

大質量星の重力崩壊による ブラックホールの形成と ニュートリノ放出

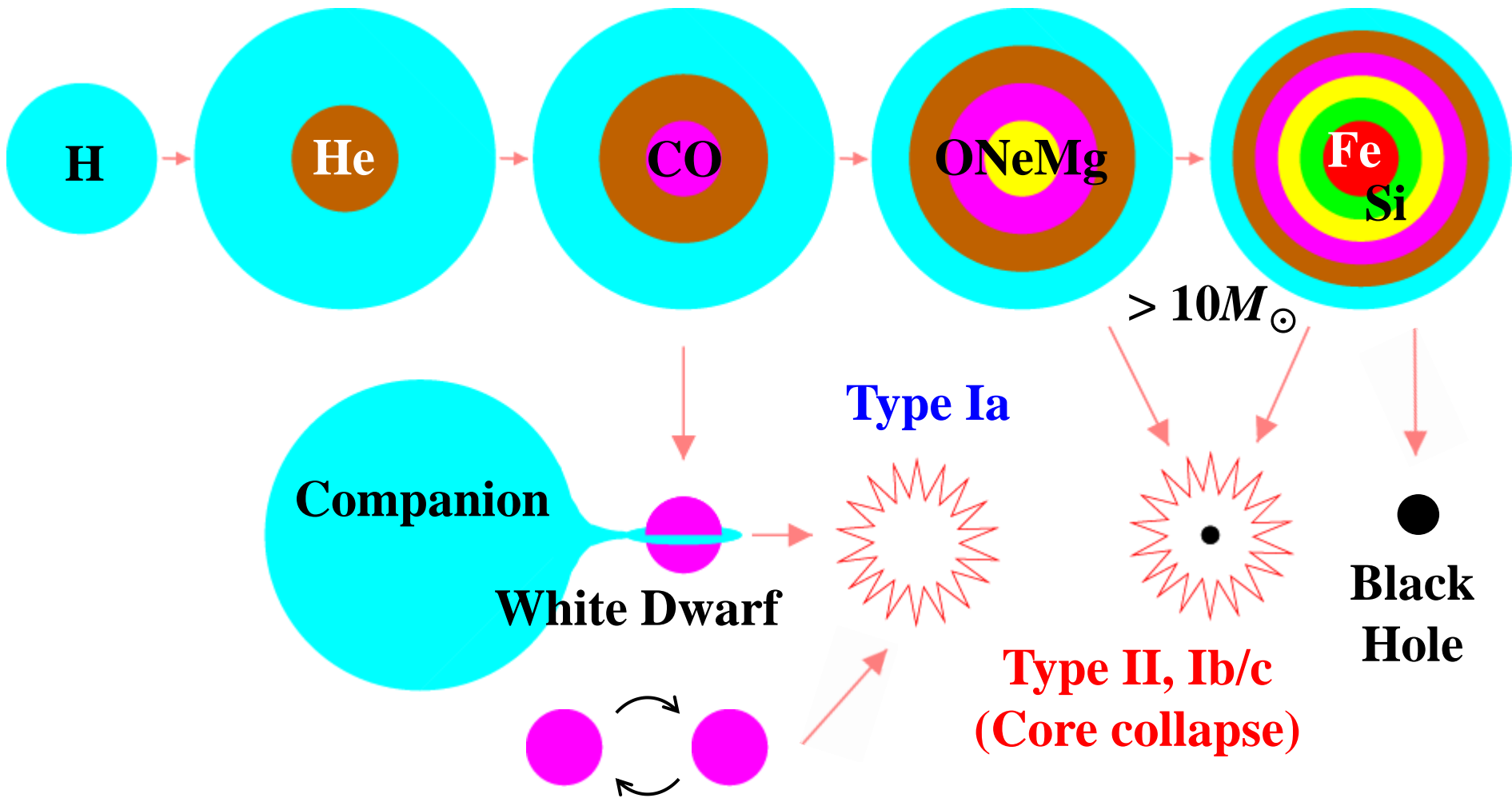
中里 健一郎

(九州大学 基幹教育院)

第3回超新星ニュートリノ研究会@東北大学 2017年3月5日

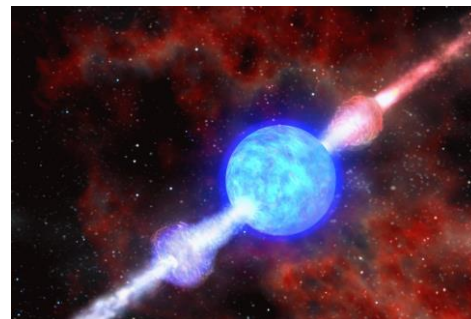
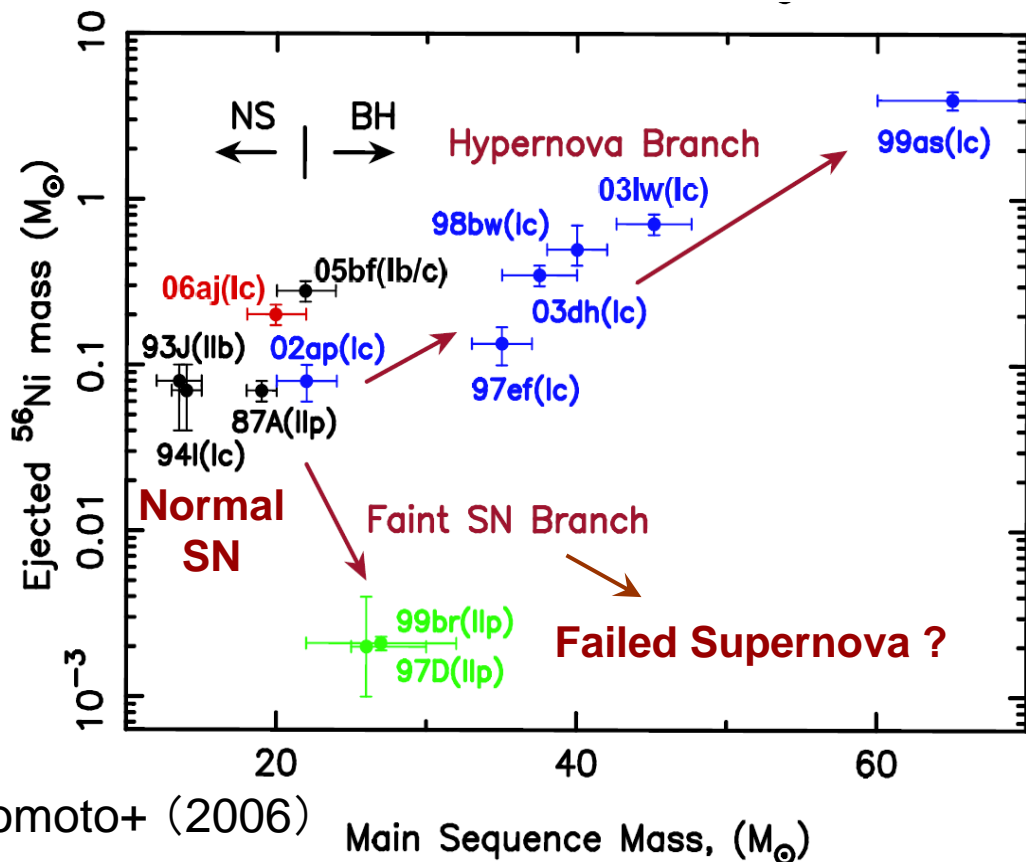
星の進化と超新星爆発

- 大質量星は進化の最後に超新星爆発を起こす。

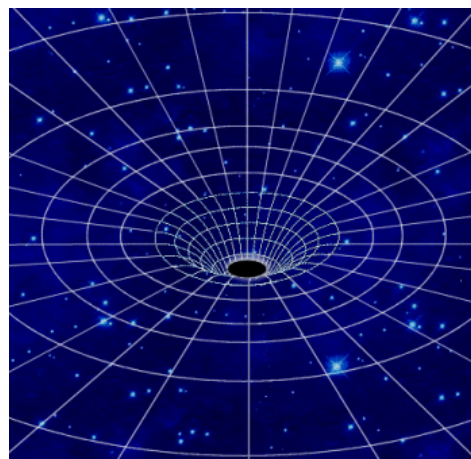


超新星爆発 vs ブラックホール形成

- 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

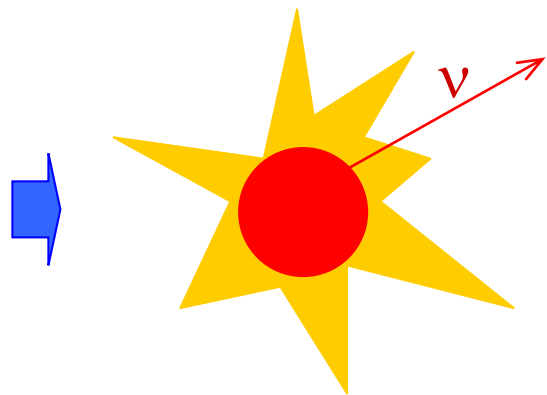


ブラックホール

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。

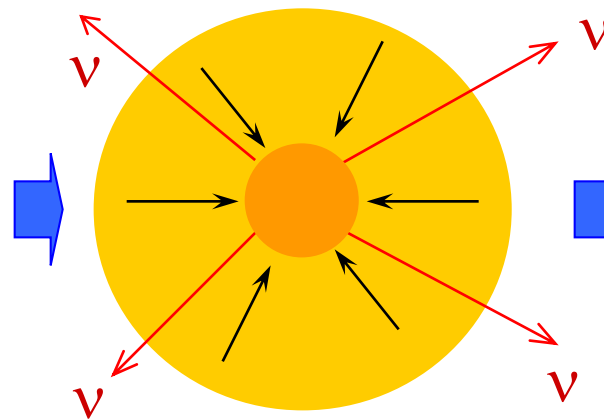
大質量星



重力崩壊

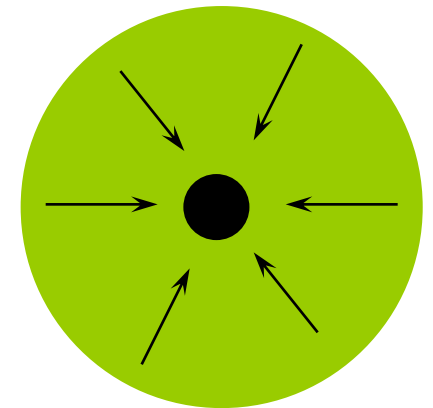
バウンス

原始中性子星



質量降着

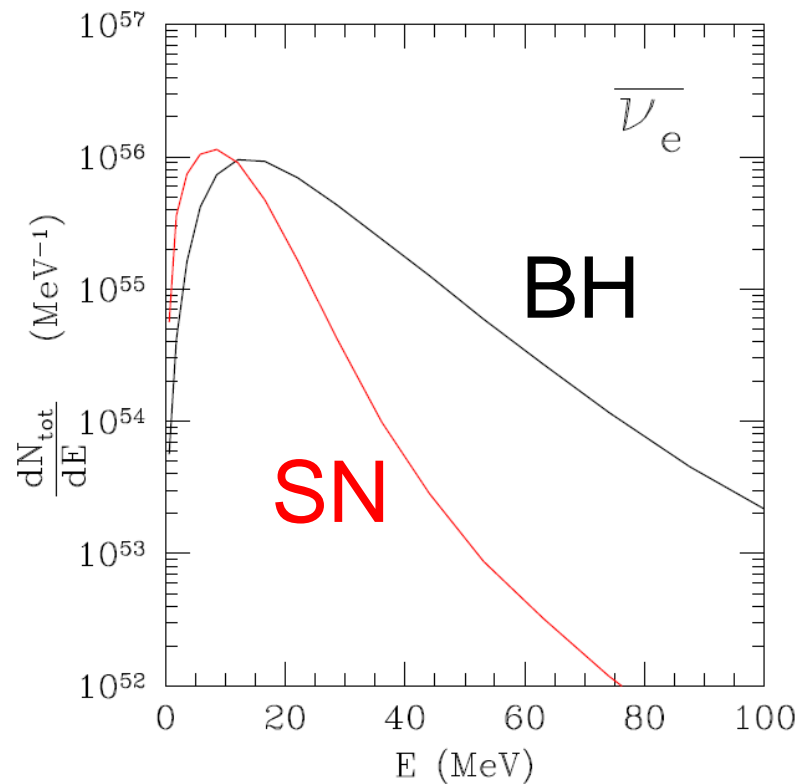
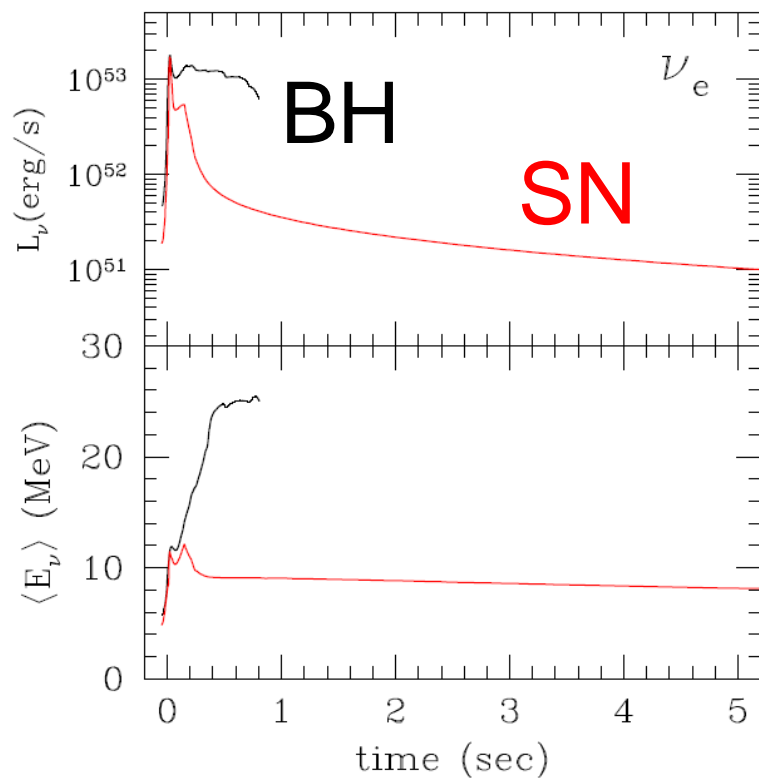
ブラックホール



