Pop III 超新星

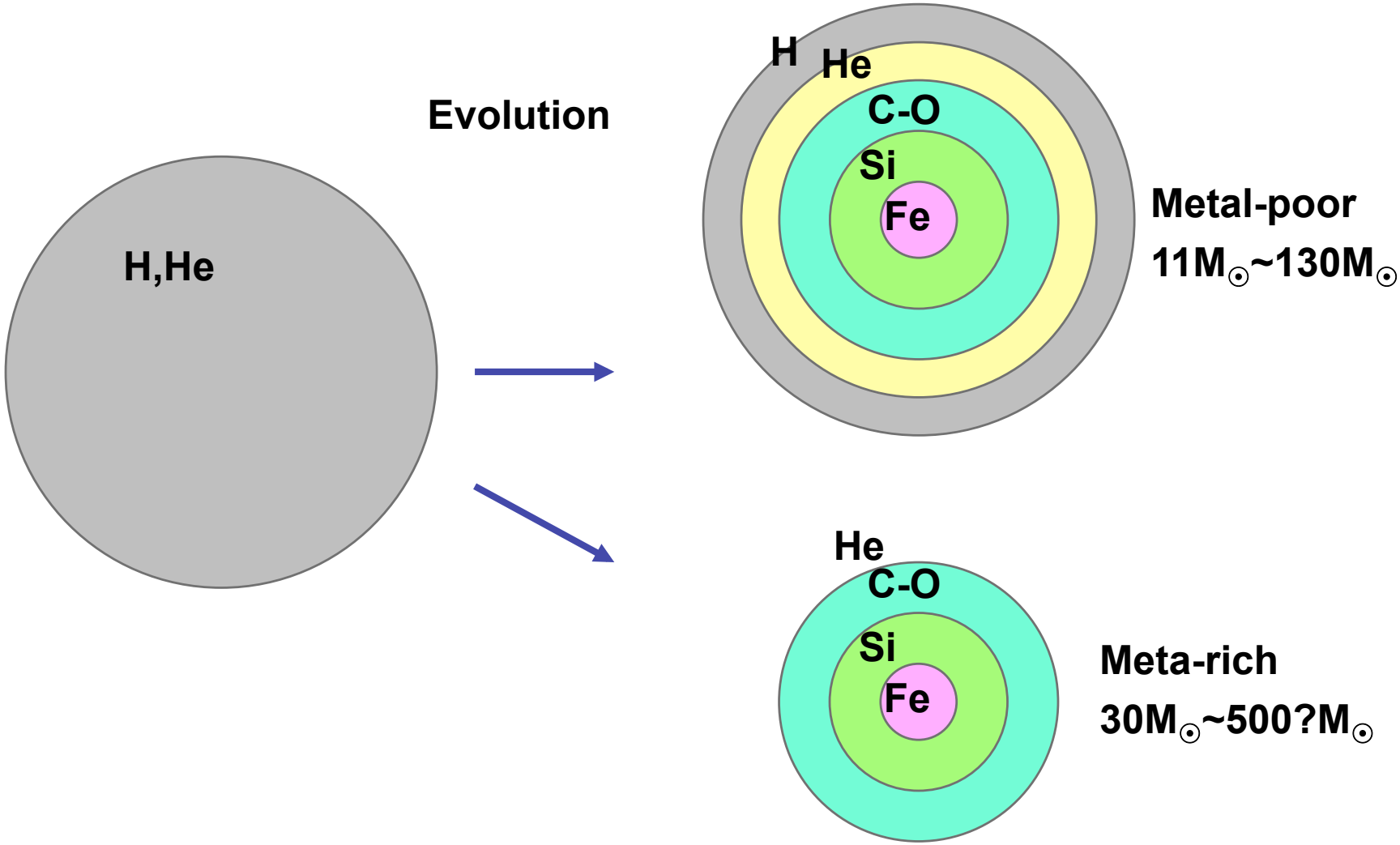
梅田秀之 （東京大学）

2014.1.22　初代星研究会＠鹿児島大学

内容

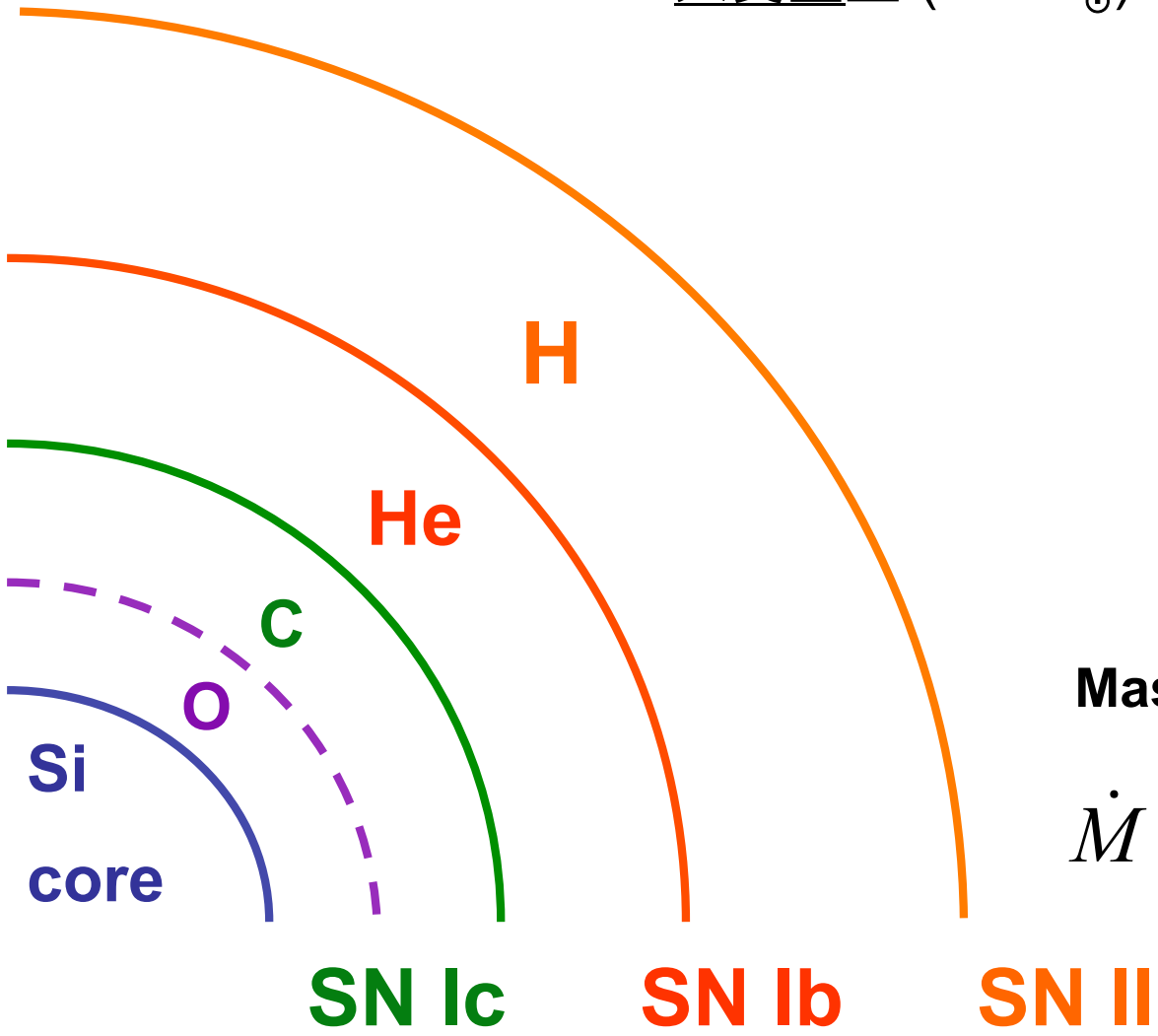
- 現在の超新星
- Pop III 超新星
  - 種類
  - 観測可能性
  - SN1.5
- Pop III 超巨大星の進化と運命

重力崩壊型超新星(II, Ib, Ic 型)



