

QUANTIQUE

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

1 - Introduction

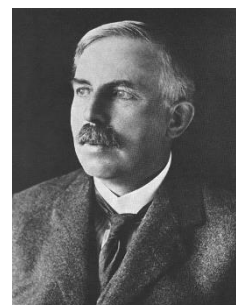
La physique quantique est née au début du XX^{ème} siècle d'un constat: à l'échelle atomique, la découverte de phénomènes impossibles à interpréter de manière classique a conduit les physiciens à construire une nouvelle physique: la physique quantique

Parmi les physiciens ayant participé au développement de la physique quantique, on retiendra:

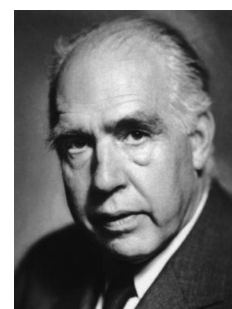
Max Planck (1885-1947) - Planck s'intéresse dès 1894 au rayonnement électromagnétique du corps noir. Il adopte les méthodes statistiques de Boltzmann. En 1899, il introduit les constantes de Planck (h) et de Boltzmann (k) en même temps que la notion des quanta. En octobre 1900, il détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir, sans en maîtriser l'interprétation physique.



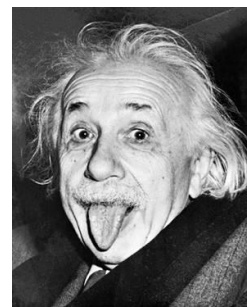
Ernest Rutherford (1871-1937) - C'est en 1911 qu'il fait sa plus grande contribution à la science en découvrant le noyau atomique. Il avait observé qu'en bombardant une fine feuille de mica avec des particules alpha, on obtenait une déflexion de ces particules. Rutherford émet alors l'hypothèse qu'au centre de l'atome devait se trouver un "noyau" contenant presque toute la masse et toute la charge positive de l'atome, les électrons déterminant en fait la taille de l'atome.



Niels Bohr (1885-1962) - Se basant sur les théories de Rutherford, il publie en 1913 un modèle de la structure de l'atome mais aussi de la liaison chimique. Cette théorie présente l'atome comme un noyau autour duquel gravitent des électrons, les orbites les plus éloignées du noyau comprenant le plus d'électrons, ce qui détermine les propriétés chimiques de l'atome. Les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant un quantum d'énergie, le photon. Cette théorie est à la base de la mécanique quantique. Ce modèle est confirmé expérimentalement quelques années plus tard.



Albert Einstein (1879-1955) - Il expose en 1905 un point de vue révolutionnaire sur la nature corpusculaire de la lumière, par l'étude de l'effet photoélectrique. Il réinvestit les résultats de Planck pour étudier l'effet photoélectrique, et il conclut en énonçant que la lumière se comportait à la fois comme une onde et un flux de particules. L'effet photoélectrique a donc fourni une confirmation simple de l'hypothèse des quanta de Max Planck. En 1920, les quanta furent appelés les photons.



Richard Feynman (1918-1988) - Il est à l'origine de l'électrodynamique quantique relativiste, à savoir l'étude des interactions électromagnétiques entre particules (chargées) relativistes. On lui doit une formulation lagrangienne de l'électrodynamique quantique, ainsi qu'une technique, permettant de calculer les sections efficaces d'interaction entre particules. Il proposa aussi une technique diagrammatique (les diagrammes de Feynman) utilisée de nos jours dans de nombreux domaines.



2- Petite histoire des modèles de l'atome

Dans l'histoire des sciences, plusieurs modèles de l'atome ont été développés, au fur et à mesure des découvertes des propriétés de la matière. Aujourd'hui encore, on utilise plusieurs modèles différents.

Depuis l'antiquité grecque, on supposait que la matière pouvait se fractionner en petits morceaux jusqu'à obtenir des grains insécables, qu'elle était comme "de la poussière dans la lumière".

Le modèle le plus récent est assez complexe, l'utilisation de modèles "anciens" ou partiellement faux, mais plus simples, facilite la compréhension et la réflexion.

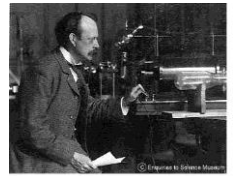
1675: Jean Picard observe une luminescence verte en agitant un tube de baromètre. On découvrira quelques siècles plus tard que cela est dû à l'électricité statique et aux vapeurs de mercure.



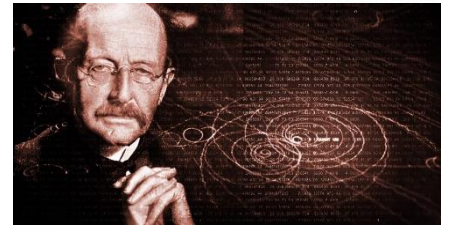
1854: Geissler et Plücker découvrent les rayons cathodiques, des rayons verts luminescents lorsque l'on établit une forte tension électrique dans une ampoule dont on a pompé l'air (faible pression de gaz). Ils inventent ainsi la lampe à décharge, qui éclaire maintenant nos supermarchés d'une lumière blanche, nos rues et nos stationnements d'une lumière orange (lampes au sodium).



1897: J.J. Thomson établit que ces rayons cathodiques sont constitués de particules chargées négativement arrachées à la matière, et découvre ainsi l'électron. C'est la première décomposition de l'atome.

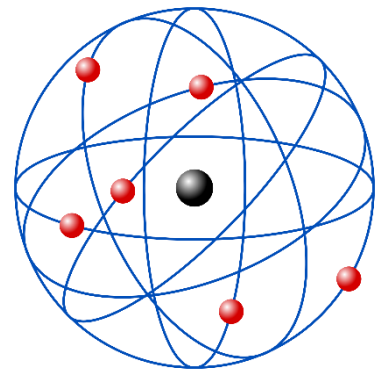
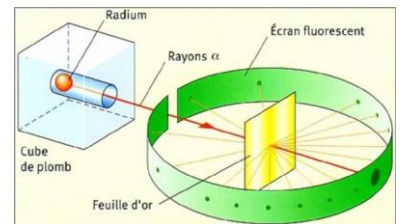


1900: Max Planck montre la quantification des échanges d'énergie dans la matière (recherches sur le corps noir). De ses travaux fut conceptualisée l'ère de Planck, période de l'histoire de l'Univers au cours de laquelle les quatre interactions fondamentales étaient unifiées.



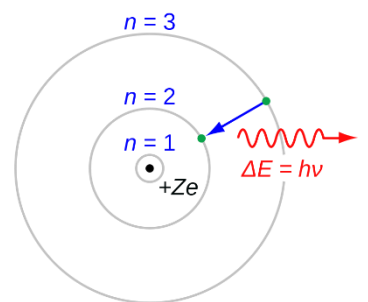
1911: Rutherford bombarde une feuille d'or par des particules alpha (des noyaux d'hélium, chargés positivement, obtenus par radioactivité). Il en déduit que:

- La plupart des particules vont en lignes droites, donc la matière est "pleine de trous".
- Certaines des particules sont déviées et même rebroussement chemin, donc elles rencontrent des îlots très concentrés de matière chargée positivement (les + se repoussent entre-eux).

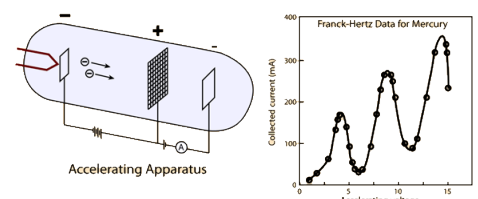


Il en déduit le modèle atomique planétaire où l'atome est constitué d'un noyau positif très petit et d'électrons tournant autour. Ce modèle pose un gros problème car en tournant, les électrons devraient perdre de l'énergie par rayonnement, et donc s'écraser sur le noyau.

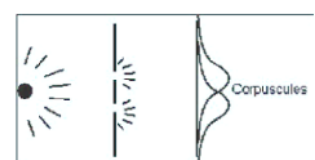
1913: Niels Bohr réunit les concepts de Planck et de Rutherford, et propose un modèle atomique quantique. Les orbites des électrons ont des rayons définis et il n'existe que quelques orbites "autorisées". Ainsi, les échanges d'énergie quantifiés correspondent à des sauts entre les orbites définies, et lorsque l'électron est sur l'orbite la plus basse, il ne peut pas descendre en dessous et s'écraser. Mais ce modèle n'explique pas pourquoi.



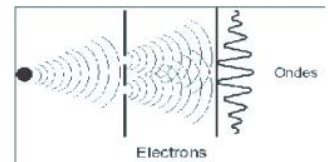
1914: L'expérience de Franck et Hertz valide le modèle de Bohr. Ils bombardent de la vapeur de mercure avec des électrons et l'énergie cinétique perdue par les électrons traversant les vapeurs est toujours la même.



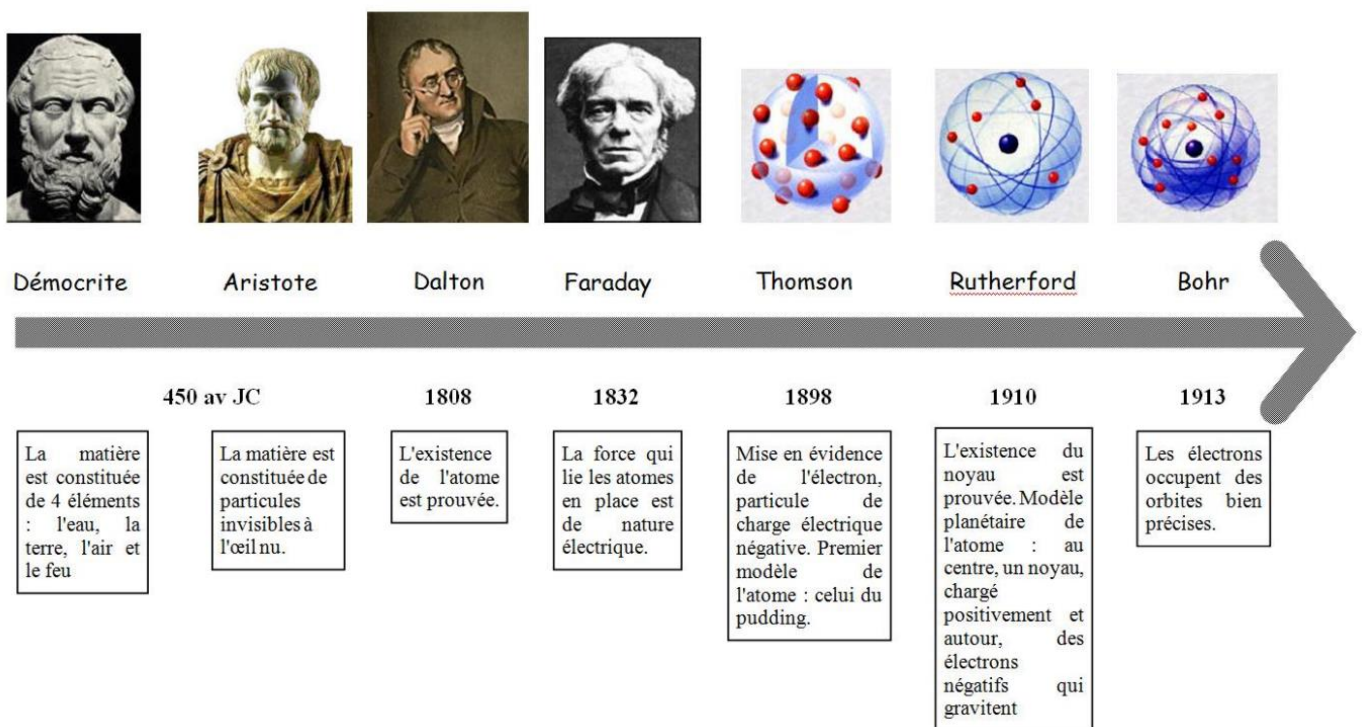
1924: Louis de Broglie postule la dualité onde-corpuscule. C'est un principe selon lequel tous les objets physiques peuvent présenter parfois des propriétés d'ondes et parfois des propriétés de corpuscules. La manifestation de ces propriétés ne



dépend pas seulement de l'objet étudié isolément, mais aussi de tout l'appareillage de mesure utilisé. Ce concept fait partie des fondements de la mécanique quantique. Le cas d'école est celui de la lumière, qui présente deux aspects complémentaires selon les conditions d'expérience: elle apparaît soit ondulatoire, d'où le concept de longueur d'onde, soit corpusculaire, d'où le concept de photons.

