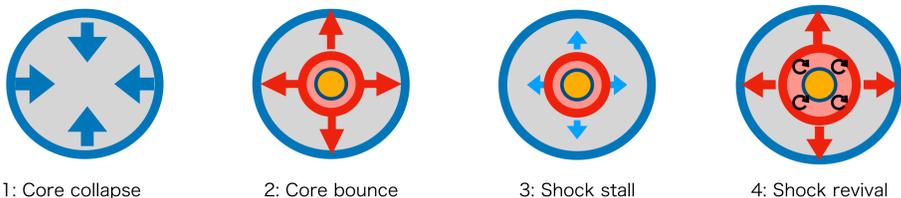


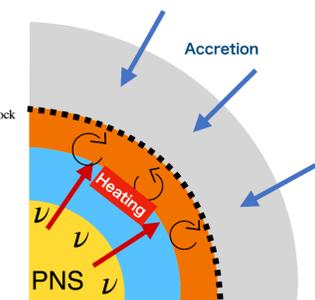


## 爆発メカニズム

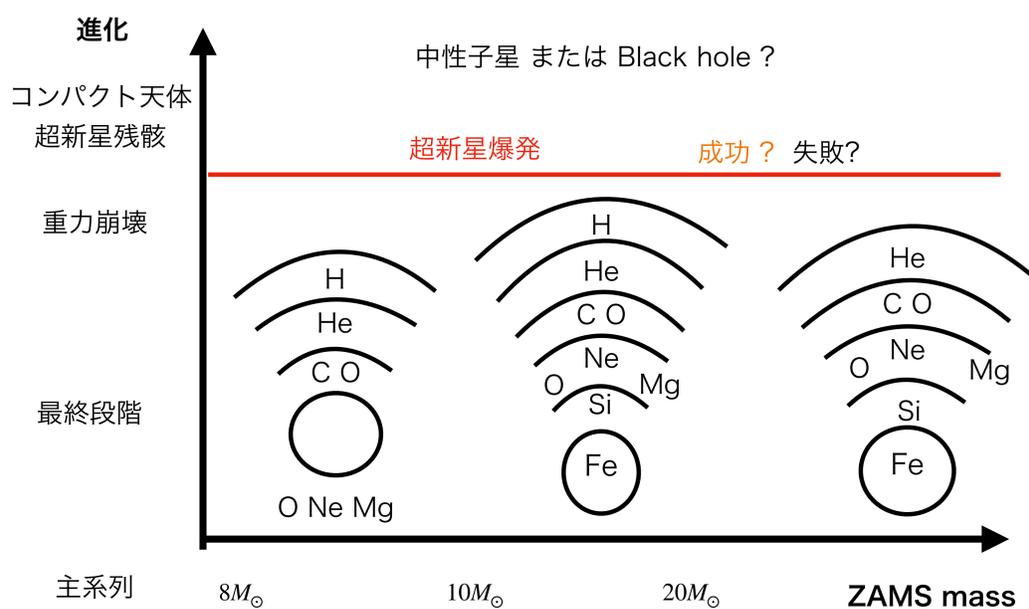


重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムでは、衝撃波後面におけるニュートリノ加熱と複雑な乱流現象が爆発を可能にする。

近年、多次元乱流効果の重要性が議論されている。



## 星の進化と超新星爆発



どれくらいの質量の親星が爆発に成功するのか？（親星依存性）

ニュートリノ光度の時間発展はどうなる？

中性子星の質量、爆発エネルギーとニュートリノ光度の関係は？

## 研究目標

計算コストの低いシミュレーションスキーム(以下1D+と呼ぶ。)を開発し、親星依存性を調査する。

	Neutrino	Gravity	Dimension (hydro)	computational cost	Accuracy	Reference
Phenomenological 1D	Artificially enhanced	Self-consistent	1D	Very Low	△	O'Connor & Ott 2011 Ertl +2016
3D	Self-consistent	Self-consistent	3D	High	◎	Burrows2020 Vartanyan+2018 Takiwaki+2016
1D+	Self-consistent	Self-consistent	1D included multi-D effects	Low	○	Couch+2020 Müller 2019 Sasaki & Takiwaki in prep

## 1D+について

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 \rho v_r] = 0$$

Mass conservation

$$\frac{\partial \rho v_r}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 (\rho v_r^2 + P + \rho v_{\text{turb}}^2)] = -\rho g + S_v$$

Euler equation

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 v_r (\rho e + P + \rho v_{\text{turb}}^2) - r^2 \rho D_\epsilon] + \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + P \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho} \right) - r^2 \rho D_K \nabla v_{\text{turb}}^2 = -\rho v_r g + \rho v_{\text{turb}} \omega_{\text{BV}}^2 \Lambda_{\text{mix}} + Q_\nu$$

Energy conservation

$$\frac{\partial \rho v_{\text{turb}}^2}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 (\rho v_{\text{turb}}^2 v_r) - r^2 \rho D_K \nabla v_{\text{turb}}^2] = -\rho v_{\text{turb}}^2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 v_r)}{\partial r} + \rho v_{\text{turb}} \omega_{\text{BV}}^2 \Lambda_{\text{mix}} - \rho \frac{v_{\text{turb}}^3}{\Lambda_{\text{mix}}}$$

