

# 通过引力波探测原初黑洞

报告人：陈祖成

导 师：黄庆国

中国科学院理论物理研究所

2021 年 5 月 20 日



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences



# 引力波相关文章



- ① Probing primordial-black-hole dark matter with scalar induced gravitational waves  
Phys.Rev.D 100 (2019) 8, 081301  
Chen Yuan, **Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ② Measuring the tilt of primordial gravitational-wave power spectrum from observations  
Sci.China Phys.Mech.Astron. 62 (2019) 11, 110421  
Jun Li, **Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ③ Log-dependent slope of scalar induced gravitational waves in the infrared regions  
Phys.Rev.D 101 (2020) 4, 043019  
Chen Yuan, **Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang

# 引力波相关文章



- ④ [Extraction of gravitational wave signals with optimized convolutional neural network](#)  
Front.Phys.(Beijing) 15 (2020) 1, 14601  
Hua-Mei Luo, Wenbin Lin, **Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ⑤ [Scalar induced gravitational waves in different gauges](#)  
Phys.Rev.D 101 (2020) 6, 063018  
Chen Yuan, **Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ⑥ [Non-tensorial Gravitational Wave Background in NANOGrav 12.5-Year Data Set](#)  
[arXiv:2101.06869 \[astro-ph.CO\]](#)  
**Zu-Cheng Chen**, Chen Yuan, Qing-Guo Huang



# 原初黑洞相关文章

- ① [Merger Rate Distribution of Primordial-Black-Hole Binaries](#)  
Astrophys.J. 864 (2018) 1, 61  
**Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ② [Stochastic Gravitational-Wave Background from Binary Black Holes and Binary Neutron Stars and Implications for LISA](#)  
Astrophys.J. 871 (2019) 1, 97  
**Zu-Cheng Chen**, Fan Huang, Qing-Guo Huang
- ③ [Distinguishing Primordial Black Holes from Astrophysical Black Holes by Einstein Telescope and Cosmic Explorer](#)  
JCAP 08 (2020) 039  
**Zu-Cheng Chen**, Qing-Guo Huang
- ④ [Pulsar Timing Array Constraints on Primordial Black Holes with NANOGrav 11-Year Dataset](#)  
Phys.Rev.Lett. 124 (2020) 25, 251101  
**Zu-Cheng Chen**, Chen Yuan, Qing-Guo Huang



# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结

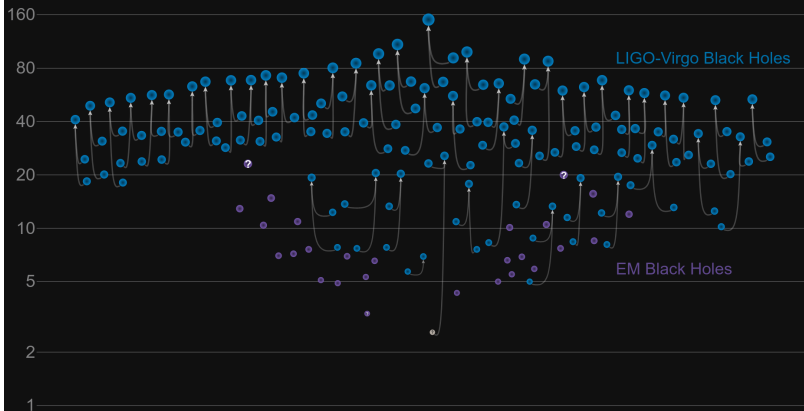


# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结

# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



GWTC-2 plot v1.0  
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

## LIGO-Virgo 的引力波探测告诉我们

- 宇宙中有很多双黑洞 (BBH)。
- 这些双黑洞可以在哈勃时间内并合。
- 黑洞是有质量分布的。

## 未解之谜

- 这些黑洞的起源是什么？
- 以及是如何成对的？
- 为什么引力波探测到的黑洞的质量要比 X 射线探测到的黑洞的质量大很多？

一个可能的解释是原初黑洞。





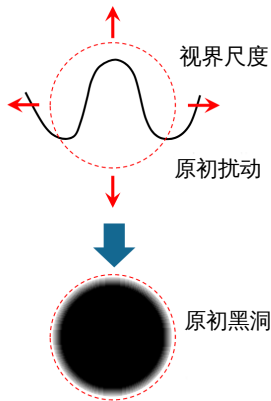
# 原初黑洞 (Primordial Black Hole, PBH)

- 原初黑洞是在宇宙早期由于原初密度扰动坍塌而形成的黑洞。 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 152 (1971) 75

- 原初黑洞的质量可以跨越很多个数量级

$$m_{\text{PBH}} \sim \frac{t}{G} \sim 10^{-18} \left( \frac{t}{10^{-23}} \right) M_{\odot} \quad (1)$$

