

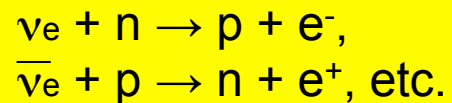
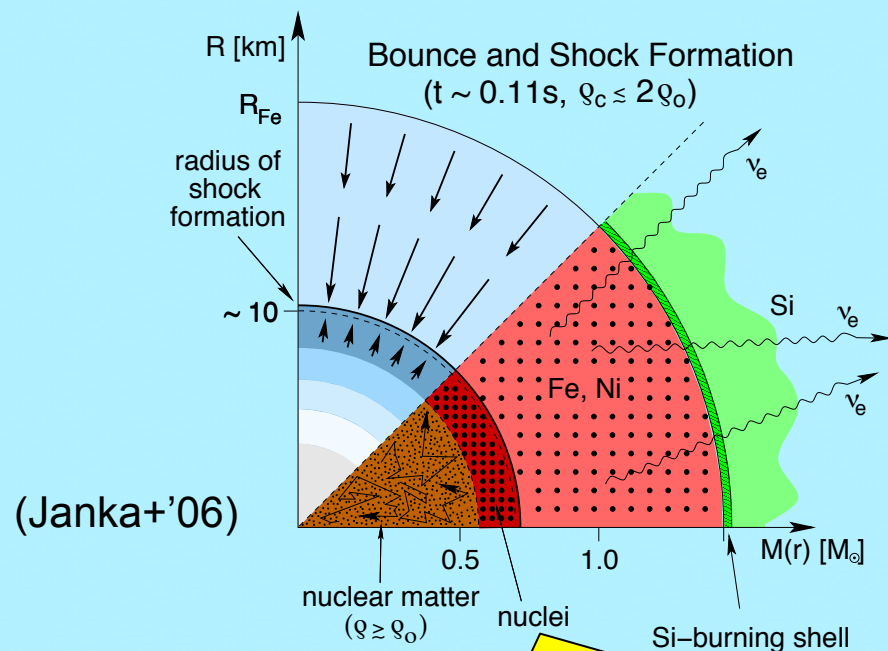
重力崩壊型超新星の3D長時間計算

中村 航 (福岡大学)

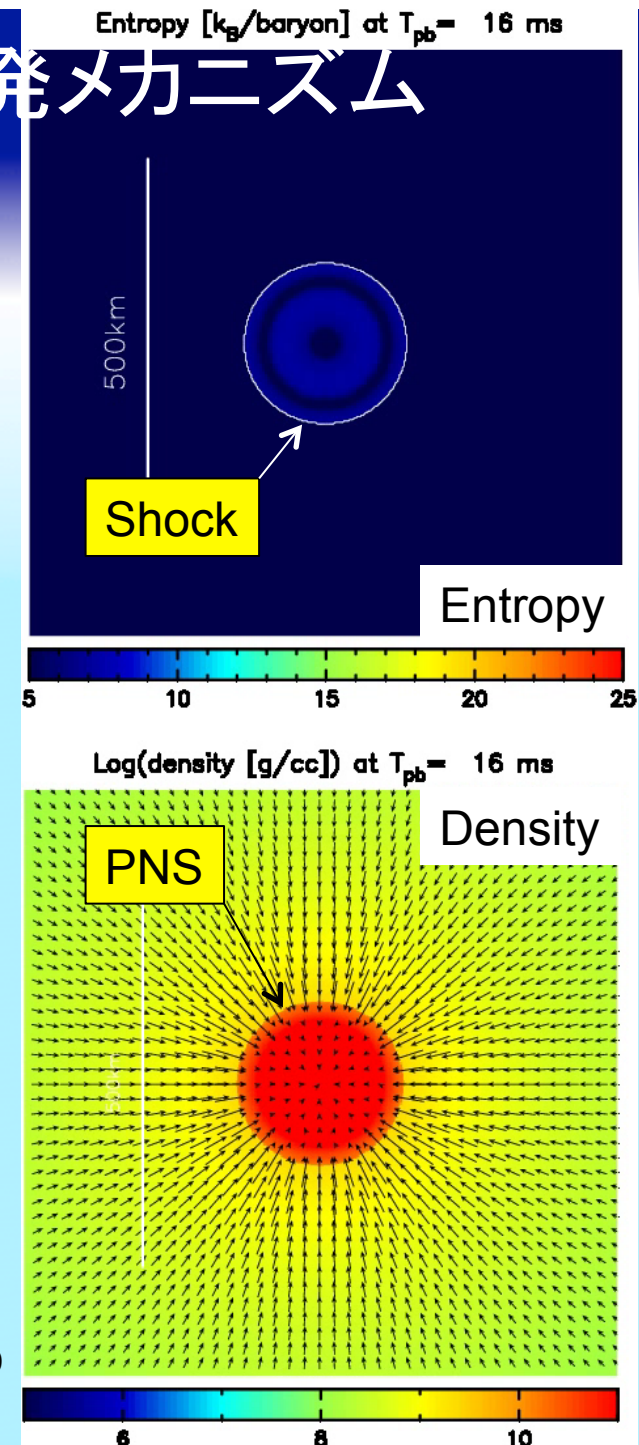
滝脇 知也 (国立天文台), 黒田 仰生 (ダルムシュタット工科大学),
諏訪 雄大 (京都大学), 固武 慶 (福岡大学)

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

- Core-collapse supernova
 - Final fate of massive stars ($> \sim 10 M_{\odot}$)
 - Unclear mechanism of explosion
 - Neutrino heating mechanism**
 - Convection, SASI

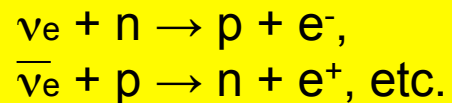
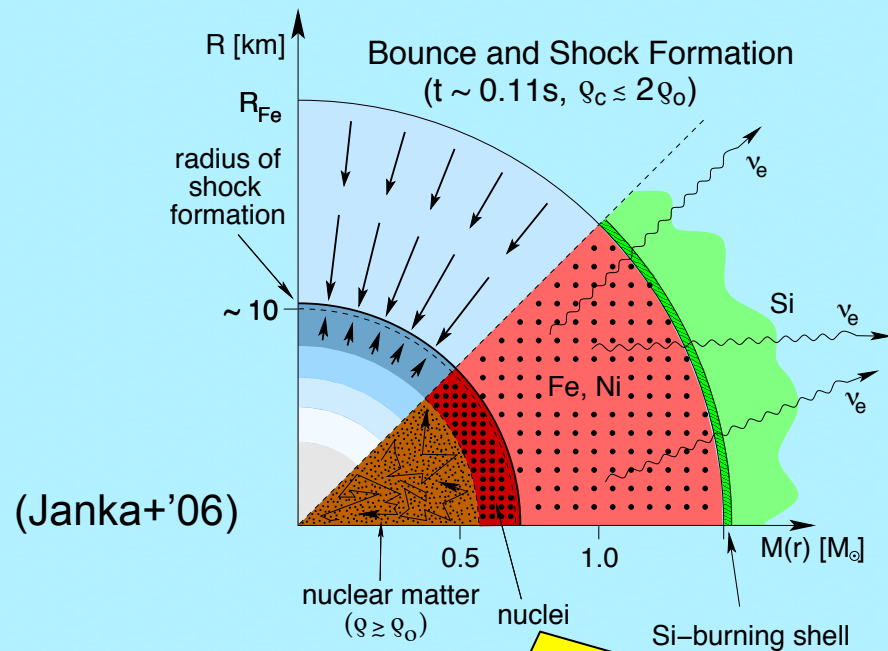


