

Compétences exigibles

- Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière ;
- Connaître les relations $|\Delta E| = h \cdot \nu$ et $\lambda = \frac{c}{\nu}$;
- Utiliser les relations précédentes pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie ;
- Utiliser les relations précédentes pour exploiter un spectre de raies d'absorption ou d'émission.

Chapitre 4 – Interaction lumière-matière

1 Tester ses prérequis

Un spectre de raies d'absorption présente :

- des raies sombres sur un fond coloré ;
- des raies colorées sur un fond sombre ;
- une bande colorée unique.

Les raies du spectre d'absorption d'un gaz, associées à un même atome :

- ont les mêmes longueurs d'onde que dans le spectre d'émission ;
- sont plus nombreuses que dans le spectre d'émission ;
- changent de longueur d'onde suivant la température du gaz.

Le fond continu du spectre de la lumière d'une étoile donne des renseignements sur :

- la composition chimique de son atmosphère ;
- la température de sa surface (photosphère) ;
- la température de son atmosphère (chromosphère).

La composition chimique de l'atmosphère d'une étoile peut être déterminée à partir du spectre de sa lumière, en analysant :

- l'étendue du fond continu ;
- la radiation émise avec la plus grande intensité lumineuse ;
- les raies d'absorption.

2 Quelques énigmes de la physique

La fin de 19^e siècle voit la victoire du déterminisme : les scientifiques ont des équations qui permettent d'expliquer la mécanique et le magnétisme, et ainsi tout en Physique semble avoir été découvert. Ne subsistent que deux ou trois petites énigmes d'intérêt mineur à éclaircir.

Ces petites énigmes vont pourtant bouleverser le bel assemblage de la Physique au tout début du 20^e siècle !

2.1 L'émission thermique d'un corps nécessite un nouveau modèle pour la lumière (rien que ça !)

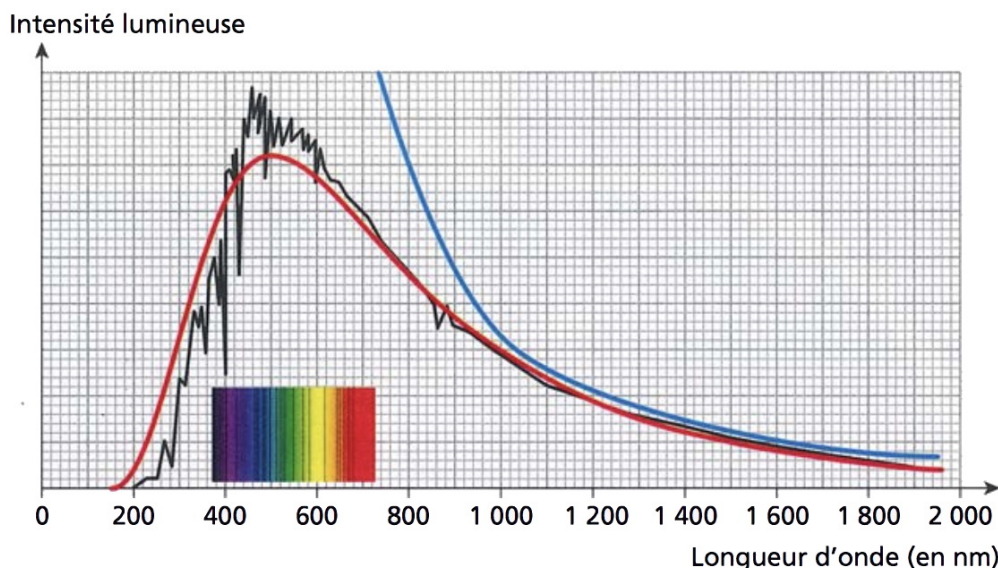


FIG. 1 – Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde pour le Soleil (courbe noire), pour un corps de même température dans le cadre du modèle de Rayleigh-Jeans (courbe bleue), et dans le cadre du modèle de Planck (courbe rouge, reproduisant exactement l'émission thermique d'un corps noir).

