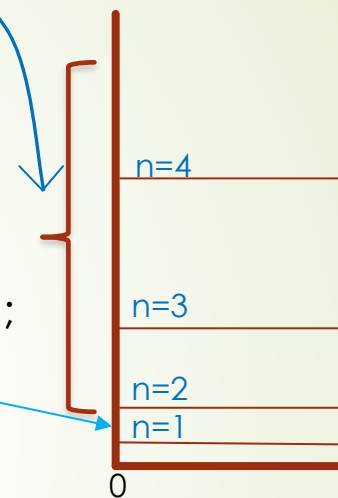
Relations d'Heisenberg : $\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$;

$$\Delta t < \infty \rightarrow \Delta E > 0$$

La durée de vie du **niveau fondamental** est infinie ;

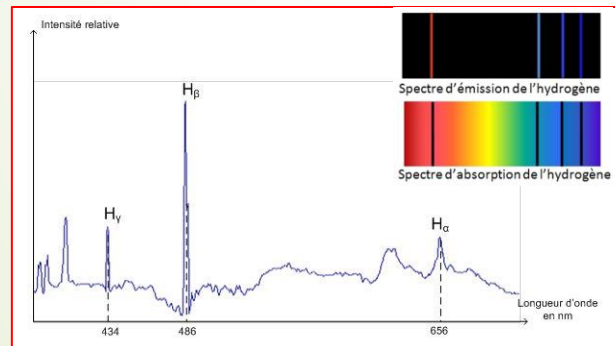
$$\Delta t = \infty \rightarrow \Delta E = 0$$

Les durées de vie des **niveaux excités** d'atomes sont de l'ordre de 10^{-9} s ;
leur énergie est définie à $\pm 6 \cdot 10^{-7}$ eV (pour des niveaux de l'ordre de la dizaine d'eV). On parle de largeur de niveau non nulle.

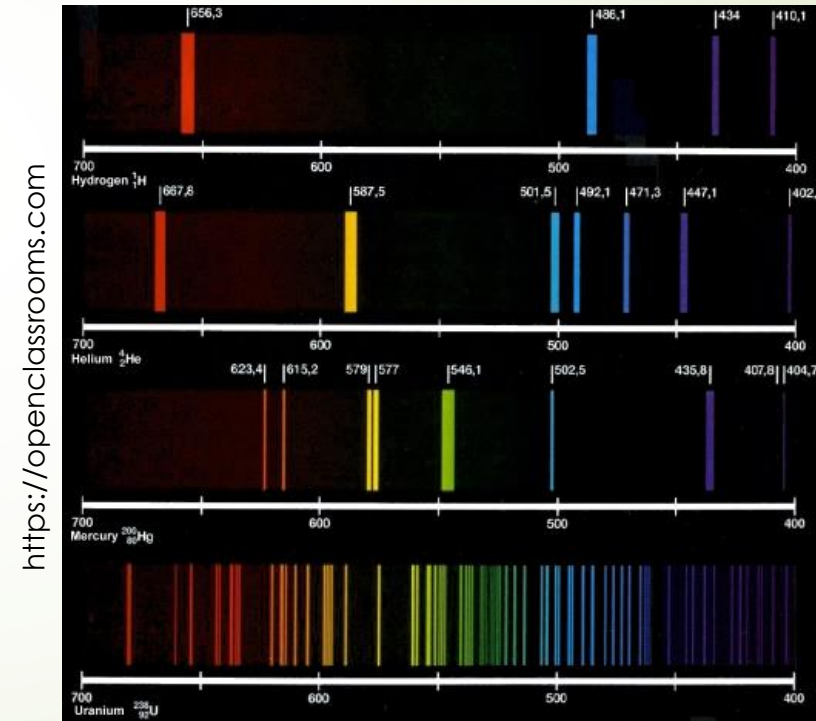


Les lois de conservation conduisent à :

