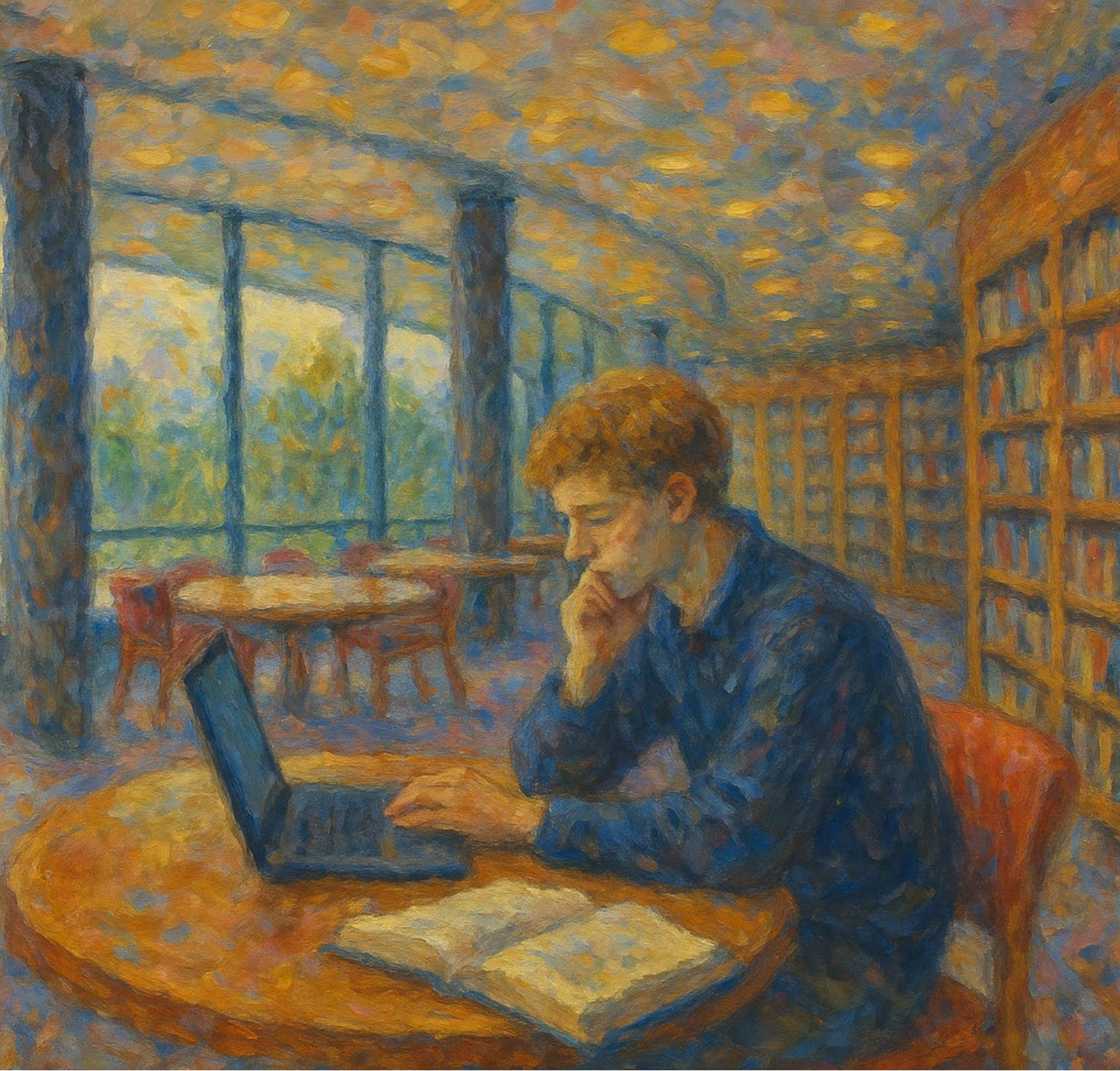




**CH-110 Chimie
Générale Avancée I**

Prof. A. Steinauer
angela.steinauer@epfl.ch



Rappel: comment étudier pour ce cours

- Résoudre les exercices dans le livre en plus de ceux des séries d'exercices hebdomadaires.
- Ne pas perdre du temps à lire ou à étudier les diapositives. Commencer par les exercices et utiliser les diapositives pour trouver le matériel et les formules adéquates.

