

# Introduction à la mécanique quantique-1

SAF 2019, PAR JACQUES FRIC

# Tout a commencé là !



Sur cette image de lave en fusion on voit différentes couleurs. On sait qu'elles dépendent de sa température.

L'analyse fréquentielle du profil de rayonnement pour une couleur donnée se révèle incompatible avec les lois de la thermodynamique classique.

**Il est intéressant de souligner que la nécessité d'une autre mécanique de type microscopique ait été motivée par un phénomène naturel totalement macroscopique**

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome: Le corps noir, M. Planck

La mécanique statistique (thermodynamique) proposait deux lois pour le rayonnement du corps noir.

La loi de Rayleigh-Jeans qui donnait des résultats convaincants pour le rayonnement des grandes longueurs d'ondes (infrarouge) mais qui divergeait pour les courtes longueurs d'ondes (catastrophe ultraviolette).

A l'inverse la loi de Wien donnait un résultat convaincant dans les courtes longueurs d'ondes mais incorrecte dans les grandes longueurs d'ondes .

La bonne loi devait se trouver entre les deux et devait avoir comme approximation ces deux lois pour les grandes longueurs d'onde d'une part et les courtes longueurs d'autres part.

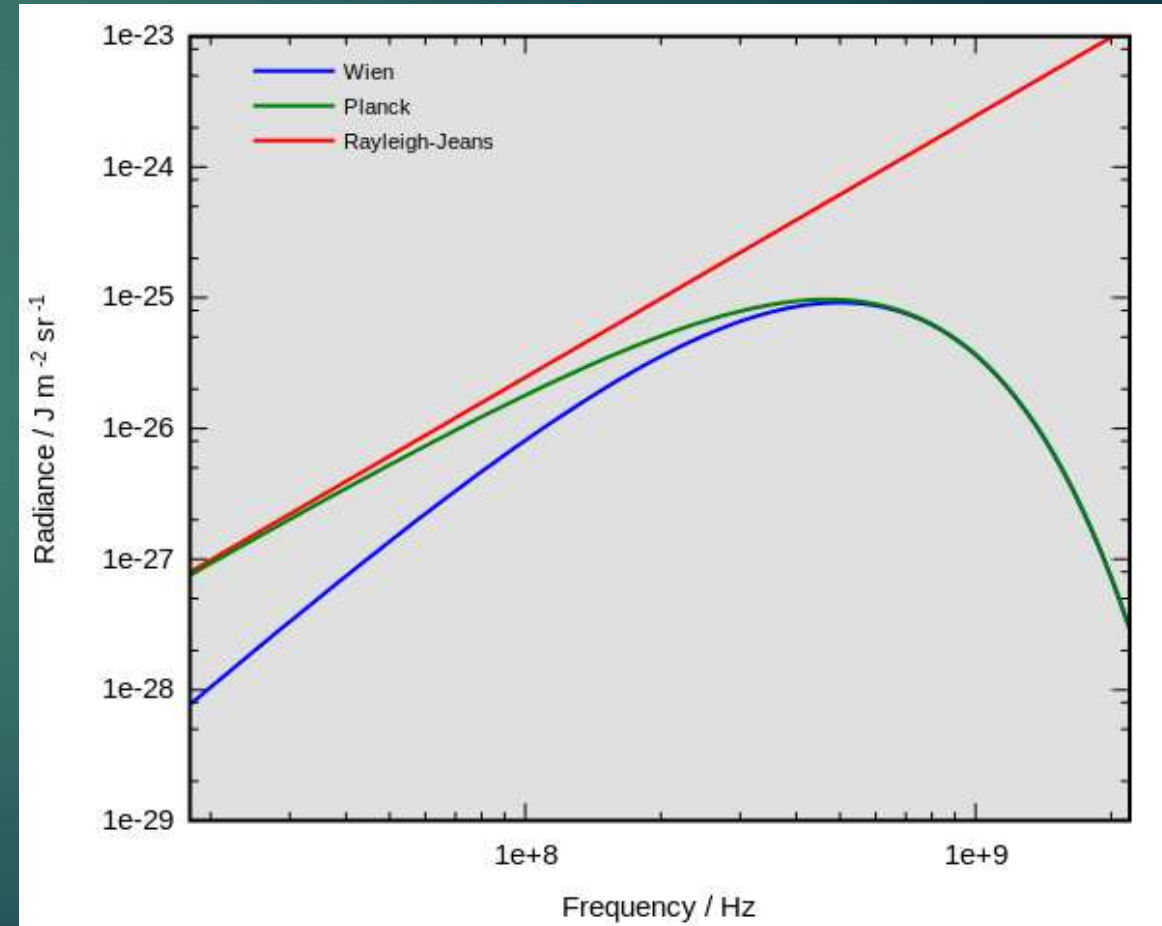
Planck construisit sa loi de manière empirique d'abord sur ces considérations.



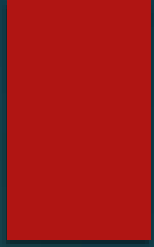
# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome: Le corps noir, M. Planck

Le diagramme ci-contre synthétise l'effet des 3 lois.

Pour la loi de Planck, il faut considérer le rayonnement, non pas continu, mais comme un ensemble d'oscillateurs, harmoniques discrets, d'énergie  $E = n.h.f$ , égale à un multiple d'un quantum d'énergie où  $n$  est un nombre entier,  $h$  la constante de Planck et  $f$  la fréquence du rayonnement. C'est ainsi que M. Planck (en 1900) a pu obtenir un diagramme conforme à l'expérience.



# La loi de Maxwell-Boltzmann.



Il existe plusieurs manières d'établir cette loi. On peut partir de la loi classique de Maxwell -Boltzmann donnant la probabilité de posséder une énergie  $E$  pour une température  $T$ , établie en considérant le système comme un ensemble de  $N$  ( $N \gg 1$ ) particules, chacune déterminée par sa position  $q_i$  et sa quantité de mouvement  $p_i$  dans un espace des phases à  $6N$  dimensions.

