



# 引力波之简介

刘帅

肇庆学院电子与电气工程学院物理系

肇庆第一中学高中部

2024年6月25日

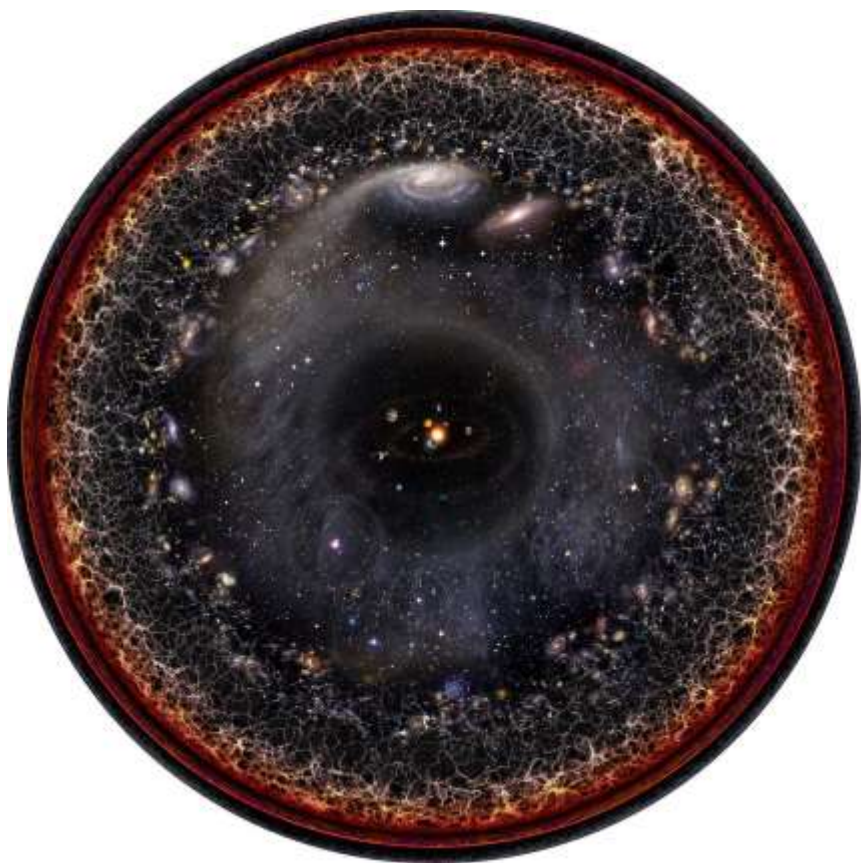


肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City



# 什么是宇宙？

□ 上下四方曰**宇**，往古来今日**宙**——《尸子》



Credit: Pablo Carlos Budassi



Credit: 达利



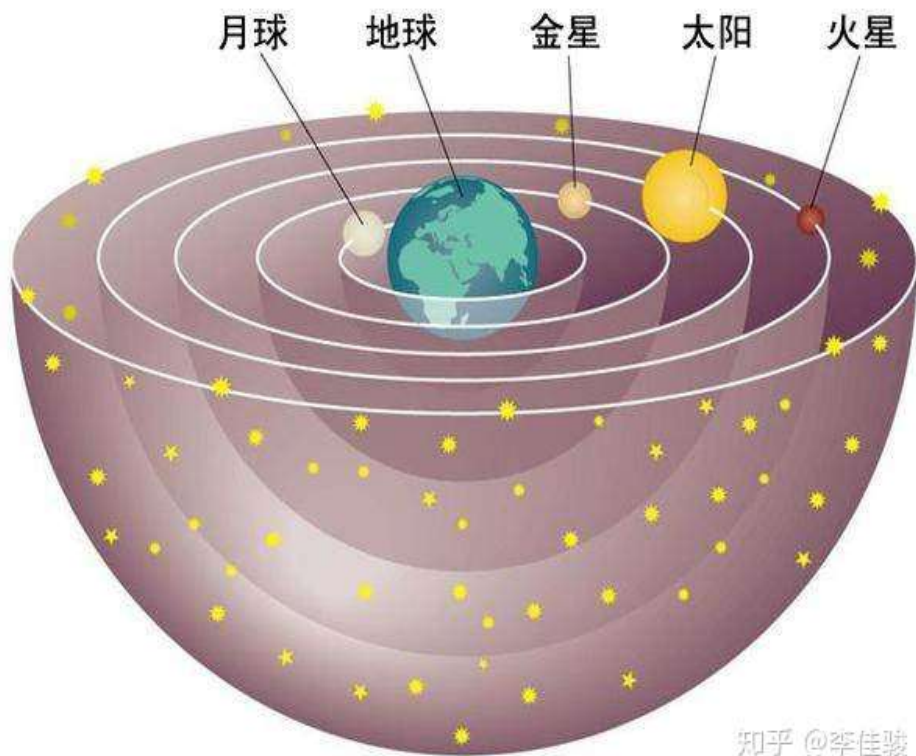
肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City





# 宇宙有多大：太阳系？

□ 太阳系的直径约为  $2.9 \times 10^{14} \text{m}$



Credit: Camille Flammarion



肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City





# 宇宙有多大：银河系？

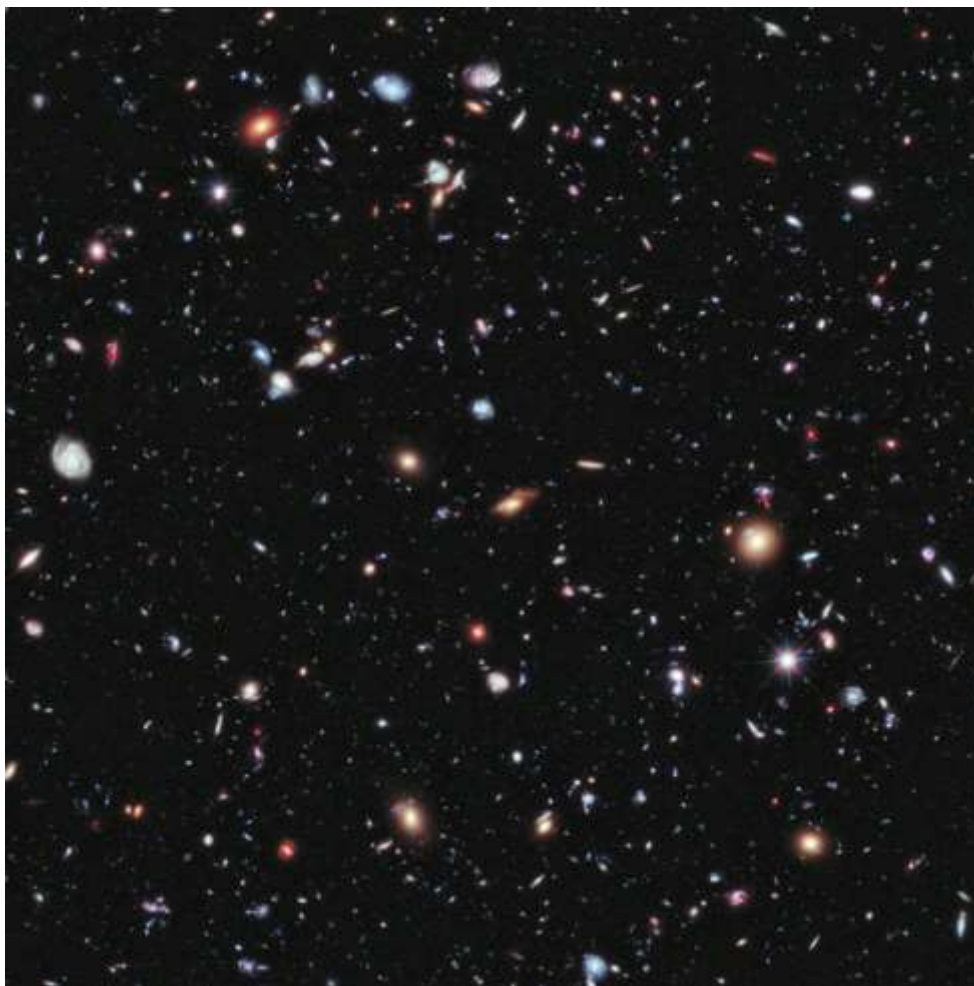
□ 银河系的直径约为 $10^{21}$ m





# 宇宙有多大：千亿颗星系！

□ 可观测宇宙的直径约为  $8.8 \times 10^{26} \text{m}$



Credit: NASA; ESA; G. Illingworth, D. Magee, and P. Oesch, University of California, Santa Cruz; R. Bouwens, Leiden University; and the HUDF09 Team

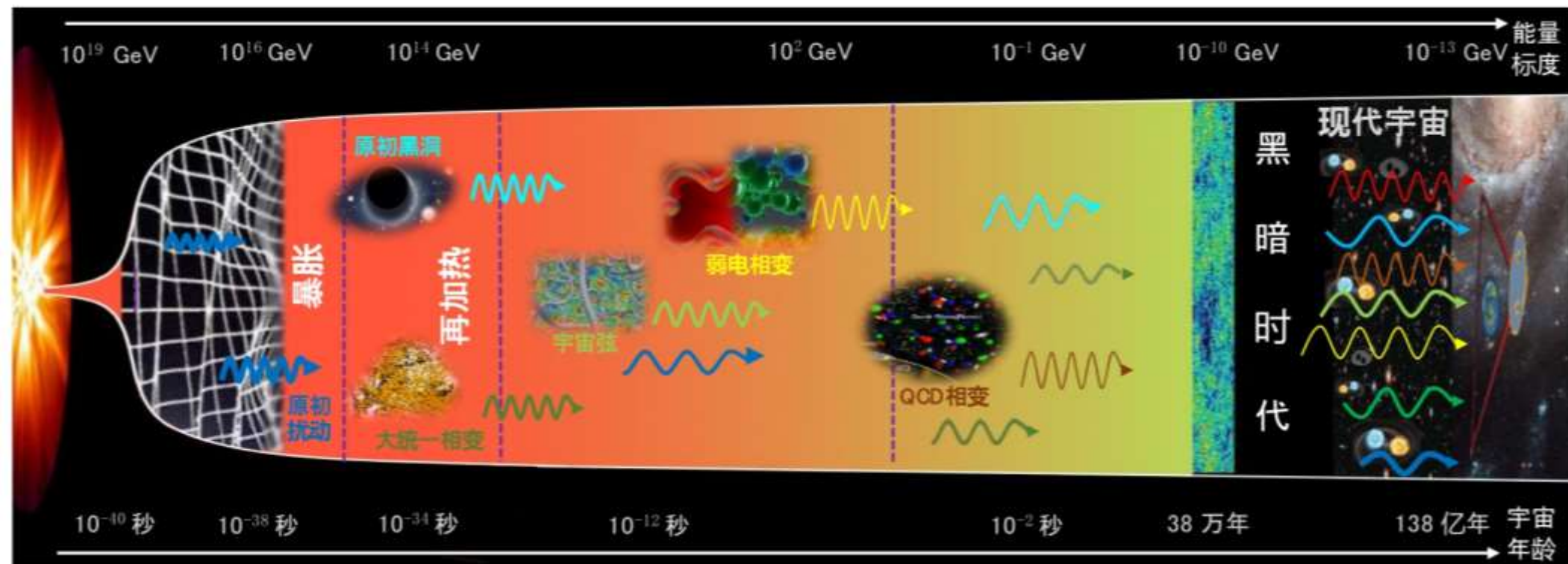


肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City





# 科学家眼中的宇宙



蒋贇, 梁正程, 胡一鸣, 魏东东. 中山大学学报 (自然科学版), 1. (2021)





