

Master ASEP : EISUA3F3
Transfert et Processus de Rayonnement

15 Décembre 2016

Partie II. : Processus de Rayonnement

On rappelle :

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

1 Émission Bremsstrahlung (4 pts)

On s'intéresse à un plasma ionisé de densité n , de température T , composé d'ions de nombre de charge Z .

- 1.1) Expliquer l'origine physique du rayonnement bremsstrahlung.
- 1.2) Représenter qualitativement la forme typique du spectre Bremsstrahlung émis par un tel plasma (avec ses éventuels points et valeurs remarquables).
- 1.3) Comment la puissance totale émise par unité de volume dépend-elle des propriétés du plasma ?

2 Collisions de particules (3pts)

On considère les deux situations de la figure 1 :

- a) la collision d'un électron non-relativiste de charge $-e$ avec un ion de charge Ze .
 - b) la collision de deux électrons non relativistes de trajectoires symétriques avec un ion de charge Ze au centre de symétrie.
- 2.1) Comparer la puissance totale émise par ces deux situations.
 - 2.2) Expliciter les hypothèses nécessaires à cette conclusion.

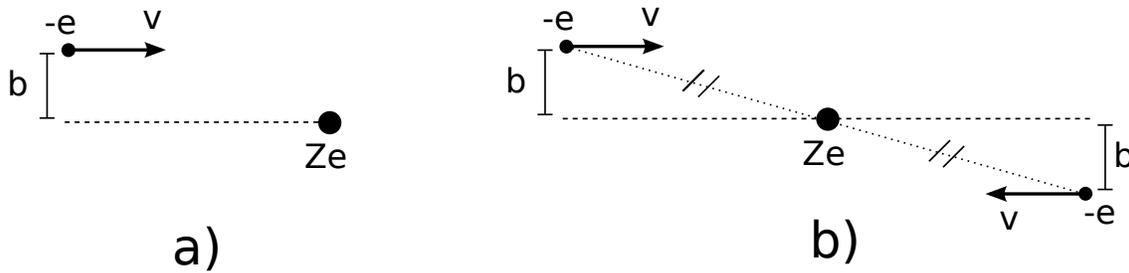


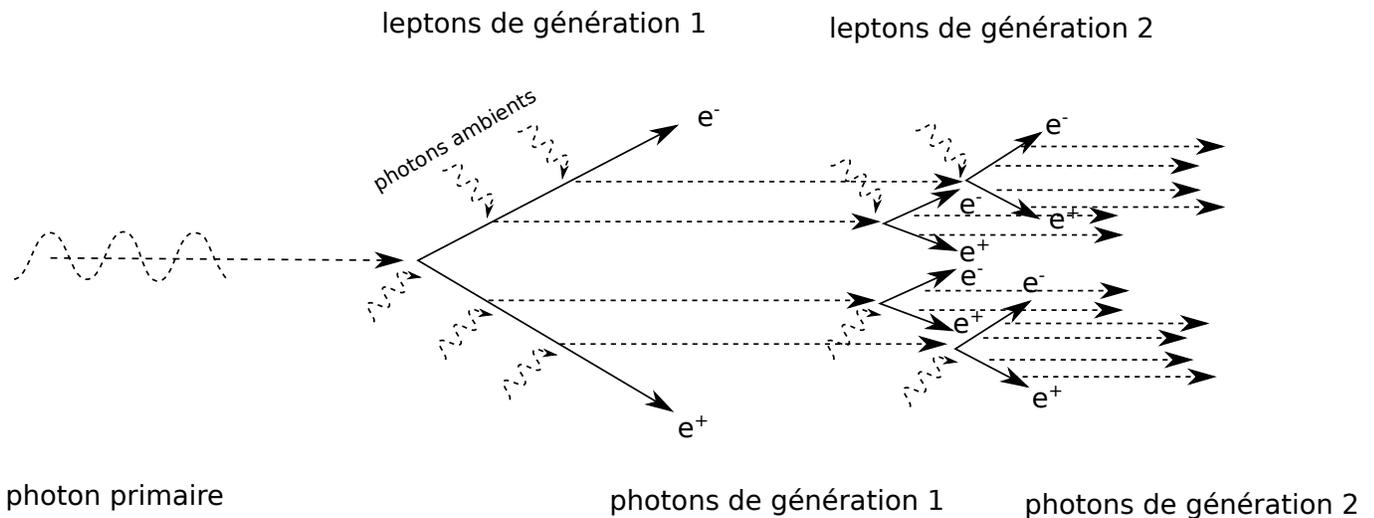
FIGURE 1 – Collisions à 2 et 3 corps.