On divise cet espace en  $M$  microcellules non accessibles à la mesure directe. Pour cela on regroupe ces microcellules dans un ensemble de  $k$  macrocellules, suffisamment grandes pour qu'une mesure soit possible. Chaque macrocellule contient  $g_k$  microcellules dans lesquelles vont se répartir  $n_k$  particules.

De la combinatoire appliquée à l'occupation des macrocellules, en supposant les configurations microscopiques équiprobables, résulte une loi de probabilité de configurations globales dont on cherche le maximum, sous contraintes que le nombre total de particules soit égal à  $N$  et l'énergie totale à  $E$ .

# L'approche quantique (bosons et fermions).

## Mécanique classique

La loi de Maxwell-Boltzmann faisait l'hypothèse que:

- a) toutes les particules étaient discernables.
- b) Une case microscopique pouvait contenir plusieurs particules.
- c) Le volume de la cellule microscopique n'est pas défini et peut tendre vers 0.

## Mécanique quantique

- A) Les particules de même type sont indiscernables, a) n'est plus applicable.
- B) Pour les bosons b) est applicable mais pas pour les fermions (exclusion)
- C) La taille de la cellule microscopique est donnée par  $h$ , la constante de Planck.

En appliquant ces conditions à la méthode classique on obtient deux statistiques: La statistique de Bose-Einstein (bosons) et celle de Fermi-Dirac pour les Fermions (il faut tenir compte du spin ou de polarisation) que nous ne détaillons pas ici.

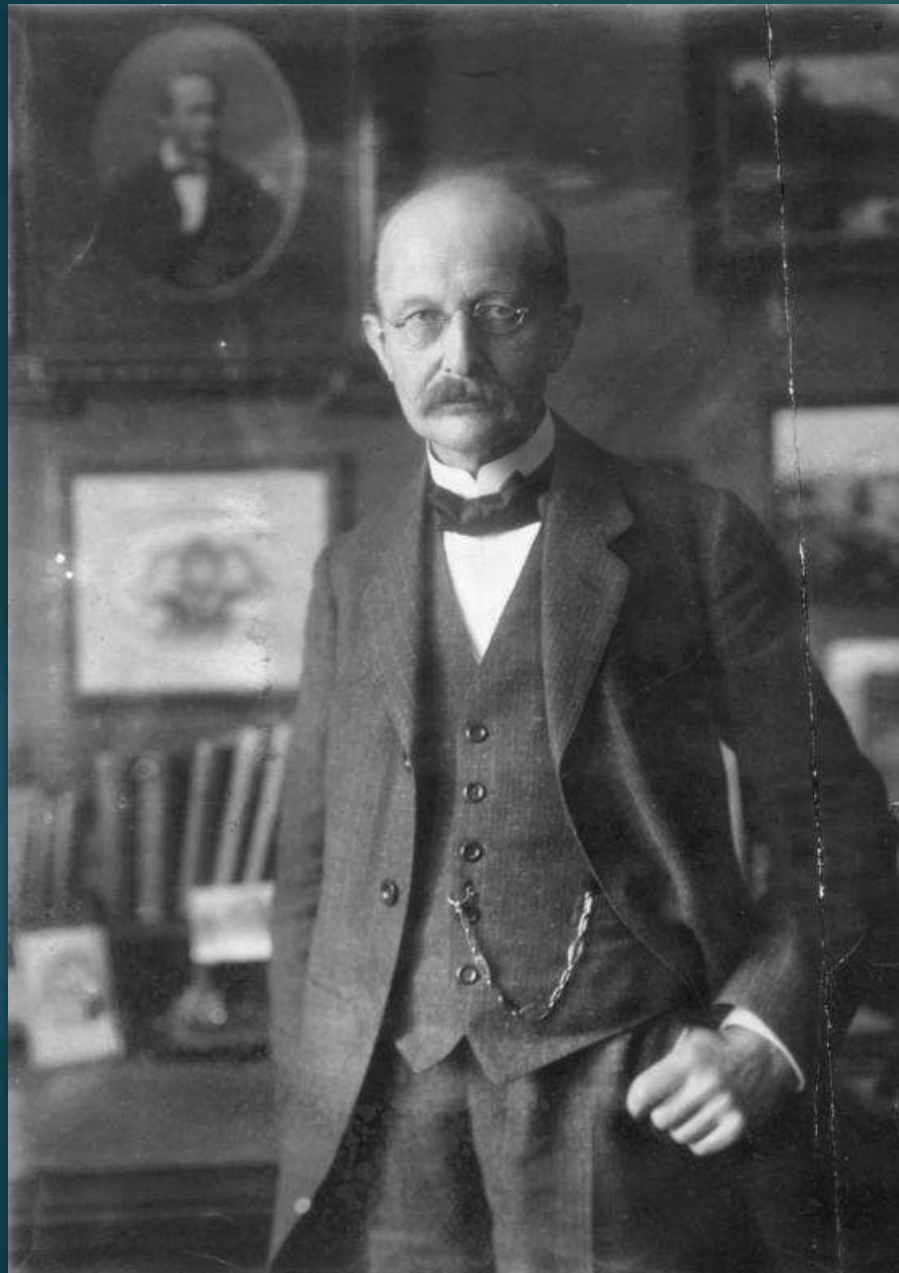
# La loi de Planck

A ce stade la loi de Planck, relative aux photons va se déduire directement de la statistique de Bose-Einstein par des considérations physiques et géométriques pour calculer les différents paramètres de la statistique et pour la mettre sous la forme d'une loi donnant l'émittance énergétique spectrale qui est le paramètre mesurable par l'expérience .

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}.$$

$h$  est la constante de Planck,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $c$  la célérité de la lumière,  $T$  la température en degrés Kelvin,  $\lambda$  la longueur d'onde.