Source de l'image: ChatGPT
Étudier dans la lumière

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Group											13	14	15	16	17	18			
	1	2											III	IV	V	VI	VII	VIII VIIA	
	IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
Period 1	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1 H hydrogen 1.0079 1s¹</div> <div style="flex-grow: 1; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;"></div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2 He helium 4.00 1s²</div> </div>																		
2	3 Li lithium 6.94 2s ¹	4 Be beryllium 9.01 2s ²											5 B boron 10.81 2s ² 2p ¹	6 C carbon 12.01 2s ² 2p ²	7 N nitrogen 14.01 2s ² 2p ³	8 O oxygen 16.00 2s ² 2p ⁴	9 F fluorine 19.00 2s ² 2p ⁵	10 Ne neon 20.18 2s ² 2p ⁶	
3	11 Na sodium 22.99 3s ¹	12 Mg magnesium 24.31 3s ²	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9	10	11 IB	12 IIB	13 Al aluminum 26.98 3s ² 3p ¹	14 Si silicon 28.09 3s ² 3p ²	15 P phosphorus 30.97 3s ² 3p ³	16 S sulfur 32.06 3s ² 3p ⁴	17 Cl chlorine 35.45 3s ² 3p ⁵	18 Ar argon 39.95 3s ² 3p ⁶	
4	19 K potassium 39.10 4s ¹	20 Ca calcium 40.08 4s ²	21 Sc scandium 44.96 3d ¹ 4s ²	22 Ti titanium 47.87 3d ² 4s ²	23 V vanadium 50.94 3d ³ 4s ²	24 Cr chromium 52.00 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn manganese 54.94 3d ⁵ 4s ²	26 Fe iron 55.84 3d ⁶ 4s ²	27 Co cobalt 58.93 3d ⁷ 4s ²	28 Ni nickel 58.69 3d ⁸ 4s ²	29 Cu copper 63.55 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn zinc 65.41 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga gallium 69.72 4s ² 4p ¹	32 Ge germanium 72.64 4s ² 4p ²	33 As arsenic 74.92 4s ² 4p ³	34 Se selenium 78.96 4s ² 4p ⁴	35 Br bromine 79.90 4s ² 4p ⁵	36 Kr krypton 83.80 4s ² 4p ⁶	
5	37 Rb rubidium 85.47 5s ¹	38 Sr strontium 87.62 5s ²	39 Y yttrium 88.91 4d ¹ 5s ²	40 Zr zirconium 91.22 4d ² 5s ²	41 Nb niobium 92.91 4d ⁴ 5s ¹	42 Mo molybdenum 95.94 4d ⁵ 5s ¹	43 Tc technetium (98) 4d ⁵ 5s ²	44 Ru ruthenium 101.07 4d ⁷ 5s ¹	45 Rh rhodium 102.90 4d ⁸ 5s ¹	46 Pd palladium 106.42 4d ¹⁰	47 Ag silver 107.87 4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd cadmium 112.41 4d ¹⁰ 5s ²	49 In indium 114.82 5s ² 5p ¹	50 Sn tin 118.71 5s ² 5p ²	51 Sb antimony 121.76 5s ² 5p ³	52 Te tellurium 127.60 5s ² 5p ⁴	53 I iodine 126.90 5s ² 5p ⁵	54 Xe xenon 131.29 5s ² 5p ⁶	
6	55 Cs cesium 132.91 6s ¹	56 Ba barium 137.33 6s ²	57 La lanthanum 138.91 5d ¹ 6s ²	72 Hf hafnium 178.49 5d ² 6s ²	73 Ta tantalum 180.95 5d ³ 6s ²	74 W tungsten 183.84 5d ⁴ 6s ²	75 Re rhenium 186.21 5d ⁵ 6s ²	76 Os osmium 190.23 5d ⁶ 6s ²	77 Ir iridium 192.22 5d ⁷ 6s ²	78 Pt platinum 195.08 5d ⁸ 6s ¹	79 Au gold 196.97 5d ¹⁰ 6s ¹	80 Hg mercury 200.59 5d ¹⁰ 6s ²	81 Tl thallium 204.38 6s ² 6p ¹	82 Pb lead 207.2 6s ² 6p ²	83 Bi bismuth 208.98 6s ² 6p ³	84 Po polonium (209) 6s ² 6p ⁴	85 At astatine (210) 6s ² 6p ⁵	86 Rn radon (222) 6s ² 6p ⁶	
7	87 Fr francium (223) 7s ¹	88 Ra radium (226) 7s ²	89 Ac actinium (227) 6d ¹ 7s ²	104 Rf rutherfordium (261) 6d ² 7s ²	105 Db dubnium (262) 6d ³ 7s ²	106 Sg seaborgium (264) 6d ⁴ 7s ²	107 Bh bohrium (264) 6d ⁵ 7s ²	108 Hs hassium (267) 6d ⁶ 7s ²	109 Mt meitnerium (268) 6d ⁷ 7s ²	110 Ds darmstadtium (271) 6d ⁸ 7s ²	111 Rg roentgenium (272) 6d ⁹ 7s ¹	112*	113	114	115	116	117	118	
				<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">58 Ce cerium 140.12 4f¹5d¹6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">59 Pr praseodymium 140.91 4f³6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">60 Nd neodymium 144.24 4f⁴6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">61 Pm promethium (145) 4f⁵6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">62 Sm samarium 150.36 4f⁶6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">63 Eu europium 151.96 4f⁷6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">64 Gd gadolinium 157.25 4f⁷5d¹6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">65 Tb terbium 158.93 4f⁹6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">66 Dy dysprosium 162.50 4f¹⁰6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">67 Ho holmium 164.93 4f¹¹6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">68 Er erbium 167.26 4f¹²6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">69 Tm thulium 168.93 4f¹³6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">70 Yb ytterbium 173.04 4f¹⁴6s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">71 Lu lutetium 174.97 5d¹6s²</div> </div>															
				<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">90 Th thorium 232.04 6d²7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">91 Pa protactinium 231.04 5f²6d¹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">92 U uranium 238.03 5f³6d¹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">93 Np neptunium (237) 5f⁴6d¹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">94 Pu plutonium (244) 5f⁶7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">95 Am americium (243) 5f⁷7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">96 Cm curium (247) 5f⁷6d¹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">97 Bk berkelium (247) 5f⁹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">98 Cf californium (251) 5f¹⁰7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">99 Es einsteinium (252) 5f¹¹7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">100 Fm fermium (257) 5f¹²7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">101 Md mendelevium (258) 5f¹³7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">102 No nobelium (259) 5f¹⁴7s²</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">103 Lr lawrencium (262) 6d¹7s²</div> </div>															

