

Effet Sunyaev-Zel'dovich

Nous allons ici étudier quelques propriétés du gaz *intra-amas* dans lequel baignent l'ensemble des galaxies d'un amas. Nous supposons ce milieu complètement ionisé et à l'équilibre thermique. Il est caractérisé par une température T_e , une densité n_e , et une taille typique L . Il est le lieu de deux processus de rayonnement : il émet d'une part un rayonnement de Bremsstrahlung, et diffuse d'autre part les photons extérieurs par interaction Compton. Les photons extérieurs les plus abondants sont les photons du fond diffus cosmologique (CMB) et possèdent un spectre de corps noir :

$$I_{\nu_0} = B_{\nu_0}(T_0) = \frac{2h\nu_0^3/c^2}{e^{h\nu_0/k_B T_0} - 1} \quad (\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{str}^{-1})$$

de température $T_0 = 2.7 \text{ K}$ (c'est à dire $2.4 \times 10^{-7} \text{ keV}$). Cette interaction Compton porte alors le nom d'*effet Sunyaev-Zel'dovich* (SZ).

1 Émission Bremsstrahlung

1. Expliquer en quelques mots le principe de l'émission Bremsstrahlung.
2. Soit dP/dV la puissance émise par unité de volume d'un gaz rayonnant par Bremsstrahlung. Comment cette puissance dépend-elle des propriétés du gaz (on ne demande aucun facteur numérique, mais uniquement des dépendances qualitatives) ?
3. Quelle espèce (proton ou électron) est principalement responsable de ce rayonnement ? Vous justifierez votre réponse.
4. Quelle est la forme typique du spectre Bremsstrahlung d'un gaz de température T_e ? Comment dépend-il des propriétés du milieu ?
5. Les observations d'amas montrent des spectres qui coupent à des énergies typiques de $E = h\nu$ entre 1 et 10 keV. Dans la suite, on prendra $h\nu \approx 5 \text{ keV}$. À quelle la gamme du spectre électromagnétique ces énergies correspondent-elles ?
6. Estimer la température du gaz intra-amas. Calculer le rapport $\theta_e = k_B T_e / (m_e c^2)$. Le gaz est-il relativiste ?

2 Diffusion Compton

7. Expliquer en quelques mots le principe de l'effet Compton **inverse** (*up-scattering*).
8. Quels sont les différents régimes de diffusion Compton ainsi que leurs propriétés respectives dans le repère propre de l'électron (spectre diffusé, et distribution angulaire) ? Dans une source donnée, quel(s) critère(s) sépare(nt) ces différents régimes ?
9. Connaissant la température T_e du gaz et celle T_0 du CMB, déterminer le régime dans lequel s'effectuent les diffusions Compton des photons du CMB ?
10. Montrer que le facteur d'amplification lors d'une diffusion unique peut s'écrire $A \approx 1 + \theta_e$. et qu'il est très proche de 1.
11. Les photons qui rentrent dans un amas avec une énergie $E_0 = h\nu_0$ ressortent de l'amas avec une énergie moyenne $E = h\nu$. On appelle $y = \delta E / E_0$ la variation relative moyenne de leur énergie. Comment ce paramètre s'exprime-t-il en fonction de la température θ_e de l'amas et du nombre moyen τ_T de diffusions qu'ils subissent dans l'amas ? Sachant que pour des amas typiques $\tau_T < 1$, que peut-on dire de y ?
12. Comment s'appelle le paramètre τ_T , et comment s'exprime-t-il en fonction des propriétés de l'amas ?

13. Quelle était l'énergie $h\nu_0$ (avant diffusion) des photons observés avec une énergie $h\nu$? Donner l'expression du spectre diffusé en sortie de l'amas. Montrer qu'il possède une forme comparable à celle d'un corps noir, mais d'intensité et de température T différentes. Comment se compare T par rapport à T_0 ? Montrer que la variation relative de température $\delta T/T_0 \ll 1$ est faible.
14. Calculer la variation du spectre δI_ν , et montrer que dans la limite $y \ll 1$:

$$\delta I_\nu = y B_\nu(T_0) \left(\frac{h\nu}{k_B T_0} \frac{e^{h\nu/k_B T_0}}{e^{h\nu/k_B T_0} - 1} - 3 \right)$$

Cette fonction est représentée en Fig. 1. Justifier qualitativement l'allure de cette courbe. Expliquer pourquoi sa forme générale est indépendante des propriétés de l'amas et que seule son amplitude en dépend.

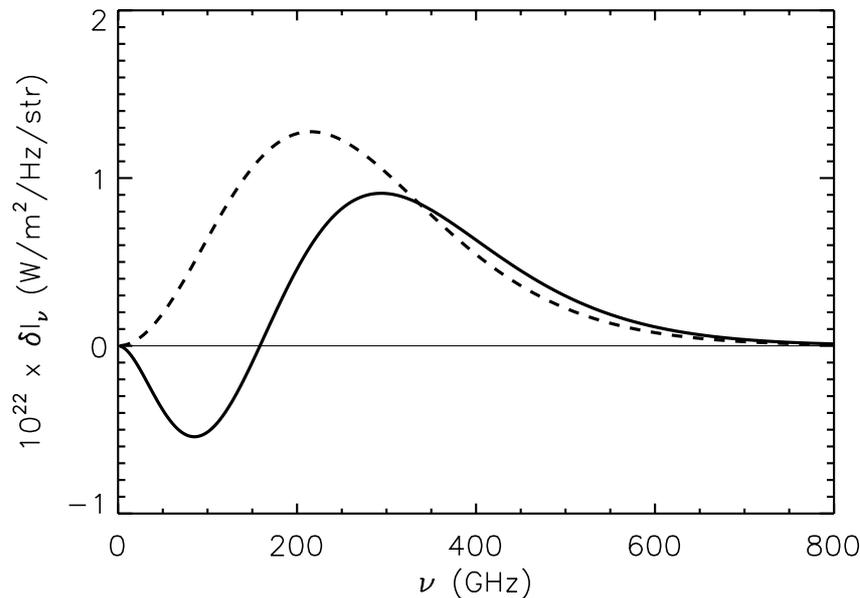


FIGURE 1 – *En trait plein* : écart spectral relatif entre le corps noir moyen du CMB à la température T_0 et le spectre diffusé de $\delta T/T_0 = 2 \times 10^{-5}$. *En pointillés* : la même chose pour une fluctuation primordiale du corps noir avec température locale T telle que $\delta T/T_0 = 1 \times 10^{-5}$.

15. En déduire une méthode observationnelle pour mesurer y .
16. On mesure ainsi $y \approx 2 \times 10^{-5}$. En déduire la densité d'un amas de diamètre 1 Mpc.
17. *Facultatif* : En réalité, le fond diffus cosmologique n'est pas parfaitement homogène et présente des inhomogénéités de température. Le spectre local ressemble donc également un spectre de corps noir mais de température T légèrement différente de la température moyenne T_0 . L'allure de la courbe δI_ν est différente de cette de l'effet SZ (voir Fig. 1). Justifier qualitativement l'allure de cette courbe et déduire que les observations spectrales permettent de distinguer ces deux effets.

On donne : $m_e c^2 = 511$ keV, 1 pc = 3.1×10^{18} cm et $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25}$ cm².