

ハイペロン混在中性子星が提起する問題

岩手大・人社 高塚龍之

ストレンジネス自由度を考慮すると高密度中性子星物質は核子に加えてハイペロンが対等な構成要素として参画する「バリオン物質」としての舞台を提供する。我々は、この数年間、バリオン間相互作用についての理論的研究の進展やハイパー核から引き出される実験的知見にも注意を払いつつ、G行列計算に基づく有効相互作用アプローチにより現実的なハイペロン混在中性子星モデルの導出にとり組んできた¹⁾。ここでは、この研究の中で得られた新たな知見に焦点をあわせ、逆に「Y混在中性子星がどのような問題を提起しているか」について述べる。

(1) ハイペロンは確実に混じってくる

中性子星中心部に向かって密度 ρ が増大すると主成分 n の化学ポテンシャルが増大し、フェルミ面上の n を Λ や Σ^- といったハイペロン(Y)で置き換える方が、系全体としてエネルギー的に有利になる。主成分 n 、且つ、運動エネルギーのみと系を単純化して算出すると $\rho_t(\Lambda) \simeq 5\rho_0$ ($\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ は核密度)で Λ の混在が始まる。YN相互作用の効果が引力的だと ρ_t は更に低密度となるが、このことはハイパー核の存在自身(YNの引力的性)が保障している。実際、有効相互作用アプローチの結果は $\rho_t(\Lambda) \simeq \rho_t(\Sigma^-) \simeq (2-3)\rho_0$ となる。重い中性子星の中心密度は $10\rho_0$ にもなるから、ハイペロンは確実に混じっていると言える。

(2) ハイパー核系では“Extra Repulsion”が必要

密度 ρ が ρ_t を越えて増してゆくとハイペロンの混在度も増し、系の状態方程式(EOS)は強くソフト化する。その結果、Y混在中性子星の最大質量は、Y混在を考えない場合に較べて、顕著に小さくなり、観測されている中性子星質量 $1.44M_\odot$ を支えられないという矛盾に逢着する。バリオン間斥力を強めてもこの問題は解決しない。斥力が強いとY混在はより顕著になり、ソフト化もより強くなるというジレンマがあるからである。高密度でのバリオン間斥力効果を化学組成の増加(自由度の増大→個々のバリオン密度の低下)によって避けることから生じる「相転移」であって、殆どモデル無依存的に起こるのである(実際、他のG行列計算等の例でもこの矛盾につきあっている)。このことはハイパー核システム(YN, YY相互作用部分)に何か“Extra Repulsion”が必要なことを示唆している。“Extra Repulsion”とは何か、これは大変興味深い。1つの試みとして、原子核や対称核物質で必要と分かっている「3体力」がハイパー核システムにも同様に働くと仮定して当たってみると(実際はイリノイ型の3体力を援用)、EOSのソフト化は適当なものとなり観測との矛盾は無くなる。この時、しきい密度は $\rho_t(Y) \simeq 4\rho_0$ と高密度側にシフトする。

(3) ハイペロンは超流体か?

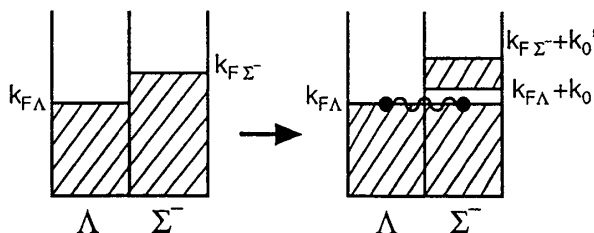
中性子星では、通常、核子の β -decayは起こらない。しかし、ハイペロン混在相があれば、Yを含む型の β -decayが可能となり、それに伴う ν 放出によって中性子星の冷却が加速される。この速い冷却機構は異常に低い表面温度が観測されているいくつかの中性子星(Vela X-1, Geminga, 3C58, 等)の冷却を説明する格好の候補になり得るが、一方で、“冷えすぎ”の問題が生じてしまう。しかし、Yが超流体になっていれば ν 放出度に適当な抑制が働き、観測結果と整合する。つま

