

Introduction à la Mécanique Quantique

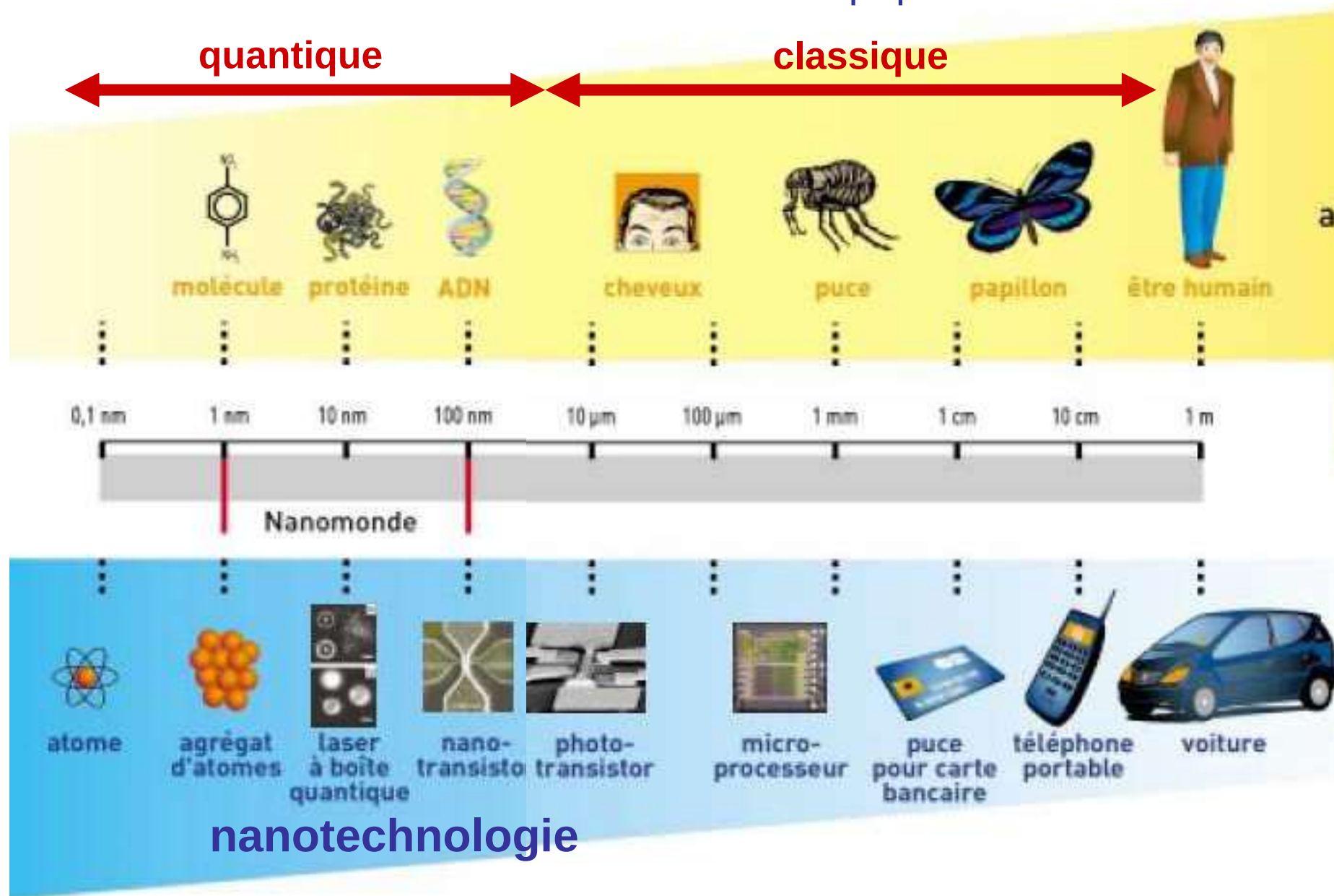
N. Battaglini

Maître de conférences – Université Paris Diderot (Paris 7)

Téléphone : 0157278858

Courriel : nicolas.battaglini@univ-paris-diderot.fr

Les comportements quantiques sont dominants
dans le monde microscopique



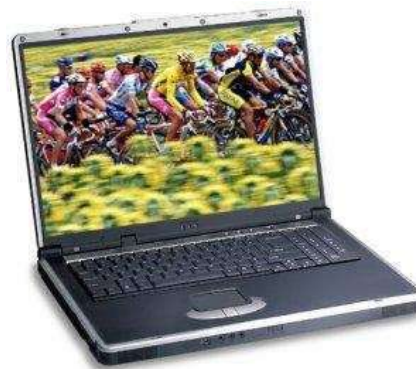
Physique quantique

La compréhension des phénomènes régissant les interactions entre lumière et matière à l'échelle microscopique a permis le développement d'une multitude d'applications.

LASER



micro-processeur
disque dur



micro-onde



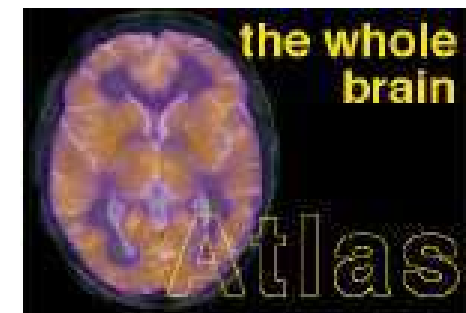
GPS



microscope à effet tunnel



imagerie médicale IRM



Un peu d'histoire des sciences

Edification de la mécanique quantique

Retour en 1900

deux concepts issus de la Physique Classique :

Ondes et Particules

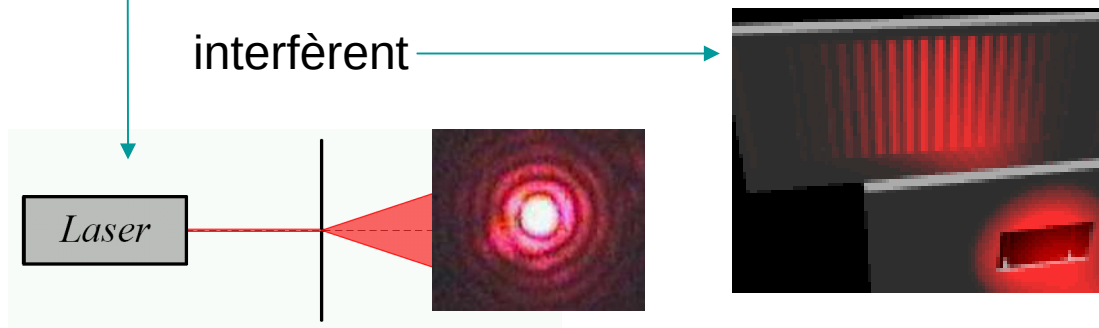
Ondes

continues

position approximative

diffractent

interfèrent



*Déplacement mécanique
ou électromagnétique*

*Propagation
de l'énergie*



Masse nulle

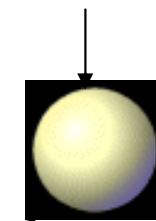
Particules

Discrètes (ponctuelles)

position et impulsion bien
définies

Classiquement ne diffractent
pas et n'interfèrent pas

Position définie



*Impulsion
définie*

*Origine
ponctuelle de
la masse*

Physique Classique

Complète hégémonie jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle

Mécanique newtonienne (Newton – fin 17^{ème} siècle)

Électromagnétisme et Optique (Maxwell – 19^{ème} siècle)

Thermodynamique classique (2^{ème} moitié du 19^{ème} siècle)

Résultats marquants pour les objets et les systèmes macroscopiques

Dynamique du système solaire

Modèle de la lumière comme une onde électromagnétique

Relation entre Chaleur et Énergie

Les principaux concepts de la Physique Classique

électricité, magnétisme et optique → équations de Maxwell

objets matériels → lois de Newton du mouvement

position et impulsion des particules définies à chaque instant

forces agissant sur le système + valeurs des positions et impulsions à l'instant t_0
=> détermination des positions et impulsions à tout instant : notion de **trajectoire**

L'électron comme une particule élémentaire

J.J. Thomson, vers la fin du 19^{ème} siècle

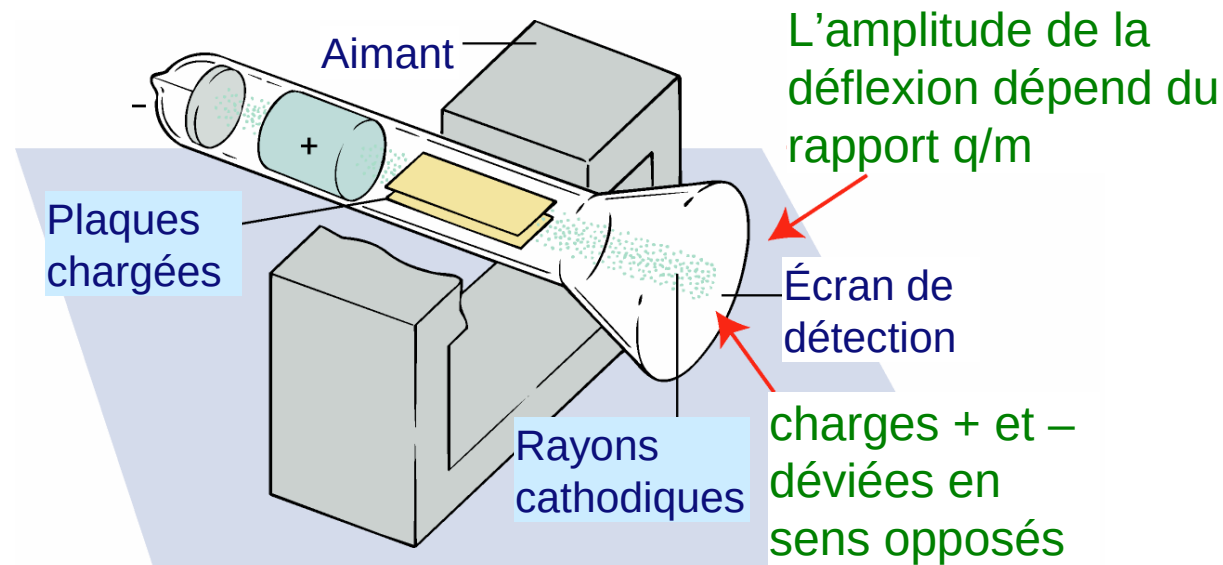
Expériences du rayonnement cathodique

Découverte de la charge négative de l'électron

Mesure du rapport q/m = charge/masse

$$q/m = 1,759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

Identification de l'électron comme une **particule** fondamentale



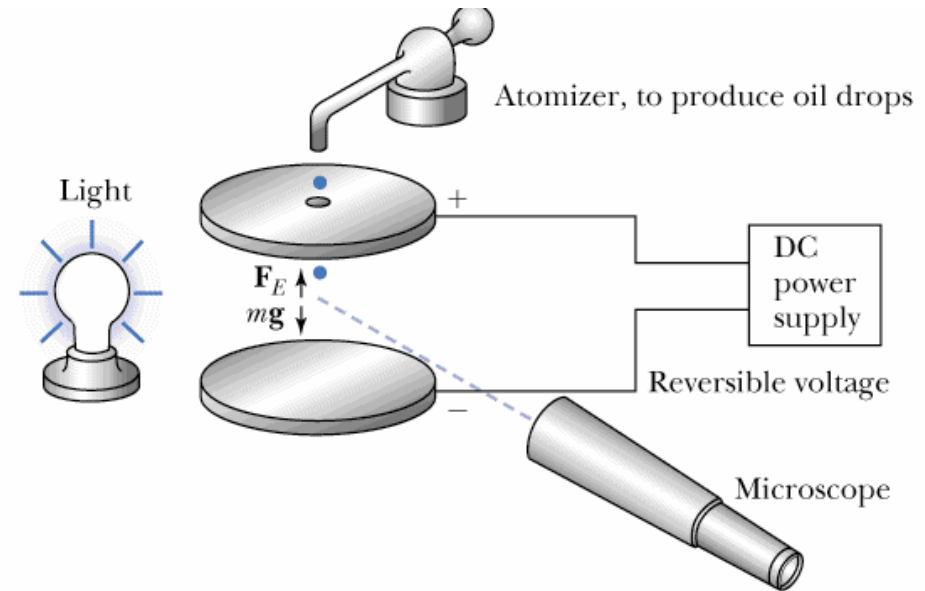
L'électron comme une particule élémentaire

R. Millikan (vers 1906)

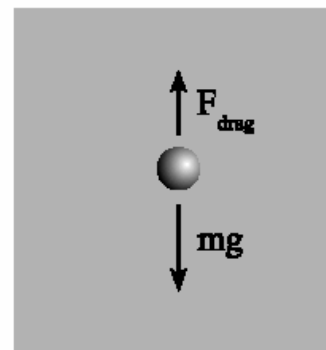
Étudie la charge de gouttes d'huile par leur mouvement dans un champ électrique.

Montre que la charge électrique des gouttes est un multiple de la charge de l'électron.

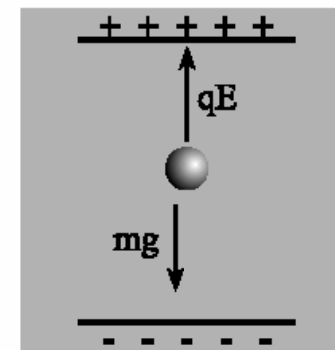
La valeur de la charge et les résultats de Thomson donnent la masse de l'électron.



chute libre



chute libre stoppée électrostatiquement



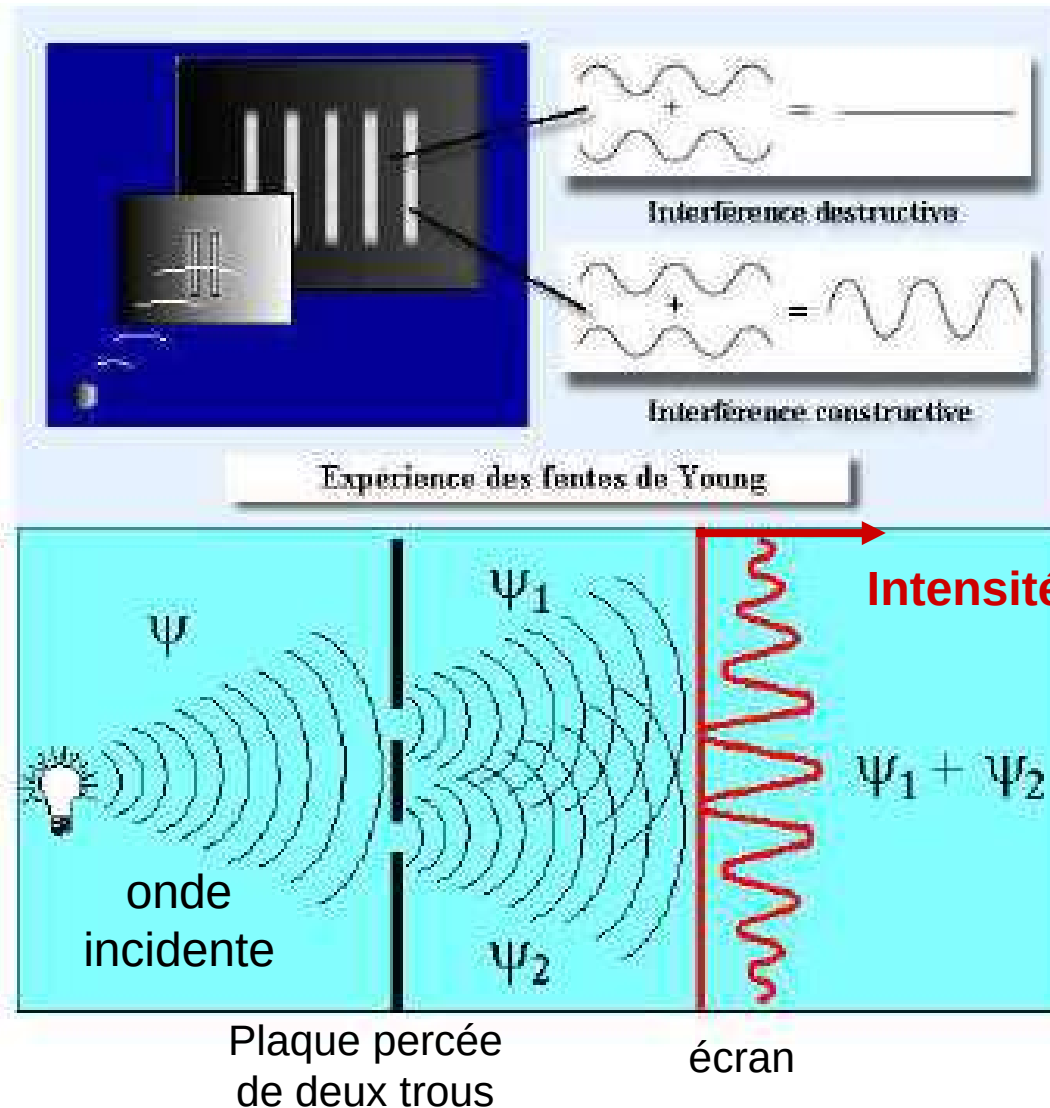
$$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

La charge à appliquer est un multiple entier de e

La lumière comme une onde

T. Young (1773-1829) : Diffraction et Interférences



Interférences destructives
lorsque les deux crêtes des
ondes se rencontrent en
opposition de phase.

