

Transfert et Processus de Rayonnement

2h
Documents interdits.

1 Processus de rayonnement

1.1 Effet Doppler

Rappels : Soient deux référentiels galiléens \mathcal{K} et \mathcal{K}' en translation uniforme l'un par rapport à l'autre. Observé dans \mathcal{K} , le référentiel \mathcal{K}' se déplace à la vitesse $\vec{v}_0 = \beta_0 c \vec{e}_x$ dans la direction x (où c est la vitesse de la lumière). Cette vitesse est associée au facteur de Lorentz γ_0 .

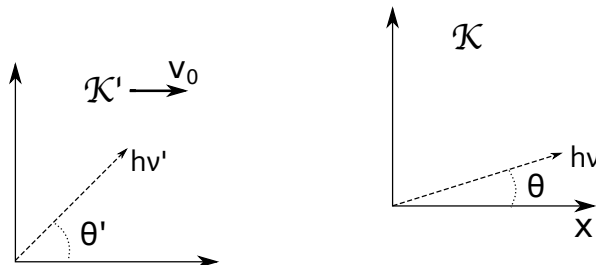


FIGURE 1 – Référentiels et notations

Dans le référentiel \mathcal{K} les fréquences sont notées ν et l'angle entre la direction de propagation d'un photon \vec{n} et la direction de référence \vec{e}_x est noté θ (de sorte que $\vec{n} \cdot \vec{e}_x = \cos \theta$). Dans le référentiel \mathcal{K}' en mouvement, ces quantités sont notés ν' et θ' . Avec ces notations, les formules relativistes de changement de repère sont :

$$\begin{aligned} \nu' &= \nu \gamma_0 (1 - \beta_0 \cos \theta) & ; & \quad \nu = \nu' \gamma_0 (1 + \beta_0 \cos \theta') \\ \cos \theta' &= \frac{\cos \theta - \beta_0}{1 - \beta_0 \cos \theta} & ; & \quad \cos \theta = \frac{\cos \theta' + \beta_0}{1 + \beta_0 \cos \theta'} \end{aligned}$$

1. On considère une source en mouvement vers un observateur à la vitesse v_0 et émettant des photons dans sa direction. Avec les conventions énoncées ci-dessus, quel est l'angle d'émission θ' de ces photons dans le repère de la source ?
2. En déduire la variation relative de fréquence $\Delta\nu/\nu_{\text{em}} = (\nu_{\text{obs}} - \nu_{\text{em}})/\nu_{\text{em}}$ entre la fréquence mesurée par l'observateur ν_{obs} et la fréquence d'émission ν_{em} .
3. Faire un développement limité dans le cas d'un mouvement faiblement relativiste ($v_0 \ll c$) et retrouver la formule la plus simple de l'effet Doppler reliant $\Delta\nu/\nu_{\text{em}}$ à la vitesse v_0 .
4. Cette source émet maintenant dans \mathcal{K}' des photons perpendiculairement à sa direction de propagation. Avec quel angle θ sont observés les photons dans le référentiel \mathcal{K} ?
5. Dans la limite fortement relativiste ($v_0 \sim c$), exprimer cet angle en fonction de γ_0 uniquement. Comment s'appelle ce phénomène ?

1.2 Facteur d'Amplification Compton

Dans cette partie, les quantités notées avec un prime (') correspondent à des mesures dans le référentiel de l'électron et celles sans prime à des mesures dans un référentiel fixe. Les quantités avec un indice 0 correspondent aux valeurs avant diffusion, et celles sans indice aux valeurs après diffusion.

On s'intéresse au facteur d'amplification A lors d'une unique diffusion Compton entre

- un électron se propageant dans une direction x avec une vitesse $\beta_0 = v_0/c$
- un photon d'énergie $h\nu_0$ se propageant avec un angle $0 < \theta_0 < \pi$ par rapport à la direction x .

