



# CH-110 Chimie Générale Avancée I

Prof. A. Steinauer  
[angela.steinauer@epfl.ch](mailto:angela.steinauer@epfl.ch)

# Notes de gestion

- J'ai téléchargé un tableau périodique en anglais sur Moodle.
- Diapositives : disponibles au plus tôt la veille (généralement 30 minutes avant le cours)
- Je posterai une version finale des diapositives après le cours.
- Les questions d'examen seront posées en anglais et en français.
- Les exercices seront téléchargés tous les mardis. Les solutions seront postées sur Moodle le mardi suivant.
- **J'ai mis en ligne un petit formulaire de feedback, il sera ouvert jusqu'à mardi prochain, 24 septembre.**
- Qu'est-ce qui sera demandé à l'examen ?
- Vous voulez voir plus de maths ? Venez me voir à la pause ou à la fin du cours.

## ▼ WEEK 2: 16-22 September

Topic 1B: Quantum theory

Topic 1C: Wavefunctions and energy levels



FEEDBACK

Feedback week 1 

## PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS																															
Group	1	2															18														
	I	II															VIII														
	IA	IIA															VIIA														
2	3 Li lithium 6.94 2s <sup>1</sup>	4 Be beryllium 9.01 2s <sup>2</sup>															He helium 4.00 1s <sup>2</sup>														
3	11 Na sodium 22.99 3s <sup>1</sup>	12 Mg magnesium 24.31 3s <sup>2</sup>	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIIB	7 VIIIB	8	9	10	11 IB	12 IIB	5 B boron 10.81 2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	6 C carbon 12.01 2s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	7 N nitrogen 14.01 2s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	8 O oxygen 16.00 2s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	9 F fluorine 19.00 2s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	10 Ne neon 20.18 2s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>													
4	19 K potassium 39.10 4s <sup>1</sup>	20 Ca calcium 40.08 4s <sup>2</sup>	21 Sc scandium 44.96 3d <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	22 Ti titanium 47.87 3d <sup>2</sup> s <sup>2</sup>	23 V vanadium 50.94 3d <sup>3</sup> s <sup>2</sup>	24 Cr chromium 52.00 3d <sup>5</sup> s <sup>1</sup>	25 Mn manganese 54.94 3d <sup>5</sup> s <sup>2</sup>	26 Fe iron 55.84 3d <sup>6</sup> s <sup>2</sup>	27 Co cobalt 58.93 3d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	28 Ni nickel 58.69 3d <sup>8</sup> s <sup>2</sup>	29 Cu copper 63.55 3d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	30 Zn zinc 65.41 3d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	31 Ga gallium 69.72 4s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	32 Ge germanium 72.64 4s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	33 As arsenic 74.92 4s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	34 Se selenium 78.96 4s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	35 Br bromine 79.90 4s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	36 Kr krypton 83.80 4s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>													
5	37 Rb rubidium 85.47 5s <sup>1</sup>	38 Sr strontium 87.62 5s <sup>2</sup>	39 Y yttrium 88.91 4d <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	40 Zr zirconium 91.22 4d <sup>2</sup> s <sup>2</sup>	41 Nb niobium 92.91 4d <sup>3</sup> s <sup>1</sup>	42 Mo molybdenum 95.94 4d <sup>4</sup> s <sup>1</sup>	43 Tc technetium (98) 4d <sup>5</sup> s <sup>2</sup>	44 Ru ruthenium 101.07 4d <sup>7</sup> s <sup>1</sup>	45 Rh rhodium 102.90 4d <sup>9</sup> s <sup>1</sup>	46 Pd palladium 106.42 4d <sup>10</sup>	47 Ag silver 107.87 4d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	48 Cd cadmium 112.41 4d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	49 In indium 114.82 5s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	50 Sn tin 118.71 5s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	51 Sb antimony 121.76 5s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	52 Te tellurium 127.60 5s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	53 I iodine 126.90 5s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>	54 Xe xenon 131.29 5s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>													
6	55 Cs cesium 132.91 6s <sup>1</sup>	56 Ba barium 137.33 6s <sup>2</sup>	57 La lanthanum 138.91 5d <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	72 Hf hafnium 178.49 5d <sup>2</sup> s <sup>2</sup>	73 Ta tantalum 180.95 5d <sup>3</sup> s <sup>2</sup>	74 W tungsten 183.84 5d <sup>4</sup> s <sup>2</sup>	75 Re rhenium 186.21 5d <sup>5</sup> s <sup>2</sup>	76 Os osmium 190.23 5d <sup>6</sup> s <sup>2</sup>	77 Ir iridium 192.22 5d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	78 Pt platinum 195.08 5d <sup>9</sup> s <sup>1</sup>	79 Au gold 196.97 5d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	80 Hg mercury 200.59 5d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	81 Tl thallium 204.38 6s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	82 Pb lead 207.2 6s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	83 Bi bismuth 208.98 6s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	84 Po polonium (209) 6s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	85 At astatine (210) 6s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	86 Rn radon (222) 6s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>													
7	87 Fr francium (223) 7s <sup>1</sup>	88 Ra radium (226) 7s <sup>2</sup>	89 Ac actinium (227) 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	104 Rf rutherfordium (261) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	105 Db dubnium (262) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	106 Sg seaborgium (266) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	107 Bh bohrium (264) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	108 Hs hassium (267) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	109 Mt meitnerium (268) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	110 Ds darmstadtium (271) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	111 Rg roentgenium (272) 6d <sup>10</sup> 7s <sup>1</sup>	112*	113	114	115	116	117	118													
	Lanthanoids (lanthanides)		58 Ce cerium 140.12 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	59 Pr praseodymium 140.91 4f <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	60 Nd neodymium 144.24 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	61 Pm promethium (145) 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	62 Sm samarium 150.36 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	63 Eu europium 151.96 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	64 Gd gadolinium 157.25 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> s <sup>2</sup>	65 Tb terbium 158.93 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	66 Dy dysprosium 162.50 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	67 Ho holmium 164.93 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	68 Er erbium 167.26 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	69 Tm thulium 168.93 4f <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	70 Yb ytterbium 173.04 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	71 Lu lutetium 174.97 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	72 Hg hafnium (223) 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	73 Ta tantalum (261) 6d <sup>3</sup> s <sup>2</sup>	74 W tungsten (264) 5d <sup>4</sup> s <sup>2</sup>	75 Re rhenium (266) 5d <sup>5</sup> s <sup>2</sup>	76 Os osmium (267) 5d <sup>6</sup> s <sup>2</sup>	77 Ir iridium (268) 5d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	78 Pt platinum (269) 5d <sup>9</sup> s <sup>1</sup>	79 Au gold (270) 5d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	80 Hg mercury (271) 5d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	81 Tl thallium (272) 6s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	82 Pb lead (273) 6s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	83 Bi bismuth (274) 6s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	84 Po polonium (275) 6s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	85 At astatine (276) 6s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	86 Rn radon (277) 6s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>
	Actinoids (actinides)		90 Th thorium 232.04 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	91 Pa protactinium 231.04 5f <sup>6</sup> d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	92 U uranium 238.03 5f <sup>6</sup> d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	93 Np neptunium (237) 5f <sup>6</sup> d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	94 Pu plutonium (244) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	95 Am americium (243) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	96 Cm curium (247) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	97 Bk berkelium (247) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	98 Cf californium (251) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	99 Es einsteinium (252) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	100 Fm fermium (258) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	101 Md mendelevium (259) 5f <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	102 No lawrencium (262) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	103 Lr lutevium (263) 6d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	104 Hg hafnium (264) 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	105 Ta tantalum (265) 6d <sup>3</sup> s <sup>2</sup>	106 W tungsten (266) 5d <sup>4</sup> s <sup>2</sup>	107 Re rhenium (267) 5d <sup>5</sup> s <sup>2</sup>	108 Os osmium (268) 5d <sup>6</sup> s <sup>2</sup>	109 Ir iridium (269) 5d <sup>7</sup> s <sup>2</sup>	110 Pt platinum (270) 5d <sup>9</sup> s <sup>1</sup>	111 Au gold (271) 5d <sup>10</sup> s <sup>1</sup>	112 Hg mercury (272) 5d <sup>10</sup> s <sup>2</sup>	113 Tl thallium (273) 6s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>	114 Pb lead (274) 6s <sup>2</sup> p <sup>2</sup>	115 Bi bismuth (275) 6s <sup>2</sup> p <sup>3</sup>	116 Po polonium (276) 6s <sup>2</sup> p <sup>4</sup>	117 At astatine (277) 6s <sup>2</sup> p <sup>5</sup>	118 Rn radon (278) 6s <sup>2</sup> p <sup>6</sup>

**Molar masses (atomic weights) quoted to the number of significant figures given here can be regarded as typical of most naturally occurring samples.**

