

背景ニュートリノと ブラックホール

中里 健一郎

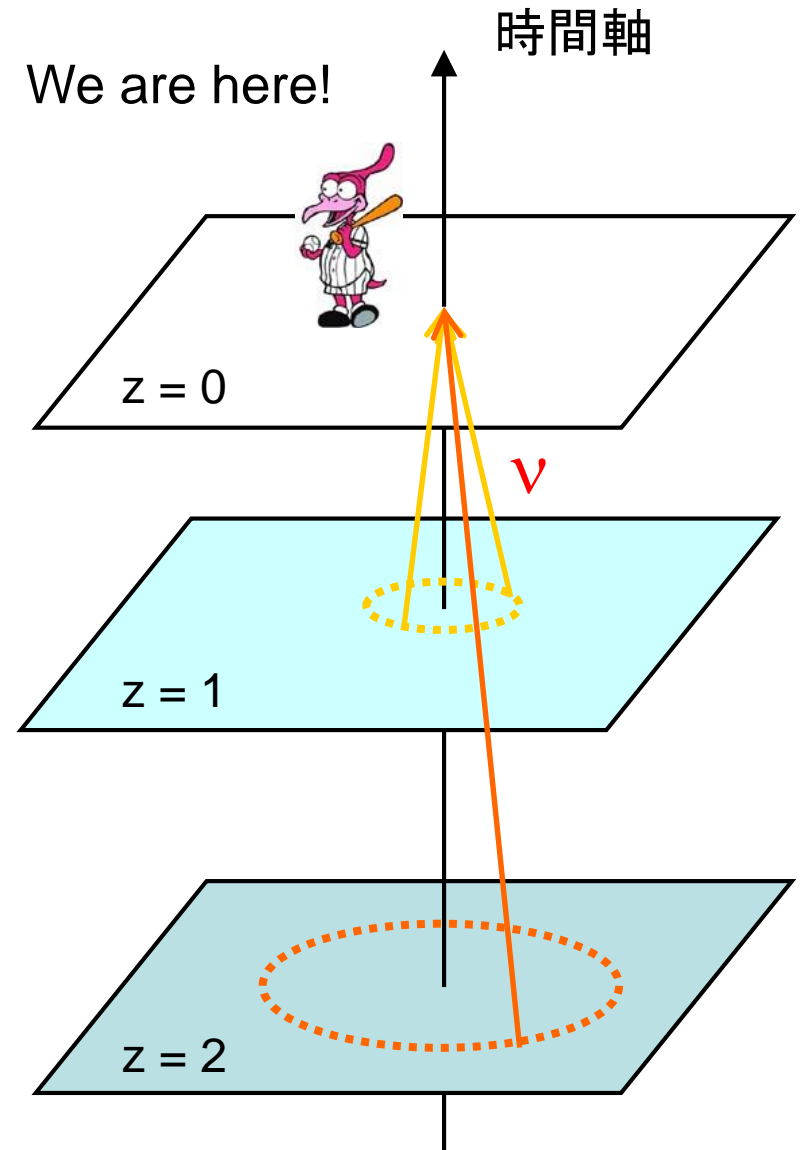
(九州大学 基幹教育院)

九州大学

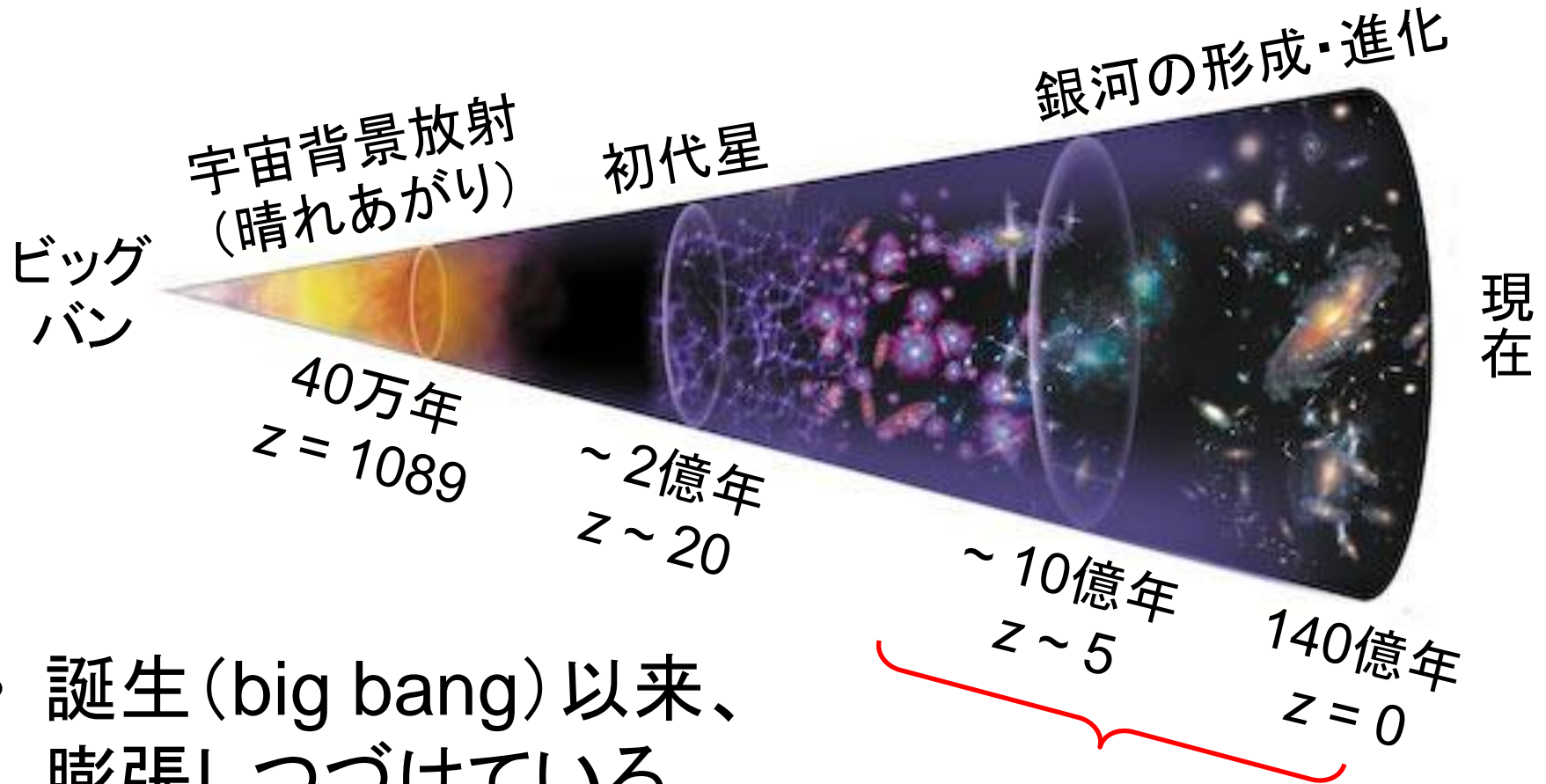
第32回ニュートリノ研究会@東大宇宙線研 2019年3月23日

背景ニュートリノ

- 宇宙背景放射のニュートリノ版。
- 過去の超新星から放出されたニュートリノが重ね合わさり、バックグラウンドとして宇宙を満たしている。
- 超新星そのものだけでなく、宇宙の星形成史などを探る上でも重要。



