

# 第二届GECAM研讨会

## WFST和MASTA

——时域天文天地一体化多波段观测网络中的地基大视场光学望远镜支撑系统

**吴雪峰**

**紫金山天文台**

2020年10月31-11月1日，北京

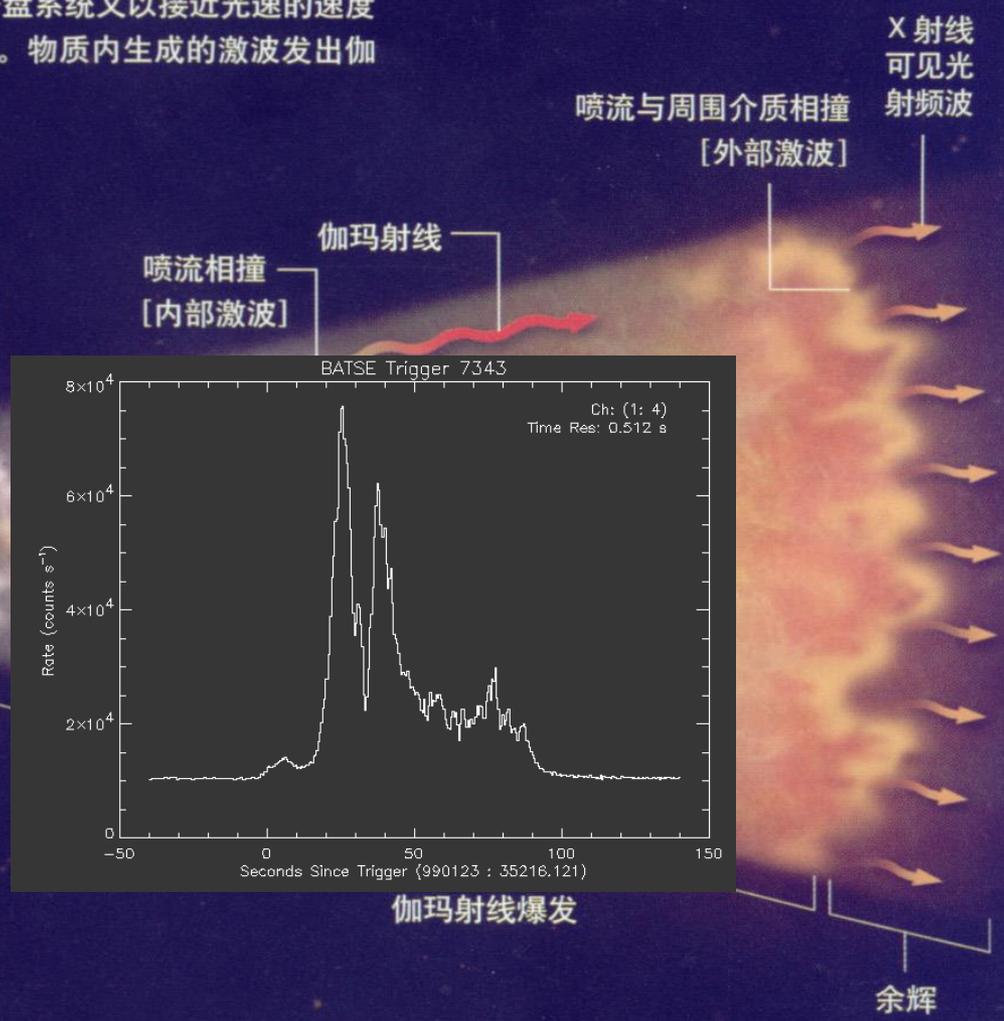
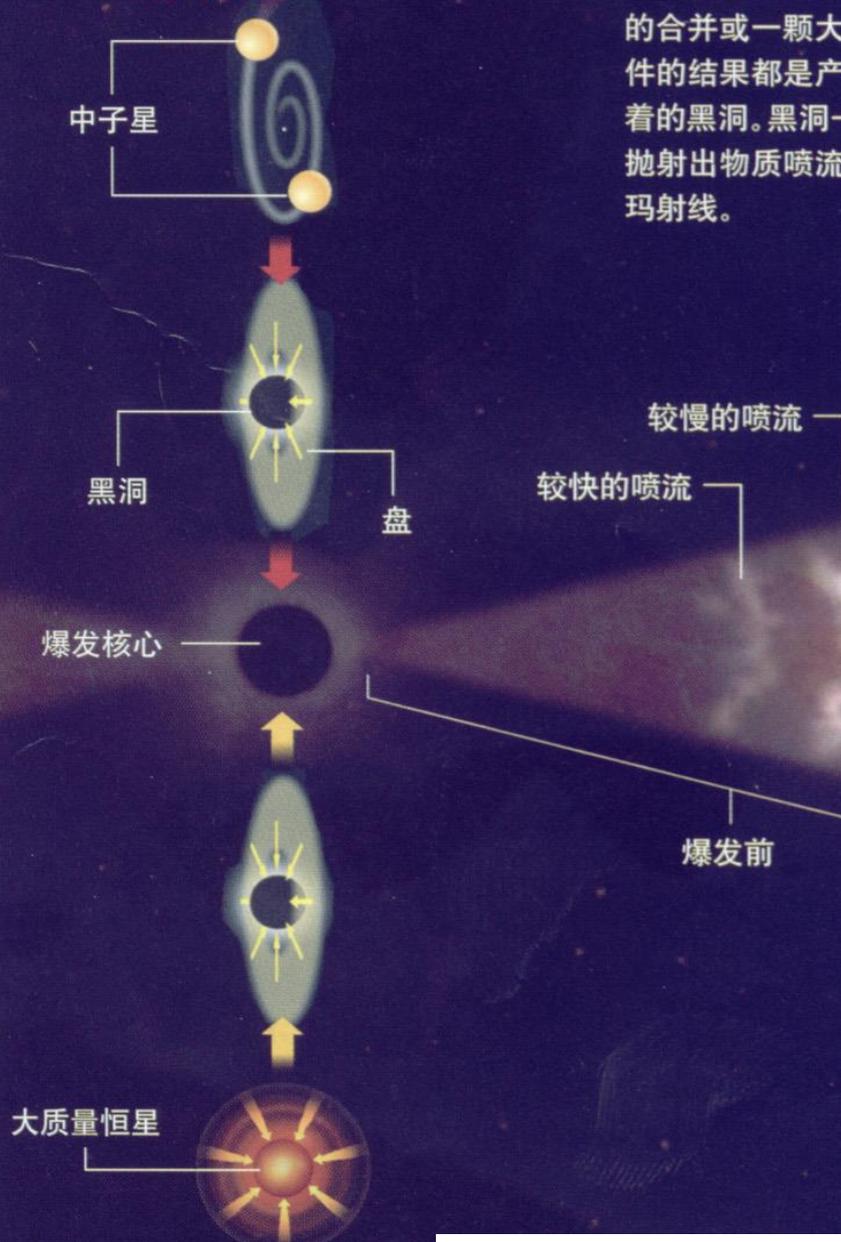
# Outline

1. 伽玛射线暴 (GRB)
2. 引力波电磁对应体 (GW)
3. 快速射电暴 (FRB)
4. WFST
5. MASTA

# 1. 伽玛射线暴 (GRB)

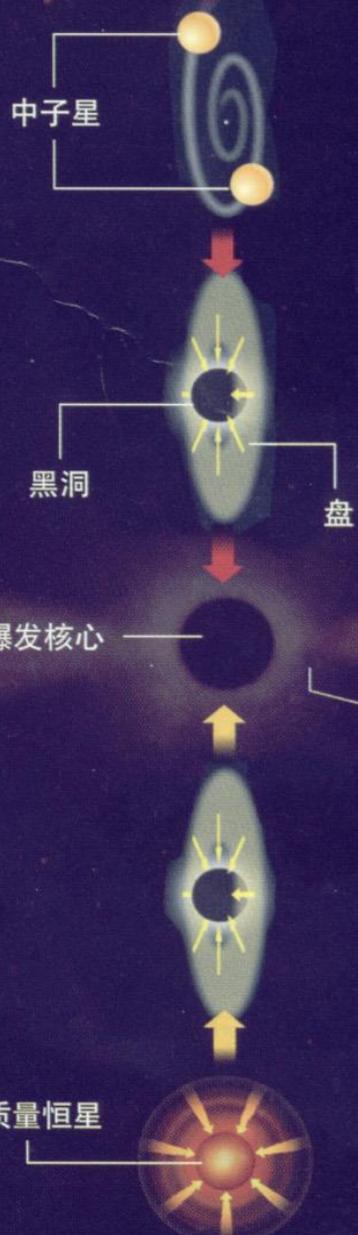
# 合并假说

伽玛射线暴的形成可能始于两颗中子星的合并或一颗大质量恒星的坍缩。这两类事件的结果都是产生一个其周围有物质盘包绕着的黑洞。黑洞-盘系统又以接近光速的速度抛射出物质喷流。物质内生成的激波发出伽玛射线。