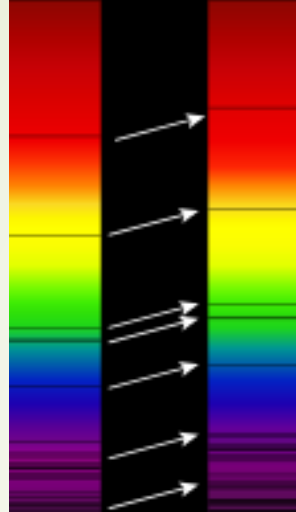
- Des **transitions interdites** : qui violent les règles de conservation énergie, impulsion, spin,...
- Des **transitions permises** : mais dont la probabilité dépend de la largeur en énergie et de la structure des fonctions d'onde des 2 niveaux.



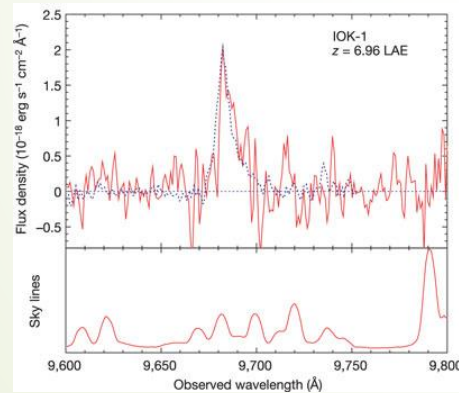
L'ensemble des transitions permises pour les électrons dans les atomes conduisent à une « signature » de chaque atome



Source Wikipedia

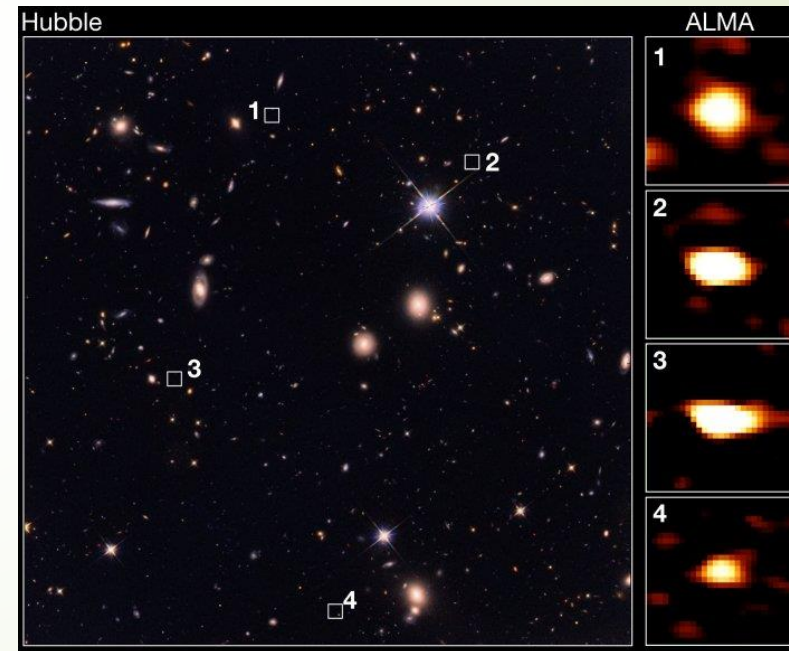


Si la source s'éloigne de l'observateur, il y a un décalage vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge) de la lumière reçue



Dans la réalité

Pic de Lyman : 1216 Å au repos



- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)
- Les règles d'occupation des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes sont à l'origine des propriétés chimiques.
- Les transitions des électrons entre les niveaux atomiques sont source des émissions électro-magnétiques (lumière)