ex.)
 $M = 17 M_{\odot}$
 $Z = Z_{\odot}$

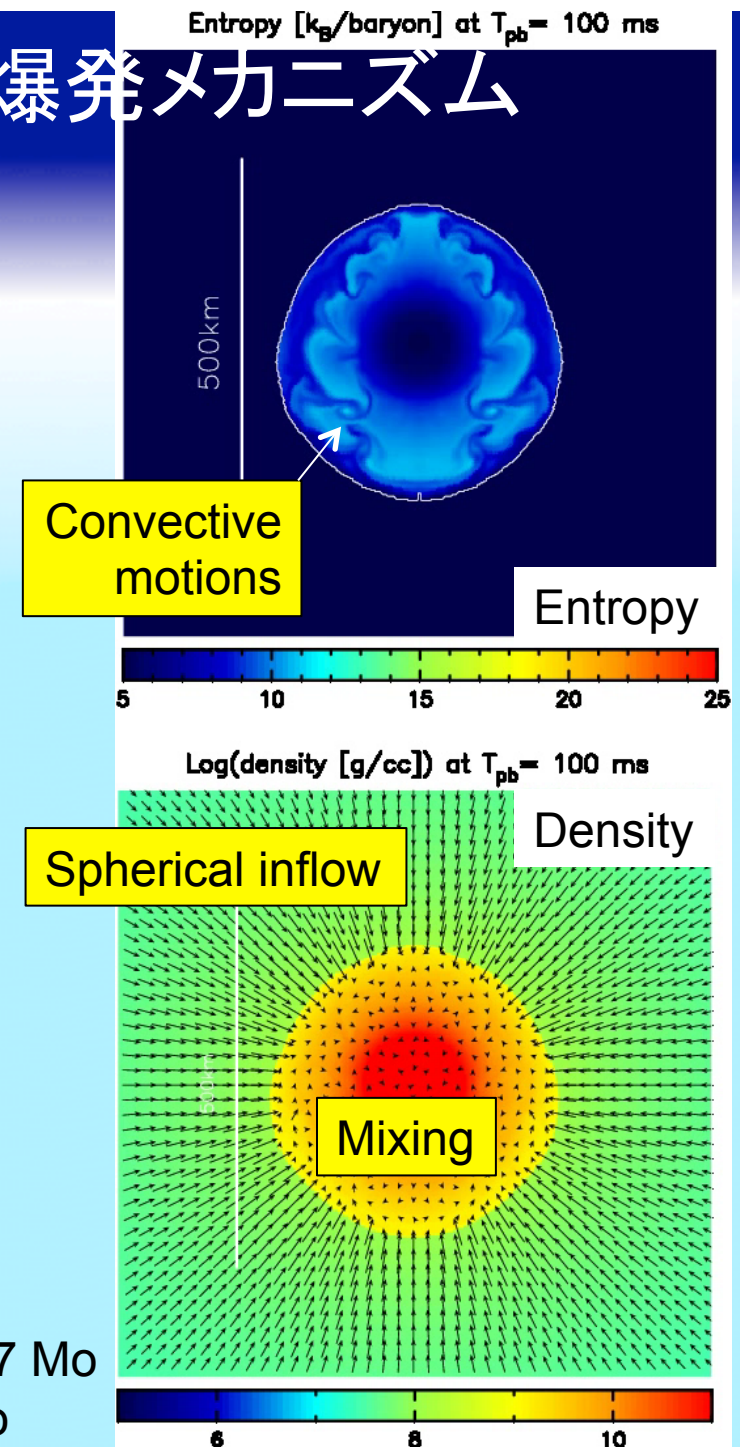


重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

- Core-collapse supernova
 - Final fate of massive stars ($> \sim 10 M_{\odot}$)
 - Unclear mechanism of explosion
 - Neutrino heating mechanism**
 - Convection, SASI



ex.)
 $M = 17 M_{\odot}$
 $Z = Z_{\odot}$



重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

Neutrino transport

from interior of PNS to outside of the shock

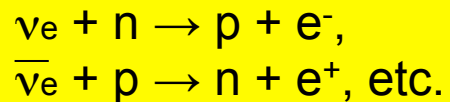
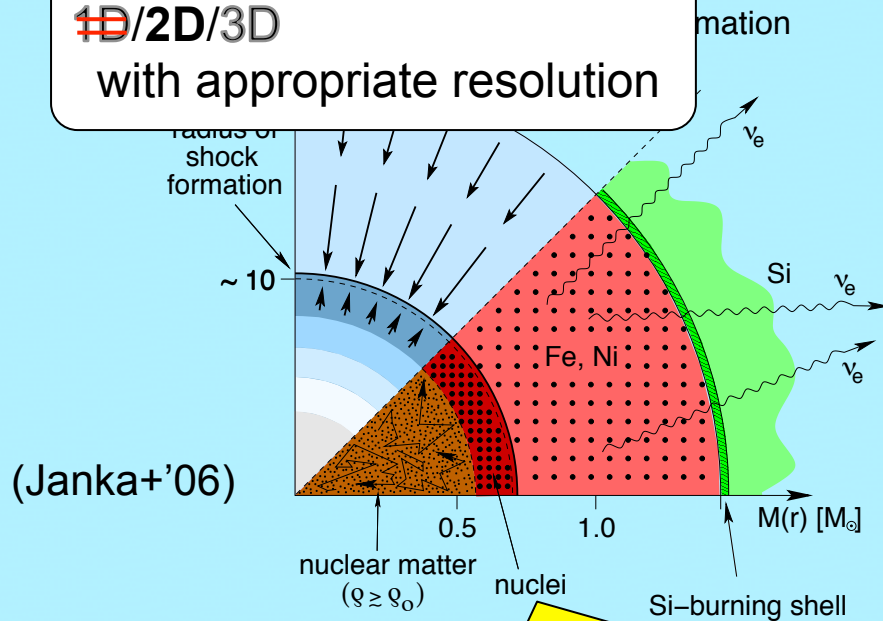
Energy distribution

to solve energy-dependent reactions

- Neutrino heating mechanism
- Convection, SASI

~~1D~~/2D/3D

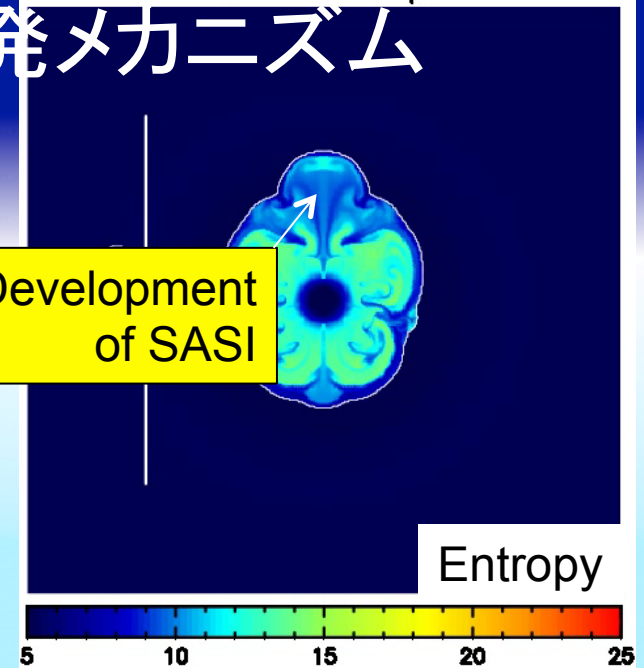
with appropriate resolution



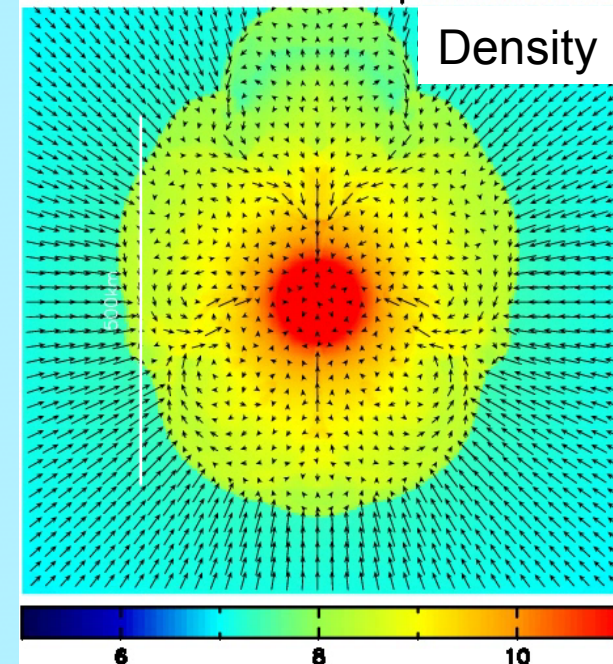
ex.)
M = 17 $M_\odot$
Z = Zo

Entropy [k_B /baryon] at $T_{pb} = 185$ ms

Development of SASI



Log(density [g/cc]) at $T_{pb} = 185$ ms



元素合成・銀河化学進化を見据えた 超新星の系統的研究

➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

KN+'15 PASJ, 67 (6) 107

$R < 5,000 \text{ km}$, $t < 1.5 \text{ s}$

まずは計算領域を中心の鉄コア周辺に限定.

