

# 現実的な 3次元超新星モデルに向けて

中村 航（福岡大学）

滝脇 知也（国立天文台）、固武 慶（福岡大学）

第7回超新星ニュートリノ研究会 @ zoom Jan. 7-8th, 2021

# 大質量星の一生（重力崩壊型超新星になる場合）

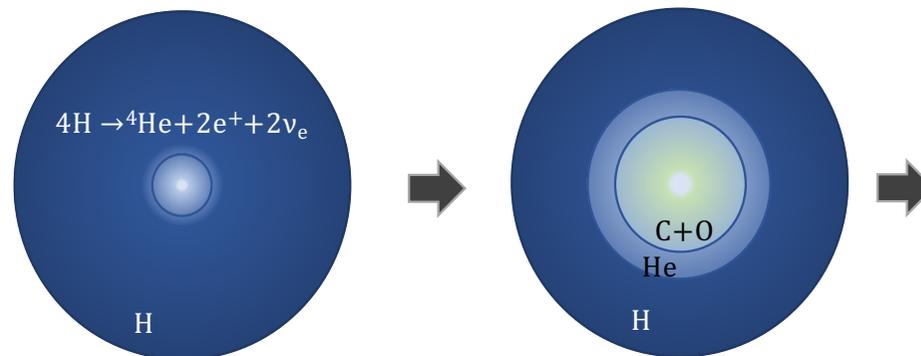
## ✓ 超新星爆発に至る現在の標準シナリオ

重力崩壊型超新星（Core-Collapse Supernova; CCSN）になるのは初期質量が約10太陽質量以上の星。

星進化の時間スケールは質量に依存する。

示しているのは初期質量が約10太陽質量の場合。

Main-sequence star



$\sim 10^7$  yr Before Bounce (BB)

$\sim 10^2$  yr BB

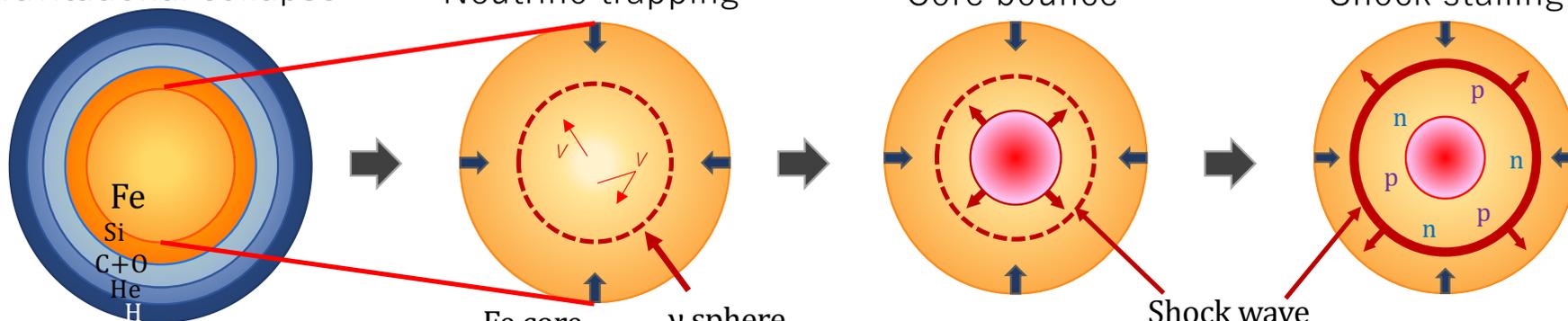
Gravitational collapse

Neutrino trapping

Core bounce

Shock stalling

Shock expansion & Explosion



$\sim 0.1$  s BB

$t = 0$

$\sim 50$  ms PB

数分 - 1日 PB

## マルチメッセンジャー信号

✓ 超新星が放出する

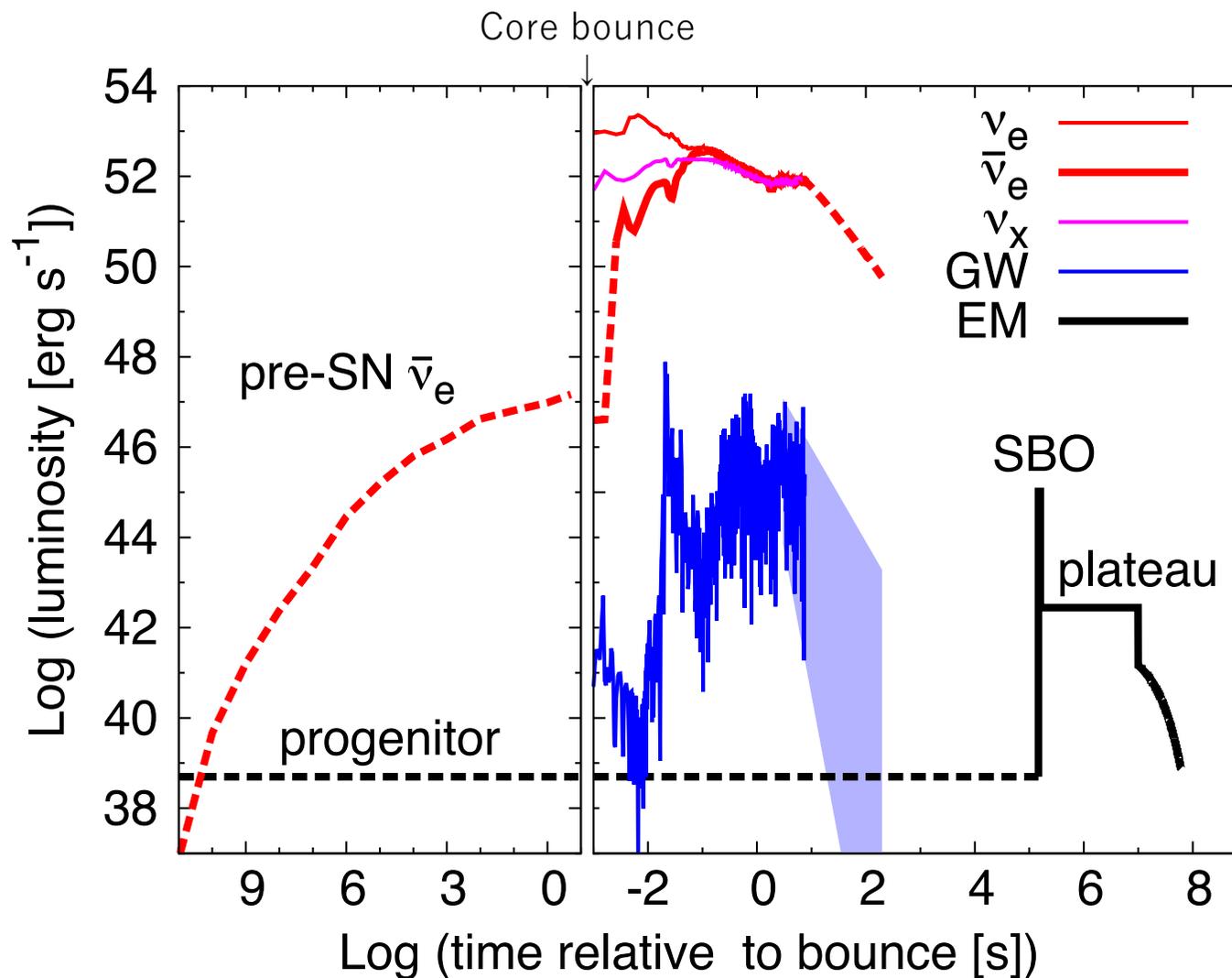
┌ ニュートリノ  
├ 重力波  
└ 電磁波

✓ バウンス前から $\nu$ 明るい  
(前兆 $\nu$ )