# 什么是引力?

□ 宇宙中存在四种基本作用力：**引力**、电磁力、强相互作用力、弱相互作用力

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

**引力由万有（牛顿）引力公式描述？**



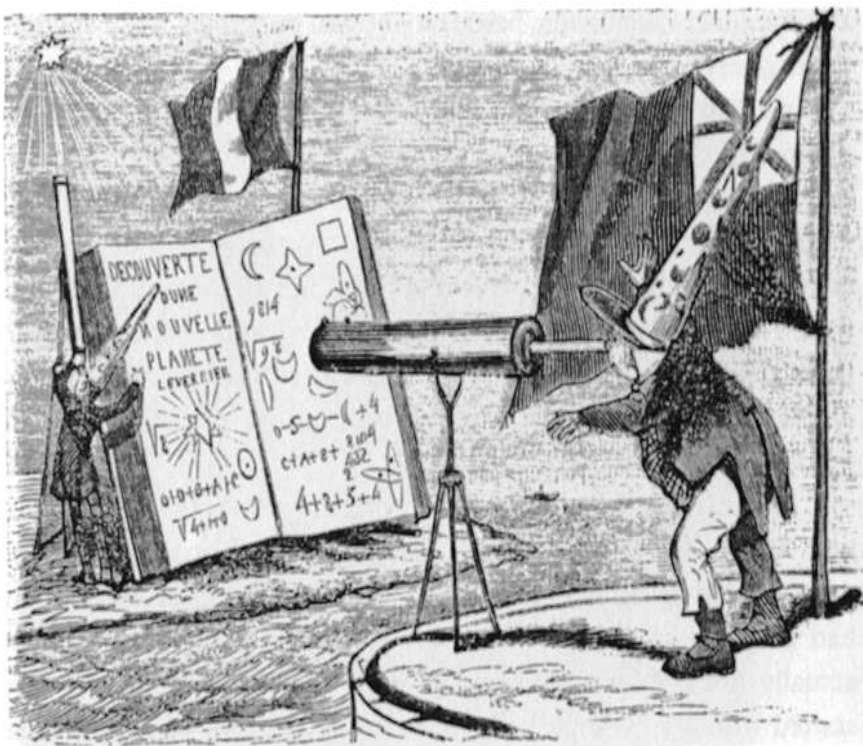


# 牛顿引力的成功

□ 牛顿引力在宏观低速的条件下相当成功

- 根据牛顿引力，亚当斯和勒威耶推算出海王星——“笔尖上发现的行星”
- 牛顿引力经受了实验的检验

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

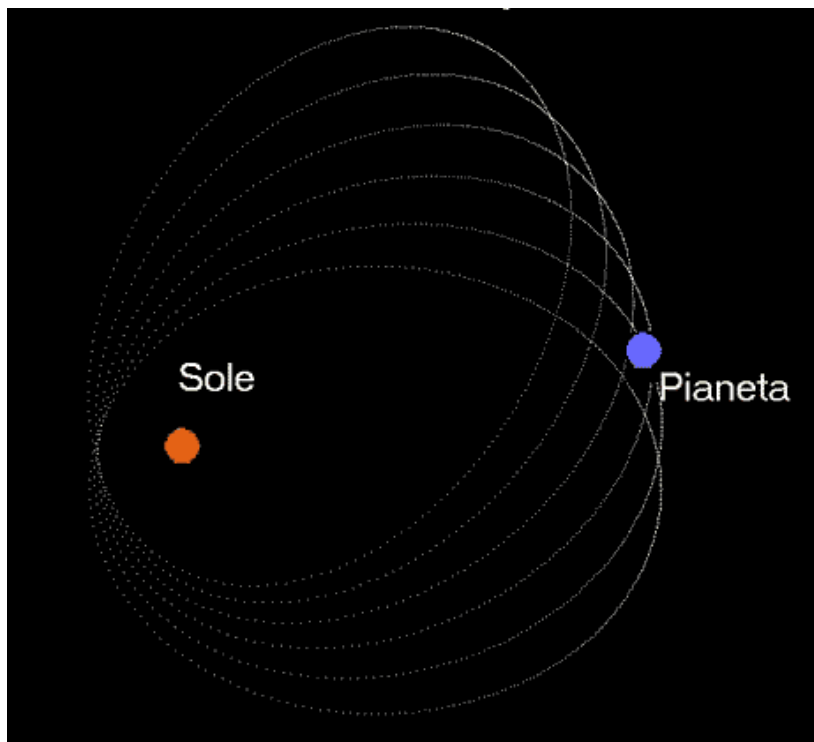






# 牛顿引力的失败

- 天文学家观测到了水星近日点进动，无法用牛顿引力解释
- 牛顿的引力是超距作用，传递速度超过光速，违背了物理的基本法则



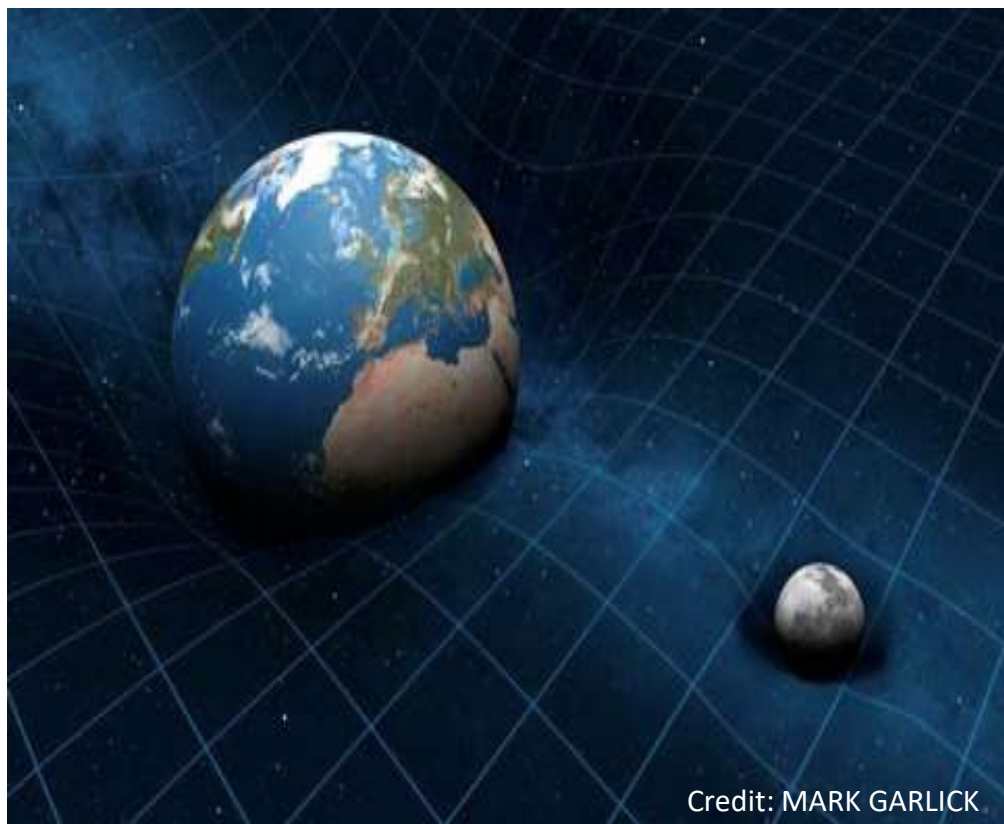
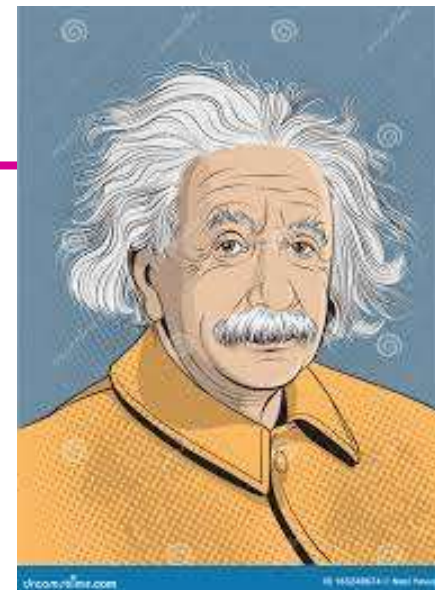


# 广义相对论

□ 1915年，爱因斯坦提出广义相对论

➤ 物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动

$$\text{时空} \leftarrow G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \rightarrow \text{物质}$$



