

# P11 – Physique quantique

## Petite introduction

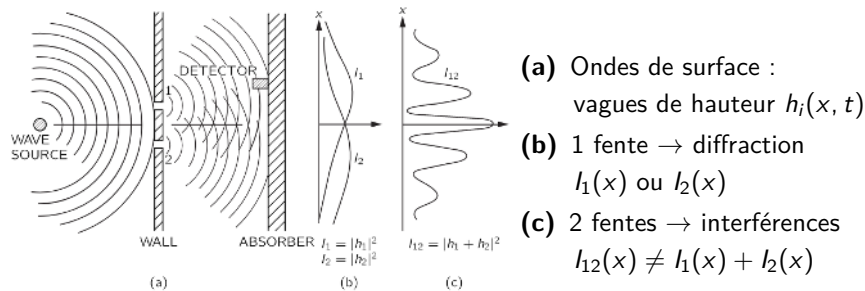
« I think that I can safely say that nobody understands quantum mechanics. »

Richard Feynman, Cambridge, 1967.

## I. L'expérience d'Young

### 1. Résultat avec des ondes

Pour des ondes mécaniques (houle, ondes capillaires, ondes sonores) ou des ondes électromagnétiques (UV, visible, IR...), l'expérience d'Young conduit à un phénomène d'interférence (cf. P4) qui se manifeste par une variation spatiale de l'amplitude de l'onde : les franges d'interférences.

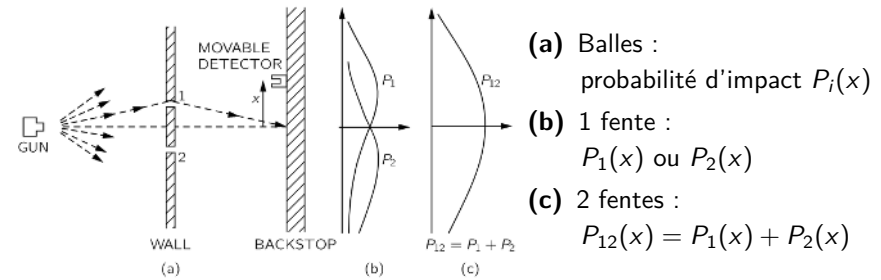


Source : The Feynman Lectures on Physics

L'expérience d'Young peut être adaptée pour chaque type d'onde, il suffit en principe de modifier la source et la taille  $a$  des ouvertures (ou des obstacles) de telle sorte que  $\lambda \sim a$ , ainsi que la distance  $d$  entre les deux ouvertures.

### 2. Résultat avec des particules classiques

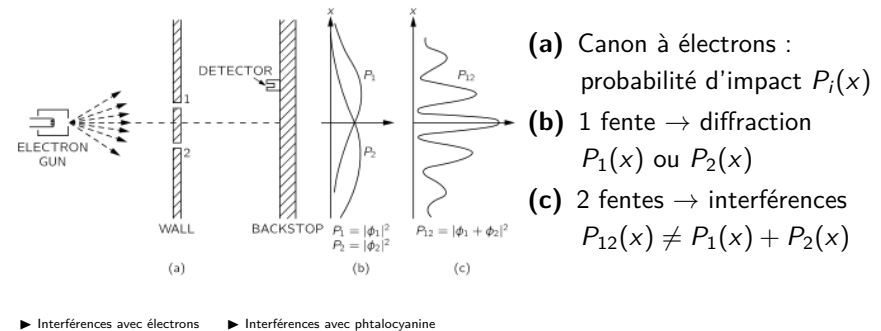
On peut tout aussi bien imaginer l'expérience d'Young avec des particules classiques : on remplace la source d'ondes par un canon qui tire au hasard des balles de diamètre  $d$  sur un mur percé de deux fentes de largeur  $a > d$ . L'écran est un second mur sur lequel on relève les impacts des balles.



Dans ce cas on détectera les balles une par une, et après un nombre de tirs important, on verra se dessiner deux franges qui sont les images déformées des deux fentes, la déformation provenant des balles ayant rebondi sur les bords des fentes.

