## 重力波観測によるPopIII星の存在の 間接的証明方法の研究

### 重力波研究交流会 2017/10/20

### 阪市大理 宮本晃伸

# 星の3種族 (Pop I, Pop II, Pop II)



# Pop III 連星BH合体重力波は検出可能



Pop III 起源の連星ブラックホール質量



第二世代重力波検出器での検出率

~140 events/yr (SFRp/(10^-2.5Msun/yr/Mcp^3)) x Err<sub>sys</sub>

Kinugawa et al. 2014, MNRAS 442, 2963

4 /22

### $30 M_{\odot}$ のブラックホールは Pop II星起源か?



https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016a を改変 5/

5 /22

# Pop III星(初代星)の存在の間接的証明

### Pop III 星:金属(H, He 以外の元素)を含まない、初代星 Pop III 星起源の連星ブラックホール:<u>重力波で観測可能</u> Kinugawa et al. 2014, MNRAS 442, 2963

-> 重力波観測で宇宙の初期の情報を得ることができる -> 重力波観測で Pop III星の存在を間接的に証明できる

### Population synthesis モデル (Popl/II, Pop III)

#### Pop I/II model

Dominik et al. Astrophys. J. **759**, 52 (2012) 金属量  $(Z \ge 0.1 Z_{\odot})$ 



#### Standard submodel B

共通外層



Hertzsprung Gapにある星が 外層に入ると合体とみなす

#### Pop III model

Kinugawa et al. MNRAS 456, 1093 (2016)



IMF:Flat  $\Psi(M) \propto \text{const.}$ 

- ここでは、他のシナリオはとりあえず置いておく(Future work)
- Dynamical formation in globular cluster
- Primordial binary black hole
- etc.

# KAGRAで検出可能な連星の質量分布



Miyamoto et al. Phys. Rev. D 96, 064025

8 / 22

検出シミュレーション(分布、検出器)

連星ブラックホールのパラメータ

- ・赤方偏移, 質量(m1,m2) 分布 by population synthesis
- ・連星は等方的分布(軌道面の向き、天球上の位置) としてモンテカルロシミュレーション



#### 信号雑音比 S/N(インスパイラルのみ)

インスパイラル重力波波形は予期できるためマッチドフィルター を仮定して計算

$$(S/N)^{2} = \frac{5}{6} \frac{\pi^{-4/3} c^{2} T_{\odot}^{5/3}}{d_{L}^{2}} \left( \frac{(1+z)M_{c}}{M_{\odot}} \right)^{5/3} \\ \times \int_{f_{\min}}^{f_{ISCO}/(1+z)} df \frac{f^{-7/3}}{S_{n}(f)} \\ \times \left( \frac{1+\cos^{2} \iota}{2} \right)^{2} F_{+}^{2} + \cos^{2} \iota F_{\times}^{2}$$
 
$$\begin{pmatrix} \mathcal{F} \lor -\mathcal{P} \begin{subarray}{c} \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{F} \lor -\mathcal{P} \begin{subarray}{c} \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I} & \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I} \\ \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I} & \mathcal{I} \\ \mathcal{I}$$

信号雑音比閾值

S/N > 8.0 の時検出

擬似検出イベント生成



 $p^{1/11/111}(\mathcal{M})$  から擬似検出イベントを生成  $\longrightarrow \mathcal{M}^{1/11/111}(n)$ 

# 対数尤度比の計算

検出イベント(検出数n): 
$$\vec{\mathcal{M}}(n) = \{\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, ..., \mathcal{M}_n\}$$
  
どちらに判別できるか?  
Pop I/II (Pop IIIなし)  $\theta^{I/II}$   
Pop I/II/III (Pop IIIあり)  $\theta^{I/II/III}$ 

尤度の定義式
$$L(\vec{\mathcal{M}}(n)|\theta^{I/II}) = \prod_{i=1}^{n} p^{I/II}(\mathcal{M}_{i})$$
$$L(\vec{\mathcal{M}}(n)|\theta^{I/II/III}) = \prod_{i=1}^{n} p^{I/II/III}(\mathcal{M}_{i})$$