幅広い質量域 ($M = 10.8\text{-}75 \text{ Mo}$)、金属量 ($Z = 0\text{-}1 \text{ } Z_{\odot}$) の親星を使用.

→ 計 378モデル

- ✓ 空間2次元 → 対流, SASIが発生.
- ✓ ニュートリノ輸送を解く → パラメータなしの self-consistent 計算.
- ✓ 核反応も同時に解く → Ni合成量の見積もり.

➤ Step 2: “代表的な”モデルを選んで長時間計算

KN+'16 MNRAS, 461 (3) 3296

$R < 100,000 \text{ km}$, $t < 10 \text{ s}$

同じセットアップ (EoSは拡張) で広範囲・長時間計算.

- 最終的な爆発エネルギーは? ニッケル合成量は?
- ポストプロセスで大規模核反応ネットワーク計算.

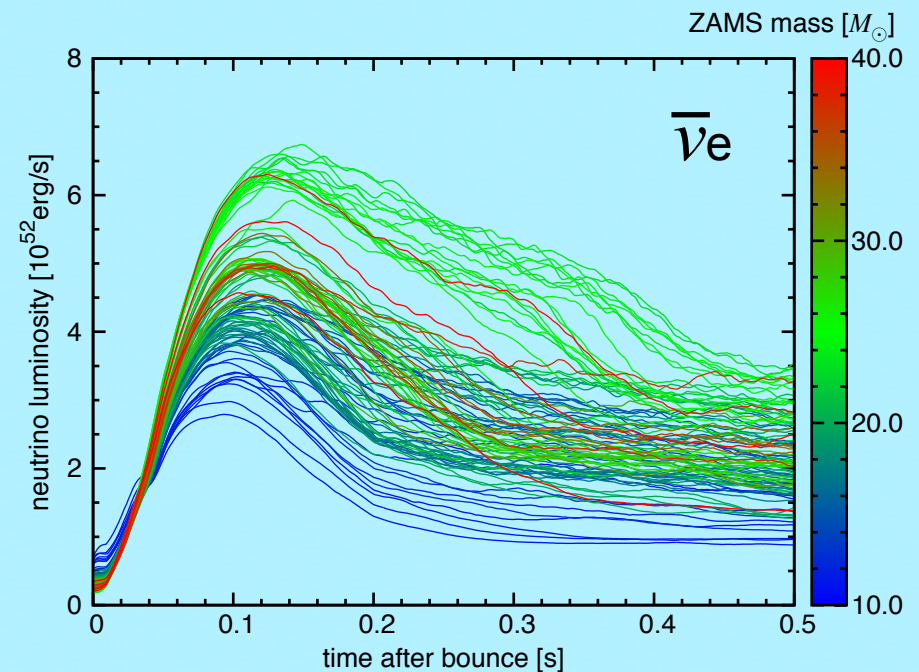
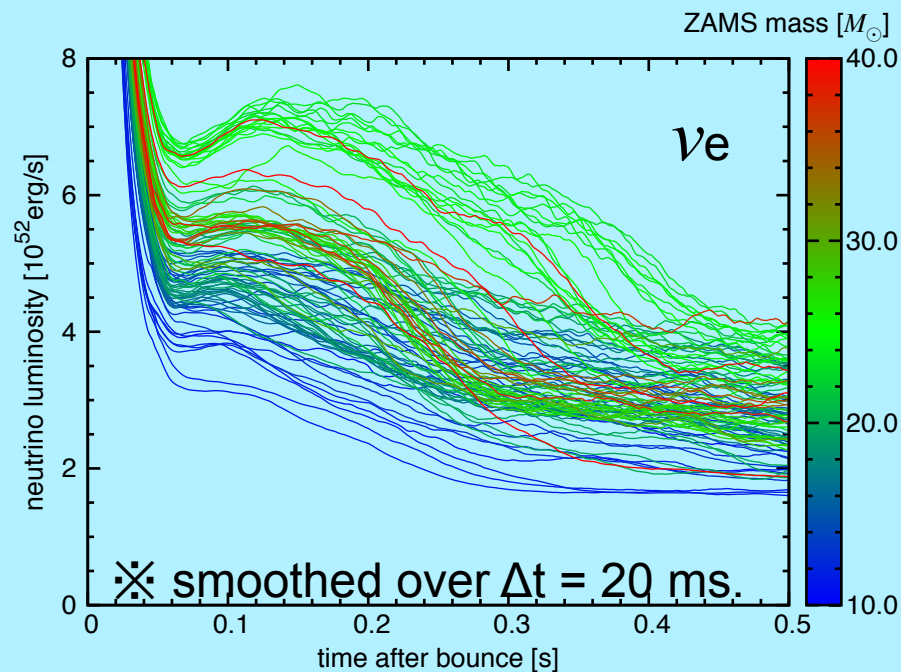
ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 378モデルのうち太陽金属量を持つ101モデルに注目(以下同様).
他の金属量のモデルも(示していないが)傾向は同じ.
- ✓ モデルによってニュートリノ光度に**2倍以上の大きな差**.
 $2-6 \times 10^{52}$ erg/s @ $t = 200$ ms.
- ✓ コンパクトネスで色分けすると**単調な傾向**.

コンパクトネスパラメータ
(O'Connor & Ott 2011)

$$\xi_M \equiv \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

各親星の構造に対応.



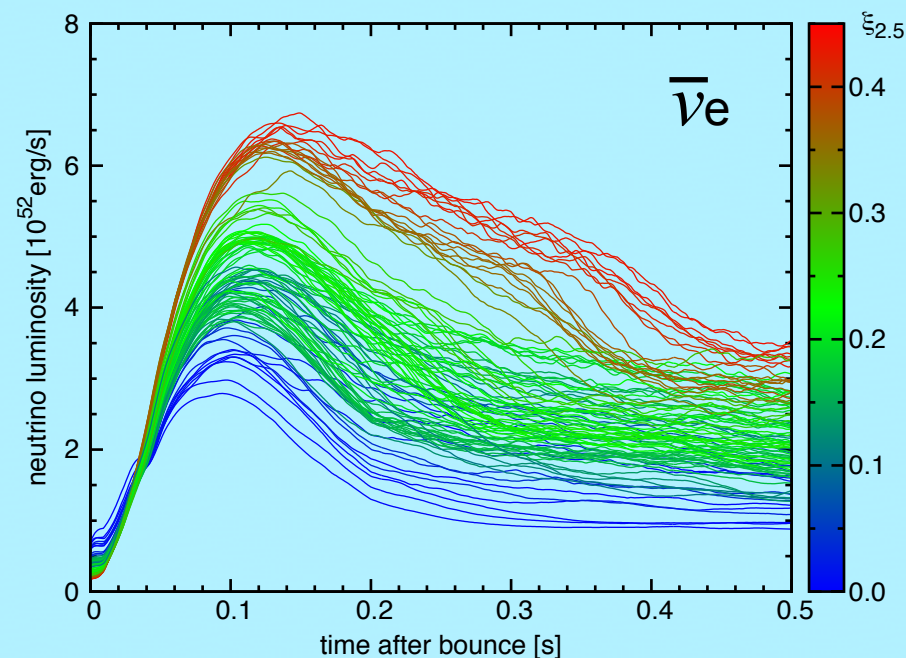
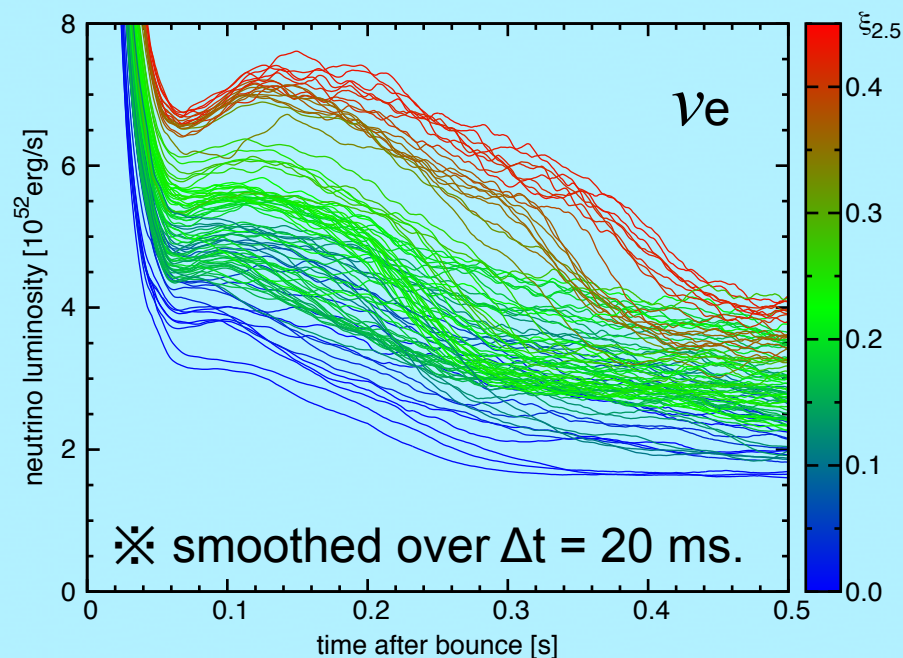
ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 378モデルのうち太陽金属量を持つ101モデルに注目(以下同様).
他の金属量のモデルも(示していないが)傾向は同じ.
- ✓ モデルによってニュートリノ光度に**2倍以上の大きな差**.
 $2-6 \times 10^{52}$ erg/s @ $t = 200$ ms.
- ✓ コンパクトネスで色分けすると**単調な傾向**.