- 未蒸发掉的原初黑洞可以作为暗物质的候选者。
- 原初黑洞可以解释 LIGO-Virgo 探测到的黑洞。





# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结

# 研究动机

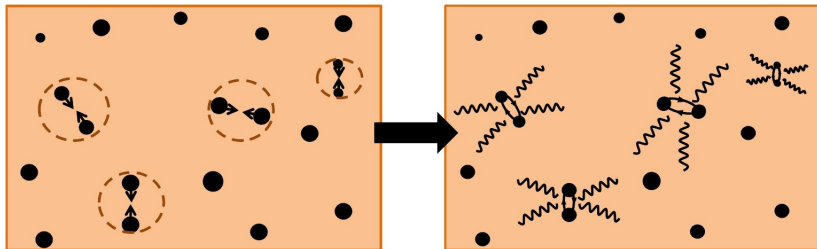


- 为了解释引力波探测到的双黑洞，需要知道原初双黑洞的并合率分布。
- 引力波探测到的黑洞是有质量分布的。
- 考虑任意的原初黑洞的质量谱  $P(m)$

$$\int P(m) dm = 1.$$



# 原初双黑洞的形成



- 在宇宙早期，原初黑洞是随机分布的。
- 最邻近的黑洞由于引力作用从宇宙膨胀背景中退耦出来。
- 其它原初黑洞和线性密度扰动提供初始角动量，进而形成有椭率的双黑洞系统。
- 由于引力辐射，原初双黑洞并合，并被 LIGO-Virgo 探测到。



# 原初双黑洞的动力学

- 运动方程

$$\ddot{r} - \left( \dot{H} + H^2 \right) r + \frac{m_b}{r^2} \frac{r}{|r|} = 0, \quad m_b = m_1 + m_2. \quad (2)$$

- 双黑洞系统的半长轴  $a$  为

$$a = \frac{0.1\bar{x}}{f_b} X^{\frac{4}{3}}, \quad X \equiv x^3/\bar{x}^3. \quad (3)$$

- 所有其他原初黑洞以及密度涨落产生的力矩

$$j_X \approx 0.5 \left( f^2 + \sigma_{\text{eq}}^2 \right)^{1/2} \frac{X}{f_b}. \quad (4)$$

- 并合时间为 [Phys.Rev. 136 \(1964\) B1224-B1232](#)

$$t_c = \frac{3}{85} \frac{a^4}{m_i m_j m_b} j^7. \quad (5)$$



# 原初双黑洞并合率密度

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{12}(t) &\approx 3.9 \cdot 10^6 \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-\frac{34}{37}} f^2 (f^2 + \sigma_{\text{eq}}^2)^{-\frac{21}{74}} \\ &\times \min\left(\frac{P(m_1)}{m_1}, \frac{P(m_2)}{m_2}\right) \left(\frac{P(m_1)}{m_1} + \frac{P(m_2)}{m_2}\right) \\ &\times (m_1 m_2)^{\frac{3}{37}} (m_1 + m_2)^{\frac{36}{37}}\end{aligned}$$

- 原初黑洞占冷暗物质的丰度  $f_{\text{PBH}} \equiv \Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{CDM}} \approx f/0.85$
- $\sigma_{\text{eq}} \sim 0.005$  是其它暗物质密度扰动的方差。
- 红移越大的时候，并合率越大  $\Rightarrow$  区分原初黑洞和天体物理黑洞



# 两种典型的质量谱

幂率:  $\alpha$

$$P(m) \approx \frac{\alpha - 1}{5M_{\odot}} \left( \frac{m}{5M_{\odot}} \right)^{-\alpha}$$

对数正态:  $\sigma, m_c$

$$P(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma m} e^{-\frac{\ln^2(m/m_c)}{2\sigma^2}}$$



# 引力波数据拟合

- 我们需要从引力波数据中拟合出质量函数的参数  $\vec{\theta}$ .
  - 幂率:  $\vec{\theta} = \{\alpha\}$
  - 对数正态:  $\vec{\theta} = \{m_c, \sigma\}$
- 今天的并合率密度分布可以改写为

$$\mathcal{R}_{12}(t_0|\vec{\theta}) = \text{Rp}(m_1, m_2|\vec{\theta}),$$

- 今天的并合率

$$R = \int \mathcal{R}_{12}(t_0|\vec{\theta}) \, dm_1 \, dm_2.$$

- 考虑的质量范围为  $5 \sim 100 M_\odot$





# 层次贝叶斯推断 (Hierarchical Bayesian Inference)

$$p(\vec{d}|\vec{\theta}, R) \propto R^N e^{-R\beta(\vec{\theta})} \prod_i^N \int dm_1 dm_2 p(d_i|m_1, m_2) p(m_1, m_2|\vec{\theta})$$

- $\vec{d} = (d_1, \dots, d_N)$  是探测到的  $N$  个引力波的数据。
- $\beta(\vec{\theta})$  是平均的可探测时空体积