✓ バウンス後の $\nu$ が支配的

空間2次元の超新星数値計算に  
基づく予測

親星モデルは  
Woosley, Heger, & Weaver '02  
の17太陽質量モデルを使用



## 超新星ニュートリノ

✓ 超新星 $\nu$ の明るさを決める要素  
= 質量降着率

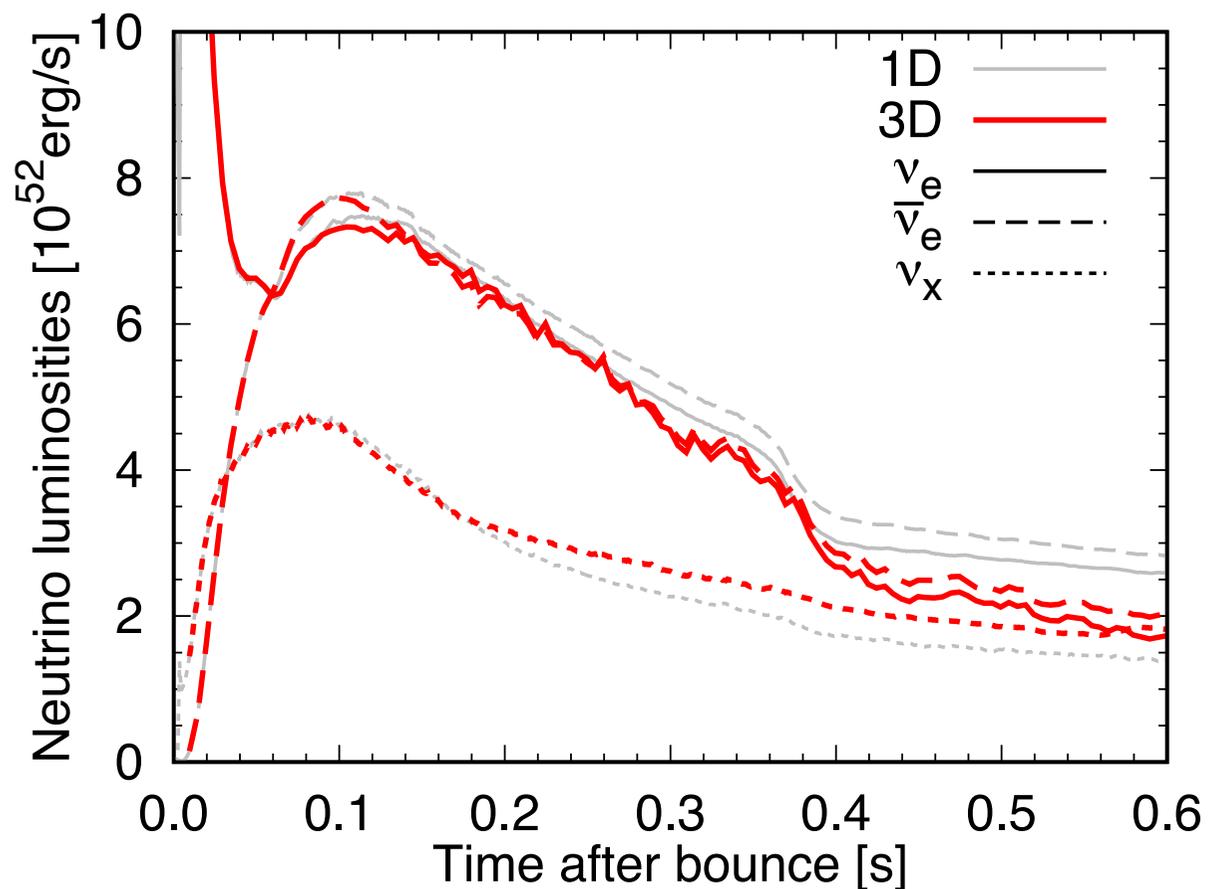
✓ 質量降着率を決める要素

### 1. 星の密度構造

星の質量, 金属量, バイナリティ

### 2. コアの自転

### 3. 衝撃波の時間発展



空間1次元および3次元の数値計算に基づく予測

親星モデルは Urushibata+'18 のSN 1987A モデルを使用

*KN+, in prep.*

## Outline

- ✓ イントロダクション
- ✓ 超新星ニュートリノと親星質量・金属量の関係 *KN+'15*  
超新星背景ニュートリノへの応用 *Horiuchi, Sumiyoshi, KN+'18*
- ✓ 超新星ニュートリノと自転の関係 *New!*
- ✓ 現実的な超新星モデルの作成に向けて  
親星の非球対称構造を考慮した計算 *New!*
- ✓ まとめ

# 系統的CCSN計算 - 1D

## ✓ 数百個の親星モデルを用いた空間1次元の重力崩壊計算

*O'Connor & Ott '11, '13; Ugliano+ '12; Pejcha & Thompson '15; Ertl+ '16; Sukhbold+ '16; Ebinger+ '19*

1D計算は基本的に爆発しないので、何らかの人為的操作が必要

*O'Connor & Ott '11:*

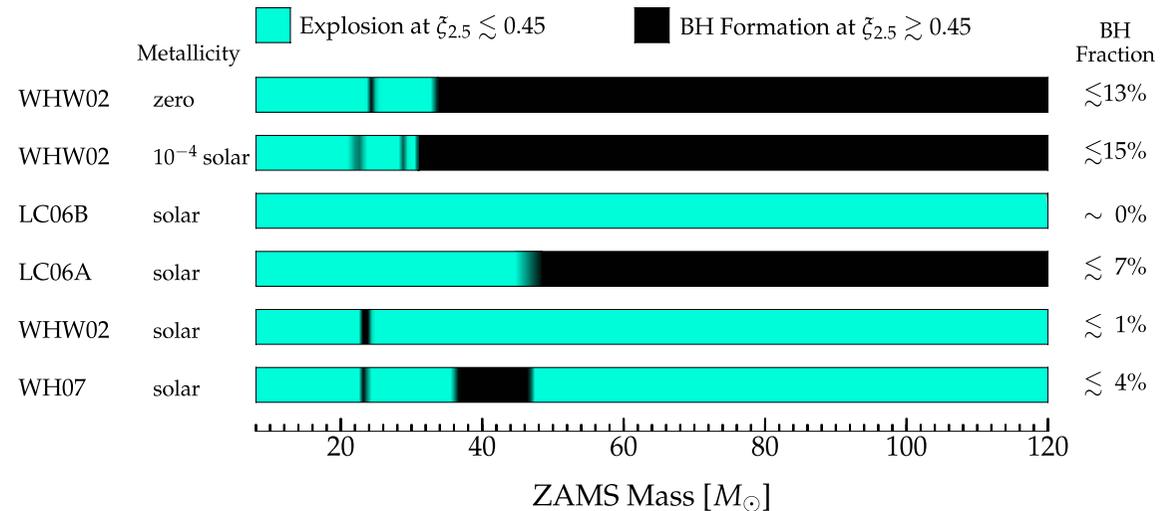
$$Q_{\nu_i}^{\text{heat}}(r) = f_{\text{heat}} \frac{L_{\nu_i}(r)}{4\pi r^2} \sigma_{\text{heat}, \nu_i} \frac{\rho}{m_u} X_i \left\langle \frac{1}{F_{\nu_i}} \right\rangle e^{-2\tau_{\nu_i}}$$

*Ugliano+ '12; Ertl+ '16:*

$$L_{\nu, c} = \frac{3\Gamma - 4}{3(\Gamma - 1)} (E_g + S) \frac{\dot{R}_c}{R_c} - \frac{\zeta}{3(\Gamma - 1)} \frac{\delta E_{\text{acc}}}{\delta t}$$

$$R_c(t) = R_{c, f} + (R_{c, i} - R_{c, f}) / (1 + t)^n$$

Outcome of Core Collapse (neglecting fallback, moderately-stiff EOS)



*O'Connor & Ott '11*

# 系統的CCSN計算 - 2D

## ✓ 約400個の親星モデルを用いた空間2次元の重力崩壊計算

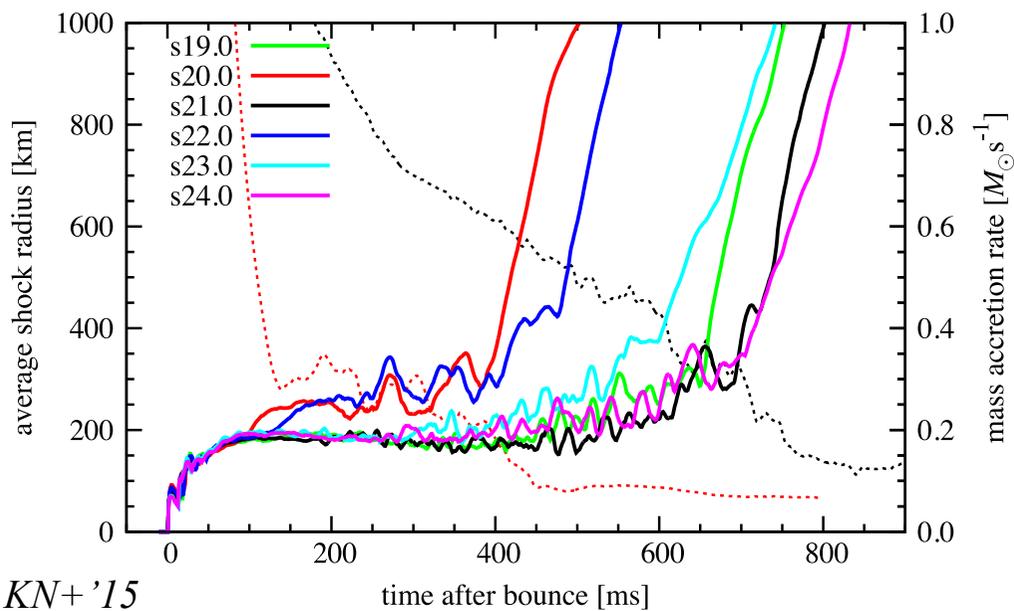
KN+ '15, PASJ, 67, 107

パラメータなしのセルフコンシステントな計算.

親星の質量（密度構造）によって質量降着率と衝撃波の時間発展が大きく異なる.

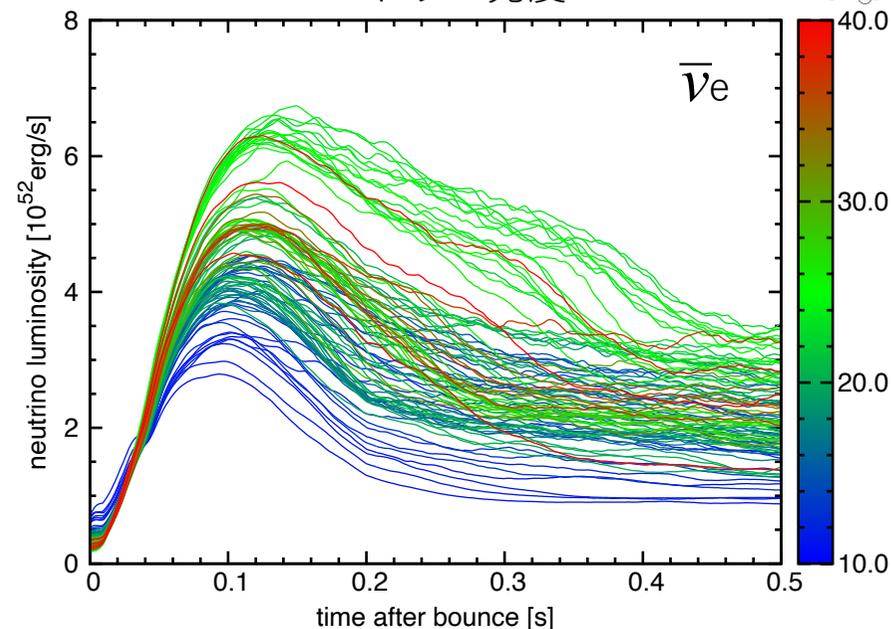
当然, ニュートリノ光度にも大きな差が現れる.  
初期質量よりも...