# 合并假说

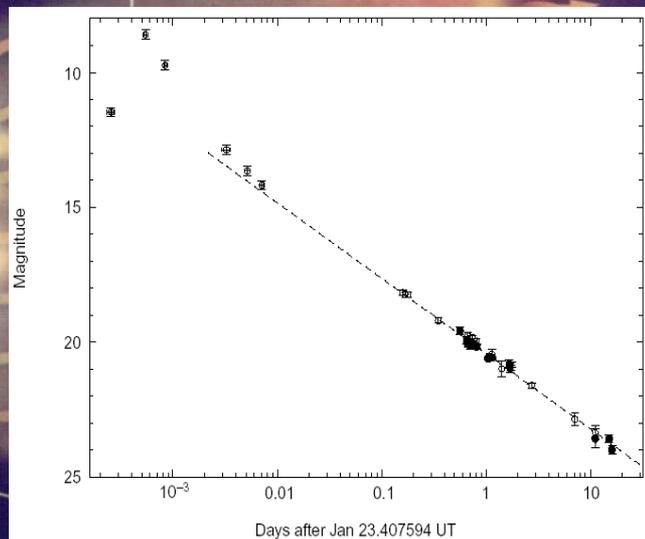
伽玛射线暴的形成可能始于两颗中子星的合并或一颗大质量恒星的坍缩。这两类事件的结果都是产生一个其周围有物质盘包绕着的黑洞。黑洞-盘系统又以接近光速的速度抛射出物质喷流。物质内生成的激波发出伽玛射线。



较慢的喷流  
较快的喷流

伽玛射线  
喷流相撞 [内部激波]

X 射线  
可见光  
射频频波  
喷流与周围介质相撞 [外部激波]



伽玛射线爆发

余辉

# 伽玛暴领域有待进一步研究和解决的重要科学问题

□ **能源和中心引擎：**中心引擎是黑洞还是超强磁场毫秒脉冲星（转动的中子星或夸克星）？如何提取能量？喷流的成分？暴本身及余辉各种辐射成分的物理起源？等等

——主暴和极早期余辉阶段的多波段密集观测最缺乏也最关键！

□ **相关前沿物理：**不同种类中心引擎的引力波辐射有什么性质？引力波暴、中微子暴与电磁波信号之间有什么关联？伽玛暴能否产生极高能宇宙线？能否用多信使观测对光速不变原理给出高精度的检验？中子星状态方程？等等

□ **伽玛暴宇宙学：**用伽玛暴如何限制宇宙学参数和暗能量状态方程演化性质？如何限制高红移恒星形成率、宿主星系性质及宇宙再电离过程？等等

引自戴子高教授2018年报告

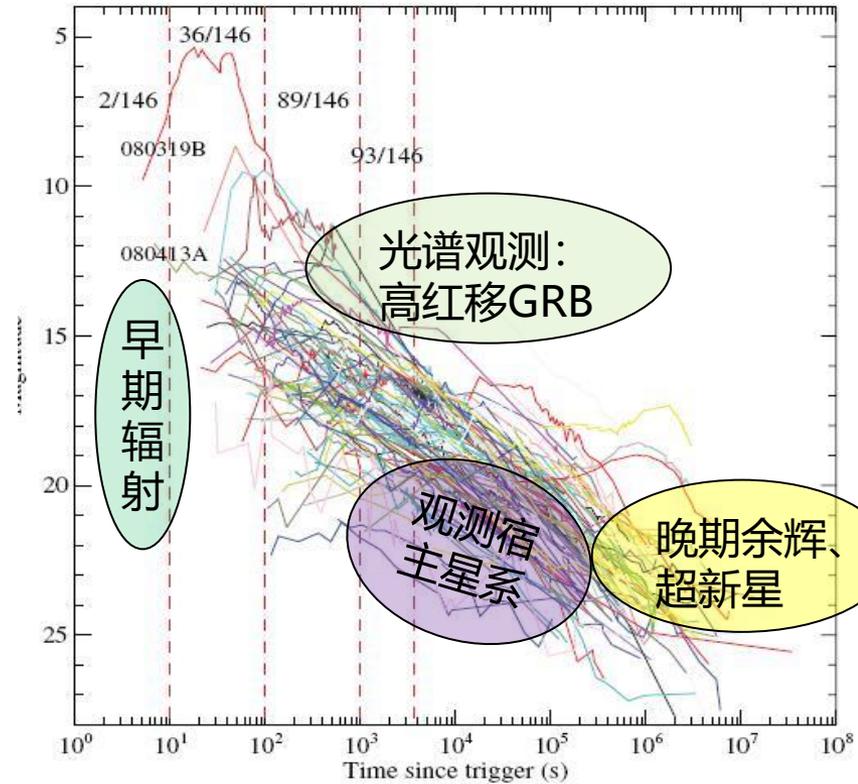
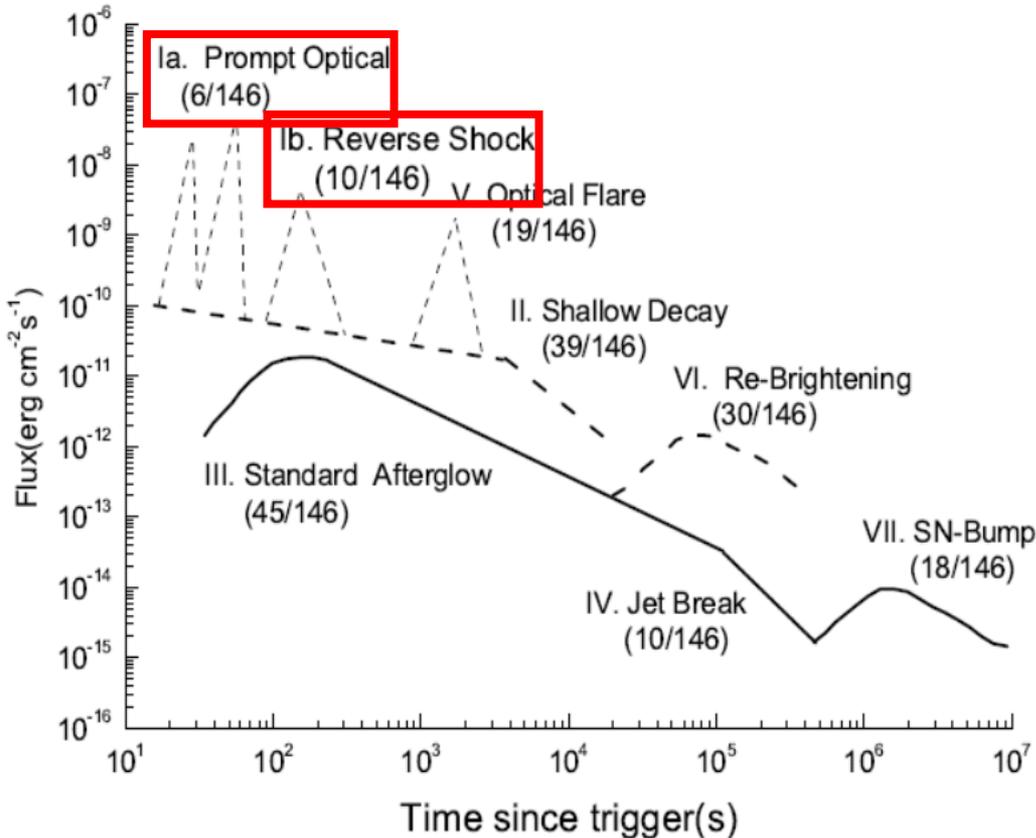
# 伽玛暴光学余辉光变曲线

