

ポスト京で迫る 重力崩壊型超新星の長時間進化

中村 航 (早稲田大学)

滝脇 知也 (国立天文台), 黒田 仰生 (バーゼル大学), 固武 慶 (福岡大)

ポスト「京」重点課題(9)

「宇宙の基本法則と進化の解明」



筑波大学計算科学研究センター (代表機関)
高エネルギー加速器研究機構
自然科学研究機構国立天文台
京都大学基礎物理学研究所

理化学研究所仁科加速器研究センター
東京大学原子核科学研究センター
大阪大学核物理研究センター
千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター

拠点長：青木愼也（筑波大）

運営委員会

事務局（マネジメント・広報など）

研究連絡会

研究担当責任者（副拠点長）

サブ課題A責任者

サブ課題A 究極の自然法則と宇宙開闢の解明

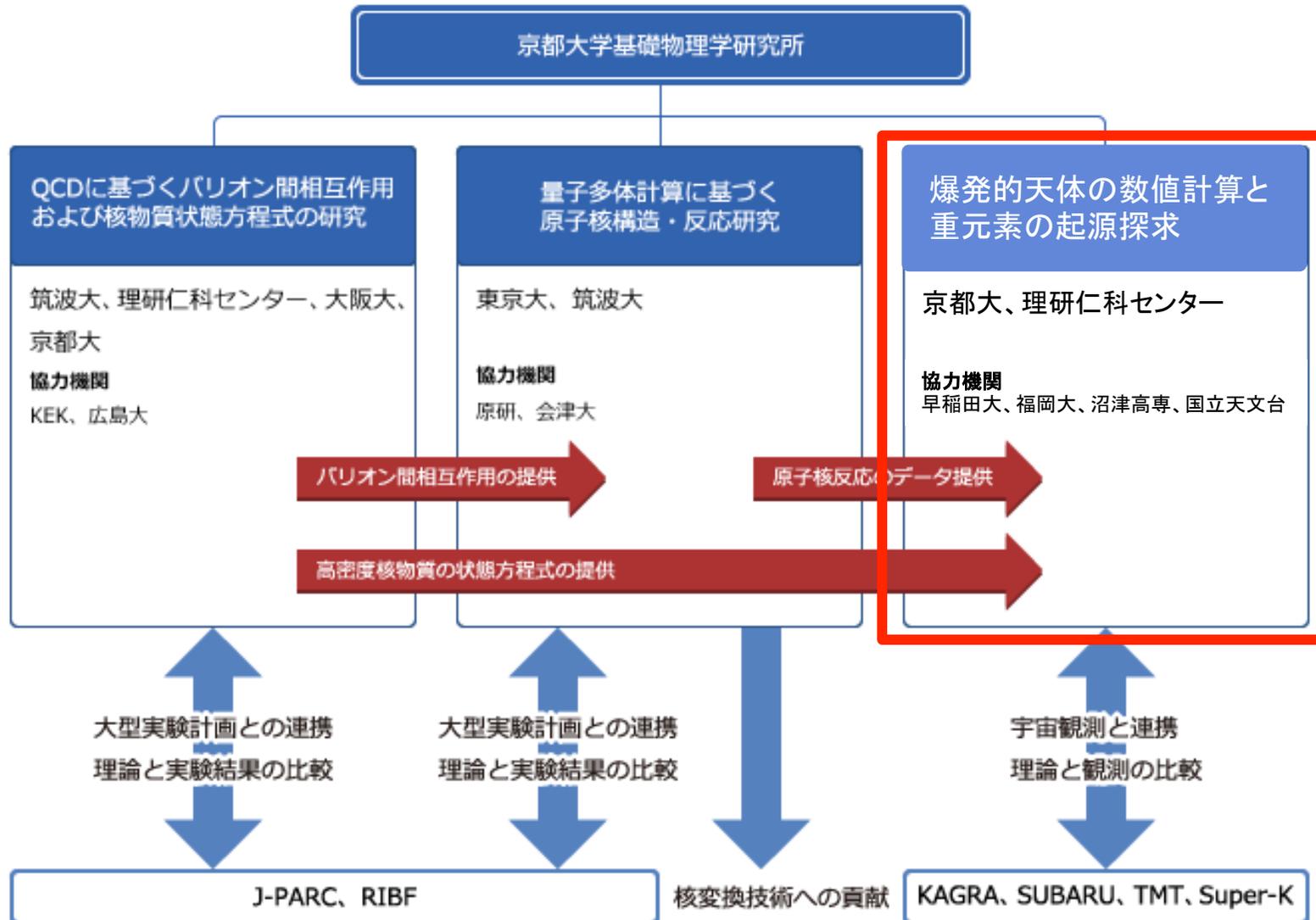
サブ課題B責任者

サブ課題B 物質創成史の解明と物質変換

サブ課題C責任者

サブ課題C 大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明

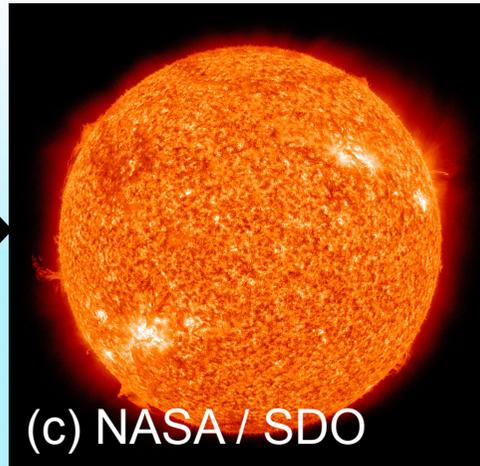
ポスト「京」重点課題(9) - サブ課題B 「物質創成史の解明と物質変換」



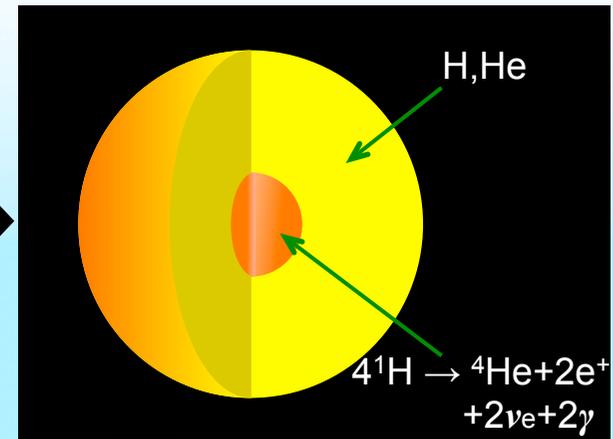
星の形成・進化・そして超新星へ



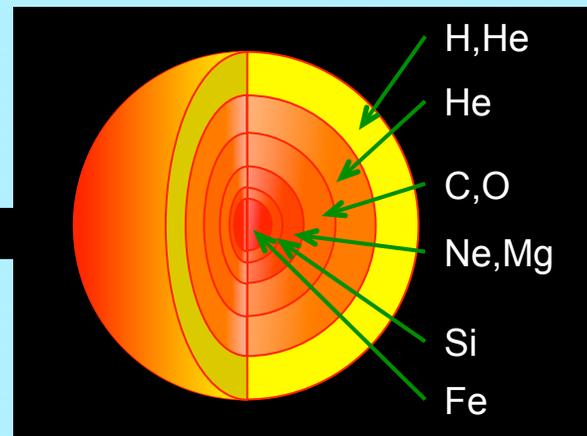
分子雲
(イータカリーナ星雲)



星の誕生
(太陽の遠紫外線画像)



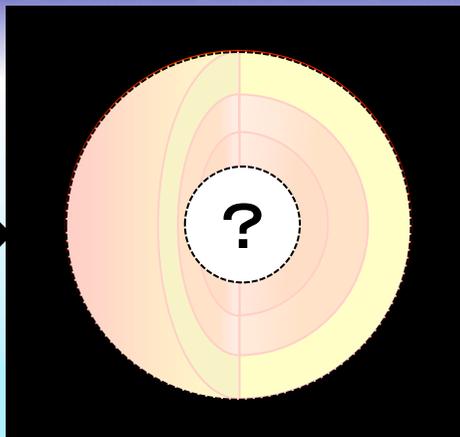
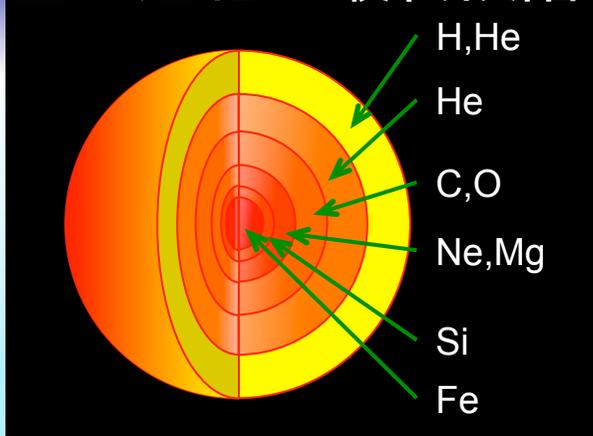
星の進化



白色矮星

超新星を創る

星の進化の最終段階



基礎方程式:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \Phi$$

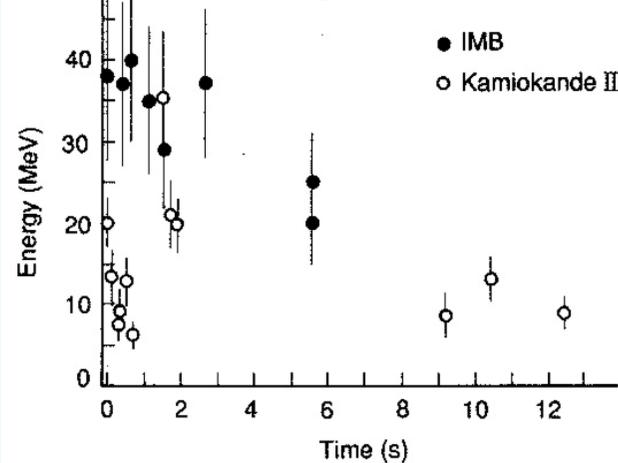
$$\frac{\partial e^*}{\partial t} + \nabla \cdot [(e^* + P)\mathbf{v}] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + Q_E$$

$$\frac{dY_e}{dt} = \Gamma_N$$

ニュートリノ(+核反応)による
エネルギーおよび電子数変化

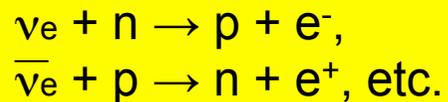
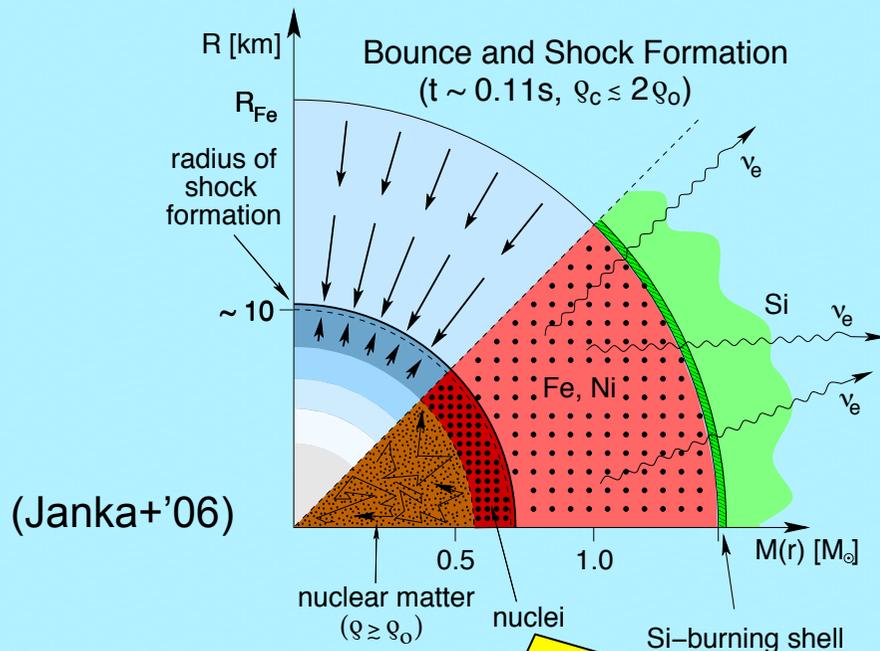
$$\Delta \Phi = 4\pi G\rho \quad + \text{EOS.}$$

