

超新星物質におけるハイペロン混合^{*})

岩手大・人社 西崎 滋

1. はじめに

鉄のコアの重力崩壊に始まる超新星爆発・中性子星形成の過程では、ニュートリノが物質中にトラップされるために、レプトンの混在度をほぼ一定に保ちつつ断熱的に物質系が変化する¹⁾。こうして形成される超新星物質は、冷たい中性子星物質に比べて、温度が $T \simeq (10 \sim 50)\text{MeV}$ という高温、バリオンあたりのエントロピー¹⁾が $S \simeq (1.0 \sim 1.5)^2)$ という高エントロピー、レプトンの混在度が $y_L \simeq (0.3 \sim 0.4)^{2),3)}$ という高混在度の特異な高密度物質系である。

通常の中性子星のコア領域には、核子以外にハイペロンが混在している可能性が高い⁴⁾が、生まれたばかりの熱い中性子星の内部ではどうなるであろうか。超新星物質の特徴がハイペロンの混在に対してどのように影響するのかを検討するのがこの研究の目的である。ここでは、粒子間の相互作用を無視した場合の結果を報告する。

2. 模型と結果

まず、中性子 (n)、陽子 (p)、 Λ 粒子、 Σ^- 粒子、および、電子 (e^-) から成る中性子星物質を取り上げて、有限温度の影響を調べる。各構成粒子の混在度 $y_i (i = n, p, e, \Lambda, \Sigma^-)$ は、バリオン数密度と温度が与えられると、

- 1) バリオン数保存： $y_n + y_p + y_\Lambda + y_{\Sigma^-} = 1$
- 2) 荷電中性条件： $y_p = y_e + y_{\Sigma^-}$
- 3) 化学平衡： $\mu_n = \mu_p + \mu_e$ 、 $\mu_{\Sigma^-} = \mu_n + \mu_e$ 、 $\mu_\Lambda = \mu_n$

によって決まる。ここで、 $\mu_i (i = n, p, e, \Lambda, \Sigma^-)$ は各粒子の化学ポテンシャルである。

図 1(a) に、バリオン密度 $\rho (\rho_0$ は通常の核物質密度) の関数として、温度 $T = 0\text{MeV}$ で中性子星物質における各粒子の混在度を示す。中性子との質量差は Λ 粒子よりも Σ^- 粒子の方が 80MeV ほど大きいですが、実際に混在を始める密度は Σ^- 粒子の方が Λ 粒子よりも低くなっている。これは、化学平衡の条件式に現れる電子の化学ポテンシャルの影響によるものであり、 Σ^- 粒子が電子の代役として混在し易くなっているのである。高密度領域では、陽子と Σ^- 粒子が 20% に近づくが、 Λ 粒子の方は 5% 以下となり、中性子が 60% 以上存在している。電子は全密度領域で 2% を越えることはない。

