

# 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

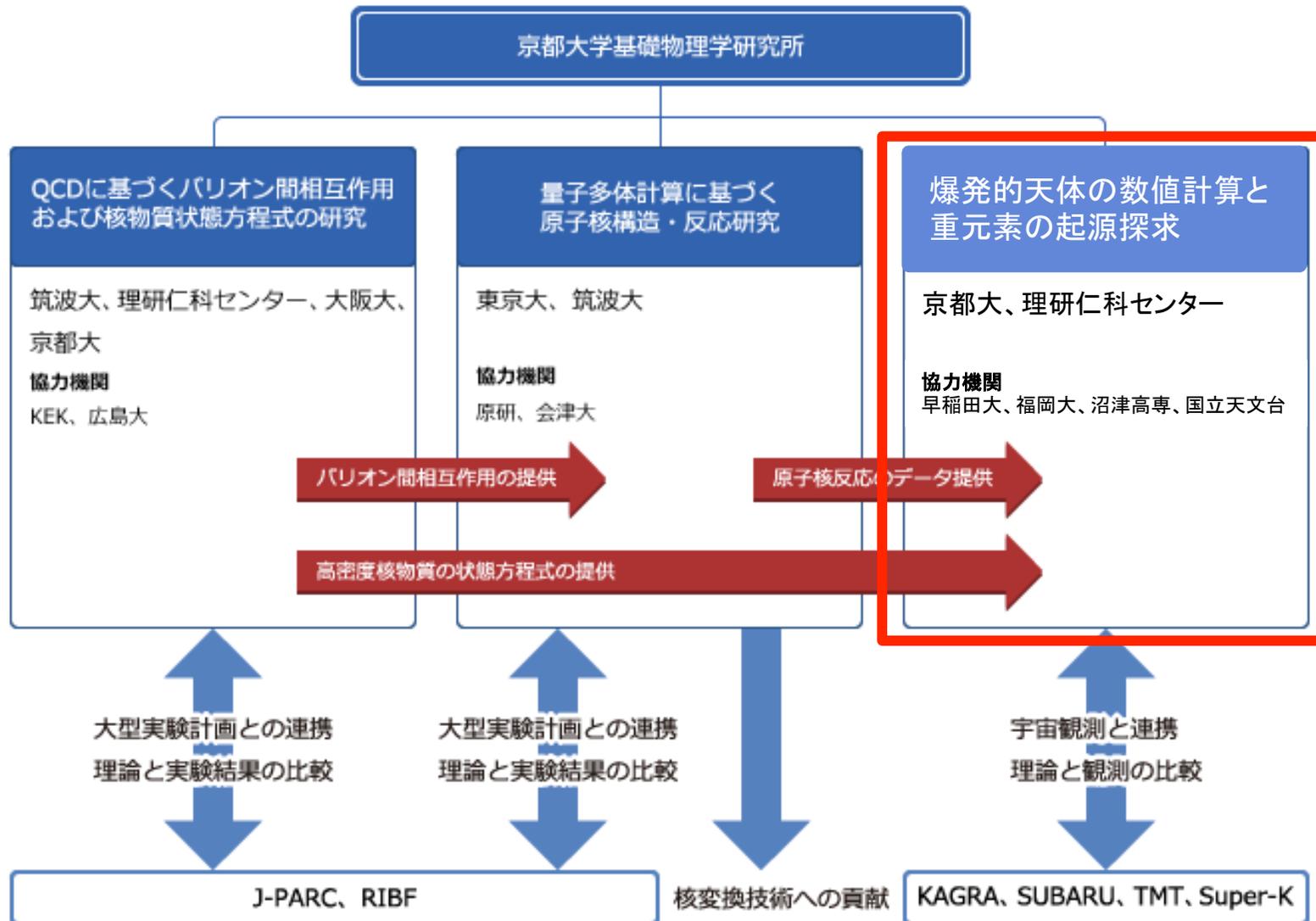
サブ課題B責任者

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

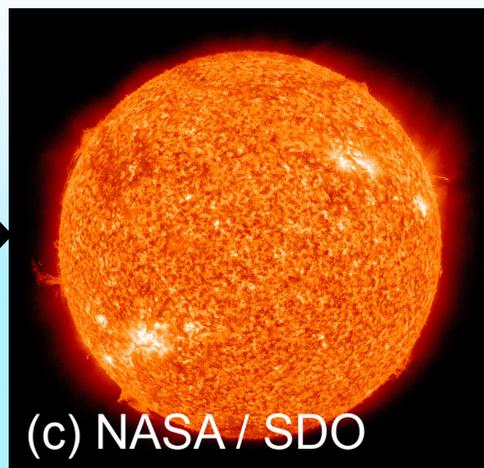
# ポスト「京」重点課題(9) - サブ課題B 「物質創成史の解明と物質変換」



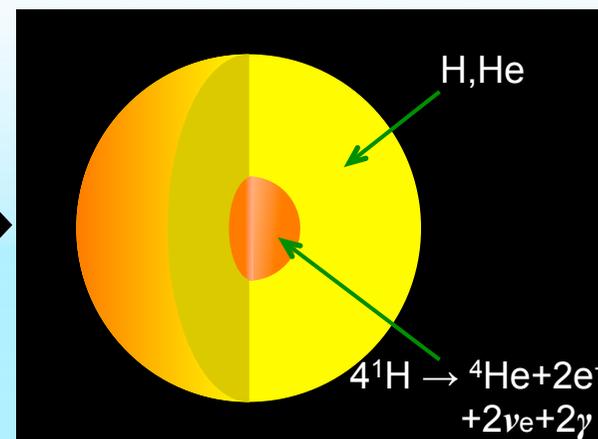
# 星の形成・進化・そして超新星へ



分子雲  
(イータカリーナ星雲)

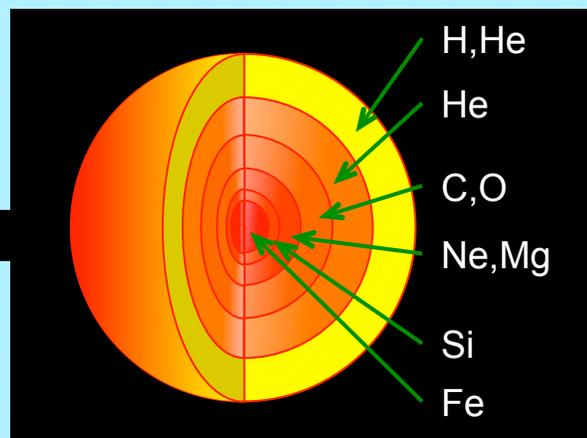


星の誕生  
(太陽の遠紫外線画像)



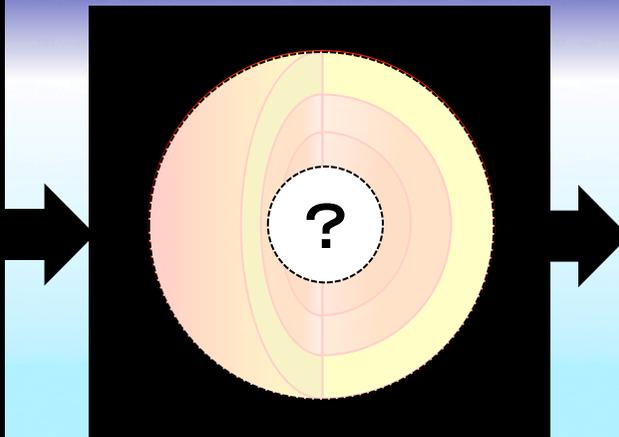
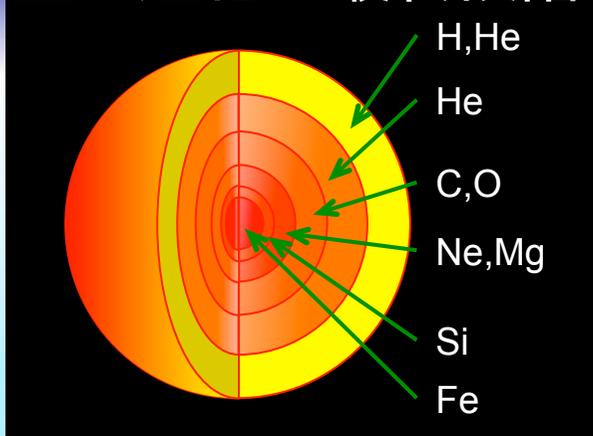
星の進化

白色矮星



# 超新星を創る

## 星の進化の最終段階



基礎方程式:

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

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

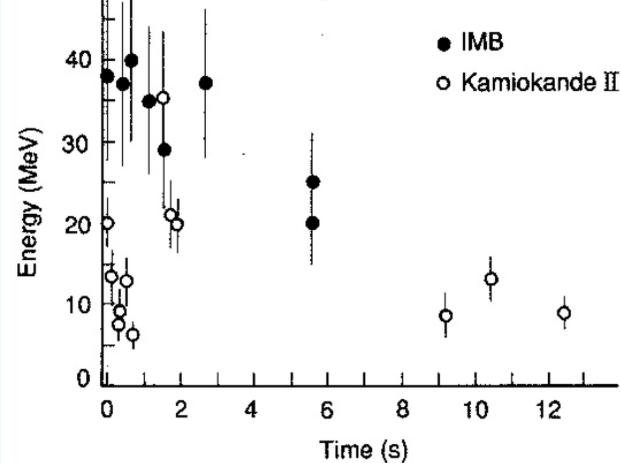
$$\frac{\partial e^*}{\partial t} + \nabla \cdot [(e^* + P)\mathbf{v}] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + Q_E$$

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

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

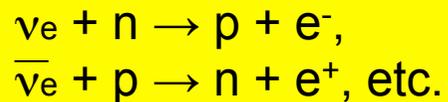
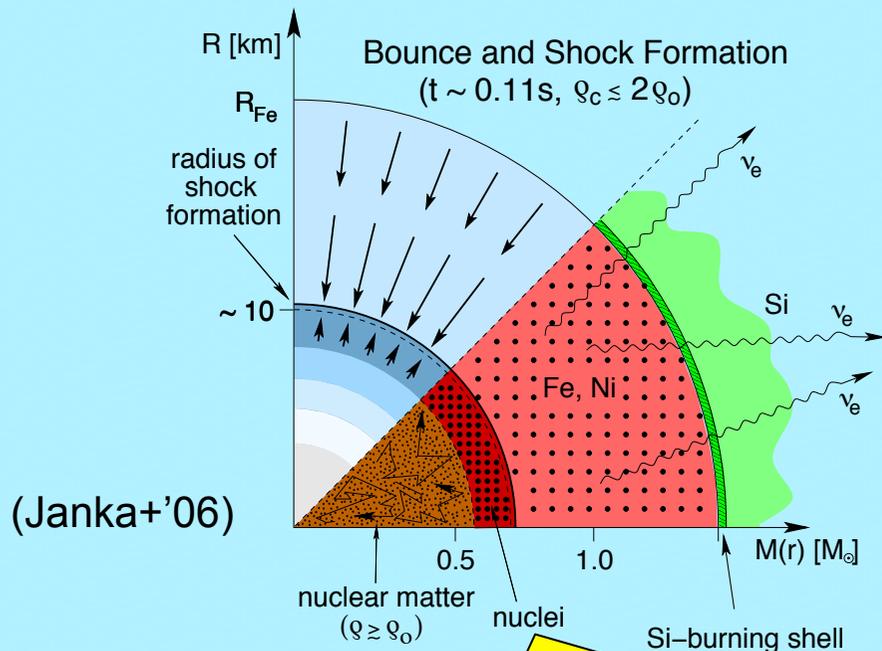
$$\Delta \Phi = 4\pi G\rho \quad + \text{EOS.}$$