SWIFT卫星自2004年底至2012年共探测到~730个GRB

~ 90%有X射线余辉

但光学观测数据采集较好的余辉样本仅146个

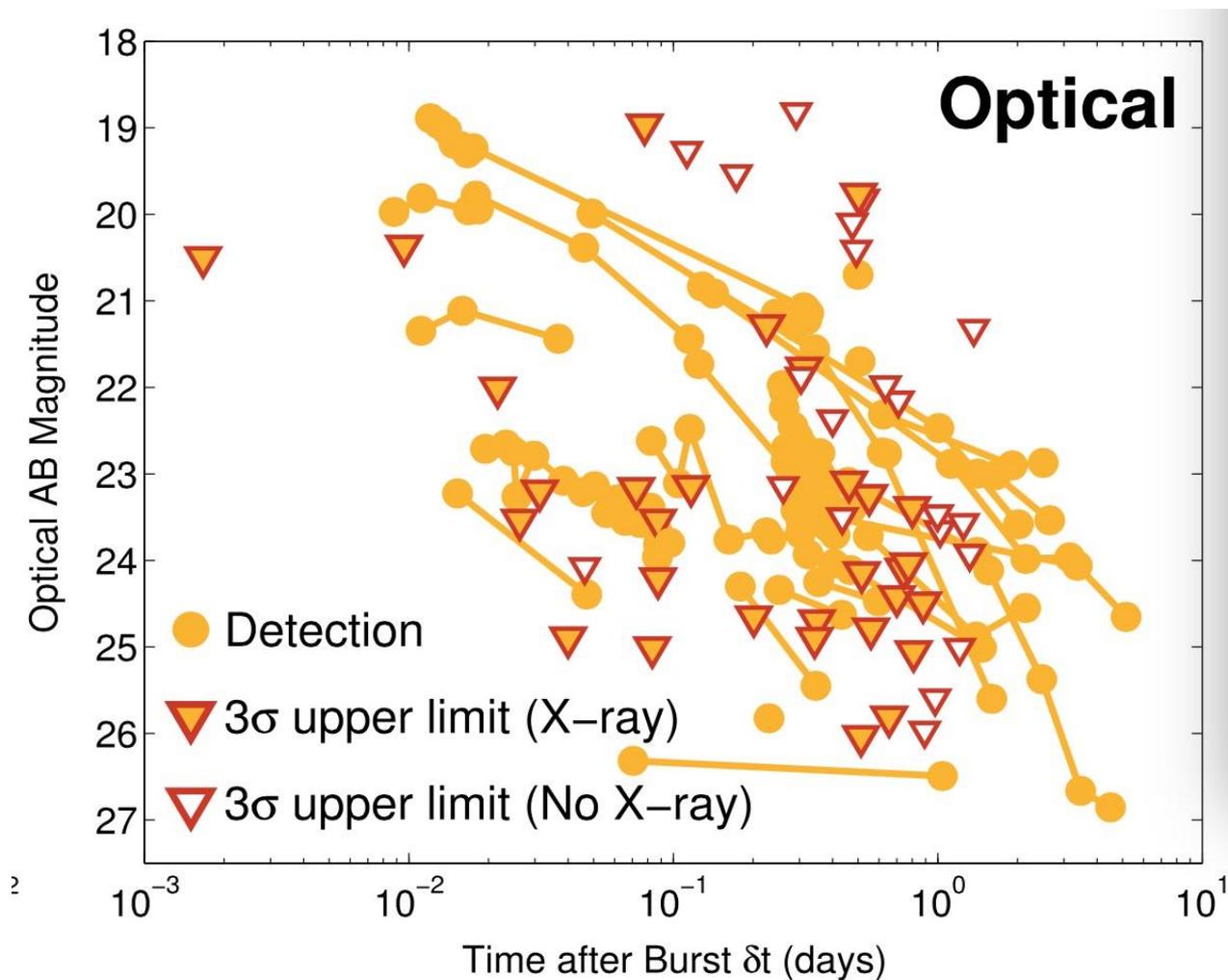
该比例到目前没有很大改变



李亮、梁恩维等, 2012, ApJ

王祥高、梁恩维等, 2013, ApJS

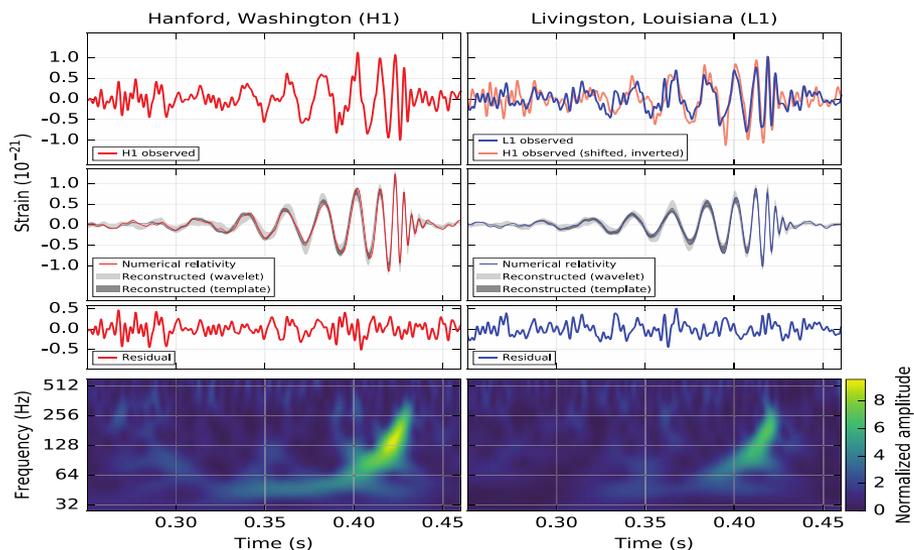
# 短伽玛暴光学余辉光变曲线



## 2. 引力波电磁对应体 (GW)

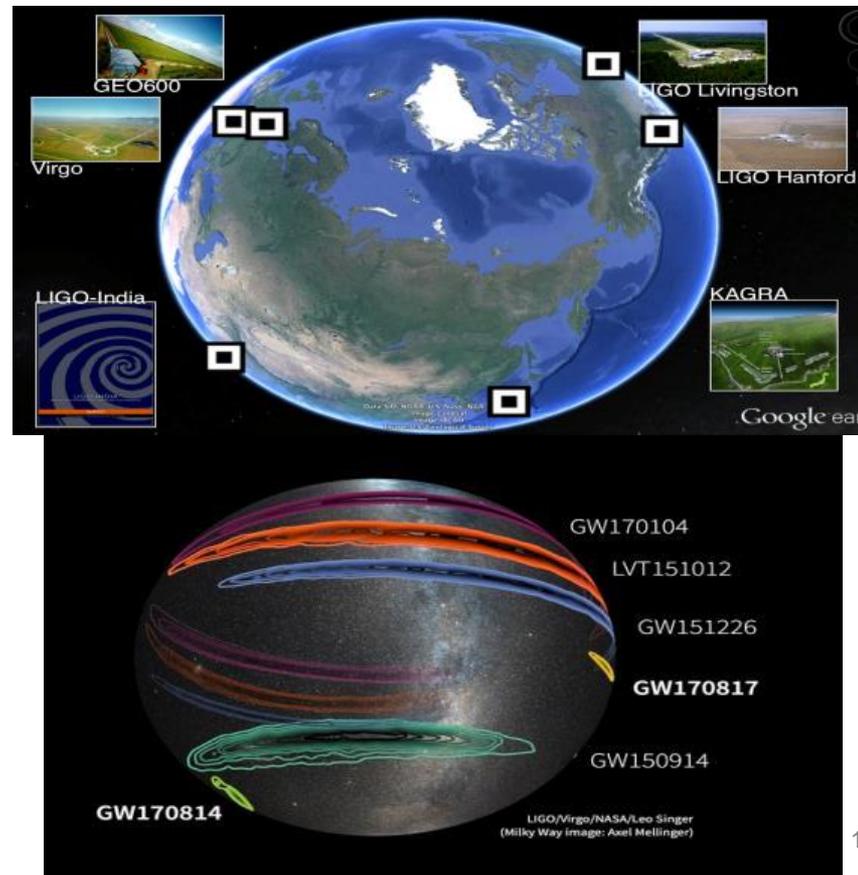
# GW150914: 引力波探测窗口被开启

## GW150914



Abbott et al. 2016, PRL, 116, 061102

**01:2015/09-2016/01 3**  
**02:2016/12-2017/08 7+1**  
**03:2019/04-2020/03 56**  
引力波探测进入**常态**阶段



# GW170817: 引力波天文学时代到来!

## GW170817及其多波段电磁对应体发现

### GW170817

双中子星合并  
LIGO/Virgo引力波事件，并有超过70个天文台联合观测到其电磁对应体



距离  
1.3亿光年

发现日期  
2017年8月17日

类型  
双中子星合并

20:41:04 北京时间

由双中子星合并产生的引力波信号被观测到

引力波信号  
双中子星相互绕转到最终并合，中子星的质量大致与太阳相当，尺寸相当于一座城市。

+2 秒  
观测到伽玛暴。

GW170817 使人类得以首次利用引力波来直接测量宇宙膨胀速率。

观测双中子星合并产生的引力波帮助我们更好地了解这些奇特天体的结构。

本次多信使联合观测证实双中子星合并可以产生短伽玛暴。

Au  
千新星的观测使我们认识到宇宙中大部分重元素，例如金元素，起源于双中子星合并。

同时观测天体物理事件产生的引力波和电磁波可以提供引力波速度等于光速的可信证据。

+10 小时 52 分钟  
观测到明亮的可见光源，该光源位于长蛇座中的NGC 4993星系。

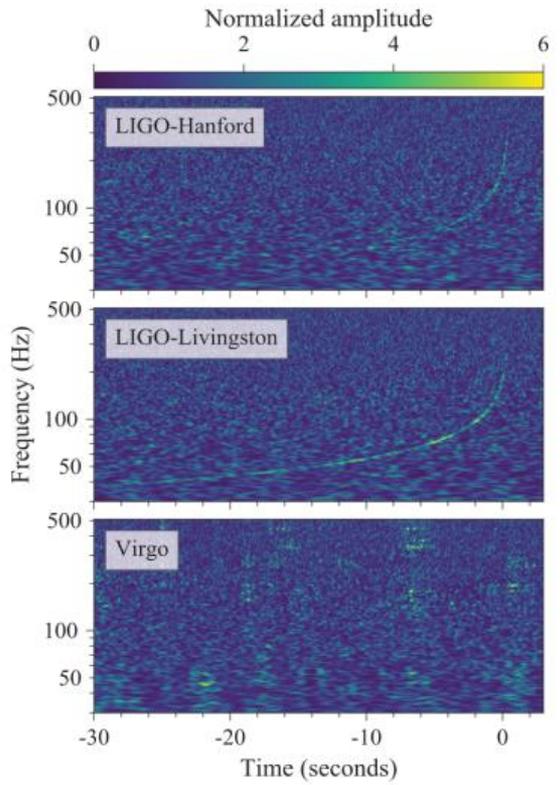
+11 小时 36 分钟  
观测到红外辐射。

+15 小时  
观测到明亮的紫外辐射。

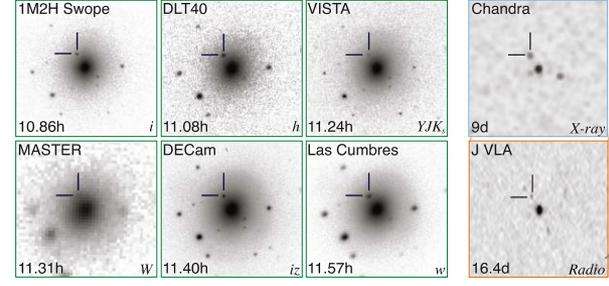
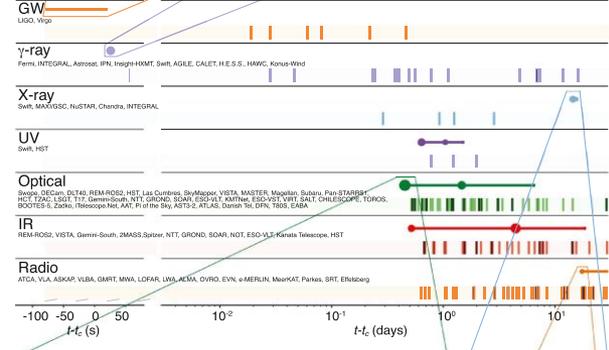
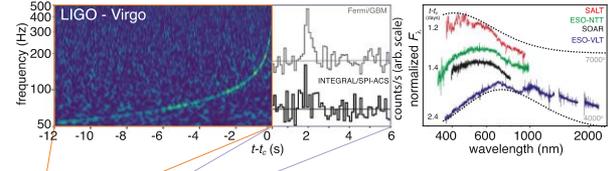
+9 天  
观测到x射线。

射电遗迹  
磁体物质从并合物中向外移动，激波会在恒星之间的稀薄物质——星际介质中产生，此过程会产生长达数年的辐射。

+16 天  
观测到射电信号。



Abbott et al. 2017, PRL



# 引力波观测总结

➤ **O1: 2015/09-2016/01 3 (双黑洞)**

