現実的な3次元超新星モデルに基づく 超新星背景ニュートリノ解析

中村航(福岡大学) 滝脇知也(国立天文台)、固武慶(福岡大学)

新学術「地下宇宙」2021年領域研究会 @ zoom May 19-21th, 2021



<u>超新星ニュートリノ検出</u>

銀河系内超新星(<30kpc)

✓ 大量の検出イベント(O(10⁴))が期待できる.

✓ 発生率が低い(~1-2/100yr).

近傍超新星(~Mpc)

✓ 発生率は稼げる(a few SN/yr).
 ✓ 検出イベント数が稼げない.

超新星ニュートリノを検出するには 運を天に任せて待つしかない…?



<u>超新星背景ニュートリノ(Diffuse Supernova Neutrino Background; DSNB)</u>

過去の重力崩壊イベントが放出したニュートリノの重ね合わせ.

$$\left|\frac{d\phi}{dE} = c \int R_{\rm CC}(z) \frac{dN}{dE'} (1+z) \left|\frac{dt}{dz}\right| dz\right|$$

R_{CC}:重力崩壊(CCSN+BH)のイベント率 星形成率 初期質量関数

dN/dE': **平均**ニュートリノスペクトル あらゆる重力崩壊イベントが放出する ニュートリノの情報



© SK official web cite

SK-Gdが動き出し、近い将来 DSNB の検出が期待される.

検出データから得られる科学的知見を最大化するには 超新星ニュートリノスペクトルの精密なモデルが必要.

しかも1モデルではなくあらゆる種類(例えば親星質量) の超新星の平均.

現実的な3次元超新星モデルを多数作成し、DSNB解析に 有用な超新星ニュートリノデータを構築する.

KN+15, PASJ, 67, 107

約400個の親星モデルを用いた 2 次元の重力崩壊計算 質量:10-75太陽質量 金属量:0-太陽金属量

パラメータなしのセルフコンシステント計算なので 親星の質量(密度構造)によってニュートリノ光度 に大きな差が現れる.

初期質量よりも

コンパクトネス ξ_M = M/R(M) と良い相関を示す.



Horiuchi, Sumiyoshi, KN+18, MNRAS, 475, 1363

✓ 2次元計算の結果を使って背景ニュートリノスペクトルを予測



Horiuchi, Sumiyoshi, KN+18, MNRAS, 475, 1363

✓ CCSN と BH を分ける ξ_{crit} をパラメータとしてDSNBスペクトルを予想.



KN+15

2D:爆発しやすい、爆発後も強い降着が続く Newton重力、 ν_x の輸送解法近似が簡単、ニュートリノ反応率が古典的

<u>3DnSNeコード(updated! Takiwaki+16, KN+19)</u> Effective GR重力、3-flavor IDSA、最新のニュートリノ反応率 → この新しいコードを使って3D計算を実行

<u>SN 1987A - 観測</u>

✓LMC (*D* ~ 50 kpc)に出現.

✓光学的情報から *E*exp ~ 1.2 foe, *M*Ni ~ 0.07 *M*sun

✓超新星ニュートリノを初検出!

✓特異な特徴

親星(Sk - 69°202):RSG→BSG 化学組成:HeやNが多い(CNOプロセス起源?) Triple-ring nebula









<u>SN 1987A - 親星モデル</u>





	Urushibata+'18	Menon & Heger'17
Red to blue evolution	Yes	Yes
Time to collapse	Yes	No
Origin of the rings	Yes	No
Anomalies of CNO-process elements	Yes	Yes
Anomalies of s-process elements	?	?

<u>SN 1987A - 3Dシミュレーション</u>

エントロピーの時間発展





最初の1秒で16イベント (実際は最初の2秒で9イベント)

 $E_{\text{exp}} \sim 0.15$ foe, $M_{\text{Ni}} \sim 0.01 M_{\text{sun}}$ (実際は $E_{\text{exp}} \sim 1.2$ foe, $M_{\text{Ni}} \sim 0.07 M_{\text{sun}}$)

親星が持つ非球対称構造

一般に星は球対称ではない.

しかし対流などを考慮しながら星の進化を計算するのはとても大変.

これまでの超新星親星モデルはほとんど全て球対称の1次元モデル.

✓ <u>Yoshida+19, ApJ, 881, 16</u>

星進化の最後の100秒を<u>3DnSEVコード</u>(我々が重力 崩壊計算に使用している3DnSNeコードの派生版)を 用いて3次元計算.

非球対称構造が乱流の種となって 衝撃波背面での 非等方運動やSASIを誘発

→ 衝撃波の膨張を助ける.



Yoshida+'19

<u>親星が持つ非球対称構造を考慮した3D CCSNシミュレーション</u>



<u>親星が持つ非球対称構造を考慮した3D CCSNシミュレーション</u>

球対称初期条件から開始した計算(rp)と 3D進化計算の結果から開始した計算(3Dp)を比較

3Dpモデルの方が早く衝撃波が復活し、 爆発エネルギーおよびニッケル合成量も増加.





<u>親星が持つ非球対称構造を考慮した3D CCSNシミュレーション</u>



まとめと今後の展望

- ✓空間2次元のセルフコンシステントな重力崩壊計算結果(KN+'15)に基づいて、超新星背景ニュートリノのスペクトルを予測した(Horiuchi+'18).
- ✓しかしこの時に使用した超新星モデルは空間2D、Newtonian等、改良の余地がある.
- ✓より現実的な超新星モデルの作成に向けてコードをアップデート(Takiwaki+16, KN+19).3D超新星シミュレーションを実行.
- ✓ 最新のSN 1987A連星親星モデル
 - → 弱い爆発を得た.
- ✓非球対称な3D親星モデル
 - → 衝撃波の復活が早まり爆発エネルギー&ニッケル合成量増加.
- ✓現在 9-60太陽質量を網羅する系統的3D MHD計算に着手
 →年度内に10数モデル完了予定