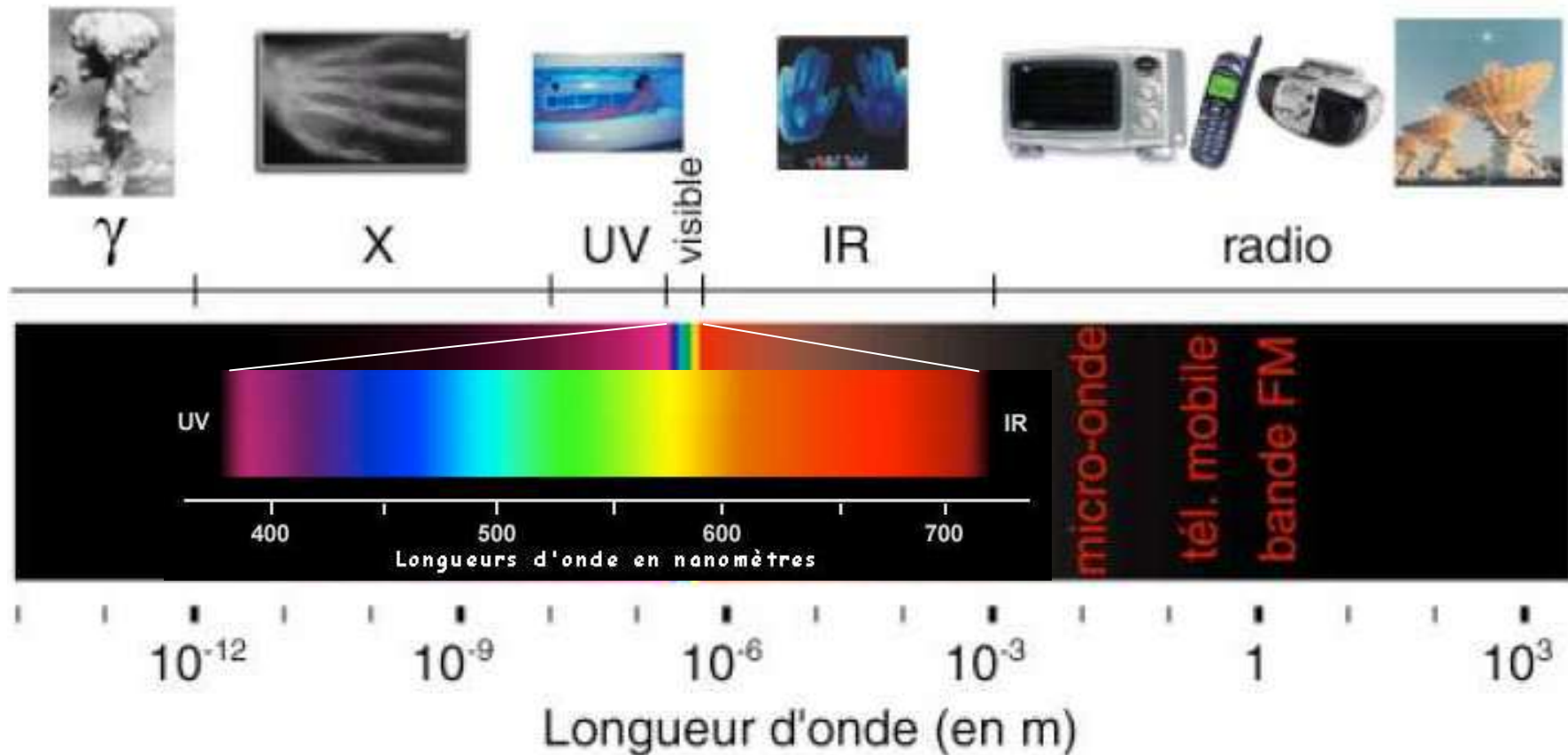
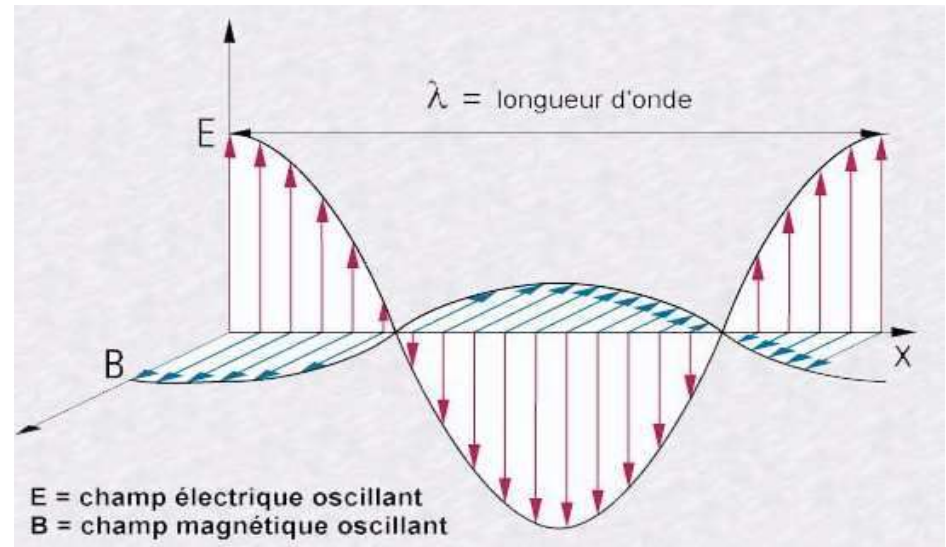
Interférences constructives
lorsque les deux crêtes des
ondes se rencontrent **en phase.**

La lumière comme une onde

J. C. Maxwell (1831-1879) :

La lumière est une onde
électromagnétique

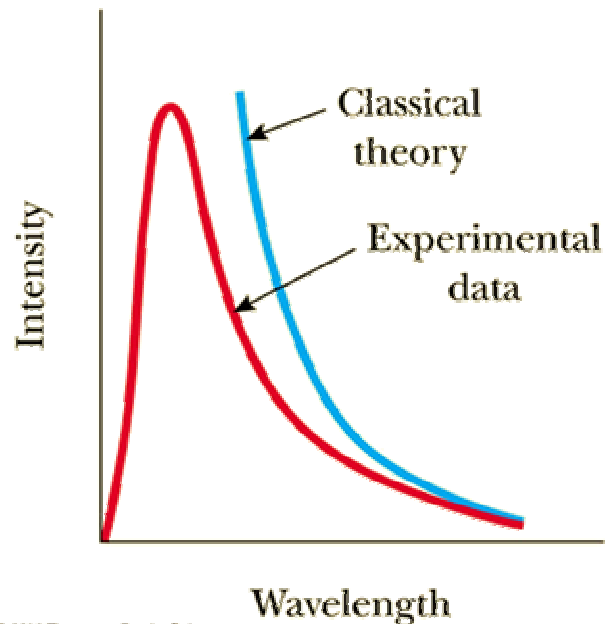
Équation de propagation



Faits expérimentaux non élucidés en 1900

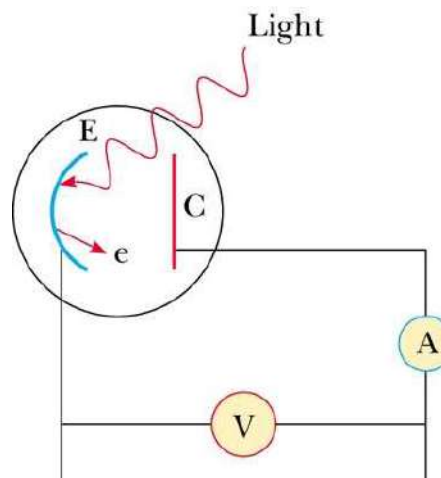
Rayonnement du corps noir

Les corps chauffés émettent du rayonnement. L'intensité émise décroît pour les courtes longueurs d'onde : «catastrophe ultra-violette»



Effet photo-électrique

La lumière (UV) est capable d'arracher des électrons de la surface d'un métal. L'énergie cinétique des électrons émis ne dépend pas de l'intensité lumineuse mais de la fréquence de la radiation utilisée.



Spectres atomiques

Les atomes émettent et absorbent des «couleurs» (longueurs d'ondes) bien déterminées.

spectre (vis.) de l'hydrogène



Loi empirique (Balmer 1885)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Wavelength λ is indicated by a red arrow pointing to the denominator. The Rydberg constant R is indicated by a red arrow pointing to the constant R .

$$R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Mise en évidence de phénomènes quantiques

Dualité onde corpuscule

1900 – **Planck** : introduction du quantum d'énergie $E = h \nu$ pour expliquer le spectre de rayonnement du corps noir.

1905 – **Einstein** : interprétation de l'effet photo-électrique en utilisant le concept de quantum de rayonnement de Planck. Le photon est né !

1912-1914 – **Bohr** : proposition d'un modèle atomique dans lequel l'énergie du système est quantifiée. Modèle en accord avec le spectre d'émission des atomes.

1914 – **Frank et Hertz** : expérience prouvant la quantification de l'énergie dans les atomes. Un faisceau d'électrons perd son énergie par valeurs discrètes lorsqu'il interagit avec une vapeur atomique de mercure.

1923 – **Compton** : preuve expérimentale de l'impulsion du photon.

De Broglie : hypothèse ondulatoire. À toute particule d'impulsion $p = mv$ est associée une onde de longueur d'onde $\lambda = h/p$

1927 – **Davisson et Germer** : preuve expérimentale de l'hypothèse ondulatoire de De Broglie. Un faisceau d'électrons est diffracté par un cristal de nickel.

1925-1927 – **Schrödinger, Heisenberg, Born, Bohr, Dirac, Pauli, Hilbert, Von Neuman...** mathématiciens et physiciens développent le formalisme de la mécanique quantique.

1927 Solvay Conference (Bruxelles)



	A. PICCARD	E. HENRIOT	P. EHRENFEST	Ed. HERZEN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHAFFELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H. FOWLER	L. BRILLOUIN
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P.A.M. DIRAC	A.H. COMPTON	L. de BROGLIE	M. BORN			N. BOHR	
I. LANGMUIR	M. PLANCK	Mme CURIE	H.A. LORENTZ		A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	Ch.E. GUYE			C.T.R. WILSON	O.W. RICHARDSON

La Lumière comme une Particule

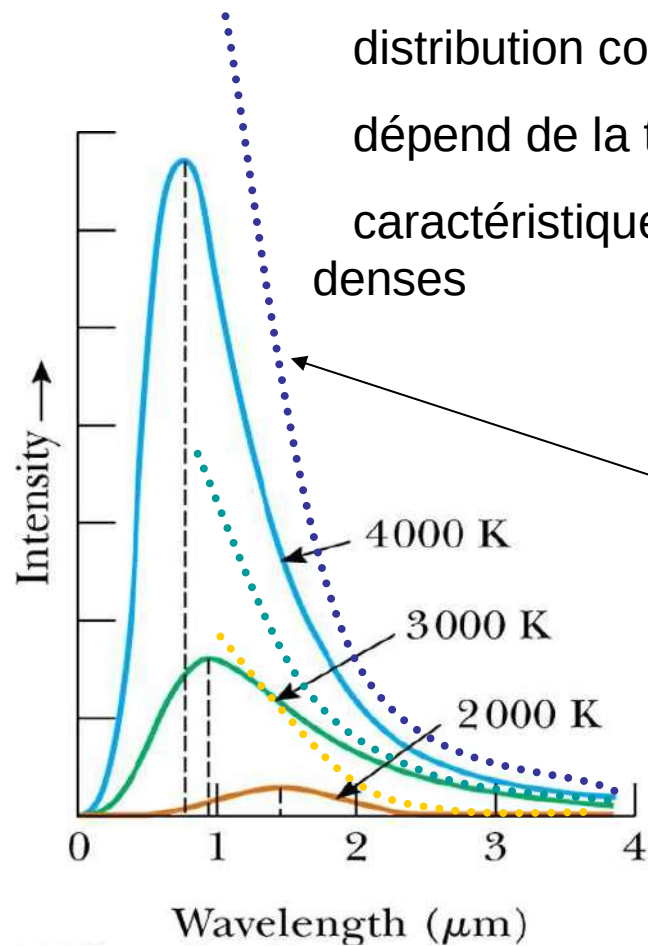
rayonnement du corps noir

Caractéristiques du rayonnement du corps noir

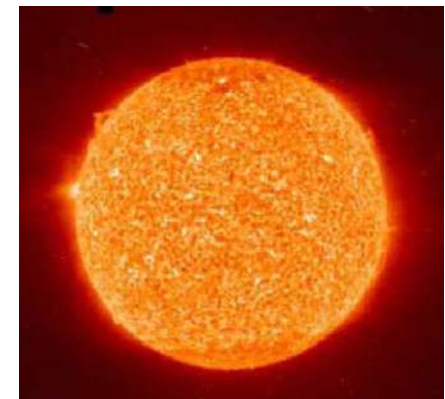
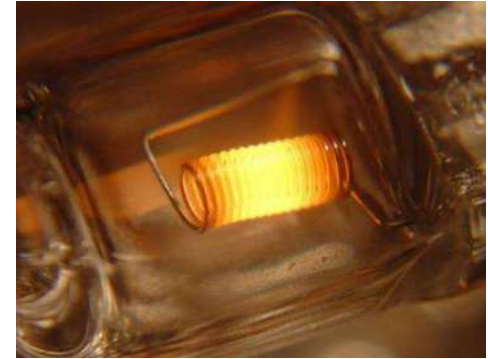
distribution continue des radiations

dépend de la température de l'objet émetteur

caractéristique des solides, liquides et gaz
denses



Modèle classique
(Rayleigh – Jeans)



La Lumière comme une Particule

Interprétation de Planck (1900)

Oscillateurs sub-microniques chargés

Hypothèse : radiations émises par des oscillateurs en résonance

Oscillations sur des énergies discrètes

$$E_n = nh\nu$$

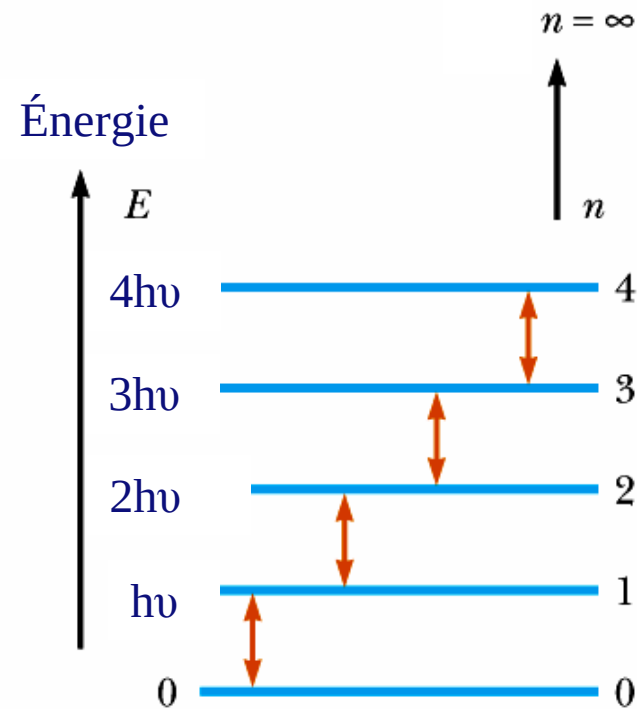
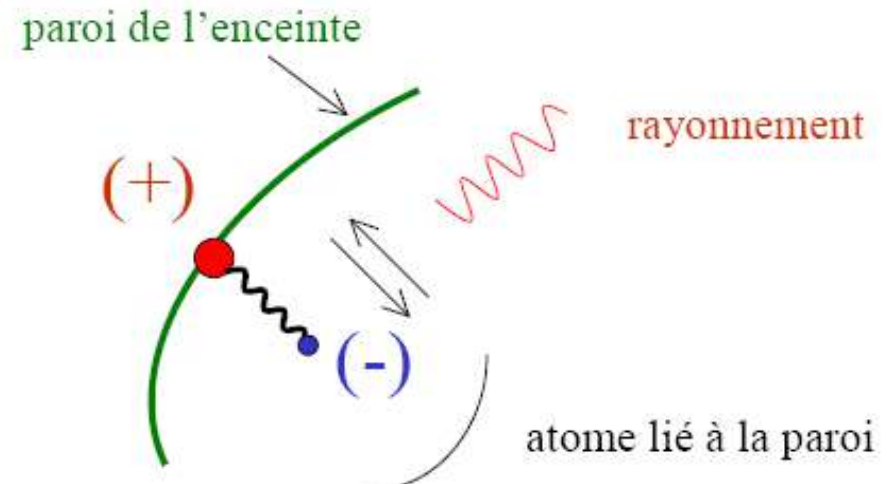
n : nombre quantique de l'oscillateur

