

# **The gravitational wave from binary black hole mergers originated from very massive population III binary stars**

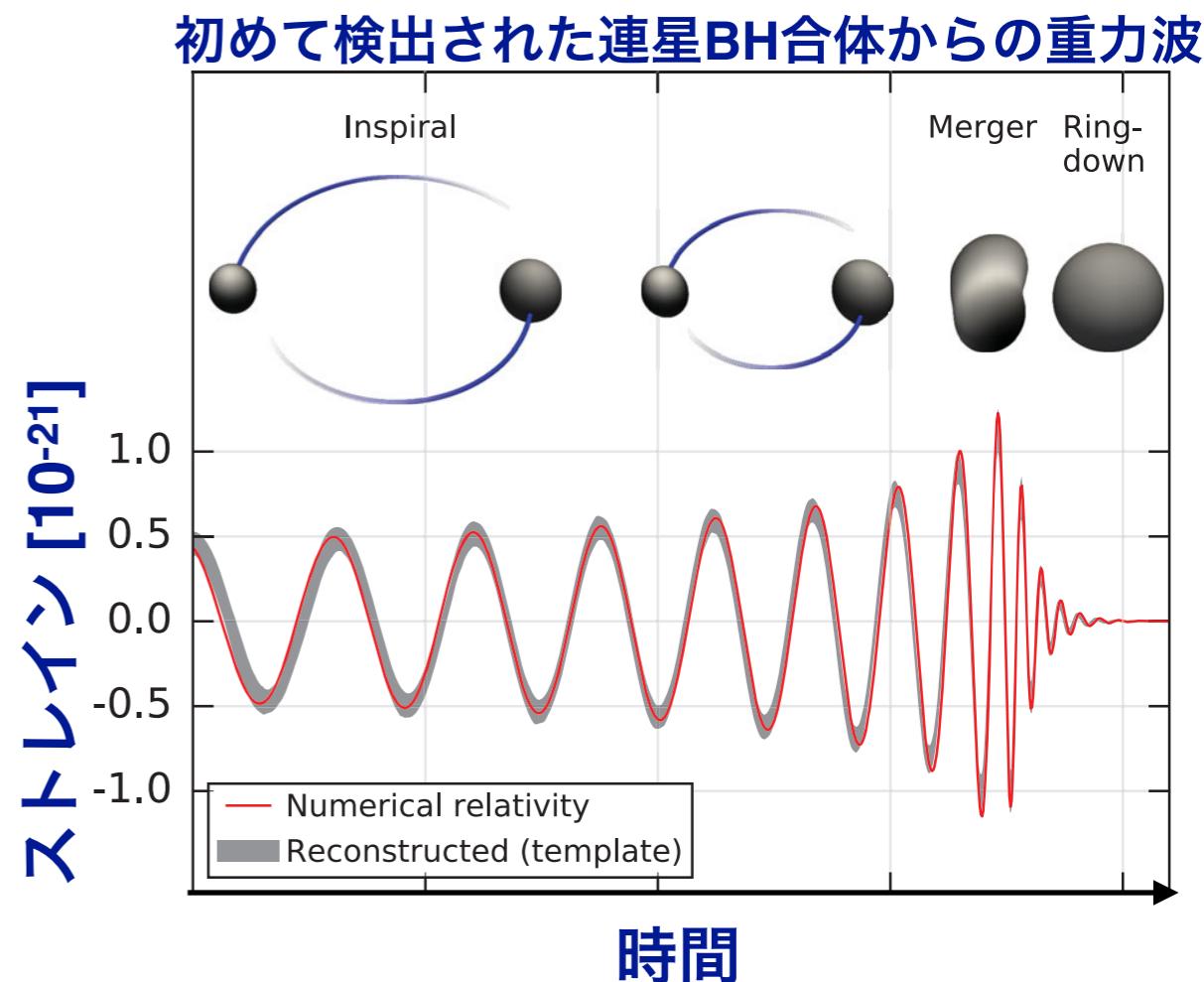
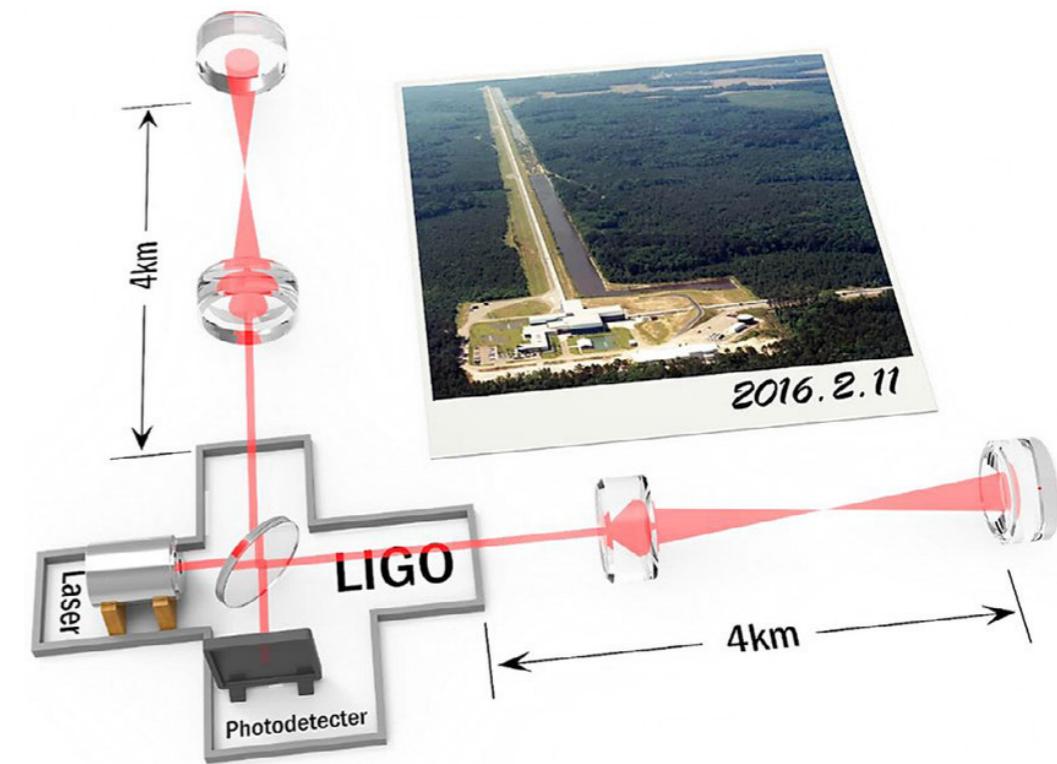
**(非常に重たい種族IIIの連星起源の連星ブラックホール合体と重力波)**

梅田研究室 聖川昂太郎

# Introduction

# 重力波による連星BHの観測

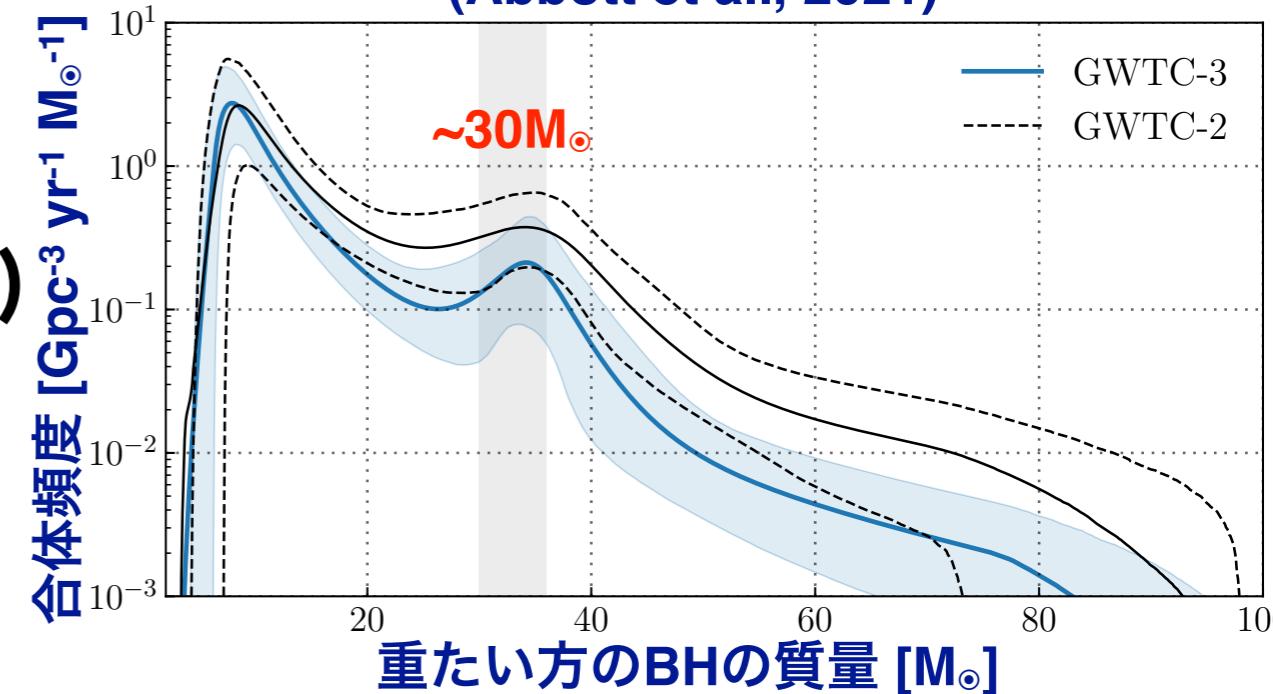
- ・重力波 = 時空の歪みの伝搬
- ・レーザー干渉計(LIGO,Virgo,KAGRA)で観測
- ・重力波源: 連星BHの合体など
- ・信号から、それぞれのBHの質量、スピン、光度距離が得られる
- ・BHについて知る新たな観測手段



# 現在までの重力波観測

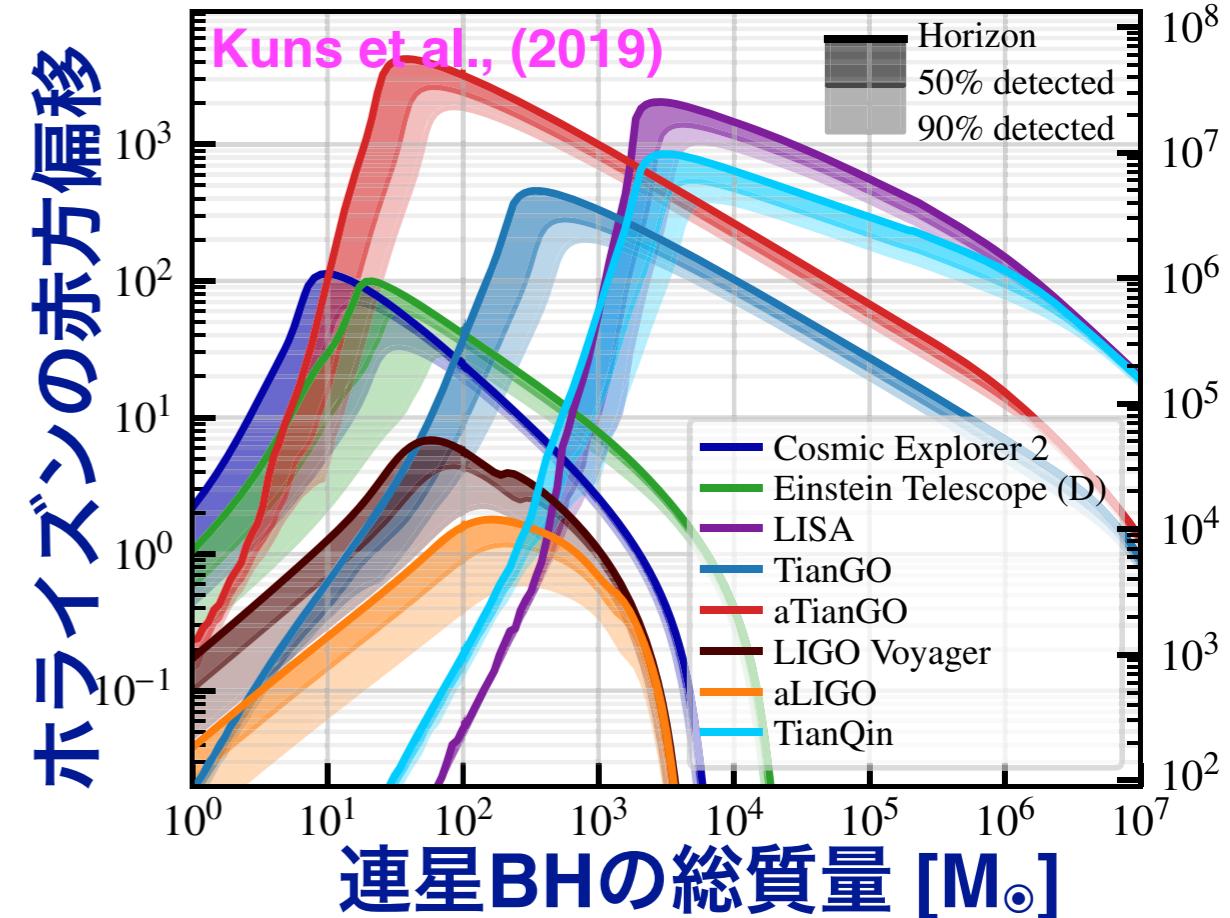
- aLIGO, Virgoによる観測(~2年)
- 85の連星BHが見つかる(~ $30M_{\odot}$ )
- 総質量~ $150M_{\odot}$ の連星BH  
(GW190521)も検出
- 銀河系のBH(~ $10M_{\odot}$ )より重たい
- 起源解明に向けて、様々な連星進化計算、星団シミュレーションが行われている。