コンパクトネスパラメータ
(*O'Connor & Ott 2011*)

$$\xi_M \equiv \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

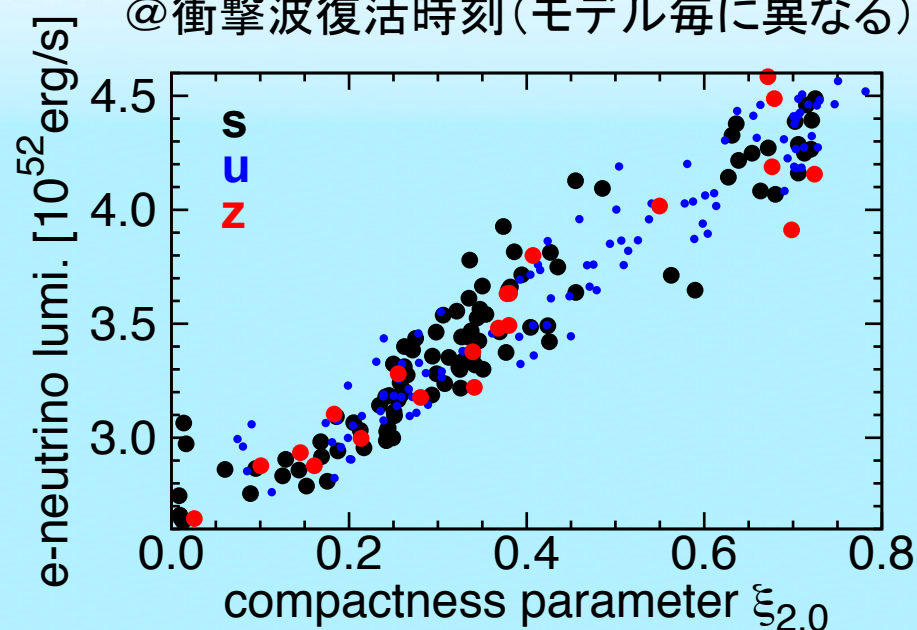
各親星の構造に対応.



“ある時刻”における物理量比較

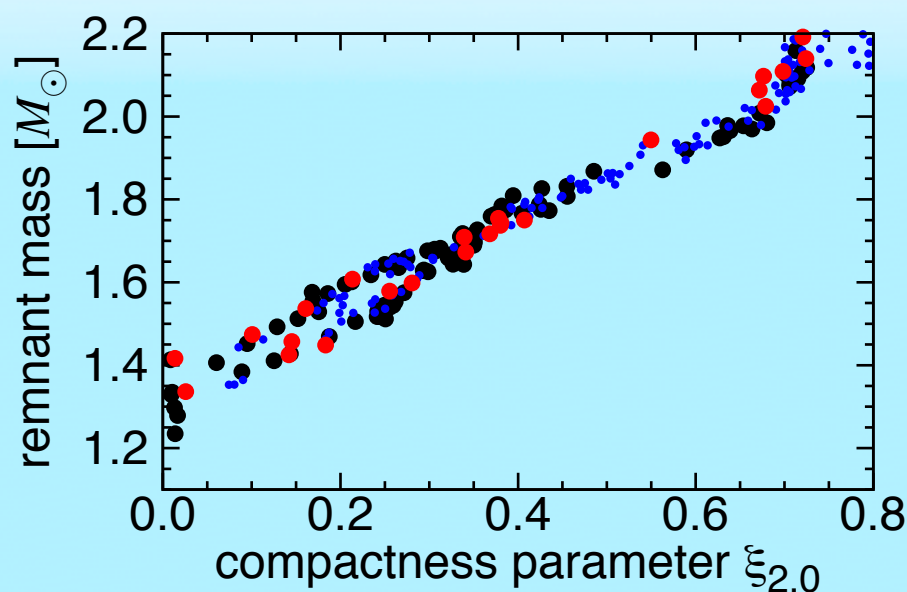
電子ニュートリノ光度

@衝撃波復活時刻(モデル毎に異なる)



原始中性子星の質量

@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)

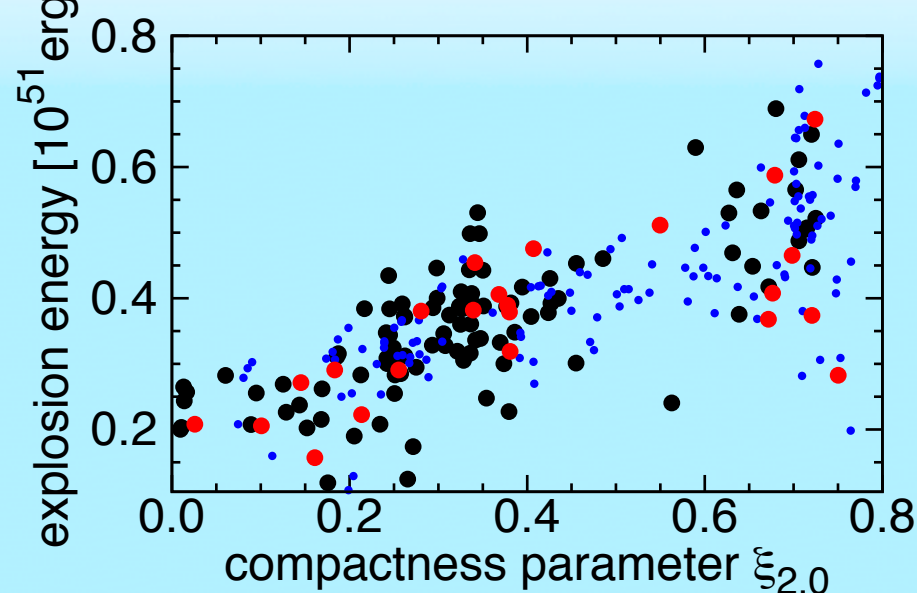


どちらもコンパクトネスパラメータに対して良い相関を示している。

“ある時刻”における物理量比較

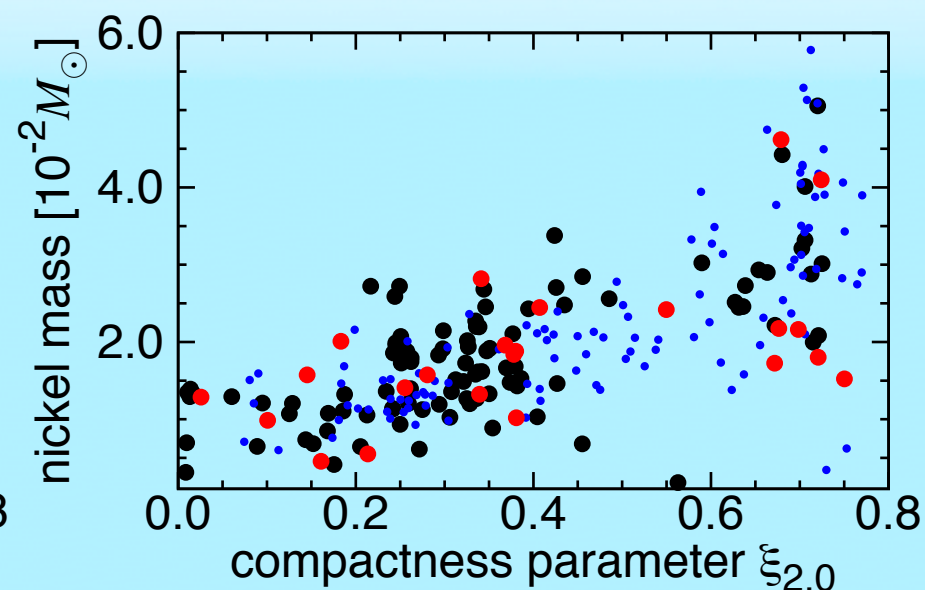
爆発エネルギー

@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)



ニッケル合成量

@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)



おおまかな傾向は同じだが、ばらつきが大きい、値も小さい。

方針：元素合成・銀河化学進化を見据えた 超新星の系統的研究

➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

KN+’15 PASJ, 67 (6) 107

$R < 5,000 \text{ km}$, $t < 1.5 \text{ s}$

爆発の特徴的な量はコンパクトネス ξ の関数として表すことが可能.

