

## Points essentiels

- ❖ Observations expérimentales
- ❖ Échec de la théorie ondulatoire
- ❖ Explication quantique
- ❖ Expérience de Millikan
- ❖ La dualité onde-corpuscule

2

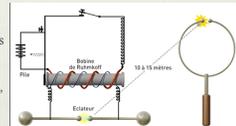
## Introduction

- ❖ L'effet photoélectrique a été découvert par Hertz lors de ses recherches sur les ondes électromagnétiques. Alors que la mise en évidence de ces dernières a validé de façon éclatante la théorie de Maxwell, l'effet photoélectrique était rebelle à toute interprétation maxwellienne. Tandis que les ondes électromagnétiques contenaient les germes de la relativité restreinte, l'effet photoélectrique contenait ceux de la mécanique quantique !

3

## Découverte accidentelle

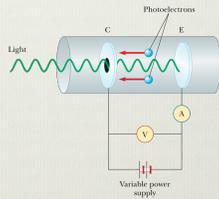
- ❖ Dans une série d'expérience sur les effets de résonance entre des oscillations électriques très rapides, deux étincelles électriques sont produites simultanément par une bobine d'induction. L'étincelle A est celle du primaire, l'étincelle B celle du secondaire. « J'ai enfermé l'étincelle B dans un compartiment obscur de façon à faire les observations plus facilement, j'ai alors constaté que la longueur maximum de cette étincelle diminuait ». Il comprend que quelque chose de nouveau se produit et décide d'interrompre ses explorations antérieures pour se consacrer à l'étude du nouveau phénomène.



Montage de Hertz servant à la production et à la détection des ondes électromagnétiques

4

## L'étude de Lenard

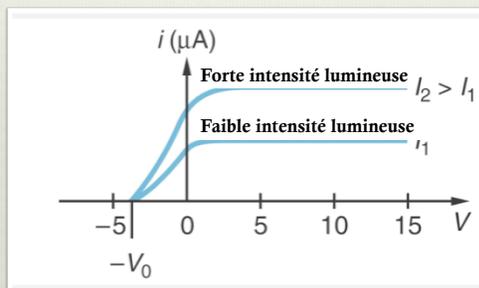
5

## Observations de Lenard

- ❖ Entre 1899 et 1902, en utilisant des tubes ayant un vide poussé, Lenard fait toute une série d'observation :
- ❖ Les UV arrachent des particules d'électricité négative aux métaux
- ❖ Ces particules d'électricité négative (« électrons ») ont le même rapport charge / masse ( $e/m$ ) que les « rayons cathodiques »
- ❖ Le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à l'intensité lumineuse
- ❖ L'énergie cinétique des électrons est indépendante de l'intensité lumineuse
- ❖ L'énergie cinétique des électrons augmente quand la fréquence de la lumière incidente augmente (effet à seuil)

6

## Constatations expérimentales



7

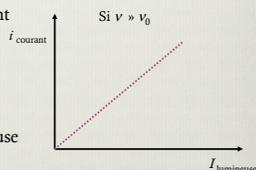
## Constatations expérimentales

- ❖ Si  $V > 0$  pour une valeur suffisamment élevée de  $V$ , tous les photoélectrons émis atteignent l'anode, et le courant  $I$  atteint une valeur maximale. Si on augmente davantage  $V$  le courant demeure constant. Cependant, la valeur maximale du courant est proportionnelle à l'intensité lumineuse.
- ❖ Si  $V < 0$  Seulement les  $e$  avec une énergie cinétique initiale  $K_c = \frac{1}{2}mv^2 > |eV|$  atteignent l'anode. Si  $|V| > |V_0|$  aucun électron n'atteint l'anode. Le potentiel d'arrêt  $V_0$  est indépendant de l'intensité lumineuse.