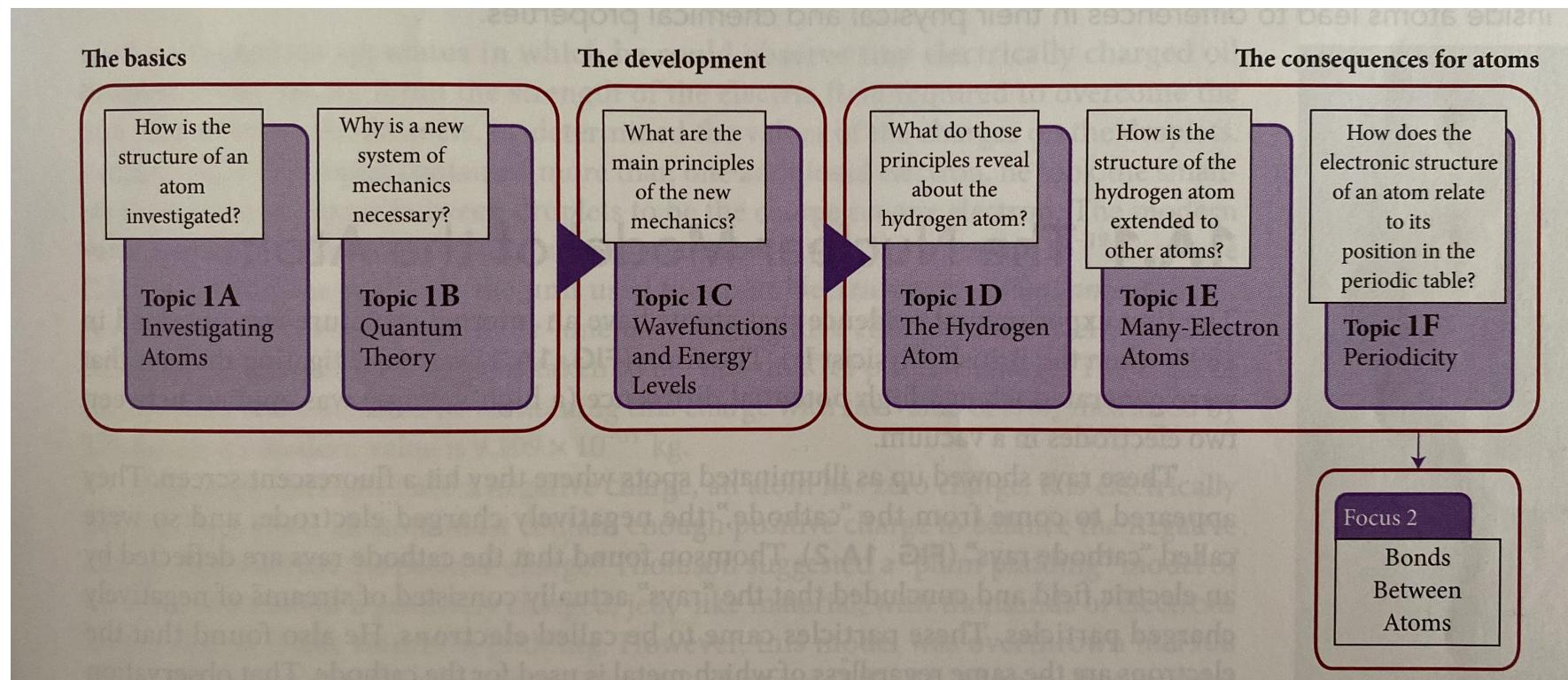
**\*The names of the elements 112 and higher have not yet been determined; both 112 and 114 have been confirmed.**

# La Théorie Quantique

Sujet 1B

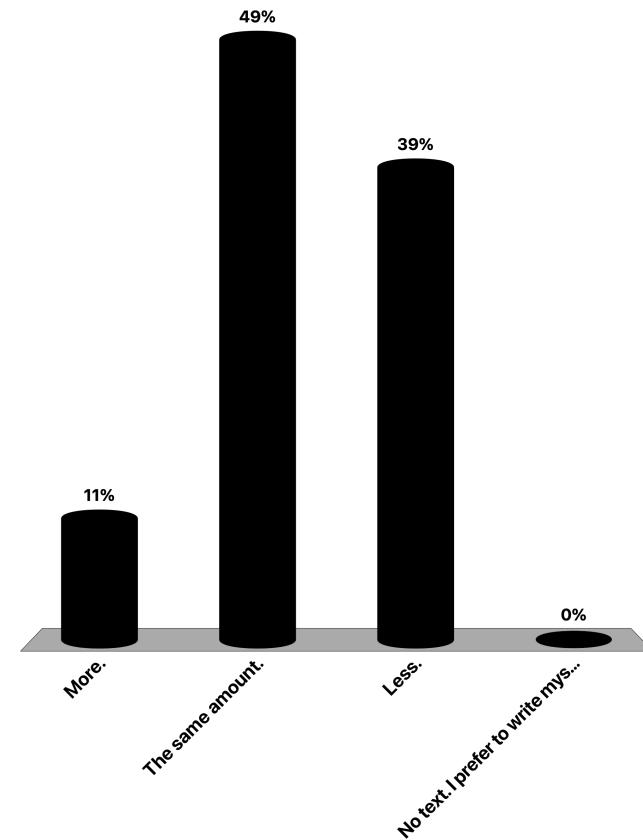


# Aperçu du chapitre 1 (Thème 1 : Atomes)



# Sondage : quelle quantité de texte préférez-vous sur les diapositives ?

- A. Plus.
- B. La même quantité.
- C. Moins.
- D. Pas de texte. Je préfère écrire moi-même.

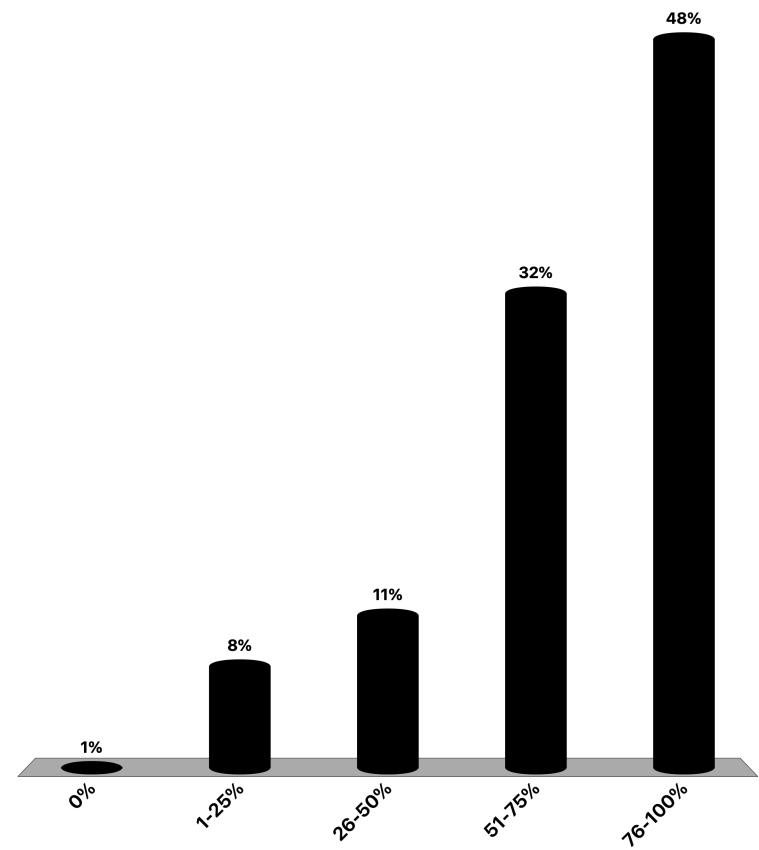


**ID de la session: 252032**

Quel pourcentage environ de la matière que nous avons abordée jusqu'à présent avez-vous rencontré dans vos études antérieures ?

- A. 0%
- B. 1-25%
- C. 26-50%
- D. 51-75%
- E. 76-100%

**ID de la session: 252032**



## Thème 1B.1 : Rayonnement, quanta et photons

## Thème 1B.2 : Dualité onde-particule

## Sujet 1B.3 : Le principe d'incertitude

POURQUOI AVEZ-VOUS BESOIN DE CONNAÎTRE CE MATÉRIEL ?

- Les propriétés des électrons dans les atomes et les molécules, qui sont à la base de toute **la chimie, ne peuvent être comprises qu'en termes de mécanique quantique.**

QUE FAUT-IL DÉJÀ SAVOIR ?

- Concept d'énergie cinétique (Principes fondamentaux A)
- Propriétés du rayonnement électromagnétique, en particulier la **relation entre la longueur d'onde et la fréquence** (thème 1A)

# Rayonnement, Quanta et Photons

Sujet 1B.1



## 1B.1 Rayonnement, quanta et photons

### Préparer le terrain

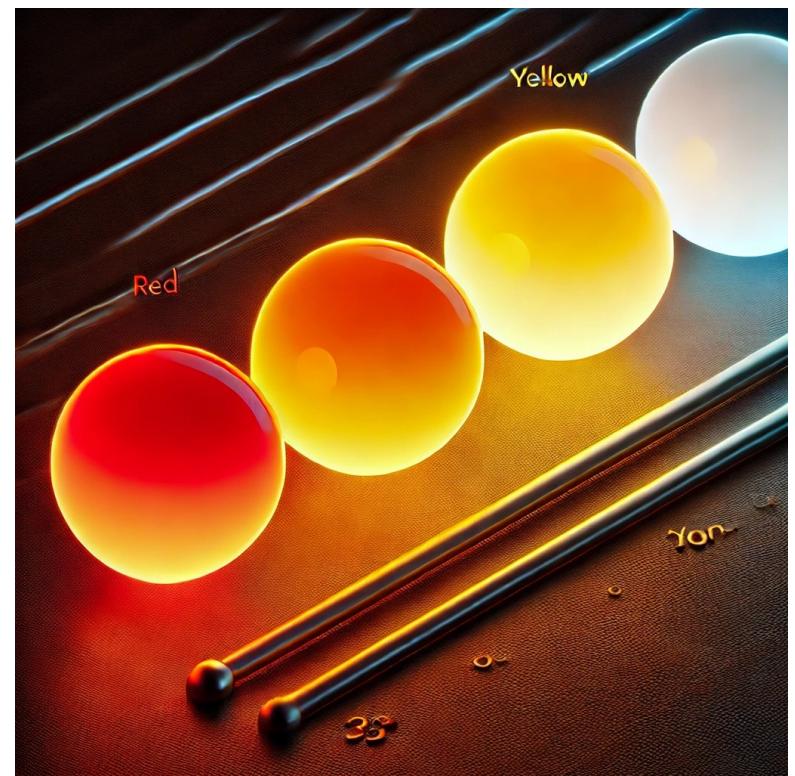
- Vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle, les scientifiques recueillent de plus en plus d'informations sur le rayonnement électromagnétique.
- Il devient de plus en plus clair que de **nombreuses observations ne peuvent être expliquées par la mécanique classique.**
- Spectre atomique de l'hydrogène : pourquoi y a-t-il des raies spectrales ? Cette question est restée une grande énigme.



## 1B.1 Rayonnement, quanta et photons

### Expérience du corps noir

- La nature du rayonnement électromagnétique a été étudiée en chauffant des objets :
- Observations **qualitatives** :
- **Incandescence** : si un objet est chauffé à des températures suffisamment élevées, il commence à briller.
- Si la température est augmentée, la couleur de la lumière passe du **rouge** à **l'orange**, au **jaune** et au **blanc**.
- Évaluations **quantitatives** : mesure de l'intensité de ce rayonnement à chaque longueur d'onde et répétition des expériences à différentes températures.



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Qu'est-ce que le rayonnement du corps noir ?

