

Lumière et matière

Alain Brémond (janvier 2021)

Introduction

Aujourd'hui, ce concept de « lumière et matière » peut paraître bien établi mais il y a néanmoins deux façons de l'étudier : l'une comme une « science faite », l'autre comme une « science en train de se faire » selon la conception de Bruno Latour. Du point de vue du pédagogue, la première est plus rapide, la seconde plus lente mais plus riche. En partant d'une période éloignée dans le temps il est possible de mieux comprendre la construction des théories et leurs réfutations au fil des expériences et des observations mis en œuvres par les scientifiques. Mais à chaque époque la boîte noire satisfait les ingénieurs et leur permet de réaliser des machines efficaces. Mais la science « toute faite » est à un moment donné remise en question. Le couvercle de la boîte noire est subrepticement soulevé par quelques jeunes chercheurs et comme le souligne Ian Hacking, la boîte noire est remise en cause, le paradigme même qui la suppose est détrôné et une nouvelle boîte noire est reconstruite jusqu'à ce qu'un nouveau paradigme voit le jour : la science est ainsi une suite sans fin de constructions et de reconstructions.

Parmi les éléments qui réveillent la curiosité des chercheurs, l'amélioration de la précision des mesures a joué un rôle capital. Par exemple, la mécanique de Newton ne posait aucun problème tant que les vitesses des systèmes restaient très éloignées de celle de la lumière. Elle a permis la construction d'automobiles, d'avions, ou de fusées extraordinaires. Mais lorsqu'on s'intéressa à des phénomènes qui incluaient des vitesses proches de la lumière, il fallu bien reconsidérer les paradigmes de la mécanique avec une nouvelle science développée par Albert Einstein : la relativité. De même tant que les phénomènes incluant la distance se mesurait en mètres, voire en millimètres, la mécanique classique, l'optique se satisfaisaient de paradigmes basés sur la notion de continu : la nature ne fait pas de saut. Lorsque l'on étudia les systèmes au niveau du nanomètre, il fallut se rendre à l'évidence : la Nature effectuait bien des sauts. Il appartient à Max Planck de le découvrir.

Dans le temps, la physique, elle-même issue de la science de la Nature, s'est fractionnée en disciplines : mécanique, optique, magnétisme, électricité, thermodynamique... Ces sciences ont fait et continuent de faire progresser les connaissances de ces domaines. Néanmoins lorsqu'il s'est agit de comprendre les phénomènes et de construire la nouvelle physique quantique, toutes ces disciplines ont été mises à contributions, sans oublier également la part importante des mathématiciens. La spécialisation est nécessaire mais la coopération des spécialistes est indispensable.

Les idées concernant la lumière et la matière furent d'abord dissociées. La conception de la lumière elle-même évolua. D'abord corpusculaire avec Newton, elle devint ondulatoire avec Huygens pour redevenir corpusculaire avec Max Planck avant de s'unifier avec Niels Bohr et Louis de Broglie puis de fusionner avec les conceptions de la matière avec Albert Einstein, Wolfgang Pauli et Erwin Schrödinger.

Dans notre tentative de comprendre la physique de la matière et de la lumière, nous suivrons une démarche historique, sans toutefois explorer les voies de traverses qui ont conduit à des impasses, même si elles sont intéressantes du point de vue épistémologique..

Table des matières

Introduction.....	1
-------------------	---

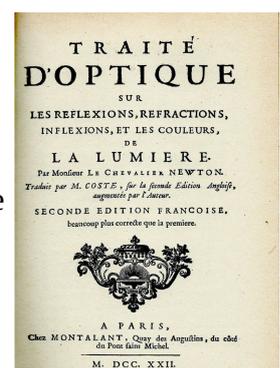
1 - La lumière, de Newton à Planck : le triomphe de l'optique.....	2
1.1. La lumière vue par Newton.....	2
1.2. Huygens et les débuts de l'optique.....	3
1.2.1. La réflexion.....	3
Lois de Snell-Descartes pour la réflexion.....	3
1.2.2. La réfraction.....	4
- Les instruments : prismes, miroirs, lentilles, fibres optiques.....	5
- La réfraction atmosphérique.....	5
1.3. Les triomphes de la théorie ondulatoire.....	5
1.3.1. La diffraction.....	5
1.3.2. La vitesse de la lumière.....	6
1.3.3. La spectroscopie.....	7
1.3.4. L'effet Doppler-Fizeau.....	7
1.3.5. Les rayons X.....	8
1.4. Le rayonnement du corps noir.....	9
1.5. Le corps noir et le questionnement de Planck.....	11
2. La matière: la découverte de l'atome.....	12
2.1. La radioactivité.....	12
2.2. La découverte de l'atome.....	13
3. Le développement de la physique quantique : matière et lumière unifiées.....	13
3.1. L 'effet photo-électrique	14
3.2. La théorie de Bohr	15
Comme l'énergie cinétique est : $E_c = 1/2 mv^2$ on a donc pour l'électron :.....	16
3.3. L'effet Compton(1892-1969) en 1923 :.....	18
3.4. De Niels Bohr à Pauli.....	19
3.4.1. Les idées de Louis de Broglie (1892-1987).....	19
3.4.2. Erwin Schrödinger (1887-1961).....	20
3.4.3. Max Born (1882-1970).....	20
3.4.4. Le spin.....	23
3.4.5. Principe d'incertitude de Heisenberg.....	24
4. Synthèse.....	25
5. Nouvelles conceptions de l'atome d'hydrogène.....	25

1 - La lumière, de Newton à Planck : le triomphe de l'optique

Les conceptions anciennes de la lumière, bien que d'un intérêt historique et philosophique certains révèlent parfois des intuitions heureuses mais aussi des conceptions erronées. Il faut souligner que des applications pratiques ont été développées sans connaissance théorique dont le plus bel exemple est la lunette utilisée par Galilée en 1610 pour découvrir le ciel.

1.1. La lumière vue par Newton

Isaac Newton (1643-1727) décide d'étudier systématiquement la lumière solaire à l'aide d'un prisme. Avant lui, d'autres avaient observé les bandes colorées qui apparaissent dans différentes circonstances, comme l'*arc-en-ciel*, mais aucune étude scientifique n'avait été conduite.



Les expériences de Newton en optique intéressent de nombreux domaines comme le télescope et la lunette, la spectroscopie ou la formation de l'arc en ciel... Ses travaux commencés en 1666 sont couronnés par la publication de l'ensemble de ses résultats dans « *Traité d'optique* » en 1704 puis 1717. L'ouvrage est traduit par Coste en 1722 puis par le futur révolutionnaire Jean-Paul Marat de 1787.

Grace à de nombreuses expériences et une analyse poussée de ses observations on lui doit plusieurs découvertes :

- La lumière du Soleil peut être décomposée par un prisme en plusieurs couleurs
- La lumière violette est plus réfractée que le rouge. C'est ce qu'il nomme le théorème 1 : « *Les rayons de lumière qui diffèrent en couleurs, diffèrent aussi en degrés de réfrangibilité.* »
- L'addition des couleurs redonne la lumière blanche
- Il comprend le phénomène d'aberration chromatique des lunettes : « *Ce qui empêche que les lunettes ne soient parfaits, c'est la différente réfrangibilité des rayons de lumière.* » Cette découverte l'amènera à la construction du télescope réflecteur dit de Newton.
- Il observe que toutes les couleurs du « spectre » n'ont pas la même intensité lumineuse : le jaune et le orange sont des couleurs plus lumineuses que le rouge, le bleu et le violet.
- Les couleurs des objets usuels tiennent à la façon dont ils réfléchissent la lumière du Soleil. Si on modifie la couleur de la lumière du Soleil en interceptant une couleur, on modifie la couleur de l'objet éclairé.
- Il observe après Grimaldi le phénomène de la diffraction en montrant que les couleurs forment des franges. Newton en conclut que l'image d'une étoile au télescope qui devrait nous apparaître comme un « *point mathématique* » est élargie du fait de la réfraction qui sépare les couleurs et de la diffraction.

Commencent alors des études systématiques qui se poursuivront tout au long du XIX^e siècle. Citons quelques travaux proches du temps de Newton :

En 1735, un adepte de la philosophie de Newton, Thomas Merrill observe diverses flammes produites par des corps divers, souvent de l'alcool auquel il mêle différentes substances. En plaçant un prisme en arrière d'un trou percé dans un cache, il constate que lorsque du sel de mer est mêlé à l'alcool, le spectre est presque totalement remplacé par une couleur jaune. Nous savons aujourd'hui que ce sont les raies d'émission du sodium.

Un peu plus tard, **William Herschel** s'intéresse au spectre solaire. En 1800, il mesure, avec un **thermomètre**, la température au niveau de chaque bande colorée. Il observe qu'elle augmente du violet au rouge mais il constate aussi qu'elle est **maximum à 38 mm en dehors du rouge**, alors qu'au-delà du violet, elle ne varie plus. Ainsi il découvre le premier les **infrarouges**. Il observe que ce rayonnement invisible obéit aux mêmes lois de réflexion et de réfraction que la lumière visible. Cette partie du spectre est appelée « *rayonnement calorifique* ».

Pour plus de détails voir l'article « Newton et l'étude de la lumière » et celui sur « la spectroscopie ».

1.2. Huygens et les débuts de l'optique

Il développe une théorie ondulatoire de la lumière, en opposition avec la théorie corpusculaire de Newton. **Christian Huygens** (1629-1695) publie en 1690 un *Traité de la Lumière* dans laquelle il explique les phénomènes de l'optique à partir des ondes sphériques et planes. En revanche il ne parle pas des aspects chromatiques de la lumière bien étudiés par Newton.

