

2016/01/05



「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」 第二回超新星ニュートリノ研究会

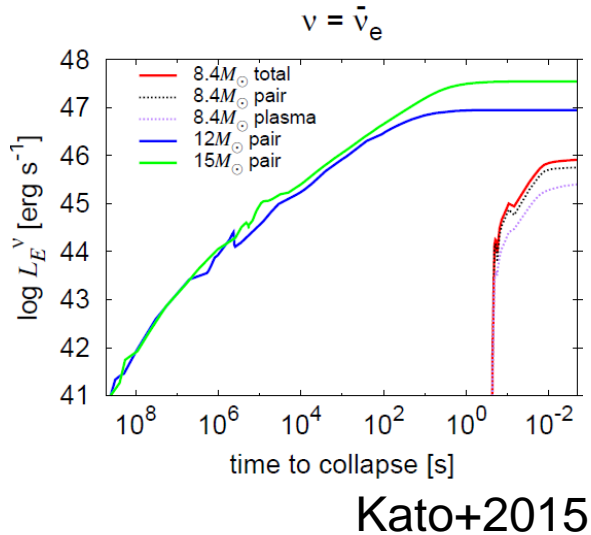
ニュートリノ観測による 超新星爆発メカニズムの探求



滝脇知也
(理化学研究所)

Three phases of supernovae

Presupernova phase



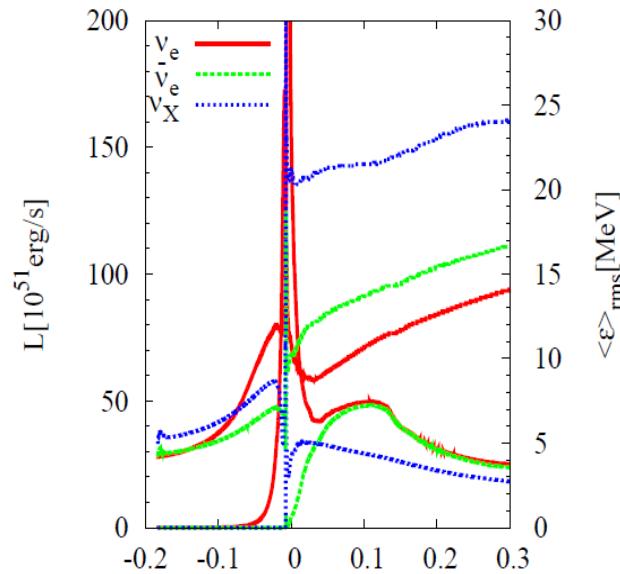
吉田敬さん 石徹白さん

$$L : 10^{47} \text{ erg/s}$$

$$E : 5 \text{ MeV}$$

$$T : 100 \text{ s}$$

Burst phase Accretion phase



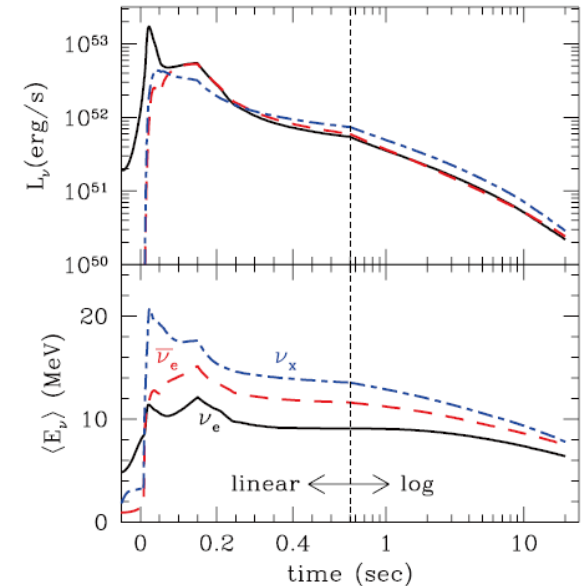
滝脇知也, 堀内俊作さん

$$L : 10^{52} \text{ erg/s}$$

$$E : 15 \text{ MeV}$$

$$T : 1 \text{ s}$$

Cooling phase



鈴木英之さん 中里 健一郎さん

$$L : 10^{51} \text{ erg/s}$$

$$E : 12 \text{ MeV}$$

$$T : 10 \text{ s}$$

What is the issue in the phases?

	Presupernova phase	Burst phase Accretion phase	Cooling phase
天文天体物理	親星	親星	星形成率 IMF (星の初期質量分布とBH率)
	Extremely nearby	Galactic	Extra Galactic
原子核物理		原子核EOS 元素合成 (<Fe) Sterile neutrino, axion?	原子核EOS 元素合成 (weak r) Sterile neutrino, axion?
		Galactic	Galactic
		爆発メカニズム	
		Galactic	

Three phases of supernovae

	Presupernova phase	Burst phase Accretion phase	Cooling phase
天文天体物理	親星	親星	星形成率 IMF (星の初期質量分布とBH率)
	Extremely nearby	Galactic	Extra Galactic
原子核物理		原子核EOS 元素合成 (<Fe) Sterile neutrino, axion?	原子核EOS 元素合成 (weak r) Sterile neutrino, axion?
		Galactic	Galactic
		爆発メカニズム	
		Galactic	

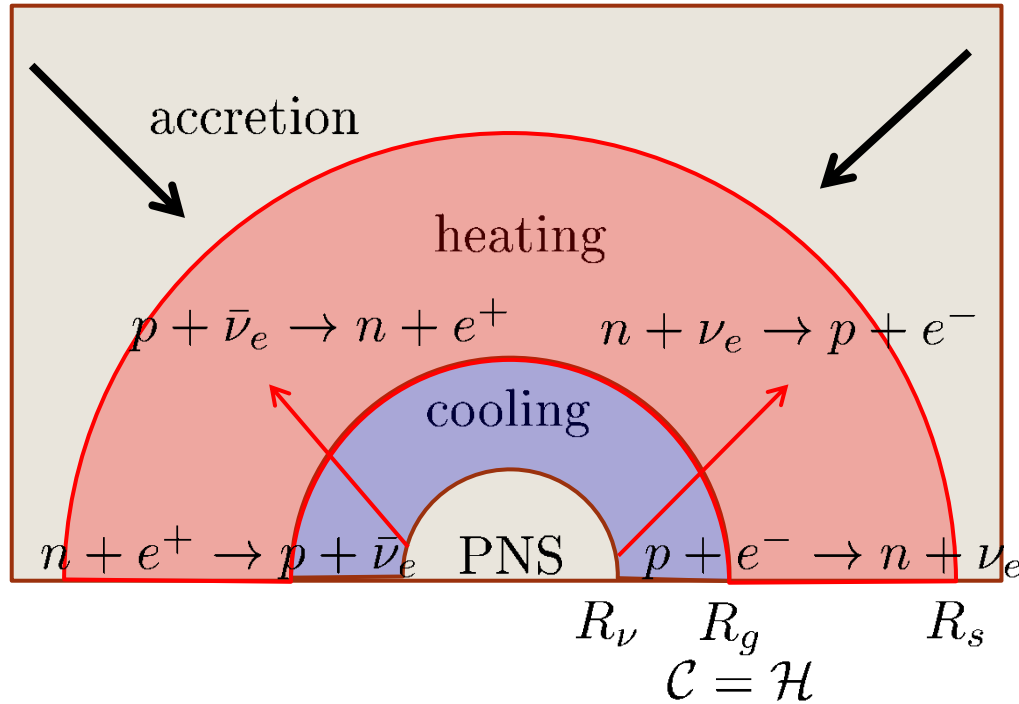
Q. 親星が決まるのがなぜそんなに大事？

A. **親星の構造が爆発の可否**を決めるから。

以下にそのロジックをしめす。

Neutrino Heating Mechanism

Janka 01

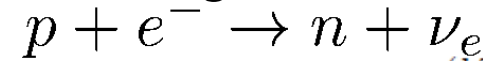


$$C \propto 1/r^9 \quad \mathcal{H} \propto 1/r^5$$

If we assume hydrostatic profile
with pressure of radiation dominant.

Above gain radius, the heating is dominant.