Credit: MARK GARLICK



Credit: Steve Mould

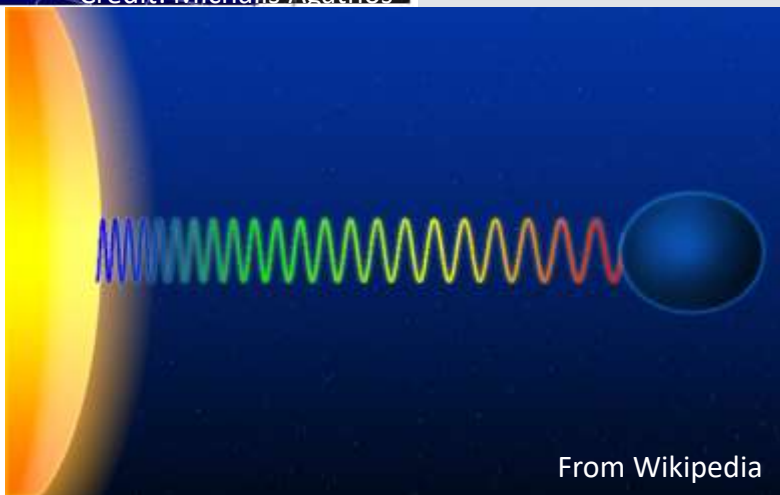
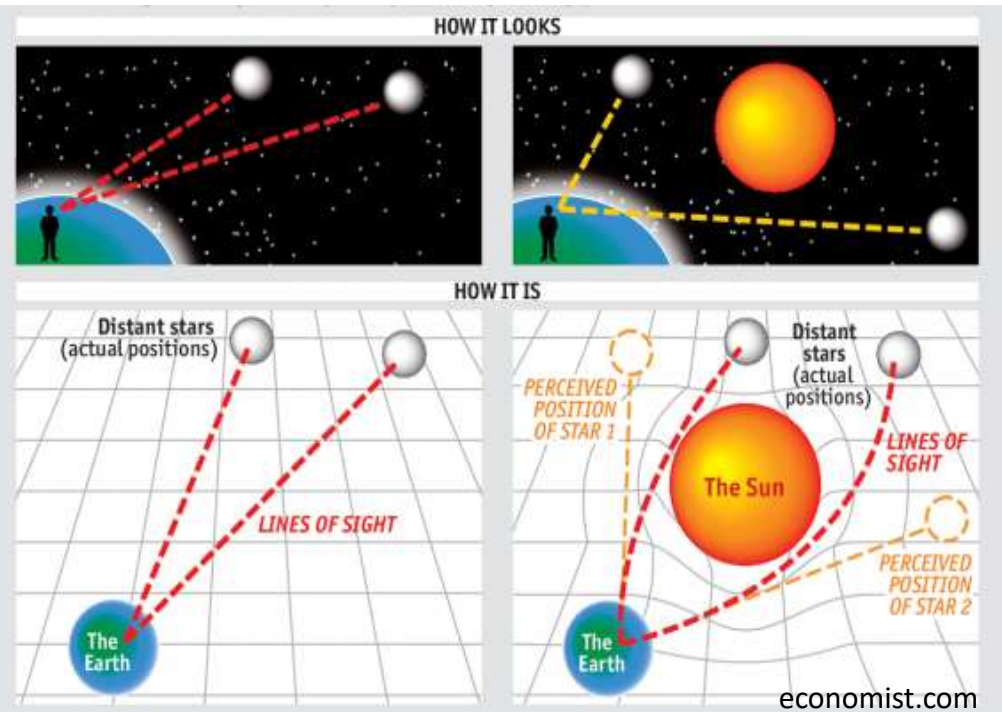
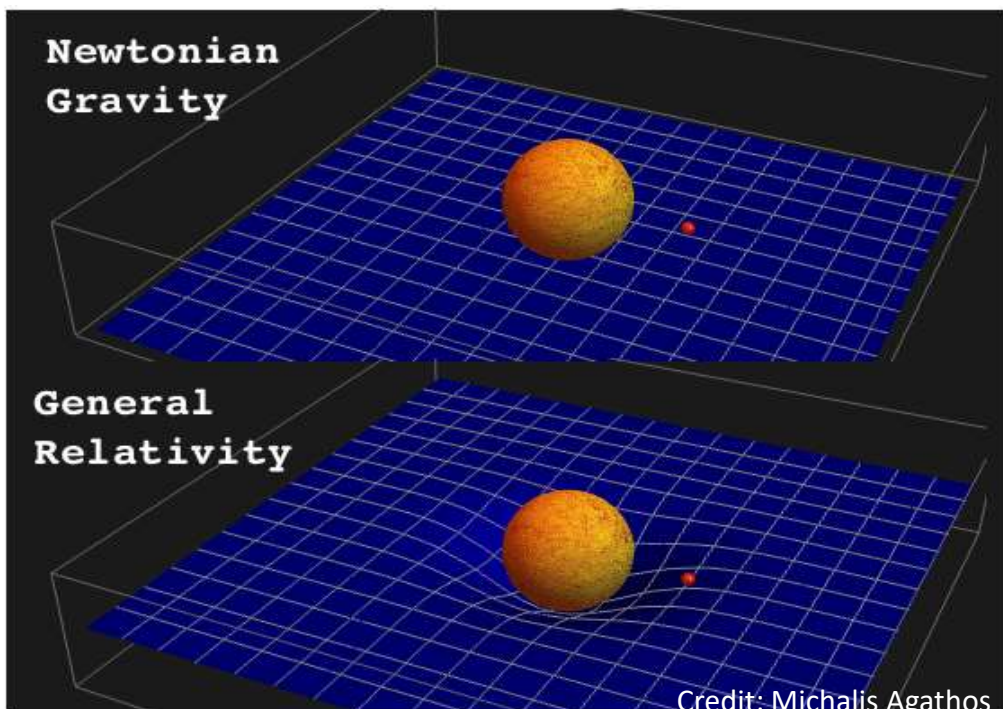






# 广义相对论的成功

□ 广义相对论的三大经典检验：水星近日点进动、光线偏转、引力红移



From Wikipedia

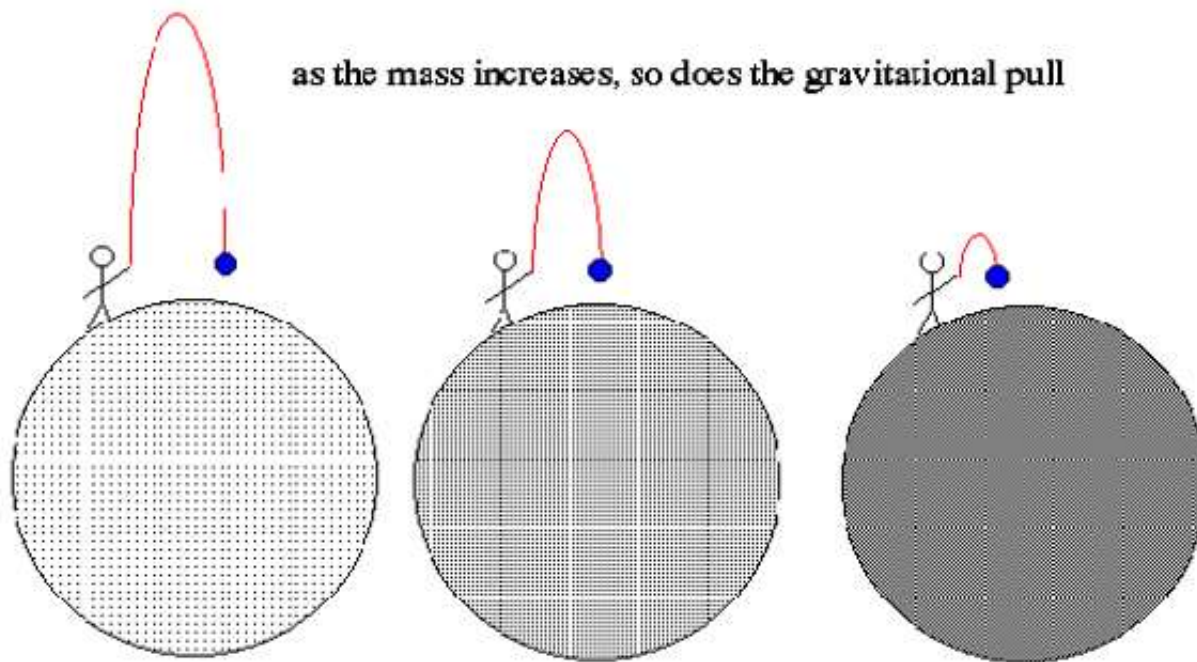


肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City



# 星体的逃逸速度

□ 星体的逃逸速度随着其质量增大而增大



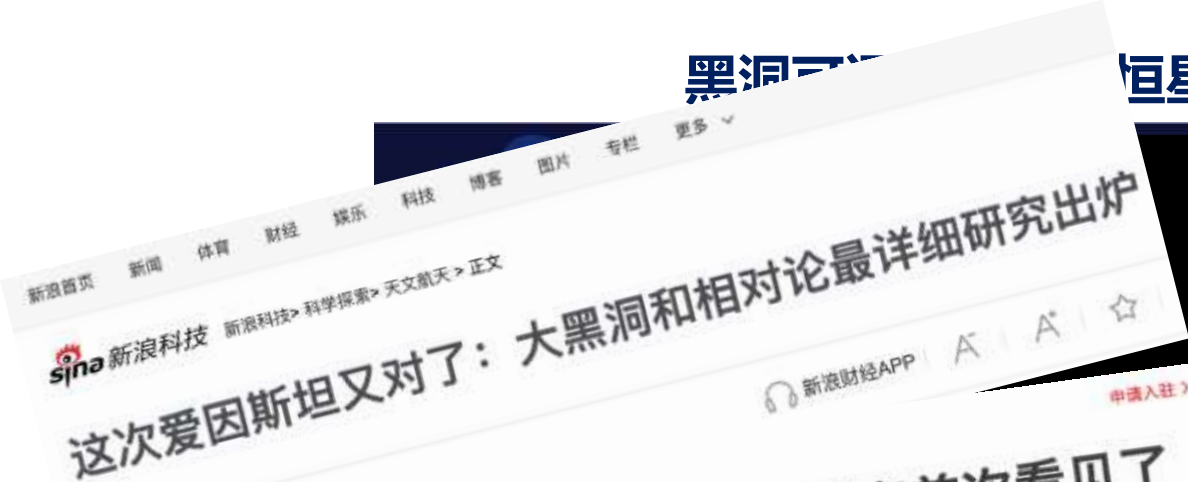
if the gravitational pull is such that even light cannot escape, then a black hole forms





# 广义相对论的成功

□ 广义相对论预言足够紧密的质量可以扭曲时空形成**黑洞**：引力足够强大，以至于包括**电磁波的任何物体**都不能逃逸的区域



这次爱因斯坦又对了！8亿光年外，科学家首次看见了  
黑洞背后的光

2021-08-18 20:58:30 来源：宇宙解码

网易首页 > 网易号 > 正文

爱因斯坦又对了！银河系中心黑洞首张照片发布  
太阳质量400万倍

2022-05-13 05:03:19 来源：天乐谈科技 © 江苏

www.everthilhorst.nl

at 20,000 km/s an hour. This is called a  
super nova.