Les physiciens du 19^e siècle ont beaucoup travaillé pour trouver un modèle de la lumière et en particulier un modèle du Soleil qui permettent d'interpréter la courbe de l'intensité lumineuse du Soleil en fonction de la longueur d'onde, vue au chapitre précédent (émission thermique dite « du corps noir »). Différents modèles ont été proposés pour expliquer l'allure de cette courbe obtenue pour un corps chauffé à une certaine température. Les britanniques RAYLEIGH et JEANS ont conçu en 1900 un modèle, représenté en figure 1 par la courbe bleue, reposant sur des bases simples et bien étayées quant au comportement des atomes. Hélas, si ce modèle explique bien l'émission thermique d'un corps noir dans les grandes longueurs d'onde, il bute dans les courtes longueurs d'onde sur ce que les deux britanniques ont nommé la « catastrophe de l'ultraviolet ».

a. Quelle est la valeur de l'énergie prévue par le modèle de RAYLEIGH et JEANS dans les courtes longueurs d'onde? Pourquoi est-ce une « catastrophe »?

Un autre modèle, conduisant à la courbe rouge, fut proposé par PLANCK un peu plus tard la même année (1900). PLANCK a proposé ce modèle sans le faire reposer sur aucune base simple ou plausible quant au comportement des atomes, car il ne s'agit alors que d'une simple astuce mathématique permettant d'interpréter les résultats expérimentaux. C'est donc une courbe mathématique « ad-hoc », pour coller aux résultats expérimentaux. PLANCK a tenté de trouver une interprétation physique plausible

à son modèle, sans succès. Le modèle (tel que proposé par EINSTEIN en 1905) impose de faire l'hypothèse que l'énergie E d'une radiation de fréquence ν (*), émise par un atome, ne peut être qu'un multiple d'une quantité que PLANCK a appelé « quantum » d'énergie, et qui a pour valeur $E = h \cdot \nu$, où h est une constante (appelée par la suite « constante de Planck », en hommage). En d'autres termes, $E = h \cdot \nu$ est la plus petite unité d'énergie qui puisse être échangée lors d'émission ou d'absorption d'une radiation. Pour PLANCK, ce modèle des énergies *discontinues* n'a aucun sens, et il l'a présenté à son corps défendant. Mais en réalité, l'hypothèse de PLANCK est révolutionnaire, car elle ne correspond pas seulement à un modèle mathématique acceptable, mais bien à la description de la réalité du comportement *microscopique*!

(*) Note : la fréquence est noté ν et non pas f lorsque l'on s'occupe des atomes. Considérez cela comme un *snobisme*.

b. Rappeler l'unité dans le système international de l'énergie et de la fréquence. En déduire l'unité de la constante de Planck h .

c. Calculer l'énergie d'un quantum pour une radiation rouge de fréquence $\nu = 5,0 \times 10^{14}$ Hz. Comparer avec l'énergie délivrée par seconde par une lampe dont la puissance est de 40 W ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s).

d. Quelle interprétation moderne peut-on faire de cette émission du corps noir?

2.2 Dans l'effet photoélectrique, on constate un effet de seuil totalement incompréhensible à l'époque

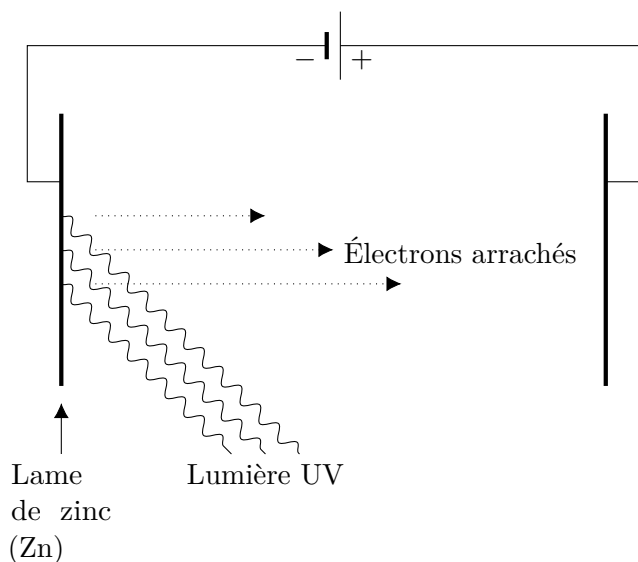


FIG. 2 – Effet photoélectrique.

