BURHAN

Résumé : Atome et mécanique de Newton

2ème Année Baccalauréat · Sciences Physiques · Physique-Chimie

Version en ligne : burhan.ma/2bac/pc/physique-chimie/atome-et-mecanique-de-newton/resume

Chapitre	Semestre
Atome et mécanique de Newton	Semestre 2

Deux interactions entre particules chargées

Remarque : Deux lois déjà rencontrées

Rappel : la loi de gravitation vient du chapitre des satellites, la loi de Coulomb de l'an dernier. Ces deux lois sont admises. Elles décrivent des forces portées par la droite qui joint les deux corps.

Propriété : Forces d'interaction gravitationnelle et électrostatique

Deux corps ponctuels A et B, séparés par la distance $d = AB$, exercent l'un sur l'autre des forces opposées, portées par la droite (AB).

- **Interaction gravitationnelle.** Pour des masses m_A et m_B, les forces sont toujours attractives et ont pour valeur

$$F_g = G\,\frac{m_A\,m_B}{d^2},$$

avec $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot kg^{-2}}$.

- **Interaction électrostatique.** Pour des charges q_A et q_B, les forces sont attractives si les charges sont de signes contraires, répulsives si elles sont de même signe, et ont pour valeur

$$F_e = k\,\frac{|q_A\,q_B|}{d^2},$$

avec $k = 9{,}00 \times 10^{9}\ \mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}}$.

Les deux valeurs varient comme l'inverse du carré de la distance.

Propriété : Interaction gravitationnelle négligeable dans l'atome d'hydrogène

Dans l'atome d'hydrogène, le proton (charge $+e$, masse $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$) et l'électron (charge $-e$, masse $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg}$) s'attirent par les deux interactions. Le rapport des valeurs des deux forces ne dépend pas de la distance :

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k\,e^2}{G\,m_p\,m_e} \approx 2{,}27 \times 10^{39}.$$

À l'échelle de l'atome, l'interaction gravitationnelle est donc négligeable devant l'interaction électrostatique, qui assure la cohésion de l'atome.

Méthode : Comparer deux forces sans connaître la distance

1. **Unités** : charges en coulombs, masses en kilogrammes, distance en mètres.
2. **Valeurs** : calcule F_e puis F_g, en newtons.
3. **Rapport** : écris $\frac{F_e}{F_g}$ en lettres d'abord ; le facteur d^2 disparaît.
4. **Lecture** : un rapport de l'ordre de 10^{39} veut dire que la gravitation ne compte pas.

Pourquoi le modèle planétaire échoue

Propriété : Limites de la mécanique de Newton à l'échelle de l'atome

Le **modèle planétaire** décrit l'électron de l'atome d'hydrogène en orbite circulaire autour du noyau, retenu par la force électrostatique, comme une planète autour du Soleil.

Dans ce modèle, la mécanique de Newton autorise n'importe quel rayon d'orbite, donc n'importe quelle valeur de l'énergie de l'atome : l'énergie pourrait varier de façon continue.

Or l'expérience montre que l'atome n'émet et n'absorbe la lumière qu'à certaines fréquences bien déterminées, propres à chaque élément. La mécanique de Newton ne permet donc pas d'expliquer la **quantification de l'énergie de l'atome** : à cette échelle, elle cesse d'être valable.

À retenir : Ce que les raies imposent

Une orbite de rayon quelconque donnerait une énergie quelconque, donc une lumière de toutes les fréquences. Or un gaz d'atomes n'émet que quelques raies, toujours les mêmes pour un élément. Ce constat oblige à quitter la mécanique de Newton pour décrire l'atome.

Énergie quantifiée et électronvolt

Propriété : Quantification de l'énergie de l'atome

L'énergie d'un atome ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées, notées $E_1 < E_2 < E_3 < \dots$: on dit qu'elle est **quantifiée**. Chaque valeur permise est un **niveau d'énergie** de l'atome.