平均衝撃波半径（実線）と質量降着率（点線）



KN+ '15

ニュートリノ光度 ZAMS mass [ $M_{\odot}$ ]



## 系統的CCSN計算 - 2D

### ✓ 約400個の親星モデルを用いた空間2次元の重力崩壊計算

*KN+ '15, PASJ, 67, 107*

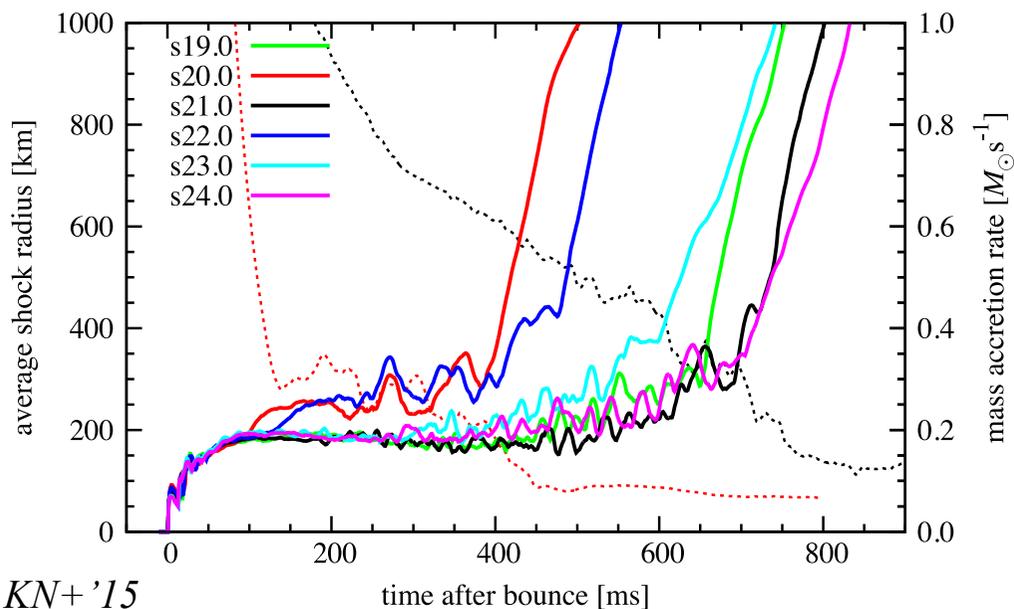
パラメータなしのセルフコンシステントな計算.

親星の質量（密度構造）によって質量降着率と衝撃波の時間発展が大きく異なる.

当然, ニュートリノ光度にも大きな差が現れる.  
初期質量よりも...

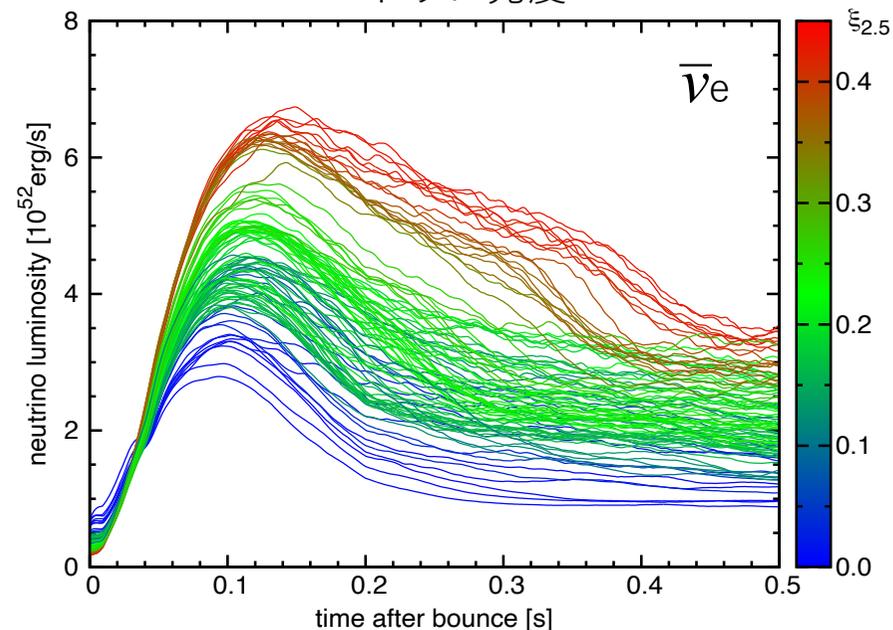
**コンパクトネス**  $\xi_M = M/R(M)$  と良い相関を示す.

平均衝撃波半径（実線）と質量降着率（点線）



*KN+ '15*

ニュートリノ光度



## 超新星背景ニュートリノの予言

- ✓ 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*

超新星背景ニュートリノ：過去のCCSNeが放出したニュートリノの重ね合わせ.

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

where  $E' = E(1+z)$  and  $|dz/dt| = H_0(1+z)[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}$ .

重力崩壊 (CCSN+BH) のイベント率

$$R_{\text{CC}}(z) = \dot{\rho}_*(z) \frac{\int_8^{100} \psi(M) dM}{\int_{0.1}^{100} M \psi(M) dM}$$

1 イベントあたりの平均ニュートリノスペクトル

$$dN/dE' = dN/dE(1+z)$$

は数値計算から推定する.

※ 詳細は本日午前の鈴木さん&芦田さんトーク参照.

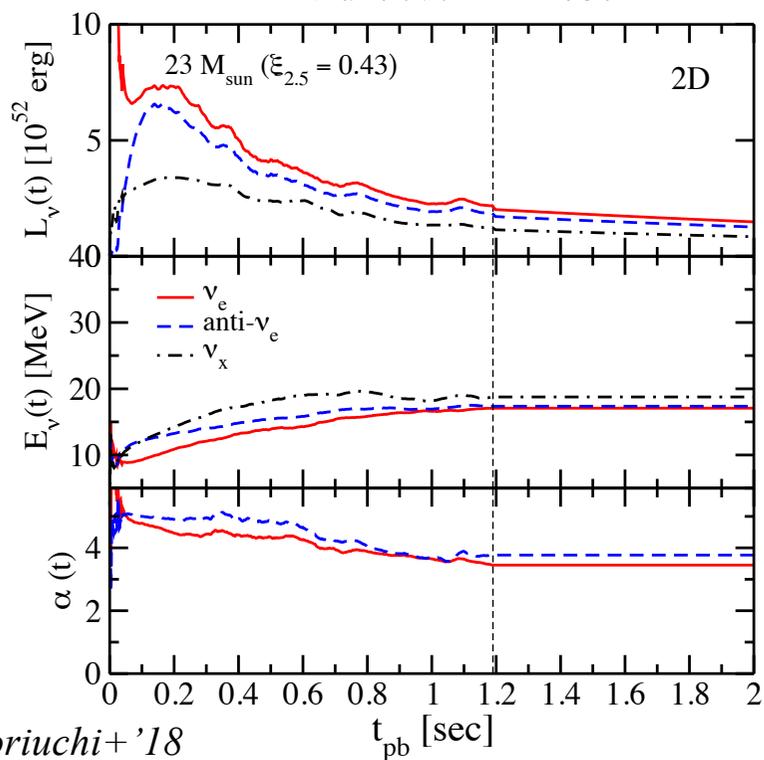
# 超新星背景ニュートリノの予言

- ✓ 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

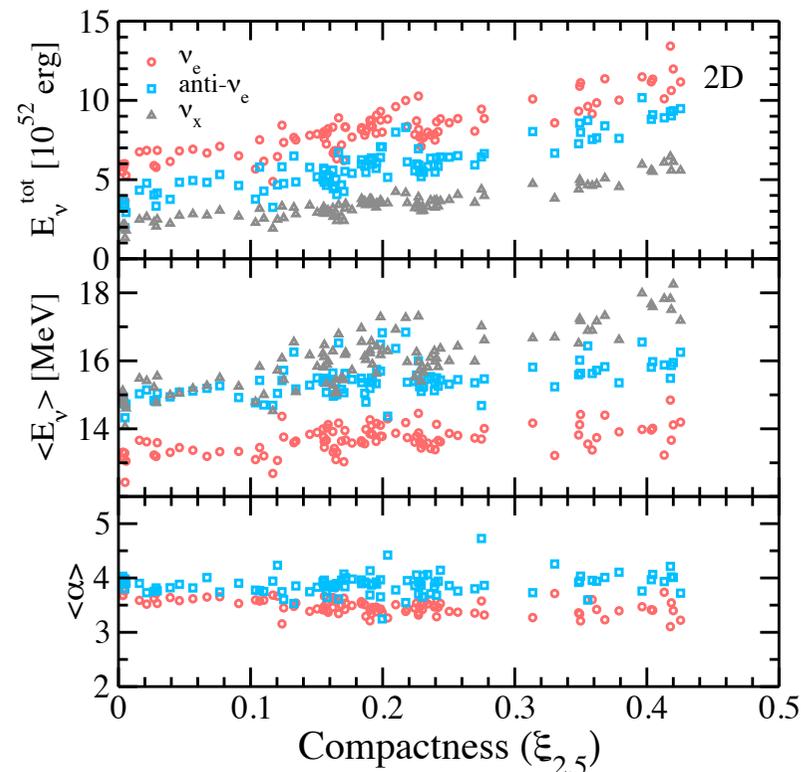
*Horiuchi, Sumiyoshi, KN+'18, MNRAS, 475, 1363*