- Un corps noir est un objet idéalisé qui **absorbe toutes les radiations** (lumière, chaleur, etc.) **qui tombent** sur lui et ne réfléchit ni ne transmet aucune de ces énergies. Il apparaît **complètement noir** lorsqu'il est froid parce qu'il ne reflète aucune lumière.
- Cependant, un corps noir ne se contente pas d'absorber de l'énergie - il **émet également un rayonnement** lorsqu'il devient chaud. Ce rayonnement émis dépend uniquement de la **température** du corps noir, et non de sa matière ou de sa forme. C'est ce qu'on appelle **le rayonnement du corps noir**.
- Le concept de rayonnement du corps noir peut sembler étrange car il ne se comporte pas exactement comme les autres objets que nous rencontrons quotidiennement. **La plupart des objets réfléchissent ou diffusent une partie de la lumière** (c'est pourquoi nous les voyons), ce qui n'est pas le cas d'un corps noir parfait.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Objets de la vie quotidienne pour illustrer le rayonnement du corps noir



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Expérience sur le corps noir

- Objet chaud = "corps noir"
- **Un corps noir émet et absorbe de la lumière sans privilégier certaines longueurs d'onde.**
- Ses atomes et leurs électrons se comportent collectivement, de nombreuses transitions se chevauchent en énergie.
- La figure 1.B1 montre l'intensité du rayonnement d'un corps noir pour une gamme de températures.

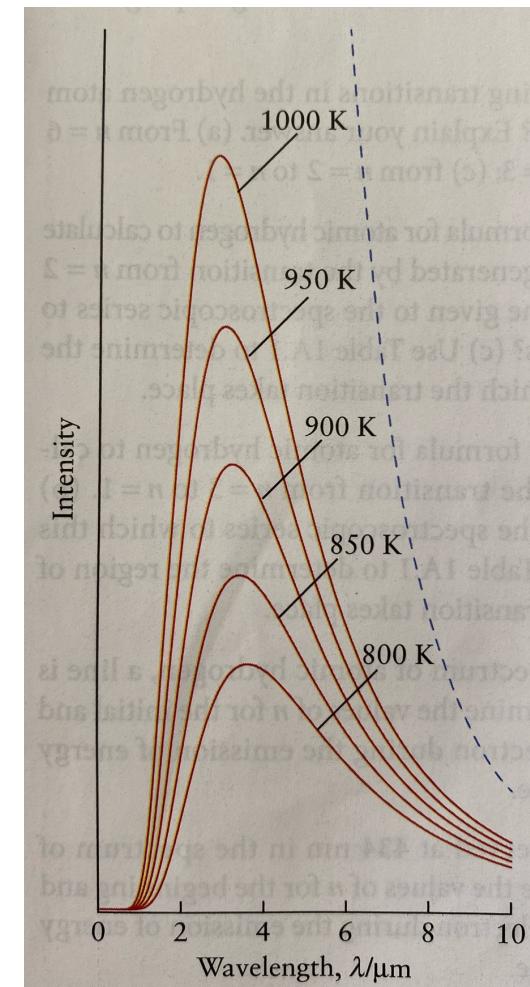


Figure 1.B1

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Remarques

- Plus  $T$  est élevé, plus la longueur d'onde au maximum est courte.
- Plus  $T$  est élevé, plus l'émission est intense : L'objet brille d'autant plus qu'il est chaud.
- **Pas de raies discrètes** comme dans le spectre atomique de l'hydrogène.

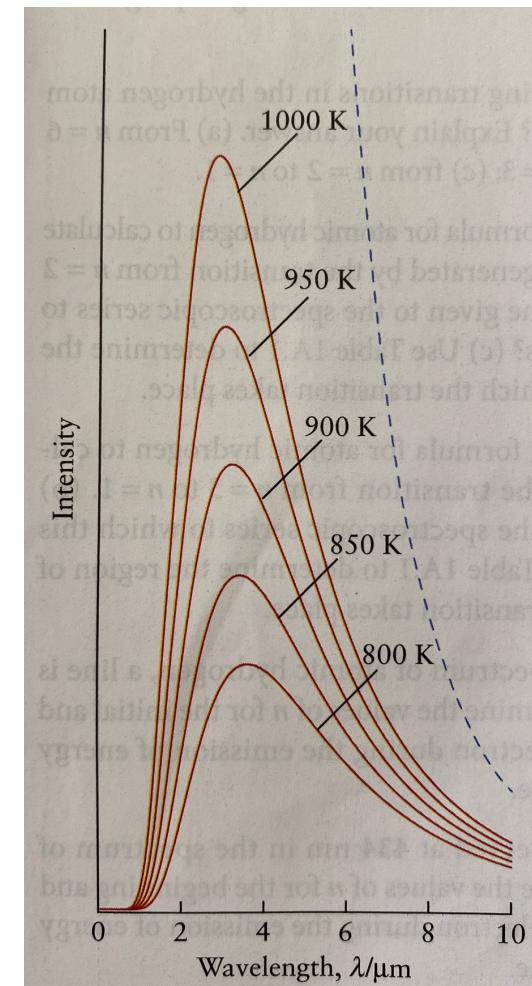


Figure 1.B1

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

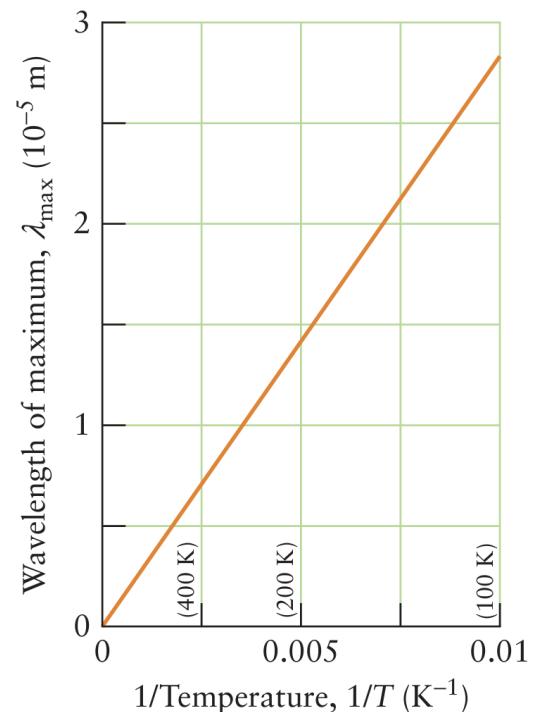
### Loi de Wien

- En 1893, Wilhelm Wien a découvert :
- la longueur d'onde correspondant à l'intensité maximale,  $\lambda_{max}$ , est inversement proportionnelle à la température absolue,  $T$
- Lorsque  $T$  augmente, la longueur d'onde de l'intensité maximale diminue.

$$T\lambda_{max} = \text{constant}$$

- Valeur empirique de la constante : 2.9 mm K

Figure 1.B2



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.1 : Détermination des températures à partir du rayonnement du corps noir

Quelle est la température de la surface du soleil, en supposant que le soleil peut être considéré comme un corps noir ? L'intensité maximale du rayonnement solaire se produit à 490 nm.

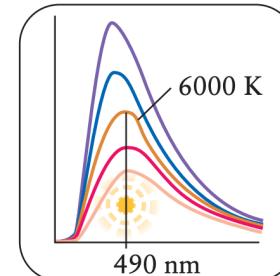
**Anticipate** We should be aware that objects glowing white hot are at temperatures of several thousand degrees.

**PLAN** Use Wien's law in the form  $T = \text{constant}/\lambda_{\max}$ .

#### SOLVE

From  $T = \text{constant}/\lambda_{\max}$ ,

$$T = \frac{\frac{2.9}{4.90} \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{490 \text{ nm}} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{4.90 \times 10^{-7}} \text{ K} = 5.9 \times 10^3 \text{ K}$$



**Evaluate** The surface temperature of the Sun is about 5900 K, in accord with our expectation.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.1 : Détermination des températures à partir du rayonnement du corps noir

Quelle est la température de la surface du soleil, en supposant que le soleil peut être considéré comme un corps noir ? L'intensité maximale du rayonnement solaire se produit à 490 nm.

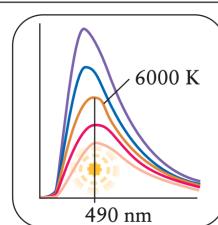
**Anticipate** We should be aware that objects glowing white hot are at temperatures of several thousand degrees.

**PLAN** Use Wien's law in the form  $T = \text{constant}/\lambda_{\max}$ .

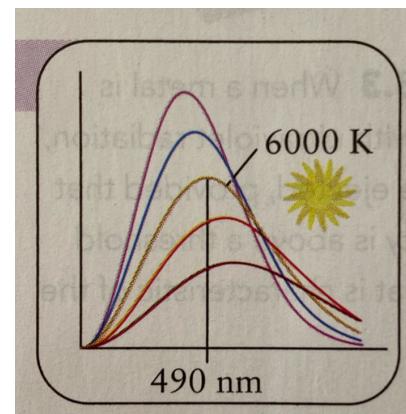
**SOLVE**

From  $T = \text{constant}/\lambda_{\max}$ ,

$$T = \frac{\overbrace{2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}^{2.9 \text{ mm}}}{\underbrace{4.90 \times 10^{-7} \text{ m}}_{490 \text{ nm}}} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{4.90 \times 10^{-7}} \text{ K} = 5.9 \times 10^3 \text{ K}$$



**Evaluate** The surface temperature of the Sun is about 5900 K, in accord with our expectation.



Note : le livre le plus récent contient des chiffres mis à jour qui sont parfois utiles. Si c'est le cas, je les afficherai sous forme d'images sur les diapositives.

Trouvez la température nécessaire pour qu'un corps noir émette un rayonnement UV d'une longueur d'onde de 260 nm.