超新星の分類

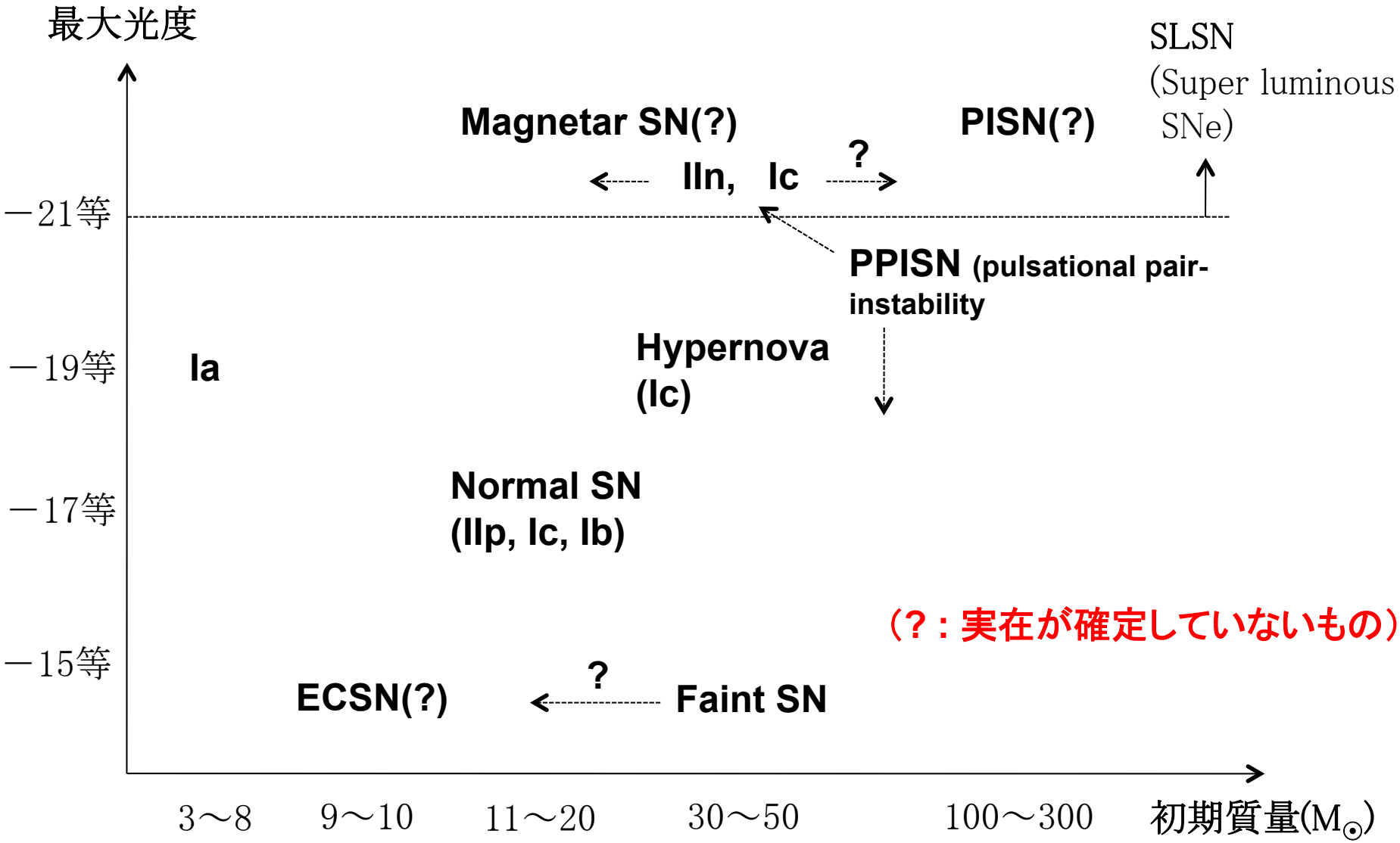
大質量星 (>10M$_\odot$)