Pour l'éclairage, on recherche les émissions dans les longueurs d'onde visibles



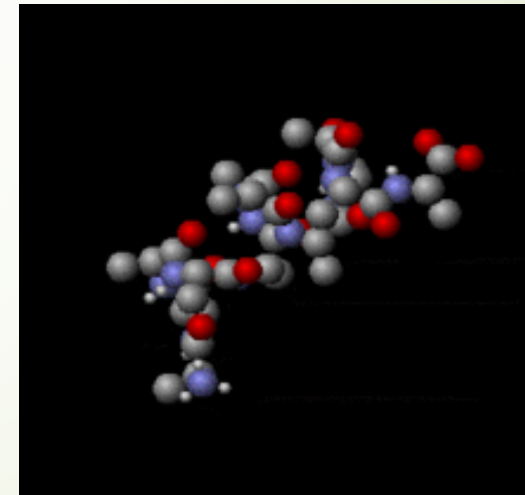
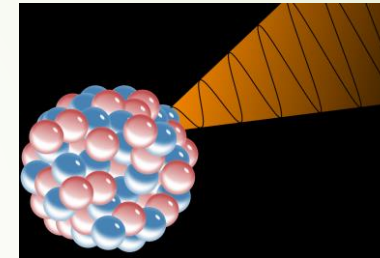
Il y a de multiples techniques pour exciter les électrons d'un atome pour en utiliser la lumière résultant des émissions spontanées:

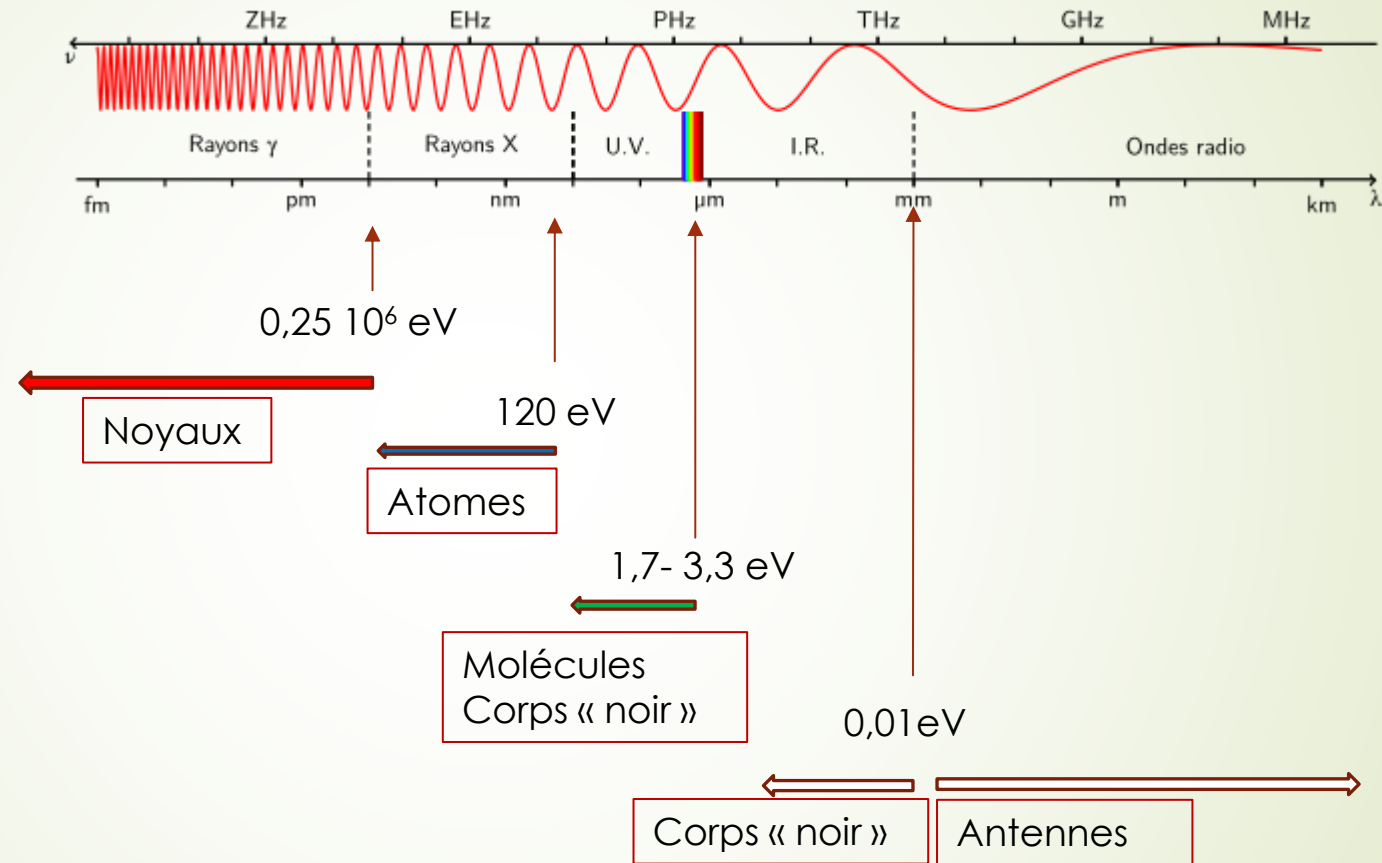
- La **chaleur** : principe des lampes à incandescence (voir corps noir plus loin)
- Les **décharges électriques** : lampes au néon ou à vapeur de mercure
- Les **transitions des électrons** dans les semi-conducteurs (LED)
- Réactions **chimiques** : luminescence, lucioles