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。

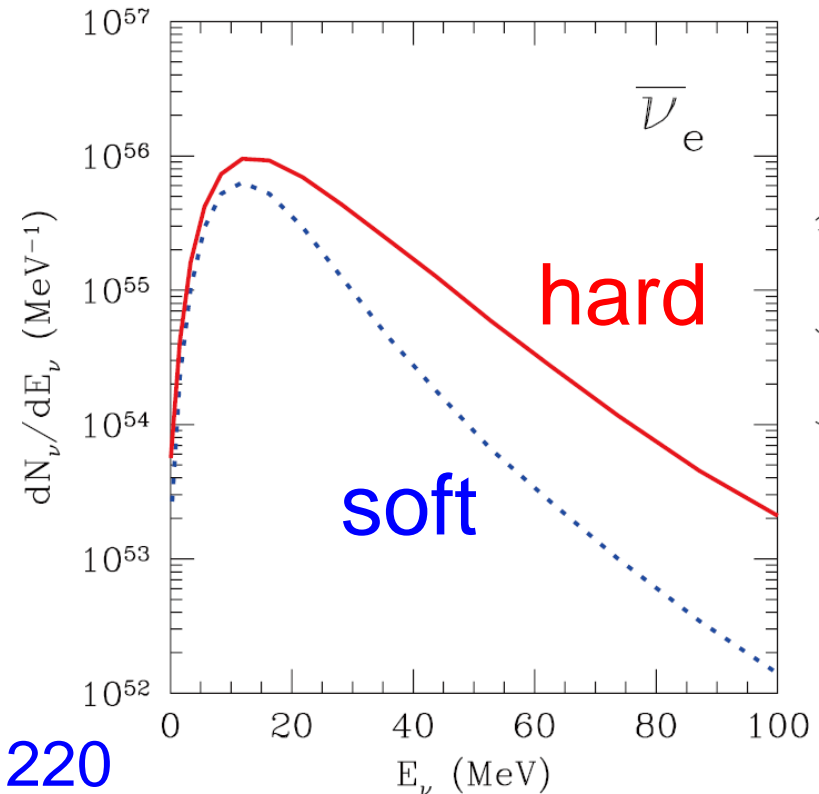
→ 通常の超新星よりも大量のニュートリノを放出



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

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。



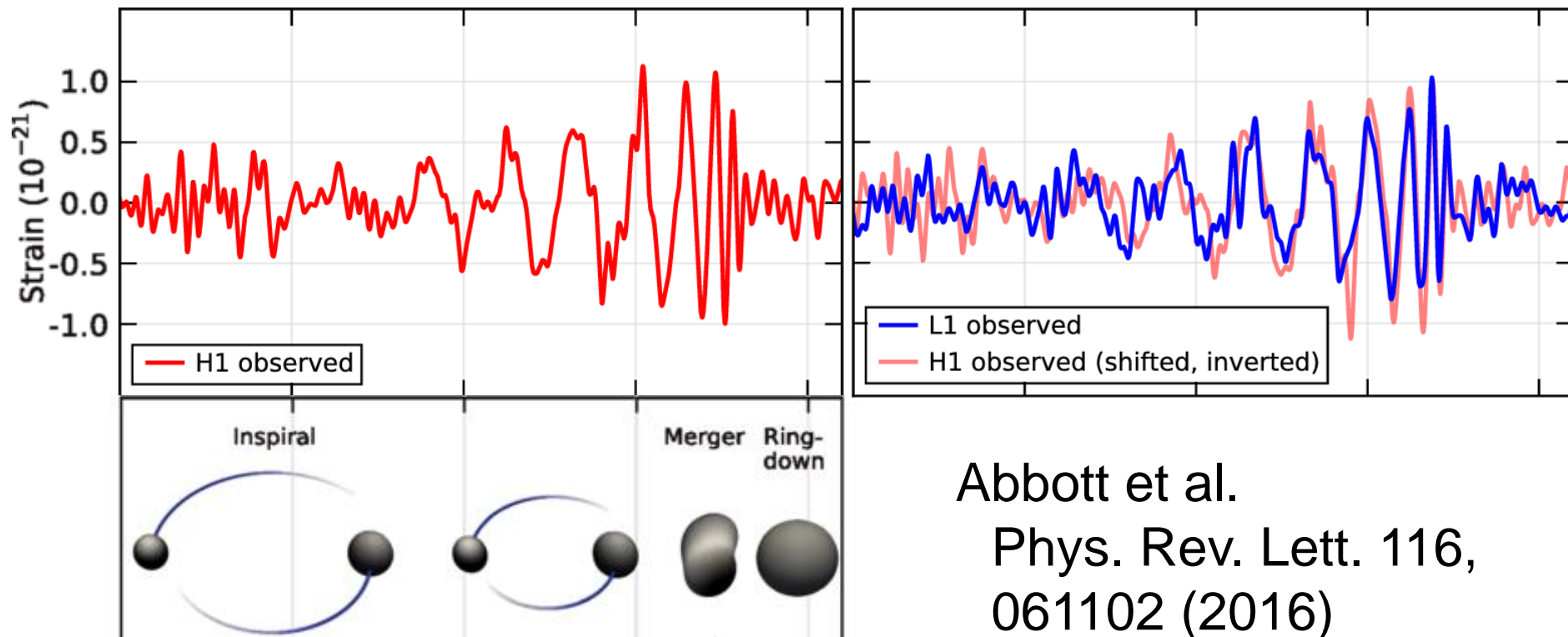
hard: Shen et al. (1998, 2011)

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

重いブラックホールの発見

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



- 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

LIGO O1 でみつかった BH 連星

Abbott et al., arXiv:1606.04856

Event	$M_1 (M_\odot)$	$M_2 (M_\odot)$	$M_c (M_\odot)$	redshift
GW150914	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$
LVT151012	23^{+18}_{-6}	13^{+4}_{-5}	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
GW151226	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

M_c : チャープ質量。重力波の強度や波形を特徴づける量。

LVT151012 (significance 1.7σ) は candidate 扱い。

- BH の質量は $8M_\odot$ から $36M_\odot$ まで分布を持つ。
- 質量の大きい BH どうしの合体ほど、重力波の強度が大きく、遠くのイベントでも検出できる。

LIGO O1 でみつかった BH 連星

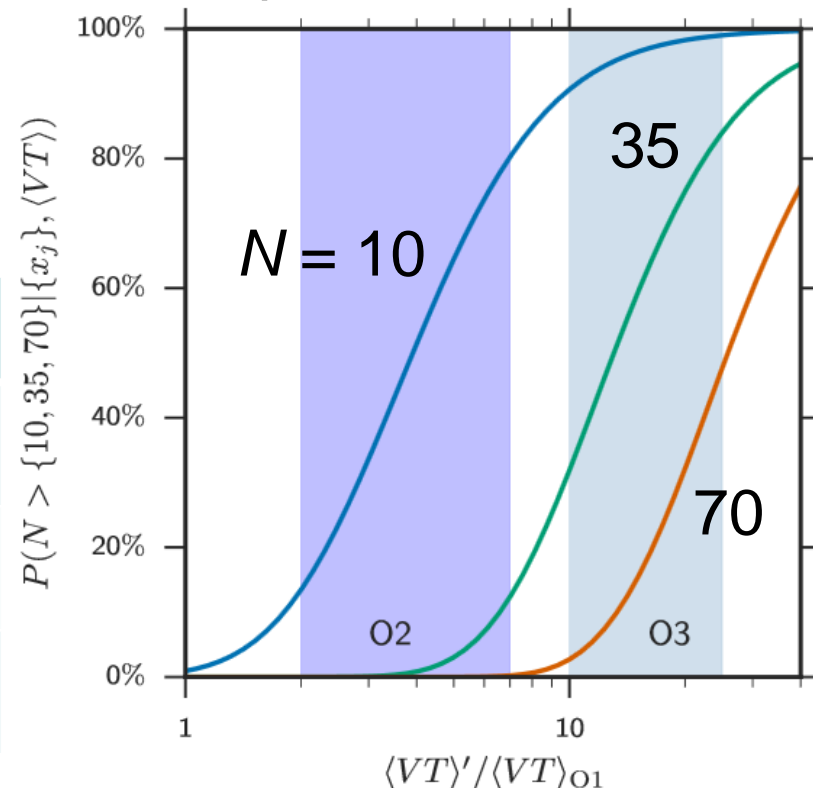
Abbott et al., arXiv:1606.04856

- これまでに検出された3例に基づいて、merger rate を見積もる。
→ LIGO O2, O3 における検出予測

merger rate

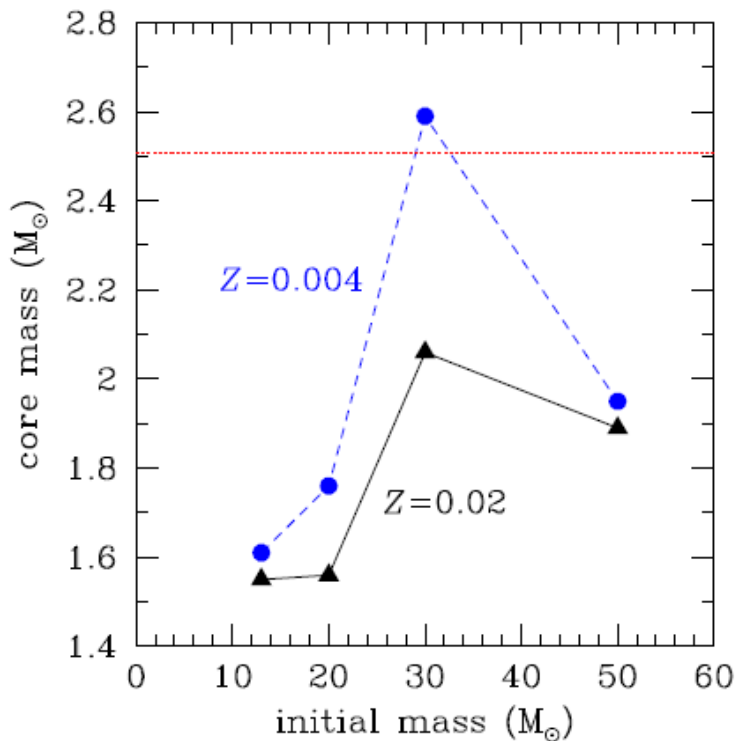
Event	$M_c (M_\odot)$	$R (\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1})$
GW150914	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$3.4^{+8.6}_{-2.8}$
LVT151012	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$	$9.4^{+30.4}_{-8.7}$
GW151226	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	37^{+92}_{-31}