➤ **O2: 2016/11-2017/08 7 (双黑洞) +1 (双中子星)**

➤ **O3: 2019/04-2020/03 56例事件**

**37例 双黑洞: 89% — >99%**

**GW190521:  $\sim 85 M_{\odot} + \sim 66 M_{\odot}$  合并形成  $\sim 142 M_{\odot}$ , 最大恒星级质量**

**GW190412:  $\sim 30 M_{\odot} + \sim 8 M_{\odot}$  合并, 高质量比**

**5+2例 双中子星: S190425z (>99%): 并合后质量 $\sim 3.4 M_{\odot}$ , 无电磁对应体**  
**S190901ap (86%), S190910h (61%), S191213g (77%)**  
**S200213t (63%), S190426c (49%), S190510g (42%)**

**4例 质量间隙: S200316bj (>99%), S200115j (>99%)**  
**S190930s (95%), S190924h (>99%)**

**5例 中子星-黑洞: S190814bv (>99%):  $18 M_{\odot} + 2.6 M_{\odot}$**   
**S190910d (98%), S190923y (68%),**  
**S190930t (74%), S191205ah (93%)**

**<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>**

## □ 下一次的重大突破:

双中子星并合后产物是什么

首例黑洞-中子星并合及其电磁对应体

## □ 未来10年中国的机遇: 多波段电磁对应体探测

空间高能: GECAM、EP、SVOM、VLAST、eXTP, 等等

空间光学: CSST

地面高能: LHAASO

地面光学: 2米级时域巡天望远镜 (2.5米WFST、1.93米、1.6米、2.5米KDUST)

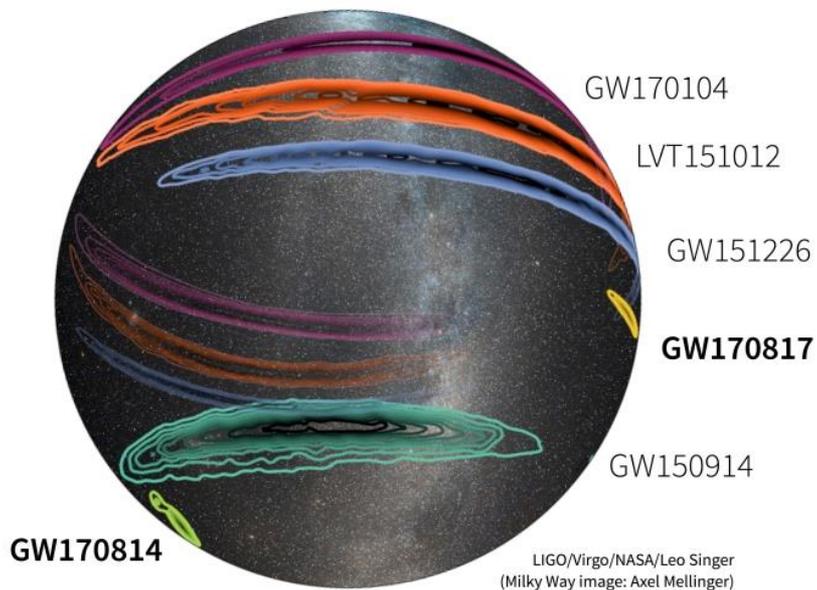
时域巡天阵列 (GWAC、MASTA、司天工程)

2米级光谱望远镜 (丽江2.4米, 兴隆2.16米)

6-10米级光谱望远镜 (LOT, 清华6.5米)

地面射电: FAST (需升级改造)、SKA

# 引力波电磁对应体探测的重要性



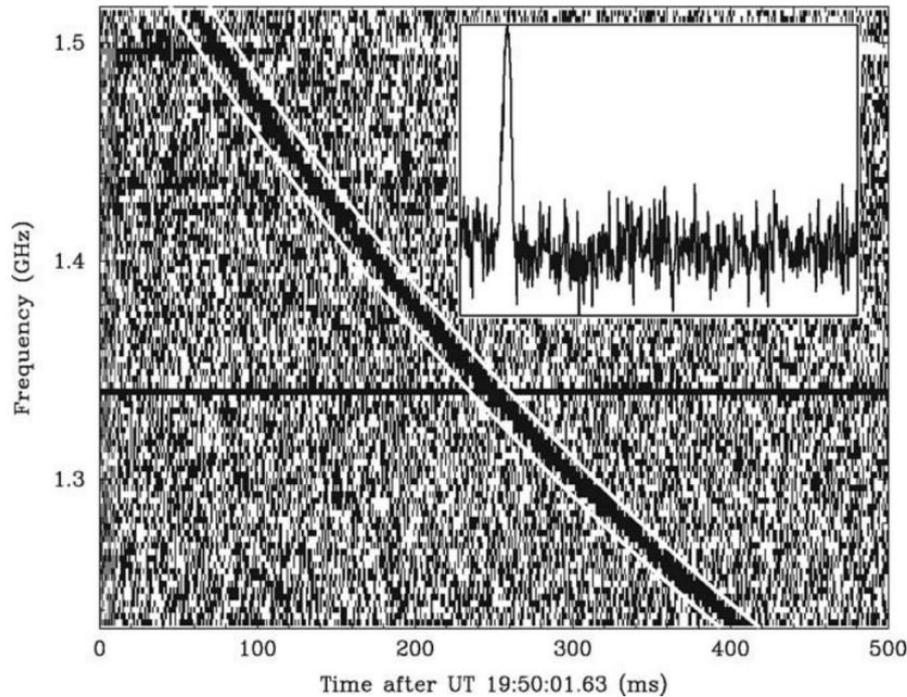
**GW150914: ~230 deg<sup>2</sup>**  
**GW170104: ~850 deg<sup>2</sup>**  
**GW171226: ~1200 deg<sup>2</sup>**  
**GW170814: ~60 deg<sup>2</sup>**  
**GW170817: ~30 deg<sup>2</sup>**

