Énoncé du Concours Général

Session 1995

Physique-Chimie

I. Interférences à deux ondes

I.1. **a -** Décrire sommairement un dispositif classique d'observation d'interférences lumineuses non localisées (trous d'Young, miroirs de Fresnel...). Expliquer ce qu'on entend par «cohérence» et en quoi le dispositif décrit satisfait à cette condition de cohérence.

b - On réalise le dispositif interférentiel représenté sur la figure 1. Le laser émet un pinceau de lumière monochromatique. L est une lame mince semi-réfléchissante inclinée à 45° sur l'axe Ix du pinceau incident. Le miroir M renvoie le pinceau réfléchi par la lame dans une direction fixe faisant l'angle α avec l'axe Ix. L' est un objectif de microscope qui se comporte comme une lentille mince de faible distance focale (quelques millimètres). E est un écran d'observation.

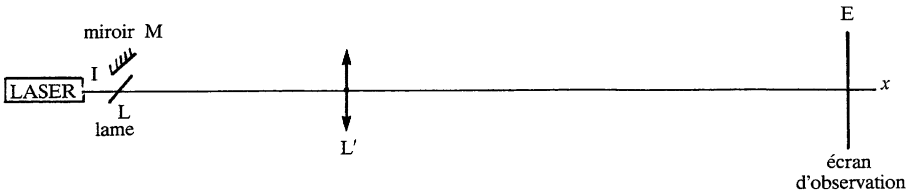

Figure 1

1 - Compléter la figure 1 en indiquant la marche des rayons lumineux. Où se trouve le champ d'interférence ?

2 - Pourquoi choisir un laser comme source de lumière ?

3 - Quel est le rôle de L' et où faut-il placer cette lentille ?

4 - Quel angle fait le plan du miroir avec celui de la lame ? Préciser par une figure.

I.2 - On étudie l'interférence de deux pinceaux monochromatiques émis par une même source laser, de longueur d'onde λ dans le milieu de propagation considéré. Les directions de propagation font entre elles un angle α.

a - Rappeler les conditions générales relatives à des interférences soit constructives, soit destructives. Les pinceaux étant notés (1) et (2) respectivement, on introduira en un point M du champ d'interférence la quantité $p(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda}$ (ordre d'interférence en M) où $\delta(M)$ désigne la différence de marche en M d'un rayon (2) par rapport à un rayon (1).

b - O étant un point de référence du champ d'interférence, calculer $\Delta p = p(M) - p(O)$ en fonction des vecteurs $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ et $\vec{K} = \vec{k_2} - \vec{k_1}$ où $\vec{k_1}$ et $\vec{k_2}$ sont respectivement les *vecteurs d'ondes* relatifs aux pinceaux (1) et (2) soit :

$$\vec{k_1} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u_1} \qquad \text{et} \qquad \vec{k_2} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u_2}$$

$\vec{u_1}$ et $\vec{u_2}$ désignent les vecteurs unitaires caractérisant les directions respectives de (1) et (2) (figure 2).

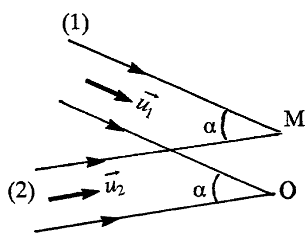

Figure 2

c - Montrer que l'ensemble des points tels que Δp a une valeur donnée définissent un plan perpendiculaire à $\vec{K}$.

d - Calculer la distance h séparant deux plans tels que $\Delta p = 1$. On exprimera h en fonction de λ et de l'angle α.

I.3. a - On observe le phénomène d'interférence dans la zone de croisement des pinceaux (1) et (2) et dans un plan parallèle à $\vec{K}$. Décrire la figure d'interférence observée et calculer l'interfrange i. Vérifier que pour α petit, cette expression de i s'applique au cas des montages classiques évoqués en **I.1.a**.

b - Calculer l'interfrange i' si maintenant le plan d'observation fait l'angle η avec $\vec{K}$.

c - Revenant au dispositif décrit en **I.1.b**, préciser la structure du champ d'interférence ainsi que la disposition des franges observées sur l'écran E.