N events より多く
検出される確率



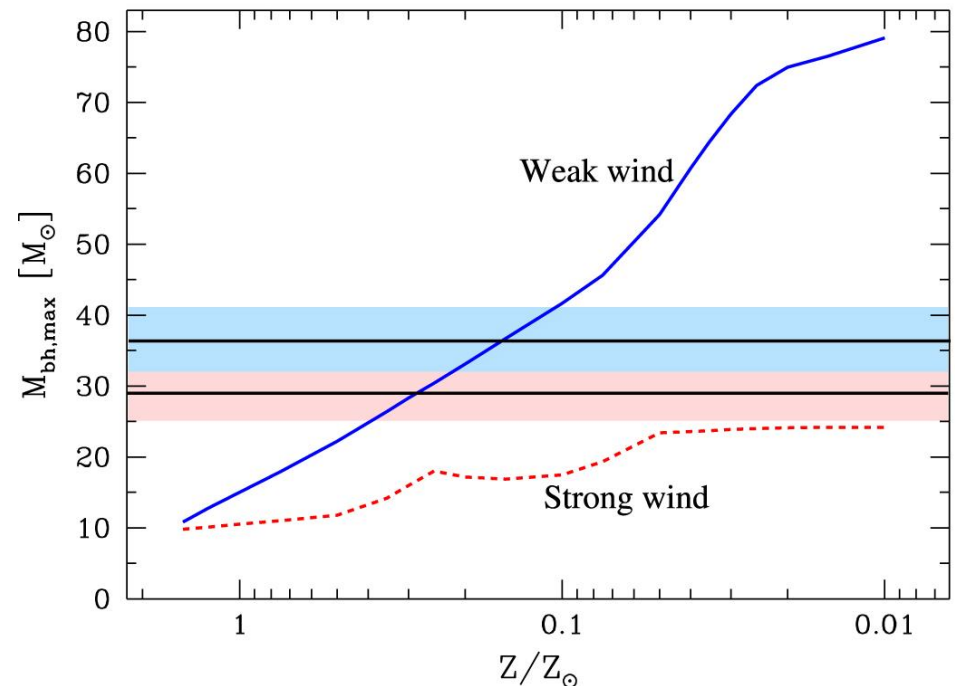
GW150914 の親星は？

- 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)

Abbott et al. ApJL 818, L22 (2016)



親星の起源を巡って

- 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。

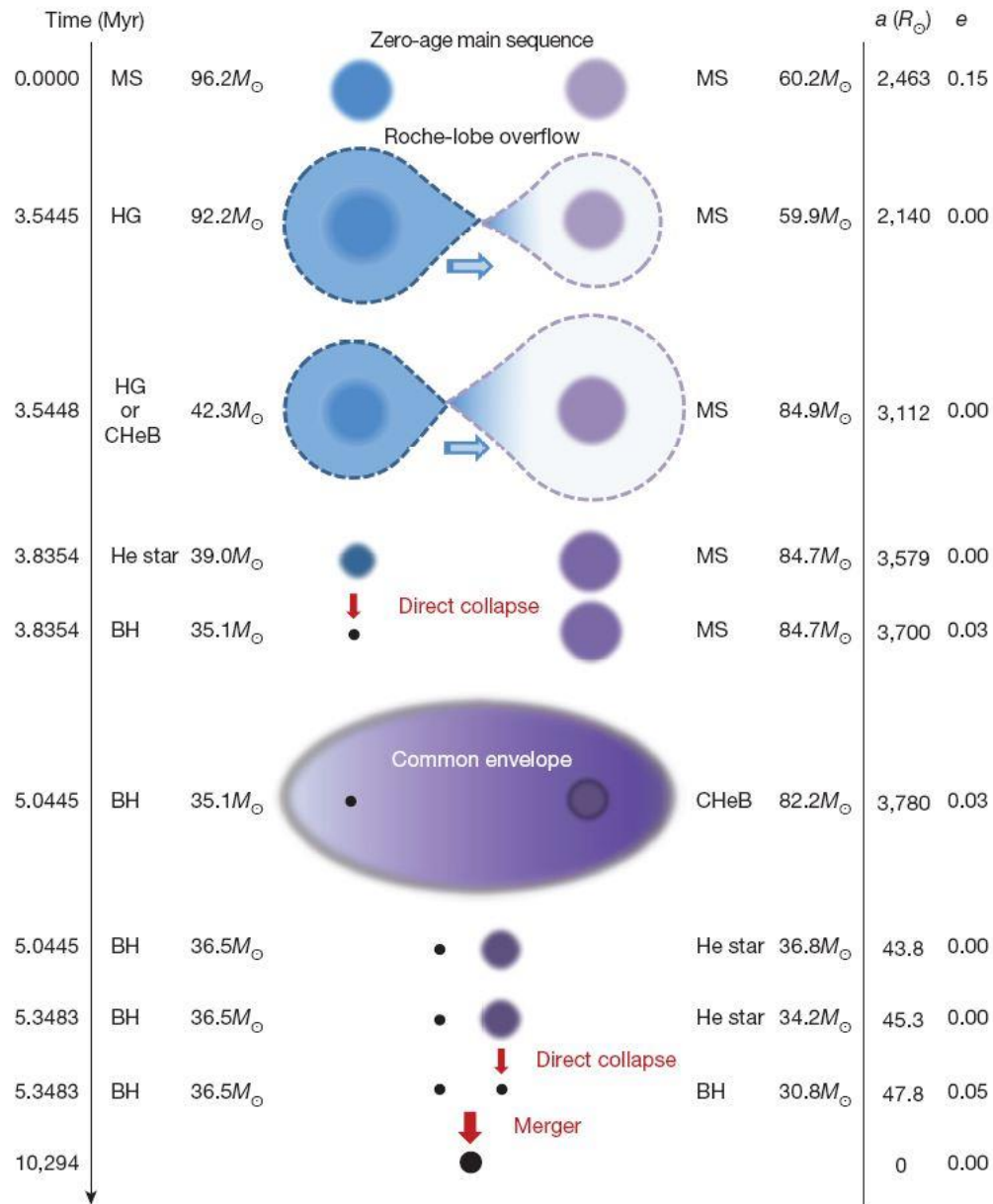
- 元の星はどんな星？

- 低金属量星

(e.g. Belczynski+ 2016)

- 初代星 (ゼロ金属量)

(Kinugawa+ 2014; 2016)



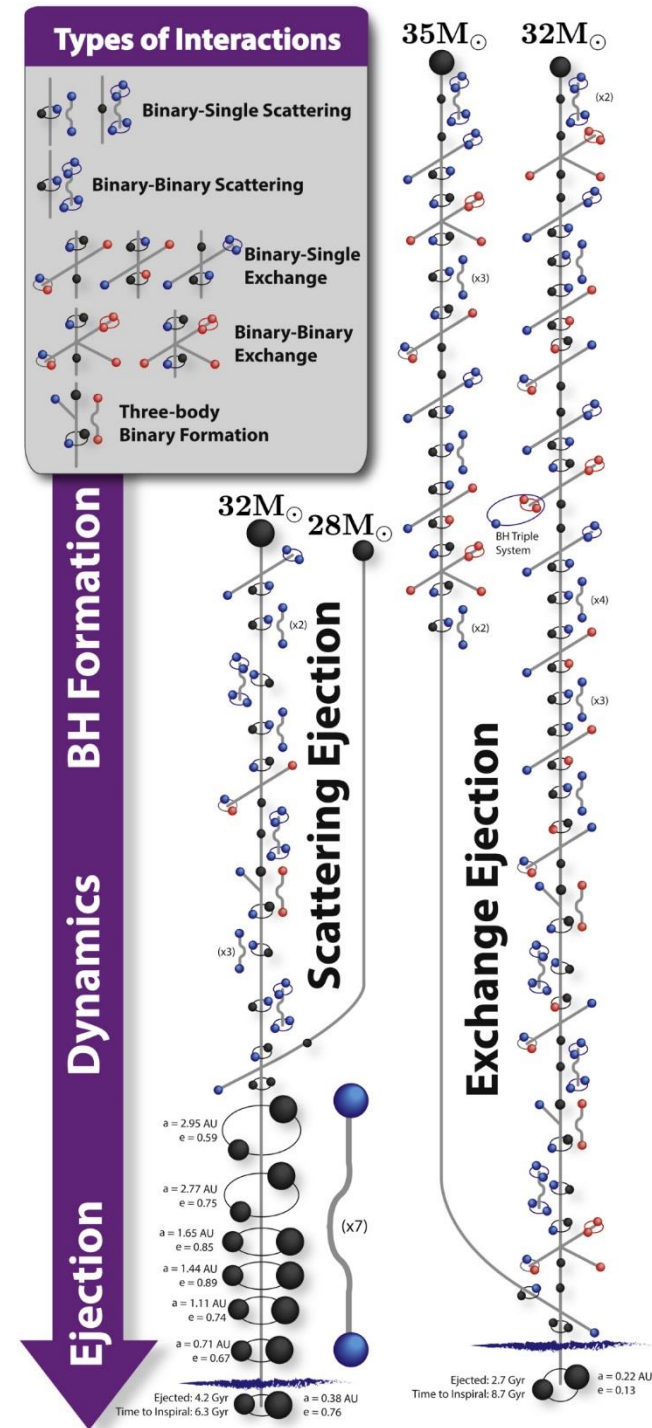
親星の起源を巡って

- 力学的形成起源説

→ 最初から単星だったブラックホールあるいは恒星と連星を組んでいたブラックホールが、球状星団内や銀河中心で力学的相互作用によって、連星ブラックホールを形成する。

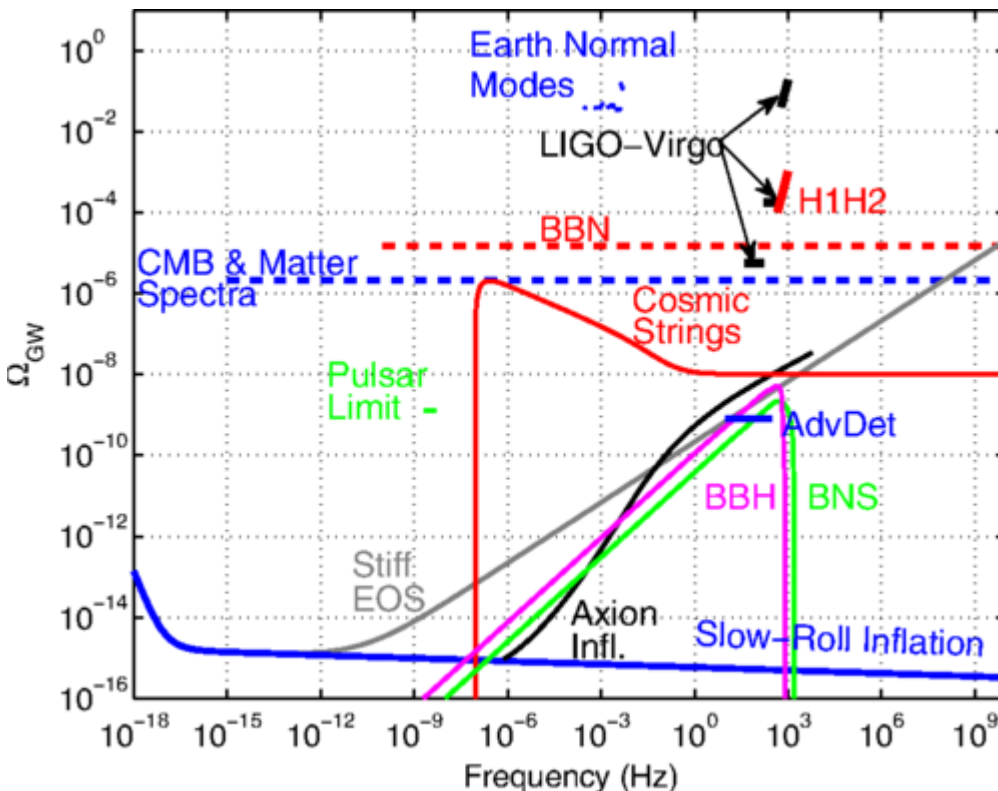
- 他にも、原始ブラックホール説などがある。

Rodriguez *et al.* *ApJL* **824**, L8 (2016)