Un atome ne change d'état qu'en passant d'un niveau à un autre : il échange alors avec l'extérieur une énergie égale à l'écart entre les deux niveaux, ni plus ni moins.

Définition : État fondamental, états excités et ionisation

- L'**état fondamental** est l'état de plus basse énergie E_1 : c'est l'état stable de l'atome.

- Les **états excités** sont les états d'énergie E_n avec $n \geq 2$: l'atome ne s'y maintient pas et revient vers des niveaux inférieurs.
- L'énergie de l'atome **ionisé**, électron séparé du noyau et immobile, est prise comme référence : $E_\infty = 0$. Les énergies des niveaux sont donc négatives.
- L'**énergie d'ionisation** est l'énergie minimale à fournir à l'atome dans l'état fondamental pour l'ioniser : $E_{\text{ion}} = E_\infty - E_1 = -E_1$.

Méthode : Conversion des énergies dans les calculs

1. **Unité attendue** : avec h en $\mathrm{J \cdot s}$, toute énergie se met en joules.
2. **Vers les joules** : multiplie la valeur en électronvolts par $1{,}60 \times 10^{-19}$.
3. **Vers les électronvolts** : divise la valeur en joules par ce même nombre.
4. **Ordre de grandeur** : quelques électronvolts, soit quelques $10^{-19}\,\mathrm{J}$, pour une transition atomique.

Attention : Le plus haut niveau, le plus proche de zéro

Avec $E_\infty = 0$, toutes les énergies des niveaux liés sont négatives. Le niveau le plus haut est celui dont l'énergie est la plus proche de zéro. Un écart entre deux niveaux se calcule toujours en retranchant le plus bas du plus haut : il est positif.

Hydrogène : expression des niveaux

Propriété : Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2},$$

où n est un entier naturel non nul et $E_0 = 13{,}6\,\mathrm{eV}$.

On obtient $E_1 = -13{,}6\,\mathrm{eV}$ (état fondamental), $E_2 = -3{,}40\,\mathrm{eV}$, $E_3 \approx -1{,}51\,\mathrm{eV}$, $E_4 = -0{,}850\,\mathrm{eV}$. Les niveaux se resserrent quand n augmente et tendent vers $E_\infty = 0$. L'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène vaut $13{,}6\,\mathrm{eV}$.

À retenir : Ioniser depuis un niveau excité

Cette expression est un modèle admis : on l'utilise, on ne l'établit pas. Depuis un niveau n occupé, l'énergie minimale à fournir pour ioniser l'atome vaut $E_\infty - E_n = \dfrac{E_0}{n^2}$. Elle diminue quand n augmente.

Photon émis, photon absorbé

Propriété : Relation entre la variation d'énergie et la fréquence du photon

La lumière échange de l'énergie avec la matière par quanta : les **photons**. Un photon associé à une radiation de fréquence ν transporte l'énergie $h\,\nu$, où $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$ est la constante de Planck.

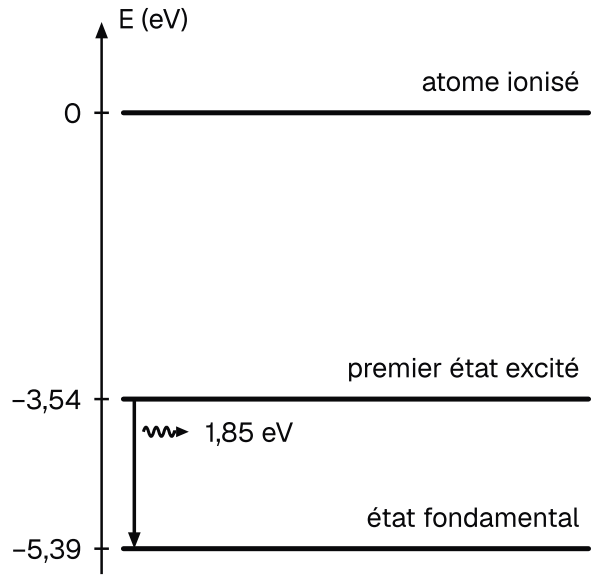
- **Émission.** Quand un atome passe d'un niveau E_p à un niveau inférieur E_n, il émet un photon de fréquence ν telle que
$$\Delta E = E_p - E_n = h\,\nu.$$
- **Absorption.** Un atome au niveau E_n absorbe un photon de fréquence ν seulement si $h\,\nu = E_p - E_n$, où E_p est un niveau supérieur. L'atome passe alors au niveau E_p. Un photon dont l'énergie ne correspond à aucun écart n'est pas absorbé, sauf s'il suffit à ioniser l'atome.