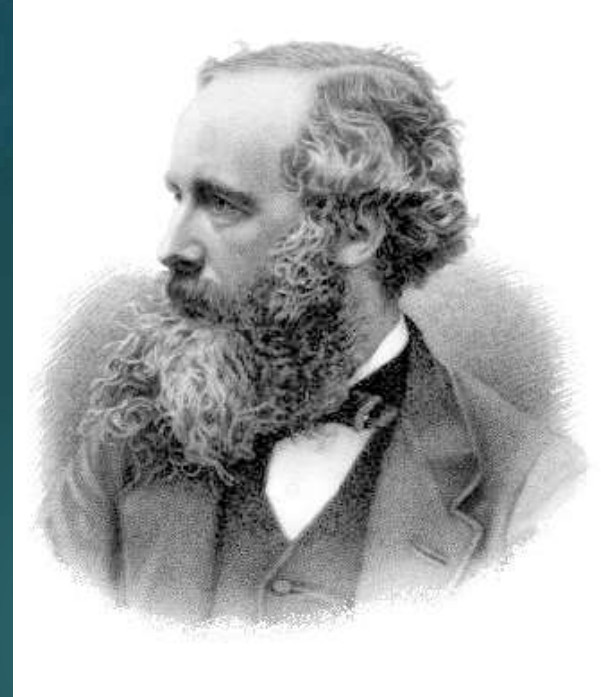




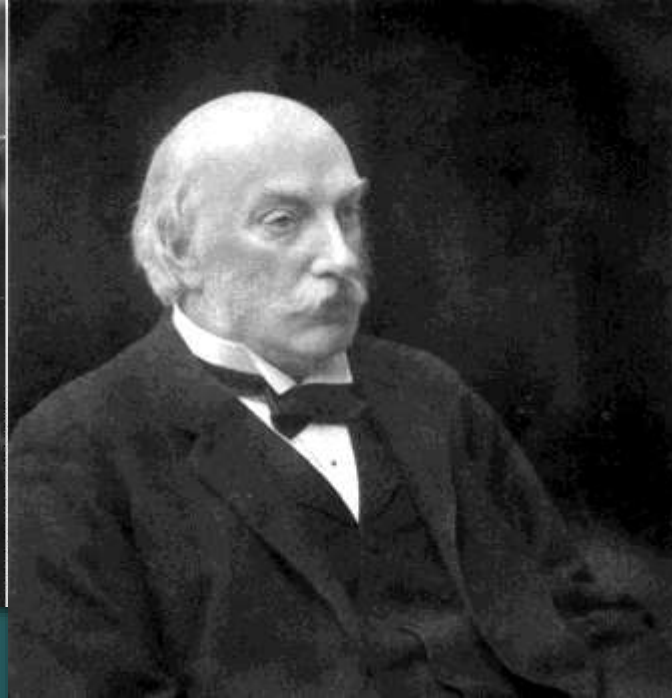
Max Planck



Ludwig Boltzmann



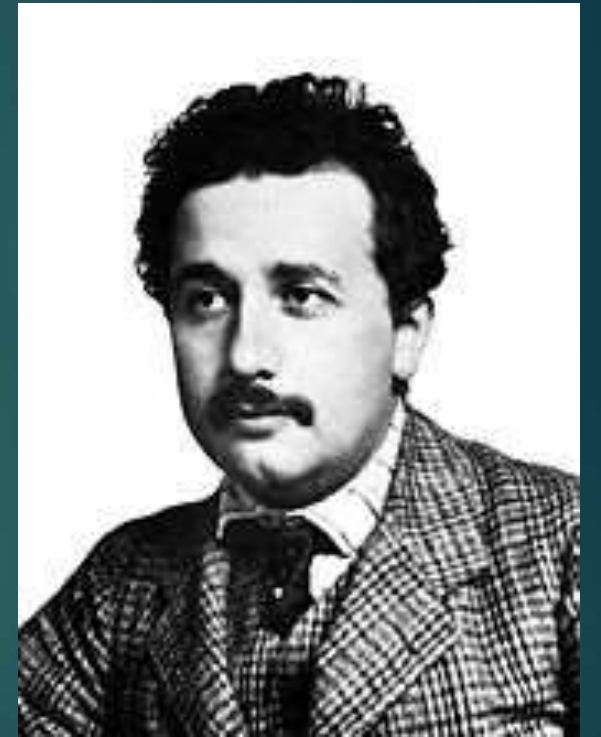
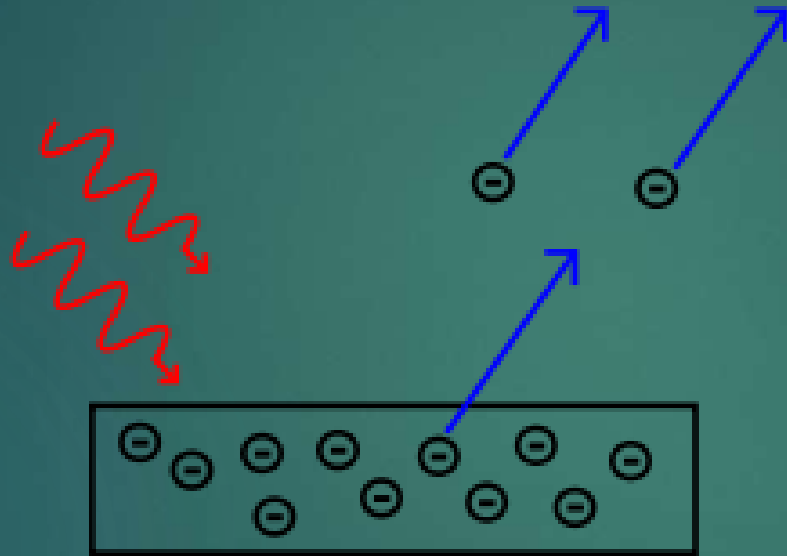
James Clerk Maxwell