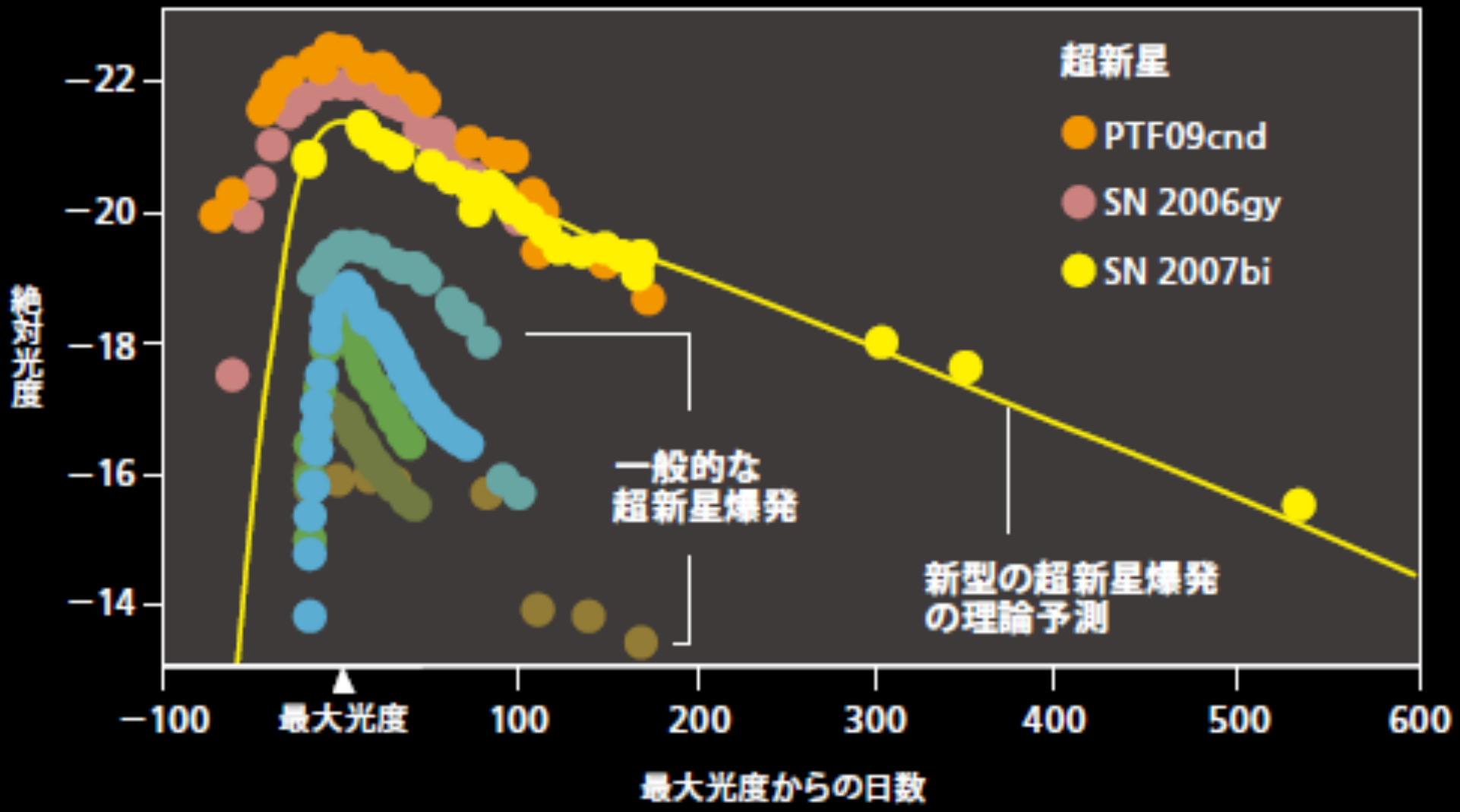
Mass Loss Rate

$$\dot{M} \approx A(L, T_{eff}) Z^{0.5} \frac{L}{T_{eff}}$$

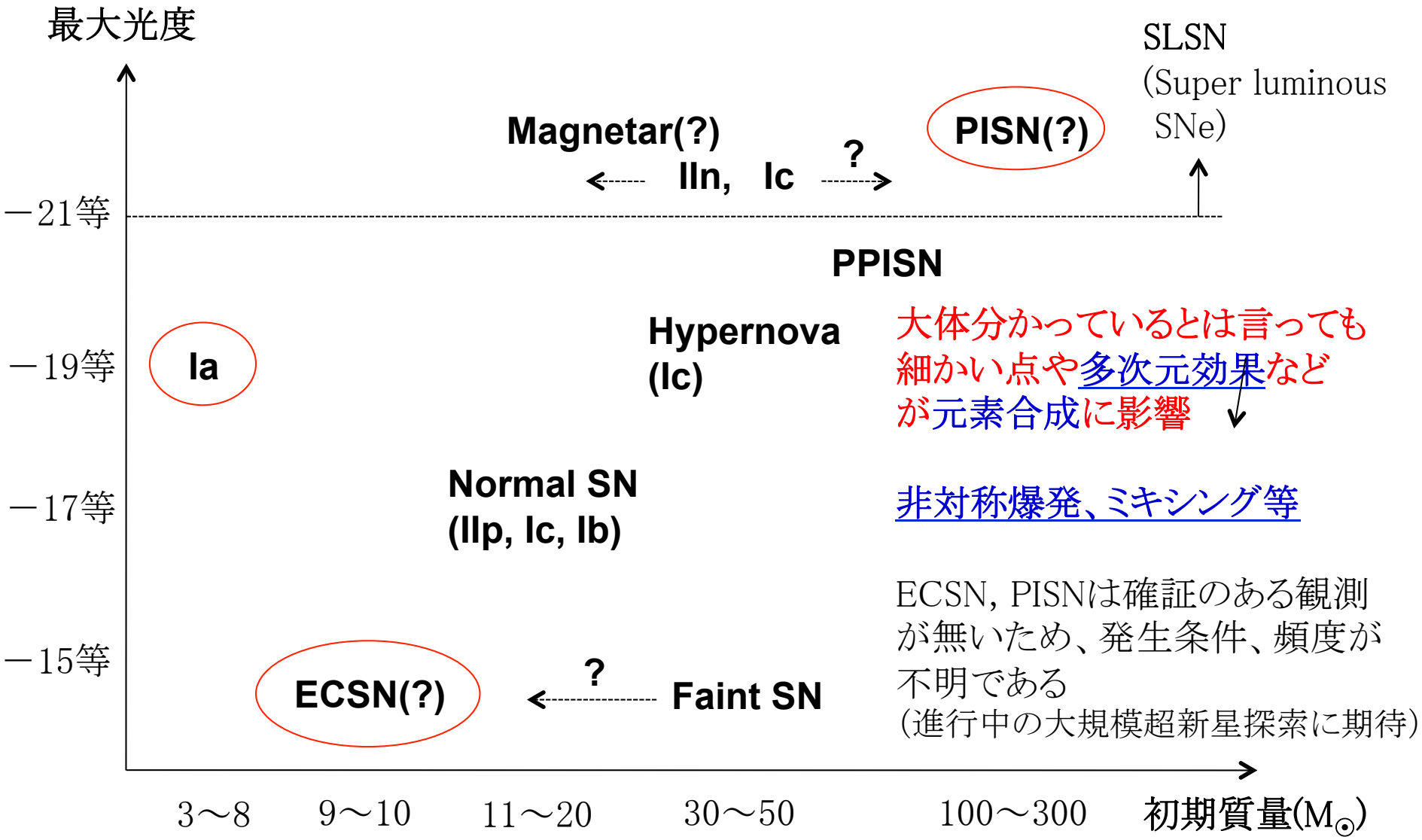
現在の超新星


最大光度
SLSN
(Super luminous SNe)
Magnetar SN(?)
PISN(?)
?
IIn, Ic
−21等
PPISN (pulsational pair-instability
Hypernova
(Ic)
−19等
Ia
Normal SN
(IIp, Ic, Ib)
−17等
（？：実在が確定していないもの）
−15等
?
ECSN(?)
Faint SN
3〜8
9〜10
11〜20
30〜50
100〜300
初期質量(M⊙)

Super luminous Supernova



超新星：爆発機構が「大体」分かっているもの

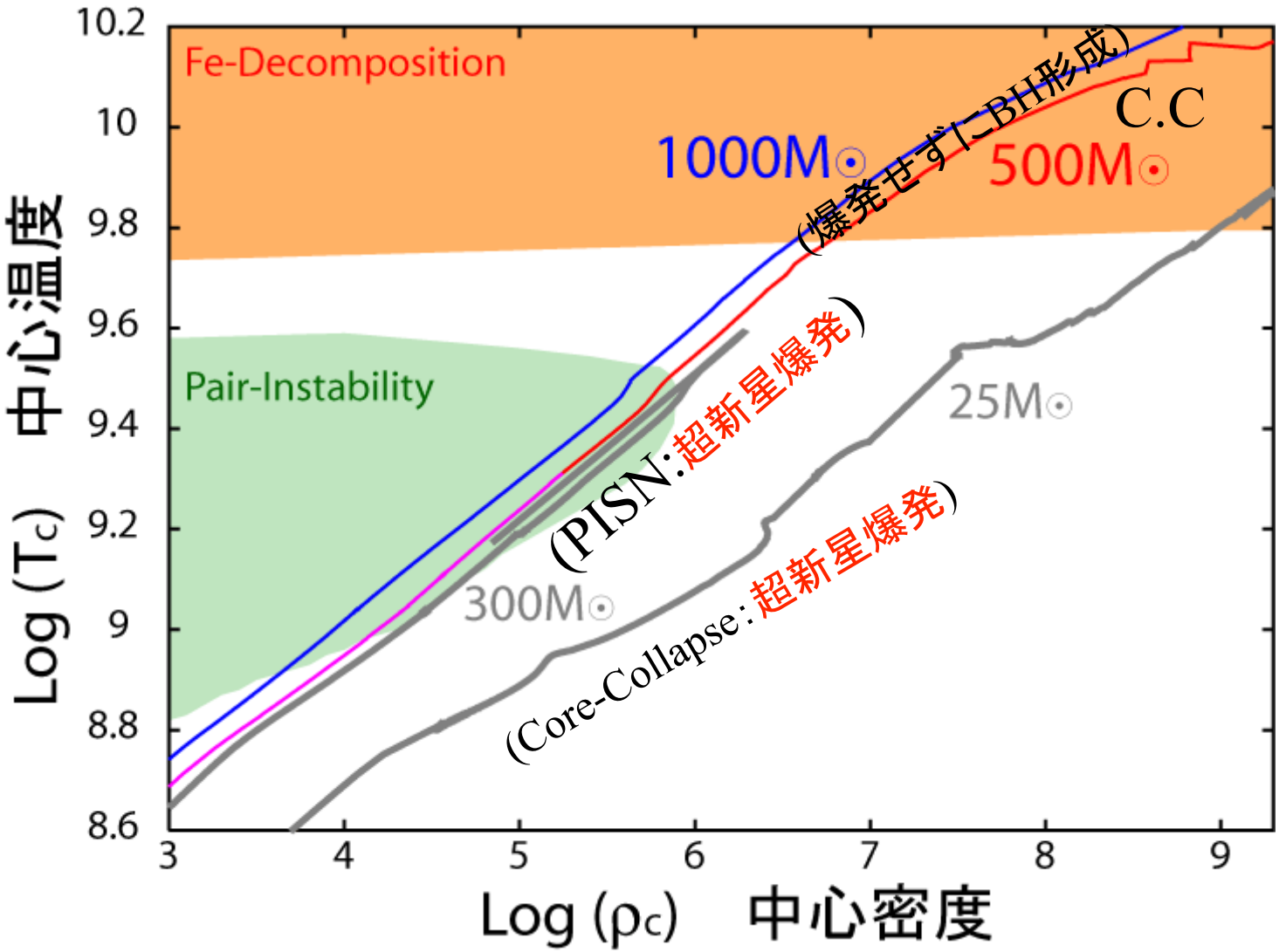


大体分かっているとは言っても
細かい点や多次元効果など
が元素合成に影響

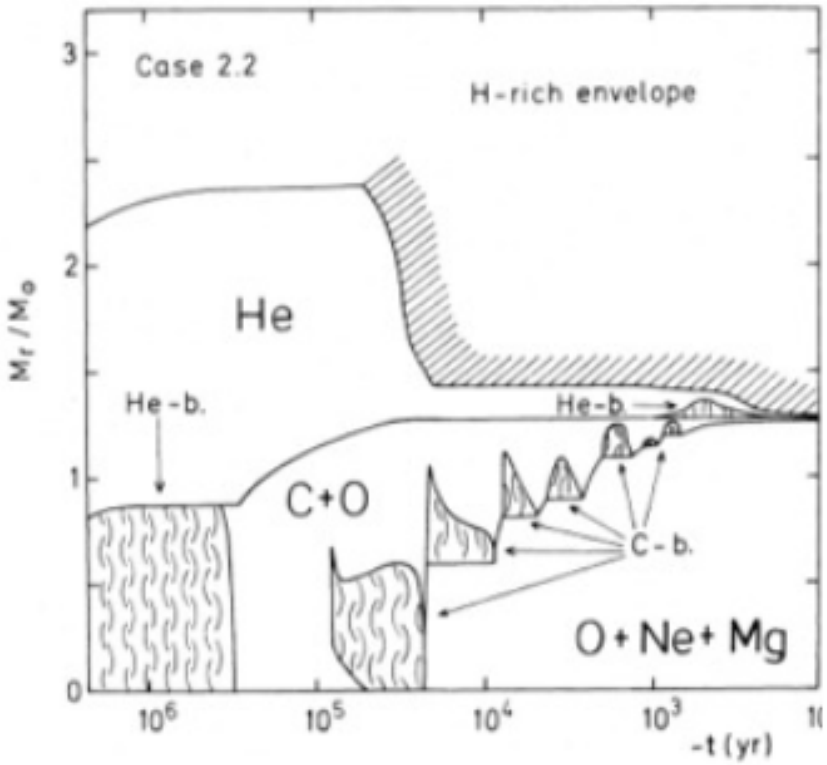
非対称爆発、ミキシング等

ECSN, PISNは確証のある観測
が無いため、発生条件、頻度が
不明である
(進行中の大規模超新星探索に期待)