1.2.1. La réflexion

Lois de Snell-Descartes pour la réflexion

Le rayon *incident* rencontre la surface réfléchissante, il est réfléchi au point d'incidence où l'on trace la normale à la surface en ce point.

L'angle d'incidence orienté θ_1 est mesuré dans le sens trigonométrique entre la normale au point d'incidence et le rayon incident. L'angle de réflexion orienté θ_2 est mesuré entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi dans le sens opposé.

Les lois de la réflexion s'énoncent ainsi :

1. les rayons incidents et réfléchis et la normale à la surface réfléchissante forment un plan.
2. Les angles incidents et réfléchis sont égaux en valeurs absolues et $\theta_2 = -\theta_1$.

1.2.2. La réfraction

Ébauchée par Kepler en 1604, c'est **Willebrod Snell**(1580-1626) qui, en 1620, établit la loi des sinus que **René Descartes** (1596-1650) démontre en 1637. Fermat en 1662 décrit le principe de moindre temps.

Les lois de la réfraction s'appliquent lorsqu'un rayon lumineux traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices de réfraction différents :

1. les rayons incident et réfracté et la normale au plan séparant les milieux sont dans le même plan.
2. Les angles du rayon incident avec la normale θ_1 et le rayon réfracté avec la normale θ_2 sont reliés par la relation:

$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ avec n_1 et n_2 les indices de réfraction des deux milieux.

On peut écrire aussi : **$\sin \theta_2 = n_1/n_2 \sin \theta_1$** qui permet de déduire l'angle du rayon réfracté en fonction des indices de réfraction et de l'angle d'incidence.

Si $n_1 > n_2$ il n'y a jamais de réflexion totale car $n_1/n_2 \sin \theta_1$ est toujours > 0

Si $n_1 < n_2$ pour une valeur donnée de n_1/n_2 , à partir d'une valeur de θ_1 , il y a réflexion totale ; dans ce cas, $n_1/n_2 \sin \theta_1 \geq 1$. et $\theta_1 = \text{asin}(n_2/n_1)$

Exemple : avec $n_1=1.5$ et $n_2=1$ $\theta_1 = 41,8^\circ$; à partir de $41,8^\circ$ le rayon est totalement réfléchi.

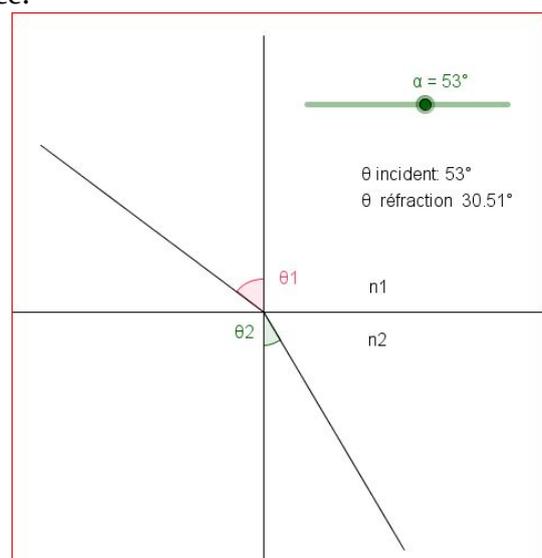


Figure : Exemple avec $n_1 = 1$ et $n_2 = 1,5$.

Applications astronomiques

- Les instruments : prismes, miroirs, lentilles, fibres optiques
- La réfraction atmosphérique
- Réfraction des ondes radio

1.3. Les triomphes de la théorie ondulatoire

1.3.1. La diffraction

Thomas Young (1773-1829), en 1802(8), démontre la nature ondulatoire de la lumière à partir des phénomènes d'interférence et de diffraction obtenues à l'aide d'un réseau de 500 traits par pouce. Il est le premier à mesurer des longueurs d'onde et des fréquences pour des couleurs visibles par l'œil humain.

Sa méthode est très simple. Il utilise deux écrans percés de trous de petit diamètre. Le premier écran est percé d'un seul orifice et le second de deux. Il projette sur le premier trou une lumière d'une couleur donnée produite par un réseau. Sur un écran placé au-delà de l'écran percé de deux trous à la distance d il observe des franges d'interférence. Au centre de symétrie, en O , la frange est la plus intense car il n'y a pas de différence de marche $S_1O = S_2O$. La distance à la frange suivante est notée a et l'écartement entre les trous S_1S_2 est e . Il existe pour la frange située en dehors de la frange centrale une différence de marche des rayons $S_2B - S_1B$ notée δ .

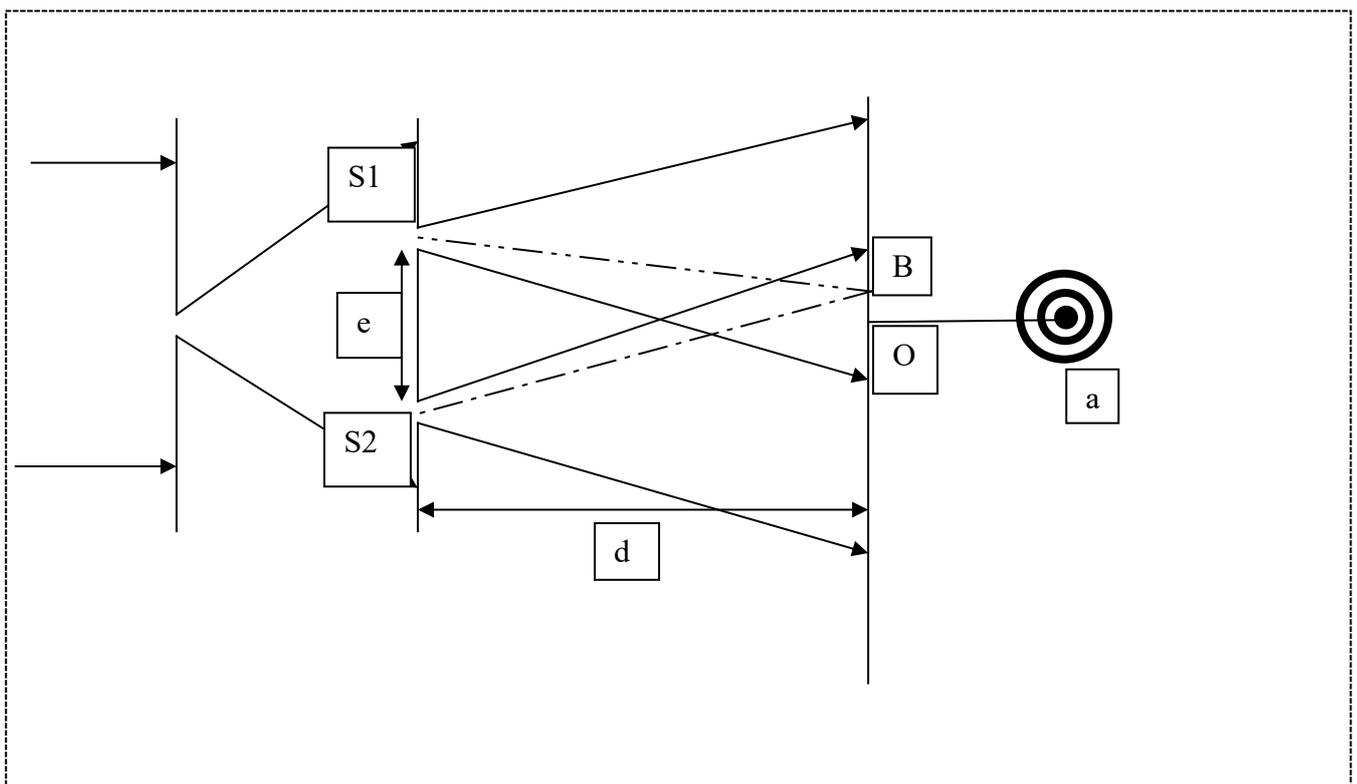


Figure : schéma des expériences de Young.

On a :

$$a/d = \delta / e. \text{ Si } a \text{ est petit par rapport à } d.$$

La différence de marche est liée à la longueur d'onde comme l'imagine Young dans son hypothèse ondulatoire.

$$\delta = k.\lambda \text{ pour les franges brillantes ; donc } a = \lambda.d / e \text{ d'où}$$

$$\lambda = a.e / d$$

Avec cette méthode et avec le prisme, il mesure les longueurs d'onde du rouge du violet et du jaune. Il trouve pour ces couleurs des longueurs d'onde mesurant respectivement : 0,7, 0,42, 0,56 microns.

Applications astronomiques

Les réseaux pour la spectroscopie

L'étude des limitations de la résolution des instruments d'optique : la diffraction dans les instruments d'optique.

1.3.2. La vitesse de la lumière

Après la découverte de **Ole Romer** (1644-1710) avec les satellites de Jupiter en 1696 , c'est Fizeau en 1849 qui mesure précisément une vitesse.

Foucault, l'année suivante, utilisant une technique différente obtient une valeur

Applications astronomiques

La vitesse de la lumière permet de définir une unité de distance : l'année de lumière : temps distance parcourue par la lumière en une année

Aujourd'hui la vitesse de la lumière dans le vide est une constante fondamentale de la physique.

1.3.3. La spectroscopie

Voir le paragraphe sur Bohr ci-dessous et les articles sur la spectroscopie.