John William Strutt  
Rayleigh

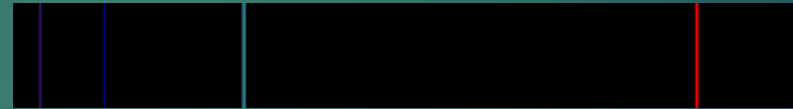
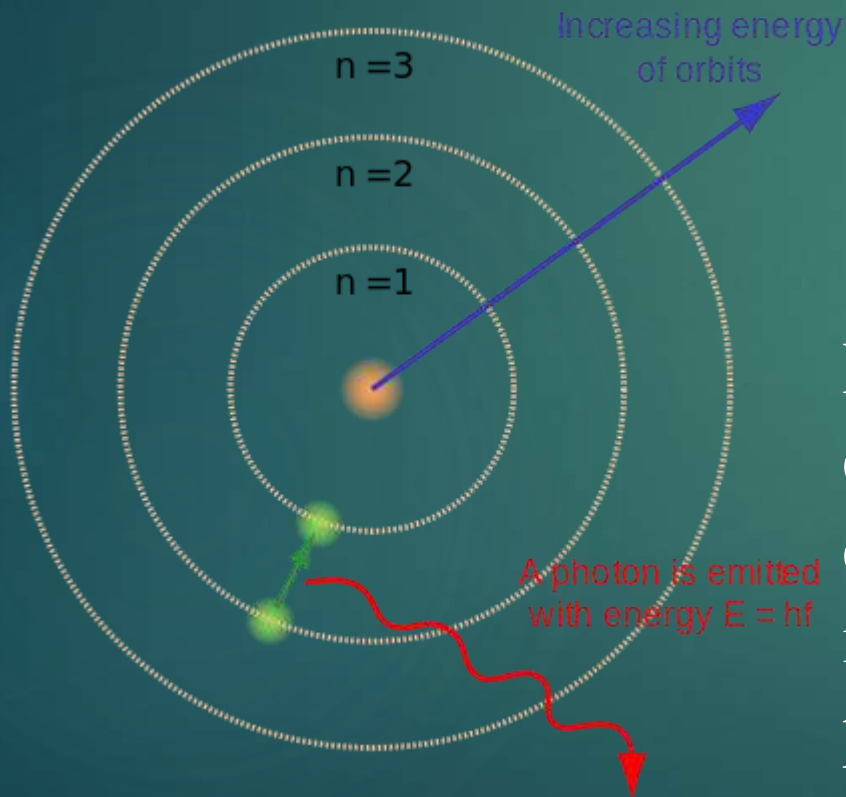
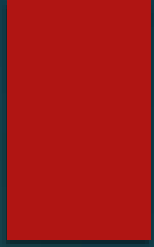


# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome: l'effet photo-électrique, Einstein(1905)



Cet effet va faire intervenir une fréquence minimale pour qu'il se produise, quelle que soit l'intensité du flux lumineux

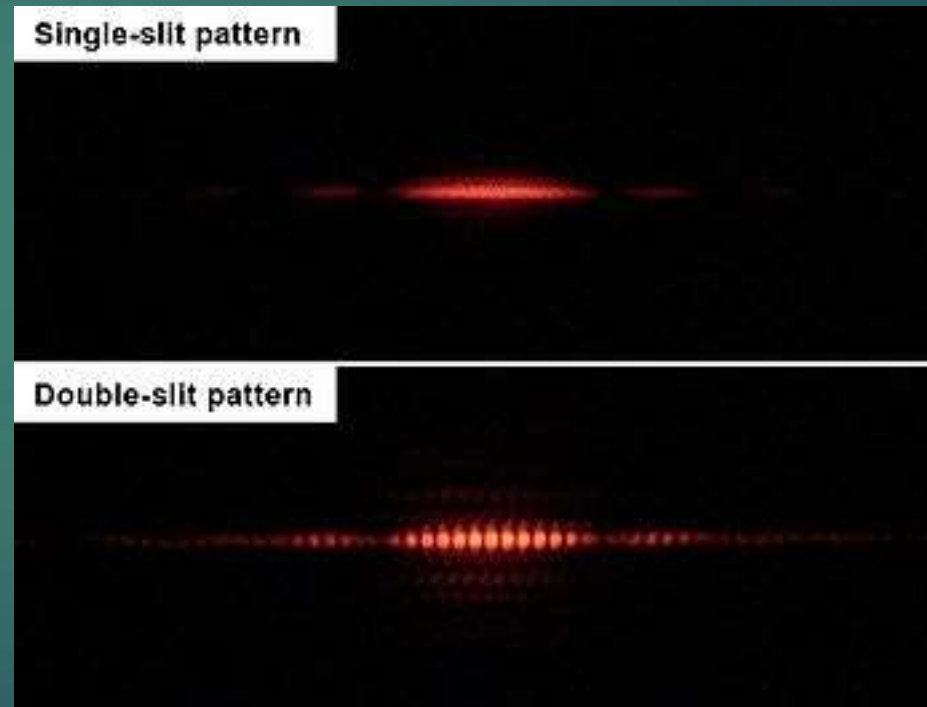
# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome: Les raies spectrales, N. Bohr (1913)



Les atomes excités qui en se désexcitant émettent la lumière ne le font pas avec une énergie variant de manière continue mais de manière discontinue (quantifiée). Ceci explique pourquoi, pour le corps noir, on a dû prendre en compte cet effet pour expliquer son spectre.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome: Dualité onde-particule, L. De Broglie (1924)

Cette expérience montre le caractère ondulatoire des photons, même, lorsqu'ils sont émis un par un, et montre aussi comment l'expérience, la mesure, modifie le phénomène.



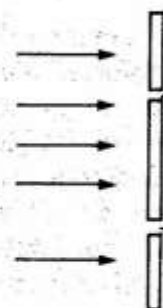


# Fentes de Young (La matière espace-temps- G. Tannoudji- M. Spiro)

148

LA MATIÈRE-ESPACE-TEMPS

CHAMP D'ELECTRONS



FENTES



TAUX DE COMPTAGE

ECRAN

Figure V. 1

## Expérience de Young

Des électrons d'impulsion bien déterminée touchent une paroi percée de deux fentes. Les électrons diffractent et interfèrent. Un écran récepteur enregistre tour à tour leurs arrivées. Une figure d'interférences se dessine au niveau de l'écran.