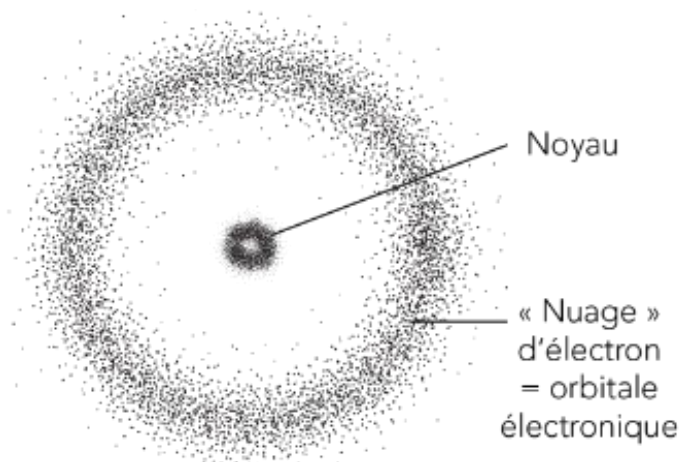


Pour résumer un tableau récapitulatif.



Le modèle actuel de l'atome a été établi en 1926 par E. Schrödinger. Dans ce modèle l'électron est modélisé comme une onde. L'électron dans l'atome n'est donc plus une boule mais un "nuage" qui entoure le noyau. Ce modèle, contrairement aux autres, est stable car l'électron ne perd pas d'énergie.

En imaginant l'équation d'évolution de la fonction d'onde associée à l'état d'une particule, il a permis le développement du formalisme théorique de la mécanique quantique.



Cette équation d'onde, qui tient compte à la fois de la quantification et de l'énergie non relativiste, a été appelée par la suite équation de Schrödinger.

3- L'atome et la mécanique de Newton

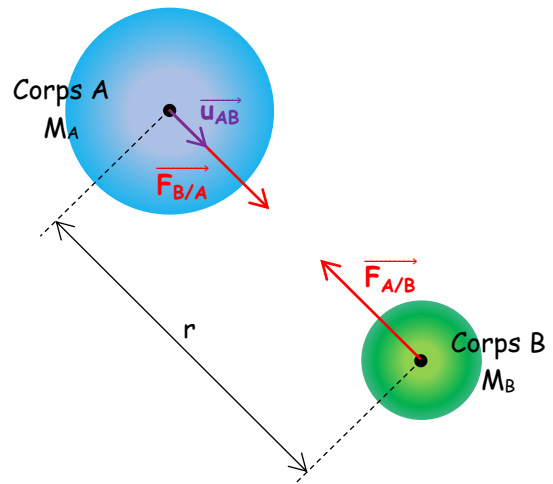
3.1- Analogies entre les forces d'attraction gravitationnelle et électrostatique

a- Force d'interaction gravitationnelle

L'interaction gravitationnelle est décrite par la loi de gravitation universelle de Newton.

La loi de la gravitation universelle correspond à l'expression de la valeur de la force de gravitation s'exerçant entre deux corps. Elle est formulée par Isaac Newton qui fut le premier à faire l'hypothèse que la gravitation terrestre n'est pas limitée à sa surface mais qu'elle peut s'étendre plus loin, il suppose qu'elle est universelle, peut se manifester jusqu'aux astres et provoquer leurs mouvements.

La force de gravitation est une force répartie en volume, c'est à dire que chaque particule du système subit cette force mais on peut considérer que la résultante s'applique en point particulier appelé centre de gravité G , ce point est en général confondu avec un autre point appelé centre d'inertie qui correspond au barycentre des masses du système, soit le point "le plus central de la répartition de masse". Pour un système homogène ou pour un système à symétrie centrale alors il correspond simplement au centre géométrique.



Deux objets ponctuels A et B de masse M_A et M_B , exercent l'un sur l'autre une force attractive, dirigée suivant la droite qui les joint.

Cette force varie proportionnellement au produit de leurs masses et à l'inverse du carré de la distance r qui les sépare.

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A} = -G \cdot \frac{M_A \cdot M_B}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$$

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \cdot \frac{M_A \cdot M_B}{r^2}$$

$\vec{F}_{A/B}$: Force exercée par A sur B (N)

$\vec{F}_{B/A}$: Force exercée par B sur A (N)

G : Constante de gravitation ($G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)

M_A : Masse du corps A (kg)

M_B : Masse du corps B (kg)

r : Distance entre A et B

\vec{u}_{AB} : Vecteur unitaire dirigé de A vers B

Cette relation est vraie pour deux objets à répartition sphérique de masse. La distance r est alors égale à la distance séparant le centre des deux sphères.

Remarque: La force de gravitation diminue très rapidement avec la distance mais ne s'annule jamais totalement, un système subit donc toujours une force gravitationnelle d'un autre système, quel que soit sa distance, même s'il est situé à l'autre bout de l'univers!

Cette force s'exerce entre tous les corps possédant une masse mais sa valeur est en général trop faible pour que ses effets soient remarquables lorsque les deux systèmes ont une masse insuffisante: particules subatomiques, atomes, molécules, objets à l'échelle humaine etc.

b- Force d'interaction électrostatique

Un objet peut posséder une charge électrique q dont le signe est positif ou négatif et qui s'exprime en Coulomb, dont le symbole est C .

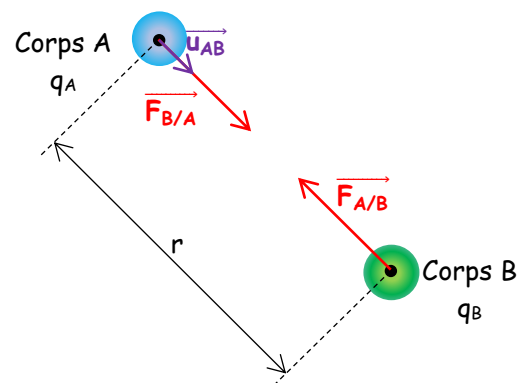
La plus petite charge qu'il est possible d'avoir est la charge élémentaire e qui a pour valeur:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

L'interaction électrostatique est décrite par la loi de Coulomb qui correspond à l'expression de la valeur de la force électrostatique s'exerçant entre deux corps.

Deux charges exercent l'une sur l'autre des forces opposées:

- A exerce sur B une force $\vec{F}_{A/B}$.
- B exerce sur A une force $\vec{F}_{B/A}$.
- $\vec{F}_{B/A} = - \vec{F}_{A/B}$
- $F_{B/A} = F_{A/B}$



Deux corps ponctuels A et B portant respectivement les charges q_A et q_B et séparées d'une distance $r = AB$ sont soumis à deux forces opposées de même valeur.

$$\vec{F}_{A/B} = - \vec{F}_{B/A} = - K \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2} \cdot \vec{u}_{AB}$$

$$F_{B/A} = F_{A/B} = K \cdot \frac{q_A \cdot q_B}{r^2}$$

F: Force (N)

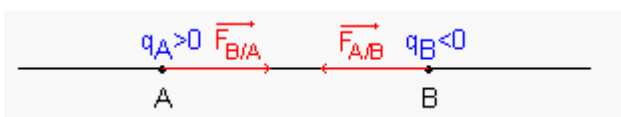
q_A et q_B : Charges électriques (C)

r : Distance entre les charges (m)

K: Constante de Coulomb ($k = 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/C$)

\vec{u}_{AB} : Vecteur unitaire dirigé de A vers B

Ces deux forces $\vec{F}_{B/A}$ et $\vec{F}_{A/B}$ qui ont pour droite d'action la droite AB, sont attractives si les charges sont de signes contraires et répulsives si les charges sont de même signe.



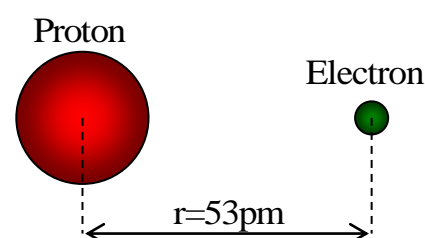
c- Analogies entre les interactions gravitationnelle et électrostatique

On observe différentes analogies entre les lois de Coulomb et de gravitation universelle:

- Ce sont des actions à distance, les corps n'ont pas besoin d'être en contact.
- L'intensité des forces est inversement proportionnellement au carré de la distance.
- La direction des forces d'interaction passe par le centre de chaque objet massif ou chargé.
- Les deux interactions peuvent être attractives, mais seule la force électrostatique peut être répulsive.

d- Cohésion de la matière à l'échelle de l'atome

Considérons un atome d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ et déterminons la valeur des interactions gravitationnelles et électriques qui existent entre le noyau (proton) et l'électron de cet atome.



La force d'interaction gravitationnelle est:

$$F_G = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \times 9,11 \cdot 10^{-31}}{(53 \cdot 10^{-12})^2} = 3,61 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

La force d'interaction électrique est:

$$F_K = K \cdot \frac{q_p \cdot q_e}{r^2} = 9,0 \cdot 10^9 \times \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(53 \cdot 10^{-12})^2} = 8,20 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

On constate que l'intensité de la force d'attraction électrique F_K est très supérieure à l'intensité de la force d'attraction gravitationnelle F_G . En effet:

$$\frac{F_K}{F_G} = \frac{8,20 \cdot 10^{-8}}{3,61 \cdot 10^{-47}} = 2 \cdot 10^{39} \quad \text{soit} \quad F_K \gg F_G$$

L'interaction électrique assure la cohésion de la matière à l'échelle atomique.

2.2- Les limites de la mécanique Newtonienne

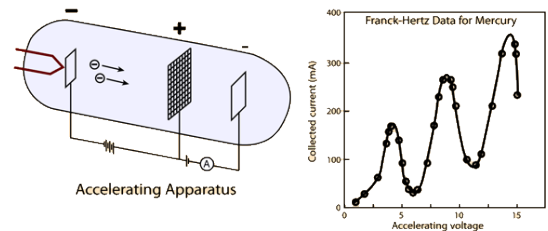
Pendant longtemps les physiciens ont postulé pour un modèle planétaire de l'atome. Ce modèle est construit par analogie avec le système solaire:

- Le noyau joue le rôle du Soleil
- Les électrons qui jouent le rôle des planètes sont soumis à la force électrique attractive exercée par le noyau.
- L'orbite de l'électron externe fournit alors la taille de l'atome.

