

# 引力波探测黑暗宇宙

—双致密星的引力波辐射

禹升华

国家天文台

2023.04.18

# 提纲

1. 引言
2. 双致密星族的引力波信号
  - 单个双星
  - 星族
3. 总结和展望

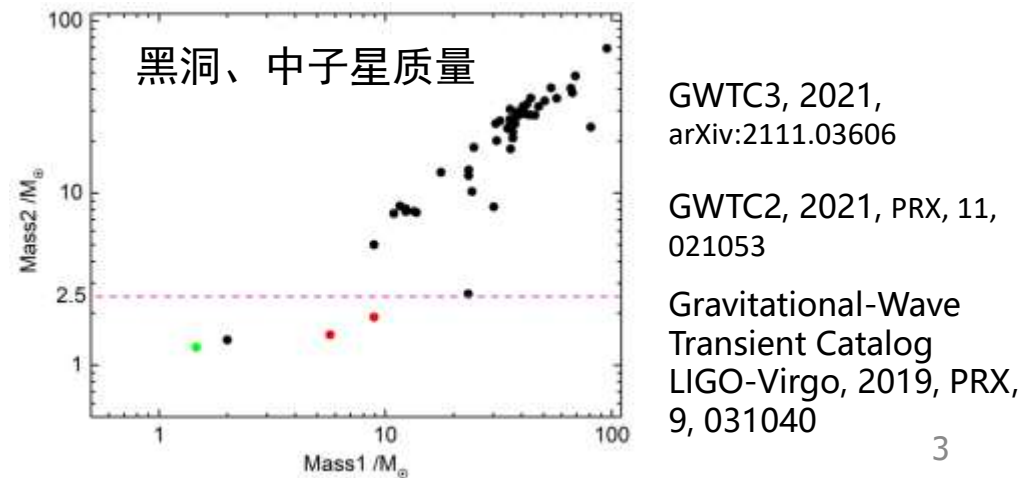
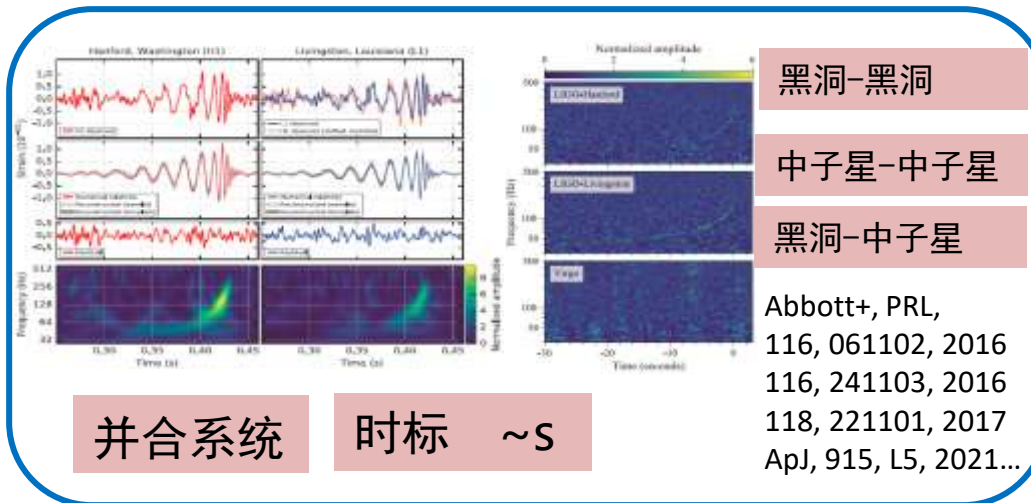
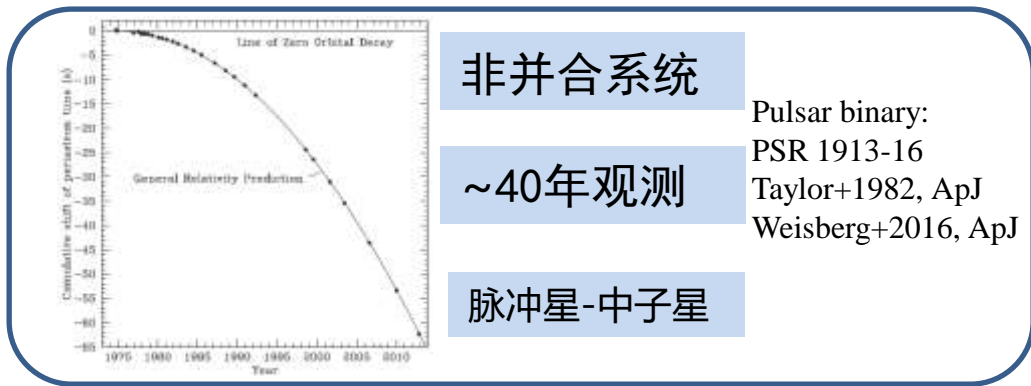
# 1. 引言 — 研究背景

- 自上世纪80年代以来，  
引力波天文学和天体物理在快速发展

- 非并合 → 并合系统
- 单一波段 → 多波段、多信使
- 单波源 ↔ 星族
- .....