PENSER CONCRÈTEMENT L'ÉLÉMENTARITÉ

155

CHAMP D'ELECTRONS



DETECTEUR



ECRAN

TAUX DE COMPTAGE

SOURCE  
DE LUMIERE

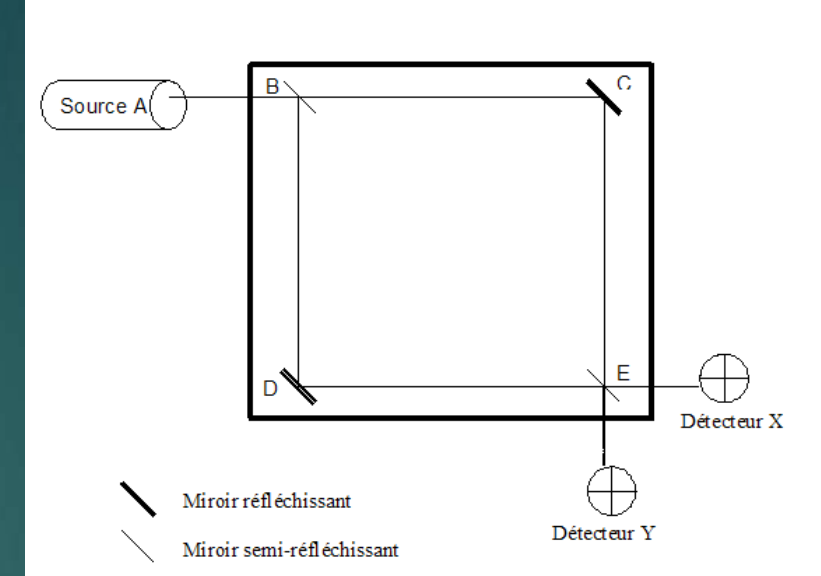
Figure V. 2

## Expérience de Young modifiée

Même expérience que celle montrée sur la figure V.1, mais cette fois-ci on cherche à savoir par quel trou chaque électron passe (au moyen de la diffusion de la lumière sur les électrons). Les interférences disparaissent.

# Contrafactualité

Selon la mécanique quantique, dans un dispositif expérimental, une non détection (qu'on qualifie d'évènement **contrafactuel**), peut apporter une information. Nous allons le montrer sur un exemple.



Dans ce diagramme, il n'y a pas de détecteur en C. Un photon unique est émis par la Source A. Si on ne considère pas les lois quantiques, les détecteurs X et Y auraient une chance égale de détecter le photon à la sortie du dispositif. Mais en mécanique quantique, l'état superposé que prend le photon à la sortie du miroir semi réfléchissant B :  $|\text{Photon transmis}\rangle + |\text{Photon réfléchi}\rangle$  va générer une interférence, du même type que celle de l'expérience des fentes de Young en E. Le dispositif est construit de sorte que seul le détecteur X (interférences additives) enregistre la sortie du photon. Donc, que la probabilité pour que le photon soit détecté en Y (interférences soustractives) soit nulle.

# Contrafactualité

- ▶ Le problème d'Elitzur-Vaidman est une variante du dispositif. Un gouvernement sous-traite la fabrication des bombes déclenchées par un miroir détecteur ultrasensible, qui va remplacer le miroir en C du schéma précédent: la bombe explose si un seul photon atteint le miroir, le recul activant le détonateur. Ce détecteur possède également les propriétés suivantes :
  - Il est peu fiable (mais soit il fonctionne toujours, soit il ne fonctionne jamais)
  - S'il ne fonctionne pas, il se comporte comme le miroir réfléchissant en C
  - On ne peut tester le détonateur qu'en l'utilisant associé à la bombe.
- ▶ Comment disposer d'un stock de bombes fiables, dont le fonctionnement du détecteur est garanti, sans faire exploser toutes les bombes fiables ?
- ▶ Un conseil: Nous suggérons à ce gouvernement de changer de sous-traitant!



# Contrafactualité

- ▶ La physique quantique nous en donne le moyen : plaçons une bombe en C, et envoyons un photon en A. Si le photon est détecté en Y c'est qu'il n'y a pas eu d'interférences donc que le détonateur était opérationnel. Le détecteur de la bombe *aurait pu* détecter le photon, et donc la bombe est certifiée 100 % fiable. Mais elle n'a pas explosé car le photon a emprunté l'autre chemin (BDE)
- ▶ Si le photon est détecté par X, on ne peut conclure sur la fiabilité de la bombe.
- ▶ Bien entendu, si la bombe explose c'est qu'elle était fiable. En itérant le processus, en remettant en jeu les bombes n'ayant pas explosé et associées à une détection en X, on peut certifier jusqu'à  $1/4 + 1/4 \cdot 1/4 + 1/4 \cdot 1/4 \cdot 1/4 + \dots = 1/3$  des bombes initiales.

# Contrafactualité: Tentative d'interprétation par la théorie de l'information

- ▶ On peut proposer une interprétation (spéculative) par la théorie de l'information.
- ▶ La détection du passage par un chemin est une information binaire (une chance sur deux). Selon le chemin, la bombe explose ou le détecteur Y ou X est activé à chance égales. Si Y est activé, il y a contrafactualité. On a l'information binaire.
- ▶ La détection par le détecteur X est ambiguë soit c'est le résultat d'une interférence (détonateur défectueux) soit le fait de la contrafactualité auquel cas il n'y a pas interférence. Ceci peut être théoriquement discernable sur un écran.
- ▶ Ce sont deux évènements possibles il faut une information complémentaire pour départager les causes.
- ▶ Si le miroir du détonateur est bloqué, alors l'information initiale est conservée, aucune information n'a été prélevée.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

- ▶ La mécanique classique s'est montrée impuissante à expliquer la plupart des résultats de la physique de l'atome
- ▶ Dès 1913 la théorie de Bohr (dite ancienne théorie des quanta), reposant sur une hypothèse de quantification tout à fait arbitraire avait connu un réel succès en fournissant une interprétation des spectres simples.



# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

En 1924, le physicien Louis de Broglie, cherchant une mécanique qui possède avec l'optique physique les mêmes liens que la mécanique classique et l'optique géométrique, proposa l'association onde-corpuscule : à tout point matériel doit être associé un mouvement vibratoire  $\psi$ , la forme de cette onde étant fournie par l'équation de Schrödinger.