ν : fréquence de l'oscillateur

h : constante de Planck : $6,626 \times 10^{-34}$ Js

h : quantum d'action

nouvelle constante universelle

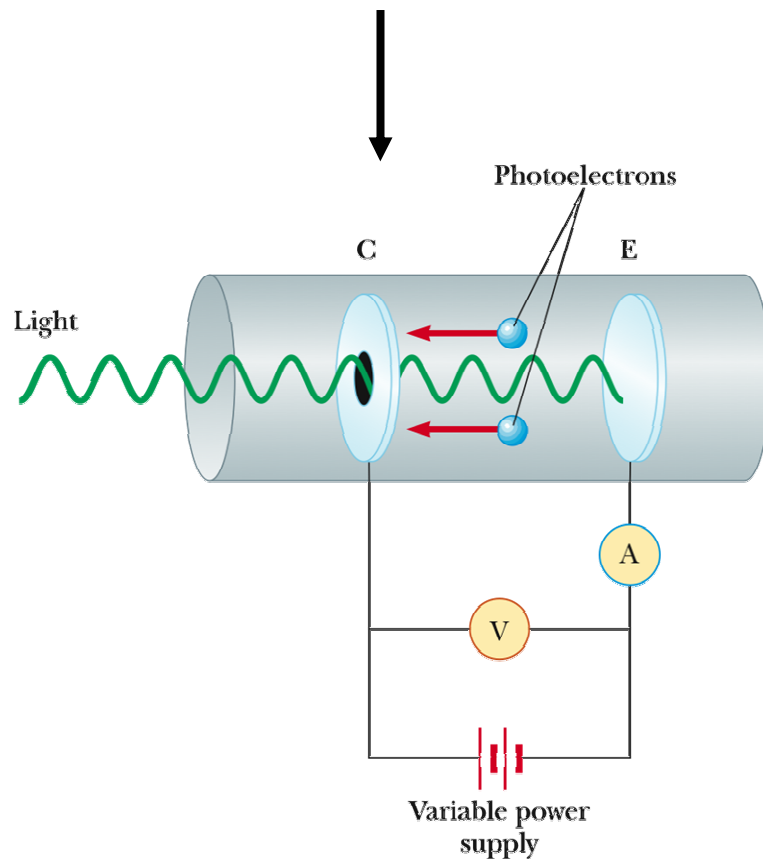


La Lumière comme une Particule

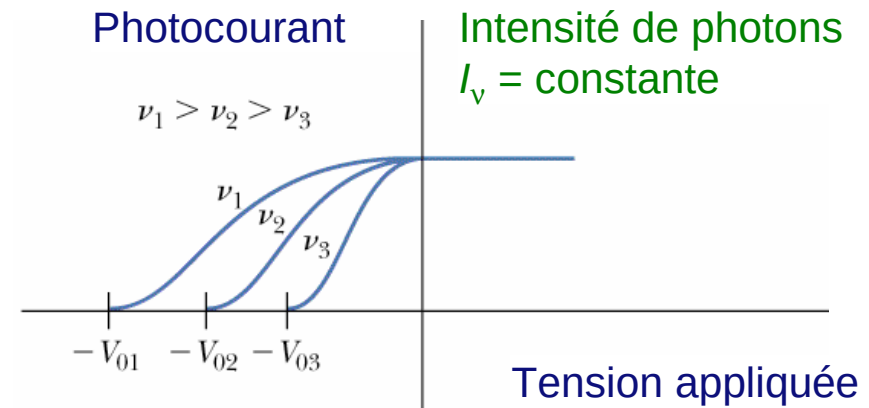
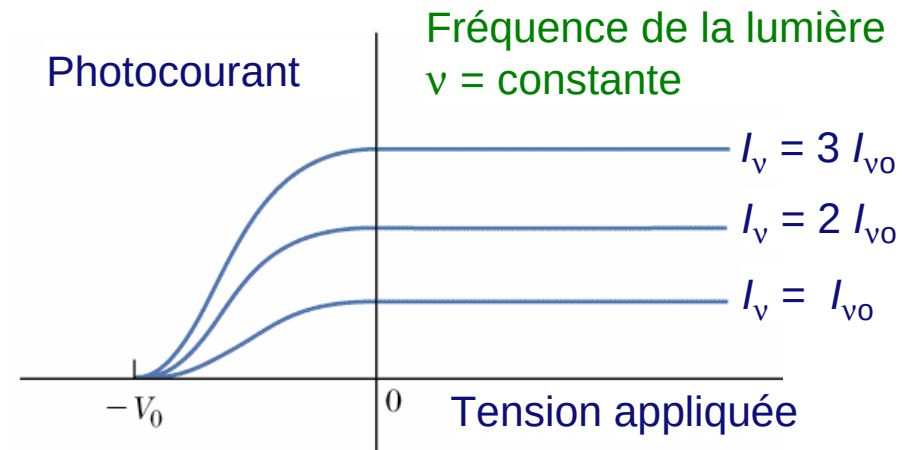
Effet Photoélectrique

Découvert par hasard par Hertz (1887)

Étudié par Lennard (1899-1902)

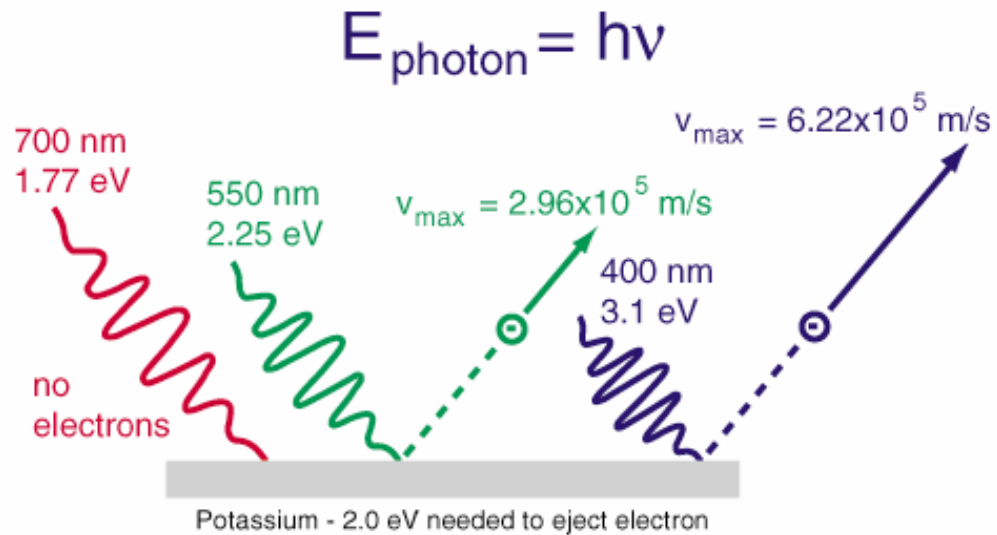


Observations :



La Lumière comme une Particule

Interprétation de Einstein (1905)
(quanta de Planck)

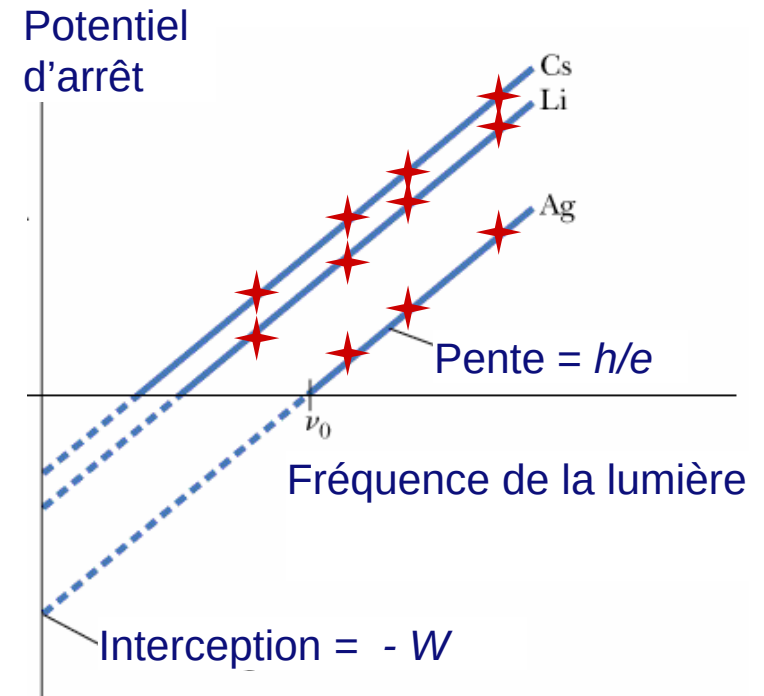


Énergie cinétique des électrons
(relation de Planck et Einstein) :

$$E_c = h\nu - W$$

Expérience de Millikan (1906)

mesure de la constante de Planck



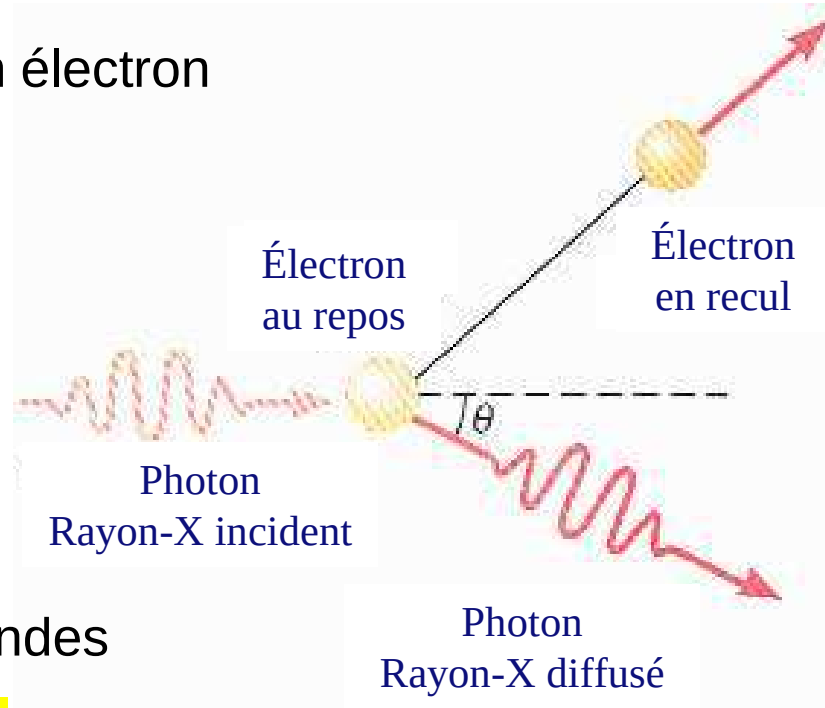
W : travail d'extraction
caractéristique des matériaux

La Lumière comme une Particule

L'Effet Compton (1923)

Collision élastique photon électron

La longueur d'onde du photon émergent est plus longue que celle du photon incident.



Différence des longueurs d'ondes

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

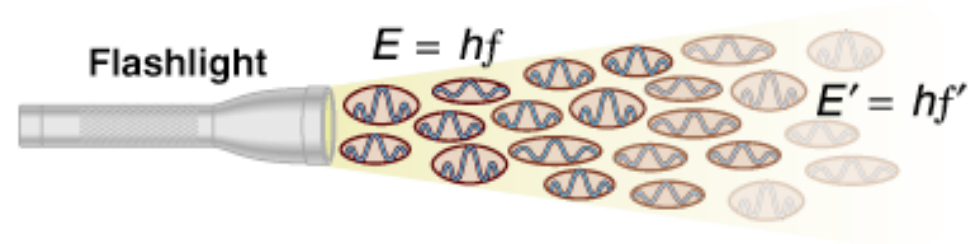
Longueur d'onde de Compton

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

La Lumière comme une Particule

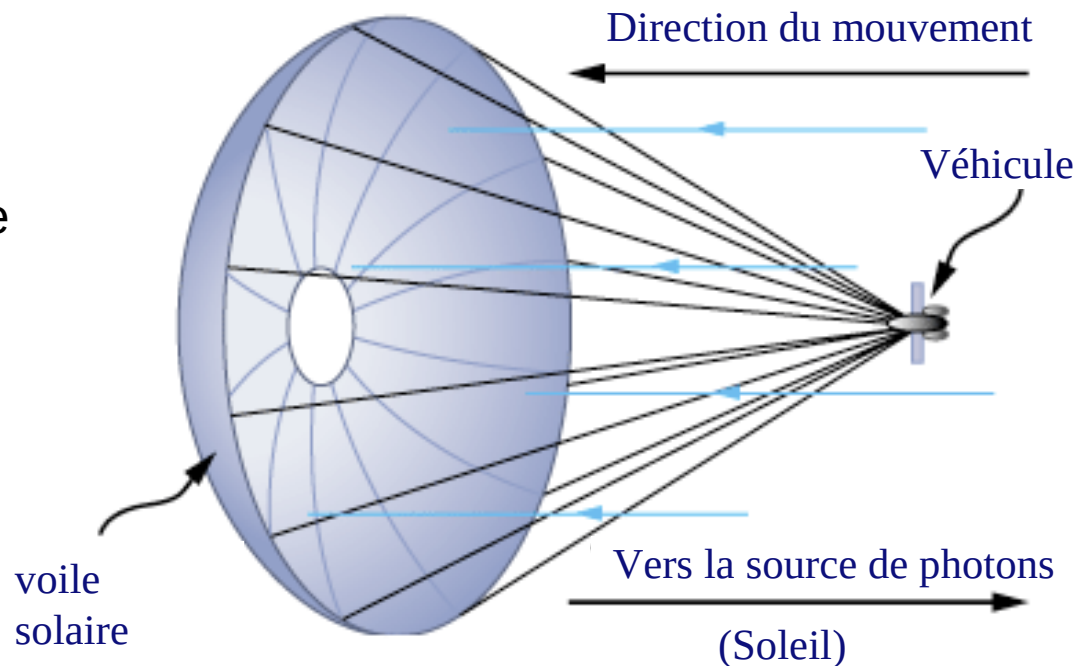
La mise en évidence de la nature discontinue des échanges d'énergie et son interprétation révèle, en tant que conséquence, l'aspect corpusculaire de la lumière.

Toute lumière est une succession de quanta d'énergie appelés photons (particules), représentés dans l'espace temps par des paquets d'ondes



En plus d'une énergie $E = h\nu$, les photons sont dotés d'une impulsion, grandeur vectorielle dont la norme est donnée par

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}$$



Dualité Onde Particule

Hypothèse ondulatoire de L. De Broglie (1923)

Conciliation de l'aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière
combinaison des équations d'Einstein (relativité) et de Planck (quanta)

$$\begin{array}{ccccc} E = p c & \longrightarrow & pc = h \nu & \longleftarrow & E = h \nu \\ & & \Downarrow & \longleftarrow & \lambda = \frac{c}{\nu} \\ & & \lambda = \frac{h}{p} & & \end{array}$$

Généralisation du concept aux particules matérielles

À toute particule d'impulsion $p = mv$, on associe une onde

longueur d'onde

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

Dualité Onde Particule

$$\text{impulsion} \propto \frac{1}{\text{longueur d'onde}}$$

Propriété associée à la **particule** Propriété associée à l'**onde**

Toutes les entités présentent les deux caractères indissociables de **particule** et d'**onde**.