## SN 1987A からのニュートリノ

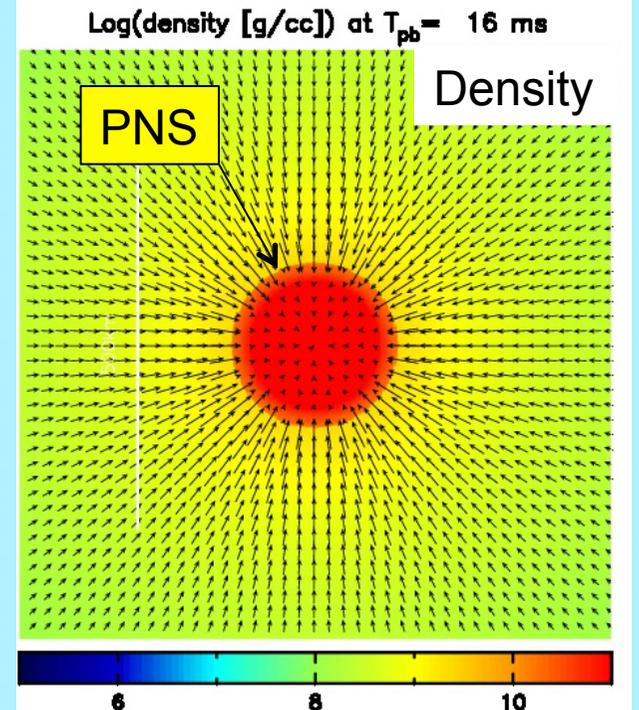
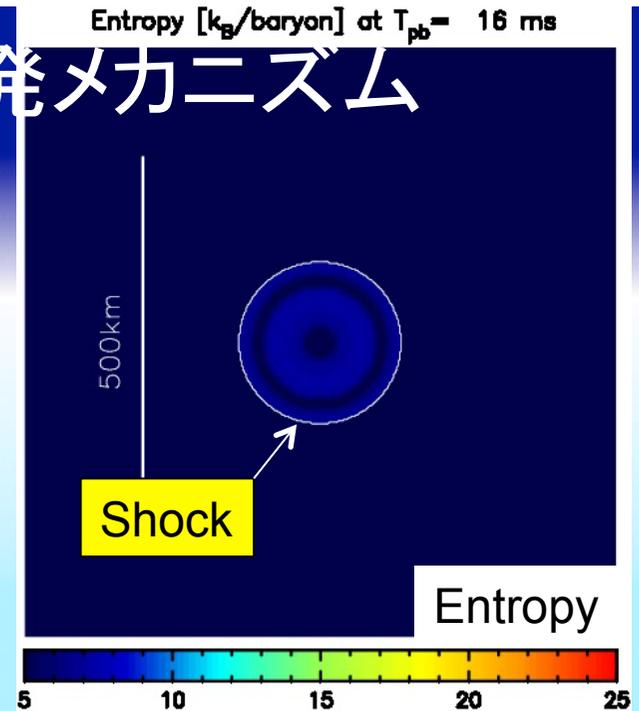


# 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

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

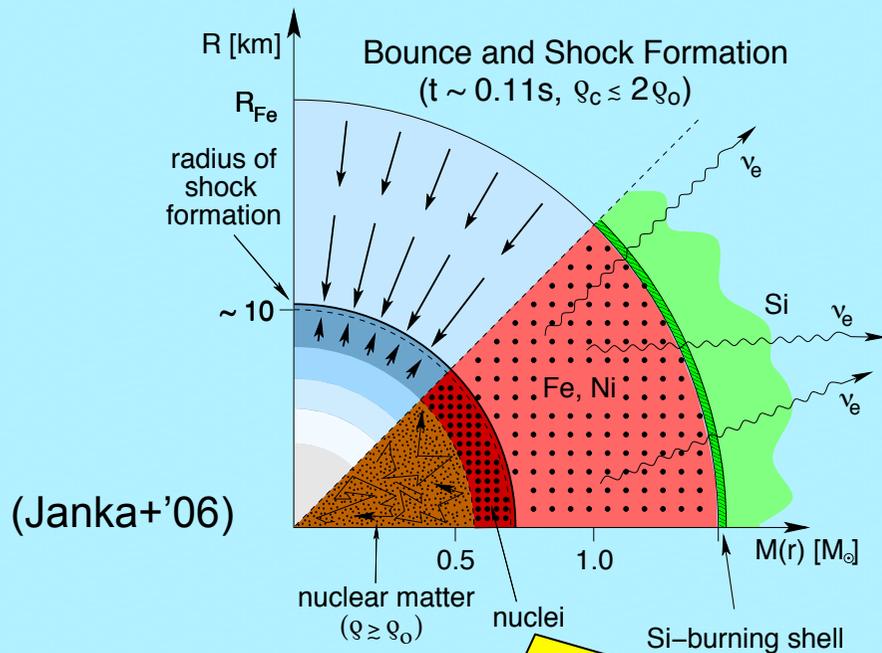


ex.)  
 $M = 17 M_{\odot}$   
 $Z = Z_{\odot}$

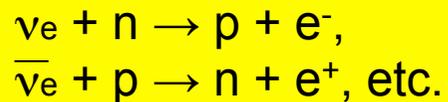


# 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

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

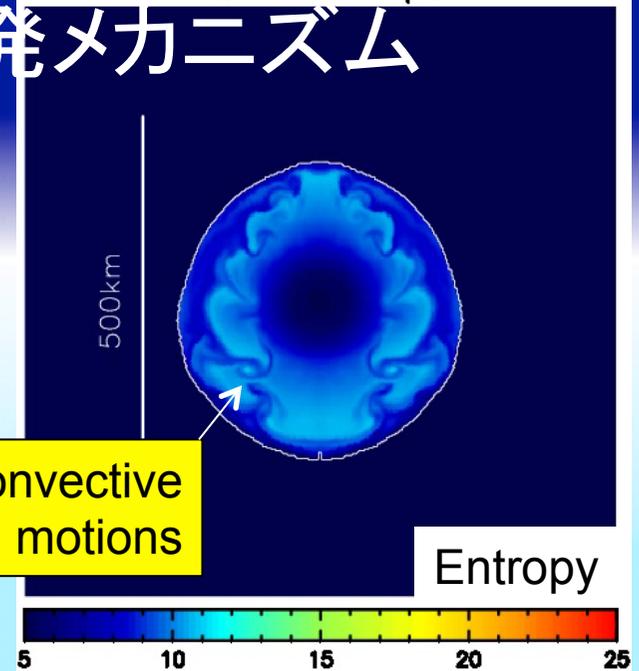


(Janka+'06)

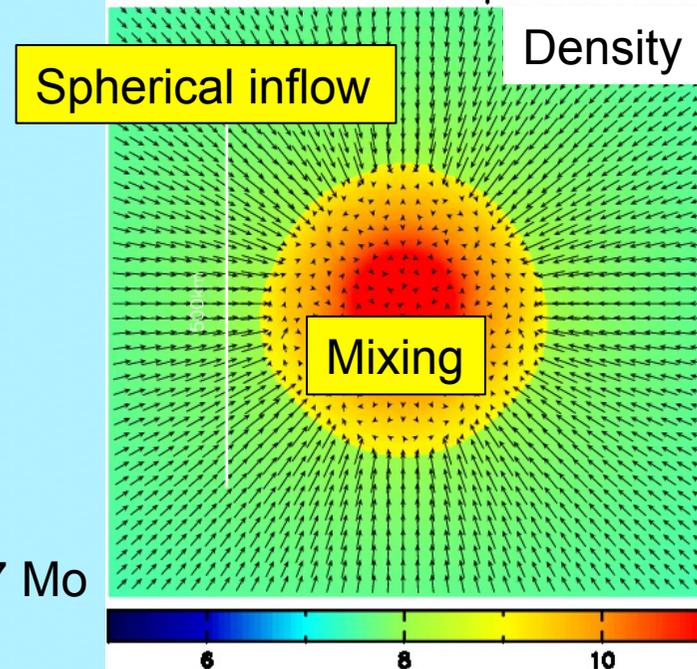


ex.)  
 $M = 17 M_{\odot}$   
 $Z = Z_{\odot}$

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

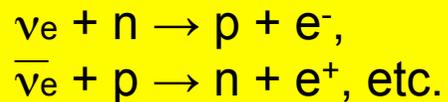
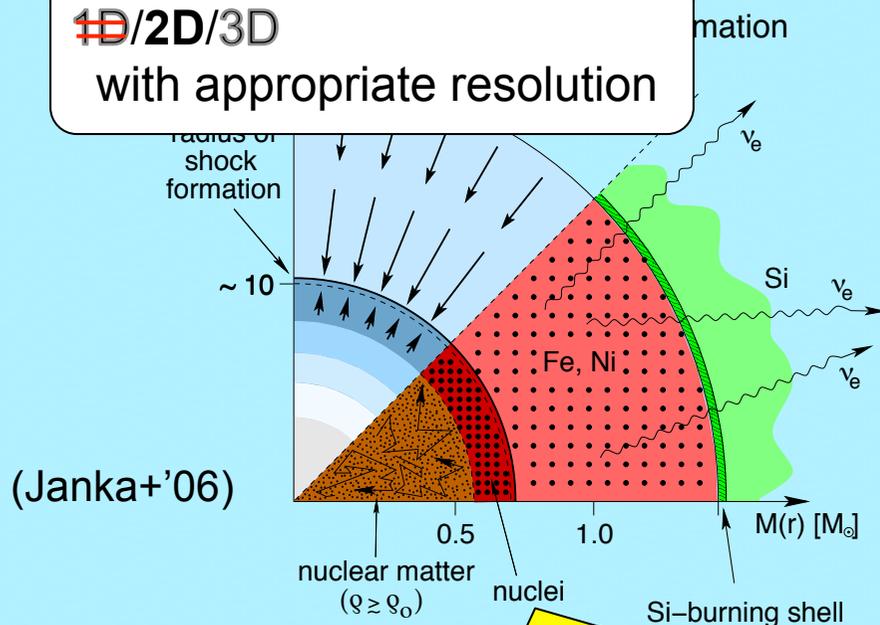
## Energy distribution