## ➤ 地面和空间监测网：

- ◇ 射电、**光学**、X射线、伽玛射线等搜索电磁对应体
- ◇ **光学**搜寻宿主星系

## ➤ 精确定位、测定红移，揭示引力波源的天体起源

### 3. 快速射电暴 (FRB)



**Fig. 2.** Frequency evolution and integrated pulse shape of the radio burst. The survey data, collected on 24 August 2001, are shown here as a two-dimensional “waterfall plot” of intensity as a function of radio frequency versus time. The dispersion is clearly seen as a quadratic sweep across the frequency band, with broadening toward lower frequencies. From a measurement of the pulse delay across the receiver band, we used standard pulsar timing techniques and determined the DM to be  $375 \pm 1 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ . The two white lines separated by 15 ms that bound the pulse show the expected behavior for the cold-plasma dispersion law assuming a DM of  $375 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ . The horizontal line at  $\sim 1.34 \text{ GHz}$  is an artifact in the data caused by a malfunctioning frequency channel. This plot is for one of the offset beams in which the digitizers were not saturated. By splitting the data into four frequency subbands, we have measured both the half-power pulse width and flux density spectrum over the observing bandwidth. Accounting for pulse broadening due to known instrumental effects, we determine a frequency scaling relationship for the observed width  $W = 4.6 \text{ ms } (f/1.4 \text{ GHz})^{-4.8 \pm 0.4}$ , where  $f$  is the observing frequency. A power-law fit to the mean flux densities obtained in each subband yields a spectral index of  $-4 \pm 1$ . The inset shows the total-power signal after a dispersive delay correction assuming a DM of  $375 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$  and a reference frequency of  $1.5165 \text{ GHz}$ . The time axis on the inner figure also spans the range 0 to 500 ms.

Duration:  $\lesssim \text{ms}$

Distance:  $\sim \text{Gpc}$

Energy:  $\sim 10^{40} \text{ erg}$

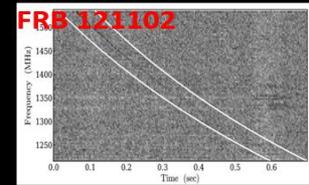
Peak luminosity:  $\gtrsim 10^{43} \text{ erg/s}$

Brightness temperature:  $\gtrsim 10^{34} \text{ K}$

All sky rate:  $10^3 \sim 10^4 \text{ day}^{-1}$

D. R. Lorimer; M. Bailes; M. A. McLaughlin; D. J. Narkevic; et al, *Science*. **318** (5851): 777

# 重大观测发现



2014  
Arecibo  
detection

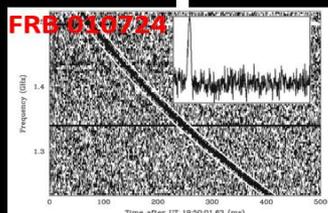
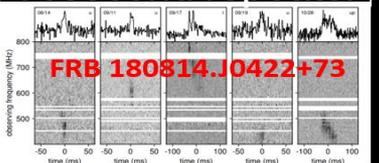
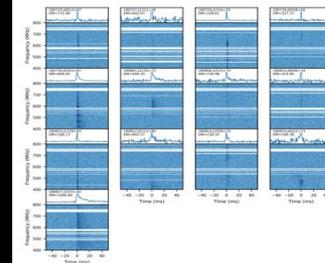
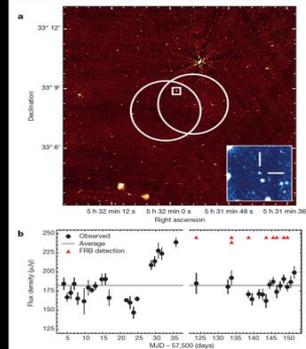
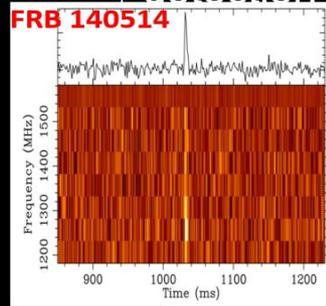
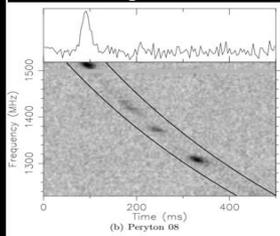
2015  
Real-time  
detection

2017  
Repeater  
localization

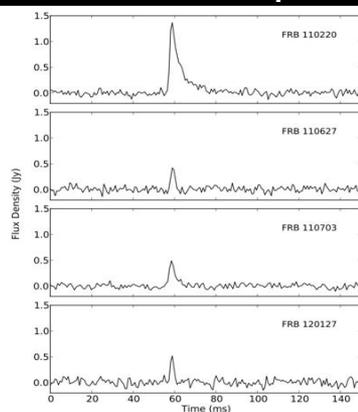
2019  
CHIME FRB  
population

2019  
CHIME  
A second repeater

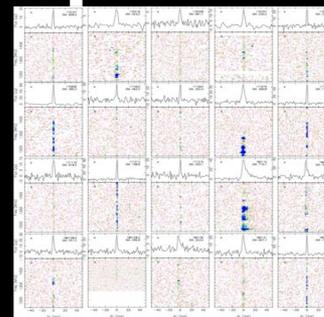
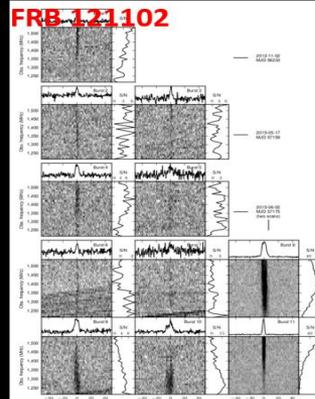
2010  
Perytons