宇宙の歴史

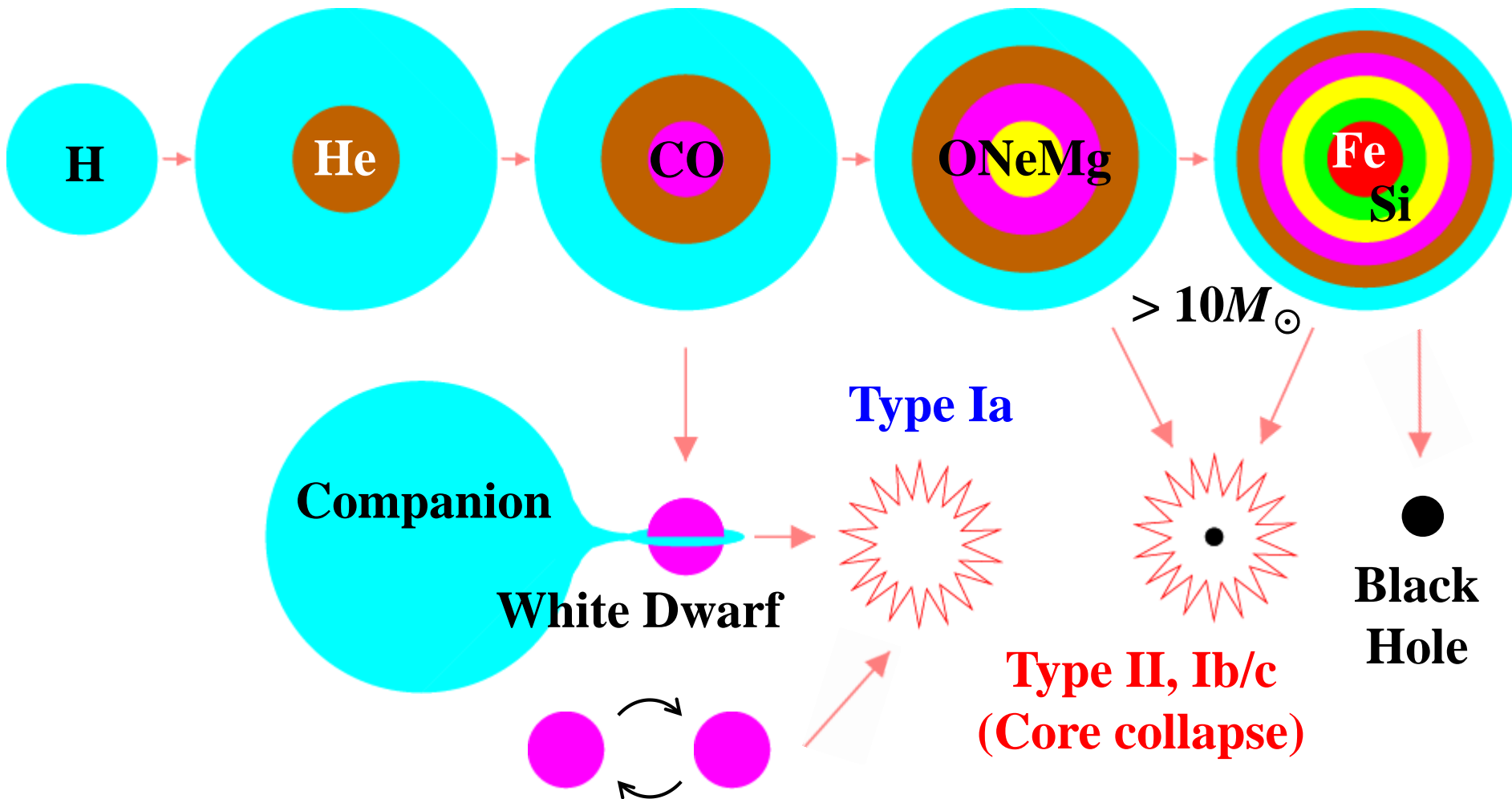


- 誕生 (big bang) 以来、膨張しつづけている。
- 「時間」として赤方偏移 z を用いる。

この間、無数の星が生まれ死んでいった

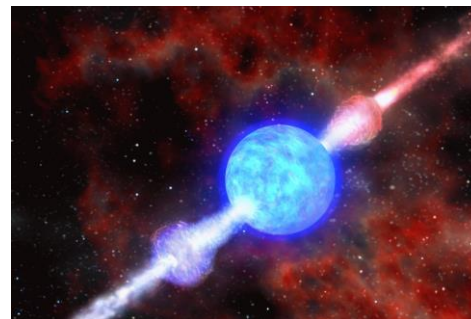
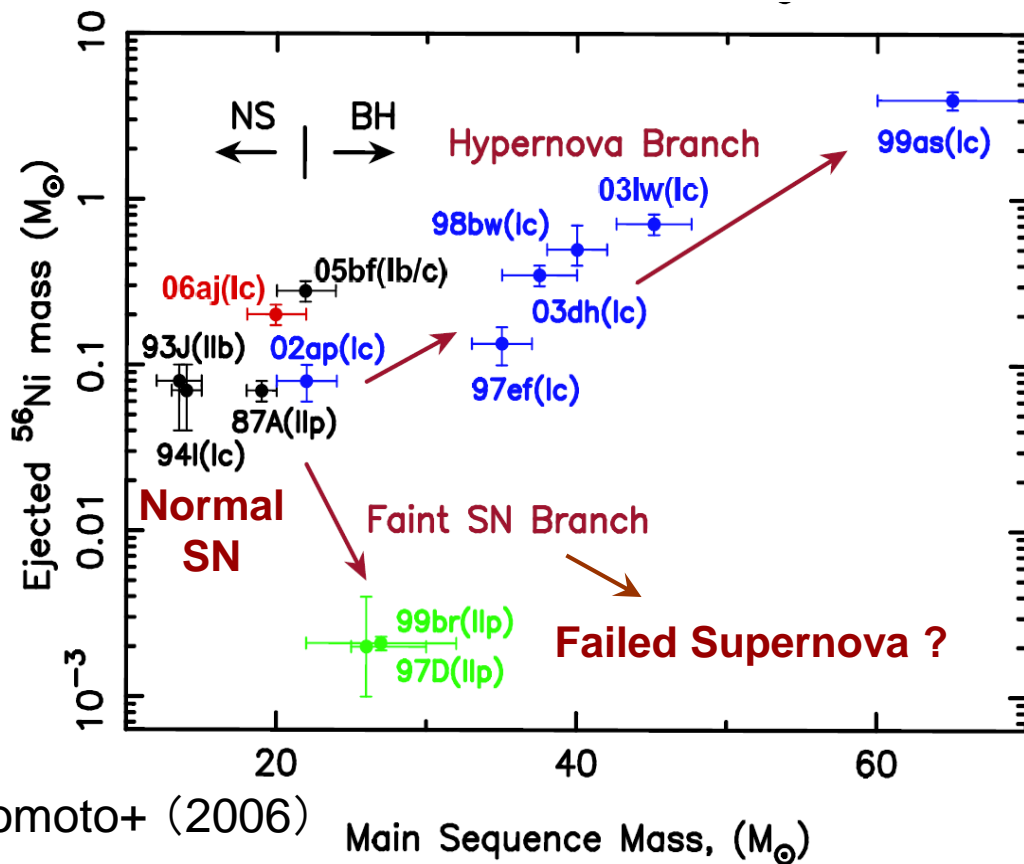
星の進化と超新星爆発