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

Lanthanoids (lanthanides) 6

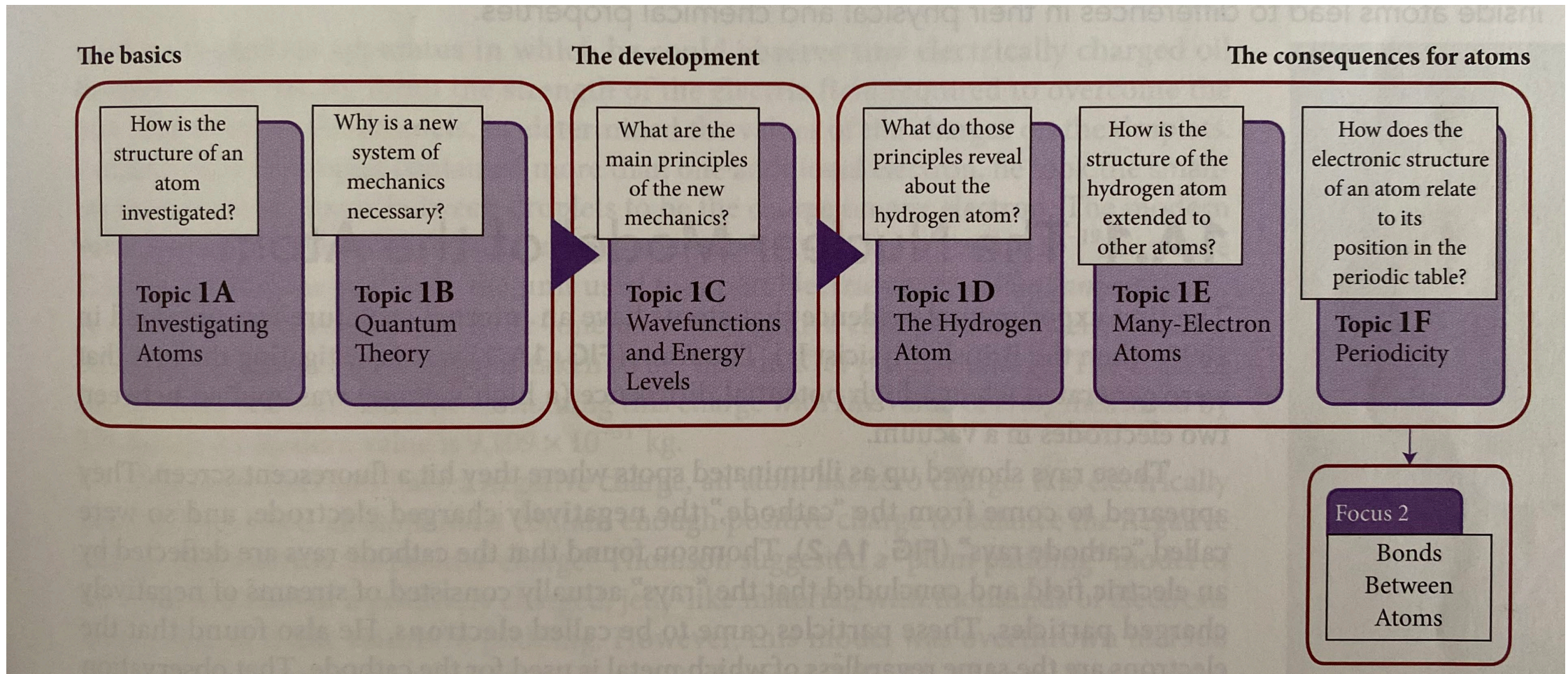
Actinoids (actinides) 7

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

La Théorie Quantique

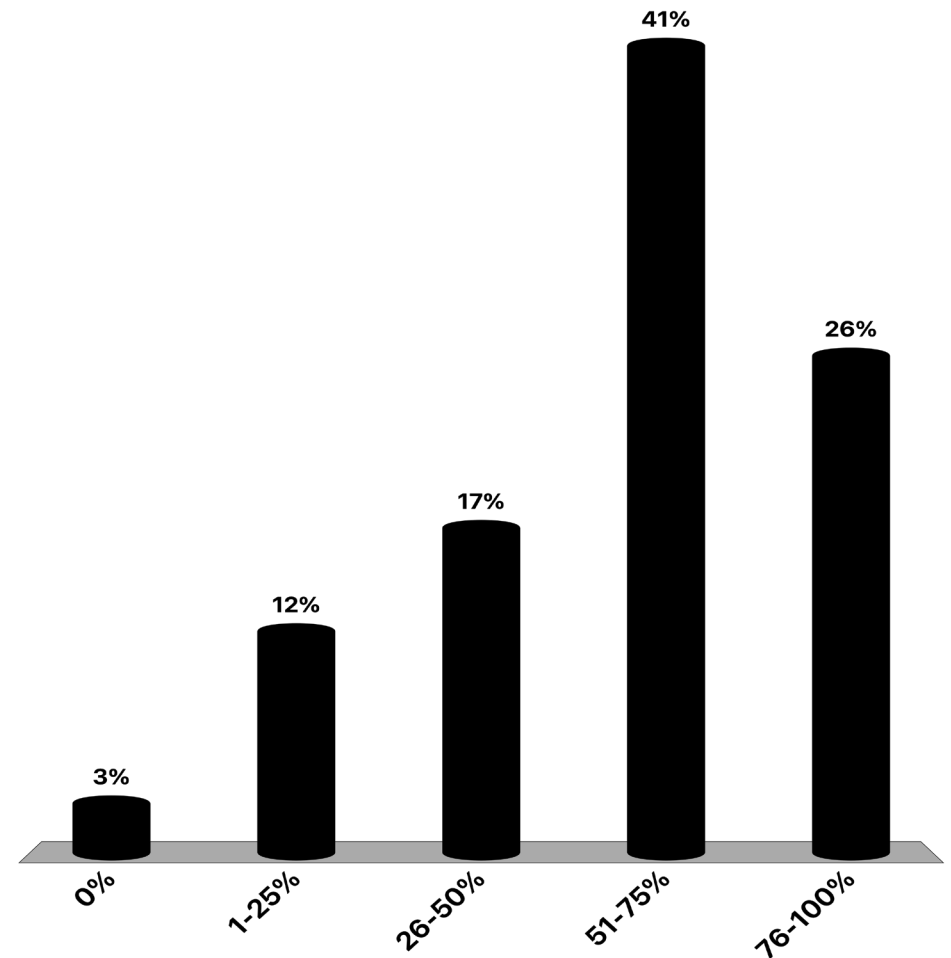
Sujet 1B

Aperçu Chapitre 1 (Focus 1: Atomes)



Quel pourcentage (approximativement) 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%



Sujet 1B.1: Rayonnement, quanta, et photons

Sujet 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

Récapitulatif de la semaine passée

- Spectre atomique de l'hydrogène:



- Calculé empiriquement par Ryberg: $\nu = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$, $n_1 = 1, 2, \dots$, $n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots$
- Pas un spectre continu, mais des lignes spectrales discrètes!
- Si les électrons pouvaient avoir de l'énergie, alors ils devraient émettre de la couleur.

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

La réponse

Les électrons dans les atomes ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie discrets.

L'énergie des électrons dans les atomes est **quantifiée**.



Source de l'image: ChatGPT

Représentation artistique de la quantification de l'énergie des électrons

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Relation de Planck-Einstein

L'énergie est échangée sous forme de paquets discrets (*quanta*).

Un photon de fréquence ν a une énergie:

$$E = h\nu$$

Formule importante.
Nécessaire de savoir comment l'appliquer.

Constante de Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

Interprétation: Chaque ligne spectrale dans le spectre atomique de l'hydrogène correspond à des photons ayant une énergie spécifique ($h\nu$).

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

L'effet photoélectrique

- L'effet photoélectrique a apporté **plus de preuves concernant la quantification de l'énergie.**
- Ce qui a été observé:
 1. Électrons émis seulement si la fréquence de la lumière $>$ seuil (caractéristique du métal).
 2. Émission immédiate (indépendant de l'intensité).
 3. Énergie cinétique de l'électron émis \uparrow linéairement avec la fréquence de la lumière.