2013  
An FRB sample

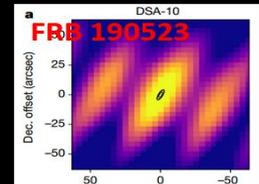


2016  
A repeater



2018  
ASKAP FRB  
population

2019  
Non-repeater  
localizations



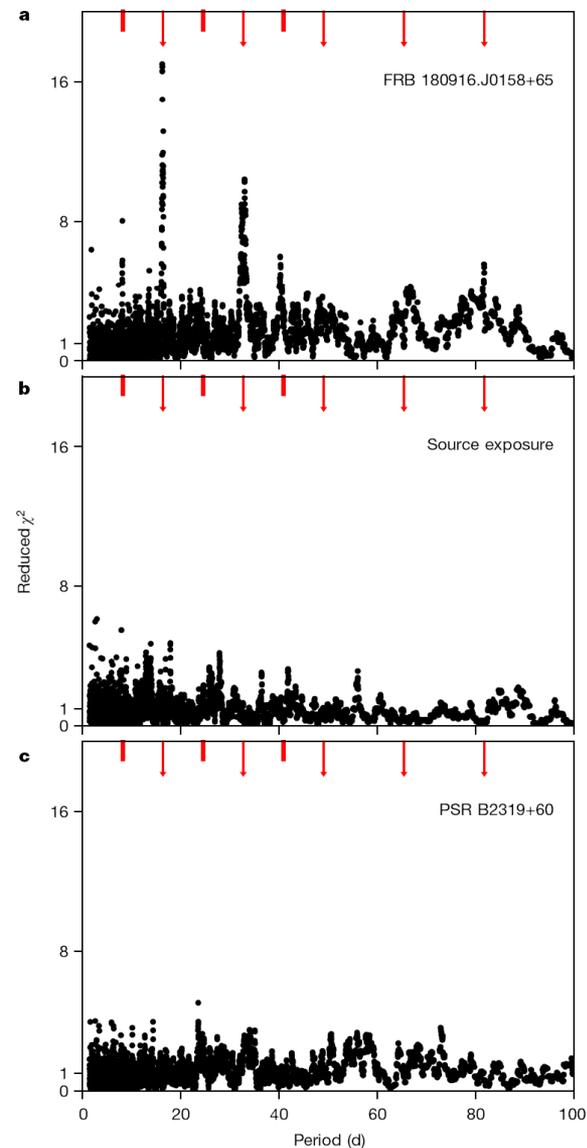
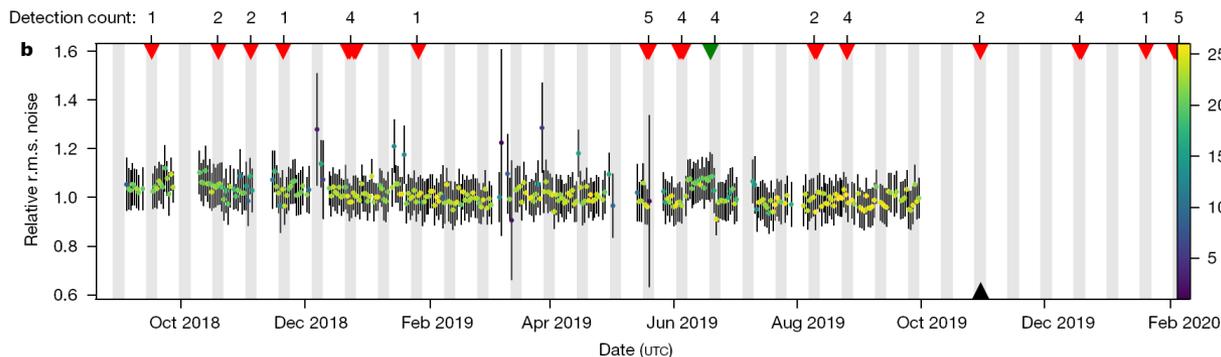
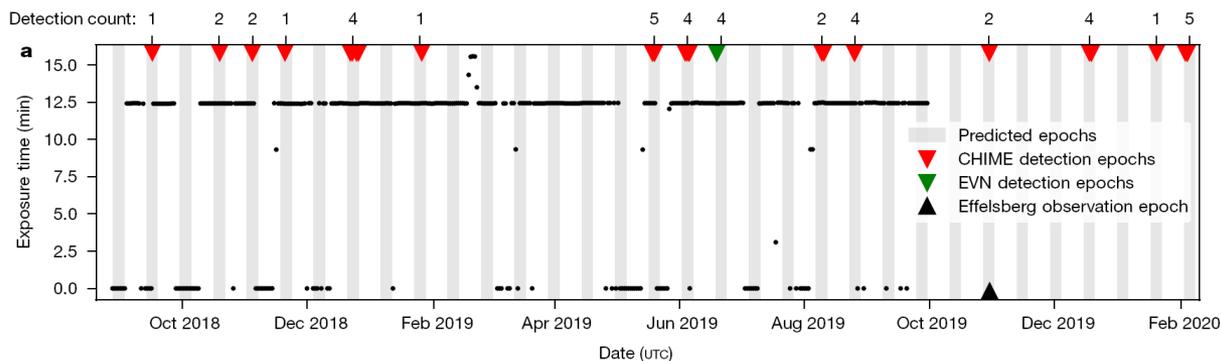
2007  
The first FRB

- Lorimer+07, Burke-Spolaor+11,
- Thornton+13, Spitler+14,
- Petroff+15, Spitler+16,
- Chatterjee+17, Shannon+18,
- CHIME+19a, CHIME+19b,
- Bannister+19, Ravi+2019

# 2020年重要进展

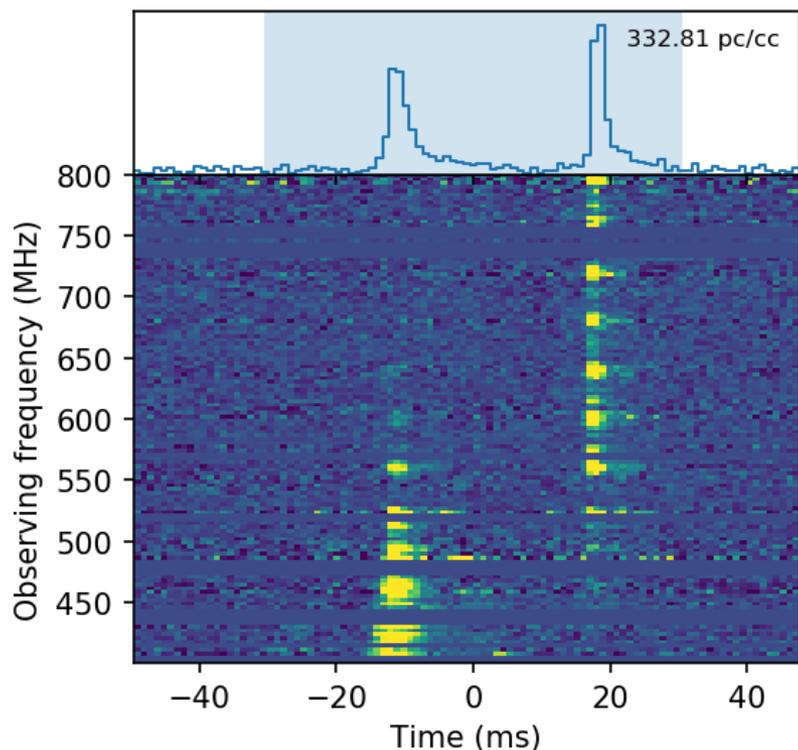
## ➤ 周期性:

- FRB 180916.J0158+65存在~16天的周期性  
(CHIME/FRB Collaboration et al. 2020, Nature, 582, 351)
- FRB 121102存在~157天的周期性?  
(Rajwade et al. 2020, MNRAS, 495, 3551)



# 2020年重要进展

## ➤ 磁星起源:

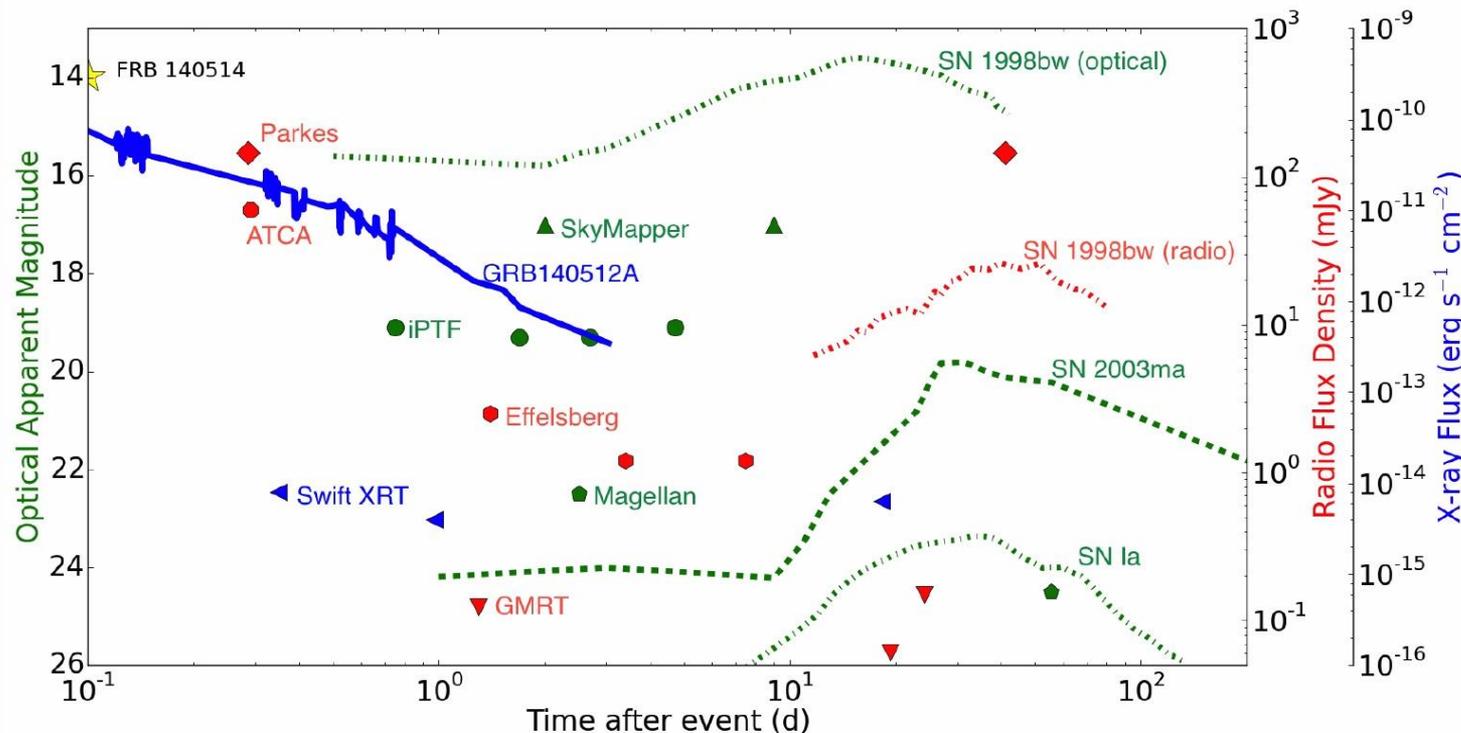


- 2020年4月28日, CHIME和STARE2发现了 **FRB 200428**
- 它和正在爆发阶段的银河系内 **磁星** SGR 1935+2154成协
- 我国**慧眼**卫星以及Konus-Wind等国外卫星观测到了与该FRB同时的X射线爆发, 慧眼数据最好
- 我国**FAST**给出了当时射电流流量极强的限制, 并于10月10日测到了一个暗弱的脉冲星

