

Titre : Spectres

Présentée par : Xavier Dumoulin

Rapport écrit par : Rémy Bonnemort

Correcteur : Laurent le Guillou

Date : 2020-05-20

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Tout-en-un physique PC/PC*	Sanz et al	Dunod	2014
Tout-en-un physique PCSI	Salamito et al	Dunod	2013
http://physique.chimie.pagesperso-orange.fr/TS_Physique/Physique_21_PROBLEME_AVEC_CORRIGE_21_B.htm			
Cours Radiométrie SupOptique : http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=31&fileid=8525	Julien Moreau		2019
https://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur_m%C3%A9tam%C3%A8re			

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : L3

Prérequis :

- Corps noir, loi de Planck
- Photométrie
- Quantification de l'énergie
- Angle solide

Plan :

1. Spectres discrets
2. Spectre continu
3. Comparaison des spectres de sources lumineuses : métamérisme

Introduction : annonce titre, niveau et prérequis

Vie quotidienne : on voit différentes couleurs donc on voit différentes longueurs d'onde que l'on peut classer en fonction de ce que l'on voit.

Spectre : classement de l'ensemble des fréquences contenues dans un signal.

Signal au sens large : signaux en électrocinétique, sonore mais dans la leçon on se restreint par choix aux spectres en optique (en électromagnétique).

➔ Diaporama : spectre électromagnétique

1.a) Cas d'un signal périodique de forme quelconque

Théorie développée par J. Fourier :

Théorème : tout signal périodique de fréquence f_s et de forme quelconque peut se reconstituer sous la forme d'une somme discrète de signaux sinusoïdaux

$$s(t) = A_0 + \sum A_n \cos(2\pi n f_s t + \varphi_n)$$

A_0 est la composante continue.

Le premier terme est appelé *fondamental* qui est à la même fréquence que le signal initial.

Les autres termes sont appelés harmoniques de rang n

On considère que des amplitudes positives et les phases sont des constantes.

La représentation du spectre correspond aux tracés soit de l'amplitude ou de la phase en fonction de la fréquence.

➔ Diapo : représentation de deux spectres du La440 par un diapason (son pur – uniquement le fondamental) et par une guitare (son riche – on a différents harmoniques).

➔ Vidéo : joueur de guitare

Uniquement certaines fréquences sont présentes, on a un spectre discret...

On en a déjà entendu parler de cette notion de spectre discret avec la lumière

1.b) Spectres d'absorption et d'émission

➔ Diapo : lampes à vapeur pour l'éclairage public de sodium et spectre

Travaux de Planck et d'Einstein.

En 1900 : Planck : quanta d'énergies : $E = h\nu$

Plus tard, Einstein développe la notion de photon

→ Diapo : 3 phénomènes responsables de l'émission de la lumière

Développement sur les phénomènes d'absorption, d'émissions spontanée et stimulée.

Matière : composée d'atomes qui ne peuvent prendre que certains niveaux d'énergie.

Lumière : transporte de l'énergie sous la forme $h\nu$

Il y a interaction uniquement dans le cas où $\Delta E = h\nu$

→ Diapo : diagramme des différents niveaux d'énergie pour la lampe de sodium

$$\Delta E_{01} = 2,11 \text{ eV} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{hc}{\lambda}$$

On trouve alors $\lambda \approx 588 \text{ nm}$, ce que l'on observe bien expérimentalement.

On pourrait également retrouver une autre longueur d'onde présente dans le spectre de la lampe à sodium.

On utilise ces spectres pour déterminer la nature d'un gaz par exemple.

Transition : dans la vie de tous les jours, on utilise peu les lampes à vapeur on utilise plutôt des LED.

2.a) Analyse de Fourier

On étudie donc des signaux non périodiques.

Théorie de Fourier : il est possible de reconstituer tout signal physique par superposition de signaux sinusoïdaux

Cependant, on a plus une somme discrète mais une somme continue, d'où :

$$s(t) = \int_0^\infty A(\omega) \cos(\omega t + \varphi(\omega)) d\omega$$

Représentation au tableau d'un spectre continu par accollement de pulsations proches les unes des autres.