1.3.4. L'effet Doppler-Fizeau

C'est **Christian Doppler** (1803-1853) qui est le premier à rapporter l'idée d'un décalage spectral lié au déplacement de l'émetteur du signal ou de celui du récepteur. Il présente son étude le 25 mai 1842 à la Société Royale Bohémienne(22). Sa théorie est que la lumière est une onde longitudinale et que sa longueur d'onde est influencée par le déplacement de la source qui l'émet. Il prétend appliquer cette théorie aux étoiles doubles. Pour lui le son qui est aussi une onde longitudinale doit subir les mêmes modifications. Il ne dispose pas des moyens d'observation qui lui permettraient de

vérifier son hypothèse pour la lumière mais il parvient dès 1845 à vérifier son hypothèse avec les ondes sonores. C'est Christophore Buys-Ballot (1817-1890) alors professeur de physique à Utrecht que réalise l'expérience¹. Pour cela il fait appel à des musiciens. Un groupe est situé sur une plateforme d'un train qui se déplace et croise d'autres musiciens qui colligent les notes qu'ils entendent selon que le train s'approche ou s'éloigne d'eux. L'expérience est concluante. Plus tard (1846) Doppler précise son hypothèse en prenant en compte les déplacements de la source aussi bien que celle de l'auditeur.

C'est tout à fait indépendamment que Hippolyte **Fizeau** (1819-1896) fait la même découverte. Le 23 décembre 1848 il lit un mémoire à la Société Philomathique qui décrit le même phénomène appliqué à la lumière. En voici le compte rendu publié dans « Notice sur les travaux de M. H. Fizeau »¹. Le titre de sa communication, « *Sur les phénomènes que présentent les sons lorsque le corps sonore ou l'observateur sont en mouvement, et sur des phénomènes correspondant que doit présenter la lumière.* » indique que ses expériences portent sur les ondes sonores et qu'il fait l'hypothèse que des phénomènes semblables doivent se produire avec la lumière. Ce n'est cependant qu'une théorie qu'il n'a pas vérifiée. Le compte-rendu précise que : « *En appliquant ces considérations (relatives au son) à la lumière, on trouve que si l'on attribue au corps lumineux ou à l'observateur un mouvement assez rapide pour qu'il soit comparable à la vitesse de la lumière, les longueurs d'ondulation de tous les rayons simples seront changés, et, par conséquent, leurs indices de réfraction. Considéré dans le spectre, cet effet se traduira par un déplacement des raies, dont l'auteur a calculé la valeur, et qu'il espère parvenir à démontrer par l'expérience. On voit que ce phénomène permettrait d'établir une relation entre les vitesses des corps lumineux et les résultats de l'analyse prismatique de la lumière.* » Ainsi toutes les applications du phénomène sont envisagées dès 1848. Ce travail ne sera publié qu'en 1870(23). Il propose une expérience et estime la valeur du déplacement des raies dans le cas de la vitesse orbitale de Vénus et de celle de la Terre. Les valeurs trouvées de l'ordre de 3 à 4'' sont, dit Fizeau, à la portée des astronomes.

Plus tard, en 1860, **Ernst Mach** (1838-1916) fait une conférence dans laquelle il développe les mêmes idées

Alors que les preuves s'accumulent sur l'effet Doppler dans les ondes sonores, pour ce qui concerne la lumière, il y aura des controverses tant que le phénomène ne sera pas démontré par des expériences et des observations précises.

Applications astronomiques

Vitesses et distance , mouvements à l'intérieur des nuages de gaz, dans la Galaxie...

1.3.5. Les rayons X

C'est en 1895 que le physicien allemand Wilhelm Röntgen (1845-1923) étudie les rayons cathodiques (des électrons, découverts en 1897 par Thomson) à l'aide d'un tube de Crookes¹ couplé à une bobine d'induction de Ruhmkorff(1803-1877). Sachant que ce rayonnement cathodique traverse le verre du tube et se propage dans l'air sur quelques centimètres. il dispose un écran opaque devant le tube et remarque qu'une feuille recouverte de platinocyanure de baryum pourtant située à distance, devient fluorescente lors de la décharge du tube. Il commence alors des expériences. Il teste plusieurs distances du tube à un écran fluorescent : l'effet se maintient. Il interpose des filtres faits de différentes substances (papier, carton, bois... : celles-ci laissent passer ces rayons alors que les métaux l'absorbent ; en particulier le plomb. En revanche ce rayonnement n'est pas dévié, au contraire des rayons cathodiques par un aimant.

Le 22 décembre 1895 il réalise la première radiographie avec une exposition de vingt minutes : celle de la main de son épouse sur laquelle apparaît nettement la structure osseuse. Il publie deux articles successifs. Le premier daté du 23 janvier 1896ⁱ décrit précisément les conditions techniques de la réalisation de ses expériences ainsi que les principales propriétés de ces rayons qu'il nomme : rayons X. Un second suit le 5 mars.

Dès lors les études sur les rayons X vont se multiplier : Max Von Laue (1879-1960) en particulier, montre qu'il s'agit d'un rayonnement électromagnétique en 1912

Applications astronomiques

Impossible avant l'ère des satellites, l'astronomie des rayons X contribue efficacement à la connaissance des phénomènes astrophysiques. (voir cet article : « astronomie des rayons X »).

1.4. Le rayonnement du corps noir.

C'est au début du XIX^e siècle que commencent les études sur le rayonnement du corps noir que l'on appelle le rayonnement de la chaleur. Très tôt les forgerons avaient constaté le changement de couleur des corps solides lors de leur échauffement passant du noir au blanc en passant par le rouge. C'est **Gustav Robert Kirchhoff** (1825-1887) qui donne le nom de corps noir à un dispositif expérimental qu'il étudie.

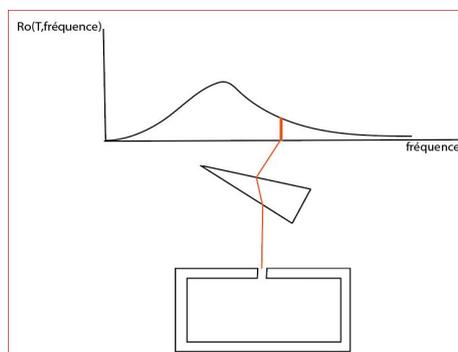


Figure : le dispositif de l'étude du corps noir : une enceinte en métal épais, bien isolée, maintenue pour les expériences à une température stable. Un petit orifice permet la sortie du rayonnement étudié par spectroscopie.

En 1859 il propose une loi du rayonnement montrant que le rapport des pouvoirs d'émission(ϵ) et d'absorption (α) du corps noir ne dépend que de la température et de la fréquence du rayonnement mais pas de la nature des matériaux constituant le corps noir :

$$\epsilon / \alpha = f(T, \nu)$$

En 1879, **Joseph Stefan** (1835-1893) publie un article intitulé *Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur (De la relation entre rayonnement thermique et température)* à l'Académie des sciences de Vienne. Stefan est un expérimentateur mais il mène ses travaux conjointement avec un théoricien, son élève **Ludwig Boltzmann** (1844-1906) qui fonde ses travaux sur la thermodynamique et les lois de Maxwell.

En 1884, ils établissent une formule, toujours utilisée et appelée loi de Stefan-Boltzmann. Elle établit que l'existance énergétique d'un corps en est liée à sa température selon la relation :

$$M = \sigma T^4$$

où M est l'existance énergétique en watts par mètre carré

T en Kelvin

σ est la constante de Stefan-Boltzmann= $5,670375 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

En 1896, Wilhelm Wien (1864-1928) poursuit les mêmes travaux et aboutit à une loi plus élaborée qui peut s'écrire :

$$\phi \lambda = C / \lambda^5 1 / e^{(c/\lambda T)} .$$

avec :

- $\phi \lambda$: existance énergétique monochromatique distribuée dans tout l'espace
- λ : longueur d'onde
- $C \approx 3,742 \times 10^{-16} \text{ m}^4 \text{ kg s}^{-3}$ (première constante de rayonnement) ;
- $c \approx 0,014 39 \text{ m K}$ (constante de rayonnement) ;
- T : température en kelvin (K).

Cette loi rend parfaitement compte des résultats des expériences pour les rayonnements de grandes longueurs d'onde (de 10 à 60 microns) mais pas du tout pour les courtes longueurs d'onde

En 1900, **John William Strutt Rayleigh** (1842-1919) utilise lui une approche de mécanique statistique pour aboutir à une loi donnant à la luminance énergétique une dépendance en λ^{-4} . Cette loi sera corrigée en 1905 par James Hopwood Jeans (1877-1946) , pour inclure un facteur de proportionnalité.

$$L_\lambda (T) = 2 c k T / \lambda^4$$

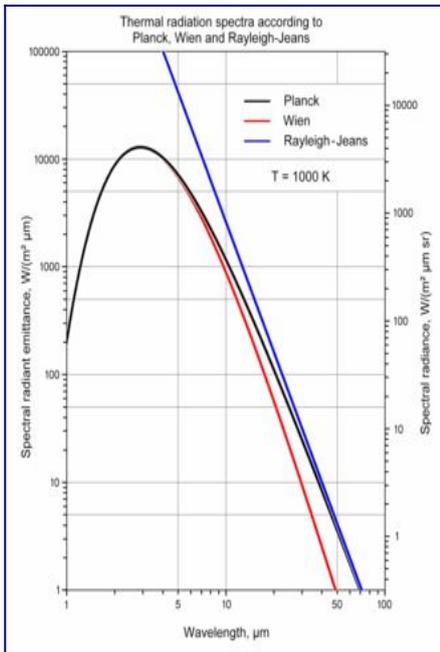
où

L est luminance spectrale énergétique, puissance par unité de surface du rayonnement émise en un point, dans une direction donnée par unité d'angle solide, en $\text{W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$

λ la longueur d'onde en nm

et T la température en K.