3 Cascades électromagnétiques (13 pts)

On s'intéresse ici aux cascades électromagnétiques initiées par des photons γ de très haute énergie (notée $E_{\gamma,0}$). Ces photons primaires sont produits dans certaines sources comme les blazars. Les cascades se développent ensuite par la répétition de 2 processus :

- Les photons γ d'énergie E_γ peuvent s'annihiler avec les photons ambiants de basse énergie (produits par les étoiles et la poussière des galaxies). Ils produisent alors deux leptons (un électron et un positron) qui emportent chacun la moitié de l'énergie du photon : $E_e = E_\gamma/2$.
- Ces leptons interagissent par Compton inverse avec les photons ambiants du fond diffus cosmologique (CMB) à 2.7 K, produisant ainsi de nouveaux photons γ .

Ces photons peuvent à leur tour s'annihiler, produisant de nouveaux leptons et ainsi de suite. Une cascade se développe ainsi, génération après génération, produisant des photons et des leptons de plus en plus basse énergie. Elle s'arrête lorsque l'énergie des photons devient plus petite qu'une certaine énergie d'absorption $E_{\gamma,abs}$ qui dépend de la distance à la source.



Pour les applications numériques, on pourra utiliser les propriétés suivantes du CMB :

- Énergie moyenne : $E_{cmb} = 6.3 \times 10^{-4}$ eV
- Densité d'énergie : $U_{cmb} = 4.2 \times 10^{-13}$ erg/cm³

Diffusions Compton

Dans tout ce problème, on supposera que les diffusions Compton ont lieu dans le régime Thomson.

- 3.1)** Jusque quelle énergie de photons primaires peut-on considérer qu'il s'agit d'une bonne approximation ?
- 3.2)** Exprimer l'énergie E_γ des photons diffusés en fonction de l'énergie E_{cmb} du fond diffus et de l'énergie E_e des électrons.
- 3.3)** On suppose que les photons primaires ont une énergie $E_{\gamma,0} = 10^{14}$ eV. Si on néglige le refroidissement des électrons, quelle est l'énergie des photons de première génération ? De seconde génération ? Combien de générations la cascade peut-elle compter si les photons arrêtent d'être absorbés lorsque leur énergie passe sous $E_{\gamma,\text{abs}} = 1$ TeV ?

Refroidissement des électrons

En pratique, chaque électron diffuse un grand nombre de photons du CMB, ce qui le refroidit.

- 3.4)** Quelle énergie δE_e perd un lepton lors d'une unique diffusion ?
- 3.5)** Dans la suite, on notera τ_c le temps typique entre 2 interactions Compton¹. Le nombre d'interactions par unité de temps est alors $dN/dt = 1/\tau_c$. En déduire que le refroidissement d'un électron est gouverné par l'équation $dE_e/dt = -\alpha E_e^2$, où α est un coefficient qu'on exprimera en fonction des grandeurs du problème.
- 3.6)** On admettra que le spectre de photons de première génération se calcul comme

$$\frac{dN}{dE_\gamma} = \left(\frac{dN}{dt} \right) \left(\frac{dE_\gamma}{dE_e} \right)^{-1} \left(\frac{dE_e}{dt} \right)^{-1}$$

A l'aide des questions précédentes, donner l'expression de ce spectre en fonction de grandeurs du problème. Le représenter qualitativement en log-log, avec ses points remarquables.

Rayonnement synchrotron

Le milieu cosmologique dans lequel se développent les cascades est vraisemblablement magnétisé. Le champ magnétique intergalactique est mal connu, mais il est probable que sa densité d'énergie soit inférieure à $B < 10^{-10}$ G.

- 3.7)** Rappeler comment la puissance totale P_c émise par des électrons plongés dans un gas de photons dépend des propriétés des photons et de celles des électrons. Même question pour la puissance synchrotron P_s . Sachant qu'en unités cgs (B en Gauss, U_B en erg), la densité d'énergie magnétique s'exprime $U_B = B^2/(8\pi)$, peut-on négliger le refroidissement des particules par émission synchrotron ?
- 3.8)** Sachant que des particules non-relativistes dans un champ de 1 G émettent à une énergie typique de $h\nu_s = 10^{-8}$ eV. Quelle est l'énergie typique des photons synchrotron émis par les leptons les plus énergétiques de la cascade ?

1. Cela ne sert pas pour cet examen, mais on montre facilement que $\tau_c^{-1} = c\sigma_T n_{\text{cmb}}$ où n_{cmb} est la densité de photons du CMB.