2.b) Loi de Planck : lien avec le corps noir

Or, par définition de l'éclairement,

$$E \propto \langle s(x, t)^2 \rangle \propto \int_0^\infty A(\omega)^2 d\omega$$

Lien entre éclairement et luminance

Pour une source à luminance constante, $E = \frac{L \cdot \Omega}{s}$

On arrive donc à $L = \int_0^\infty L^0(\omega) d\omega$: il s'agit de la loi de Planck à la détermination de la constante près.

→ Diapo : spectre continu obtenu par la loi de Planck

On retrouve ce genre de spectre pour des lampes à incandescence que l'on pouvait utiliser il n'y a pas si longtemps.

3. Métamérisme

→ Diapo :

- Spectre d'une lampe fluocompacte : spectre continu mais présentant certaines raies plus intenses
- LED Blanche avec phosphore
- LED Blanche : LED RVB : grâce à la synthèse additive on a une lumière blanche

Ces spectres sont différents mais on observe la même couleur à l'œil nu.

Deux couleurs sont dites métamères ou homochromes si les spectres des sources associées sont différents mais les couleurs perçus sont identiques.

En utilisant deux sources différentes pour observer une toile, on n'observe pas les mêmes couleurs : cet effet est appelé métamérisme.

Conclusion : on s'est intéressé aux deux grandes familles de spectres : discret et continu grâce à l'étude de Fourier. On a également étudié les effets de métamérisme.

Ouverture : spectroscopie infrarouge et utilisation en chimie

Questions posées par l'enseignant

As-tu une idée de l'allure du profil d'une raie pour une transition discrète ?

On a des profils Gaussiens, Lorentziens

Profil théorique : convolution des deux (profil de Voigt)

Les niveaux atomiques sont quantifiés, quelles sont les causes physiques de cet élargissement ?

Gaussienne : effet Doppler

Lorentzienne : collisions interatomiques / moléculaires

Largeur intrinsèque des raies liée au temps de vie des niveaux atomiques

Les valeurs sur le diagramme des niveaux d'énergie du sodium sont négatives, quelle en est la raison ?

Que se passe-t-il lorsqu'un atome est excité ?

Les électrons passent d'une couche à une autre.

Référence : énergie choisie comme nulle lorsque l'électron est infiniment du noyau

Comment appelle-t-on cette situation ?

On parle d'ionisation, ce qui correspond à la libération du dernier électron

Le spectre d'une LED n'est pas très étendu habituellement... Pourquoi ce profil pour une LED ?

Il s'agit de semi-conducteurs à gap direct : recombinaison électron-trous

Peux-tu dire quelques mots sur la fluorescence ?

Explication à l'aide d'un schéma

Comment comparer la longueur d'onde de la lumière réémise par rapport à celle de l'excitation ?

Elle est plus grande car l'énergie de transition est plus faible

Est-ce que tous les objets qui émettent des spectres continus sont des corps noirs ?

Non

Quelles sont les hypothèses pour l'établissement de la loi du corps noir ?

Tous les rayonnements sont absorbés et sont réémis

Rayonnement à l'équilibre thermique

Transferts d'énergie se font par quanta d'énergie

Pourrais-tu expliquer pourquoi le ciel est bleu ?

Diffusion de Rayleigh.

La lumière incidente excite les molécules présentes dans l'atmosphère ce qui entraîne la création de dipôles. La puissance est en l'inverse de la puissance 4 de la longueur d'onde.

Pourquoi le ciel n'est pas violet ?

Dans la diffusion Rayleigh, comment se compare le photon réémis par rapport au photon incident en termes de longueur d'onde, de direction ?

Direction aléatoire

Polarisation donnée plus ou moins préférentielle

Longueur d'onde est identique

Pourquoi les nuages sont blancs ?

Il ne s'agit pas de la diffusion Rayleigh mais de la diffusion de Mie

Pourrais-tu décrire en quelques mots ce qui dans l'œil humain permet la détermination des couleurs ?

Les bâtonnets sont uniquement sensibles à l'intensité (*perception à faible luminosité, dans le noir*)

Les cônes sont responsables de la détection des couleurs (vert, rouge et bleu) puis le cerveau se charge de faire la synthèse additive.

D'un individu à l'autre les couleurs ne sont pas donc perçues de la même façon.

Pourriez-vous décrire l'interaction d'un photon de haute énergie avec la matière ?