^{*})この報告は、山本安夫(都留文科大)、高塚龍之(岩手大・人社)両氏との共同研究に基づくものである。

^{†)}この報告では、 $\hbar = c = k_B$ (ボルツマン定数)=1とする単位系を用いる。

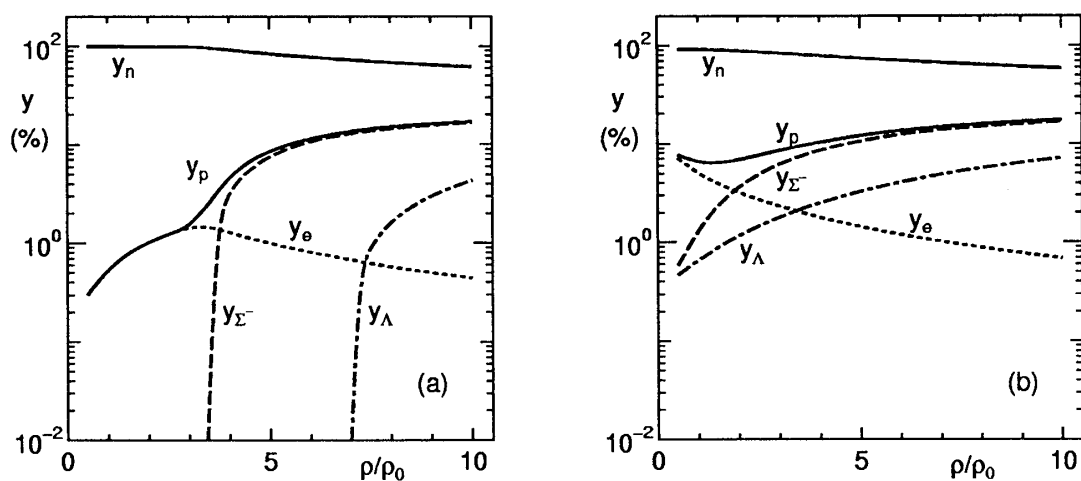


図 1: 中性子星物質における各粒子の混在度。(a) 温度 $T = 0\text{MeV}$ (b) $T = 30\text{MeV}$

温度 $T = 30\text{MeV}$ の場合を図 1(b) に示す。有限温度の影響は、温度とフェルミ・エネルギーの比が大きいほど顕著になるため、中性子以外の粒子で、特に、低密度領域で著しくなっている。電子の混在度は、低密度領域で 7% 程度へと増加しており、これは高密度領域での混在度よりも大きい。中性子と電子を除くと、低密度領域での混在度が高密度領域での混在度を超えることはない。高密度領域での各粒子の混在度については、有限温度による影響が小さく、 Λ 粒子と電子の混在度が少し増加する程度となっている。

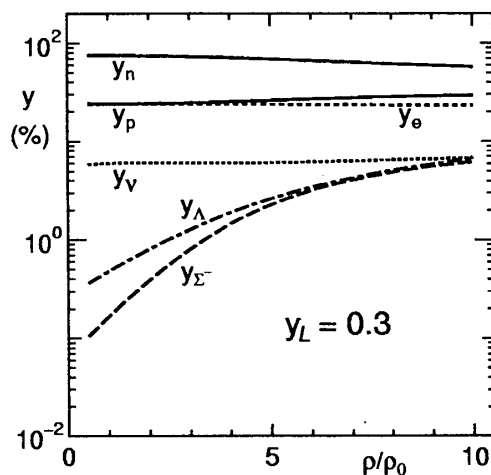


図 2: 温度 $T = 30\text{MeV}$ 、レプトン混在度 $y_L = 0.3$ の超新星物質における各粒子の混在度。

超新星物質として、中性子星物質に電子ニュートリノ ν_e を導入した物質系を考察する。ニュートリノが縮退するために、化学平衡の最初の 2 式が変更を受けて、 $\mu_n + \mu_\nu = \mu_p + \mu_e$ 、 $\mu_{\Sigma^-} + \mu_\nu = \mu_n + \mu_e$ となる。レプトン数が保存するという条件 ($y_L = y_e + y_\nu = \text{一定}$) の下

で、バリオン数密度と温度が与えられると、各粒子の混在度が決まる。温度 $T = 30\text{MeV}$ 、レプトンの混在度 $y_L = 0.3$ の場合の結果を図2に示す。図1(b)の結果と比較すると、レプトン数保存という制約から、電子から Σ^- への交代が抑制され、 Σ^- の混在度が大きく減少していることが分かる。電子とニュートリノの混在度は密度の全領域でほぼ一定になっており、ニュートリノは(6~7)%で電子は(23~24)%となっている。ニュートリノと電子の大小関係は、ニュートリノと電子の内部自由度の違いに起因して、ニュートリノの化学ポテンシャルが大きくなり過ぎるのを避けるためである。レプトンのうち電子の占める割合が大きいため、冷たい中性子星物質(図1(a))での結果に比べて、陽子の混在度は(20数~30)%へと大きく増加している。 Λ 粒子の混在度は、図1(b)の結果からの変化は小さいが、それぞれの密度で、中性子の混在度が減少した影響を受けて減少している。

3. まとめ

超新星物質においては、ニュートリノ縮退のためにレプトン数が保存され、電子や陽子の混在度が増加し、ハイペロンは混じり難くなる。特に、電子の代役をする Σ^- 粒子の混在が著しく抑制される。有限温度の効果は低密度領域で顕著となり、中性子以外の粒子の混在に対する影響が大きい。誕生時の熱い中性子星では、低密度領域でもハイペロンが混在するものの、全体としての混じりは少なく、冷えていく行く過程でハイペロンの割合が増加し、状態方程式が軟化すると予想される。定量的な評価には粒子間の相互作用の影響やエントロピー一定の条件を取り入れた今後の研究が必要があるが、定性的な結論には影響しないであろうと考えている。

参考文献

- 1) D.Z. Freedman, Phys. Rev. **D9**(1974), 1389.
K. Sato, Prog. Theor. Phys. **53**(1975), 595; **54**(1975), 1325.
T.J. Mazurek, Astrophys. Space Sci. **35**(1975), 117; Astrophys. J. Lett. **207**(1976), L87.
- 2) H.A. Bethe, G.E. Brown, J. Applegate and J.M. Lattimer, Nucl. Phys. **A324**(1979), 487.
- 3) R.I. Epstein and C.J. Pethick, Astrophys. J. **243**(1981), 1003.
J.M. Lattimer, C.J. Pethick, D.G. Ravenhall and D.Q. Lamb, Nucl. Phys. **A432**(1985), 646.
- 4) S. Nishizaki, Y. Yamamoto and T. Takatsuka, Prog. Theor. Phys. **105**(2001), 607.