Les énergies s'expriment en joules (J) ou en électronvolts (eV) : $1\,\mathrm{eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$.

Propriété : Longueur d'onde de la radiation émise ou absorbée

Lors d'une transition entre deux niveaux d'énergie $E_p > E_n$, la radiation émise ou absorbée a pour longueur d'onde dans le vide
$$\lambda = \frac{h\,c}{E_p - E_n},$$
où $c = 3{,}00 \times 10^{8}\,\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ et l'écart $E_p - E_n$ est exprimé en joules. Plus l'écart entre les niveaux est grand, plus la longueur d'onde est courte.

Pour la transition de $n = 3$ à $n = 2$ de l'atome d'hydrogène, $E_3 - E_2 \approx 1{,}89\,\mathrm{eV}$ et $\lambda \approx 658\,\mathrm{nm}$: une radiation rouge du spectre visible.



Deux niveaux du lithium et l'émission de la raie rouge

Exemple : Énergie du photon de la raie rouge du lithium

Observation. Une flamme qui contient du lithium émet une raie rouge de longueur d'onde $\lambda = 671\,\text{nm}$.

Énergie du photon. Avec h et c de la fiche des constantes :

$$E = \frac{h\,c}{\lambda}$$
$$E \approx 2{,}96 \times 10^{-19}\,\text{J}$$

En électronvolts. $E \approx 1{,}85\,\text{eV}$, et la fréquence vaut $\nu = \dfrac{c}{\lambda} \approx 4{,}47 \times 10^{14}\,\text{Hz}$.

Niveaux. Cet écart sépare le fondamental, à $-5{,}39\,\text{eV}$, du premier niveau excité, à $-3{,}54\,\text{eV}$: $E_2 - E_1 = 1{,}85\,\text{eV}$.

Méthode : De l'écart d'énergie à la longueur d'onde

1. **Écart** : $\Delta E = E_p - E_n$, le niveau haut moins le niveau bas.
2. **Joules** : multiplie par $1{,}60 \times 10^{-19}$.
3. **Fréquence** : $\nu = \dfrac{\Delta E}{h}$; **longueur d'onde** : $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$.
4. **Domaine** : en dessous de $400\,\text{nm}$ ultraviolet, au-dessus de $800\,\text{nm}$ infrarouge, entre les deux visible.

Méthode : Lire les flèches d'un diagramme

1. **Sens de la flèche** : elle descend pour une émission, elle monte pour une absorption.
2. **Valeur** : l'écart se lit entre le niveau de départ et le niveau d'arrivée, en électronvolts.

3. **Classement** : la flèche la plus longue porte le photon le plus énergétique, donc la longueur d'onde la plus courte.

Méthode : Tester l'absorption d'un photon

1. **Énergie du photon** en électronvolts.
2. **Écarts permis** : du niveau occupé vers chaque niveau situé au-dessus.
3. **Égalité** : le photon est absorbé seulement s'il égale l'un de ces écarts, aux arrondis des données près.
4. **Cas de l'ionisation** : un photon d'énergie au moins égale à $-E_n$, depuis le niveau n occupé, ionise l'atome.

Attention : Joules d'abord, division par h ensuite

La constante de Planck est en $\mathrm{J \cdot s}$. Diviser des électronvolts par h donne une fréquence $6{,}25 \times 10^{18}$ fois trop grande. Convertis l'écart en joules avant de calculer ν ou λ.