- ✓ CCSNとして爆発する場合 (2D Newtonian計算)

数値計算 ←→ 外挿



ニュートリノデータを時間外挿する必要。  
NS半径が  $R(t) = R_f + (R_i - R_f)e^{-t/t_0}$  で収縮していくと仮定。  
重力エネルギー解放率 = ニュートリノ光度。

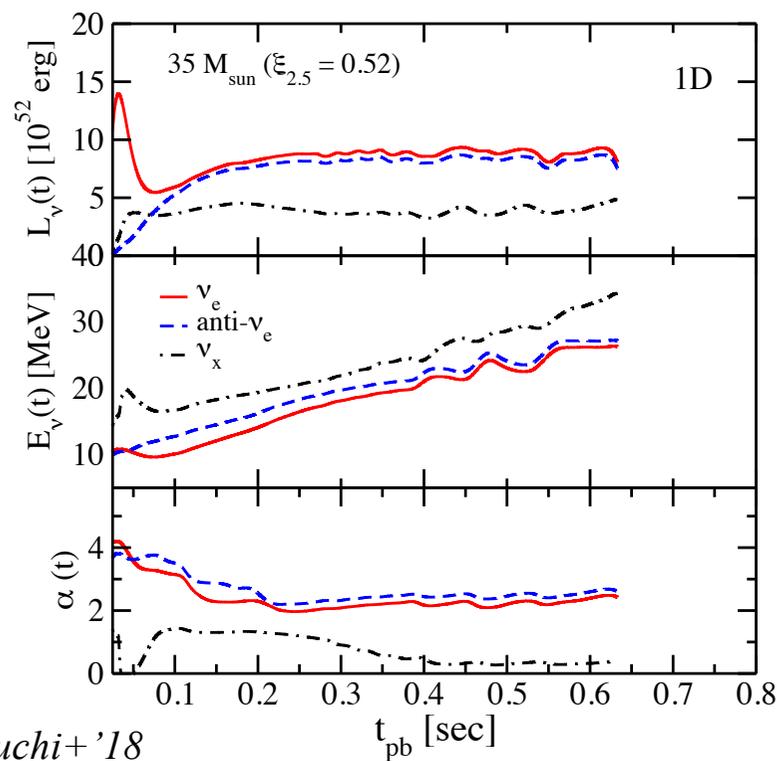


# 超新星背景ニュートリノの予言

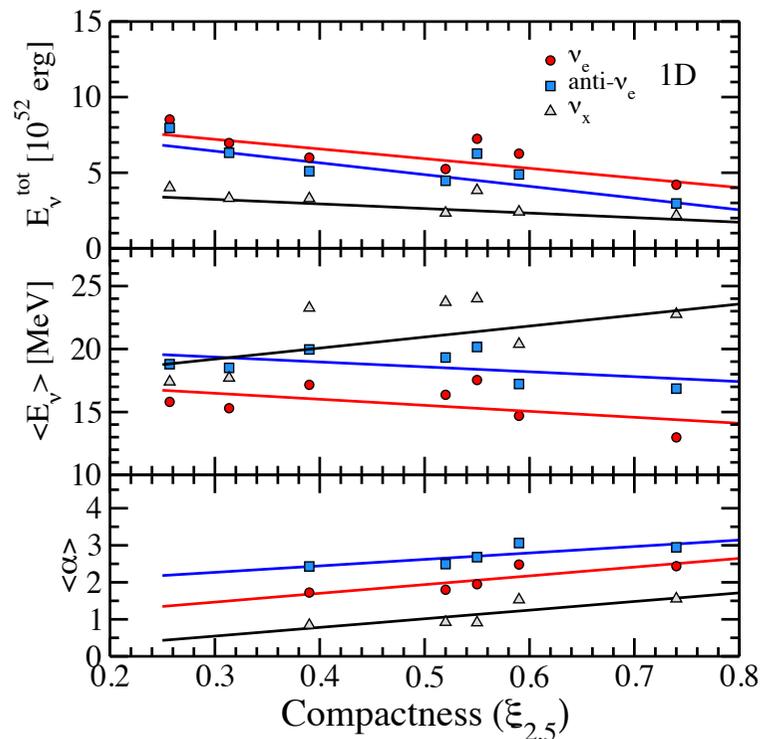
- ✓ 2次元計算の結果を使って背景ニュートリノスペクトルを予測

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

- ✓ 爆発せずBHを形成する場合 (1D GR計算)



*Horiuchi+ '18*

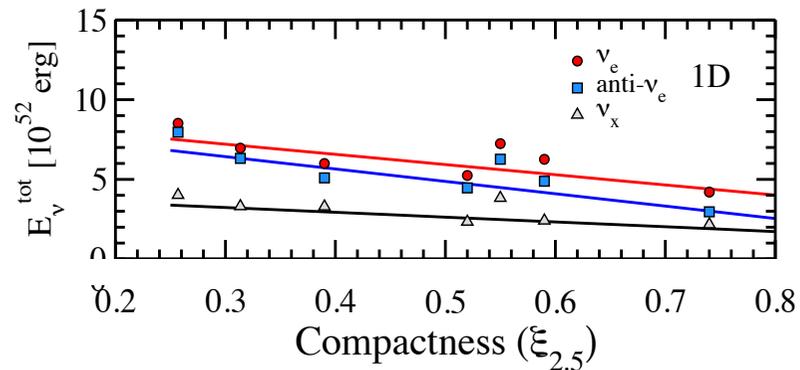
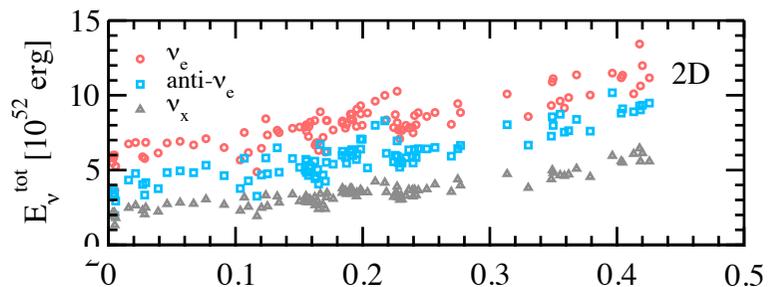


# 超新星背景ニュートリノの予言

## ✓ 予想される背景ニュートリノスペクトル

コンパクトネスが  
小さい→CCSNとして爆発  
大きい→BH形成

ではその中間は？



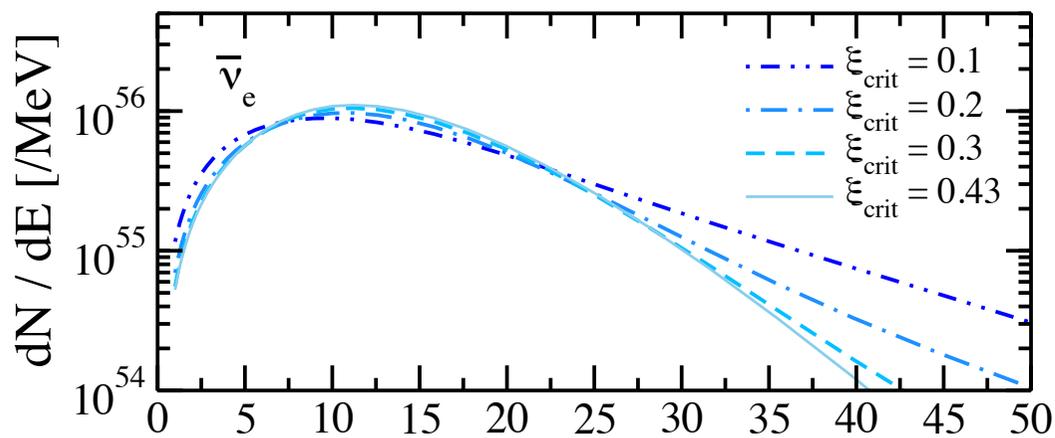
# 超新星背景ニュートリノの予言

## ✓ 予想される背景ニュートリノスペクトル

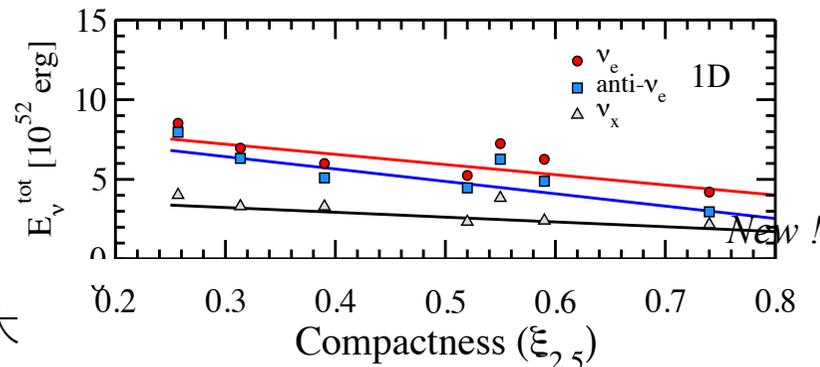
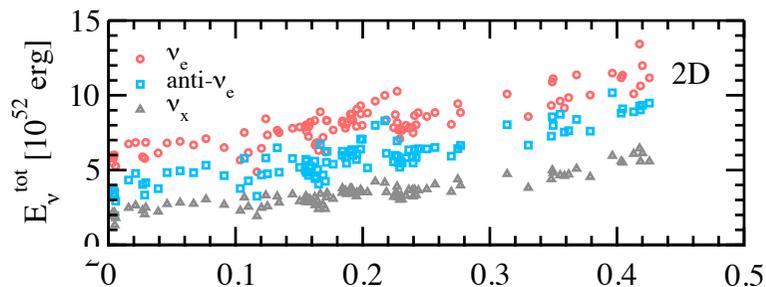
コンパクトネスが  
 小さい→CCSNとして爆発  
 大きい→BH形成

ではその中間は？

CCSN / BH を分ける critical  $\xi$  があると仮定.