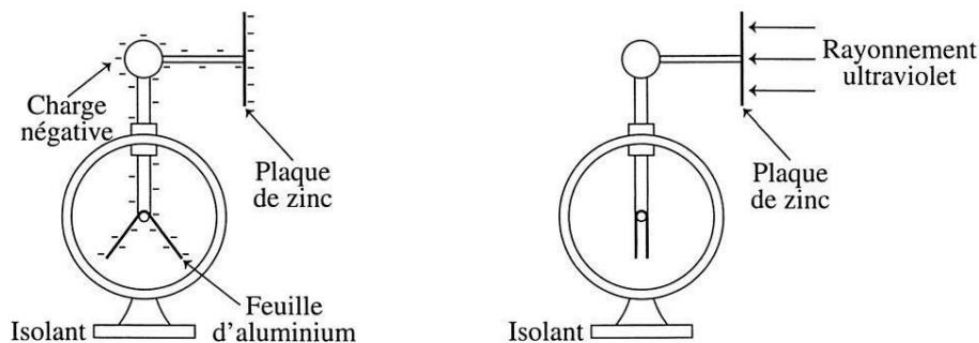
On peut se poser diverses questions par rapport à ce modèle classique de l'atome. En effet:

- Pourquoi tous les atomes ont-ils une taille similaire, alors qu'il existe une grande diversité de taille dans les systèmes astronomiques?
- Pourquoi tous les systèmes atomiques ayant les mêmes constituants ont-ils la même taille?
- Pourquoi le hasard fournirait-il la même taille d'orbites électroniques pour tous les atomes d'hydrogène ou tous les atomes de sodium?

Frank et Hertz ont réalisé une expérience et ont constaté que lors de la collision d'un atome avec une particule, ou de l'interaction avec un rayonnement lumineux, il y a échange d'énergie avec l'atome. Mais cette énergie échangée ne peut prendre que des valeurs bien précises. Cette énergie est donc quantifiée.



Hertz a effectué une expérience en éclairant une plaque de zinc montée sur un électroscope avec une lampe à vapeur de mercure émettant de la lumière ultraviolette.



Il a constaté que les feuilles de l'électroscope initialement chargées négativement se déchargeaient et se rapprochaient. La lumière éclairant la plaque de zinc permettait donc d'extraire des électrons du métal. Ce phénomène se produisait uniquement avec de la lumière ultraviolette. C'est ce que l'on appellera par la suite l'effet photoélectrique.

2.3- La nécessité d'une nouvelle théorie

Toutes ces questions, ainsi que d'autres problèmes, ont conduit les physiciens à penser que la mécanique newtonienne ne permettait pas de rendre compte de la structure atomique.

La mécanique quantique est née de ce constat d'échec, introduisant une nouvelle constante fondamentale: la constante de Planck:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Mais comment peut-on savoir pour un système donné s'il faut le traiter d'un point de vue classique ou quantique?

Généralement:

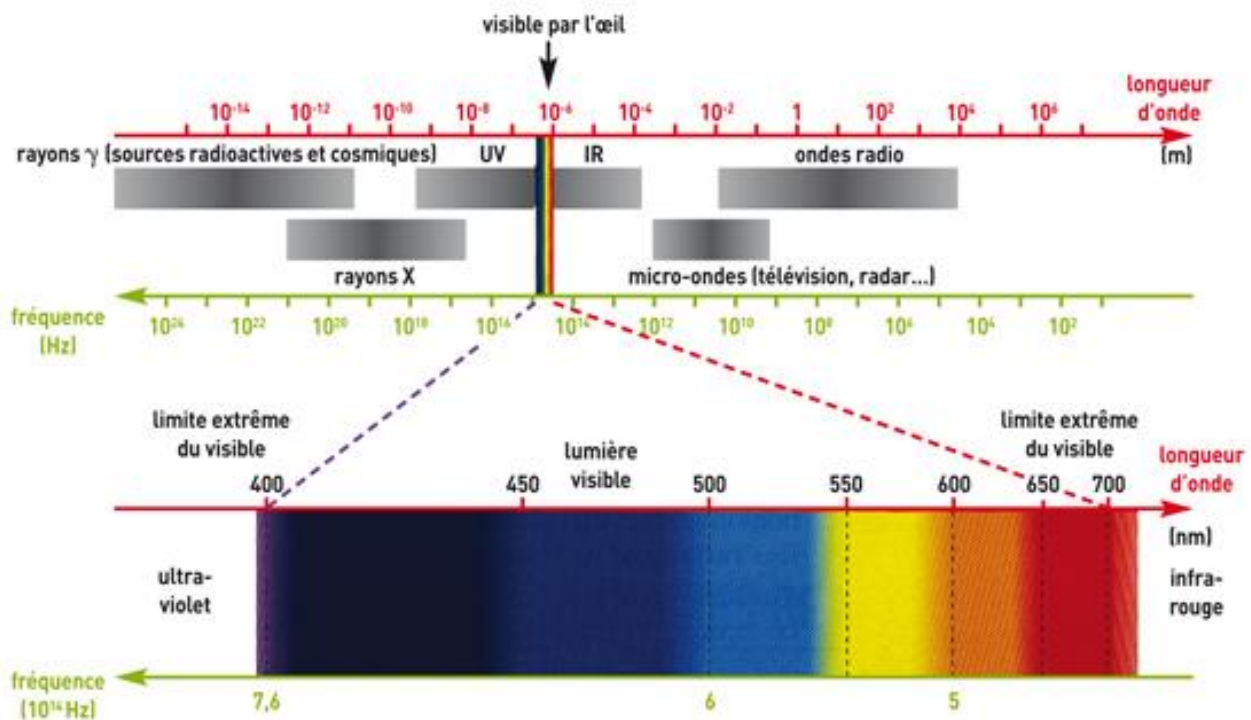
- Si le système est macroscopique on utilisera la physique classique.
- Si le système est microscopique on utilisera la physique quantique.

Pour cela, on définit une nouvelle grandeur que l'on nomme "Action". Cette grandeur que l'on notera A a les dimensions de la constante de Planck h en $J.s$:

- Si $A \gg h$ on utilisera les lois de la physique classique.
- Si $A \approx h$ on utilisera les lois de la physique quantique.

3- La lumière

La lumière visible est un cas particulier des ondes électromagnétiques qui sont des perturbations du champ électrique et du champ magnétique qui se propagent de proche en proche.



La lumière peut être décrite de trois façons en Physique, selon les problèmes à traiter.

- On peut la considérer comme se propageant en ligne droite, c'est l'optique géométrique.
- On peut aussi considérer qu'il s'agit d'une onde et qu'elle peut interférer et diffracter.
- Enfin, on peut considérer qu'elle transporte l'énergie par petits paquets, qu'on appelle des photons dans le cas de l'optique corpusculaire.

Dans le vide, la valeur de la célérité de la lumière est:

$$c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Une lumière monochromatique est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence ν unique. La couleur de cette lumière dépend de sa fréquence.

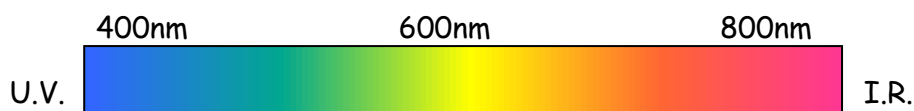
Ces ondes présentent une double périodicité temporelle (T) et spatiale (λ).

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

λ : Longueur d'onde (m)
c : Célérité de la lumière (m.s^{-1})
T : Période (s)
ν : Fréquence (Hz)

On définit une lumière visible par rapport à l'œil humain. Les longueurs d'onde du domaine visible sont comprises entre 400nm et 800nm.

Les radiations ultra violettes (U.V.) ont une longueur d'onde inférieure à 400nm et les radiations infra rouge (I.R.) ont une longueur d'onde supérieure à 800nm.



Dans le vide ou dans un milieu transparent (air, eau, gaz, verre, etc...) homogène (toutes ses parties sont identiques) et isotrope (mêmes propriétés dans toutes les directions), la lumière se propage en ligne droite.

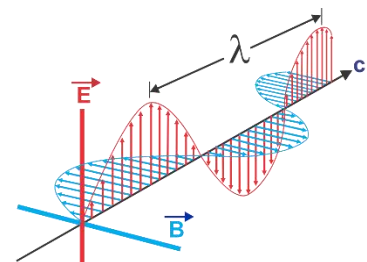
Remarque: Le principe de propagation rectiligne de la lumière, valable que si le milieu est transparent, homogène et isotrope amène à postuler l'existence de rayons lumineux.

Un rayon lumineux est modélisé par une demi-droite issue d'un point de la source et orienté dans le sens de propagation de la lumière. Il ne peut pas être isolé et n'a pas de réalité physique. Il modélise simplement le trajet suivi par la lumière.

4- Ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique est une perturbation du champ électrique \vec{E} et du champ magnétique \vec{B} qui se propage de proche en proche.

C'est une onde transversale.



Dans le vide, sa célérité correspond à la vitesse de la lumière:

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Cette onde peut se propager dans le vide et certains milieux, mais elle peut aussi être absorbée par la matière.

La longueur d'onde λ en mètre est reliée à la fréquence ν en Hertz et à la vitesse de la lumière c en mètre par seconde par la relation:

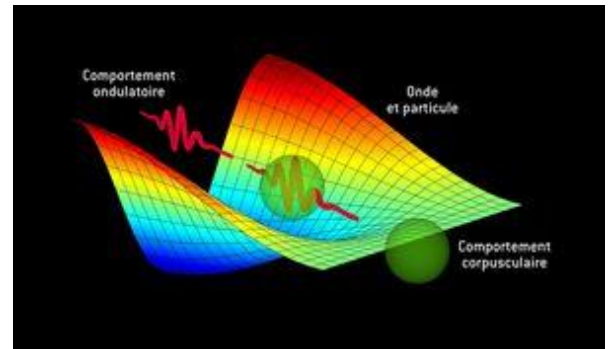
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

λ : Longueur d'onde (m)
 c : Célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1})
 ν : Fréquence (Hz)

5- Aspect ondulatoire et particulaire de la lumière

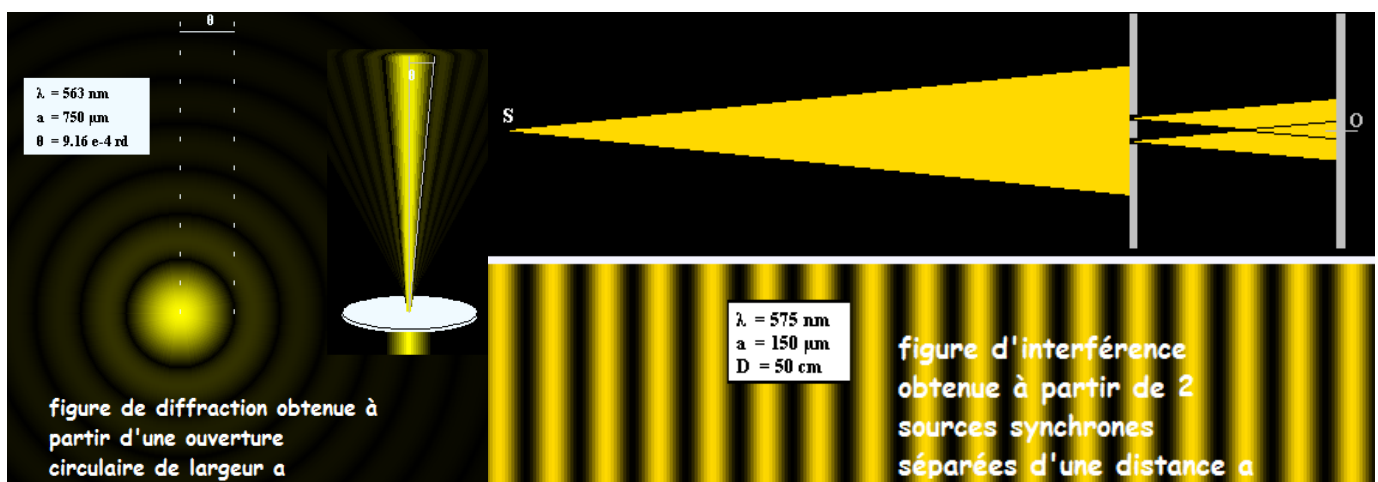
La lumière présente deux aspects, à priori contradictoires:

- D'une part, elle présente un aspect ondulatoire qui permet d'interpréter certaines expériences comme la diffraction de la lumière par des obstacles ou des ouvertures.
- D'autre part elle présente un aspect corpusculaire qui permet d'interpréter d'autres expériences comme l'effet photoélectrique.