- LIGO-Virgo已观测到90+双致密天体并合事件

- 黑洞、中子星质量  
(约1.27-95太阳质量)
- 自旋
- 位置
- 事件率(约0.25/天)
- 寄主星系



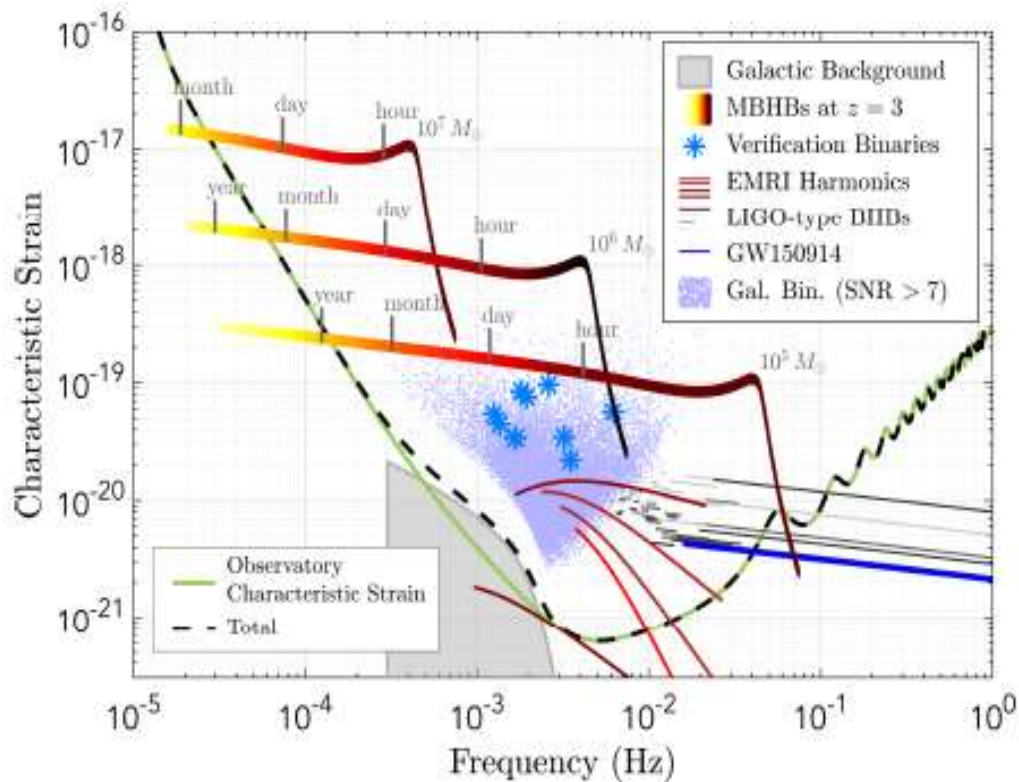
# 1. 引言 — 研究背景

- LIGO等观测之外，其它引力波频率的探测也有待挖掘

● 射电望远镜  
— FAST  
— SKA

● 空间探测器  
— LISA  
— TAIJI  
— TIANQIN

- 很多种类波源和信号
  - 主要研究双致密星引力波信号（白矮星、中子星、黑洞双星组合）
- 会遮挡某些波源的信号，需要扣除
- 和双星物质交流、潮汐、磁场、星系和星族演化、黑洞形成等有密切联系



LISA mission proposal

Kramer+, 2004, New Astro.

<https://www.cosmos.esa.int/web/lisa/lisa-documents/>

# 1. 引言 — 引力波的产生

□ 场方程 (Einstein 1918, Landau+1975) + 引力波微扰:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi k}{c^4} T_{ik}, \quad g_{ik} = g_{ik}^{(0)} + h_{ik}. \quad \frac{1}{2} \square \psi_i^k = \frac{8\pi k}{c^4} \tau_i^k, \quad \square = \triangle - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}.$$

↑ ↑ ↑ ↙

空间几何    度规    能量-动量张量    引力常数

$$\psi_i^k = h_i^k - \frac{1}{2} \delta_i^k h,$$

方程的解和质量四极矩密切相关:  $h_{23} = -\frac{2k}{3c^4 R_0} \ddot{D}_{23},$

$$\psi_{\alpha\beta} = -\frac{2k}{c^4 R_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int \mu x^\alpha x^\beta dV.$$

$$h_{22} - h_{33} = -\frac{2k}{3c^4 R_0} (\ddot{D}_{22} - \ddot{D}_{33})$$

$$D_{\alpha\beta} = \int \mu (3x^\alpha x^\beta - \delta_{\alpha\beta} r^2) dV.$$

□ 双星系统 (Peters & Mathews, 1963):

$$h(n, e) \equiv h_n$$

引力波振幅  $h = \frac{\Delta L}{L}$

$$= 4\sqrt{2}(2\pi)^{2/3} \frac{G^{5/3}}{c^4} M^{2/3} \mu P_{\text{orb}}^{-2/3} R_b^{-1} \left( \frac{g(n, e)}{n^2} \right)^{1/2}$$

$$= 1.14 \times 10^{-21}$$

$$\times \left( \frac{g(n, e)}{n^2} \right)^{1/2} \left( \frac{\mathcal{M}}{M_\odot} \right)^{5/3} \left( \frac{P_{\text{orb}}}{\text{h}} \right)^{-2/3} \left( \frac{R_b}{\text{kpc}} \right)^{-1}$$

频率:  $f_n = \frac{n}{P_{\text{orb}}}, n = 2, 3, 4, 5, \dots$

# 1.引言 — 双致密星观测

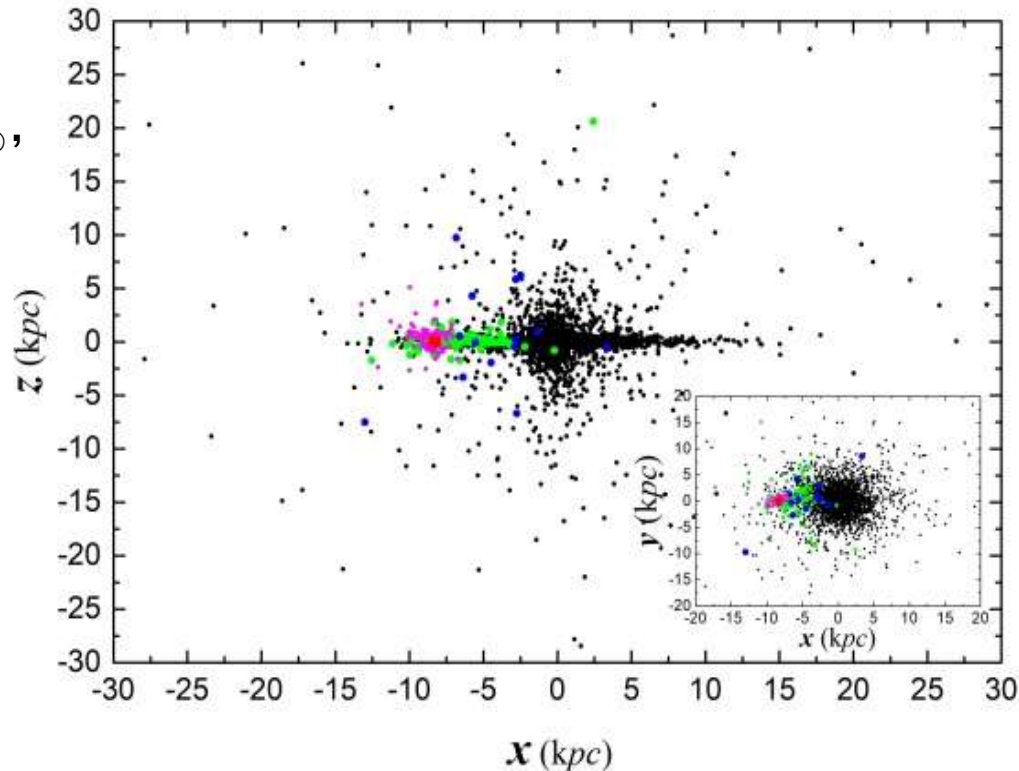
- 银河系双致密星数目： 理论值  $\longrightarrow$
- 观测： 白矮星 (WD) + 白矮星  $\sim 100-1000$
- 中子星 (NS) + 白矮星  $\sim 200$
- 中子星+中子星  $\sim 20$
- 黑洞双星  $\sim 10-20$

- 银河系结构(恒星总质量: $\sim 1.25 \times 10^{11} M_{\odot}$ , 总质量 $\sim 6 \times 10^{11} M_{\odot}$ ):  
核球 + 薄、厚盘 + 晕

- 银河系双致密星空间分布 (右图)
  - 黑点 数值模拟
  - 粉点 观测WD+WD
  - 绿、蓝点 观测NS+WD
  - 红点 太阳系位置

Nelemans+2001

Type	$\nu$	$\nu_{\text{merg}}$	#
(wd, wd)	$2.5 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^8$
[wd, wd)	$3.3 \times 10^{-3}$	—	$4.2 \times 10^7$
(ns, wd)	$2.4 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^6$
(ns, ns)	$5.7 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^5$
(bh, wd)	$8.2 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^6$
(bh, ns)	$2.6 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^5$
(bh, bh)	$1.6 \times 10^{-4}$	—	$2.8 \times 10^6$