Malheureusement, cette loi ne rend pas compte des résultats des expériences pour les les hautes fréquences. Il reviendra à Max Planck de reprendre les expérience et de proposer une meilleure formulation de la loi du rayonnement thermique.



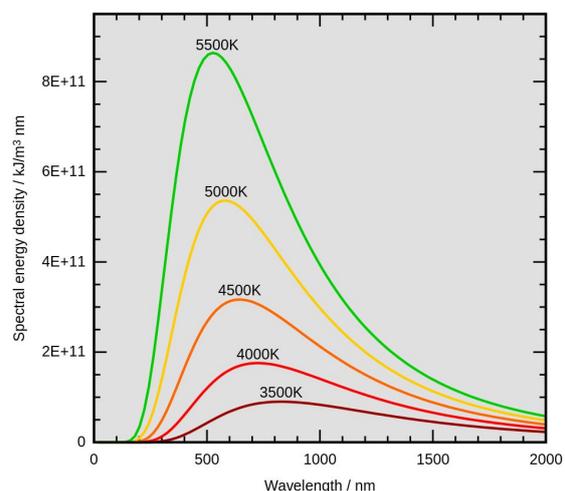
Ce schéma montre que les lois de Planck et de Rayleigh-Jeans s'accordent bien aux longueurs d'onde les plus grandes (entre 5 et 50 microns) alors que les lois de Planck et de Wien s'accordent elles bien aux longueurs d'onde les plus courtes entre 1 et 5 microns.

1.5. Le corps noir et le questionnement de Planck

Comme nous l'avons vu, les études antérieures sur le rayonnement du corps noir aboutissent à des contradictions fortes entre la théorie et les observations pour les fréquences élevées du rayonnement.

Planck mesure les spectres en faisant varier la température : il obtient les courbes que nous connaissons :

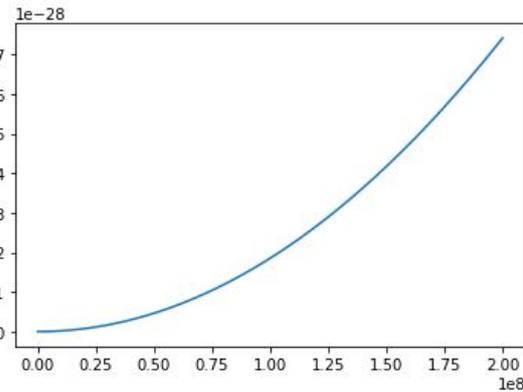
Comment expliquer ces courbes avec les lois de la physique ?



Avec la physique classique on obtient la relation :
 $f(T,\nu) = \text{proportionnel à } \nu^2 T$

L'allure de la courbe représentative est bien différente des courbes spectrales observées !

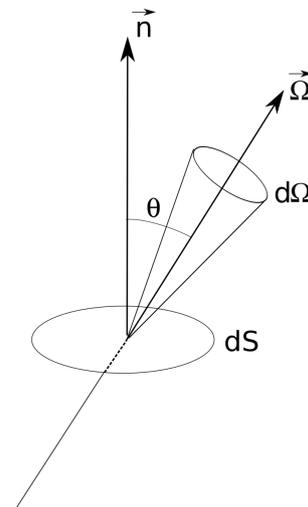
La densité spectrale énergétique tend vers l'infini pour les fréquences élevées, et cela à toute température : c'est la « catastrophe ultra-violette ». De plus l'aire sous la courbe qui est la densité d'énergie à une température donnée tend également vers l'infini.



Planck se dit alors que les équations dépendent des lois de la mécanique, de l'électromagnétisme et de la thermodynamique. Donc, quelque chose ne convient pas dans une de ces sciences pour expliquer les courbes des corps noirs. Il fait des essais, infructueux, jusqu'à ce qu'il imagine des échanges entre le rayonnement électromagnétique et la matière.

Il se sert des propriétés des oscillateurs harmoniques (cf le ressort...) et part des travaux de ses prédécesseurs (Boltzmann, Stefan et Wien) et obtient une formule qui marche à condition que l'énergie évolue non de façon continue mais par sauts d'un multiple d'une nouvelle constante (empirique) : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

La luminance spectrale énergétique, puissance par unité de surface dans une direction et par unité d'angle solide (schéma), en fonction de la température et de la fréquence du rayonnement :



$$L_{\Omega,\nu}(\nu,T) = \frac{2h\nu^3}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

L en watt $\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{Hz}^{-1}$

ν : fréquence du rayonnement en Hertz

λ : longueur d'onde du rayonnement en m

k : constante de Boltzmann = $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

h : constante de Planck = $6,626070 \times 10^{-34} \text{ J s}$

T : température en Kelvin

Planck (en 1900) pense n'avoir trouvé qu'une formule empirique sans relation avec un phénomène physique réel. D'autres que lui vont confirmer qu'il s'agit bien d'une loi de la Nature : ce seront Einstein puis Compton.

2. La matière: la découverte de l'atome

2.1. La radioactivité

Henri Becquerel(1852-1908) travaillait sur la phosphorescence de divers matériaux. En 1896, il réalise une expérience consistant à placer des sels d'uranium dans un papier opaque placé ensuite sur une plaque photographique. Elle est impressionnée. L'étude de ce phénomène le conduit à soumettre ce sel à un rayonnement magnétique : il sépare trois rayonnements : l'un n'est pas dévié (rayonnement gamma), un autre est dévié en direction du pôle - : rayonnement alpha chargé

positivement et le troisième rayonnement beta est chargé négativement. Ce dernier est rapidement identifié comme semblable aux rayons cathodiques formé d'électrons.

Les études ultérieures préciseront la nature des autres rayonnements. Les particules alpha présentent une charge qui est deux fois celle de l'électron ; de plus la charge disparaît au bout d'un certain temps : il s'agit du noyau de l'hélium. Le rayonnement gamma n'est pas dévié ni par un champ magnétique ni par un champ électrique : c'est un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde.

Pierre et Marie Curie poursuivront avec succès les travaux sur la radio activité et découvrent en 1898 le radium et son émission alpha intense.

2.2. La découverte de l'atome

La découverte des électrons passe par plusieurs étapes. **William Crookes** (1832-1919) perfectionne les expériences consistant à produire des éclats entre deux électrodes dans un tube à vide. Il obtient un vide plus poussé et étudie ces nouveaux rayons que l'on nomme cathodiques car ils semblent issus de la cathode et se matérialisent sur le fond du tube de verre sous forme de fluorescence. Il positionne même dans son tube un tourniquet qui avance sous l'effet de ces rayons cathodiques. **Jean Perrin** (1870-1942) montre que ces particules sont chargées négativement en les soumettant à un champ magnétique : ce sont des électrons. En 1897, **Joseph John Thomson** (1856-1940) améliore le dispositif de Jean Perrin et mesure le rapport masse/charge de ces particules. En 1911, l'américain **Robert Millikan** (1868-1953) montre que ces électrons sont à la source des phénomènes électriques.

Rutherford (1871-1937) utilise le radium pour irradier une mince feuille métallique. En l'absence de feuille de métal, le rayonnement alpha du radium produit une fluorescence sur l'extrémité du tube en verre. Malgré la présence du métal, la grande majorité des particules alpha arrivent sur le verre : ce qui constitue le métal n'est donc pas jointif : il y a des espaces entre ce que l'on estime être les atomes du métal. Enfin certaines particules reviennent en arrière. Rutherford comprend que la matière est faite de beaucoup de vide avec des points solides chargés positivement comme les particules alpha qui renvoient (rarement) ces particules alpha : en 1911 il propose un modèle d'atome avec un noyau autour duquel tournent des électrons.

En 1919 il découvre le proton dans une expérience consistant à placer un corps radioactif dans une atmosphère d'azote. En étudiant ensuite l'azote dans un champ magnétique, il constate que les atomes d'azote sont chargés positivement. Ils portent une charge égale en valeur absolue à celle de l'électron et leurs masses sont égales à celle de l'atome d'hydrogène : il nomme **protons** ces particules. Cette découverte sera confirmée grâce à la chambre de **Charles Wilson** (1869-1959).

Le **neutron** est identifié par **James Chadwick** (1891-1974) en soumettant l'azote à des particules alpha, il identifie un isotope de l'oxygène : O17 : il a le même nombre d'électron que l'oxygène « normal » : 16 mais le noyau est plus massif. En 1932 il identifie clairement une particule de même masse que le proton mais de charge nulle : le neutron.

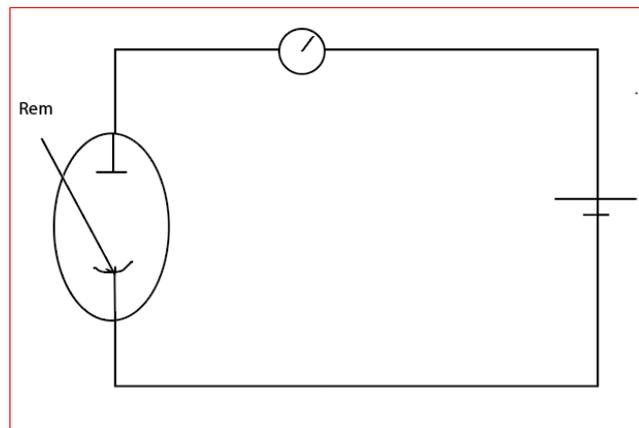
Applications astronomiques

Le fonctionnement des étoiles

3. Le développement de la physique quantique : matière et lumière unifiées.

3.1. L 'effet photo-électrique

Les rayons qui se produisent dans un tube de verre où on a fait le vide, appelés rayons cathodiques sont étudiés par Hertz et son élève **Philipp Lenard** (1862-1947) vers 1894 mais ce sera Einstein qui élaborera une explication du phénomène en 1905. Ce travail lui vaudra le prix Nobel en .