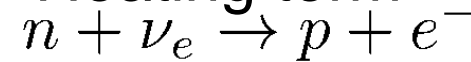
-Cooling term



$$Q_\nu^- = (3\alpha^2 + 1) \frac{\pi \sigma_0 c (kT)^6}{(hc)^3 (m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \\ \times [Y_p \mathcal{F}_5(\eta_e) + Y_n \mathcal{F}_5(-\eta_e)] \\ \approx 145 \frac{\rho}{m_u} \left(\frac{kT}{2 \text{ MeV}} \right)^6 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{proton}} \times \rho_{\text{electron}} (\propto T^3) \times \sigma (\propto T^2) \times \bar{E} (\propto T)$$

-Heating term



$$Q_\nu^+ = \frac{3\alpha^2 + 1}{4} \frac{\sigma_0 \langle \epsilon_{\nu_e}^2 \rangle}{(m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e}}{4\pi r^2 \langle \mu_\nu \rangle} (Y_n + 2Y_p) \\ \approx 160 \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e, 52}}{r_7^2 \langle \mu_\nu \rangle} \left(\frac{kT_{\nu_e}}{4 \text{ MeV}} \right)^2 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{neutron}} \times \rho_{\text{neutrino}} (\propto T_\nu^3 / r^2) \times \sigma (\propto T_\nu^2) \times \bar{E} (\propto T_\nu) \\ \rho \propto r^{-3} \quad T \propto r^{-1}$$