to solve energy-dependent reactions

- Neutrino heating mechanism
- Convection, SASI

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

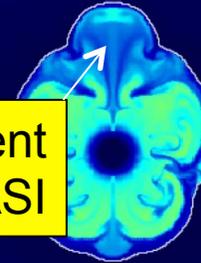
with appropriate resolution



ex.)  
M = 17  $M_\odot$   
Z = Z<sub>o</sub>

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

Development of SASI

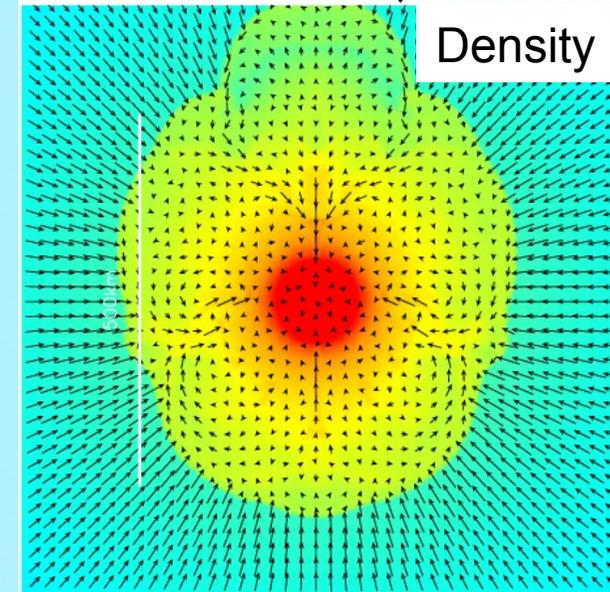


Entropy

5 10 15 20 25

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

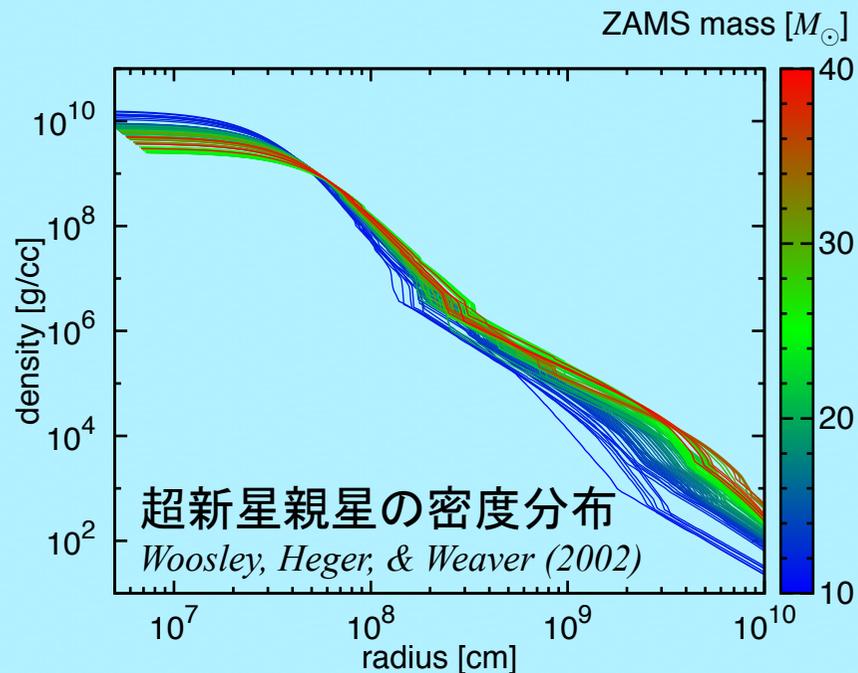
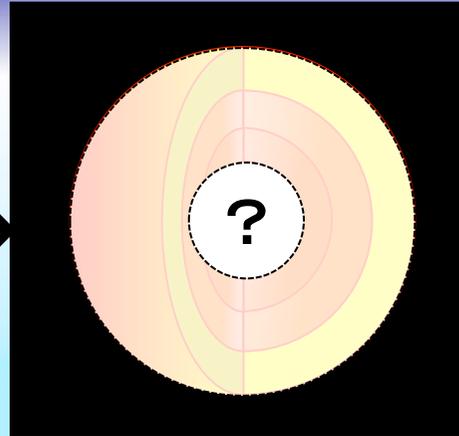
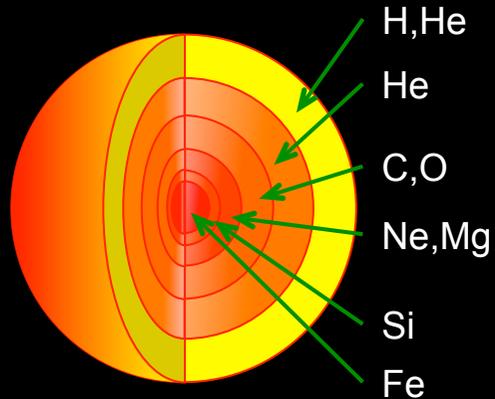
Density



6 8 10

# 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.

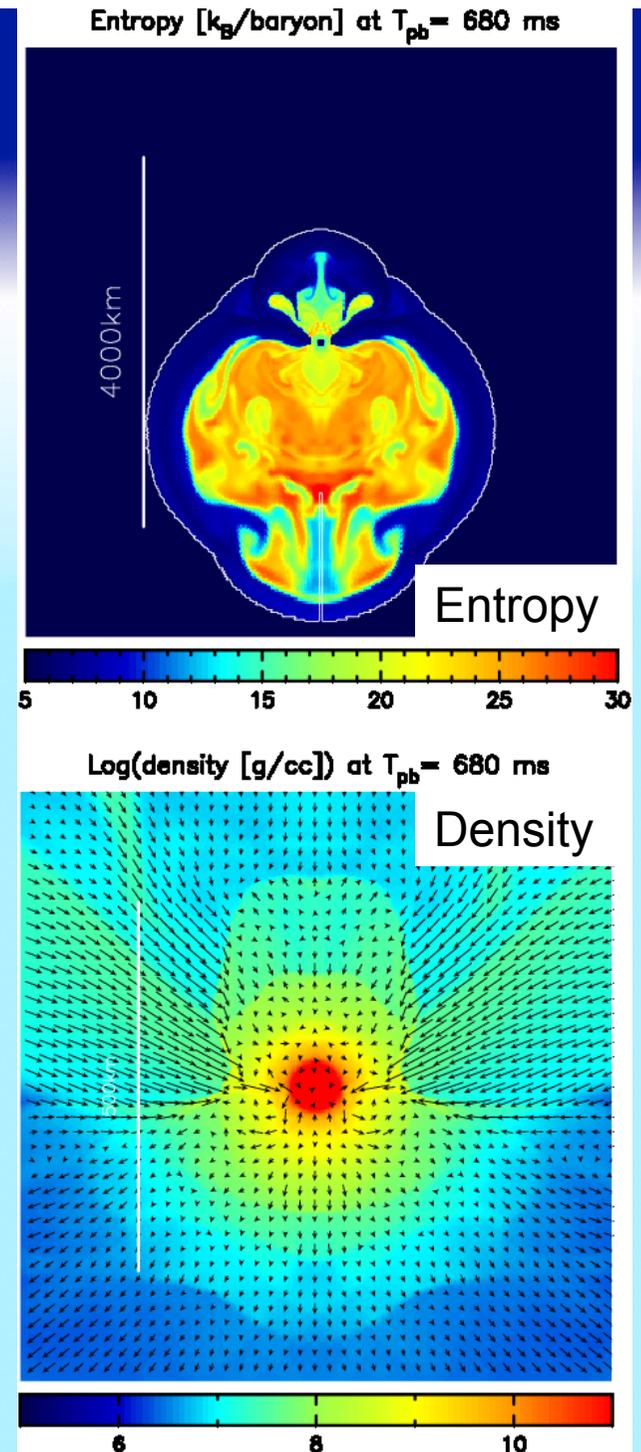
→ 最終的な爆発エネルギーは? ニッケル合成量は?

→ 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)  
 $\nu_x$ : leakage scheme  
with 20 energy bins ( $< 300$  MeV)
- 状態方程式
  - LS220 (Lattimer & Swesty '91)
- 核反応
  - $13\alpha$  (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)

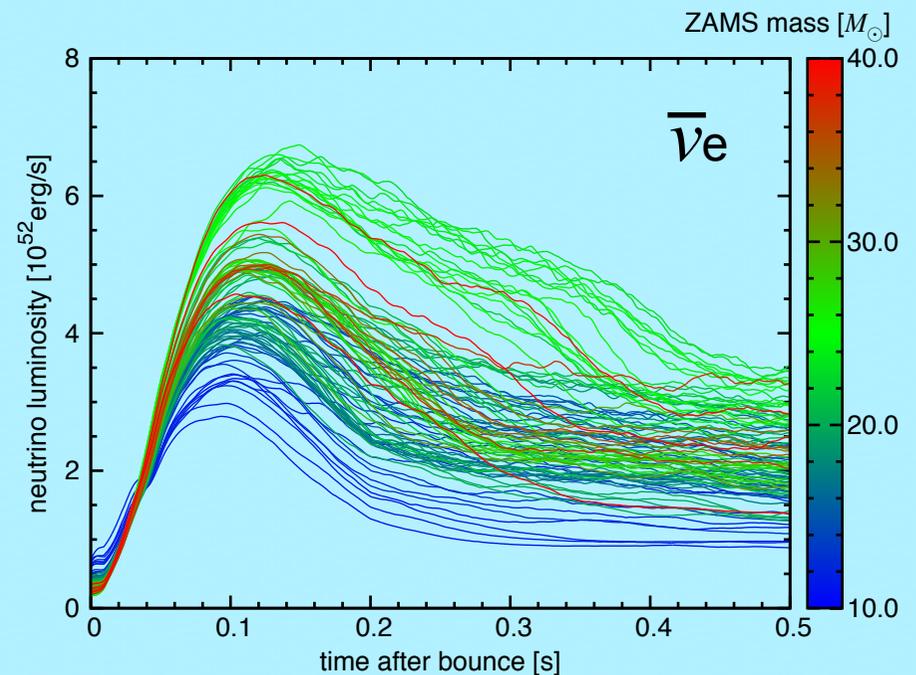
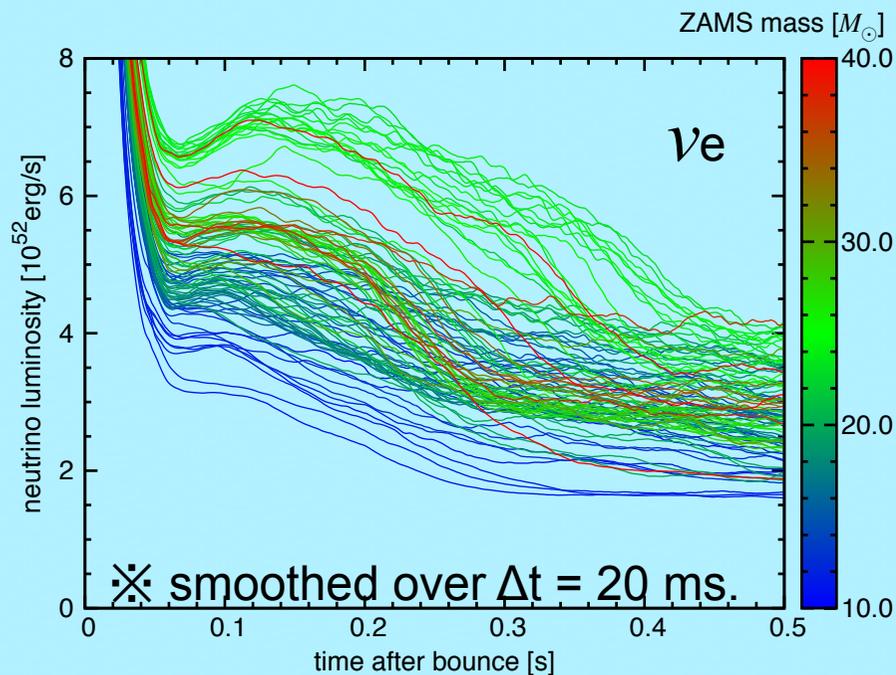
# ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 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.