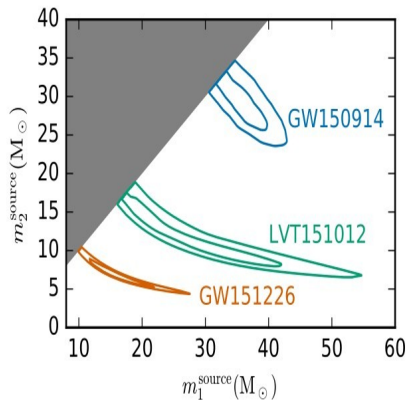
$$\beta(\vec{\theta}) \equiv \int dm_1 dm_2 VT(m_1, m_2) p(m_1, m_2|\vec{\theta})$$

- $p(d_i|m_1, m_2)$  是单个引力波事件的似然函数

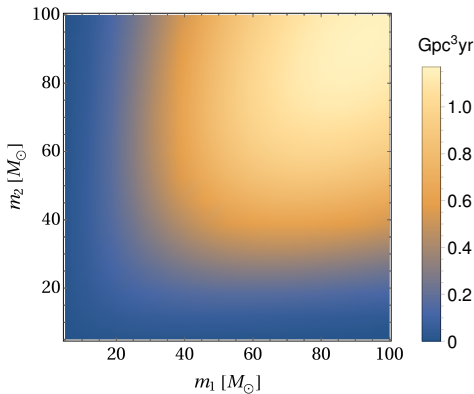
$$p(d_i|m_1, m_2) \propto p(m_1, m_2|d_i)$$



# 使用 LIGO O1 的数据



后验分布  $p(m_1, m_2 | d_i)$

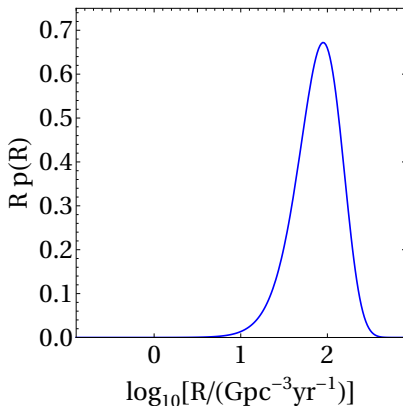
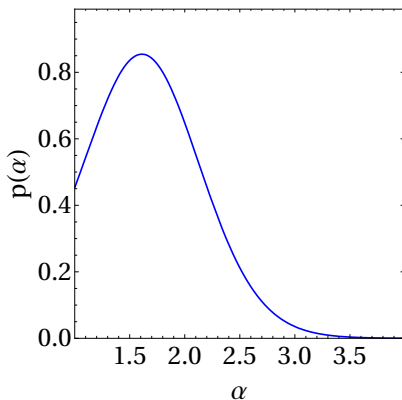


时空体积  $VT(m_1, m_2)$

# 幂率: $P(m) \approx \frac{\alpha-1}{5M_\odot} \left( \frac{m}{5M_\odot} \right)^{-\alpha}$



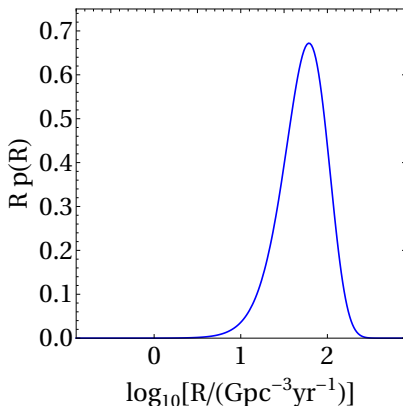
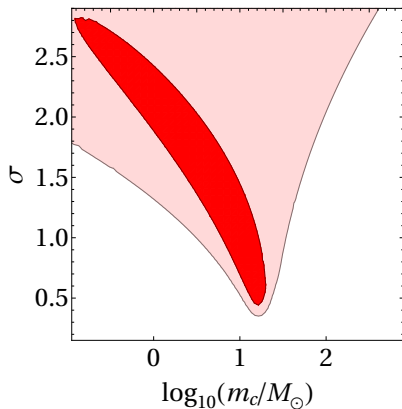
$$\{\alpha, R, f_{\text{PBH}}\} = \{1.61, 80^{+108}_{-56} \text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}, 3.8^{+2.3}_{-1.8} \times 10^{-3}\}$$