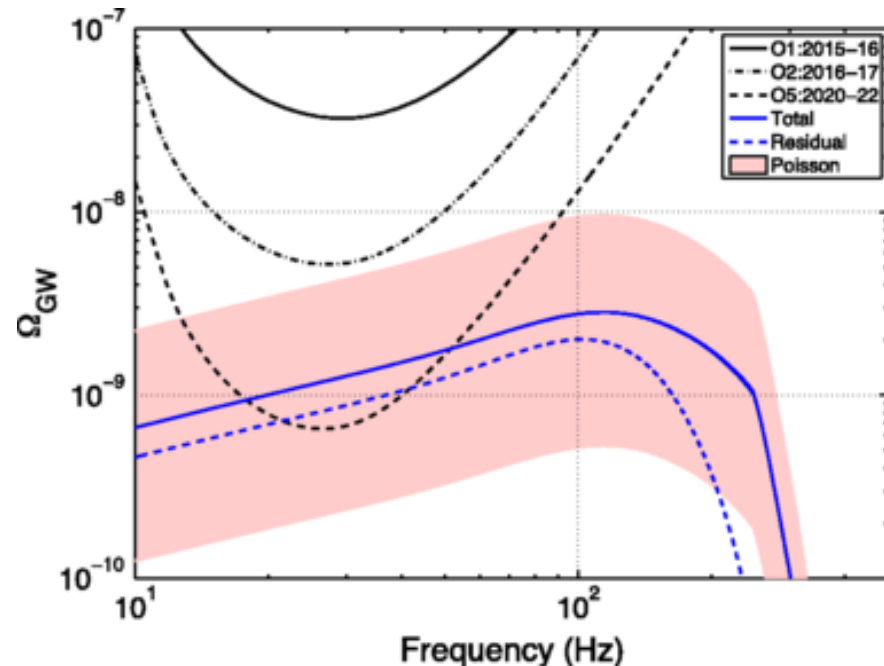
背景重力波への示唆

- 過去の連星ブラックホール合体からの重力波は定常的にやってくるランダムな波として観測。
- 背景重力波として、宇宙論的起源のものもある。



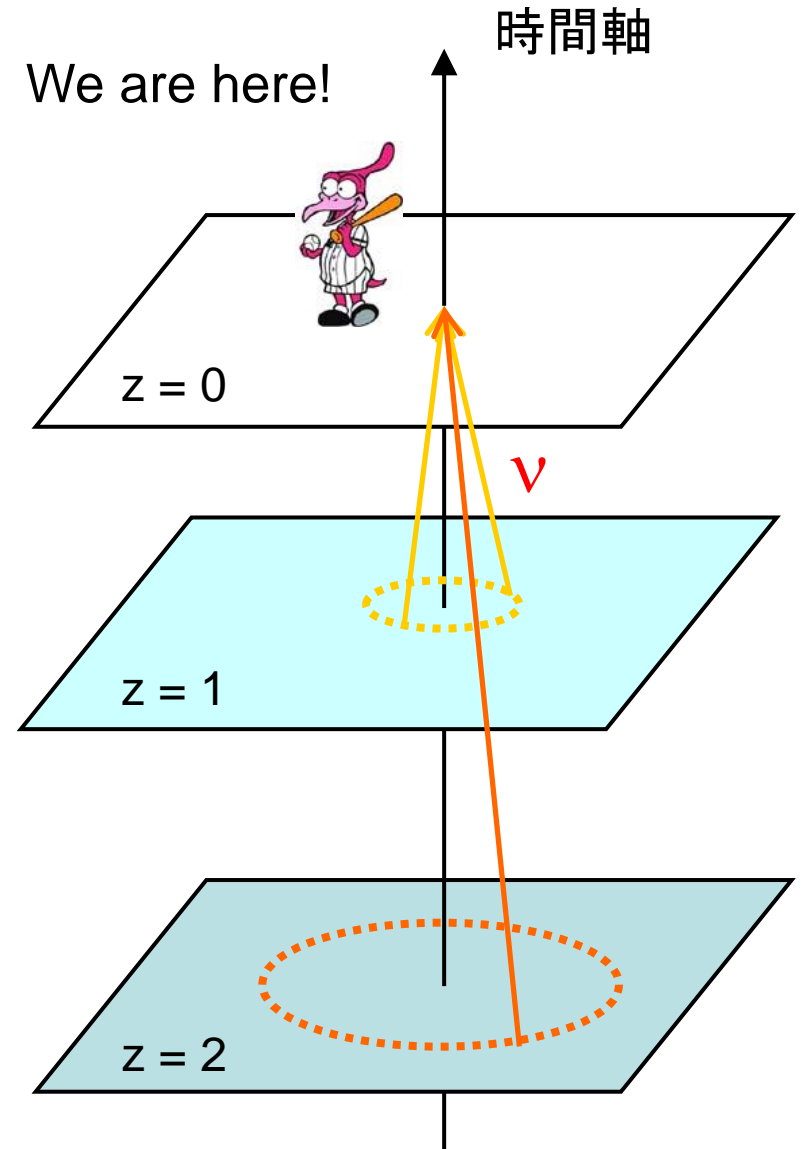
← Aasi et al., PRD 91, 022003 (2015)