Application numérique : L'angle α est petit ; la distance de la lame L au miroir M est d = 5 cm et la distance de L à la lentille L' est D = 1 m. L'écran E est situé à la distance D' = 3 m derrière L' dont la distance focale est f = 3 mm. Calculer l'ordre de grandeur de l'interfrange observé sur l'écran E pour $\lambda = 0{,}6\ \mu$m. Justifier le mode d'observation utilisé.

II. Délais de propagation - Effet Doppler

Dans toute cette partie on rapporte les mouvements à un même référentiel d'étude noté (R). La vitesse de propagation de lumière (ou plus généralement d'une onde électromagnétique) est c, le milieu de propagation étant, sauf indication contraire, assimilé au vide.

II.1 - On considère une source ponctuelle mobile S qui émet à des intervalles de temps égaux T_0 des flashs lumineux que l'on considérera comme infiniment brefs. L'émission est isotrope. Les signaux lumineux sont reçus par un détecteur A fixe. La vitesse $\vec{v_S}$ de S est constante.

a - On suppose que $\vec{v_S} = v_S\,\vec{u_x}$ où $\vec{u_x}$ est le vecteur unitaire de l'axe Sx porté par SA (figure 3a). On note que $v_S > 0$ si S se rapproche de A et $v_S < 0$ dans le cas contraire. Montrer que A reçoit les signaux émis par S à des intervalles de temps successifs égaux de valeur T_A que l'on exprimera en fonction de T_0 et du rapport $\beta_S = \dfrac{v_S}{c}$. Interpréter qualitativement le résultat.

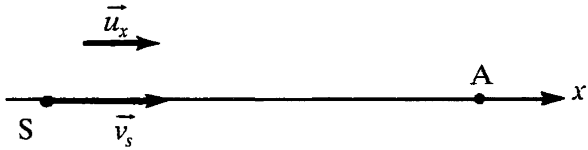

Figure 3a

b - Reprendre cette question en supposant que $\vec{v}_S$ fait l'angle θ avec Sx (figure 3b). On posera ici $v_s = || \vec{v}_S ||$ (donc $v_S > 0$) et $\beta_s = \dfrac{v_S}{c} > 0$. On supposera la distance $SA >> v_S T_0$ et on justifiera l'approximation qui en découle.

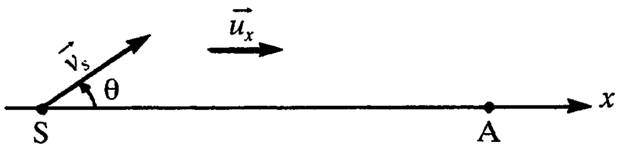

Figure 3b

II.2 - On a observé des émissions radio provenant de jets constitués d'électrons et de protons émis à grande vitesse par des *quasars* ou des noyaux actifs de galaxies. La vitesse apparente v_a observée de ces jets peut dépasser la vitesse c de la lumière dans le vide (*effet superluminique*). On se propose ici d'analyser cette apparente anomalie.

a - Dans le référentiel (R) d'observation, le jet S est émis avec une vitesse $\vec{v}_S$ faisant un angle θ avec Sx (voir **II.1.b**). L'observateur A, fixe dans (R), est informé du jet et de son mouvement par une émission radio de ce jet. En utilisant le résultats du **II.1.b** calculer en fonction de c, β_S et de θ la vitesse apparente v_a du jet c'est-à-dire sa vitesse mesurée sur le fond du ciel (perpendiculairement à Sx).

b - Établir la condition sur θ et β_S pour que $v_a > c$.

c - Pour β_S fixé, comment doit être cette valeur de β_S pour pouvoir observer effectivement l'effet superluminique ?

d - Pour β_S fixé quelle est la valeur θ_{am} de θ telle que v_a soit maximal ? Calculer cette valeur maximale v_{am} en fonction de v_S et du facteur de Lorentz $\gamma_S = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2{}_S}}$. Relier le résultat à celui de la question **II.2.c**.