重力波観測から見積もられた質量分布  
(Abbott et al., 2021)



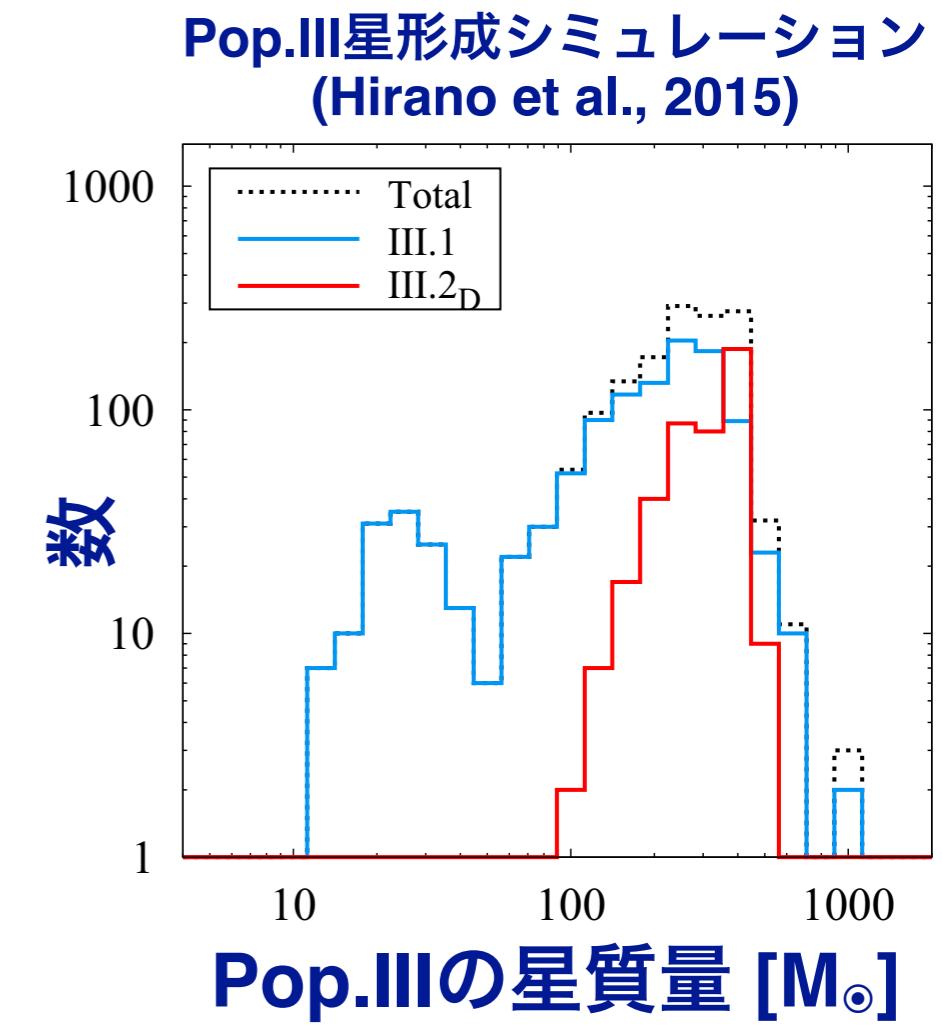
# 今後の重力波観測と観測ターゲット

- Einstein Telescope (2035年-)、LISA (2037年-)、など
- 今後の重力波観測器では感度が飛躍的に向上  
(赤方偏移~10-1000,  
総質量>1000M<sub>⦿</sub>)
- 観測可能な領域、質量帯が広がる  
⇒ さらに重たいBH(つまり中間質量BH)の観測が期待される
- 将来観測される中間質量BHの起源解明に向けて、あらかじめ準備をしておきたい



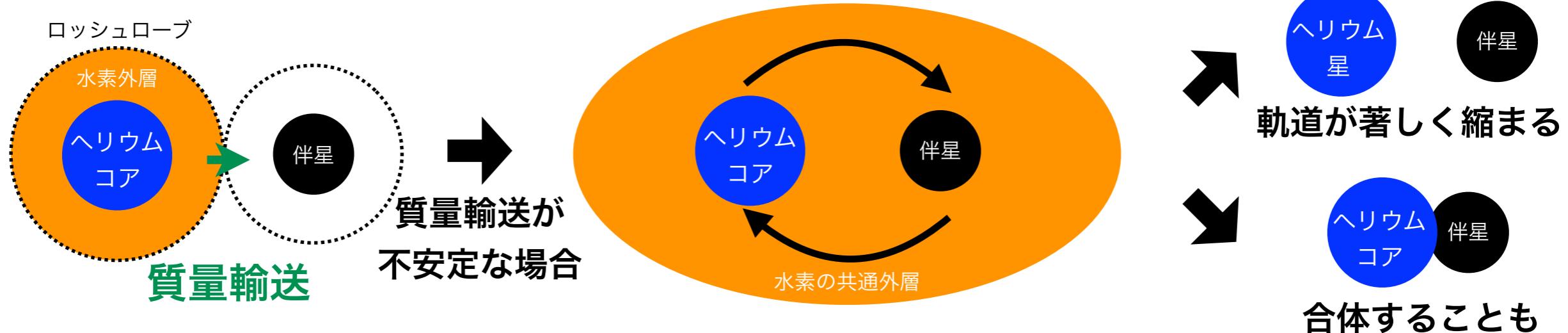
# 中間質量BHとは

- ・ 中間質量BH
  - ・  $10^2\text{--}10^5 M_{\odot}$
  - ・ ほとんど見つかっていない
- ・ 中間質量BHを観測する意義
  - ・ 天文学
    - ・ 不明とされる質量分布の解明
    - ・ 超大質量BH形成の手がかり
  - ・ 物理学
    - ・ 重力理論の検証
- ・ 親星の候補
  - ・ Pop.IIIの大質量星( $10^2\text{--}10^3 M_{\odot}$ )など
- ・ 本研究 ⇒ Pop.IIIの孤立連星を取り扱う



# 連星進化の不定性: 共通外層

- ・ロッシュロープを満たしたあとの質量輸送が不安定になる  
→ 共通外層(common envelope)が起きる
- ・軌道が縮まり、近接連星へ。もしくは合体。
- ・宇宙年齢以内に合体する連星BH形成には重要
- ・どの程度軌道が縮まるかを知りたい



# 共通外層の取り扱い

- ・シミュレーションが困難で、継続時間の短さから観測も難しい  
⇒ 共通外層でどの程度軌道が縮まるかは分かっていない

- ・エネルギー収支に基づく定式化(Webbink 1984):

$$\alpha \left( \frac{\frac{GM_{c,don}M_{acc}}{2a_f} - \frac{GM_{don}M_{acc}}{2a_i}}{\lambda R_{env}} \right) = \frac{GM_{don}M_{env,don}}{\lambda R_{env}}$$

↑  
外層剥ぎ取りの効率

共通外層後の  
軌道半径

外層の束縛エネルギー  
( $\lambda$ でパラメetrize)

$$\Rightarrow a_f = \frac{M_{c,don}M_{acc}}{M_{don}M_{acc} + \frac{2M_{don}M_{env,don}}{\alpha\lambda R_{env}/a_i}} a_i.$$

$\alpha\lambda$ の積が分かれれば、共通外層後の軌道半径( $a_f$ )がわかる  
しかし  $\alpha$ 、 $\lambda$ ともに良い制限は得られていない

- ・ $\alpha\lambda$ の積を一つのパラメータとして、色々な値を用いる

# 本研究の目的

- ・ 将来の重力波観測で中間質量BHの観測が期待される
- ・ 将来見つかる中間質量BHの起源解明のために、種々の進化経路から質量分布等の観測量を調べておくことが重要 ⇒ 調べる
- ・ 有力な起源として、Pop.IIIの孤立連星に着目
- ・ 共通外層の不定性も取り入れて、影響を調べる

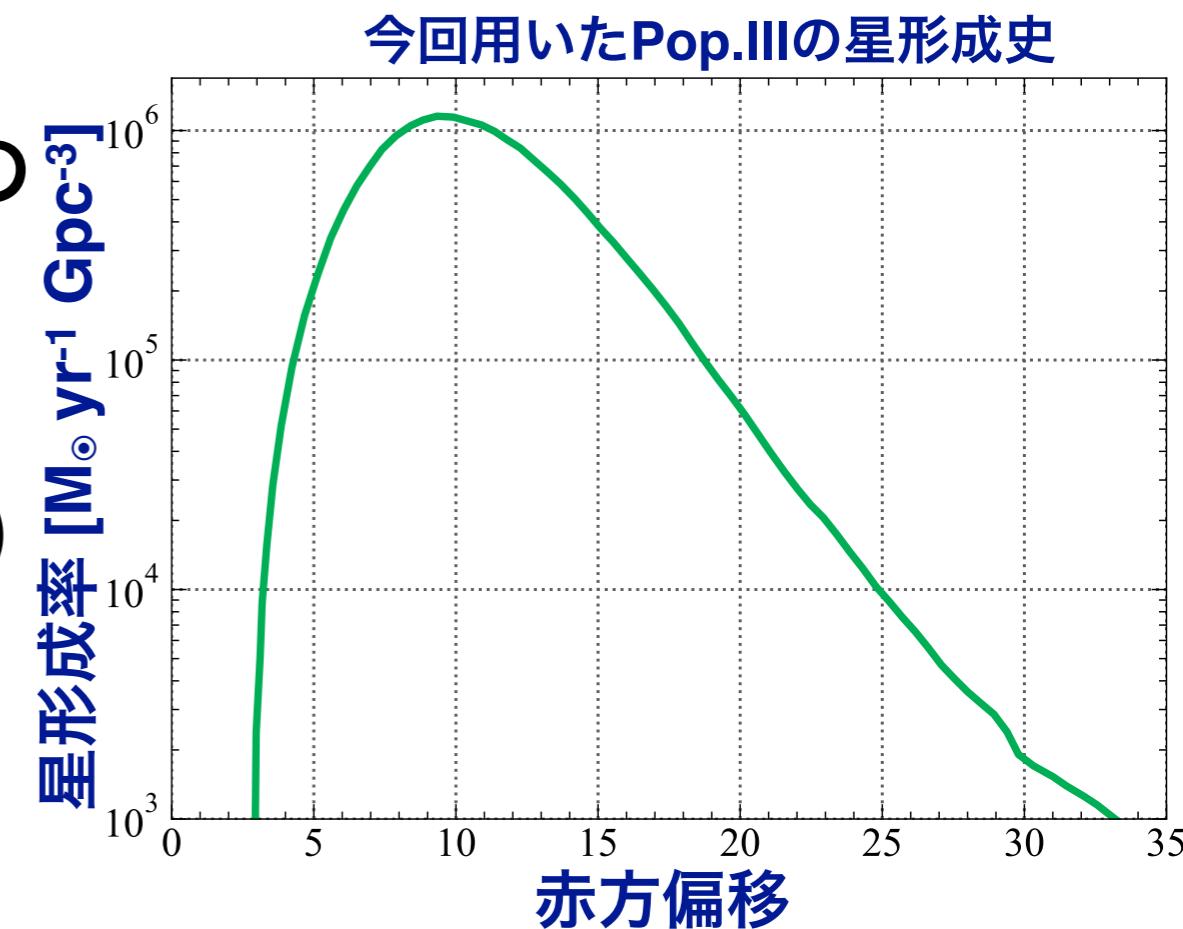
# Method

# 手法: Population synthesis

- ・連星の種族合成 (binary population synthesis)を用いて調べる

(rapid) binary population synthesisとは  
多数の連星の進化を追い、統計量(質量分布や合体頻度など)を求める。  
恒星のパラメータ(光度、半径、コア質量など)を時間と初期質量の関数  
として記述する fitting formulae 用いて、連星相互作用(質量輸送、  
潮汐相互作用など)を取り入れた連星の進化を高速に多数追う。