Le dispositif expérimental ci-dessus comporte un générateur, un voltmètre et un ampoule dans laquelle on a fait le vide contenant deux électrodes : la cathode et l'anode. Aucun courant ne passe. Si on éclaire la cathode avec un rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde, un courant apparaît dans le circuit.

Quelque soit l'intensité du rem il faut qu'il ait **une fréquence précise** pour que le courant passe mais dès que la fréquence est obtenue, le courant passe **immédiatement**. La physique classique au contraire indique que quelque soit la fréquence du rem, le courant devrait passer si l'intensité (l'amplitude de l'onde, le nombre de photons) du rem est suffisante ; de plus, Et il devrait y avoir un temps de latence entre l'irradiation et le passage du courant (accumulation d'énergie).

Einstein(en 1905) présente une solution. Pour lui, l'énergie du rem est quantifiée et liée à la fréquence du rayonnement : $E = h \nu$. Quand cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron, celui-ci est expulsé immédiatement. Cette quantité d'énergie du rem sera appelée plus tard : le photon

En 1917 : Einstein montre que le photon a aussi une quantité de mouvement $p = h\nu / c$ (Pour mémoire en mécanique : $p = mv$.)

William Lawrence Bragg (1890-1971) réalise une expérience (1915) de diffraction des rayons X par les cristaux. Il obtient la formule suivante :

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

où n N est l'ordre de diffraction

Elle permet de mesurer la distance inter atomique dans les cristaux.

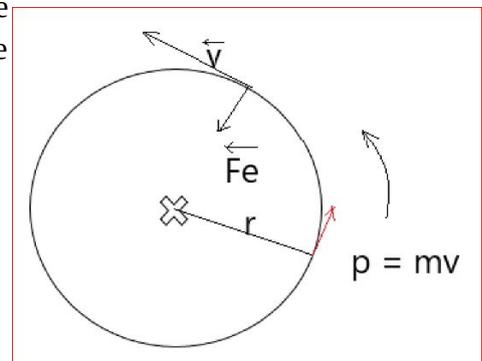
3.2. La théorie de Bohr

Le modèle de l'atome de Rutherford laissait beaucoup d'interrogations non résolues. En particulier on n'expliquait pas pourquoi les électrons ne tombaient pas sur le noyau alors que lui et le proton étaient chargés. De plus comment expliquer les raies spectrales ?

Bohr repris le modèle planétaire de Rutherford mais en intégrant dans ce modèle la toute nouvelle découverte de Planck sur la quantification du rayonnement. Il aboutit avec des notions simples à la quantification de l'énergie de l'électron et à la notion de niveaux d'énergie.

Démonstration :

Sur ce schéma X représente le proton, l'électron est animé d'une vitesse \vec{v} ; il est attiré vers le proton par une force électrostatique F_e . Le rayon r est la distance électron-proton¹.



$$F_e = k \cdot |q_1| \cdot |q_2| / r^2$$

$k = 1/4\pi\epsilon_0$ où ϵ_0 est la permittivité du vide.

$$q_1 = e, q_2 = -e \text{ et } |q_1| \cdot |q_2| = e^2.$$

d'où :

$$F_e = k \cdot e^2 / r^2$$

Selon la deuxième loi de Newton :

$$F_e = m_e \cdot a = m_e \cdot v^2 / r \text{ et :}$$

$k \cdot e^2 / r^2 = m_e \cdot v^2 / r$ on simplifie : $k \cdot e^2 / r = m_e \cdot v^2$ et on en tire la vitesse :

$$v^2 = k \cdot e^2 / r \cdot m_e$$

Étude du moment cinétique : L par rapport au centre de l'atome :

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge \mathbf{p} \text{ où } \mathbf{p} = m\mathbf{v} \text{ d'où } \mathbf{L} = \mathbf{r} \wedge (m_e \cdot \mathbf{v}) = r \cdot m_e \cdot v \cdot \sin(\theta) \quad \wedge \text{ signifie produit vectoriel.}$$

Or $\theta = 90^\circ$ et $\sin(\theta) = 1$ donc : $L = r \cdot m_e \cdot v$

A ce stade Bohr qui connaît les travaux de Planck postule que L doit être quantifié et doit être un multiple de $h/2\pi$: $L = n \cdot h/2\pi$.

$$r \cdot m_e \cdot v = n \cdot h/2\pi$$

La vitesse devient :

$$v = nh / 2\pi \cdot r \cdot m_e \text{ et } v^2 = n^2 h^2 / 4\pi^2 \cdot r^2 \cdot m_e^2. \text{ Avec la formule précédente :}$$

$$k \cdot e^2 / r \cdot m_e = n^2 \cdot h^2 / 4\pi^2 \cdot r^2 \cdot m_e^2 \text{ qui se simplifie en : } k \cdot e^2 = n^2 \cdot h^2 / 4\pi^2 \cdot r \cdot m_e$$

On extrait le rayon de cette formule : $k \cdot e^2 \cdot 4\pi^2 \cdot r \cdot m_e = n^2 \cdot h^2$

¹ Les vecteurs sont en gras

$$d'où r = n^2 \cdot h^2 / k \cdot e^2 \cdot 4\pi^2 \cdot m_e$$

$$\text{Calculons la valeur de } h^2 / k \cdot e^2 \cdot 4\pi^2 \cdot m_e = (6.626 \cdot 10^{-34})^2 / 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}$$

Le calcul donne $r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 53 \text{ pm}$ (picomètre) . C'est le rayon de Bohr a_0

$$\text{Le rayon} = n^2 \times a_0 \text{ d'où } r_n = n^2 a_0$$

Les rayons sont quantifiés.

Pour $n_1 = 1 \rightarrow r_1 = n^2 a_0 = 53 \text{ pm}$: état fondamental, niveau d'énergie le plus bas.

$$\text{Calcul de la vitesse de l'électron : } v = nh / 2\pi \cdot r \cdot m_e \quad v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$$

n	r (pm)	v (m.s ⁻¹)
1	53	2,2 10 ⁶
2	4 X 53	4,4
3	9X 53	6,6

Calcul de l'énergie cinétique :

$$\text{La force de Colomb } F_e = k \cdot e^2 / r^2 \text{ et } v = nh / 2\pi \cdot r \cdot m_e$$

$$\text{Selon la seconde loi de Newton ; } F_e = m_e \cdot a = m_e \cdot v^2 / r$$

$$\text{D'où ; } k \cdot e^2 / r^2 = m_e \cdot v^2 / r \text{ et } m_e \cdot v^2 = k \cdot e^2 / r$$

Comme l'énergie cinétique est : $E_c = 1/2 mv^2$ on a donc pour l'électron :

$$E_c = 1/2 mv^2 = 1/2 k \cdot e^2 / r$$

Calcul de l'énergie potentielle électrique:

$$E_{pe} = k \cdot e \cdot (-e) / r^2 \text{ (sans les valeurs absolues)} \rightarrow E_{pe} = - k \cdot e^2 / r^2$$

$$E_{\text{totale}} = E_c + E_{pe} = 1/2 k \cdot e^2 / r - k \cdot e^2 / r^2$$

$$E_t = -1/2 k \cdot e^2 / r \text{ or le rayon est quantifié } r_n = n^2 a_0 \text{ donc :}$$

$$\mathbf{E_n = -1/2 k \cdot e^2 / n^2 \cdot a_0}$$
, l'énergie est quantifiée.

$$\text{Pour } n=1 \quad E_1 = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ J qui, convertit en eV (1 eV = } 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J)} \rightarrow E_1 = -13,6 \text{ eV.}$$

$$\text{On peut écrire : } \mathbf{E_n = -13,6 / n^2 \text{ en eV.}}$$

Permet d'expliquer les spectres d'absorption et d'émission de l'hydrogène.

On peut calculer les énergies de chaque niveau :

$$n=1 \quad E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

$$n=2 \quad E_2 = -3,4 \text{ eV}$$

$$n=3 \quad E_3 = -1,51 \text{ eV}$$

Plus on monte dans les niveaux plus l'énergie de l'électron augmente.

Sont donc quantifiés dans ce modèle le rayon de l'orbite de l'électron, et un niveau d'énergie

n	r	E
1	53	-13,6 eV
2	4Xr1	-3,40 eV
n=3	9Xr1	-1,51eV

Très utile pour calculer les différences d'énergie entre niveaux.

Pour faire passer un électron du niveau 1 au niveau 2 il faut lui apporter de l'énergie. Et celle-ci doit avoir une valeur = $13,6 - 3,4 = 10,2 \text{ eV}$

Pour envoyer l'électron à l'infini : $r = \infty$, donc $n = \infty$ donc l' E_{pe} est nulle : 0 eV et son E_C est également nulle. Il a donc fallu lui apporter $13,6 \text{ eV}$. L'atome d'hydrogène est ionisé.

Cette énergie d'ionisation peut être calculée autrement elle est = 13.6 eV .

Explication des raies spectrales de l'atome d'hydrogène

Bohr émit l'hypothèse que si l'électron recevait une énergie suffisante il pouvait passer dans une couche supérieure et qu'en retour, la désexcitation s'accompagnait de la restitution de cette énergie sous la forme d'une émission d'un rayonnement électromagnétique de même énergie.