Application numérique : On observe $v_{am} = 6{,}725$ c. Calculer γ_S , β_S et θ_{am} .

II.3 - La source ponctuelle S de vitesse $\vec{v}_S$ émet un rayonnement électromagnétique monochromatique de fréquence f_0 . On suppose que la longueur d'onde dans le vide du rayonnement, soit $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$, est très inférieure à la distance SA du détecteur A à la source S. $\vec{v}_S$ est supposé constant.

a - Montrer que l'observateur fixe placé en A attribuera au rayonnement émis par S une fréquence $f_A \neq f_0$ (effet Doppler). Calculer f_A ainsi que le «décalage Doppler» $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_A - f_0}{f_0}$ en fonction de β_S et de θ_S . Cas où $\beta_S << 1$.

b - Indiquer quelques conséquences de l'effet précédent concernant, par exemple, l'observation d'un spectre en astrophysique. Quelles applications peut-on en tirer ? Connaissez-vous un effet analogue en acoustique ?

II.4. **a** - La source S est maintenant immobile dans (R). Le détecteur A se déplace à vitesse constante $\vec{v}_A$ (figure 4). S émet un rayonnement électromagnétique de fréquence f_0 et on suppose toujours $SA >> \lambda_0$. Montrer que A mesure une fréquence $f_A \neq f_0$ que l'on exprimera en fonction de $\beta_A = \frac{v_A}{c}$ et de l'angle $\theta_A = (\overrightarrow{v_A}, Sx)$. Calculer le décalage $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_A - f_0}{f_0}$. Cas où $\beta_A << 1$.

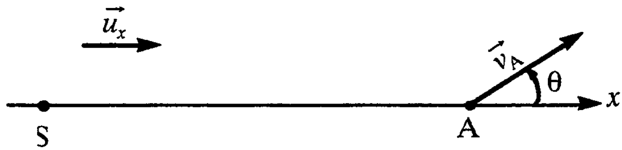

Figure 4

b - En comparant les résultats précédents à ceux obtenus en **II.3.a**, peut-on dire qu'il y a réciprocité entre S et A et que le décalage de fréquence dépend seulement du mouvement relatif de A et de S ? On reprendra l'analyse de cette question dans la partie **IV**.

II.5 - La source *fixe* S est disposée comme l'indique la figure 5. Elle émet un rayonnement électromagnétique de fréquence f_0 . Ce rayonnement est réfléchi sur le détecteur *fixe* A par le miroir mobile M. Le vecteur vitesse constant $\vec{v}$ de M est perpendiculaire au plan du miroir. Si I est le point d'incidence, on pose $\theta = (\overrightarrow{SI}, \vec{v})$. On supposera en outre que la distance SI est très grande devant la longueur d'onde λ_0 du rayonnement.

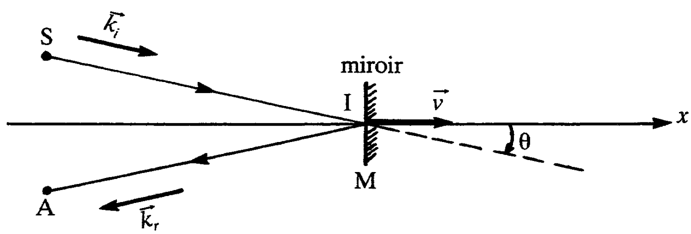

Figure 5

a - Calculer en fonction de f_0 , θ et $\beta = \frac{v}{c}$ la fréquence f_A mesurée par A. Calculer le décalage $\frac{\Delta f}{f_0}$. Cas où $\theta = 0$.

b - On suppose $\beta << 1$. Simplifier les résultats précédents et interpréter en faisant intervenir l'image (virtuelle) S' de S dans le miroir. Si $\vec{k_i}$ et $\vec{k_r}$ sont les vecteurs d'onde respectifs d'un rayon incident et d'un rayon réfléchi, exprimer Δf en fonction de $\vec{v}$ et du vecteur $\vec{K} = \vec{k_r} - \vec{k_i}$.

c - Le signal émis par S, de même que le signal reçu par A, sont transformés par un photodétecteur en signaux électriques qu'on superpose. Le détecteur est sensible au carré du signal résultant (détecteur quadratique) et seulement à la moyenne temporelle des composantes haute fréquence de ce signal résultant. Décrire le signal délivré par le détecteur et observé sur un oscilloscope. Comment mesurer ainsi le décalage Δf ?