SN 1987A からのニュートリノ

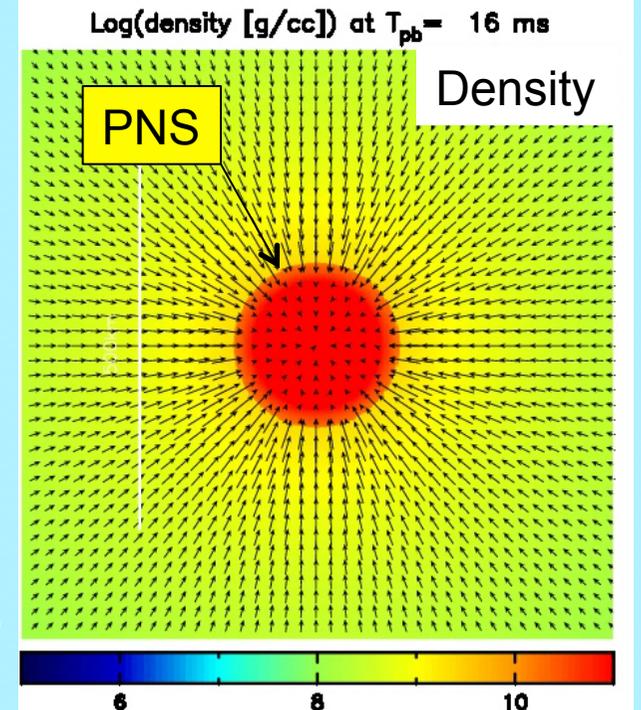
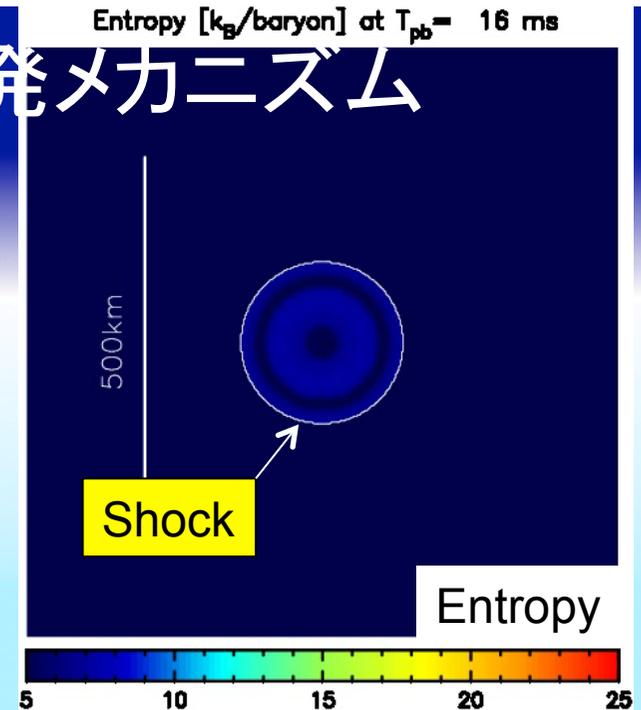


重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

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

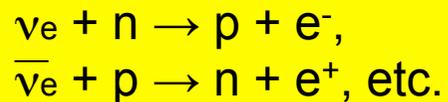
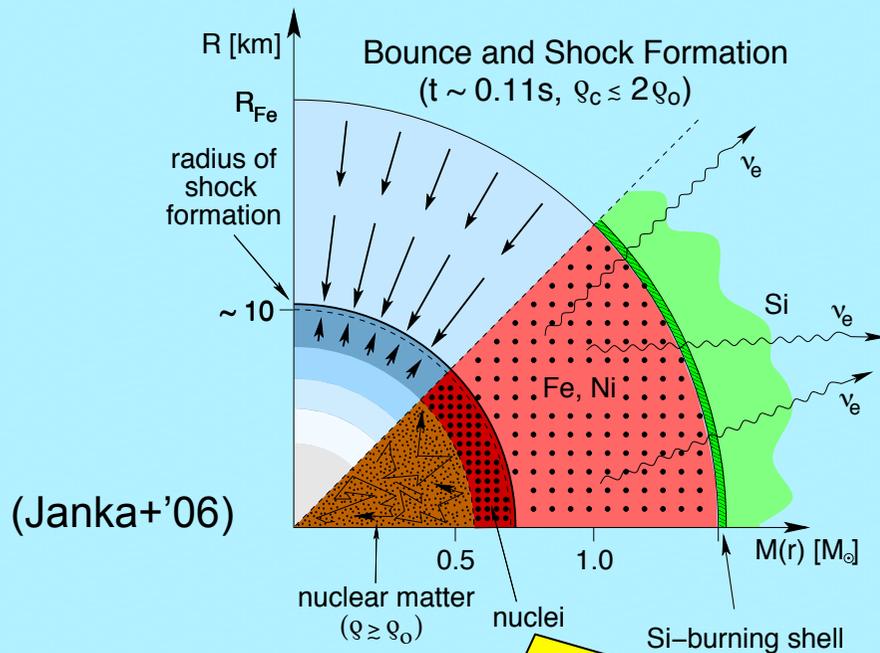


ex.)
 $M = 17 M_{\odot}$
 $Z = Z_{\odot}$



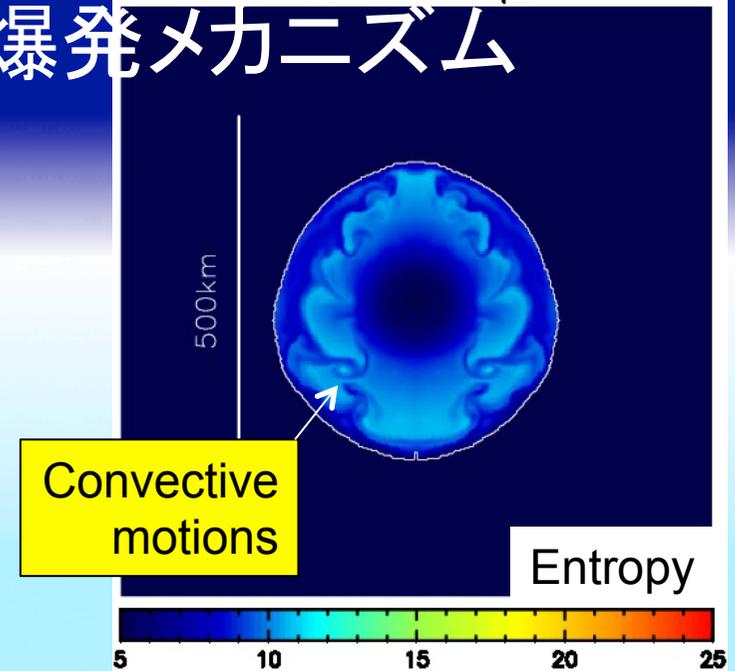
重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

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

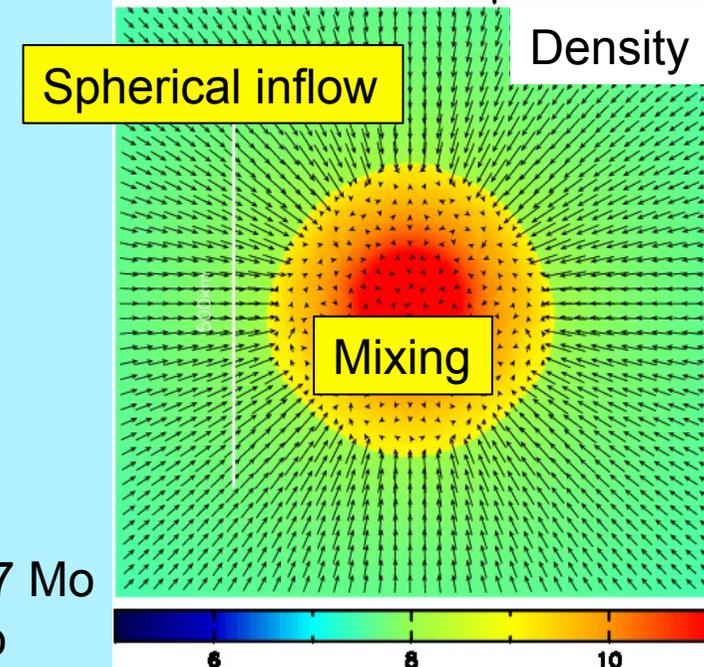


ex.)
 $M = 17 M_{\odot}$
 $Z = Z_{\odot}$

Entropy [k_B /baryon] at $T_{pb} = 100$ ms



Log(density [g/cc]) at $T_{pb} = 100$ ms



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

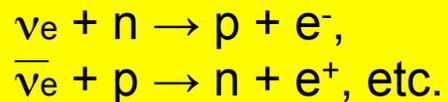
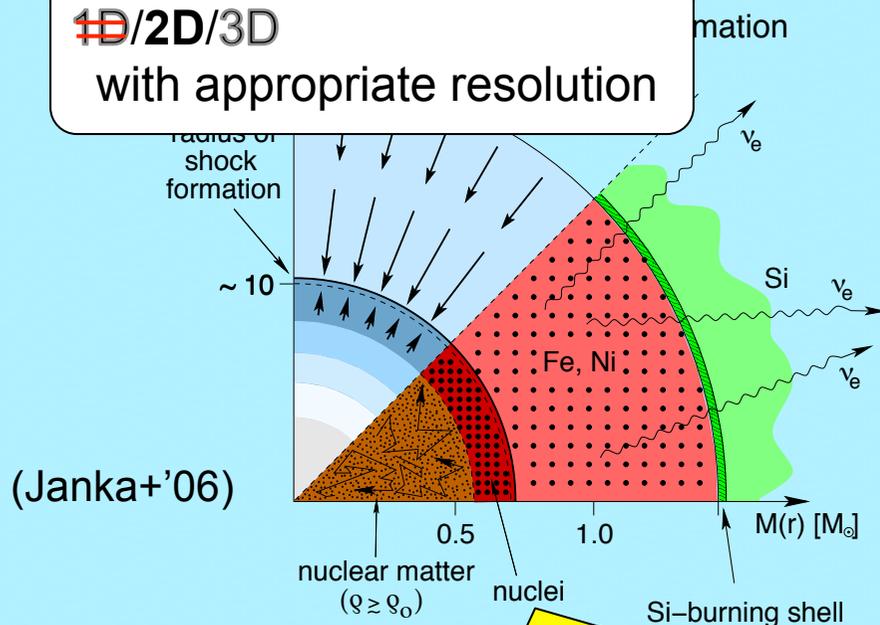
Energy distribution