8

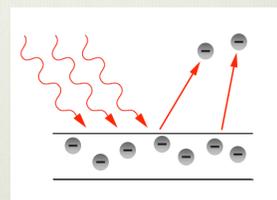
## Ce que l'on doit expliquer

1. Émission de photoélectrons si  $\nu > \nu_0$  (fréquence seuil);
2. Présence d'un potentiel d'arrêt  $V_0$  si  $|V| > |V_0|$ ;
3. Le potentiel d'arrêt est indépendant de l'intensité lumineuse;
4. L'émission des photoélectrons est instantanée;
5. Le courant photoélectrique est proportionnel à l'intensité lumineuse de la source.



## Explication par la théorie ondulatoire

- ❖ Sous l'influence de l'onde électromagnétique, l'électron (dans le métal) se met à vibrer à la même fréquence que l'onde et lorsqu'il possède assez d'énergie pour passer la barrière de potentiel ( $\phi$ ), qui le retient, il s'échappe.



## Explication inexacte

1. Incapable d'expliquer la fréquence seuil:
  - Avec le temps, l'électron pourrait toujours acquérir suffisamment d'énergie pour s'échapper.
2. Incapable d'expliquer pourquoi le potentiel d'arrêt  $V_0$  est indépendant de l'intensité lumineuse:
  - Puisque  $I$  est proportionnel au carré de l'amplitude ( $A^2$ ), pour une même fréquence, si  $I$  augmente alors l'énergie devrait augmenter.
3. Incapable d'expliquer l'émission instantanée:
  - Le retard d'émission calculé est beaucoup plus grand que celui mesuré expérimentalement.

Conclusion: "La théorie ondulatoire de la lumière ne réussit pas à expliquer l'émission photoélectrique".

## Explication quantique (Einstein 1905)

En se basant sur l'idée de *quantifier* l'énergie de Planck, Einstein suggéra que la quantification est une propriété fondamentale de l'énergie électromagnétique.

Les collisions entre les quanta de lumière (photon) et les électrons du métal sont de type mécanique où l'énergie et la quantité de mouvement se transmettent et se conservent.

Ainsi,

1. À basse fréquence ( $\nu < \nu_0$ ), les photons incidents n'ont pas suffisamment d'énergie à communiquer aux électrons pour les faire passer la barrière de potentiel  $\phi$  qui les retient dans le métal (explication de la fréquence seuil  $\nu_0$ )

## Explication quantique (Einstein 1905) (suite)

2. Il s'agit d'une collision parfaitement élastique

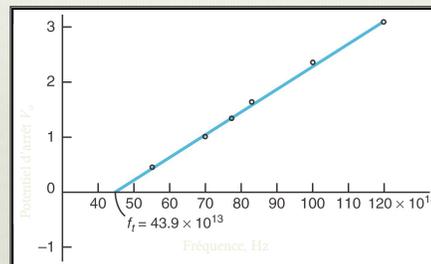
$$h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{Équation photoélectrique})$$

Puisque :  $\frac{1}{2}mv^2 = eV_0$

Alors :  $h\nu = W_e + eV_0$

Où  $h\nu$  est l'énergie d'un photon.

## Expérience de Millikan (1906)



La pente donne  $h/e$ . Où  $h$  est la constante de Planck =  $6,626 \times 10^{-34}$  J.S.

## Exemple 1

Calculez l'énergie d'un photon si:

a)  $\lambda = 400 \text{ nm}$  ( $3,1 \text{ eV}$ );

b)  $\lambda = 700 \text{ nm}$  ( $1,77 \text{ eV}$ );

Remarque:  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

La lumière visible contient des photons dont l'énergie varie entre  $1,8$  et  $3,1 \text{ eV}$ .

## Exemple 2

L'intensité de la lumière solaire à la surface terrestre est environ  $1400 \text{ W/m}^2$ . Si l'énergie moyenne d'un photon est de  $2 \text{ eV}$  ( $\lambda = 600 \text{ nm}$ ), calculez le nombre de photons frappant une surface de  $1 \text{ cm}^2$  à chaque seconde.