Effet de non linéarité : création d'harmonique

Diffusion Rayleigh tant que la longueur d'onde est du même ordre que la dimension caractéristique de l'atome ou molécule. Si cette longueur d'onde est plus petite, le phénomène qui devient dominant est la diffusion Compton (interaction du photon avec un électron unique, uniquement compréhensible dans le cadre relativiste). Au-delà du MeV, les photons peuvent former une paire électron/positron ; dans la gamme des photons gamma, il peut aussi y avoir absorption par le noyau atomique du photon (et excitation du noyau).

Commentaires donnés par l'enseignant

Titre assez vague mais il fallait comprendre spectres de la lumière.
Cependant, l'introduction avec d'autres exemples (son d'une guitare) était bien.

Partie sur les spectres discrets : peut-être un peu léger .
Il y a des effets d'ionisation totale / de libération d'électrons, dont il faut aussi parler.

Pour les LED, on utilise des dopants pour créer des niveaux intermédiaires entre bande de valence et bande de conduction. Les spectres des LED sont complexes à interpréter, il est risqué de se les présenter comme un exemple de spectre continu sans en maîtriser la théorie.

Corps noir : modèle ultra simple, sous des hypothèses assez restrictives. Expérimentalement, il est assez difficile de fabriquer un corps noir satisfaisant. Il n'en existe pas vraiment dans la nature même si certains objets s'en approchent (naines blanches par exemple). Corps qui absorbe tout ce qu'il reçoit et qui est en équilibre avec le rayonnement dans lequel il baigne.

Une lampe à incandescence n'est pas un tout à fait corps noir, la forme générale du spectre ne correspond pas exactement (notamment à cause du verre de l'ampoule qui filtre, mais pas seulement).

La partie finale sur le métamérisme est intéressante mais un peu « casse-gueule » car liée à la perception de l'œil humain : il est alors indispensable d'expliquer auparavant les mécanismes de la vision chez les mammifères et la perception de la couleur, en particulier chez les humains.

Remarque en passant : une fraction de la population (mutations) possède un quatrième cône : d'autres (Daltonismes) n'ont pas les 3 cônes fonctionnels. La perception des couleurs est très dépendante de chaque individu : des couleurs métamères pour un individu ne le seront pas pour un autre.

En tant que candidat physicien, le jury en attendrait peut-être davantage sur le principe de la mesure d'un spectre : la dispersion par un prisme ou un réseau pour l'appliquer à la spectroscopie par exemple.

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Le plan de la leçon distinguant spectres discrets et spectres continus était raisonnable, même si cette division est somme toute assez arbitraire : même les spectres de raies monochromatiques présentent en général un élargissement des lignes (chocs, effet Doppler, etc) et sont donc de nature continue. Comme déjà souligné dans cette fiche, la 3^e partie, sur le métamérisme, était peut-être un peu risquée, car pour être correctement traitée, elle impliquerait auparavant une longue introduction sur les mécanismes de la vision chez les mammifères, et en particulier la perception des couleurs par l'oeil (et le cerveau) humain.

Il aurait peut-être été plus pertinent, surtout pour une leçon d'agrégation de physique, d'évoquer les instruments et les méthodes expérimentales de mesure d'un spectre lumineux : dispersion par un prisme, par un réseau, principe d'un spectrographe ou d'un monochromateur, etc.

La présentation de l'appareil mathématique (décomposition de Fourier) aurait peut-être mérité d'être un peu plus courte, en traitant dans la même partie la décomposition en fréquences discrètes (harmoniques) et la décomposition continue (transformée de Fourier).

Dans la 2^e partie sur les spectres continus, la présentation était trop succincte, et ne devrait pas se résumer à l'énoncé de la loi de Planck pour un corps noir, qui n'est qu'un modèle très idéalisé d'émission à spectre continu, dont l'application en pratique se limite à des objets très particuliers (fours expérimentaux, classes d'étoiles, etc.).

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Comme relevé précédemment, il serait peut-être plus pertinent de présenter les techniques expérimentales et les instruments utilisés pour mesurer les distributions spectrales des sources lumineuses (réseaux, prismes et instruments associés).

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Les expériences simples mettant en évidence le spectre d'une source de lumière : utilisant d'un prisme, d'un réseau ; éventuellement un réseau monté sur goniomètre (même si ce n'est pas hyper spectaculaire pour une démonstration de classe, ou alors en le munissant d'une caméra).

Bibliographie conseillée

« *Spectroscopie atomique - Instrumentation et structures atomiques* », Émile Biémont, de Boeck