Ces caractères ne sont manifestes qu'à l'échelle microscopique



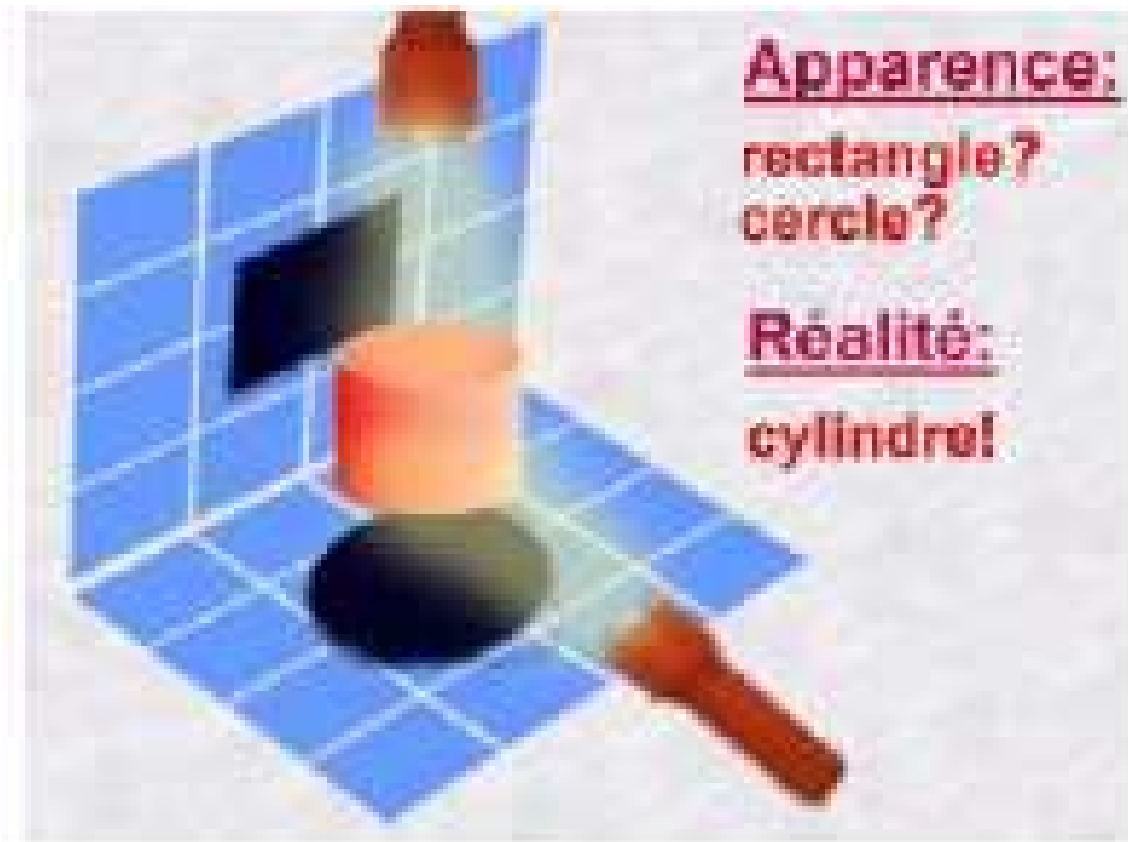
Une **particule** quand elle interagit avec la matière



Une **onde** quand elle se propage dans la matière comme dans le vide

Dualité Onde Particule

Illustration de la dualité onde particule

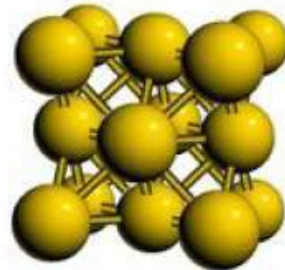
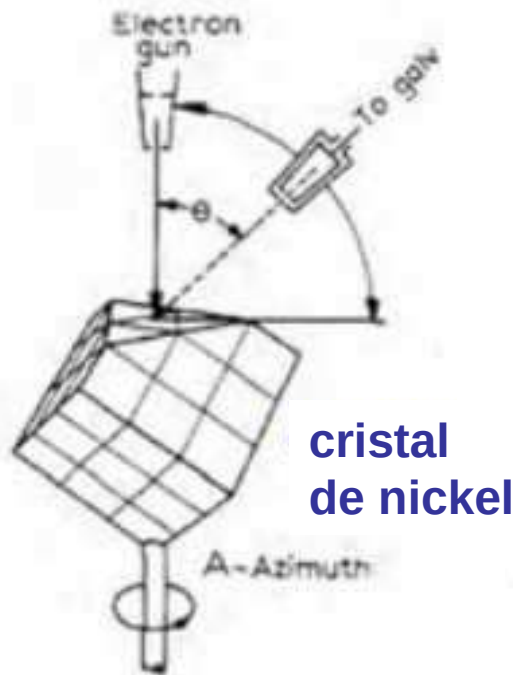


La Matière comme une Onde

Expérience de Davisson et Germer (1927)

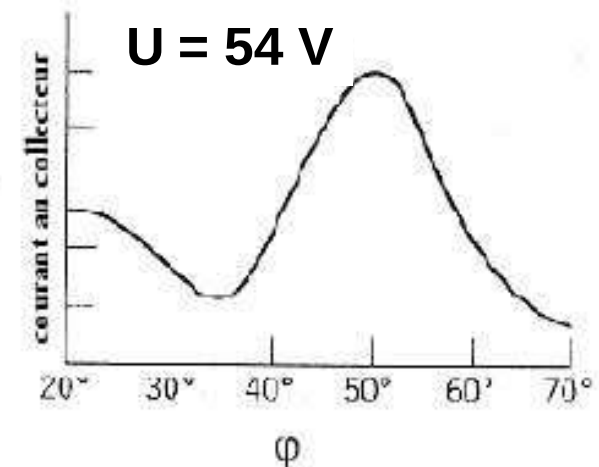
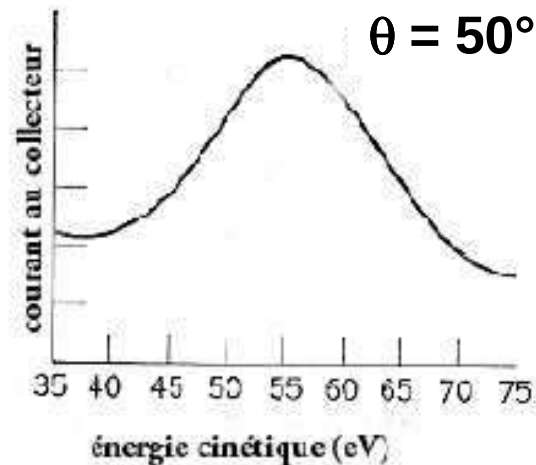
Première vérification expérimentale de l'hypothèse ondulatoire de De Broglie

Electrons diffractés par un cristal de nickel

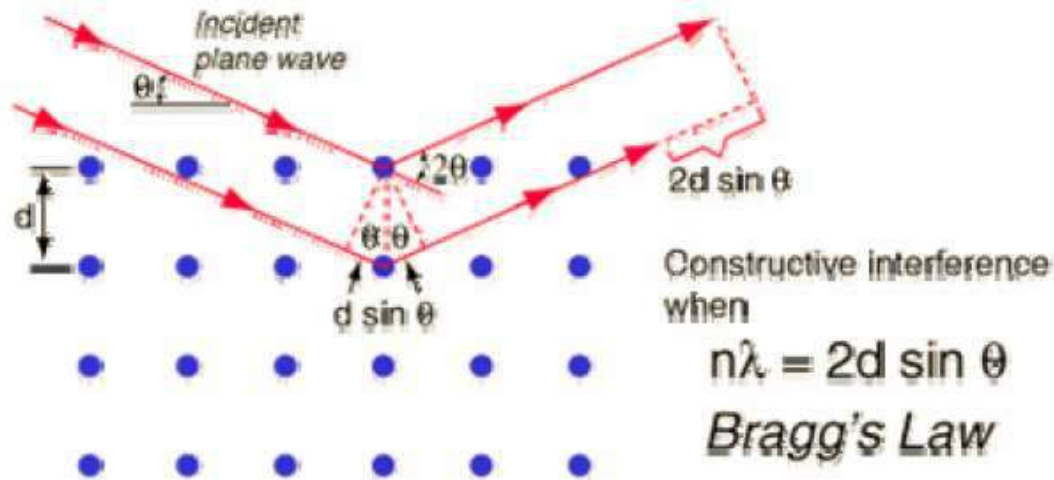


Les électrons diffusés par un cristal sont réfléchis selon des directions privilégiées.

=> **comportement ondulatoire**

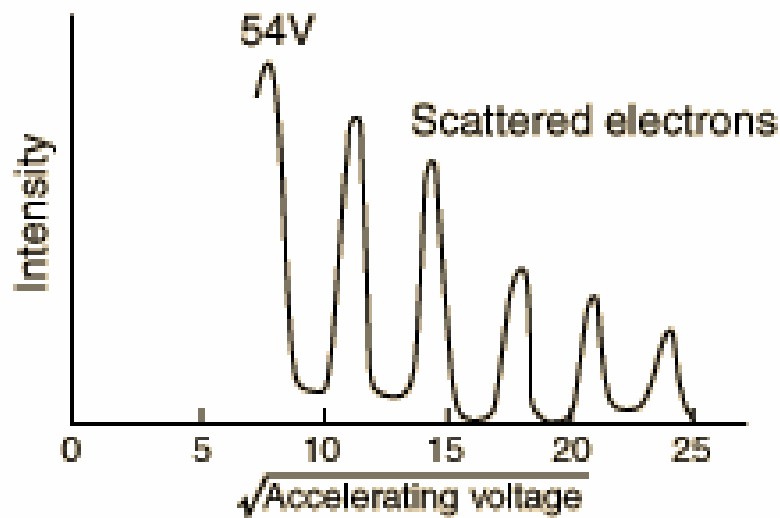


La Matière comme une Onde



Interprétation :
Combinaison loi de Bragg et
longueur d'onde de De Broglie

$$\frac{n}{2d \sin \theta} = \frac{p}{h}$$



Les pics indiquent un comportement ondulatoire pour les électrons et peuvent être interprétés par la loi de Bragg (connue pour la diffraction des rayons X).

La Matière comme une Onde

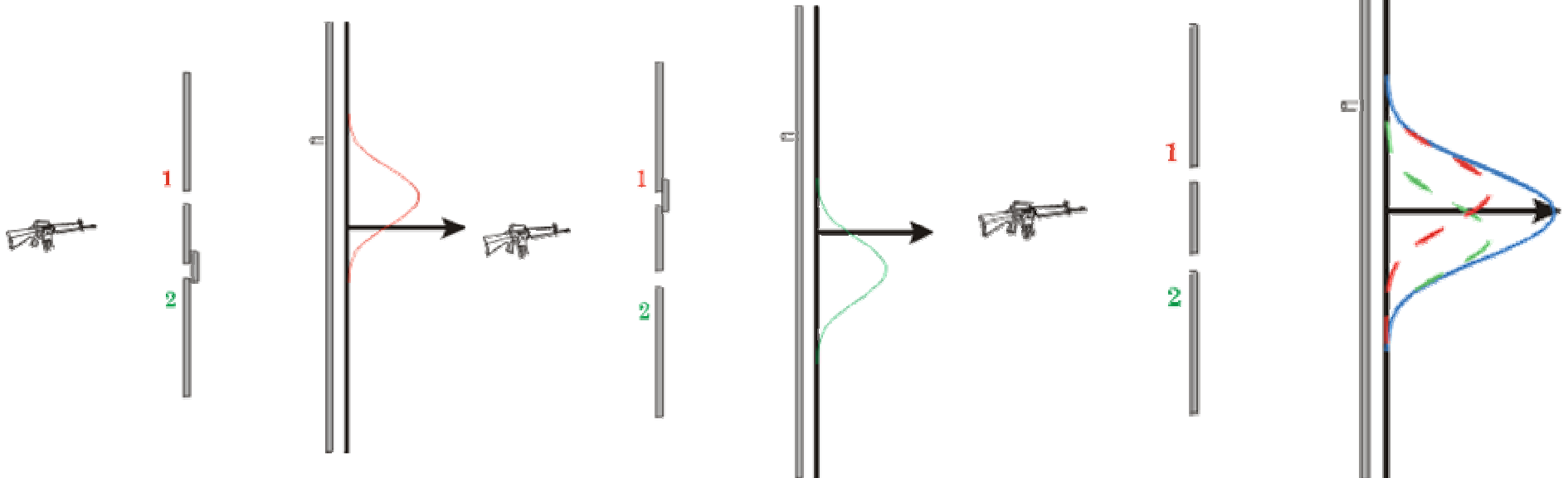
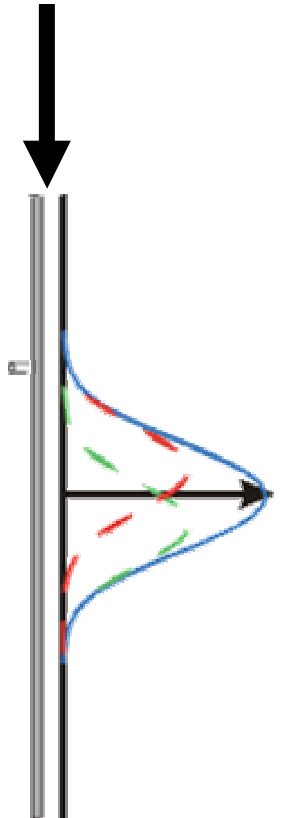
Expérience d'interférences avec deux fentes
et une source de particules matérielles

Comportement classique pour des particules macroscopiques

Le tireur fou !!

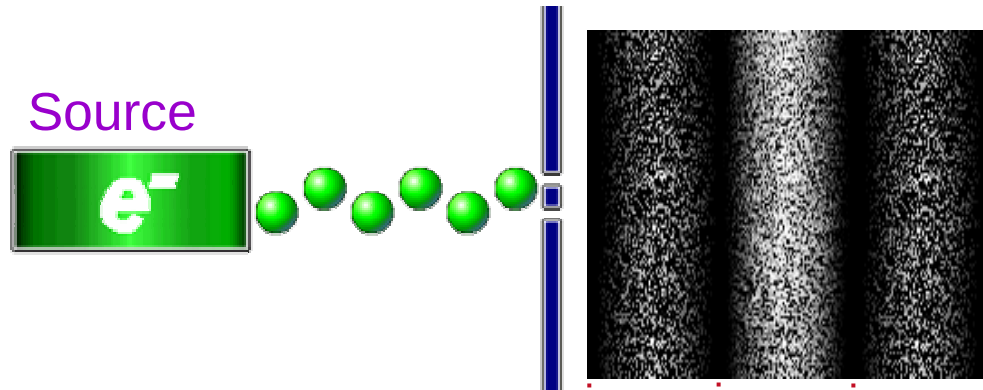


Pas d'interférence

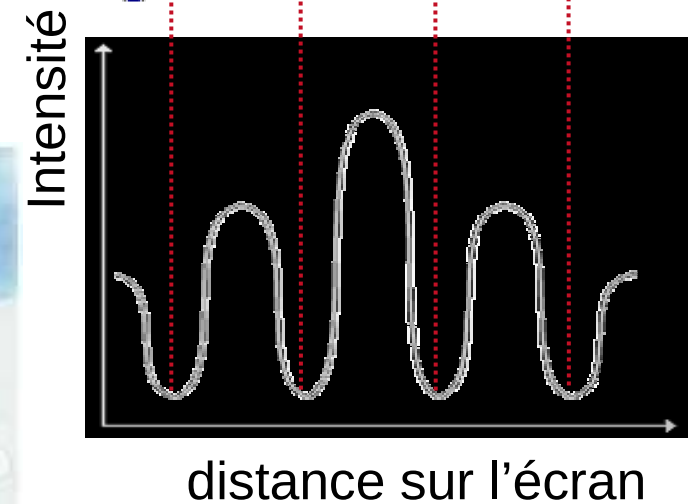
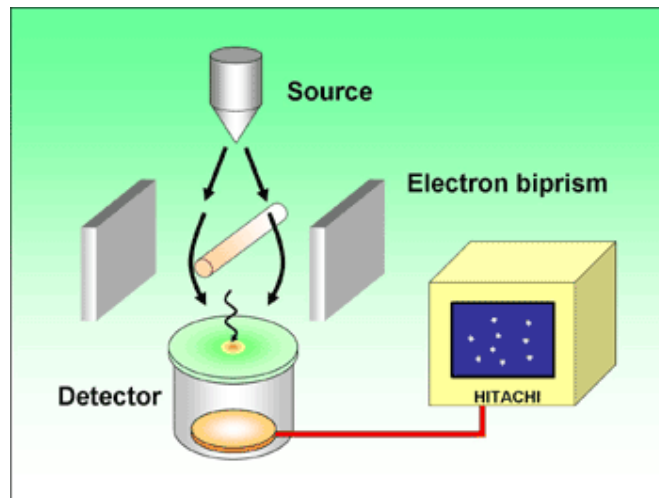


La Matière comme une Onde

Expérience d'interférences
électronique avec deux fentes

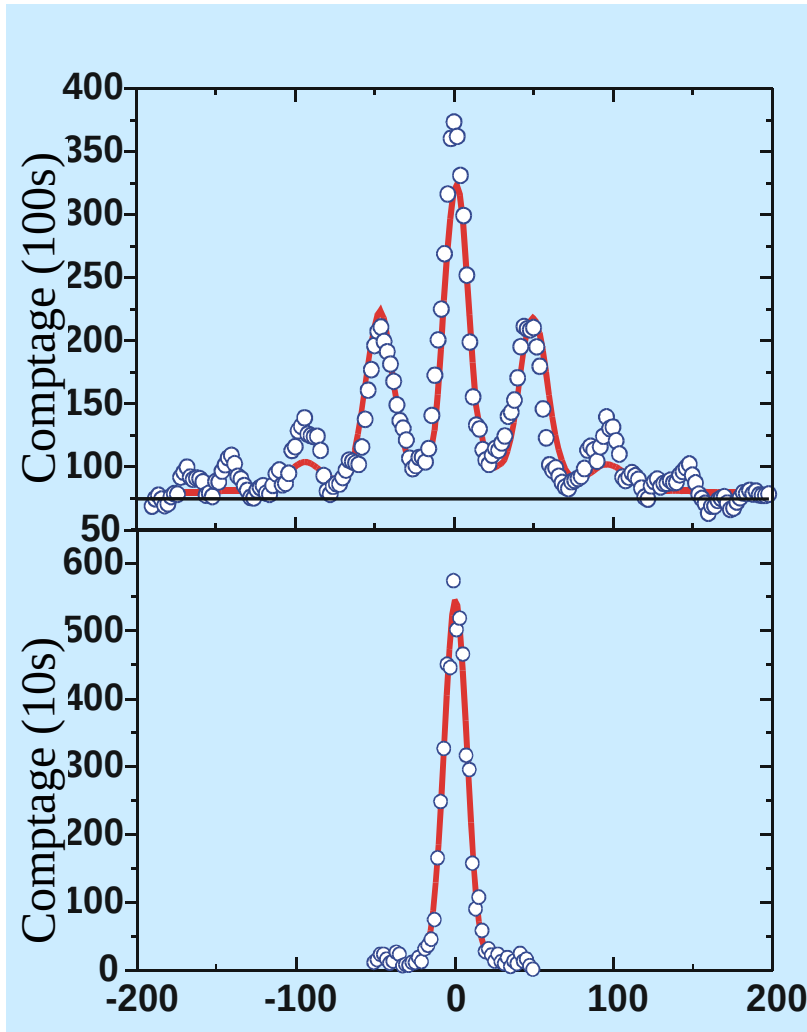


dispositif expérimental
plus réaliste



La Matière comme une Onde

Plus gros objet diffracté (1999) : Molécule de fullerène C_{60}

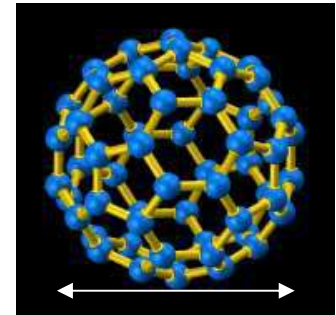


M. Arndt, O. Nairz, J. Voss-Andreae, C. Keller, G. Van der Zouw, A. Zeilinger

Wave-particle duality of C_{60} molecules

Nature 401, (1999) 680-682.

