

Série 8: Enoncé

Laboratoire d'Astrophysique <http://lastro.epfl.ch>
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Semestre de printemps 2025

Exercice 1 : Nuage moléculaire en effondrement

Considérons un modèle simple de création d'une protoétoile par effondrement d'un nuage moléculaire.

Par la conservation du moment cinétique, la vitesse de rotation du nuage augmente progressivement avec l'effondrement. La force centripète résultant de cette rotation finira par équilibrer la gravitation, mettant fin à l'effondrement. La protoétoile aura alors une forme de disque, dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

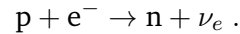
- a) Nous voulons calculer le rayon "final" r_f de la protoétoile, lorsque le nuage terminera de se contracter. Partons de l'équation qui décrit l'équilibre mentionné, dans le cadre d'une trajectoire circulaire autour du centre du nuage :

$$\omega^2 r = G \frac{M_r}{r^2} \quad (1)$$

- i. Dans cette équation, nous voulons remplacer la vitesse de rotation ω par une fonction de la vitesse de rotation initiale ω_0 et d'un rayon initial r_0 . Exprimez cette relation (i.e. la conservation du moment cinétique), en supposant que le nuage passe d'une forme sphérique rigide ($I_s = \frac{2}{5} M r^2$) à un disque rigide ($I_d = \frac{1}{2} M r^2$).
 - ii. Exprimez maintenant le rayon r_f de la protoétoile en équilibre, en fonction du rayon initial, de la vitesse de rotation initiale, et de la masse totale du nuage.
- b)
- i. Calculez la vitesse angulaire initiale ω_0 pour un nuage de $1 M_\odot$, d'un rayon initial de 0.5 pc et d'un rayon final de 100 UA.
 - ii. Quelle est la vitesse initiale de rotation (en m s^{-1}) au bord du nuage ?
 - iii. Quelle est la vitesse angulaire finale du disque ? Exprimez ce dernier résultat sous forme d'une période en années.
 - iv. Vérifiez (de tête, directement avec les bonnes unités !) que cette période est "très compatible" avec la période obtenue par application de la troisième loi de Kepler à la situation...

Exercice 2 : SN 1987a

L'étoile Sk-69202 est le progéniteur de la supernova SN 1987A. Elle se trouve dans le Grand Nuage de Magellan, soit à une distance $d = 50$ kpc. La supernova SN 1987A a été produite par l'effondrement du coeur de l'étoile Sk-69202. C'est ce qui se passe en fin de vie d'une étoile massive. Durant cet effondrement la densité du coeur devient si élevée (environ 10^{17} kg/m³) que les protons et les électrons se combinent pour former des neutrons, par exemple selon la réaction :



Les réactions nucléaires finissent par transformer le coeur en étoile à neutrons. Lors de la formation des neutrons, une énorme quantité de neutrinos ν_e est ainsi produite. Ces neutrinos interagissent très faiblement avec la matière, et ils quittent donc l'étoile.

- a) En supposant que la masse du coeur avant l'effondrement valait $2 M_\odot$, et que le coeur était composé de 50% de protons et de 50% de neutrons, estimez la quantité de neutrinos émis lors de la création de l'étoile à neutrons. Estimez le flux de neutrinos (en nombre par m²) reçu sur Terre. (Ne considérez que la réaction ci-dessus). La masse d'un neutron et d'un proton vaut $m_n \simeq m_p \simeq 1.67 \times 10^{-27}$ kg.
- b) Le flux de neutrino sur Terre provenant de SN 1987A est estimé à $N = 1.3 \times 10^{14}$ m⁻². En comparant ceci avec la valeur obtenue au point précédent, qu'en déduisez-vous ?
- c) L'énergie moyenne par neutrino vaut approximativement $E_\nu = 4.2$ MeV. Avec un flux de neutrinos de $N = 1.3 \times 10^{14}$ m⁻², calculez l'énergie libérée sous forme de neutrinos durant l'explosion de la supernova SN 1987A. Exprimez la en Joules, sachant que 1 eV = 1.602×10^{-19} J.
- d) Dans un autre type de supernova, appelé supernova de type Ia, le scénario est complètement différent. En effet, dans ce cas, il s'agit d'une naine blanche qui accrète de la matière d'une étoile voisine et qui finit par atteindre la masse critique de Chandrasekhar de $1.4 M_\odot$. Une fois cette limite atteinte, la naine blanche s'effondre sous son propre poids. Ceci induit un collapse de l'étoile qui chauffe fortement en son centre, puis amorce des réactions de fusion nucléaire en chaîne qui détruisent la naine blanche dans une formidable explosion. En utilisant l'équation

$$U_g \simeq -\frac{GM^2}{R} , \tag{2}$$

estimez l'énergie gravitationnelle d'une naine blanche d'une masse $M = 1.4 M_\odot$ et d'un rayon $R = 1R_T = 6380$ km. Ceci permettra d'estimer l'énergie nécessaire à la destruction de la naine blanche. Comparez ce résultat à l'énergie libérée sous forme de neutrinos durant l'explosion de SN 1987A.