- 大質量星は進化の最後に超新星爆発を起こす。

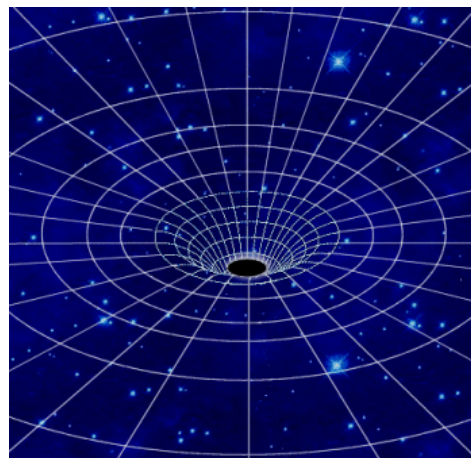


超新星爆発 vs ブラックホール形成

- 重力崩壊する星（親星）の質量が非常に大きい場合、ブラックホールを形成するとされている。
 - 少なくとも2つの Branch（回転が関係か？）



ガンマ線バースト

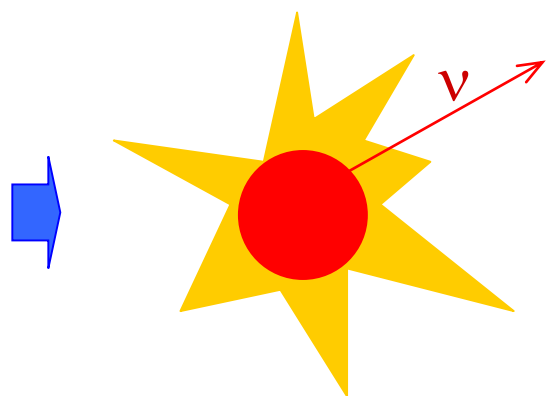


ブラックホール

ひっそりと死んでゆく星

- 爆発に失敗した星 = Failed supernovae
 - その場合も重力崩壊ののち一旦、バウンス
 - 追って降着してくる物質に押しつぶされる形で
まるごと重いブラックホールを形成する。
- この間、1秒程度ニュートリノを放出する。

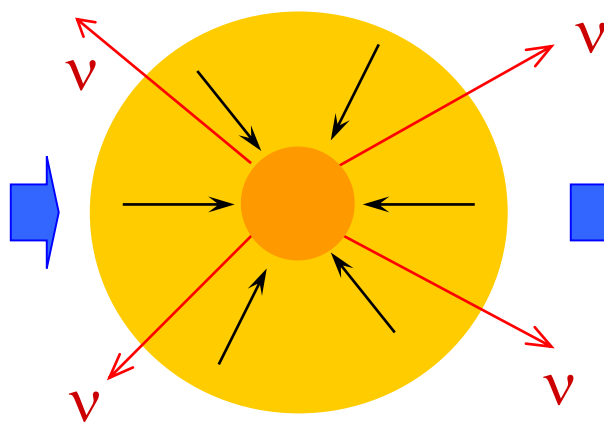
大質量星



重力崩壊

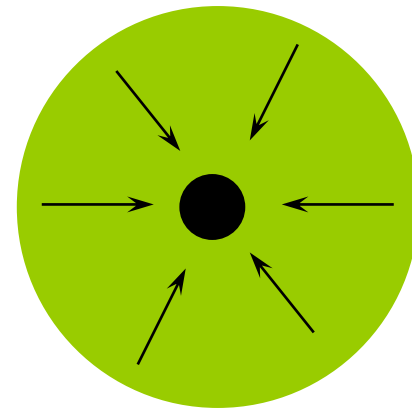
バウンス

原始中性子星



質量降着

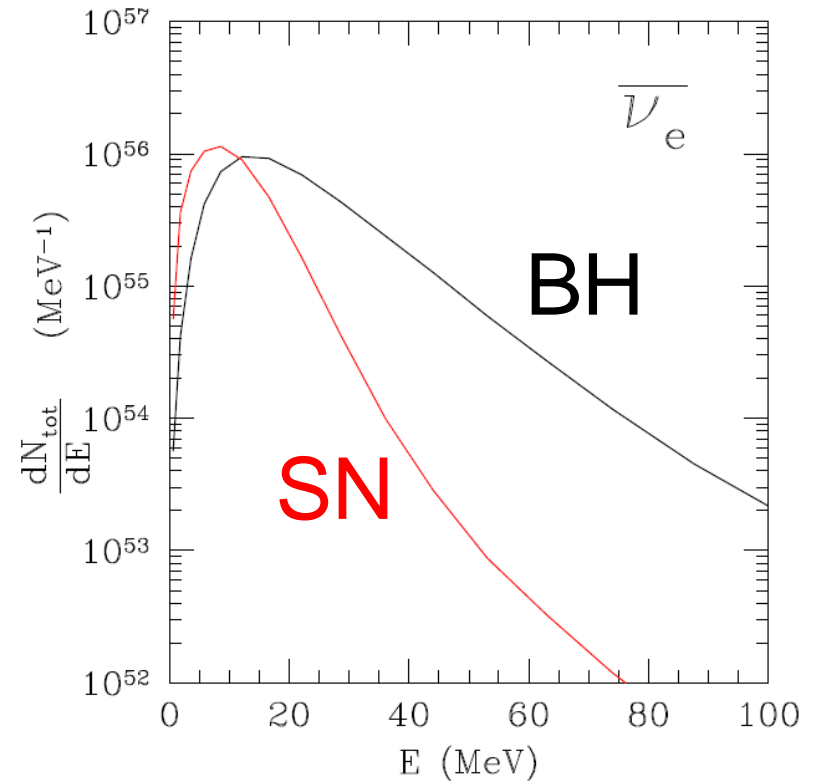
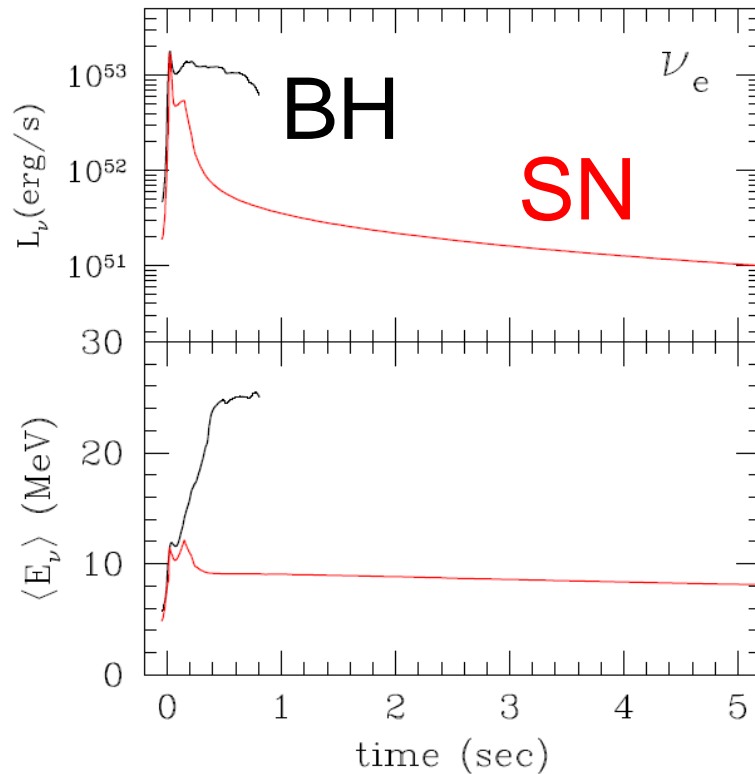
ブラックホール