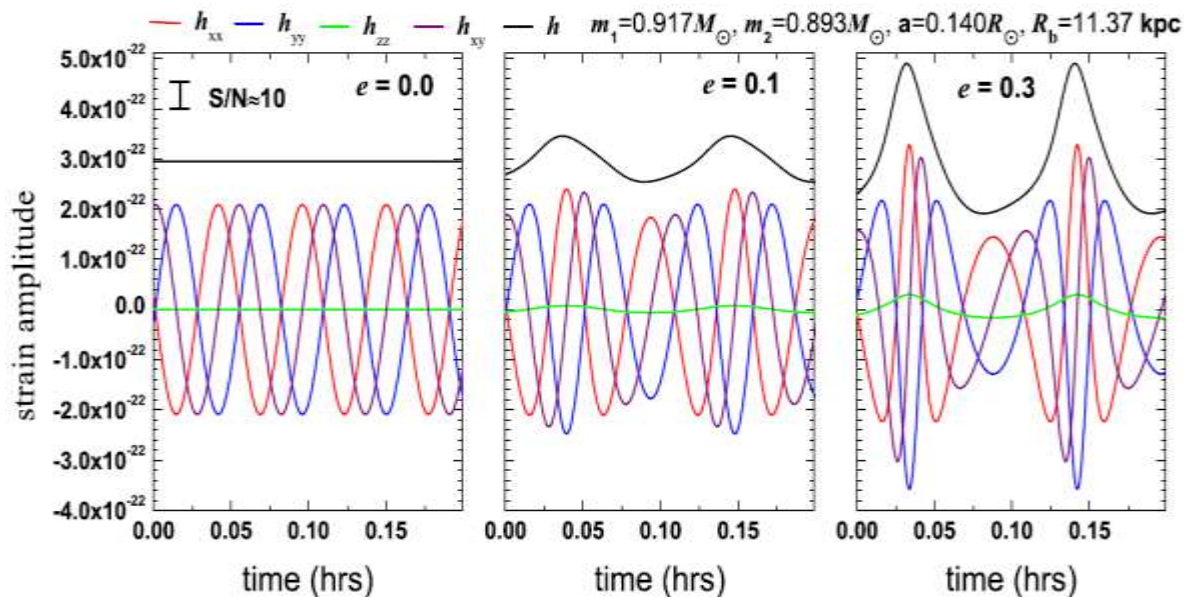


## 2.双致密星族引力波信号 — 单个双星

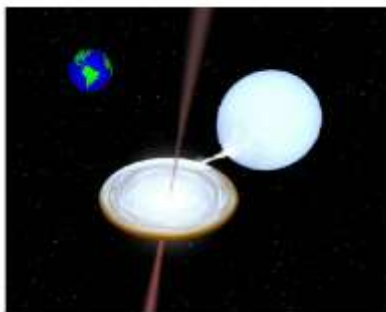
### □ 分离双星引力波信号



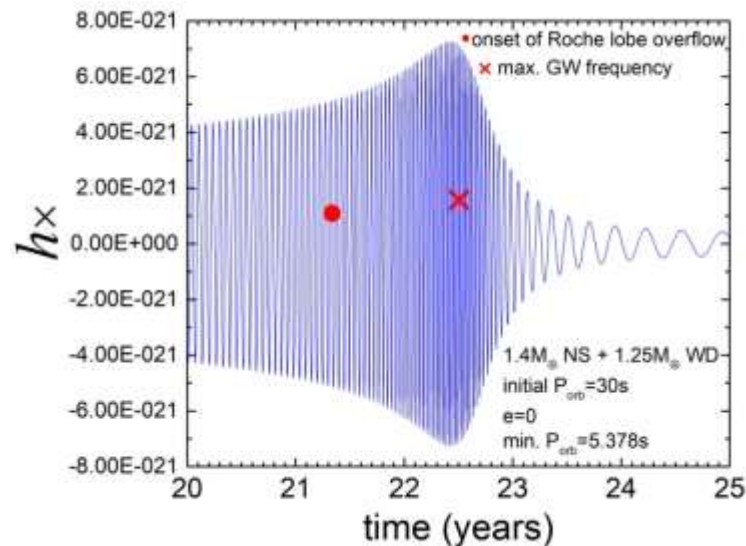
分离双星示意图



### □ 物质交流双星引力波信号



物质交流双星示意图



NS+WD ( $1.4+1.25$ )  $M_{\odot}$

## 2. 双致密星系的引力波信号 — 单个双星

Yu, Lu, Jeffery, 2021, MNRAS 503, 2776

角动量演化  $\dot{J}_{\text{orb}} = \dot{J}_{\text{GR}} + \dot{J}_{\text{mt}} + \dot{J}_{\text{so}}$ .

轨道间距演化

$$\frac{\dot{a}}{2a} = -\frac{32}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{m_1 m_2 M}{a^4} + \left[ 1 - \alpha q - (1 - \alpha) \frac{q}{1 + q} \left( \beta + \frac{1}{2} \right) - \alpha \sqrt{(1 + q) r_1} \right] \frac{-\dot{m}_2}{m_2} + \frac{k m_1 r_1^2}{\tau_s J_{\text{orb}}} (\omega_s - \omega_c).$$

物质转移速率

$$\dot{m}_2 \approx \frac{\Delta m_2}{\Delta t} = -\frac{4\pi}{3} \frac{\rho_2 (r_2^3 - r_{2L}^3)}{\Delta t},$$

$$\frac{dP_e}{dr_2} = -\frac{d\Phi}{dr_2} \rho_2,$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho_2,$$

自旋-轨道角速度

磁场, 光度, .....

引力波频率演化

$$\frac{\dot{f}}{f} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} c^{-5} G^{5/3} m_1 m_2 M^{-1/3} f^{8/3} + \left[ \frac{(1 - \alpha)}{2M} + \frac{3C^{-1}}{m_2} \right] \dot{m}_2 - \frac{3k m_1 r_1^2}{\tau_s J_{\text{orb}}} (\omega_s - \omega_o).$$