# 对数正态: $P(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma m} e^{-\frac{\ln^2(m/m_c)}{2\sigma^2}}$

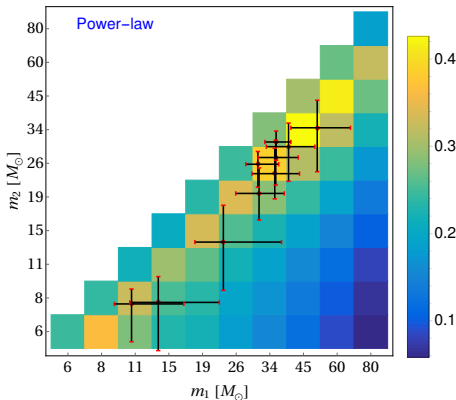
$$\{\sigma, m_c, R, f_{\text{PBH}}\} = \{0.65, 14.8 M_\odot, 55^{+74}_{-38} \text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}, 2.8^{+1.6}_{-1.3} \times 10^{-3}\}$$



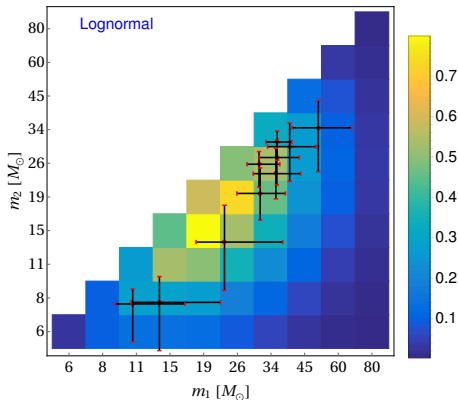


# 二维的可探测事件数分布

用 O1 的结果来估算 O2 的可探测事件数



$$N_{\text{O1+O2}} = 12_{-9}^{+17}$$



$$N_{\text{O1+O2}} = 11_{-8}^{+15}$$

随着引力波数据的积累，我们可以重构质量谱。



# 小结

- 计算了原初黑洞具有一般质量谱时，原初双黑洞的并合率分布。
- 证实原初黑洞可以解释 LIGO-Virgo 探测到的双黑洞事件。
- 证实绝大多数的冷暗物质不是由恒星级质量的原初黑洞构成的。



# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结

# 研究动机



- LIGO-Virgo 目前只能探测到红移  $z \lesssim 2$  的双黑洞并合事件。
- 所有双黑洞并合产生的引力波信号会叠加形成随机引力波背景。
- 除了探测单个原初双黑洞产生的引力波外，还可以探测原初双黑洞产生的随机引力波背景。

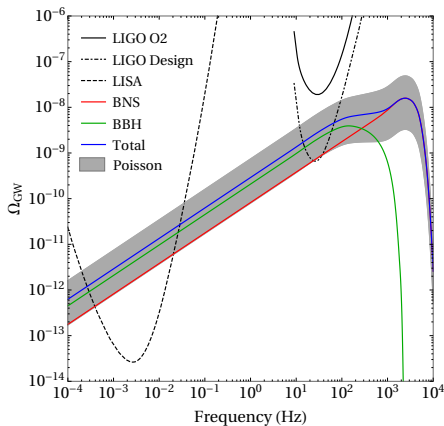




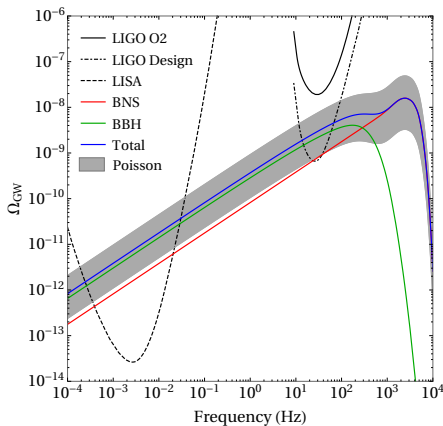
# 随机引力波背景 (SGWB)

$$\Omega_{\text{GW}}(\nu) \equiv \frac{\nu}{\rho_c} \int dz dm_1 dm_2 \frac{\mathcal{R}_{12}(z)}{(1+z) H(z)} \frac{dE_{\text{GW}}}{d\nu_s}$$

Power-law



Lognormal



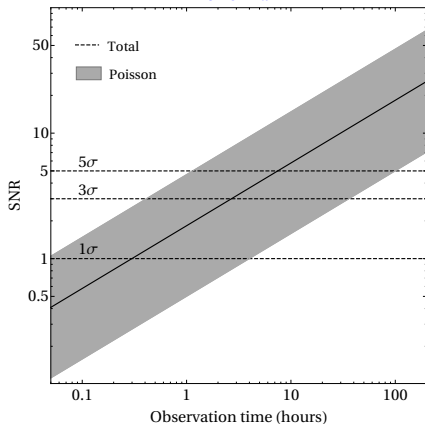


# LISA 探测随机引力波背景的信噪比 (SNR)

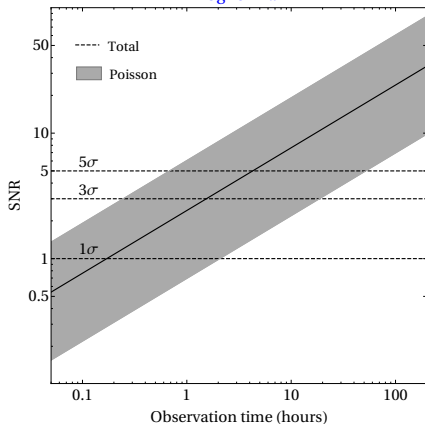
$$\text{SNR} = \sqrt{T} \left[ \int d\nu \frac{\Omega_{\text{GW}}(\nu)}{\Omega_n(\nu)} \right]^{1/2}$$