ブラックホール形成からのニュートリノ

- 中性子星の最大質量を超えて、コアに物質降着するまでニュートリノ放出が続く。

→ 通常の超新星よりも大量のニュートリノを放出

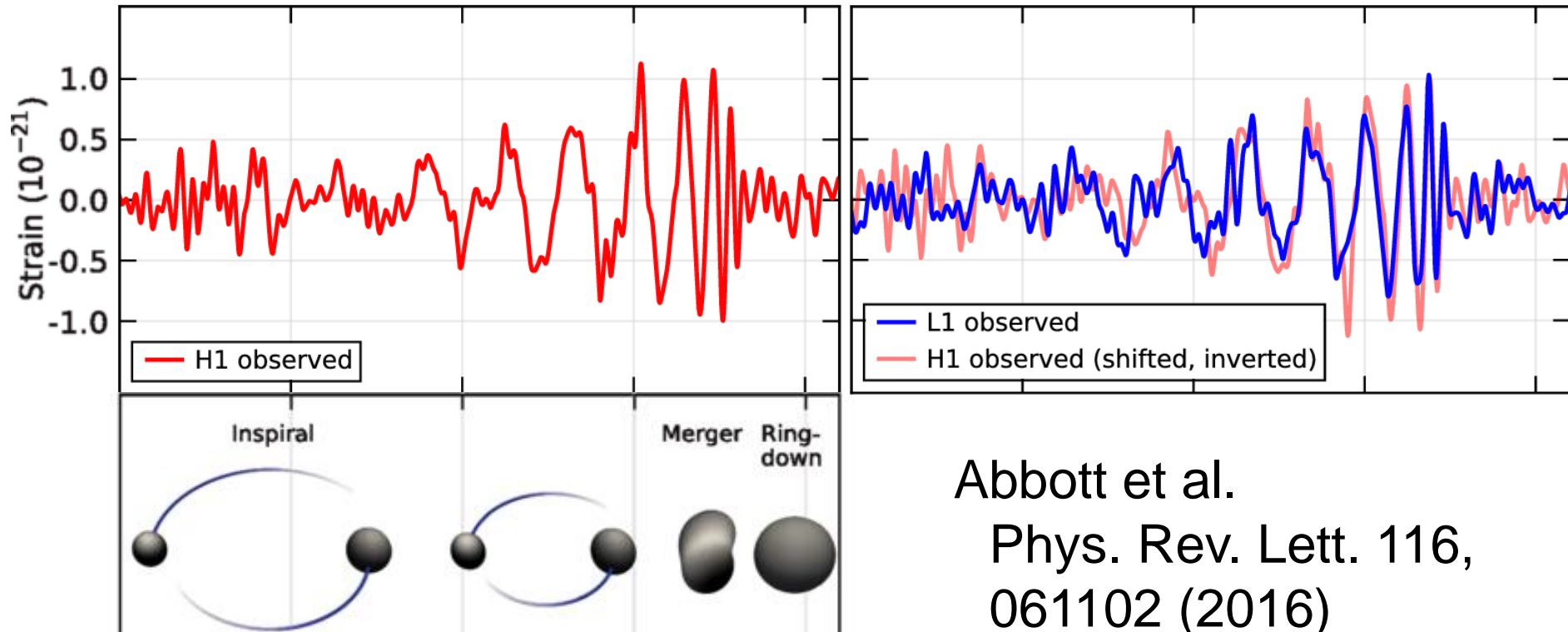


超新星($13M_\odot$)と重いブラックホール形成($30M_\odot$)からのニュートリノ放出

重いブラックホールの発見

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



Abbott et al.

Phys. Rev. Lett. 116,
061102 (2016)

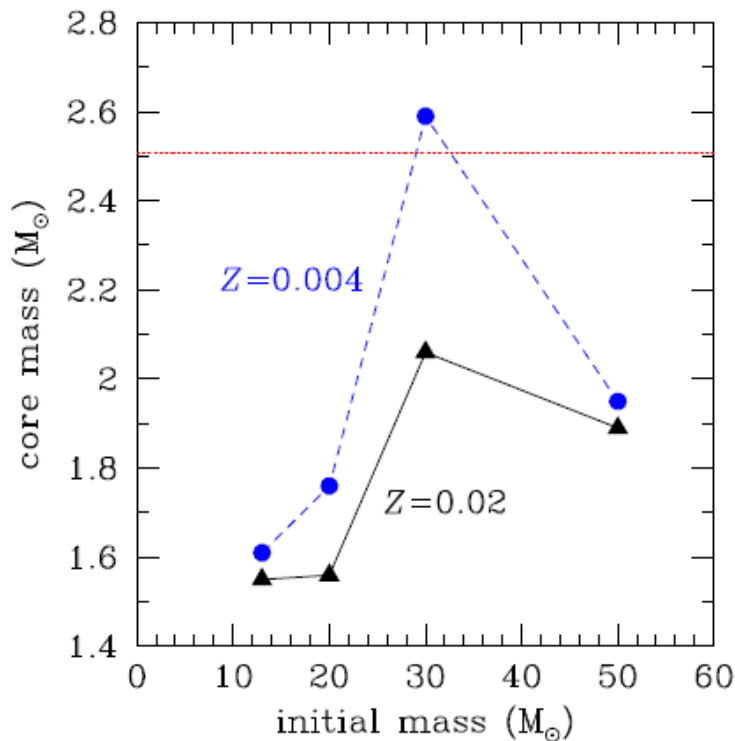
- LIGO による重力波 GW150914 の検出
→ $36M_{\odot}$ ブラックホール + $29M_{\odot}$ ブラックホール

ここまでのまとめ

- 約 $10M_{\odot}$ 以上の質量を持つ恒星は進化の最後に重力崩壊を起こす。
- その結果として、だいたい超新星爆発を起こすと考えられているが、爆発に失敗するとブラックホールになる星もあると考えられる。
- **どっちにしても**ニュートリノをどっさり放出する。重力崩壊でできたブラックホールは連星を組んで合体すると、重力波を放出する。
- こうした現象が宇宙進化のなかでくり返された。

ブラックホールの親星は？

- 星の金属量が低いほど、進化の途中での質量放出は少なく、重力崩壊のときまで重いまま。
→ ブラックホールは低金属量の環境で形成？



Nakazato et al. ApJS 205, 2 (2013)

恒星進化計算の一例

M	Z	
	0.02	0.004
$13M_{\odot}$	SN	SN
$20M_{\odot}$	SN	SN
$30M_{\odot}$	SN	BH
$50M_{\odot}$	SN	SN

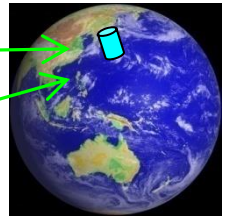
宇宙と銀河の化学進化

ビッグバン

銀河形成・進化

超新星爆発

v



現在

H, He のみ

metal(重元素) の放出・増加

- 昔の銀河・星ほど metallicity(重元素量) Z が低い
 - 恒星進化における質量放出が少ない
 - ブラックホールになる星が多くなる

Formulation

Nakazato et al. ApJ 804, 75 (2015)

$$\left(\frac{dE'_\nu}{dE_\nu} = 1 + z \right)$$

$$\frac{dF(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \times \left[R_{\text{CC}}(z) \int_0^{Z_{\max}} \psi_{\text{ZF}}(z, Z) \left\{ \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \psi_{\text{IMF}}(M) \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM \right\} dZ \right]$$

- ニュートリノスペクトル (SN, BH): $\frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu}$
- 宇宙論的パラメータ
 $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}, \Omega_m = 0.3 \text{ and } \Omega_\Lambda = 0.7$
- Initial mass function: $\psi_{\text{IMF}}(M) \propto M^{-2.35}$
 (Salpeter)

Formulation

$$\left(\frac{dE'_\nu}{dE_\nu} = 1 + z \right)$$

$$\frac{dF(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \times \left[\boxed{R_{\text{CC}}(z)} \int_0^{Z_{\max}} \psi_{\text{ZF}}(z, Z) \left\{ \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \psi_{\text{IMF}}(M) \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM \right\} dZ \right]$$