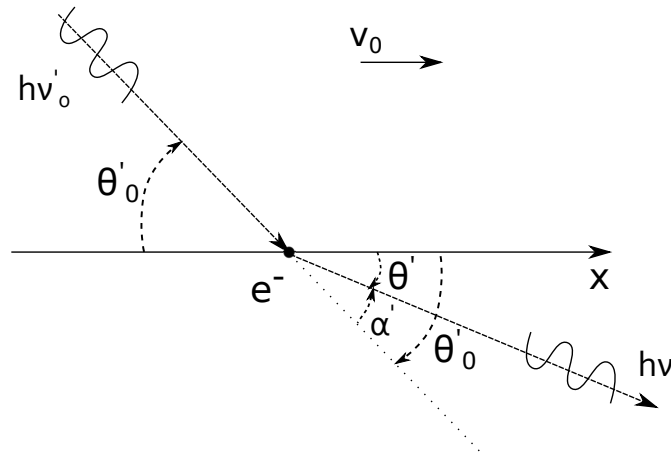


FIGURE 2 – Interaction Compton (dans le référentiel de l'électron) entre un électron se propageant à la vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x$ et un photon allant dans la direction repérée par θ_0 .

On suppose que, dans le référentiel de l'électron, le photon est diffusé d'un angle $0 < \alpha' < \pi$. On rappelle que l'énergie du photon après diffusion est alors :

$$h\nu' = \frac{h\nu'_0}{1 + \frac{h\nu'_0}{m_e c^2} (1 - \cos \alpha')}$$

Dans la suite, on ne s'intéressera qu'au cas de photons diffusés par des électrons ultra-relativistes diffusés dans le régime Thomson.

6. Rappeler le critère de définition du régime Thomson, dans le référentiel de l'électron ET dans un référentiel quelconque.
7. Dans ce régime, quels sont les propriétés de la diffusion Compton dans le référentiel de l'électron (variation d'énergie, distribution angulaire) ? Dans ce cas, que devient en particulier la formule donnée précédemment ?
8. Dans le cas d'une collision frontale ($\theta_0 = \pi$) donnant lieu à une retro-diffusion ($\alpha' = \pi$), suivre la démarche suivante (on pourra utiliser les rappels de la sous-partie précédente) :
 1. Donner l'énergie du photon $h\nu'_0$ avant diffusion (dans le référentiel de l'électron)
 2. En déduire l'énergie du photon diffusé $h\nu'$ (dans le référentiel de l'électron)
 3. Donner l'angle θ'_0 avec lequel arrive le photon (dans le référentiel de l'électron)
 4. Donner l'angle θ' avec lequel repart le photon diffusé (dans le référentiel de l'électron)
 5. En déduire l'énergie du photon $h\nu$ après diffusion (dans le référentiel fixe).
 6. Donner finalement la valeur du facteur d'amplification A pour une particule hautement relativiste ($\gamma_0 \gg 1$).

9. Recommencer pour une collision parallèle ($\theta_0 = 0$) donnant lieu à une retro-diffusion ($\alpha' = \pi$)
10. Rappeler (sans faire le calcul) la valeur du coefficient d'amplification moyen A lorsqu'un ensemble de photons **isotropes** est diffusé par des électrons relativistes de facteur de Lorentz γ_0 ?

1.3 Diffusions Compton multiples

Un disque d'accrétion émet un rayonnement de corps noir à la température $k_B T_0 = 1$ keV. Ce rayonnement traverse un gaz d'électrons chauds appelé *couronne*, de température $k_B T_e = 50$ keV, et de profondeur optique Thomson $\tau_T = 1$. On rappelle que l'énergie de masse des électrons est $m_e c^2 = 511$ keV.

11. On admettra que l'énergie cinétique E_k des électrons dans la couronne est de l'ordre de $k_B T_e$. Les électrons de la couronne sont-ils relativistes? Calculer leur vitesse typique $\beta = v/c$.
12. On admettra que dans le régime concerné, le facteur d'amplification à chaque diffusion est $A = 1 + (4/3)\beta^2$. En déduire l'énergie atteinte par des photons d'énergie initiale $h\nu_0$ après exactement N diffusions ?
13. Quel est le nombre **moyen** de diffusions N subies par les photons avant de sortir de la couronne ? En déduire leur énergie moyenne à ce moment.
14. Certains photons peuvent subir beaucoup plus de diffusions que la moyenne. Quelle énergie **maximale** peuvent atteindre les photons qui ressortent de la couronne ?