対数尤度比の定義式

$$\ln \Lambda(\vec{\mathcal{M}}(n)) = \ln \left[ \frac{L(\vec{\mathcal{M}}(n)|\theta^{\mathrm{I}/\mathrm{II}/\mathrm{II}})}{L(\vec{\mathcal{M}}(n)|\theta^{\mathrm{I}/\mathrm{II}})} \right]$$

# 尤度比解析

擬似検出イベント $\vec{\mathcal{M}}^{\mathrm{I}/\mathrm{II}}(n)$  x10<sup>7</sup>セット

対数尤度比を計算

対数尤度比  $\ln \Lambda(\vec{\mathcal{M}}^{\mathrm{I}/\mathrm{II}}(n)) = \ln$ 

$$\begin{bmatrix} L(\vec{\mathcal{M}}^{\mathrm{I/II}}(n)|\theta^{\mathrm{I/II/III}}) \\ L(\vec{\mathcal{M}}^{\mathrm{I/II}}(n)|\theta^{\mathrm{I/II}}) \end{bmatrix}$$
の分布

この分布の上から1%の位置に**対数尤度比閾値**を設定 (= 誤認率 1%) 擬似検出イベント *成<sup>I/II/III</sup>(n)* x10<sup>7</sup>セット

- ・Pop I/II 連星BHのcutoff  $\mathcal{M}$  をこえるイベントを1つでも含む -> 明らかにPopIIIあり <u>これを満たすデータセット数 Dc</u>
- ・対数尤度比が閾値をこえる -> 尤度比解析により Pop III ありと判定 <u>これを満たすデータセット数 D</u>

"Pop III 星の存在を証明できる確率" 
$$P = \frac{D_{\rm L} + D_{\rm C}}{10^7}$$

# Pop III 星の存在を証明できる確率

Pop I/II(Pop III<u>なし</u>)



Miyamoto et al. Phys. Rev. D 96, 064025

# Pop III 星の存在証明の確率



### さらに Pop I/II モデル

#### Standard





Dominik et al. Astrophys. J. 759, 52 (2012)

Hertzsprung Gapにある星が 外層に入ると合体とみなす

#### High BH kicks



#### **Delayed SN**



### さらに Pop III モデル

Kinugawa et al. MNRAS **456**, 1093 (2016)

#### 初期質量関数(IMF) $\Psi(M)$



# 検出可能な連星の質量分布



# Log likelihood ratio 分布



# Pop III 星の存在証明の確率(再掲)



# Pop III 星の存在証明の確率



Miyamoto et al. Phys. Rev. D 96, 064025

### まとめ

連星ブラックホール合体重力波の検出シミュレーションの結果、 デザイン感度の**KAGRA**での検出率を <u>~30 events/month (Pop I/II), ~5 events/month (Pop III)</u> と見積もった

典型的population synthesisモデルにおいて、 ~22 eventsの重力波を検出することで、Pop Ⅲ 星の存在を証明できる確率が 90%に達することがわかった

以上より、デザイン感度のKAGRA、およびデザイン感度の Advanced LIGO, Advanced Virgo で観測をおこなうと、 数年の内にPop III 星の存在の証明やさらにpopulation synthesis モデルの 制限ができるようになるかもしれない。

問題点-課題

- ・恒星進化シナリオ以外のシナリオとのモデル判別
- ・より低金属量星起源の連星BHの寄与
- ・実際の検出イベントを用いた解析

バックアップ

# LIGO O1 run のイベント数との比較

デザイン感度でのKAGRAで検出率は 4.8 - 37.2 events/month

- ・O1でのLIGOの感度はデザインのKAGRAの感度の約1/3倍
- ・LIGOの2台のcoincident analysis time は 51.5 days
- 4.8 37.2 events/(30days) /3<sup>3</sup> x 51.5days = 0.3 - 2.4 events/(51.5days)

LIGO O1 の2 events と無矛盾

# Dc,DL,P

#### 今回仮定したモデルにおいては、 Pop Ⅲ 星の存在を証明できる確率 P には、Dcが大きく寄与している

TABLE II. The probability of identifying the existence of Pop III stars P. The first column shows variations of Pop I/II and Pop III models. The second column shows the sum of the event rates of Pop I/II model and Pop III model. The third column is the number of data sets  $D_{\rm C}$  that Pop I/II model and Pop I/II/III model are clearly distinguished. The fourth column is the number of data sets  $D_{\rm L}$  that Pop I/II model and Pop I/II/III model are clearly distinguished. The fifth column shows the P for equivalent a 1-month period of observation, respectively.