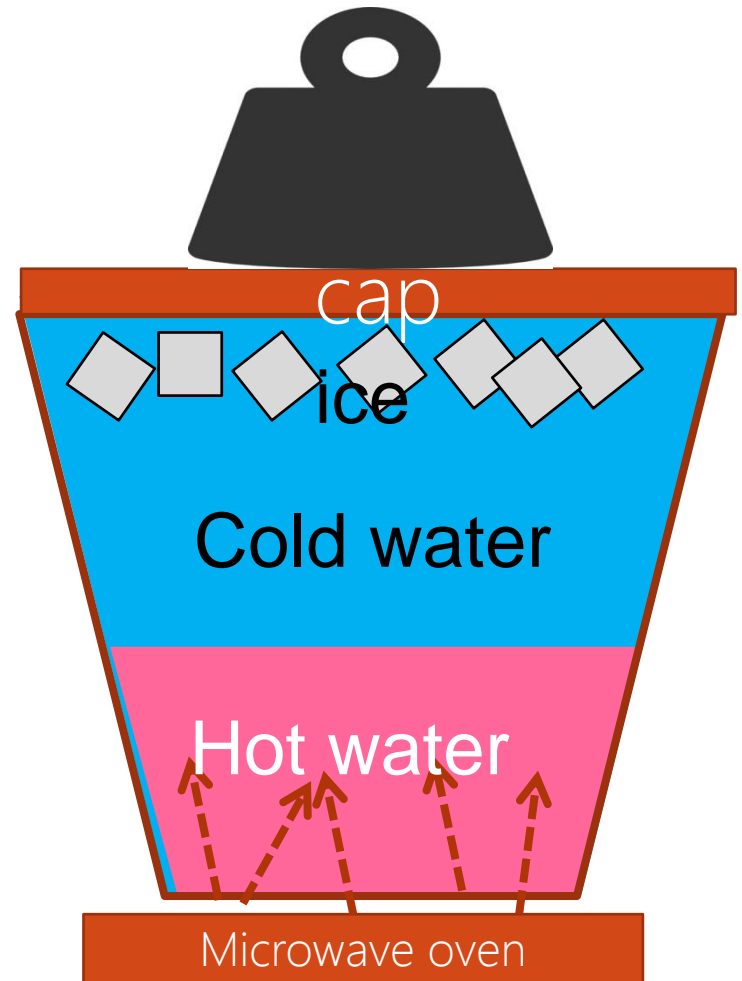
Analogy

一番簡単には上の錘の重さと
電子レンジの出力の勝負

錘の重さ = 衝撃波への質量降着率
出力 = ニュートリノの光度

錘の重さ > ニュートリノの光度
なら爆発しない

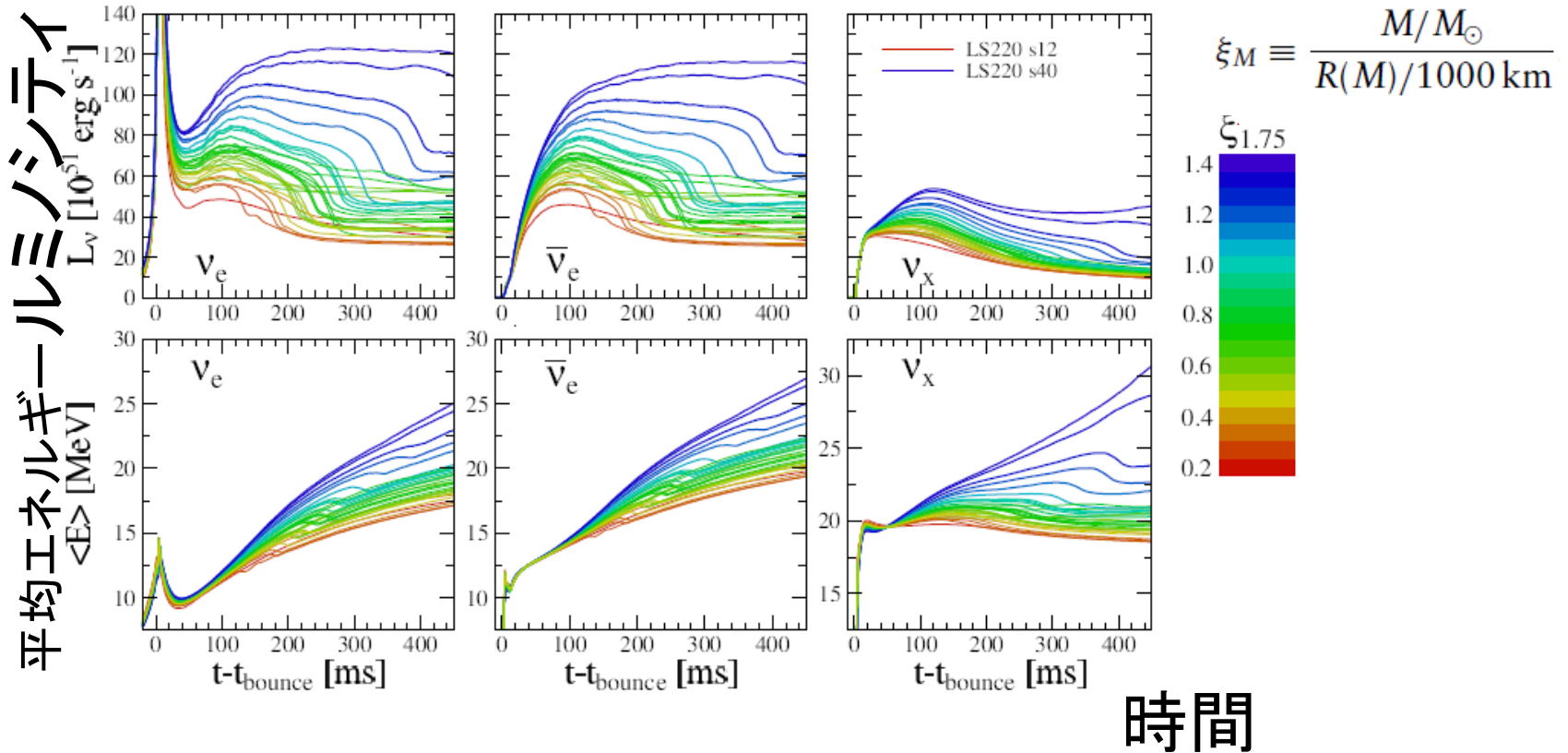
錘の重さ < ニュートリノの光度
なら爆発する



ただし、ニュートリノの光度も結局錘の重さで決まる。
超新星は錘の重さの1パラメータで表されるシステム！

Time Evolution of ν Luminosity

O' Connor and Ott 2012



青：重い星（質量降着率が高い）

赤：軽い星（質量降着率が低い）

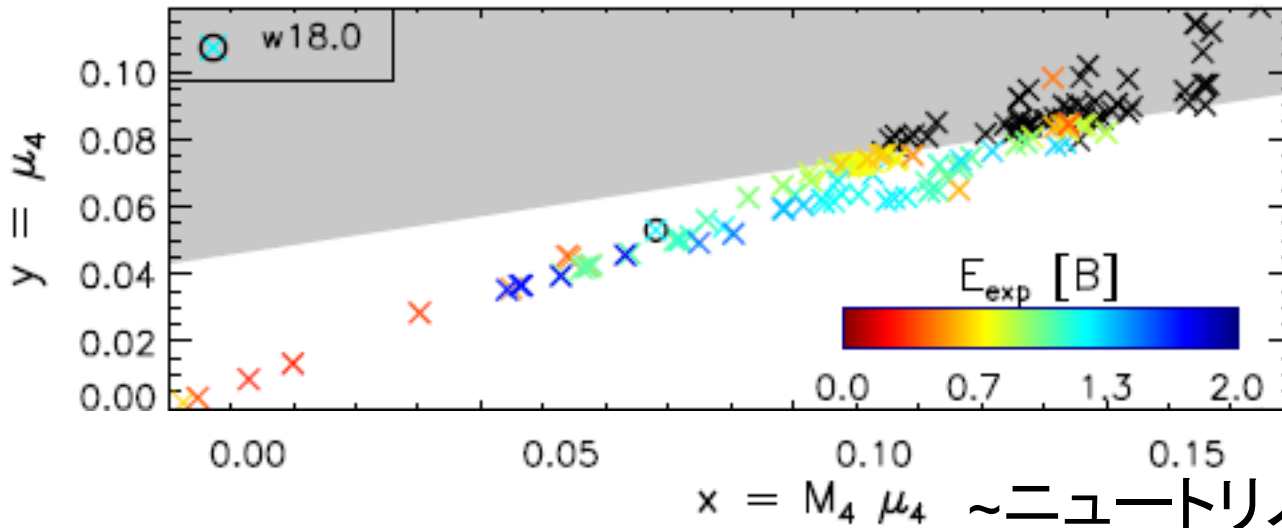
ルミノシティから星の軽重（質量降着率）の情報を得る。

Mass accretion vs neutrino heating

Ertl+ 2015

1D simulation

Phenomenological ν -transport

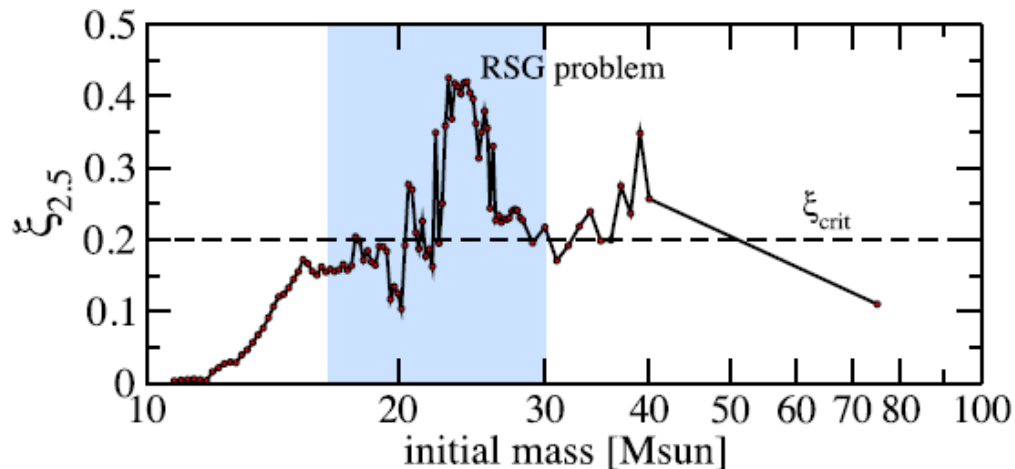


$$\mu = \frac{dM}{dr}$$

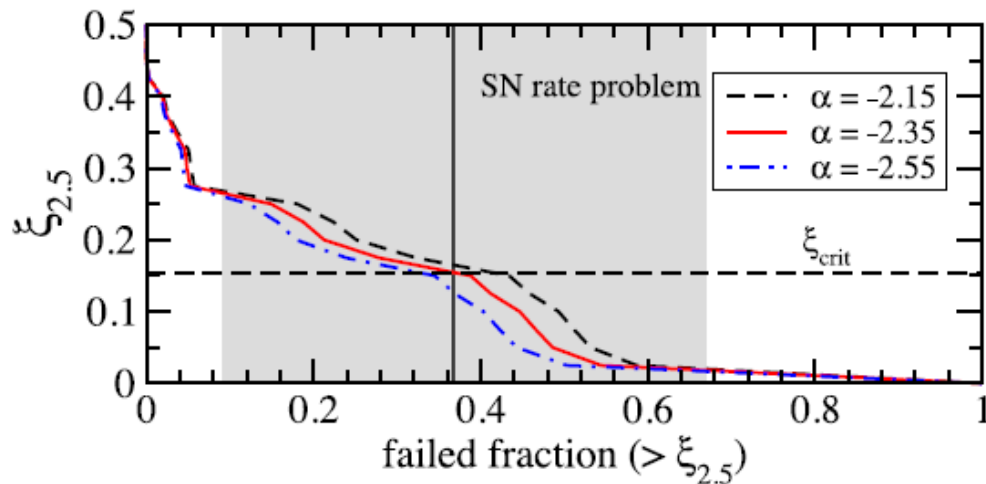
- (1) 質量降着率 $>$ ニュートリノの光度なら爆発しない
 - (2) 質量降着率 $<$ ニュートリノの光度なら爆発する
 - (3) ニュートリノの光度も結局質量降着率で決まる。
 - (4) 質量降着率は親星の構造で決まる
- 親星の構造で爆発の可否はきまる！

RSG problem & SN rate problem

Horiuchi+ 2014



あると以上が爆発しないとすると、二つの問題が同時に解決。



Red supergiant problem:
16-30M_sの親星の超新星爆発が観測されない。

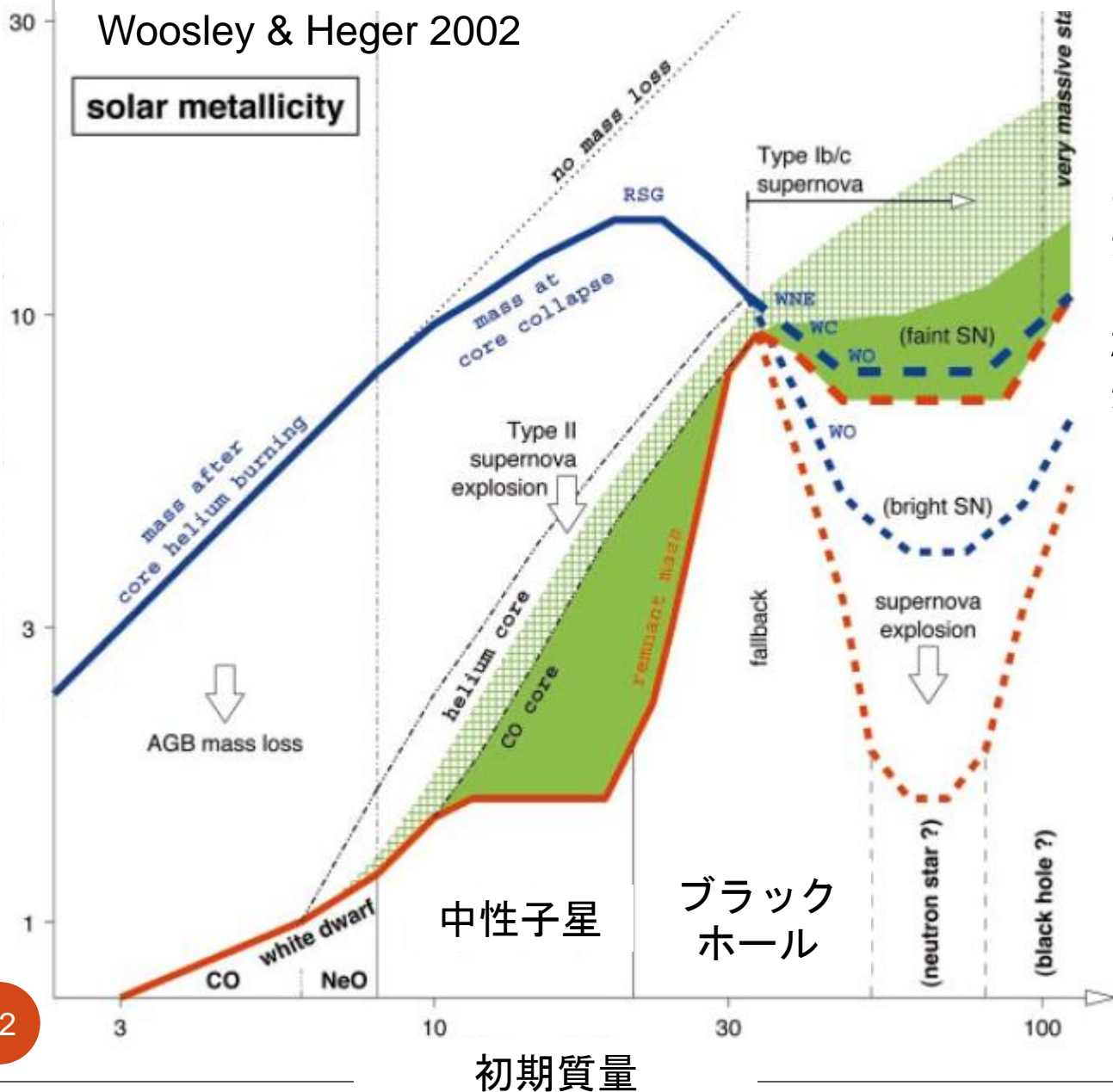
SN rate problem:

星形成率から予想される超新星爆発の数に対して現実の数が少ない

Fate of the massive stars

Woosley & Heger 2002

solar metallicity



星の進化計算からの定性的予想

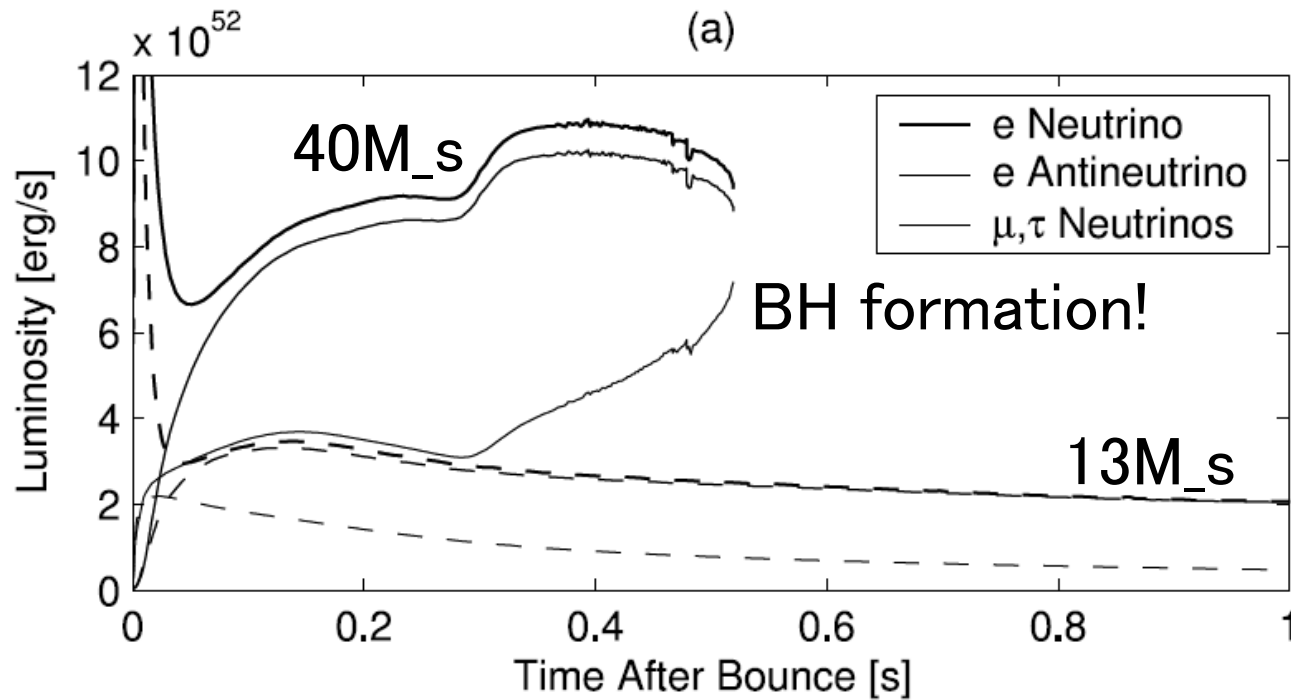
~8-20 M_{\odot} ぐらいが超新星爆発を起こして中性子星を作る
 20-40 M_{\odot} ぐらいで、爆発せずにBHになる。

シミュレーション技術が発達して、この定性的な図を定量的にする。

中性子星

ブラックホール

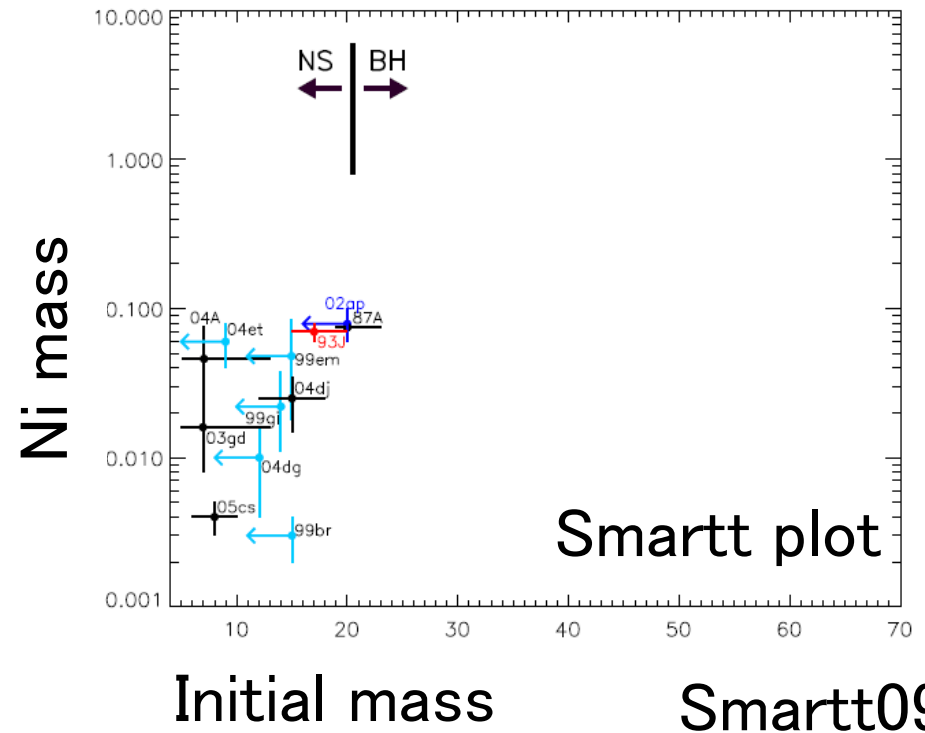
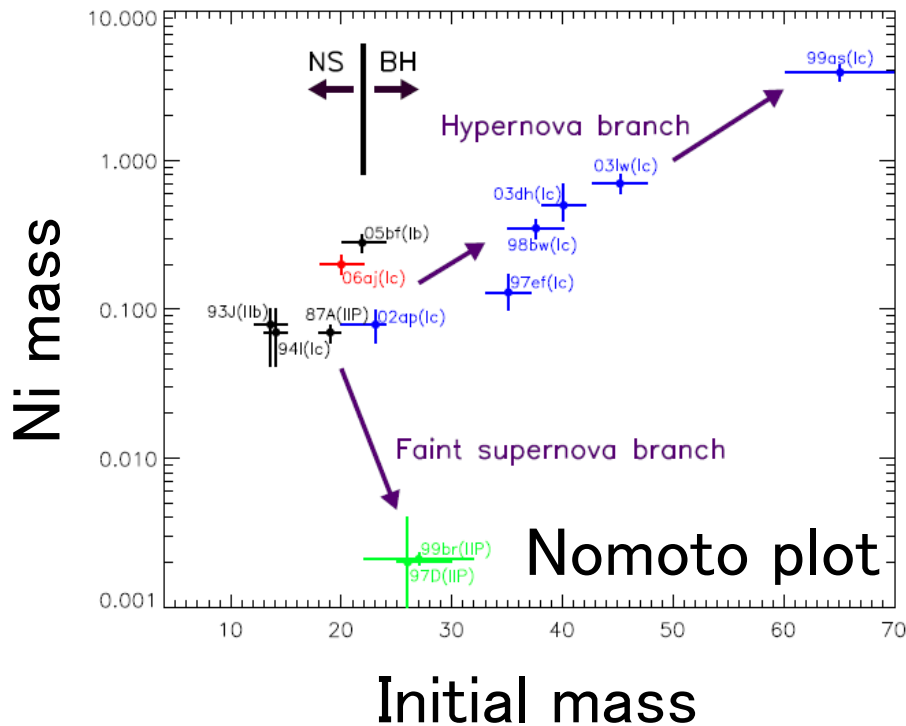
BH forming core-collapse