- **重力崩壊の rate:** $R_{\text{CC}}(z) = \dot{\rho}_*(z) \times \frac{\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \psi_{\text{IMF}}(M) dM}{\int_{0.1M_\odot}^{100M_\odot} M \psi_{\text{IMF}}(M) dM}$
宇宙の星形成率密度

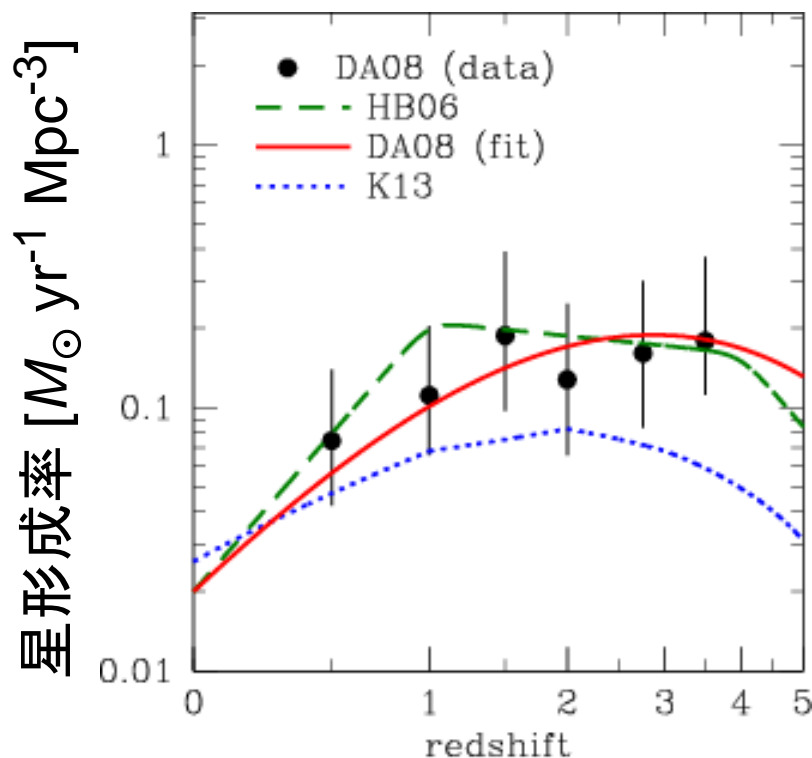
→ 銀河の星質量の分布と以下の関係にある。

(Drory & Alvarez, 2008)

$$\dot{\rho}_*(z) = \int_0^\infty \underbrace{\dot{M}_*(M_*, z)}_{\text{銀河の星形成率}} \underbrace{\phi_{\text{SMF}}(M_*, z)}_{\text{星質量関数}} dM_*$$

銀河の星形成率 星質量関数

星形成史とその不定性



銀河の観測

Hopkins & Beacom (2006)

Drory & Alvarez (2008)

準解析的モデル

Kobayashi+ (2013)

- redshift $z \sim 1-2$ でピーク(不定性は大きい)
 - 観測量(銀河の UV 光度)から星形成率への変換
 - ダストによる遮蔽の補正

注) $z > 2$ の領域は超新星背景ニュートリノには効かない

Formulation

$$\left(\frac{dE'_\nu}{dE_\nu} = 1 + z \right)$$

$$\frac{dF(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \times \left[R_{\text{CC}}(z) \int_0^{Z_{\max}} \psi_{\text{ZF}}(z, Z) \left\{ \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \psi_{\text{IMF}}(M) \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM \right\} dZ \right]$$

- 親星の金属量の分布関数

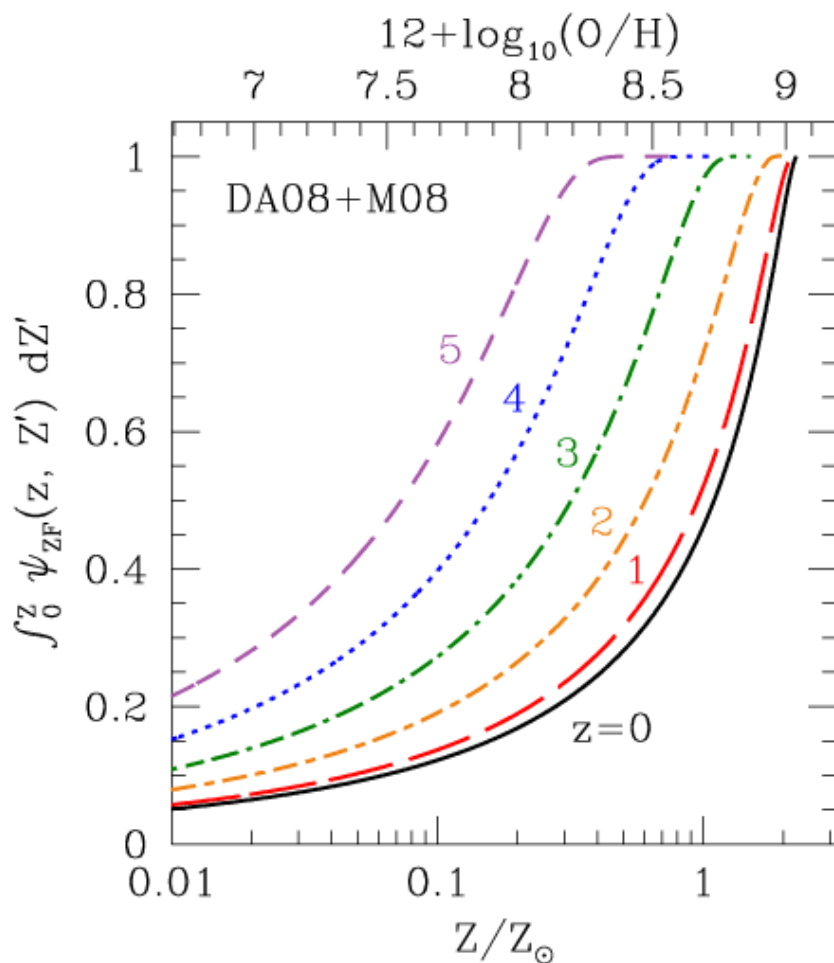
銀河の質量-金属量関係 (Maiolino+, 2008)

$$\int_0^Z \psi_{\text{ZF}}(z, Z') dZ' = \frac{\int_0^{M_*(z, Z)} \dot{M}_*(M'_*, z) \phi_{\text{SMF}}(M'_*, z) dM'_*}{\int_0^\infty \dot{M}_*(M'_*, z) \phi_{\text{SMF}}(M'_*, z) dM'_*}$$