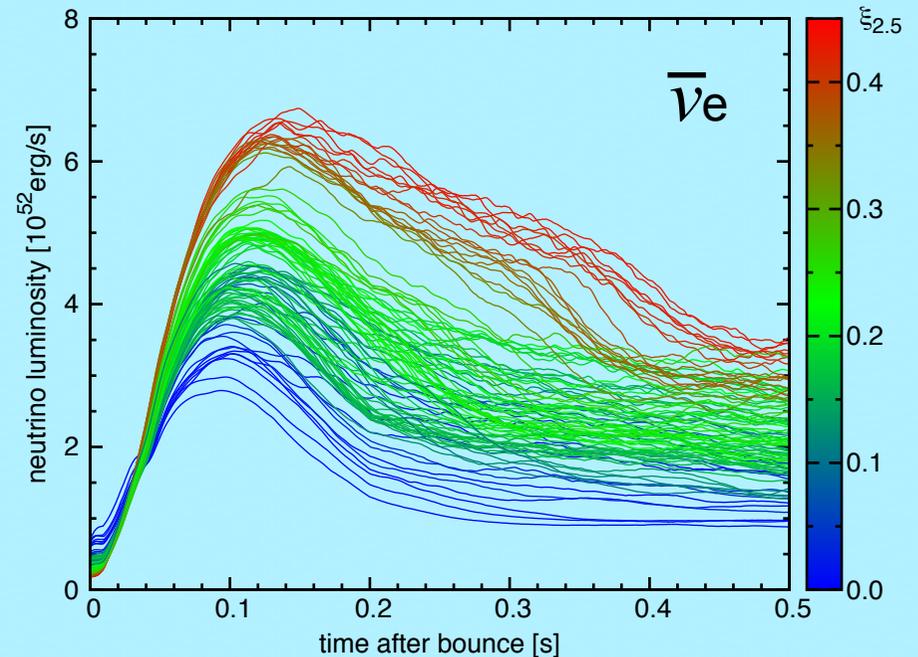
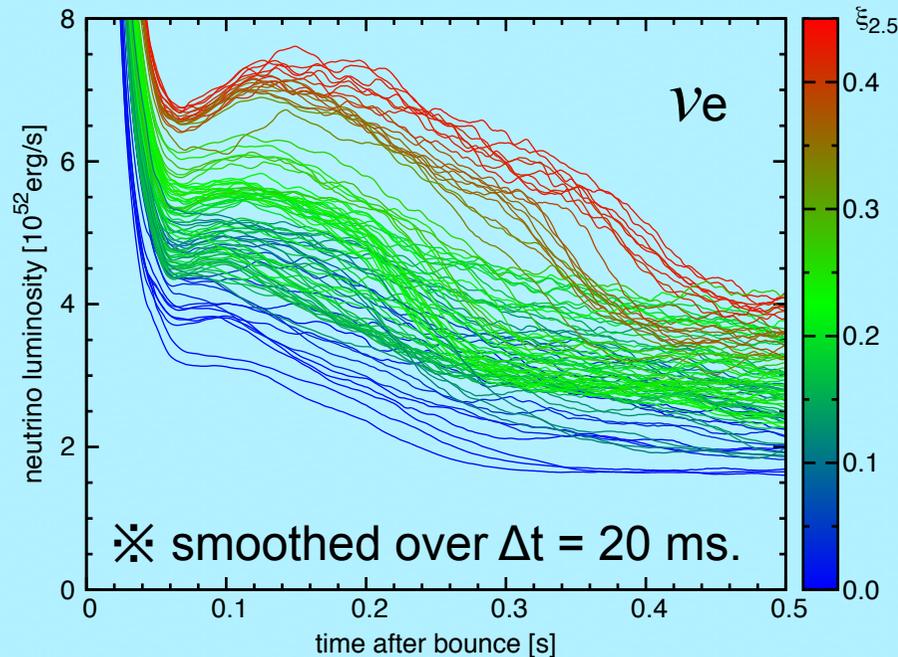
# ニュートリノ光度の時間発展

- ✓ 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

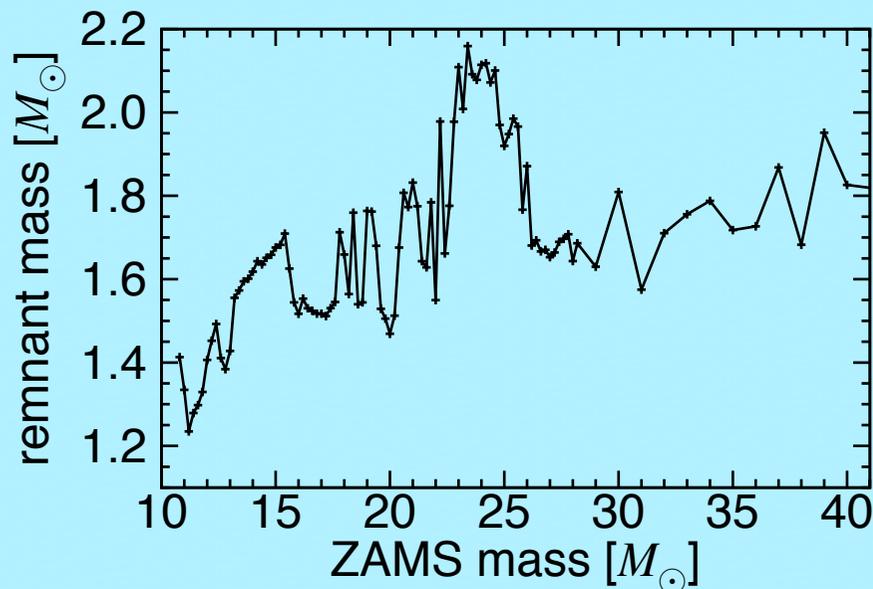
- ✓ 全378モデルを定量的に比較するため、時刻を固定.
- ✓ 初期質量(ZAMS mass)はよい指標ではない.
- ✓ コンパクトネスパラメータに対して単調な傾向.
- ✓ その傾向は金属量に依らない.

コンパクトネスパラメータ  
(O'Connor & Ott 2011)

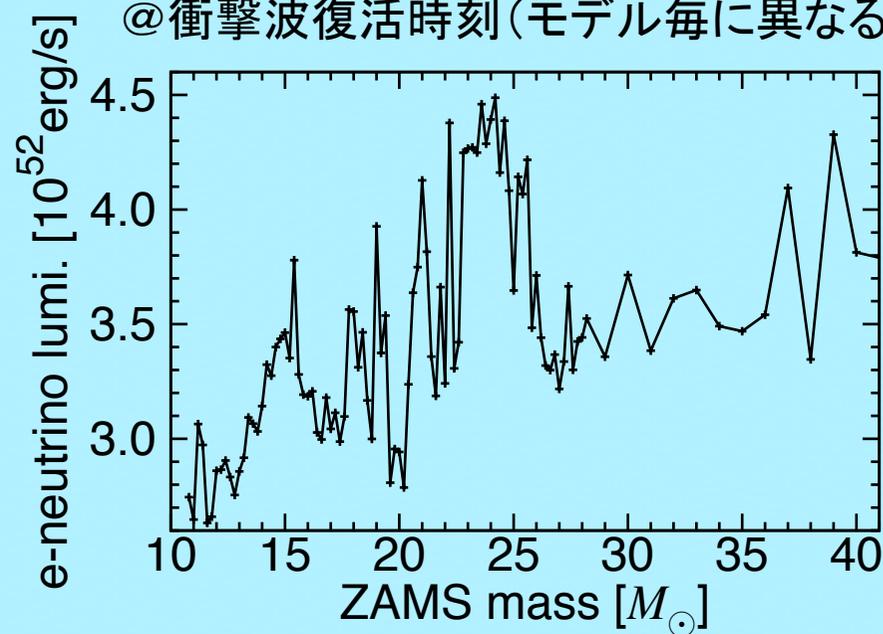
$$\xi_M \equiv \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

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.

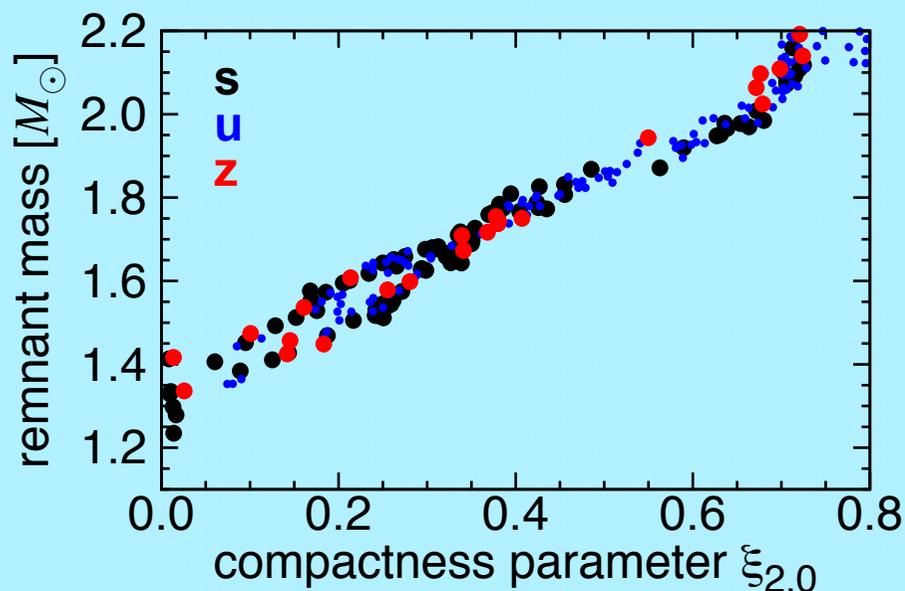
コンパクトネスパラメータ  
(*O'Connor & Ott 2011*)

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

各親星の構造に対応.

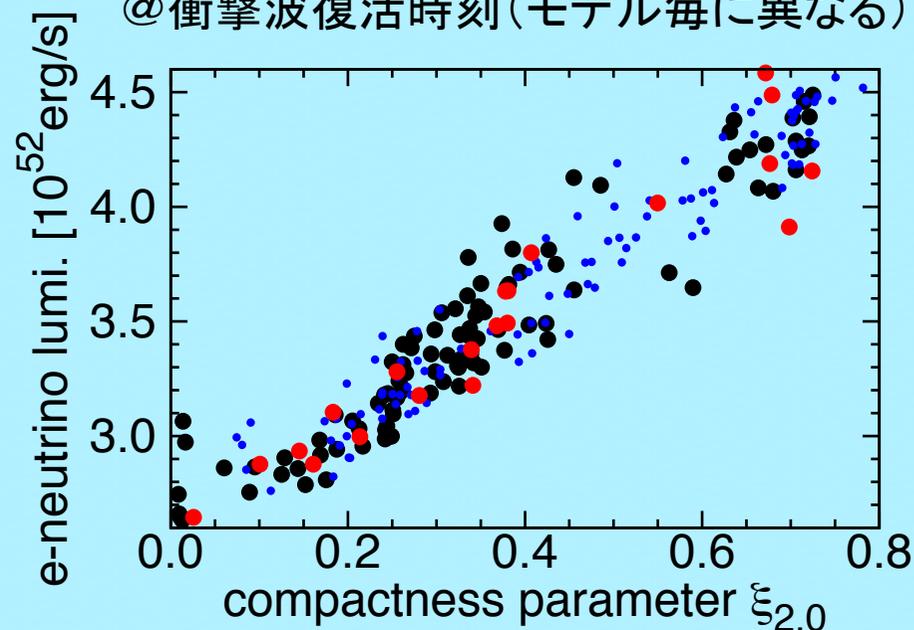
原始中性子星の質量

@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!

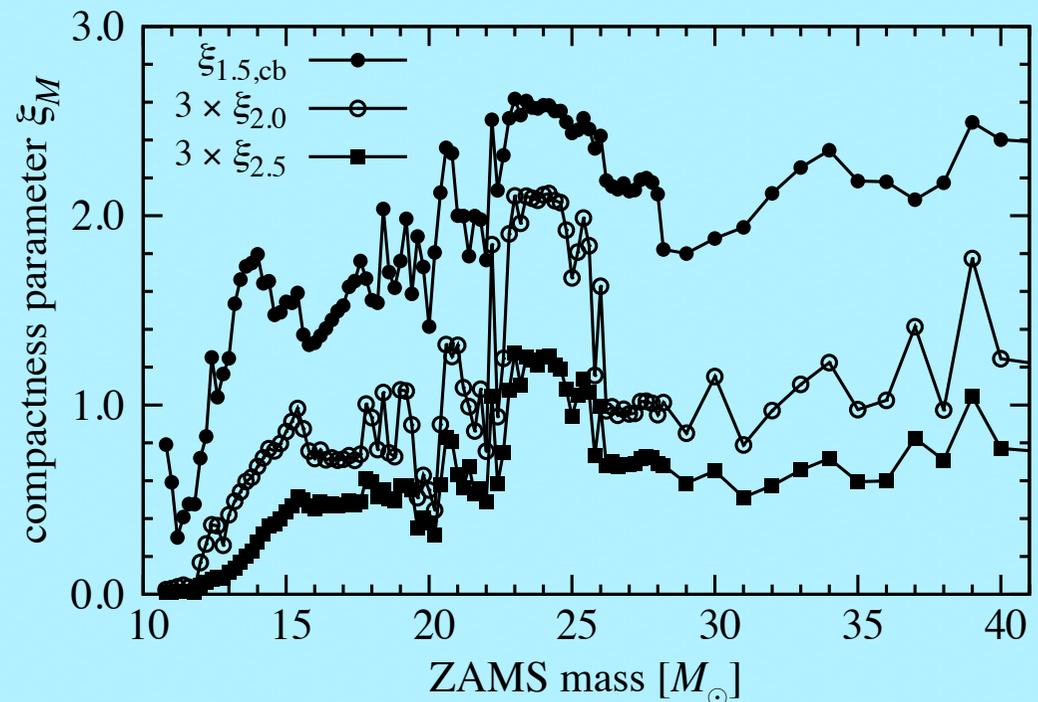
(\*Not too much) Mass accretion ↗  
→ PNS mass ↗  
→  $\nu$  luminosity ↗  
→ Explosion energy ↗  
→  $^{56}\text{Ni}$  mass ↗