On éclaire une lame de zinc avec de la lumière UV. Des électrons sont arrachés à la lame de zinc, électrons qui

sont ensuite accélérés en direction d'une anode collectrice placée en vis-à-vis.

Sans lumière UV, on ne constate aucune sortie d'électron de la lame de zinc. Cela montre que la lumière UV communique une énergie suffisante aux électrons afin de leur faire vaincre le travail d'extraction du métal, travail noté W_0 (exprimé en joule, symbole J). C'est l'effet photoélectrique.

Un petit détail étrange subsiste néanmoins : cet effet dépend de la longueur d'onde de la lumière. L'effet apparaît brusquement dès que la longueur d'onde des UV est assez courte. On ne peut pas utiliser des UV deux fois moins énergétiques, par exemple en « compensant » par une intensité lumineuse double. L'expérience n'a pas un comportement « continu », un net effet de seuil sans explication est présent.

e. À nouveau, pour cette deuxième énigme, proposez une interprétation moderne.

2.3 Les spectres d'émission des atomes est une preuve indirecte d'une structure interne de l'atome

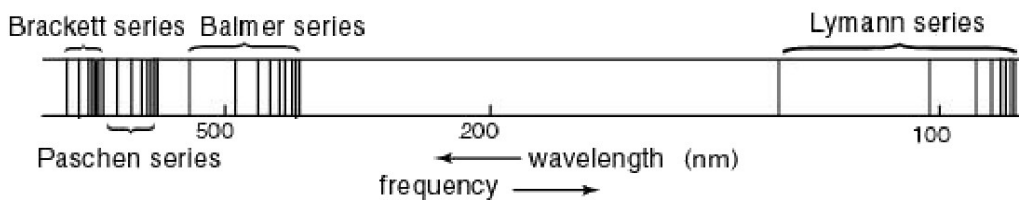


FIG. 3 – Spectre de raies d'émission de l'atome d'hydrogène.

Les spectres de raies des atomes étaient bien connus à la fin du 19^e et au début de 20^e siècle. Les physiciens qui avaient travaillé sur ces spectres avaient trouvé une relation mathématique relativement simple permettant de grouper les raies en « séries », séries qui portent les noms de leurs découvreurs respectifs (BALMER, LYMAN, PASCHEN et BRACKETT), tel qu'indiqués en figure 3 ci-

dessus pour le spectre de l'atome d'hydrogène.

Cependant, le fait que l'on observe ainsi des spectres de raies et non des spectres continus montre qu'une structure interne à l'atome se devait d'être découverte.

f. Donnez une interprétation moderne.

2.4 Les mesures de célérité de la lumière sont en contradiction avec les plus élémentaires principes de la mécanique

Une dernière « petite énigme » de la physique classique du 19^e siècle a conduit à refonder la totalité de la physique au 20^e siècle : il s'agit du fait très étonnant selon lequel la célérité de la lumière ne dépend pas du mouvement de

la source. Cette dernière énigme, résolue par EINSTEIN en 1905 (en même temps que les précédentes !), dépasse le cadre de ce chapitre.

g. Donnez une formulation moderne.

Correction des exercices du chapitre 3

3.1 N° 9 p. 25 – QCM

1. (b) et (c) : le foyer est le point de convergence des rayons émergents parallèles à l'axe optique, par exemple les rayons issus d'un objet lointain.
2. (a) : la distance focale d'une lentille est la distance entre le centre optique de la lentille et son foyer objet.
3. (b) : un rayon incident parallèle à l'axe optique de la lentille émerge en passant par son foyer.
4. (a) : tout rayon passant par le centre O de la lentille émerge sans être dévié.
5. (c) : une image virtuelle est une image qui ne peut pas se former sur un écran.