Liebendoerfer+2004

BH を作る場合その直前でニュートリノ光度が上がる。

Origin of faint supernovae



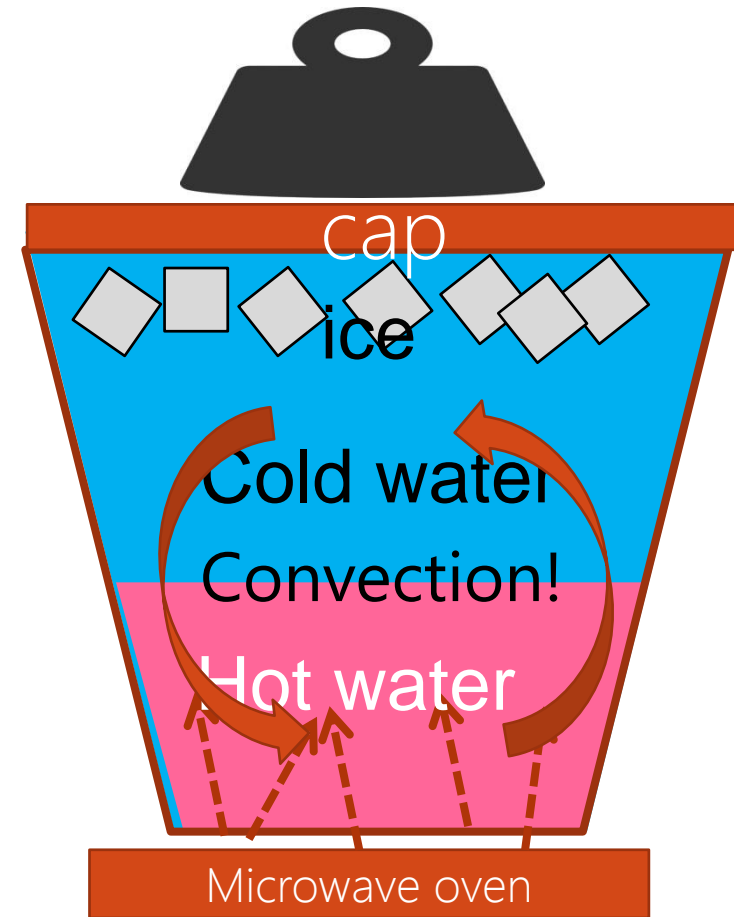
もしfaint SupernovaがGalacticで起きたら、
 ν の観測をすれば起源が分かる！
 重い星でBH形成をするときにはその直前で ν 光度が高い。
 軽い星でNSができる場合には ν 光度がそれほど高くない！

Analogy

もう一步複雑にすると、
下の熱を上へ伝える機構の効率が問題になる。

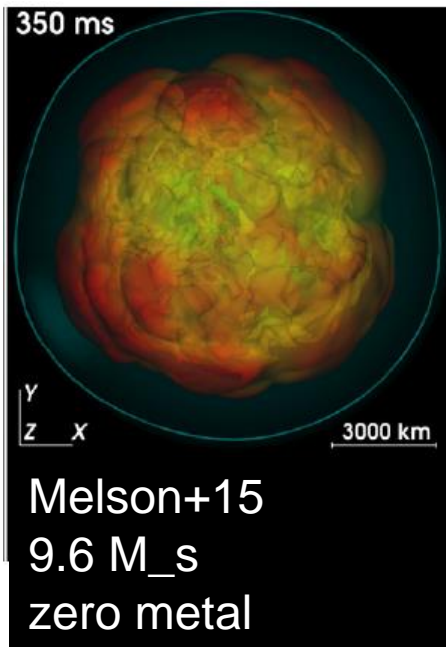
対流など...これは3次元の高解像度
計算をしないとイケない。

回転、磁場などによっても変わる。



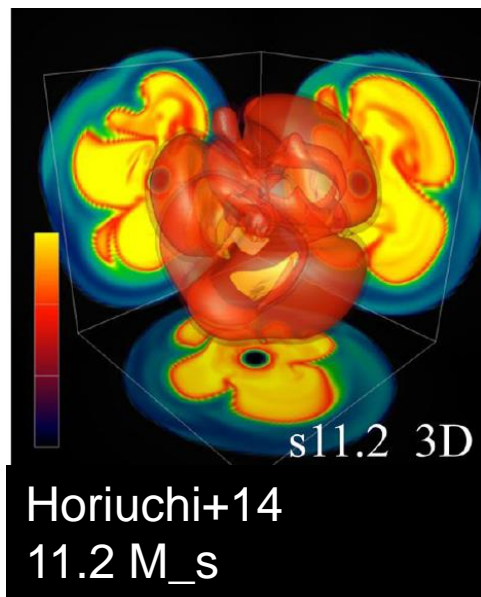
Variant of v-heating mechanism

$M < 10M_s$



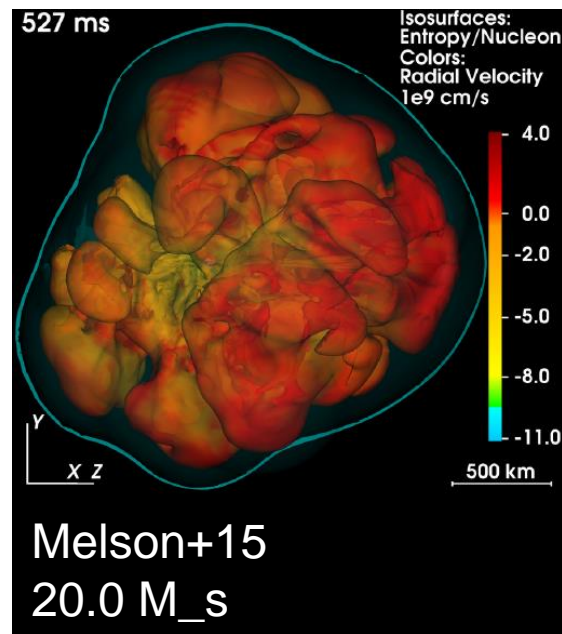
1次元でも爆発！
v加熱のみで。
8.8 M_s ,
Kitaura+06が有名