La Physique Quantique permet de concilier ces deux aspects corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

L'observation des phénomènes de diffraction et d'interférences nous permettent d'affirmer que la lumière est une onde.



Dans le "Traité de la lumière", Christian Huygens (1643- 1695) interprète la lumière comme la propagation d'une onde. Maxwell (1831-1879) élabore la théorie de la propagation des ondes

électromagnétiques (OEM). La lumière devint alors un cas particulier d'OEM de longueurs d'onde comprises entre 380nm et 780nm.

L'énergie **E** d'un photon (OEM) est donnée par la relation:

$$E = h \cdot \nu$$

E: Energie (J)
h: Constante de Planck (J.s)
ν: Fréquence de l'onde (Hz)

Dans le vide, l'onde associée au photon d'énergie **E** a une longueur d'onde λ telle que:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E: Energie (J)
h: Constante de Planck (J.s)
ν: Fréquence de l'onde (Hz)
c: Célérité de la lumière dans le vide (m.s ⁻¹)
λ: Longueur d'onde (m)

Plus la longueur d'onde est grande plus l'énergie est faible.

On peut calculer l'énergie des rayonnements rouge et bleu, se déplaçant dans le vide, de longueur d'onde $\lambda_{\text{rouge}}=720\text{nm}$, $\lambda_{\text{bleu}}=450\text{nm}$.

$$E_{\text{rouge}} = h \cdot \nu_{\text{rouge}} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{rouge}}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8}{722 \cdot 10^{-9}} = 2,76 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,73 \text{ eV}$$

$$E_{\text{bleu}} = h \cdot \nu_{\text{bleu}} = h \cdot \frac{c}{\lambda_{\text{bleu}}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3,0 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,76 \text{ eV}$$

L'effet photo-électrique est un des trois articles révolutionnaires qu'Albert Einstein publia il y a exactement un siècle.

La lumière est quanta, c'est à dire ondes et corpuscules à la fois.

Eclairée par une lumière bleue, une plaque de métal éjecte des électrons: c'est l'effet photoélectrique.

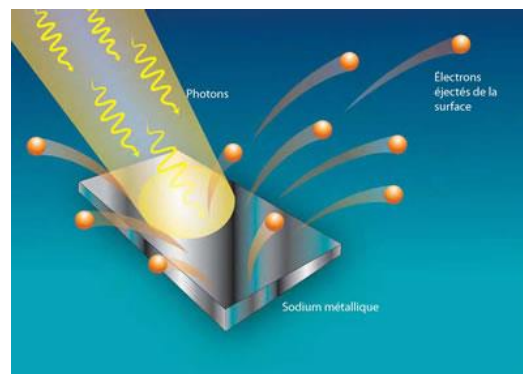
Avec une lumière rouge, rien à faire, même en concentrant beaucoup de lumière en un point.

Cela est difficile à comprendre si l'on admet, comme tous les physiciens de l'époque, que la lumière n'est qu'une simple vibration, une onde transportant une énergie électromagnétique.

Einstein, élargissant une formule proposée par Max Planck en 1900, a attribué à la lumière une double nature: onde et corpuscule.

Un "photon bleu", plus énergétique qu'un "photon rouge" peut arracher un électron hors du métal. Cette idée de "quanta" d'énergie était féconde.

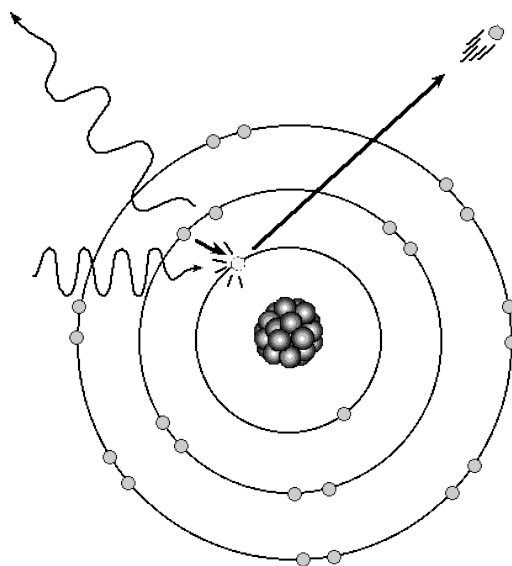
Quelques années plus tard, L. De Broglie, E. Schrödinger, W. Heisenberg attribueront la même double nature aux corpuscules comme l'électron ou le proton, les composants des atomes.



Ainsi est née la "physique quantique", substrat théorique décrivant les propriétés des composants ultimes de la matière.

En 1905 Albert Einstein postule que la lumière est constituée d'un flux de particules appelées photons. Il explique ainsi l'effet photoélectrique mis en évidence par Hertz en 1887: la lumière est constituée de particules appelées photons.

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire et ondulatoire.



6- Relation de Louis De Broglie

En 1924 L. De Broglie généralise la dualité onde particule admise pour la lumière à tous objets microscopiques (électrons, protons, neutrons..).

Cette dualité a été mise en évidence en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction puis, plus tard, d'interférence pour les électrons. De Broglie introduit la notion d'onde de matière.

A chaque particule en mouvement on associe une onde de matière de longueur d'onde λ liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation de de Broglie suivante:

$$p = m.v = \frac{h}{\lambda}$$

p : Quantité de mouvement (kg.m.s ⁻¹) m : Masse de la particule (kg) v : Vitesse de la particule (m.s ⁻¹) h : Constante de Planck (J.s) λ : Longueur d'onde (m)

Remarque: Si la masse est importante alors la quantité de mouvement $p=m.v$ est grande et donc la longueur d'onde λ est très faible. Or, pour observer le phénomène de diffraction il faut que l'ouverture soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ce qui devient impossible pour des valeurs de λ trop faible. Le caractère ondulatoire de l'électron ne peut pas être mis en évidence.

Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture est du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde λ de matière.

Par exemple, la taille a de l'ouverture permettant d'observer la diffraction d'un faisceau d'électrons de longueur de l'onde λ associée à un électron de masse $m=9,11.10^{-31}\text{kg}$ et de vitesse $v=40\text{m.s}^{-1}$, est:

$$\lambda = \frac{h}{m.v} = \frac{6,63.10^{-34}}{9,11.10^{-31}.400} = 1,82.10^{-6}\text{m}$$

Pour observer la diffraction de ce faisceau d'électron il faut une ouverture de l'ordre du micromètre.

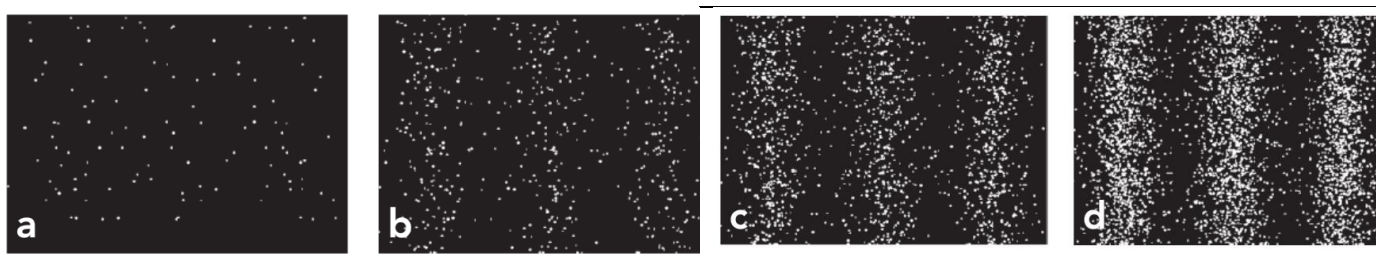
7- Aspect probabiliste des phénomènes quantiques

La physique quantique a pour but d'étudier et de décrire les phénomènes à l'échelle atomique. Développée au début du XX^{ème} siècle elle a permis d'expliquer des phénomènes comme le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique, ou l'existence des raies spectrales.

Parmi ces concepts, on peut citer la dualité onde corpuscule et l'amplitude de probabilité.

En physique quantique les objets microscopiques ou les OEM ont des niveaux d'énergie quantifiés et non continus comme en mécanique classique.

La figure d'interférence ci-dessous est obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites.



Les photos a, b, c, d sont prises aux instants $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.

La position de l'impact des électrons ne permet pas de déterminer la trajectoire des électrons. Cependant ils ont une probabilité d'impact en un lieu donné. Une zone sombre correspond à une faible probabilité d'impact, une zone claire à une forte probabilité d'impact.

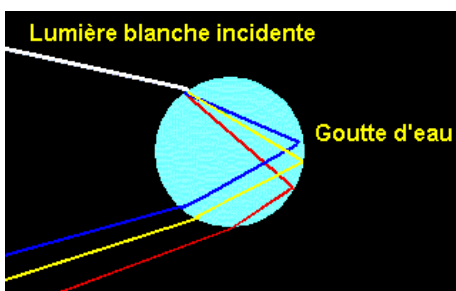
Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois probabilistes. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.

Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste. En effet, on peut au mieux établir la probabilité de présence d'une particule à un endroit donné.

8- Les spectres lumineux

On peut décomposer la lumière blanche artificiellement en décomposant la lumière à travers un prisme.

La lumière blanche est aussi décomposée naturellement lors de la réfraction de la lumière solaire dans les gouttes d'eau. Il se forme alors un arc en ciel.



Pour étudier la composition d'une lumière, on la décompose grâce à un milieu dispersif (prisme ou réseau).

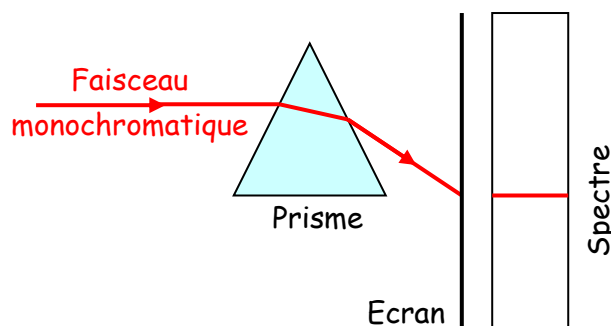
On obtient ainsi un spectre qui renseigne sur la nature de la lumière.

8.1- Lumière monochromatique

Une source laser émet dans la plupart des cas de la lumière monochromatique.

Sur l'écran, on observe une seule raie, ce qui confirme que la radiation est monochromatique.

Le spectre d'une lumière monochromatique est composé d'une seule raie.



8.2- Lumière polychromatique

Une lumière polychromatique est composée de plusieurs ondes monochromatiques.

Sur l'écran, on observe plusieurs raies, ce qui confirme que la radiation est polychromatique.

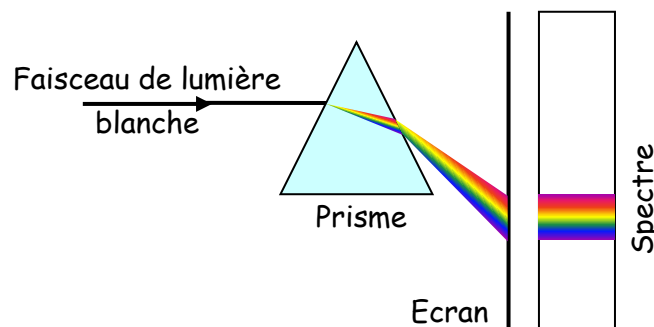
Le spectre d'une lumière polychromatique est composé de plusieurs raies.