Il devenait possible de calculer la longueur d'onde correspondante et de confronter ce résultat avec les observations faites par Balmer, Lyman, etc.

Démonstration :

L'énergie d'un photon émis est égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux impliqués dans la transition. La différence d'énergie entre les niveaux n_{haut} et n_{bas} se calcule en utilisant la formule de $E(n)$ donnée plus haut :

$$\Delta E = E(n_{\text{haut}}) - E(n_{\text{bas}})$$

$$\Delta E = (-1/n_{\text{haut}}^2 \times 13,6 \text{ eV}) - (-1/n_{\text{bas}}^2 \times 13,6 \text{ eV})$$

$$\Delta E = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times 13,6 \text{ eV}$$

En utilisant la relation de Planck ($E = h\nu$) pour exprimer l'énergie des photons en fonction de leur fréquence, on déduit la fréquence des photons émis :

$$h\nu = \Delta E = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times 13,6 \text{ eV}$$

$$\nu = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times 13,6 \text{ eV} / h$$

On utilise ensuite la relation $v = c/\lambda$ avec c : la vitesse de la lumière dans le vide, v : la fréquence, et λ : la longueur d'onde :

$$c/\lambda = v = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times 13,6 \text{ eV}/h$$

En divisant chaque côté par c , on obtient :

$$1/\lambda = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times 13,6 \text{ eV}/hc$$

En utilisant la constante de Rydberg, R : $R = 13,6 \text{ eV} / hc = 1,1 \times 10^7 \text{ J/m}$,

on obtient :

$$1/\lambda = (1/n_{\text{bas}}^2 - 1/n_{\text{haut}}^2) \times R$$

Il est ainsi possible de calculer toutes les longueurs d'onde décrites par les spectroscopistes.

Des niveaux supplémentaires avec Arnold Sommerfeld (1868-1951) en 1915 :

Il imagine qu'à chaque orbite circulaire (les niveaux de Bohr), il peut exister plusieurs orbites elliptiques (nombre quantique azimutal) qui, avec mouvements de précession décrits par Joseph Larmor (1857-1942) (futur nombre quantique magnétique). Ces deux concepts seront mieux définis ultérieurement avec les équations de Schrödinger. Mais pour l'instant, ils n'expliquent encore pas la formation de toutes les raies, ni les phénomènes observés pour les atomes au-delà de l'hydrogène.

3.3. L'effet Compton (1892-1969) en 1923 :

Compton fournit une explication de ce qui se passe quand on envoie un rayonnement électromagnétique sur une feuille métallique mince.

Le rayonnement est dévié d'un angle θ et l'électron est arraché de l'atome dans une direction ϕ . La λ du rayonnement augmente, sa fréquence diminue traduisant une perte d'énergie. L'électron est accéléré et émet une onde à la même valeur que cette énergie perdue par le rayonnement. Pour que l'effet soit observé, il faut que le rayonnement possède une énergie multiple de h .

Cette expérience apporte la preuve de l'existence de ce que l'on nommera plus tard les photons d'énergie $h\nu$ et de la relation lumière-matière.

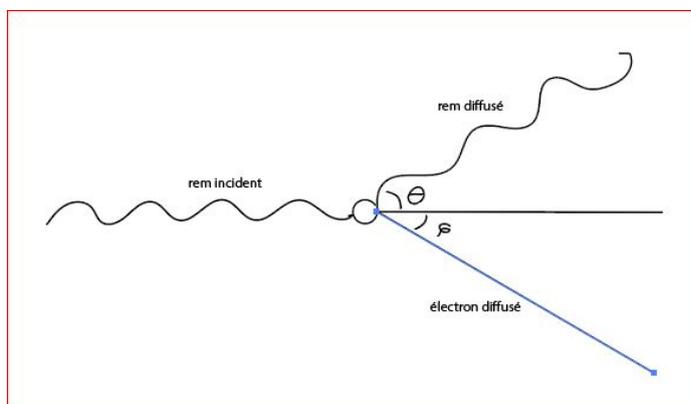


Figure : Direction de l'électron : angle θ , le rayonnement perd de l'énergie qu'il donne à l'électron.

L'électron part avec la direction ϕ

Il existe un **effet Compton inverse** qui est l'action d'un faisceau d'électrons sur une onde électromagnétique. Il est observé en astrophysique : c'est l'effet Sunyaev-Zel'dovich : un plasma chaud présent dans les amas de galaxies agit sur le rayonnement du fond diffus cosmologique qui est décalé dans la direction des hautes fréquences.

Intérêt : détection d'amas de galaxies à grand décalage (satellite Planck).

3.4. De Niels Bohr à Pauli

Le modèle de Bohr est bientôt critiqué. Il permet de bien expliquer la formation des raies spectrales principales de l'hydrogène (Balmer...) mais pas toutes les raies et surtout pas celles des autres atomes plus compliqués. Il n'explique pas l'élargissement de certaines raies ni leur dédoublement sous l'effet d'un champ magnétique (effet Zeeman). Il ne permet pas non plus d'expliquer le caractère corpusculaire du photon : le modèle comme représentation de l'atome est donc faux.

3.4.1. Les idées de Louis de Broglie (1892-1987)

Les travaux d'Einstein montrent que la lumière possède une nature corpusculaire ; pourquoi l'électron ne pourrait-il pas se comporter comme une onde ?

Pour élaborer sa théorie, de Broglie associe la théorie des quanta : $E = h\nu$, la relativité restreinte : $E = mc^2$ et les applique à l'électron :

$$h\nu = mc^2 \rightarrow \nu = mc^2 / h$$

Comme $\nu = 1 / \lambda$ on a ;

$$\lambda_e = h / m_e v_e$$

pour l'électron (c'est la longueur d'onde de de Broglie).

On a pour le photon : $\lambda_{ph} = h / m_{ph} c$ (de Broglie pose comme principe que le photon a une masse)

C'est la dualité onde-corpuscule

Cette théorie sera vérifiée expérimentalement par l'expérience de Davisson et Germer (1927)

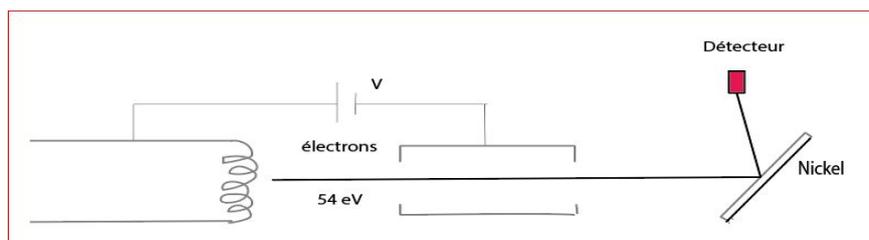


Figure : L'expérience est conduite dans le vide. Une source d'électrons envoie des électrons d'énergie égale à 54 eV sur une lame de Nickel. Un détecteur que l'on peut

déplacer d'un angle θ mesure l'énergie reçue. Ce dispositif permet de calculer une longueur d'onde reçue au niveau du détecteur.

Le résultat donne une valeur de 0,096 nm pour la longueur de de Broglie.

Quand l'électron rencontrera un objet de l'ordre de cette dimension : atome, neutron ... il se comportera comme une onde.

Pour les objets macroscopiques, dans la vie de tous les jours cet effet ne s'applique pas : Exemple d'une balle lancée à 50 m/s et pesant 0,15 kg ; on calcule la longueur de de Broglie. On obtient : $\lambda = 0,3 \times 10^{-34} \text{m}$ (inférieur à la constante de Planck). Ceci explique l'absence d'effet ondulatoire observable.

Une application de la théorie de de Broglie : le microscope électronique :

$\lambda_{\text{optique}} = 500 \text{ nm}$ est à comparer avec $\lambda_{\text{électronique}} = 0,1 \text{ à } 0,01 \text{ nm}$: on peut donc observer des détails plus fins à la surface d'un objet car la résolution est inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

3.4.2. Erwin Schrödinger (1887-1961)

S'inspire des travaux de Niels Bohr et de Louis de Broglie ainsi que des données acquises en mécanique ondulatoire et en thermodynamique. Il cherche une équation pour décrire la propagation de l'onde décrite par Louis de Broglie.

Schrödinger n'a jamais dit ou écrit comment il avait fait mais certains physiciens l'ont deviné. On pense qu'il observe une ressemblance entre la physique classique et les opérateurs quantiques.

La physique classique décrit l' E_c et l' E_p de l'électron,

Selon les axes x,y,z d'un repère les moments $p = mv$ peuvent s'écrire :

$$m v_x^2 + m v_y^2 + m v_z^2 / 2 + d e^2 c / r^2 = E$$

Ressemble à :

$$- (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2 + 8\pi m_e^2 / h^2 r) \psi = E \psi$$

où r est la distance électron-proton et E les niveaux d'énergie de l'électron.

Cette formula apparaît comme non conventionnel, mais **elle fonctionne!**

L'équation de Schrödinger peut s'écrire en résumé

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

C'est encore une formule « ad hoc » qui permet bien de calculer les orbites des électrons et leurs énergies mais dont la signification reste inconnue de Schrödinger.

3.4.3. Max Born (1882-1970)

Il va donner une interprétation physique : il montre que ψ^2 représente la **probabilité de position** de l'électron par rapport au noyau. Le carré de la fonction d'onde est proportionnel à la *probabilité* de trouver l'électron dans un volume donné dans l'atome. La fonction ψ^2 est appelée *densité de probabilité de présence*.