3.2 N° 10 p. 25 – Caractéristiques d'une image

1. Distance focale f de la lentille :

$$f = \frac{1}{C} = \frac{1}{80} = 0,0125 \text{ m} = 12,5 \text{ mm}$$

2. Pour les lectures graphique des positions et des tailles, il faut remarquer que le schéma est tracé à l'échelle sur le papier millimétré, puisque l'on a bien $\overline{OF'} = f = 12,5 \text{ mm}$.

Premier cas :

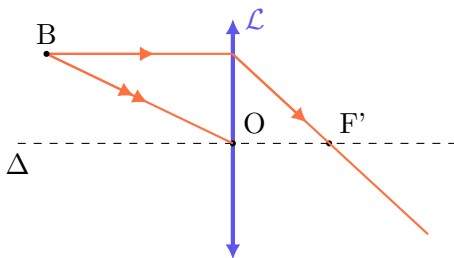
- position $\overline{OA'} = 25,5 \text{ mm}$;
- taille $\overline{A'B'} = -9 \text{ mm}$;
- sens : image renversée ;
- nature : image réelle (on peut la projeter sur un écran).

Second cas :

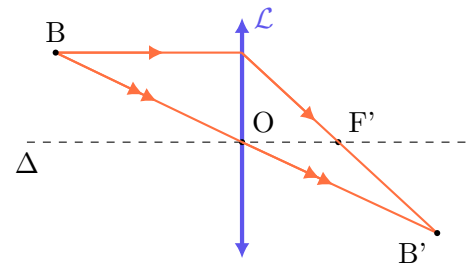
- position $\overline{OA'} = -9,5 \text{ mm}$;
- taille $\overline{A'B'} = 13,5 \text{ mm}$;
- sens : image droite ;
- nature : image virtuelle (on ne peut pas la projeter sur un écran).

3.3 N° 13 p. 25 – Tracé de faisceaux de lumière

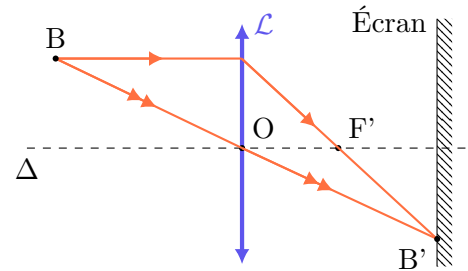
1. Première figure (de gauche) : le rayon incident parallèle à l'axe optique émerge en passant par le foyer image F' :



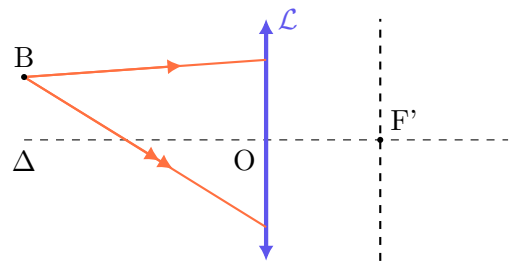
Le rayon incident passant par le centre émerge sans être dévié ; on peut placer le point image B' , intersection des deux rayons émergents :



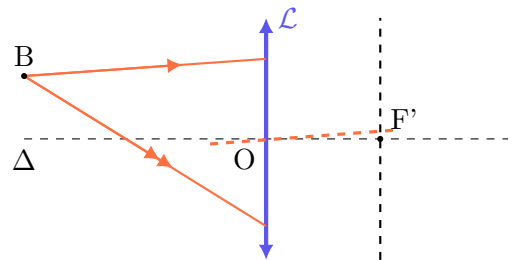
On peut dès maintenant placer un écran au niveau de B' , il s'agit d'une image réelle, que l'on peut observer sur un écran :



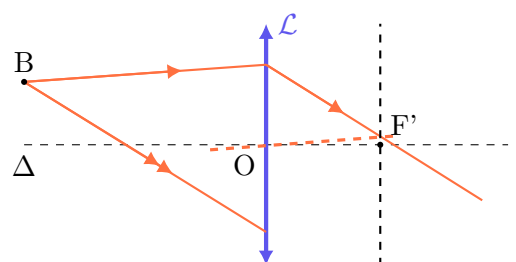
Deuxième figure (de droite) : aucun des rayons incidents n'est un rayon particulier ; on trace la section du plan focal avec le plan verticale en pointillés :