→ しかし爆発エネルギーや元素合成反応はまだ収束していない.

➤ Step 2: “代表的な”モデルを選んで長時間計算

KN+’16 MNRAS, 461 (3) 3296

$R < 100,000 \text{ km}$, $t < 10 \text{ s}$

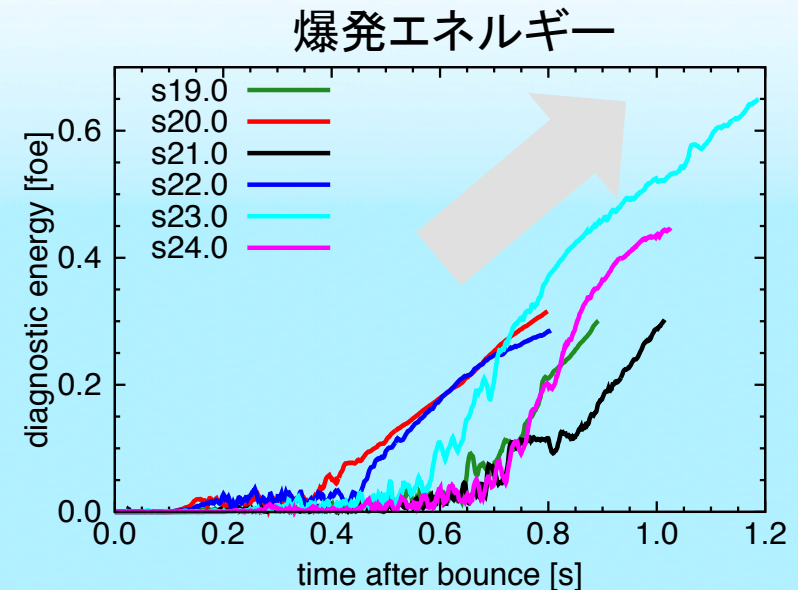
Step 1で爆発に転じたモデルの中から小/中/大 ξ モデルを選択

→ $M = 11.2, 17.0, 27.0 \text{ Mo}$ の太陽金属量モデル.

同じセットアップ(EoSは拡張)で広範囲・長時間計算.

→ 最終的な爆発エネルギーは？ ニッケル合成量は？

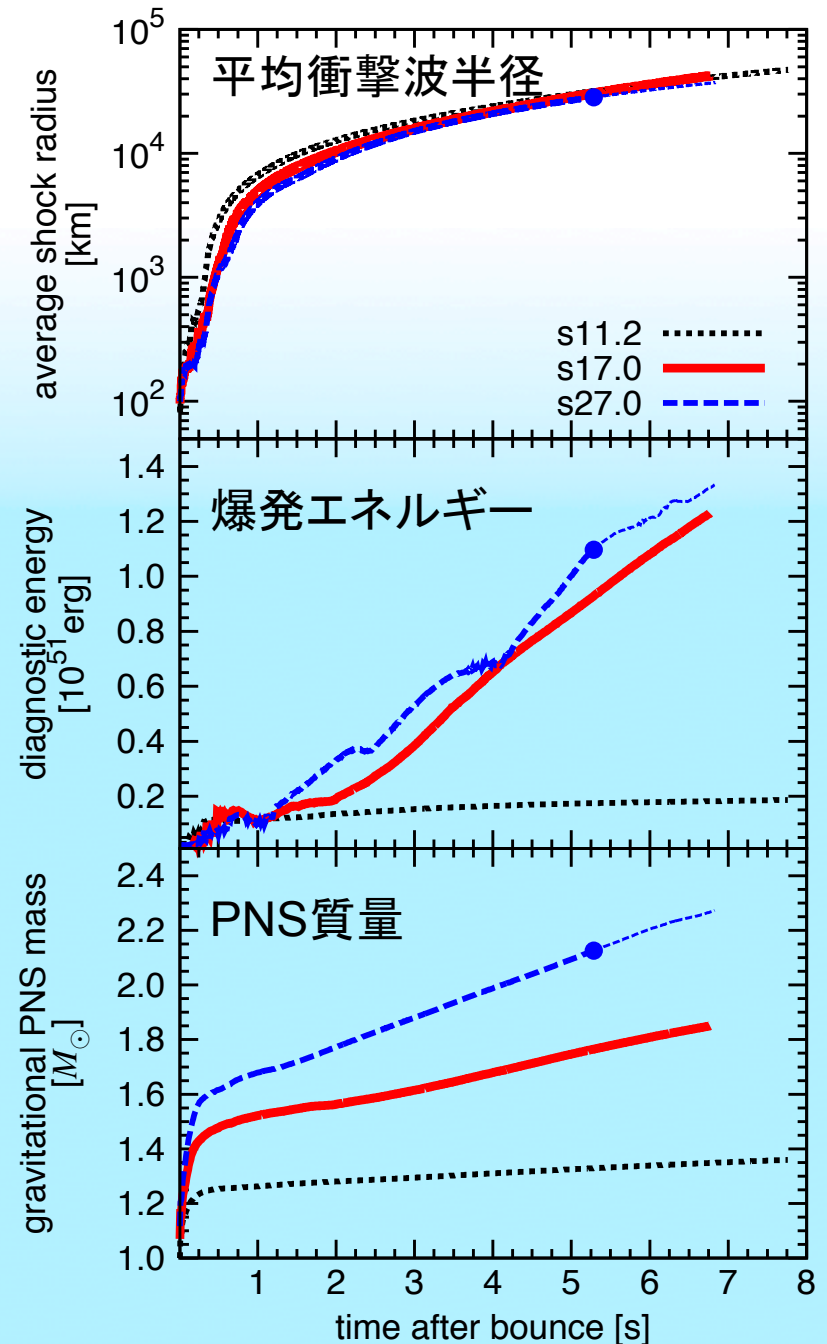
→ ポストプロセスで大規模核反応ネットワーク計算.



Long-term CCSN simulation

(*KN et al., in prep.*)

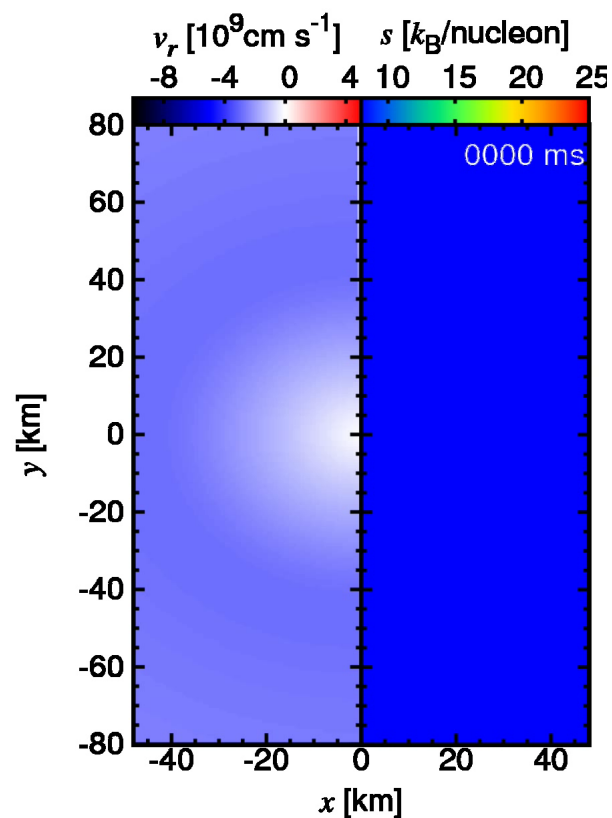
- ✓ 全てのモデルが爆発に転じた.
t = 7-8 秒で衝撃波が外境界@10万kmに.
(He層の底に対応)
- ✓ **s11.2モデル**
爆発エネルギー、PNS質量ほぼ収束
Eexp = 0.19 foe, Mpns = 1.36 Mo
- ✓ **s17.0モデル**
~7秒後でまだEexp, Mpns成長.
Eexp = 1.23 foe, Mpns = 1.85 Mo
- ✓ **s27.0モデル**
s17.0モデルと同様に成長.
5.29秒後に1D GR計算で予言される限界
質量 (Mpns = 2.13 Mo) に到達.
(O'Connor & Ott '11; KN+'15)
→この先成長? 衰退?