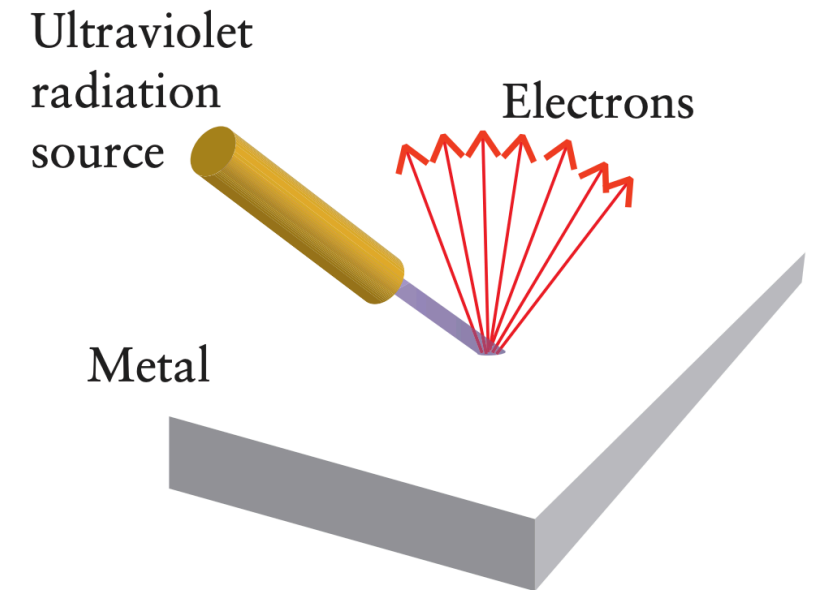


Figure 1.B3

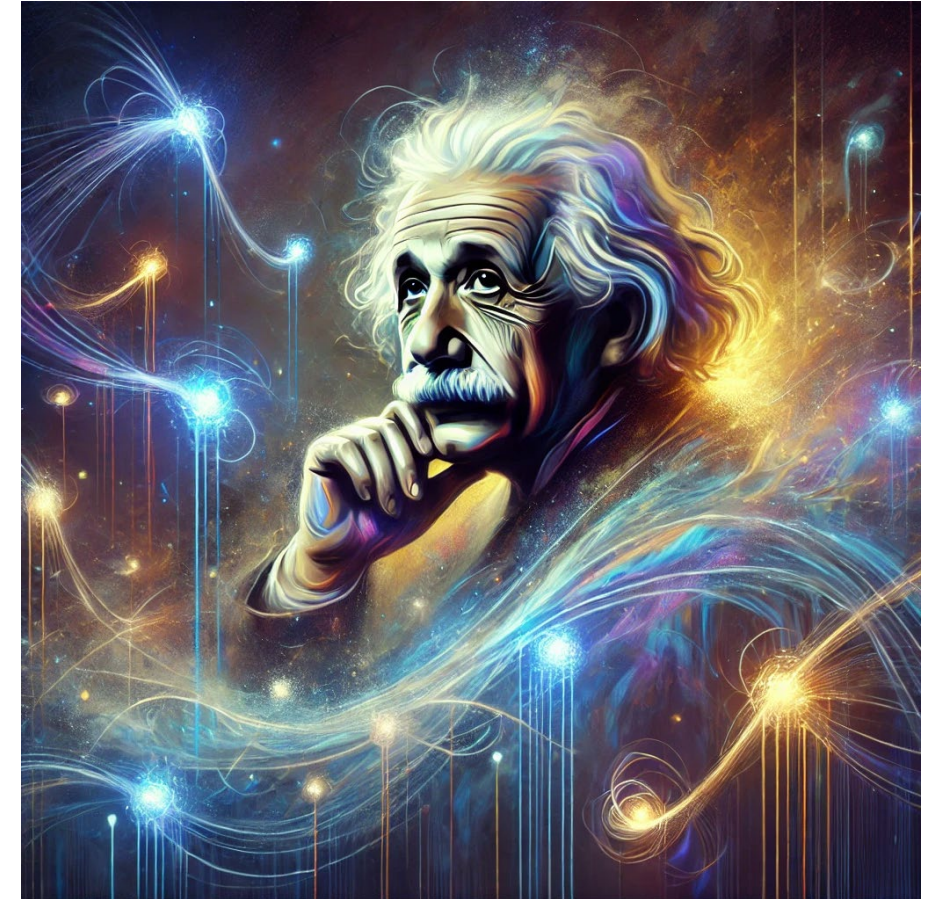
1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Le photon (Einstein)

- La lumière est composée de particules (photons), chacune avec une énergie:

$$E = h\nu$$

- L'énergie du photon \uparrow avec la fréquence (UV > visible > IR).
- L'intensité = nombre de photons, et non pas l'énergie par photon.
- **Un photon est un paquet d'énergie.**



Source de l'image: ChatGPT
Albert et le photon

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Le photon

TABLE 1B.1 Photon Energy*

Radiation type	Energy of photon/(10^{-19} J)	Energy per mole of photons/($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Energy of photon/eV
X-rays and γ -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	$\leq 2.0 \times 10^{-3}$	≤ 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 de lumière bleue de fréquence 6.4×10^{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 $E(\text{per mole of photons}) = N_{\text{A}}E$,

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

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

Travail de sortie (Φ) d'un métal

- Travail de sortie (Φ): l'énergie minimale nécessaire pour éjecter un electron (en eV).
- Un photon doit avoir une énergie $h\nu \geq \Phi$.
- Si $h\nu > \Phi$:

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \Phi + \frac{1}{2}m_e v^2$$

- Communément exprimé en eV (**électronvolt**), qui est défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré à travers une différence de potentiel de 1 V:
- $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

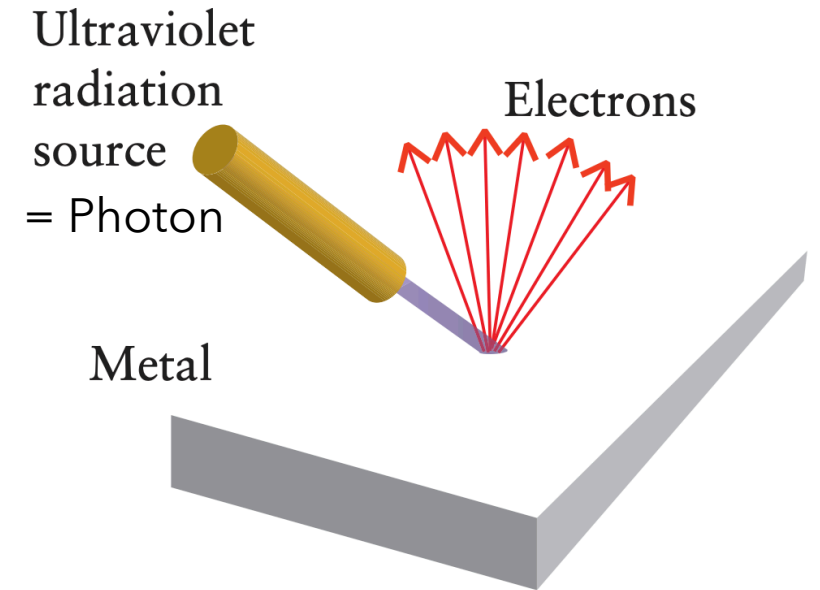


Figure 1.B3

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Équation photoélectrique d'Einstein

$$\underbrace{\frac{1}{2}m_e v^2}_{\text{Kinetic energy of ejected electron}} = \underbrace{h\nu}_{\text{Energy supplied by photon}} - \underbrace{\Phi}_{\text{Energy required to eject photon}}$$

Formule importante.