$M < 15M_s$



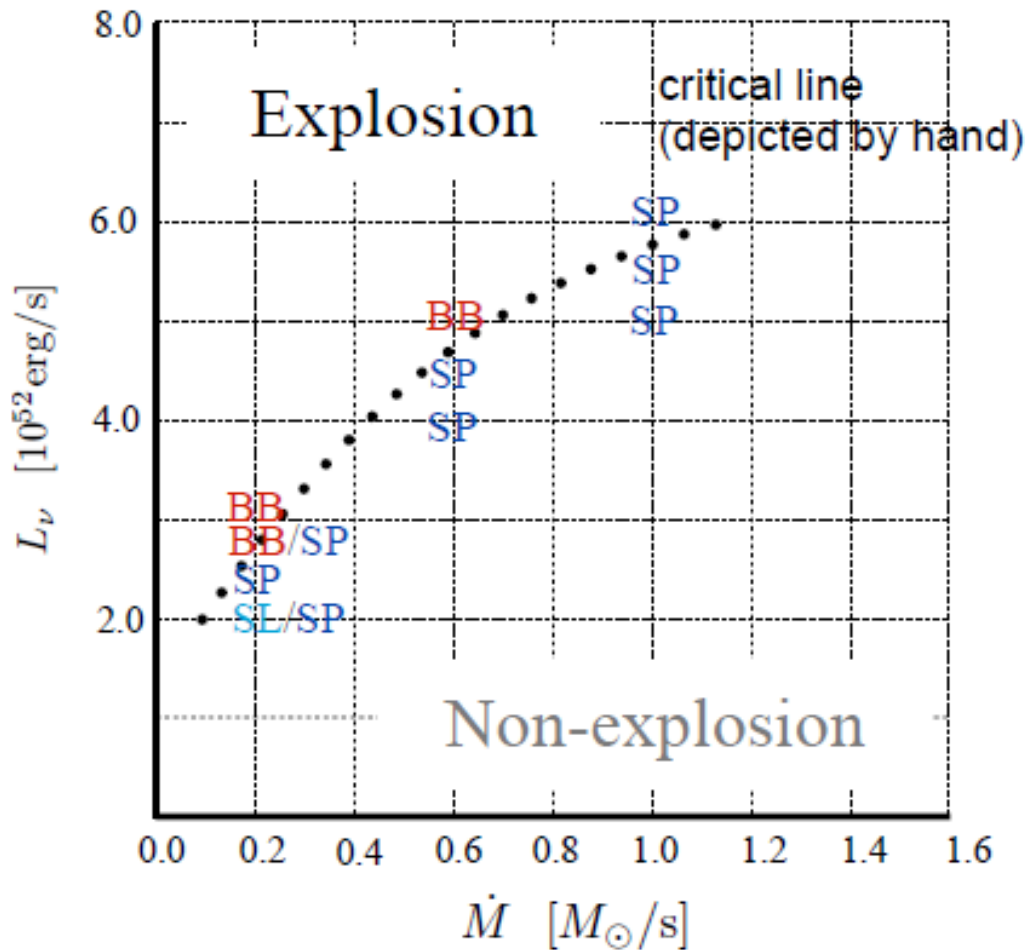
1次元では爆発し
ない。3次元で対
流が効いて爆発。

$M < 40M_s$



1次元で爆発しない。
SASIが起こって爆発。
一般に爆発しづらい？

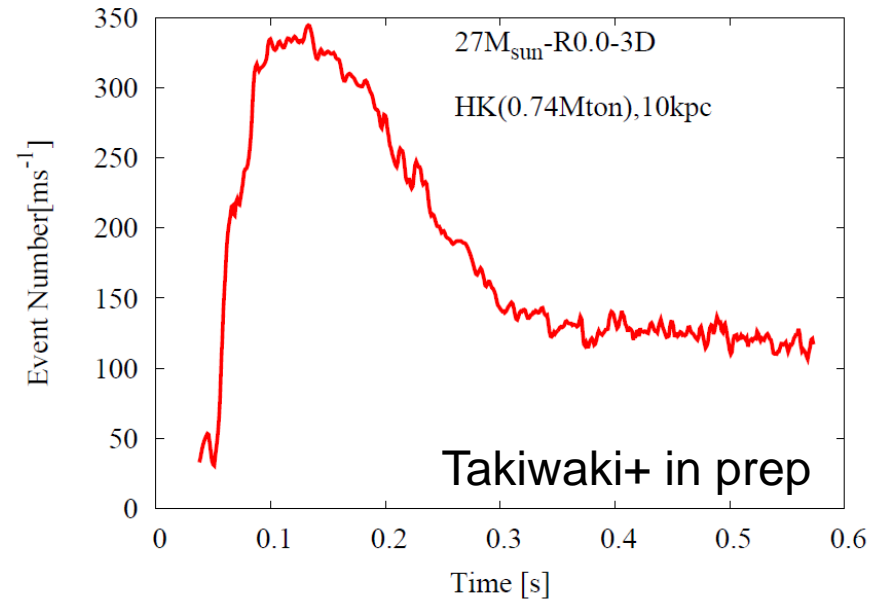
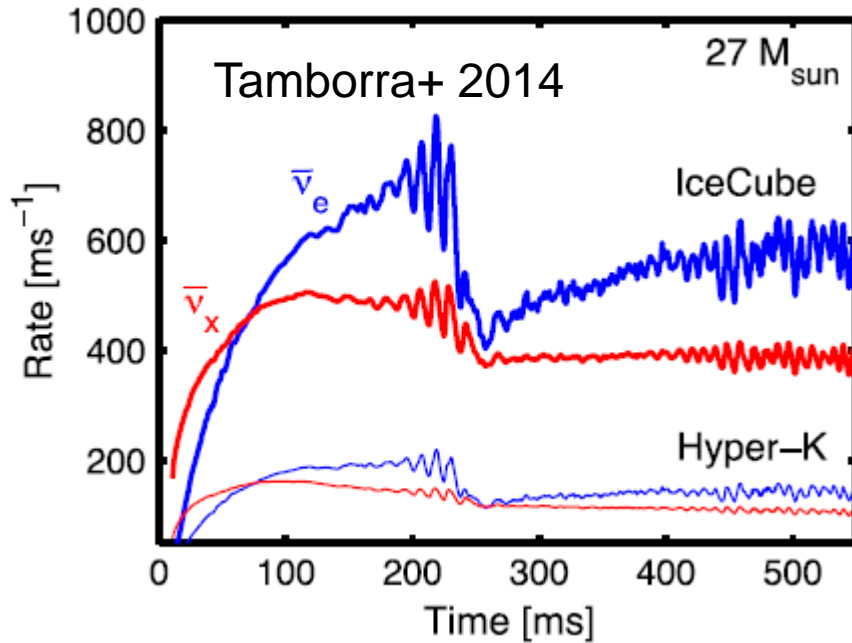
Flow PatternとMdot-L平面



ニュートリノ加熱が優勢な側でコンベクションが発達しやすい。

SASI+爆発は難しい (不可能とは言っていないし、実際モデルもある。Melson+15)

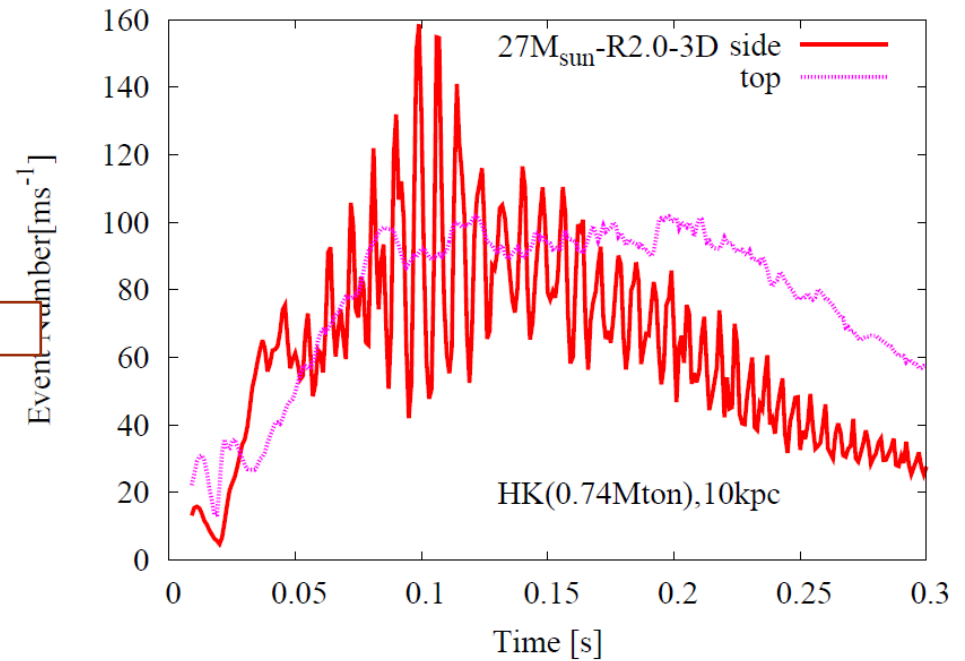
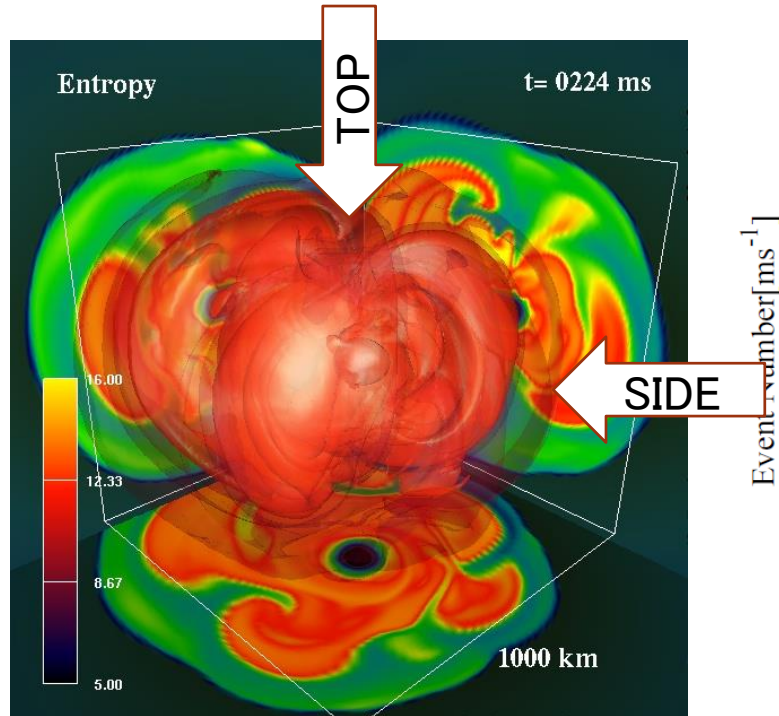
Neutrino signals from no-rotating model