### 3. Résultats avec des « particules » subatomiques

On projette un à un des électrons qui sont détectés ponctuellement après passage par les ouvertures.



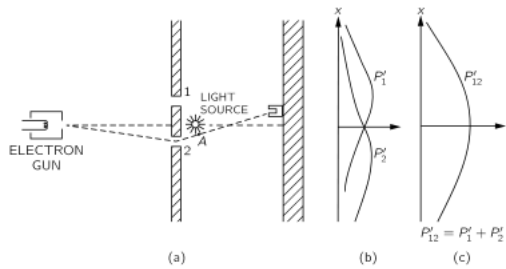
## Conclusion

- Les électrons sont détectés ponctuellement, ce sont des particules.
- Les électrons interfèrent (même seuls), ce sont des ondes.
- La situation est paradoxale ! C'est la dualité onde-corpuscule !

Mais par où passent les électrons ?

### 4. Résultats avec « particules » subatomiques sondées

Si l'électron est une particule, il doit passer par une ouverture ou l'autre. On place un détecteur sur les ouvertures.



- (a) La lumière diffusé par les électrons produit un flash dont l'origine est détectée.
- (b)  $P'_i(x)$  probabilité d'impact d'un électron passant par la fente  $i$ .
- (c) Les interférences disparaissent !

- « sonde » est au moins de la « taille » de l'électron. Au niveau atomique, toute observation ou mesure est une perturbation du système.
- Les entités quantiques sont entièrement décrites par une fonction d'onde ou « onde de probabilité » dont on peut déduire la probabilité de mesure des grandeurs physiques. Ce n'est pas la « particule » en elle même qui se comporte comme une onde, mais sa probabilité de présence.
- Il est impossible de prévoir exactement la position et la vitesse d'une entité quantique, c'est le principe d'incertitude d'Heisenberg.

### Conclusion

- Lorsqu'on sait par où passent les électrons, ils se comportent comme des particules !
- Lorsqu'on ne sait pas par où passent les électrons, ils se comportent comme des ondes !
- Nous influençons le comportement des électrons !?

► Dualité onde-particule

## II. Dualité onde corpuscule

### 1. Bref historique

En 1905, Albert Einstein interprète l'effet photoélectrique grâce à l'aspect corpusculaire de la lumière et introduit la notion de photon (prix Nobel 1921).



En 1922, Arthur Compton met en évidence la diffusion inélastique des rayons  $\gamma$  par des électrons et confirme l'hypothèse d'Einstein sur la nature corpusculaire du rayonnement électromagnétique : les photons « existent » ! (prix Nobel 1927).

En 1924, Louis De Broglie fait l'hypothèse que toute particule de matière est associée à une onde (prix Nobel 1929).



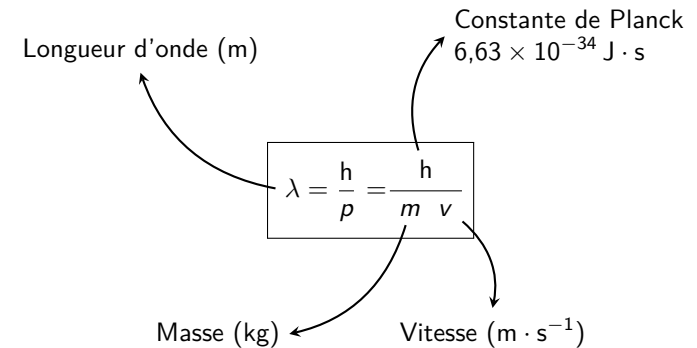
En 1927, Davisson et Germer observent la diffraction des électrons par un cristal de nickel et confirment la nature ondulatoire des électrons ainsi que l'hypothèse de De Broglie (prix Nobel 1937).

### 2. Quelques postulats/résultats de la physique quantique

- Dans l'expérience d'Young les électrons sont perturbés par les photons qui servent à les détecter. Il est impossible d'observer les électrons sans les perturber, car toute

### 3. Longueur d'onde de De Broglie

Le comportement ondulatoire des particules subatomiques peut être associé à une longueur d'onde, la longueur d'onde de De Broglie :



#### Remarque

En changeant la vitesse, on change la longueur d'onde et donc la finesse des détails observables par les particules (microscope électronique).

