重力崩壊型超新星の3次元数値モデル に基づくニュートリノ信号解析

<u>中村 航(福岡大学)</u>

滝脇知也(国立天文台),松本仁(慶應大学),固武慶(福岡大学)

第8回超新星ニュートリノ 研究会 @ 早稲田大学/zoom Jan. 6-7, 2022

<u>超新星からのマルチメッセンジャー信号</u>



<u>超新星ニュートリノの特徴的なフェイズ</u>



✓ 冷却フェイズ

衝撃波膨張 中心への降着弱まる

爆発に失敗しBHを形成する場合, 光度や平均エネルギーは高く 継続時間は短くなる.



SN 1987A モデル, LS220 EOS



 $\nu_{e}, \overline{\nu}_{e}: 3D$ モデルでは衝撃波復活→降着率減少(1D>3D).

SN 1987A モデル, LS220 EOS



 ν_{e} , $\overline{\nu}_{e}$: 3Dモデルでは衝撃波復活→降着率減少(1D>3D). ν_{x} : 3DモデルではPNS対流(1D<3D).

SN 1987A モデル, LS220 EOS



1Dモデルは重くてコンパクトなPNS形成(1D>3D).

SN 1987A モデル, LS220 EOS



SN 1987A モデル, LS220 EOS



2Dと3Dよく似ている.

<u>超新星ニュートリノのEOS依存性</u>

SN 1987A モデル, 2D



EOSによってコアバウンスのタイミングが 大きく異なる(LS220 \rightarrow SFHo \rightarrow Togashi).

バウンス後の時刻で比較すると LS220><mark>SFHo</mark>>Togashi.

<u>超新星ニュートリノのEOS依存性</u>

SN 1987A モデル, 2D



光度、平均エネルギーともに LS220>SFHo>Togashi.

ここまでのまとめ

超新星の数値モデルが予言するニュートリノは

- ✓ 1Dモデルと2D/3Dモデルで異なる(87Aモデルの場合 $\Delta L \bar{v}_{e} \sim 10\%, \Delta E \bar{v}_{e} \sim 2 \text{MeV}$).
- ✓ 2Dモデルと3Dモデルは似ている(衝撃波の振る舞いに起因する差がある).
- ✓ EOS依存性あり(87Aモデルの場合 $\Delta L \bar{v}_{e} \sim 10\%, \Delta E \bar{v}_{e} \sim 1-2 \text{MeV}$).

(EOSは将来的に理解が進むとして) 超新星ニュートリノを調べるには3Dではなく2Dで十分…なのか?

- ✓ 2D/3Dモデルで衝撃波復活のタイミングや爆発する/しないが異なる.
- ✓ ニュートリノ放射の角度依存性も異なる.





2Dモデルを用いた系内超新星の内部構造予測



最初の50msと少し後(例えば200-250ms)の検出イベント数の比をとることで 超新星親星のコンパクトネスを推測できる.

Horiuchi, KN+'17



<u>CCSNの空間3次元数値シミュレーション(1)</u>

衝撃波の復活には空間多次元効果(流体不安定性)が本質的に重要な役割を果たす. 1D計算 → ごく限られた初期条件を除いて爆発しない. 2D計算 → 爆発に成功する数値モデルが多数. 3D計算 → 2D計算と比較して爆発しにくい傾向. 衝撃波の復活に成功しても 爆発エネルギーが小さい ($E_{exp} << 10^{51} \text{ erg}$). $\begin{array}{cc} E_{\mathrm{expl}} \left[10^{50} \, \mathrm{erg} \right] \\ \mathbf{c} & \mathbf{c} \end{array}$ 350 ms ✓ Melson+'15 9.6 Mo progenitor t < ~400 msLS220 EoS 1D gravity + GR correction *E*_{exp} ~ **10**⁵⁰ erg @ t_{pb}=400ms 10^4 ل الح 10³

2 X 3000 km Isosurfaces: Entropy/Nucleon Colors: Radial Velocity, 1e9 cm/s ✓ Mueller+'18
 7 small-mass progenitors CoCoNUT-FMT code
 LS220 EoS
 *E*_{exp} ~ 1-4 x 10⁵⁰ erg



<u>CCSNの空間3次元数値シミュレーション(2)</u>

衝撃波の復活には空間多次元効果(流体不安定性)が本質的に重要な役割を果たす.

- 1D計算 → ごく限られた初期条件を除いて爆発しない.
- 2D計算 → 爆発に成功する数値モデルが多数.
- 3D計算 → 2D計算と比較して爆発しにくい傾向. 衝撃波の復活に成功しても 爆発エネルギーが小さい ($E_{exp} << 10^{51} \text{ erg}$).