$$\text{其中 } \Omega_n(\nu) \equiv \frac{2\pi^2 \nu^3 S_n(\nu)}{3H_0^2}$$

Power-law



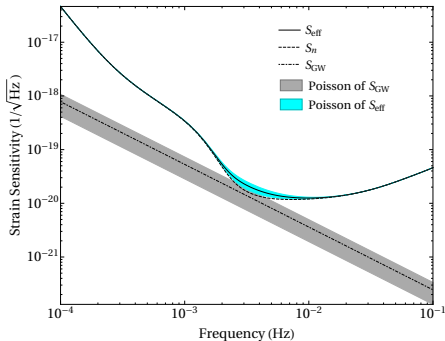
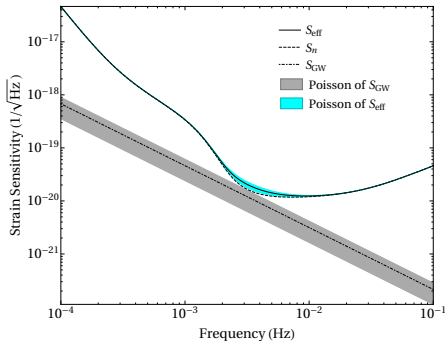
Lognormal





# LISA 的额外噪音

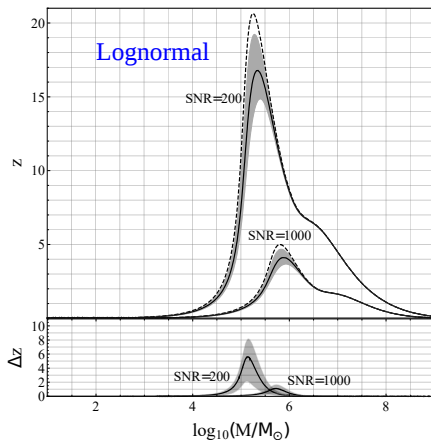
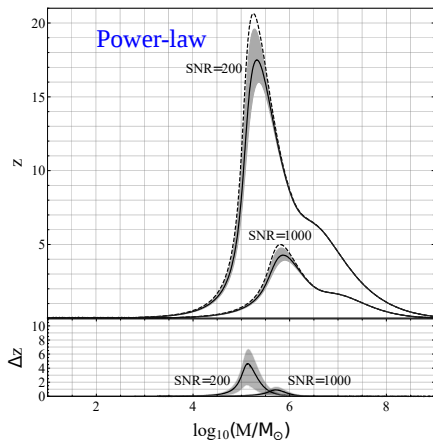
$$S_{\text{eff}}(\nu) = S_n(\nu) + S_{\text{GW}}(\nu), \quad S_{\text{GW}}(\nu) \equiv \frac{3H_0^2}{2\pi^2} \frac{\Omega_{\text{GW}}(\nu)}{\nu^3}$$





# 降低 LISA 的探测能力

- 探测大质量双黑洞的并合是 LISA 的一个关键科学目标
- 降低最大可探测红移  $\Rightarrow$  降低可探测到的数目





# 小结

- 计算了原初双黑洞产生的随机引力波背景。
- 此引力波背景可以被 LIGO 设计阶段和 LISA 探测到。
- 如果此引力波背景没能从 LISA 的噪音中扣除掉，将会构成 LISA 的额外噪音，从而降低 LISA 的探测能力。



# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结

# 研究动机



- 原初黑洞可以解释 LIGO-Virgo 探测到的双黑洞并合事件。
- 如何判断探测到的黑洞是原初黑洞还是天体物理黑洞？
  - 亚太阳质量的黑洞必然是原初黑洞
  - 黑洞的群体性质（例如红移分布） $\Rightarrow$  判断超太阳质量的黑洞的起源

# 第三代地基引力波探测器



- ET 和 CE 可以探测更低的频率和更高的红移
- ET 和 CE 有望每年探测到  $\mathcal{O}(10^5)$  个双黑洞并合事件 *Phys. Rev. Lett.* 118, 151105 (2017)