Ex. 4 p. 408 : quantité de mouvement d'un photon

Ex. 19 p. 412 : diffraction de grains de sable

### III. Interactions lumière-matière

#### 1. Rappels : niveaux d'énergie, absorption et émission

Les électrons des atomes sont organisés en couches d'énergies croissantes (K, L, M, N...).

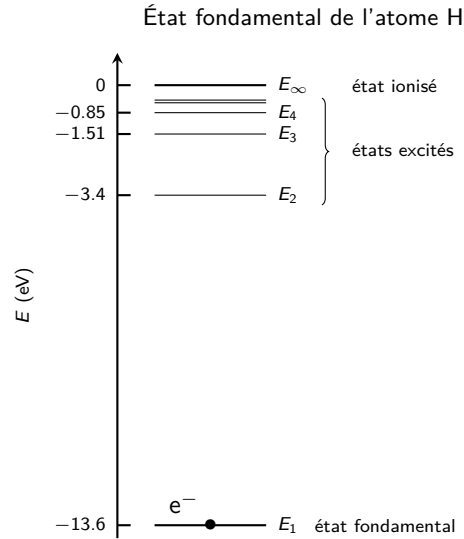
Tout état d'énergie intermédiaire est interdit.

Les électrons occupent les couches de plus basses énergies.

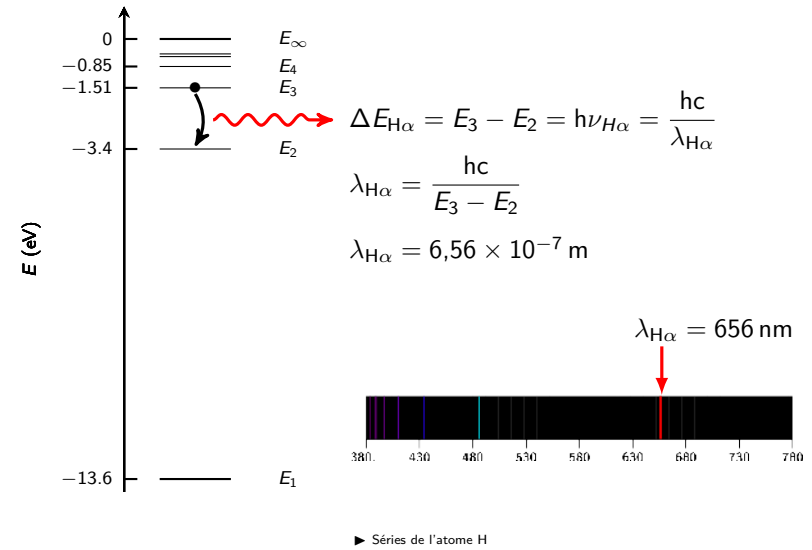
Les niveaux d'énergie diffèrent selon le type d'atome.

**Remarque**

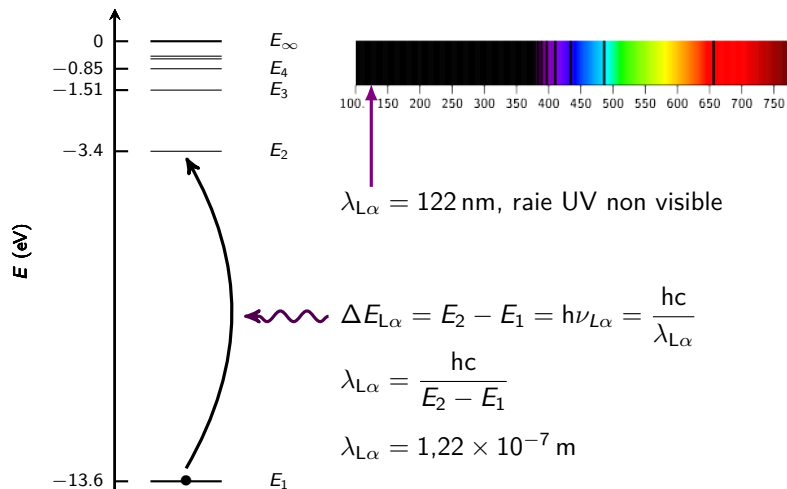
$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$