La plupart des notions classiques, telles que vitesse et trajectoire perdent leur sens en mécanique ondulatoire, seule la densité de probabilité de présence de la particule ( $\psi\psi^*$ ) est connue en tout point de l'espace et à tout instant.

Le succès de cette théorie l'interprétation des propriétés atomiques et en particulier des spectres optiques a été remarquable.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

Mais comme cela arrive souvent en physique, en même temps que la tentative théorique de Louis de Broglie, s'est développée une tentative purement phénoménologique qui fut l'œuvre de l'école allemande de Göttingen groupant sous l'égide de Max Born son élève Pascal Jordan et surtout son assistant Werner Heisenberg.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

De l'ancienne théorie des quanta, Heisenberg rejette délibérément tout ce qui n'est pas strictement expérimental tel que trajectoire, vitesse, position des électrons sur les orbites.

Il postule ainsi que les grandeurs établies dans le domaine macroscopique peuvent très bien être dénuées de toute réalité dans le domaine microscopique.

Il ne retient que les éléments observables, c'est-à-dire les grandeurs caractéristiques du rayonnement atomique accessibles à l'expérience, à savoir :

- Les fréquences, intensité et états de polarisation des raies spectrales.
- Les niveaux d'énergie atomique qui nous sont révélés par les expériences d'ionisation et par le principe de combinaisons de la spectroscopie.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

Pour les exploiter, ces éléments sont groupés dans des tableaux à double entrée auxquels Heisenberg applique les règles algébriques du calcul matriciel.

Ces travaux, menés à bien en 1925 fournirent les mêmes résultats que ceux qui seront prédits, peu de temps après, par la mécanique ondulatoire de Schrödinger.

C'est ce dernier physicien qui montra alors que les deux méthodes, si différentes de prime abord, étaient, sous des formes dissemblables, mathématiquement équivalentes.



# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

On conçoit combien cette constatation a renforcé l'un et l'autre point de vue et quelle en est l'importance de ce principe pour le physicien.

Dans ce cours, nous laisserons de côté le point de départ d'Heisenberg et la mécanique des matrices.

Nous reprendrons équation de Schrödinger que nous avons déjà évoquée pour une particule, nous préciserons la notion d'opérateur associé une grandeur physique et ses conséquences puis nous généraliserons l'équation de Schrödinger à un système quelconque.

# Nécessité d'une autre mécanique au niveau de l'atome

Ceci nous permettra de dégager les principes généraux de la mécanique quantique en étudiant grâce à ces principes l'évolution des systèmes au cours du temps, nous serons amenés à attribuer à la fonction d'onde un caractère vectoriel et nous verrons alors apparaître les éléments de matrice d'Heisenberg.

Nous terminerons en indiquant, très succinctement, les grandes lignes de la théorie de Dirac (mécanique quantique relativiste) dans laquelle le spin apparaît comme une conséquence directe des équations fondamentales.

# L'équation de Schrödinger d'une particule

## Généralités

C'est en 1925 qu'Erwin Schrödinger prend connaissance du travail de Louis de Broglie. Schrödinger met à profit sa compétence en matière d'équations aux dérivées partielles pour construire, dans une étonnante série de huit articles publiés en 1926, ce qu'on appelle la Mécanique ondulatoire.

Cette version de la théorie quantique est légèrement postérieure, du moins dans ses débuts, à la mécanique quantique, ou mécanique des matrices, de Heisenberg, Born, Jordan et Dirac dont nous parlerons par la suite.

# L'équation de Schrödinger d'une particule

L'apport le plus marquant des travaux de Schrödinger réside dans la construction d'une équation d'onde régissant le comportement d'une particule placée dans un potentiel (ou un champ de forces).

L'obtention des niveaux d'énergie comme phénomène d'ondes stationnaires se présente alors comme un problème mathématique bien posé, du même type que celui de la détermination d'ondes stationnaires avec des conditions aux limites données.



# L'équation de Schrödinger d'une particule

A la base de la physique, il y a l'observation expérimentale et le processus de mesure qui consiste à caractériser les aspects de la réalité par des nombres. Ces aspects de la réalité sont élaborés en concepts de grandeurs physiques (énergie, intensité du courant électrique, etc.).

Dans des circonstances données, un système physique, c'est-à-dire un objet appartenant à la réalité, sera dit être dans un certain état. L'état du système est sa « manière d'être », c'est-à-dire la forme particulière que revêt sa réalité.

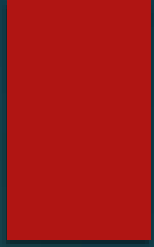
On possède une information sur l'état d'un système si l'on a effectué des mesures de grandeurs physiques et obtenu un ensemble correspondant de nombres.

# L'équation de Schrödinger d'une particule

Nous admettons également qu'en agissant sur le système, et en soumettant les valeurs d'un sous-ensemble (à déterminer) de grandeurs physiques à un filtrage adéquat, on peut préparer l'état de ce système.

La collection des nombres résultant de ce filtrage constitue l'information expérimentale sur l'état du système ainsi préparé.

# Les étapes de la théorie sont donc les suivantes



1. Il faut d'abord décrire l'état du système, c'est-à-dire lui associer une représentation mathématique qui le définit de façon opératoire. Ainsi, en mécanique newtonienne, l'état d'un point matériel de masse  $m$  est décrit à l'instant  $t$  par sa position  $r(t)$  et sa vitesse  $v(t) = dr(t)/dt$ , ou son impulsion  $p = mv$ .
2. On doit connaître la loi d'évolution dans le temps du système quand on le place dans des conditions données, c'est-à-dire pouvoir prévoir son état à l'instant  $t$ , le connaissant à  $t = 0$ .
3. Pour Newton, c'est la loi fondamentale  $f = dp/dt$  où  $f$  est la force agissant sur la particule.