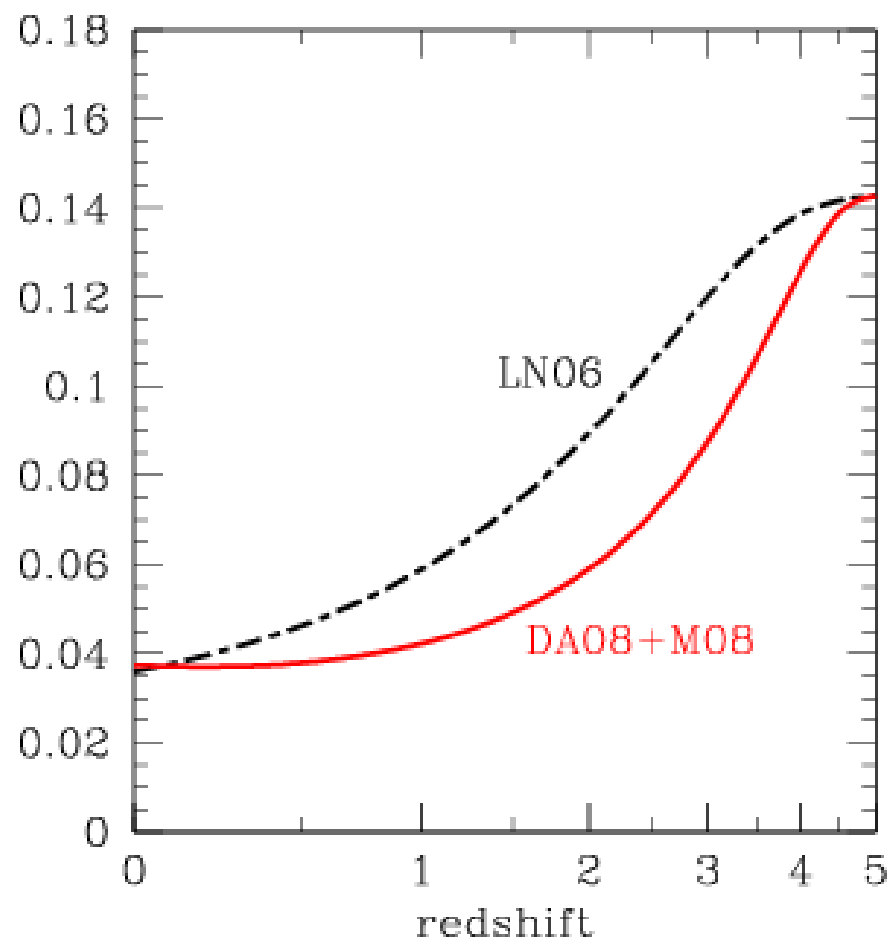
銀河の星形成率 星質量関数
(Drory & Alvarez, 2008)

ブラックホール形成率の時間変化

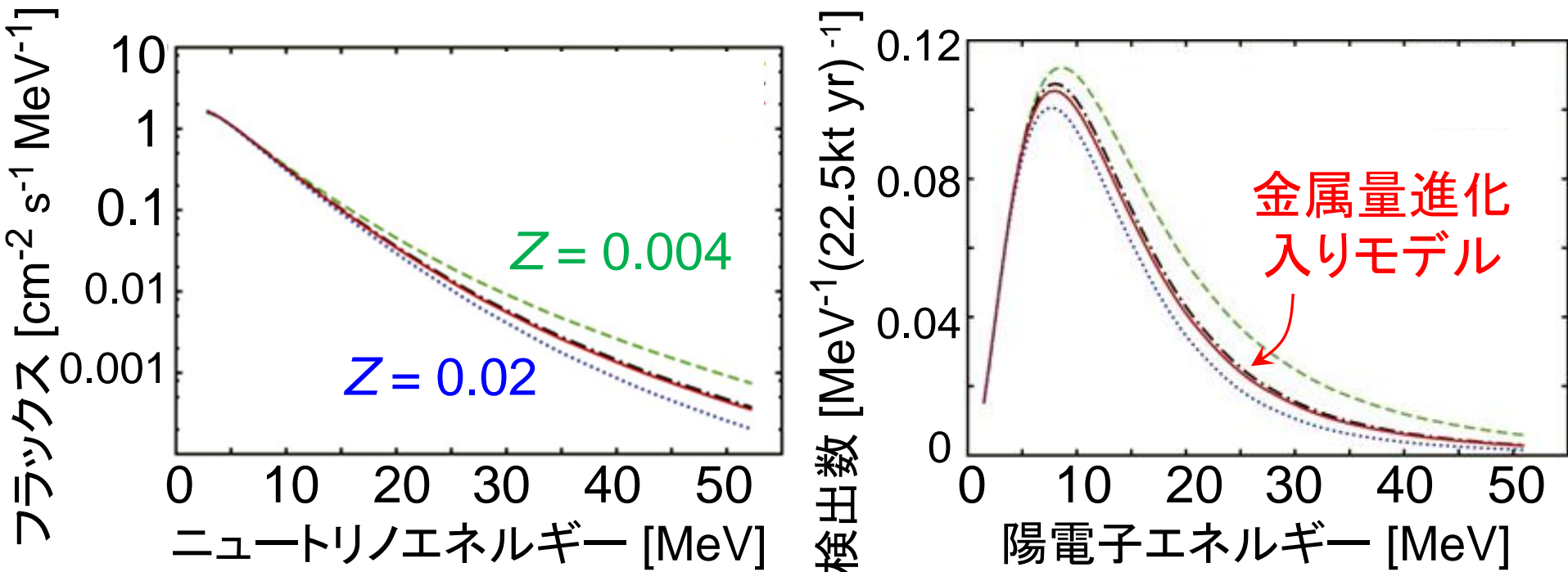
- 銀河の観測から金属量の時間変化を見積もる。



ブラックホール形成の割合



ブラックホール形成の影響



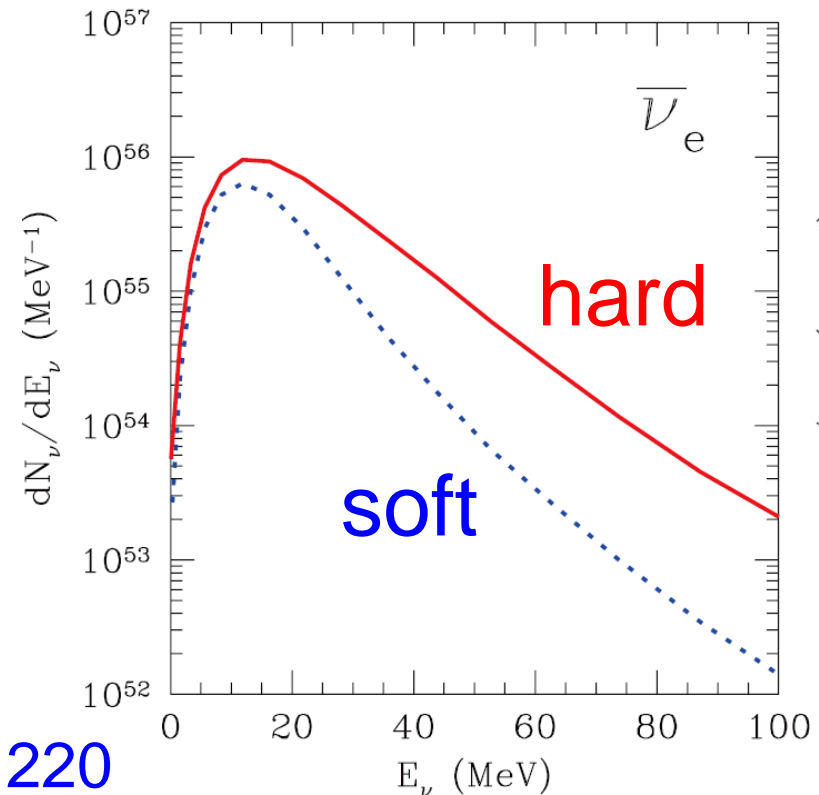
- 高エネルギー領域のほうが違いが大きい。
- ブラックホール形成では、物質降着が最後まで続き、高エネルギーのニュートリノが多く出る。