D'autres modes d'excitation (que les électrons de l'atome) sont quantifiés et susceptibles d'émettre des ondes e-m (pas toujours visibles)

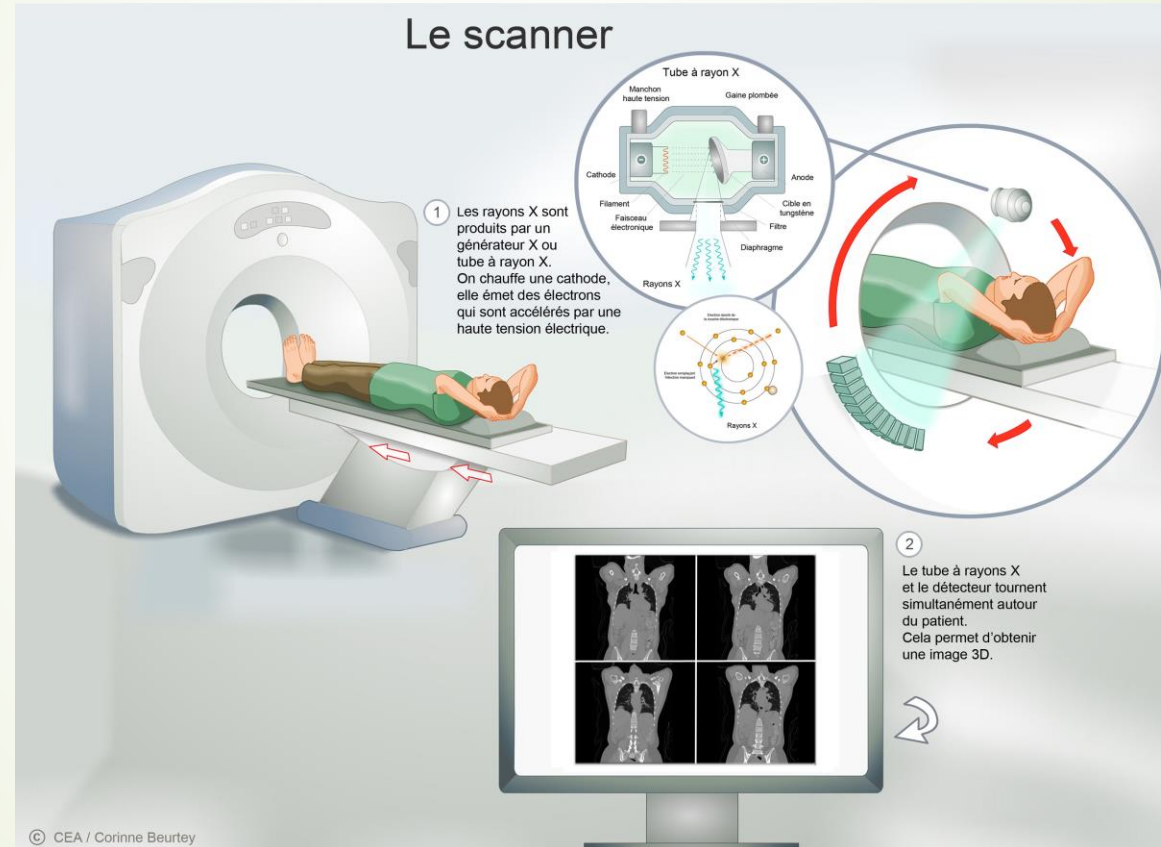
- Excitation des **protons** en couches dans le noyau → **rayons γ**
- Modes collectifs de **vibration**, **rotation** des molécules