II.6. **a -** On utilise un réseau optique par *«réflexion»* comportant $n = \frac{1}{d}$ traits équidistants par unité de longueur. Le réseau se déplace dans (R) avec une vitesse $\vec{v}$ constante parallèle à son plan et perpendiculaire aux traits. La source fixe S émet un rayonnement monochromatique de fréquence $f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$.

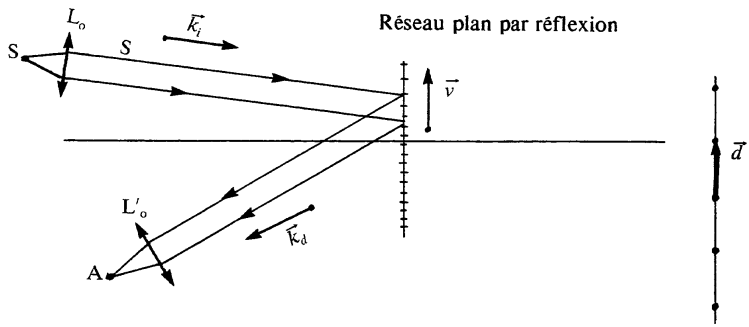

Figure 6

Un rayon incident de vecteur d'onde $\vec{k_i}$ est diffracté et le rayon diffracté de vecteur d'onde $\vec{k_d}$ est reçu par le détecteur fixe A (figure 6). On pose $\theta_i = (\vec{k_i}, \vec{v})$ et

$\theta_d = (\vec{k}_d, \vec{v})$. On suppose $\beta = \frac{v}{c} << 1$. Exprimer le décalage Δf observé en fonction de $\vec{v}$ et du vecteur $\vec{K} = \vec{k}_d - \vec{k}_i$. Exprimer également Δf en fonction de v, λ et de l'angle $\delta = (\vec{k}_d, \vec{k}_i)$.

b - Si $\vec{d}$ désigne le vecteur perpendiculaire aux traits, de norme d et de même sens que $\vec{v}$, montrer que la condition pour que les rayons diffractés dans la direction caractérisée par θ_d donnent entre eux des interférences constructives peut s'écrire :

$$\vec{K} \cdot \vec{d} = 2\pi \, m$$

où m est un entier positif ou négatif. Expliquer le rôle des lentilles L_0 et L'_0. En déduire, dans ces conditions, le décalage Δf observé en fonction de d, v et m. Interpréter le résultat.

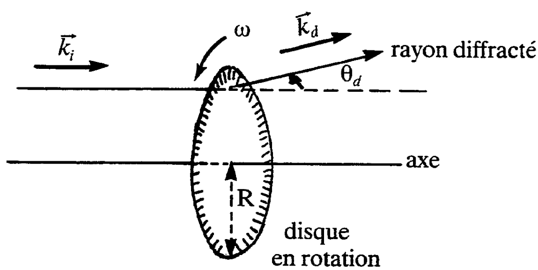

Figure 7

c - Reprendre l'étude précédente pour un réseau par *transmission,* les fentes diffractantes équidistantes (n par unité de longueur) étant alors disposées à la circonférence d'un disque de rayon R tournant autour de son axe fixe à la vitesse angulaire constante ω (figure 7). Calculer le décalage de fréquence Δf observé sur les rayons diffractés dans une direction θ_d correspondant à des interférences constructives. On supposera que la lumière incidente arrive perpendiculairement au disque. Si $f_r = \frac{\omega}{2\pi}$ désigne la fréquence de rotation du disque, exprimer $\frac{\Delta f}{f_r}$ en fonction uniquement de m et du nombre total N de traits du réseau. Voyez-vous des applications possibles de ce type d'expérience ?