8.3- Lumière blanche

La lumière blanche émise par le soleil est une lumière polychromatique.

Le spectre de la lumière blanche est continu.

C'est celui de la lumière visible.



Remarque: Lors de la réfraction d'une lumière polychromatique par un prisme, les radiations de faibles longueurs d'onde comme le bleu sont plus déviées alors que celles de grandes longueurs d'onde comme le rouge sont moins déviées.

8.4- Les différents types de spectres

Au milieu du XIX^{ème} siècle l'allemand Kirchhoff découvre des lois qui porteront son nom et qui postulent l'existence de différents types de spectres selon la nature de la source lumineuse.

Un corps rayonnant, solide ou liquide, émet de la lumière sur toutes les longueurs d'ondes. Il présentera un spectre continu.



Un gaz lumineux, incandescent, émet de la lumière sous forme de raies brillantes appelées spectre d'émission discontinu ou de raies auquel se superpose quelquefois un spectre continu.



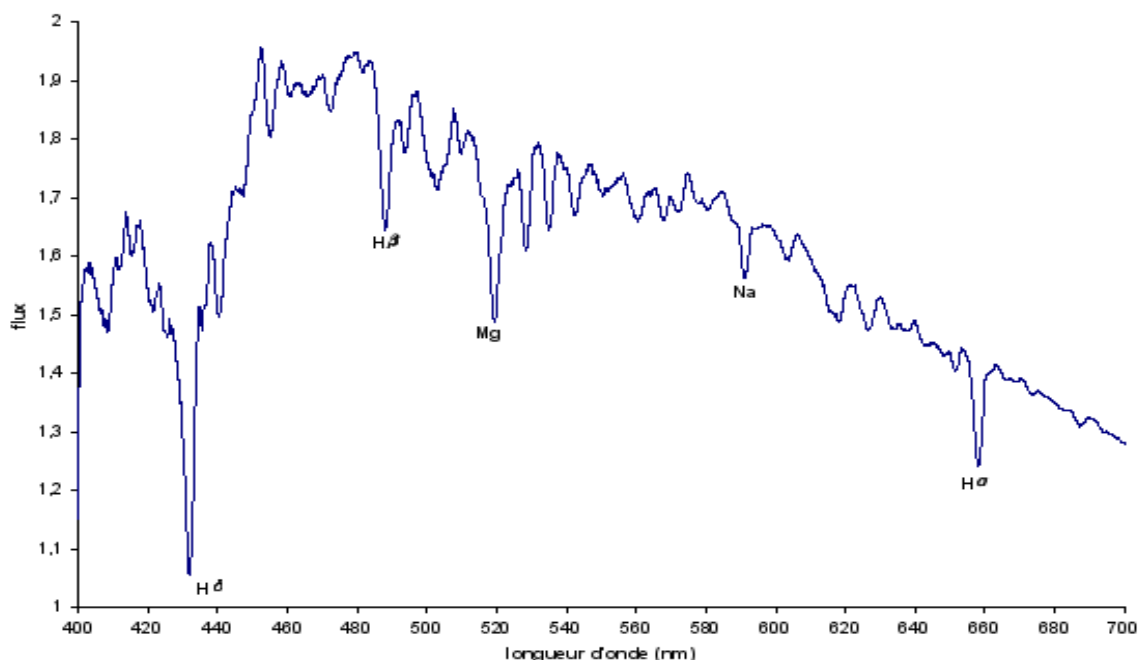
Si la lumière blanche d'une source lumineuse traverse un gaz, celui-ci peut éteindre certaines longueurs d'ondes du spectre continu et les remplacer par des raies sombres qui se superposent au spectre continu de la source lumineuse, c'est le spectre d'absorption.



L'importance de ces lois vient du fait que nous pouvons dès lors conclure qu'à chaque corps correspond un spectre caractéristique et que chaque atome ou molécule peut absorber ou émettre certaines longueurs d'ondes qui le caractérisent.

L'étude du spectre d'une étoile permet d'en connaître sa composition.

Remarque: Les raies d'émission et d'absorption d'un élément déterminé ont les mêmes longueurs d'onde, caractéristiques de cet élément.



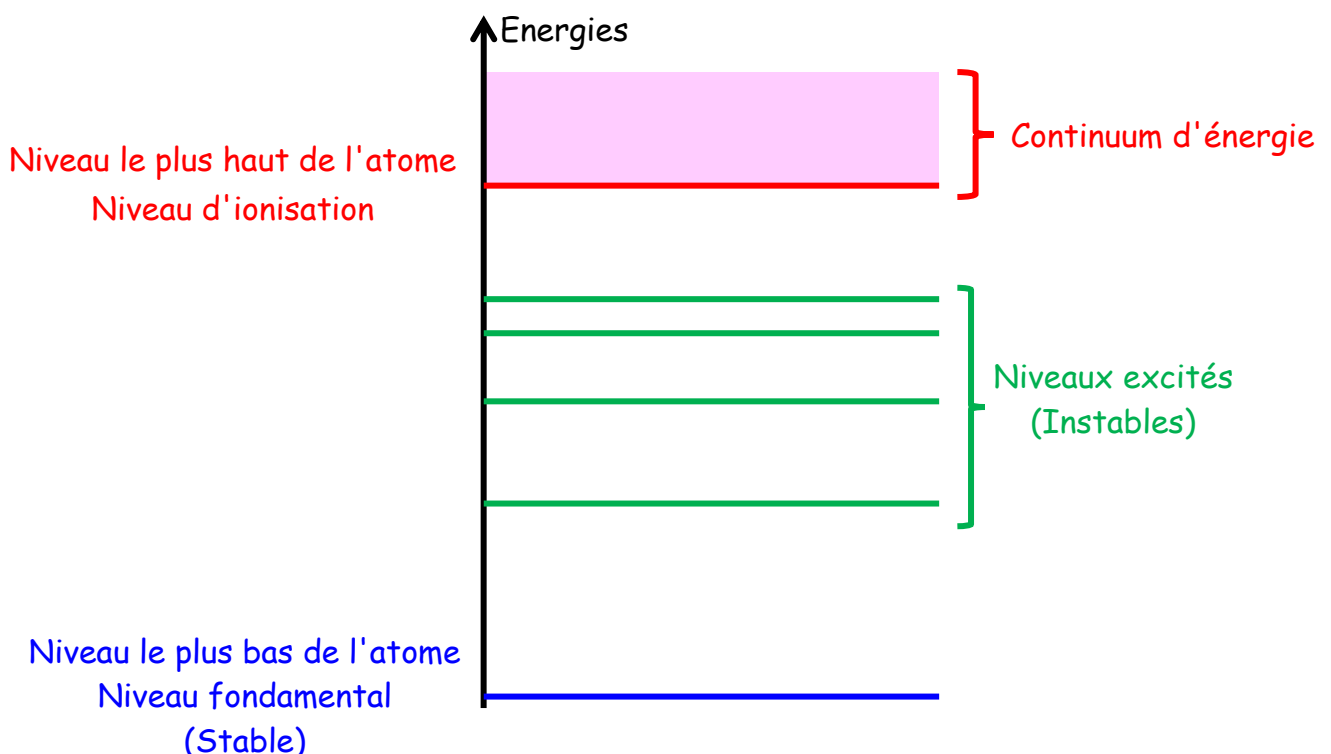
9- Origine des spectres - Niveau d'énergie électronique d'un atome

Les différents niveaux d'organisation des électrons définissent également l'énergie propre à chaque électron en fonction de sa position.

Chaque orbite (ou nombre quantique principal) correspond à un niveau d'énergie propre dont la valeur se détermine à partir d'une formule commune à tous les atomes, mais dont un des paramètres constants varie avec l'atome:

- Les niveaux les plus éloignés du noyau sont les plus énergétiques.
- La différence entre deux niveaux diminue très rapidement alors que l'on s'éloigne du noyau.

Les niveaux d'énergie pour un atome sont fixes et définis: ils ne peuvent pas prendre d'autres valeurs que ces valeurs-ci.

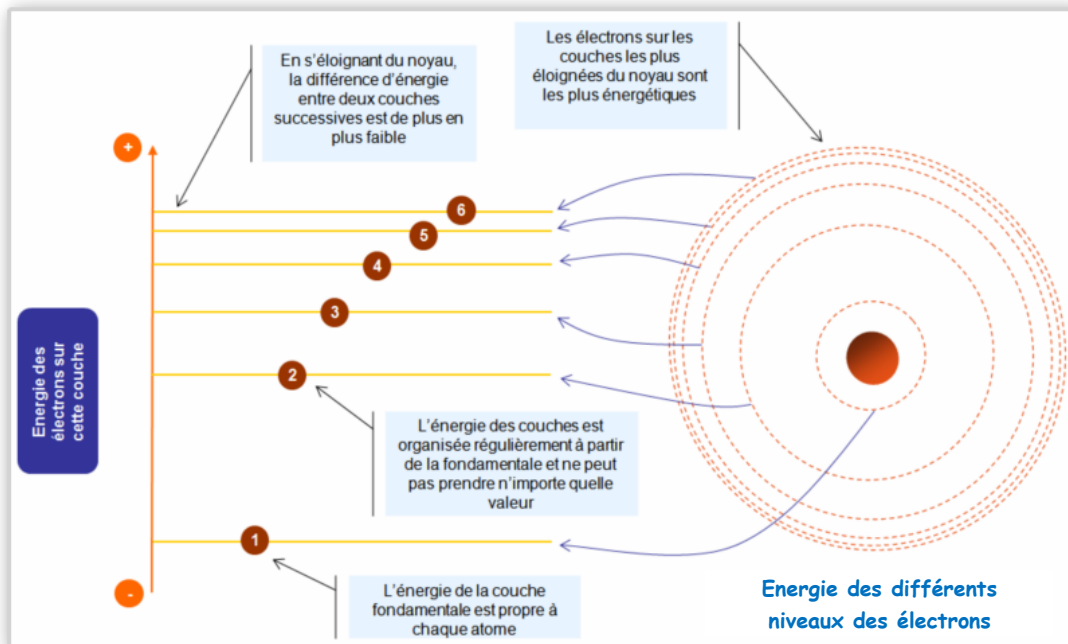


On peut les assimiler à un escalier ou chaque couche serait une marche: les électrons peuvent passer d'une marche à l'autre, mais ne peuvent pas s'arrêter entre deux marches.