The molecular beam is extracted from an oven at a velocity of approx. 210 m/s, which corresponds to a **de Broglie wavelength** of only **2.5 pm** (pm = 10^{-12} m, or one billionth mm). The used gratings are made from silicon nitride, which has **slits of 50 nm width and pitch of 100 nm** (nm = 10^{-9} m). It is quite difficult to manufacture such a fine structured grating that matches the short wavelength. The distances between the slits are still 40.000 times larger than the wavelength of the molecular beam. At this extreme ratio of the wavelength to the lattice size we find that the angle between the center and the **1st diffraction maximum** is only **$1.4 \cdot 10^{-3}$ degrees**, which corresponds to only 0.03 mm at a distance of 1.25 m on the detection plane.



0,71 nm



Processus quantiques aléatoires

Que se passe-t-il si on diminue l'intensité du faisceau d'électrons jusqu'à ce que les électrons passent un par un ?

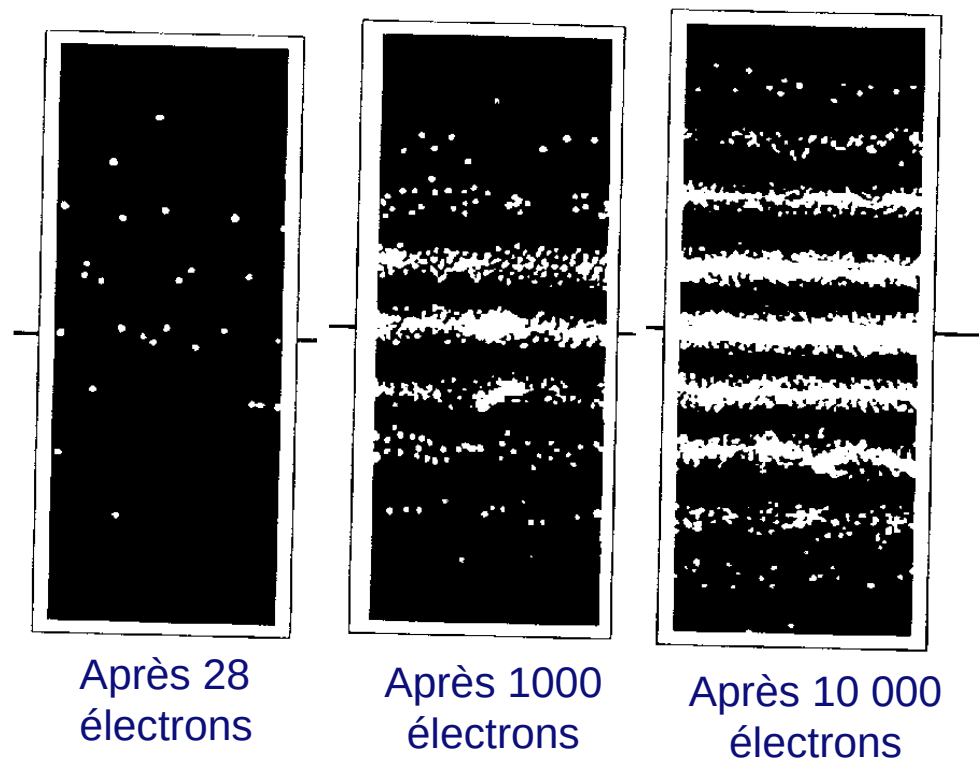


durée totale d'acquisition : environ 30 minutes

Processus quantiques aléatoires

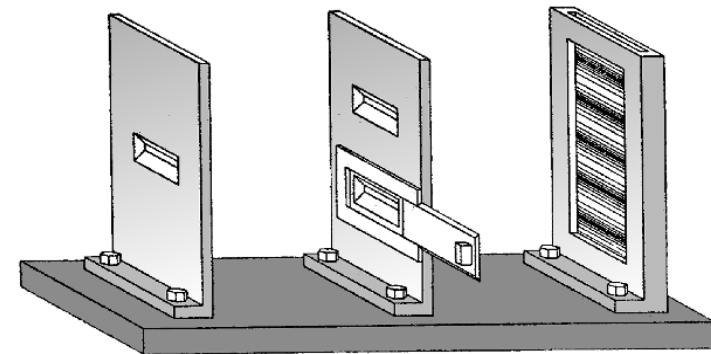
Expérience dans laquelle les électrons sont envoyés **un par un**.

Le caractère ondulatoire qui définit les figures d'interférences est conservé.



La figure d'interférence obtenue n'apparaît qu'en présence des 2 fentes.

La répartition des électrons obtenue en utilisant une seule fente est semblable à celle obtenue avec des particules macroscopiques.

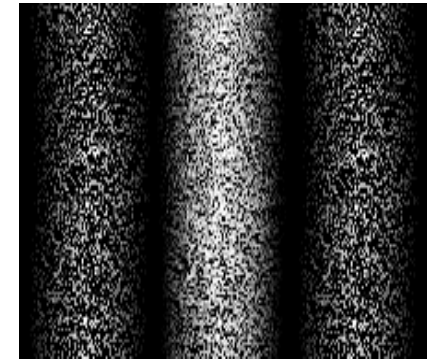
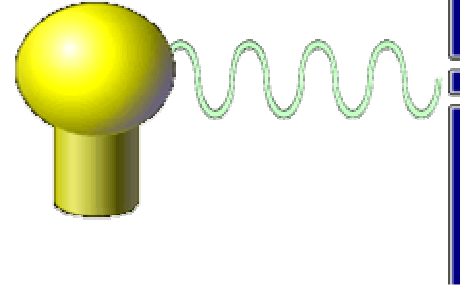


Remarque importante : si on cherche à savoir par quelle fente les électrons sont passés, la figure d'interférence est détruite, ceci quel que soit le moyen utilisé pour satisfaire sa curiosité.

Processus quantiques aléatoires

Expérience dans laquelle les **photons** sont envoyés **un par un**.

Le caractère ondulatoire qui définit les figures d'interférences est conservé.



Temps d'exposition

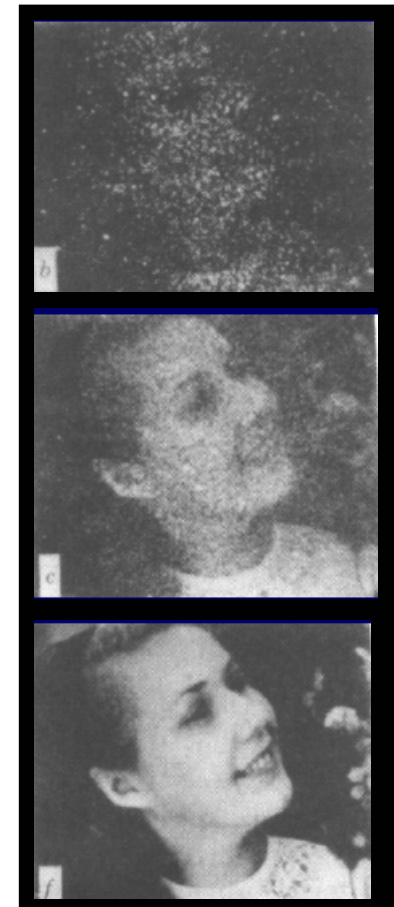
nature ondulatoire de la lumière :

détermine la **probabilité** qu'un photon atteigne un certain endroit de l'écran, cet endroit ne peut être déterminé précisément a priori.

nature particulaire de la lumière:

traduit le caractère événementiel localisé dans l'espace-temps de la présence du photon sur l'écran.

Temps d'exposition



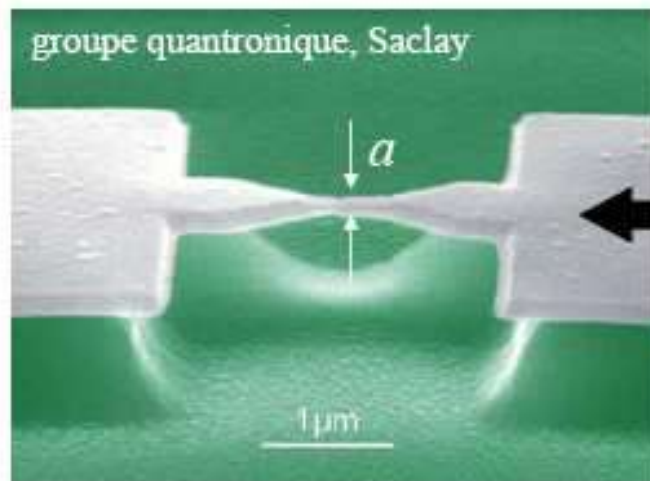
Critère de
« quantité »

Les concepts classiques cessent de s'appliquer quand :

action caractéristique $<$ constante de Planck h

$$\text{action} = \text{longueur caractéristique} \times \text{impulsion caractéristique}$$

Exemple : Conduction d'électrons par un fil



Pont d'aluminium déposé sur un isolant

électron d'impulsion p

action caractéristique : pa
à comparer à la cte. de Planck : h

Description quantique en terme d'onde plane de longueur d'onde

$$\lambda = h/p \quad \text{(de Broglie)}$$

Les phénomènes non classiques (diffraction) seront dominants si :

$$\lambda = h/p > a \implies h > pa$$

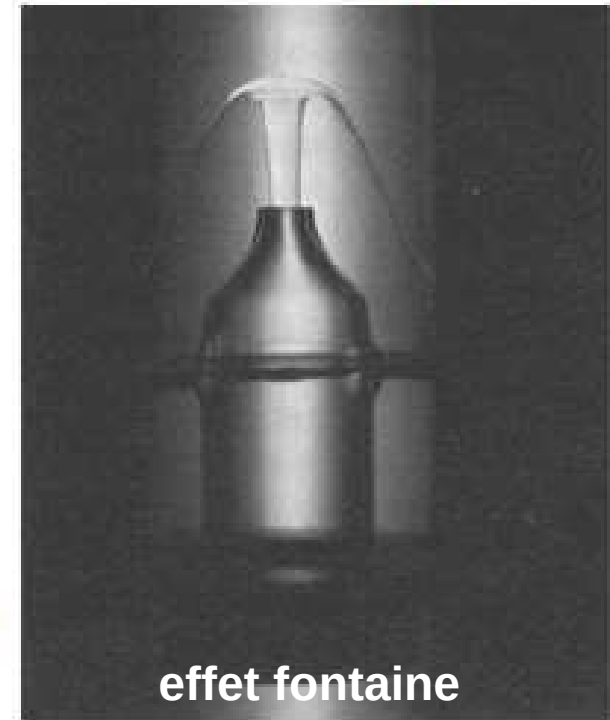
Critère de « quanticité »

Ordres de grandeur ($h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$)

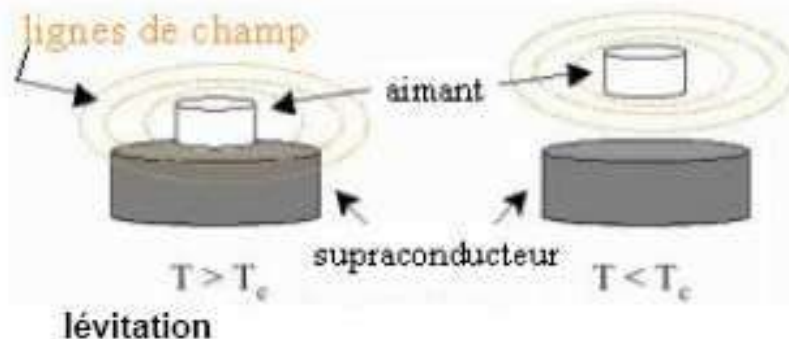
Système considéré	Masse (kg)	Vitesse (m/s)	Taille de l'ouverture (m)	$p a / h$
Homme passant une porte	70	1	1	10^{35}
Globule rouge dans un capillaire	10^{-16}	10^{-1}	10^{-4}	10^{12}
Electron dans un fil étroit	$9 \cdot 10^{-31}$	10^6	10^{-9}	1,36

La physique quantique peut également être macroscopique

Superfluidité de l'hélium liquide
à basse température ($T < 2.3 \text{ K}$)



Supraconductivité de certains métaux
à basse température



Caractère quantique marqué si
distance entre voisins $< \lambda_{\text{De Broglie}}$

Quantification de l'énergie dans l'atome

Les différents modèles atomiques

La découverte du noyau (Rutherford)

Le modèle planétaire de Bohr et la quantification de l'énergie

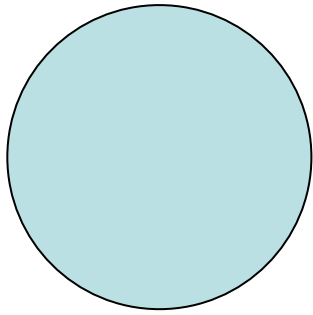
Confirmation expérimentale (Frank et Hertz)