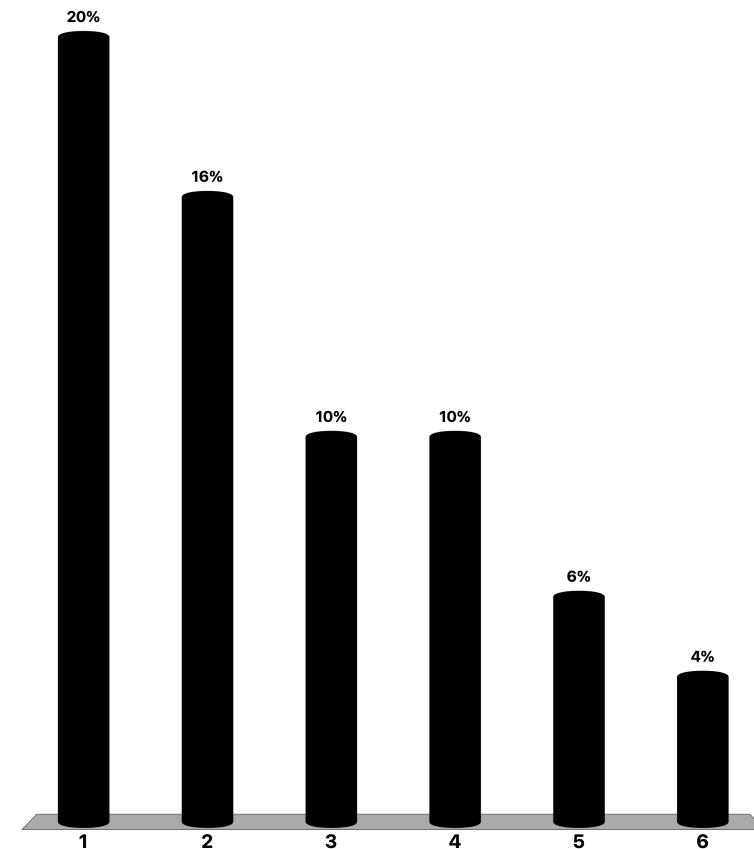
Unités : K.

Rank	Responses
1	11153
2	11154
3	11000
4	11200
5	11153.84
6	1115

Values: 11000

Value Matches: 5

ID de la session: 252032



# Réponse partie I

Pour connaître la température nécessaire pour qu'un corps noir émette un **rayonnement UV** d'une longueur d'onde de **260 nm**, on peut utiliser la **loi de Wien**, qui relie la température d'un corps noir à la longueur d'onde du pic d'émission :

$$T\lambda_{max} = \text{constant}$$

**Étape 1 : Convertir la longueur d'onde en mètres:**

$$\lambda_{max} = 260 \text{ nm} = 260 \times 10^{-9} \text{ m} = 2.60 \times 10^{-7} \text{ m}$$

**Étape 2 : Réarranger la loi de Wien pour résoudre la T :**

$$T = \text{constant} / \lambda_{max}$$

Remplacer les valeurs :

$$T = \frac{2.9 \times 10^{-3} \text{ m K}}{2.60 \times 10^{-7} \text{ m}} = 1.1 \times 10^4 \text{ K}$$

**Réponse finale :**

La température nécessaire pour qu'un corps noir émette un rayonnement UV à **260 nm** est d'environ **11 000 K**.

## Réponse partie II : cette température est-elle celle observée sur le soleil ?

Oui, **11'000 K** est une température que l'on peut observer dans certaines régions du Soleil, bien qu'elle soit supérieure à la température de surface du Soleil.

La **température de surface** (ou **photosphère**) du Soleil est d'environ **5'500 K**, ce qui émet principalement de la lumière visible et un peu de rayonnement ultraviolet (UV) et infrarouge.

Cependant, la **couronne** (la couche la plus externe de l'atmosphère du Soleil) a des températures allant d'environ **1 million K à 3 millions K**. Cette couche émet un rayonnement UV et des **rayons X** extrêmes en raison de sa température élevée, dépassant de loin la température requise pour le rayonnement UV dans la gamme des 260 nm.

Ainsi, alors que la **surface** du Soleil est plus froide que 11 000 K, la **couronne** atteint des températures bien supérieures, et le rayonnement UV constitue en effet une partie importante du spectre d'émission du Soleil, en particulier dans le domaine des **UV lointains**.

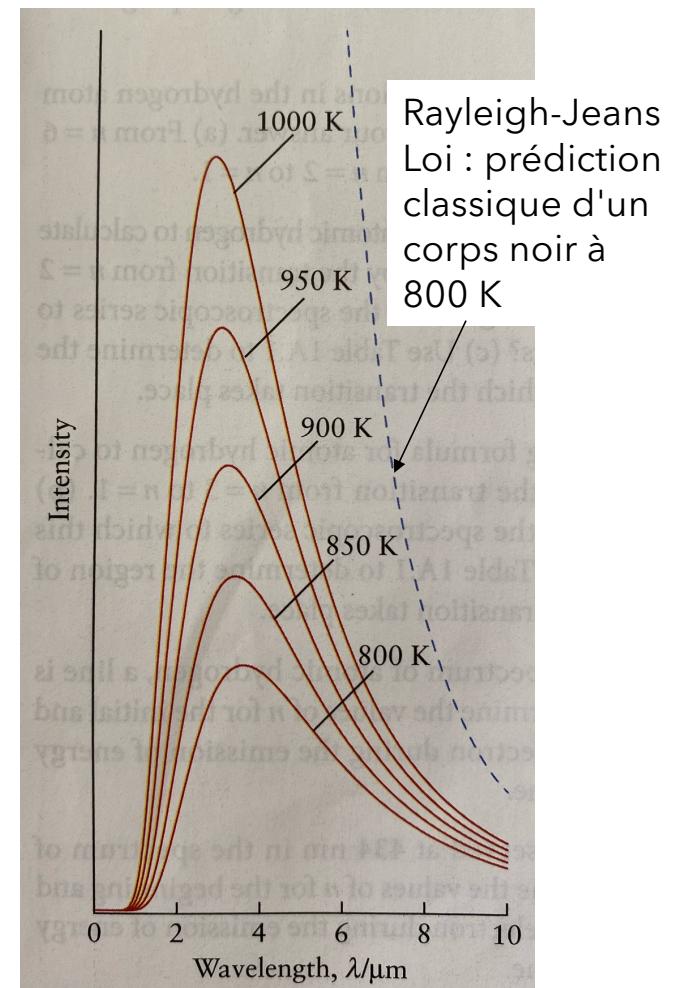
## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### La catastrophe de l'ultraviolet

L'observation de la figure 1.B1 est en contradiction avec la physique classique (loi de Rayleigh-Jeans), qui prédit :

- Tout corps chaud devrait émettre un rayonnement ultraviolet intense et même des rayons X et  $\gamma$  (gamma).
- Un objet chaud dévasterait la campagne avec des rayonnements à haute fréquence.
- Le corps humain à 37 °C brillerait dans l'obscurité.

**De toute évidence, une nouvelle théorie s'imposait.**



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### La catastrophe de l'ultraviolet



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

**La réponse**

L'énergie est quantifiée !

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### L'énergie est transférée sous forme de quanta

- En 1900, Max Planck a proposé que l'énergie soit échangée entre la matière et le rayonnement sous **forme de quanta, ou paquets, d'énergie**.
- Une particule chargée oscillant à une fréquence  $\nu$  peut échanger de l'énergie,  $E$ , avec son environnement en générant ou en absorbant un rayonnement électromagnétique uniquement sous forme de paquets discrets d'énergie de magnitude

$$E = h\nu$$

### Équation de Planck ou relation de Planck-Einstein

- La constante  $h$  est appelée constante de Planck. ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ )
- **Interprétation :** Si l'atome oscillant libère un paquet d'énergie de magnitude  $E$  dans l'environnement, la fréquence de rayonnement  $\nu = E/h$  sera détectée.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Pourquoi la catastrophe de l'ultraviolet est évitée

- À basse température, il n'y a **pas assez d'énergie disponible pour stimuler les oscillations à haute fréquence**, de sorte que l'objet ne peut pas générer de rayonnement UV.
- Par conséquent, les courbes d'intensité de la figure 1B.1 **s'estompent aux hautes fréquences** (courtes longueurs d'onde).
- L'hypothèse de Planck correspondait aussi quantitativement aux observations expérimentales.
- Il s'agit néanmoins d'une nouvelle hypothèse révolutionnaire :

**Des preuves supplémentaires sont nécessaires.**

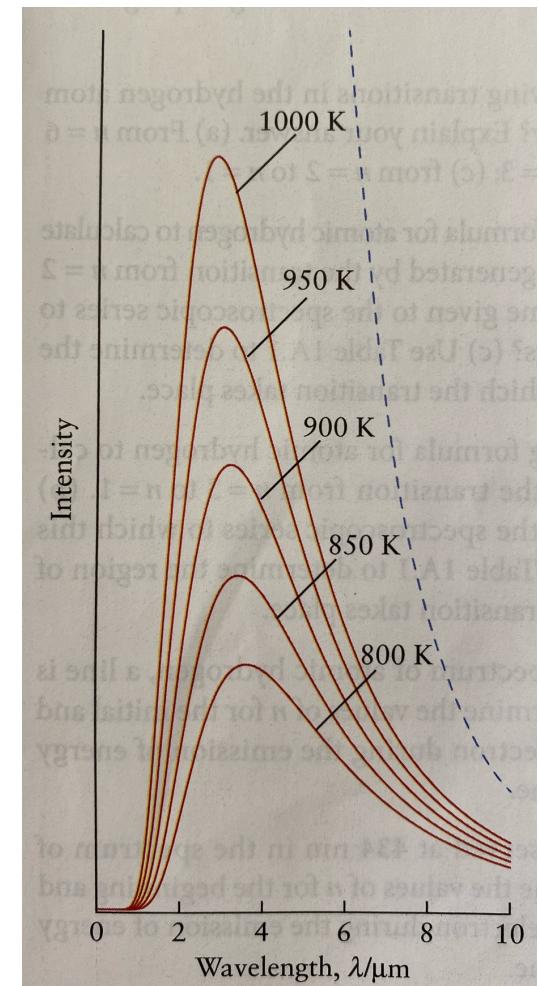


Figure 1.B1

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Pourquoi le chevauchement distinct des transitions est-il utile dans le cas du rayonnement du corps noir ?

Contrairement aux **lignes spectrales discrètes** observées dans l'atome d'hydrogène (qui correspondent à des transitions électroniques spécifiques entre les niveaux d'énergie), le rayonnement des corps noirs a un **spectre continu**. Cela signifie qu'au lieu d'émettre de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, les corps noirs émettent des rayonnements dans une large gamme de longueurs d'onde. Voici pourquoi cela est utile :

#### 1. Emission sur une gamme continue de longueurs d'onde :

Dans le rayonnement du corps noir, la lumière émise couvre une **large gamme de longueurs d'onde** allant de l'infrarouge à la lumière visible (et au-delà), en fonction de la température. Les corps noirs sont donc utiles pour étudier le **rayonnement thermique** sur une gamme d'énergies plutôt que sur des transitions énergétiques spécifiques.

