OPHY Chapitre 1 : Introduction à l'optique physique

3/11/2011

---

1 Modèle scalaire de la lumière

1.1 Élements historiques

1678 : pour Huygens, la lumière est une onde. Pour Newton, c'est des corpuscules.
1801 : pour Young, la lumière est une onde : interférences. Aidé par Fresnel.
1864 : Maxwell étudie l'électromagnétisme. Ces recherches le mène à établir que la lumière est une onde electromagnétique.
1881 : Michelson et Morley montrent que la vitesse de la lumière est identique dans tous les référentiels. Contradiction avec la loi de composition des vitesses. Einstein établit la théorie de la relativité.
1905 : Einstein étudie l'effet photoélectrique qui suppose que la lumière est formée de corpuscule. La dualité de la lumière est établie, la dualité onde-corpuscule de la lumière. Ceci donne naissance à la mécanique quantique.
1924 : Louis Broglie établie que c'est une onde de matière.

1.2 Postulats

- La lumière est une vibration sclaire $s(M,t)$ qui se propage le long des rayons lumineux (ceux de l'optique géométrique) à la vitesse $v = \dfrac{c}{n}$ dans un milieu d'indice optique n, c étant la vitesse de la lumière dans le vide.
- Si en M au temps t arrivent N vibrations lumineuses $s_i(M,t)$, la vibration résultante est $s(M,t) = \displaystyle\sum_{i=1}^{N} s_i(M,t)$.

1.3 Récepteurs lumineux

Un récepteur lumineux est caractérisé par son temps de réponse τ. 10^{-1} s pour l'oeil, 10^{-2} pour les capteurs CCD, 10^{-4} pour les émulsions photographiques et 10^{-6} pour les photodiodes. T est le temps caractéristique des variations de la lumière : $T = 10^{-15}$.
La lumière est une onde électromagnétique pour certaines fréquences auxquelles l'oeil est sensible.
Les récepteurs sont sensibles à la valeur moyenne de l'énergie reçu, moyennée sur le temps de réponse.

1.4 Éclairement

C'est la grandeur utile pour l'étude de l'optique physique. C'est la puissance moyenne reçu par le recepteur sur son temps de réponse τ noté $\mathcal{E}(M)$. $\mathcal{E}(M)$ est proportionnelle à $K\times < s^2(M,t) >_t$. L'éclairement est une puissance surfacique : $[W \cdot m^{-2}]$.

2 Lumière monochromatique

2.1 Définition

Une lumière monochromatique est décrite par $s(M,t) = \underbrace{A(M)}_{\text{amplitude}} \cos(\underbrace{\omega t + \varphi(M)}_{\text{phase}\varphi(M,t)})$. Caractérisation temporelle de la vibration :

- pulsation ω ;
- période $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$;
- fréquence $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi}$.

Caractérisation spatiale dans le vide de la vibration :

- longueur d'onde dans le vide qui est la distance parcourut par la lumière dans le vide pendant une période $\lambda_0 = cT = \dfrac{c}{f}$;
- nombre d'onde dans le vide $\sigma_0 = \dfrac{1}{\lambda_0}$;
- vecteur d'onde dans le vide $\overrightarrow{k_0} = \dfrac{2\pi}{\lambda_0}\overrightarrow{u}$ avec $\overrightarrow{u}$ vecteur unitaire tangent à la trajectoire du rayon lumineux.
  $k_0 = \|\overrightarrow{k_0}\| = \dfrac{2\pi}{\lambda_0}$ (par abus, k_0 est parfois nommé vecteur d'onde).

Dans un mileu d'indice n, on a :

$$v = \frac{c}{n} \qquad \lambda = vT = \frac{cT}{n} = \frac{\lambda_0}{n} \qquad \sigma = n\sigma_0 \qquad \overrightarrow{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\overrightarrow{u} = n\overrightarrow{k_0}$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c}$$

Remarque : lumière : $\lambda_0 \in [400, 800]$.