Application numérique : Calculer en tours par minute la vitesse de rotation du disque pour $m = 1$, $N = 8.10^4$ et $\Delta f = 5$ MHz.
Considérer les cas $m = 1$ pour $m = -1$ et indiquer clairement sur une figure le signe de Δf en liaison avec le sens de rotation du disque et la direction du vecteur $\vec{k_d}$.

II.7 - Dans un tube cylindrique contenant un liquide au repos, on envoie une onde ultrasonore de fréquence f_s . Cette onde se propage parallèlement à l'axe du cylindre et provoque dans le liquide une modulation de pression de période spatiale égale à la longueur d'onde Λ_S de l'onde ultrasonore, soit $\Lambda_S = \frac{v_s}{f_s}$ où v_s est la vitesse de propagation de l'onde (figure 8). Cette structure périodique se déplace à la vitesse $\vec{v_s}$ parallèle à l'axe cylindre. Un faisceau optique de fréquence f_0 est envoyé dans le tube et se réfléchit sur les différents plans. On désignera par $\vec{k_i}$ et $\vec{k_r}$ respectivement les vecteurs d'ondes d'un rayon incident et d'un rayon réfléchi *au sein du liquide*. On posera $\vec{K} = \vec{k_r} - \vec{k_i}$.

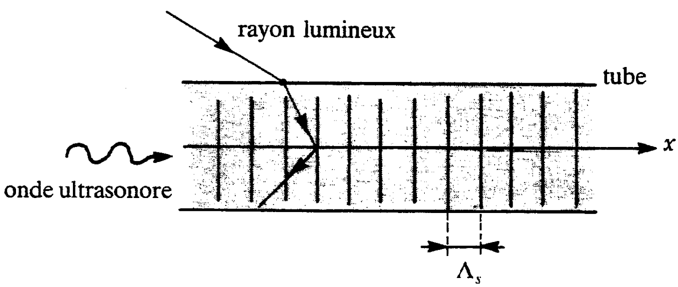

Figure 8

a - Écrire la condition d'interférence constructive entre les rayons réfléchis par deux plans successifs distants de Λ_S. Les réfractions qui ont lieu sur les parois du tube lors de l'entrée de la lumière dans le tube sont-elles à rendre en compte ? Justifier la réponse.

b - Calculer le décalage de fréquence Δf observé sur la lumière réfléchie compte tenu de la condition d'interférence constructive. On exprimera Δf en fonction de la fréquence f_s de l'onde ultrasonore. Ce résultat constitue l'effet Brillouin.

Application numérique : $\Lambda_S = 10^{-5}$ m, $v_s = 1500$ m.s^{-1}, m = 1. Calculer Δf et le comparer à la fréquence f_0 de la longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632{,}8$ nm .

III. Vélocimétrie

On se propose dans cette partie de généraliser les résultats obtenus en **II.5** et **II.6** débouchant sur les techniques dites de «vélocimétrie laser». Le référentiel d'étude est (R). On mesure les décalages fréquentiels par des techniques du type de celle décrite en **II.5.c**. Le milieu de propagation est assimilé au vide.

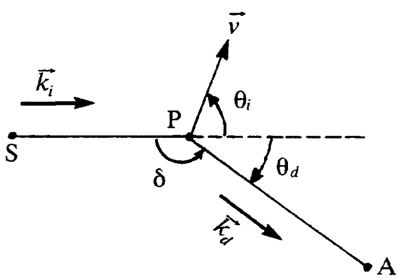

Figure 9

III.1 - Une particule P se déplace dans (R) à la vitesse constante $\vec{v}$ et traverse un pinceau laser émis par une source S fixe, de fréquence f_0 . La particule diffuse le rayonnement qu'elle reçoit ainsi, cela dans toutes les directions, en particulier dans la direction PA, où A désigne un détecteur supposé fixe dans (R). Un rayon incident selon SP et un rayon diffusé selon PA sont caractérisés respectivement par les vecteurs d'ondes $\vec{k_i}$ et $\vec{k_d}$. L'angle $\delta = (\vec{k_d}, \vec{k_i})$ est *l'angle de diffusion*. On définit également les angles $\theta_i = (\vec{k_i}, \vec{v})$ et $\theta_d = (\vec{k_d}, \vec{v})$ (figure 9).