SASIによる揺れがニュートリノ観測に現れる。

SASIの強さと見る方向によってはうまく見れない可能性も。

Neutrino signals from rotating model



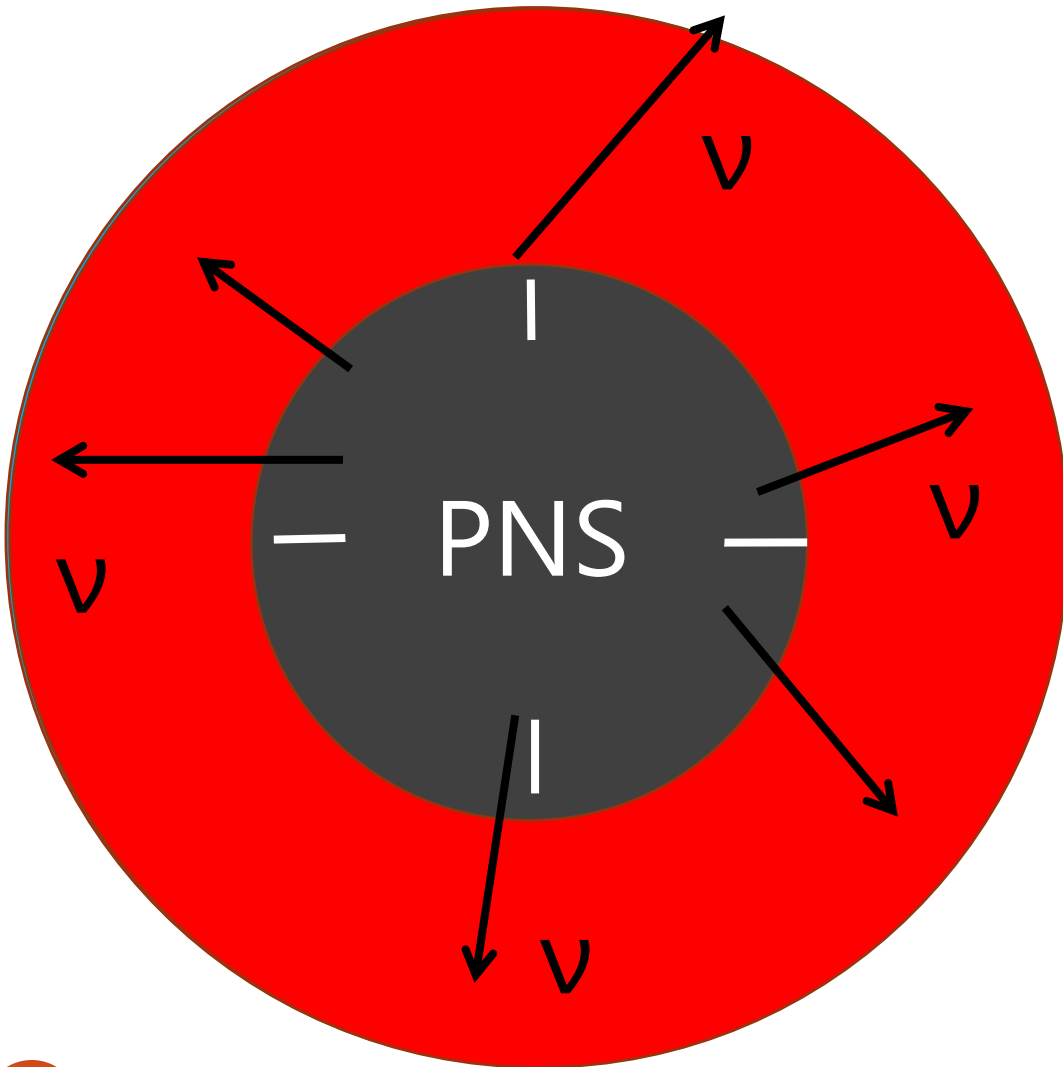
Takiwaki+ in prep

Period of spiral mode is extracted by ν -signal

Three phases of supernovae

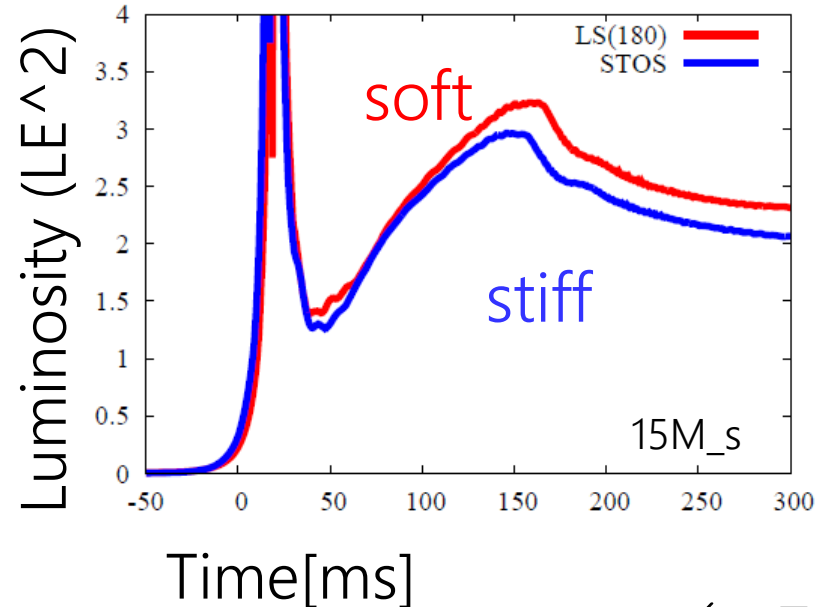
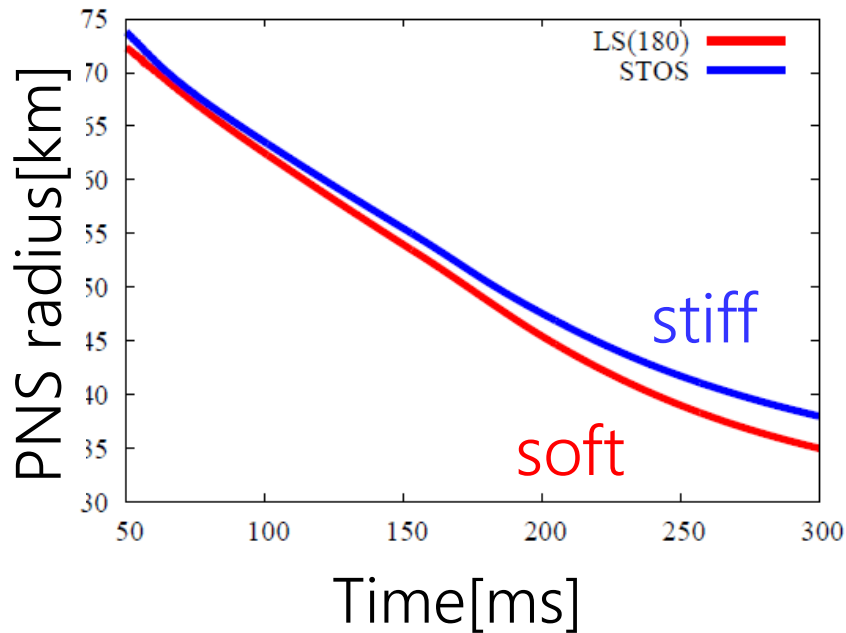
	Presupernova phase	Burst phase Accretion phase	Cooling phase
天文天体物理	親星	親星	星形成率 IMF (星の初期質量分布とBH率)
	Extremely nearby	Galactic	Extra Galactic
原子核物理		原子核EOS 元素合成 (<Fe) Sterile neutrino, axion?	原子核EOS 元素合成 (weak r) Sterile neutrino, axion?
		Galactic	Galactic
		爆発メカニズム	
		Galactic	

Basic idea to connect EOS and Explosion



1. The PNS gradually shrinks by the gravity.
2. E_{grav} is released.
3. E_{thermal} is increased.
4. The L_{ν} and sonic waves are emitted from the surface of PNS.