Remarques:

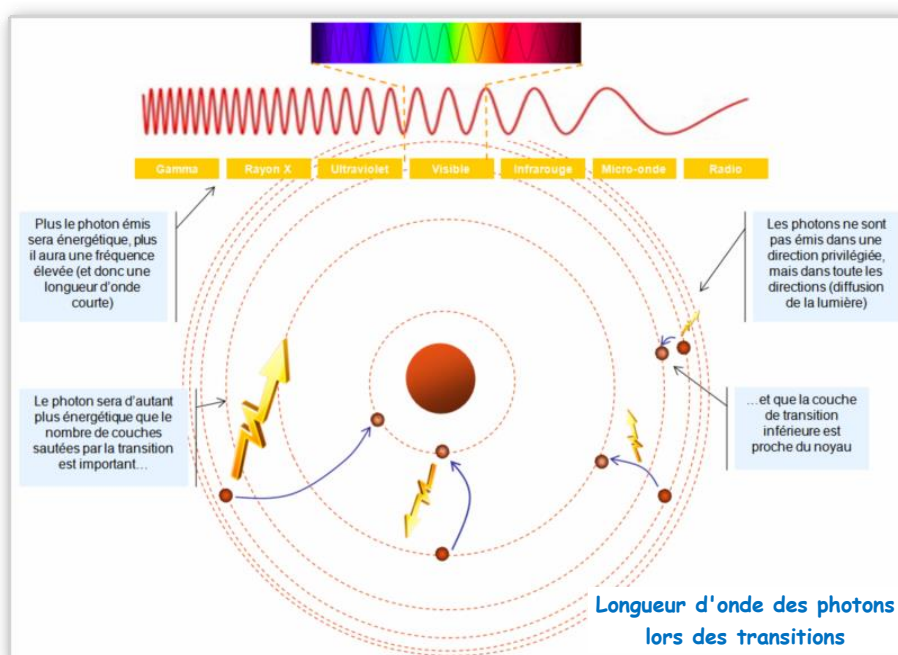
- On choisit comme référence ($E = 0$) l'énergie la plus grande.
- Les énergies de tous les niveaux sont donc négatives.
- Lorsque l'atome gagne de l'énergie, il s'excite.
- Lorsque l'atome perd de l'énergie, il se désexcite.
- Si l'énergie fournie est suffisante on peut ioniser l'atome.
- Son énergie n'est alors plus quantifiée (l'énergie cinétique de l'électron pouvant prendre toutes les valeurs possibles).
- Il est possible d'exciter ou d'ioniser un atome par interaction avec un faisceau d'électrons homocinétiques (ayant tous la même énergie cinétique) ou par absorption de rayonnement (photons).

Généralement, les schémas représentant les niveaux d'énergie d'un atome sont principalement basés sur l'atome d'hydrogène qui est assez simple à étudier du fait de son unique proton.

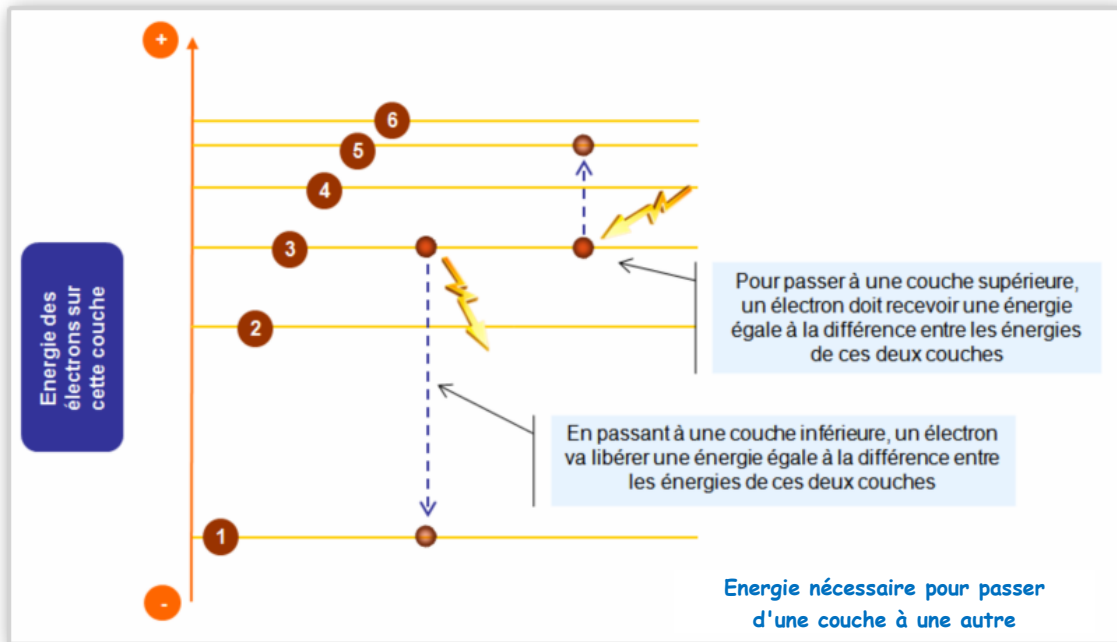


Les niveaux d'énergies exacts d'atomes plus complexes restent difficiles à calculer, mais le fonctionnement global reste le même.

Pour passer d'un niveau inférieur (moins d'énergie) à un niveau supérieur (plus d'énergie), il faut fournir de l'énergie à l'électron. L'énergie du photon est égale à la différence d'énergie entre le niveau initial et le niveau final. Cette énergie déterminera sa fréquence et donc si le photon émis sera visible, X, etc.



Inversement, en passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, l'électron libèrera de l'énergie sous la forme d'un photon le plus fréquemment.

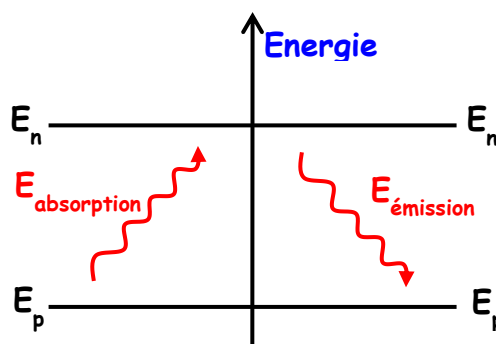


L'énergie concernée est la différence entre l'énergie du niveau d'origine et celui de destination et sont donc des valeurs très précises et fixes pour chaque type d'atome et chaque transition possible entre les couches de ces atomes.

Un atome gagne ou cède de l'énergie en faisant transiter un électron d'un niveau d'énergie quantifiée E_n à E_p . Une radiation monochromatique, de fréquence ν , est constituée de photons dont chacun possède l'énergie :

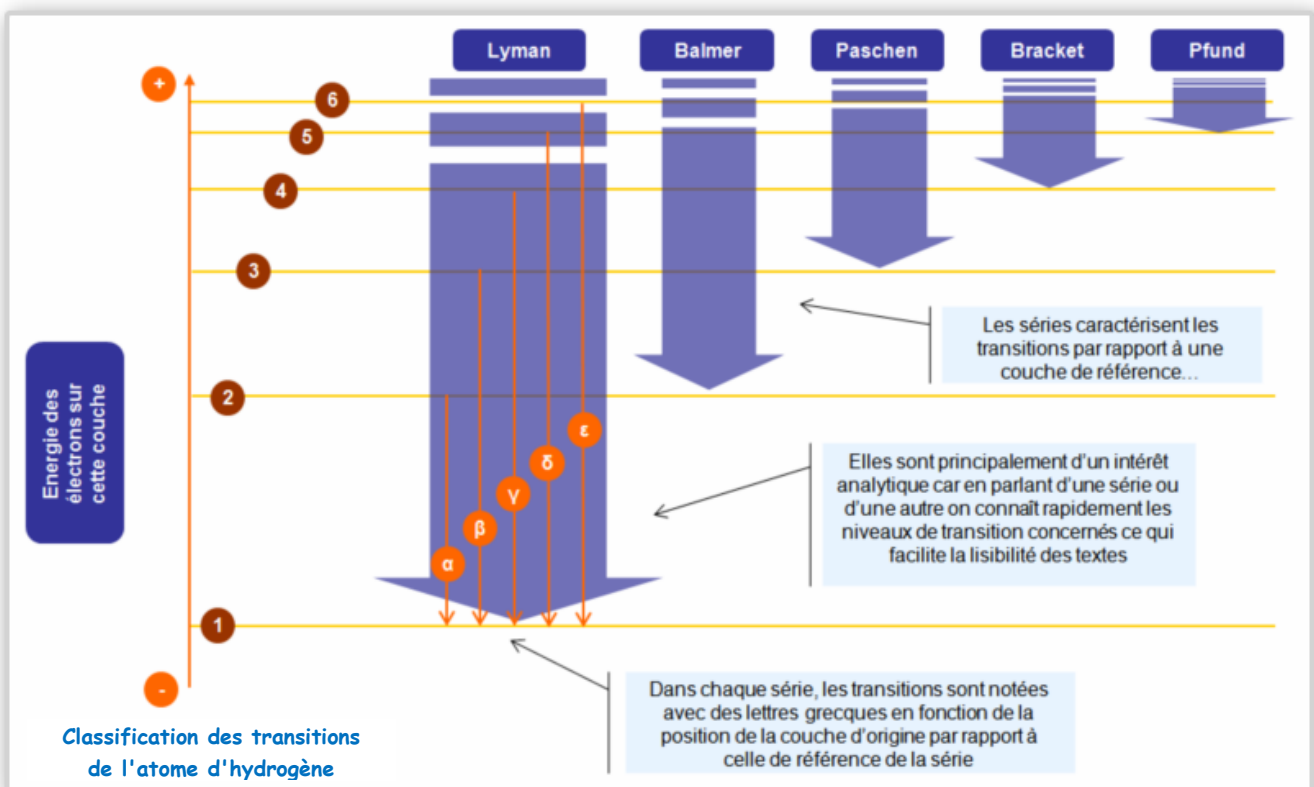
$$E_{\text{photon}} = \Delta E = |E_p - E_n| = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E_{photon} : Energie (J) $\Delta E = E_p - E_n $: Variation d'énergie (J) h : Constante de Planck (J.s) ν : Fréquence de l'onde (Hz) c : Célérité de la lumière dans le vide (m.s ⁻¹) λ : Longueur d'onde (m)



Une classification existe, commune à tous les atomes, et qui permet rapidement de déterminer l'énergie des photons émis ou absorbés par les atomes. Ces classifications qui se nomment séries portent les noms des savants qui les ont caractérisées au cours des siècles précédents:

- Chaque série représente les transitions des niveaux supérieurs vers un même niveau inférieur.
- Les énergies concernées par ces transitions vers un même niveau inférieur sont dans une gamme spécifique (visible, ultraviolet, infrarouge, etc.).
- La transition entre le niveau de référence et le niveau immédiatement supérieur est noté α , avec le niveau du dessus β , etc.



Les séries basées sur les couches les plus proches du noyau sont les plus simples à étudier et on fait l'objet des premières analyses. C'est pourquoi ce sont les seules à porter un nom.

Les différentes séries de transition (Lyman, Balmer, etc.) permettent rapidement de déterminer les fréquences des photons émis et dans quel domaine se fera cette émission (ultraviolet, visible, infrarouge, etc.).

La connaissance de ces informations sert par exemple en astrophysique pour déterminer la nature des nuages qui nous séparent d'étoiles lointaines, et au quotidien pour déterminer la couleur que pourra émettre une ampoule à gaz.

L'énergie des différents niveaux quantiques principaux varie avec chaque atome du fait de sa structure ce qui a des conséquences sur sa capacité à interagir avec les autres atomes, mais surtout avec les différentes fréquences électromagnétiques.

Les énergies de transition étant de plus en plus faibles lorsque l'on considère des couches de plus en plus élevées, chaque série a une forme caractéristique où :

- La transition α est la moins énergétique.
- Les différences d'énergie entre deux couches élevées diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du noyau ce qui impose une limite pour chaque série qui est la tendance maximale vers laquelle tendront les photons émis par cette série.

10- L'atome d'hydrogène

Le spectre de l'atome d'hydrogène est l'ensemble des longueurs d'onde (ou des fréquences) des photons qu'il peut émettre ou absorber.