# 亚太阳质量的情况——单色质量谱





# 亚太阳质量的情况——一般质量谱

- 用分段的方法重构质量函数

$$P(m) = \begin{cases} P_0, & 0.2 M_{\odot} \leq m < 1 M_{\odot} \\ P_1, & 1 M_{\odot} \leq m < 30 M_{\odot} \\ P_2, & 30 M_{\odot} \leq m < 60 M_{\odot} \\ P_3, & 60 M_{\odot} \leq m \leq 100 M_{\odot} \end{cases} \quad (6)$$

- 其中  $P_i = \{P_0, P_1, P_2, P_3\}$  为四个常数，其满足归一化条件

$$\int P(m) dm = 0.8P_0 + 29P_1 + 30P_2 + 40P_3 = 1. \quad (7)$$

- 四个  $P_i$  中只有三个是独立的，我们选择  $\vec{\theta} = \{P_1, P_2, P_3\}$  作为自由参数。
- 用 GWTC-1 (O1 和 O2) 的 10 个双黑洞并合事件去拟合  $\vec{\theta}$ 。



# 搜索具有亚太阳质量和超太阳质量的双黑洞

$$\{R, f_{\text{PBH}}\} = \{308_{-135}^{+193} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}, 3.3_{-1.8}^{+2.3} \times 10^{-3}\}$$



# 超太阳质量的情况：原初双黑洞并合率

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{12}(t) &\approx 3.9 \cdot 10^6 \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-\frac{34}{37}} f^2 (f^2 + \sigma_{\text{eq}}^2)^{-\frac{21}{74}} \\ &\times \min\left(\frac{P(m_1)}{m_1}, \frac{P(m_2)}{m_2}\right) \left(\frac{P(m_1)}{m_1} + \frac{P(m_2)}{m_2}\right) \\ &\times (m_1 m_2)^{\frac{3}{37}} (m_1 + m_2)^{\frac{36}{37}}\end{aligned}$$

- 原初黑洞占冷暗物质的丰度  $f_{\text{PBH}} \equiv \Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{CDM}} \approx f/0.85$
- $\sigma_{\text{eq}} \sim 0.005$  是其它暗物质密度扰动的方差。
- 红移越大的时候，并合率越大  $\Rightarrow$  区分原初黑洞和天体物理黑洞



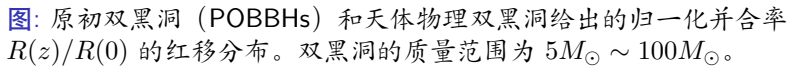
# 超太阳质量的情况：天体物理双黑洞并合率

并合率是天体物理黑洞的生成率  $R_{\text{birth}}(z, m)$  与天体物理双黑洞的时间延迟分布  $P_d(t_d)$  的卷积 [Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 461 \(2016\) 4, 3877-3885](#)

$$\mathcal{R}_{12}(z) = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \frac{R_{\text{birth}}(t(z) - t_d, m_1)}{m_1 - 5M_{\odot}} \times P_d(t_d) dt_d, \quad (8)$$

其中  $t_d$  是时间延迟,  $t(z)$  双黑洞并合时的宇宙年龄。

- **Fiducial** 模型:  $R_{\text{birth}}$  由发光星系观测结果拟合得到,  $P_d \propto t_d^{-1}$ ,  $t_{\min} = 50 \text{ Myr}$ ,  $t_{\max}$  为哈勃时间。
- **GRB-based** 模型:  $R_{\text{birth}}$  由高红移下的伽马射线暴 (GRB) 校准而得到。
- **LongDelay** 模型: 与 **Fiducial** 模型基本相同, 但  $t_{\min} = 5 \text{ Gyr}$ 。
- **FlatDelay** 模型:  $P_d$  是平的分布,  $t_{\min} = 50 \text{ Myr}$ , 且  $t_{\max} = 1 \text{ Gyr}$ 。

图: 原初双黑洞 (POBBHs) 和天体物理双黑洞给出的归一化并合率  $R(z)/R(0)$  的红移分布。双黑洞的质量范围为  $5M_{\odot} \sim 100M_{\odot}$ 。



# 通过红移演化来区分原初黑洞和天体物理黑洞

$$\text{可观测事件数} \quad N_{\text{obs}}(z) = \int dm_1 dm_2 \int_0^z \mathcal{R}_{12}(z') \frac{dVT}{dz'} dz'$$

看红移  $z > 5$  时的  $N_{\text{obs}}$  的变化



# 小结

- 探讨如何通过第三代地基引力波探测器来区分原初黑洞和天体物理黑洞。
- 通过定向搜寻至少包含一个亚太阳质量的双黑洞系统，估算了  $f_{\text{PBH}}$  的可探测极限。
- 预测了 ET 和 CE 能够探测到的双黑洞事件数目随红移的分布，从而来区分原初黑洞和天体物理黑洞。





# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结



# 研究动机

- 除了直接探测原初双黑洞及其产生的随机引力波背景外，还有间接的方法来探测原初黑洞。
- 在原初黑洞形成的过程中，标量扰动将不可避免地产生诱导引力波

$$ds^2 = a^2 \left\{ -(1 + 2\phi)d\eta^2 + \left[ (1 - 2\phi)\delta_{ij} + \frac{h_{ij}}{2} \right] dx^i dx^j \right\}, \quad (9)$$

其中  $\phi \equiv \phi^{(1)}$  是标量扰动， $h_{ij} \equiv h_{ij}^{(2)}$  为张量扰动。

- 考虑单色质量谱，则相应曲率扰动  $\zeta = (3/2)\phi$  的功率谱为

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = Ak_* \delta(k - k_*). \quad (10)$$

- 通过探测标量诱导引力波可以间接探测原初黑洞

$$f_{\text{PBH}} \simeq 1.9 \times 10^7 \left( \frac{1}{A} - 1 \right) e^{-\frac{1}{2A}} \left( \frac{m_{\text{PBH}}}{M_\odot} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (11)$$



# 三阶标量诱导引力波

$$h''_{ij} + 2\mathcal{H}h'_{ij} - \nabla^2 h_{ij} = -4\mathcal{T}_{ij}^{\ell m} S_{\ell m}$$

$$\Omega_{\text{GW}}(\eta, k) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln f} \propto \langle S^{(2)} S^{(2)} \rangle + \langle S^{(3)} S^{(3)} \rangle + \langle S^{(2)} S^{(4)} \rangle$$

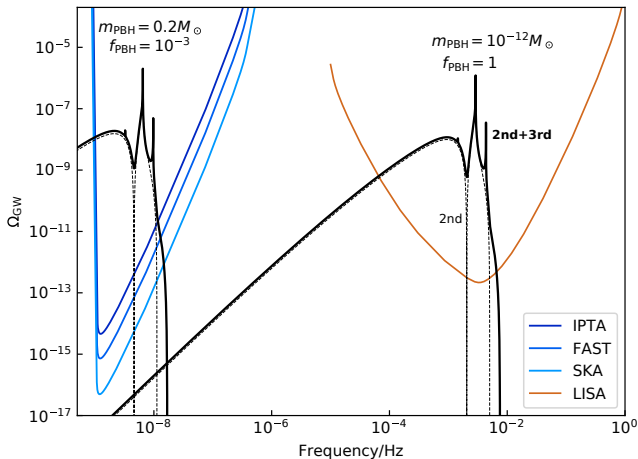
$$S_{ij}^{(2)} = 4\phi \partial_i \partial_j \phi + 2\partial_i \phi \partial_j \phi - \partial_i \left( \phi + \frac{\phi'}{\mathcal{H}} \right) \partial_j \left( \phi + \frac{\phi'}{\mathcal{H}} \right)$$

$$S_{ij}^{(3)} = \frac{1}{\mathcal{H}} \left( 12\mathcal{H}\phi - \phi' \right) \partial_i \phi \partial_j \phi - \frac{1}{\mathcal{H}^3} \left( 4\mathcal{H}\phi - \phi' \right) \partial_i \phi' \partial_j \phi' \\ + \frac{1}{3\mathcal{H}^4} \left( 2\partial^2 \phi - 9\mathcal{H}\phi' \right) \partial_i \left( \mathcal{H}\phi + \phi' \right) \partial_j \left( \mathcal{H}\phi + \phi' \right)$$

$$S_{ij}^{(4)} = 16\phi^3 \partial_i \partial_j \phi + \frac{1}{3\mathcal{H}^3} \left[ 2\phi' \partial^2 \phi - 9\mathcal{H}\phi'^2 - 8\mathcal{H}\phi \partial^2 \phi + 18\mathcal{H}^2 \phi \phi' + 96\mathcal{H}^3 \phi^2 \right] \partial_i \phi \partial_j \phi \\ + \frac{2}{3\mathcal{H}^5} \left[ -\phi' \partial^2 \phi + 3\mathcal{H}\phi'^2 + 4\mathcal{H}\phi \partial^2 \phi + 3\mathcal{H}^2 \phi \phi' - 12\mathcal{H}^3 \phi^2 \right] \partial_i \phi' \partial_j \phi' \\ + \frac{1}{36\mathcal{H}^6} \left[ -16(\partial^2 \phi)^2 - 3\partial_k \phi' \partial^k \phi' + 120\mathcal{H}\phi' \partial^2 \phi - 6\mathcal{H}\partial_k \phi \partial^k \phi' \right. \\ \left. + 144\mathcal{H}^2 \phi \partial^2 \phi - 180\mathcal{H}^2 \phi'^2 + 33\mathcal{H}^2 \partial_k \phi \partial^k \phi - 504\mathcal{H}^3 \phi \phi' - 144\mathcal{H}^4 \phi^2 \right] \\ \times \partial_i \left( \mathcal{H}\phi + \phi' \right) \partial_j \left( \mathcal{H}\phi + \phi' \right)$$