Horiuchi+'18



BH寄与大  
 ↑↓  
 BH寄与小

この予言を  
 現実的な超新星モデルを使って精緻化したい。  
 もちろんバーストν理論モデルとしても重要。

# より現実的な超新星モデルに向けて (1) - 自転の効果

星はすべからく自転しているが、これまでにこの発表で触れた超新星モデルはその効果を考慮していない。

## ✓ 超新星親星コアの自転

自転を考慮した星進化計算.

*Zwinger & Müller '97; Woosley & Weaver '95; Heger+ '00, '03.*

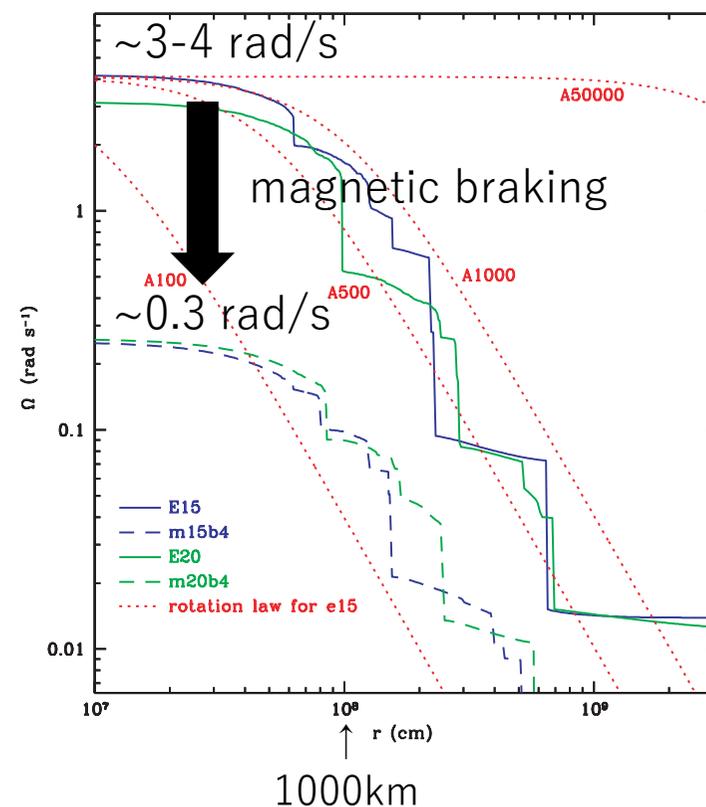
中心の鉄コアはほぼ剛体回転.

磁場を介した角運動量輸送で大幅に減速.

## ✓ 自転が超新星のダイナミクスに及ぼすと期待される効果

1. 衝撃波に降着してくる物質を遠心力で支える.  
→ 降着率が減少, 衝撃波の膨張を助ける.
2. 収縮するコアを遠心力で支える.  
→ 重力エネルギーの解放を阻害, ニュートリノ加熱減少.

回転星の進化計算に基づく角速度分布



# より現実的な超新星モデルに向けて (1) - 自転の効果

## • Progenitor model

- SN 1987A モデル (*Urushibata+'18*)

## • Rotation

$$\Omega = \Omega_0 \frac{1}{1 + (x/1000\text{km})^2} \frac{1}{1 + (z/1000\text{km})^4}$$

- $\Omega_0 = 0.0, 0.1, 0.2, \dots, 0.7$  [rad/s]

## • 2D simulations with 3DnSNe code

- $n(r)*n(\theta) = 600*128$ ,  $r = 0-10,000$  km,  $\theta = 0-\pi$

## • Neutrino transport

- 3-flavor IDSA spectral transport (*Liebendoerfer+09*)
- with 20 energy bins (< 300 MeV)

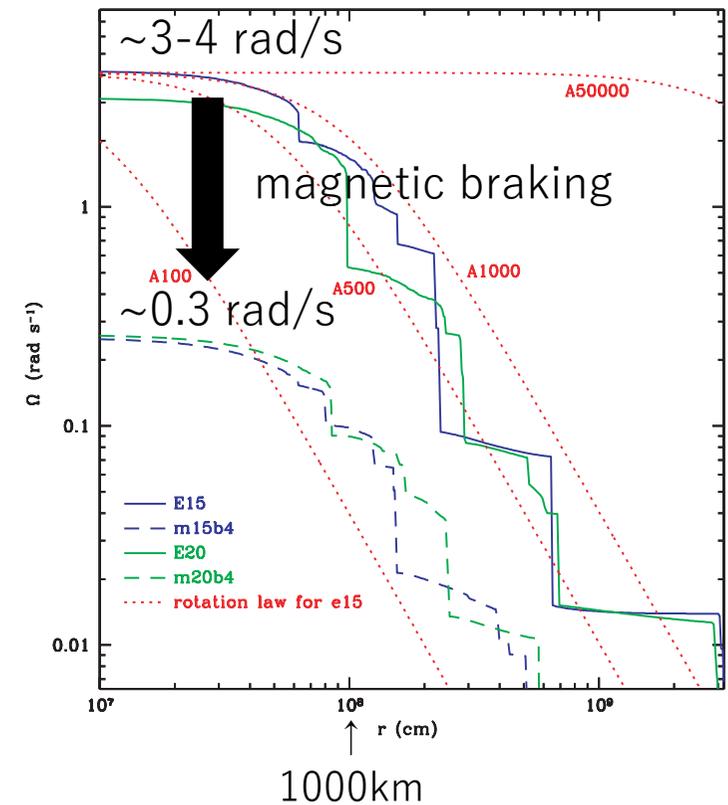
## • Effective GR potential

## • State-of-the-art neutrino opacity (*Kotake+'18*)

## • LS220 EoS (*Lattimer & Swesty '91*) + Boltzmann gas

## • $13\alpha$ (He-Ni) nuclear reactions

回転星の進化計算に基づく角速度分布

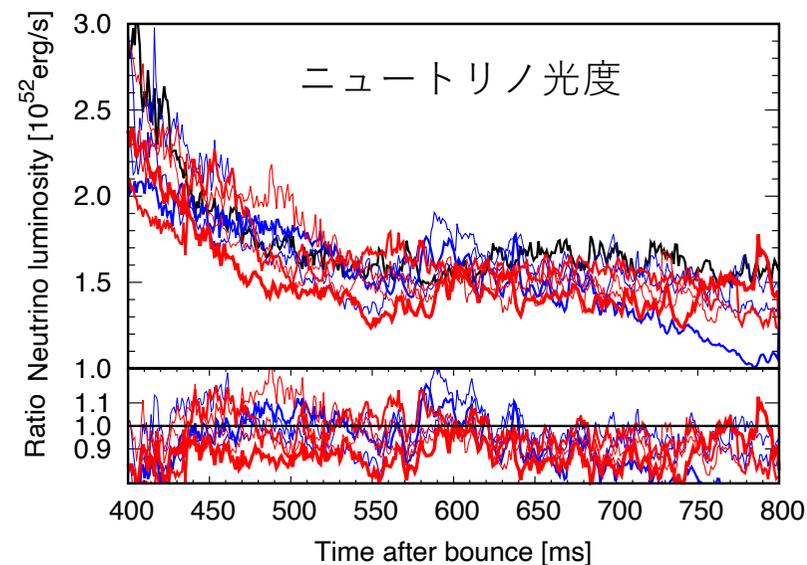
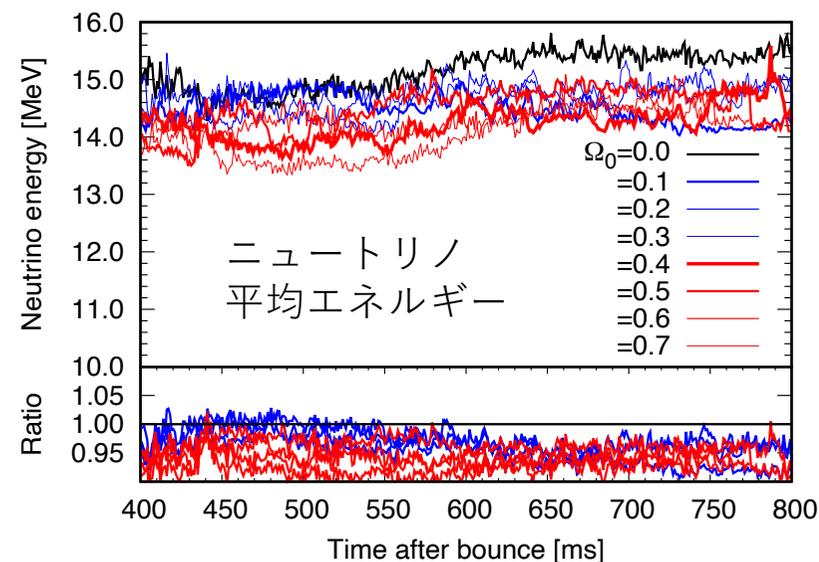
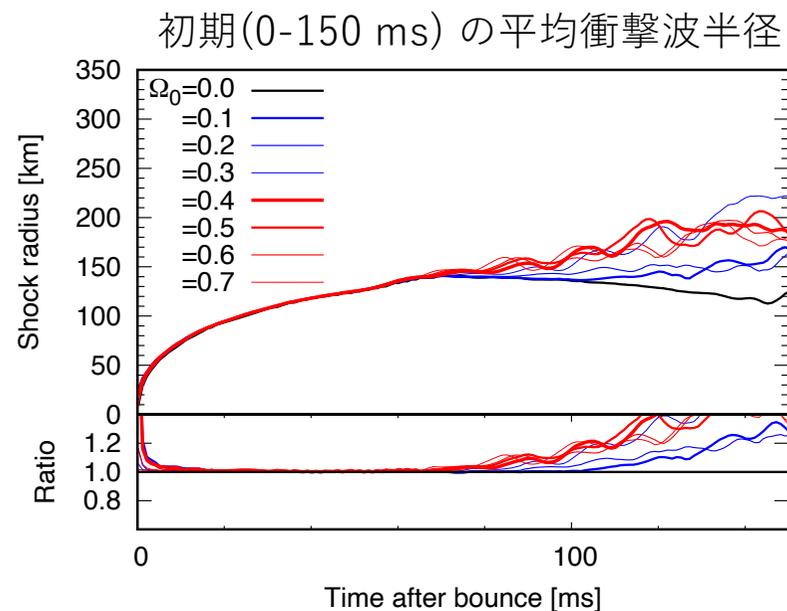