Abbott et al. PRL 116, 131102 (2016) ↓



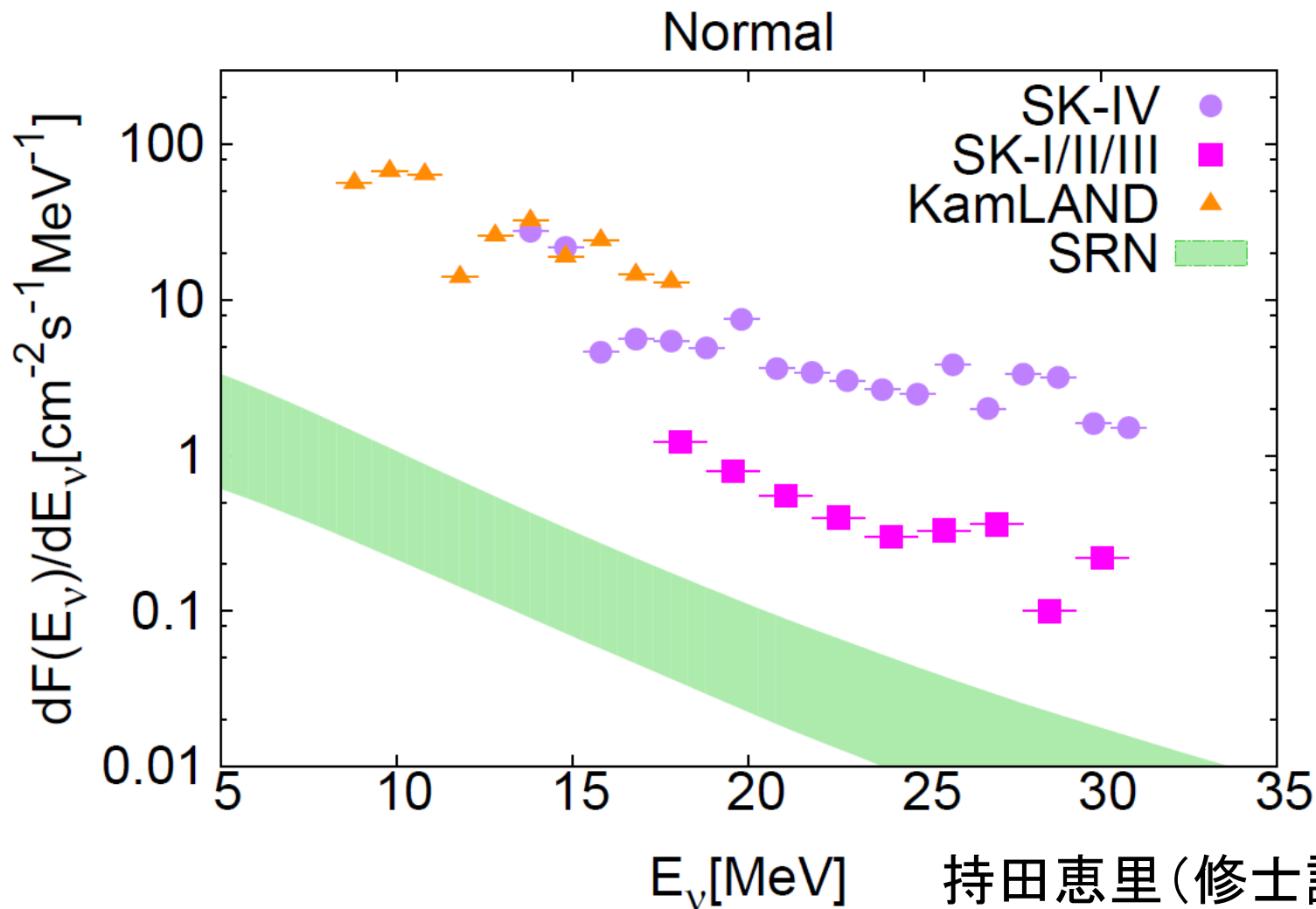
超新星背景ニュートリノ

- 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。



観測の現状

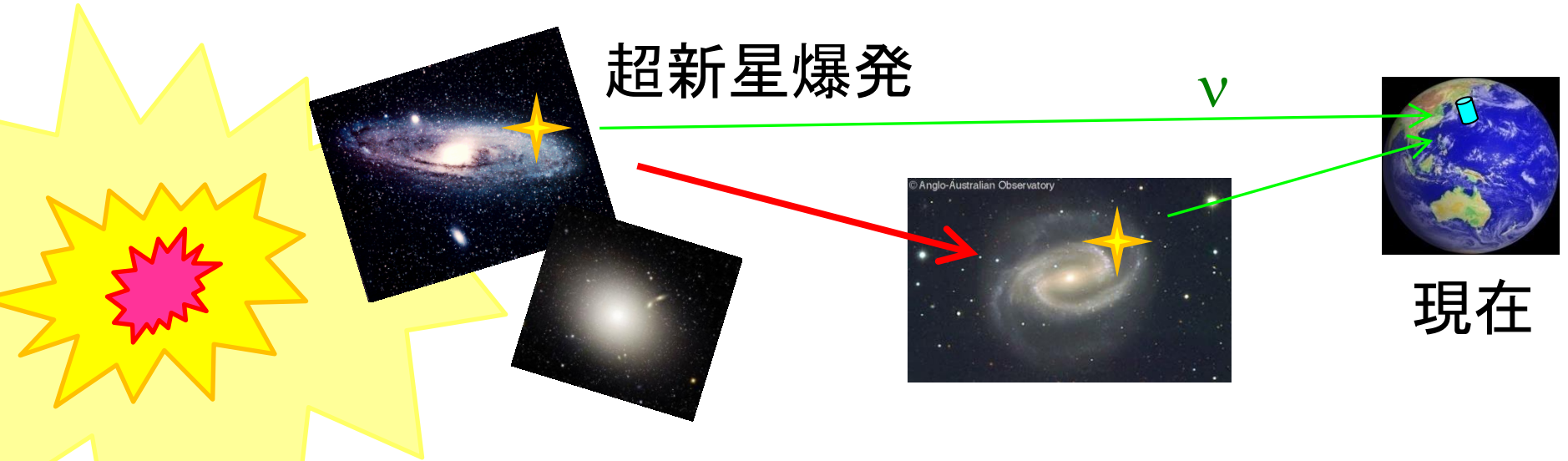
- 上限値が予測値に迫りつつある。



宇宙と銀河の化学進化

ビッグバン

銀河形成・進化



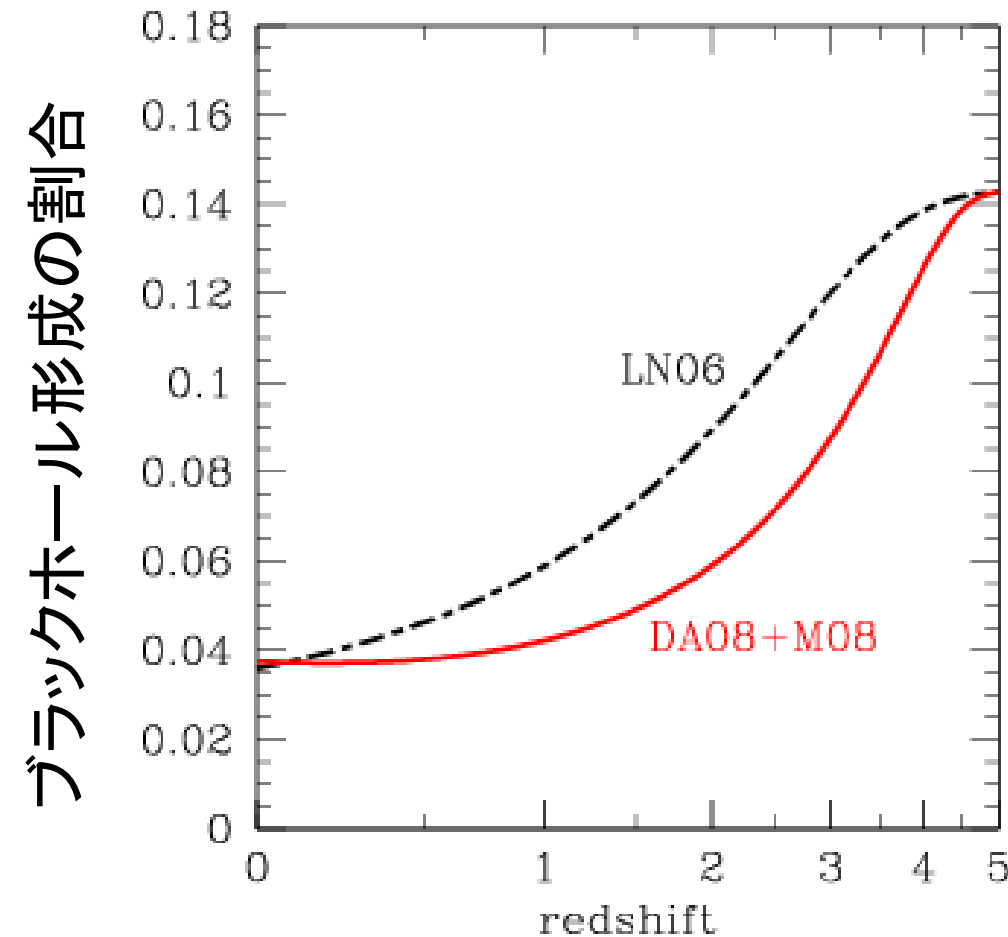
H, He のみ

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

重力崩壊前の星の金属量依存性

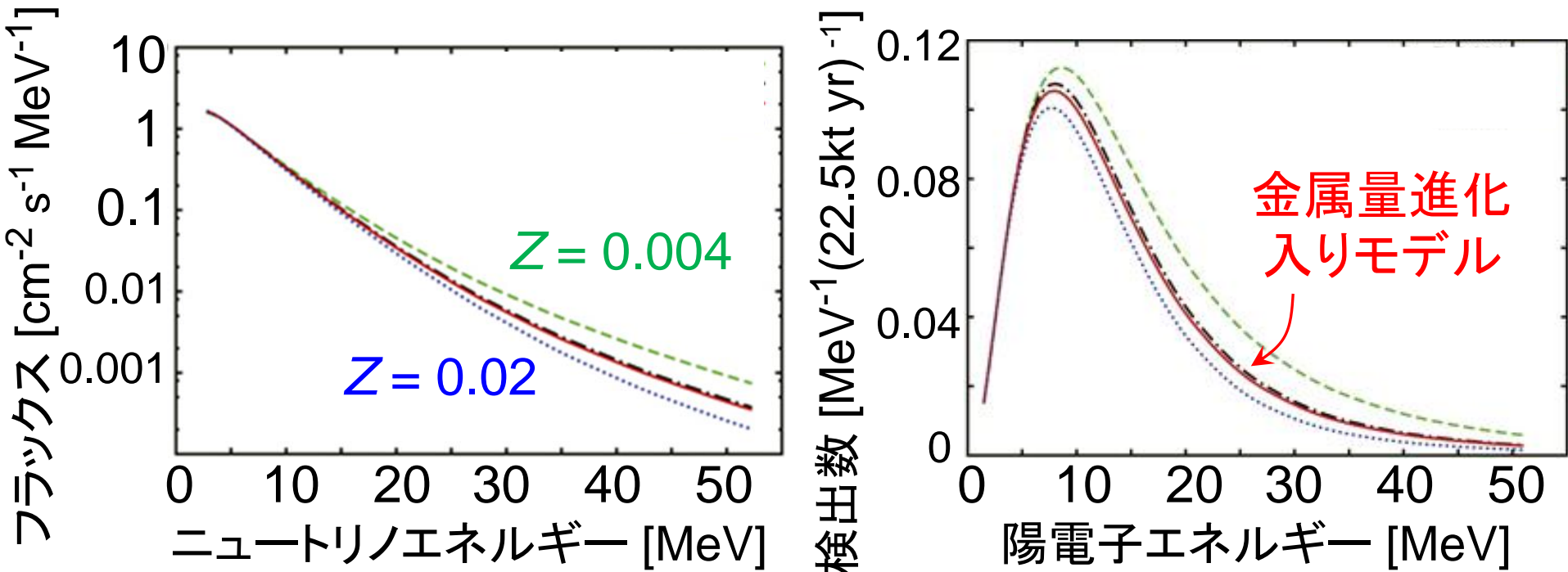
Nakazato+ arXiv:1503.01236



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

- 高赤方偏移ほど black hole になる割合が多い。
- black hole 形成の方が多くのニュートリノが放出

背景ニュートリノへの影響



- 高エネルギー領域のほうが不定性が大きい。
- 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。

同じモデルを背景重力波に適用

- LIGO group によるコンパクト連星合体起源の背景重力波の見積もり (Abbott et al. 2016, *PRL* 116, 131102)
 - 宇宙全体を one zone とみなし平均的な金属量の進化を計算。

$$Z_{\text{mean}}(z) = Z_{\text{mean}}(0) \frac{\int_z^{z_{\text{max}}} \frac{\dot{\rho}_*(z') dz'}{\{H_0(1+z')\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}\}}}{\int_0^{z_{\text{max}}} \frac{\dot{\rho}_*(z') dz'}{\{H_0(1+z')\sqrt{\Omega_m(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}\}}}$$

$$Z_{\text{mean}}(0) = 0.5Z_\odot$$

- 金属量分布が $\sigma = 0.5$ dex の log-normal 分布と仮定。
- 銀河の金属量分布に基づくモデルに改良！

背景重力波のエネルギー密度

- Formulation

$$f' = (1 + z)f$$

ブラックホール合体率

$$\Omega_{\text{GW}}^{\text{BH}}(f) = \frac{f}{\rho_c} \int_0^{z_{\text{max}}} dz \left[\frac{R_m^{\text{BH}}(z)}{H_0(1+z)\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \times \frac{dE_{\text{GW}}^{\text{BH}}(f')}{df'} \right]$$

周波数

$\rho_c = 3H_0^2 c^2 / 8\pi G$

1回の合体の重力波のエネルギー密度

- 1回の合体の重力波のエネルギー密度

model by Ajith et al. (2011)

連星のチャープ質量

$$\text{or } \frac{dE_{\text{GW}}^{\text{BH}}(f)}{df} \simeq \frac{(G\pi)^{2/3}}{3} M_{c,\text{BH}}^{5/3} f^{-1/3} \text{ @ inspiral phase}$$

ブラックホール合体率 $R_m^{\text{BH}}(z)$

ブラックホール形成率

delay time distribution

$$R_m^{\text{BH}}(z_m) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} R_f^{\text{BH}}(z_f) P(t_d) dt_d$$

合体の起こる redshift

ブラックホールが出来た redshift

ここで、 $T(z)$ を redshift z における lookback time として

$$T(z_f) = T(z_m) + t_d$$

- delay time distribution

$$P(t_d) \propto 1/t_d \text{ for } t_d > \underline{\underline{t_{\min}}}$$

minimum delay time: $t_{\min} = 50 \text{ Myr} - 5 \text{ Gyr}$

ブラックホール形成率 $R_f^{\text{BH}}(z)$

- metallicity Z_{crit} 以下の金属量を持つ星の形成率 $\dot{\rho}_*^{\text{low}}(z, Z_{\text{crit}})$ に比例

$$R_f^{\text{BH}}(z) = \zeta_{\text{BH}} \dot{\rho}_*^{\text{low}}(z, Z_{\text{crit}})$$

- 比例係数 ζ_{BH}

→ よくわからないので、定数だと思って放置
(LIGO paper の手法を踏襲)

- 低金属量星の形成率 $\dot{\rho}_*^{\text{low}}(z, Z_{\text{crit}})$

→ 銀河の星形成率・金属量の進化を考慮

低金属量星の形成率 $\dot{\rho}_*^{\text{low}}(z, Z_{\text{crit}})$

- Nakazato et al. ApJ 804, 75 (2015)
- 宇宙全体の星形成率密度

$$\dot{\rho}_*(z) = \int_0^\infty \underline{\dot{M}_*(M_*, z)} \underline{\phi_{\text{SMF}}(M_*, z)} dM_*$$

- 低金属量星の星形成率密度

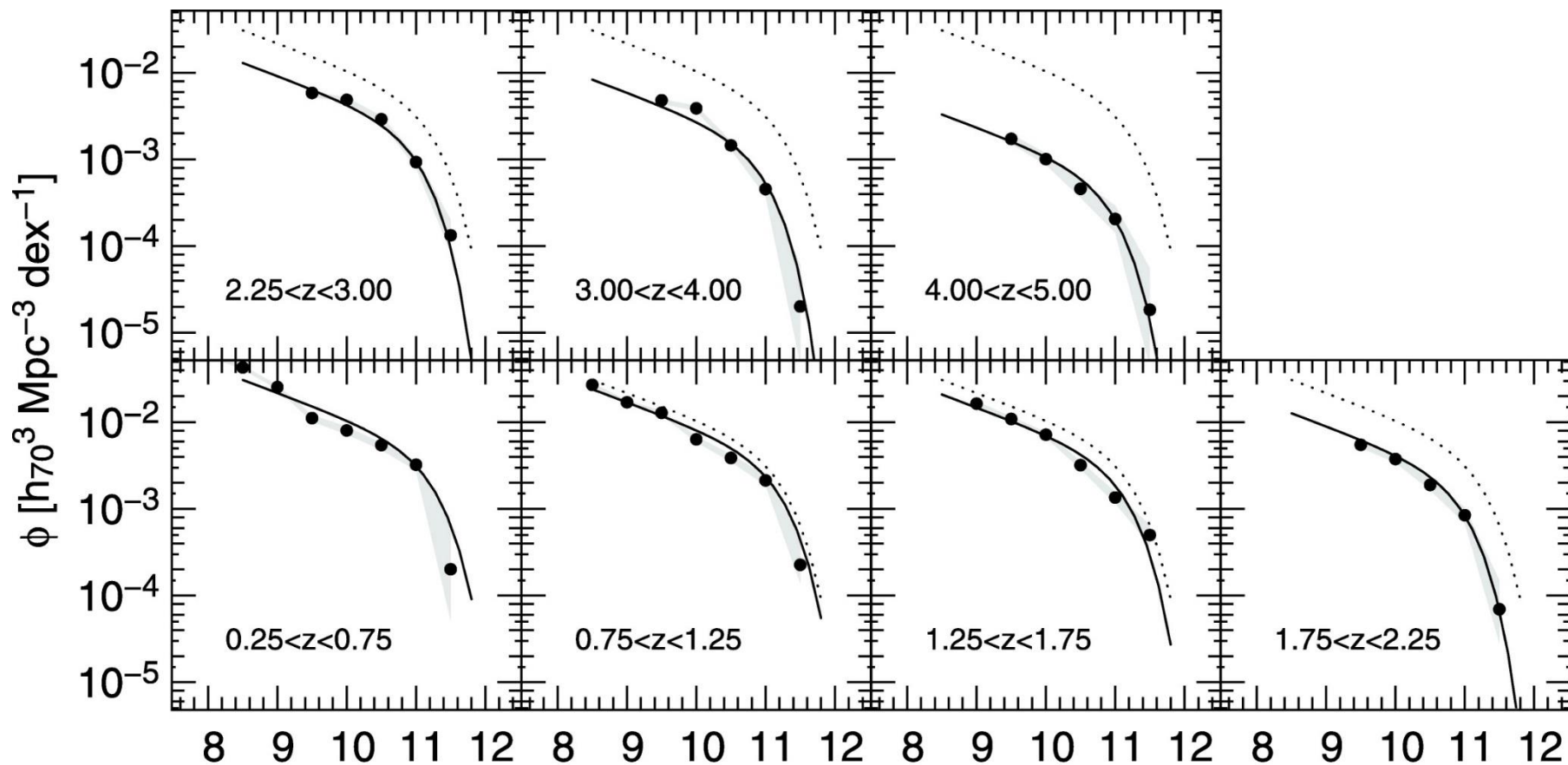
銀河の質量-金属量関係 (Maiolino+, 2008)

$$\dot{\rho}_*^{\text{low}}(z, Z_{\text{crit}}) = \int_0^{\overset{M_*(z, Z_{\text{crit}})}{\quad}} \underline{\dot{M}_*(M'_*, z)} \underline{\phi_{\text{SMF}}(M'_*, z)} dM'_*$$