# 标量诱导引力波的能量密度谱



- 三阶贡献  $\sim 10\%$  的修正； 把截断频率从  $2k_*$  延展到  $3k_*$
- 现有的 PTA 中是否有标量诱导引力波的信号？

# 脉冲星计时阵列（PTA）探测引力波背景



- 脉冲星计时残差之间的关联为

$$\langle \tilde{r}_I^*(f) \tilde{r}_J(f') \rangle = \frac{H_0^2}{16\pi^4} \delta(f - f') f^{-5} \Gamma_{IJ} \Omega_{\text{GW}}(f). \quad (12)$$

- 关联函数  $\Gamma_{IJ}$  依赖于脉冲星  $I$  和脉冲星  $J$  之间的夹角  $\zeta$

$$\Gamma_{IJ} = \frac{3}{2} \left[ \frac{1}{3} + \frac{1 - \cos \zeta}{2} \left[ \ln \left( \frac{1 - \cos \zeta_{IJ}}{2} \right) - \frac{1}{6} \right] \right] + \frac{1}{2} \delta_{IJ}.$$



# NANOGrav 11 年的数据

脉冲星名称	RMS [ $\mu\text{s}$ ]	$N_{\text{epoch}}$	$N_{\text{TOA}}$	$T_{\text{obs}}$ [yr]
J0613-0200	0.422	324	11,566	10.8
J1012+5307	1.07	493	16,782	11.4
J1600-3053	0.23	275	12,433	8.1
J1713+0747	0.108	789	27,571	10.9
J1744-1134	0.842	322	11,550	11.4
J1909-3744	0.148	451	17,373	11.2

**表:** 数据分析中所使用的 6 颗脉冲星的基本属性: RMS-加权均方根计时残差,  $N_{\text{epoch}}$ -观测数,  $N_{\text{TOA}}$ -TOA 数,  $T_{\text{obs}}$ -观测时间跨度。

# 曲率扰动功率谱的振幅 $A$ 的上限



**图：** 上图：曲率扰动功率谱振幅  $A$  的 95% 上限与峰值频率  $f_*$  的关系。  
下图：相应的贝叶斯因子  $B_{10}$  与峰值频率  $f_*$  的关系。





# 原初黑洞占冷暗物质丰度 $f_{\text{PBH}}$ 的上限

**图：** 原初黑洞占冷暗物质丰度  $f_{\text{PBH}}$  的 95% 上限关于原初黑洞质量  $m_{\text{PBH}}$  的函数。



# 小结

- 计算了三阶标量诱导引力波。
- 在 NANOGrav 11 年的数据中搜索标量诱导引力波。由于没有发现引力波信号，对曲率扰动功率谱的振幅  $A$  和原初黑洞的丰度  $f_{\text{PBH}}$  给出上限。
- 在  $0.002 \sim 0.7 M_{\odot}$  的质量区间， $f_{\text{PBH}} < 10^{-6}$ 。



# 提纲

- 1 引言
- 2 原初双黑洞的并合率
- 3 原初双黑洞产生的引力波背景
- 4 区分原初黑洞和天体物理黑洞
- 5 用脉冲星计时阵列限制原初黑洞丰度的限制
- 6 总结



# 总结

- 计算原初黑洞具有一般质量谱时，原初双黑洞的并合率分布；证实恒星级质量的原初黑洞无法构成绝大部分冷暗物质。
- 计算了原初双黑洞产生的随机引力波背景，并发现此背景可以被 LISA 探测到。如果此背景没能从 LISA 噪音中扣除掉，将会构成 LISA 的额外噪音，从而降低 LISA 的探测能力。
- 探讨如何通过 ET 和 CE 来区分原初黑洞和天体物理黑洞。通过定向搜寻包含至少一个亚太阳质量黑洞的双黑洞系统，估算了  $f_{\text{PBH}}$  的可探测极限。并预测了 ET 和 CE 能够探测到的双黑洞事件数目随红移的分布，从而来区分原初黑洞和天体物理黑洞。
- 在 NANOGrav 11 年的数据中搜寻伴随原初黑洞形成而产生的标量诱导引力波。由于没有发现引力波信号，所以在  $0.002 \sim 0.7 M_{\odot}$  的质量区间， $f_{\text{PBH}} < 10^{-6}$ 。

# 展望



- 用 LIGO-Virgo 最新的数据 GWTC-2 来重构原初黑洞质量谱  $P(m)$  以及拟合原初黑洞模型。
- 考虑原初黑洞和天体物理黑洞同时存在的情况。
- 在 NANOGrav 12.5 年的数据中搜索引力波信号：
  - 标量诱导引力波
  - 其它极化模式的引力波

谢谢！