り、Y混在中性子星は「Y超流体は可能か」という問題も提起することになる。Y超流体の存否を左右するYY対相互作用、Yの有効質量、Y混在度の3つのファクターに留意しつつ、エネルギーギャップ方程式をrealisticに扱った結果、 Λ も Σ^- も臨界温度 $T_c \sim 10^8-10^{10}$ Kをもつ超流体として十分に存在し得ることが分かった。従って、上記のハイペロン冷却シナリオは中性子星の速い冷却を説明し得る有力な候補と言える。実際、我々の結果を用いた冷却計算はこのことを支持するものとなっている。

(4) 新スキームでのペアリング— Bubble Fermi-Shell 形成—

しかし、上記に対立するハイパー核情報がある。近年観測されたNAGARA event (${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$)は、従来の知見とは異なり、“ $\Lambda\Lambda$ 相互作用の弱い引力性”を示唆している。もしこれが本当なら Λ 超流動は存在し得ない、つまり、ハイペロン冷却シナリオはつぶれることになる。ダブル Λ 核から $\Lambda\Lambda$ 相互作用の知見を導く上での諸問題(3体力効果や質量依存性をもたらす要因、等)の吟味は尚必要であるが、一方で、 $\Lambda\Lambda$ 間ではなく $\Lambda\Sigma^-$ 間の対効果によって Λ 超流動が復活できないかどうかを検討することも興味深い。換言すれば、Y混在中性子星は「異種フェルミオン間のペアリング」の問題を検討する新たな題材を提供していることにもなる。

異種フェルミオン間の対効果では、一般にフェルミ面のミスマッチをもたらす Pauli blocking の効果によって、超流動(エネルギーギャップ解の存在)は大変起こりづらい。そこで、図のように大きい方の Σ^- フェルミ球(フェルミ運動量 $k_{F\Sigma^-} > k_{F\Lambda}$)に“すき間”(“bubble Fermi-shell”)をつくり、強制的に小さい方の Λ フェルミ面とマッチングさせるという新しいスキームでの $\Lambda\Sigma^-$ ペアリングを考える。これが許されるか否かは、単にエネルギーギャップ(Δ)の存否だけでなく、ペアリングによるエネルギー利得($\Delta E_p < 0$)が“すき間”をつくることからくるエネルギー損失($\Delta E_b > 0$)を上廻る、つまり、 $\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_b < 0$ が系全体で成立するかどうかをチェックする必要がある。 $\Lambda\Sigma^-$ 力は実験情報も無くきわめて不定性が大きい。そこで従来の $\Lambda\Lambda$ 力を基準にしてその引力度合を調節したもので代用し結果がどうなるか当たってみる(η は $\Lambda\Lambda$ 引力部を調整するパラメータ、 $\Lambda\Lambda$ 力としてはNijmegen hard-core Dタイプに対応するもの採用)。予備的な計算の段階ではあるが、1例として、 $\{\Delta, \Delta E\} = \{0.46, 0.03\} \rightarrow \{1.01, -0.02\} \rightarrow \{1.89, -0.17\}$ MeV for $\eta = 1.0 \rightarrow 1.1 \rightarrow 1.2$ という結果が得られた(但し、 $\rho = 4.25\rho_0$, すき間の厚さ $k_0 = 0.05k_{F\Lambda}$, 温度 $T = 0$ の場合)。つまり、 $\Delta E < 0$ の領域があり、 $\Lambda\Sigma^-$ 力が $\Lambda\Lambda$ 力より幾分引力性が強ければ、 $\Lambda\Lambda$ ペアリングによる超流動は不可能でも、 $\Lambda\Sigma^-$ ペアリングによる超流動が期待できるということになる。



この報告は、西崎、山本、玉垣各氏との共同研究に基づくものであり、記して謝意を表します。

- 1) T. Takatsuka, S. Nishizaki, Y. Yamamoto and R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. No.146 (2002) 279 ; T. Takatsuka, Prog. Theor. Phys. Suppl. No.156 (2004) 84.