Spectres atomiques

Atomes et nombres quantiques

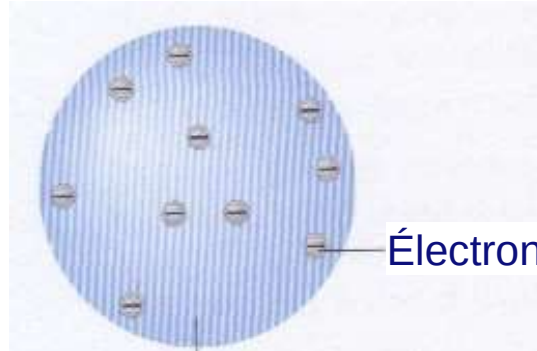
Structures Atomiques

Modèles structuraux de l'Atome à travers les âges



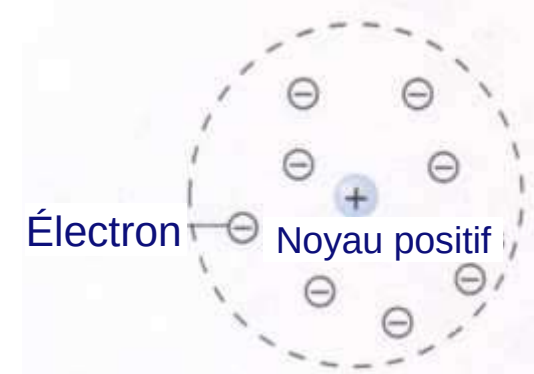
Modèle Ponctuel
d'Aristote

atomos = indivisible

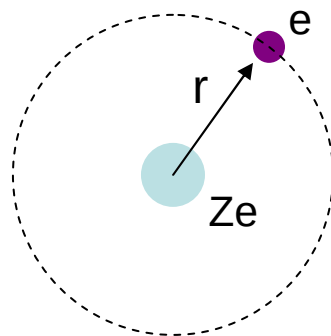


Matière chargée
positivement

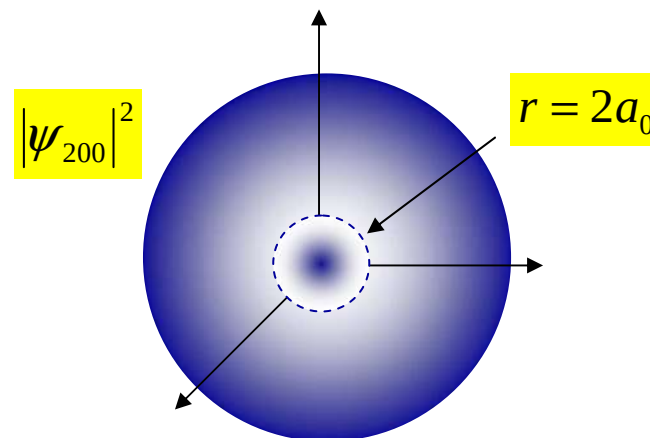
Modèle « Plumb Pudding »
de Thomson



Modèle « Noyau Ponctuel »
de Rutherford



Modèle Planétaire
de Bohr



Modèle Probabiliste de la
Mécanique Quantique

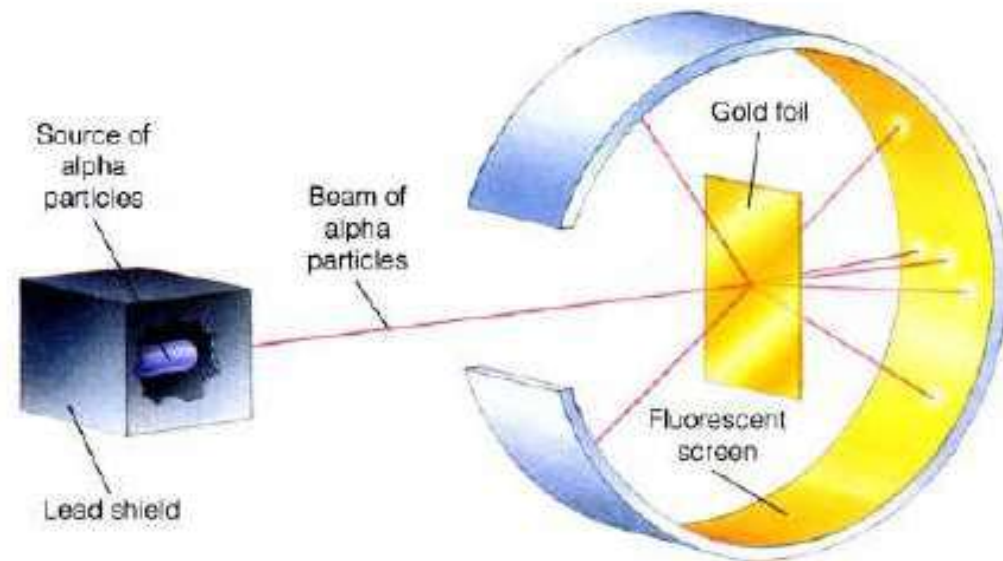
Modèle « Noyau Ponctuel » de Rutherford (1907)

Diffusion de particules α

(charge $+2e$) par une feuille d'or

La plupart des particules passent au travers sans être déviées.

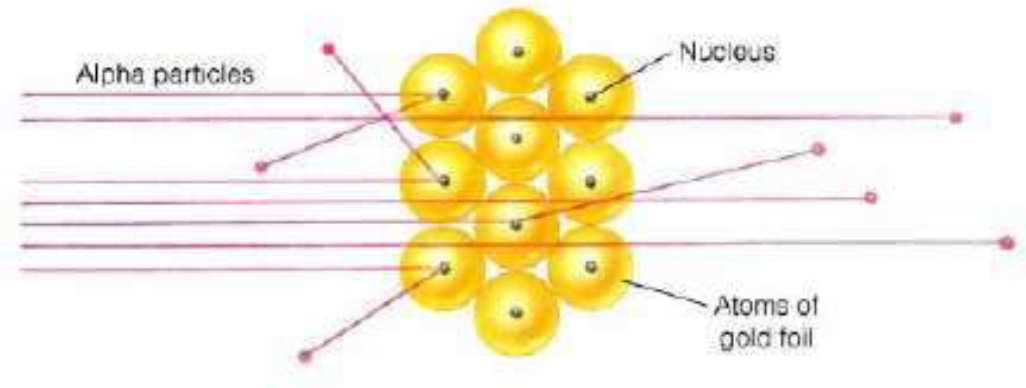
Certaines sont déviées sous un grand angle (voire rétrodiffusées).



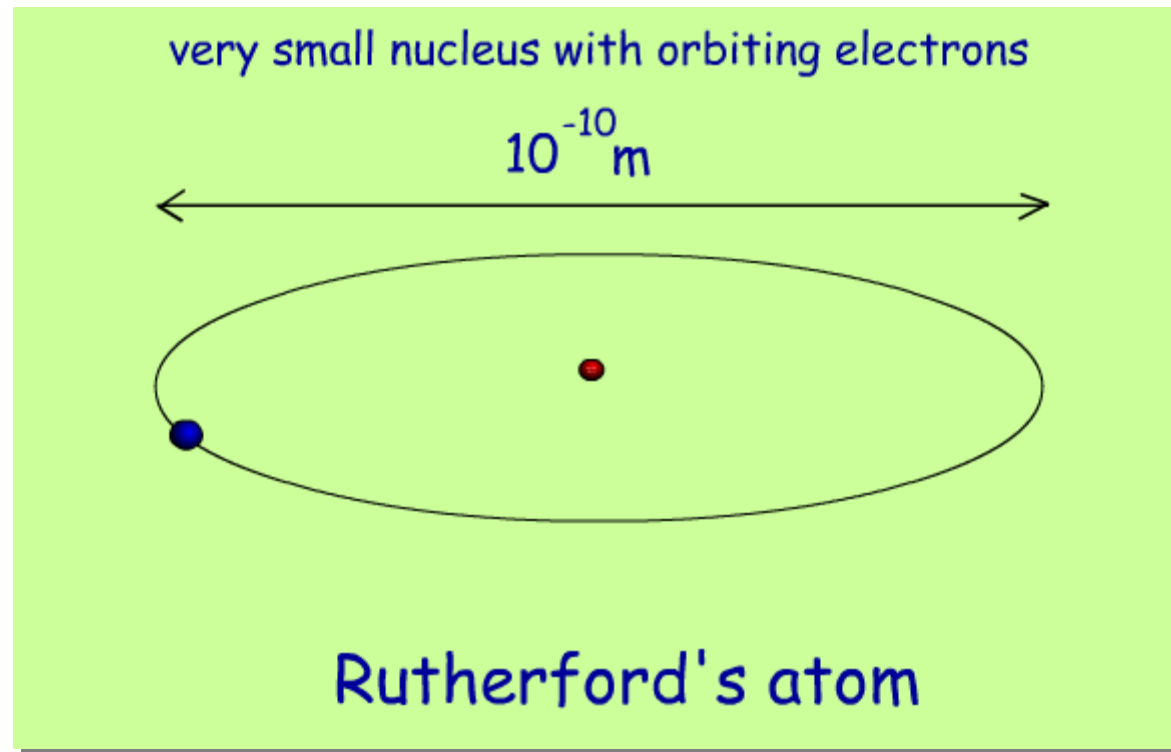
Interprétation :

les atomes ont une charge positive de petite dimension, 100 000 x plus petite que l'atome (noyaux)

(découverte ultérieure : les charges positives sont portées par les protons)



Insuffisances du modèle de Rutherford



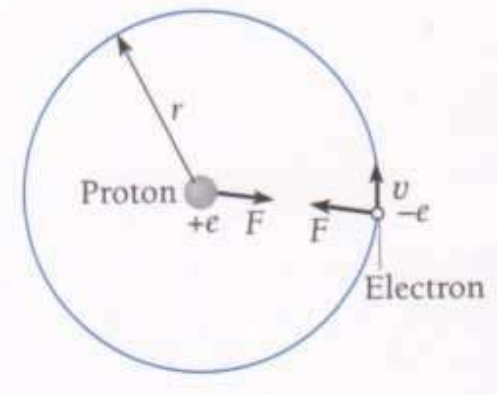
Modèle « Planétaire » de Bohr

Premier postulat

Les atomes peuvent avoir différentes orbites électroniques à partir desquelles aucune radiation ne sera émise, malgré le mouvement non rectiligne uniforme des électrons.

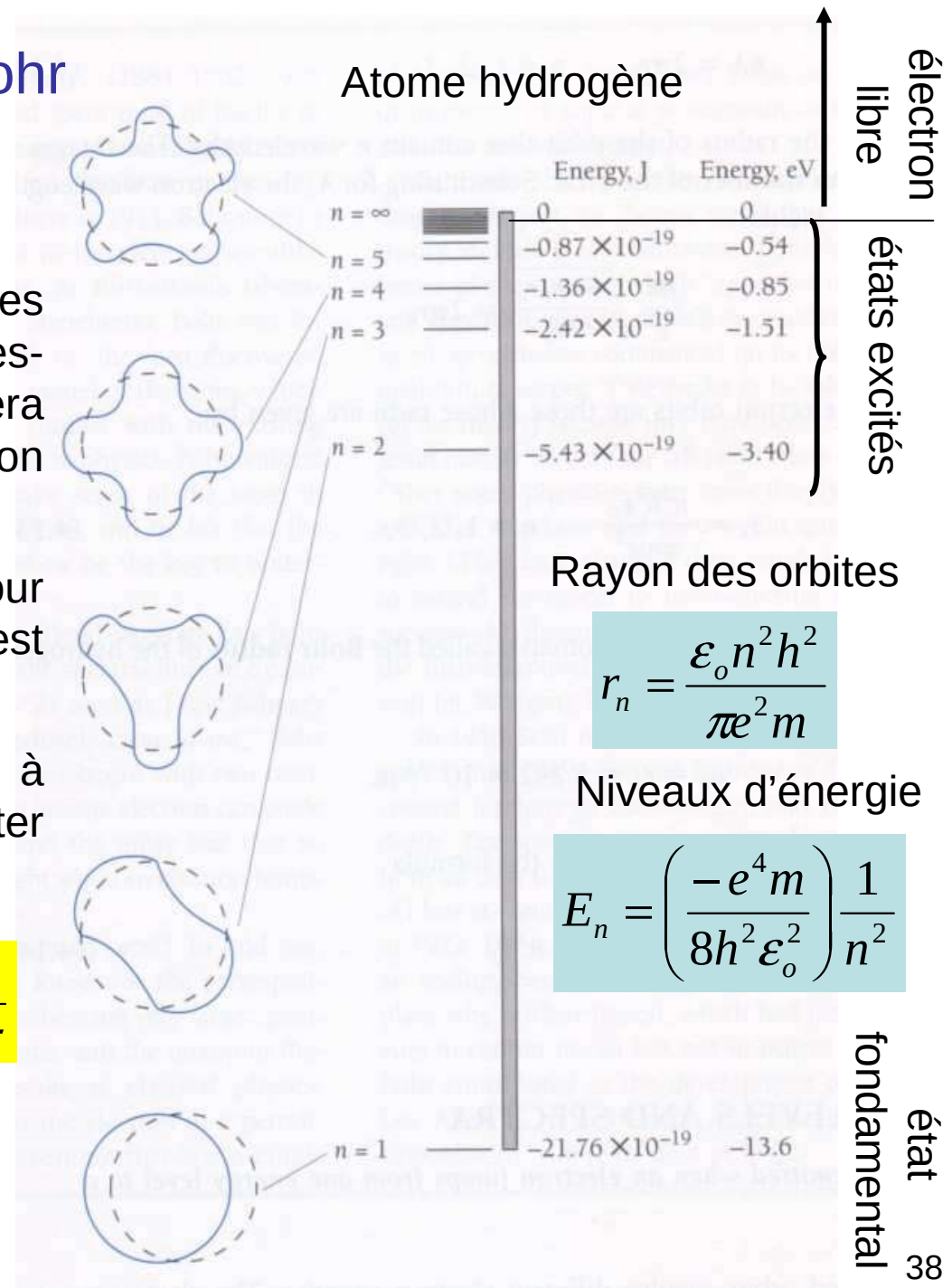
Orbites = états stationnaires pour lesquels le moment cinétique est quantifié $L = n \times (h/2\pi)$ n entier.

Les électrons passent d'une orbite à une autre, mais ne peuvent exister entre deux de ces états.



$$L = pr = n \frac{h}{2\pi}$$

$$p = n \frac{h}{2\pi r}$$



Modèle « Planétaire » de Bohr

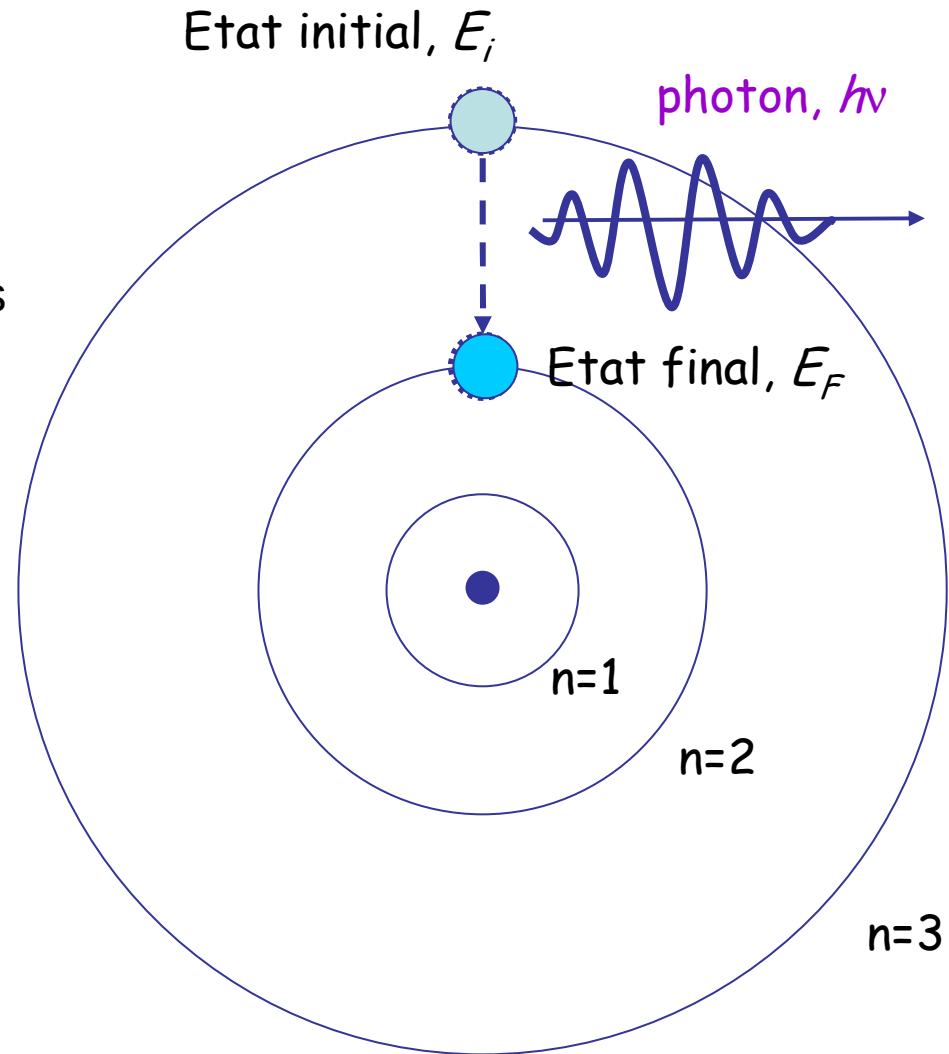
Deuxième postulat

Les transitions d'un électron entre deux états stationnaires expliquent les phénomènes d'absorption et d'émission de radiations électromagnétiques.