Turbulent energy conservation

Reynolds 分解に基づいて、乱流の効果を導入。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \vec{v}] = 0$$

$$\frac{\partial (\hat{\rho} + \rho')}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 ((\hat{\rho} + \rho') (v_r + v'_r))] = 0$$

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} [r^2 \hat{\rho} v_r + \langle \rho' v'_r \rangle] = 0$$

現在、簡単のため具体的な数式化には Mixing length theory を使用(パラメータ)

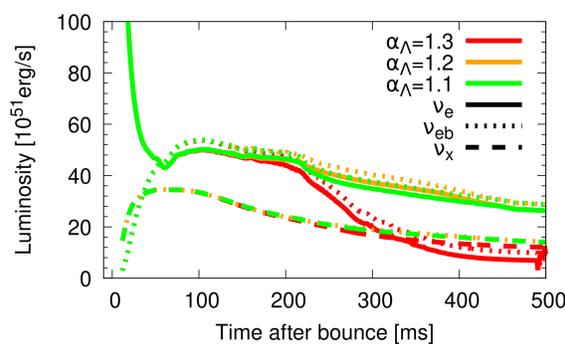
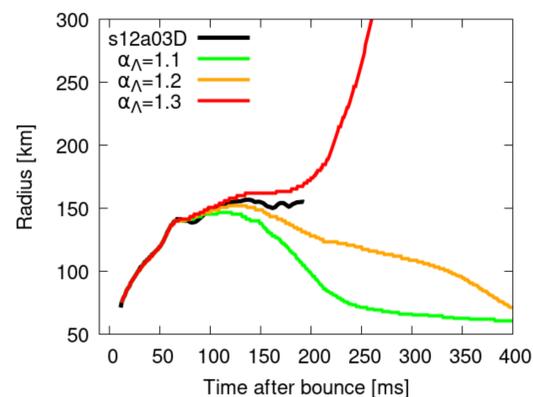
$$\Lambda_{\text{mix}} = \alpha_\Lambda H_p = \alpha_\Lambda \frac{P}{\rho g} \quad : \text{mixing length}$$

## 結果 1D+

### 衝撃波の時間発展

黒線: 3Dシミュレーション

パラメータを変えることで3Dの結果を再現できる。パラメータ $\alpha_\Lambda$ の大きさは乱流の強さを表す。



### ニュートリノ光度の時間発展

$\nu_e, \bar{\nu}_e$ のニュートリノ光度は衝撃波の復活、質量降着率と関係がある。

爆発成功  $\rightarrow L_\nu \downarrow$

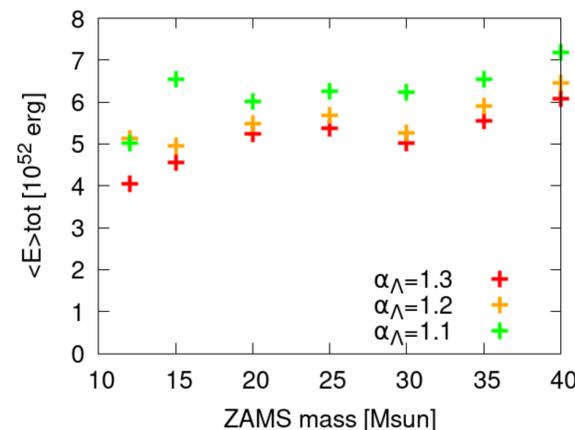
## 親星依存性：爆発する親星について

### ZAMSmassとニュートリノ

ニュートリノの親星依存性を議論するとき、ニュートリノ総放射エネルギーを用いる。

$$\langle E_\nu \rangle_{\text{tot}} = \int_{t_b=0}^{t_b=0.5} L_\nu dt$$

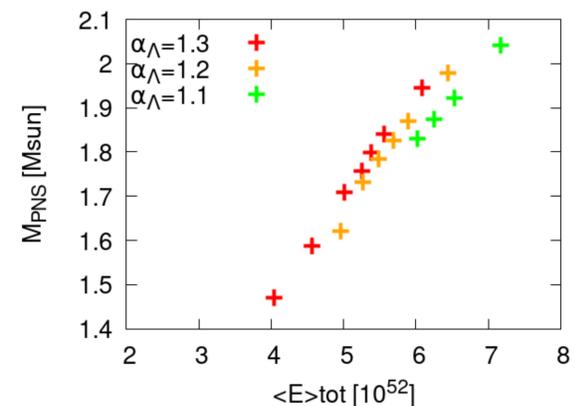
$\langle E_\nu \rangle_{\text{tot}}$  は強い爆発モデルほど小さくなる。大雑把に親星の質量が大きいほどニュートリノも多く放射される。



### 中性子星とニュートリノ

中性子星のバリオン質量を  $\langle E_\nu \rangle_{\text{tot}}$  の関数として表すと、強い相関がある。

これは中性子星がニュートリノの供給源であるため。



## 今後の展望

ニュートリノは観測量であるが、これだけでは中性子星の質量を特定することはできない。可視光観測や重力波観測の予測と比較する必要がある。すなわち、重力波や爆発エネルギーなどとの親星依存性や相関関係を調査する必要がある。

- (1) 放射される重力波の親星依存性の確認
- (2) 他の観測可能な物理量（爆発エネルギー、元素合成など）の調査
- (3) 1,2 の結果を踏まえ、ニュートリノ、重力波から中性子星質量などを特定できるか調査する。