## 2. 双致密星族的引力波信号 — 单个双星

超致密X射线源NS+WD的引力波信号

4年Taiji/Tianqin/LISA的观测时间

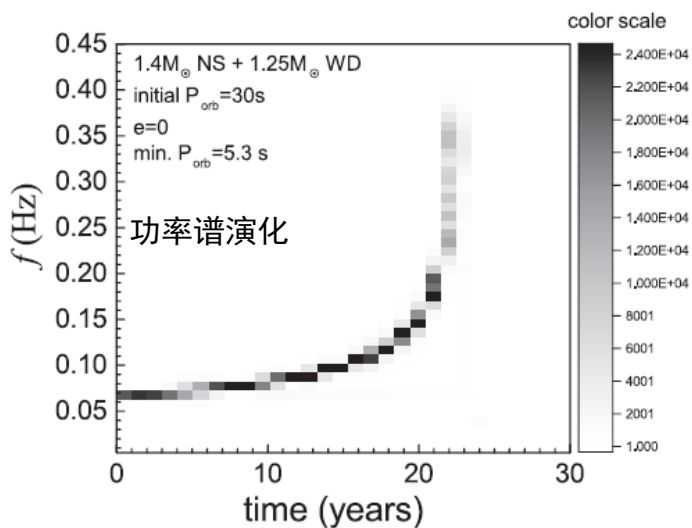
4U1820-30的信噪比可达约11/10/2,

(1.0+0.065) $M_{\odot}$ 的中子星-白矮星

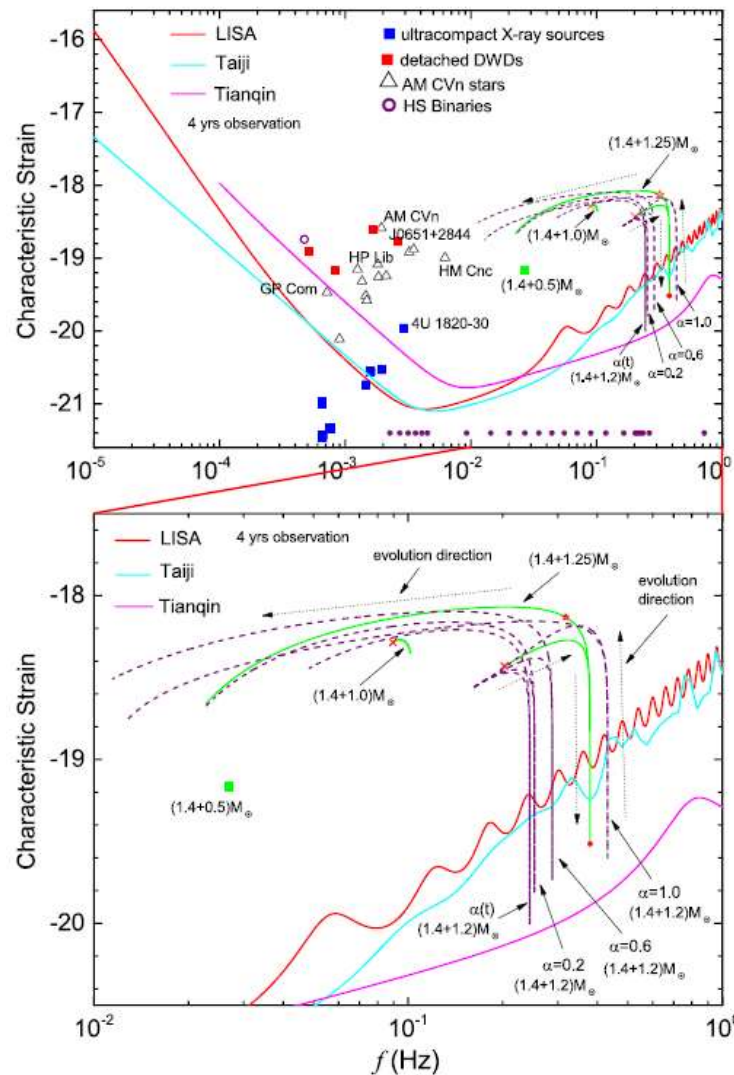
(1.4+0.5)  $M_{\odot}$ 的双星信噪比可达27/40/28;

白矮星质量 $>1.1M_{\odot}$ 时, 可以明显观测到中子星-白矮星的演化轨迹;

银河系中相接中子星-白矮星的数目约在100-1000



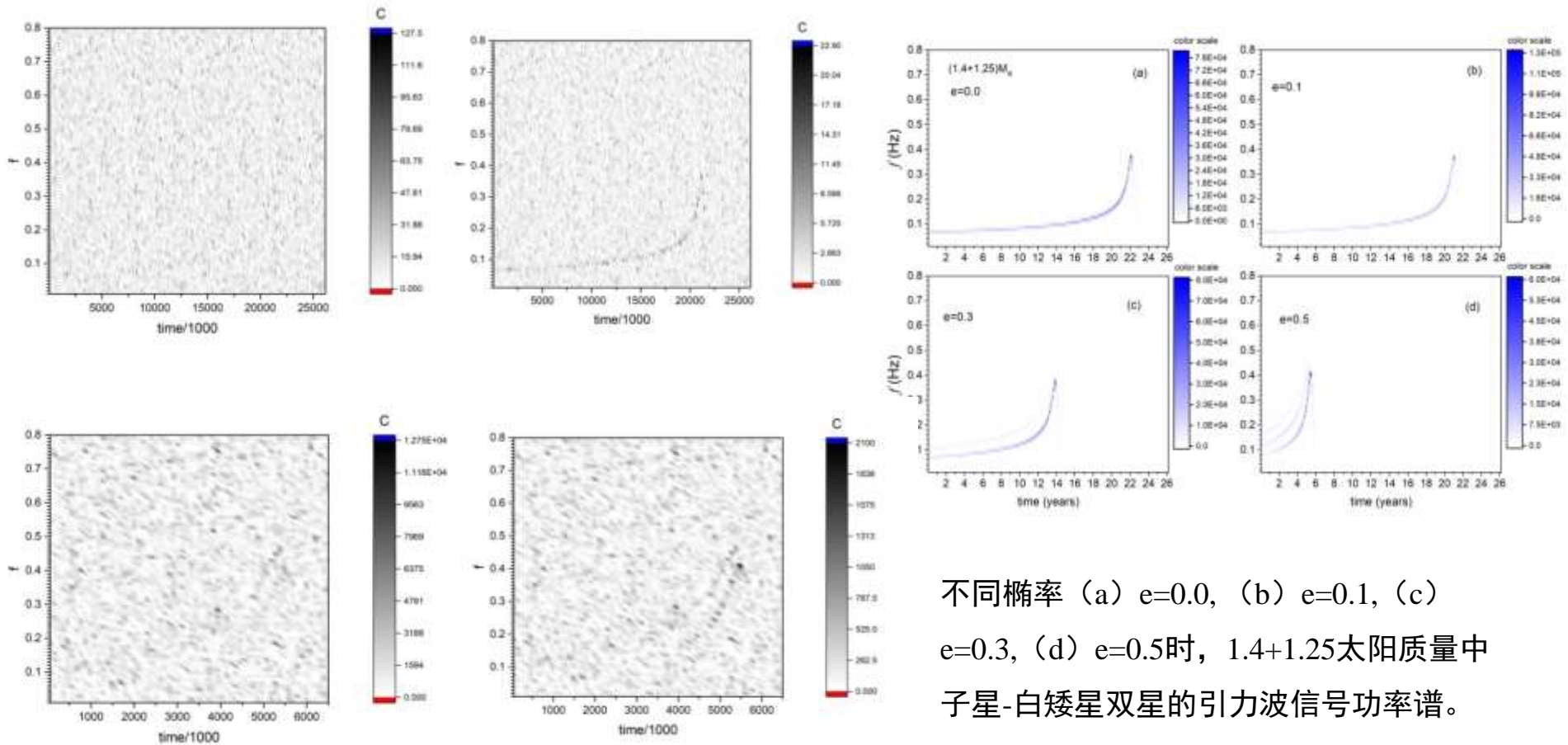
Yu, Lu, Jeffery, 2021, MNRAS 503, 2776



质量 (1.4+0.5, 1.0, 1.25)  $M_{\odot}$ 的相接中子星-白矮星双星在引力波特征振幅-频率图中的演化轨迹 (4年观测时间)。为方便比较, 也标出极致密X射线源, 相接双白矮星, 分离双白矮星和热亚矮星双星的振幅和频率。青色、粉色和红色曲线分别标出Taiji、Tianqin和LISA的灵敏度。