Pair-instability Supernova



ECSN（電子捕獲型超新星）



(Nomoto 1987)

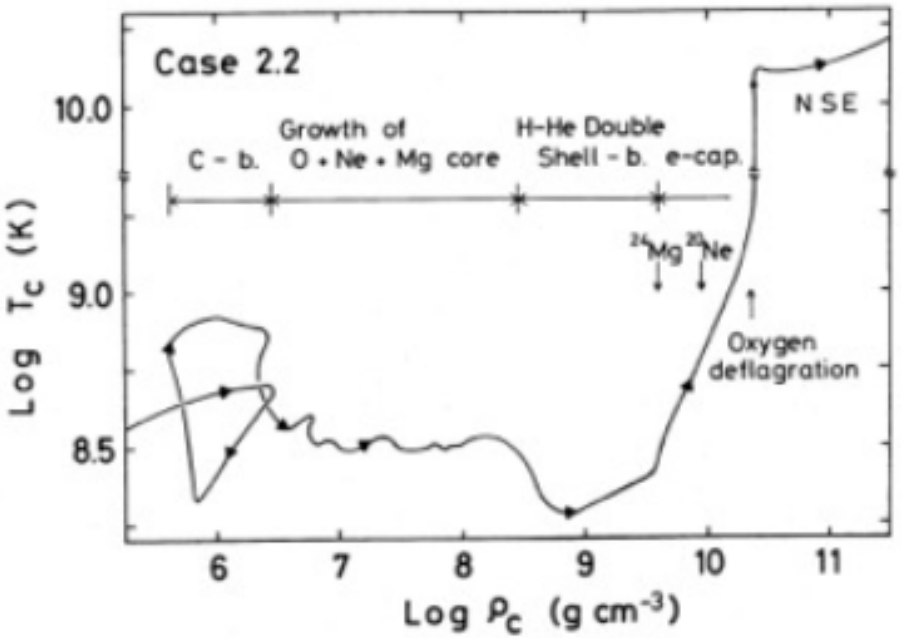


FIG. 4.—Evolutionary track in the central density and temperature diagram

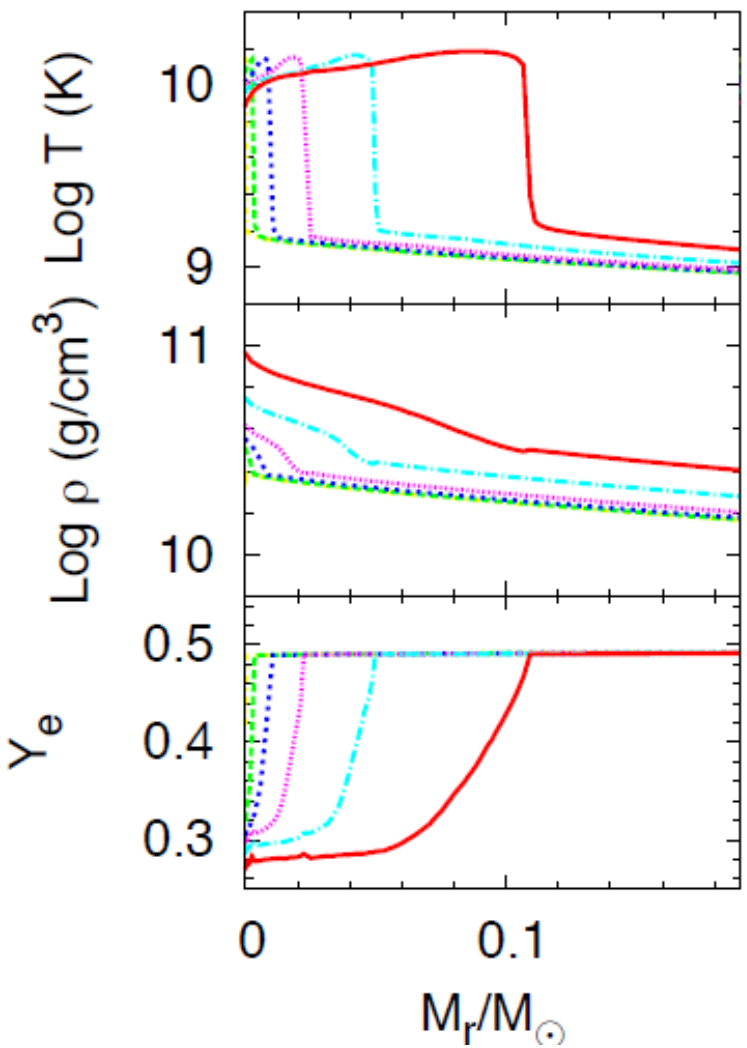
ECSN: ONeMg コアが殻燃焼で成長。限界質量（チャンドラセカールmass）に達し崩壊。
Normal Core collapse: Si燃焼後にできたFe核が重力崩壊。

⇒　どちらも中性子星を形成するが、作る機構が違うため基本的にその質量は異なる。

ECSN（電子捕獲型超新星）

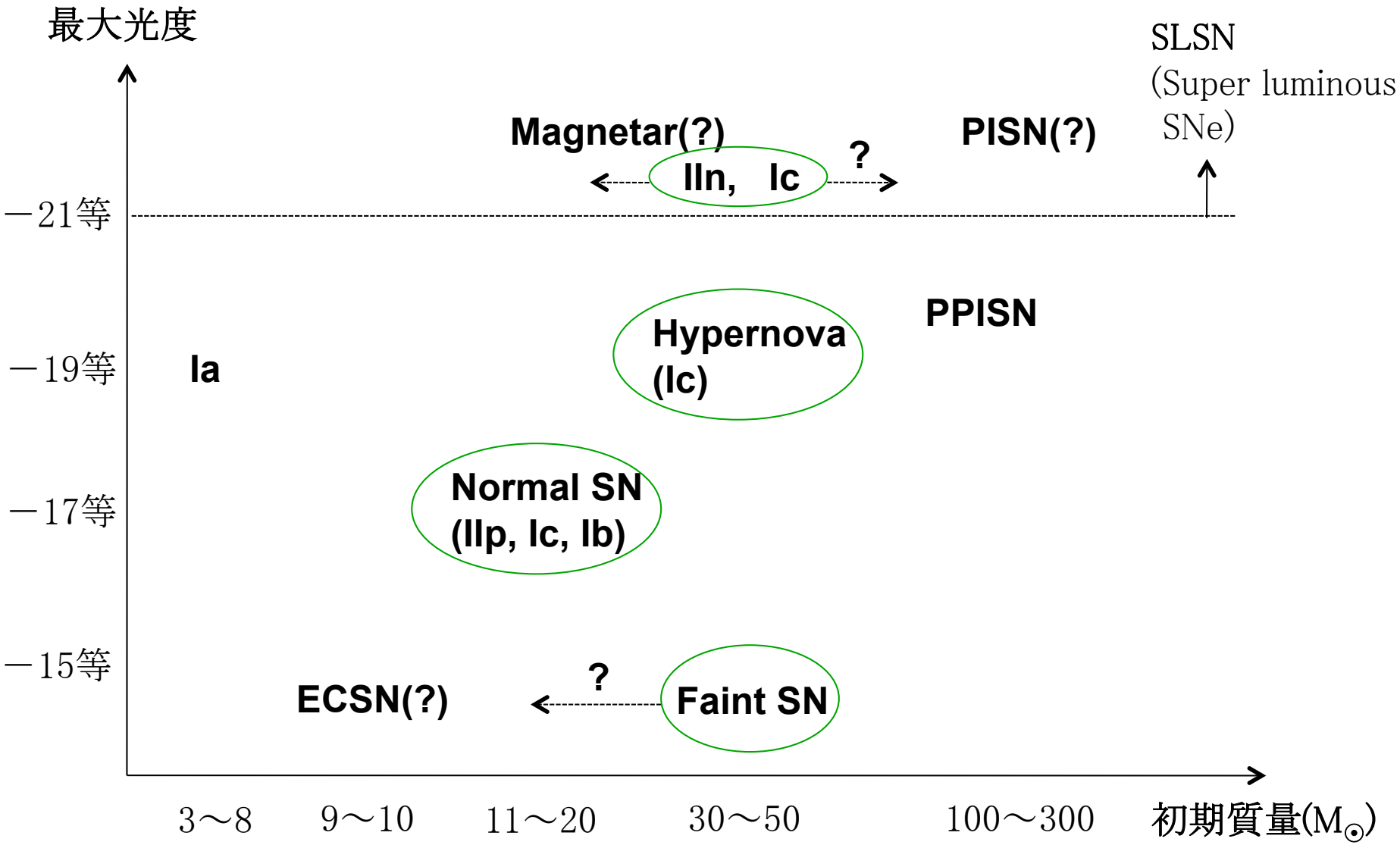
Until core collapse

Takahashi, Yoshida, Umeda
ApJ, 771, 28 (2013)



- O+Ne burning causes deflagration in the degenerate core.
- convective energy transport is solved.
- NSE is achieved behind the deflagration front.
- in the NSE region, intense electron capture reduces Ye.
- Ye reduction cause core contraction.

