

PHYSIQUE THÉORIQUE. — *Sur le déplacement des raies émises par un objet astronomique lointain.* Note de M. **LOUIS DE BROGLIE**, Membre de l'Académie.

L'auteur montre que les grands déplacements spectraux observés avec les « quasars » ne sont pas en contradiction avec la théorie relativiste de l'effet Doppler, mais il envisage une autre interprétation du déplacement des raies spectrales émises par un objet astronomique lointain qui ne fait plus intervenir un effet Doppler résultant d'une expansion de l'univers.

Le déplacement vers le rouge des raies spectrales émises par une nébuleuse lointaine est généralement interprété comme résultant d'un effet Doppler dû à l'expansion de l'univers. On écrit la formule de l'effet Doppler sous la forme

$$(1) \quad \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

et, comme une loi empirique découverte par Hubble et Humason montre que  $\delta\lambda/\lambda$  croît linéairement en fonction de la distance  $D$  de la nébuleuse à la Terre, on en déduit pour la vitesse de récession de la nébuleuse

$$(2) \quad v = HD,$$

où  $H$  est la constante de Hubble égale à environ 75 si  $v$  est mesurée en kilomètres par seconde et  $D$  en mégaparsecs.

Or, actuellement on connaît des radiosources quasi stellaires, dénommées « quasars », très éloignées pour lesquelles  $\delta\lambda/\lambda$  pourrait atteindre et dépasser la valeur 2, ce qui d'après (1) entraînerait  $v > c$ . Cette conclusion contraire à la théorie de la Relativité obligerait à abandonner l'interprétation des déplacements spectraux par un effet Doppler. Mais, en réalité, cette conclusion est inexacte et il y a lieu de reprendre le calcul de plus près.

En théorie de la Relativité, on déduit la formule de l'effet Doppler en écrivant la formule de transformation de la composante de temps du quadrivecteur fréquence-nombre d'ondes d'une onde électromagnétique, ce qui donne la formule bien connue

$$(3) \quad \nu = \frac{\nu_0(1 - \beta)}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}},$$

où  $\nu_0$  est la fréquence de l'onde dans le système propre de la source,  $\nu$  la fréquence dans le système de l'observateur avec  $\beta = v/c$ ,  $v$  étant la vitesse de récession de la source. Si l'on pose  $\delta\nu = \nu_0 - \nu$ , on a

$$(4) \quad \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{\delta\nu}{\nu_0} = 1 - \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

avec naturellement  $0 \leq \nu \leq \nu_0$ . Si  $\beta$  est très inférieur à 1 (approximation newtonienne), on trouve simplement

$$(5) \quad \frac{\delta\nu}{\nu_0} = \beta$$

et, comme le déplacement spectral est alors petit, on peut en posant  $\delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  écrire  $\delta\lambda/\lambda_0 = \delta\nu/\nu_0$  et l'on retrouve la formule (1).

Mais ces résultats ne sont plus valables dès que les déplacements spectraux deviennent très grands. En effet, la relation  $\lambda = c/\nu$  montre qu'on a

$$(6) \quad \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0 + \delta\lambda}$$

et c'est seulement quand  $\delta\lambda \ll \lambda_0$  qu'on obtient, en négligeant un terme en  $\delta\lambda^2$ ,  $\delta\nu/\nu_0 = \delta\lambda/\lambda_0$ . On doit donc s'en tenir à la formule (4) écrite en fréquence et l'on voit que  $\delta\nu$  ne peut atteindre sa valeur maximale  $\nu_0$ , correspondant à  $\nu = 0$  et  $\lambda = \infty$ , que pour  $\beta = 1$ . Cela montre que, conformément à la théorie de la Relativité,  $v$  ne peut dépasser  $c$ . Donc le fait que pour certains quasars on ait trouvé  $\delta\lambda/\lambda_0 \geq 2$  n'est aucunement en contradiction avec la théorie de la Relativité et n'oblige pas à renoncer à l'interprétation du déplacement spectral par un effet Doppler.

