

I - Astrophysique nucléaire

1 – Questions de cours

a – L'expression du pic de Gamow est : $G(E) = \exp[-E/(kT)] \times \exp[-2\pi\eta/\sqrt{E}]$.

Que représentent les deux termes de cette expression ?

Montrez que l'énergie du maximum du pic s'écrit : $E_0 = (k\pi\eta T)^{2/3}$.

b – Quelles sont les différences entre une réaction directe et indirecte ?

2 – Emission gamma du ^{56}Co produit par une supernova de type Ia (SNIa)

Le ^{56}Co éjecté par les SNIa est issu de la décroissance radioactive du ^{56}Ni (vie moyenne $\tau_{\text{Ni}} = 8.8$ jours) produit lors de l'explosion. Le ^{56}Co décroît en ^{56}Fe (stable), avec une vie moyenne $\tau_{\text{Co}} = 111.3$ jours. Ces trois noyaux constituent donc la chaîne suivante : $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

Le ^{56}Co effectue sa décroissance en émettant un photon γ d'énergie 847 keV dans 100% des décroissances et un photon γ d'énergie 1238 keV dans 68% des décroissances. A partir d'une centaine de jours après l'explosion, on peut considérer que la matière éjectée est assez diluée pour être transparente aux photons γ . Ces photons peuvent donc s'en échapper et on pourrait les observer. La mesure du flux (photons/s/cm²) de ces raies γ nucléaires permet donc d'estimer la masse de ^{56}Ni initialement produite dans l'explosion. C'est l'objectif de ce problème.

a – Donner l'expression du nombre de noyaux de ^{56}Co en fonction du temps : $N_{\text{Co}}(t)$. Pour cela on mettra en place puis on résoudra le système d'équations différentielles représentatif de la chaîne de décroissance. On supposera un nombre initial $N_{\text{Ni}0}$ de noyaux de ^{56}Ni .

b – A partir des résultats précédents, donner l'expression de $F_{847}(t)$ le flux de photons à 847 keV et de $F_{1238}(t)$ le flux de photons à 1238 keV en fonction du temps et de la masse initiale de ^{56}Ni , pour une SNIa située à une distance d de la Terre.

c – Quels seraient les flux de ces raies γ , 100 jours après l'explosion d'une SNIa située à 10 Mpc qui aurait produit initialement $0.5 M_{\odot}$ de ^{56}Ni ? Peut-on détecter ces raies sachant que le flux minimum détectable avec les spectromètres actuels est de 5×10^{-5} photons/s/cm² ?

On donne :

- les masses atomiques du ^{56}Ni et du ^{56}Co sont ≈ 56 g/mole

- Nombre d'Avogadro $N_A = 6 \times 10^{23}$ mole⁻¹.

- 1 pc = 3×10^{18} cm,

- 1 masse solaire : $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$ g.

II - Physique des particules

1 – Questions de cours

a – Etablir la liste des fermions élémentaires en précisant leur symbole et leur charge électrique.

b – Donner la liste des bosons de jauge en précisant leur symbole et le nom de l'interaction associée.

c – Pour chaque processus listés ci-dessous, dire s'il est permis ou non par les lois de conservation des nombres quantiques. Justifier votre réponse dans le cas négatif. Dans le cas positif, donner l'interaction responsable du processus.

i) $\tau^- \rightarrow \mu^- + \underline{\nu}_\mu$

ii) $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

iii) $\Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$

2 – Origine des particules accélérées dans l'explosion de la nova symbiotique V407 Cyg

L'émission gamma de la nova V407 Cyg pourrait être expliquée soit par la décroissance des π^0 produits par des collisions proton-proton ($pp \rightarrow pp\pi^0$ puis $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$), soit par l'émission inverse Compton et bremsstrahlung d'électrons. Ces deux types de particules (p et e) pourraient être accélérées lors de l'explosion. Les collisions pp produisent aussi des pions chargés π^+ et π^- en même quantité ($N_{\pi^+} = N_{\pi^-} = 0.5 N_{\pi^0}$). Ces derniers se désintègrent pour donner des électrons et des neutrinos :

$-\pi^- \rightarrow \mu^- + \underline{\nu}_\mu$

$-\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

puis $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \underline{\nu}_e$

puis $\mu^+ \rightarrow e^+ + \underline{\nu}_\mu + \nu_e$

L'observation des neutrinos et antineutrinos ($\bar{\nu}$) permettrait donc de différencier les deux origines de l'émission γ de la nova. Aux énergies considérées les ν sont détectables par les interactions neutrino-nucléon qui produisent des leptons (ou antileptons) chargés dans le volume de détection (eau). Ces leptons génèrent dans l'eau un rayonnement Cérenkov qui est mesuré par des photomultiplicateurs. L'objectif de ce problème est d'estimer le nombre de neutrinos qui pourraient être détectés.

N.B. Par simplification, on négligera le phénomène d'oscillation des neutrinos.

a – Le flux γ mesuré en 15 jours (durée de l'émission) est de 4.4×10^{-7} photons/s/cm². Quel serait le flux de neutrinos attendu (quelle que soit la famille des neutrinos) dans l'hypothèse où l'émission gamma est due à des collisions pp ?

b – Quel serait alors le nombre de ν détectés par un détecteur composé de 6×10^{36} nucléons ($\sim 10^{10}$ kg d'eau¹) sachant que la section efficace d'interaction de ces ν avec les nucléons est $\sigma = 1.5 \times 10^{-37}$ cm² ? Discutez le résultat.

c – Expliquez brièvement le phénomène de production de rayonnement Cérenkov.

¹ Pour information, il s'agit du volume de détection de l'expérience IceCube.