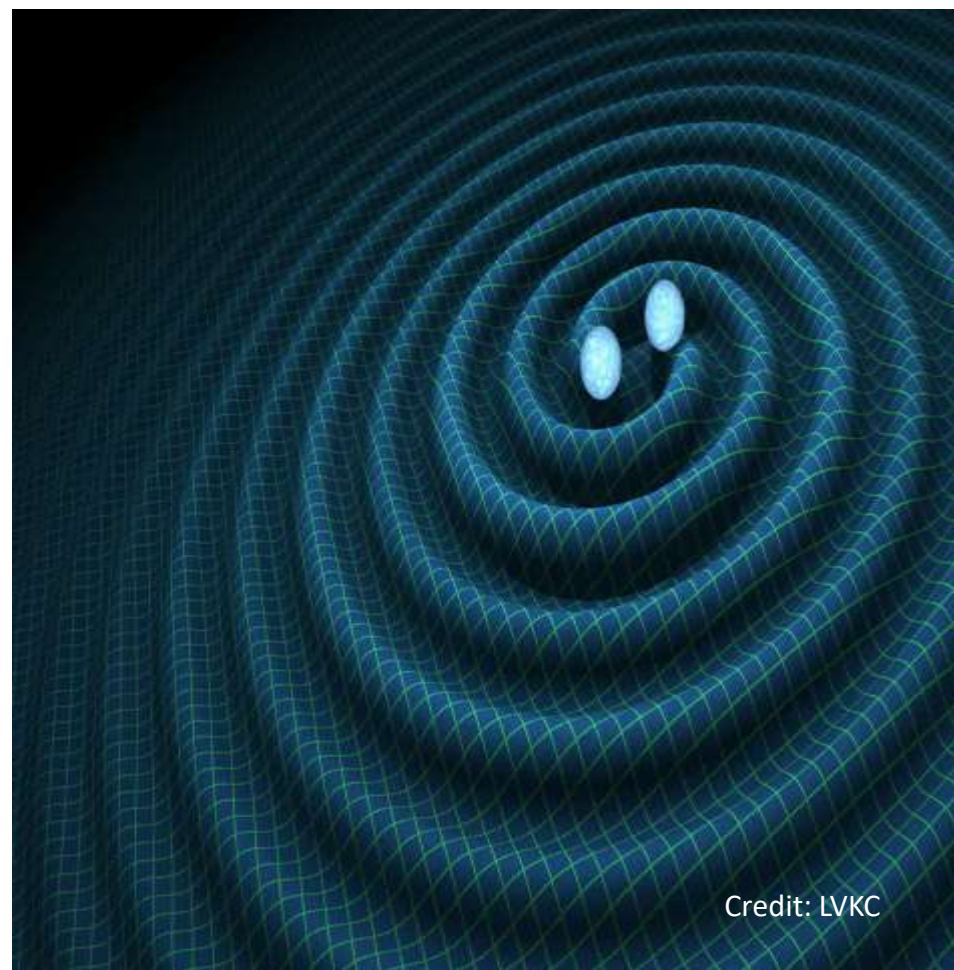
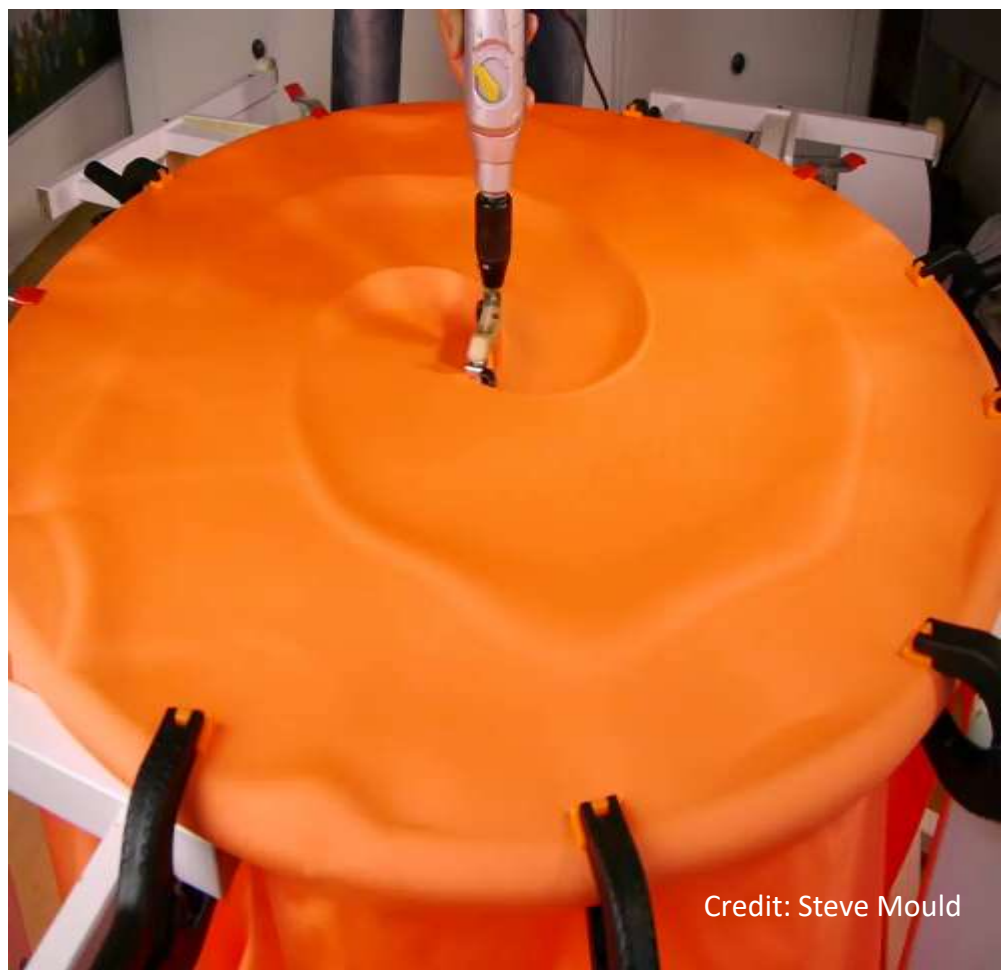
恒星演化

Observer



# 引力波——时空的涟漪

□ 广义相对论预言了引力波：当物质分布发生变化时（例如双星绕转），时空曲率也会随之改变，并且以类似波的形式以光速向外传播







# 引力波强度

□ 引力波的强度由四个长度量决定

$$h \sim \frac{r_1 \times r_2}{R \times D}$$

$r_1$ : 与第一个天体质量相同的黑洞半径

$R$ : 两个天体之间的距离

$r_2$ : 与第二个天体质量相同的黑洞半径

$D$ : 两个天体到地球的距离

对于  $m_1 = m_2 = 10M_{\odot}$  的双黑洞,  $r_1 = r_2 = 10^4 m$ , 假设它们之间的距离  $R = 10^5 m$ , 且距离地球的距离  $D = 100 Mpc \approx 10^{24} m$ , 则在地球测得它们产生的引力波的强度为