Nécessaire de savoir comment l'appliquer.

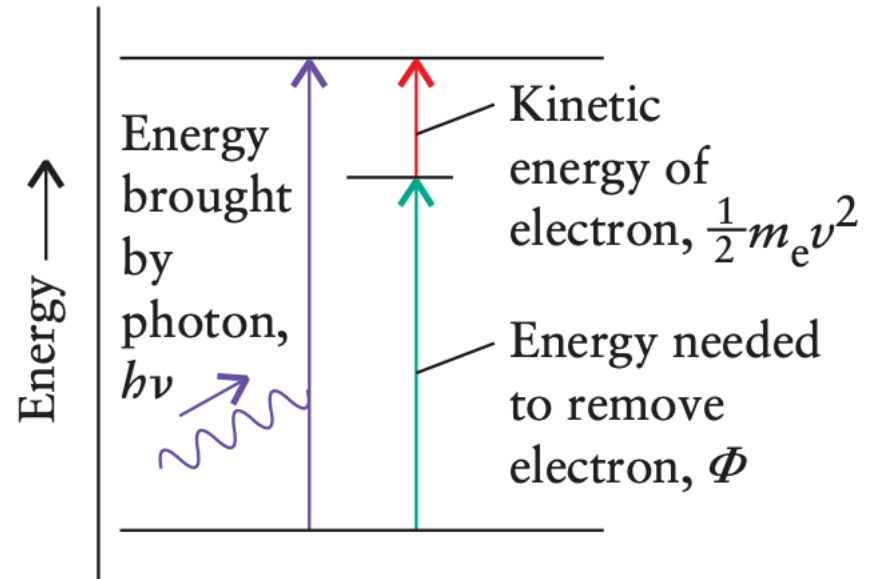
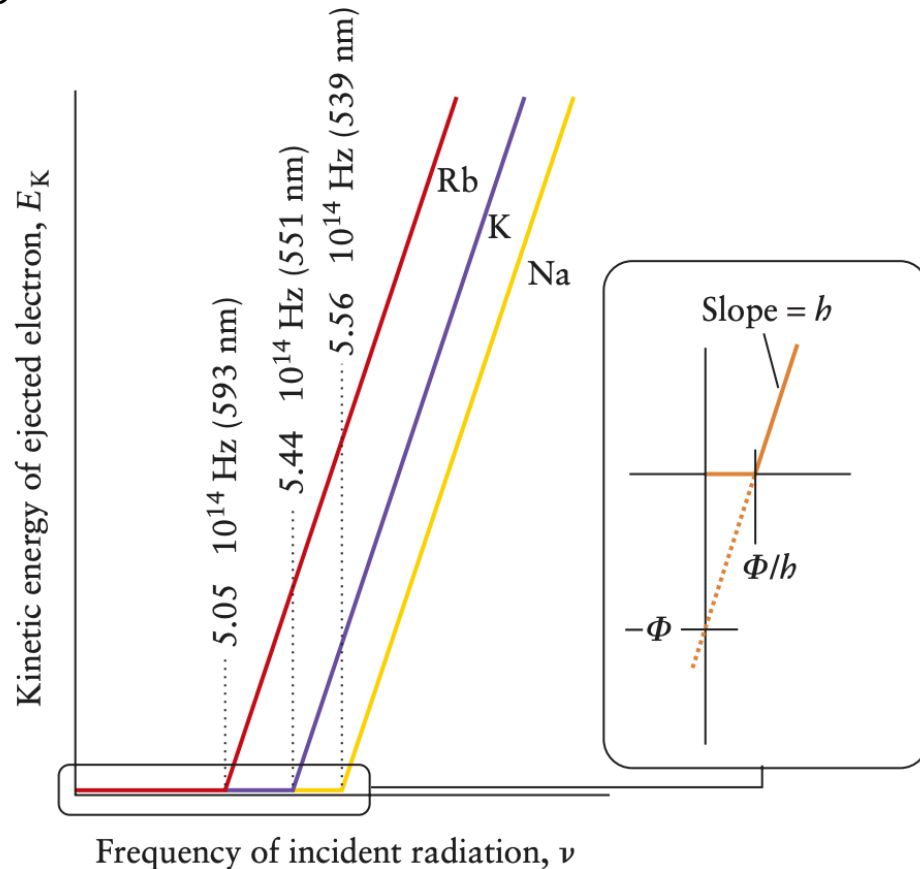


Figure 1.B4

1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

Qu'apprenons-nous avec cette équation?

Figure 1.B5



- E_k augmente linéairement avec la fréquence.
- Pente = h (identique pour chaque métal).
- Abscisse à l'origine = fréquence seuil $\nu_0 = \Phi/h$.
- Ordonnée à l'origine = $-\Phi$ (différent pour chaque métal).