to solve energy-dependent reactions

- Neutrino heating mechanism
- Convection, SASI

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

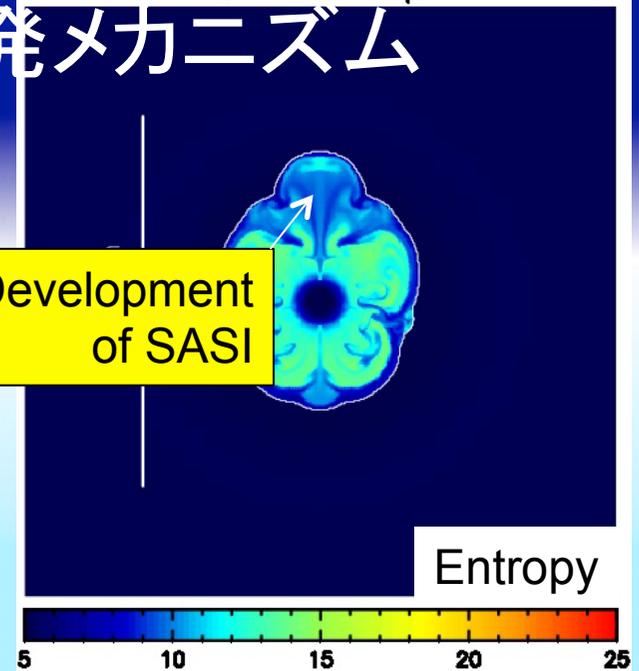
with appropriate resolution



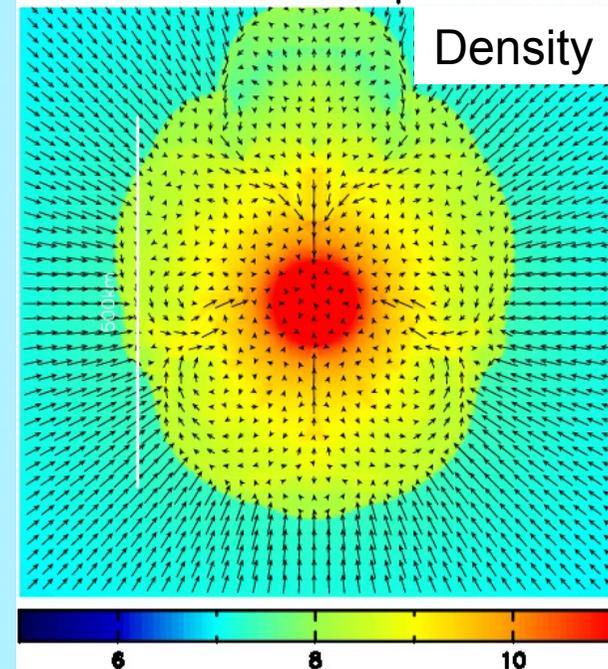
ex.)
M = 17 M_\odot
Z = Z_o

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

Development of SASI

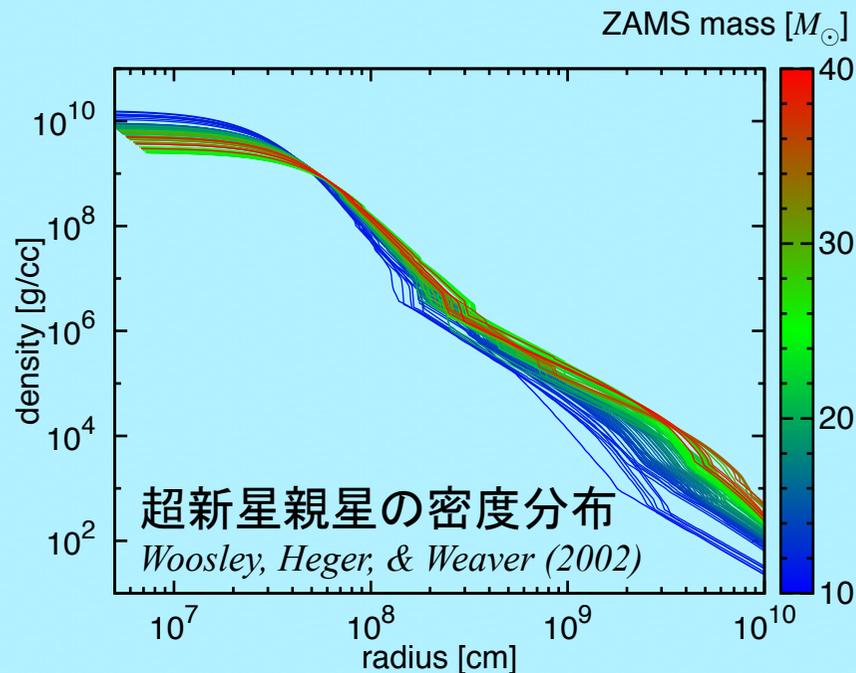
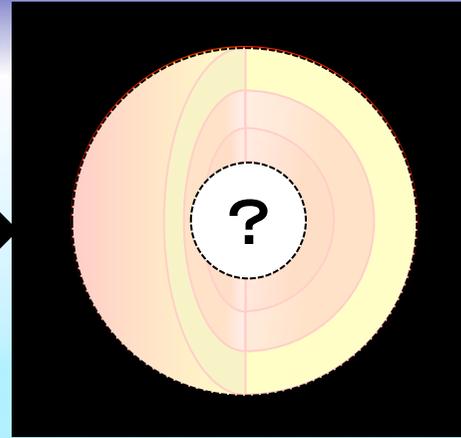
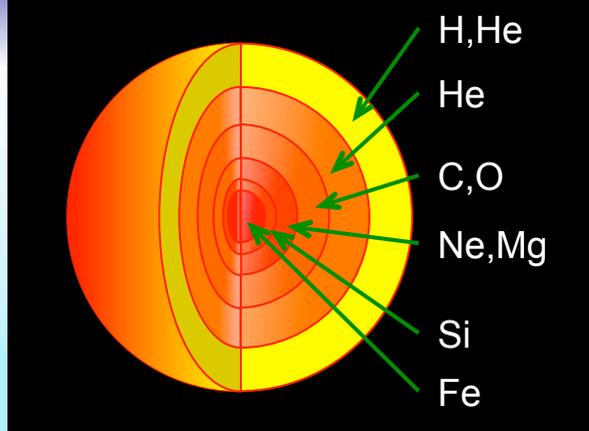


Log(density [g/cc]) at $T_{pb} = 185$ ms



超新星の親星構造依存性

星の進化の最終段階



超新星を特徴付ける量：
ニュートリノ光度、爆発エネルギー、
ニッケル生成量、PNS/BH質量、etc.

これらは初期条件(親星の構造)とどのような関係にあるか？

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

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

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+, in prep.

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

同じセットアップ (EoSは拡張) で広範囲・長時間計算.

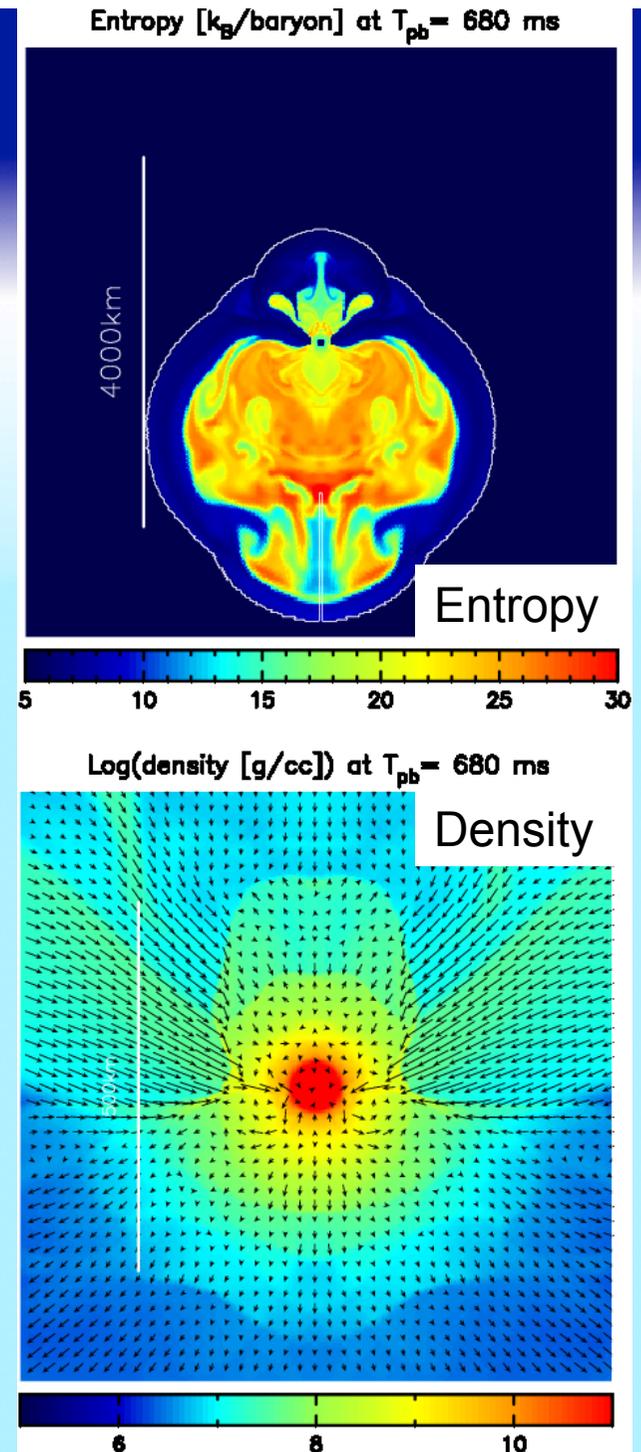
→ 最終的な爆発エネルギーは? ニッケル合成量は?

→ ポストプロセスで大規模核反応ネットワーク計算.

Systematic features of CCSNe

KN et al., PASJ (2015)

- 数値計算コード
 - 詳細は *KN+'15 PASJ, 67 (6) 107* 参照
 - 2D, $n(r)*n(\theta) = 384*128$
 $r = 0-5000$ km, $\theta = 0-\pi$
 - ニュートリノ輸送スキーム
 $\nu_e, \bar{\nu}_e$: IDSA spectral transport (Liebendoerfer+09)
 ν_x : leakage scheme
with 20 energy bins (< 300 MeV)
- 状態方程式
 - LS220 (Lattimer & Swesty '91)
- 核反応
 - 13α (He-Ni) ネットワーク
- 親星モデル
 - $M = 10.8-75$ Mo, $Z = 0-1 Z_{\odot}$, 回転・磁場なし
計 378 モデル (Woosley, Heger, & Weaver '02)
- 計算には国立天文台の共同利用計算機
Cray XC30を使用 (96 cores \times 2.5 days / model)



*All progenitors are from *Woosley, Heger & Weaver (2002)*

Solar-metallicity ($Z=Z_{\odot}$) models

s10.8 - 40.0 (#100)

Metal-poor ($Z=10^{-4}Z_{\odot}$) models

u11.0 - 22.8 / u23.0 - 46.8 / u47.0 - 58.8
(#240)

Zero-metallicity ($Z=0$) models

z11.0 - 40.0 (#30)

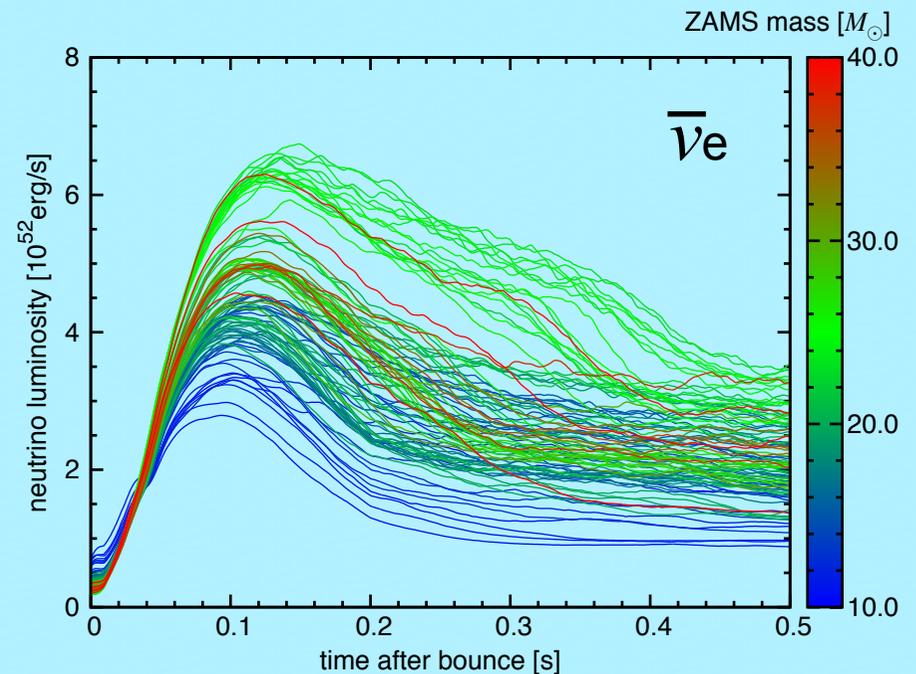
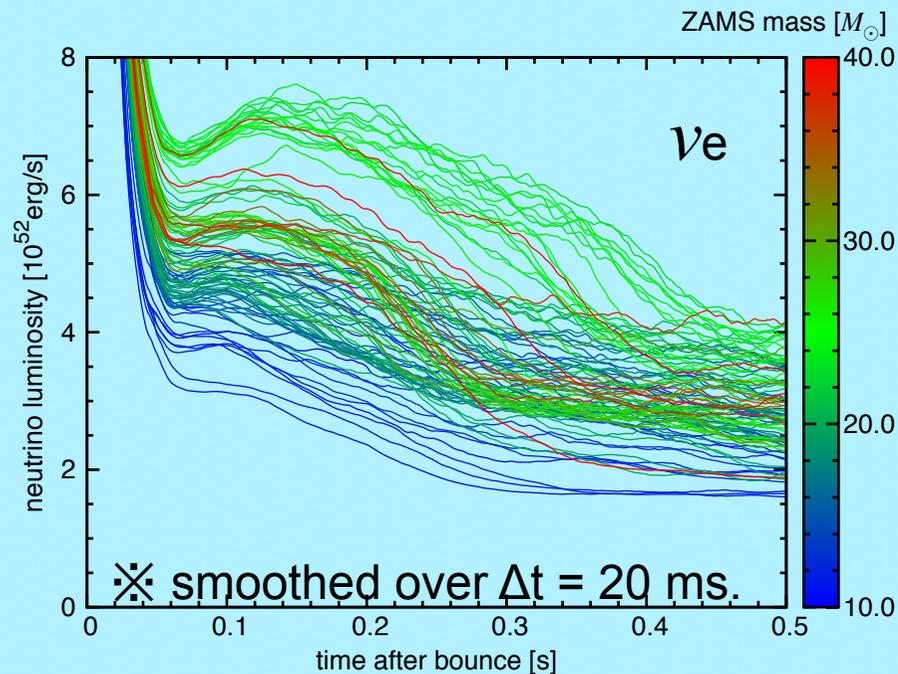
ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 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.