$$h \sim 10^{-21}$$

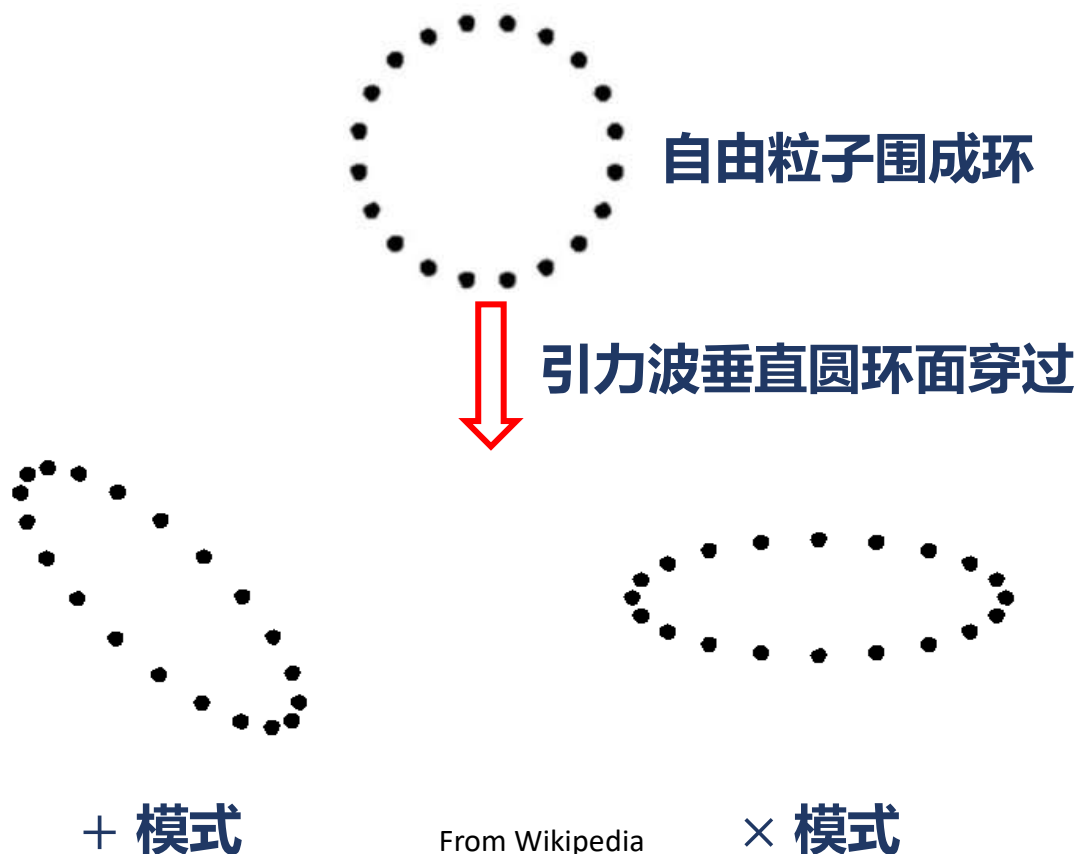
**引力波非常微弱!**





# 引力波的效应

## □ 引力波改变自由粒子间的距离



两自由粒子间的距离为 $L$ ，强度为 $h$ 的引力波经过后，它们间距离的改变量为

$$\Delta L \sim L \times h$$



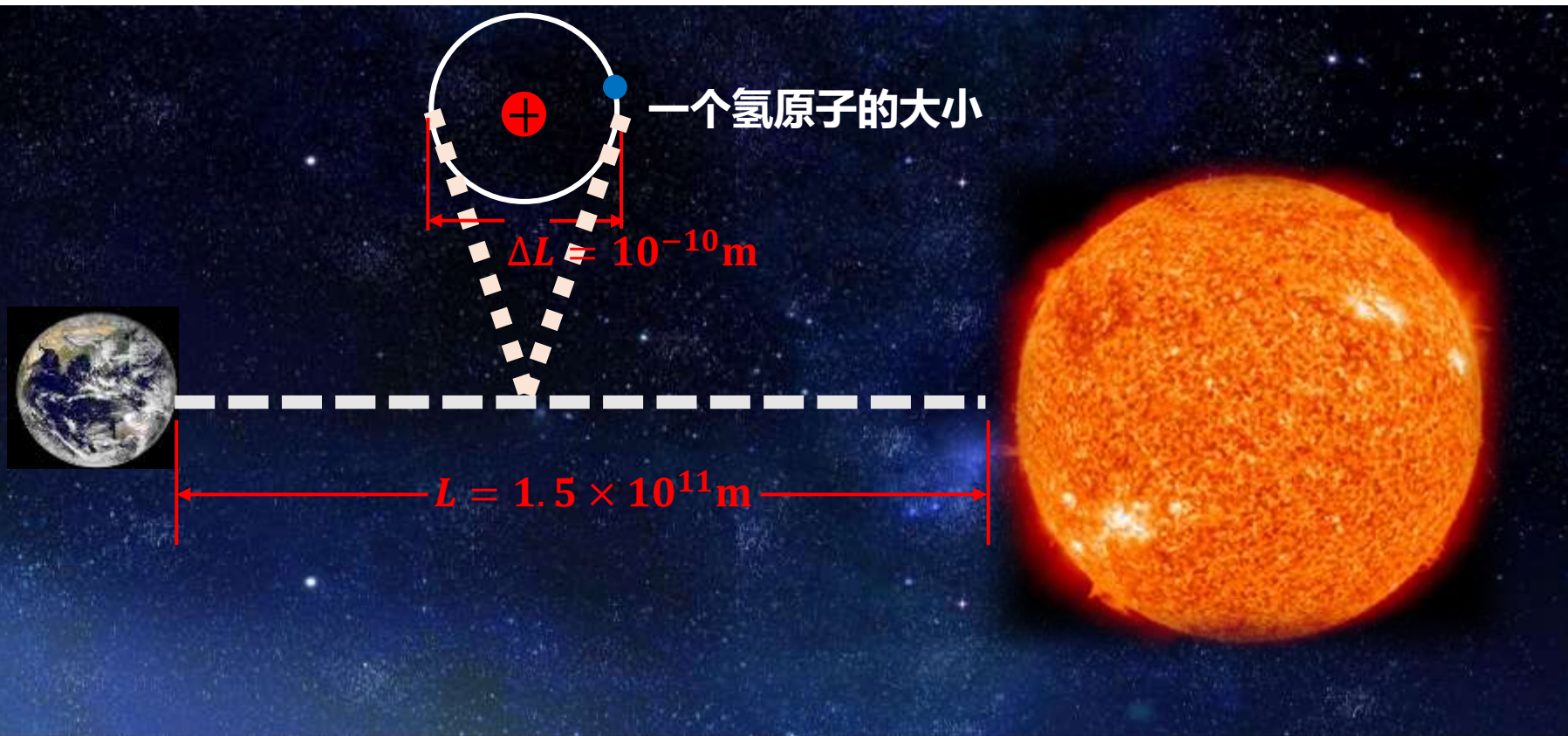




# 引力波的效应

□ 强度  $h = 10^{-21}$  的引力波引起日地距离  $L = 1.5 \times 10^{11} \text{m}$  的改变量为多少？

$$\Delta L \sim L \times h \sim 1.5 \times 10^{11} \times 10^{-21} \text{m} \sim 10^{-10} \text{m}$$



爱因斯坦曾说过在所有可以想象的场景中，引力波都太过微弱，因此不可能被人类探测

**探测引力波非常困难！**





# 引力波探测

□ LIGO: 通过激光干涉探测引力波



Credit: LVKC



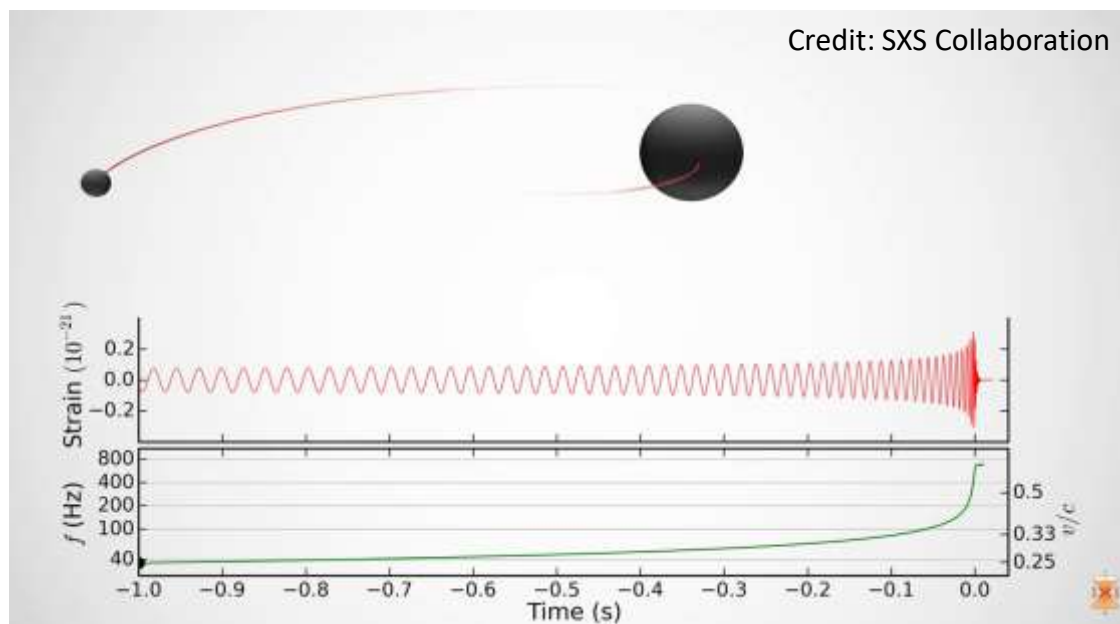
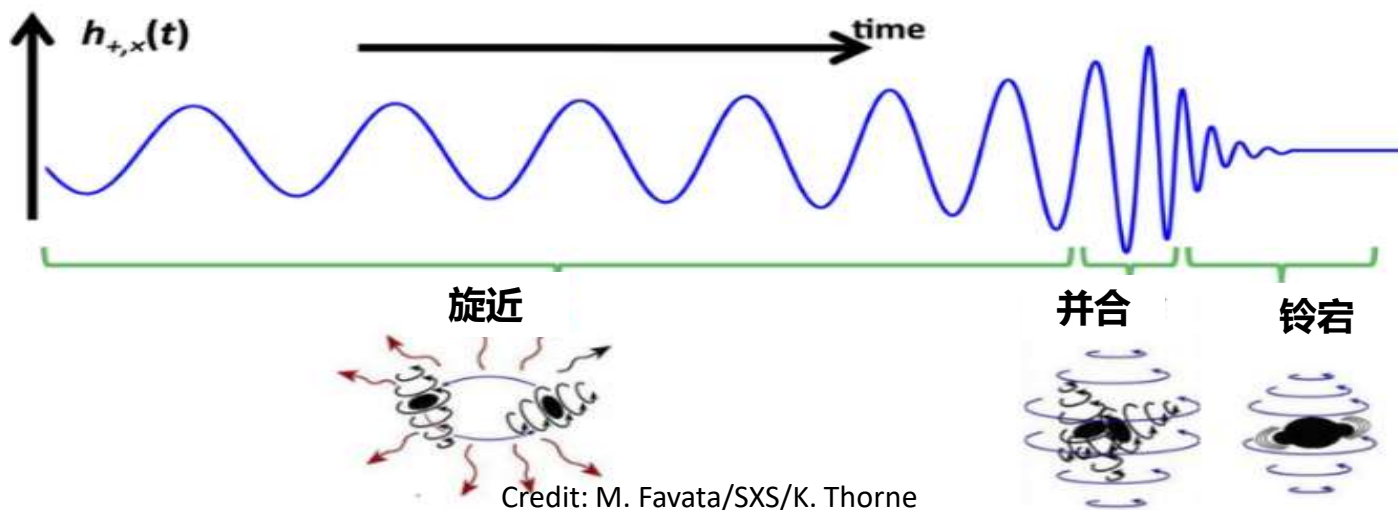
肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City





# 双黑洞的引力波

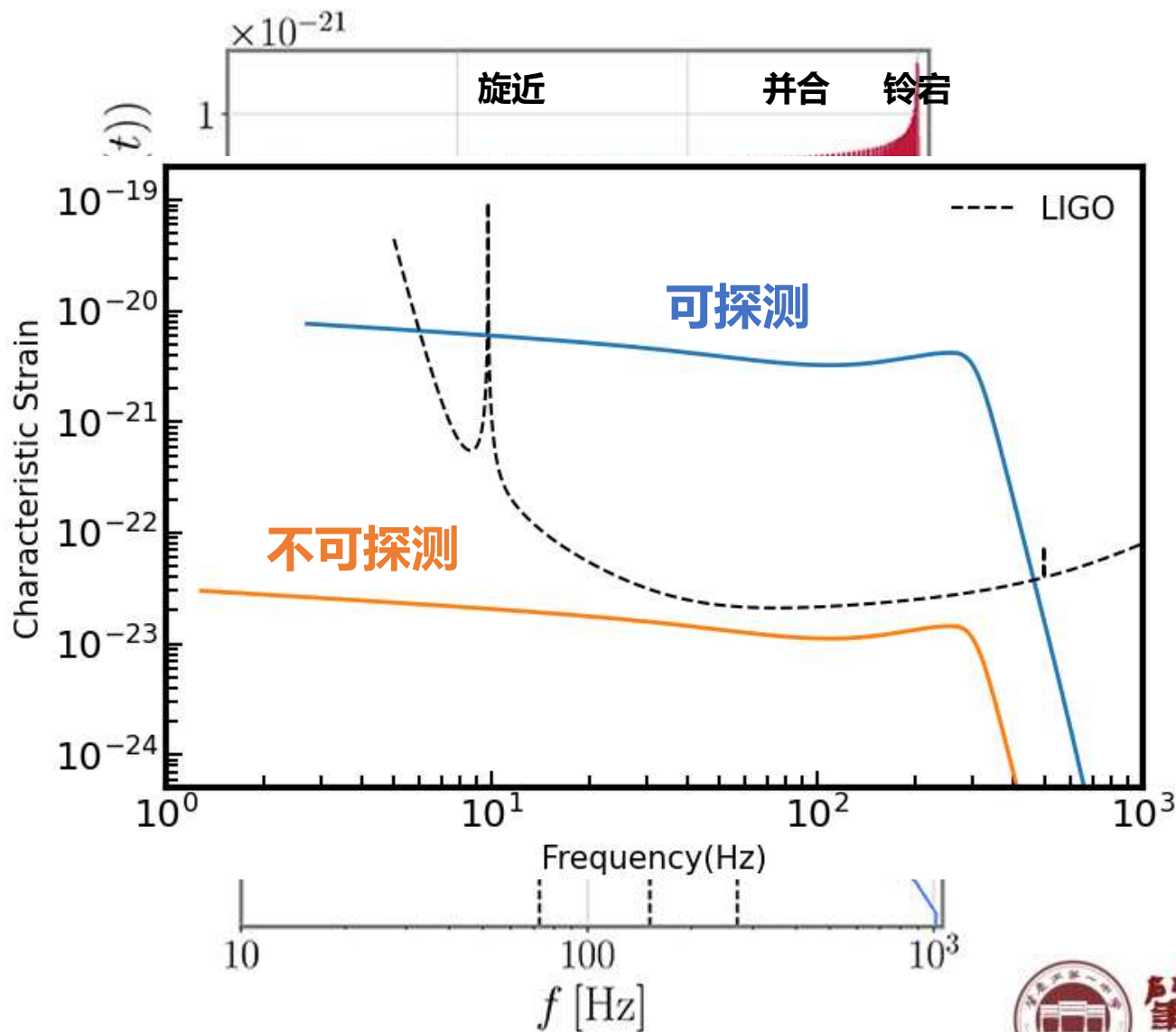
□ 双黑洞形成之后，在引力波辐射的作用下，依次经历**旋近**、**并合**与**铃宕**三个阶段