- ・各パラメータ(後述)ごとに、 $10^6$ 個の  
Pop.IIIの孤立連星の進化を追う
- ・星形成史 (de Souza et al., 2011)  
を採用し、合体頻度を求める



# 連星の初期値と共通外層のパラメータ

- 主星の初期質量 $M_1$ の分布:

double power law

$$\gamma_1=0, 1; \gamma_2=1.5, 2, 2.5, \dots, 5;$$

$$m_c[M_\odot]=100, 200, 300;$$

$$10M_\odot < M_1 < 1500M_\odot$$

- 初期質量比 $q$ の分布: 一様

- 初期軌道半径 $a$ の分布:  $\propto a^{-1}$

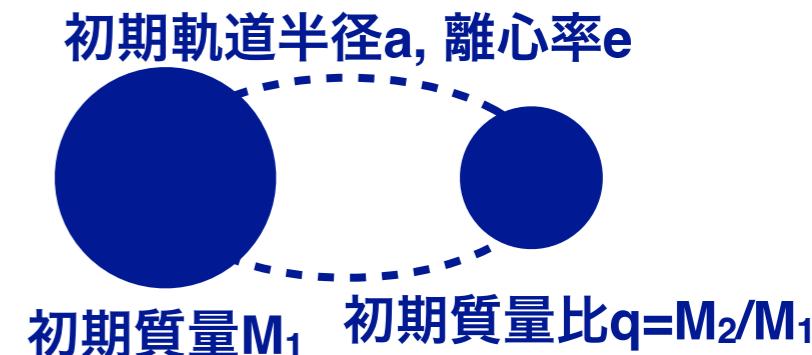
Pop.Iの観測結果を用いる

- 初期離心率:  $e = 0$  (円軌道)

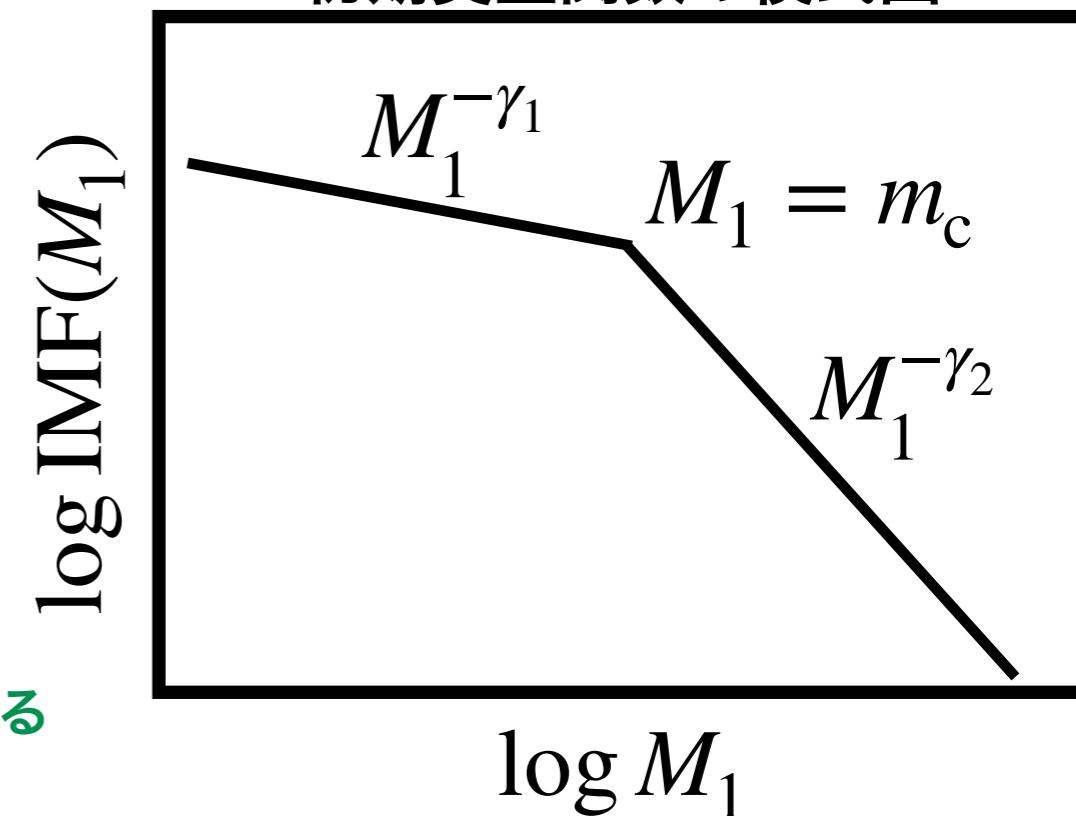
- 共通外層のパラメータ:

$$\alpha\lambda=0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$$

共通外層後の軌道がより広く



初期質量関数の模式図



$$a_f = \frac{M_{c,don}M_{acc}}{M_{don}M_{acc} + \frac{2M_{don}M_{env,don}}{\alpha\lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$

共通外層後  
の軌道半径

# Results

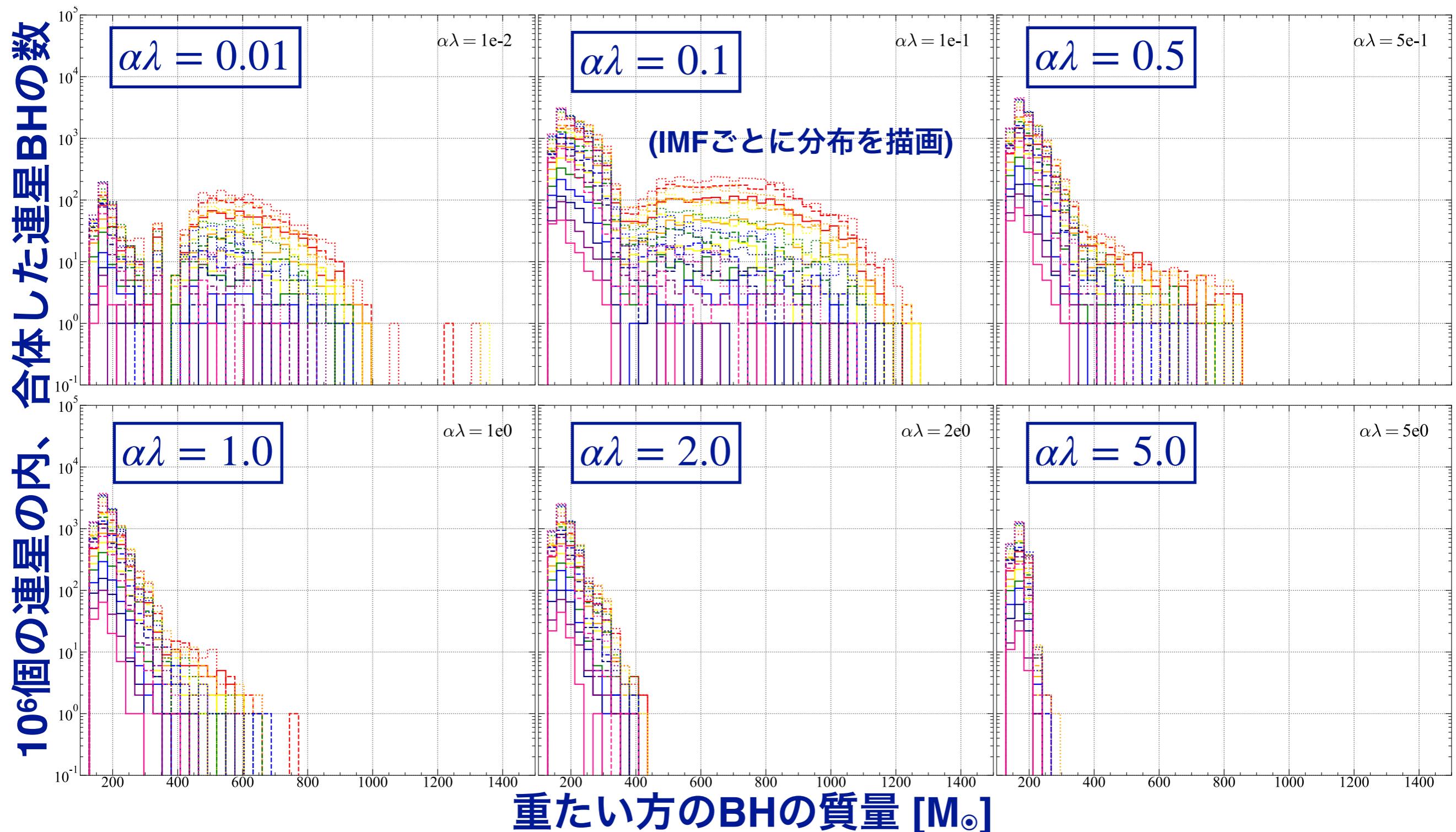
# 連星BHの分類

- ・ 中間質量BHを含む連星BH
  - ├ 中間質量BH + 中間質量BH
  - └ 中間質量BH + 恒星質量BH
- ・ pair-instability mass gap ( $45\text{-}135M_{\odot}$ )の上下で中間質量BHと恒星質量BHを区別
- ・ それぞれのsub-populationについて、以下を紹介する。
  - 主星BHの質量分布
  - delay timeの分布
  - 合体頻度

**中間質量BH+中間質量BH**

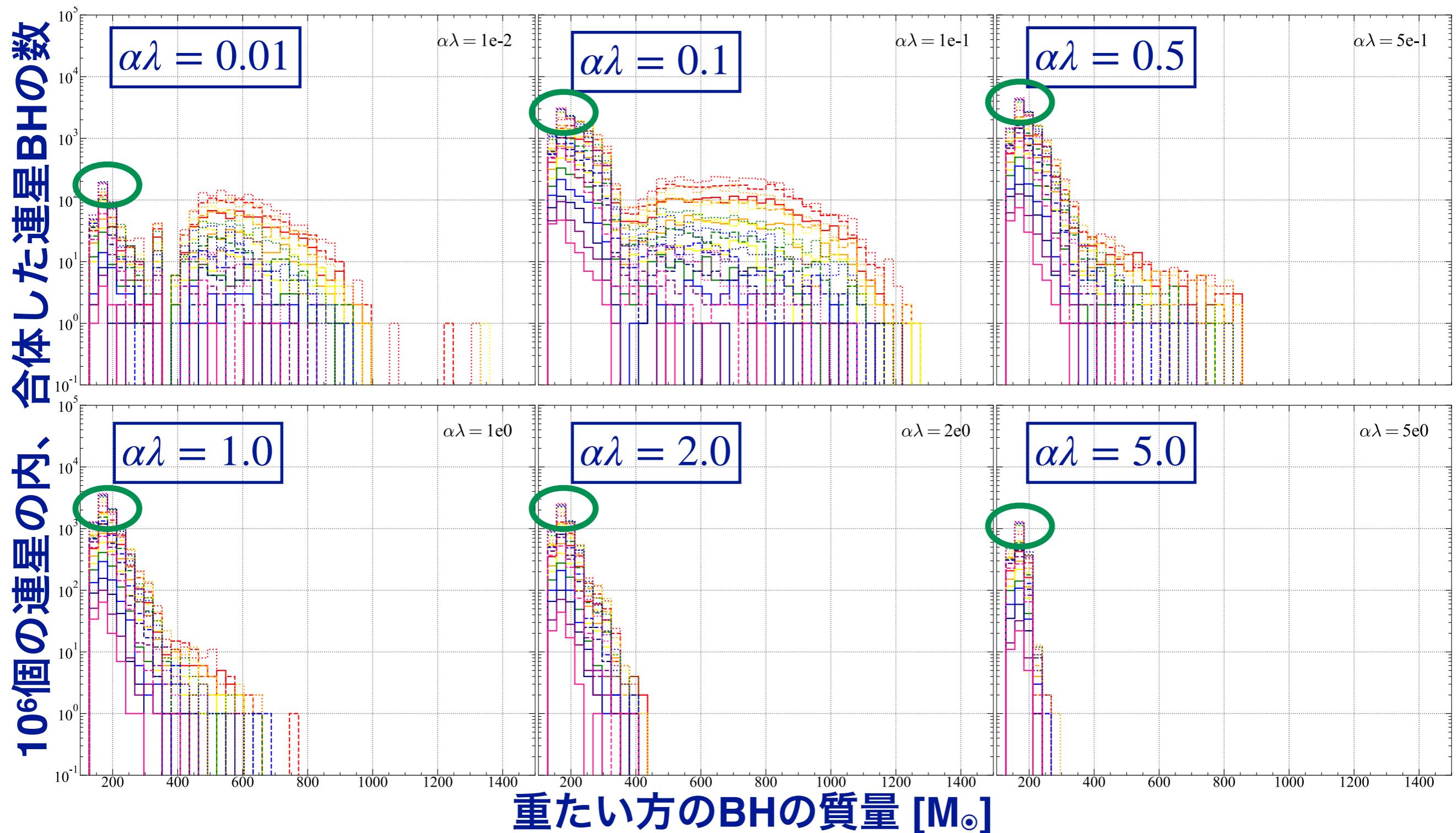
# 質量分布 (中間質量BH+中間質量BH)