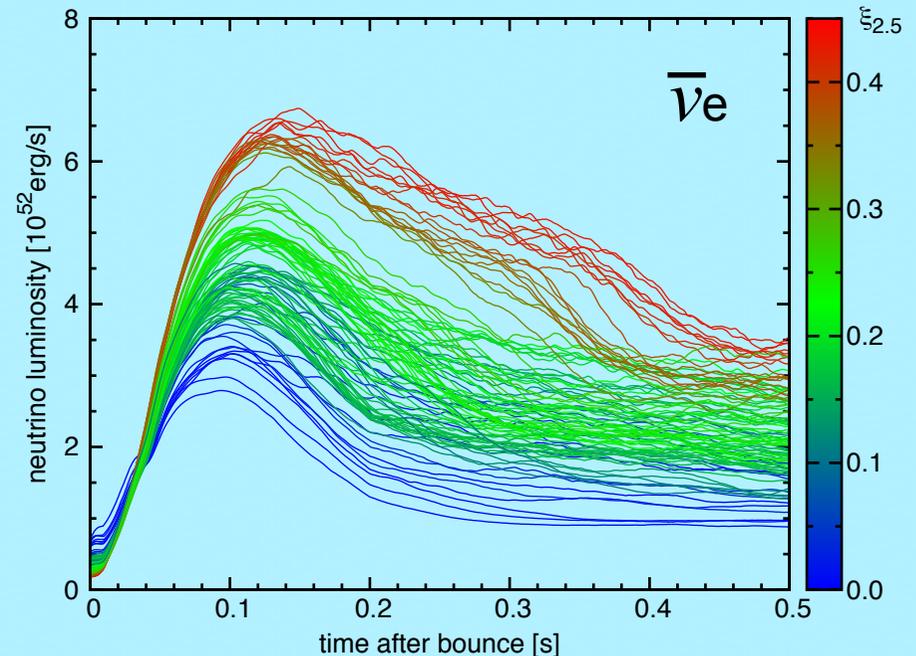
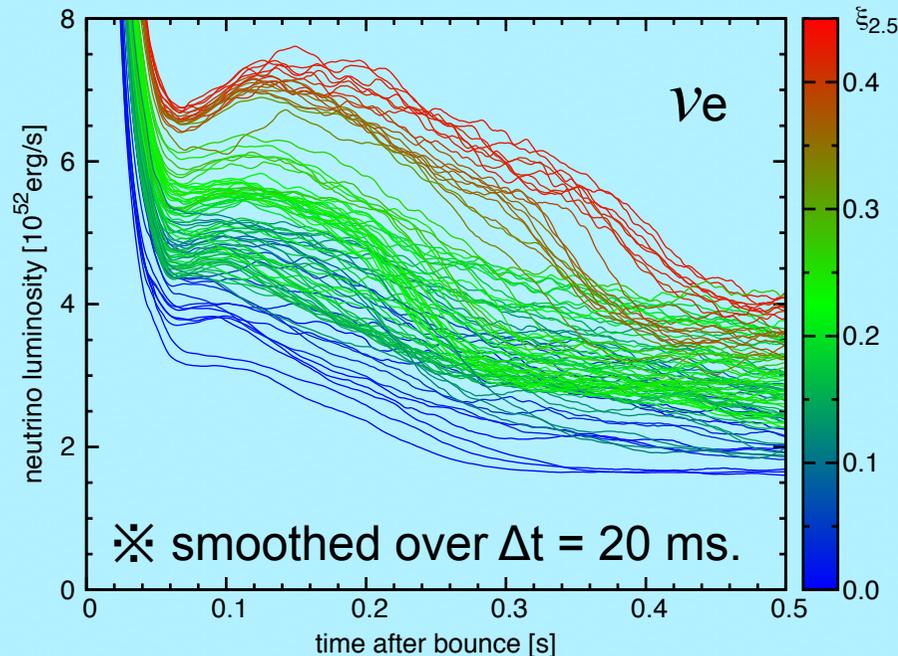
ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 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

- ✓ 全378モデルを定量的に比較するため、時刻を固定.
- ✓ 初期質量(ZAMS mass)はよい指標ではない.
- ✓ コンパクトネスパラメータに対して単調な傾向.
- ✓ その傾向は金属量に依らない.

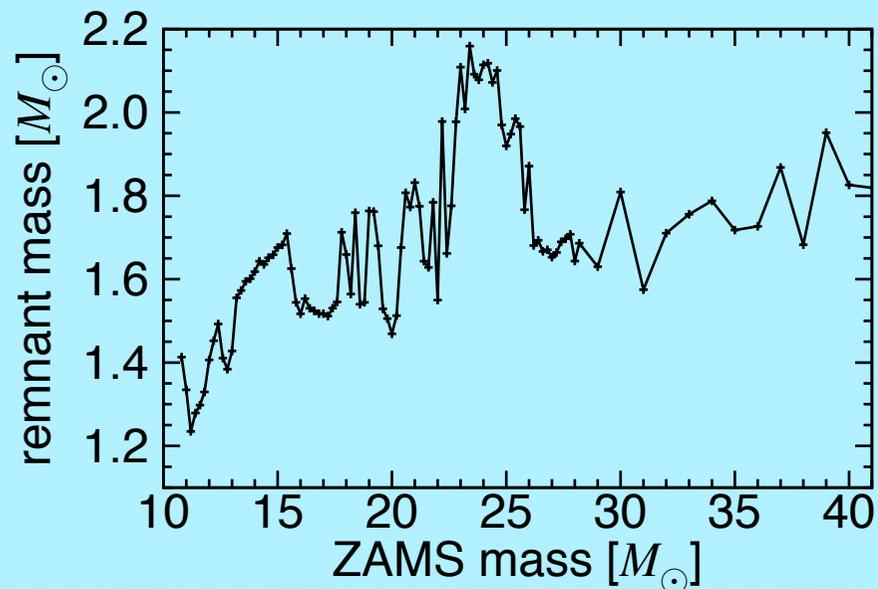
コンパクトネスパラメータ
(*O'Connor & Ott 2011*)

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

各親星の構造に対応.

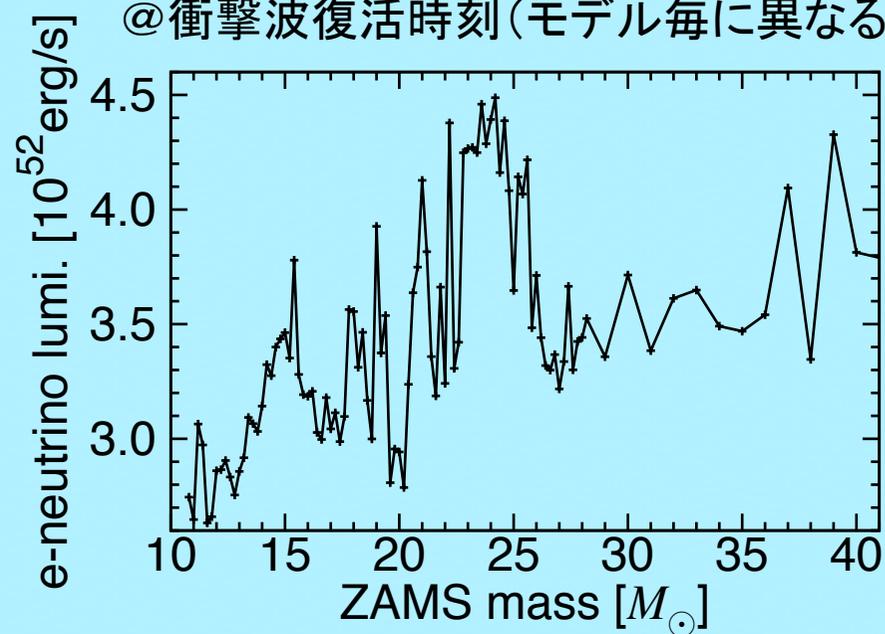
原始中性子星の質量

@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)



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)



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

- ✓ 全378モデルを定量的に比較するため、時刻を固定.
- ✓ 初期質量(ZAMS mass)はよい指標ではない.
- ✓ コンパクトネスパラメータに対して単調な傾向.
- ✓ その傾向は金属量に依らない.

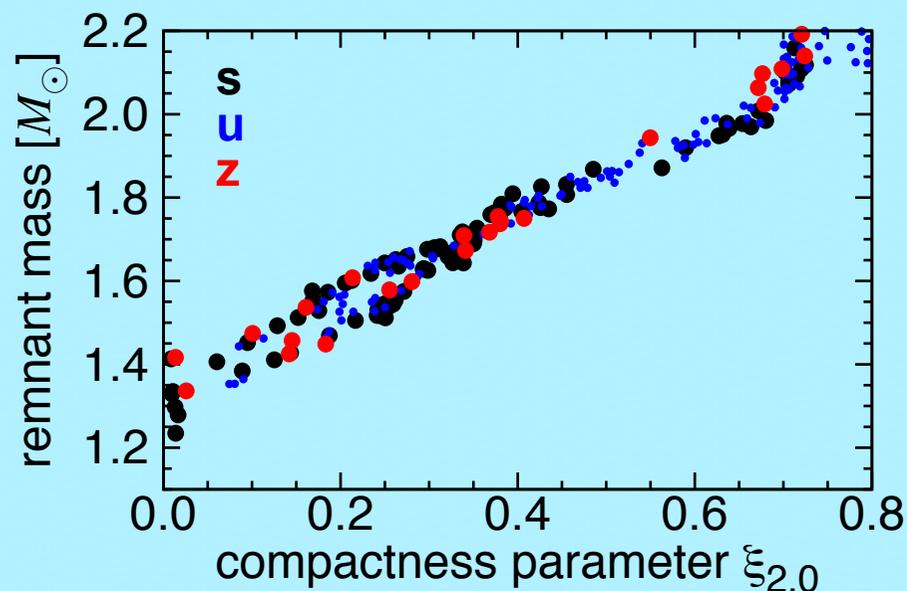
コンパクトネスパラメータ
(*O'Connor & Ott 2011*)

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

各親星の構造に対応.

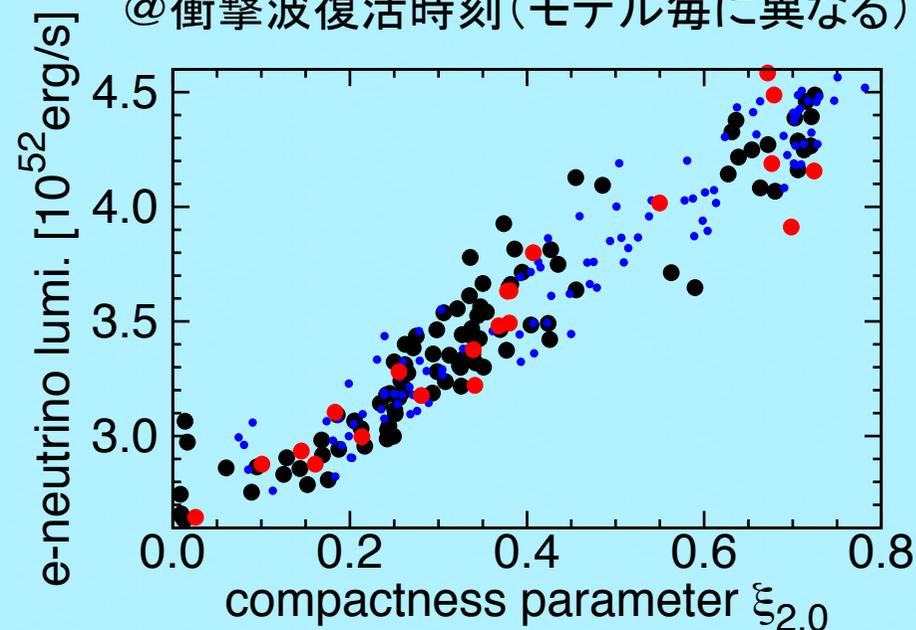
原始中性子星の質量

@計算の最終時刻(モデル毎に異なる)



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)



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.

超新星物理量とコンパクトネスの関係

What determines the CCSN properties is ...
mass accretion onto the central PNS!

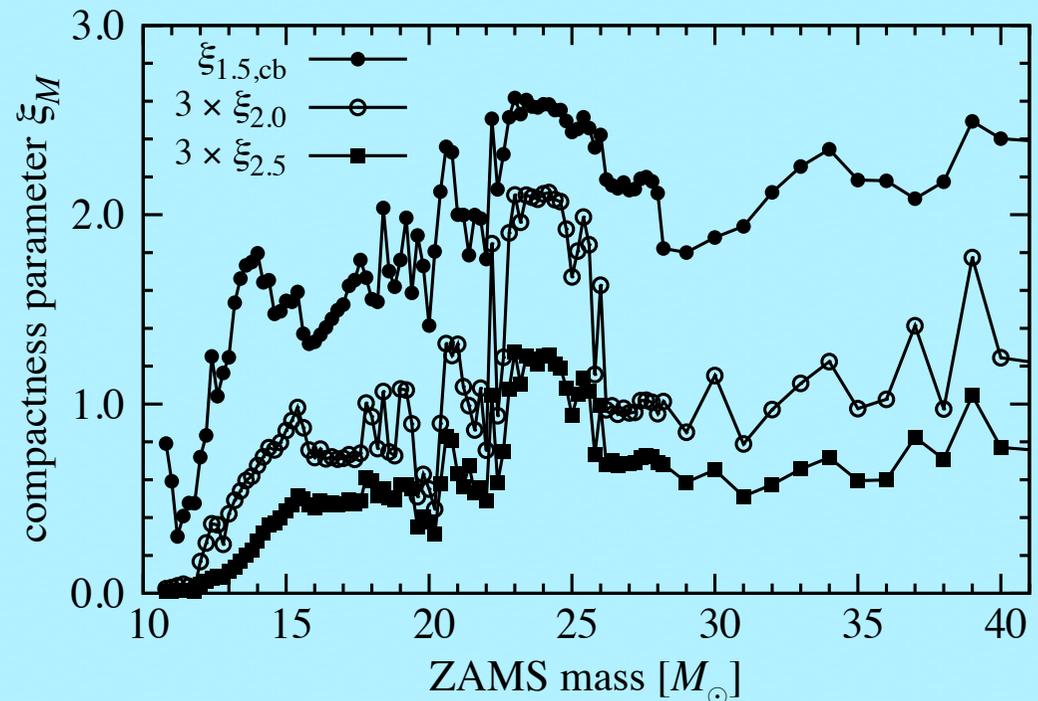
(*Not too much) Mass accretion ↗
→ PNS mass ↗
→ ν luminosity ↗
→ Explosion energy ↗
→ ^{56}Ni mass ↗

*Too much accretion leads to
BH formation and/or
failed explosion.