#### 2. Pas de lignes spectrales = plus simple d'étudier le rayonnement thermique :

1. Comme il n'y a **pas de lignes spectrales distinctes** (comme dans le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène), l'étude du rayonnement du corps noir se concentre sur la **distribution globale de l'énergie** à travers différentes longueurs d'onde, ce qui est beaucoup plus simple à modéliser pour des systèmes idéalisés.
2. Cette distribution continue est plus facile à comparer à des objets réels tels que les étoiles ou les métaux chauffés, qui ne présentent pas de lignes spectrales distinctes comme les gaz.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Résumé : Pourquoi le rayonnement du corps noir est-il important ?

La compréhension du rayonnement du corps noir a été cruciale au début des années 1900, car elle a conduit au développement de **la théorie quantique**. La physique classique ne pouvait pas expliquer pourquoi les corps noirs se comportaient comme ils le faisaient (cet échec a été appelé **la catastrophe de l'ultraviolet**). Ce n'est que lorsque le physicien **Max Planck** a proposé que l'énergie soit **quantifiée** (qu'elle se présente sous forme de paquets discrets, ou « quanta ») que les scientifiques ont pu expliquer correctement le rayonnement du corps noir. Cette découverte a ouvert la voie à la mécanique quantique moderne !

# Quel est l'intérêt de l'expérience du corps noir ?

(Plusieurs réponses correctes possibles!)

- A. Elle a montré que **la théorie classique du rayonnement était insuffisante** pour expliquer la distribution d'énergie du rayonnement émis, en particulier dans le domaine de l'ultraviolet.
- B. Elle a démontré que l'énergie est émise en **paquets discrets (quanta)**, ce qui a conduit au développement de la théorie quantique.
- C. Elle a apporté la preuve que la lumière se comporte uniquement **comme une onde** et n'a pas les propriétés d'une particule.
- D. Elle a contribué à résoudre la "**catastrophe ultraviolette**" en introduisant l'idée de niveaux d'énergie quantifiés.

**ID de la session : 139250**

# Explication

- A) est **correcte** car l'expérience du rayonnement du corps noir a révélé **l'incapacité de la physique classique** (en particulier, la loi de Rayleigh-Jeans) à prédire la distribution de l'énergie à des longueurs d'onde plus courtes, en particulier dans la gamme des ultraviolets, ce qui a conduit à **la catastrophe des ultraviolets**.
- B) est **correcte** car **l'explication de Max Planck** sur le rayonnement du corps noir a montré que l'énergie est émise en **paquets discrets (quanta)**, ce qui a conduit à la fondation de **la théorie quantique**.
- C) est **incorrect** car l'expérience du corps noir a permis de démontrer **les propriétés particulières** de l'énergie (quanta), et non que la lumière se comporte uniquement comme une onde. En fait, la quantification de l'énergie était une étape vers la compréhension de **la dualité onde-particule**.
- D) est **correcte** car l'introduction par Planck de **l'énergie quantifiée** a permis d'expliquer pourquoi la physique classique prédisait une quantité infinie d'énergie à haute fréquence et de résoudre **la catastrophe de l'ultraviolet**.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### L'effet photoélectrique

- L'effet photoélectrique a apporté **d'autres preuves**
- Des électrons sont éjectés d'un métal lorsqu'il est exposé à un rayonnement UV.
- Ce qui a été observé :
  1. Aucun électron n'est éjecté si le rayonnement n'a pas **une fréquence supérieure à une certaine** valeur seuil caractéristique du métal.
  2. Les électrons sont **éjectés immédiatement**, quelle que soit l'intensité du rayonnement.
  3. **L'énergie cinétique** des électrons éjectés augmente linéairement avec la fréquence du rayonnement incident.

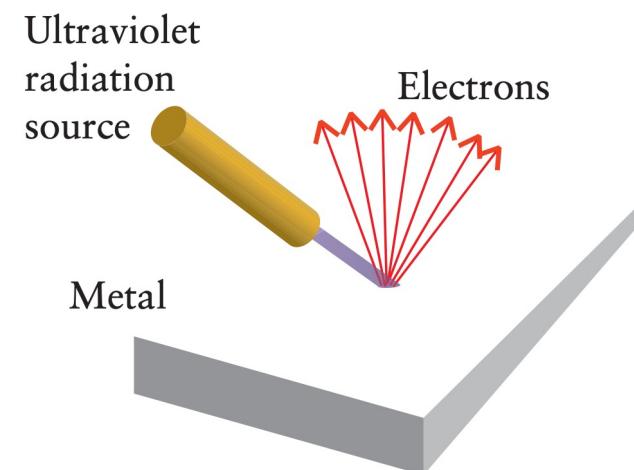


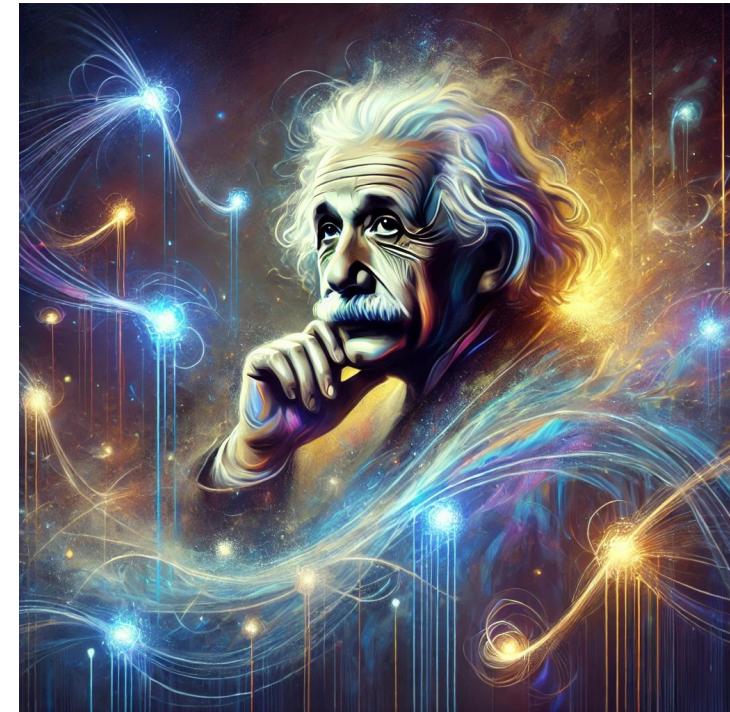
Figure 1.B3

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Le photon

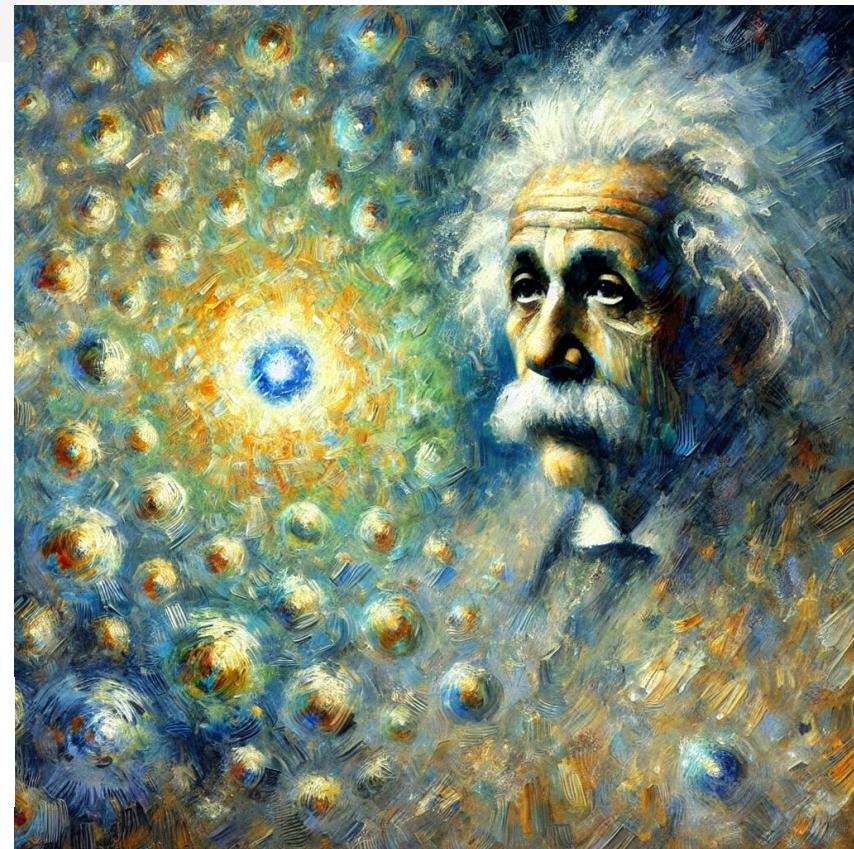
Albert Einstein a expliqué ces observations :

- Il a proposé que le rayonnement électromagnétique soit constitué de particules, appelées par la suite **photons**.
- Un photon est un paquet d'énergie.**
- L'énergie d'un seul photon est liée à la fréquence du rayonnement par l'équation  $E=h\nu$ .
- Par exemple, les photons UV ont plus d'énergie que les photons de la lumière visible.
- Un faisceau de lumière rouge : un flux de photons ayant chacun la même énergie.
- Un faisceau de lumière jaune : un flux de photons ayant chacun la même énergie et une énergie supérieure à celle de la lumière rouge.
- Distinction importante:** l'intensité du rayonnement indique le nombre de photons présents. L'équation  $E=h\nu$  détermine l'énergie de chaque photon.