銀河の星形成率 星質量関数
(Drory & Alvarez, 2008)

星質量関数 (stellar mass function)

- High mass で cutoff を持つ (Schechter form)

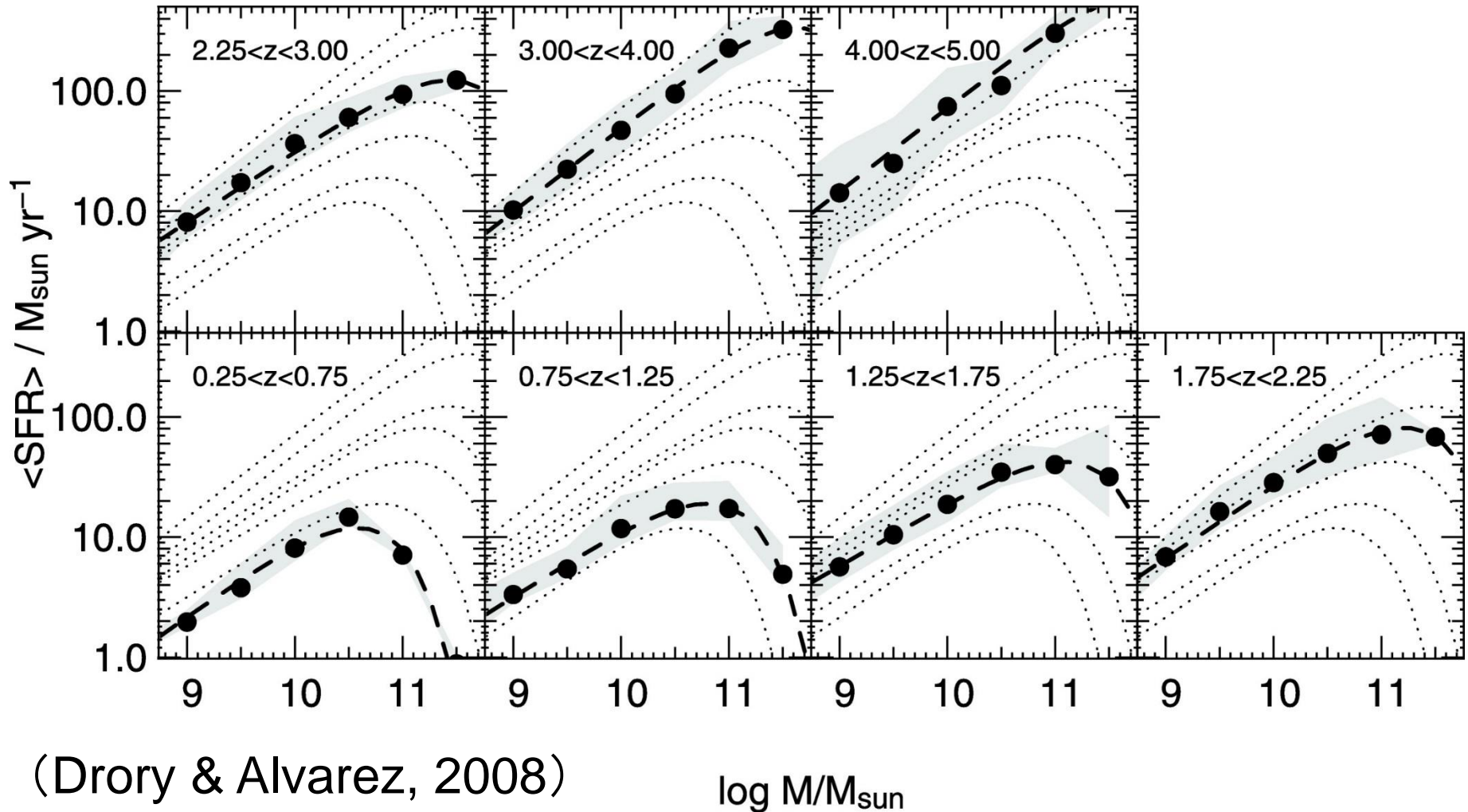


(Drory & Alvarez, 2008)

$\log M_* [h_{70}^{-2} M_{\text{sun}}]$

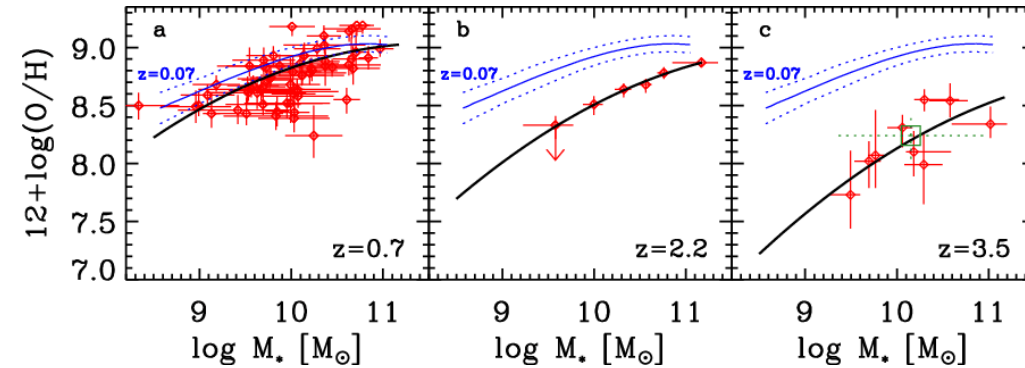
銀河の星形成率

- 宇宙の星形成率: $\dot{\rho}_*(z) = \int_0^\infty \dot{M}_*(M_*, z) \phi_{\text{SMF}}(M_*, z) dM_*$



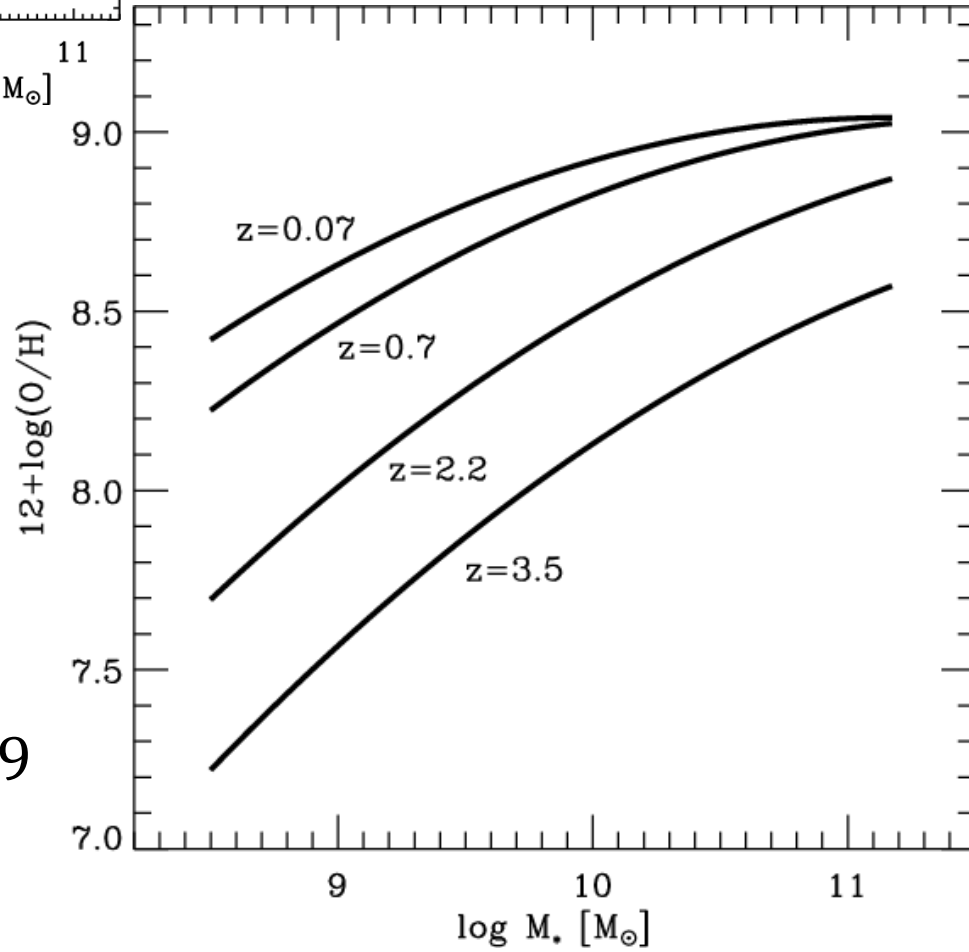
銀河の質量-金属量関係

(Maiolino+, 2008)



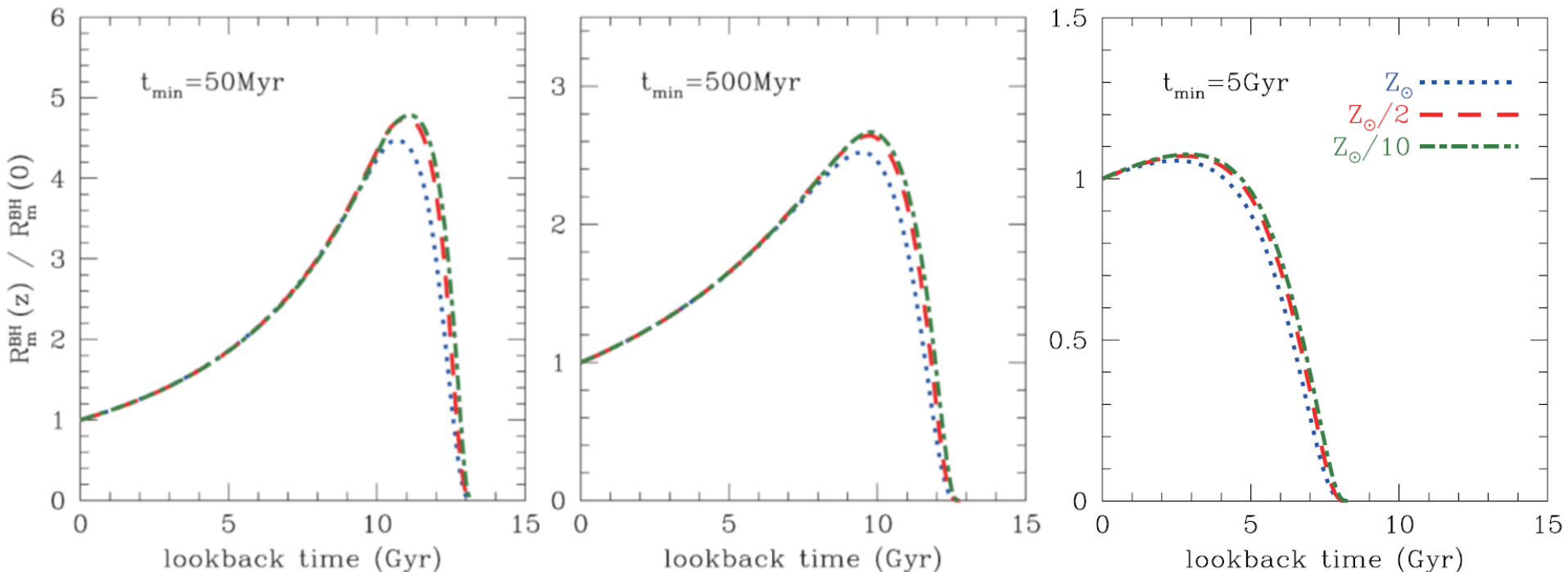
- 昔の銀河ほど金属量が少ない。
- 金属量はあるところで頭打ちになる。

$$\log\left(\frac{Z}{Z_{\odot}}\right) = 12 + \log\left(\frac{O}{H}\right) - 8.69$$