## 2.双致密星族引力波信号 — 单个双星

### NS+WD (1.4+1.25) $M_{\odot}$ 双星引力波辐射



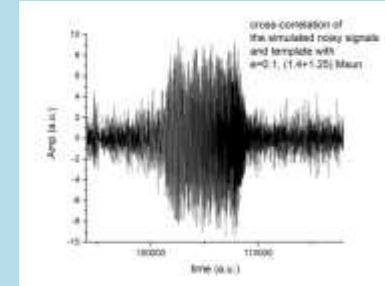
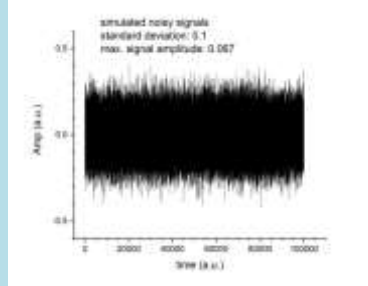
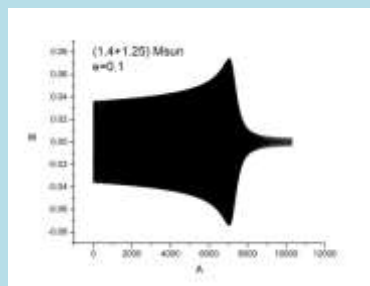
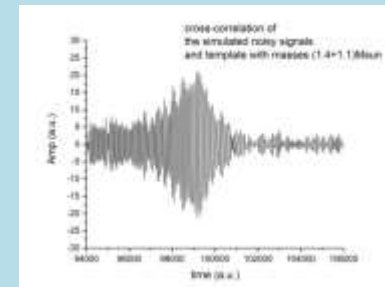
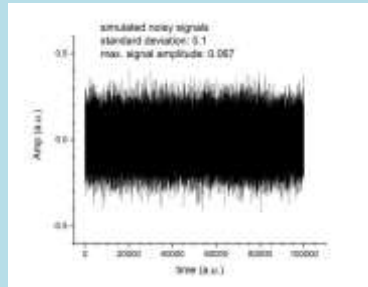
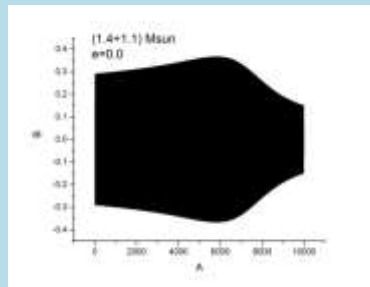
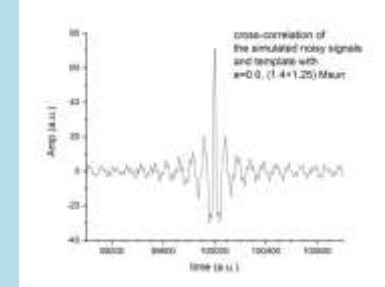
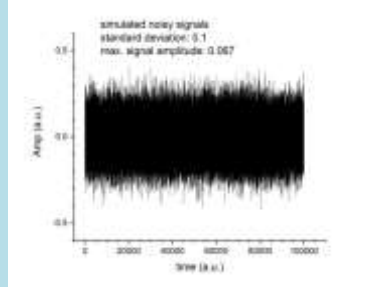
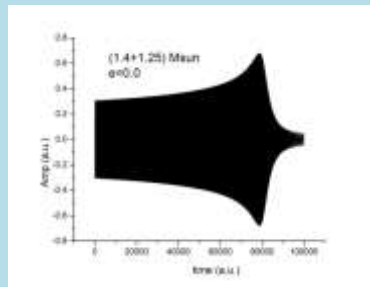
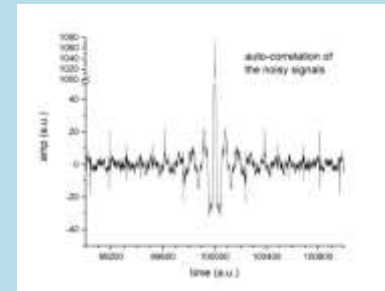
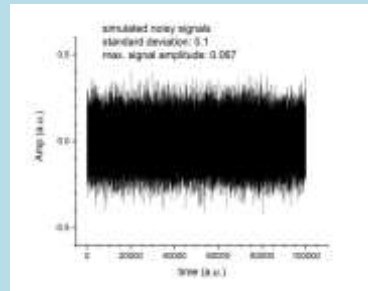
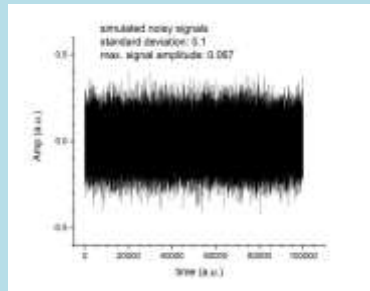
不同信噪比时，中子星-白矮星双星引力波信号功率谱。

不同椭率 (a)  $e=0.0$ , (b)  $e=0.1$ , (c)  $e=0.3$ , (d)  $e=0.5$ 时，1.4+1.25太阳质量中子星-白矮星双星的引力波信号功率谱。

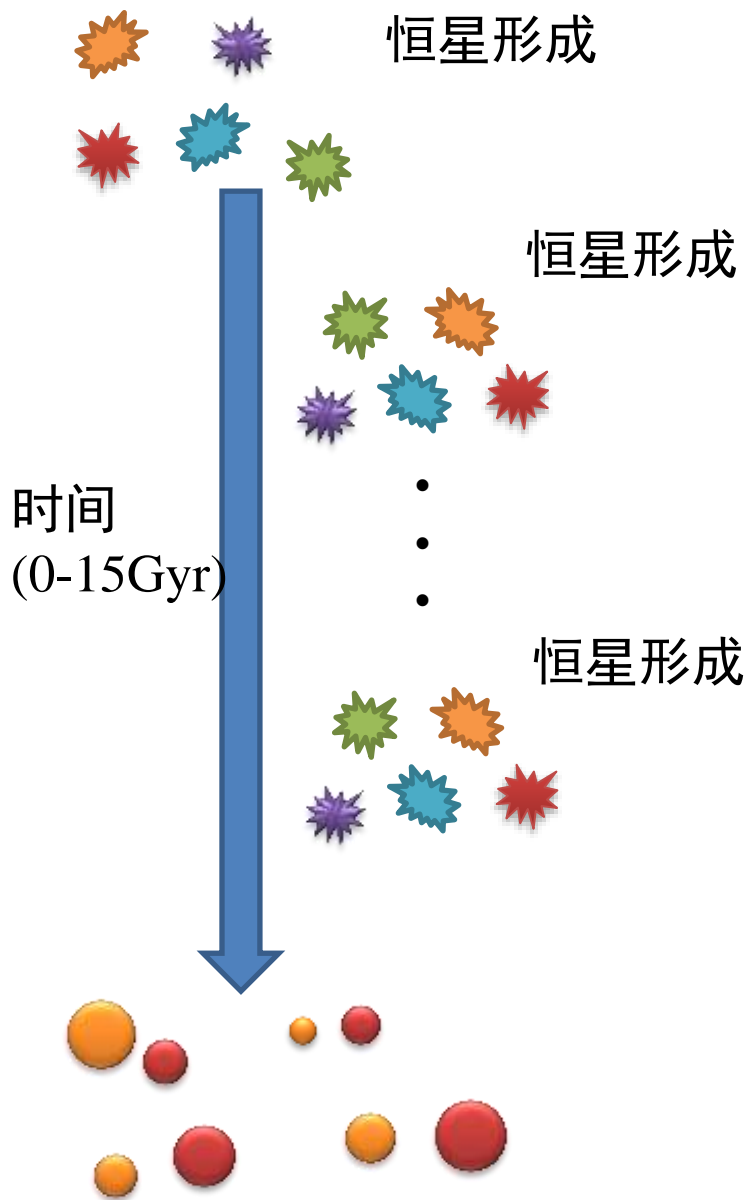
(Bian, 2021, Sci. China Phys. Mech. Astron. 64, 120401)