Ces modes sont excités aléatoirement dans les **corps chauds** et sont à l'origine du rayonnement dit « du corps noir »





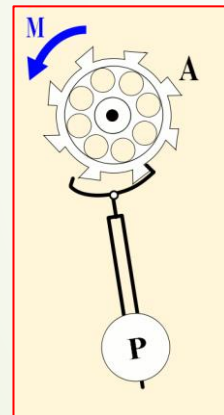
Le scanner utilise les rayons X émis par les électrons des atomes de tungstène



<http://www.cea.fr/comprendre/PublishingImages>

La **mesure du temps** de plus en plus précise : une nécessité de la navigation maritime à la navigation spatiale et aux télécommunications (GPS)

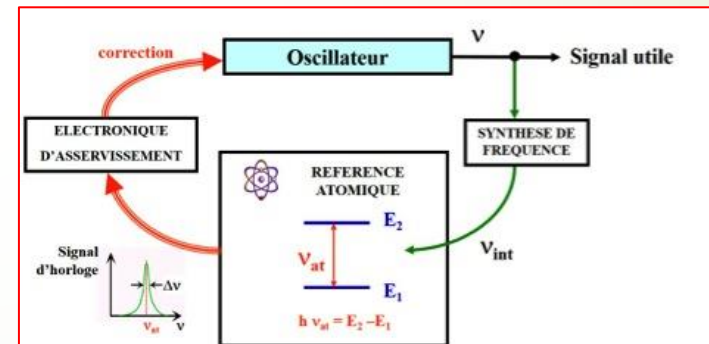
« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état **fondamental** de l'atome de césium 133 » (depuis 1967)



De
Huyghens
(1658)

A
l'horloge
atomique

Une précision
relative de 10^{-5}
10 secondes par jour



<https://first-tf.fr>

Une précision relative de l'ordre
de 10^{-16}

Le temps que met la lumière pour
parcourir 0,03 microns)

- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)
- Les règles d'occupation des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes sont à l'origine des propriétés chimiques.
- Les transitions des électrons entre les niveaux atomiques sont source des émissions électro-magnétiques (lumière)
- Le scanner utilise les rayons X émis par les atomes de tungstène ; l'horloge atomique le rayonnement émis par des atomes de césium.

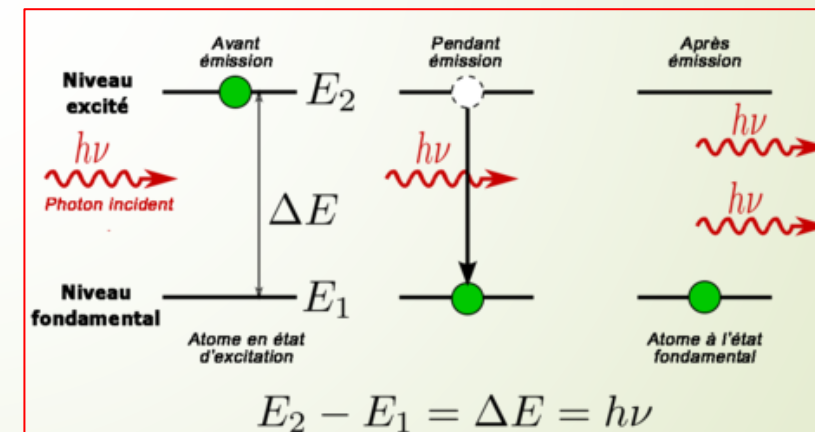
La lumière (rayonnements e-m) émis par désexcitation spontanée est **incohérente** : composée de photons émis aléatoirement, dans toutes les directions ; sans plan de vibration défini (polarisation).