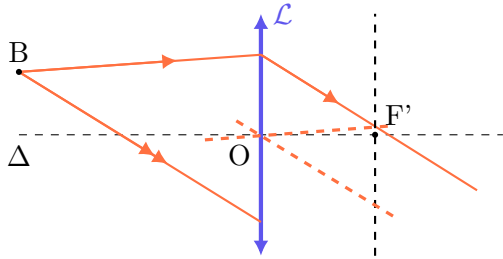
On trace en pointillés un rayon hypothétique, parallèle au rayon du haut, et passant par le centre de la lentille : il émerge sans être dévié :



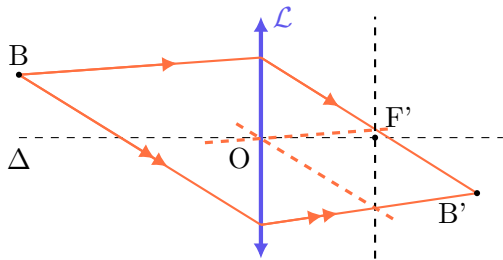
Le rayon du haut émerge en passant à l'intersection de ce rayon hypothétique et du plan focal :



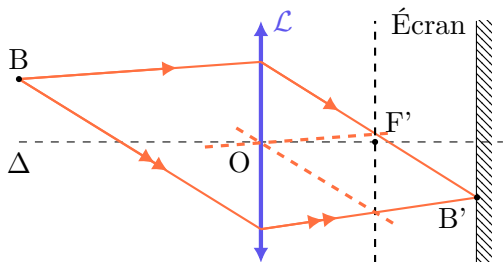
Recommençons pour le rayon du bas : un rayon hypothétique, parallèle au rayon incident, passant par le centre de la lentille :



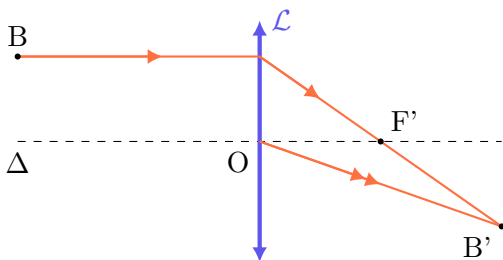
Le rayon du bas émerge en passant à l'intersection de ce rayon hypothétique et du plan focal ; et on en déduit le point image B', intersection des deux rayons émergents :



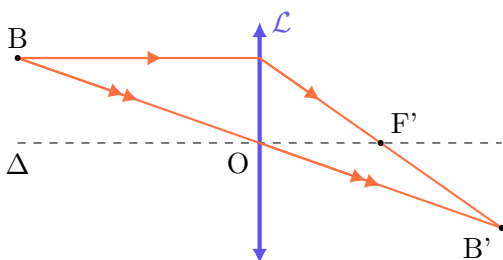
Pour terminer on peut placer un écran, l'image est réelle :



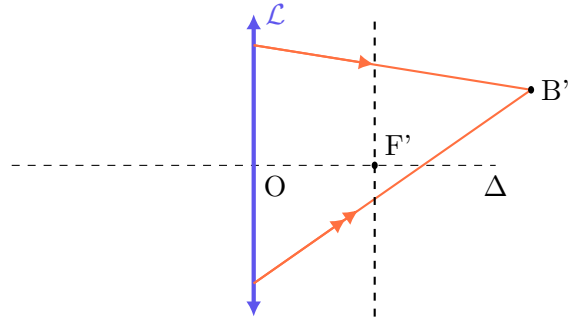
2. Première figure (de gauche) : le rayon émergent en passant par le centre de la lentille n'a pas été dévié :