状態方程式の影響

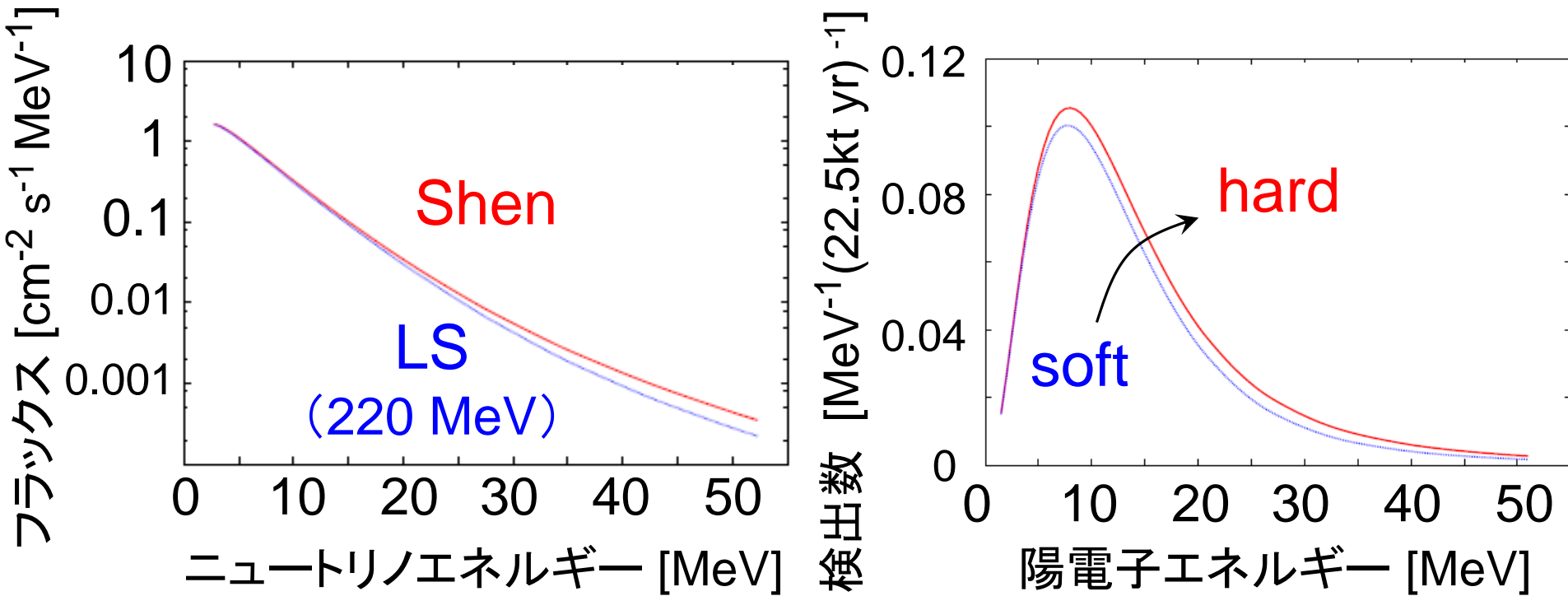
- ブラックホール形成からのニュートリノ放出は、高密度状態方程式に強く依存する。
- 中性子星最大質量の大きい(硬い)状態方程式ほど、スペクトルが硬く総エネルギーも大きい。
- ブラックホール形成までに降着した物質が解放する重力ポテンシャルが大きいため。

hard: Shen et al. (1998, 2011)

soft: Lattimer & Swesty (1991), $K = 220$



状態方程式の依存性(ブラックホール)



- 高エネルギー領域のほうが不定性が大きい。
- 中性子星最大質量が大きい(状態方程式が硬い)とスペクトルが硬い。

ここまでのまとめ

- 背景ニュートリノには、ブラックホール形成に伴って放出されるものも含まれる。
- ブラックホールになる割合は、金属量が少ない環境ほど高くなる。
- ブラックホールになる場合の方が、通常の超新星の場合よりも多量のニュートリノが放出されるため、背景ニュートリノからブラックホール形成シナリオへの示唆が可能(かもしれない)。
 - ただしブラックホールから放出されるニュートリノの量には状態方程式の不定性がある。

今後の展望

- 背景ニュートリノの検出数が予測以上に多ければ、そのなかにブラックホール形成を起源とする成分が多いことが期待される。
- 重力波観測との相補性
 - 重力波で見えるのは、ブラックホール同士が合体する瞬間。
 - ブラックホールの形成数と、そのうち連星を組んで合体する割合は別。形成から合体までのラグも有。
 - そもそも、重力波観測だけでは、ブラックホールの形成シナリオにはアプローチできない。

ブラックホールの起源を巡って

- 大質量連星起源説

→ 恒星の段階から連星を組んでいたものが、ともにブラックホールになる。

- 元の星はどんな星？

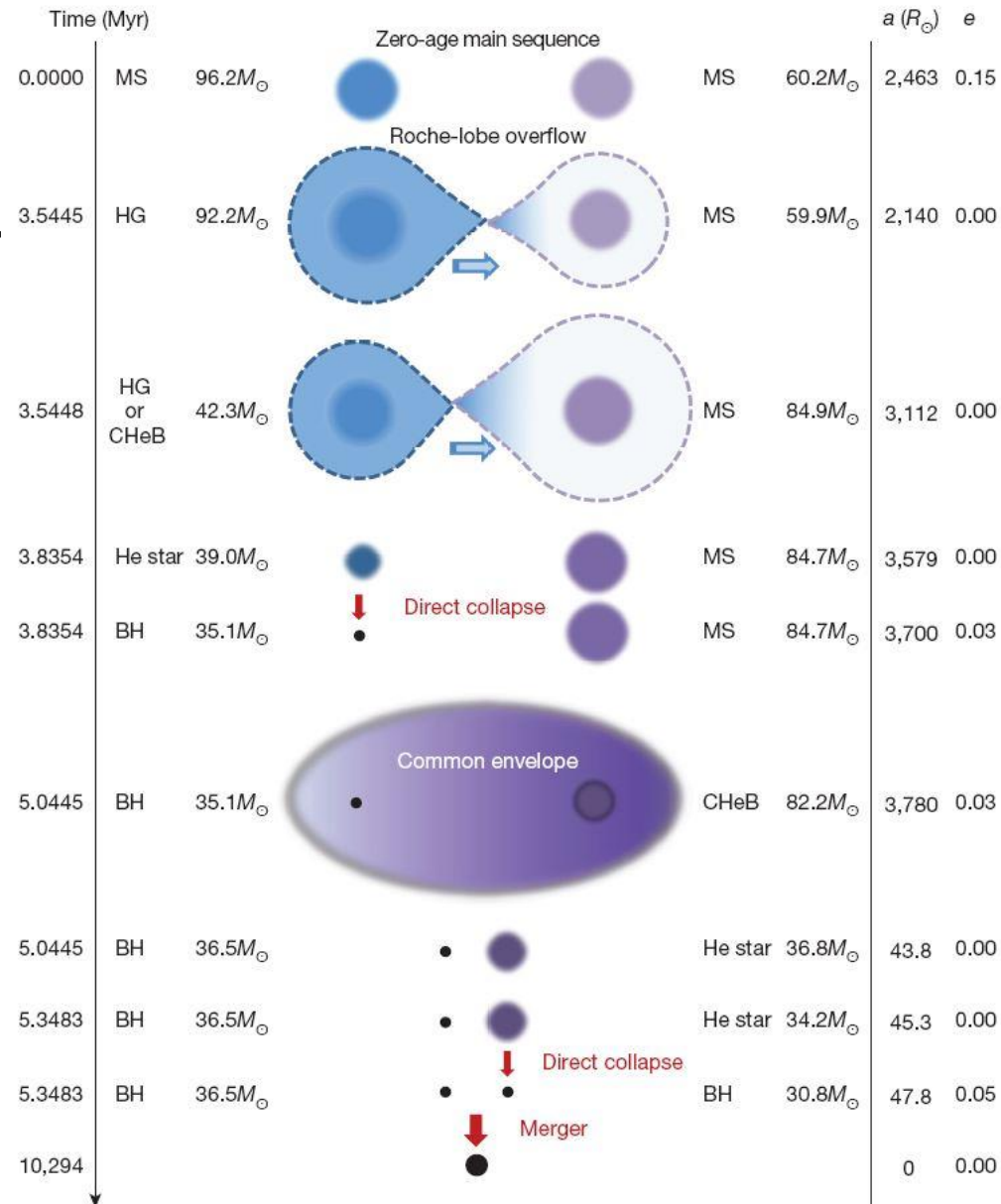
- 低金属量星

(e.g. Belczynski+ 2016)