- 典型的質量 ~  $150\text{--}300 M_{\odot}$
- 上限質量があり、 $\alpha\lambda$  が大きいほど小さく



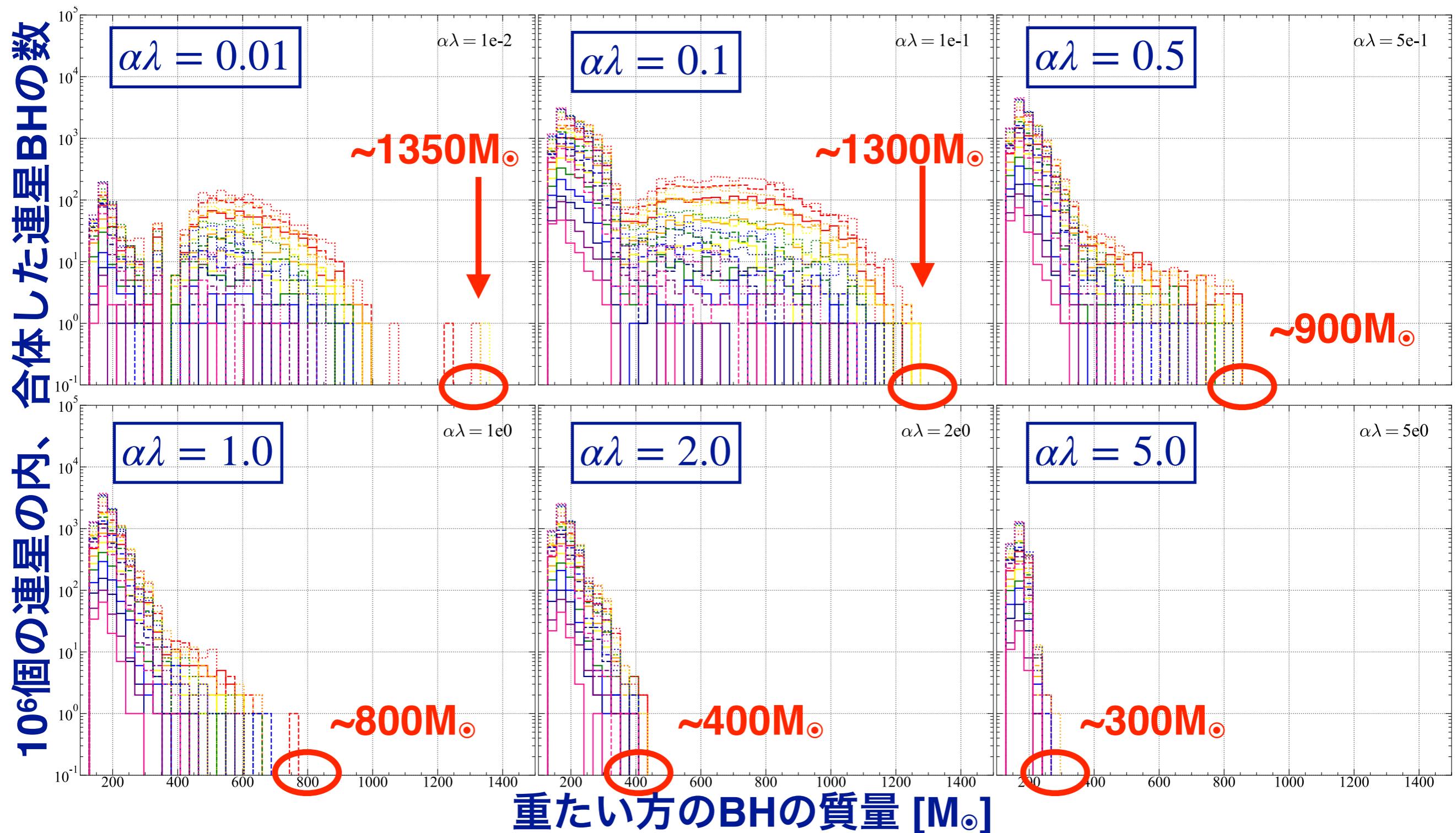
# 質量分布 (中間質量BH+中間質量BH)

- 典型的質量 ~  $150$ — $300 M_{\odot}$
- 上限質量があり、 $\alpha \lambda$  が大きいほど小さく



# 質量分布 (中間質量BH+中間質量BH)

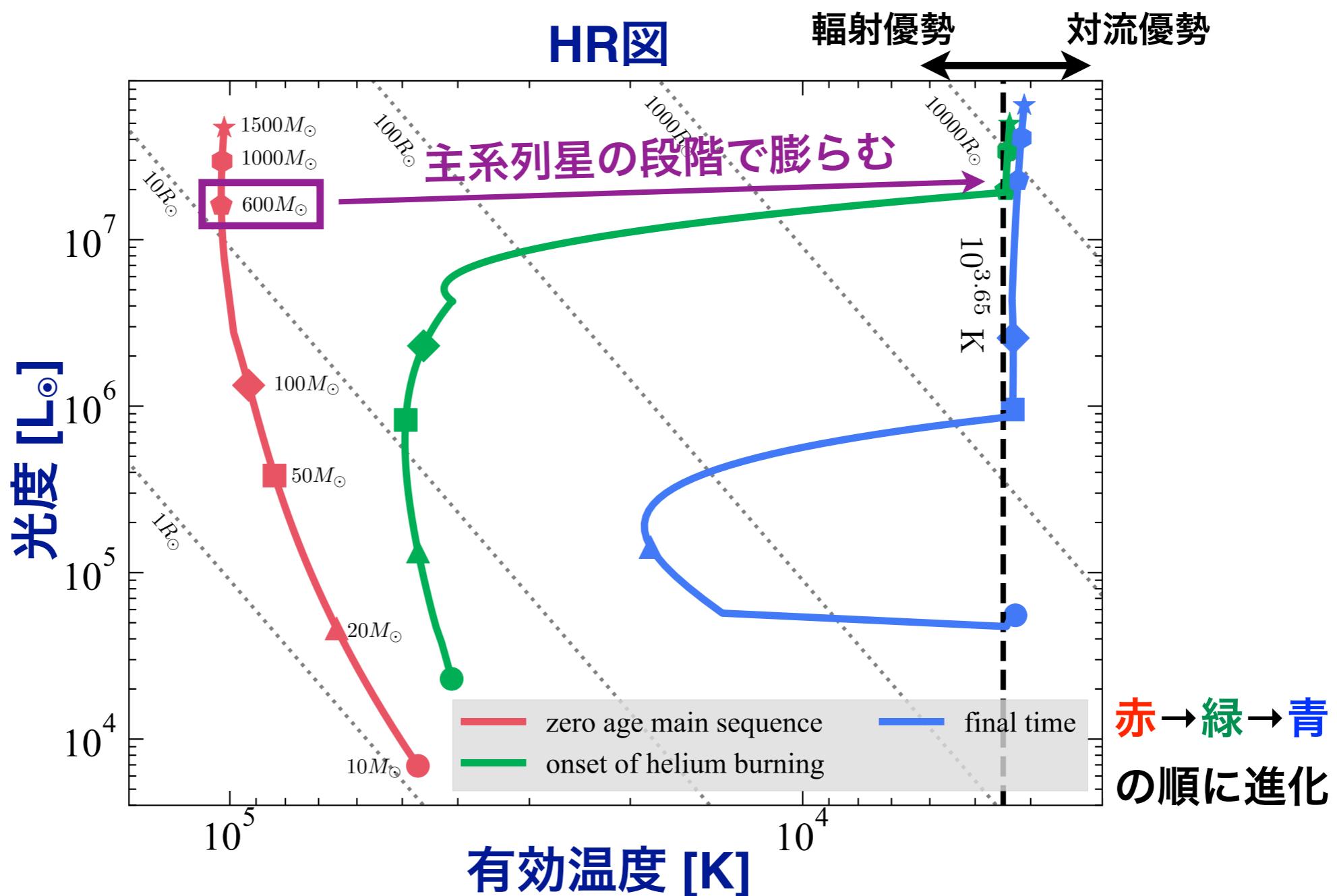
- 典型的質量 ~ 150—300M<sub>⊙</sub>
- 上限質量があり、 $\alpha\lambda$ が大きいほど小さく



# 上限質量はなぜ存在するか(前提知識)

- 前提知識1/3:

ZAMS 質量  $> 600M_{\odot}$   $\Rightarrow$  主系列星の段階で対流優勢に  
中心光度の上昇により、星が十分に膨らむ



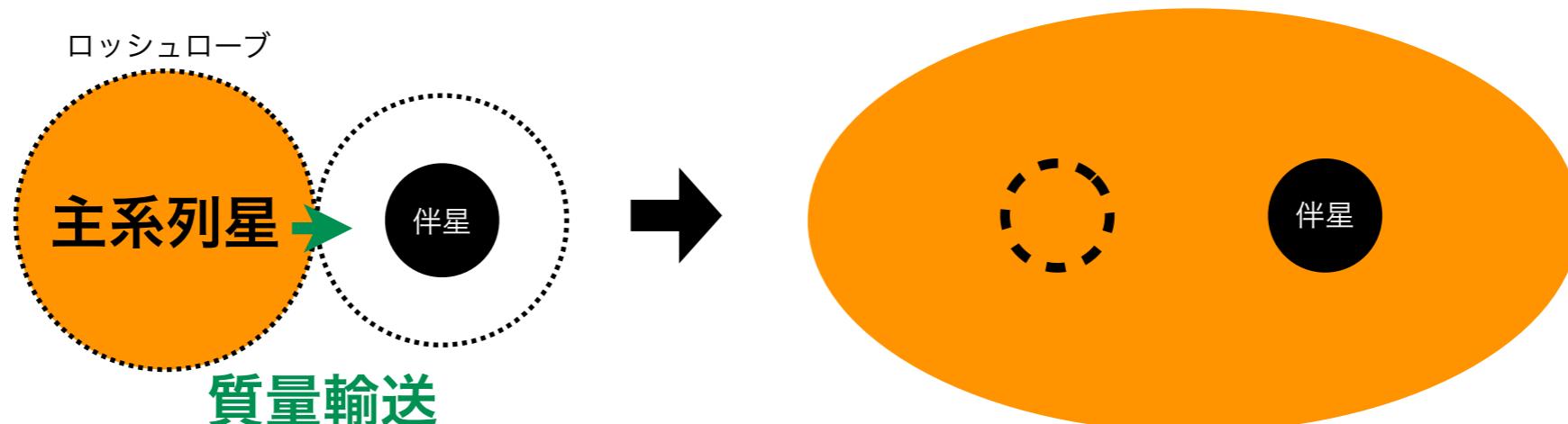
# 上限質量はなぜ存在するか(前提知識)

- 前提知識2/3:

対流優勢な星がロッシュローブを満たす ⇒ 共通外層が起きやすい  
対流優勢な星と輻射優勢な星では半径の変化の仕方が異なる  
対流優勢な星 → 短い時間スケールの間でもロッシュローブの外側