# Les étapes de la théorie sont donc les suivantes

3. Il faut établir les lois qui permettent de calculer les résultats de mesure des grandeurs physiques, c'est-à-dire de passer de l'objet mathématique qui décrit le système aux nombres qui apparaissent sur les appareils de mesure (compteur, oscilloscope, etc.). En mécanique newtonienne, ce sont des fonctions de  $r$  et  $p$ .

4. Enfin, comme nous l'avons pressenti, il nous faut poser une question, absente en mécanique classique, sur le processus de mesure. En quoi résulte-il ? Que savons-nous après une mesure ?

Dans ce chapitre, nous étudions les deux premières questions, sur le cas d'une particule évoluant dans l'espace.



# Rappels : Etats stationnaires

Considérons une particule d'énergie totale constante  $E$  dans un domaine où elle est soumise à des forces dérivant d'un potentiel indépendant du temps, et soit alors  $U(x, y, z)$  son énergie potentielle.

On convient d'associer à cette particule une onde plane monochromatique de fréquence  $\nu = E/h$ , dont la forme générique est représentée par l'équation :

$$\Psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) e^{-2\pi i(E/h)t}$$

# Rappels : Etats stationnaires

Sa forme sera précisée ultérieurement. La fonction d'onde  $\psi$  qui caractérise l'état de la particule est fournie par l'équation aux dérivées partielles de Schrödinger :

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\psi = 0 \quad (1)$$

Cette équation peut encore s'écrire :

$$E\psi = (U\psi) - \frac{\hbar^2}{2m} \Delta\psi \quad (1')$$

Un tel état, dans lequel  $U$  est indépendant du temps et où  $E$  est constante, est dit «état stationnaire».

# Rappels : Cas des états non stationnaires

On remarque que :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \varphi(x, y, z) \left[ -2\pi i \frac{E}{h} \right] e^{-2\pi i \frac{E}{h} t} = \psi \left[ -2\pi i \frac{E}{h} \right]$$

Dériver  $\psi$  par rapport à  $t$  revient à multiplier par  $E/i\hbar$ , où  $\hbar = h/2\pi$ , d'où :

$$E \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

En remplaçant dans (1')

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = U\psi - \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi \quad (2)$$

Cette équation satisfait aux critères 1 et 2 des généralités (décrit l'état du système et son évolution)

# Rappels : Cas des états non stationnaires

Une manière moderne de dériver l'équation de Schrödinger est de partir du hamiltonien  $H(x_j, p_j)$ , qui est l'opérateur associé à l'énergie totale de la particule (énergie potentielle + énergie cinétique). Il vaut :

$$H(x_j, p_j) = E = \frac{p^2}{2m} + U(x, y, z, t)$$

L'équation de propagation de l'onde  $\psi(x, y, z, t)$  associée s'obtient en associant des opérateurs agissant sur la fonction d'onde à savoir :

*A-L'opérateur « multiplication noté  $x$  » par  $\psi$  pour les coordonnées de position  $x_j$ .*

*B-L'opérateur  $-i\hbar/\partial_j\psi$  pour les quantités de mouvement  $p_j$ .*

*C-L'opérateur  $i\hbar/\partial_t\psi$  pour l'énergie  $E^*$*

\*Comme en relativité, l'énergie est associée au temps et la quantité de mouvement à l'espace. Ceci, qui a de profondes implications épistémologiques, sera mis en évidence en mécanique quantique relativiste.



# Rappels : Cas des états non stationnaires

Remarquons les deux concepts:

- Une fonction d'onde, qui contient l'information « générale » sur le système,
- Des opérateurs associés aux grandeurs mesurables par l'expérimentateur, qui vont caractériser l'intervention humaine, montrant l'interdépendance entre le monde physique et l'esprit du physicien!

$$H(x_j, p_j) = E = \frac{p^2}{2m} + U(x, y, z, t)$$

En réalisant les opérations A, B, C définies précédemment, on obtient :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = U\psi - \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi$$

On vérifie qu'on obtient bien l'équation (2) par ce procédé qui a l'avantage de montrer comment les opérateurs vont être associés à la fonction d'onde.

# Signification de la fonction d'onde

Comme cette équation contient un terme imaginaire, elle n'admet que des solutions imaginaires. La fonction d'onde est de nature complexe ce qui montre qu'on ne peut pas lui affecter un caractère physique.

C'est le principe posé par Max Born qui donne une signification physique à cette fonction :

*Le carré du module de la fonction  $\psi$  mesure en chaque point et à chaque instant la densité de probabilité de présence du corpuscule.*

*Ce carré a pour valeur  $|\psi|^2 = \psi\psi^*$ , où  $\psi^*$  est le conjugué complexe de  $\psi$ .*

L'onde joue alors le rôle d'un intermédiaire de calcul permettant de faire des prévisions.

# Contraintes sur la fonction d'onde

Conséquences:

Les dérivées partielles premières de  $\psi$  doivent être continues, uniformes et bornées en tout point de l'espace. De plus on ne considère que des fonctions qui s'annulent à l'infini.  $\Psi$  doit être une fonction normée, on doit avoir :

$$\int \psi \psi^* d\tau = 1$$

L'intégrale est étendue à l'espace entier (la particule est nécessairement quelque part). Si cette fonction est solution de l'équation de Schrödinger, en utilisant l'équation et sa conjuguée, il est facile de montrer que, pour une solution quelconque, l'intégrale a une valeur constante indépendante du temps. La fonction  $\psi$  est de carré sommable. Comme l'équation de Schrödinger est homogène en  $\psi$ , son produit par un facteur numérique est aussi solution, propriété qu'on utilise pour la normalisation.

# Contraintes sur la fonction d'onde

Conséquence: quantification de l'énergie:

De telles conditions imposées à  $\psi$  limitent le nombre de solutions utilisables de l'équation indépendante du temps, il n'existera des fonctions  $\psi$  satisfaisant à ces conditions que pour certaines valeurs des coefficients, c'est-à-dire pour certaines valeurs de l'énergie.

Ces valeurs sont dites « valeurs propres ». Elles forment le plus souvent une suite discontinue.

A chaque valeur propre  $E_k$  correspondra en général une solution  $\psi_k$  de l'équation de Schrödinger.