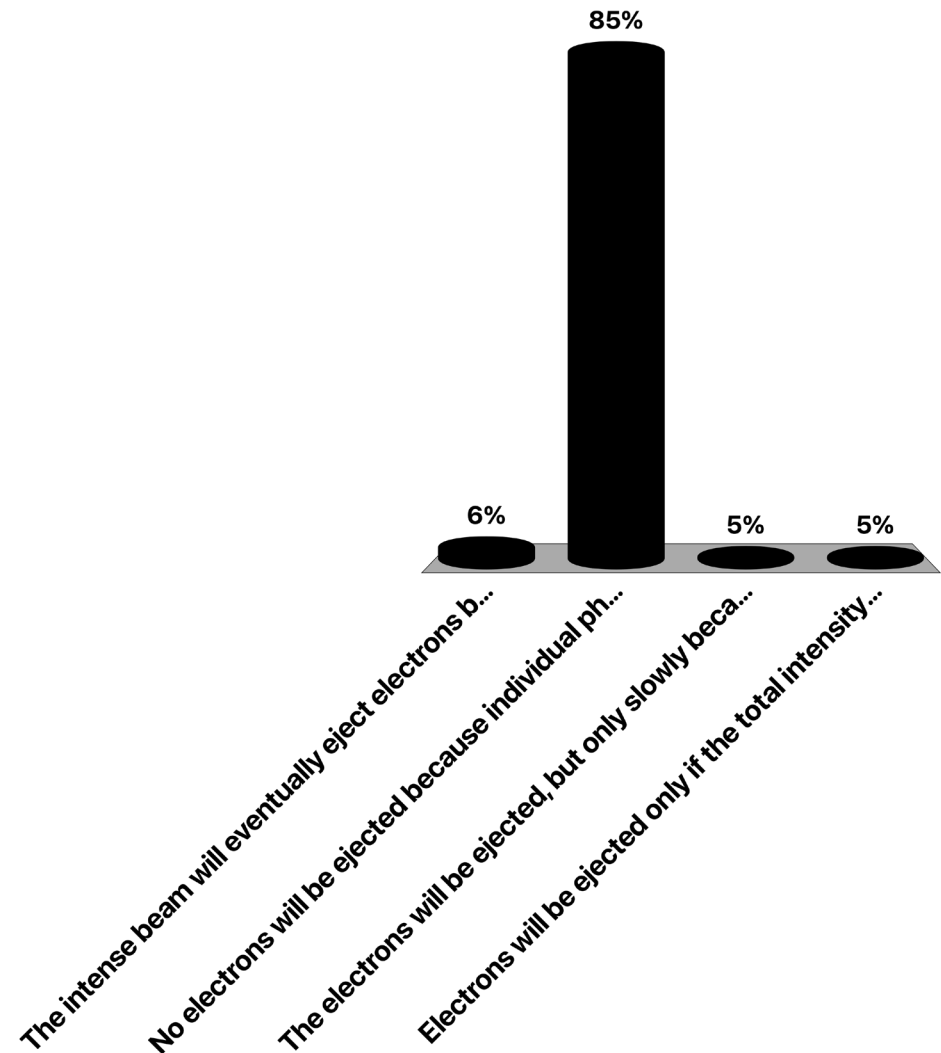
1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

La théorie d'Einstein fournit l'interprétation suivante

1. Les photons doivent avoir une énergie $h\nu \geq \Phi$ pour éjecter un électron.
2. Surplus d'énergie \rightarrow énergie cinétique de l'électron: $E_k = h\nu - \Phi$.
3. E_k augmente linéairement avec la fréquence.

Imaginons que nous éclairons une surface métallique pour éjecter des électrons. Le métal a un travail de sortie de 5 eV. La source lumineuse produit des photons de 4 eV. Que se passe-t-il si nous envoyons 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 de tous les photons s'élève** à plus de 5 eV.
- B. **Aucun électron ne sera éjecté** car les photons individuels de la source A n'ont pas assez d'énergie pour surmonter le travail de sortie.
- C. Les électrons seront éjectés, mais **lentement**, car l'énergie des photons individuels est légèrement inférieure au travail de sortie.
- D. Les électrons ne seront éjectés que si **l'intensité totale de la lumière est suffisamment élevée**, quelle que soit l'énergie des photons.



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 concernant les propriétés physiques impliquées. Dans un test, la vitesse d'un électron émis par un photon depuis la surface d'un échantillon de potassium est de 668 km s^{-1} .

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

(b) Le travail de sortie du potassium est de $2,29 \text{ eV}$, ce qui correspond à $3.67 \times 10^{-19} \text{ J}$. Quelle est la longueur d'onde du rayonnement qui a provoqué la photo-éjection de l'électron ?

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

(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

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

(b) Le travail de sortie du potassium est de 2,29 eV, ce qui correspond à 3.67×10^{-19} J. Quelle est la longueur d'onde du rayonnement qui a provoqué la photo-éjection de l'électron ?

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

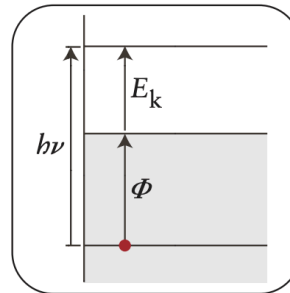
$$2.29 \text{ eV} \times \frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3.67 \times 10^{-19} \text{ J}$$

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

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

so

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



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

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

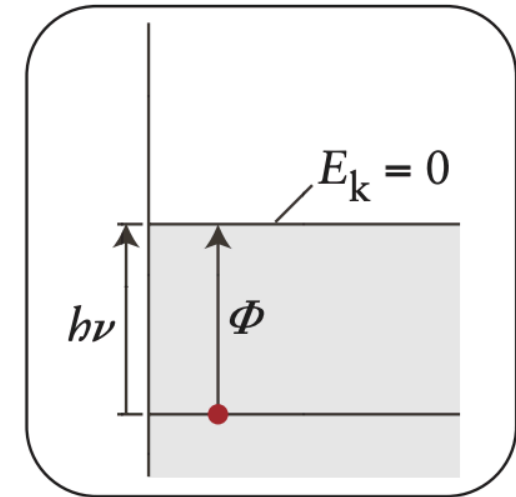
1B.1 Rayonnement, quanta, et photons

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

(c) Quelle est la plus grande longueur d'onde de 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

Planck a postulé la quantification de l'énergie.

L'effet photoélectrique prouve la nature particulaire du rayonnement électromagnétique et l'existence des photons.