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

can you make albert einstein and the photon in the style of an artist  
at the time that he liked



Albert Einstein greatly admired artists like Paul Cézanne and was fond of impressionism and post-impressionism. For this version, I can blend Einstein's connection with photons into a Cézanne-inspired style, featuring bold, expressive brushstrokes and subtle transitions between colors.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

could you paint the ultraviolet catastrophe in the style of cezanne



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Le photon

Radiation type	Energy of photon/ $(10^{-19} \text{ J})$	Energy per mole of photons/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	Energy of photon/eV
X-rays and $\gamma$ -rays	$\geq 1.0 \times 10^3$	$\geq 6.0 \times 10^4$	$\geq 6.2 \times 10^2$
ultraviolet	5.7	340	3.6
visible light			
violet	4.7	280	2.9
blue	4.2	250	2.6
green	3.8	230	2.4
yellow	3.4	200	2.1
orange	3.2	190	2.0
red	2.8	170	1.8
infrared	2.0	120	1.3
microwaves and radio waves	$\leq 2.0 \times 10^{-3}$	$\leq 0.12$	$\leq 1.3 \times 10^{-3}$

\* Values are to 2 sf.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.2 : Calculer l'énergie d'un photon

Quelle est (a) l'énergie d'un photon unique de lumière bleue de fréquence  $6.4 \times 10^{14}$  Hz; (b) l'énergie par mole de photons, en joules par mole, de cette fréquence ?

#### SOLVE

(a) From  $E(1 \text{ photon}) = h\nu$ ,

$$E(1 \text{ photon}) = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \times (6.4 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 4.2 \times 10^{-19} \text{ J}$$

(b) From  $E(\text{per mole of photons}) = N_A E$ ,

$$\begin{aligned} E(\text{per mole of photons}) &= (6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \times (4.2 \times 10^{-19} \text{ J}) \\ &= 2.5 \times 10^5 \text{ J mol}^{-1}, \text{ or } 250 \text{ kJ mol}^{-1} \end{aligned}$$

To derive the energy in part (a), we have used  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ , so  $\text{J}\cdot\text{s} \times \text{Hz} = \text{J}\cdot\text{s} \times \text{s}^{-1} = \text{J}$ .

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### La fonction de travail d'un métal

- L'énergie nécessaire pour retirer un électron d'un métal est appelée **fonction de travail**,  $\Phi$  (phi majuscule).
- Communément exprimée en eV (**électronvolt**), elle est définie comme l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré à travers une différence de potentiel de 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Si l'énergie d'un photon est inférieure à l'énergie nécessaire pour arracher un électron à un métal, l'électron ne sera pas éjecté, quelle que soit l'intensité du rayonnement.
- Si l'énergie du photon,  $h\nu$ , est supérieure à  $\Phi$ , un électron est éjecté avec une énergie cinétique  $E_k$  égale à la différence entre l'énergie du photon entrant et la fonction de travail:

$$E_k = h\nu - \Phi$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2$$

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = h\nu - \Phi$$

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### L'équation photoélectrique d'Einstein

$$\frac{1}{2}m_e v^2 = h\nu - \Phi$$

Kinetic energy of ejected electron      Energy supplied by photon      Energy required to eject photon

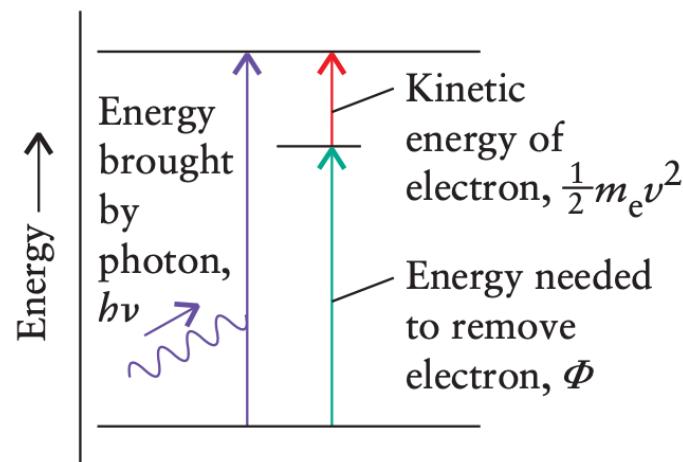
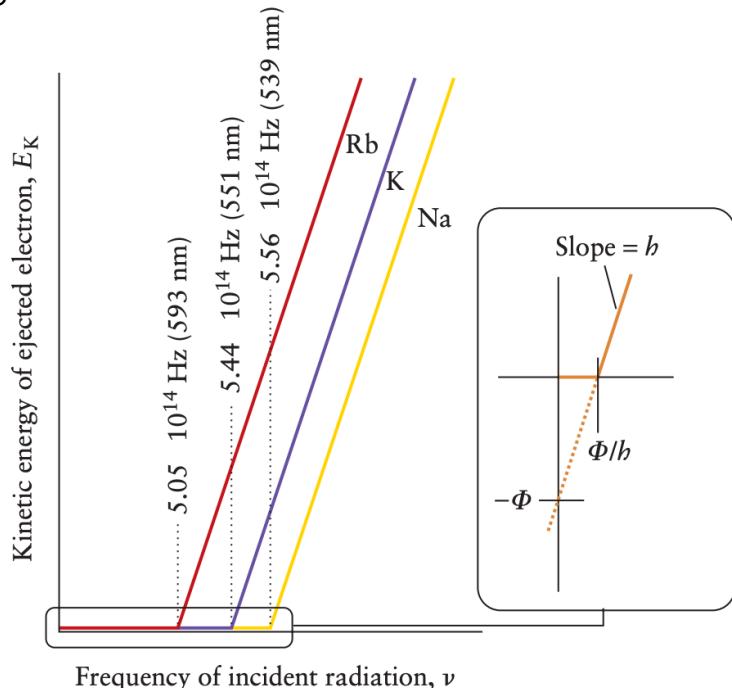


Figure 1.B4

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Que vous apprend cette équation ?

Figure 1.B5



- L'énergie cinétique d'un électron éjecté varie linéairement avec la fréquence.
- Tracé de l'énergie cinétique en fonction de la fréquence :
  - Ligne droite de pente  $h$ , **identique** pour tous les métaux
  - Interception extrapolée avec l'axe vertical à  $-\Phi$ , **diférente** pour chaque métal
  - L'ordonnée à l'axe horizontal correspond à l'énergie cinétique nulle de l'électron éjecté :  $\Phi/h$  dans chaque cas.

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

**La théorie d'Einstein fournit l'interprétation suivante**

1. Un électron ne peut être expulsé du métal que s'il est frappé par un photon dont **l'énergie est au moins égale à la fonction de travail,  $\Phi$** . Par conséquent, la fréquence du rayonnement doit avoir une certaine valeur minimale, qui dépend nécessairement de la fonction de travail du métal.
2. Si un photon a une énergie supérieure à la fonction de travail, il peut provoquer **l'éjection immédiate** d'un électron.
- 3. L'énergie cinétique** de l'électron éjecté du métal augmente linéairement avec la fréquence du rayonnement incident.

Imaginez que vous éclairez une surface métallique pour éjecter des électrons. Le métal a une fonction de travail de 5 eV. Votre source lumineuse produit des photons de 4 eV. Que se passe-t-il si vous envoyez un faisceau très intense de la source A (avec un grand nombre de photons) sur la surface métallique ?

- A. Le faisceau intense finira par éjecter des électrons car **l'énergie totale des nombreux photons s'élève à** plus de 5 eV.
- B. **Aucun électron ne sera éjecté parce que les photons individuels de la source A n'ont pas assez d'énergie pour surmonter la fonction de travail.**
- C. Les électrons seront éjectés, mais **lentement**, car l'énergie des photons individuels est légèrement inférieure à la fonction de travail.
- D. Les électrons ne seront éjectés que si **l'intensité totale de la lumière** est suffisamment élevée, quelle que soit l'énergie des photons.

**ID de la session: 139250**

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.3: Analyse de l'effet photoélectrique

---

Vous développez **un détecteur de rayonnement pour un vaisseau spatial.**

Vous utilisez une fine couche de potassium métallique pour détecter certaines gammes de rayonnements électromagnétiques. Vous devez faire des estimations des propriétés physiques impliquées. Dans un test, la vitesse d'un électron émis par un photon à la surface d'un échantillon de potassium est de  $668 \text{ km s}^{-1}$ .

- a) Quelle est l'énergie cinétique de l'électron éjecté ?
- (b) Le travail du potassium est de 2,29 eV, ce qui correspond à  $3.67 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Quelle est la longueur d'onde du rayonnement qui a provoqué la photoéjection de l'électron ?
- (c) Quelle est la plus grande longueur d'onde du rayonnement électromagnétique qui pourrait éjecter des électrons du potassium ? potassium?

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.3 : Analyse de l'effet photoélectrique

---

(a) Quelle est l'énergie cinétique de l'électron éjecté ?

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Example 1B.3: Analyse de l'effet photoélectrique

---

(a) Quelle est l'énergie cinétique de l'électron éjecté ?

---

(a) From  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ,

---

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \times (9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (6.68 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \\ &= 2.03 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Example 1B.3: Analyse de l'effet photoélectrique

(b) La fonction de travail du potassium est 2.29 eV, correspondant à  $3.67 \times 10^{-19}$  J. Quelle est la longueur d'onde du rayonnement qui a provoqué la photoéjection de l'électron?

(b) Convert the work function from electronvolts to joules.

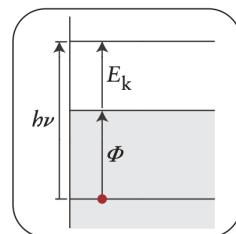
$$2.29 \text{ eV} \times \frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3.67 \times 10^{-19} \text{ J}$$

From  $\frac{1}{2}m_e\nu^2 = h\nu - \Phi$ ,  $h\nu = \Phi + \frac{1}{2}m_e\nu^2 = \Phi + E_k$ ,

$$h\nu = 3.67 \times 10^{-19} \text{ J} + 2.03 \times 10^{-19} \text{ J} = 5.70 \times 10^{-19} \text{ J}$$

so

$$\nu = \frac{5.70 \times 10^{-19} \text{ J}}{h}$$



Now use  $\lambda = c/\nu$ :

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}) \times (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{5.70 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 3.49 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \text{or} \quad 349 \text{ nm}\end{aligned}$$

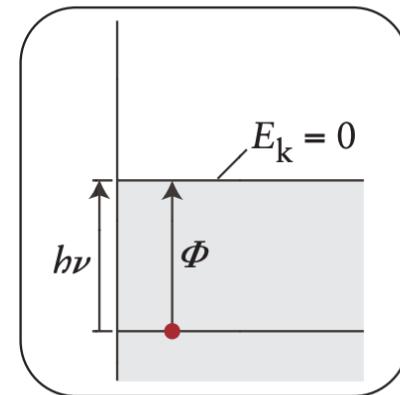
## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Exemple 1B.3 : Analyse de l'effet photoélectrique

(c) Quelle est la plus grande longueur d'onde du rayonnement électromagnétique qui pourrait éjecter des électrons du potassium ?