\*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

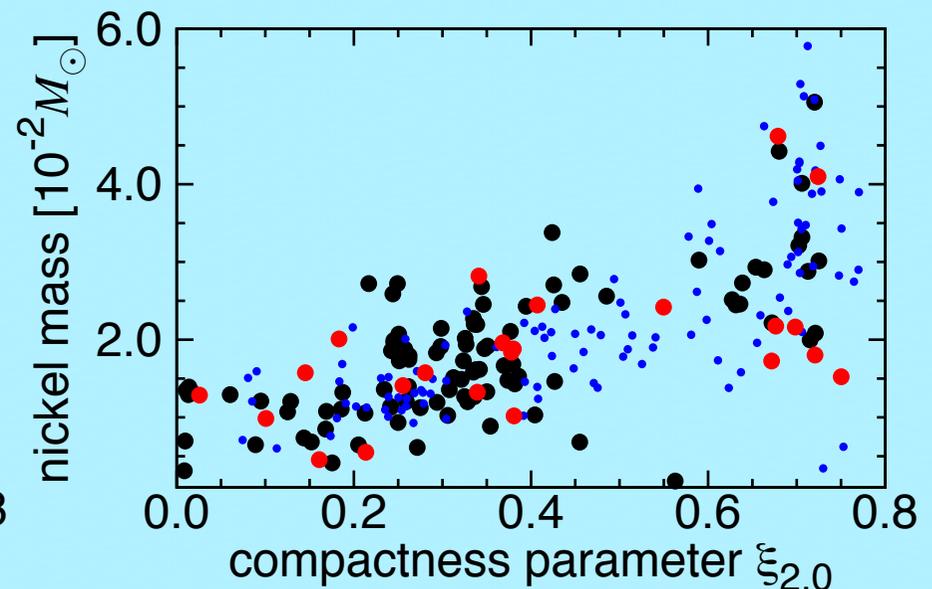
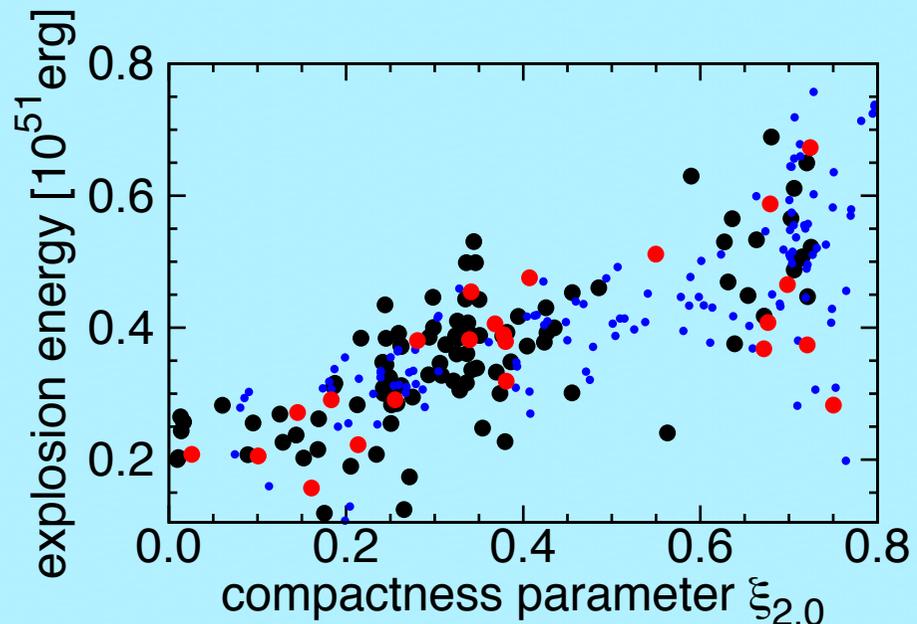
What determines the CCSN properties is ...  
**mass accretion** onto the central PNS!

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

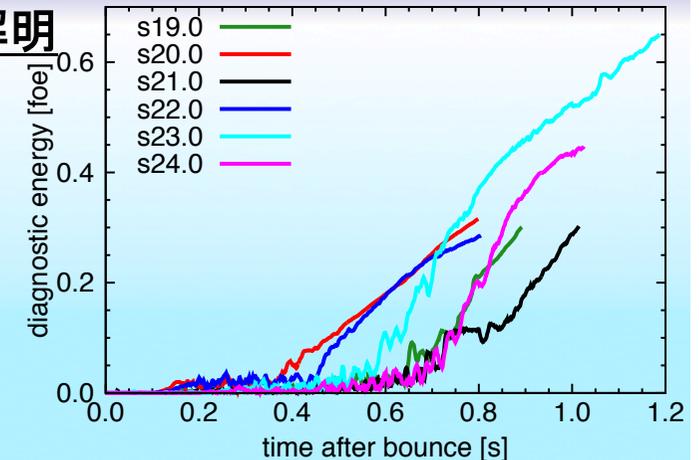
## ➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

*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  $\xi$  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。



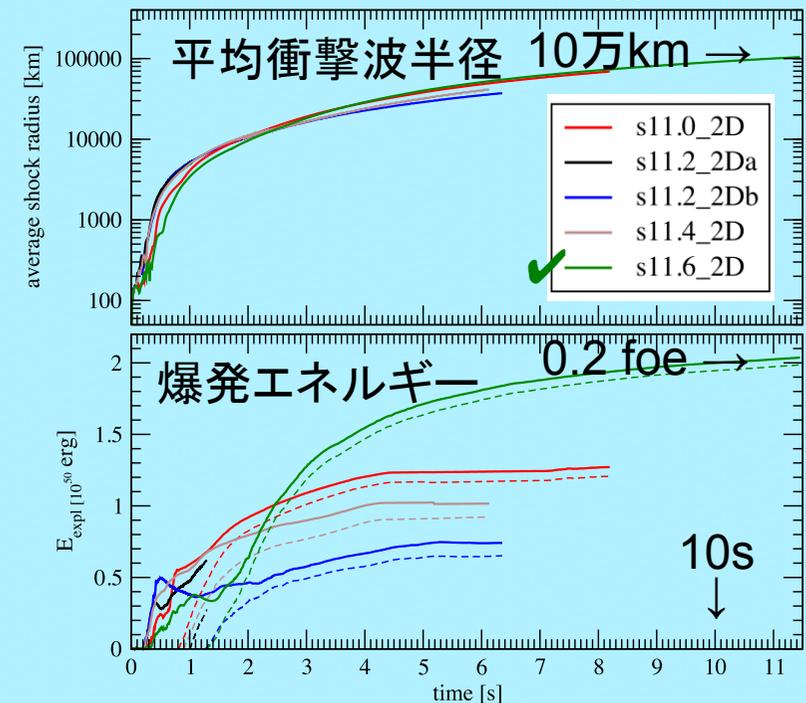
## ➤ B. Mueller '15

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

COCONUT (GR hydro.) - FMT ( $\nu$ ) 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

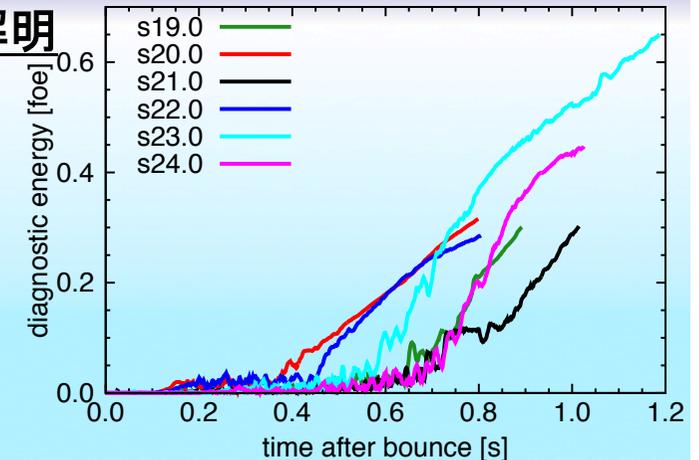
## ➤ Step 1: 時間・空間を限定して超新星の系統的性質を解明

*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  $\xi$  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  $\xi$  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.

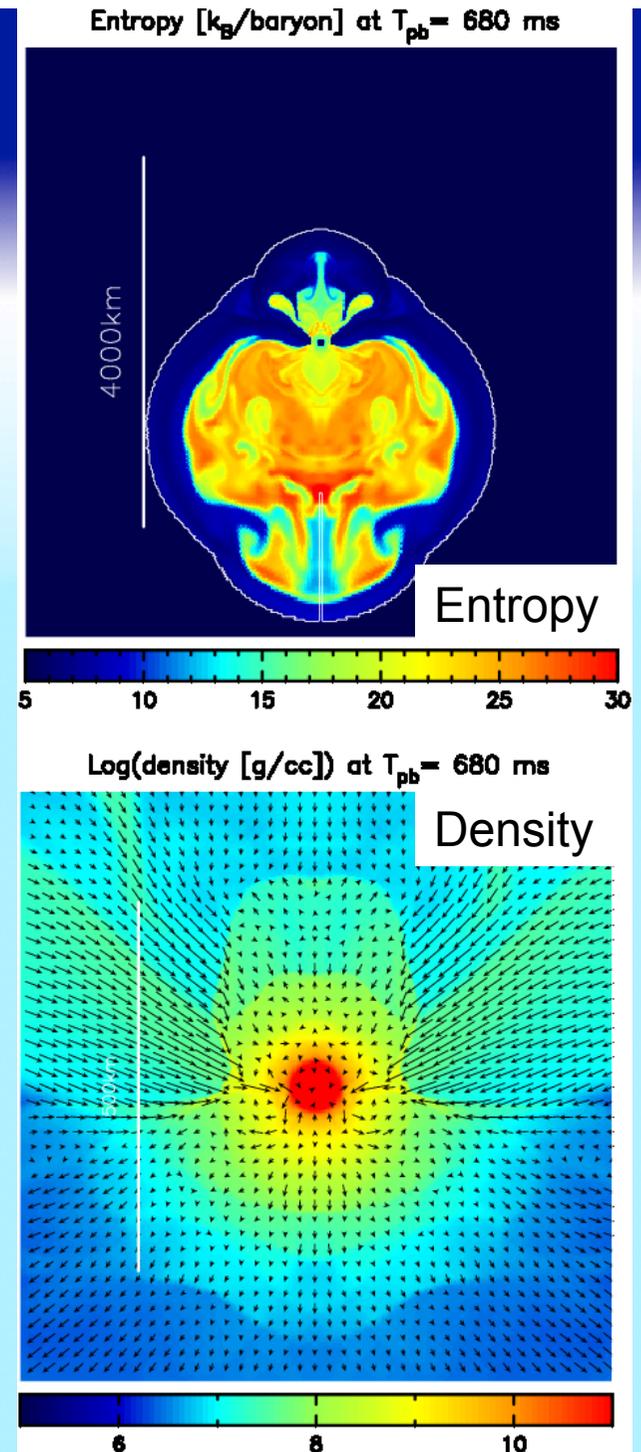
→ 最終的な爆発エネルギーは? ニッケル合成量は?