Explication

Lumière :

En théorie corpusculaire : $E \times t$ est proportionnelle au nombre de photons $X t$

En théorie ondulatoire : E est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde ψ^2

Selon de Broglie ce doit être la même chose pour les **particules**.

Une expérience de diffraction avec des électrons montre les résultats suivants :

- Si on réalise l'expérience de trous de Young avec les électrons, si on envoie un seul électron, on ne devrait observer qu'un seul impact sur l'écran selon que l'électron est passé par l'un ou l'autre des trous. En réalité on observe deux impacts, comme si l'électron *était passé par les deux trous à la fois* !

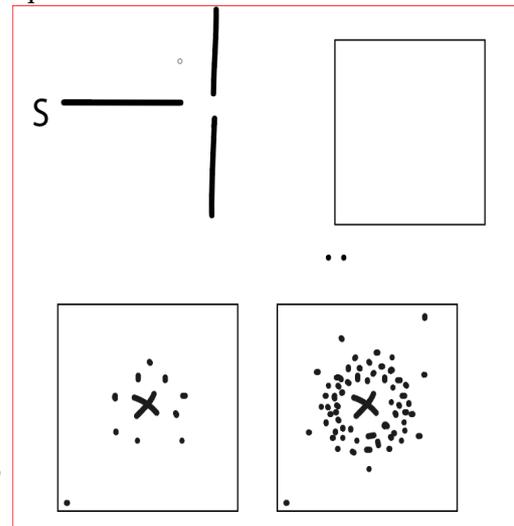
- S'ils arrivent un par un, ils remplissent aléatoirement un espace. A la fin de l'expérience tous les électrons se sont dispersés dans un volume avec des probabilités plus grande en certains endroits.

On en déduit que un électron unique peut occuper n'importe quelle position autour du proton mais que certaines sont beaucoup plus probables que d'autres. Comme en probabilité on peut décrire un volume contenant par exemple 90 % des positions possibles de l'électron.

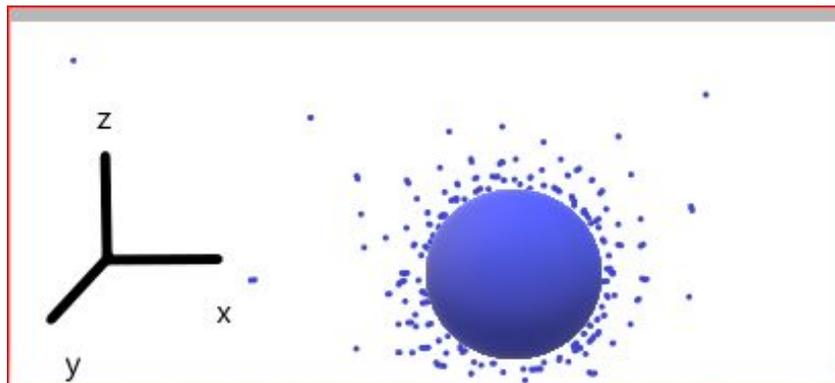
Voyons cela avec des schémas.

Si on envoie des électrons un par un sur un écran, ils semblent au début se disperser au hasard sur toute la surface.

Avec un nombre plus grand d'électrons, on voit au cours du temps se dessiner une sorte de couronne où les impacts sont plus fréquents. On peut voir qu'au moins 90 % des électrons se trouvent dans cette zone.



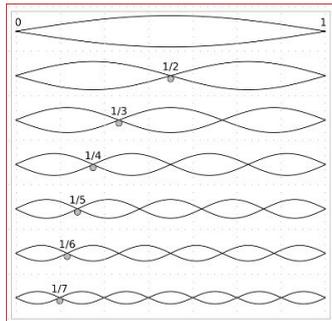
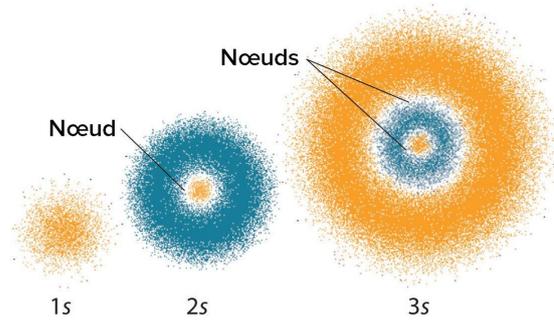
En réalité la distribution est sphérique :



Autres représentations de ce phénomène :

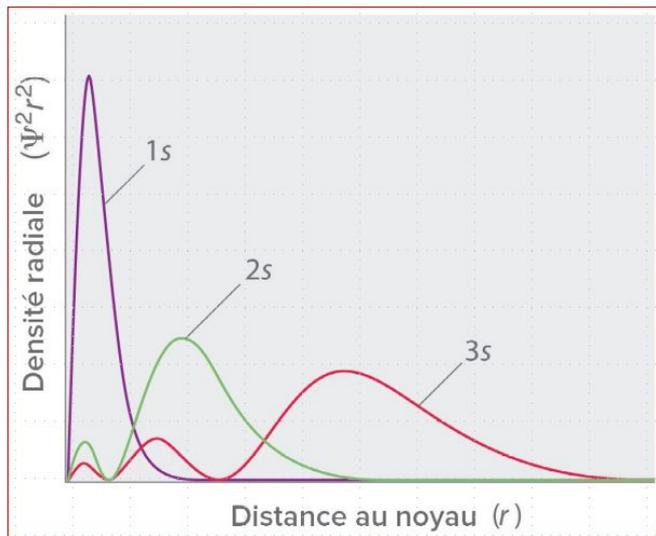
Distribution des électrons suivant leur niveaux d'énergie. Ces formations concentriques se nomment des orbitales. Ici elles sont sphériques (symbole : s).

Orbitale = ensemble des probabilités de présence de l'électron autour du proton.



Ressemblance avec les harmoniques des ondes stationnaires.

Ici est représentée la probabilité de présence des électrons en fonction de leur distance au proton.



Plus le niveau d'énergie de l'orbitale augmente de n=1 à n=2 puis à n=3, plus la probabilité de trouver un électron en un point plus éloigné du noyau augmente également.

Ici sont dessinées des orbitales sphériques mais en fonction des nombres quantiques de **Sommerfeld**: n, l,m, les formes des orbitales sont différentes.

On peut ainsi écrire l'équation de Schrödinger de cette façon :

$$\hat{H}\psi_{n,l,m} = E\psi_{n,l,m}$$

où \hat{H} est u opérateur qui décrit les opérations qu'il faut appliquer à la fonction ψ (ici un opérateur hamiltonien, que l'on peut considérer comme une somme de dérivées partielles) : E est l'énergie de liaison et ψ une fonction d'où l'on tire les nombres quantiques n,l,m que nous allons voir en détail plus loin et qui décrivent les probabilités de présence de l'électron.

3.4.4. Le spin

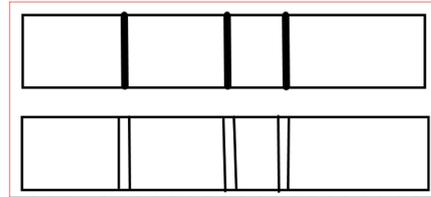
C'est une propriété quantique, relié au magnétisme.

Elle a été suspecté par l'observation de l'effet Zeeman et par l'expérience de Stern et Gerlach.

L'effet Zeeman (1896)

Sous l'influence d'un champ magnétique, le niveau d'énergie des atomes changent.

En spectroscopie, les raies sont dédoublées et l'intervalle qui les sépare est proportionnel au champ magnétique.

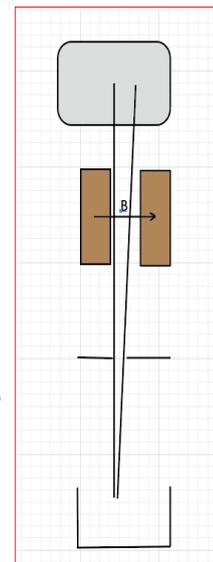


En astrophysique, l'effet Zeeman en astrophysique permet le calcul du champ magnétique des taches solaires et sa surveillance par Soho, l'étude du champ magnétique des étoiles (instruments ESPADON et NARVAL au pic du Midi), celui de la Galaxie...

L'Expérience de Stern et Gerlach (1927)

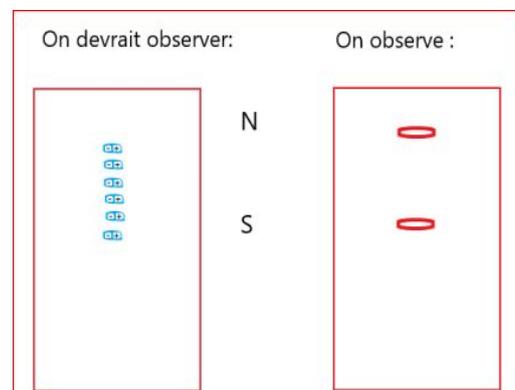
Cette expérience consiste à chauffer très fortement de l'Ag fondu. L'expérience est conduite dans le vide ;

Des atomes s'échappent, ils sont diaphragmés et passent entre un électroaimant : le jet d'atomes est dévié.



L'atome d'hydrogène était considéré comme un dipole : + pour le proton et - pour l'électron qui pouvait selon Bohr occuper toutes les positions autour du proton.

Pour un grand nombre d'atomes on devrait, dans le champ de l'aimant, observer une trace verticale .En réalité on observe deux taches : au N et au S.



Cette observation est incompréhensible avec la physique classique. Cette observation est retrouvée avec tous les atomes neutres ayant un nombre d'électrons **impairs**. On en conclue que cet effet résulte d'une propriété de l'électron.