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.



超新星物理量とコンパクトネスの関係

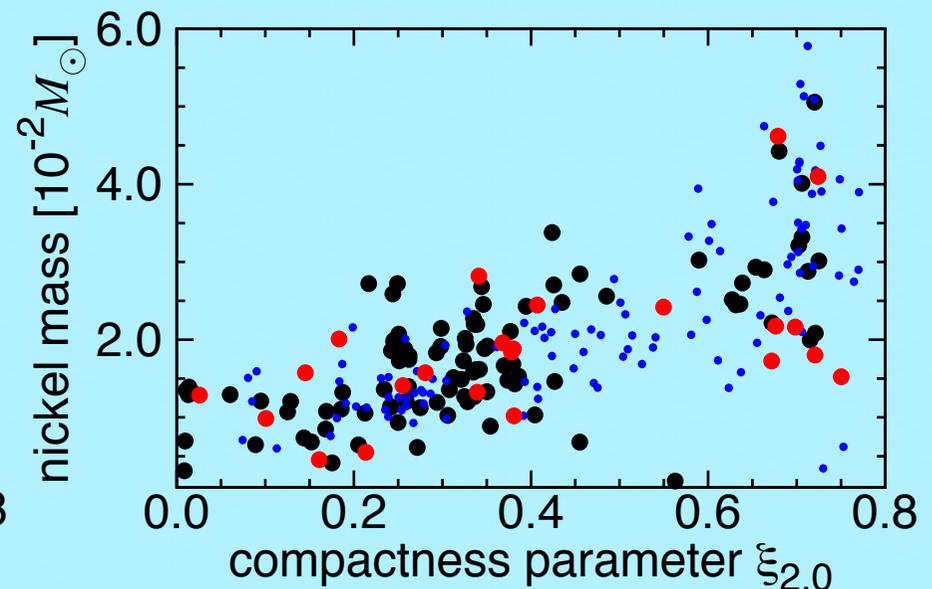
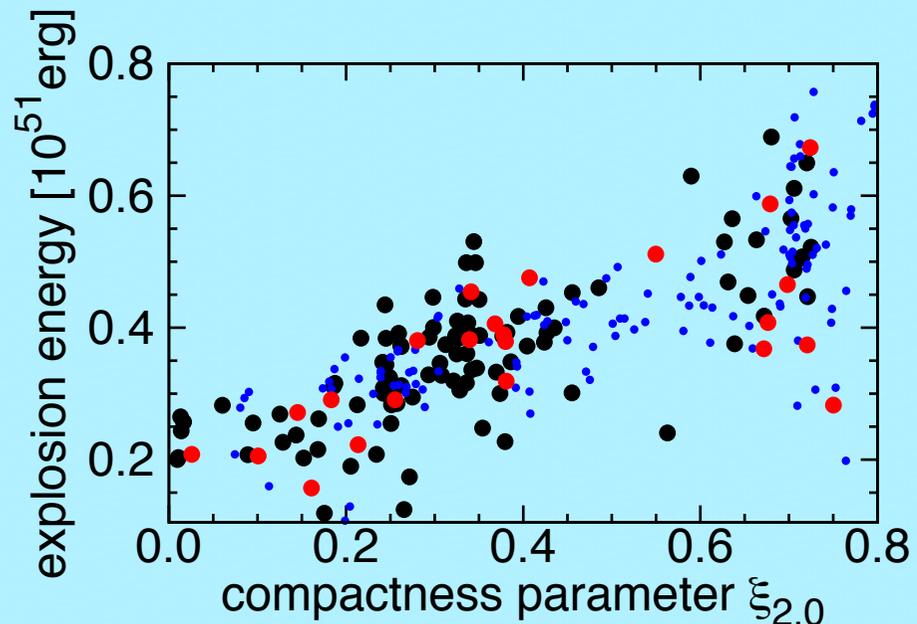
What determines the CCSN properties is ...
mass accretion onto the central PNS!

(*Not too much) Mass accretion ↗
→ PNS mass ↗
→ ν luminosity ↗
→ Explosion energy ↗
→ ^{56}Ni mass ↗

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.



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

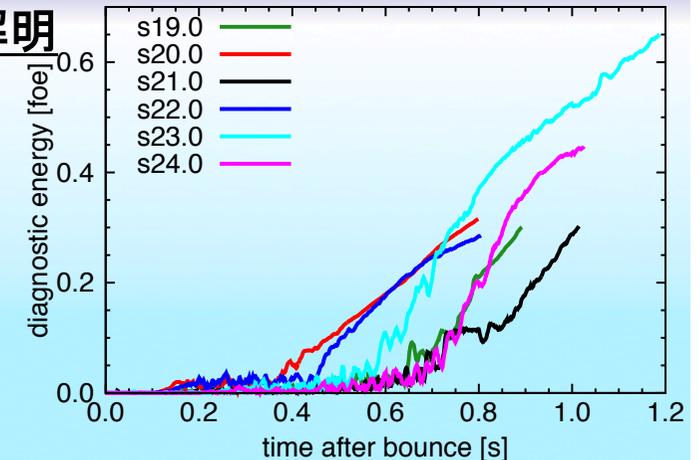
➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

KN+'15 PASJ, 67 (6) 107

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

爆発の特徴的な量 (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。



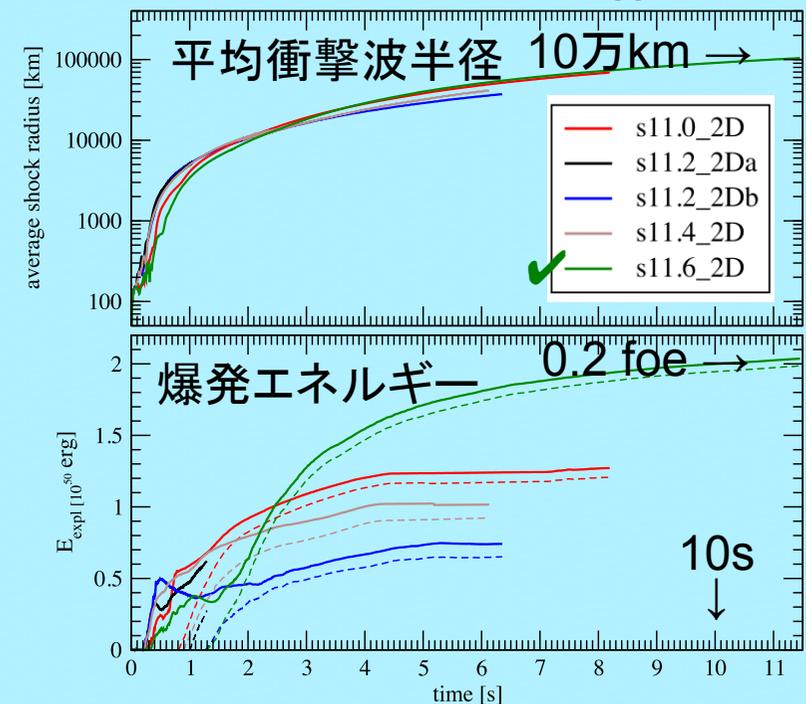
➤ B. Mueller '15

$R < 100,000 \text{ km}, t < 6-11 \text{ s}$

COCONUT (GR hydro.) - FMT (ν) コード

$M = 11.0 - 11.6 \text{ Mo}$

2D, $n(r) \cdot n(\theta) = 550 \cdot 128$



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

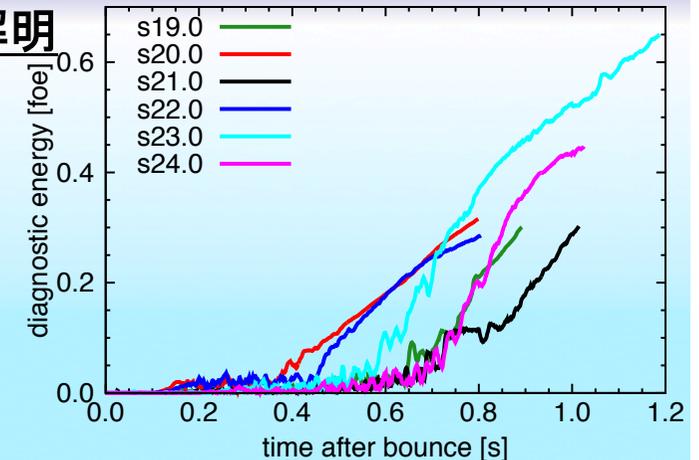
➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

KN+'15 PASJ, 67 (6) 107

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

爆発の特徴的な量(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

KN+, in prep.

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

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.

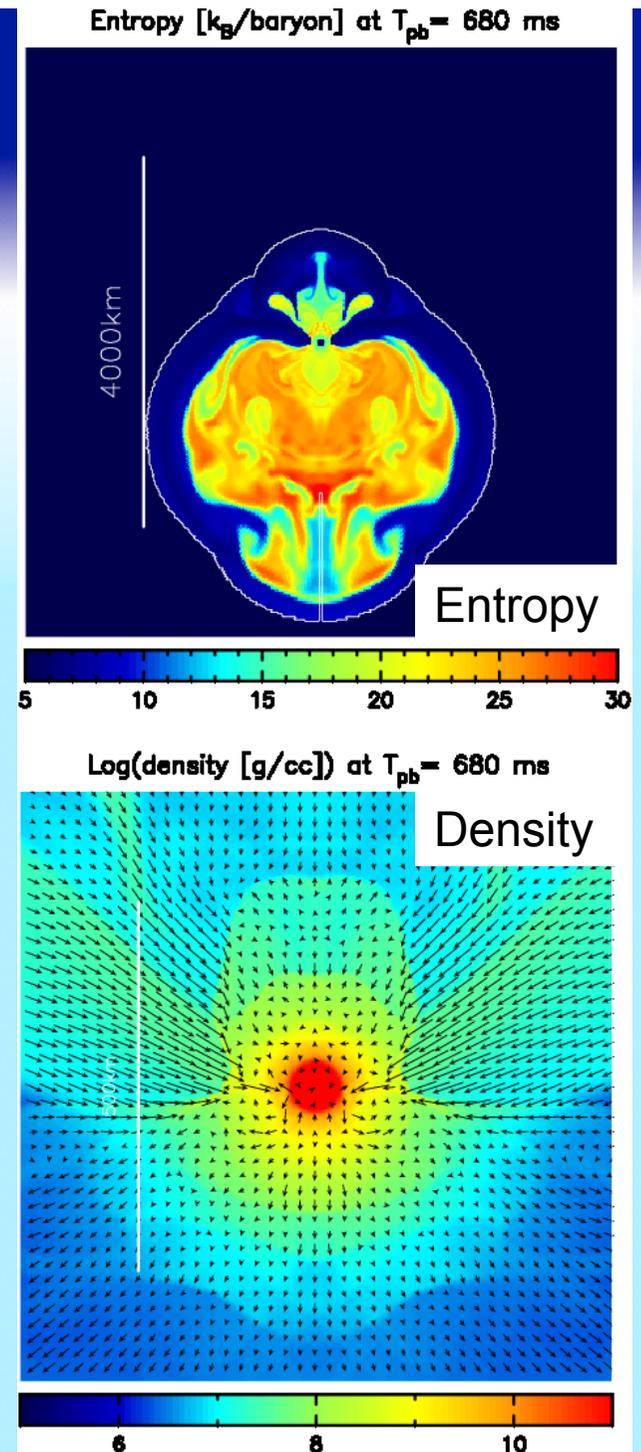
→ 最終的な爆発エネルギーは? ニッケル合成量は?

