

Ecole Polytechnique – Année 3

PHY583 Trous noirs, étoiles à neutrons et phénomènes associés – Frédéric Daigne

Projet n°7 – Sursauts gamma : émission "prompte"

Objectif : étudier la dynamique et le rayonnement d'un ejecta relativiste de sursaut γ . Pour un jeu de paramètres décrivant l'état initial du jet, on calcule la courbe de lumière et le spectre du sursaut gamma émis. Le projet s'inspire d'un article de 1998 en le mettant à jour sur certains aspects.

Description :

- **Commentaire général :** pour les valeurs numériques, les notes de cours et l'article de 1998 joint donnent des valeurs pertinentes.
- **Étape 1 : la dynamique.** Le projet doit commencer par développer un modèle simple de la dynamique de l'ejecta tant que le freinage par le milieu extérieur est négligeable. Le seul phénomène dynamique est alors la propagation d'ondes de choc dans l'éjecta (chocs internes). Une approche simple consiste à modéliser l'éjecta comme une succession de couches de matière qui n'interagissent que par des collisions directes (approche balistique). En dehors des collisions, les couches se propagent à vitesse constante. Chaque collision est traitée comme une collision inélastique entre une couche froide de masse M_1 et de facteur de Lorentz $\Gamma_1 \gg 1$ et une seconde couche froide de masse M_2 et de facteur de Lorentz $\Gamma_2 > \Gamma_1$, qui fusionnent pour donner une couche unique chaude de masse $M = M_1 + M_2$ et de facteur de Lorentz Γ , avec une énergie interne juste après la collision E'_i (ref. comobile). On suppose ensuite que cette énergie interne est immédiatement rayonnée et que la couche redevient froide (ce qui justifie l'approche balistique). Le processus de choc interne se prolonge tant que la distribution de facteur de Lorentz dans le jet n'est pas monotone (plateau ou croissante). La méthode est décrite dans l'article Daigne & Mochkovitch 1998 joint.
 - Paramètres du modèle dynamique : (1) la durée de l'éjection relativiste Δt_{GRB} : on verra par la suite qu'elle doit être comparable à la durée observée du sursaut gamma ; (2) le facteur de Lorentz de la matière éjectée $\Gamma(t)$ pour $0 \leq t \leq \Delta t_{\text{GRB}}$. Il y a des exemples dans l'article de 1998 ; (3) le flux d'énergie injectée lors de l'éjection $\dot{E}(t)$. Pour simplifier, on peut supposer $\dot{E} = \text{cst}$ dans un premier temps. Le processus d'accélération n'est pas traité dans le modèle, donc on suppose que le matériel éjecté adopte immédiatement ces propriétés (c'est valable si le rayon auquel l'accélération se termine est très petit par rapport aux rayons considérés par la suite). On suppose que le jet est ultra-relativiste, on déduit donc le flux de masse éjecté par $\dot{M}(t) = \dot{E}(t)\Gamma(t)c^2$.
 - Paramètre numérique : le pas de temps pour discrétiser cette éjection continue en "couches" : Δt_{ej} . Il faut vérifier à la fin que les résultats ne dépendent pas de ce choix tant que $\Delta t_{\text{ej}} \ll \Delta t_{\text{GRB}}$.
 - Résultats du modèle dynamique : la liste des collisions, avec pour chaque collision le rayon, la date, l'énergie dissipée, etc.

La première étape du projet est de construire ce modèle dynamique. Il faut pour cela obtenir en amont le calcul des propriétés de la couche unique fusionnée à l'issue d'une collision. Ensuite, le calcul est une boucle sur le temps, où à chaque itération on calcule la date de la prochaine collision, on avance toutes les couches jusqu'à cette date, et on traite la collision (ce qui diminue de 1 le nombre de couches). La boucle s'arrête quand il ne reste qu'une couche ou qu'il n'y a plus de collisions possibles car les facteurs de Lorentz sont ordonnés.

- **Étape 2 : propriétés de la matière choquée.** L'article joint explique comment estimer les propriétés dynamiques (facteur de Lorentz Γ_* , masse volumique ρ_* , densité d'énergie interne u_* , ces deux densités étant mesurées dans le référentiel comobile) de la matière choquée. On sait que de telles régions sont le siège, à l'échelle plasma, d'accélération de particules et d'amplification du champ magnétique. Pour ne pas avoir à traiter cette physique compliquée et encore incertaine, on la paramétrise de la façon suivante :
 - on suppose qu'une fraction ϵ_B de l'énergie dissipée est injectée dans le champ magnétique amplifié, ce qui permet de calculer B (dans le référentiel comobile) par

$$\epsilon_B u_* = \frac{B^2}{8\pi}$$

(note, en cgs, $\frac{B^2}{2\mu_0}$ devient $\frac{B^2}{8\pi}$).