Neutrino Luminosity

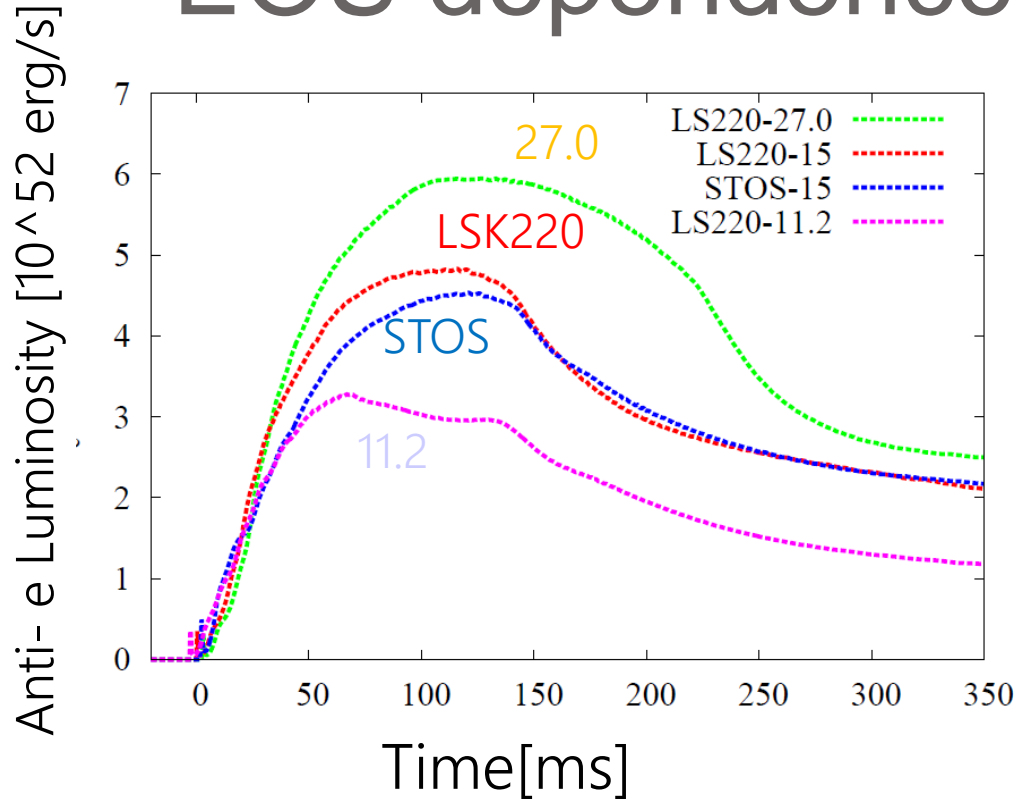


$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \sum_{i=\nu_e, \bar{\nu}_e} L_i \left(\frac{T_i}{4.5 \text{ MeV}} \right)^2$$

LS(K220): Soft EOS => rapidly shrink => Large L_ν

Shen: Stiff EOS => slowly shrink => small L_ν

EOS dependence on Luminosity

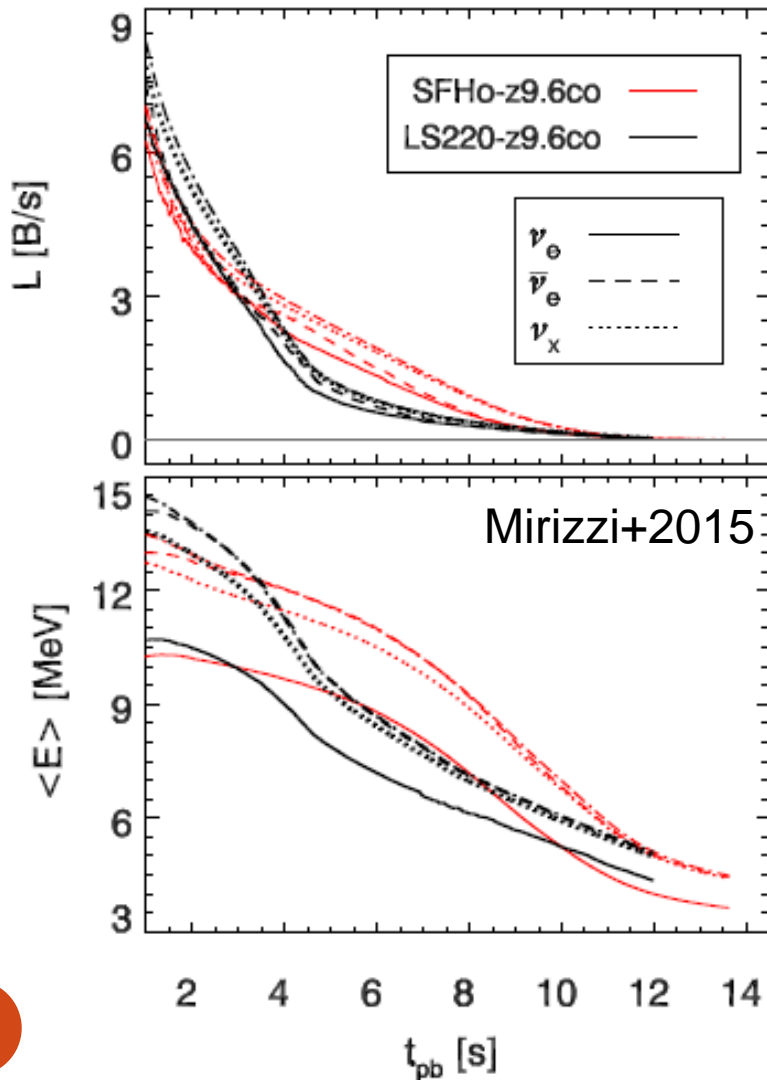


Accretion phaseでは
EOS依存性は
親星依存性より弱い。

ニュートリノ観測は親星推定に使える！

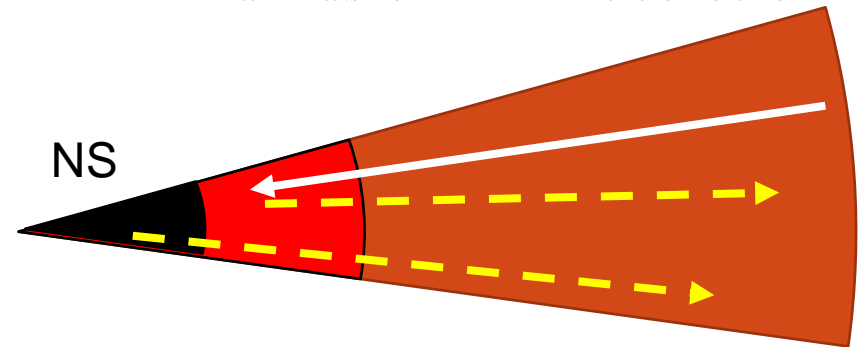
ただし、正確な親星の大きさを出すとき、EOSの不定性がエラーとなるかもしれない。

EOS dependence on Luminosity



Cooling phase ではEOS依存性は大きくでる。

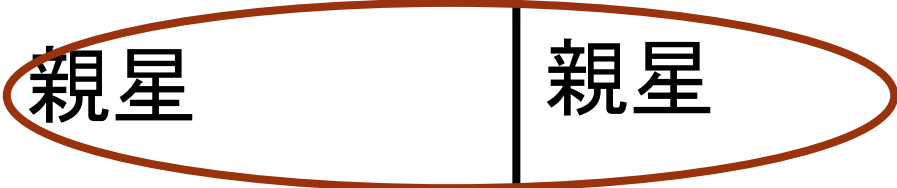
$$L = L_{\text{diffusion}} + L_{\text{accretion}}$$



Cooling phaseでEOSを決めて、そのEOSを使ってaccretion phaseのモデルをあわせる戦略は可能か？

Next Strategy

	Presupernova phase	Burst phase Accretion phase	Cooling phase
天文天体物理	親星	親星	星形成率 IMF (星の初期質量分布とBH率)
	Extremely nearby	Galactic	Extra Galactic
原子核物理		原子核EOS 元素合成 (<Fe) Sterile neutrino, axion?	原子核EOS 元素合成 (weak r) Sterile neutrino, axion?
		Galactic	Galactic
		爆発メカニズム	
		Galactic	



同じ情報？ 違う情報？

Next Strategy

	Presupernova phase	Burst phase Accretion phase	Cooling phase
天文天体物理	親星	親星	
	Extremely nearby	Galactic	
原子核物理		原子核EOS 元素合成 (<Fe) Sterile neutrino, axion?	原子核EOS 元素合成 (weak r) Sterile neutrino, axion?
		Galactic	Galactic
		爆発メカニズム	
		Galactic	

Cooling phaseの情報でEOSを特定して
Accretion phaseでの親星予想を修正する？

原子核EOS

元素合成 (<Fe)

Sterile neutrino, axion?

原子核EOS

元素合成 (weak r)

Sterile neutrino, axion?

まとめ

- 超新星の ν 放出には3つのフェイズがある。
Presupernova, burst-accretion phase, cooling phase
- それぞれで親星、爆発メカニズム、原子核EOSなどが分かる。
○
- Accretion phaseではO-coreあたりの親星の構造がよく分かる。これはPresupernovaeで得られる情報とどう違うのか？
 ν は親星の構造をよく反映するのでfaint supernovaが重い星起源か軽い星起源かは ν 観測ではつきりする。
- 爆発メカニズムは激しければニュートリノの時間変化が特徴的
- 原子核EOSについてはcooling phaseを見るべき。