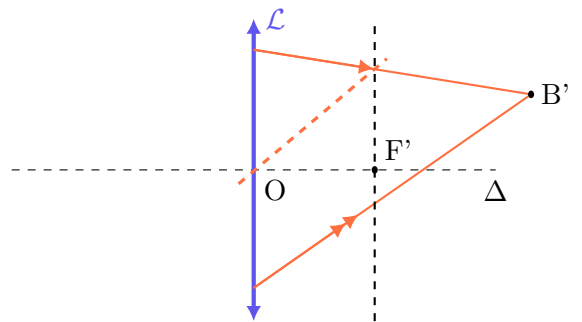
Le rayon émergent en passant par le foyer image F' est issu d'un rayon incident parallèle à l'axe optique ; on en déduit le point objet B.



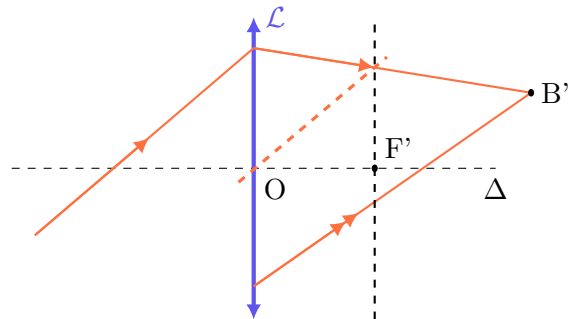
Deuxième figure (de droite) : aucun rayon particulier ; on trace la section du plan focal avec la verticale en pointillés :



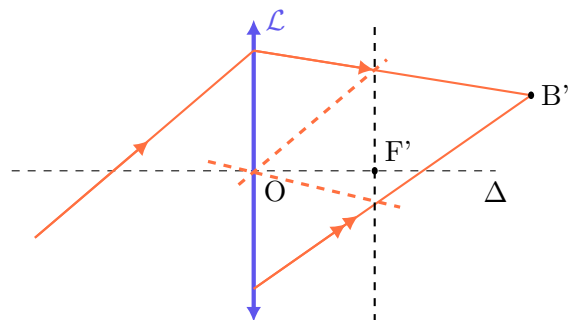
On trace un rayon hypothétique en pointillés, qui passe par le centre de la lentille et coupe le rayon du haut dans le plan focal :



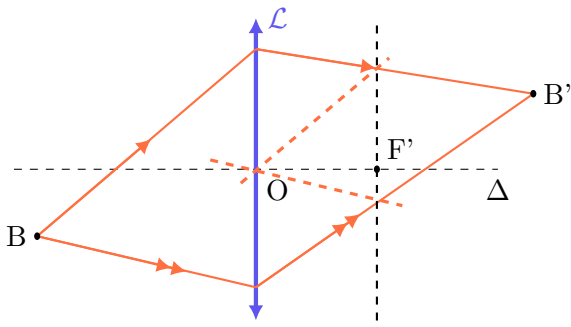
Ce rayon est non dévié, et parallèle au rayon incident, que l'on peut ainsi reconstituer :



De même, un rayon hypothétique, en pointillés, passant par le centre de la lentille, coupe le rayon du bas dans le plan focal :



Ce rayon est non dévié, et parallèle au rayon incident, que l'on peut ainsi reconstituer ; les deux rayons incidents se coupent en un point B, point objet recherché :



3.4 N° 14 p. 25 – Optics un cartoon

Traduction :

Dans le « Temple du Soleil », Tintin allume une pipe à l'aide d'une loupe.

1. Que représente l'inscription $+20 \delta$ portée sur la loupe ?
2. En déduire la distance à laquelle devrait être placé le tabac.

Réponse aux questions :

1. Il s'agit de la vergence C , exprimée en dioptrie (symbole δ).
2. Il faut placer le tabac dans le plan focal de la lentille, c'est-à-dire à une distance du centre de la lentille égale à la distance focale. Calculons cette distance :

$$f = \frac{1}{C} = \frac{1}{20} = 0,050 \text{ m} = 5,0 \text{ cm}$$

Il faut donc placer le tabac à 5,0 cm de la lentille.