- On suppose qu'une fraction ϵ_e de l'énergie dissipée est injectée dans une fraction ζ des électrons qui sont accélérés pour acquérir une distribution en loi de puissance avec une pente $-p$, soit

$$\begin{aligned} n_e^{\text{acc}} &= \int_{\gamma_m}^{\gamma_M} n(\gamma) d\gamma \\ &= \zeta \frac{\rho_*}{m_p} \\ u_e^{\text{acc}} &= \int_{\gamma_m}^{\gamma_M} n(\gamma) \gamma m_e c^2 d\gamma \\ &= \epsilon_e u_* \\ n(\gamma) &= \begin{cases} A\gamma^{-p} & \text{pour } \gamma_m \leq \gamma \leq \gamma_M \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

Pour simplifier, on suppose $\gamma_M \rightarrow \infty$ et on déduit donc de ces relations γ_m et A (normalisation de $n(\gamma)$). La seconde étape du projet consiste donc à calculer pour chaque collision les propriétés du champ magnétique amplifié et des électrons accélérés.

- **Étape 3 : émission synchrotron.** Les électrons accélérés dans le champ magnétique amplifié rayonnent par rayonnement synchrotron. Ce rayonnement peut être traité à différents niveaux de réalisme selon le temps disponible :

- La fréquence synchrotron des électrons ayant un facteur de Lorentz γ vaut $\nu'_{\text{syn}}(\gamma) = K_1 B \gamma^2$ (dans le référentiel comobile) avec $K_1 = \frac{e}{2\pi m_e c}$ dans le système cgs.
- Calcul simplifié : on suppose que la matière choquée rayonne avec un spectre piquant à $\nu'_m = \nu'_{\text{syn}}(\gamma_m)$ et avec deux pentes à basse et haute fréquence qui sont paramétrisées. Le nombre de photons émis par unité de fréquence est alors proportionnel à $\nu'^{-\alpha}$ pour $\nu' \leq \nu'_m$ et $\nu'^{-\beta}$ pour $\nu' \geq \nu'_m$. Des valeurs typiques sont $\alpha = 1$ et $\beta = 2.3$.
- Calcul plus détaillé : à discuter, on peut faire un calcul plus complet en s'inspirant de l'article de Sari, Piran & Narayan joint.

La troisième étape du projet consiste donc à calculer les propriétés du rayonnement synchrotron émis par chaque collision.

- **Étape 4 : signal mesuré par l'observateur.** L'observateur se situe à la distance D , dans l'axe du jet (en effet les sursauts gamma sont très lointains, et si l'observateur n'est pas dans l'axe, le signal est trop atténué par la focalisation relativiste pour être observable).

- Si une collision a lieu en R à la date t , et si on suppose que l'émission est instantanée dans le référentiel de la source, les premiers photons émis seront reçus par l'observateur à la date $\tilde{t}_{\text{obs}}^0 = t + \frac{D-R}{c}$. On change généralement l'origine des temps pour l'observateur en définissant $t_{\text{obs}}^0 = \tilde{t}_{\text{obs}}^0 - \frac{D}{c} = t - \frac{R}{c}$.
- On suppose que la surface émettrice est sphérique (jet conique). Chaque point de la surface émettrice focalise son rayonnement vers l'avant dans un cône d'ouverture $1/\Gamma_*$. On peut en déduire que l'observateur ne va pas voir un flash instantané mais un pulse de durée Δt_{obs}^0 à déterminer en fonction de R et Γ_* .

On dispose alors de toute l'information pour calculer la courbe de lumière (flux de photons en fonction du temps) mesurée par l'observateur.

- Pour chaque collision, on calcule la contribution à la courbe de lumière, sous forme d'un pulse démarrant à t_{obs}^0 avec une durée typique Δt_{obs}^0 . En sommant toutes les contributions, on peut calculer la courbe de lumière bolométrique (photons par seconde, émission intégrée de $\nu = 0$ à $+\infty$) ou dans une bande d'énergie donnée (par exemple entre 50 et 300 keV pour les sursauts gamma) à l'aide de l'information spectrale obtenue ci-dessus.
- Calcul simplifié d'une contribution élémentaire : dans un premier temps, on suppose que l'énergie rayonnée par une collision est reçue avec un flux constant de t_{obs}^0 à $t_{\text{obs}}^0 + \Delta t_{\text{obs}}^0$. Chaque photon émis avec une fréquence ν' dans le référentiel comobile de la matière choquée subit alors un effet Doppler relativiste. Il est mesuré par l'observateur avec une fréquence $\nu_{\text{obs}} \simeq \Gamma \nu'$ (note : pour simplifier, on n'inclut pas en plus les effets de redshift cosmologique : à discuter le cas échéant).
- Calcul exact d'une contribution élémentaire : si le temps le permet, on peut faire un calcul exact tenant compte de la focalisation relativiste vers l'avant et de l'effet Doppler relativiste. La note jointe guide ce calcul.

La quatrième étape du projet consiste donc à produire ces courbes de lumière synthétique, et éventuellement

par la même méthode des spectres synthétiques.

- **Étape 5 : discussion.** À l'aide de ce modèle, on peut explorer les propriétés des sursauts gamma synthétiques (variabilité, durée, évolution spectrale, ...), étudier l'impact des paramètres décrivant le jet initial ou la microphysique, comparer aux observations, etc.

Références :

- les notes de cours
- l'article Daigne & Mochkovitch 1998.
- l'article Sari, Piran & Narayan 1998.
- une note sur un flash produit par une sphère relativiste : le principe du calcul est guidé sur plusieurs étapes