a - En reprenant l'étude faite en **II.5** et **II.6** exprimer la fréquence f_A mesurée par A en fonction de f_0 , $\beta = \frac{v}{c}$, θ_i et θ_d .

b - Dans toute la suite on suppose $\beta << 1$. Exprimer dans ces conditions le décalage $\Delta f = f_A - f_0$ en fonction de $\vec{v}$ et du vecteur $\vec{K} = \vec{k_d} - \vec{k_i}$. Exprimer également $\frac{\Delta f}{f_0}$ en fonction de v, λ_0 , δ et de l'angle $\eta = (\vec{K}, \vec{v})$. Expliquer en quoi consistent les *méthodes de vélocimétrie.*

c - Le détecteur A qui reçoit le rayonnement diffusé possède une certaine ouverture de manière à pouvoir capter un rayonnement suffisant. Montrer que cela a l'inconvénient d'affecter la mesure de Δf.

III.2 - Pour obvier à l'inconvénient précédent, on utilise une méthode dite *«différentielle»*. On fait interférer entre eux deux pinceaux laser (notés (1) et (2)), comme en **I.2**, de vecteurs d'ondes respectifs $\vec{k_1}$ et $\vec{k_2}$ et issus d'une même source. La particule diffusante P traverse la zone d'interférence. Le détecteur A fixe reçoit de la lumière diffusée par P. On notera $\alpha = (\vec{k_2}, \vec{k_1})$ (figure 10). La fréquence d'émission est $f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$.

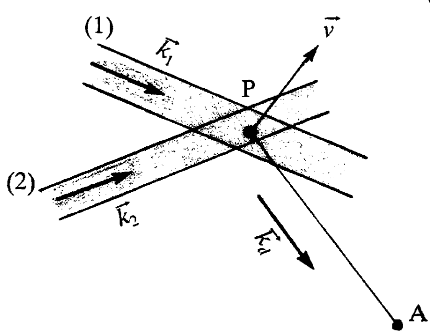

Figure 10

a - Soit $\vec{k}_d$ le vecteur d'onde d'un rayon détecté par A. Calculer les décalages de fréquence Δf_1 et Δf_2 relatifs respectivement aux pinceaux (1) et (2) pour une diffusion caractérisée par le même vecteur $\vec{k}_d$. On introduira les vecteurs $\vec{K}_1 = \vec{k}_d - \vec{k}_1$ et $\vec{K}_2 = \vec{k}_d - \vec{k}_2$.

b - Les signaux ainsi diffusés sont superposés et analysés dans le détecteur comme il a été indiqué en **II.5.c**. Montrer que l'on accède ainsi à la quantité $\Delta f = \Delta f_2 - \Delta f_1$ que l'on exprimera en fonction de $\vec{v}$ et du vecteur $\vec{K} = \vec{K}_2 - \vec{K}_1$. Quel est l'intérêt de la méthode ? Exprimer également Δf en fonction de β, λ_0, α et $\eta = (\vec{K}, \vec{v})$.

c - La particule P de vitesse $\vec{v}$ franchit la zone d'interférence en rencontrant ainsi, par exemple, les plans successifs d'intensité maximale. Calculer la fréquence f_r de ce défilement et la comparer à Δf. Interpréter le résultat et le rapprocher d'autres obtenus précédemment.

III.3 - Connaissez-vous des applications des méthodes vélocimétriques ?

En météorologie on utilise des lasers puissants émettant en infrarouge. Expliquer les raisons d'un tel choix.

Connaissez-vous des exemples de vélocimétrie par ondes ultrasonores ?

IV. Relativité de temps

A la question **II.4.b** on a noté une dissymétrie de l'effet Doppler selon qu'on considère la source en mouvement par rapport au détecteur ou au contraire le détecteur en mouvement par rapport à la source.