Uhlenbeck et Goudsmit proposent une représentation physique (1925) par une rotation de l'électron sur lui-même . Elle est séduisante pour rendre plus facile son interprétation mais elle n'est pas physiquement réelle. Le spin est une propriété quantique de l'électron assimilable à un moment magnétique.

Pour l'hydrogène le spin peut avoir deux orientations symbolisés ainsi : up ↑ et down ↓.

Le principe d'exclusion de Pauli (1925)

Il pose que les électrons d'un même système ne peuvent pas être dans le même état quantique. Il est à noter que ce principe s'applique à tous les fermions (particules de spin demi-entier comme les électrons, les protons et les neutrons). Deux fermions identiques ne peuvent être dans le même état quantique avec le même spin.

Les états quantiques sont définis par les nombres quantiques n , l et m plus le spin (voir ci-dessous) qui permettent une grande quantité d'états différents.

En astrophysique, le principe d'exclusion de Pauli permet l'existence des étoiles à neutrons.

3.4.5. Principe d'incertitude de Heisenberg

Il existe une question sémantique : doit-on dire principe d'incertitude ou principe d'indétermination ? Le second a la préférence mais le second garde son sens dans une vision statistique du problème.

« il est physiquement impossible de déterminer précisément à la fois la position et la quantité de mouvement p —ou l'énergie E — d'une particule à un moment donné. En d'autres termes, plus on connaît avec précision la position d'un électron, moins on en sait sur sa quantité de mouvement, et vice-versa. »

$$\Delta x \times \Delta p \geq h / 4\pi \quad \text{avec} \quad \Delta p = m v$$

Deux exemples

Exemple de l'électron

Soit $r_1 = 5,3 \times 10^{-11}$ m la distance proton-électron, $v = 2,2 \times 10^6$ m/s sa vitesse orbitale et $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg sa masse.

La quantité de mouvement est :

$$p = m v = 9,11 \times 10^{-31} \times 2,2 \times 10^6 = 20 \times 10^{-25} \text{ kg m/s}$$

Si p est connu avec une précision de 10 % $\Delta p = 2 \times 10^{-25}$ kg m/s

Que sera alors Δx ? Selon Heisenberg :

$$\Delta x \geq h / (4\pi \times \Delta p)$$

$$\text{Soit } \Delta x \geq 6,634 \times 10^{-34} / 4 \times 3,1459 \times 2 \times 10^{-25}$$

donc $\Delta x \geq 2,6 \times 10^{-10}$ m, imprécision très grande par rapport à la valeur de

$$x = r_1 = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m.}$$

Prenons l'exemple d'un corps macroscopique de rayon $r = 1$ m, qui tourne au bout d'une ficelle à la vitesse $v = 2$ m/s et qui pèse $m = 9$ kg

La quantité de mouvement est : $p = m = 18 \text{ kg X m/s}$

Si p est connu avec une précision de 10 % on a $\Delta p = 1,8 \text{ kg X m/s}$

Que sera alors Δx ? Selon Heisenberg :

$$\Delta x \geq h / (4\pi \times \Delta p)$$

$$\Delta x \geq 6,634 \times 10^{-34} / 4 \times 3,1459 \times 1,8 \quad \Delta x \geq 0,3 \times 10^{-24} \text{ m}$$

L'incertitude est si petite qu'il n'est pas possible de la mesurer ! Dans la vie courante le principe d'incertitude ne s'applique pas.

4. Synthèse

Louis de Broglie : toute particule peut être considérée comme une onde de matière de longueur d'onde λ donnée par l'équation suivante :

$$\lambda = h/mv$$

Erwin Schrödinger : modèle quantique de l'atome, dans lequel les électrons sont traités comme des ondes de matières. La résolution de l'équation de Schrödinger, $\hat{H}\psi = E\psi$, permet d'obtenir une série de **fonctions d'onde ψ** , chacune associée à une **énergie de liaison de l'électron, E** .

Max Born : Le carré de la fonction d'onde, ψ^2 , représente la *densité de probabilité* de présence de l'électron à un endroit donné de l'atome. Une **orbitale atomique** est définie comme étant *la région d'un atome où l'électron a une probabilité de présence de plus de 90%*.

Le principe d'incertitude (d'indétermination) de Heisenberg stipule qu'il est impossible de connaître précisément à la fois l'énergie et la position d'un électron à un instant donné. Ainsi, plus la position de l'électron est déterminée de manière précise, moins son énergie est connue, et vice versa.

Les électrons ont une propriété intrinsèque appelée **spin**, et un électron ne peut être que dans un des deux états de spin possibles : up ou down. **Pauli** : Deux électrons se trouvant sur la même orbitale ont forcément des spins opposés.

5. Nouvelles conceptions de l'atome d'hydrogène.

La fonction d'onde, ψ est associée à une orbitale spécifique. Chaque orbitale possède **quatre nombres quantiques** que l'on déduit de l'équation de Schrödinger. Ensemble, ces quatre nombres quantiques forment **l'identification unique d'un électron**, qui définit son orbitale à l'intérieur de l'atome.

Les quatre nombres quantiques sont les suivants :

n, le nombre quantique principal, est le principal déterminant de l'énergie d'une orbitale. Les orbitales possédant la même valeur de n partagent la même **couche** électronique.

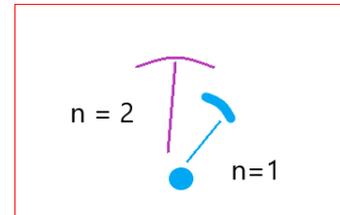
l, le nombre quantique orbital, ou azimutal, définit la forme de l'orbitale. Les orbitales qui ont la même valeur de n mais une valeur de l différente sont appelées *sous-couches électroniques*.

m_l, le nombre quantique magnétique, est lié à l'orientation spatiale de l'orbitale.

m_s, le nombre quantique de spin, indique le spin de l'électron. les électrons peuvent avoir un spin up (m_s=+1/2) ou un spin down (m_s=-1/2).

n, nombre quantique principal ou couche

- Entier qui varie de 1 à l'∞
- Est associé à l'énergie de l'électron
- Quand n augmente la « distance » au proton augmente

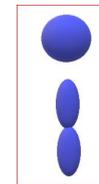


l, nombre quantique azimutal

- Entier variant de 0 à n-1.
- Est associé à un sous-niveau d'énergie (sous couche).
- Détermine la forme de l'orbitale.

Exemples :

n=1 n-1=0 → l=0 → **orbitale s** de forme sphérique
 n=2 n-1=0 → l=0 → « »
 L=1 → **orbitale p** forme en haltère



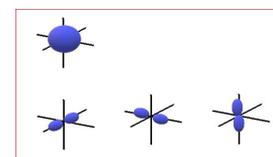
m_l = nombre quantique magnétique

- Orientation de l'orbitale par rapport au noyau
- Entier qui varie de -l à +l

Exemples :

l=0 → m = 0

l=1 → m = -1, 0, 1



m_s : nombre quantique de spin

Deux valeurs + 1/2 → ↑ up
 - 1/2 → ↓ down

Nombre d'électrons dans les 2 premières couches

n	l [0, n-1]	m _l [-l, +l]	nb d' électrons dans les orbitales	nb d' électrons dans la couche
n=1	n ²		maximum 2	2n ²
	l = 0 s		2	2
	m _l = 0			

n=2	l = 0	s de r +gd	2	
	l = 1			
		$m_l = -1,0,1$ p_x, p_y, p_z	6	8

Nombre d'électrons dans la troisième couche

n	l[0,n-1]	$m_l [-l, +l]$		
	Orbitales	nb d' électrons		nb d 'électrons
		dans les orbitales		dans la couche
	n^2	maximum 2		$2n^2$
n=3	l = 0	s	2	
	l = 1			
		$m_l = -1,0,1$ p_x, p_y, p_z	6	
	l = 2	d		
		$m_l = 2,1,0,1,2$	10	18

Nombre d'électrons dans la quatrième couche

n	l[0,n-1]	$m_l [-l, +l]$		
	Orbitales	nb d' électrons		nb d 'électrons
		dans les orbitales		dans la couche
	n^2	maximum 2		$2n^2$
n=4	l = 0	s	2	
	l = 1			
		$m_l = -1,0,1$ p_x, p_y, p_z	6	
	l = 2	d		
		$m_l = -2,-1,0,1,2$	10	18
	l = 3	f		
		$m_l = -3,-2,-1,0,1,2,3$	14	32

$n = 1$	$\ell = 0$	1s	 1s						
$n = 2$	$\ell = 0$	2s	 2s						
	$\ell = 1$	2p	 2p _z	 2p _x	 2p _y				
$n = 3$	$\ell = 0$	3s	 3s						
	$\ell = 1$	3p	 3p _z	 3p _x	 3p _y				
	$\ell = 2$	3d	 3d _{z²}	 3d _{xz}	 3d _{yz}	 3d _{xy}	 3d _{x²-y²}		
$n = 4$	$\ell = 0$	4s	 4s						
	$\ell = 1$	4p	 4p _z	 4p _x	 4p _y				
	$\ell = 2$	4d	 4d _{z²}	 4d _{xz}	 4d _{yz}	 4d _{xy}	 4d _{x²-y²}		
	$\ell = 3$	4f	 4f _{z³}	 4f _{xz²}	 4f _{yz²}	 4f _{xyz}	 4f _{z(x²-y²)}	 4f _{x(x²-3y²)}	 4f _{y(3x²-y²)}

Ces découvertes se relient parfaitement avec la classification faite à partir de 1869 par le chimiste Dmitri Mendeleïev (1834-1907).