La dualité onde-particule

Sujet 1B.2

1B.2 Dualité onde-particule

L'expérience des fentes de Young

- Effet photoélectrique → Les photons se comportent comme des particules.
- Avant, la nature ondulatoire de la lumière avait été démontrée et prouvée (Newton, Young, Maxwell)
- Preuve la plus convaincante de la nature ondulatoire: **la diffraction, le motif d'intensités élevées et faibles généré par un objet sur le chemin d'un rayon de lumière.**

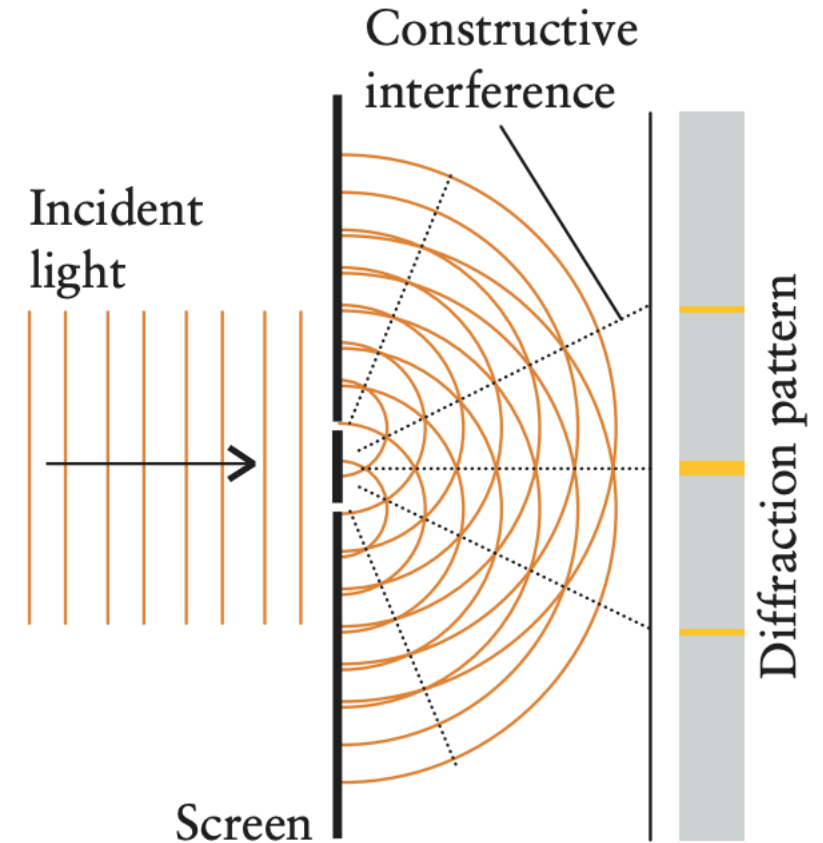
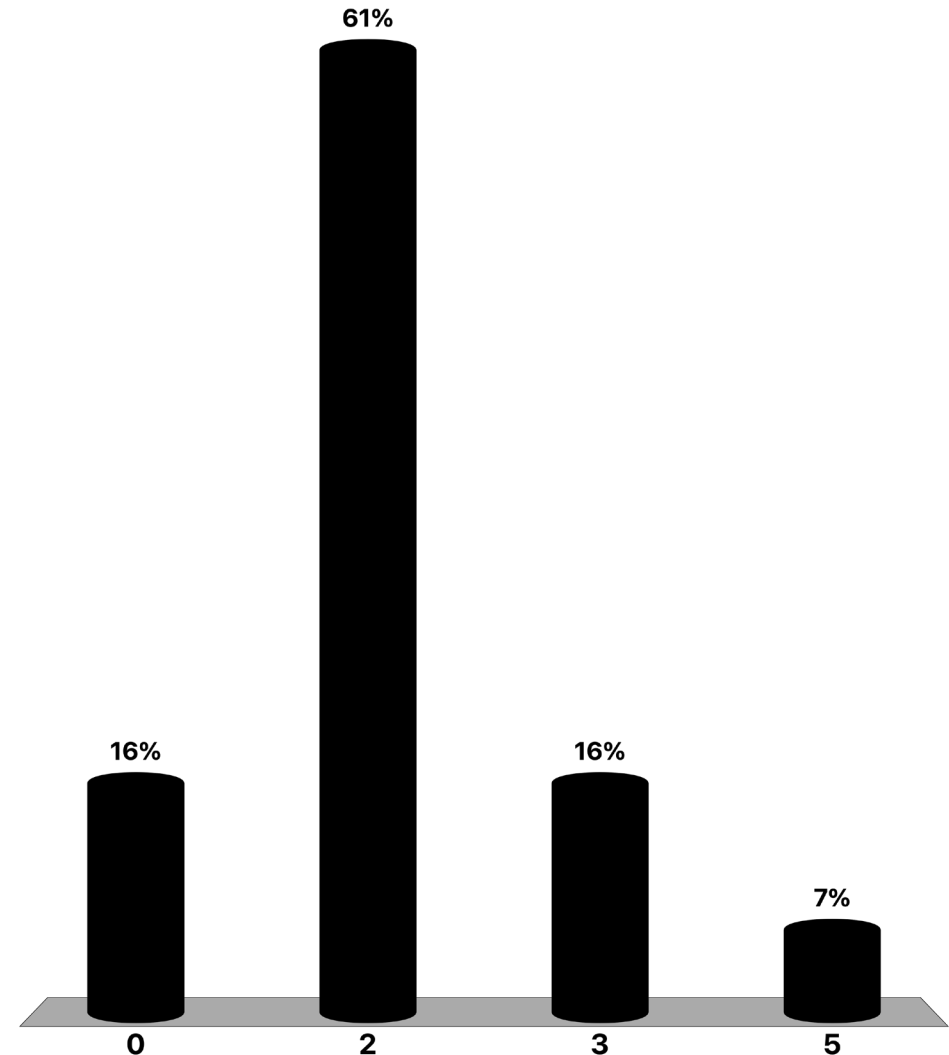


Figure 1.B6

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

- A. 0
- B. 2
- C. 3
- D. 5



1B.2 Dualité onde-particule

L'expérience des fentes de Young

- Devoir: regarder Dr. Quantum (link sur Moodle)



Dr. Quantum - Double slit experiment

1B.2 Dualité onde-particule

Interférence constructive et destructive

(a) **Interférence constructive**: si les pics coïncident, l'amplitude de l'onde (sa hauteur) augmente.