(c) To find the longest wavelength of radiation able to eject an electron, set  $E_k = 0$  in Eq. 5, so  $h\nu = \Phi$ , and therefore  $\lambda = ch/\Phi$ .

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}) \times (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{3.67 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 5.42 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \text{or} \quad 542 \text{ nm}\end{aligned}$$



## 1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

### Résumé

Les observations expérimentales sur le rayonnement du corps noir ont permis de confirmer l'hypothèse de Planck sur la quantification de l'énergie. L'effet photoélectrique apporte la preuve de la nature particulaire du rayonnement électromagnétique et de l'existence des photons.

# Dualité onde-particule

Sujet 1B.2



## 1B.2 Dualité onde-particule

### L'expérience de la double fente

- Effet photoélectrique → les photons se comportent comme des particules
- Avant : la nature ondulatoire du rayonnement électromagnétique était bien étayée.
- Preuve la plus convaincante de la nature ondulatoire: **la diffraction, la configuration des intensités élevées et faibles générée par un objet sur le chemin d'un rayon de lumière.**

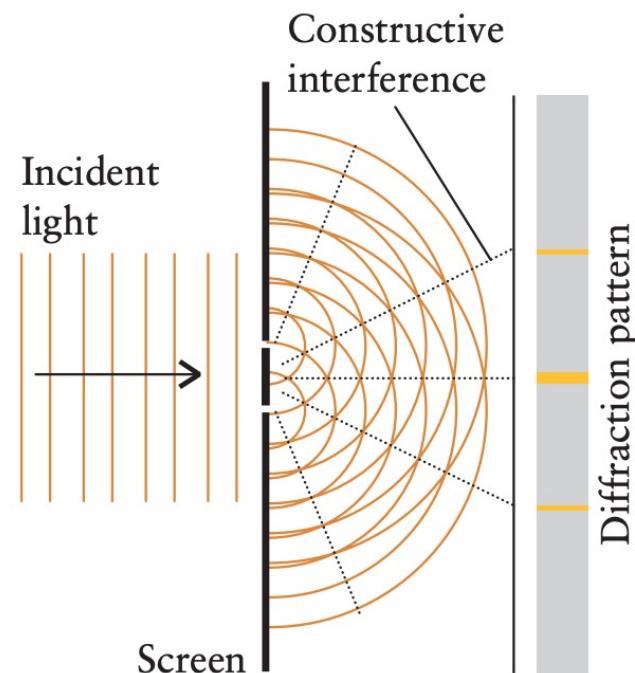


Figure 1.B6

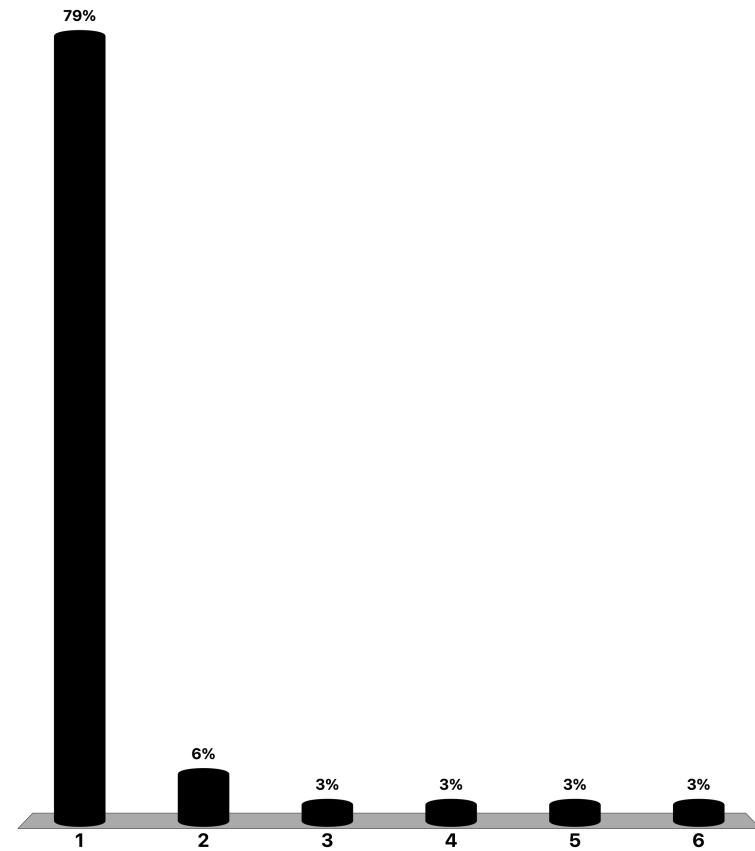
Combien de bandes devriez-vous voir sur l'écran si la lumière se comportait comme des particules dans cette expérience ?

Rank	Responses
1	2
2	3
3	0
4	5
5	69
6	106

Values: 2

Value Matches: 26

ID de la session: 139250



## 1B.2 Dualité onde-particule

### L'expérience de la double fente

- Devoirs : regarder Dr. Quantum (lien sur Moodle)



Dr. Quantum - Double slit experiment

## 1B.2 Dualité onde-particule

### Interférences constructives et destructives

(a) **Interférence constructive:** si les crêtes coïncident, l'amplitude de l'onde (sa hauteur) est augmentée.

(b) **Interférence destructive:** si les crêtes d'une onde coïncident avec les creux d'une autre onde, l'amplitude de l'onde est diminuée.

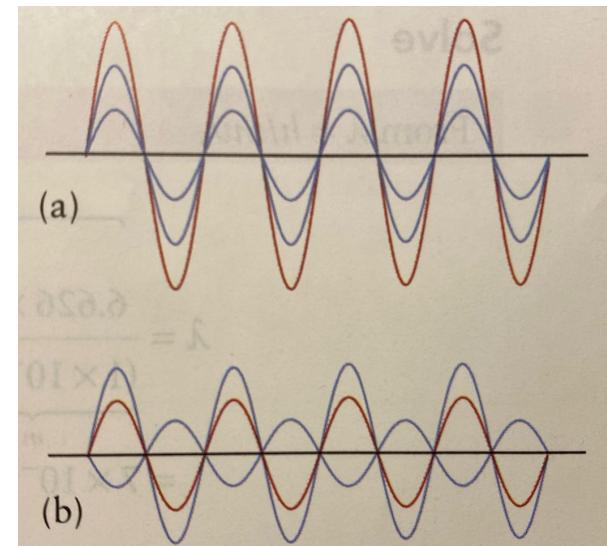


Figure 1.B7

## 1B.2 Dualité onde-particule

### Onde ou particule ?

Effet photoélectrique → particule

Diffraction → onde

**Cette énigme est au cœur de la physique moderne.**

Les expériences nous obligent à accepter la dualité onde-particule du rayonnement électromagnétique, dans laquelle les concepts d'ondes et de particules se confondent :

- Dans le modèle ondulatoire, l'intensité du rayonnement est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde.
- Dans le modèle particulaire, l'intensité est proportionnelle au nombre de photons présents à chaque instant

## 1B.2 Dualité onde-particule

### La matière a des propriétés ondulatoires : La relation de Broglie

Si le rayonnement électromagnétique, longtemps considéré comme une onde, possède un caractère dual, **se pourrait-il que la matière**, considérée comme constituée de particules, **possède également des propriétés ondulatoires?**

En 1924, **Louis de Broglie** propose que toutes les particules soient considérées comme ayant des propriétés ondulatoires.

Il suggère que la longueur d'onde associée à une **«onde de matière»** est inversement proportionnelle à la masse,  $m$ , et à la vitesse,  $v$ , de la particule, et que

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Avec  $mv = p$ , la quantité de mouvement linéaire:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

## 1B.2 Dualité onde-particule

### Exemple 1B.4 : Calculer la longueur d'onde d'une particule

---

Supposons maintenant que vous soyez de Broglie et que vous veniez de mettre au point votre formule. Un ami vous fait remarquer que le monde n'est manifestement pas ondulatoire. Peut-être devriez-vous vérifier si votre formule a des conséquences inquiétantes pour les objets de tous les jours.

Calculez la longueur d'onde d'une particule de masse 1 g se déplaçant à  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

## 1B.2 Dualité onde-particule

### Exemple 1B.4 : Calculer la longueur d'onde d'une particule

---

#### SOLVE

From  $\lambda = h/mv$ ,

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(1 \times 10^{-3} \text{ kg}) \times (1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{s}}{1 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}} \\ &= 7 \times 10^{-31} \text{ m}\end{aligned}$$

**Evaluate** As expected, this wavelength is very—in fact, undetectably—small; the same is true for any macroscopic (visible) object traveling at normal speeds.

## 1B.2 Dualité onde-particule

### Résumé

Les électrons (et la matière en général) et le rayonnement ont des propriétés ondulatoires et particulières.

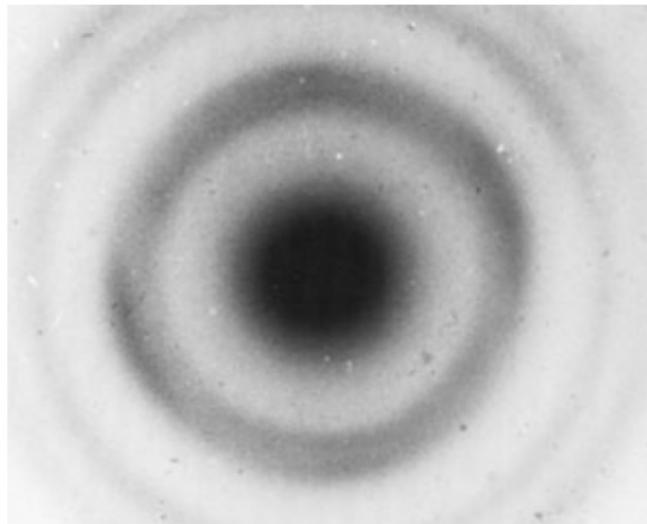


Figure 1.B8

## Citations d'étudiants

"J'AIME LA THÉORIE ET LA PRATIQUE".

La mécanique quantique fait le lien entre **la théorie** (comme la dualité onde-particule et l'effet photoélectrique) et les **expériences pratiques** qui vérifient le comportement des particules et des ondes.

"C'EST ASSEZ FOU".