## より現実的な超新星モデルに向けて (1) - 自転の効果

### ✓ 自転を考慮した空間2次元計算の結果

以下の2つの効果を確認した.

1. 衝撃波に降着してくる物質を遠心力で支える.  
→ 降着率が減少, 衝撃波の膨張を助ける.
2. 収縮するコアを遠心力で支える.  
→ 重力エネルギーの解放を阻害, ニュートリノ加熱減少.



## より現実的な超新星モデルに向けて (1) - 自転の効果

### ✓ 自転を考慮した空間2次元計算の結果

爆発に有利な効果（衝撃波の膨張）と不利な効果（ニュートリノ加熱の減少）の両方が同時に働く。

結果、回転が遅いモデルは爆発エネルギーが増加し、速いモデルは減少した。

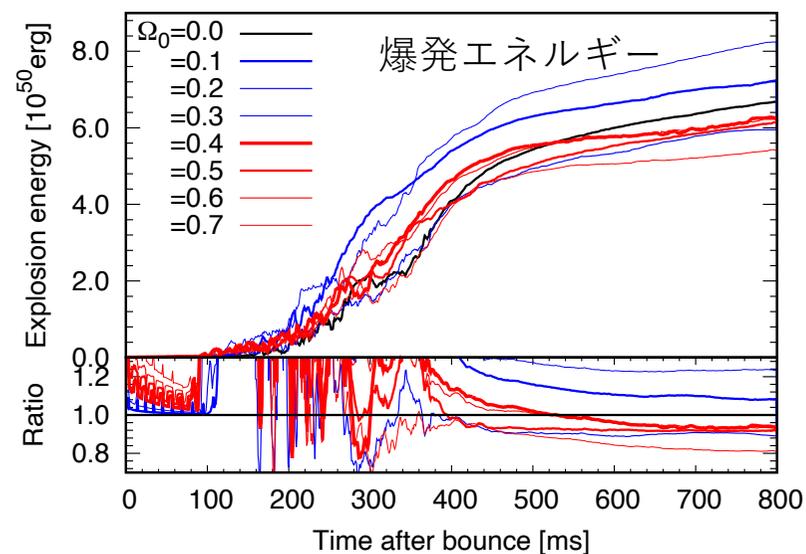
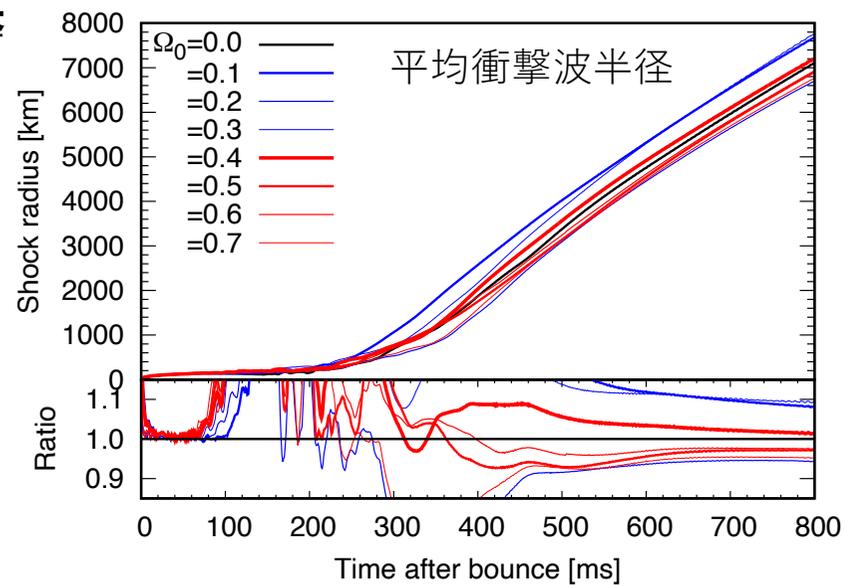
### ✓ 観測イベント数への影響

自転を考慮した空間2次元計算の結果、ニュートリノの光度は10-20%、平均エネルギーは5-10%、それぞれ無回転の場合に比べて減少した。

超新星ニュートリノ（単発）：<~30-40%

背景ニュートリノ（積み重ね）：<~10%

（※ Ib/c型超新星の割合~30%）



## より現実的な超新星モデルに向けて (2) - 親星が持つ非球対称構造の効果

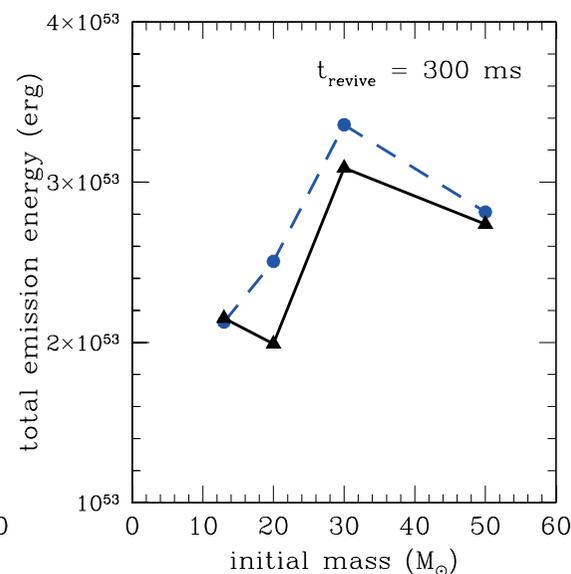
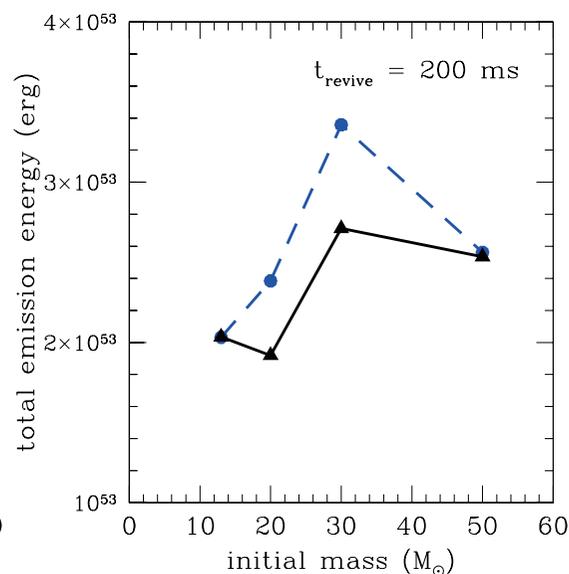
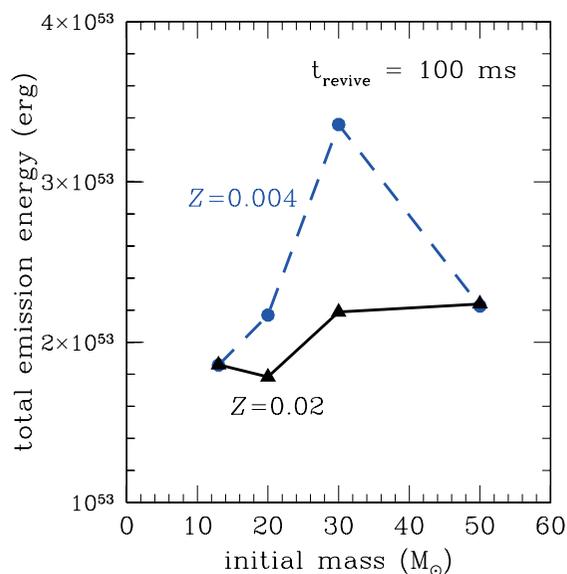
超新星親星の構造は対流などによって球対称からずれているが、これまでにこの発表で触れた計算で使用されている超新星親星モデルは全て球対称の1次元モデル。