## 2. 双致密星系的引力波信号 — 单个双星

➤ 搜寻弱信号 : 相关



## 2.双致密星星族的引力波信号 — 星族

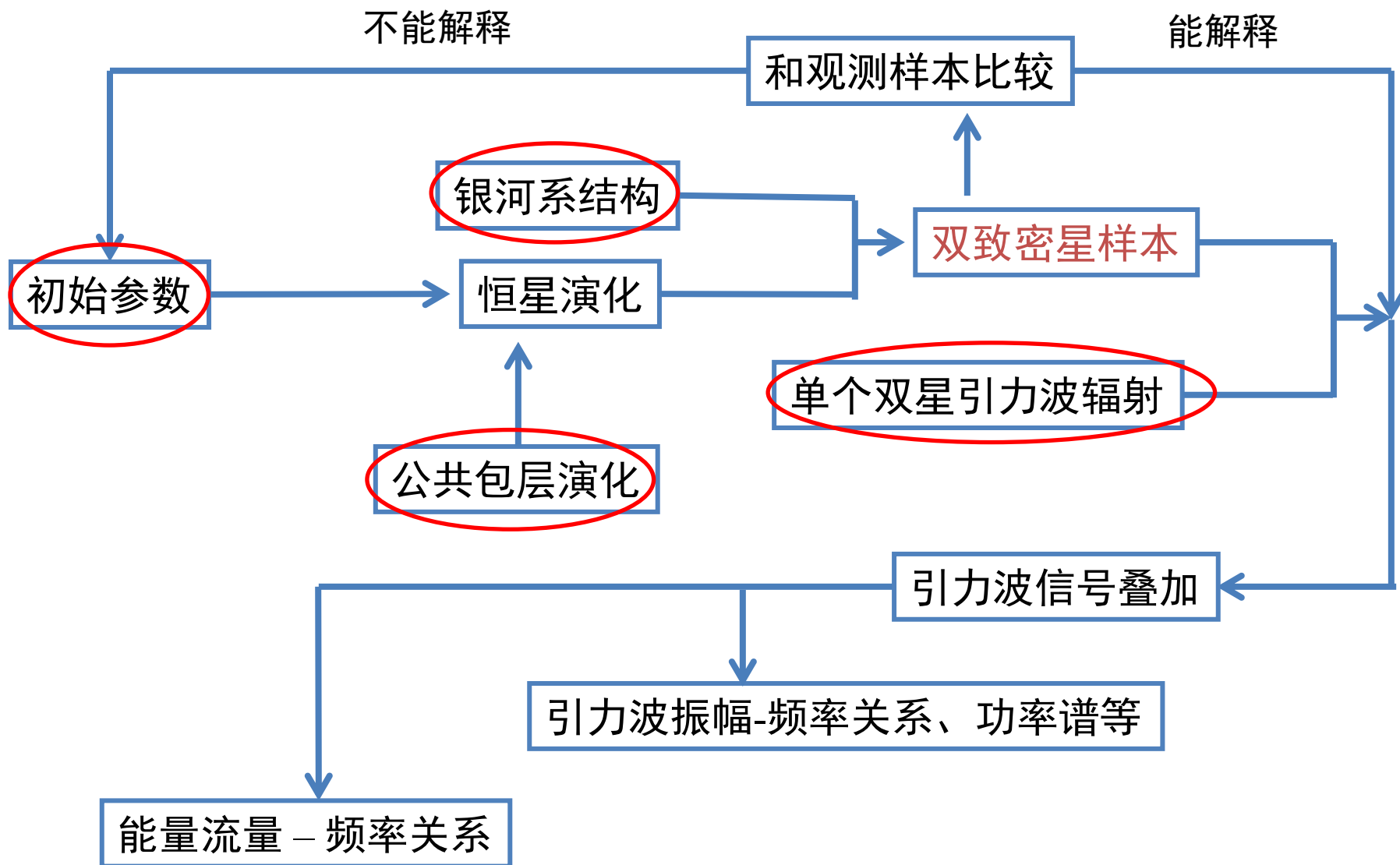


### 星族合成

- 主序星  $\xrightarrow{\text{演化}}$  双致密星
- 恒星形成历史
- 分布函数：
  - 初始质量函数
  - 金属丰度
  - 质量比
  - 椭率
  - 轨道间距
  - ...
- 距离: 银河系结构