実際観測されているが爆発機構が良くわからないもの



通常の超新星の爆発研究の現状

- ニュートリノ加熱

遅延爆発モデル＋SASI

1D – X

2D、3D – △

（爆発するがエネルギーが小さい

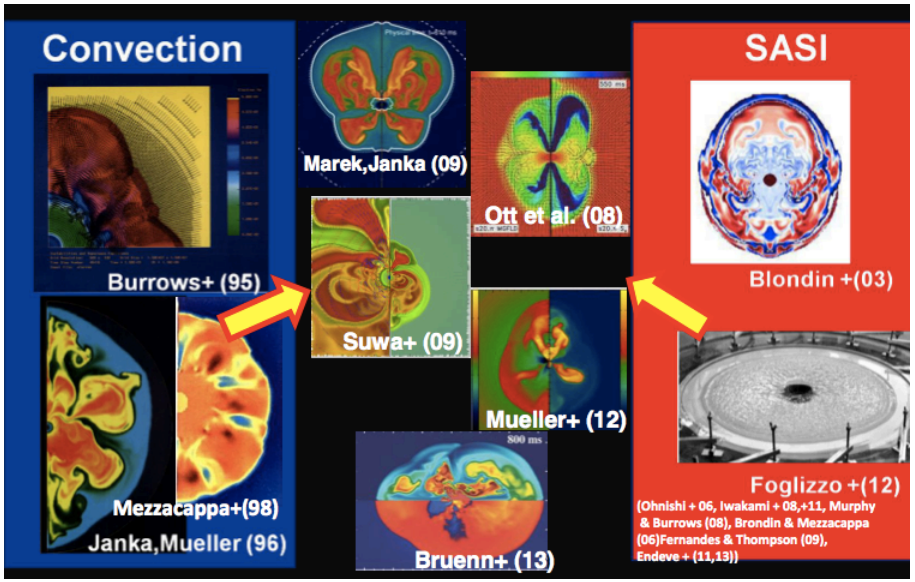
実際の超新星の 1/3~1/10 程度）

より長時間計算を行えば爆発エネルギーが増えるという示唆（期待）もある。

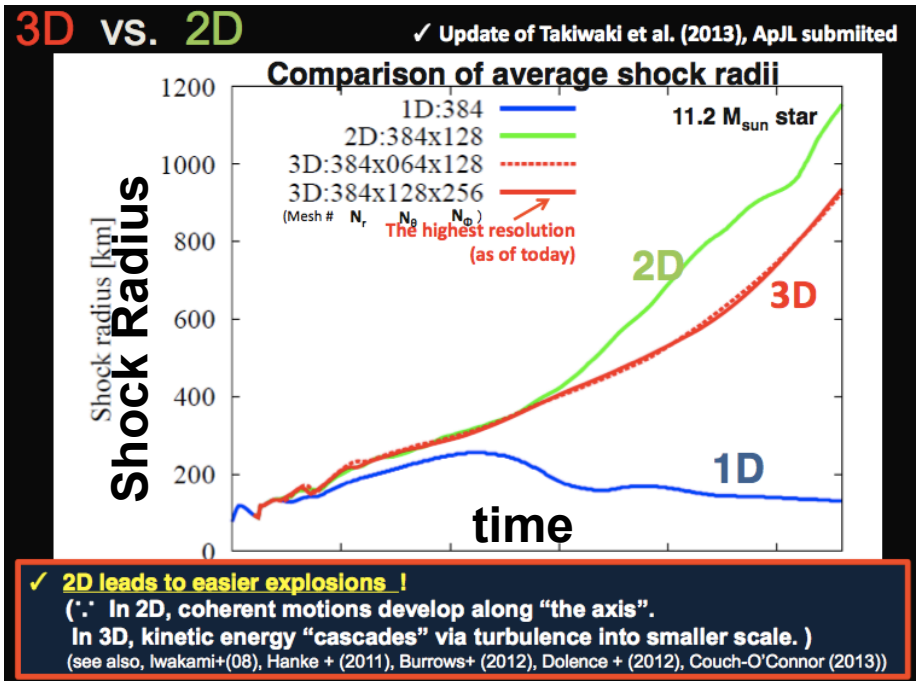
（これらのモデルが正しい場合には r−プロセス元素合成は起きない）

- 2D vs 3D

Takiwaki et al. 2013 など、京を使った計算
(まだよくわかっていない



K.Kotake Supernovae and GRBs 2013 @ YITP, Kyoto Univ.より

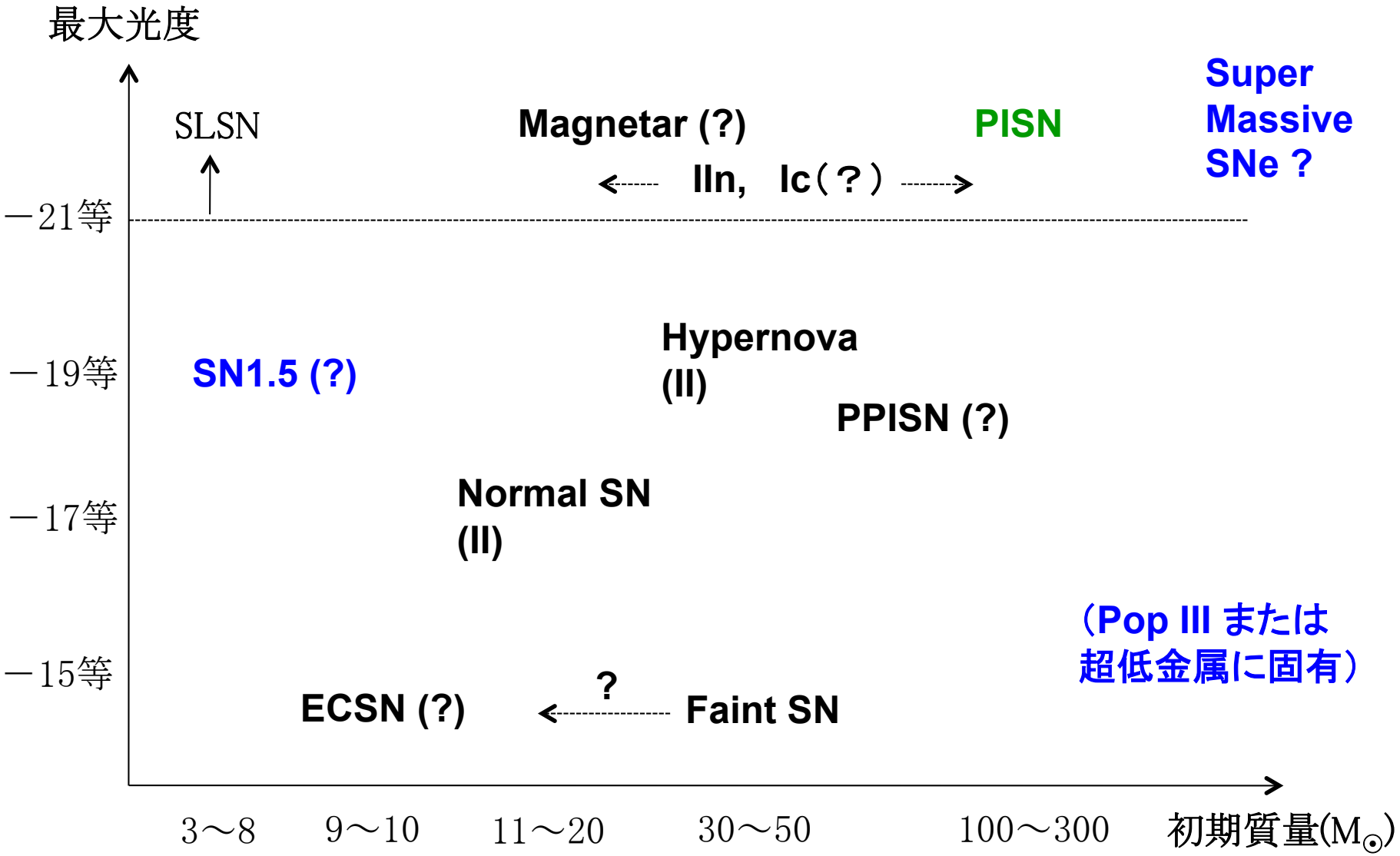


Pop III 星の特徴

- Opacity が小さい （金属が無い
- Mass Loss が少ない
- CNOが無い（水素燃焼初期にCNOサイクル無し
  - 3α➡C　反応で少量作るまで温度上昇
- これらの影響で表面進化（温度、半径）は Pop II, I とは大きく異なる
- が、コアの進化（超新星爆発、元素合成）は大体同じ
  - 元素番号奇数の元素は少ない（seed が無いため）