ブラックホール合体率の計算

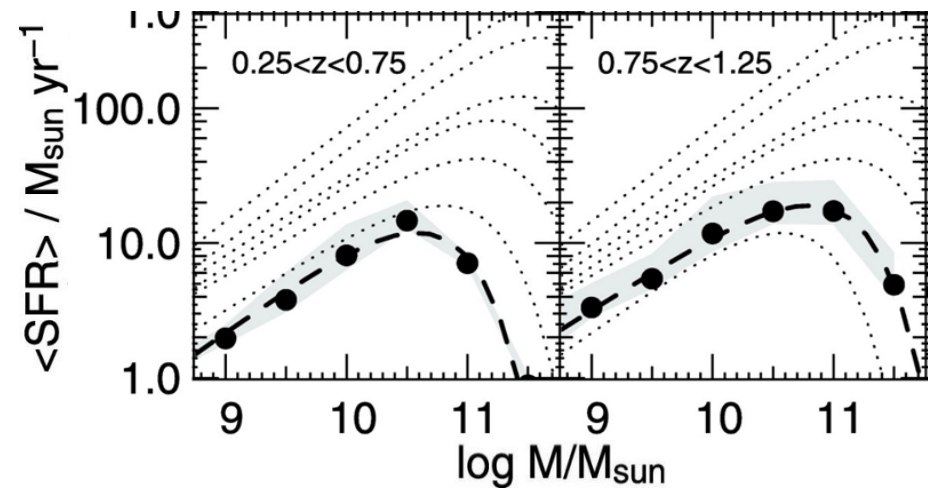
- local Universe での合体率 $R_m^{\text{BH}}(0)$ でスケールすると時間発展が求められる。
- critical metallicity Z_{crit} に依存しない。
↑ metal rich になった銀河では星形成が止む。



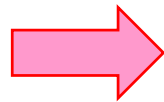
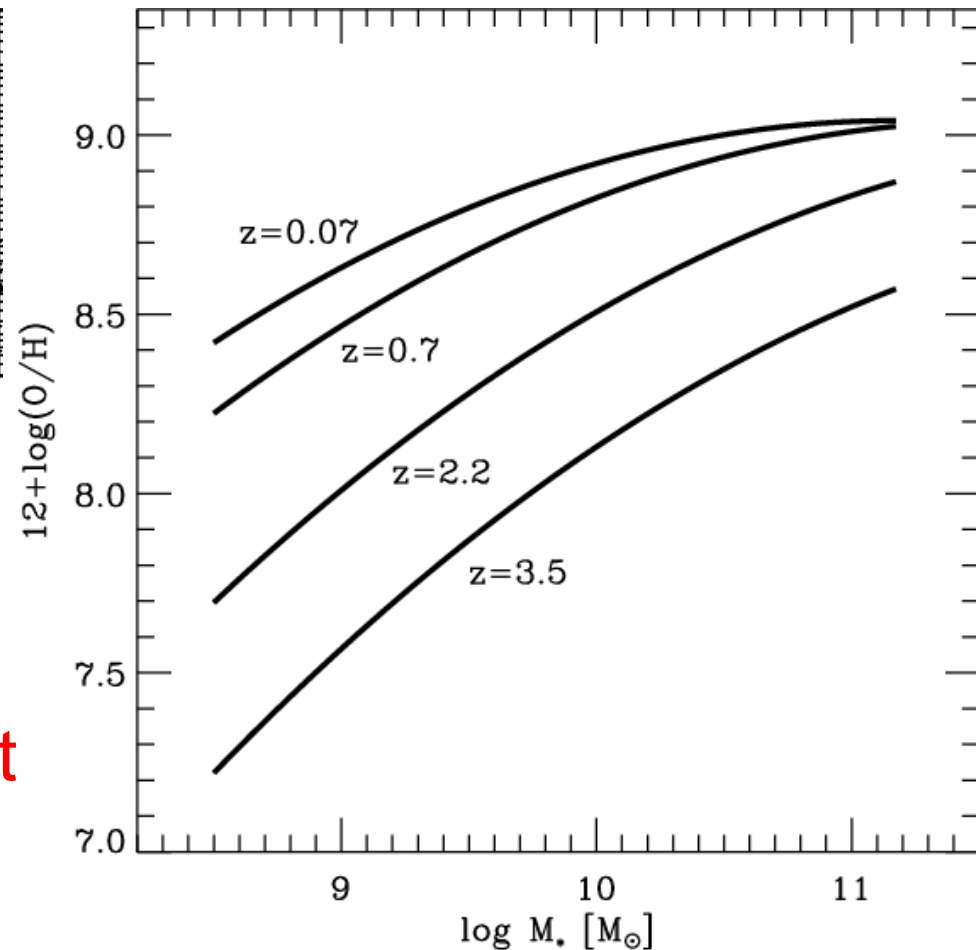
銀河進化のモデルを見てみると・・・

- 星形成率と質量金属量関係が同じように平行移動する。

(Drory & Alvarez, 2008)



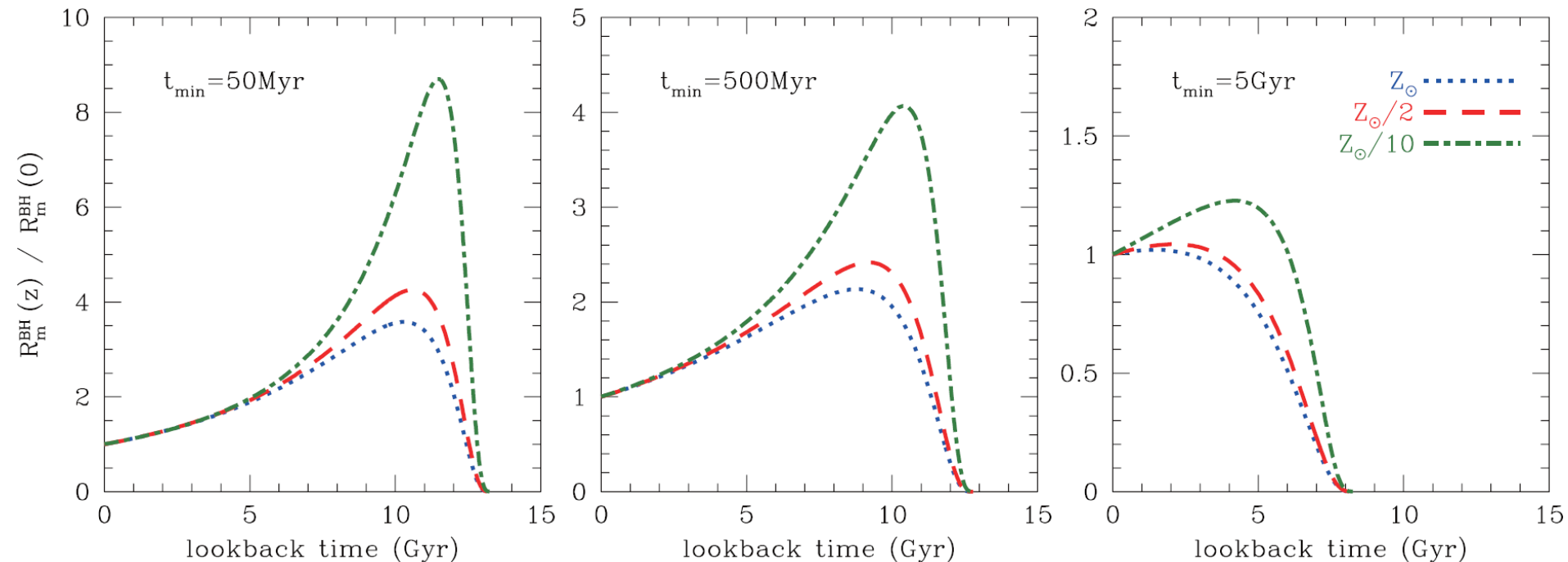
(Maiolino+, 2008)



+0.6 dex per unit redshift

LIGO paper の方法だと・・・

- 低 redshift で低金属量の星の形成が抑制され、 Z_{crit} 依存性が大きくなる。
- 比較のため、宇宙の全星形成率密度 $\dot{\rho}_*(z)$ は Drory & Alvarez (2008) にあわせておく。



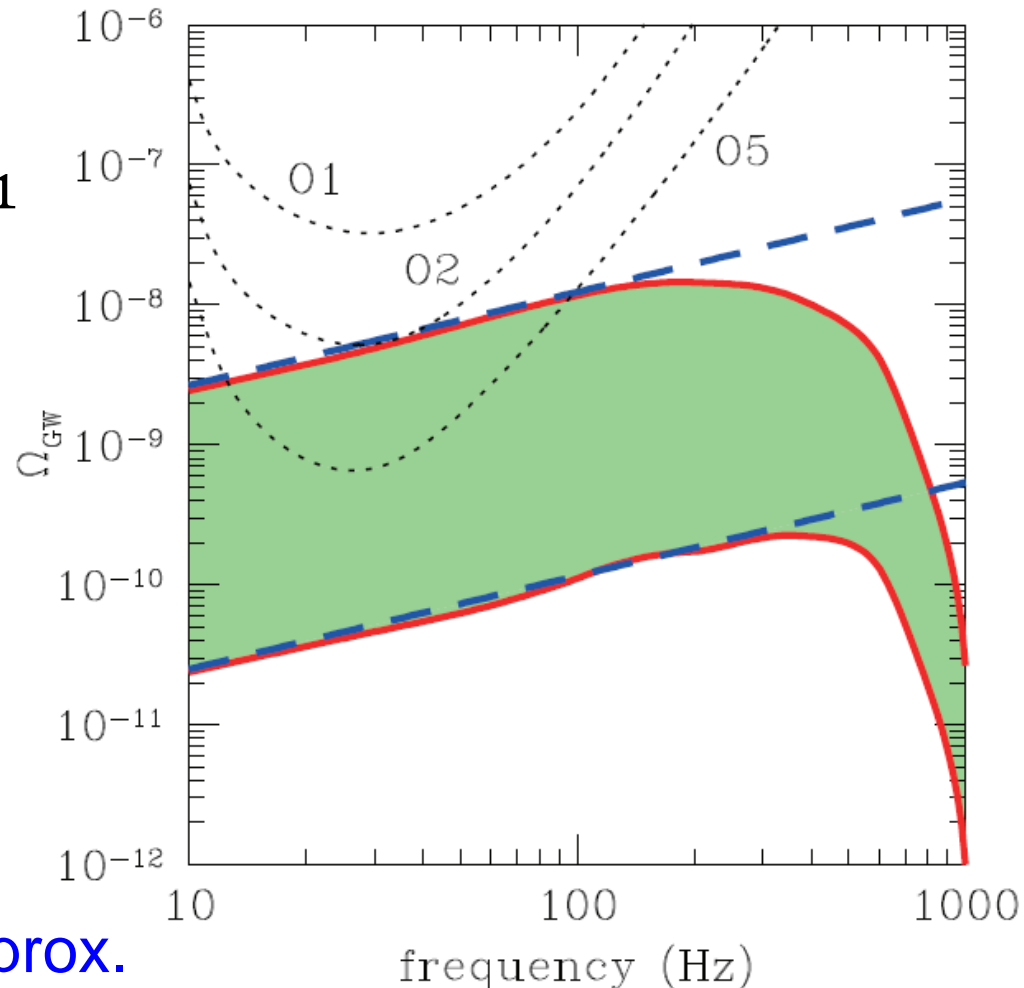
結果：背景重力波のスペクトル

- local Universe の合体率 $R_m^{\text{BH}}(0)$ を仮定するとスペクトルが出せる。

$$\left\{ \begin{array}{l} R_m^{\text{BH}}(0) \\ = 9 - 240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} \\ t_{\text{min}} = 50 \text{ Myr} - 5 \text{ Gyr} \end{array} \right.$$

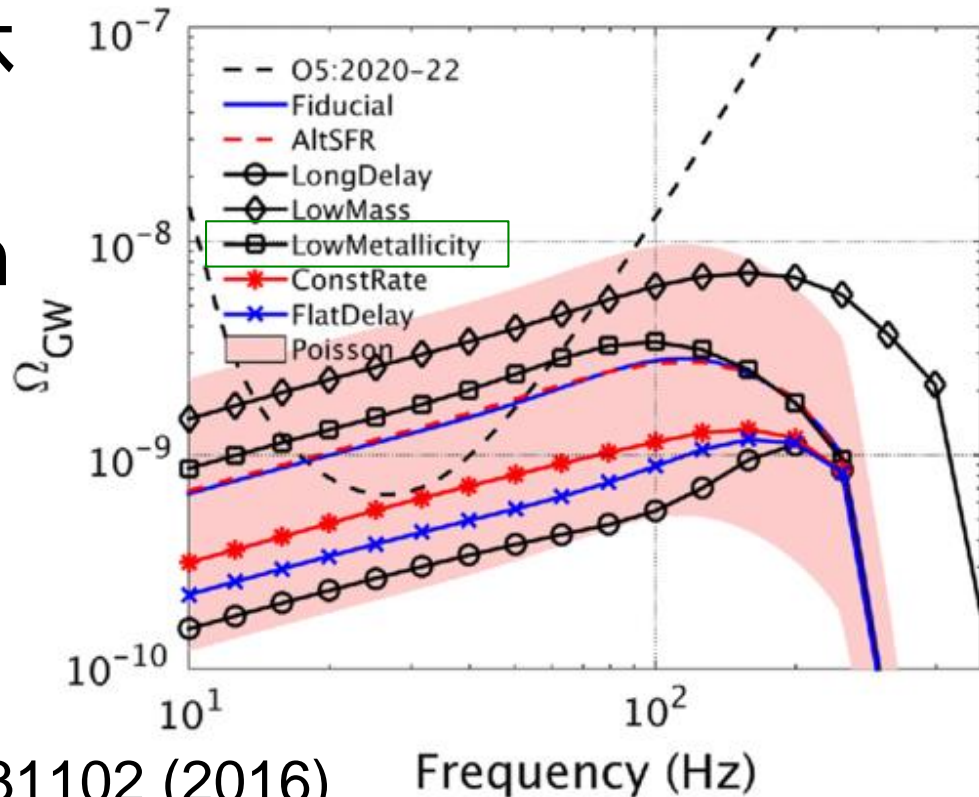
+ LIGO O1 の質量分布
でスピンなし・等質量の
merger を仮定。

- adv. observation
- Ajith et al. (2011)
- - - - inspiral phase approx.