# 双黑洞的引力波

□ 为了方便分析数据，通过傅里叶变换将时域中的引力波波形变换到频域中

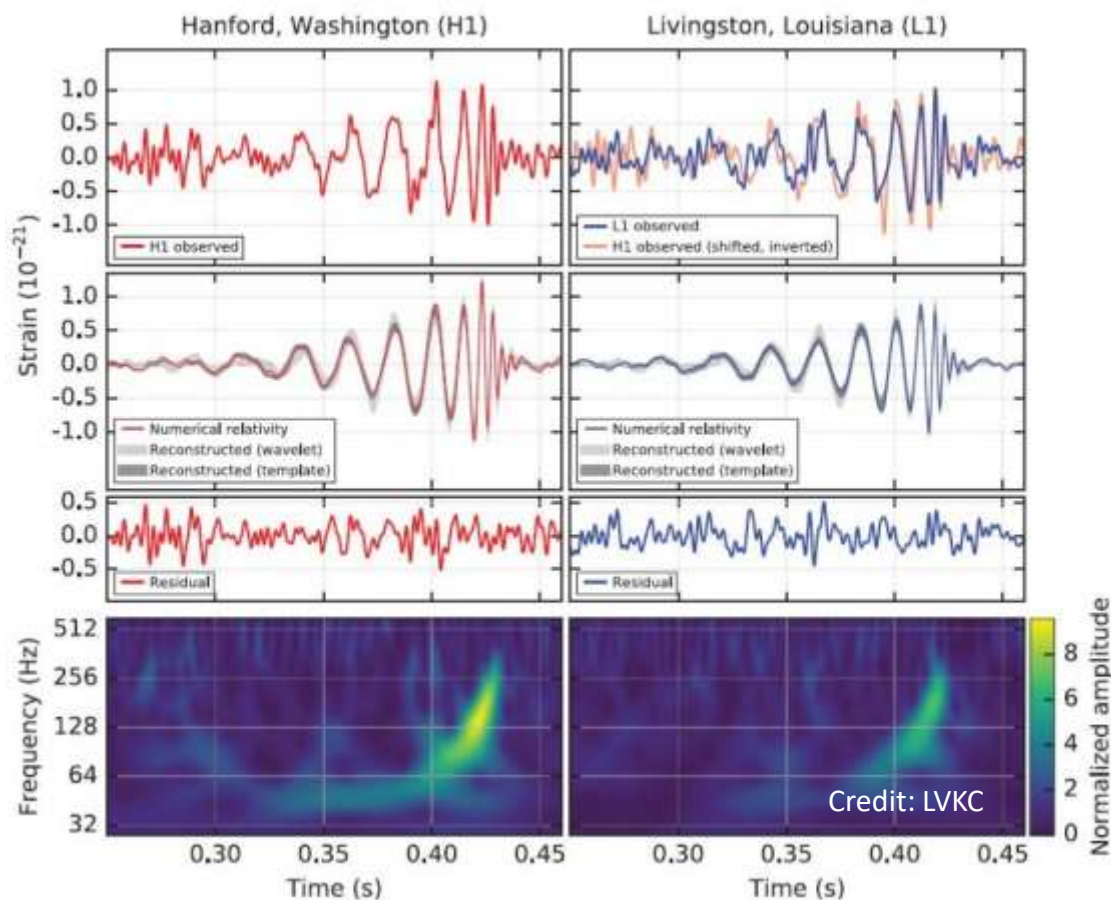






# 引力波探测

□ 2016年2月11日，LIGO/Virgo合作组官宣探测到由双黑洞GW150914 ( $36M_{\odot}$ ,  $29M_{\odot}$ ) 所产生的引力波



**2017年度诺贝尔物理学奖**授予  
**韦斯、巴里什和索恩**，以表彰  
他们“在LIGO探测器和引力波  
探测方面做出的决定性贡献”

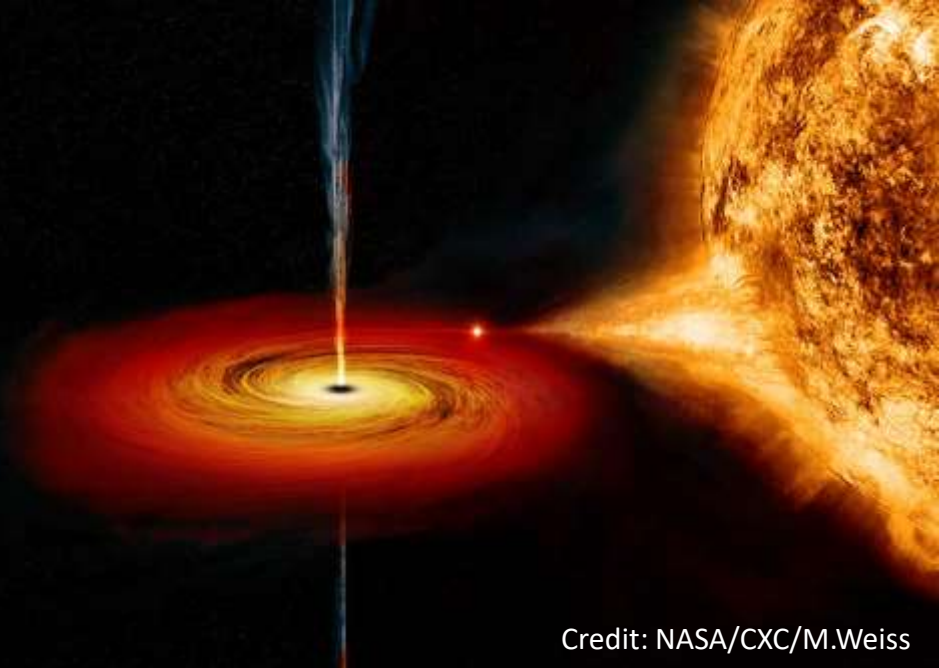
此时距离广义相对论预言引力波已有大约100年！





# 引力波探

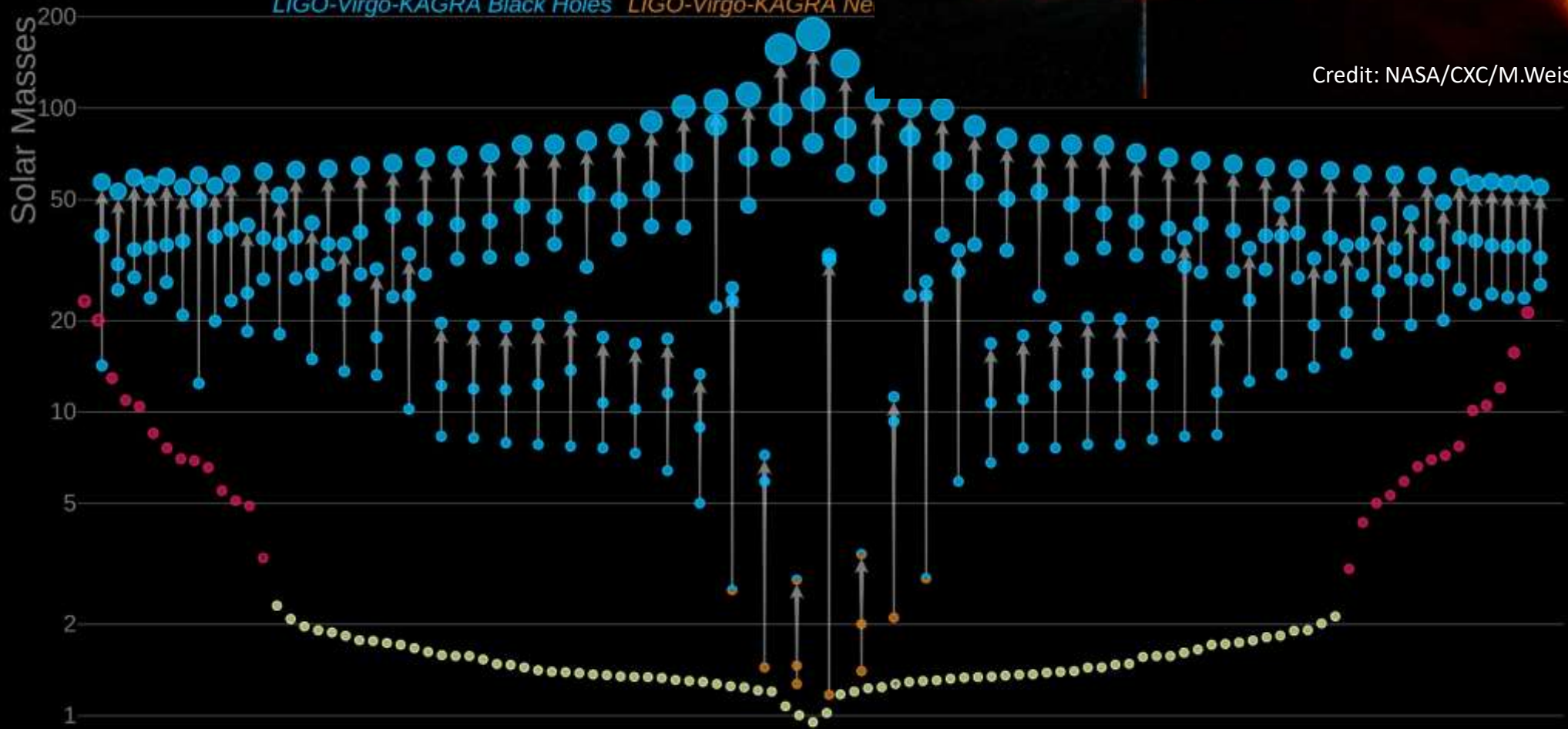
□ 目前LIGO/Virgo公布了接近100例引力波事



Credit: NASA/CXC/M.Weiss

## Masses in the Ste

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Ne








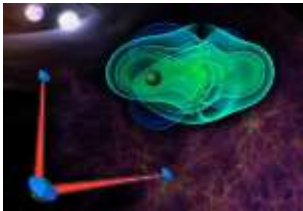
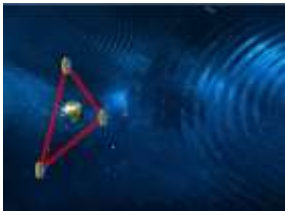
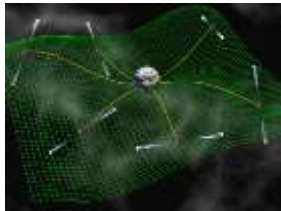
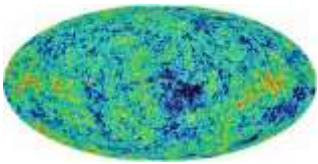
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern





# 引力波探测

## □ 不同频段上的引力波波源及探测方式

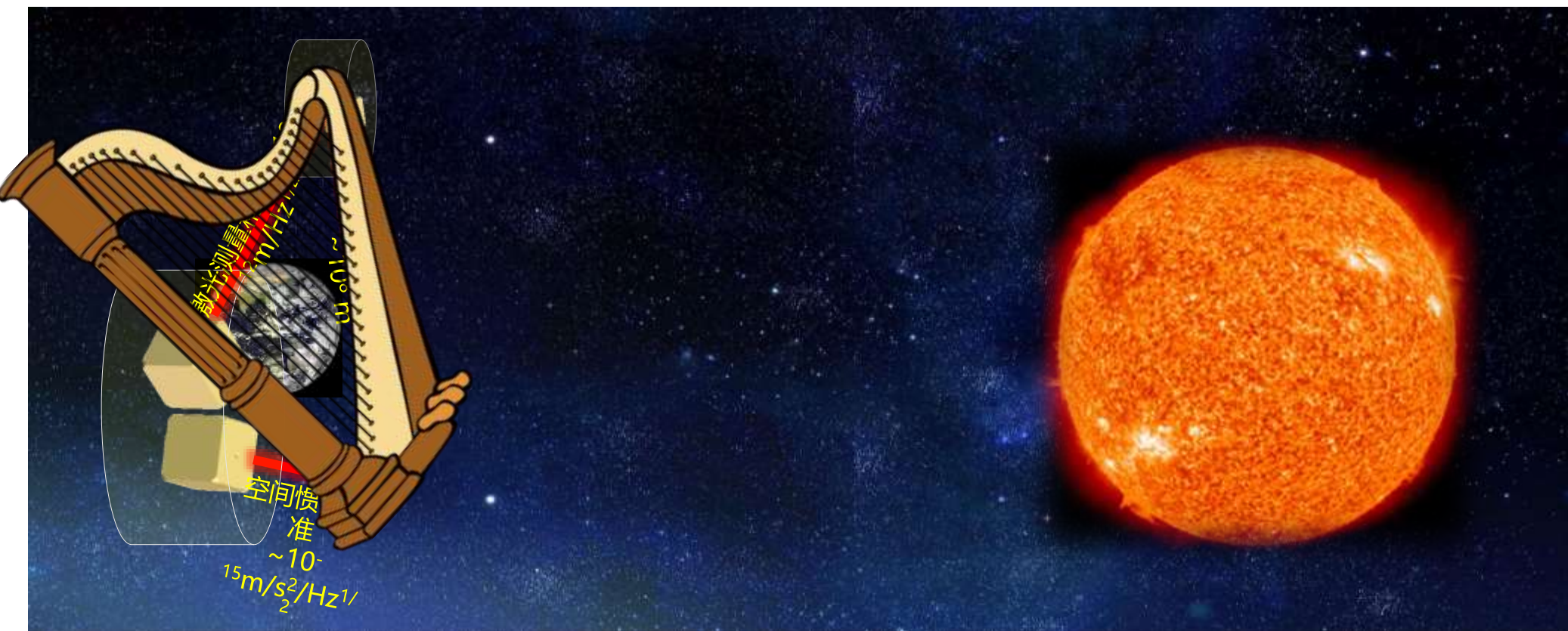
波源	恒星质量 双黑洞系统	大质量 双黑洞系统		超大质量 双黑洞系统	宇宙暴涨的 原初引力波
波源 质量	$10^1 M_{\odot}$ 	$10^6 M_{\odot}$ 		$10^9 M_{\odot}$ 	
波长 频段	千公里	千万公里	百亿公里	光年	
	$10^3 \text{ Hz}$	$1 \text{ Hz}$	$10^{-3} \text{ Hz}$	$10^{-6} \text{ Hz}$	$10^{-9} \text{ Hz}$ $10^{-16} \text{ Hz}$
探测 方式	地面 激光干涉仪	空间激光干涉仪		脉冲星计时 阵列	宇宙微波 背景辐射
		 			
现有 计划	LIGO, Virgo, GEO600, KAGRA	eLISA/LISA, 天琴, 太极		NANOGrav, PPTA, EPTA, FAST	BICEP2, 阿里 Planck





# 天琴 (TianQin)

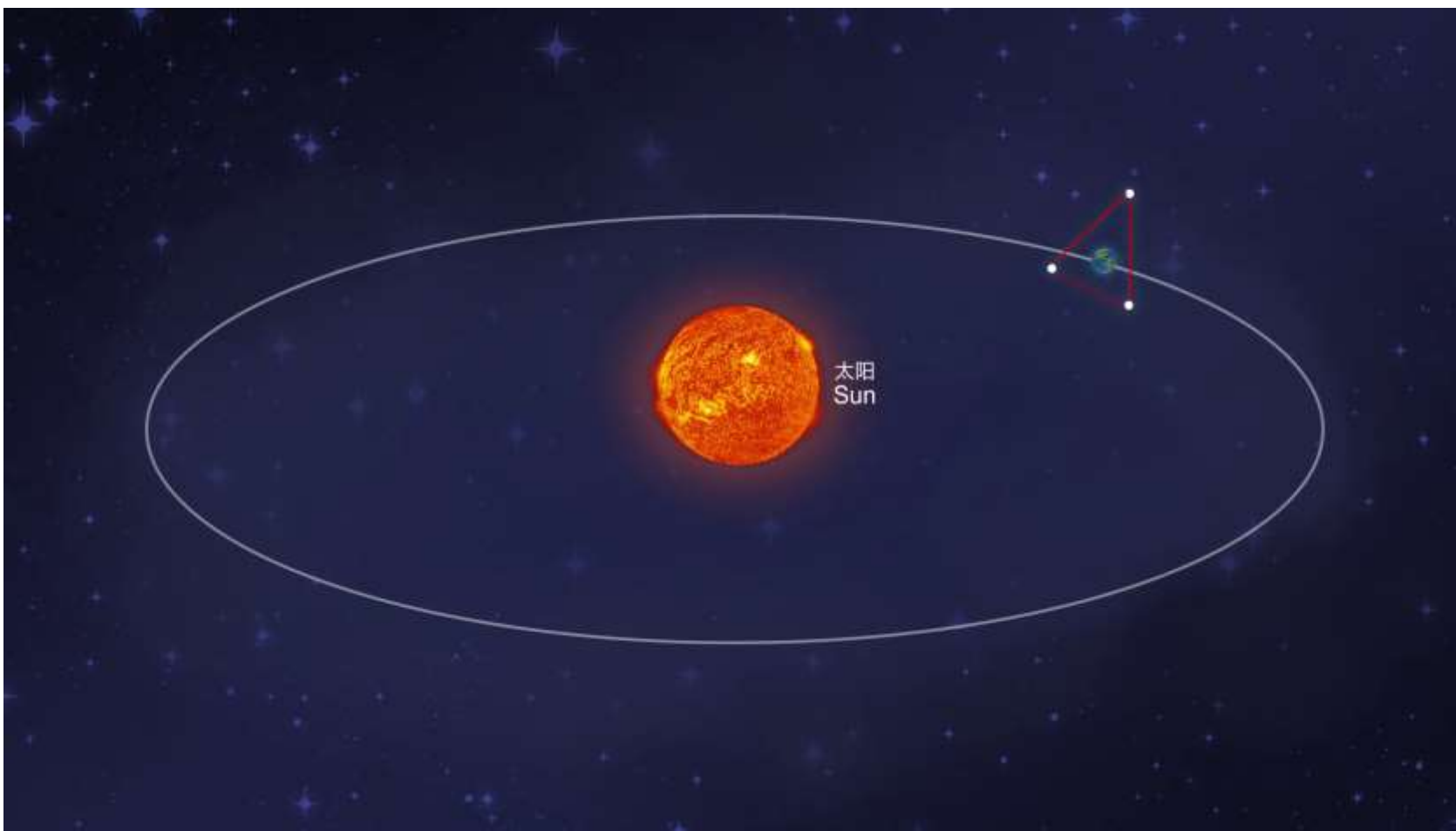
□ 天琴计划是中山大学牵头的国内空间引力波探测计划，其探测器由环绕地球的三颗卫星构成，通过卫星之间的激光干涉探测引力波。预计**2035年**左右发射并运行