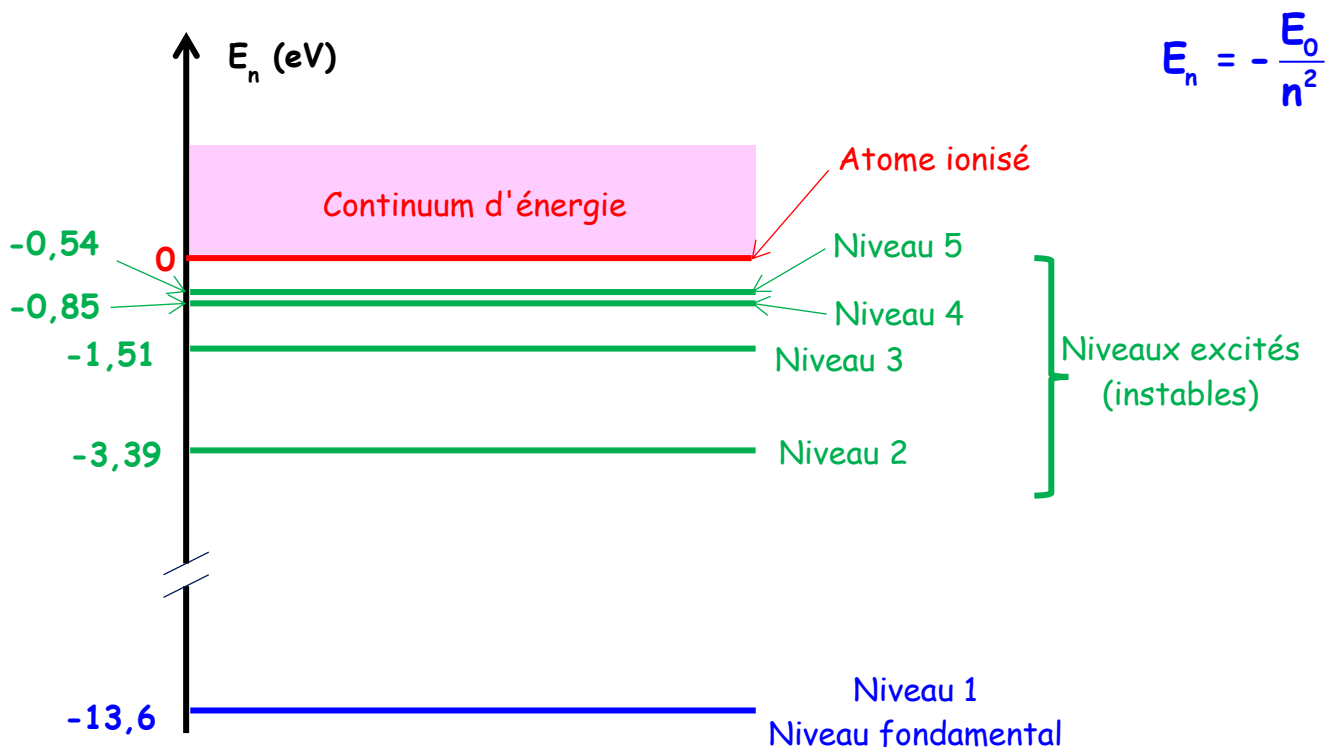
Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la formule :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} \quad \left| \begin{array}{l} n: \text{Nombre entier} \\ E_n: \text{Energie du niveau } n \\ E_0: \text{Energie du niveau fondamental } (E_0 = 13,6 \text{ eV}) \end{array} \right.$$

Les énergies des raies spectrales de l'atome d'hydrogène sont données par la formule :

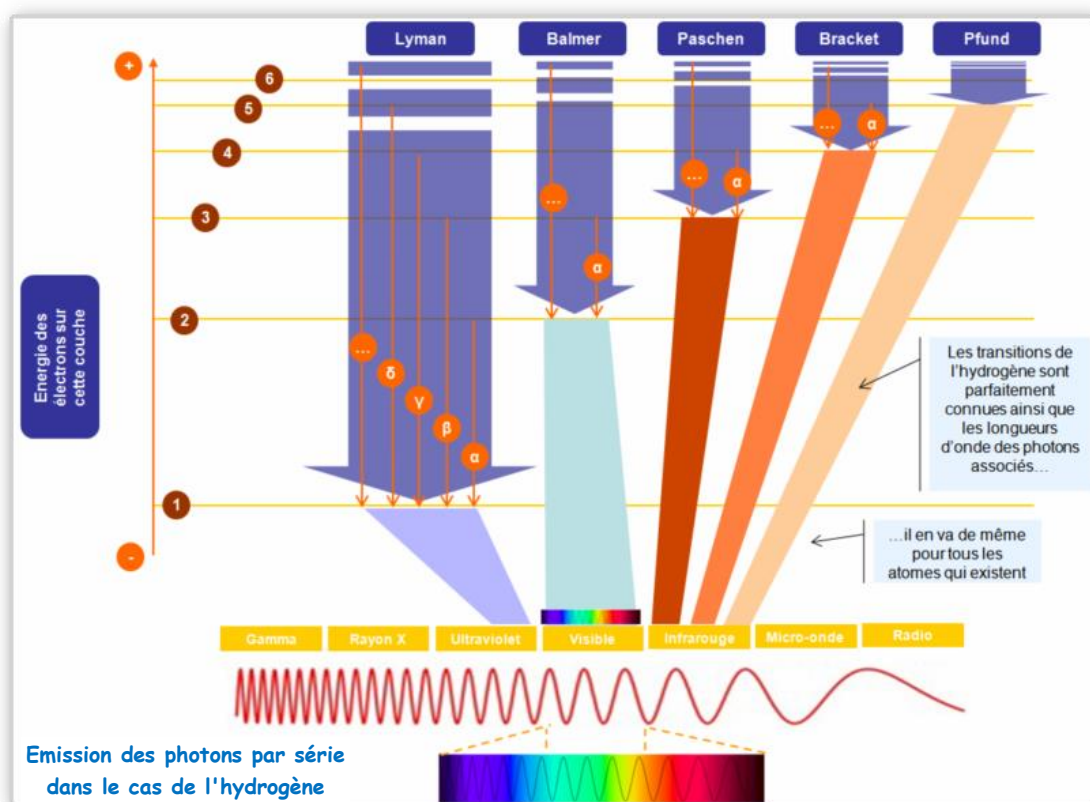
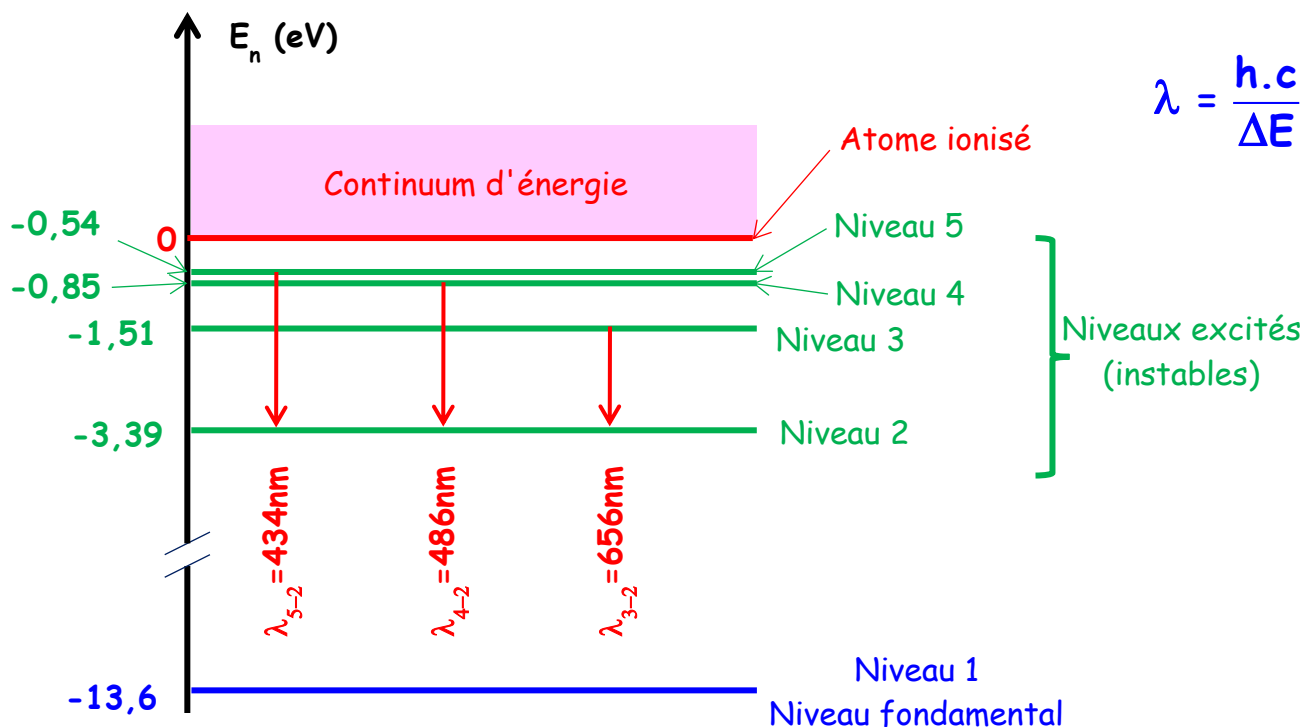
$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_n - E_p = -E_0 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right) \quad \text{avec} \quad n > p$$

On peut ainsi établir le diagramme énergétique de l'atome d'hydrogène pour des valeurs de n de 1 à 5.



On peut compléter cette figure en y ajoutant les radiations émises par les photons des niveaux $n=3, 4$ et 5 vers le niveau 2 .

Cela correspond à la série de Balmer qui émet des radiations dans le domaine du visible.



Il est possible d'exciter ou d'ioniser un atome d'hydrogène par interaction avec un faisceau d'électrons homocinétiques ou par absorption de rayonnement.

Si on considère un atome d'hydrogène dans son état fondamental, alors:

- Si on fournit une énergie égale à 5eV (sous forme de photons) rien ne se passe.
- Si on fournit une l'énergie égale à $12,09\text{eV}$ (sous forme de photons) alors l'atome passe dans un état excité ($n=3$) et se désexcite ensuite en émettant des photons de longueur d'onde bien défini.
- Si on fournit une l'énergie égale à 11eV (sous forme de photons) rien ne se passe.
- Si on fournit une l'énergie égale à 11eV (sous forme d'électrons) alors l'atome absorbe $10,2\text{ eV}$ et passe dans un état excité ($n=2$) et se désexcite ensuite en émettant des photons de longueur d'onde bien définis. L'électron garde l'énergie excédentaire ($0,8\text{eV}$).
- Si on fournit une l'énergie égale à 15eV (sous forme d'électrons) alors l'atome passe dans un état ionisé. L'électron est émis avec une énergie cinétique excédentaire de $1,4\text{eV}$.

L'énergie d'ionisation est l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'atome dans son état fondamental pour l'ioniser ($13,6\text{ eV}$ pour l'atome d'hydrogène).

11- Effet photoélectrique

11.1- Description

En 1887, Heinrich HERTZ réalise des expériences sur les ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde, appelées depuis ondes hertziennes. Il remarque qu'un rayonnement ultraviolet favorise des décharges électriques, sous forme d'étincelles, au niveau des électrodes métalliques de son détecteur d'ondes hertziennes. S'il identifie la cause du phénomène observé, il ne sait pas l'interpréter.



Par la suite, d'autres scientifiques étudient ces phénomènes:

- En 1888, Wilhem HALLWACHS constate qu'une plaque de zinc éclairée par de la lumière ultraviolette se charge positivement.
- Entre 1889 et 1895, Julius EGLSTER et Hans EITEL établissent un classement des métaux vis-à-vis de ce phénomène. Ils montrent notamment que pour les métaux alcalins, les lumières visible et ultraviolette permettent d'observer cet effet. Pour les autres métaux, l'effet n'est visible qu'avec de la lumière ultraviolette.
- En 1900, Philipp LENARD montre que des particules négatives sont arrachées d'une plaque métallique sous l'effet de la lumière. Ces particules négatives sont en fait des électrons, découverts en 1897 par Joseph John THOMSON.