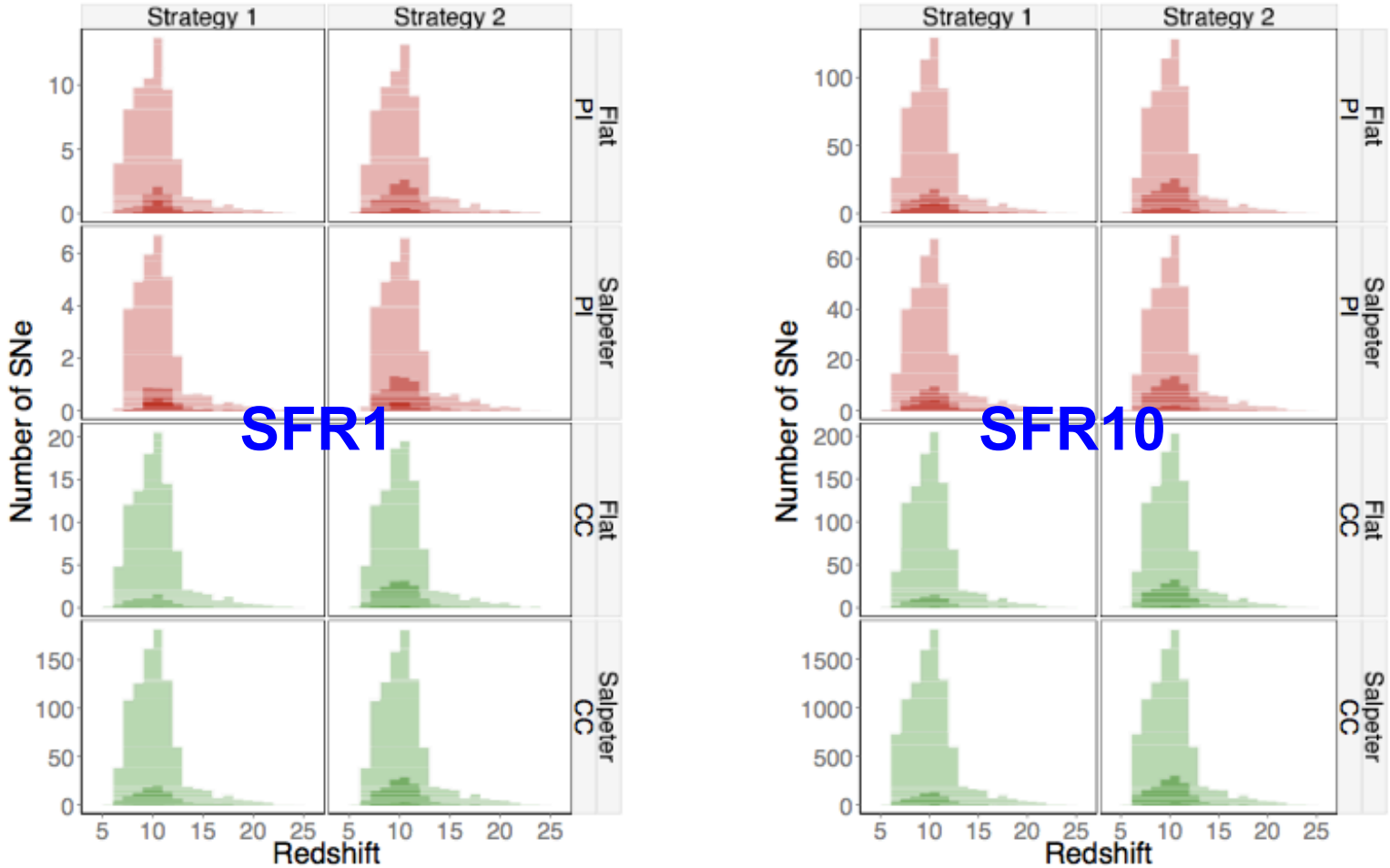
- IMF（及び典型的な質量）は大きく異なり大質量

Pop III 超新星（誰も見た事は無い）



Pop III 超新星の観測可能性 (一例)

8 *R. S. de Souza, E. E. O. Ishida, D. J., Whalen, J. Johnson, A. Ferrara* **arXiv:1401.2995**



薄色:JWST 5yr

濃色:cut1 (at least 1 filter with S/N>2)

Detection:
at least 1 epoch before and 1 epoch after maximum at least 3 epochs in one filter

Run	Sky (per cent)	Cadence	NIRCam Filters	*JWST* time per yr
Strategy 1	0.06	One pointing per year	F115W-F444W	730 h
Strategy 2	0.06	Three pointings per year, two-month gaps	F150W, F444W	730 h

Detectability requirements

SF1: Johnson
Pop III SFR
(右図下青線)