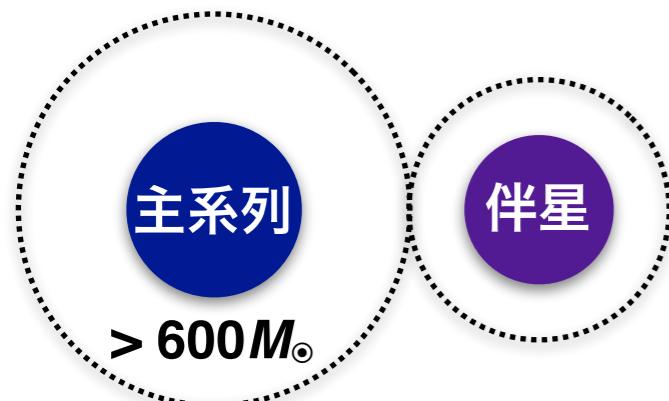
- 前提知識3/3:

主系列星が共通外層を起こす ⇒ 連星は生き残れない  
コアと外層がないので外層の剥ぎ取りが止まらない



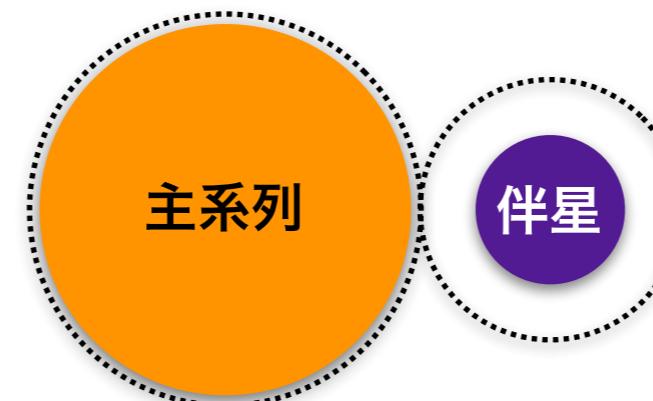
# 上限質量はなぜ存在するか

ロッシュロープ



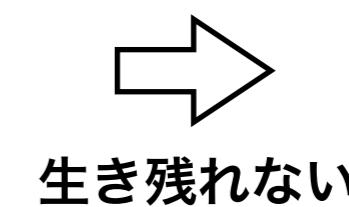
軌道半径が小さい  
→ロッシュロープ半径も小さい  
(∴ロッシュロープ半径 ∝ 軌道半径)

対流優勢



主星がまだ主系列の段階で  
ロッシュロープを満たす

共通外層

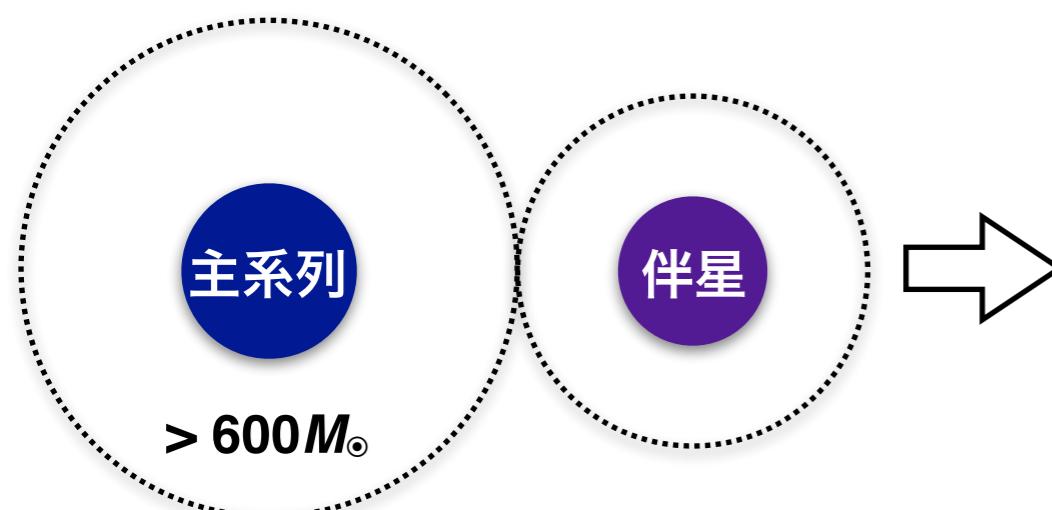


連星BHには  
もうなれない

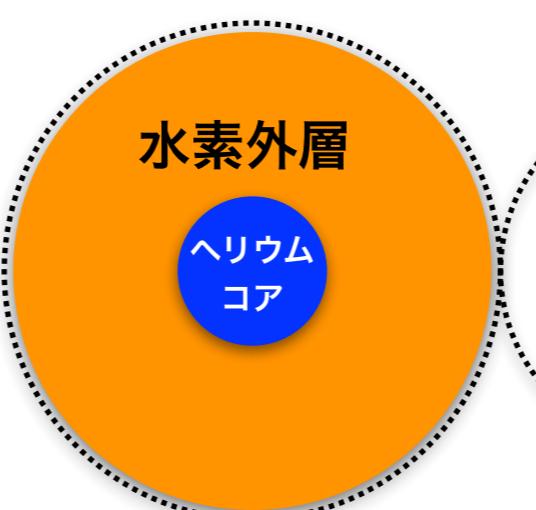
生き残れない

この↑シナリオを回避するためには

対流優勢

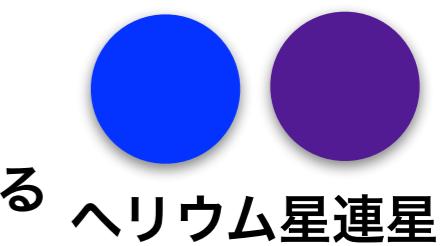


軌道半径が大きい  
→ロッシュロープ半径も大きい



主星が主系列を離れた後に  
ロッシュロープを満たす

共通外層



生き残れる  
場合もある

ヘリウム星連星

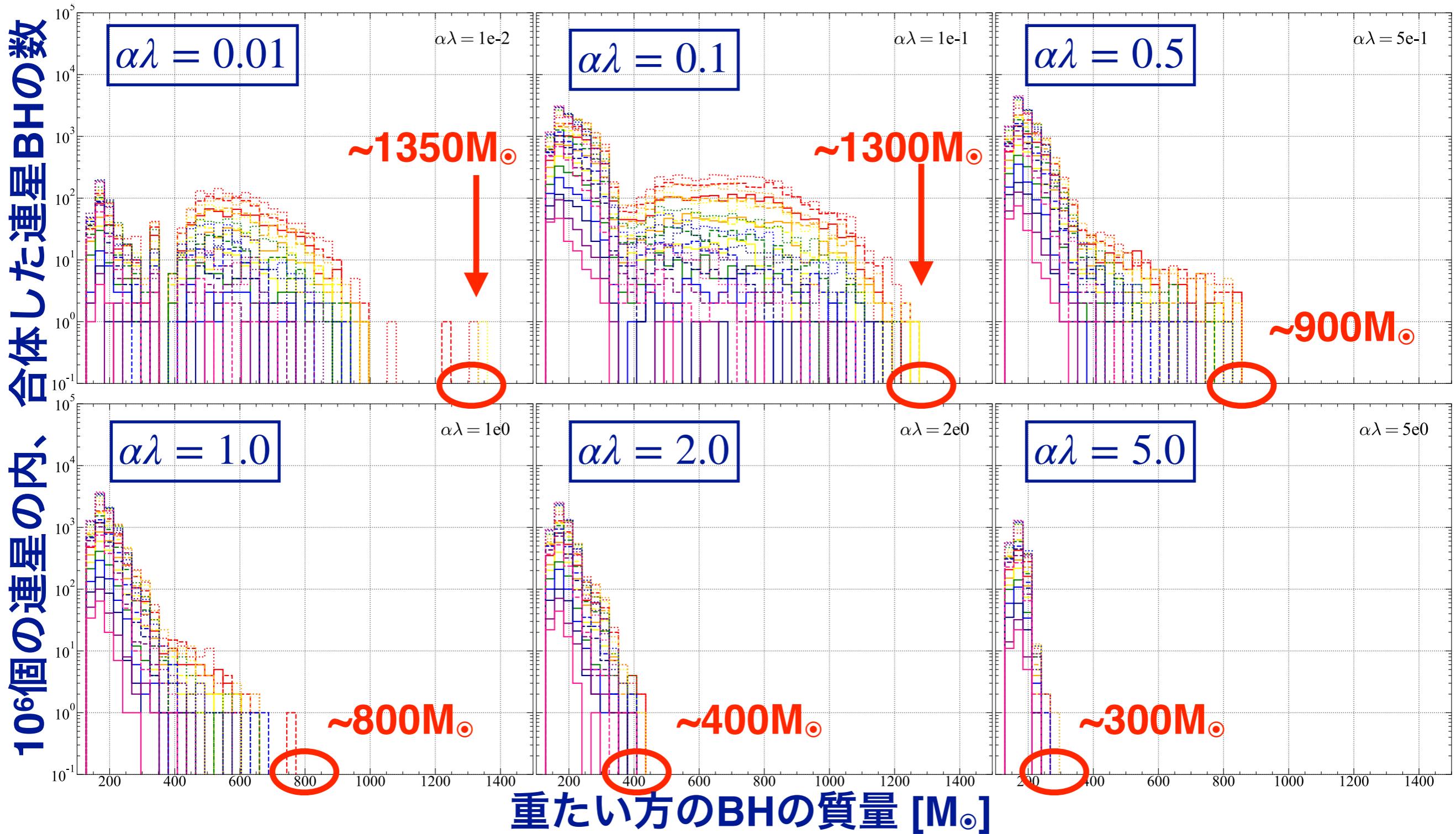
# 上限質量はなぜ存在するか

- >600M<sub>○</sub>の星が連星系として生き残るために、主系列の段階でロッシュロープを満たさない程度に広い軌道が必要
- 重たい星ほど半径は大きい  
⇒ 連星系として生き残るために、より広い初期軌道半径  
⇒ 合体までの時間が長くなる
- 合体までの時間が宇宙年齢を超えないための初期質量が存在  
= 上限質量



# 質量分布 (再掲)

- 典型的質量 ~ 150—300M<sub>⊙</sub>
- 上限質量があり、 $\alpha\lambda$ が大きいほど小さく



# 上限質量の $\alpha\lambda$ 依存性

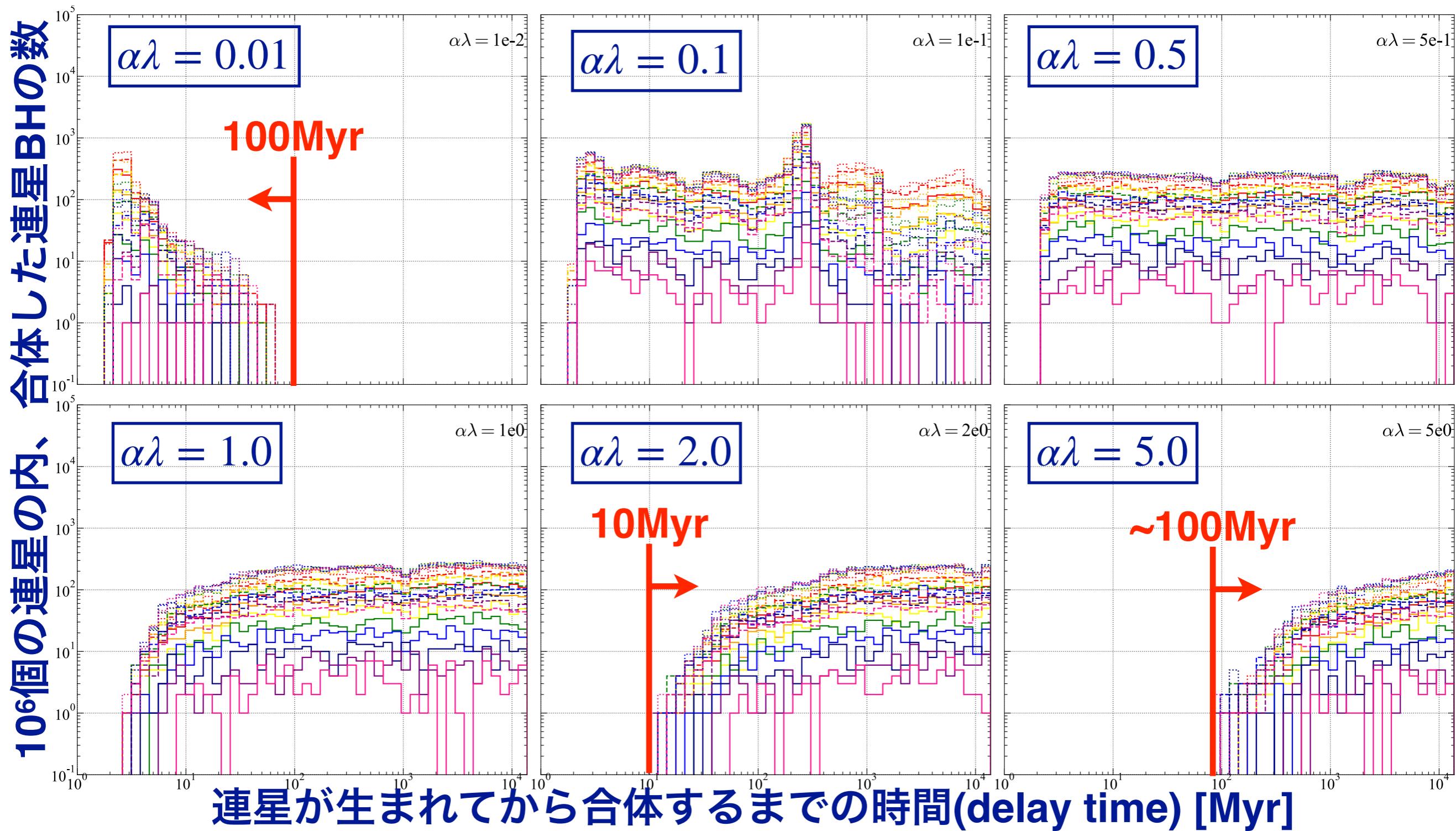
- 共通外層後の軌道半径 $a_f$ と $\alpha\lambda$ （再掲）：

$$a_f = \frac{M_{c,don}M_{acc}}{M_{don}M_{acc} + \frac{2M_{don}M_{env,don}}{\alpha\lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$