Pop I/II and Pop III	Event rate [/month]	$D_C$	$D_L$	$P = (D_C + D_L)/10^7$
Standard and IMF:Flat	36.68	9 503 988	294 964	0.980
Standard and IMF:Logflat	37.17	9 302 652	478 977	0.978
Standard and IMF:Salpeter	35.79	7 631 154	1382 485	0.901
High BH kicks and IMF:Flat	5.735	9 965 669	28 968	0.999
High BH kicks and IMF:Logflat	6.232	9 912 516	78 855	0.999
High BH kicks and IMF:Salpeter	4.849	9 333 580	538 701	0.987
Delayed SN and IMF:Flat	31.98	9 628 499	176 166	0.980
Delayed SN and IMF:Logflat	32.47	9 505 284	281 221	0.979
Delayed SN and IMF:Salpeter	31.09	8 161 445	868 814	0.903

## 第三世代検出器で距離分布の判別

連星ブラックホールの分布(種族I+II)



<sup>27/22</sup> 

### 連星ブラックホールの分布 (種族|+||+||)



<sup>28/22</sup> 

### 連星ブラックホールの分布 (種族|+||+||)



検出シミュレーション(分布、検出器)

・赤方偏移,質量(m1,m2)分布 連星進化計算より



第3世代検出器(仮定): **米(Hanford)** にCosmic Explorer(**CE**) 40 km **欧(Virgoの所)** にEinstein Telescope(**ET**) 10 km, 腕開角60度,干渉計1台 **日(KAGRAの所)** に **ET**と同等の感度を持った検出器, 同上

### ET, CEによる検出可能な領域



検出シミュレーション (信号雑音比)

・信号雑音比 S/N インスパイラル重力波波形は予期できるためマッチドフィルター を仮定して計算



・信号雑音比閾値

第3世代検出器で3台同時に S/N > 8.0 の時検出

32/22

from http://iopscience.iop.org/article/

10.1088/1361-6382/aa51f4/data

### 検出可能な連星の光度距離分布



## 対数尤度比の計算



どちらに判別されるか?

種族 I+II(種族Ⅲ<u>なし</u>) θ<sup>I+II</sup>

【種族 I+II+ III(種族IIIあり) $\theta^{I+II+III}$ 



### 対数尤度比の分布





'種族Ⅲあり' の場合に '種族Ⅲあり' と正しく判別できる確率 P



まとめ

第3世代重力波検出器を想定して、重力波検出シミュレーションをおこなった。 イベントレート

種族I+II星 起源連星ブラックホール: 5x10<sup>4</sup> [/yr]

種族III 星 起源連星ブラックホール: 6x104 [/yr] Preliminary

連星進化計算から得られる連星ブラックホールの**光度距離分布**を尤度関数として、 **尤度解析**をすることにより種族III起源連星ブラックホールが 存在するときに 'ある'と判別できる確率 Pを計算した。

検出数nが **O(10)** あれば<mark>種族|||星</mark>の存在を 判別できる確率が**90%**に達する。

**第3世代重力波検出器**が稼働を始めると、 すぐに**種族III星**の存在や**宇宙の初期**に 関する情報を得ることが可能となるだろう。









### 検出数に伴う判別確率Pの推移





#### 明らかに '種族IIIあり' と判別できる確率 P



### 光度距離の推定誤差

### 検出シミュレーションにおいて 検出した連星の光度距離 dLには フィッシャー行列に基づいて誤差をつけた

$$\frac{\Delta d_{\rm L}}{d_{\rm L}} \simeq \frac{1}{\sqrt{\sum_i ({\rm S/N})_i^2}} \ ({\rm S/N})_i :$$
各検出器の信号雑音比

$$rac{\Delta d_{
m L}}{d_{
m L}}$$
が  
ガウス分布 N( 0,  $rac{1}{\sqrt{\sum_i ({
m S/N})_i^2}}$ )に従うと仮定

観測ロードマップ



https://www.knaw.nl/shared/resources/adviezen/ bestanden/KNAWAgendaEinsteinTelescope.pdf