<u>CCSNの磁場入り2D/3D計算</u>

✓ Mueller & Varma '20

弱い磁場を入れて空間3次元計算. 弱い種磁場が増幅されてニュートリノ駆動爆発 を**助ける**. ✓ Matsumoto+'20

比較的強い磁場を入れて空間2次元計算. 強い磁場はニュートリノが駆動する流体摂動を 弱め衝撃波復活を遅らせる.



<u>系統的 3D MHD 計算 - 親星モデル(初期条件)</u>

✓ Sukhbold et al. (2016) ApJ, 821, 38

親星モデルの中にはSi/O層の境目で密度構造 に大きな不連続を持つものもある (例: **s10**, **s11**, **s12** 等). ZAMS質量に対するコンパクトネス $\xi = M(R)/R$. 23太陽質量あたりにピークがある. 今回の計算では9-20太陽質量から10モデル選択.



<u>系統的 3D MHD 計算 - 数値計算手法</u>

✓ <u>3DnSNe_MHD コード</u> (*Matsumoto+'20*): 超新星計算用 3DnSNe コード (*Takiwaki+'16,'18*)の派生版.

- ✓ 初期重力崩壊~コアバウンスまでは空間2次元計算:
 - 回転なし,磁場は $A_{\phi} = \frac{B_0}{2} \frac{r_0^3}{r^3 + r_0^3} r \sin \theta$, $B_0 = 10^{10}$ [G] and $r_0 = 10^3$ km.
 - 空間解像度 $600(r)x128(\theta)$ 格子 $(0 \leq R \leq 10^4 \text{ km}, 0 \leq \theta \leq \pi)$.

✓ コアバウンス後は空間3次元計算:

- バウンス後 10 ms で 2D → 3D に切り替え.
- その際にランダムな密度摂動 (≦ 1%)を R > 100 km の領域に注入.
- 空間解像度 $600(r)x64(\theta)x128(\phi)$ 格子 $(0 \leq R \leq 10^4 \text{ km}, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi)$.

<u>系統的 3D MHD 計算 - 時間発展の概要</u>

✓ 10モデルのエントロピー動画.

衝撃波が膨張するに従って表示されている空間スケールが変化していることに注意. いくつかのモデル(例:s11@約140ms)は衝撃波が突然膨張.



<u>系統的 3D MHD 計算 - 時間発展の概要</u>

✓ 10モデルのエントロピー動画.

衝撃波が膨張するに従って表示されている空間スケールが変化していることに注意. いくつかのモデル(例:s11@約140ms)は衝撃波が突然膨張.

バウンス後120ms



<u>系統的 3D MHD 計算 - 時間発展の概要</u>

✓ 10モデルのエントロピー動画.

衝撃波が膨張するに従って表示されている空間スケールが変化していることに注意. いくつかのモデル(例:s11@約140ms)は衝撃波が突然膨張.

バウンス後150ms



<u>系統的 3D MHD 計算 - 衝撃波復活</u>

✓ (上図) 質量降着率 @ r = 500km.

バウンス後 < 100 ms 程度までは, おおよそZAMS 質量(~コンパクトネス)の順.

密度ジャンプがある Si/O 層境界が500 km まで落 ちてきた時に質量降着率が突然減少するモデルも.

✔ (下図) 平均衝撃波半径.

密度ジャンプに起因する質量降着率の急減少によって 衝撃波面でのラム圧も減少し,停滞していた衝撃波が 突然膨張に転じる.

→ 衝撃波が復活する時刻は ZAMS 質量の順でない.

最終的には計算した10モデル全てで計算時間内に 衝撃波が復活した.



<u>系統的 3D MHD 計算 - ニュートリノ</u>

✓ (上図) 質量降着率 @ r = 500km.

バウンス後 < 100 ms 程度までは, おおよそZAMS 質量(~コンパクトネス)の順.

密度ジャンプがある Si/O 層境界が500 km まで落 ちてきた時に質量降着率が突然減少するモデルも.

- ✓ (下図) 反電子型ニュートリノ光度.
 - ニュートリノ光度~質量降着率~親星コンパクトネス. →ニュートリノ検出イベント数を用いて親星の コンパクトネスに制限.

質量降着率の減少に呼応してニュートリノ光度も減少.
→ (超新星が十分近ければ)親星の密度構造もわかる.



まとめ

- ✓数値モデルが予言する超新星ニュートリノ. 空間次元依存性:球対称1D vs.対流などを考慮できる2D,3D EOS依存性:中心の潰れ方,PNS構造,衝撃波の時間発展
- ✓重力崩壊型超新星の系統的な空間3次元数値シミュレーションは実行可能な段階に.
 9-20太陽質量の親星モデル(Sukhbold+'16)に対して3次元MHD計算を実行.
 全てのモデルでバウンス後300ms以内に衝撃波復活.
- ✓数値計算から得られたニュートリノシグナルは以下の特徴を示した:
 ニュートリノ光度は親星のコンパクトネスと正の相関.
 親星の密度構造に対応する光度曲線の進化.