Comment passer de la
← lumière incohérente
à la lumière cohérente →



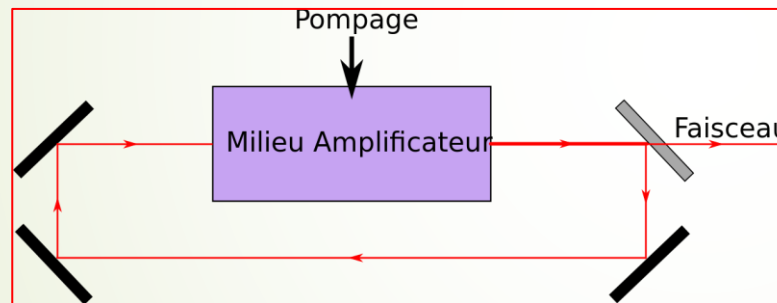
Le **laser** est basé sur l'émission **stimulée** : les 2 photons ont exactement les mêmes caractéristiques que le photon incident (monochromatisme)



Source wikipedia

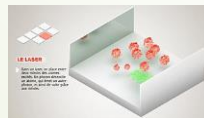
Les lasers sont constitués à partir de 4 mécanismes :

- **Le pompage optique** : il faut de nombreux électrons en même temps dans le même état excité (inversion de population)
- **L'émission stimulée** (voir plus haut)
- **L'amplification** pour atteindre des intensités suffisantes, il faut réinjecter les photons émis
- **L'extraction** : une petite part des photons est extraite pour l'utilisation



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17305072>

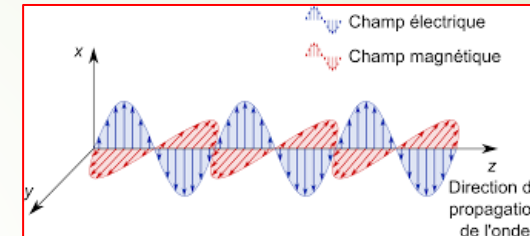
Voir la vidéo



La lumière émise par les lasers est fortement **cohérente**

Polarisation

Le plan des oscillations e-m définit la polarisation.
Avec le laser les ondes émises ont la même polarisation

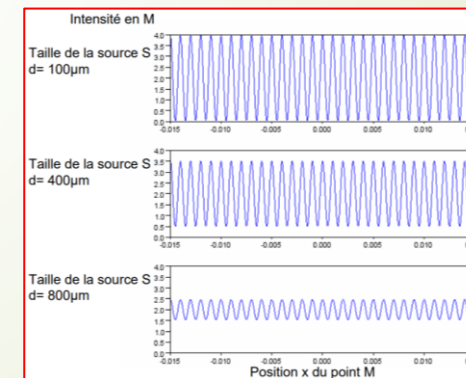


Cohérence temporelle

Une onde purement monochromatique ($\Delta\nu = 0$) implique un train d'onde de durée infinie ($\Delta t = \infty$) ; en pratique $\Delta\nu > 0$; 2 trajets lumineux ne pourront interférer que si leurs longueurs diffèrent de moins de $\frac{c}{\Delta\nu}$

Cohérence spatiale

Elle est liée à la taille de la source émettrice : il faut **collimater** fortement une source lumineuse classique dans une expérience d'Young