Si à une valeur  $E_k$  correspondent plusieurs fonctions  $\psi_{k1}, \psi_{k2}, \dots, \psi_{kl}$ , on dit que la valeur de  $E_k$  est dégénérée et le nombre de solutions linéairement indépendantes caractérise le degré de dégénérescence.

# Contraintes sur la fonction d'onde

Autre propriétés de fonctions  $\psi_l$  : Orthogonalité

Considérons deux fonctions propres  $\psi_l$  et  $\psi_m$ , non dégénérées correspondant à deux valeurs propres non dégénérées  $E_l$ ,  $E_m$  d'une même équation de Schrödinger indépendante du temps. Il est facile de démontrer que :

$$\int \psi_l * \psi_m d\tau = 0$$

Ce qui est la condition d'orthogonalité pour ce type de fonctions. Des fonctions à la fois normées et orthogonales sont orthonormées. Si  $\psi_n$  est une fonction orthonormée et  $A_n$  un coefficient réel ou complexe, la fonction

Implique la relation

$$\begin{aligned} \psi &= \sum A_n \psi_n \\ A_n &= \int \psi \psi_n^* d\tau. \end{aligned}$$



# Contraintes sur la fonction d'onde

Le principe de superposition ou de décomposition spectrale:

Si un état dépend du temps, la fonction d'onde ne sera pas de la forme très simple :

$$\Psi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, z) e^{-2\pi i(E/h)t}$$

La forme sera plus générale et comme décrit au § précédent il faudra considérer la fonction d'onde  $\psi$  comme une somme (superposition) d'états d'énergie différentes  $\psi = \sum A_n \psi_n$  correspondant aux valeurs propres avec les probabilités associées  $A_n$  telles que  $\sum A_n A_n^* = 1$ .

Si on effectue une mesure d'énergie, le résultat sera nécessairement une valeur propre  $E_n$ .

# Contraintes sur la fonction d'onde

Le principe de superposition ou de décomposition spectrale:

De façon générale (le nombre d'états stationnaires étant quelconque) le principe de superposition s'énonce :

*Une détermination physique de l'énergie  $E$  d'une particule caractérisée par la fonction d'onde  $\psi = \sum A_n \psi_n$  fournira nécessairement une des valeurs propres,  $E_n$ , avec la probabilité  $|A_n|^2$ .*

Une mesure de  $E$  agit sur l'état de la particule et le fixe dans un de des états propres avec la probabilité associée à cet état.

# Contraintes sur la fonction d'onde

Le principe de superposition ou de décomposition spectrale:

Ce principe de superposition est un point clé de la mécanique quantique et le fait qu'un seul état puisse être le résultat de la mesure la distingue formellement de la mécanique classique où quand plusieurs états « vibratoires d'une corde par exemple » coexistent, on les peut mesurer simultanément (on obtient un état qui peut être décomposé en série de Fourier).

# Comment les physiciens tentent de d'expliquer l'étrangeté de la mécanique quantique.

Tous ces phénomènes, qui défient l'entendement, ont fait l'objet de nombreux débats sur l'interprétation qu'on pouvait en faire.

Cette étrangeté sera sublimée par le paradoxe EPR.

Différentes positions ont été avancées.

Citons l'interprétation historique de l'école de Copenhague (Bohr, Heisenberg, ..).

Les principes essentiels de l'interprétation de Copenhague sont:

# Comment les physiciens tentent de d'expliquer l'étrangeté de la mécanique quantique.

Un système est complètement défini par sa fonction d'onde, représentée généralement par la lettre  $\psi$ . (Heisenberg)

L'équation de Schrödinger décrit l'évolution de  $\psi$ .

La description de la nature au niveau microscopique est essentiellement probabiliste.

La probabilité d'un évènement (par exemple l'expérience à deux fentes) est donnée par le carré de l'amplitude de cette fonction d'onde. (règle de Born qui donne un sens physique à la fonction d'onde dans cette interprétation de Copenhague)



# Comment les physiciens tentent de d'expliquer l'étrangeté de la mécanique quantique.

Il n'est pas possible de connaître théoriquement, simultanément, les valeurs exactes de toutes les propriétés d'un système, en vertu de la « relation d'indétermination » d'Heisenberg. Cette dénomination souvent appelée principe d'incertitude, relation d'incertitude est recommandée aujourd'hui, car reflétant mieux le fait que ce concept est inhérent à la théorie, indépendamment des imprécisions de mesure qui, bien sûr, existent également.

La matière, comme l'énergie possède des caractères corpusculaires et ondulatoires (dualité onde- particule). Selon l'expérience, ce caractère corpusculaire ou ondulatoire va se révéler. (principe de complémentarité, énoncé par Bohr).

Remarquons que cette dualité qui peut paraître impossible est assez proche de la nature de la ligne d'univers dans un espace-temps qui en fonction du chemin peut être à caractère temporel (onde) ou spatial (particule).

# Comment les physiciens tentent de d'expliquer l'étrangeté de la mécanique quantique.

Les instruments de mesure sont essentiellement des instruments “classiques” mesurant des grandeurs classiques comme la position d'une particule et sa quantité de mouvement.

Nous avons indiqué, au début, que Heisenberg, dans son approche, déniait tout caractère physique, au niveau de la mécanique quantique, à ces grandeurs classiques

Par contre, la description d'un système macroscopique par la mécanique quantique doit converger avec la description classique (principe de correspondance de Bohr et Heisenberg).

L'étrangeté de la mécanique quantique ne fait que refléter une approche non aboutie.

Nous devons faire appel à deux formalismes: Celui de la fonction d'onde qui caractérise le système à étudier et celui des opérateurs associés aux grandeurs physiques, associé à ce que l'opérateur peut en connaître.

L'opération se fait en deux étapes.

L'idéal serait de trouver un formalisme unique qui intégrerait l'opérateur (la pensée du physicien) et la physique, ces deux aspects formant un tout unique comme l'espace et le temps sont intégrés en espace-temps en relativité générale.

Ceci permettrait de comprendre comment la pensée du physicien et la physique sont intimement liés et indissociables.