近年、特に重力崩壊直前の星の対流構造を空間多次元の星進化計算で明らかにする試みが盛ん。

### ✓ 親星の非球対称構造が超新星のダイナミクスに及ぼすと期待される効果

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  
→ 停滞した衝撃波の復活を助ける。

衝撃波復活の  
タイミングに  
よって10-50%  
の違い

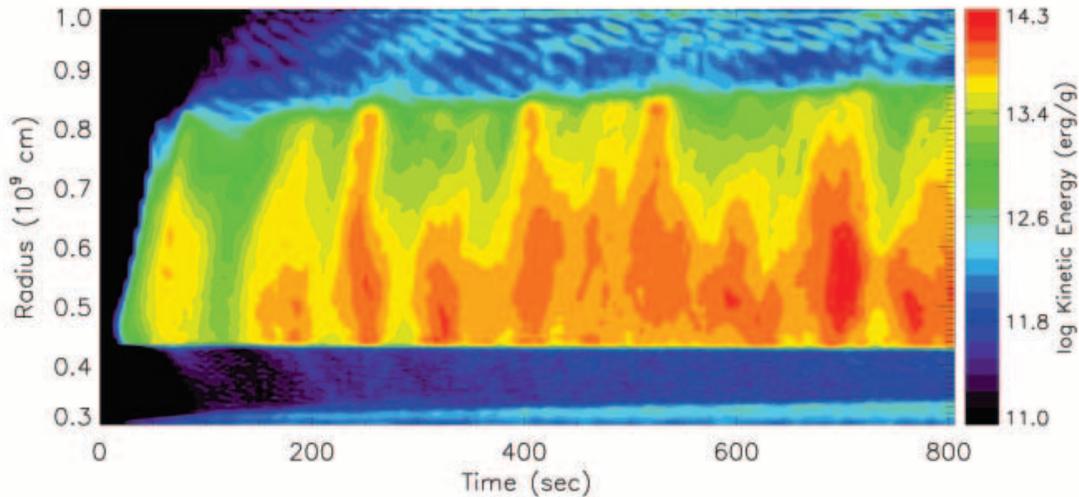


## より現実的な超新星モデルに向けて (2) - 親星が持つ非球対称構造の効果

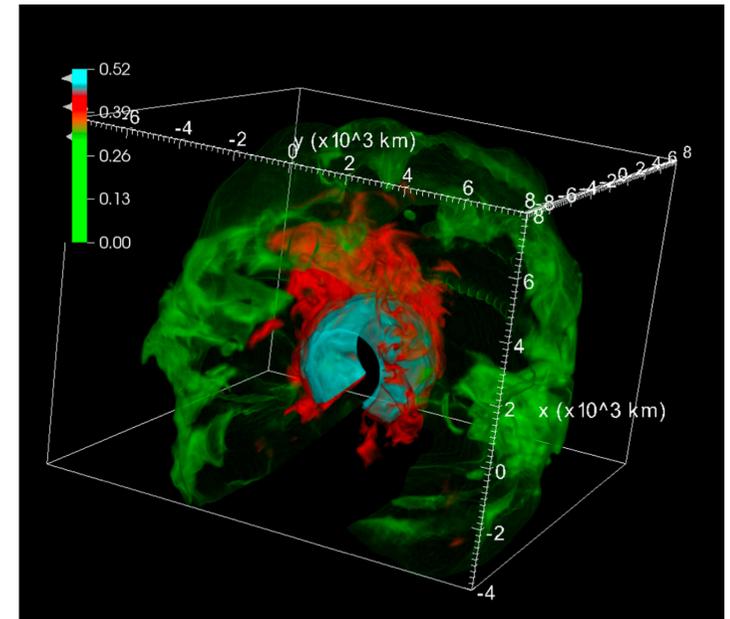
超新星親星の構造は対流などによって球対称からずれているが、これまでにこの発表で触れた計算で使用されている超新星親星モデルは全て球対称の1次元モデル。

近年、特に重力崩壊直前の星の対流構造を空間多次元の星進化計算で明らかにする試みが盛ん。

### ✓ 空間3次元の星進化計算の例



*Meakin & Arnett '07, Fig. 4*



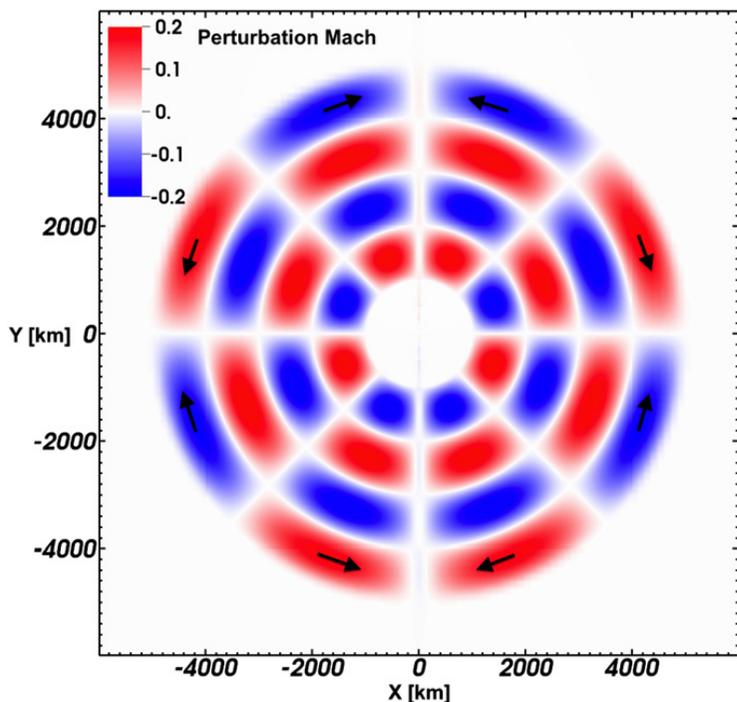
*Mueller+'16, Fig. 4*

## より現実的な超新星モデルに向けて (2) - 親星が持つ非球対称構造の効果

### ✓ 空間3次元の超新星爆発計算の例

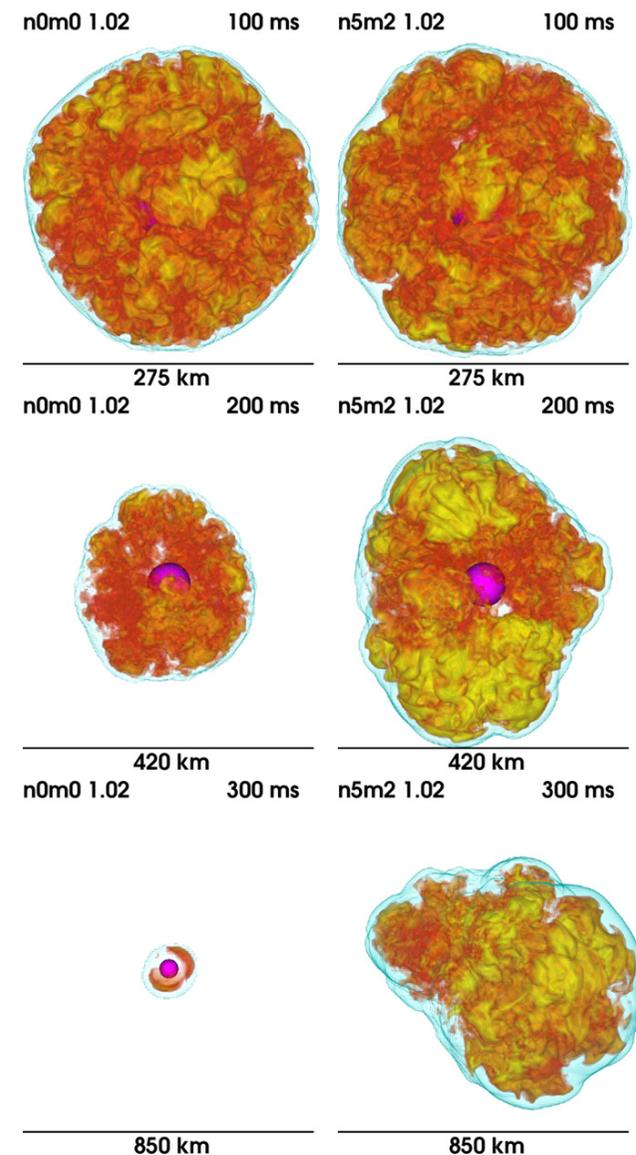
*Couch & Ott '13*

15太陽質量の球対称な親星モデル (Woosley & Heger '07) を使用.  
半径1000-5000kmの領域に $v_\theta$ 摂動をパラメトリックに与えて計算.



摂動なしモデルでは衝撃波が復活しないセットアップに対して上記摂動を加えると、衝撃波が復活することを発見.

注) ニュートリノ輸送を正しく取り扱っておらず (leakage scheme)、また計算時間も短いために $\nu$ 放出量については言及していない.



*Couch & Ott '13, Fig. 1 & 2*

## より現実的な超新星モデルに向けて (2) - 親星が持つ非球対称構造の効果

### ✓ 使用する空間3次元の親星モデル

Yoshida+'19

9-40太陽質量の空間1次元進化をHOSHIコードを用いて計算.  
→ 重力崩壊の約100秒前から**3DnSEVコード**を用いて3次元計算.  
(我々が重力崩壊計算に使用している3DnSNeコードの派生版)

右上図: 25太陽質量モデルの角度平均したマッハ数分布.