Les phénomènes quantiques tels que **la dualité onde-particule** et **l'effet photoélectrique** sont souvent décrits comme « époustouflants » ou « malades » parce qu'ils défient l'intuition classique, introduisant des comportements surprenants et non déterministes qui modifient fondamentalement notre compréhension de la lumière et de la matière.

# Le Principe d'incertitude

Sujet 1B.3



## 1B.3 Le principe d'incertitude

**Les électrons n'ont PAS de trajectoire définie.**

- **Mécanique classique : une particule a une trajectoire ou un chemin défini:**
  - L'emplacement et la quantité de mouvement linéaire (vitesse, direction du mouvement) sont connus en chaque point.
- Les électrons ont des propriétés ondulatoires et particulières.
  - Il est impossible de spécifier l'emplacement précis d'une particule si elle se comporte comme une onde.
- La dualité onde-particule nie la possibilité de spécifier l'emplacement si la quantité de mouvement linéaire est connue, et il est donc impossible de spécifier exactement la trajectoire d'une particule.
- **L'incertitude est négligeable pour les particules lourdes, mais pour les particules subatomiques, elle peut être énorme.**

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Le principe d'incertitude d'Heisenberg

- L'impossibilité de connaître la position précise si la quantité de mouvement linéaire est connue avec précision est un aspect de **la complémentarité** de la position et de la quantité de mouvement - si l'une des propriétés est connue, l'autre ne peut l'être simultanément.
- Le principe d'incertitude d'Heisenberg, formulé en 1927 par Werner Heisenberg, exprime cette complémentarité de manière quantitative.
- Il stipule que si la position d'une particule est connue avec une marge d'incertitude de  $\Delta x$ , alors la quantité de mouvement linéaire,  $p$ , parallèle à l'axe des  $x$  ne peut être connue simultanément qu'avec une incertitude  $\Delta p$ , où

$$\Delta p \times \Delta x \geq \frac{1}{2}\hbar$$

- Le symbole  $\hbar$ , qui se lit «h bar», représente  $\frac{h}{2\pi}$ . Sa valeur est de  $1.054 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Une note d'intérêt

Qu'entend-on par «incertitude»  $\Delta X$  dans une propriété  $X$ ?

Formellement, il s'agit de l'«écart-type » de  $X$ , qui est défini comme suit  $\Delta X = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}$  où les crochets indiquent les valeurs moyennes.

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Exemple 1B.5: Utilisation du principe d'incertitude

---

Dans quelle mesure le principe d'incertitude d'Heisenberg affecte-t-il votre capacité à spécifier les propriétés des objets que vous pouvez voir ? Pouvez-vous être sûr de leur emplacement ? Estimez l'incertitude minimale.

- (a) la position d'une bille de masse 1,0 g étant donné que sa vitesse est connue à  $\pm 1,0$  mm/s et (b) la vitesse d'un électron confiné dans un atome.
- (b) la vitesse d'un électron confiné dans un atome d'un diamètre de 200,0 pm.

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Exemple 1B.5: Utilisation du principe d'incertitude

---

**SOLVE** (a) First we convert mass and speed into SI base units. The mass,  $m$ , is  $1.0 \times 10^{-3}$  kg, and the uncertainty in the speed,  $\Delta v$ , is  $2 \times (1.0 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$ . The minimum uncertainty in position,  $\Delta x$ , is then:

From  $\Delta p \Delta x = \frac{1}{2} \hbar$  and  $\Delta p = m \Delta v$ ,

$$m \Delta v \Delta x = \frac{\hbar}{2} \quad \text{or} \quad \Delta x = \frac{\hbar}{2m \Delta v}$$

From  $\Delta x = \hbar / 2m \Delta v$ ,

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{1.054\,57 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2 \times \underbrace{(1.0 \times 10^{-3} \text{ kg})}_{1.0 \text{ g}} \times \underbrace{(2.0 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})}_{2.0 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}}} \\ &= \frac{1.054\,57 \times 10^{-34}}{2 \times 1.0 \times 10^{-3} \times 2.0 \times 10^{-3}} \frac{\text{J}\cdot\text{s}}{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}} \\ &= 2.6 \times 10^{-29} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{s}}{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}} = 2.6 \times 10^{-29} \text{ m} \end{aligned}$$

**Evaluate** As expected, this uncertainty is very small.

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Exemple 1B.5 : Utilisation du principe d'incertitude

(b) The mass of the electron is given inside the back cover; the diameter of the atom is  $200 \times 10^{-12} \text{ m}$ , or  $2.00 \times 10^{-10} \text{ m}$ . The uncertainty in the speed,  $\Delta v$ , is equal to  $\Delta p/m$ :

From  $\Delta p \Delta x = \frac{1}{2} \hbar$  and  $\Delta p = m \Delta v$ ,

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{m} \stackrel{\Delta p = \hbar/2\Delta x}{=} \frac{\hbar}{2m\Delta x}$$

From  $\Delta x = \hbar/2m\Delta v$ ,

$$\begin{aligned}\Delta v &= \frac{1.054\ 57 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2 \times \underbrace{(9.109\ 39 \times 10^{-31} \text{ kg})}_{m_e} \times \underbrace{(2.00 \times 10^{-10} \text{ m})}_{200 \text{ pm}}} \\ &= \frac{1.054\ 57 \times 10^{-34}}{2 \times 9.109\ 39 \times 10^{-31} \times 2.0 \times 10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{m}} \text{ J}\cdot\text{s} \\ &= 2.89 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{s}} = 2.89 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\end{aligned}$$

**Evaluate** As predicted, the uncertainty in the speed of the electron is very large, nearly  $\pm 150 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## 1B.3 Le principe d'incertitude

### Résumé

La position et la quantité de mouvement d'une particule sont complémentaires, c'est-à-dire que la position et la quantité de mouvement ne peuvent pas être connues simultanément avec une précision arbitraire. La relation quantitative entre l'incertitude de chaque mesure est décrite par le principe d'incertitude de Heisenberg.

## Citations d'étudiants

"PARCE QUE J'AIME BREAKING BAD."

"J'ADORE BREAKING BAD".

Walter White adopte le pseudonyme "**Heisenberg**" dans la série. S'il s'agit d'une référence directe à **Werner Heisenberg**, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, ce nom reflète également **l'incertitude morale et personnelle** qui règne dans sa vie. La transformation de Walter White, d'un professeur de chimie aux manières douces en un baron de la drogue impitoyable, incarne cette **incertitude** - à mesure que ses actions deviennent plus extrêmes, sa boussole morale et la prévisibilité de son comportement deviennent plus floues.

## Les compétences que vous avez maîtrisées sont la capacité à

- Utiliser la loi de Wien pour estimer la température d'une source chaude.
- Utiliser la relation  $E=h\nu$  pour calculer l'énergie, la fréquence ou le nombre de photons émis par une source lumineuse.
- Analyser l'effet photoélectrique en termes de travail d'un métal.
- Estimer la longueur d'onde d'une particule dont le moment linéaire est connu.
- Utiliser le principe d'incertitude pour estimer l'incertitude sur la position ou la vitesse d'une particule.

**Résumé : Vous avez vu que tous les concepts classiques ne sont pas applicables aux particules subatomiques, et vous savez maintenant que les concepts d'ondes et de particules se mélangent. Vous avez appris qu'une des conséquences de ce mélange est qu'il est impossible de spécifier la trajectoire d'une particule avec une précision arbitraire.**

# Questions des élèves

## **Qu'arrive-t-il au métal dans l'expérience de l'effet photoélectrique si vous lui enlevez des électrons ?**

Charge positive : Oui, le métal acquiert une charge positive lorsque les électrons sont éjectés par l'effet photoélectrique.

Changement physique : Il n'y a généralement pas de changement physique direct et significatif du métal dans des conditions expérimentales typiques.

Changement chimique : L'effet photoélectrique lui-même n'entraîne aucune modification chimique directe, mais les électrons éjectés et la surface chargée positivement peuvent rendre le métal plus sensible à l'oxydation ou à d'autres réactions chimiques, en fonction de l'environnement.

## **Pour le principe d'incertitude d'Heisenberg, pourquoi n'y a-t-il pas d'incertitude associée à la masse ( $\Delta p = m\Delta v$ )?**

Pour les applications typiques du principe **d'incertitude d'Heisenberg**, la masse est **une propriété fixe et bien définie** de l'objet ou de la particule. Par exemple, la masse d'un électron ou d'une bille ne fluctue pas dans des conditions normales.

Puisque **la masse ne change pas** dans ces scénarios, elle n'a **pas d'incertitude**. Par conséquent, toute l'incertitude de la quantité de mouvement  $\Delta p$  provient de l'incertitude de la vitesse  $\Delta v..$

Définition	Exemple
Il y a <b>absorption</b> lorsqu'un matériau absorbe l'énergie d'une lumière ou d'un autre rayonnement électromagnétique entrant. L'énergie est souvent convertie sous d'autres formes, telles que la chaleur, ou utilisée pour exciter les électrons du matériau à un niveau d'énergie plus élevé.	Lorsque la lumière du soleil frappe une surface noire, celle-ci <b>absorbe</b> la lumière et la transforme en chaleur, ce qui rend la surface chaude.
<b>L'émission</b> est le processus par lequel un matériau libère de l'énergie, souvent sous forme de lumière ou de rayonnement électromagnétique. Cela se produit lorsque les électrons des atomes ou des molécules passent d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau inférieur, libérant ainsi des photons	Un filament métallique chauffé dans une ampoule <b>émet</b> de la lumière visible lorsque les électrons perdent de l'énergie.
Il y a <b>transmission</b> lorsque la lumière ou un autre rayonnement traverse un matériau sans être absorbé ou réfléchi. Le matériau permet au rayonnement de se déplacer à travers lui.	La lumière qui <b>traverse</b> une fenêtre en verre clair est transmise à travers le verre.
On parle de <b>réflexion</b> lorsque la lumière ou un autre rayonnement rebondit sur la surface d'un matériau au lieu d'être absorbé ou transmis. L'angle d'incidence est généralement égal à l'angle de réflexion.	Un miroir <b>réfléchit</b> la lumière, ce qui permet de voir son reflet.

En bref :

**Absorption :** L'énergie est absorbée par un matériau.

**Émission :** Un matériau libère de l'énergie.

**Transmission:** La lumière traverse un matériau.

**Réflexion:** La lumière rebondit sur un matériau.