→ 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

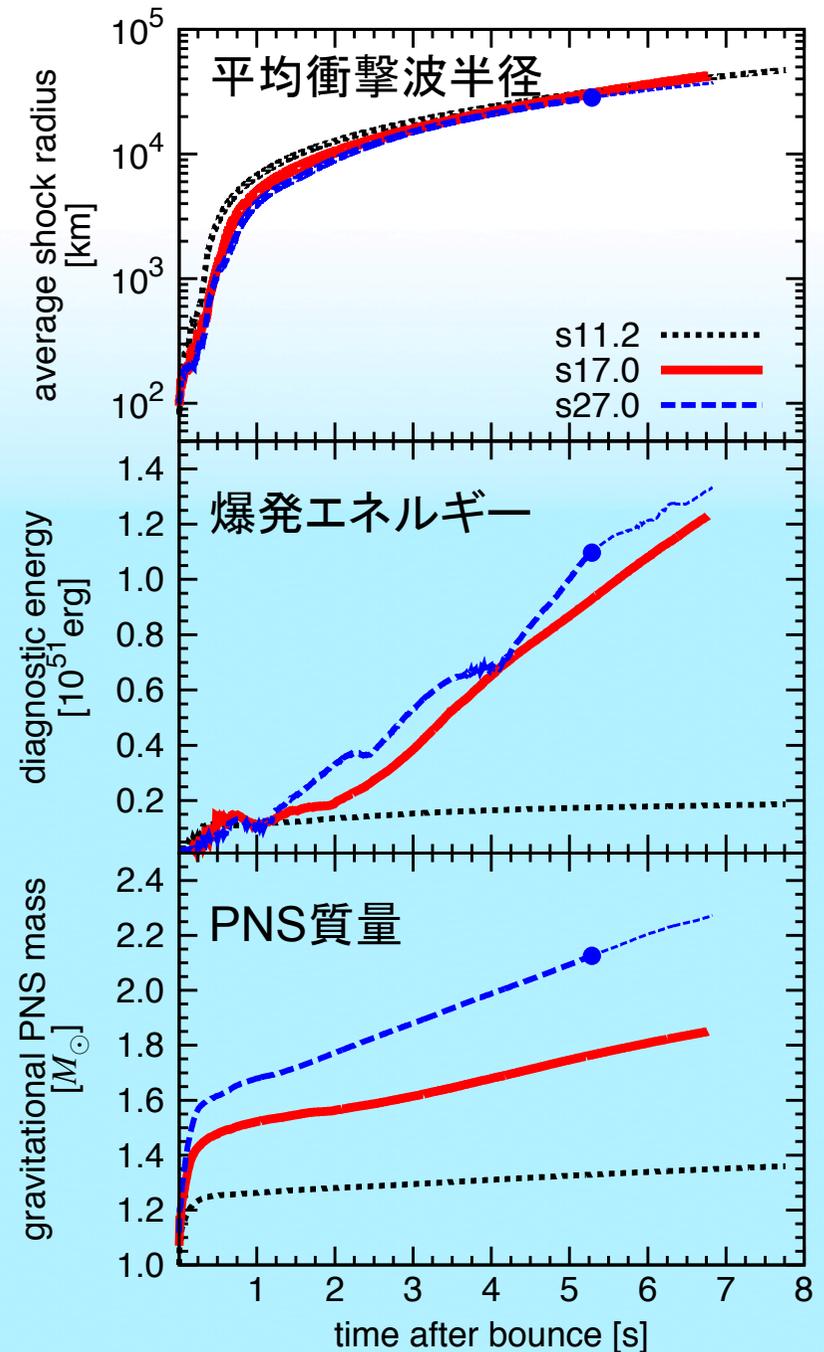
(KN et al., in prep.)

- 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**,  $\theta=0$ - $\pi$
  - ニュートリノ輸送スキーム  
 $\nu_e, \bar{\nu}_e$ : IDSA spectral transport (Liebendoerfer+09)  
 $\nu_x$ : leakage scheme  
with 20 energy bins ( $< 300$  MeV)
- 状態方程式
  - LS220 (Lattimer & Swesty '91) + Si gas
- 核反応
  - $13\alpha$  (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.)

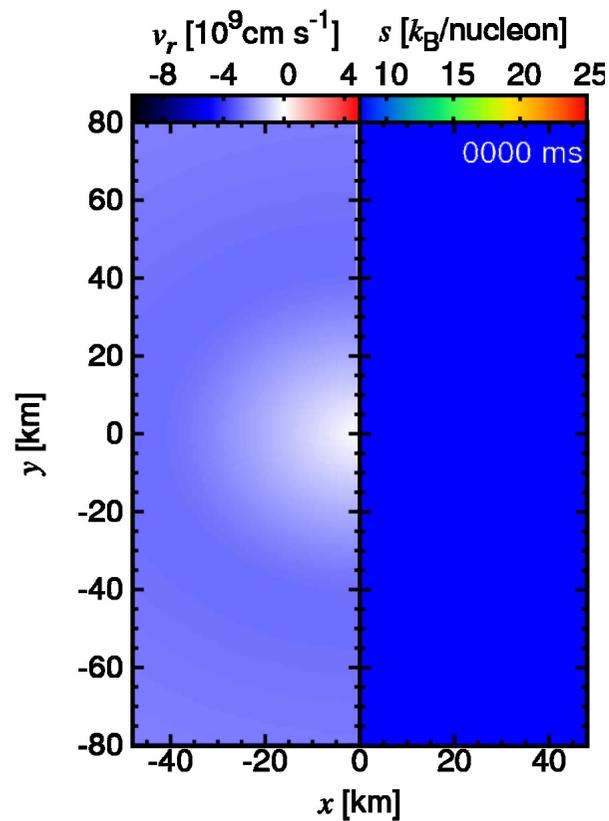
- ✓ 全てのモデルが爆発に転じた。  
t = 7-8 秒で衝撃波が外境界@10万kmに。  
(He層の底に対応)
- ✓ **s11.2モデル**  
爆発エネルギー、PNS質量ほぼ収束  
Eexp = 0.19 foe, M<sub>pns</sub> = 1.36 Mo
- ✓ **s17.0モデル**  
~7秒後でまだEexp, M<sub>pns</sub>成長。  
Eexp = 1.23 foe, M<sub>pns</sub> = 1.85 Mo
- ✓ **s27.0モデル**  
s17.0モデルと同様に成長。  
5.29秒後に1D GR計算で予言される限界  
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



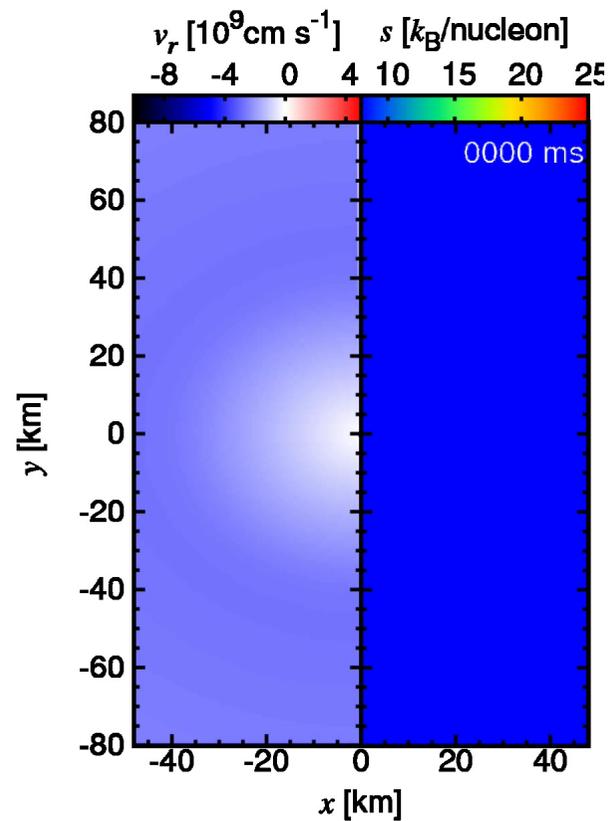
# 中心付近の降着流

- ✓ 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

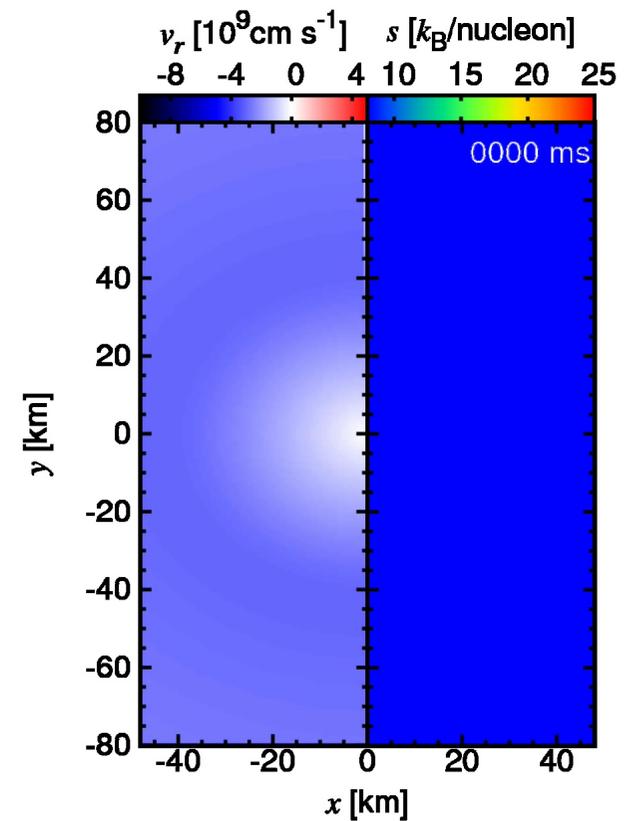
s11.2



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  $\xi$  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  $\xi$  モデルを選択し広範囲・長時間計算.

→ 爆発エネルギーが  $10^{51} \text{ erg}$  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

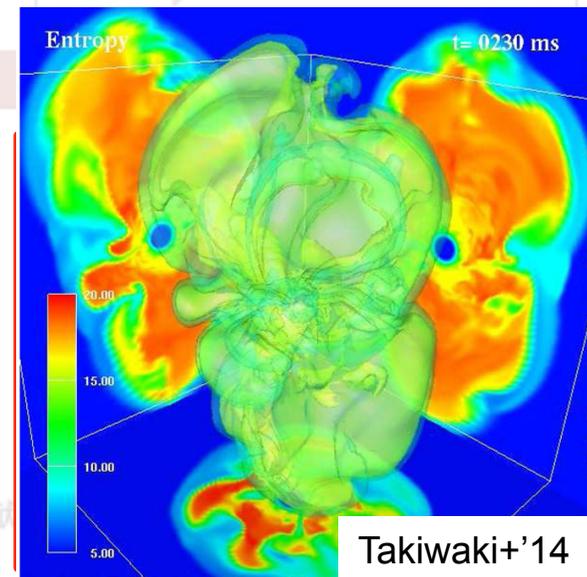
$\times n(\varphi) \times (\Delta t_{2D} / \Delta t_{3D})$