La théorie de la relativité restreinte, élaborée par Einstein, récuse une telle dissymétrie lorsque c'est la lumière qui véhicule l'information, le milieu de propagation étant le vide. Mais cette «symétrisation» exige un changement radical de conception quant au temps et à sa mesure. Il faut en effet admettre alors que la valeur mesurée de l'intervalle de temps séparant deux événements dépend du référentiel de mesure : le temps devient *relatif* à l'observateur.

Les questions qui suivent se proposent de préciser cette idée et d'en montrer quelques conséquences. Le milieu de propagation considéré est le vide.

IV.1 - On considère dans le référentiel (R) une source lumineuse ponctuelle S émettant suivant Sx des flashs infiniment brefs à intervalles de temps égaux à $T_S = \frac{1}{f_S}$. La source se déplace suivant Sx à la vitesse constante $\vec{v_S} = v_S \, \vec{u_x}$ (figure 11). Les signaux sont reçus sur un miroir M qui se déplace sur Sx à la vitesse constante $\vec{v_M} = v_M \, \vec{u_x}$ et qui les renvoie sur la source S où ils sont reçus par un détecteur A lié à S. La vitesse de la lumière dans (R) est c. On pose $\beta_S = \frac{v_S}{c}$, $\beta_M = \frac{v_M}{c}$.

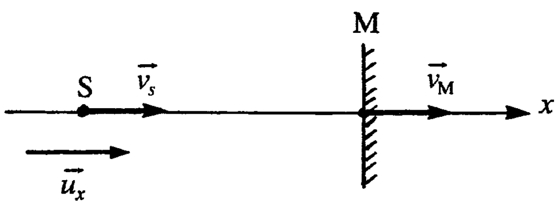

Figure 11

a - Exprimer la fréquence de retour f_A des signaux mesurée par A en fonction de f_S , β_S et β_M . On raisonnera dans le seul référentiel (R).

b - Retrouver le résultat précédent en raisonnant maintenant dans le référentiel (S) lié à la source et en appliquant la loi de composition des vitesses de Galilée. On introduira com - modément les rapports $\beta_{MS} = \frac{v_M - v_S}{c - v_S}$ et $\beta'_{MS} = \frac{v_M - v_S}{c + v_S}$.

c - Le résultat ne dépend-il que du seul mouvement relatif de S et M ? A quoi attribuez-vous la dissymétrie constatée ?

IV.2 - On suppose ici que S est fixe dans (R) soit $\beta_S = 0$. Un observateur *lié au miroir M* va mesurer l'intervalle de temps T_M séparant l'arrivée en M et *mesuré par une horloge liée à M* de deux signaux successifs, soit $T_M = \alpha\, T_S$ où α est une fonction de β_M . La symétrie impose que l'intervalle de temps T_A séparant deux signaux successifs de retour par A (confondu avec S) mesuré par une horloge liée à A (ou à S) soit de même $T_A = \alpha\, T_M$ où α a même valeur que précédemment.

a - En déduire la valeur de α en fonction de β_M .

b - Montrer que l'argument de réciprocité implique aussi que la vitesse de la lumière c dans le vide soit la même dans les différents référentiels considérés.

c - Soit $T_{M^{(R)}}$ les intervalles de temps successifs d'arrivée des signaux sur M mesurés par une horloge liée au référentiel (R) dans lequel S et A sont fixes. Montrer que :

$$T_{M^{(R)}} = \frac{T_M}{\sqrt{1-\beta_M^2}}$$

Le facteur de Lorentz $\gamma_S = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta_M^2}}$ est appelé «facteur de dilatation» du temps.

Ce résultat montre que l'intervalle de temps mesuré entre deux mêmes événements dépend du référentiel de mesure.

d - S est une source lumineuse monochromatique de fréquence f_0 mesurée dans son propre référentiel. Calculer la fréquence f mesurée par l'observateur lié à un récepteur se déplaçant radialement à la vitesse v par rapport à S (effet Doppler relativiste).