SF10：10倍したもの

青帯：GRBより
緑帯： High z proto-galaxies
線： simulations

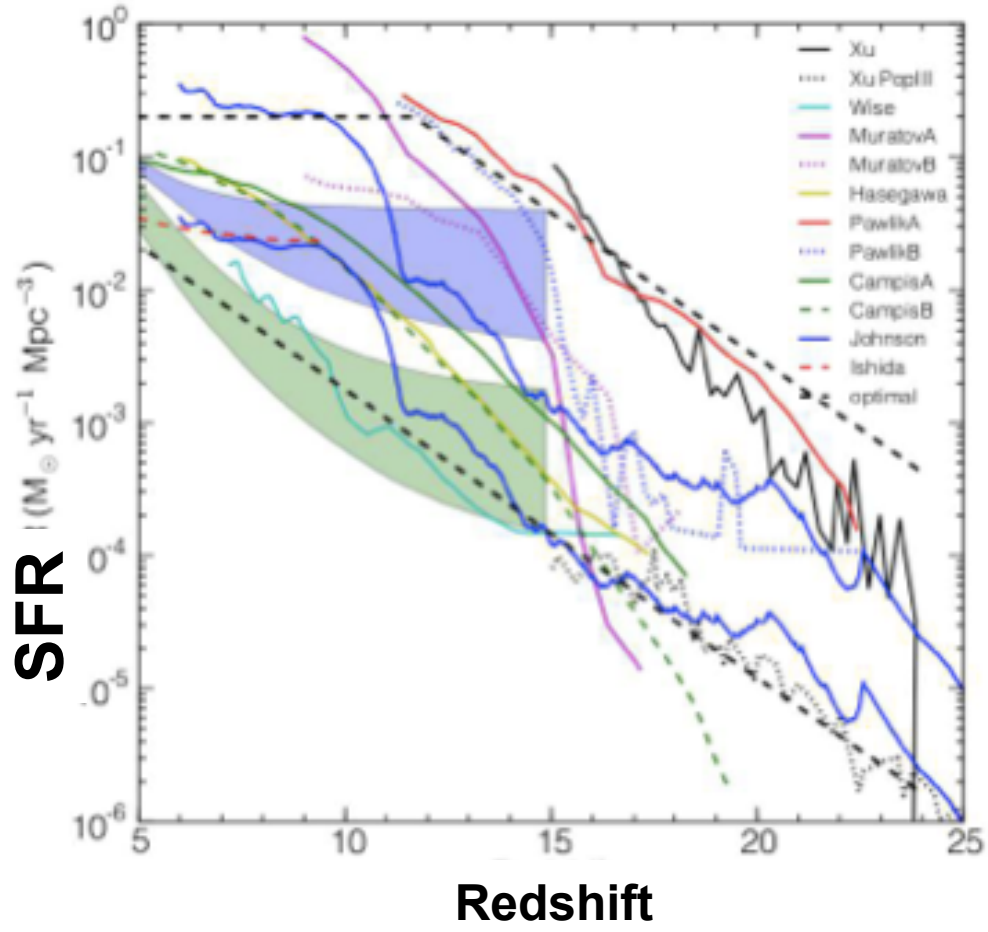
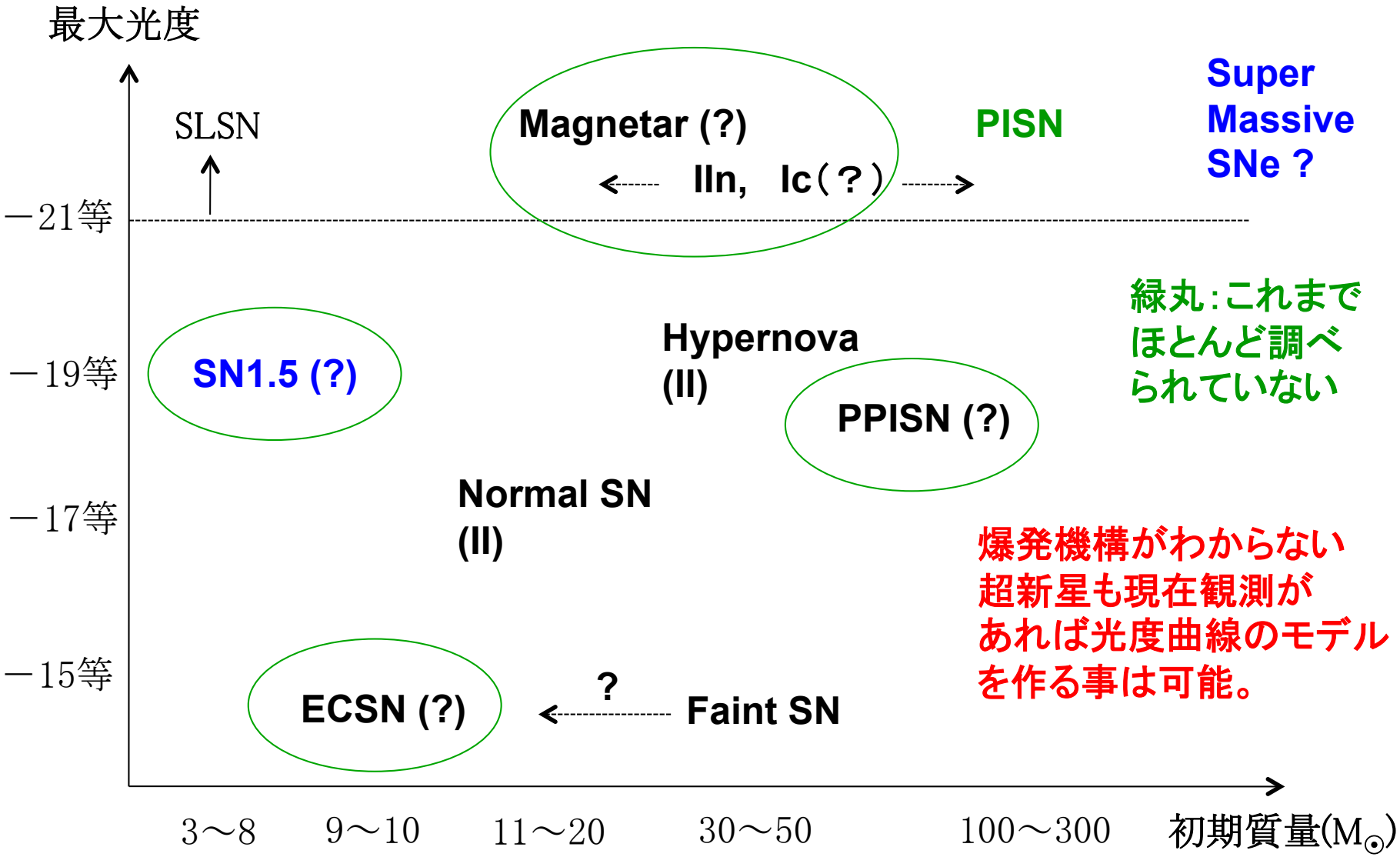
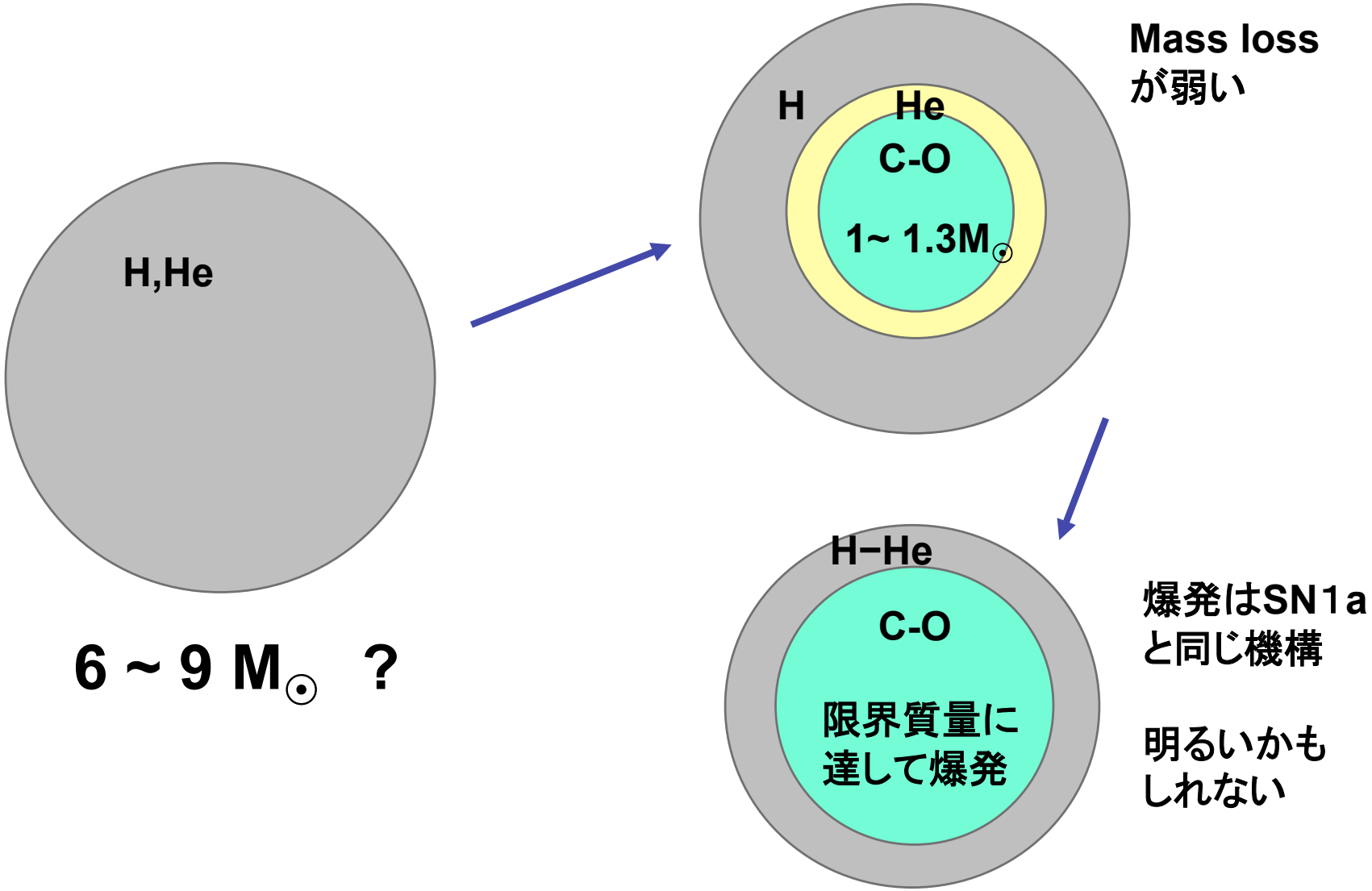


Figure 2. Cosmic SFRs as a function of redshift. The blue band and dashed red line are rates inferred from GRBs (Ishida et al. 2011; Robertson & Ellis 2012) and the green band are rates inferred from high z protogalaxies (Campisi et al. 2011). The SFRs compiled from simulations are from Salvaterra et al. (2011); Wise et al. (2012); Hasegawa & Semelin (2013); Johnson et al. (2013a); Muratov et al. (2013); Pawlik et al. (2013); Xu et al. (2013) (see Tornatore et al. 2007; Trenti & Stiavelli 2009, for other SFRs that fall within those shown here). The two black dashed lines are lower and upper fits to the simulation SFRs. The Xu Pop III SFR is for Pop III stars only, the others are Pop III + II SFRs. The Johnson Pop III SFR is plotted twice representing the models SFR1 and SFR10 in this work.