# 天琴 (TianQin)

□ 天琴在绕地球运动的同时也随地球绕太阳旋转

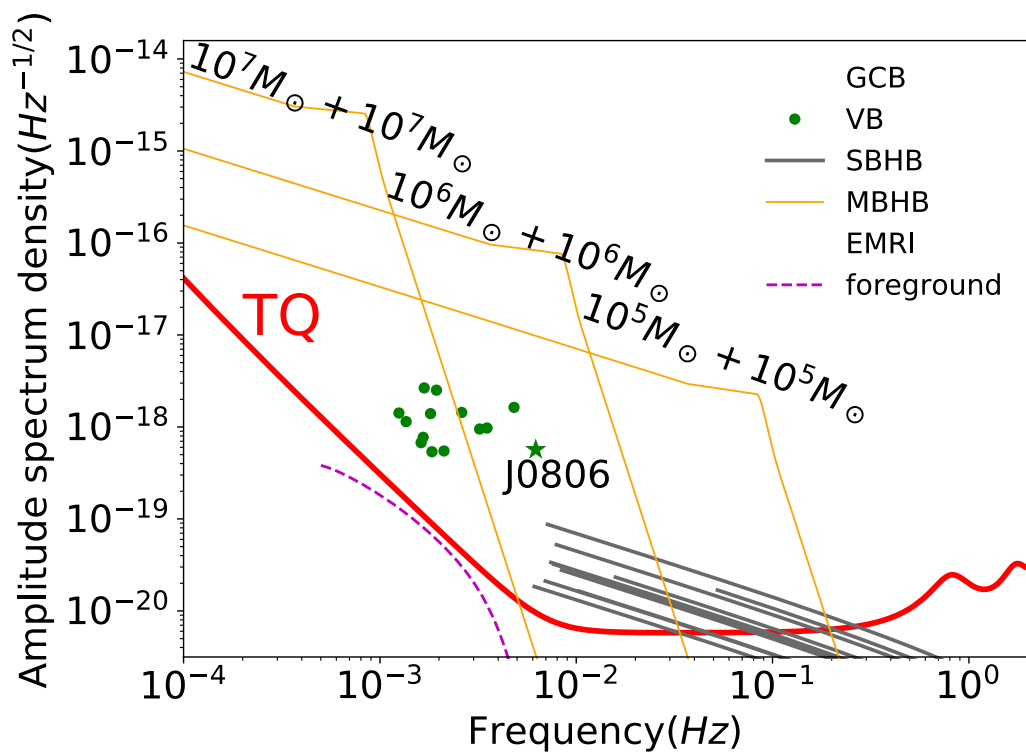






# 天琴

## □ 天琴能做什么？



Mei et al. PTEP, 2021, 05A107

### 天琴科学目标

#### 天文学

银河系内致密双星

大质量双黑洞并合

EMRI

恒星级双黑洞

天文学起源随机引力波

#### 宇宙学

宇宙膨胀

宇宙学起源随机引力波

#### 基础物理

检验引力本质

检验黑洞本质

新物理

其它潜在引力波源





# 天文学对我们重要吗？

□ 研究天文学的理由（该部分的图片均来自网络）

● 帮助我们解决重大问题：了解我们在宇宙中的位置，更好地理解自己的存在



● 改善我们的日常生活：像地球这样美丽的星球并不常见，必须保护它



Credit: NASA

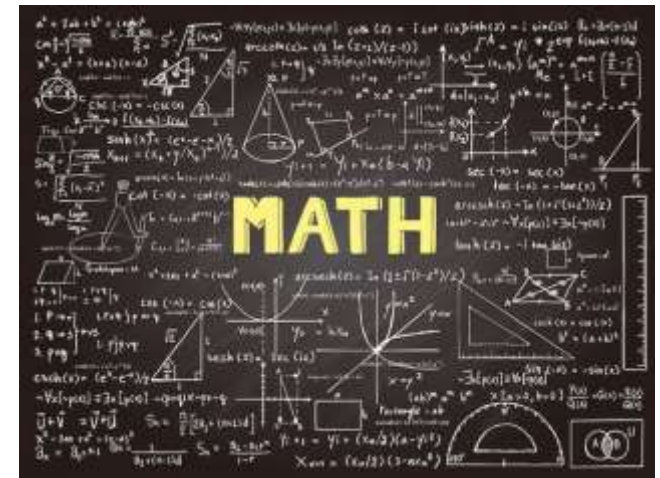
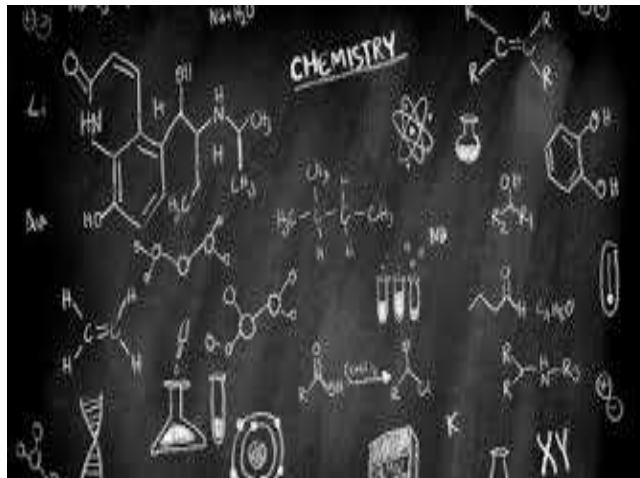
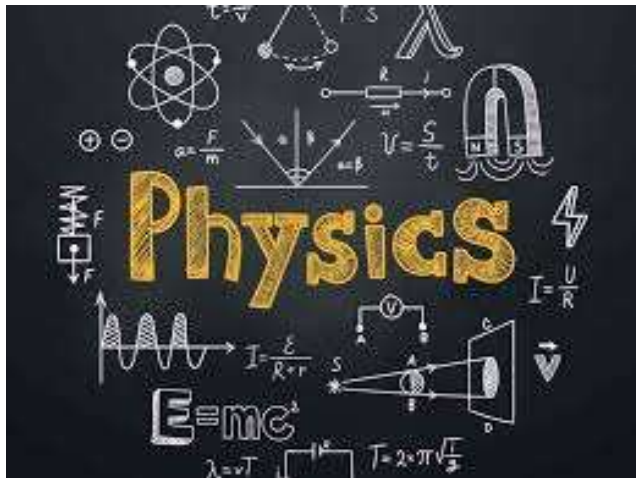


肇慶市第一中學  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City



# 天文学对我们重要吗？

- 是通往其它学科的门户：获得对物理、化学和数学等学科的基本了解



- 是灵感的源泉：天空和星星激发了艺术、音乐和宗教的灵感







# 天文学对我们重要吗？

□ 银河系与仙女星系将在大约30亿年后相撞



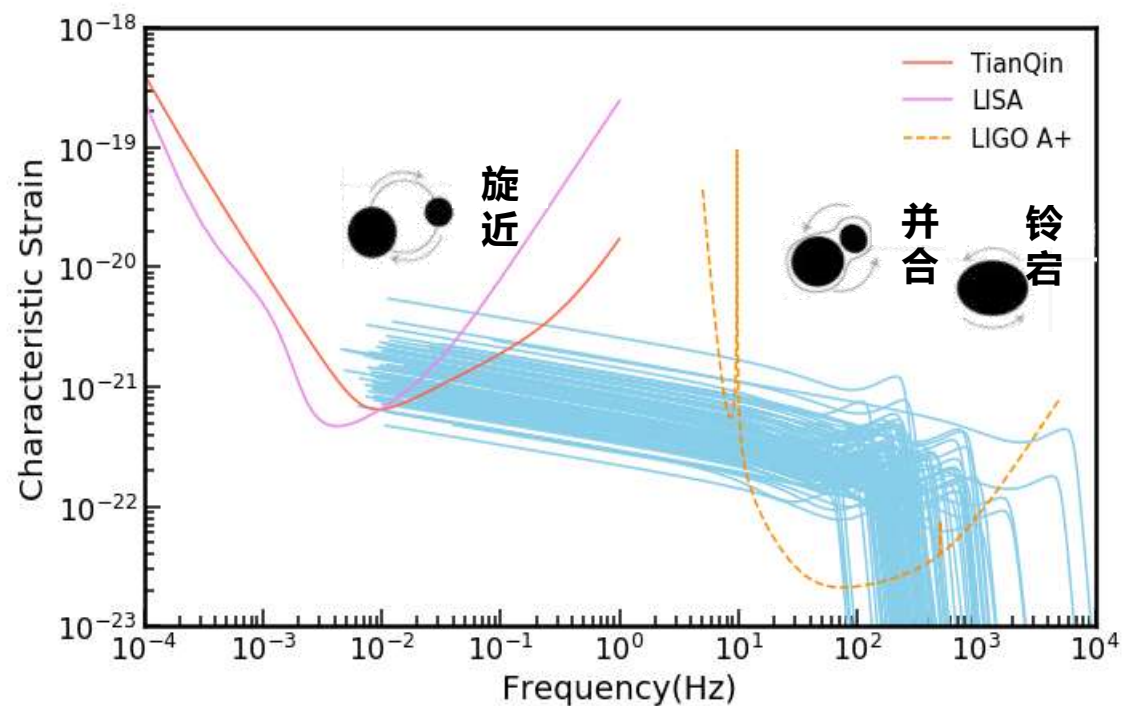
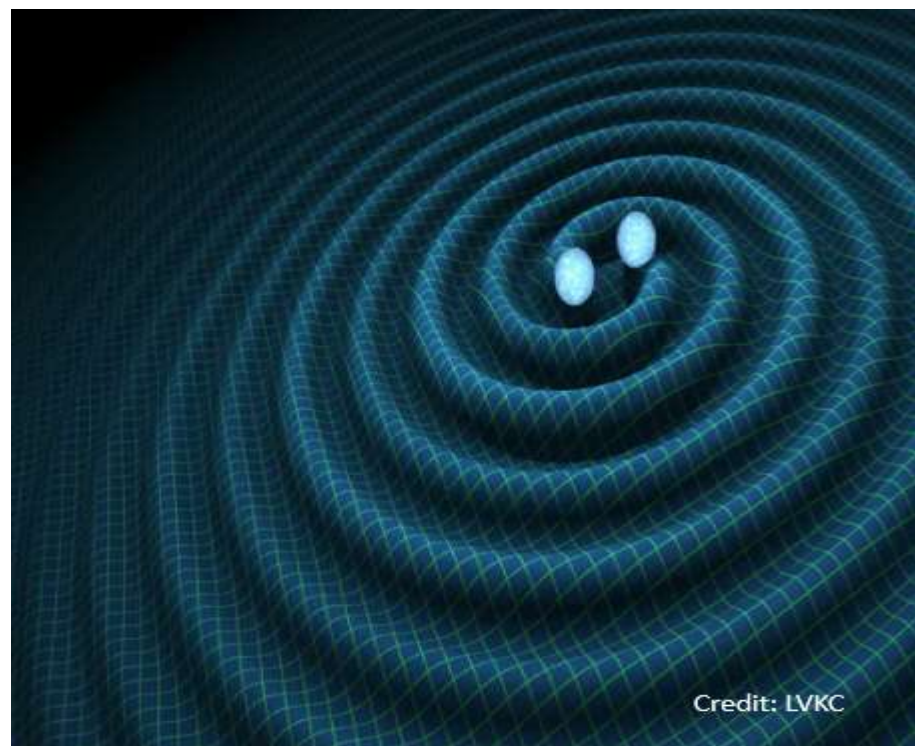


# 想象与现实中的研究生生活





# 想象与现实中的研究生生活







# 想象与现实中的研究

Handwritten mathematical notes on a blackboard, featuring various physics formulas such as  $E=mc^2$ ,  $\nabla^2\psi + V\psi = E\psi$ ,  $\vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ , and  $\vec{E} = -\nabla\phi$ .

读研需要找到真正的动机，不要盲目跟风

Handwritten mathematical notes on a whiteboard, featuring quantum mechanics formulas such as  $\psi(x,t) = e^{-i\omega t} \psi(x)$ ,  $E_n = (\frac{1}{2} + n)\omega$ , and  $[a, a^\dagger] = 1$ .

```
class WaveForm:
    """Calculate the gravitational wave (GW) waveform in time and frequency domain.

    Attributes:
        m1 : the mass of heavier object, the unit is second
        m2 : the mass of lighter object, the unit is second
        zz : the redshift of a binary
        const : some constants
        dis : some distances, the unit is second
        mass : the quantities on mass, the unit is second or 1
        freq : the quantities on frequency, the unit is Hzenergy_dot
        energy_dot: the rate of change of energy of GW with respect to time, the unit is 1

    Returns:
        Some GW waveforms
    """

    def __init__(self, m1, m2, zz):
        """Init the parameters."""
        self.m1 = m1
        self.m2 = m2
        self.zz = zz
        self.const = Constant()
        self.dis = Distance(zz)
        self.mass = Mass(m1, m2)
        self.freq = Frequency(m1, m2)
        self.amp = Amplitude(m1, m2, zz)
        self.phase = Phase(m1, m2)
        self.time = Time(m1, m2)
        self.energy_dot = EnergyDot(m1, m2)
        self.func = Function()

    def waveform_incl_e_3pn_tq(self, tc, incl, freq_e0, e0):
        """
        ff, amp_plus_0pn, amp_cross_0pn = self.amp.amp_incl_0pn_tq(tc, incl)
        psi3pn = self.phase.psi_3pn_tq(tc)
        phie = self.phase.phi_e_tq(tc, freq_e0, e0)
        hp = amp_plus_0pn * np.exp(1j * psi3pn + 1j * phie)
        hc = amp_cross_0pn * np.exp(1j * psi3pn + 1j * phie)
        return ff, hp, hc
```



**祝大家学有所成!!!**

**Thanks for your attention!**



**肇慶市第一中學**  
NO.1 Middle School Of Zhaoqing City