La fréquence d'émission ν est quantifiée formule de Planck/Einstein

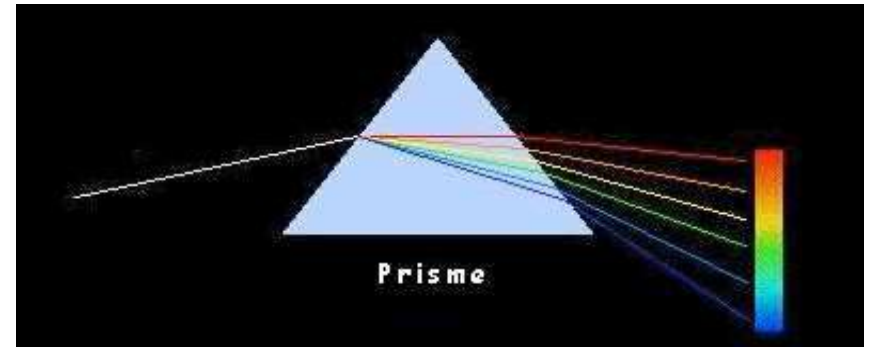
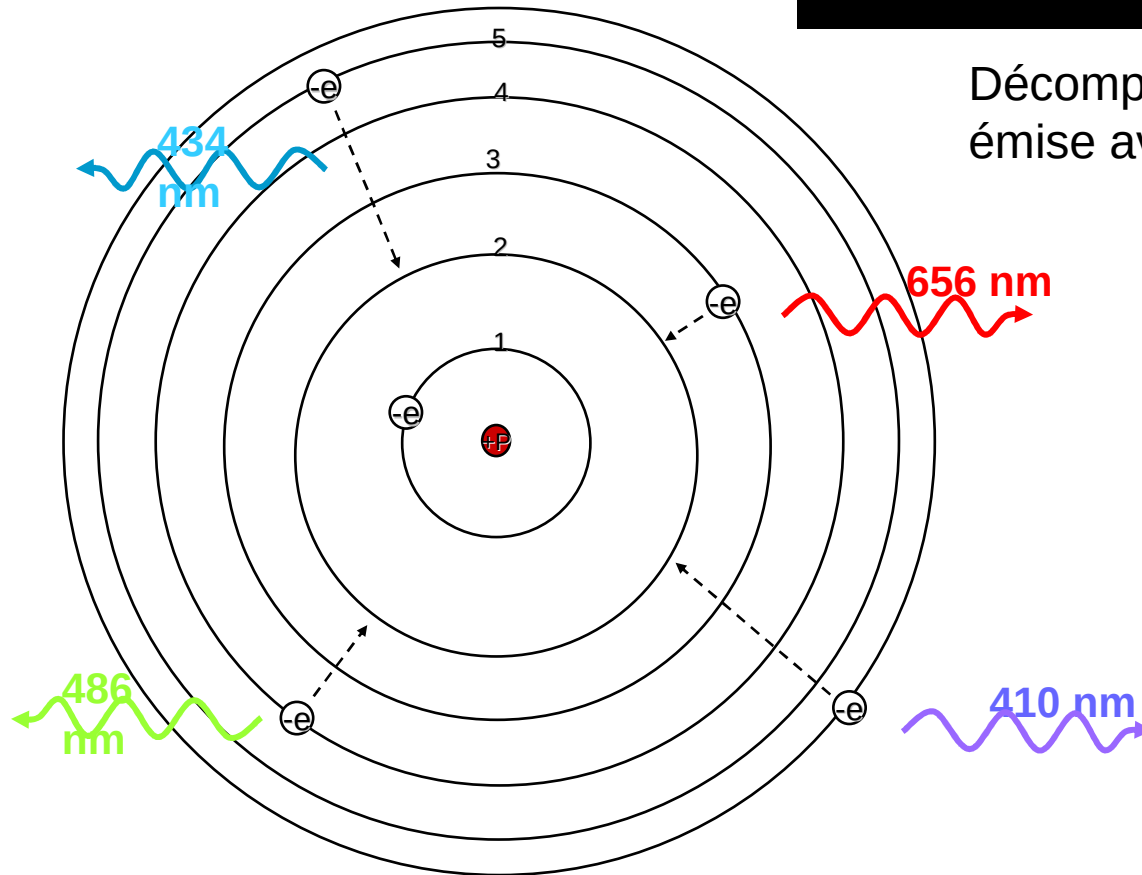
$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f$$

E_i et E_f : énergies des états stationnaires initial et final.



Spectres Atomiques

Atome Hydrogène



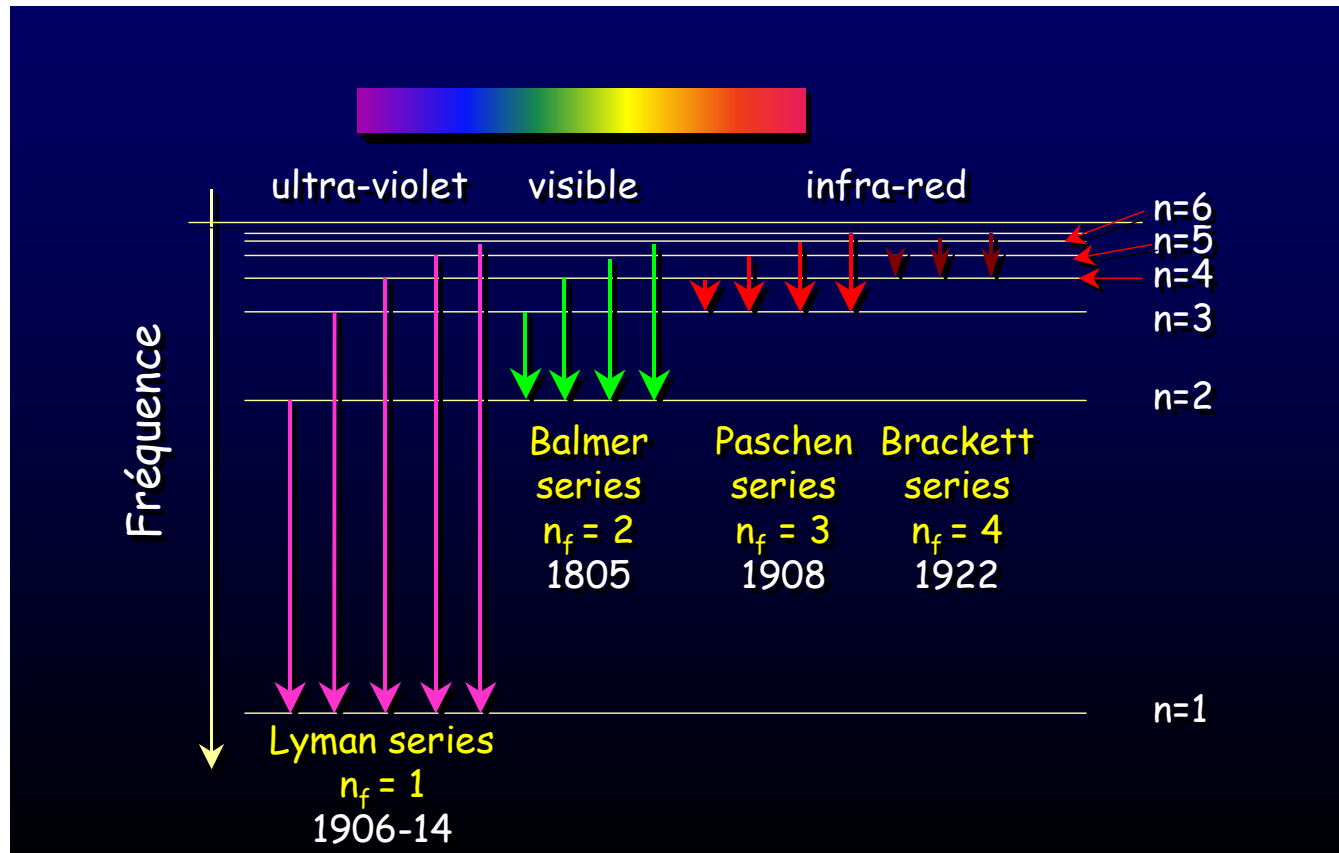
Décomposition de la lumière
émise avec un prisme

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_0}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) ; n_1 < n_2$$



Spectres Atomiques

Toutes les raies prédites par le modèle quantique de l'atome ont été observées



L'idée de Niels Bohr est donc validée !

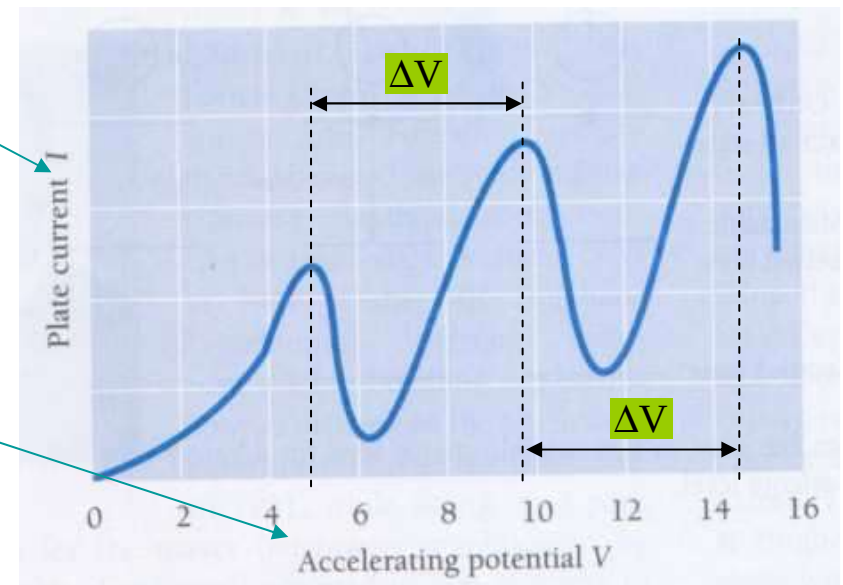
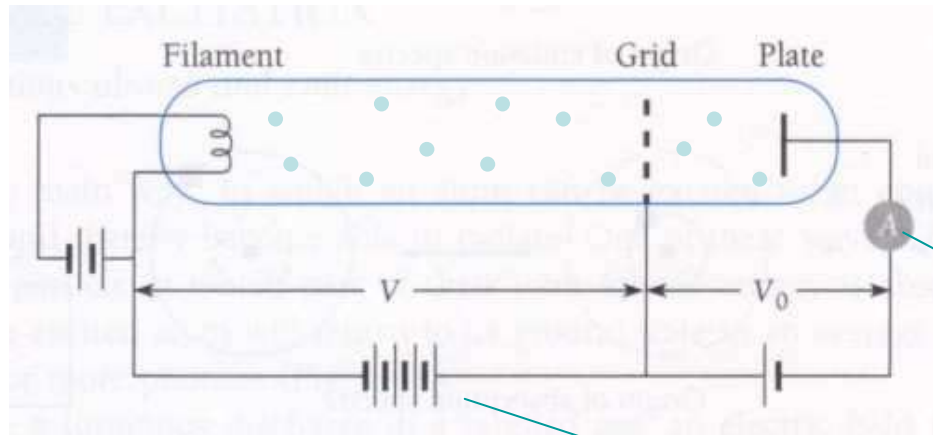
L'étude des spectres confirme que les électrons atomiques gagnent et perdent de l'énergie par sauts entre orbites, chaque orbite correspondant à un niveau d'énergie

On définit **n : nombre quantique principal**

Preuve de la quantification de l'énergie dans l'atome

Expérience de Franck-Hertz (1914)

La quantification de la diffusion inélastique des électrons dans une vapeur de mercure conduit à la preuve de la quantification des niveaux d'énergie des atomes.

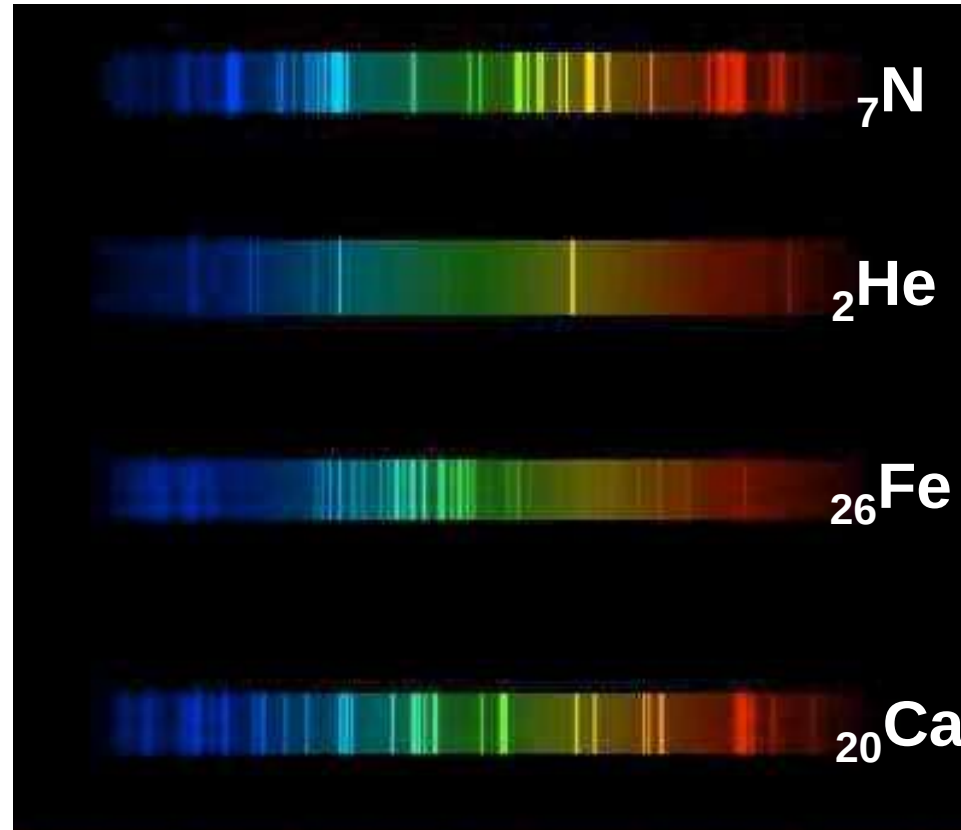


Pour le mercure, les pertes d'énergie des électrons doivent être des multiples de 4,9 eV. Le courant d'anode présente une structure de pics espacés d'environ 4,9 eV, correspondant à des électrons émis par le filament, accélérés par la grille et qui ont interagi une fois, deux fois... avec les atomes de mercure avant d'atteindre l'anode.

De plus, les atomes de mercure émettent de la lumière à 253,5 nm, radiation connue dans le spectre d'émission de l'élément.

Spectres Atomiques et nombres quantiques

Chaque atome a une signature électronique qui lui est propre et qui est caractéristique des sauts que ses électrons peuvent effectuer !



Les spectres obtenus pour les édifices poly-électroniques ne peuvent pas s'interpréter avec un modèle ne faisant intervenir qu'un seul nombre quantique.

Les nombres quantiques

Un 2^{ème} nombre quantique doit être introduit

Pour chaque valeur du nombre quantique principal, donc **pour chaque orbite, il y a plusieurs formes possibles**. Ce qui correspond à des sous-niveaux d'énergie.

Pour en tenir compte, il faut introduire un 2^{ème} nombre quantique, le nombre ℓ , **nombre quantique de moment cinétique orbital**.

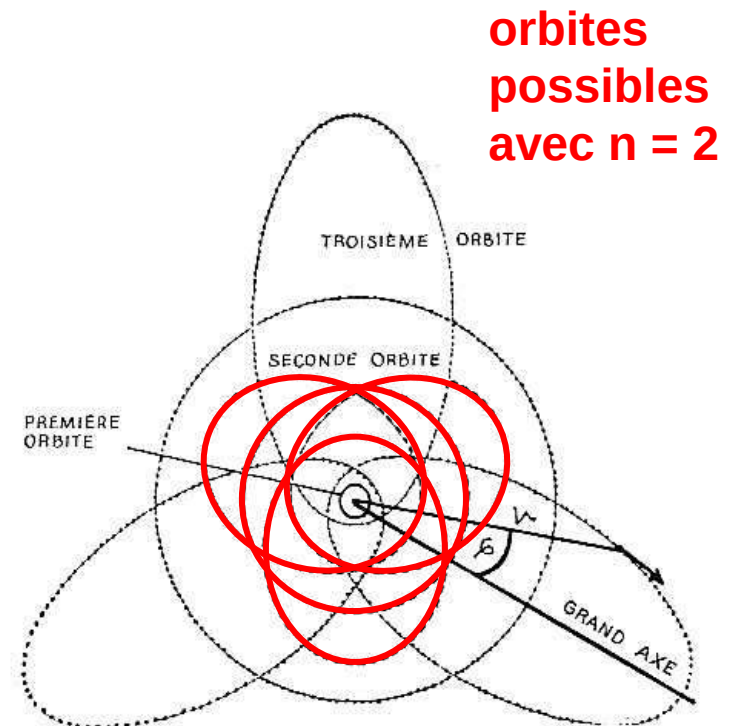
Ce nombre ℓ doit respecter la règle suivante :

ℓ peut varier de 0 jusqu'à $n-1$

(avec n le nombre quantique principal)

Exemple:

si le nombre quantique principal n vaut 3
alors ℓ peut prendre les valeurs 0, 1 et 2.



Les nombres quantiques

Puis un 3^{ème} nombre quantique est introduit

En 1896, P. Zeeman constate une anomalie dans le spectre émis par la vapeur du sodium, **anomalie qui se produit en présence d'un champ magnétique seulement.**

→ effet Zeeman.