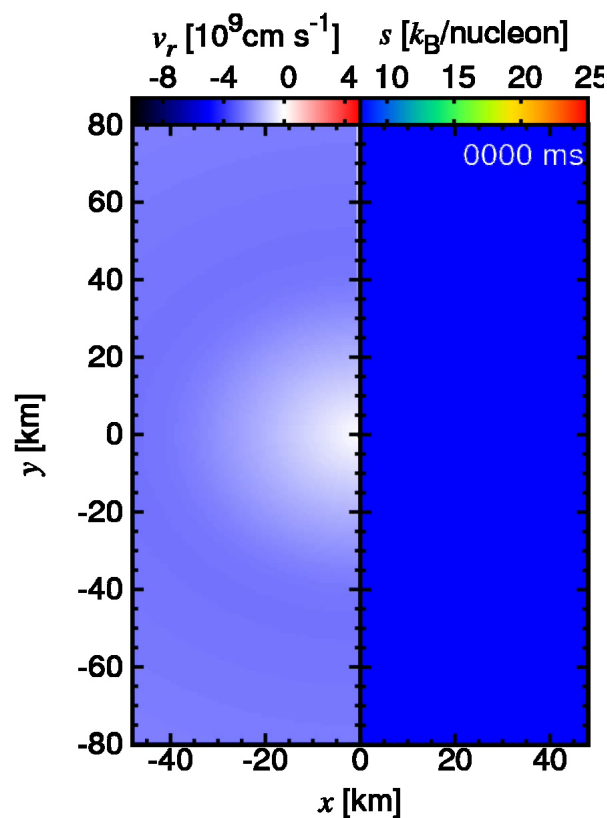
中心付近の降着流

- ✓ s17.0 と s27.0 では冷たいdownflowが中心のPNSを叩き続ける.
 - PNS質量増大、ニュートリノ光度維持
 - 爆発エネルギー成長

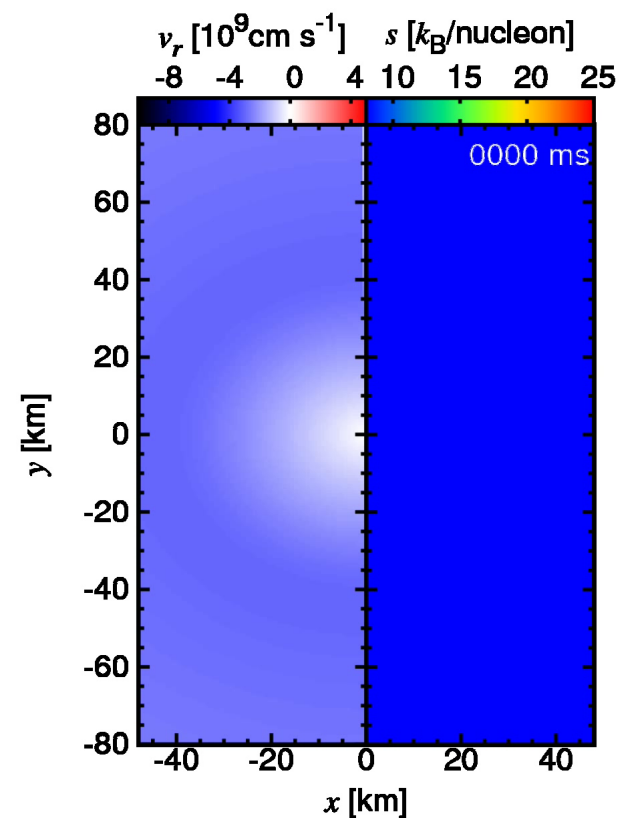
s11.2



s17.0



s27.0



ポスト京に向けて

➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

KN+'15 PASJ, 67 (6) 107

爆発の特徴的な量(ニュートリノ光度、PNS質量等)はコンパクトネス ξ の関数として表すことが可能.

→ しかし爆発エネルギーや元素合成反応はまだ収束していない.

$R < 5,000 \text{ km}, t < 1.5 \text{ s}$

➤ Step 2: “代表的な”モデルを選んで長時間計算

KN+'16 MNRAS, 461 (3) 3296

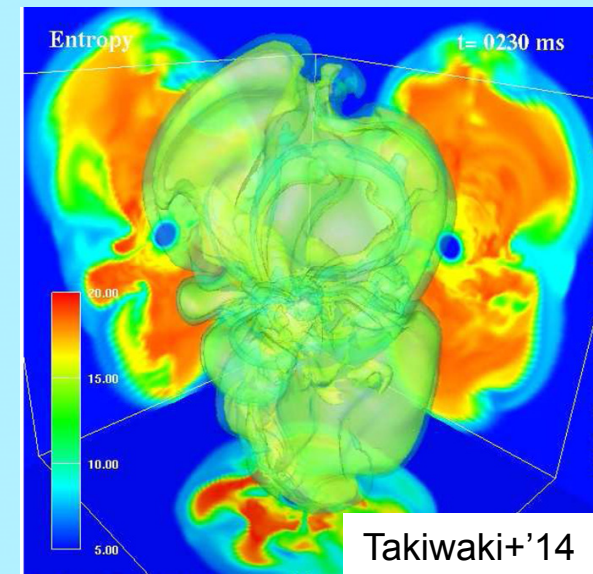
Step 1で爆発に転じたモデルの中から小/中/大 ξ モデルを選択し広範囲・長時間計算.

→ 爆発エネルギーが 10^{51} erg に到達. しかし収束しない. 2Dの問題.

$R < 100,000 \text{ km}, t < 10 \text{ s}$

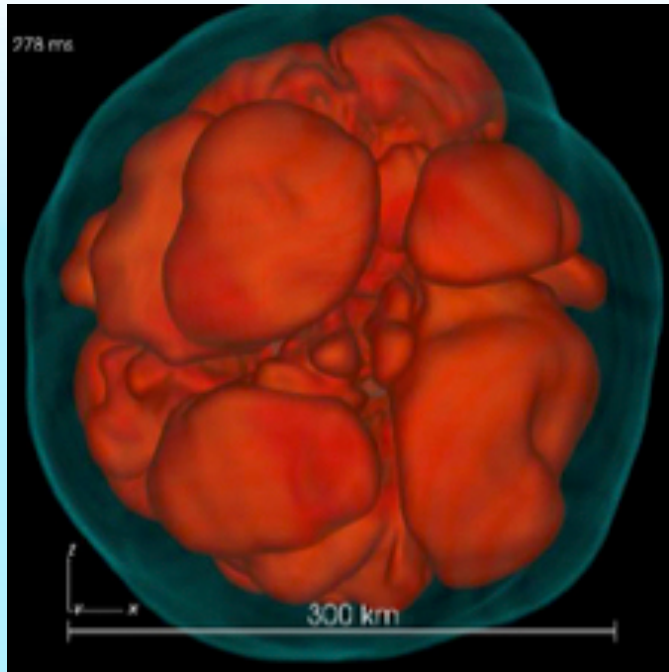
➤ Step 3: 空間3次元で長時間計算が必要!

しかし計算コストは飛躍的に増加...



