

ニュートリノ天文学で探る高温・高密度物質の世界

中里健一郎 (東理大理工)

利用カテゴリ XT4B

太陽の約8倍以上の質量をもつ恒星は、進化の最後に重力崩壊を起こしてその一生を終えると考えられている。そのうち、 $25M_{\odot}$ 以上の星は結果としてブラックホールが形成されると考えられており、観測的には極超新星と呼ばれるような非常にエネルギーの高い爆発を起こす種族と、通常よりも低いエネルギーの超新星になる種族に分かれることが示唆されている。この違いは主に星の回転によるものとされており、回転の速い星ほど爆発エネルギーが強くなると考えられている。回転が遅くかつ質量が $40M_{\odot}$ 以上と特に大きい場合には、超新星爆発を起こさずにそのままブラックホールを形成すると考えられている。今回はハイペロン含むより現実的な状態方程式を用いて $40M_{\odot}$ の星の重力崩壊のシミュレーションを行った。数値計算では重力崩壊のダイナミクスは無回転の仮定のもとで球対称に近似したが、ニュートリノ輸送を厳密に取り扱うことで、これらの効果がダイナミクスだけでなくニュートリノ放出量に与える影響を考察した。

今回の研究ではLattimer & Swesty (1991)、Shen et al. (1998) および Ishizuka et al. (2008) の3種類の状態方程式を用いた。Lattimer & Swestyによる状態方程式は液滴模型に基づき、非圧縮率 K のちがう3つのセットが用意されているが、今回の研究では $K = 180$ MeV (LS180-EOS) と $K = 220$ MeV (LS220-EOS) の柔らかいモデルを採用した。一方、Shen et al.による状態方程式 (Shen-EOS) は相対論的平均場理論に基づいており $K = 281$ MeV と硬めである。これら2つはストレンジネスの自由度を含まない「原子核」の状態方程式であるのに対して、Ishizuka et al.による状態方程式 (Hyperon-EOS) はShen-EOSの拡張としてハイペロンを含むモデルである。

図1(a)に放出されるニュートリノの光度の時間発展を示した。まず、ストレンジネスの自由度を含まない状態方程式を比較してただちにわかることは、柔らかい状態方程式 (LS180-EOS, LS220-EOS) ほど硬い状態方程式 (Shen-EOS) よりもブラックホール形成が早く起こるため、ニュートリノの放出時間が短くなることである。他方、同じ時間で比較したニュートリノ光度は柔らかい状態方程式ほど高くなる。これは柔らかいほど内部が圧縮されているため、原始中性子星の温度が高くなった結果である。

次に、ハイペロンを考慮した場合 (Hyperon-EOS) と考慮しない場合 (Shen-EOS) を比較すると、ハイペロンを含むモデルは含まないモデルよりもニュートリノの放出時間が短いことが分かる。しかし、同じ時間で比較したニュートリノ光度にはほとんど変化が見られない。よって、硬い「原子核」状態方程式にハイペロン出現が起こる場合 (Hyperon-EOS) とともに柔らかい「原子核」状態方程式 (LS180-EOS, LS220-EOS) を比べると、ニュートリノの放出時間はあまり変わらなくても後者の方がニュートリノ光度が高いことになる。

次に上記の状態方程式による違いが、実際の検出においてどのくらい有為であるかを考察する。LS180-EOS と LS220-EOS の中間にある状態方程式 (たとえば、Lattimer & Swesty と同じ手法で作られた $K = 200$ MeVのもの) の場合には、Hyperon-EOSの場合と同じニュートリノ放出時間を持つ可能性がありえるため、以下ではHyperon-EOS と LS180-EOS (LS220-EOS) がニュートリノイベント数から統計的に識別可能であるか否かを議論する。

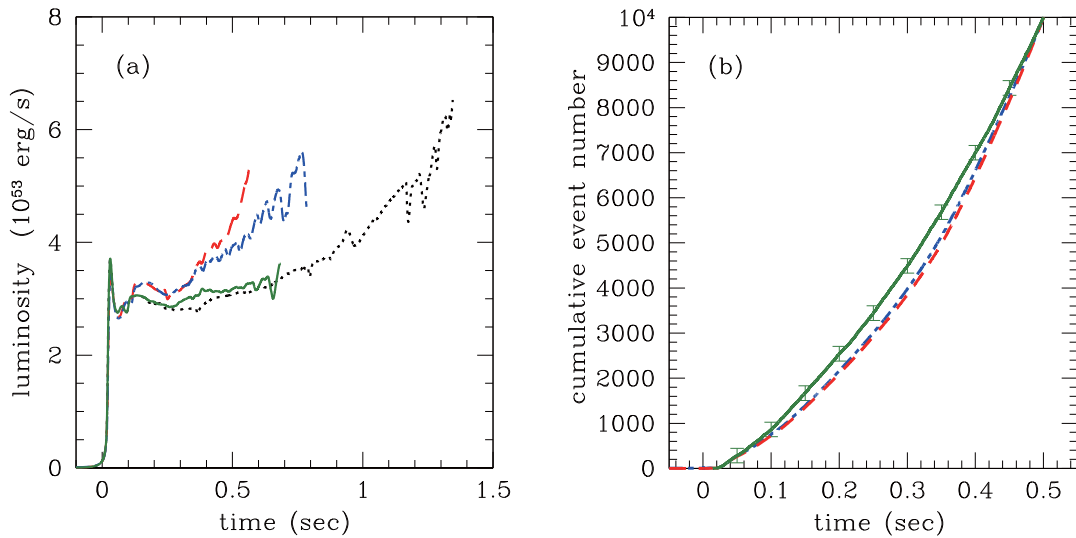


図 1: (a) 全ニュートリノ光度の時間発展。(b) 累積ニュートリノイベント数の時間発展。いずれのグラフにおいても、実線、点線、破線、一点鎖線が Hyperon-EOS、Shen-EOS、LS180-EOS、LS220-EOS の場合に対応する。また (b) におけるエラーバーは、KS 検定における 99% C.L. に対応する。

今回の解析では既存のニュートリノ検出器である SuperKamiokande におけるニュートリノイベント数を計算した。解析ではニュートリノ振動も考慮し、その未決定なパラメータについては、例として normal mass hierarchy で $\sin^2 \theta_{13} = 10^{-8}$ の場合を仮定した。ただし以下に示す結果は、定性的にはこのパラメータの選択に依存しない。また今回は、ブラックホール形成天体までの距離を仮定するのではなく、0.5 秒までに検出されたニュートリノイベント数 $N_{0.5s}$ を仮定する点である。ここでは銀河系内の天体を念頭に $N_{0.5s} = 10,000$ とする。

統計解析においては、Hyperon-EOS の場合の結果のデータを基にモンテカルロ計算を行い、擬似的に「観測」イベントを生成する。それが LS180-EOS (LS220-EOS) の場合(「理論」曲線に相当する)と fit できるかどうかを Kolmogolov-Smirnov (KS) 検定を用いて判定する。図 1(b) にモンテカルロ計算の結果の一例を示した。エラーバーは KS 検定における 99% C.L. に対応する。ここから分かるように、もし Hyperon-EOS に相当するイベントが銀河系内で発生し、SuperKamiokande で 0.5 秒までに 10,000 イベント検出された場合には、LS180-EOS (LS220-EOS) は棄却されることを意味する。このことは Hyperon-EOS と LS180-EOS (LS220-EOS) がニュートリノイベント数から識別可能であることに他ならない。つまりニュートリノ観測から状態方程式に何らかの制限がつけられることを示唆している。