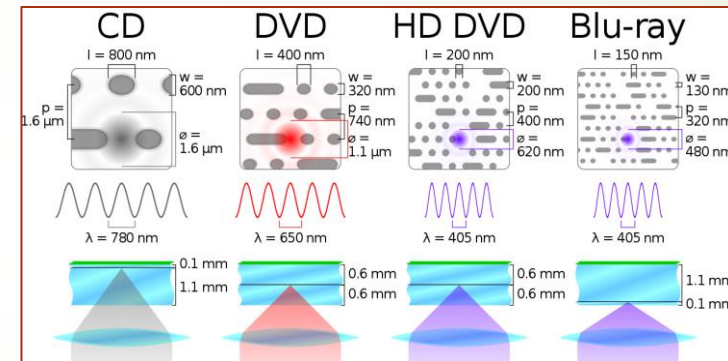
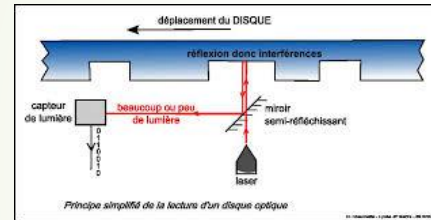
Source u-psud.fr

- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)
- Les règles d'occupation des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes sont à l'origine des propriétés chimiques.
- Les transitions des électrons entre les niveaux atomiques sont source des émissions électro-magnétiques (lumière)
- Le scanner utilise les rayons X émis par les atomes de tungstène ; l'horloge atomique le rayonnement émis par des atomes de césium.
- Le laser est une émission de lumière cohérente (visible ou non) résultant de transitions électroniques stimulées.

Une excellente [vidéo sur le laser](#) et ses applications faite par le CNRS

Une lumière cohérente : Une seule fréquence, non dispersive.

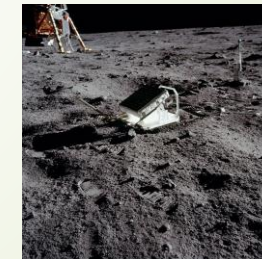
- Lecture/écriture de système nanométriques



- Mesure des distances



Distance Terre-Lune
384 402 km en moyenne
à 25 cm près



Une puissance concentrée: des bosons ... grégaires

Laser de Puissance

Energie d'un photon (lumière rouge) $h\nu \approx 10^{-22}$ J

- Un pointeur laser de 5 mW $\rightarrow 5 \cdot 10^{18}$ photons par seconde
- Un laser de découpe typique 5 kW
 $\rightarrow 5 \cdot 10^{24}$ photons par seconde sur une cible de 1 mm^2

Laser médicaux (ou cosmétique):

- Brûler de manière très sélective

Accélérateurs de particules/ applis militaires



- Les objets quantiques liés, dans un état stationnaire, sont décrits par des fonctions d'état quantifiées
- L'énergie des états liés des objets quantiques est quantifiée : elle n'est jamais nulle.
- Les lois de probabilité pour les grandeurs dynamiques vérifient les relations d'Heisenberg
- Les particules peuvent occuper simultanément plusieurs états (principe de superposition)
- Les règles d'occupation des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes sont à l'origine des propriétés chimiques.
- Les transitions des électrons entre les niveaux atomiques sont source des émissions électro-magnétiques (lumière)
- Le scanner utilise les rayons X émis par les atomes de tungstène ; l'horloge atomique le rayonnement émis par des atomes de césium.
- Le laser est une émission de lumière cohérente (visible ou non) résultant de transitions électroniques stimulées.

A tout de suite pour le chapitre 2 c – Systèmes quantiques

« La science de
Bernie »



La chaîne
YouTube



Le blog

« Un peu de physique
pour comprendre le
monde »

bernard.remaud@univ-nantes.fr

<https://www.un-peu-de-physique.fr>

<https://www.youtube.com/channel/UCdPBh5KXlOl50MEV8p1DrIA/playlists>