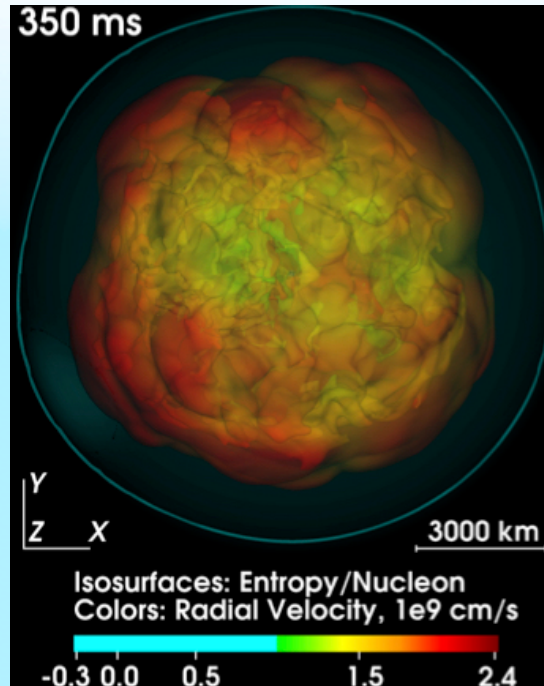
3D CCSN Simulations

Hanke+'13



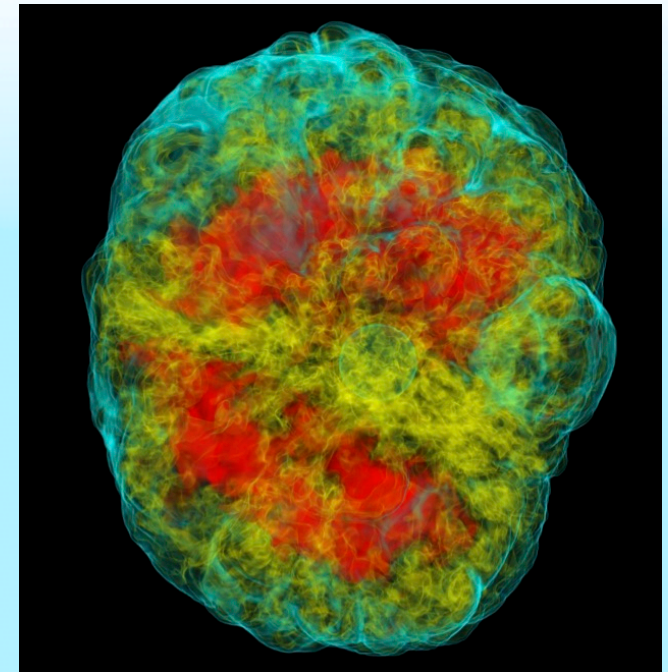
27 Mo (WHW02)
 $t < \sim 400$ ms
LS220 EoS
1D gravity + GR correction

Melson+'15



9.6 Mo (A. Heger)
 $t < \sim 400$ ms
LS220 EoS
1D gravity + GR correction
Yin-Yang grid

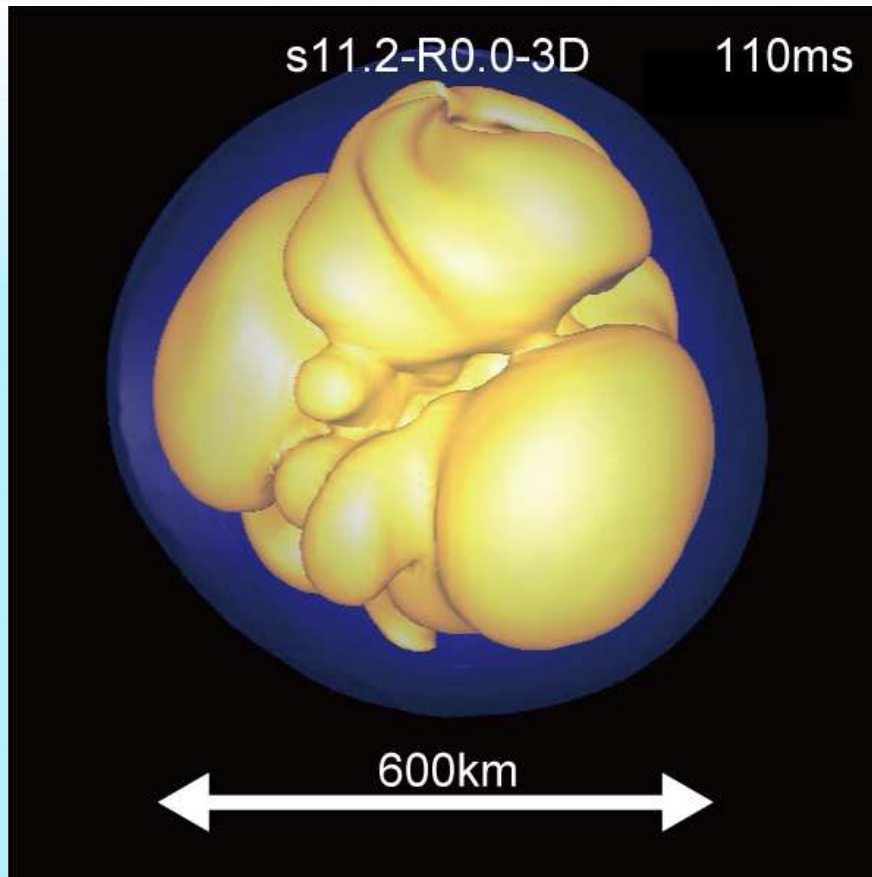
Roberts+'16



27 Mo (WHW02)
 $t < 380$ ms
LS220 EoS
GR
Cartesian AMR

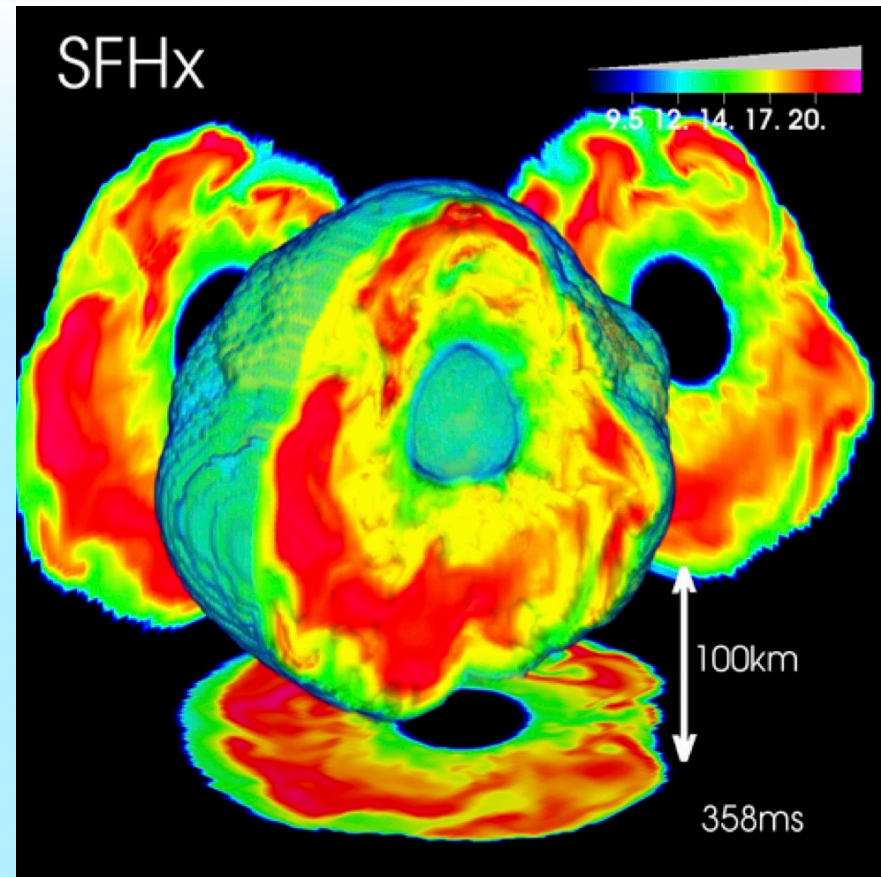
3D CCSN Simulations

Takiwaki+16



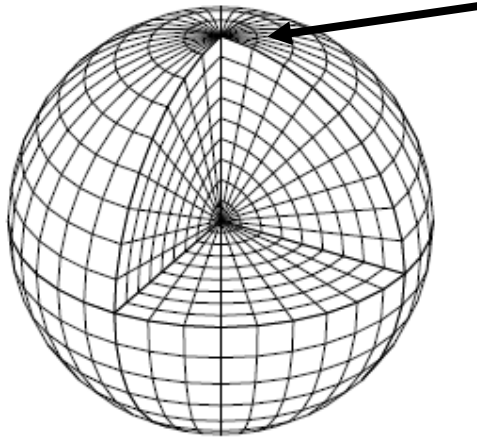
11.2 (± 2.7) Mo (WHW02)
 $t < \sim 300$ (400) ms
LS220 EoS
Newtonian