Attention : Aucune absorption partielle

Un photon dont l'énergie se situe entre deux écarts permis ne cède pas une partie de son énergie. Il traverse le gaz sans être absorbé. Seule exception : s'il suffit à ioniser l'atome depuis le niveau occupé.

Attention : Énergie du photon et longueur d'onde en sens contraire

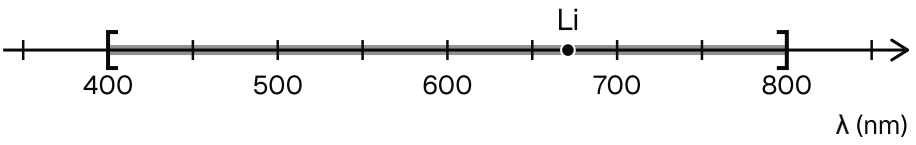
La longueur d'onde varie comme l'inverse de l'écart d'énergie. Un grand écart donne une petite longueur d'onde, parfois dans l'ultraviolet ; un petit écart donne une grande longueur d'onde, vers l'infrarouge.

Lire et exploiter un spectre de raies

Propriété : Spectres de raies d'émission et d'absorption

- Le **spectre d'émission** d'un gaz d'atomes excités, sous faible pression, est un **spectre de raies** : quelques raies colorées sur fond noir.
- Le **spectre d'absorption** de ce gaz, éclairé en lumière blanche, est un spectre continu barré de **raies noires**.
- Les raies d'absorption d'un élément occupent les mêmes longueurs d'onde que certaines de ses raies d'émission. Chaque élément a son propre spectre de raies, qui permet de l'identifier.

Ces spectres s'expliquent par la quantification de l'énergie : chaque raie correspond à une transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome.



Place de la raie rouge du lithium ; le domaine visible est marqué de 400 à 800 nm

À retenir : Observer un spectre au laboratoire

Au laboratoire, la lumière d'une lampe à vapeur traverse une fente fine, puis un prisme ou un réseau, et se disperse sur un écran. Pour un spectre d'absorption, on remplace la lampe par une lumière blanche qui traverse le gaz froid. On repère ensuite chaque raie sur une échelle de longueurs d'onde.

Attention : Raies noires et raies colorées aux mêmes places

Une raie noire d'absorption occupe la place exacte d'une raie colorée d'émission du même gaz. Elle ne se trouve jamais à une autre longueur d'onde, dite complémentaire. Un gaz froid n'absorbe pourtant que les raies qui partent du niveau occupé.

Méthodes et formules à retenir

Méthode : Quelle méthode pour quelle question ?

- **Comparer deux interactions** : rapport $\frac{F_e}{F_g}$, la distance s'élimine.
- **Changer d'unité d'énergie** : facteur $1{,}60 \times 10^{-19}$.
- **Niveaux de l'hydrogène** : $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$, modèle donné.
- **Énergie d'ionisation** : $-E_n$ depuis le niveau n.
- **Raie émise** : écart, joules, fréquence, longueur d'onde, domaine.
- **Photon reçu** : égalité avec un écart, ou ionisation.
- **Spectre mesuré** : longueur d'onde, énergie du photon, écart de niveaux.

Gravitation

$$F_g = G\,\frac{m_A\,m_B}{d^2}$$

Coulomb

$$F_e = k\,\frac{|q_A\,q_B|}{d^2}$$

Hydrogène

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

Ionisation

$$E_{\text{ion}} = E_\infty - E_1$$

Photon

$$\Delta E = h\,\nu$$

Longueur d'onde

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta E}$$

Électronvolt

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

À retenir : Rédiger une application numérique

Écris la relation en lettres, puis les valeurs avec leurs unités, puis le résultat avec son unité. Garde le nombre de chiffres significatifs de la donnée la moins précise. Ne réutilise jamais une valeur arrondie dans un calcul suivant.