2.2 Représentation complexe

$s(M,t)$ monochromatique réel : $A(M)\cos(\omega t + \varphi(M))$ se voit associé sa représentation complexe $\underline{s}(M,t) = A(M)e^{j(\omega t + \varphi(M))}$. C'est l'amplitude temporelle complexe.
$s(M,t) = \underbrace{A(M)e^{j\varphi(M)}}_{\underline{a}(M)} e^{j\omega t}$. C'est l'amplitude complexe. $\underline{s}(M,t) = \underline{a}(M)e^{j\omega t}$.
On passe de $\underline{s}(M,t)$ à $s(M,t)$ par $s(M,t) = Re(s(M,t))$ ou $s(M,t) = |\underline{a}(M)| \cos(\omega t + \arg(\underline{a}(M)))$.

2.3 Expression de l'éclairement

$\mathcal{E}(M) = K < s^2(M,t) >_t = \dfrac{1}{2}KA^2(M)$ avec s monochromatique.
Remarque : $\mathcal{E}(M) = \dfrac{1}{2}K\underline{s}(M,t)\underline{s}^\star(M,t)$.

3 Retard de phase, chemin optique

3.1 Généralisation

On se place dans un milieu inhomogène.
On pose le chemin optique (MN) entre M et N, défini par $(MN) = \displaystyle\int_M^N n(P)dl$.

On a alors $\varphi(N) = \varphi(M) - \dfrac{2\pi}{\lambda_0}(MN)$.
(MN) est une grandeur algébrique positive si N est au delà de M (dans le sens de propagation de la lumière).
$\varphi(N) - \varphi(M) = -\dfrac{2\pi}{\lambda_0}(MN)$:

- si $-\dfrac{2\pi}{\lambda_0}(MN) = 0[2\pi]$, alors M et N vibrent en phase. (MN) est multiple de la longueur d'onde dans le vide ;
- si $-\dfrac{2\pi}{\lambda_0}(MN) = \pi[2\pi]$: opposition de phase. (MN) est un nombre impair de $\dfrac{\lambda_0}{2}$.

3.2 Cas particulier

Le chemin optique est dit purement géométrique. Dans certains cas particlier, il faut rajouter des termes (optiques).

- Cas de la réflexion vitreuse (réflexion sur un dioptre entre un milieu moins réfringent sur un milieu plus réfringent) ou sur un métal : il faut rajouter $\dfrac{\lambda_0}{2}$ au chemin optique : $(MN) = nMI + \dfrac{\lambda_0}{2} + nIN$.
- Cas d'un rayon lumineux passe par un point de convergence : $(MN) = nMN + \dfrac{\lambda_0}{2}$.

4 Théorème de Malus

4.1 Surface d'onde

Soit une source ponctuelle S monochromatique.
Une surface d'onde Σ associée à S est un lieu de points M tels que (SM) est constant.
$M_i \in \Sigma$, $(SM_1) = (SM_2) = \ldots = (SM_N)$.
$M \in \Sigma$, $\varphi(M)$ est constante. Tous le $M \in \Sigma$ ont même état vibratoire.

4.2 Énoncé

Après un nombre quelconque de réflexions ou de réfractions, les rayons lumineux issus d'une source ponctuelle sont orthogonaux aux surfaces d'ondes.

4.3 Application : formulation alternative du sigmatisme

Soit A et A' deux points.
Le système optique est rigoureusement stigmatique pour (AA') si les chemins optiques (AA') sont les mêmes pour tous les rayons lumineux issus de A et passant par A'.

4.4 Propriété

Les chemins optiques entre deux mêmes surfaces d'onde sont indépendant des rayons lumineux suivis.

5 Exemples d'onde

5.1 Onde sphérique

Une onde est shpérique si ses surfaces d'ondes sont des sphères centrées en un même point O. Elles sont de la forme $S(M,t) = \frac{A}{r}\cos(\omega t - \overrightarrow{k} \cdot \overrightarrow{r})$ avec A une constante, $\overrightarrow{r} = \overrightarrow{OM}$ et $\overrightarrow{k} = k \cdot \overrightarrow{u}$, $k > 0$.
Dans ce cas, il s'agit d'une onde divergente à partir de O.
Si $s(M,t) = \frac{A}{r}\cos\left(\omega t + \overrightarrow{k} \cdot \overrightarrow{r}\right)$, il s'agit d'une onde convergente vers O.

5.2 Onde plane

Une onde est plane si ses surfaces d'onde sont planes et parallèles entre elles. $s(M,t) = A\cos\left(\omega t + \varphi(O) - \overrightarrow{k} \cdot \overrightarrow{OM}\right)$.