# 目前对FRB的认知

|   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
| 微波炉?  | 来自太阳系?  | 来自外星人?  | 宇宙学起源?   | 高DM是因为星系际介质?   |
|    |    |   |   |   |
| 时标?   | 流量  | 能量  | 有宿主星系?   | 在恒星形成区?  |
| ~ms   | ~1 Jy ms  | $10^{39}-10^{41}$ erg   |   |   |
| 重复?   | 有周期?  | 有脉冲星?   | 有X射线?  | 有余辉?   |
|   |   |  |  |  |
| 分类?   | 相干辐射?   | 来自黑洞?   | 来自中子星?   | 其它来源?  |
|  |  | Maybe   | Probably   | 不排除  |

# 针对FRB 140514开展了地面射电、光学和空间X射线的多波段对应体搜寻



**Figure 3.** The limits for optical in apparent magnitude (green), radio flux density in mJy (red), and X-ray flux in  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (blue) of our observations of the field of FRB 140514 from 8 telescopes that fully sampled the Parkes beam. Colors of data points refer to the axis scale of the same color. Light curves from GRB140512A ( $z = 0.725$ ), 1.4 GHz radio data and  $R$ -band optical data for supernova SN1998bw ( $z \sim 0.008$ ),  $R$ -band data for superluminous supernova SN2003ma ( $z = 0.289$ ) and an  $R$ -band light curve for a typical type-Ia SN ( $z = 0.5$ ) have been included for reference (Evans et al. 2007; Rest et al. 2011; Kulkarni et al. 2014; Galama et al. 1998).

Petroff et al. (2015)

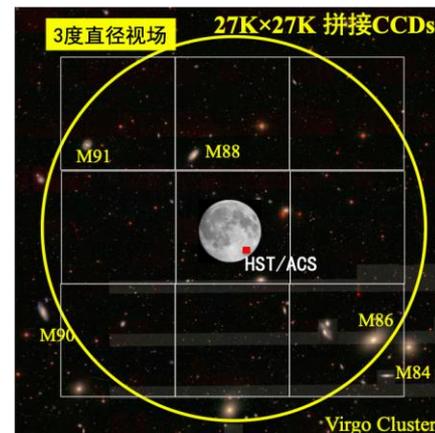
FRB 140514的光学对应体观测上限 (点) 与其他暂现源观测结果 (线) 的对比。  
其中，绿色表示光学观测结果，红色表示射电，蓝色表示X射线。

## 4. WFST

# WFST：中国科大与紫金山天文台共建2.5米大视场巡天望远镜

- 2018年3月，双方签订共建合作协议，成立2.5米大视场巡天望远镜（WFST）项目工作组，共同推进重大科研平台建设。WFST建成后，由紫台主要负责设施运行。
- 2019年，完成望远镜的详细方案设计，望远镜本体和CCD芯片已完成采购招投标工作，同时成立“两总”，现进入工程建设阶段；
- 2020年4月，中科大与海西州人民政府签署“大视场巡天望远镜项目”合作协议，圆顶基建费用由海西州负责（3000万元）。

WFST观测能力强大，有望在时域天文、太阳系普查、银河系和近场宇宙学等研究方向上取得重大科学突破！



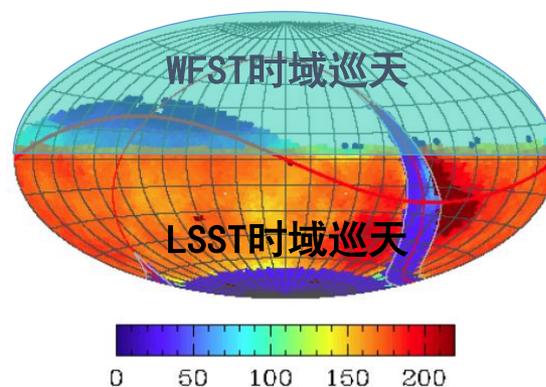
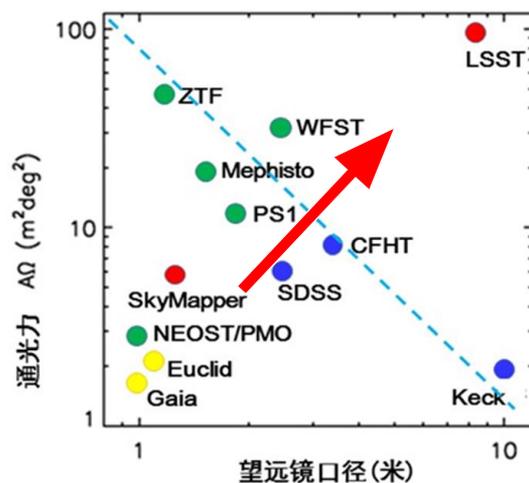
# WFST: 中国科大与紫金山天文台共建2.5米大视场巡天望远镜

- ◆ 2.5米WFST望远镜通光力( $A\Omega$ )=29.3, 是北半球巡天能力最强的观测设备
- ◆ 北天2万平方度 $u,g,r,i,z,w$ 时域深度巡天
- ◆ 每小时巡测600平方度, 每幅图像1.5GB, 每晚1.3 TB, 五年巡天累计2 PB

## 观测数据

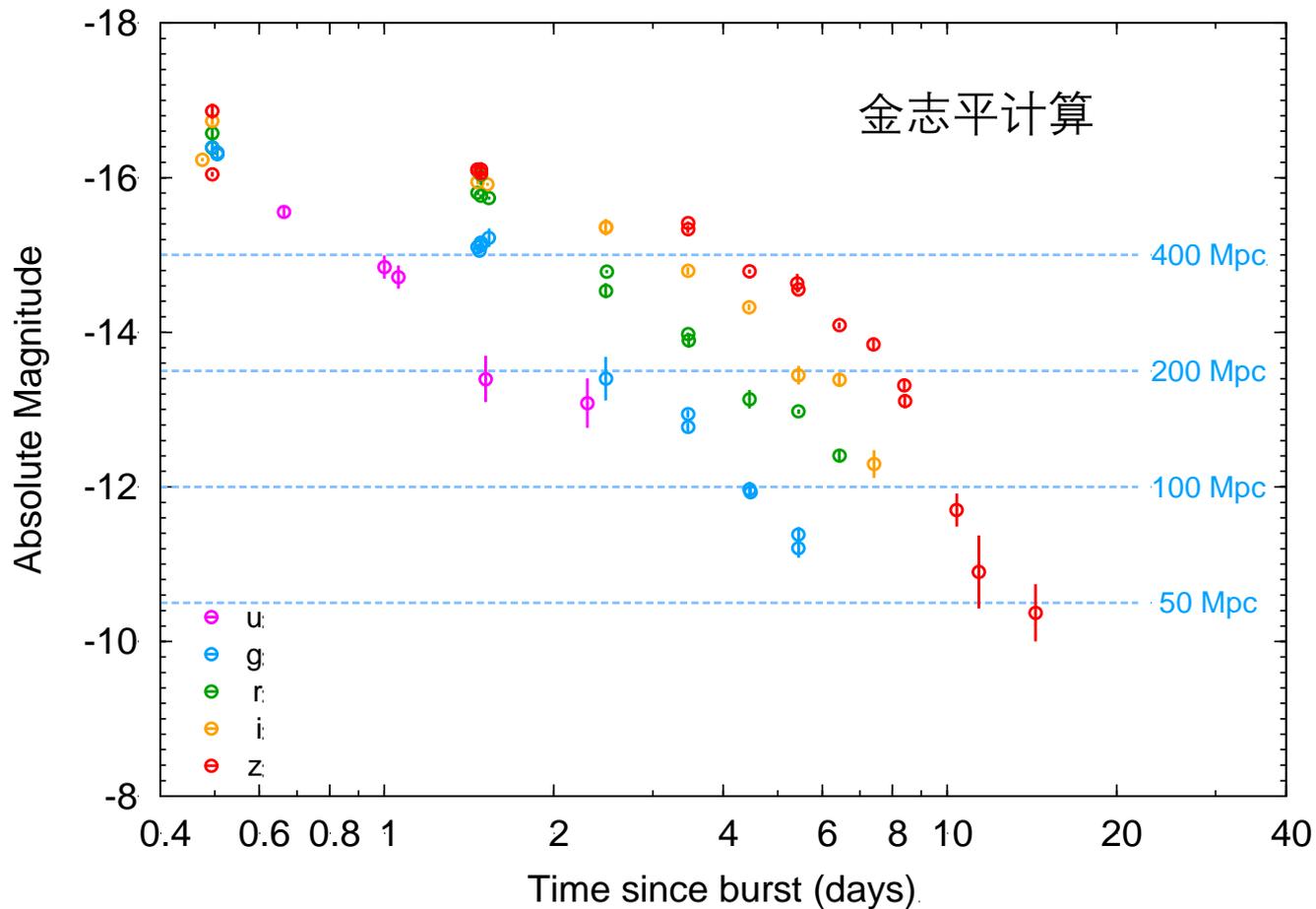
- ◆ 挑战: 数据处理分析算法软件和PB级大数据科学研究

台址: 青海省海西州冷湖赛什腾山



# WFST 的千新星探测前景

GW170817 绝对光度与 WFST 可探测距离对比，假定WFST g波段观测极限星等 23 等



# 5. MASTA

# MASTA概况

- Multi-Application Survey Telescope Array
- 多应用巡天望远镜阵
- 超大视场光学巡天, 2个子阵
- 项目整体预期完成: 2023年12月