## 2. 双致密星系的引力波信号 — 星族

### 星族合成模拟方法



## 2.双致密星星族的引力波信号 — 星族

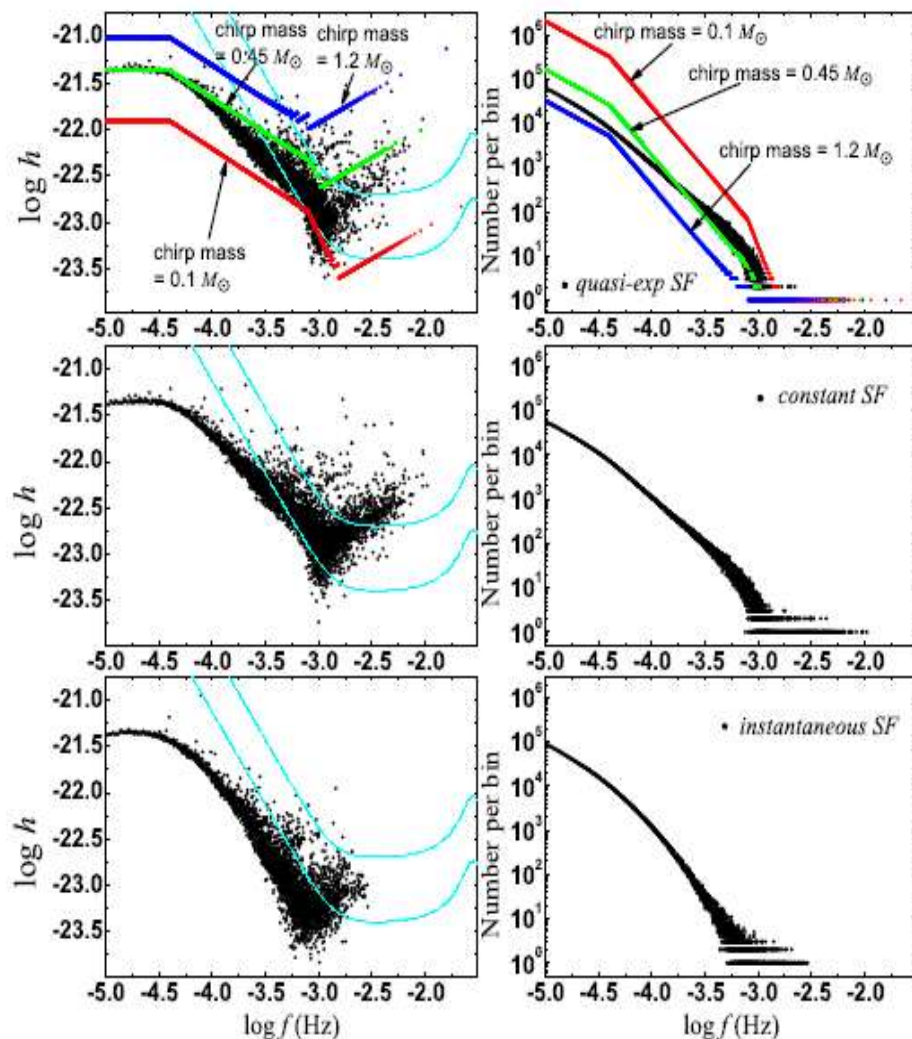
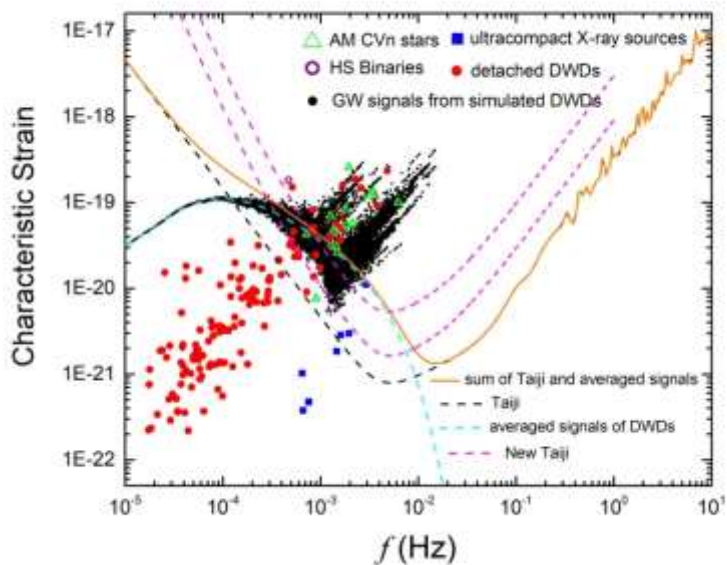
### 双白矮星星族的引力波辐射

$$h = \begin{cases} h_1(n, e) \cdot (n'(f)\Delta f)^{0.5}, & f \leq f_c, \\ h_1(n, e) \cdot (n'(f)\Delta f_r)^{0.5}, & f > f_c \end{cases}$$

$$= \begin{cases} A \cdot f^{(3\beta-7)/6}, & f \leq f_c, \\ B \cdot f^{2/3}, & r = i \text{ and } f > f_c, \\ 0, & r \neq i \text{ and } f > f_c. \end{cases}$$

$$A = 1.732 \times 10^{-25} b^{0.5} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{5/6} \left(\frac{\Delta f}{10^{-8}}\right)^{1/2},$$

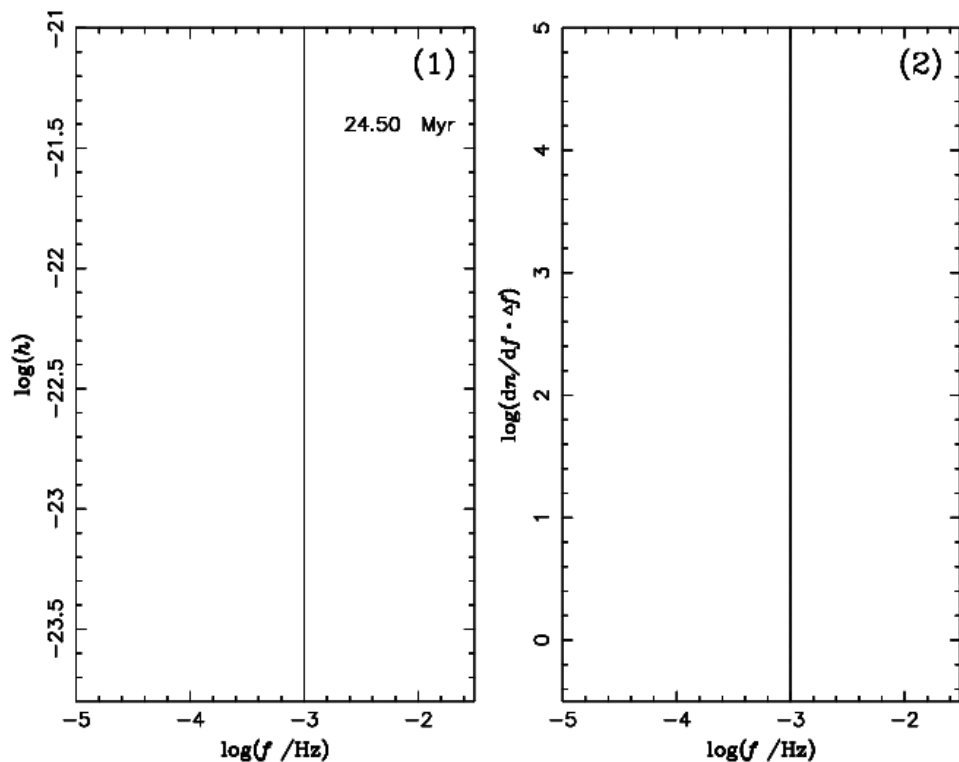
$$B = 7.41 \times 10^{-21} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{5/3} \left(\frac{d}{8.5\text{kpc}}\right)^{-1}.$$