LIGO paper の結果では・・・

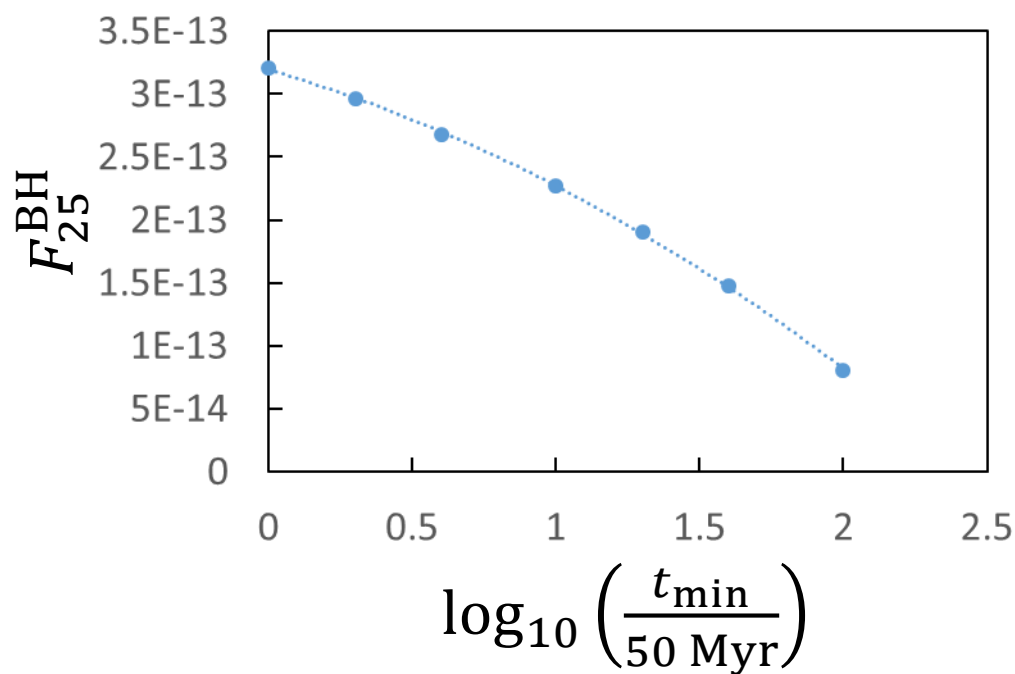
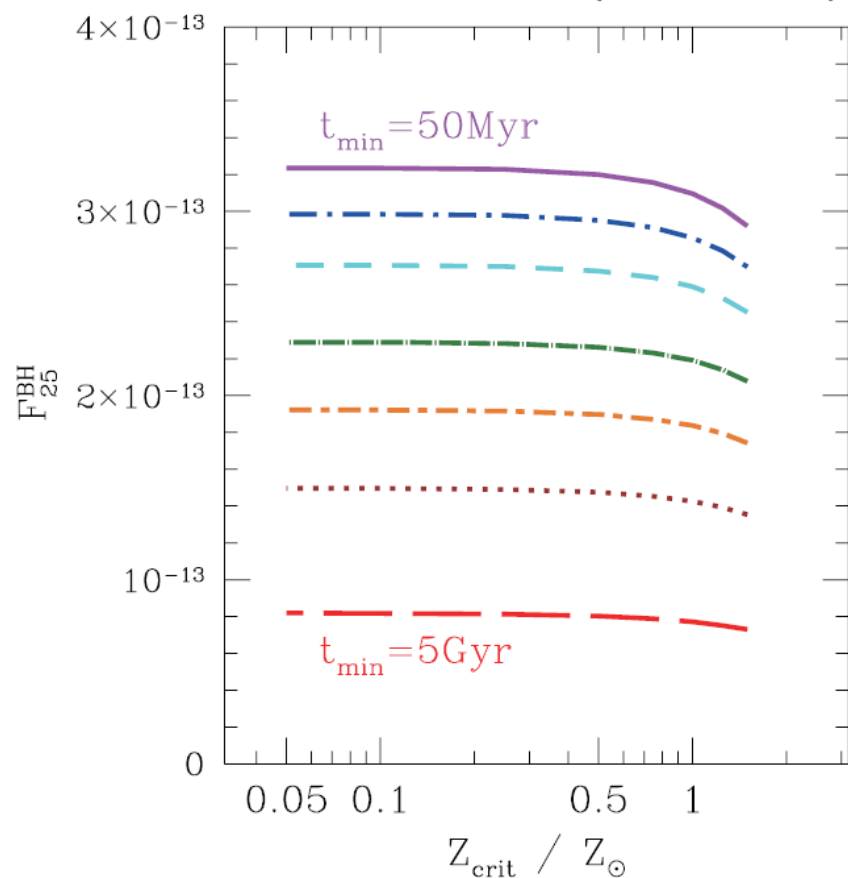
- 背景重力波のエネルギー密度にも、 Z_{crit} 依存性が現れるが、それほど大きくない。
→ $R_m^{\text{BH}}(0)$ を固定しているため。
- local Universe の合体率 $R_m^{\text{BH}}(0)$ 以外では、delay time distribution (including t_{min}) の不定性が最大。



結果：背景重力波のエネルギー密度

- inspiral phase の近似を仮定。

$$\Omega_{\text{GW}}^{\text{BH}}(f) \simeq F_{25}^{\text{BH}} \left(\frac{M_{c,\text{BH}}}{M_{\odot}} \right)^{5/3} \left(\frac{R_m^{\text{BH}}(0)}{\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}} \right) \left(\frac{f}{25 \text{ Hz}} \right)^{2/3}$$



$R_m^{\text{BH}}(0)$, t_{min} と背景重力波の エネルギー密度の関係

- critical metallicity Z_{crit} には依存しない。
- inspiral phase の近似を仮定。

→ minimum delay time t_{min} 依存性を fitting !

$$\Omega_{\text{GW}}^{\text{BH}}(f) \simeq F_{25}^{\text{BH}} \left(\frac{M_{c,\text{BH}}}{M_{\odot}} \right)^{5/3} \left(\frac{R_m^{\text{BH}}(0)}{\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}} \right) \left(\frac{f}{25 \text{ Hz}} \right)^{2/3}$$

$$F_{25}^{\text{BH}} = c_0^{\text{BH}} + c_1^{\text{BH}} \log_{10} \left(\frac{t_{\text{min}}}{50 \text{ Myr}} \right) + c_2^{\text{BH}} \left\{ \log_{10} \left(\frac{t_{\text{min}}}{50 \text{ Myr}} \right) \right\}^2$$

$$c_0^{\text{BH}} = 3.2 \times 10^{-13}$$

$$c_1^{\text{BH}} = -6.6 \times 10^{-14}$$

$$c_2^{\text{BH}} = -2.6 \times 10^{-14}$$

背景重力波検出の見通し

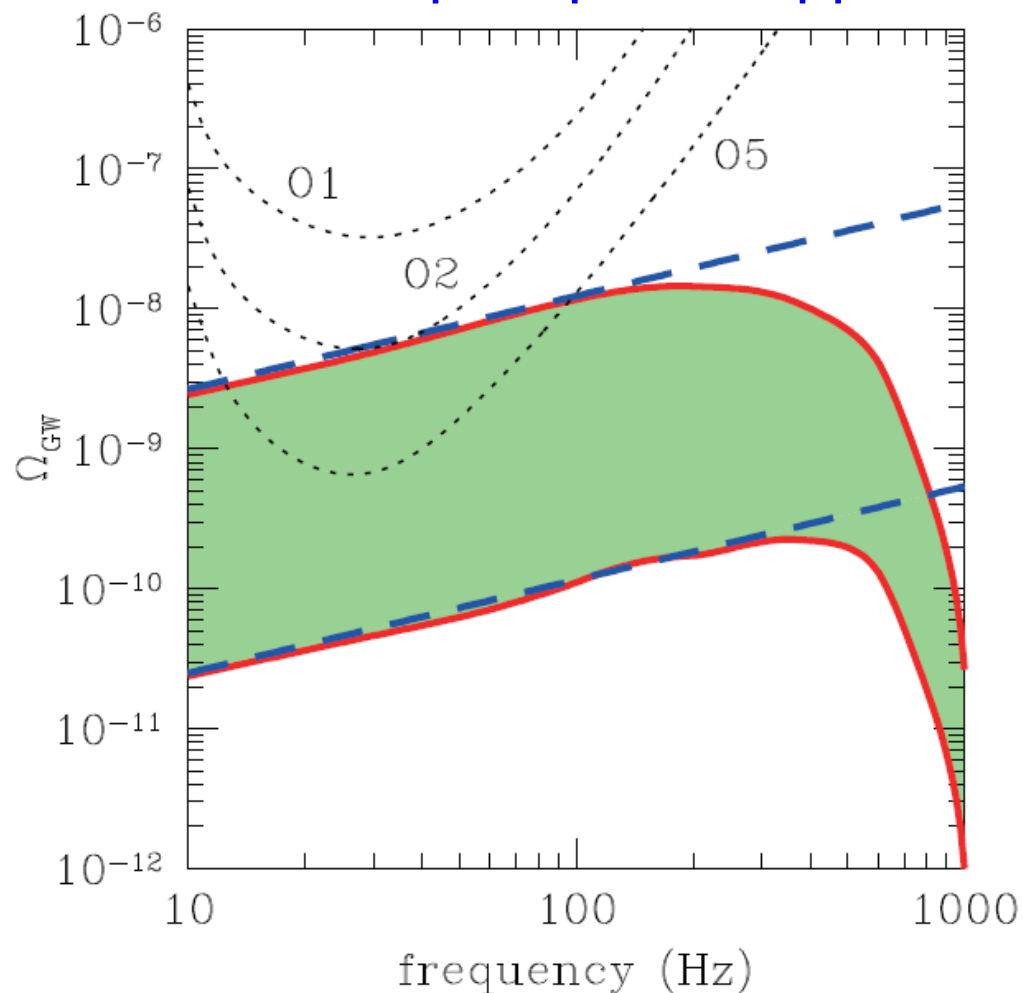
- ブラックホール合体の event rate に不定性があるが、楽観的な場合、aLIGO O5 で検出できる可能性。
→ LIGO paper による結論と同じ。



adv. observation

Ajith et al. (2011)

inspiral phase approx.



まとめ：ブラックホール形成と ニュートリノ放出

- ブラックホールの形成が大質量星の重力崩壊によるものであれば、ニュートリノ放出を伴う。
→ ニュートリノ検出器のターゲットおよび検証。
- 超新星を伴わない場合、ブラックホール形成の瞬間まで物質降着が続くため、通常の超新星ニュートリノとくらべて平均エネルギーが高い。
- 総放出エネルギーは状態方程式の依存性が大きい。
- 背景ニュートリノにも寄与。

まとめ：背景重力波

- 約 $30M_{\odot}$ の BH が低金属量の環境下で形成されると仮定して、連星 BH から放出される背景重力波のエネルギースペクトルを計算した。
- 低金属星形成率は、銀河の星形成率や金属量の進化に基づいて評価した。
- 背景重力波のエネルギースペクトルは BH 形成の critical metallicity Z_{crit} に依存しないことがわかった。
 - metal rich な銀河では星形成が止むため、規格化 BH 合体率 $R_m^{\text{BH}}(z)/R_m^{\text{BH}}(0)$ は Z_{crit} に依らない。