# 设计与性能



## □ 单台望远镜：

700mm口径

大靶面sCMOS相机

3.8度 X 3.8度视场

20秒曝光可达到20星等

巡天6000余平方度/晚

## □ 子阵：

✓ 20台望远镜

✓ 同时覆盖~300平方度天区

✓ 最快可在25分钟内完成对12000平方度本地天区的巡天

✓ 3色测光

✓ 可在能力上达到一台大型大视场光学巡天望远镜的水平

# 预期能力

## □ 图像欠采样:

- seeing:  $\sim 0.72''$
- 像元分辨率:  $2''/\text{pixel}$
- 设计光学质量 (考虑公差) : 好于1个像元

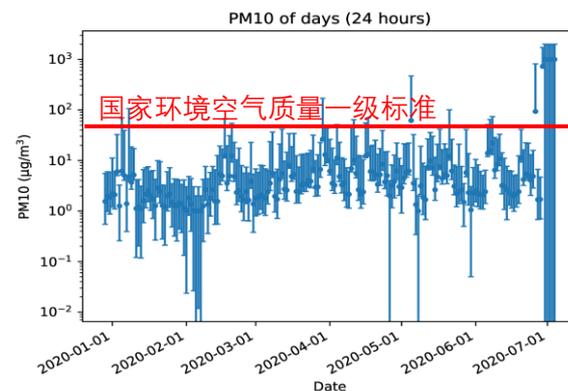
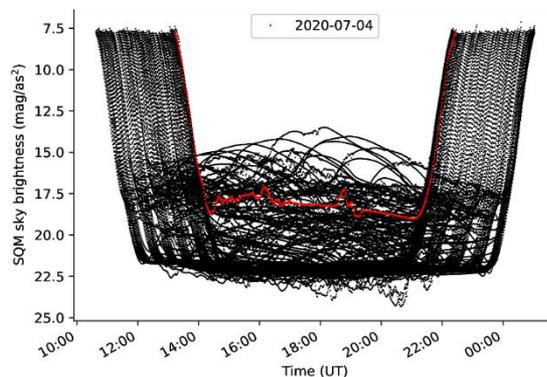
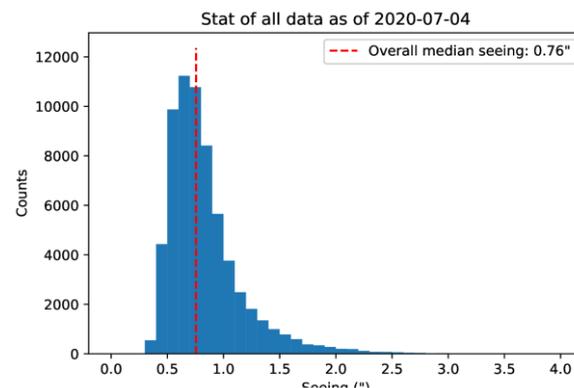
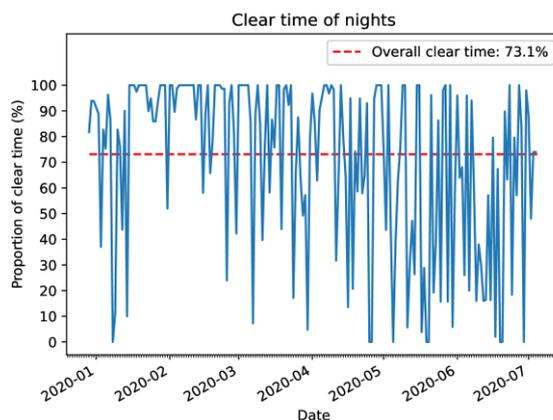
## □ 共视场观测和图像叠加可在需要时有效提高采样率和能力:

- 单次30 ~ 60秒曝光极限星等22等
- 视场近 $4^\circ \times 4^\circ$ , 分辨率高于 $0.5''/\text{pixel}$ ——~ 30K  $\times$  30K的大视场巡天
- 将是一个世界一流的巡天项目

# 台址条件 (冷湖)

## 赛什腾山X点 (3800m) 站址监测情况

- 数据自2019年12月29日起，基本完整
- 总体可观测时间73.1% (截止2020年7月4日)
- 视宁度中值0.76"
- 夜天光中值20.7，众数22.1
- 空气质量优良，PM10多数时间优于一级



# 建设计划（冷湖子阵）

- 2019年内，完成项目包括设备和基建的初步设计
- 2020年春，完成基建招标并开始建设
- 2021年中，第一台望远镜入场，构建测试系统
- 2021年冬，开始初级系统的试观测，产出第一批科学数据
- 2022年中，完成所有设备的安装，开始全阵的试运行
- 2023年底，项目验收

# 科学目标

## □ 空间碎片巡天

## □ 大视场时域巡天

1. 小行星和近地天体观测

2. 引力波事件、伽马射线暴光学观测

Swift, Fermi, GECam, EP, SVOM

3. 快速射电暴光学对应体观测

4. TDE后随观测

5. 超新星后随观测

# 司天工程

□ 国家天文台、紫金山天文台联合国内20多家科研院所和高校共同推进；

□ 项目负责人刘继峰

□ 72台一米望远镜：多台址保证

实现全球不间断监测

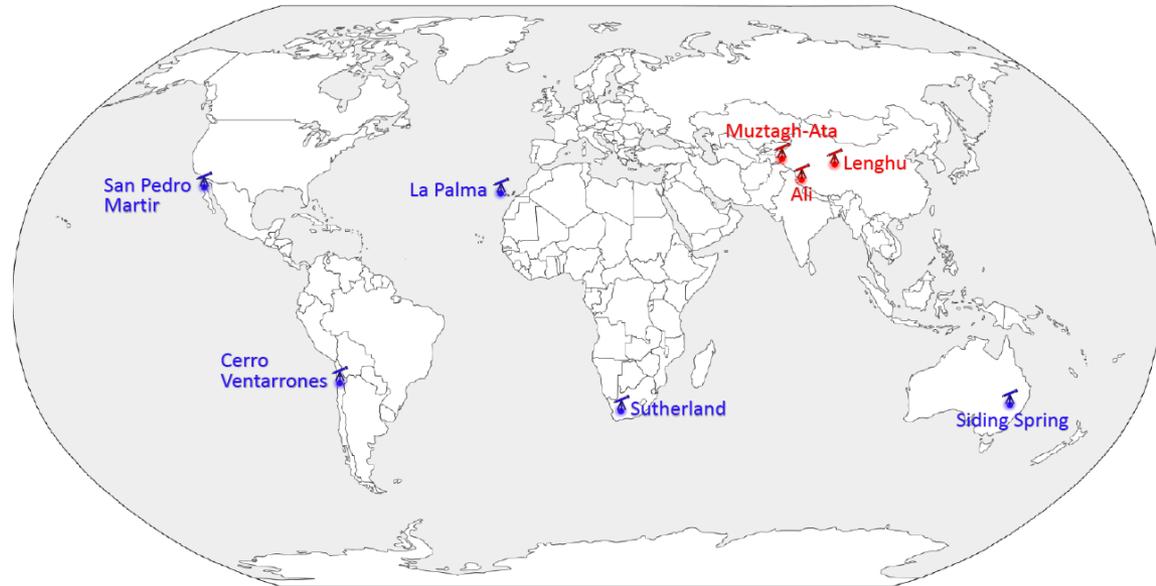
✓ 主阵由18个单元54台望远镜组成

司天阵并放于国内单一台址上

✓ 2个单元放于国内其它成熟台址

✓ 4个单元放于国外优秀台址

□ 3台四米后随观测望远镜：分布于国内的3个台址



谢谢!