→ 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

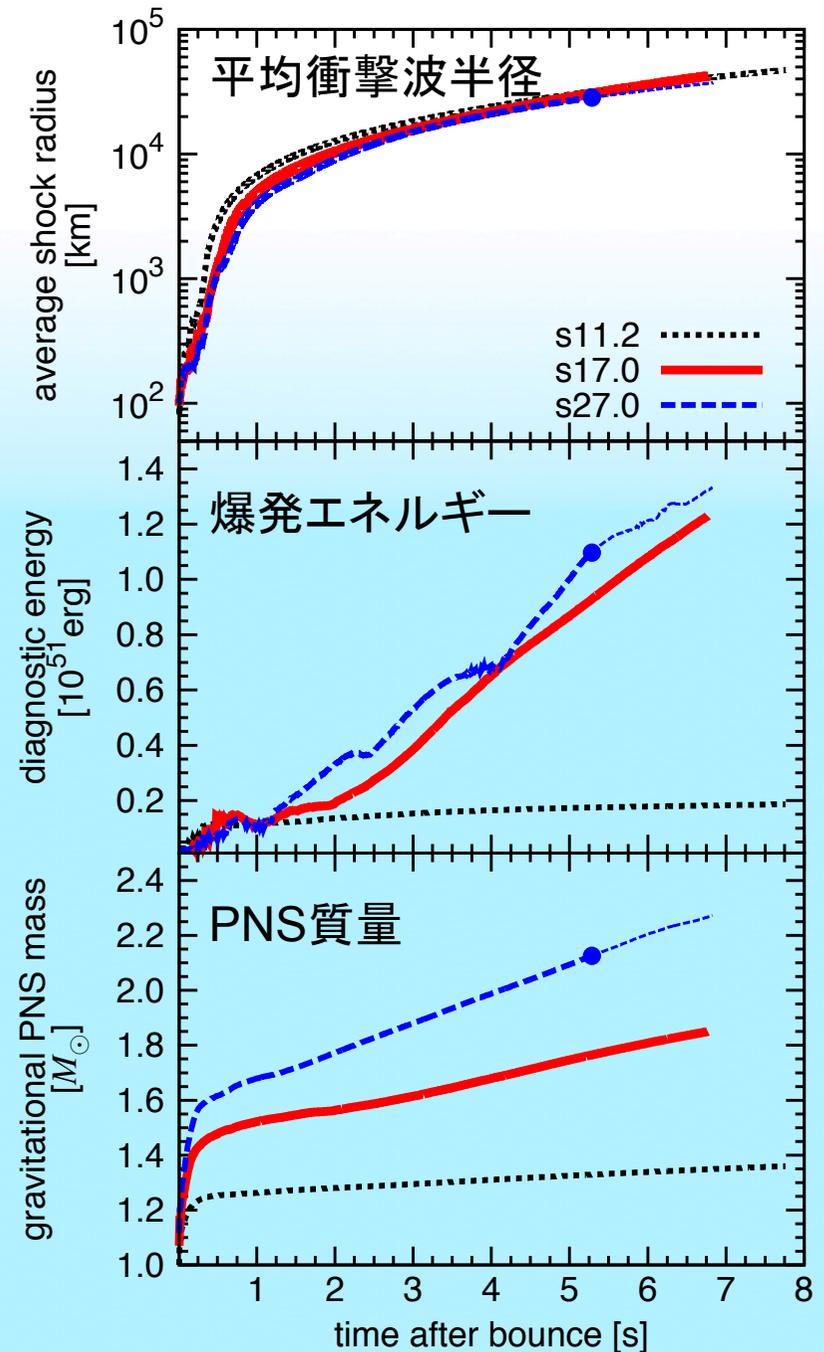
(KN *et al.*, *in prep.*)

- 数値計算コード
 - 基本的に378モデル計算と同じ
 - 2D, $n(r)*n(\theta) = 1008*128$
 $r=0$ -**100,000 km**, $\theta=0$ - π
 - ニュートリノ輸送スキーム
 $\nu_e, \bar{\nu}_e$: IDSA spectral transport (Liebendoerfer+09)
 ν_x : leakage scheme
with 20 energy bins (< 300 MeV)
- 状態方程式
 - LS220 (Lattimer & Swesty '91) + Si gas
- 核反応
 - 13α (He-Ni) ネットワーク
- 親星モデル
 - 11.2, 17, 27 Mo, 太陽金属量, 回転・磁場なし
(Woosley, Heger, & Weaver '02)
- 計算には国立天文台の共同利用計算機
Cray XC30を使用 (576 cores \times 20 days / model)



Long-term CCSN simulation (KN *et al.*, *in prep.*)

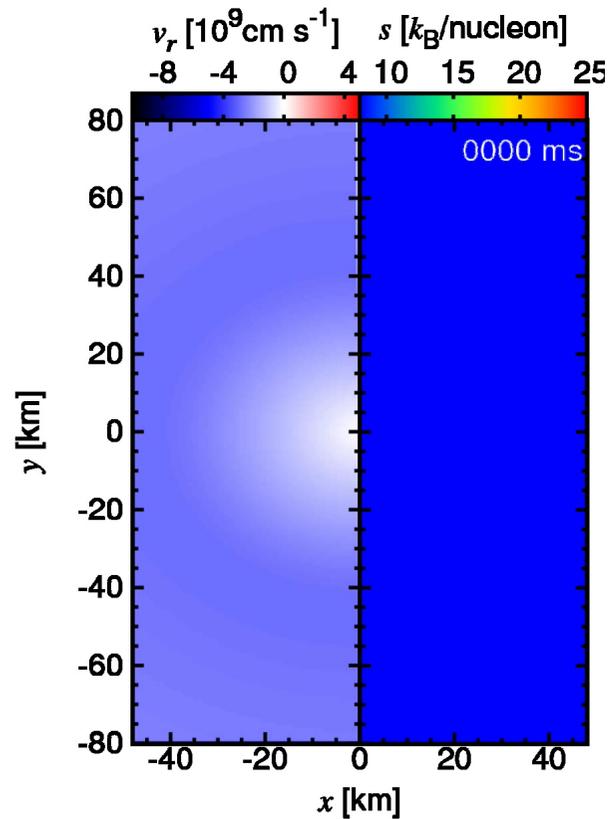
- ✓ 全てのモデルが爆発に転じた。
t = 7-8 秒で衝撃波が外境界@10万kmに。
(He層の底に対応)
- ✓ **s11.2モデル**
爆発エネルギー、PNS質量ほぼ収束
Eexp = 0.19 foe, M_{pns} = 1.36 Mo
- ✓ **s17.0モデル**
~7秒後でまだEexp, M_{pns}成長。
Eexp = 1.23 foe, M_{pns} = 1.85 Mo
- ✓ **s27.0モデル**
s17.0モデルと同様に成長。
5.29秒後に1D GR計算で予言される限界
質量 (M_{pns} = 2.13 Mo) に到達。
(O'Connor & Ott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



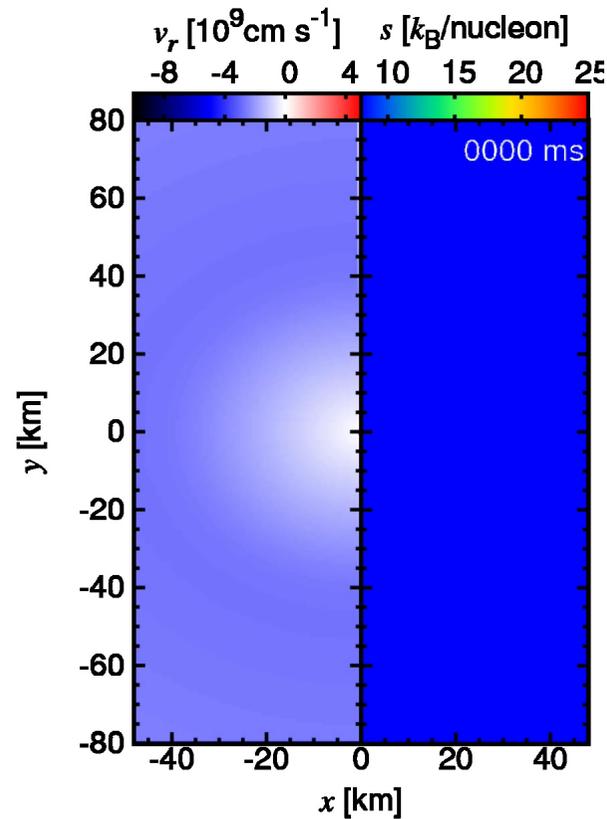
中心付近の降着流

- ✓ 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

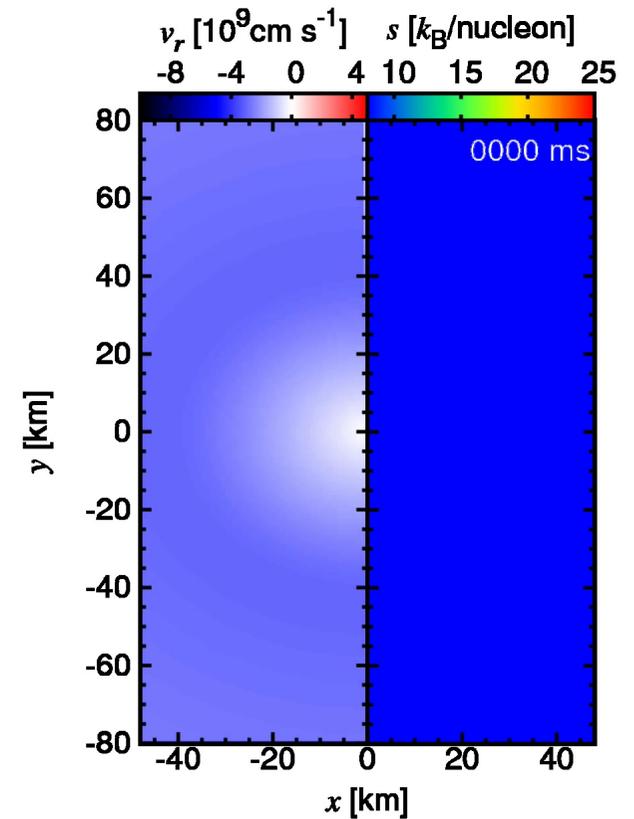
s11.2



s17.0



s27.0



ポスト京に向けて

京都大学基礎物理学研究所

➤ 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+, in prep.

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

空間2D → 3D

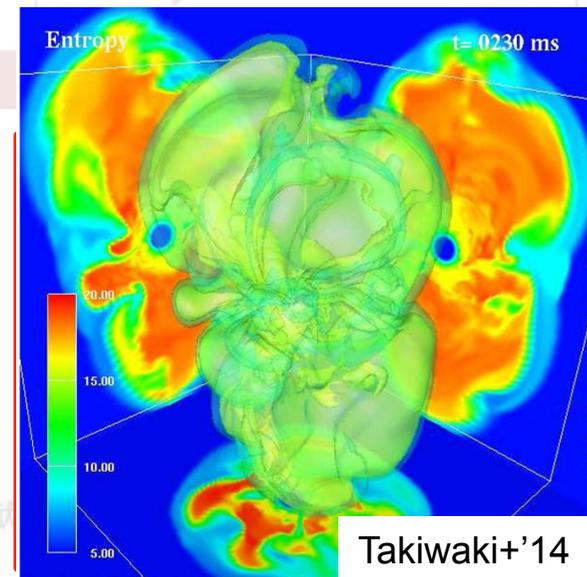
$\times n(\varphi) \times (\Delta t_{2D} / \Delta t_{3D})$

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

$\times 1.5 \times n(\varepsilon)$

➤ Step 4: マルチメッセンジャー天文学に向けて

KN+ arXiv:1602.03028

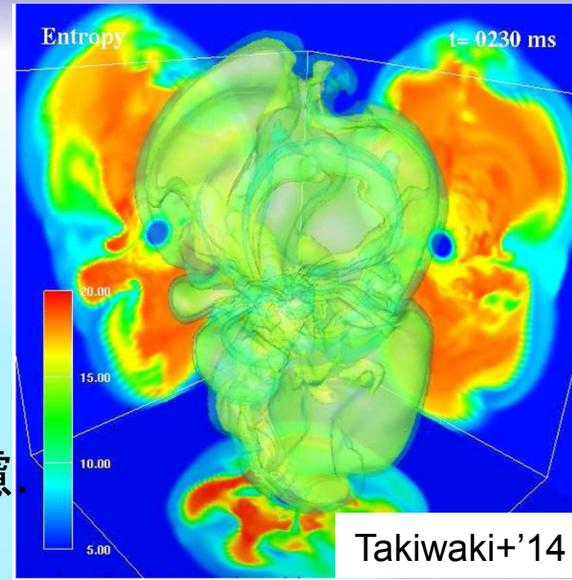


Multi-messenger signals from CCSNe

➤ Detailed simulations

$R < 5000 \text{ km}$, $t < 1 \text{ s}$
(狭い、短い)

空間2次元／3次元.
重力崩壊・PNS形成.
ニュートリノ輸送・相互作用を考慮.
計算コストが非常に高い.