- $\alpha\lambda$ の積の値が小さい
  - ⇒ 共通外層でより軌道が縮まる
  - ⇒ 広い軌道半径を要する重たい星も宇宙年齢以内に合体できる
  - ⇒ 上限質量が大きくなる

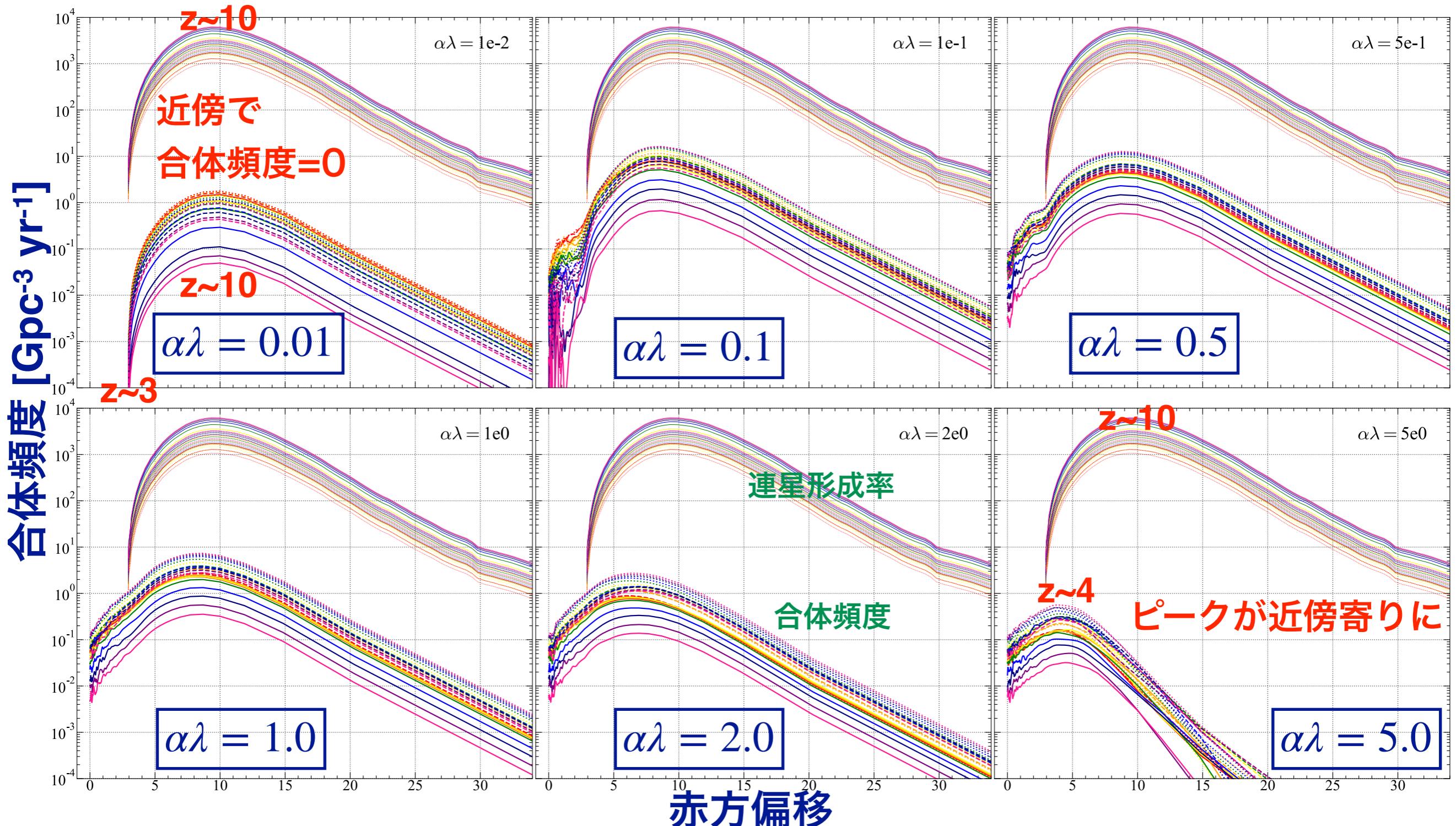
# delay time分布 (中間質量BH+中間質量BH)

- $\alpha\lambda$  が大きい  $\Rightarrow$  軌道半径が長く  $\Rightarrow$  合体までの時間も長くなる



# 合体頻度 (中間質量BH+中間質量BH)

- $\alpha\lambda$  が大きい  $\Rightarrow$  合体までの時間が長く  $\Rightarrow$  近傍でより合体



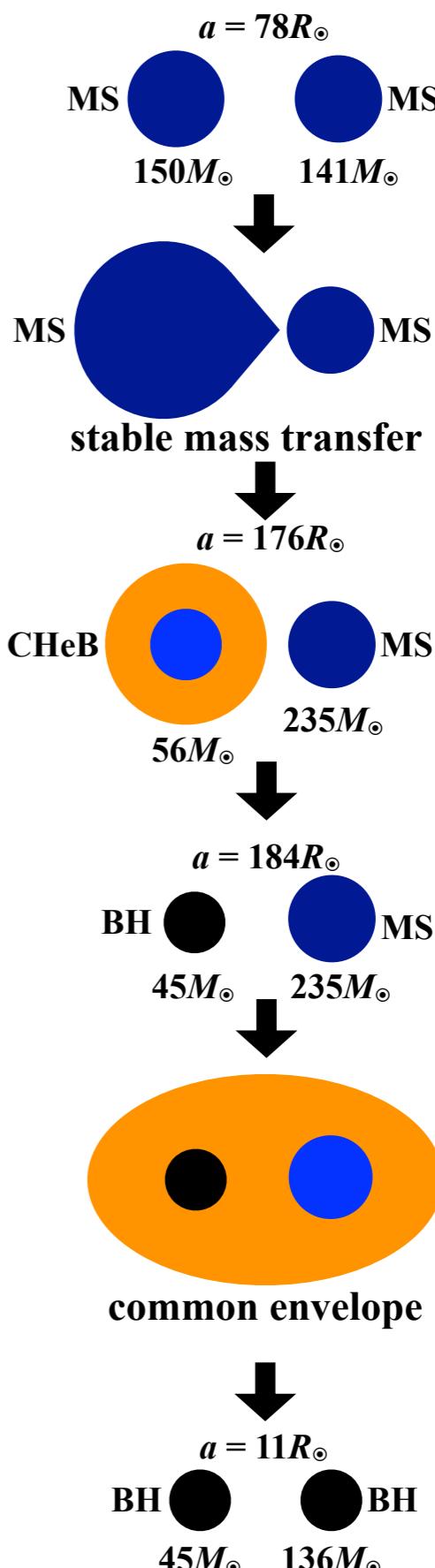
**中間質量BH+恒星質量BH**

# 進化経路(中間質量BH + 恒星質量BH)

- 連星の初期パラメータ:
  - 初期質量: 共に $100\text{--}200M_{\odot}$
  - 初期軌道半径:  $\sim 100R_{\odot}$  (非常に狭い)
- 共通外層を経由
- $\alpha \lambda$ が小さい  $\Rightarrow$  共通外層で合体してしまう  
 $\Rightarrow \alpha \lambda \geq 1$  のときのみ形成可能

共通外層後の軌道半径

$$a_f = \frac{M_{c,don} M_{acc}}{M_{don} M_{acc} + \frac{2M_{don} M_{env,don}}{\alpha \lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$

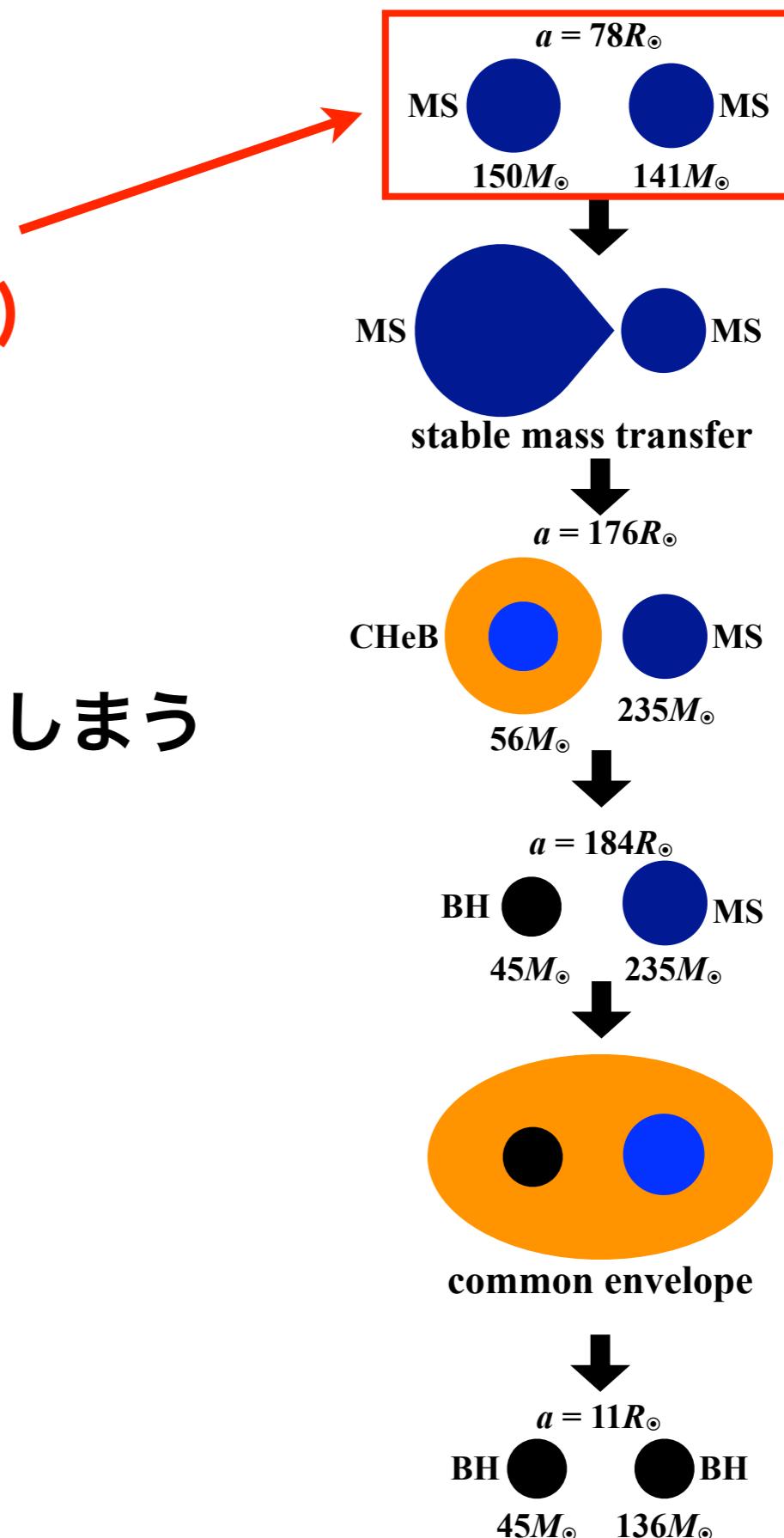


# 進化経路(中間質量BH + 恒星質量BH)

- 連星の初期パラメータ:

初期質量: 共に $100\text{--}200M_{\odot}$

初期軌道半径:  $\sim 100R_{\odot}$  (非常に狭い)



- 共通外層を経由

- $\alpha \lambda$  が小さい  $\Rightarrow$  共通外層で合体してしまう

$\Rightarrow \alpha \lambda \geq 1$  のときのみ形成可能

$$a_f = \frac{M_{c,don} M_{acc}}{M_{don} M_{acc} + \frac{2M_{don} M_{env,don}}{\alpha \lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$

共通外層後  
の軌道半径

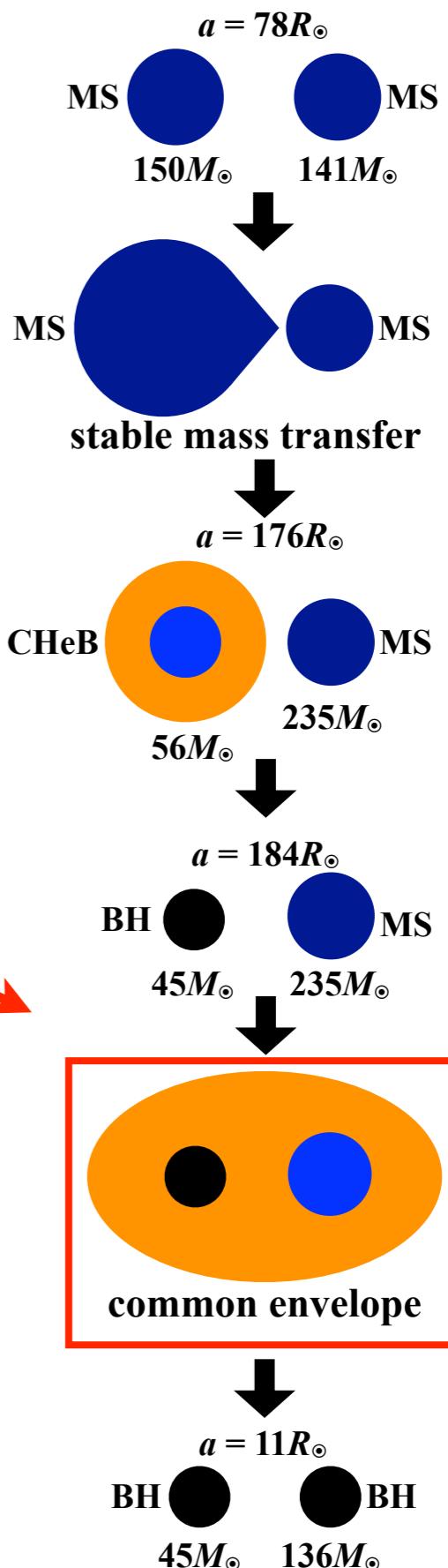
# 進化経路(中間質量BH + 恒星質量BH)

- 連星の初期パラメータ:
  - 初期質量: 共に $100\text{--}200M_{\odot}$
  - 初期軌道半径:  $\sim 100R_{\odot}$  (非常に狭い)

- 共通外層を経由
- $\alpha \lambda$ が小さい  $\Rightarrow$  共通外層で合体してしまう  
 $\Rightarrow \alpha \lambda \geq 1$  のときのみ形成可能

共通外層後の軌道半径

$$a_f = \frac{M_{c,don} M_{acc}}{M_{don} M_{acc} + \frac{2M_{don} M_{env,don}}{\alpha \lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$

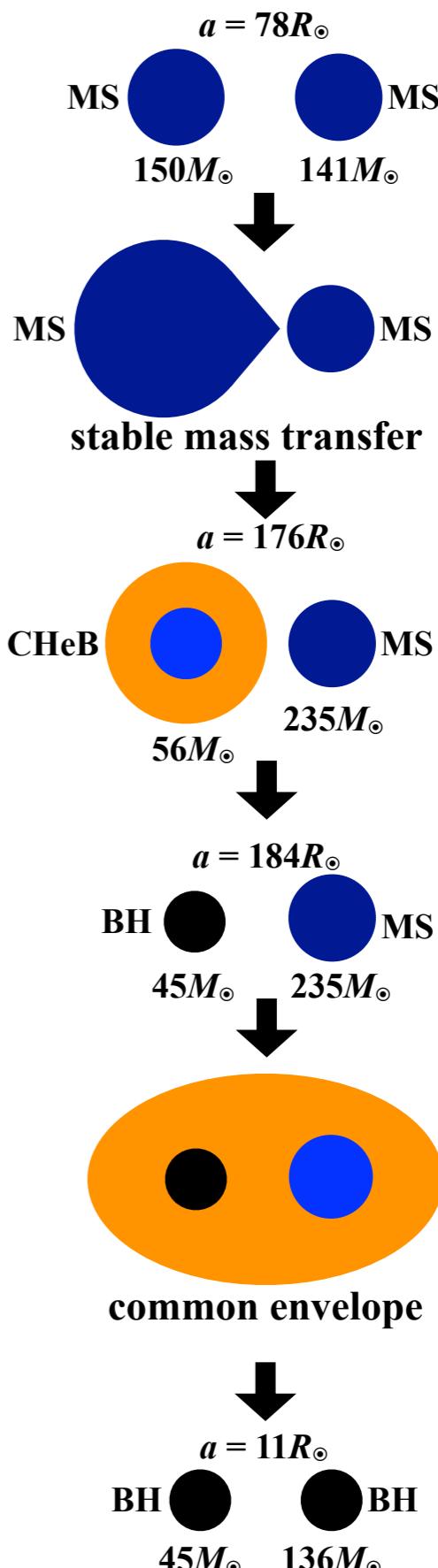


# 進化経路(中間質量BH + 恒星質量BH)

- 連星の初期パラメータ:
  - 初期質量: 共に $100\text{--}200M_{\odot}$
  - 初期軌道半径:  $\sim 100R_{\odot}$  (非常に狭い)
- 共通外層を経由
- $\alpha \lambda$ が小さい  $\Rightarrow$  共通外層で合体してしまう  
 $\Rightarrow \alpha \lambda \geq 1$  のときのみ形成可能

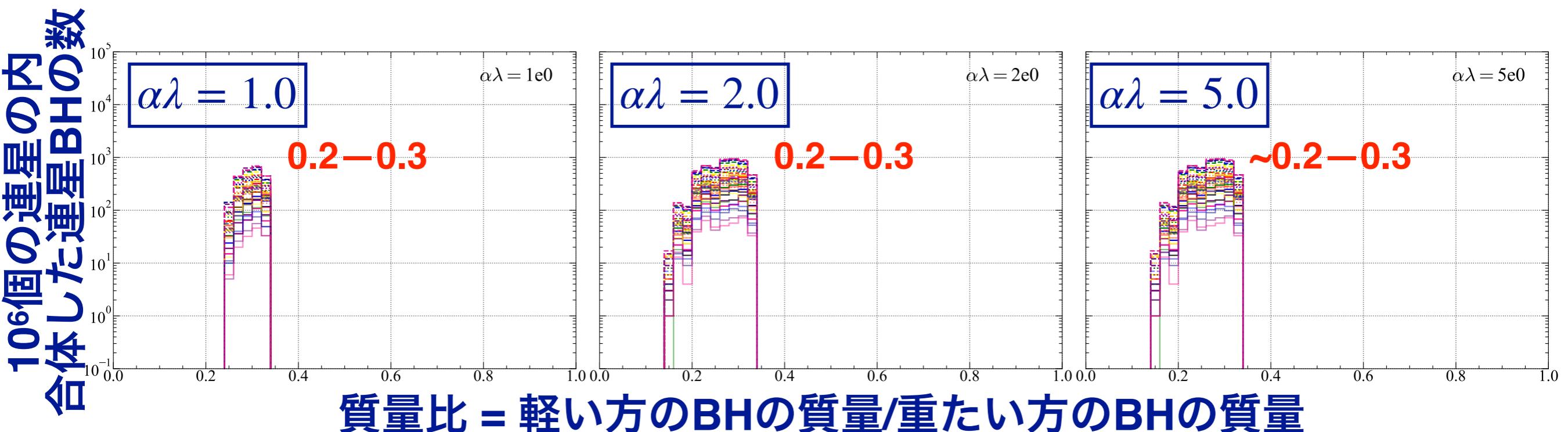
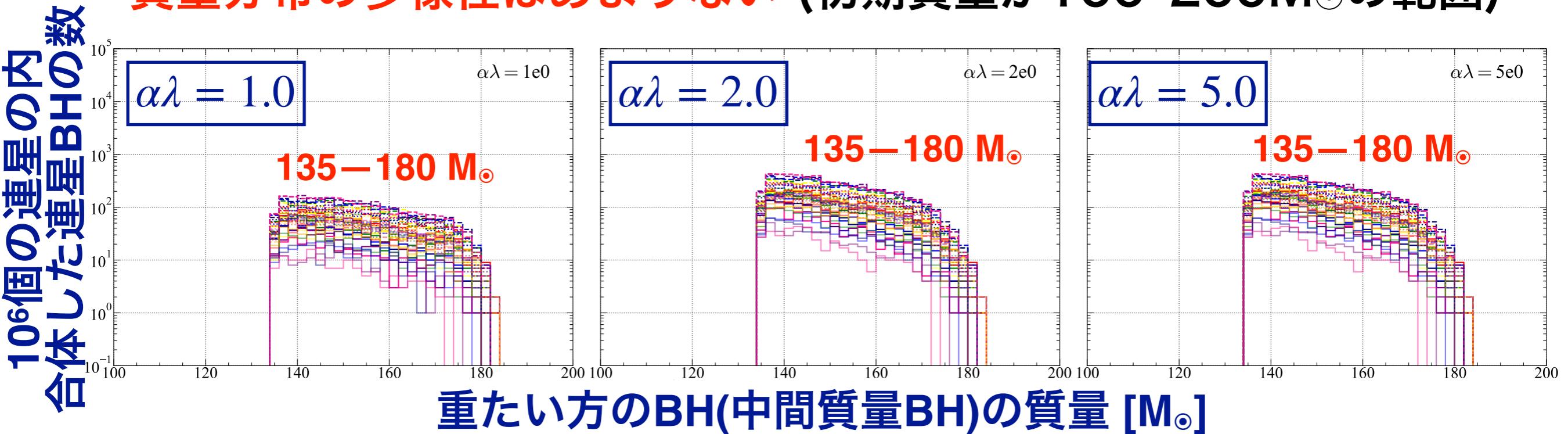
共通外層後の軌道半径

$$a_f = \frac{M_{c,don} M_{acc}}{M_{don} M_{acc} + \frac{2M_{don} M_{env,don}}{\alpha \lambda R_{don}/a_i}} a_i.$$