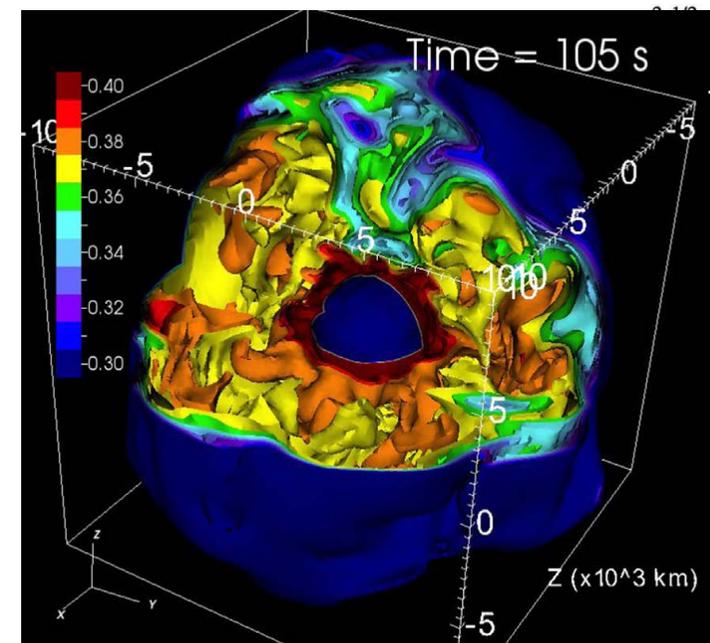
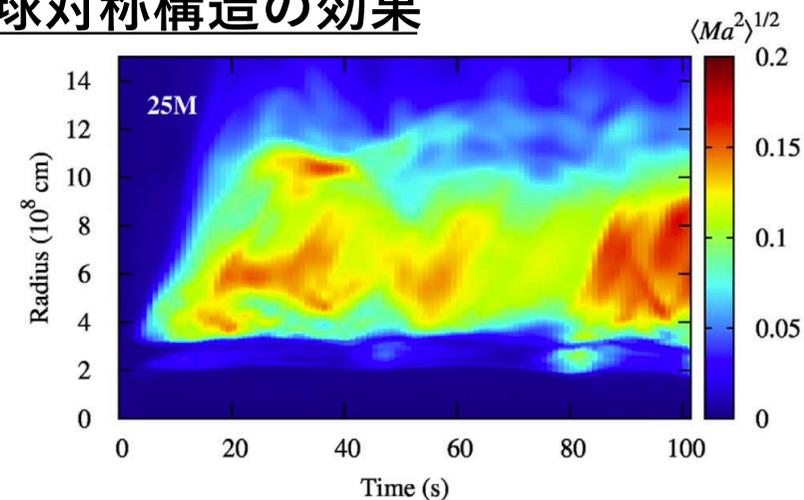
右下図: 同モデルのSi質量比の空間分布.

激しい殻燃焼で駆動されたSi-richな上昇流が立ち上がり、大規模な対流構造を形成してる。

右下図を初期条件とした超新星数値シミュレーションを**実行予定**.  
今回は対応する摂動なし親星の空間3次元計算結果を報告する.

### ✓ 使用する計算セットアップ

自転計算と同様.



Yoshida+'19

## より現実的な超新星モデルに向けて (2) - 親星が持つ非球対称構造の効果

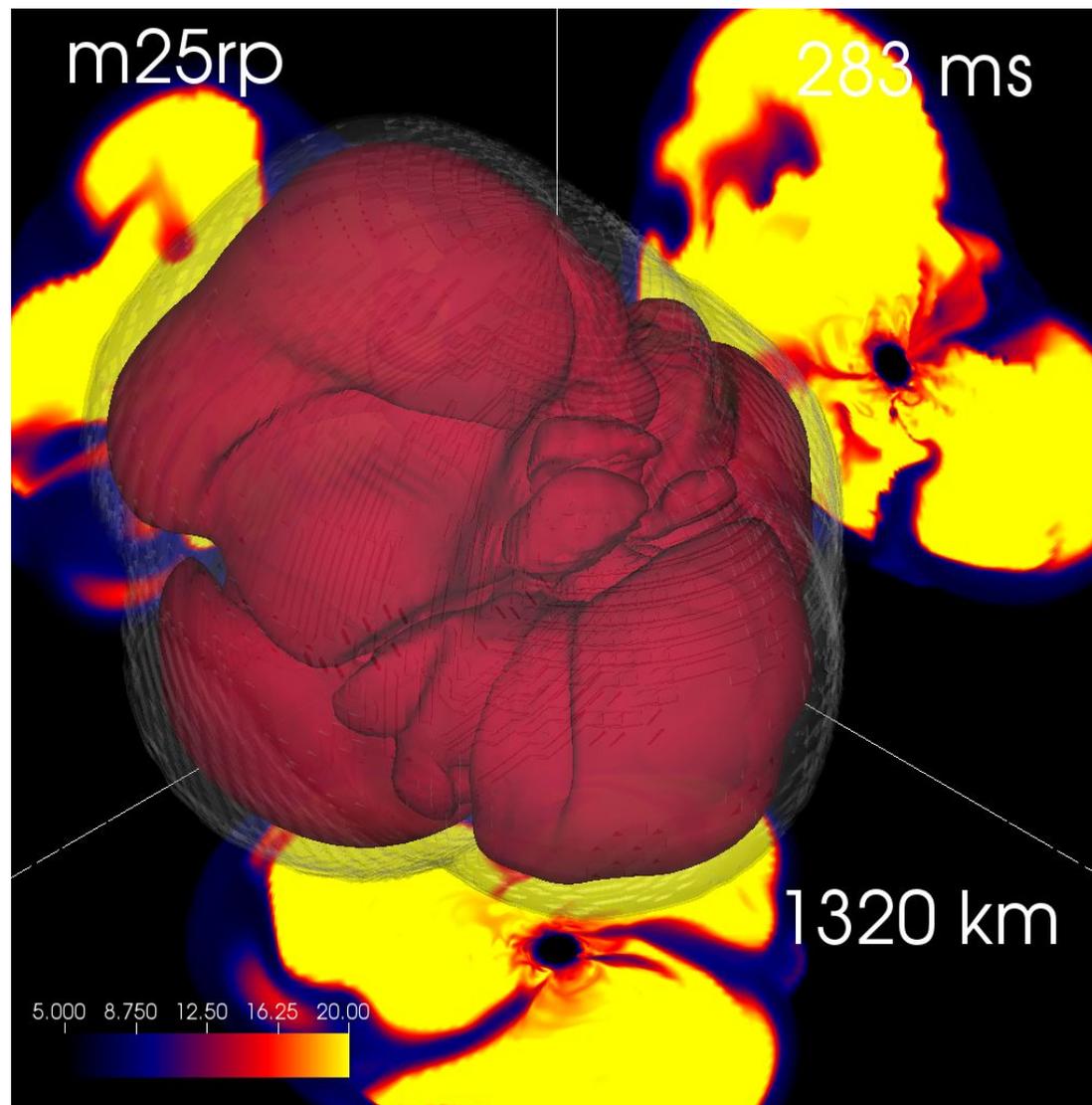
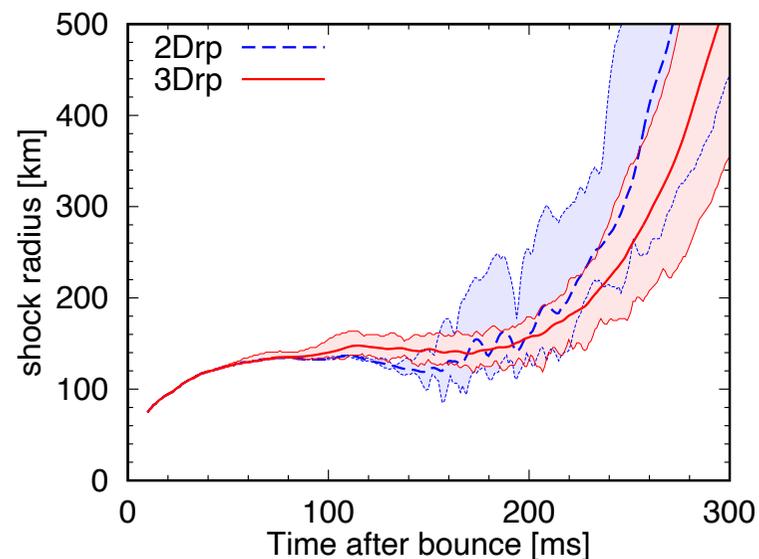
### ✓ 空間3次元摂動なし計算結果

3次元計算では衝撃波が復活しないことを期待（危惧）していたが、3次元モデルも衝撃波復活。2次元モデルより少し遅れる。

衝撃波の揺れ幅は小さい。SASIの特徴なし。

*Yoshida+*'19の構造に基づく3D計算を**実行中**。

2D/3Drpモデルの衝撃波半径



## 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 2 次元、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、自転と摂動の効果を検証した／する予定.
- ✓ 自転を考慮した空間 2 次元計算の結果、ニュートリノの光度は10-20%、平均エネルギーは5-10%、それぞれ無回転の場合に比べて減少した.  
コアの自転が期待されるIb/c型超新星の割合 (~30%) を考慮すると、~10%程度の影響.
- ✓ 摂動を考慮しない空間 3 次元計算の結果、対応する 2 次元計算に比べて衝撃波の復活が~30ms遅れた. 星の多次元進化に由来する摂動の効果を 3 次元計算で検証予定.