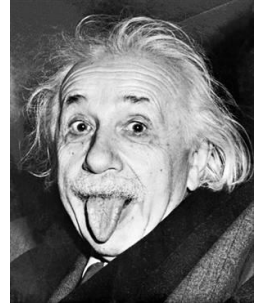
Remarque: Le modèle ondulatoire de la lumière, qui était le modèle admis à l'époque, ne permet pas d'expliquer ces différentes observations.

De nouveaux scientifiques étudient ces phénomènes à partir d'un autre modèle:

En 1905, Albert EINSTEIN postule que la lumière est constituée d'un ensemble de quanta d'énergie. Sa théorie lui permet, entre autres, d'expliquer les observations de P. LENARD.

En 1916, son interprétation est validée par les expériences de Robert Andrew MILLIKAN.

En 1926, Gilbert Newton LEWIS nomme "photons" les particules de lumière porteuses de ces quanta d'énergie.



L'effet photoélectrique est le phénomène d'éjection d'électrons d'un métal sous l'effet de radiations lumineuses. Pour un métal donné, cet effet ne se manifeste que pour des photons d'énergie suffisamment grande. L'effet est alors quasi instantané

11.2- Energie du photon

La lumière peut être décrite comme un flux de photons. Chaque photon possède une masse nulle et se propage à la célérité $c \approx 3.108 \text{ m.s}^{-1}$ de la lumière.

L'énergie d'un photon $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde lumineuse associée, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde λ .

L'énergie d'un photon, notée $\mathcal{E}_{\text{photon}}$, est égale au produit de la constante de Planck h par la fréquence ν de la radiation associée à ce photon:

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \cdot \nu_{\text{photon}}$$

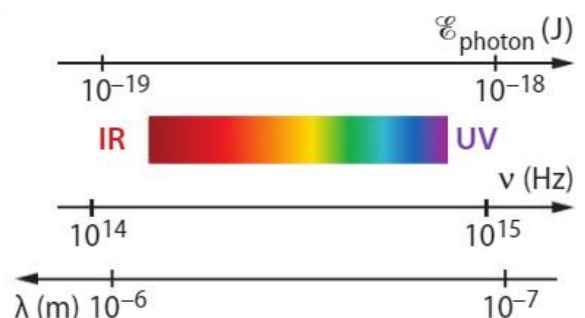
$\mathcal{E}_{\text{photon}}$: Energie du photon (J)
h : Constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$)
ν_{photon} : Fréquence de la radiation du photon (s^{-1})

Pour un métal donné, l'effet photoélectrique se produit lorsque la longueur d'onde de la radiation lumineuse mise en jeu est inférieure à une longueur d'onde seuil λ_{seuil} .

La fréquence ν de cette radiation est alors supérieure à la fréquence seuil ν_{seuil} .

L'énergie de chaque photon associé à cette radiation lumineuse est alors suffisante pour arracher un électron du métal: l'effet photoélectrique est observé.

Remarque: Un photon **IR** transporte moins d'énergie qu'un photon **UV**.



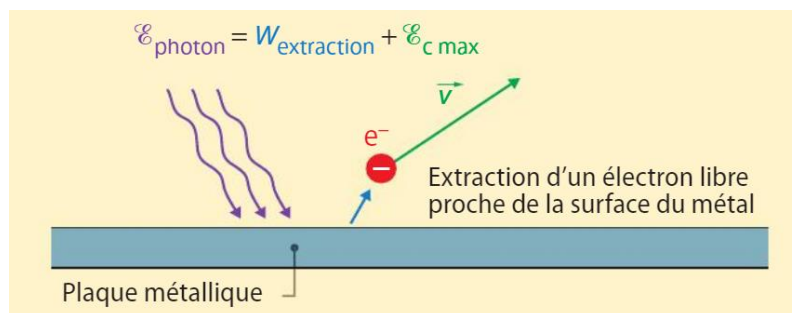
11.3- Bilan énergétique - Interprétation

Un métal solide est un édifice cristallin. Les atomes qui le constituent sont proches les uns des autres. Leurs électrons, en particulier les électrons périphériques, sont soumis à des interactions de la part de tous les noyaux environnants. Pour certains de ces électrons, les interactions avec les autres noyaux sont si fortes qu'ils sont libérés de leur atome initial : ce sont les électrons libres ou électrons de conduction.

L'énergie minimale permettant d'arracher un électron d'un métal est égale au travail à fournir pour extraire un électron libre proche de la surface du métal. Elle est appelée travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$. Elle diffère d'un métal à un autre. Si l'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ du photon est supérieure au travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$, l'excédent d'énergie est emporté par cet électron sous la forme d'énergie cinétique $\mathcal{E}_{\text{cinétique}}$.

L'arrachage d'autres électrons nécessite une plus grande énergie. Pour une même radiation lumineuse, l'énergie cinétique $\mathcal{E}_{\text{cinétique}}$ de l'électron arraché est alors plus faible. L'énergie cinétique $\mathcal{E}_{\text{cinétique}}$ d'un électron arraché est donc maximale pour un électron libre proche de la surface du métal.

Lors de l'effet photoélectrique, l'énergie $\mathcal{E}_{\text{photon}}$ du photon incident est transférée à un électron pour l'extraire du réseau cristallin métallique. Le surplus d'énergie est emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique $\mathcal{E}_{\text{cinétique}}$.



Si l'électron arraché est un électron libre proche de la surface du métal, la relation de l'effet photoélectrique s'écrit :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \mathcal{E}_{\text{cinétique}}$$

$$h \cdot \nu_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v_{\text{max}}^2$$

$\mathcal{E}_{\text{photon}}$: Énergie du photon (J)

$W_{\text{extraction}}$: Énergie d'extraction de l'électron (J)

$\mathcal{E}_{\text{cinétique}}$: Énergie de l'électron libre (J)

h : Constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$)

ν_{photon} : Fréquence de la radiation du photon (s^{-1})

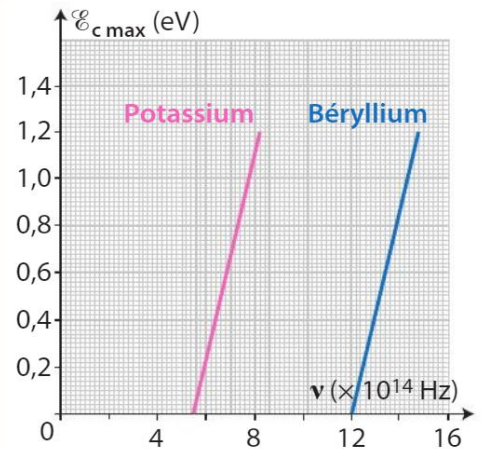
m_e : Masse de l'électron (kg)

v_{max} : Vitesse de l'électron libre (m.s^{-1})

Cette équation de conservation de l'énergie lors de l'effet photoélectrique est connue sous le nom d'**Equation d'Einstein de l'effet photoélectrique**.

Elle explique chaque aspect de l'effet photoélectrique, notamment l'augmentation de l'énergie cinétique maximale des électrons arrachés en fonction de la fréquence du photon incident.

Lors de l'effet photoélectrique, l'énergie cinétique maximale $\mathcal{E}_{\text{cinétique,max}}$ des électrons arrachés augmente avec la fréquence ν_{photon} des photons incidents. Le coefficient directeur de chaque droite permet de retrouver la constante de Planck h .



Si la lumière apportait progressivement l'énergie nécessaire pour arracher les électrons du métal comme le prévoit la théorie ondulatoire de la lumière, il suffirait d'éclairer le métal pendant une durée suffisante pour y parvenir.

Or il n'en est rien: soit le phénomène a lieu quasi instantanément, soit il n'a pas lieu, car l'énergie apportée par le photon est insuffisante.

Le modèle particulaire de la lumière la décrit comme un flux de photons. Il permet d'expliquer l'effet photoélectrique, contrairement au modèle ondulatoire.

12- Absorption et émission de photons

12.1- Absorption de photons - Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique, ou photorécepteur, désigne tout dispositif dont une des propriétés électriques est modifiée lors de l'absorption de photons.

La plupart des cellules photoélectriques font appel à des matériaux semi-conducteurs, dont les propriétés électriques sont intermédiaires entre celles d'un isolant et celles d'un conducteur métallique.

L'absorption de photons engendre un signal électrique qui peut commander divers dispositifs comme l'allumage d'un éclairage.

Parmi les cellules photoélectriques, on peut citer les cellules photovoltaïques. Sous l'effet de la lumière, une tension électrique apparaît entre leurs faces: ce sont des générateurs. Elles convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.



Le rendement η d'une cellule photovoltaïque est le rapport, sans unité, de la puissance électrique $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ ou l'énergie électrique $\mathcal{E}_{\text{élec}}$ exploitable sur la puissance \mathcal{P}_{lum} ou l'énergie \mathcal{E}_{lum} en entrée:

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{\mathcal{P}_{\text{lum}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{élec}}}{\mathcal{E}_{\text{lum}}}$$

η : Rendement (sans unité)

$\mathcal{P}_{\text{élec}}$: Puissance électrique exploitable (W)

\mathcal{P}_{lum} : Puissance en entrée (W)

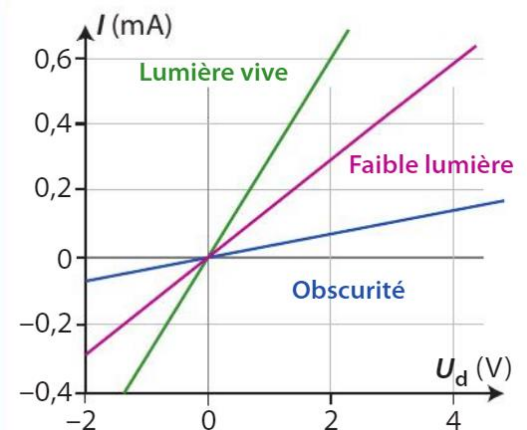
$\mathcal{E}_{\text{élec}}$: Energie électrique exploitable (W)

\mathcal{E}_{lum} : Energie en entrée (W)

Certains composants électriques sont aussi des cellules photoélectriques.

Par exemple, une photorésistance est un dipôle dont la résistance diminue d'autant plus que la lumière qu'elle reçoit est intense. Elle est donc sensible à toute variation de l'éclairement reçu.

Une photodiode est un dipôle qui est traversé par un courant électrique d'intensité d'autant plus grande que la lumière qu'il reçoit est intense. Les photodiodes sont utilisées dans les capteurs CCD ou CMOS contenus dans les appareils photographiques ou les caméras.



L'analyse des charges électriques accumulées dans les diverses zones du capteur permet de reconstruire l'image de l'objet photographié.

La spectroscopie est une méthode d'analyse qui utilise des capteurs CCD ou CMOS. Le composé à analyser est éclairé par des radiations qui interagissent avec la matière. Les longueurs d'onde des radiations que le composé absorbe donnent des renseignements sur sa structure chimique.

12.2- Emission de photons - DEL

Une diode électroluminescente (DEL) est un dipôle dans lequel s'opère une conversion inverse de celle qui a lieu dans une photodiode. Le passage d'un courant électrique dans la structure semi-conductrice d'une DEL entraîne l'émission de photons. La fréquence de la lumière émise, et de ce fait la couleur de cette lumière, dépend de la nature du semi-conducteur.



Une diode laser a la particularité d'émettre une radiation que l'on peut rendre plus directive que celle d'une DEL: l'énergie est alors concentrée dans une direction.