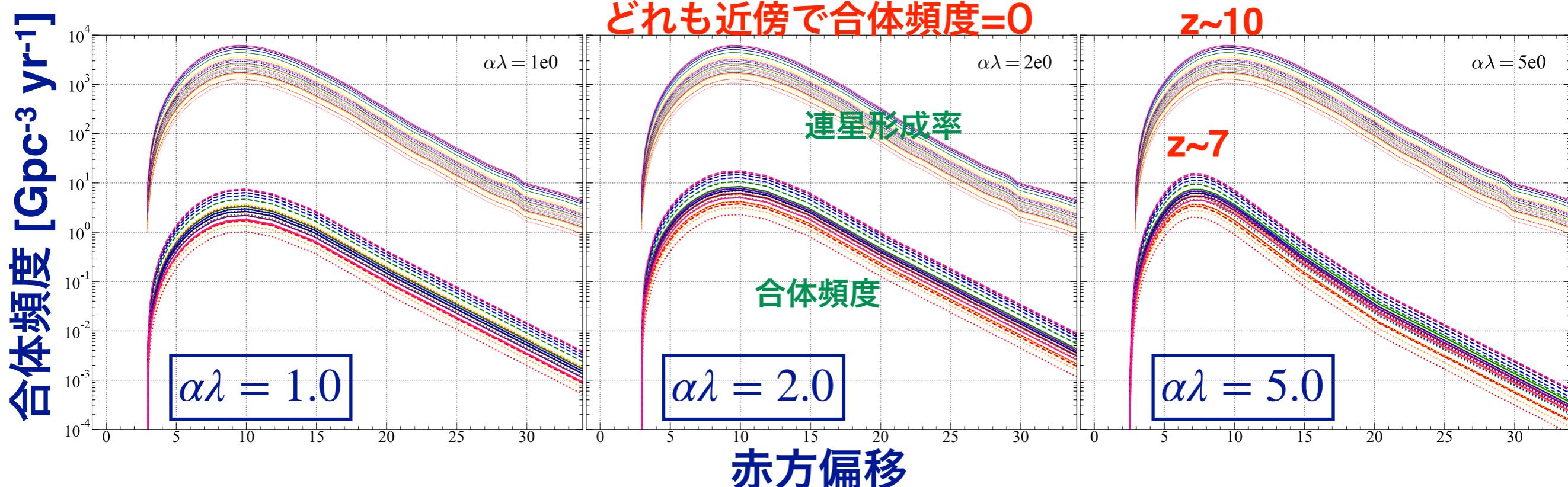
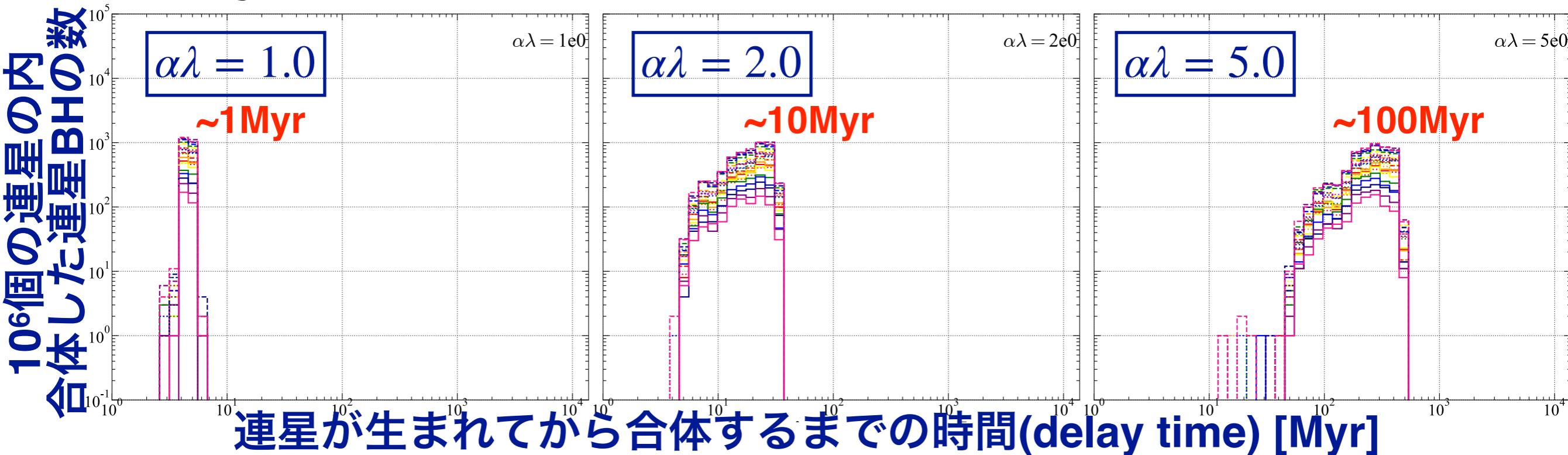
# 質量分布(中間質量BH + 恒星質量BH)

- ・質量分布の多様性はない (初期質量が $100-200M_{\odot}$ の範囲)



# delay time/合体頻度(中間質量BH + 恒星質量BH)

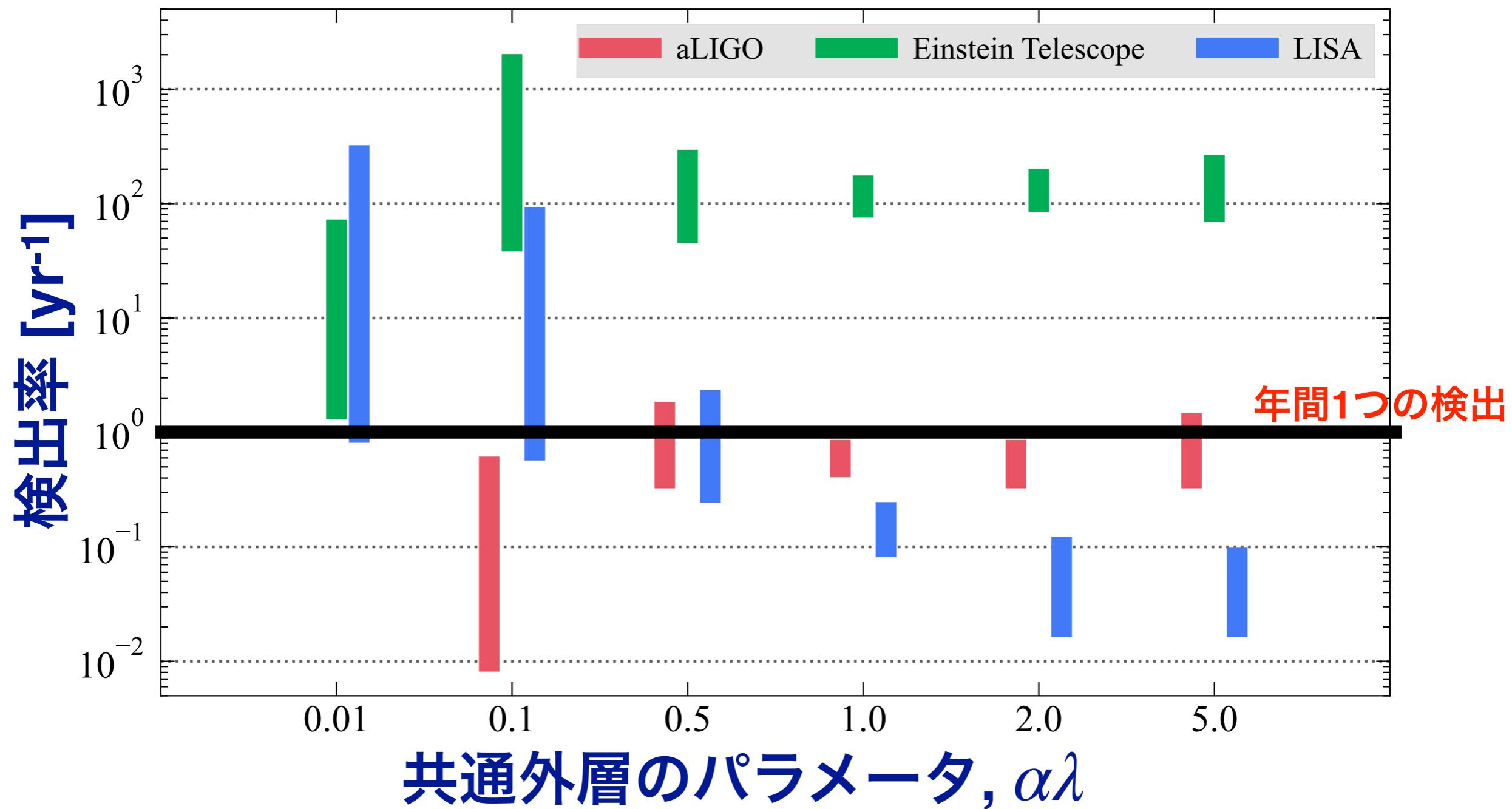
- delay timeは短く、近傍での合体は生じない



# 検出率

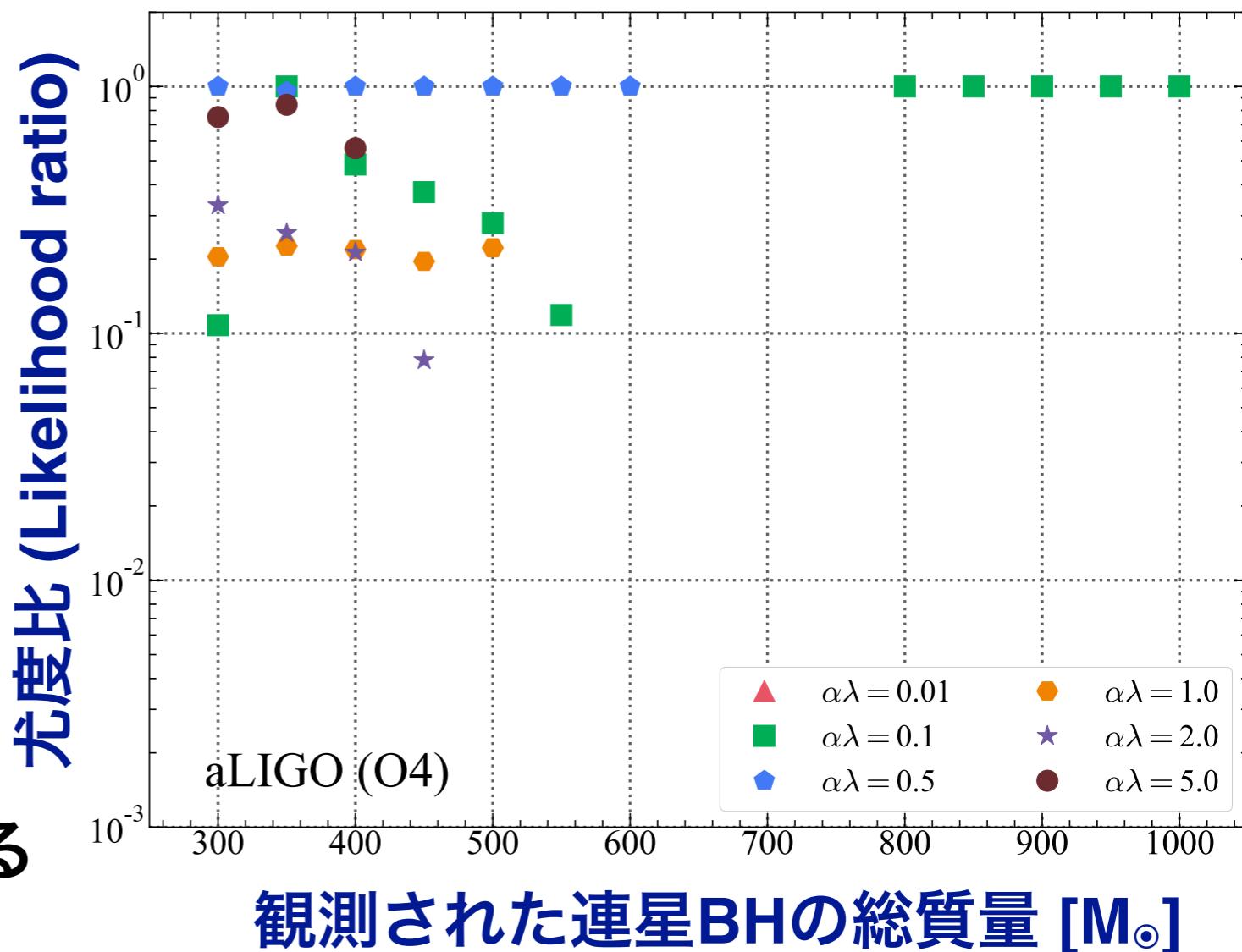
# 将来観測での検出

- aLIGO(O4)でも、一年から数年で一つ程度見つかるかもしれない
- Einstein Telescopeが最も期待できて、 $O(10^2)\text{yr}^{-1}$ ほどの検出率



# aLIGOでの観測と $\alpha\lambda$

- aLIGOで一つ観測と仮定
- 総質量=300—500Msun:  
 $\alpha\lambda=0.1—5.0$ かつ  
Pop.IIIの孤立連星で  
説明可能
- 総質量>800Msun:  
Pop.IIIの孤立連星で説明する  
ためには $\alpha\lambda=0.1$ のみが  
許される。



# まとめ

- Pop.IIIの孤立連星起源で中間質量BHを含む連星BHについて、質量分布等を調べた。
- 中間質量BH同士の連星の質量には上限が存在し、 $\alpha \lambda \nearrow$  上限  $\searrow$
- $\alpha \lambda \geq 1$  のときのみ、中間質量BH+恒星質量BHは合体
- Einstein Telescopeで  $O(10^2)$   $yr^{-1}$  程度観測可能
- aLIGO(O4)の観測期間で1つくらい受かるかも