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*

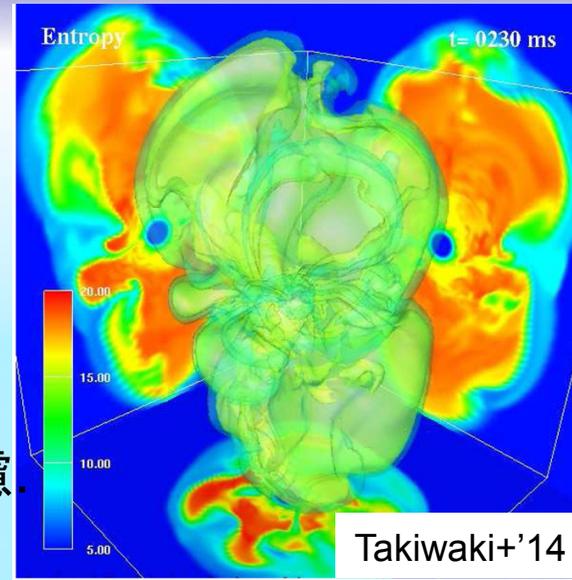


# Multi-messenger signals from CCSNe

## ➤ 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.



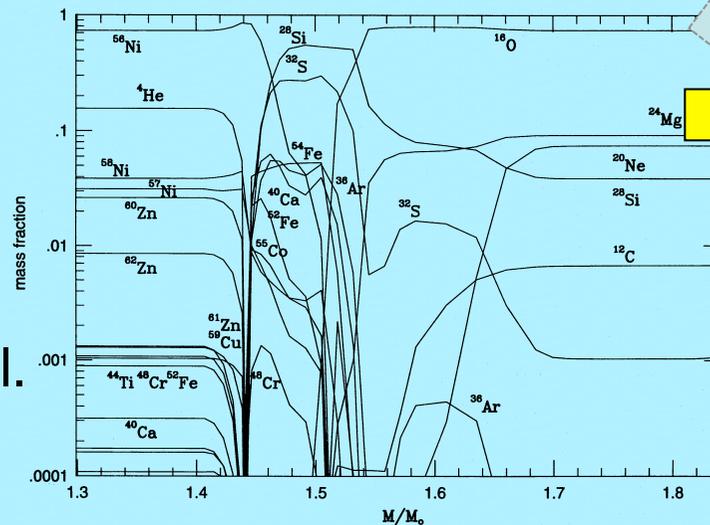
$\nu$

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

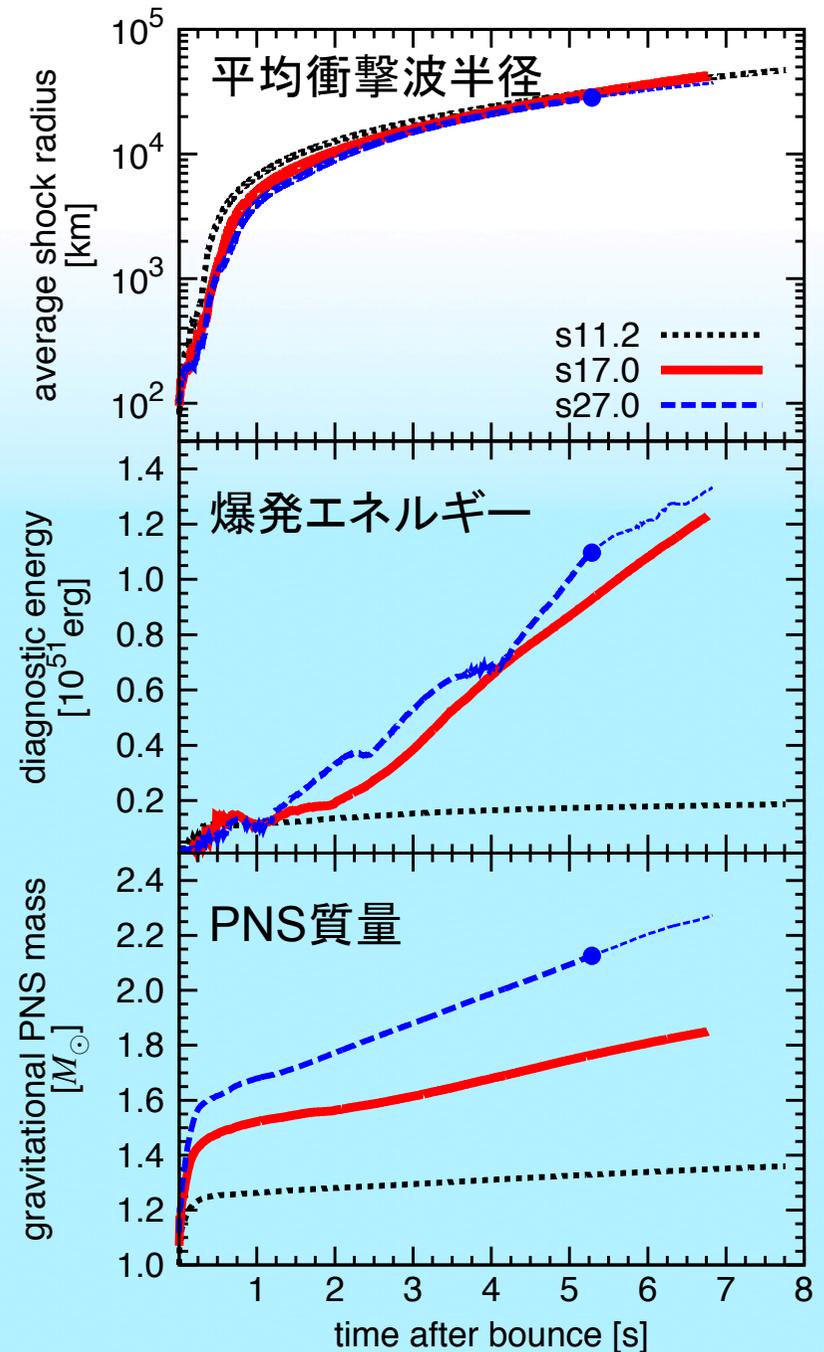


EM

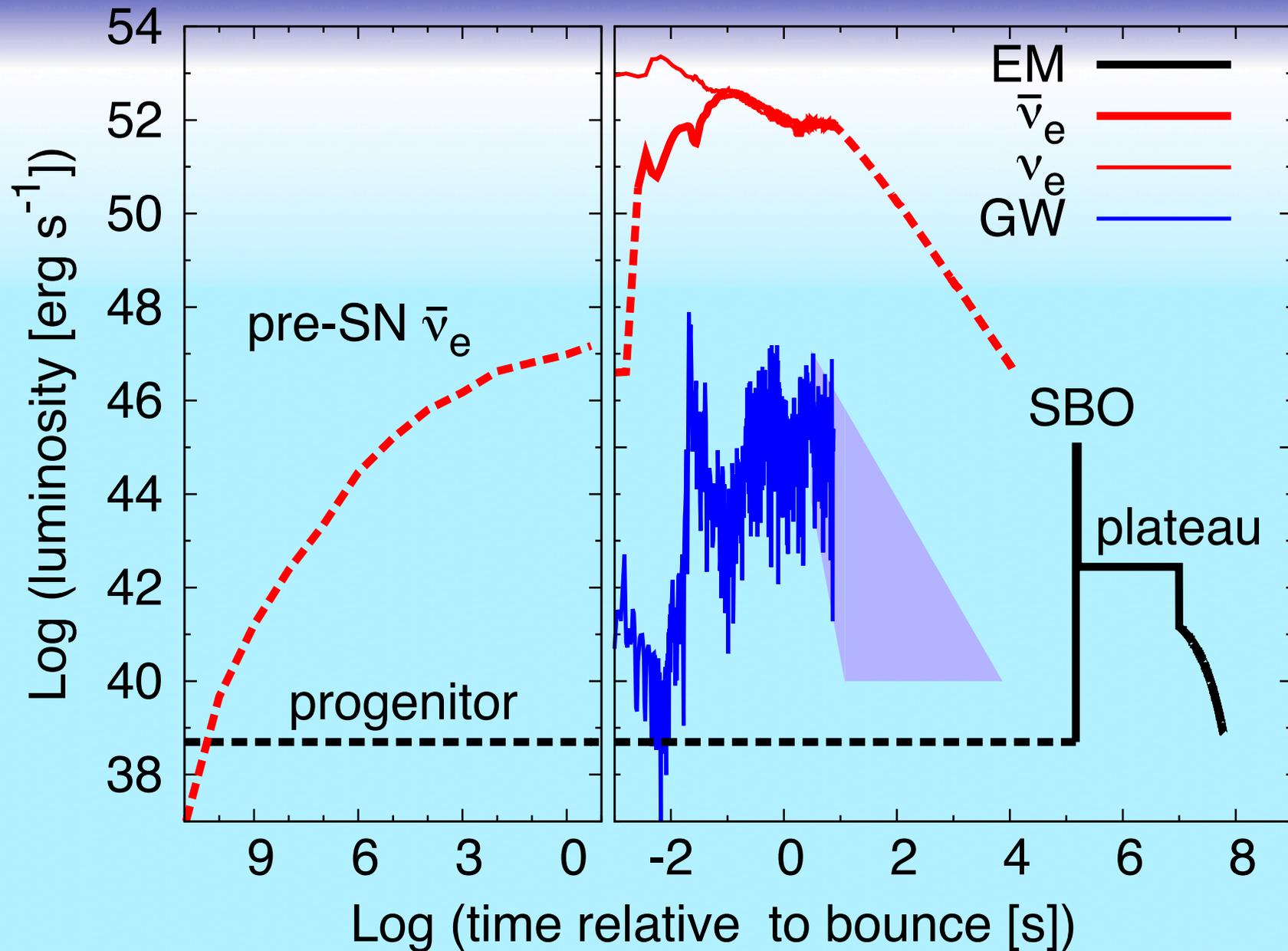
Thielemann+'96

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

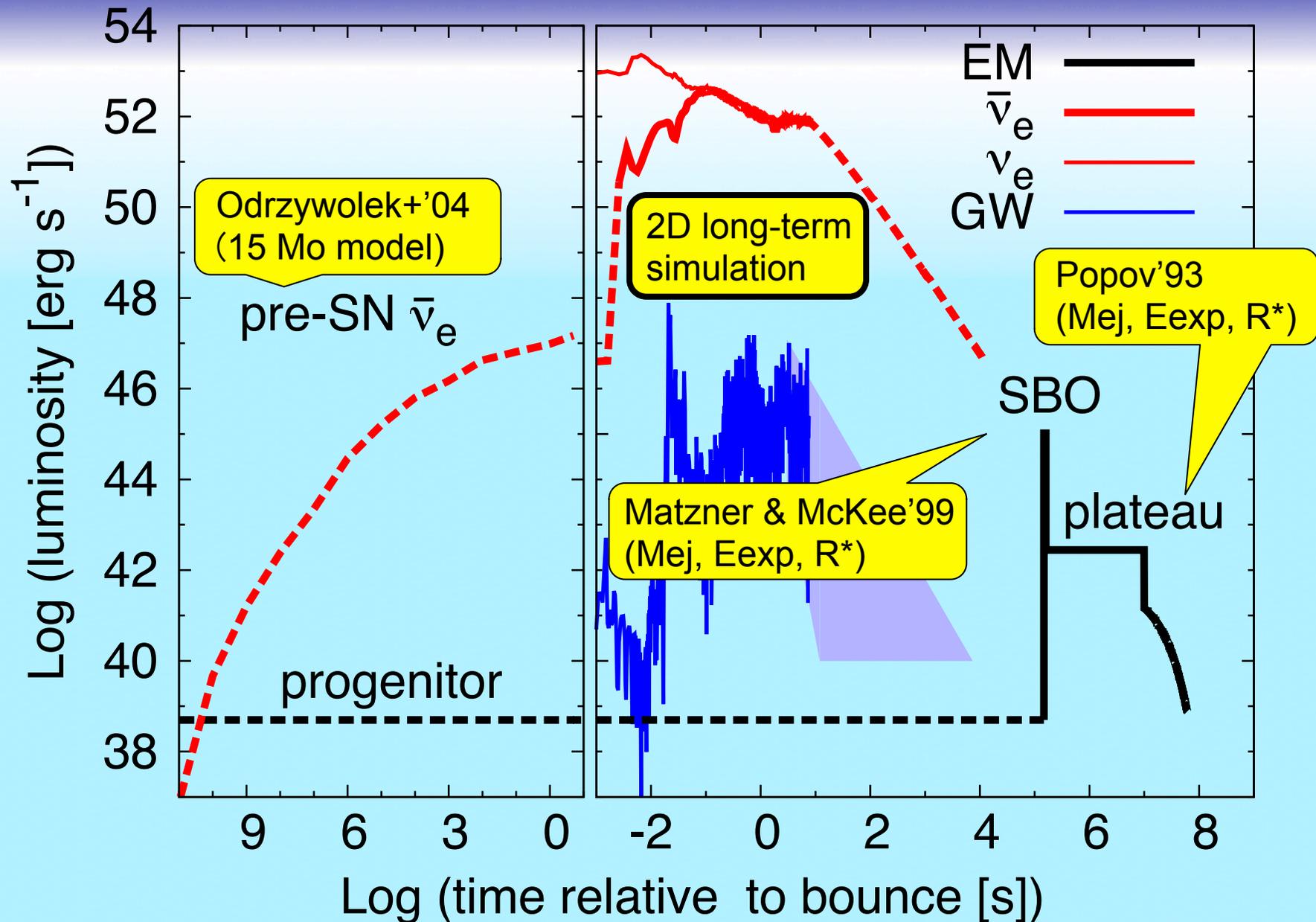
- ✓ 全てのモデルが爆発に転じた。  
t = 7-8 秒で衝撃波が外境界@10万kmに。  
(He層の底に対応)
- ✓ **s11.2モデル**  
爆発エネルギー、PNS質量ほぼ収束  
Eexp = 0.19 foe, M<sub>pns</sub> = 1.36 Mo
- ✓ **s17.0モデル**  
~7秒後でまだEexp, M<sub>pns</sub>成長。  
Eexp = 1.23 foe, M<sub>pns</sub> = 1.85 Mo
- ✓ **s27.0モデル**  
s17.0モデルと同様に成長。  
5.29秒後に1D GR計算で予言される限界  
質量 (M<sub>pns</sub> = 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