Réponse

À chaque seconde  $1400 \text{ J/m}^2 = 0,14 \text{ J/cm}^2$

Si  $N$  est le nombre de photons de  $2 \text{ eV}$  d'énergie qui possèdent au total  $0,14 \text{ J}$  ( $8,75 \times 10^{17} \text{ eV}$ ).

On trouve  $N = 4,38 \times 10^{17}$  photons (à chaque seconde).

## Exemple 3

Si la longueur d'onde maximale pour observer l'effet photoélectrique est de  $564 \text{ nm}$  dans le cas du potassium (K), calculez:

a) Le travail d'extraction  $\phi = \frac{1242 \text{ eV} \times \text{nm}}{564 \text{ nm}} = 2,20 \text{ eV}$

b) Si la longueur d'onde de la lumière utilisée est de  $400 \text{ nm}$ , déterminez l'énergie cinétique maximale des photoélectrons.

$$\frac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = eV_0 = h\nu - \phi = 0,90 \text{ eV}$$

Ainsi le potentiel d'arrêt (pour le potassium) est de  $0,90 \text{ Volt}$ , si la longueur d'onde de la lumière utilisée est  $\lambda = 400 \text{ nm}$ .

## Le quantum

Serait-il pensable qu'une source de lumière n'émette pas d'ondes électromagnétiques de façon continue, mais plutôt, des petits paquets distincts d'énergie dans toutes les directions? Ces petits paquets d'énergie seraient comparables à des particules élémentaires qu'on appellerait **PHOTONS** qui voyageraient à la vitesse de la lumière. Chaque photon ou **QUANTUM** posséderait une quantité d'énergie dont la valeur serait donnée par:

$$E = hf$$

## Dualité onde-corpuscule

- ❖ Photon se comporte à la fois comme une onde et un corpuscule



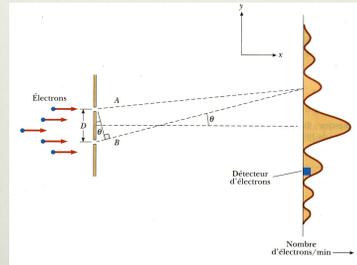
De Broglie suggère de généraliser cette dualité à la matière

$$\text{Photon: } p = \frac{E}{c} = \frac{(hc/\lambda)}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

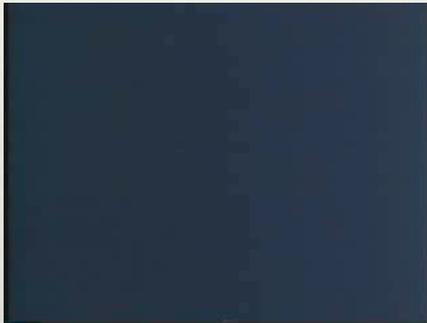
$$\text{Matière: } p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

## Dualité onde-corpuscule

- ❖ Observation des propriétés ondulatoires de la matière par diffraction ou par interférence:

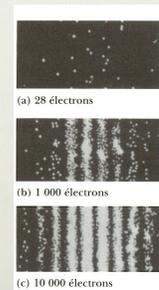


On diminue l'intensité du faisceau jusqu'à ce que les électrons passent un par un



## Dualité onde-corpuscule (suite)

- ❖ Observations



## Conflit de générations ?



- ❖ 1906 J.J. Thomson, démontre que les rayons cathodiques sont des particules (électrons).

23

## Conflit de générations ?

- ❖ 1937 G.P. Thomson (le fils de J.J.), démontre que les électrons sont également des ondes.
- ❖ Les deux ont raison !



24

## Travail personnel

- ❖ Faire l'exemple 9.4
- ❖ Répondre aux questions: 1, 2 et 5
- ❖ Faire les exercices: 9, 11, 17, 19 et 24
- ❖ Aucun problème