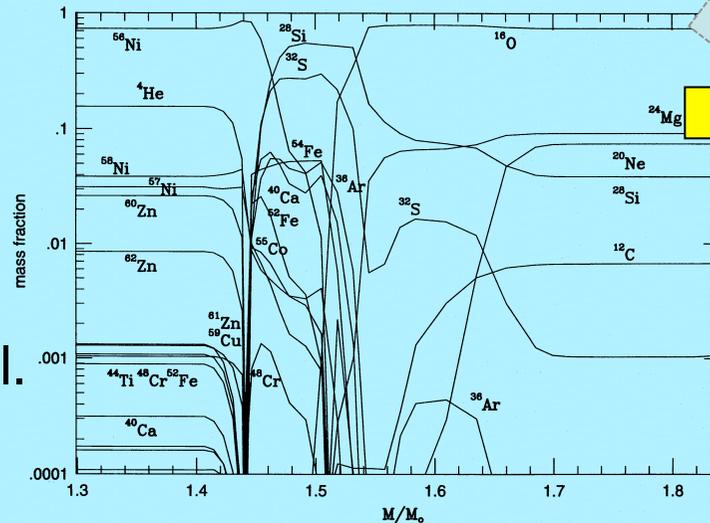
ν

GW

➤ Simplified models

$R > \sim 10^{13} \text{ cm}$, $t > \sim 10^4 \text{ s}$
(広い、長い)

空間1次元／2次元.
thermal bomb · piston model.
→ 元素合成計算

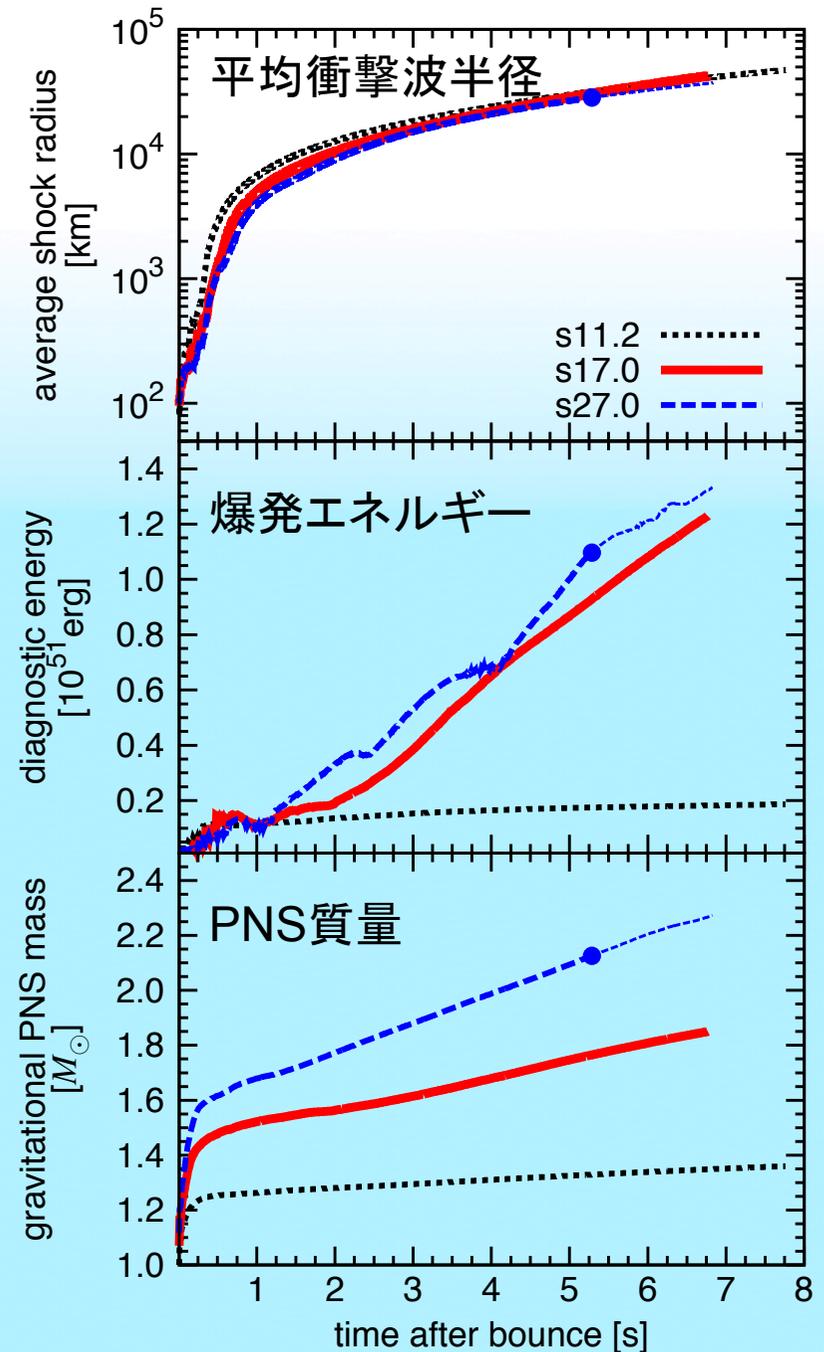


EM

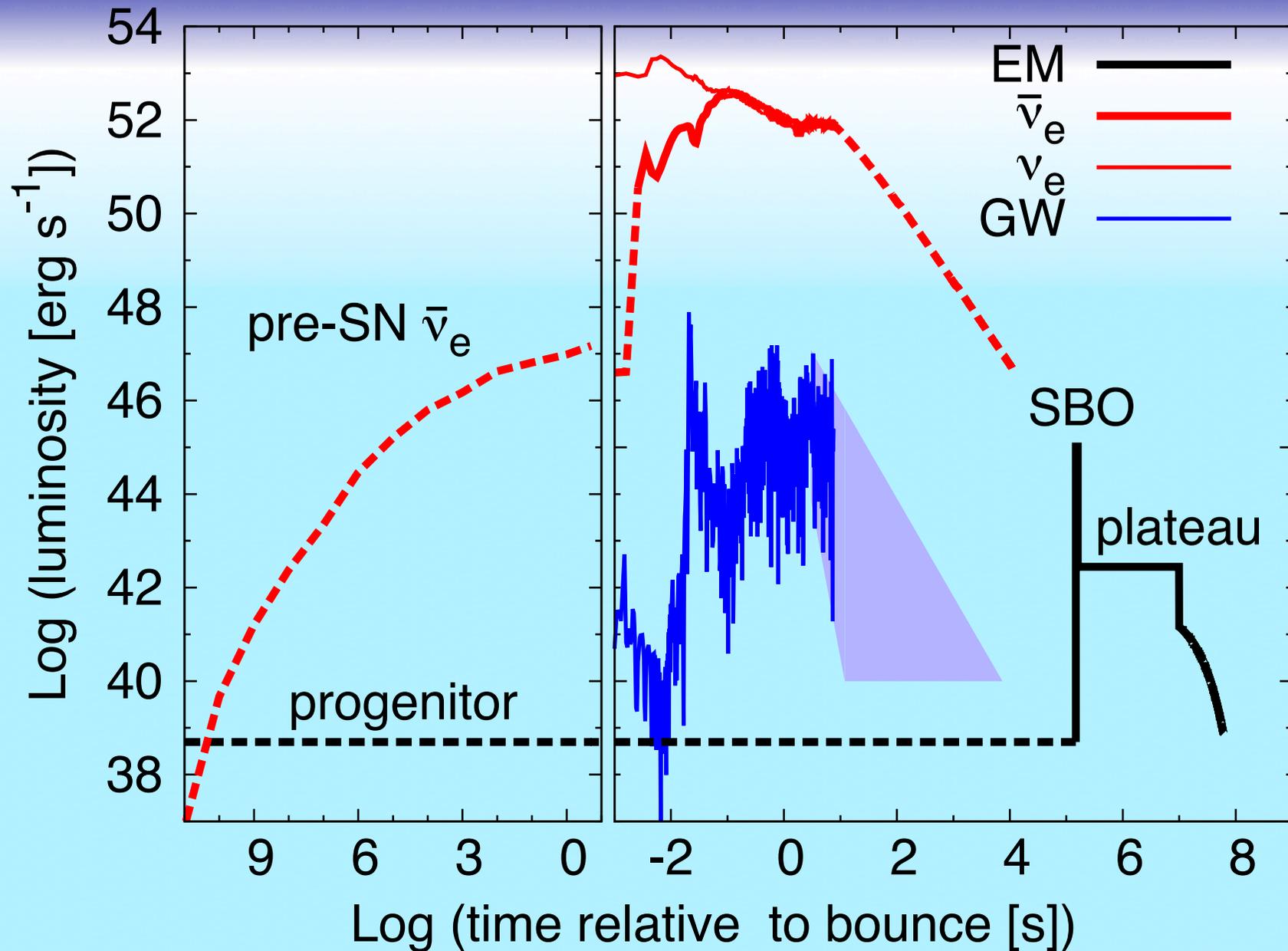
Thielemann+'96

Long-term CCSN simulation (KN et al., in prep.)

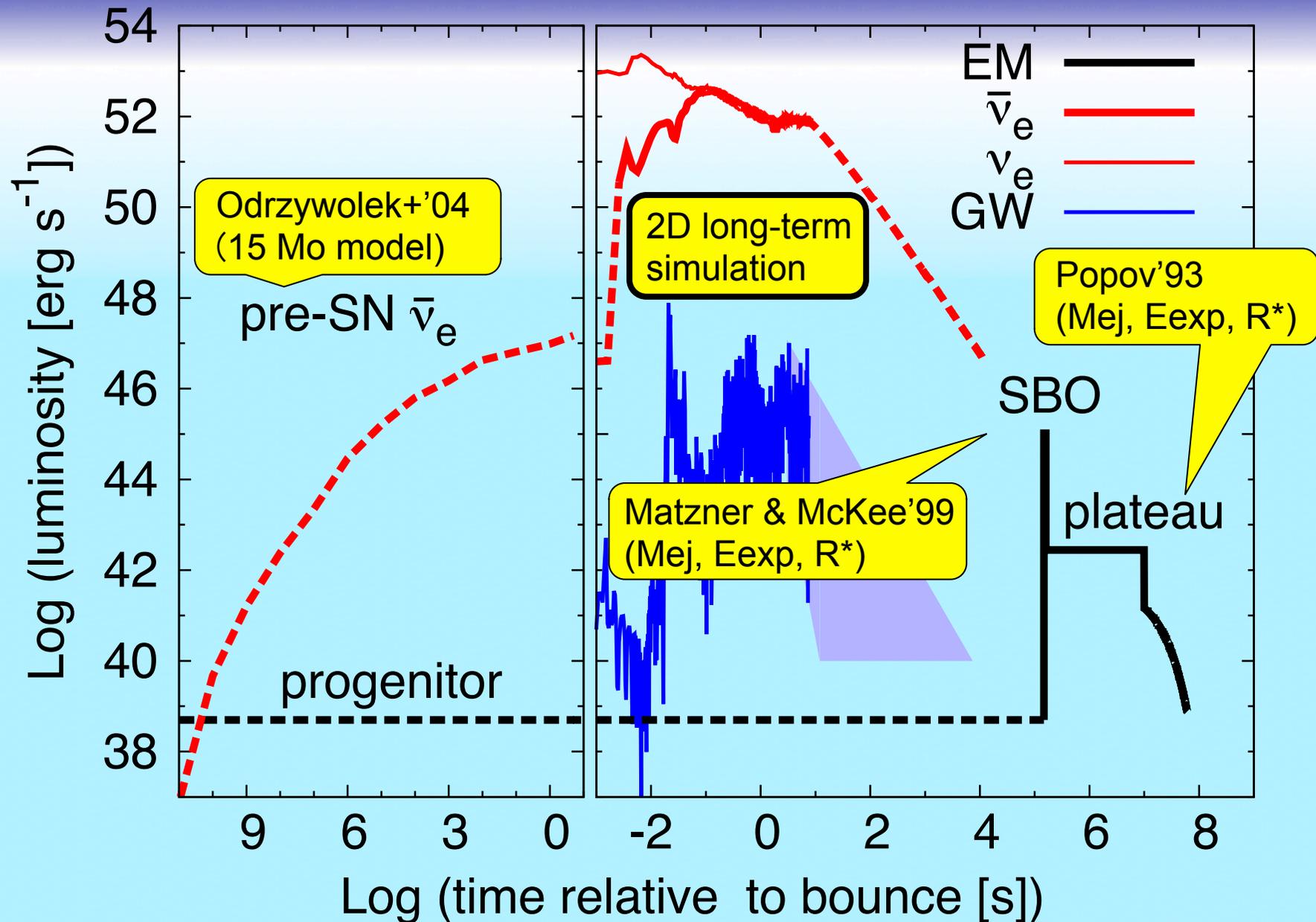
- ✓ 全てのモデルが爆発に転じた。
t = 7-8 秒で衝撃波が外境界@10万kmに。
(He層の底に対応)
- ✓ **s11.2モデル**
爆発エネルギー、PNS質量ほぼ収束
Eexp = 0.19 foe, M_{pns} = 1.36 Mo
- ✓ **s17.0モデル**
~7秒後でまだEexp, M_{pns}成長。
Eexp = 1.23 foe, M_{pns} = 1.85 Mo
- ✓ **s27.0モデル**
s17.0モデルと同様に成長。
5.29秒後に1D GR計算で予言される限界
質量 (M_{pns} = 2.13 Mo) に到達。
(O'Connor & Ott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



