

Ecole Polytechnique – Année 3

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

Projet n°6/10 – Supernovae/Kilonovae : courbes de lumière - dynamique de l'éjecta

Projet 6–objectif : calculer l'évolution au cours du temps de la luminosité d'une supernova.

Projet 10–objectif : calculer l'évolution au cours du temps de la luminosité d'une kilonova.

Dans les deux cas, on peut s'intéresser ensuite au freinage de l'éjecta s'il reste du temps.

Description : le cœur du projet est de pouvoir disposer d'une résolution numérique de l'évolution temporelle d'un éjecta de supernova/kilonova (rayon, masse volumique, température, ...) et de sa luminosité. Il y a deux phases (1) juste après l'explosion : expansion à vitesse constante. L'équation centrale est

$$\frac{dU}{dt} = -P \frac{dV}{dt} + (\dot{E}_{\text{heat}} - L) ,$$

donnant l'évolution de l'énergie interne (\dot{E}_{heat} est le chauffage radioactif). Dans cette phase la pression est dominée par la pression du rayonnement $P = \frac{1}{3}aT^4$. Dans la phase initiale l'éjecta est opaque ; (2) freinage de l'éjecta par le milieu extérieur.

1. Supernova (projet 6)

- Poser les équations d'évolution en utilisant le modèle simple à une zone donné dans les notes de cours. Ces mêmes notes de cours donnent une solution analytique dans certains régimes (évolution dominée par l'expansion adiabatique, expansion dominée par la décroissance radioactive, ...) : utiliser ces solutions pour tester le modèle numérique.
- Obtenir numériquement la solution pour un jeu de paramètres donné : température, luminosité, etc. au cours du temps.
- Pour passer de la courbe $L(t)$ à une courbe de lumière plus réaliste, il faut utiliser la forme du spectre, qu'on peut prendre égale au corps noir (on néglige les raies). On peut alors tracer la courbe de lumière observée dans une gamme de longueurs d'onde donnée (par exemple entre 400 et 700 nm : domaine visible).
- Comparer l'allure de la courbe de lumière bolométrique ($L(t)$) et de la courbe de la lumière limitée au domaine visible.
- Etudier l'impact des paramètres du modèle sur la courbe de lumière.
- Faire une petite recherche pour savoir pourquoi ces paramètres varient sans doute peu d'une explosion à l'autre dans le cas particulier des supernovae de type Ia. En déduire que les supernovae de type Ia peuvent être utilisées pour la mesures de distances de galaxies lointaines (cf. prix Nobel de Physique 2011).
- Développements possibles : aller vers un modèle plus raffiné, comme décrit dans l'ouvrage de Arnett en référence ci-dessous. Un des principaux effets supplémentaires à prendre en compte est celui de l'opacité de la matière qui évolue au cours du temps.

2. Kilonova (projet 10)

- Le modèle est le même avec plusieurs différences : opacité κ plus élevée, vitesse d'éjection plus élevée, masse éjectée beaucoup plus faible, expression du chauffage radioactif différente (décroissance de nombreux éléments lourds) : loi de puissance au lieu d'une exponentielle (voir document joint : $\dot{E}_{\text{heat}} = AMt^{-\alpha}$ avec A et α tirées de simulations de physique nucléaire).
- Modifier le modèle précédent pour l'adapter à une kilonova.
- Essayer d'ajuster les données de la kilonova associée à GW170817.

3. Kilonova, supernovae (projets 6 et 10) : calculer quand l'éjecta devient transparent. Comment adapter le modèle ?

4. Développements possibles (projets 6 et 10) – phase de freinage :

- retrouver la solution analytique auto-similaire de Sedov-Taylor et l'implémenter pour pouvoir représenter la densité, la pression, la température, la vitesse en fonction du rayon, au cours du temps.
- Ensuite coupler avec un modèle simple de l'accélération des particules au choc pour en déduire le rayonnement (thermique + synchrotron) de la nébuleuse au cours du temps (m'en parler).

Références :

- les notes de cours
- le livre "Supernovae & Nucleosynthesis" de D. Arnett, Princeton University Press (chapitre 13 et annexe D).
- Chauffage radioactif pour une kilonova.
- Observations de la kilonova associée à GW170817.