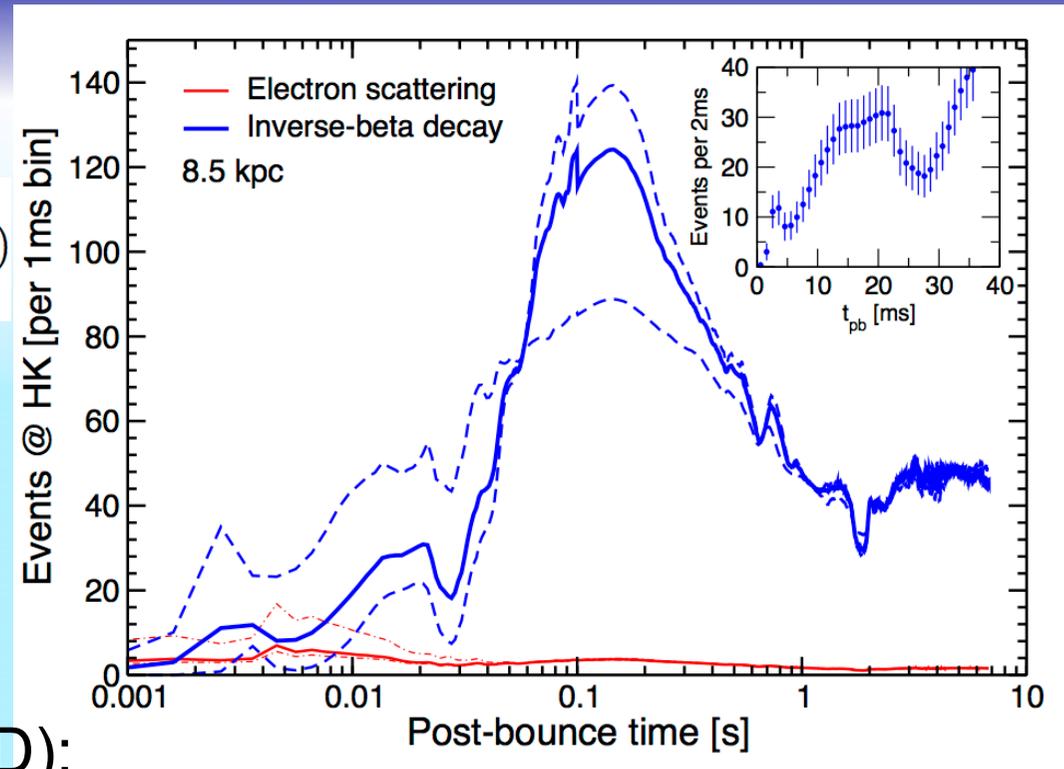
# Galactic event @ 8.5 kpc - neutrino

✓ 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  $\pm 3.0$  ms**

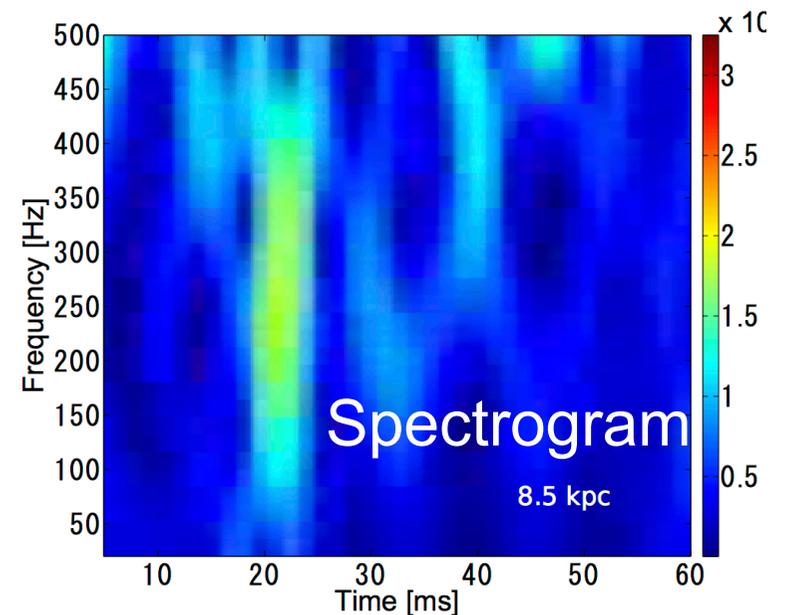
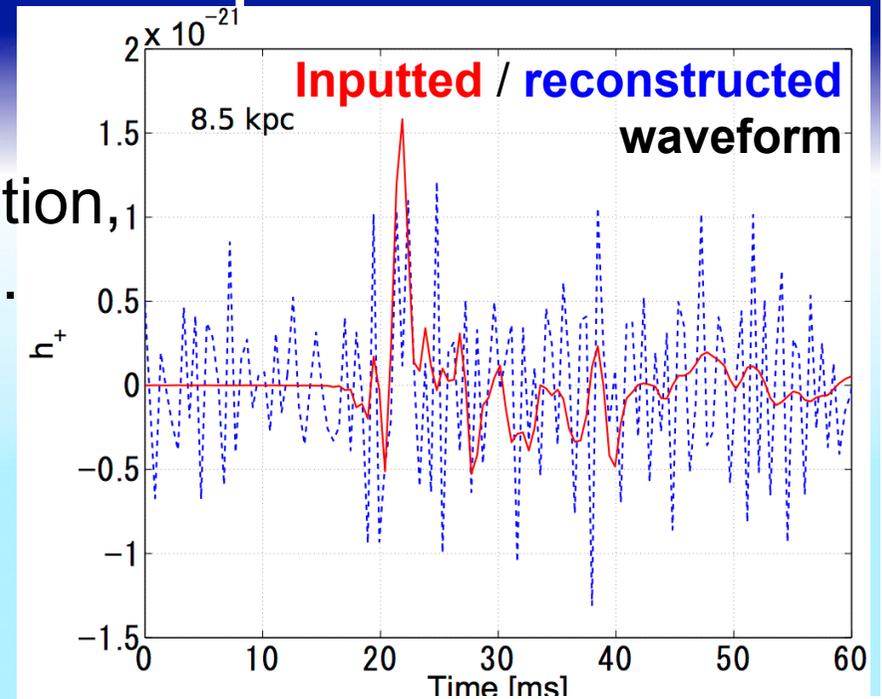
at 95% confidence level.

✓ 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)**

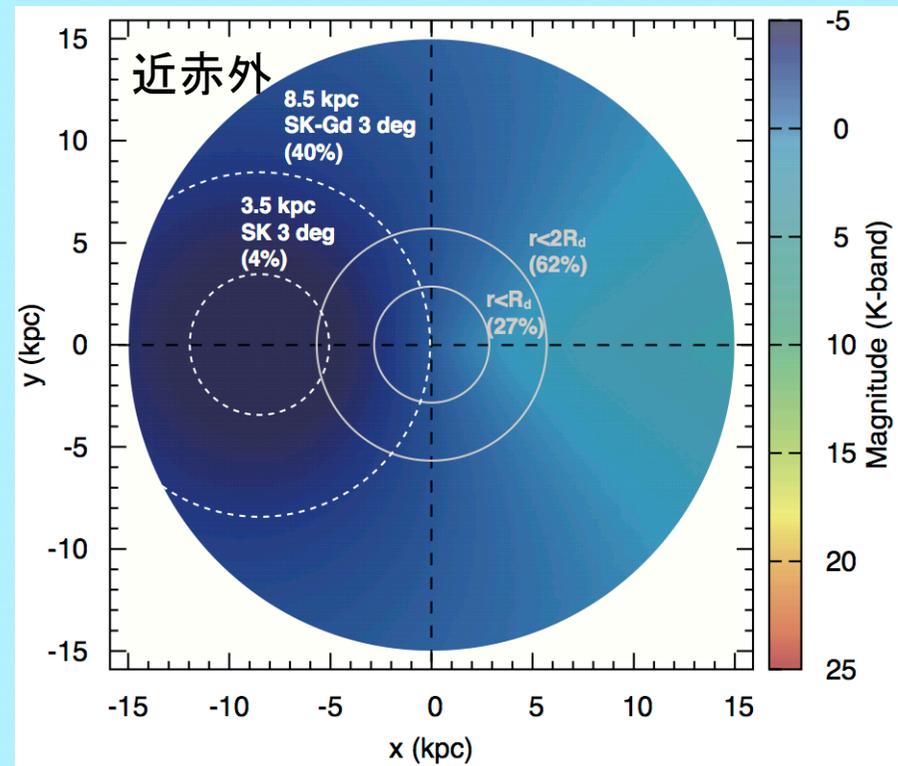
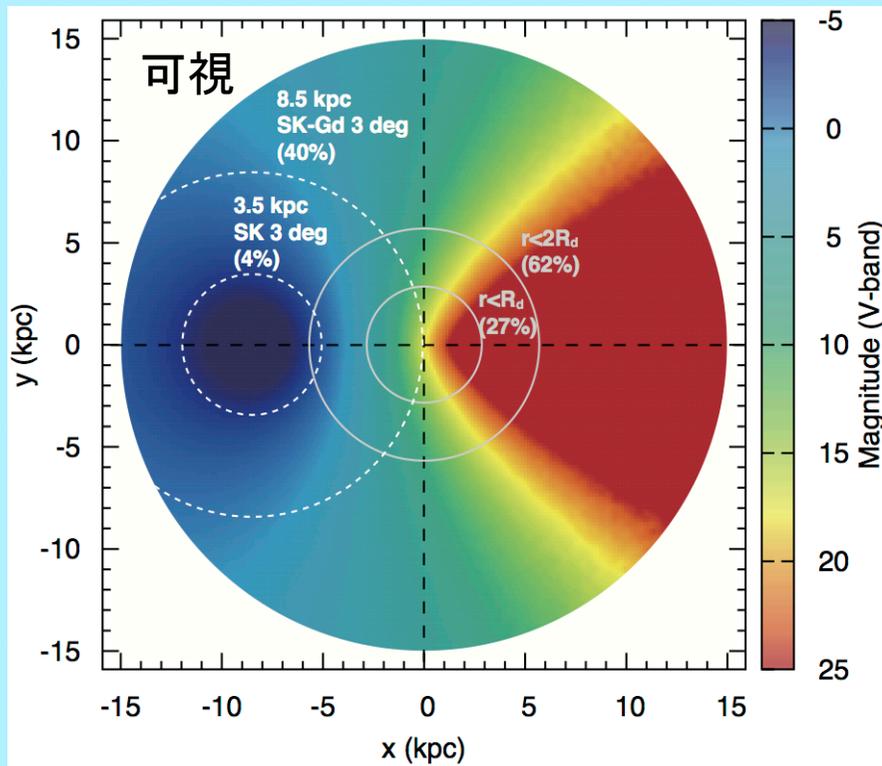
# Galactic event @ 8.5 kpc - GW

- ✓ 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  $\sim 7.5$ 
  - **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  $\xi$  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  $\xi$  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!