- 初代星(ゼロ金属量)

(Kinugawa+ 2014; 2016)

Belczynski *et al.* *Nature* **534**, 512 (2016)

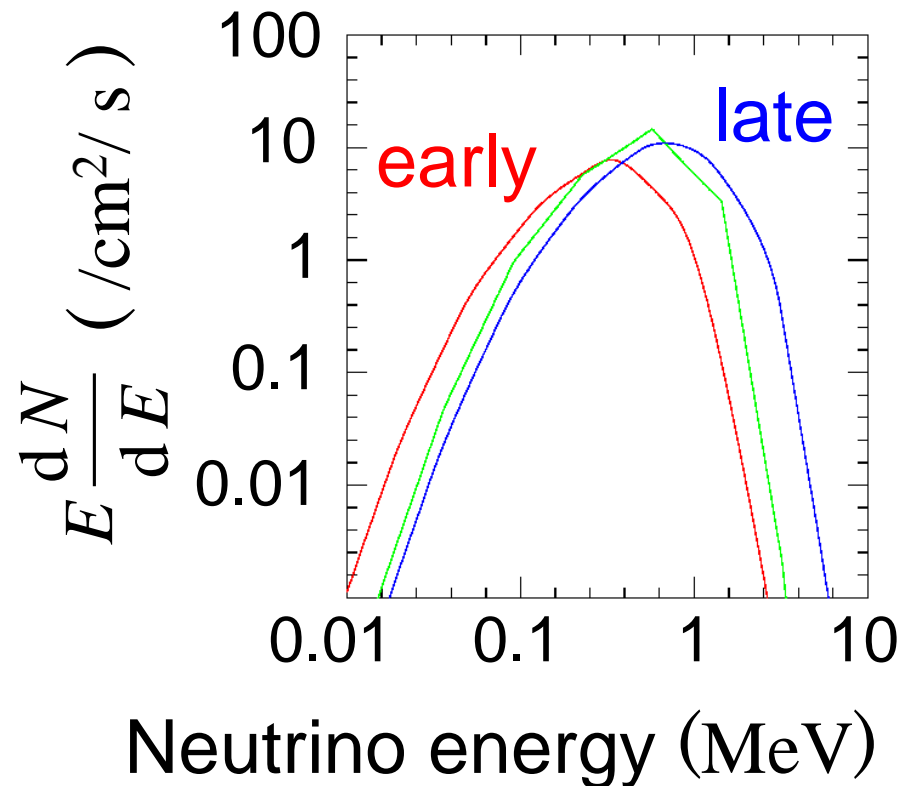


初代星からの背景ニュートリノ

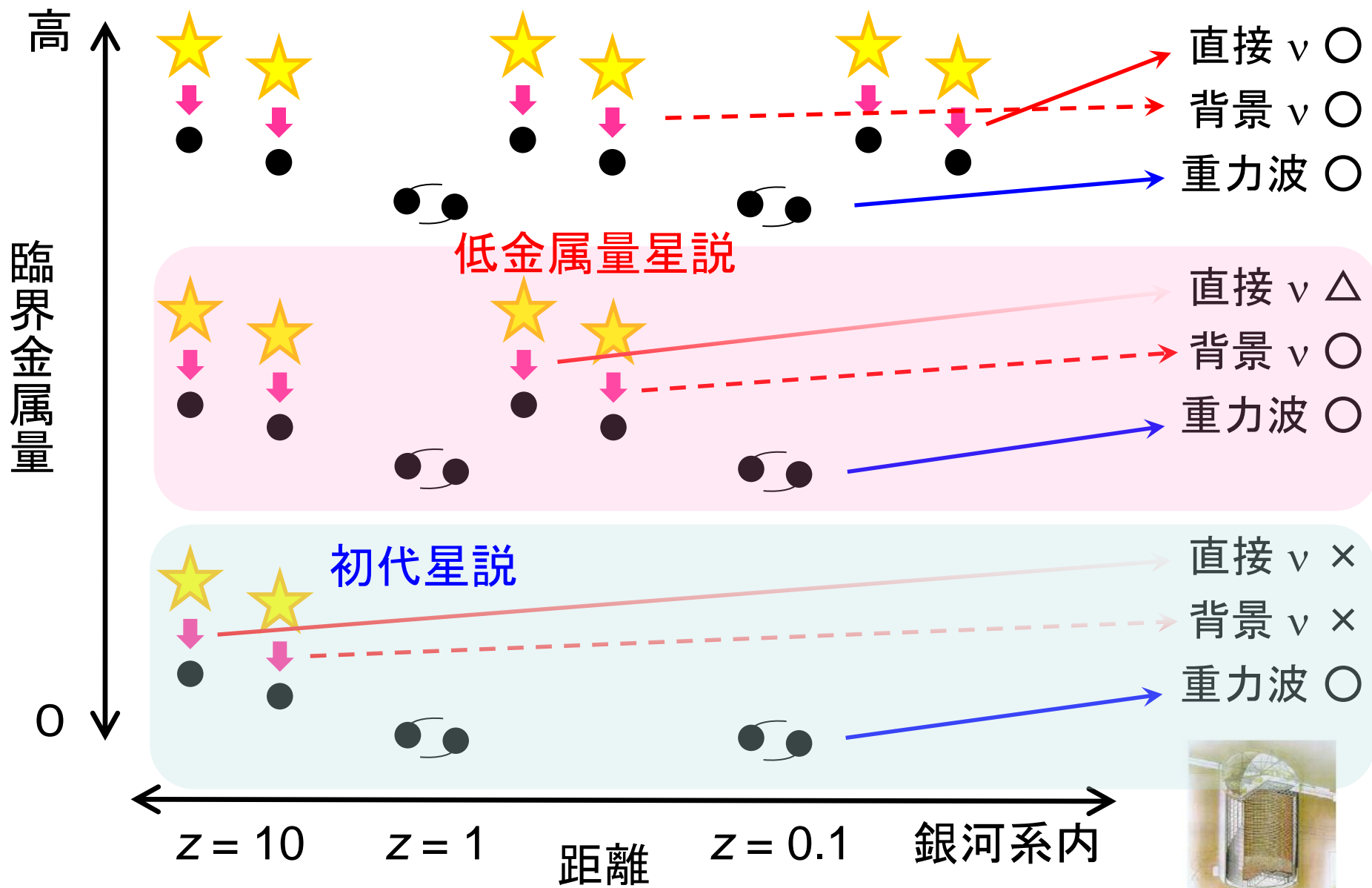
Nakazato et al., ApJ **645** (2006) 519.

- 大きく redshift ($z \sim 10$) され、観測可能なエネルギー領域には来ない。
- 仮に、 $100M_{\odot}$ 以上の非常に大きな質量を持つ星からブラックホールが形成されたとしても、放出されるニュートリノのエネルギーは高くない。

星形成のタイミングによる違い
(ニュートリノ振動なし)



ブラックホール形成の時期は？



ブラックホール形成の時期は？

ニュートリノの観測からブラックホールの起源に迫る！？