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

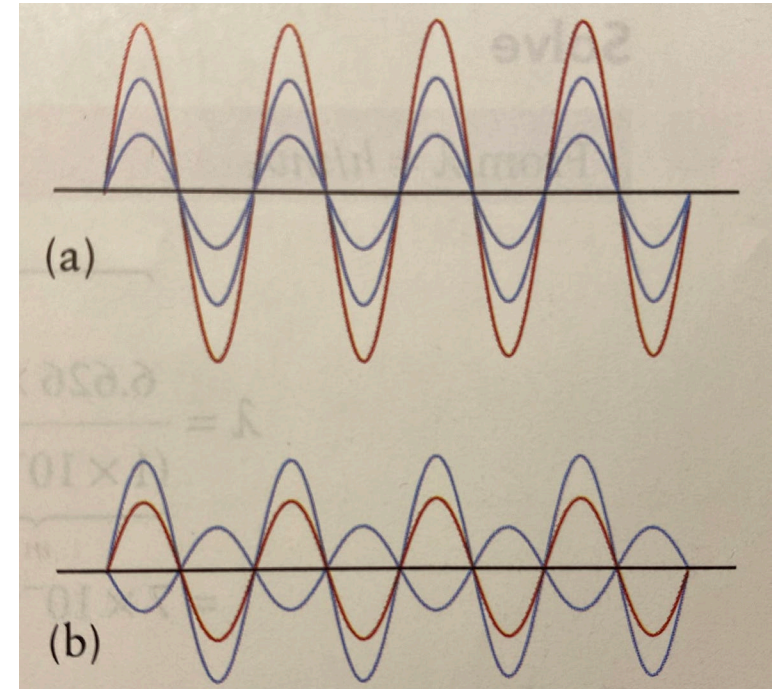


Figure 1.B7

1B.2 Dualité onde-particule

Onde ou particule?

- Effet photoélectrique → Comportement particulaire.
- Diffraction → Comportement ondulatoire.
- La **dualité onde-particule** de la lumière est illustré.
- Intensité = amplitude de l'onde² = nombre de photons.

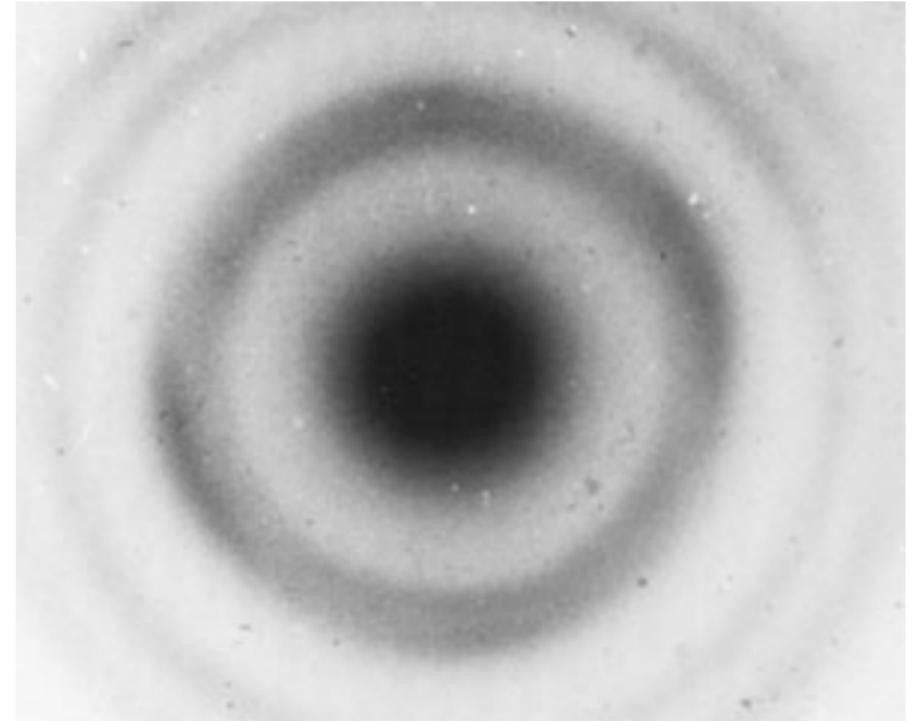


Figure 1.B8: Au lieu de se comporter comme des boules de billard, les électrons créent un motif d'interférence de nature ondulatoire, très similaire à la diffraction de la lumière. Les cercles clairs et foncés résultent de l'interférence constructive et destructive des ondes d'électrons dispersées par le réseau cristallin.

1B.2 Dualité onde-particule

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

- **Si la lumière (ondes) peut se comporter comme des particules, alors la matière (particules) peut se comporter comme des ondes.**
- Longueur d'onde d'une particule:

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

Formule importante.
Nécessaire de savoir comment l'appliquer.

- Le produit de la masse m et de la vitesse v est appelé la quantité de mouvement linéaire p de la particule.
- Petite masse / haute vitesse \rightarrow longueur d'onde courte.

1B.2 Dualité onde-particule

Exemple 1B.4: Calcul de 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 m s^{-1} .

1B.2 Dualité onde-particule

Exemple 1B.4: Calcul de 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 general) et les rayonnements ont des propriétés ondulatoires et particulaires.

Le principe d'incertitude

Sujet 1B.3

1B.3 Le principe d'incertitude

Les électrons N'ONT PAS de trajectoire définie

Limites des Trajectoires Classiques

- Particule classique: position + quantité de mouvement connues → chemin défini.
- Électrons: dualité onde-particule signifie que la position et la quantité de mouvement ne peuvent pas être déterminées de manière précise simultanément.
- Pour des objets lourds, l'incertitude est négligeable; pour des particules subatomiques, elle est significative.



Source de l'image: ChatGPT. Interprétation artistique:
From Classical Paths to Quantum Uncertainty 42

1B.3 Le principe d'incertitude

Le principe d'incertitude de Heisenberg (1927)

- **La position et la quantité de mouvement ne peuvent pas être déterminées de manière précise simultanément.**
- Si la position est connue avec une incertitude Δx , alors la quantité de mouvement a une incertitude Δp telle que:

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

Formule importante.

Nécessaire de savoir comment l'appliquer.

- Le symbole \hbar , dit «h bar», signifie $\frac{h}{2\pi}$. Sa valeur est 1.054×10^{-34} J s.

1B.3 Le principe d'incertitude

Une nota bene

Qu'entend-on par "incertitude" ΔX pour une propriété X ?

Formellement, il s'agit de «l'écart-type» de X , défini par $\Delta X = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}$, où les chevrons (" $\langle \rangle$ ") indiquent les moyennes de X^2 et X respectivement.

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 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 1.0×10^{-3} kg, and the uncertainty in the speed, Δv , is $2 \times (1.0 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$. The minimum uncertainty in position, Δx , is then:

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

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

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

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

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 $200. \times 10^{-12}$ m, or 2.00×10^{-10} m. The uncertainty in the speed, Δv , 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 $\Delta x = \hbar/2m\Delta v$,

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

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.

Les compétences que vous avez maîtrisées sont la capacité à

- ❑ 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 du travail de sortie d'un métal.
- ❑ Estimer la longueur d'onde d'une particule dont la quantité de mouvement 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.