Multi-messenger signals from $17M_{\odot}$ CCSN



Multi-messenger signals from $17M_{\odot}$ CCSN



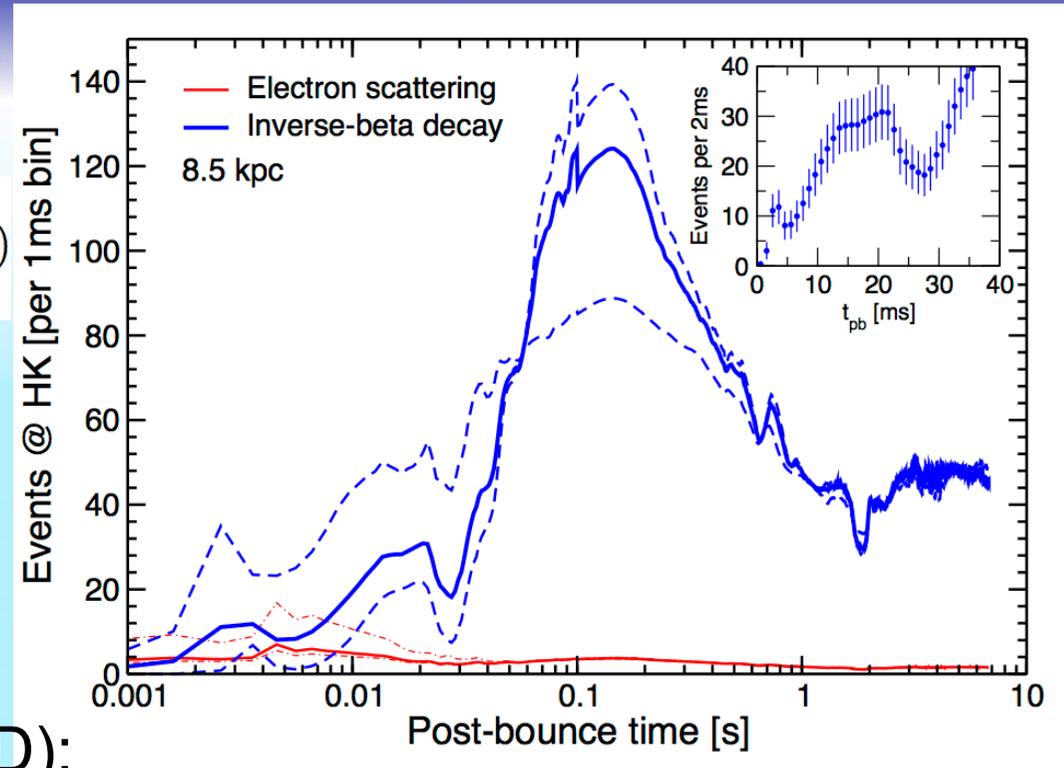
Galactic event @ 8.5 kpc - neutrino

✓ Observed event rate:

$$\frac{dN_e}{dT_e} = N_t \int_{E_{\min}}^{\infty} dE_\nu \frac{dF_\nu}{dE_\nu}(E_\nu) \frac{d\sigma}{dT_e}(E_\nu, T_e)$$

Number of targets

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu}(E_\nu) = \frac{L_\nu}{4\pi d^2 \langle E_\nu \rangle} f(E_\nu)$$



✓ Timing information (via IBD):

the bounce time within ± 3.0 ms

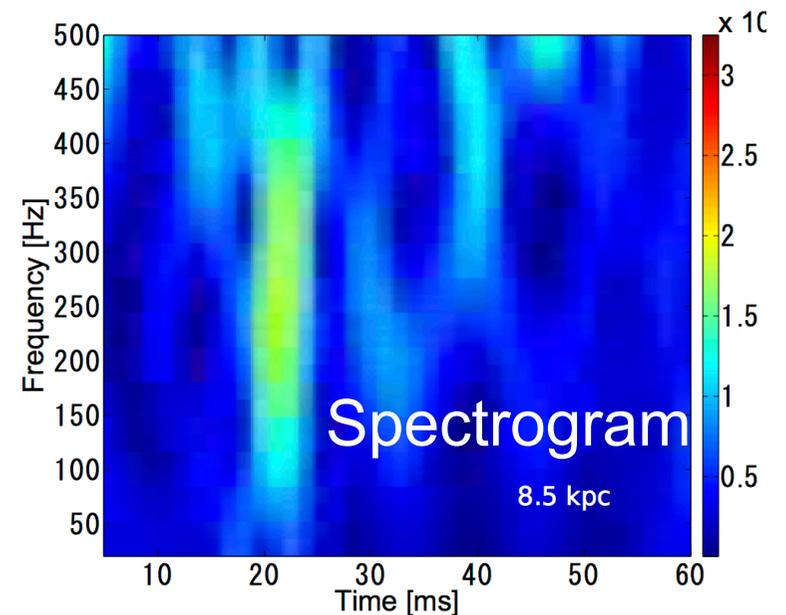
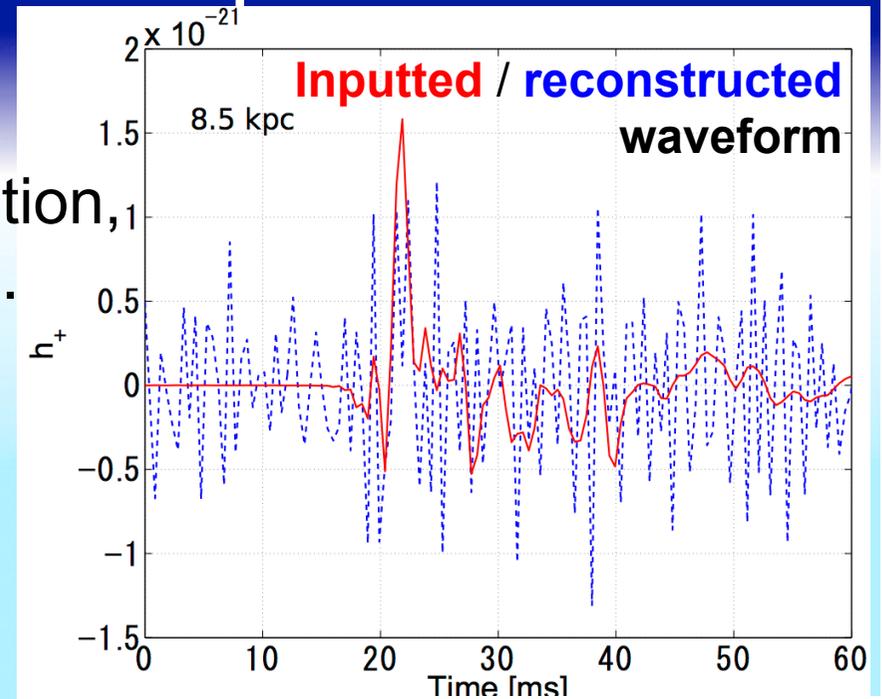
at 95% confidence level.

✓ Pointing information (via e^- scattering):

$\sim 6^\circ$ (SK), $\sim 3^\circ$ (Gd-SK), $\sim 0.6^\circ$ (Gd-HK), $\sim 0.3^\circ$ (DUNE)

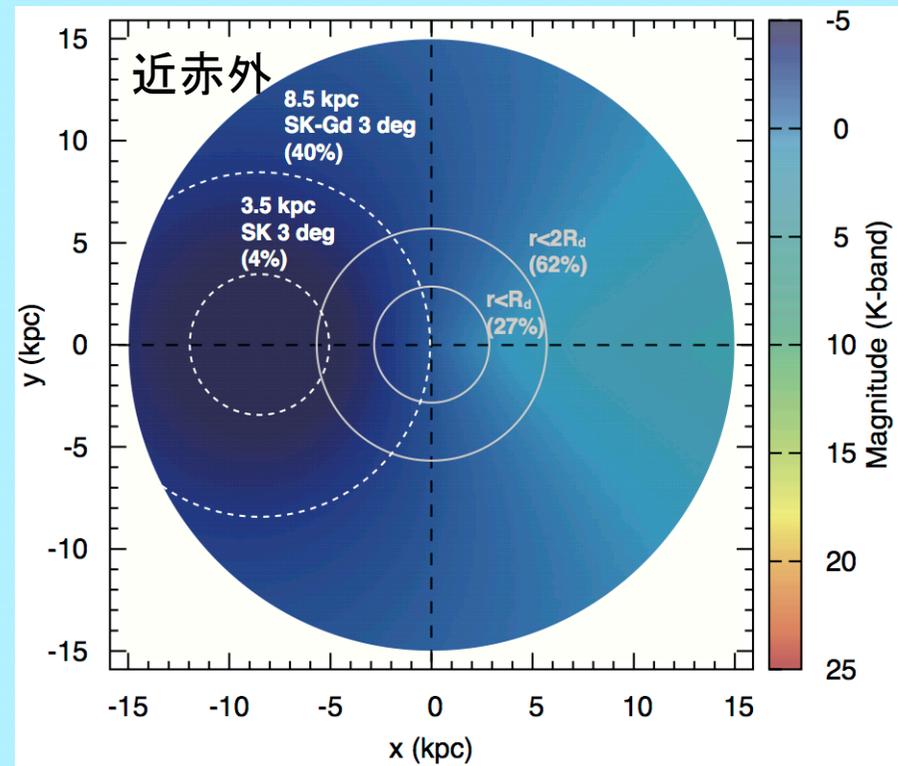
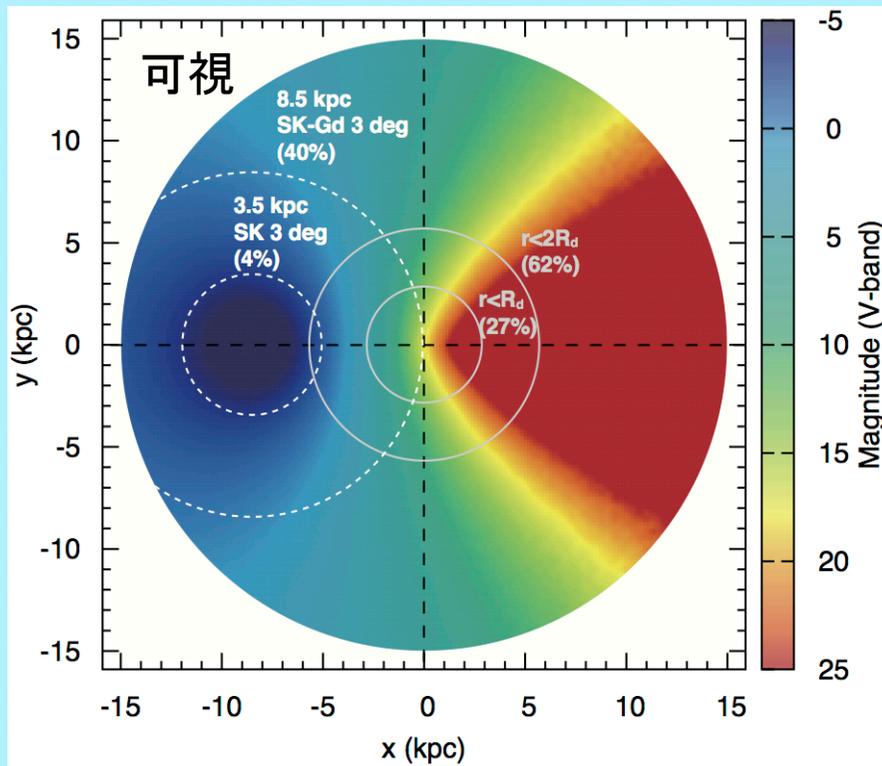
Galactic event @ 8.5 kpc - GW

- ✓ With the aid of the timing information,
 - small time window [0, 60] ms.
 - hard to see time-dependent waveform structure...
- ✓ Prompt convection
 - small frequency window [50, 500] Hz.
- ✓ The maximum S/N ratio ~ 7.5
 - **CCSN-GW is detectable even from GC!**
 - Core rotation (Yokozawa+'15)



Galactic event - EM

- ✓ Pointing information from neutrino detection
~ 6 deg. (SK) → ~28 sq. deg. → 20 images (Subaru/HSC)
- ✓ Integral time a to catch SBO ($\Delta t < \sim 1$ hr)
($a+0.5$)*20=30 → $a=1$ min. → **24-25 mag.**
- ✓ Time delay
 $R_* / v_{\text{shock}} \sim 1$ day (RSG), **a few min.!** (WR)



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 km, t < 1.5 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 km, t < 10 s

KN+, in prep.

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

空間2D → 3D

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

- Step 4: マルチメッセンジャー天文学に向けて

KN+ arXiv:1602.03028

ニュートリノ検出! → 位置・時刻情報

→ 重力波検出!

→ 光学望遠鏡観測!