#### Émission de la raie H $\alpha$ de l'atome d'hydrogène



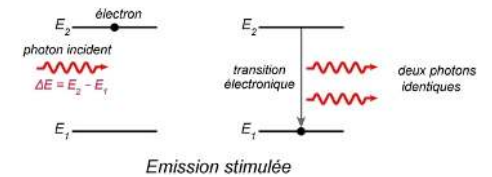
#### Absorption de la raie Lyman- $\alpha$ de l'atome d'hydrogène



#### 2. Émission stimulée ou émission induite

En 1916, Einstein, encore lui ! montre que l'absorption et l'émission spontanée ne suffisent pas à expliquer le rayonnement du corps noir (cf. P2-3 1S).

Il faut introduire un troisième processus, l'émission stimulée (ou émission induite).



#### Caractéristiques

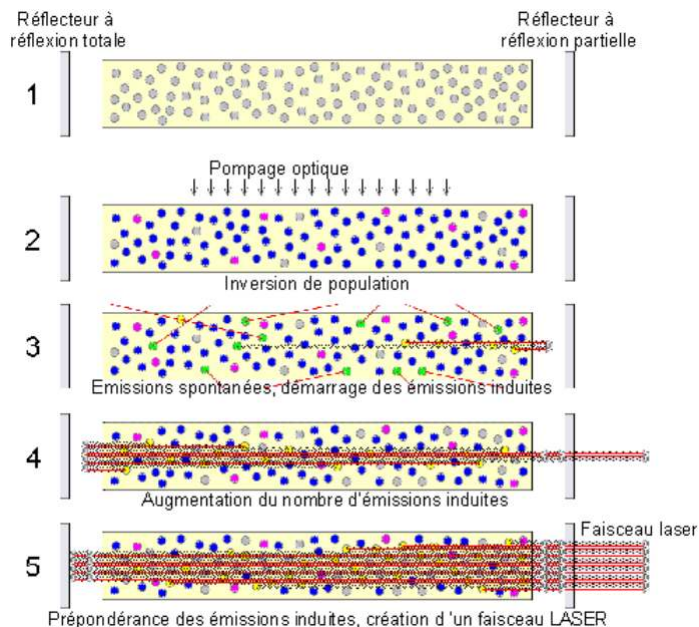
Dans ce cas l'émission est déclenchée par un photon incident, le photon émis a les mêmes caractéristiques :

- même fréquence, et donc même énergie,
- même direction, orthogonale aux miroirs dans un LASER,
- même phase, ils sont cohérents.

► Émission induite

Ex. 3 p. 392 : absorption ou émission stimulée

### 3. LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



#### Dangers

- Le réflexe de fermeture des paupières lors d'un éblouissement n'est pas suffisamment rapide pour protéger l'œil.
- Ne jamais regarder un faisceau laser → ne pas se mettre en face lorsqu'il est allumé !
- Faire attention aux nombreuses réflexions, et interférences, même loin de la direction centrale !

#### Fonctionnement

- Initialement c'est le niveau bas d'énergie qui est peuplé, il faut peupler le niveau d'énergie supérieur.
- On amène les électrons sur la couche supérieure par pompage optique (ou électrique), c'est l'inversion de population.
- Un électron relaxe par émission spontanée d'un photon dans la bonne direction (perpendiculaire aux miroirs).
- Le photon émis spontanément provoque des émissions induites en cascade sur les autres atomes excités qu'il rencontre.

► Fonctionnement du laser ► Laser à 3 niveaux

#### Propriétés

- lumière monochromatique, une seule longueur d'onde présente,
- faisceau directif, de faible ouverture angulaire,
- lumière cohérente, tous les photons sont en phase,
- forte intensité.