Kuroda+16



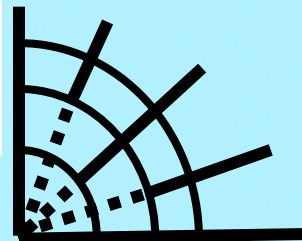
15 Mo (WW95)
 $t < \sim 400$ ms
DD2/TM1/SFHx EoS
GR; Cartesian FMR

粗視平均化による計算コストの削減

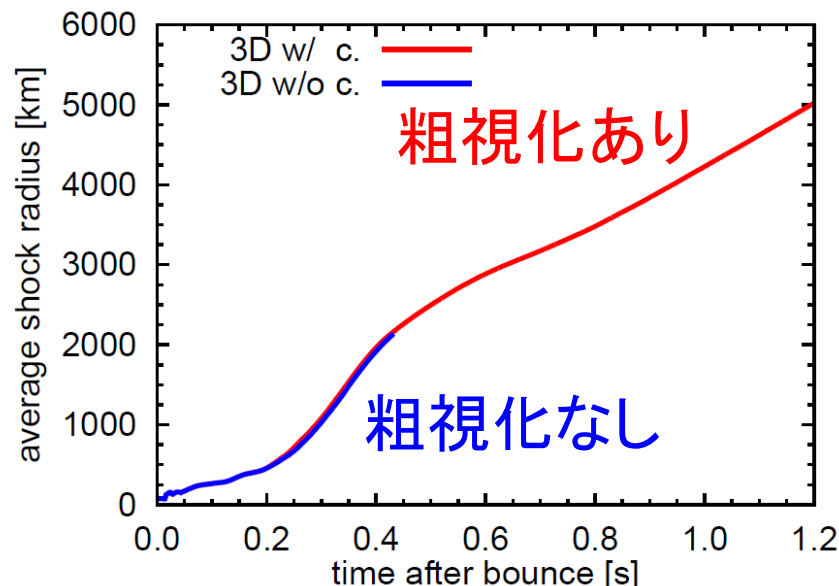


3次元の球座標の計算は
極でメッシュ幅 L が小さく、 Δt が短くしかとれない。

$$L \sim r \Delta\theta \Delta\phi \quad \Delta t \sim L/c_s$$



⇒複数のメッシュを同一視して平均化し、同一視した大きなメッシュにおいて Δt を決める。



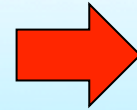
左: 3次元のテスト計算

平均衝撃波半径のような平均量
(積分量)は粗視化に依らない。

(KN+, in prep.)

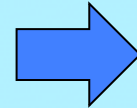
3D計算 - セットアップ

$R < 5,000\text{-}10,000 \text{ km}$
($t < 0.5 \text{ s}$)



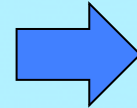
$R < 10,000\text{-}100,000 \text{ km}$
($t < 1\text{-}10 \text{ s}$)

$\delta\theta \sim 2^\circ$
(with FMR / AMR)



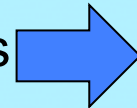
$\delta\theta \sim 1.4^\circ\text{-}2.8^\circ$
with coarsened grid

3-flavor spectral ν transport



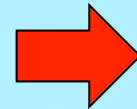
2-flavor spectral ν transport
+ leakage scheme

with a complete set of ν interactions



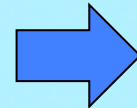
Liebendoerfer+'05

nuclear EOS



nuclear EOS + Boltzmann gas
with $13\text{-}\alpha$ network

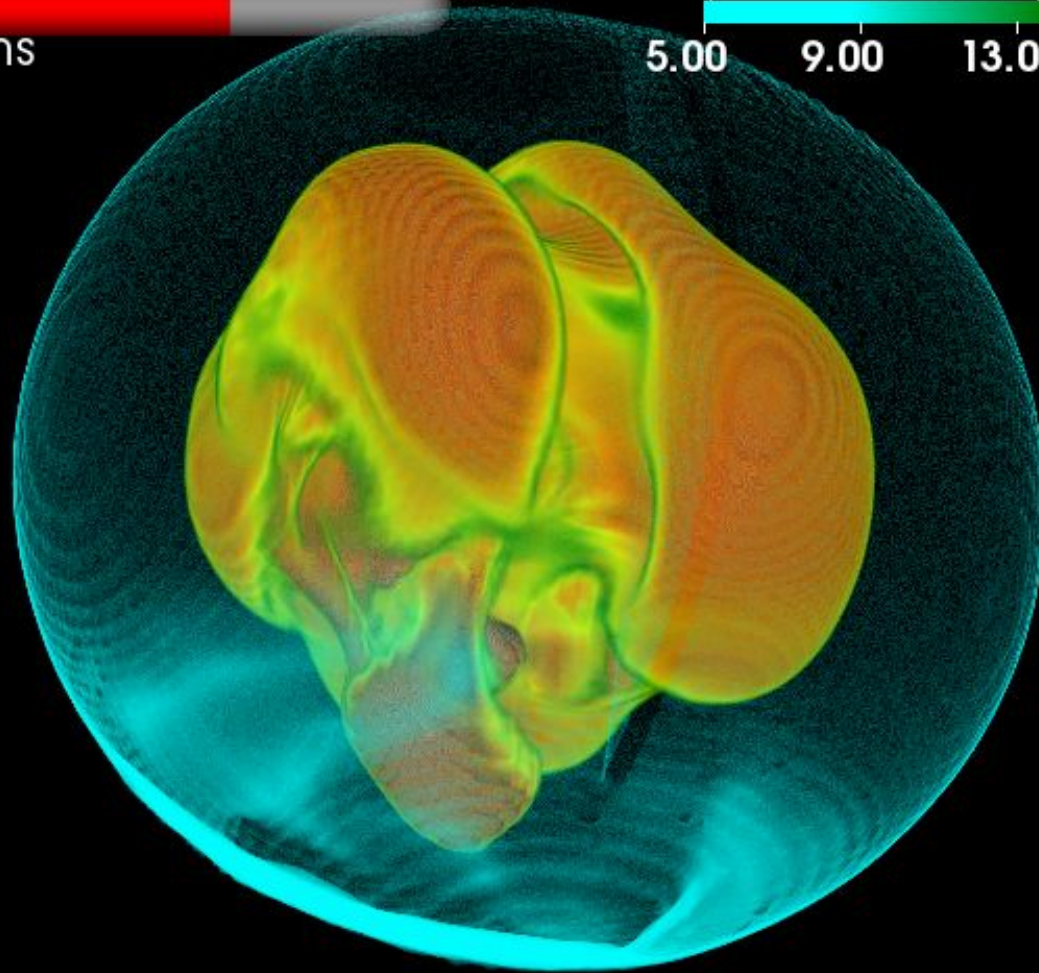
(effective) GR



Newtonian

$T_{pb}=1118$ ms

5.00 9.00 13.0 17.0



10000 km

まとめ

➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

$R < 5,000 \text{ km}$, $t < 1.5 \text{ s}$

KN+ '15 PASJ, 67 (6) 107

爆発の特徴的な量(ニュートリノ光度、PNS質量等)はコンパクトネス ξ の関数として表すことが可能.

→ しかし爆発エネルギーや元素合成反応はまだ収束していない.

➤ Step 2: “代表的な”モデルを選んで長時間計算

$R < 100,000 \text{ km}$, $t < 10 \text{ s}$

KN+ '16 MNRAS, 461 (3) 3296

Step 1で爆発に転じたモデルの中から小/中/大 ξ モデルを選択し広範囲・長時間計算.

→ 爆発エネルギーが 10^{51} erg に到達. しかし収束しない. 2Dの問題.

➤ Step 3: ポスト京を用いた“より現実的な”計算

KN+, in prep.

空間2D → 3D

2-flavor IDSA → 3-flavor IDSA + more reactions.

Newtonian → GR correction.