Indiquer le signe de $\Delta f = f - f_0$ selon que M se rapproche ou s'éloigne de S.

e - Les relations concernant la vélocimétrie laser sont-elles modifiées par la prise en compte de la relativité du temps ?

f - On revient à la situation décrite en **IV.1**. En admettant la généralité du résultat obtenu en **IV.2.c**, exprimer $\beta_{MS} = \frac{v_{MS}}{c}$ (où v_{MS} est la vitesse relative de M par rapport à S) en fonction de β_S et β_M . Exprimer v_{MS} en fonction de v_S , v_M et c (loi de composition des vitesses d'Einstein).

Examiner les cas particulier $|\beta_S| = 1$, $|\beta_M| = 1$, $|\beta_S| << 1$ ou $|\beta_M| << 1$ et conclure.

IV.3 - On retourne à l'étude faite en **II.2** sur l'effet superluminique. Le jet S a la vitesse $\vec{v_S}$ dans le référentiel où l'observateur A est fixe. On pose $\theta = (\vec{v_S}, \vec{SA})$.

a - En tenant compte du facteur de dilatation du temps calculer le décalage Doppler $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_A - f_0}{f_0}$ où f_0 est la fréquence des ondes radio émises par le jet mesurée dans son référentiel propre et f_A la fréquence mesurée par l'observateur dans son référentiel propre. Calculer $\frac{\Delta f}{f_0}$ lorsque la vitesse apparente v_a a la valeur maximale v_{am} (voir **II.2.d**).

b - Pour un jet de matière, on mesure :

– d'une part la vitesse apparente v_a , soit $\frac{v_a}{c} = a$,

– d'autre part le décalage Doppler, soit $\frac{\Delta f}{f_0} = b$.

1 **-** Montrer que β et γ ont chacun une borne inférieure β_m et γ_m respectivement que l'on calculera en fonction de a. Montrer également que θ a une borne supérieure θ_M que l'on calculera en fonction de b.

Application numérique : Calculer numériquement β_m , γ_m et θ_M pour a = 2,86 et b = 5,10.

2 - Calculer numériquement θ et v pour ces mêmes valeurs de a et b.

IV.4 - Soit deux émetteurs identiques A_1 et A_2 envoyant des signaux électromagnétiques infiniment brefs séparés d'un même intervalle de temps T_0 (mesurés dans les référentiels propres de A_1 ou A_2). A_1 et A_2 sont initialement au même point. A_1 reste fixe dans le référentiel (R) supposé *galiléen*. A_2 quitte A_1 en se déplaçant à la vitesse constante $\vec{v}$ dans (R), parcourt ainsi une distance D dans (R) avec de retourner vers A_1 à la vitesse $-\vec{v}$. On supposera que l'intervalle de temps nécessaire à la décélération et à l'accélération dans la phase de retournement est négligeable devant la durée du parcours. On posera $\beta = \frac{v}{c} > 0$.

a - Peut-on dire que les situations de A_1 et A_2 sont équivalentes ? Justifier la réponse. Pourquoi est-il nécessaire de préciser que (R) est galiléen ?

b - Calculer la durée t_1 du voyage aller et retour de A_2 mesurée par A_1. Quelle est la durée t_2 du même voyage mesurée par A_2 dans son référentiel propre ? Y-a-t-il un paradoxe à constater que $t_1 \neq t_2$? Quelle est la distance maximale d'éloignement d mesurée par A_2 ? Conclure.

Application numérique : Calculer t_1 , t_2 et d pour $\beta = 0{,}6$ et $D = 6$ années de lumière. Calculer la période T_2 de réception des signaux mesurée par A_2 dans son référentiel propre durant la phase d'éloignement. Quel est, dans cette phase, le nombre n_2 de signaux reçus par A_2 ? Exprimer n_2 en fonction de t_2 et de T_0 (on supposera $t_1 >> T_0$). Calculer de même la période T'_2 de réception des signaux mesurée par A_2 dans son référentiel propre lors de la phase de retour ainsi que le nombre n'_2 de signaux reçus. Reprendre ces mêmes questions pour A_1 en distinguant deux phases de réception selon la période de réception mesurée par A_1. Comparer les nombres totaux de signaux reçus respectivement par A_1 et A_2 et conclure.