Cette anomalie se manifeste par l'apparition de **raies supplémentaires dans le spectre.**

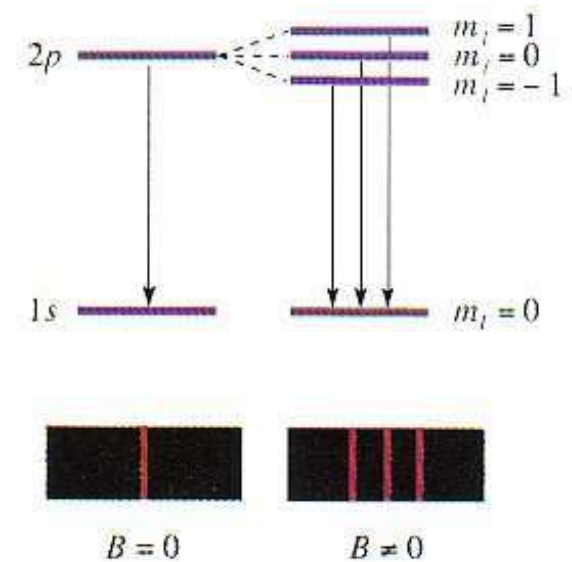
raies supplémentaires dans le spectre de la lumière

=> **niveaux intermédiaires d'énergie supplémentaires pour les électrons qui émettent ces photons !**

Pour tenir compte de cet effet, il faut introduire un 3^{ème} nombre quantique, le nombre ***m***, **nombre quantique magnétique orbital.**

L'étude des spectres montre que ce nombre doit respecter la règle suivante: ***m* peut varier de $-\ell$ à $+\ell$**

Exemple: si $\ell = 2$ alors ***m*** peut prendre les valeurs: $-2, -1, 0, +1, +2$



Les nombres quantiques

Enfin, il faut introduire la notion de spin !

En étudiant l'effet Zeeman (sous champ magnétique), on trouva en 1897 que **les raies du sodium se séparent en un ensemble de raies encore plus compliqué que celles de l'effet Zeeman.** → **effet Zeeman anormal**

2 niveaux intermédiaires d'énergie supplémentaires : $\pm 1/2 (h/2\pi) \nu$

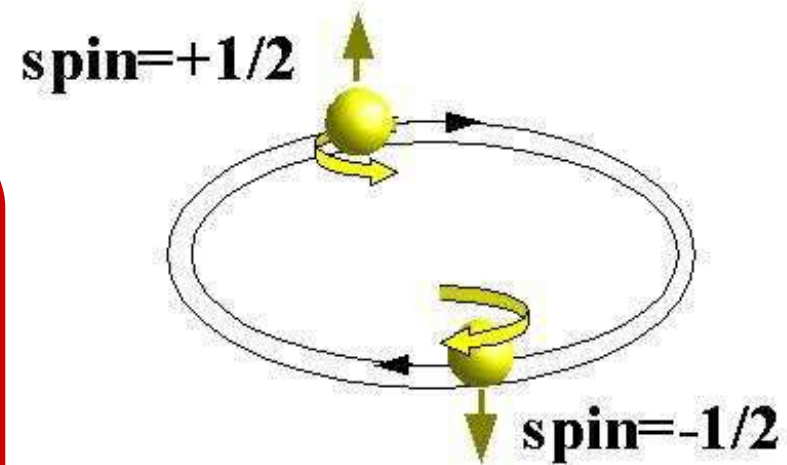
Pour en tenir compte, il faut introduire l'idée que l'électron est porteur d'un moment magnétique, appelé le **SPIN** (G. Uhlenbeck, S. Goudsmit 1925)

Le SPIN s est le quatrième nombre quantique.

2 valeurs possibles : $-1/2$ et $+1/2$

Les niveaux d'énergie des électrons atomiques peuvent être définis avec 4 nombres :

n, ℓ, m, s



L'atome quantique

Principe d'exclusion de W. Pauli (1924)

Rappel:

Dans un atome neutre, il y a donc autant d'électrons autour du noyau que de protons dans le noyau.

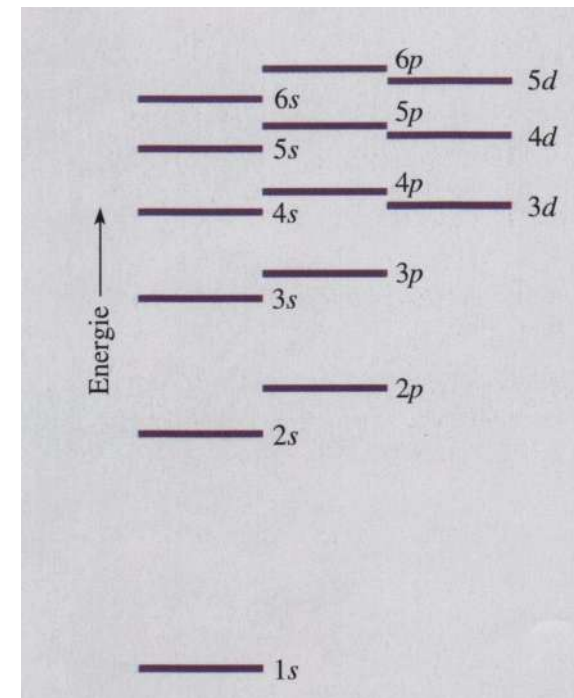
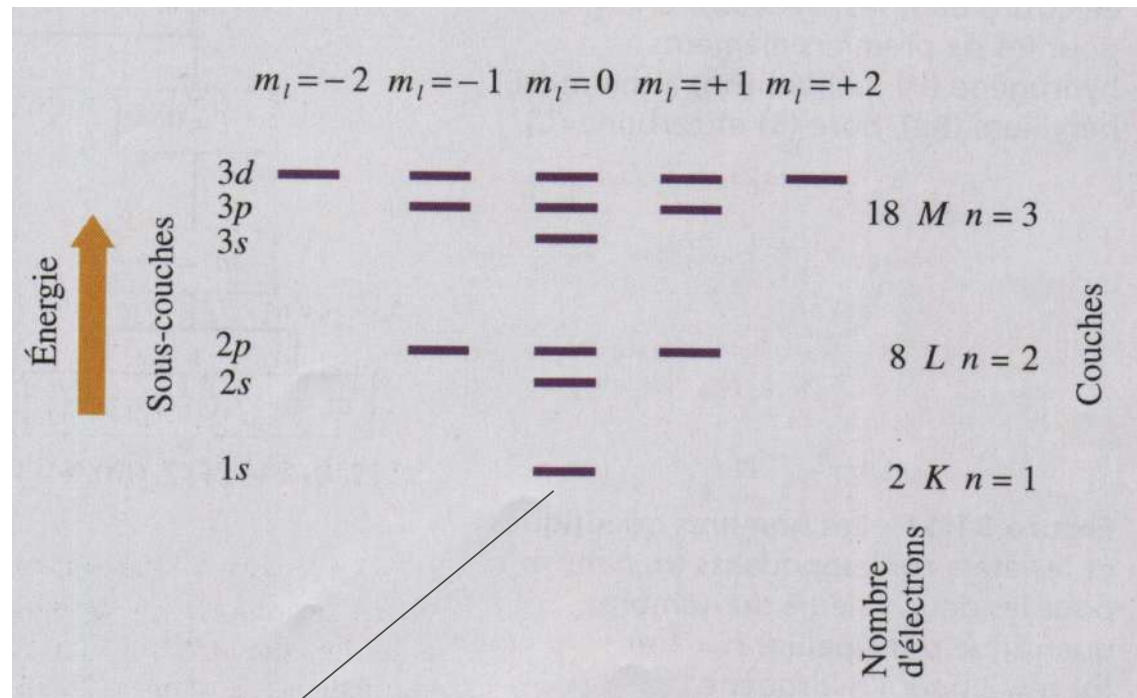
Les électrons peuvent occuper des **niveaux d'énergie** qui sont **définis par 4 nombres** (n , ℓ , m et s).

principe d'exclusion :

Il ne peut y avoir qu'un seul électron par « niveau » (ou état) d'énergie; **c'est-à-dire un seul électron par groupe de valeurs des 4 nombres quantiques.**

L'atome quantique

modèle pour les électrons atomiques



— sur chaque niveau représenté, il ne peut y avoir que 1 ou 2 électrons, s'il y en a 2, alors leur spin sont opposés

En première approximation, les électrons occupent les différents niveaux successivement depuis le niveau d'énergie le plus bas jusqu'au niveau le plus élevé.

L'atome quantique

Répartition des électrons par couche

n	ℓ	m	s	Nombre d'électrons de la sous-couche (n, ℓ)	Nombre d'électrons de la couche (n)
1	0	0	1/2,-1/2	2	2
2	0	0	1/2,-1/2	2	8
2	1	-1,0,+1	1/2,-1/2	6	
3	0	0	1/2,-1/2	2	18
3	1	-1,0,+1	1/2,-1/2	6	
3	2	-2,-1,0,+1,+2	1/2,-1/2	10	
4	...				

L'atome quantique

	IA																	VIIIA
n=1	1 H 1.01																	2 He 4.0
n=2	3 Li 6.94	4 Be 9.01											5 B 10.8	6 C 12.0	7 N 14.0	8 O 16.0	9 F 19.0	10 Ne 20.2
n=3	11 Na 23.0	12 Mg 24.3											13 Al 27.0	14 Si 28.1	15 P 31.0	16 S 32.1	17 Cl 35.5	18 Ar 39.9
n=4	19 K 39.1	20 Ca 40.1	21 Sc 45.0	22 Ti 47.9	23 V 50.9	24 Cr 52.0	25 Mn 54.9	26 Fe 55.8	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.5	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 79.0	35 Br 79.9	36 Kr 83.8
:	37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 95.9	43 Tc 98.9	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	72 Hf 168.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
	87 Fr (223)	88 Ra 226.0	89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (269)	109 Mt (268)	110 (269)	111 (272)	112 (277)		114 (285)		116 (289)		118 (293)

1	Atomic number
H	Symbol
1.01	Atomic weight (rounded value)

58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0
90 Th 232.0	91 Pa (231)	92 U 238.0	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)

() represents an isotope

L'atome quantique

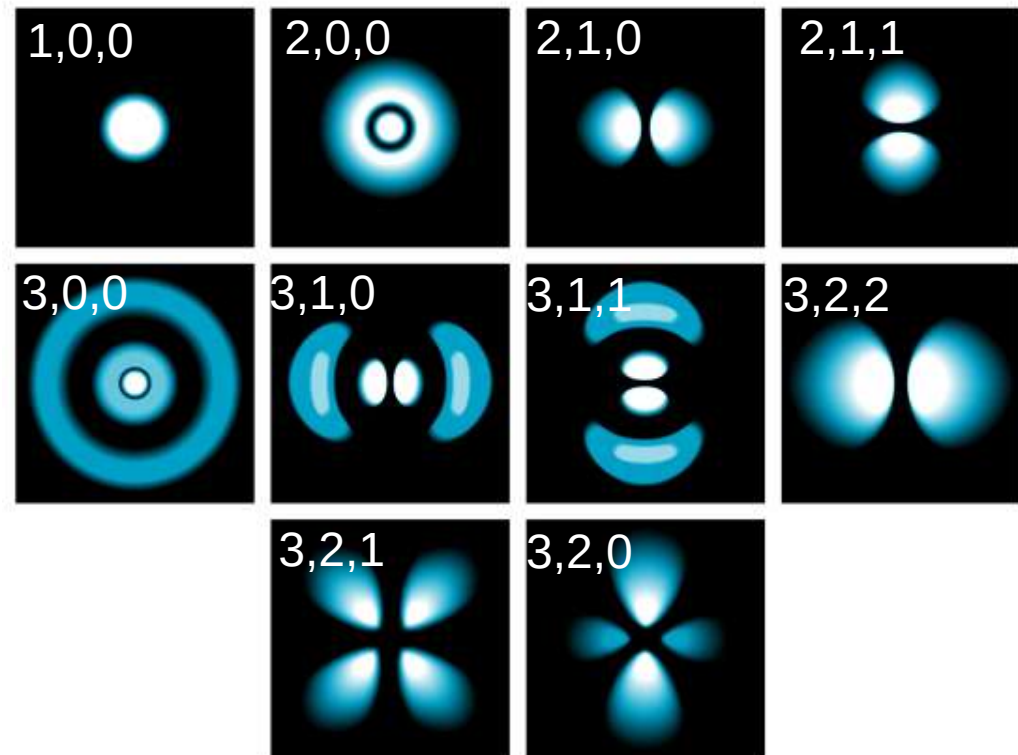
Modèle probabiliste

Les postulats du modèle de Bohr sont en contradiction avec les lois classiques de la physique et ne sont pas justifiables

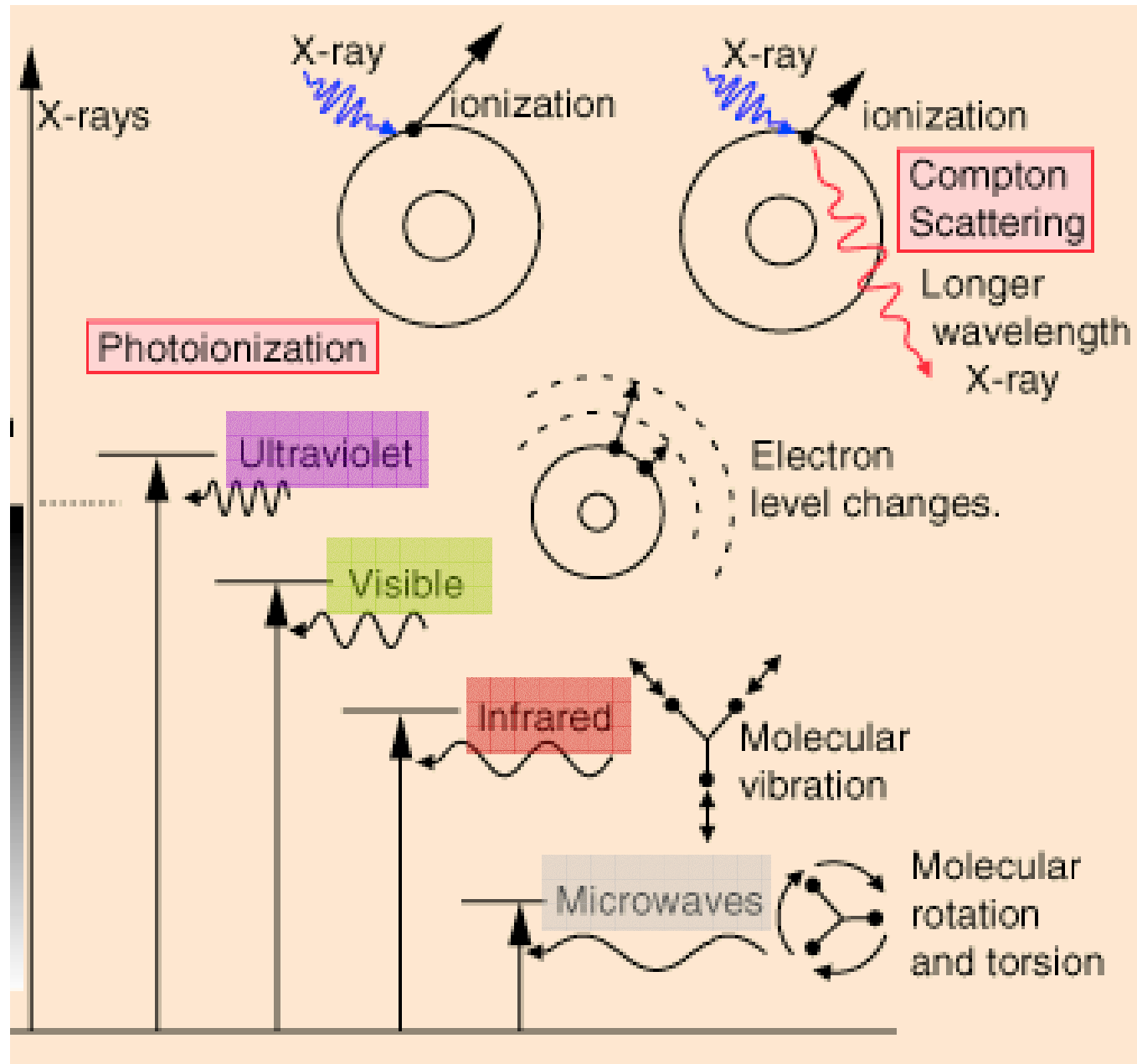
Meilleure description de l'atome :
approche probabiliste

Atome quantique => rechercher
les lieux de l'espace dans
lesquels l'électron a le plus de
chances de se trouver autour du
noyau.

Notion d'orbitale atomique



Interactions photon matière



Mise en évidence de phénomènes quantiques

Résumé de quelques idées importantes

- Les **particules** ont un **comportement ondulatoire** à l'échelle microscopique.
- Certaines **grandeurs physiques**, qui classiquement peuvent prendre un ensemble continu de valeurs, n'adoptent en mécanique quantique que des **valeurs discrètes** : exemple l'énergie interne des atomes et molécules.
- **Les phénomènes quantiques sont de nature aléatoire**. On ne peut prévoir le résultat d'une expérience que sous forme **statistique** (grand nombre d'événements), ou **probabiliste** (un seul événement).
- Le fait de mesurer une grandeur physique affecte le système considéré.