Cependant je ne suis pas personnellement persuadé que l'interprétation des déplacements spectraux observés par un effet Doppler lié à une expansion de l'univers s'impose réellement. A mon sens, l'effet observé pourrait être dû à un « vieillissement du photon », c'est-à-dire à une perte progressive d'énergie par le photon au cours de son long parcours intergalactique. Cet effet, jusqu'ici inconnu de toutes les théories de la lumière même compte tenu de l'existence des photons, pourrait résulter d'une cession continue d'énergie par le photon à l'onde qui l'entoure. Dans un article assez récent, j'ai montré pourquoi cette hypothèse pouvait être envisagée et conduire ainsi à écrire avec mes notations actuelles

$$(7) \quad \frac{\delta\nu}{\nu_0} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = 1 - e^{-K D},$$

avec  $K = H/c = 25 \cdot 10^{-5}$ ,  $D$  en mégaparsecs. Pour les petites distances  $D$  (c'est-à-dire inférieures à quelques centaines d'années de lumière), la formule (7) prend la forme  $\delta\nu/\nu_0 = KD$  en accord avec la loi de Hubble et Humason.

Aujourd'hui où le grand éloignement d'objets célestes tels que les quasars ne permet plus d'employer la formule d'approximation newtonienne (5), c'est la grandeur  $(\nu_0 - \nu)/\nu_0$  qu'on devrait toujours exprimer en fonction de la distance D en écrivant

$$(8) \quad \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = F(D).$$

La fonction  $F(D)$  devrait être une fonction croissante de D tendant vers KD pour les valeurs suffisamment petites de D. On pourra alors toujours interpréter le déplacement des raies par un effet Doppler en posant

$$(9) \quad 1 - \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} = F(D)$$

mais il est probable que cela donnerait pour  $\beta = v/c$  une fonction de D très compliquée et difficile à interpréter.

Mais, si l'on pouvait établir que la forme de  $F(D)$  est

$$(10) \quad F(D) = 1 - e^{-KD}$$

alors il deviendrait très probable que la véritable interprétation du déplacement des raies spectrales émises par un objet astronomique lointain est celle qui admet un vieillissement du photon tel que je l'ai envisagé. En effet, l'équation (8) pourrait s'écrire

$$(11) \quad \nu = \nu_0 e^{-KD},$$

d'où en multipliant par la constante de Planck  $h$ ,

$$(12) \quad W = W_0 e^{-KD},$$

où  $W_0$  est l'énergie du photon lors de son émission et  $W$  son énergie lors de son arrivée sur la Terre. Or, la formule (12) exprime justement une « dégradation du quantum  $h\nu$  » du photon au cours de son très long trajet intersidéral. La diminution de l'énergie du photon serait d'ailleurs très lente, de l'ordre du dix milliardième de sa valeur par année de trajet, ce qui expliquerait pourquoi elle ne pourrait se manifester ni dans des expériences de laboratoire, ni même à l'intérieur de notre galaxie.

Ma conclusion est que les résultats obtenus récemment par l'étude des quasars ne condamnent pas l'interprétation des effets observés par un effet Doppler lié à une expansion de l'univers, mais que cependant on doit accorder une certaine attention à une interprétation toute différente invoquant l'existence d'un vieillissement du photon comportant une diminution progressive de son énergie et correspondant à une propriété

de la lumière jusqu'ici inconnue. Pour trancher entre les deux conceptions, l'allure de la fonction  $F(D)$  pour les distances de l'ordre de  $10^{10}$  années de lumière ou supérieures pourrait être décisive.

(<sup>1</sup>) *Cahiers de Physique*, n° 147, octobre 1962, p. 429.

(94, rue Perronet, Neuilly-sur-Seine, Hauts-de-Seine.)