Pop III 超新星：我々の研究（計画）



SN1．５ （来年度から研究するかもしれない）



PopIII超巨大星の運命（先行研究）

- Fuller, Woosley & Weaver 1986 ⇒
- $10^{56\sim57}$ erg で水素燃焼中に爆発するものがあるが、Z=0では無い

  ⇒ PopIII ブラックホール

- 最近、Chen, Heger 他のモデルでは M=5.5 万$M_\odot$のものが 10^{55} erg の巨大爆発を起こす（He燃焼中にPISN)と言っている論文が複数出現

  （例arXiv: 1304.4601)。

  （Chen,Heger 論文はまだ未発表）

1986ApJ

RESULTS

Initial Mass $M/10^5\ M_\odot$ (1)	Initial Metallicity Z_{init} (2)	Fate (3)
1	0	Stable
5	0	Black hole
5	2×10^{-3}	Black hole
5	5×10^{-3}	2.1×10^{56} ergs He: 0.249 → 0.282
5	1×10^{-2}	2×10^{56} ergs He: 0.247 → 0.275
2.5	0	Black hole
10	0	Black hole
10	6×10^{-3}	Black hole
10	1×10^{-2}	2.5×10^{57} ergs He: 0.25 → 0.42

M(10^5 $M_\odot$)

宇宙初期の超大質量星の進化と最後

梅田秀之[1]、細川隆史[1]、大向一行[2]、吉田直紀[1]

1 東京大学、2 東北大学

2013.9.11　P152a　天文学会秋季年会

計算方法

- Henyey タイプの星の進化コード（主に超新星親星計算に用いていたもの　梅田＆野本2002, 2005）を質量降着に伴う進化計算ができるようにしたもの(梅田他 2009).
- 加速項入り
- 降着物質は星の最外層に等エントロピーで降り積もるとする

- 降着流による外層の加熱は無視
  - これの有無は$M>1000M_\odot$ の進化にはほぼ影響を及ぼさない
    （細川他 2013 arXIv: 1308.4457)
- Post Newtonian Gravity
  $G_{eff}=G(1 + P/\rho c^2 + 4\pi r^3P/Mc^2 + 2GM/rc^2)$
- 重力崩壊は流体力学(PPM)コードで計算
  - EOS,核反応計算の改良（高橋他2013), Post Newtonian Grav.

イントロ

- 一つ前の講演（細川他　P151a ）参照

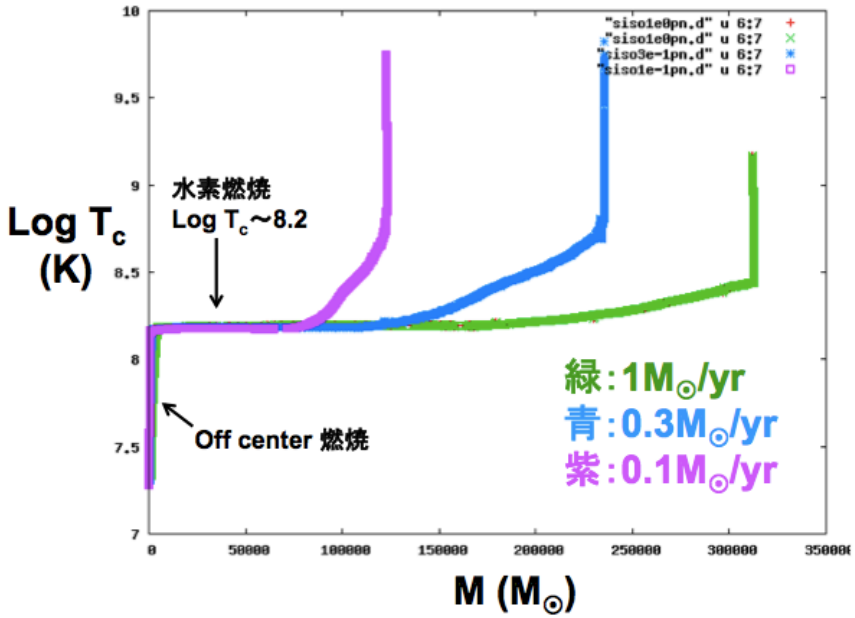
- 降着率が0.1 $M_\odot$/yr を超えるような急速ガス降着
  ⇒　超大質量星　（10万$M_\odot$以上）

- 細川他P151aでは約10万$M_\odot$に達するまでの計算を行った

- 本講演では、その後の進化、最終質量、それらの星の運命について

- そのような星は爆発せずにブラックホールになる、というのが常識？

M vs Log T_c



結果

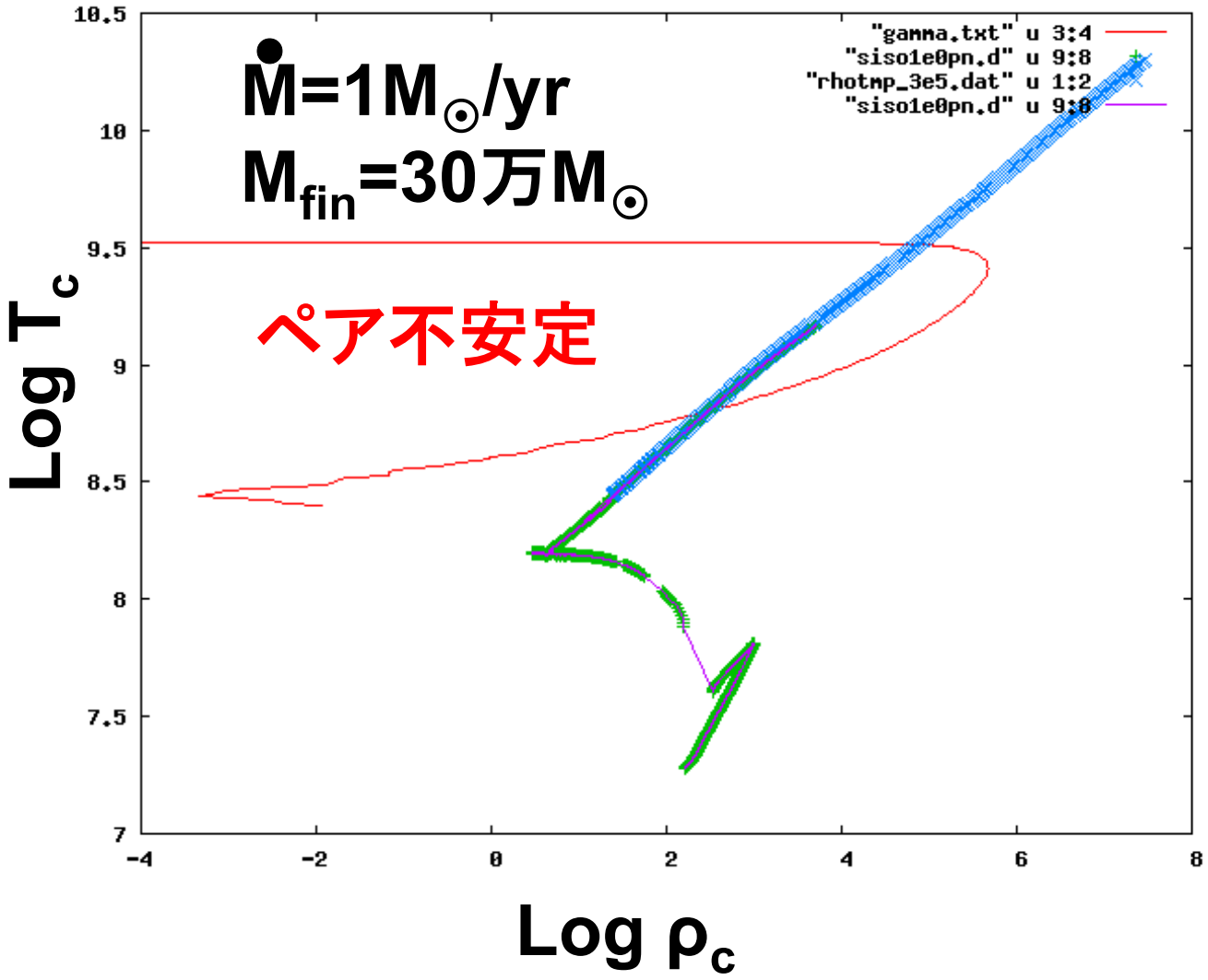
dM/dt ($M_\odot$/yr)	0.1	0.3	1.0	3.0
最終質量 ($M_\odot$)	122,900	233,300	312,000	>460,000 ➡ 55万
運命	Black hole (Fe core)	Black Hole (Fe core)	? (He燃焼時ペア不安定)	?

- 途中の進化は細川他（の講演）の計算結果とほぼ同じ

爆発しない

計算例：星の進化コード＋1D GR implicit-hydro

New！



1D GR hydro-code:
山田、鈴木、住吉のコードに EOS, 核反応ネットワークを加えた（高橋による）もの

以前の(PPM) codeに比べて通常のPISNの計算を安定にできることを確認済み

いろいろなケースを計算したが、すべて爆発せずに鉄まで燃えて重力崩壊

➡巨大ブラックホールへ(5千～50万M$_\odot$)

内容

- 現在の超新星
- Pop III 超新星
  - 種類
  - 観測可能性
  - SN1.5
- Pop III 超巨大星の進化と運命