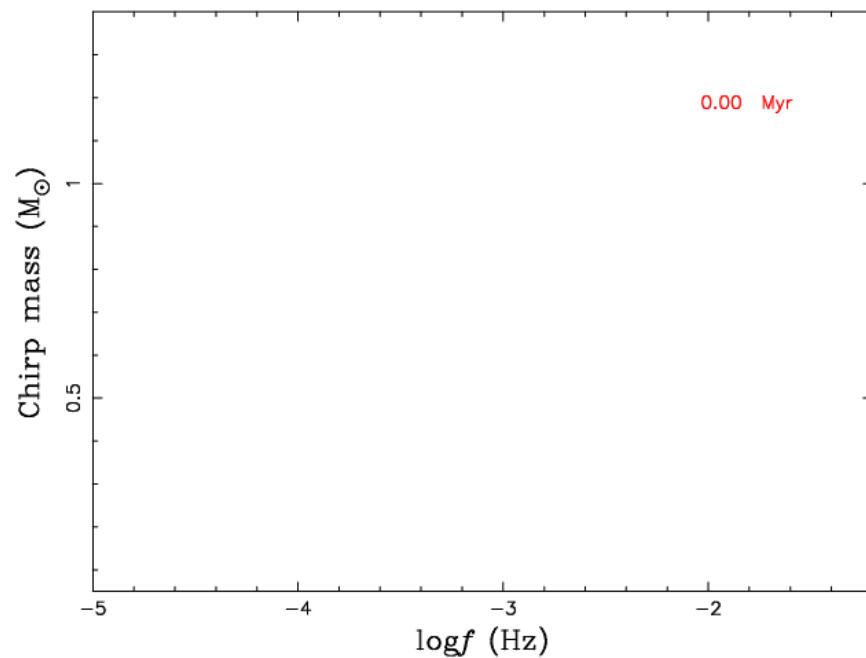
## 2. 双致密星族引力波信号 — 星族

### 双白矮星星族的引力波辐射

引力波振幅-频率随时间的演化



双星啁啾质量-频率随时间的演化

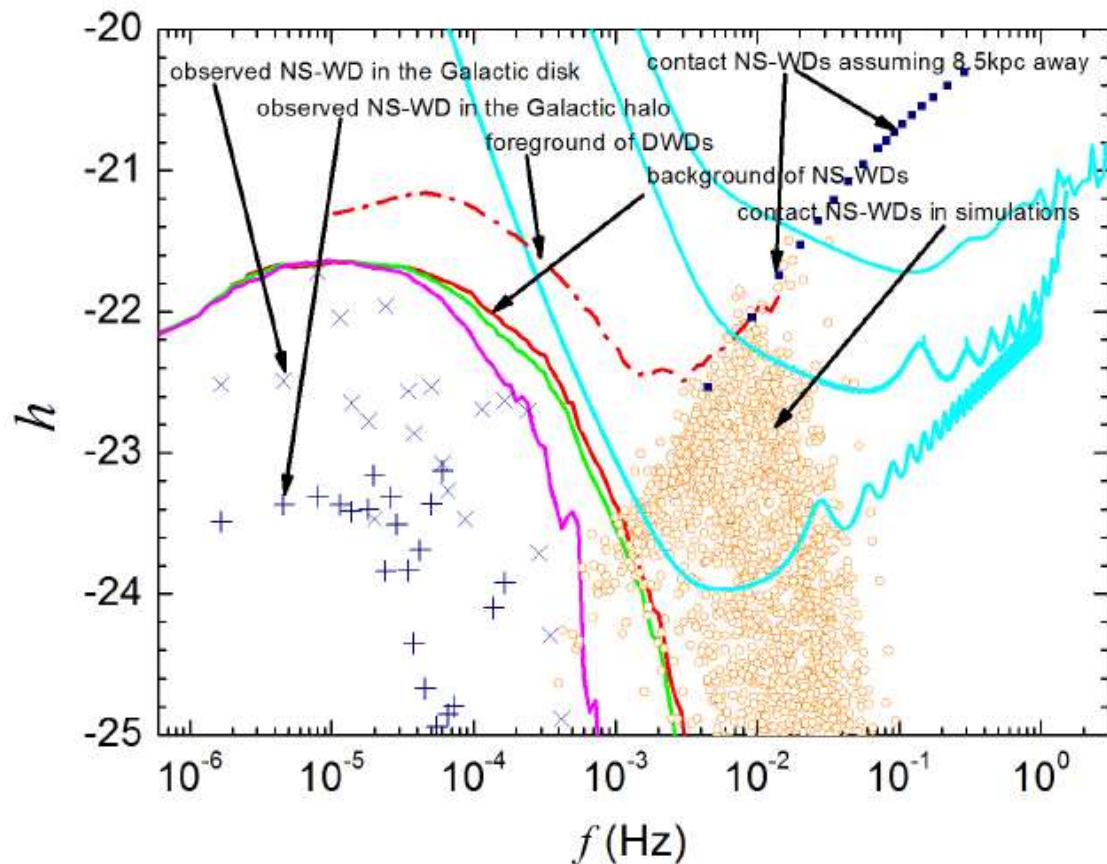


Yu&Jeffery , 2010, 2011, 2013

## 2.双致密星星族的引力波信号 — 星族

### 中子星-白矮星星族的引力波辐射

- NS+WD星族的引力波背景辐射小于WD+WD的背景，在可探测边缘
- 物质交流NS+WD贡献可观的引力波信号



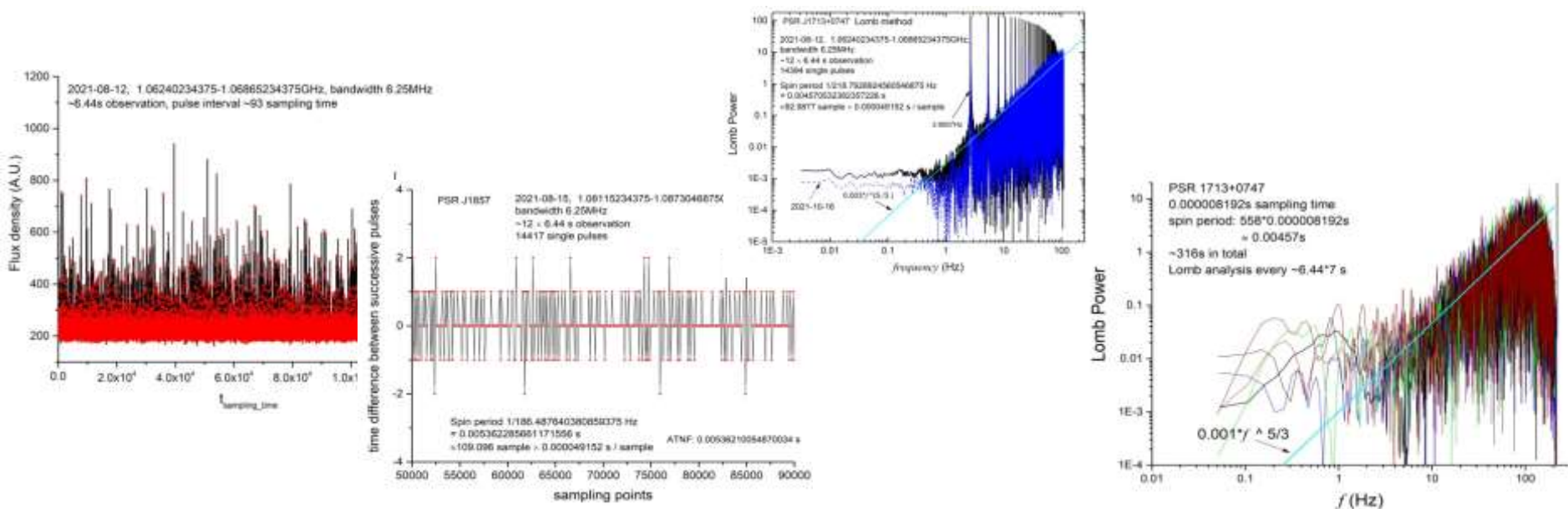


### 3. 总结和展望

研究双致密星族的引力波信号，发现：

- ❑ 物质交流双致密星可以是信噪比高的引力波波源，通过引力波探测可以研究这些双星的演化状态；
- ❑ 超致密X射线源、相接双白矮星（AM CVn stars）等天体可作为引力波观测定标源；
- ❑ 大量双白矮星的引力波背景辐射将被探测到，其他双致密星的引力波背景辐射在探测边缘；
- ❑ 引力波探测能帮助理解整个双致密星族，和其与星系演化之间的关系；

**展望：**引力波背景信号可能影响脉冲星计时，我们的高精度脉冲星计时研究初步结果：



*thanks!*