



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 以镜观天400年 之 时域巡天

孔旭

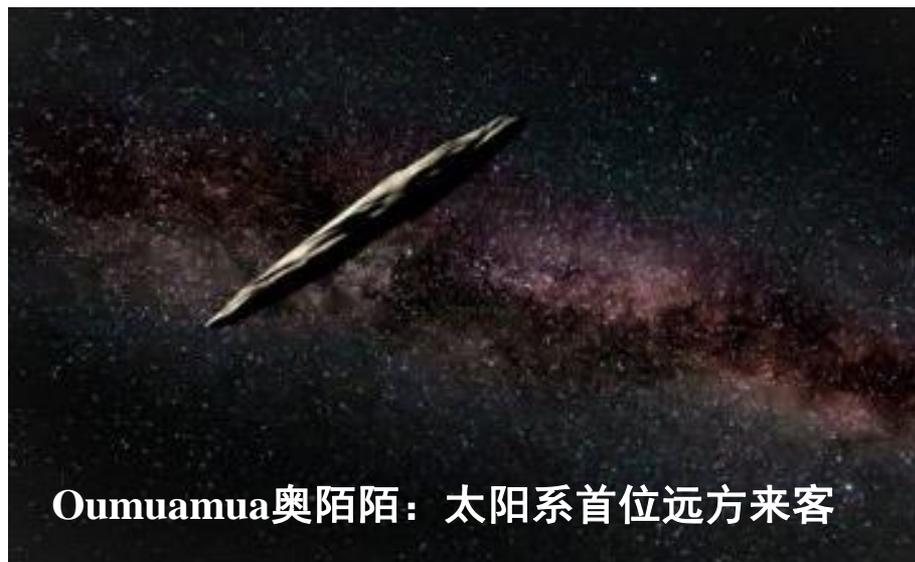
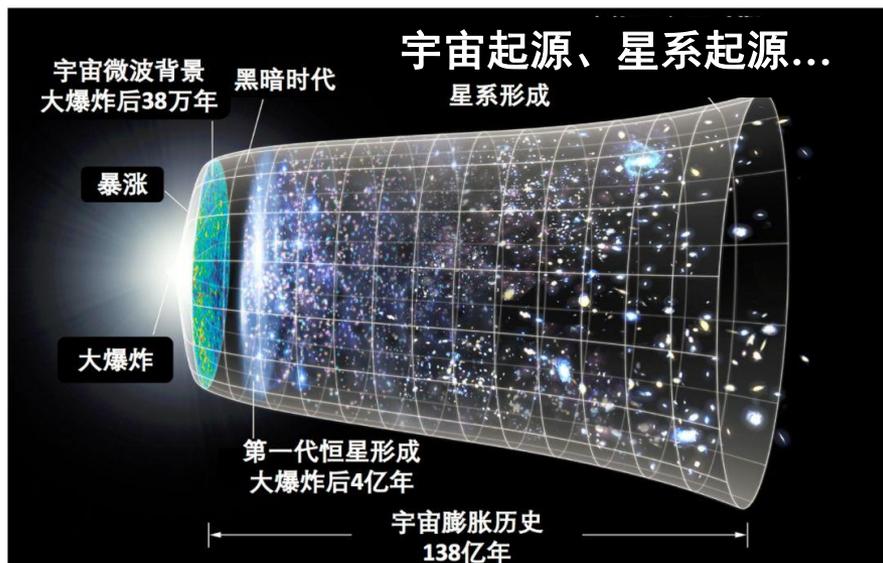
中国科学技术大学天文学系

# 报告内容

---

1. 时域天文科学意义
2. 时域天文设备需求
3. 时域天文设备现状
4. 大视场巡天望远镜
5. 大视场望远镜进展
6. 中国时域巡天设备

# 1. 时域天文科学意义



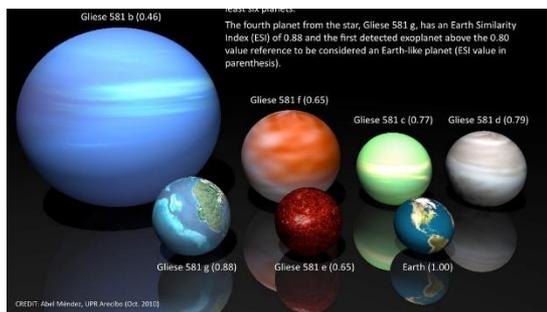
- ◆ **起源 (Origins)**：宇宙不同时刻天体 → 天体物理、形态和环境的演化 → **精测望远镜**

- ◆ **发现 (Discovery)**：**大天区**重复观测 → 天体光度变化和位置移动 → **巡天望远镜 (视场大)**

**大视场巡天**是现代天文发展趋势：近年来，天文学从刻画**静态**的宇宙发展到认识**动态的宇宙** → 通过**时域监测**来揭示宇宙中各类天体的变化，发现、探索各类**新天体、新现象、新物理**。

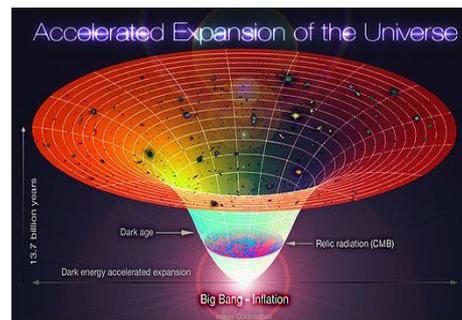
# 时域天文

现代天文技术和信息技术的快速发展，开启了以动态天文事件为研究对象的**时域天文**这一全新领域。



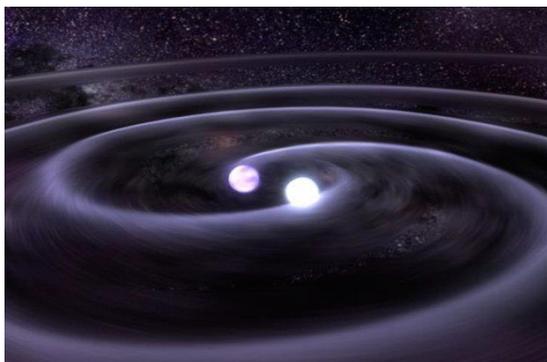
太阳系外行星发现（1995）

2019年诺贝尔物理学奖



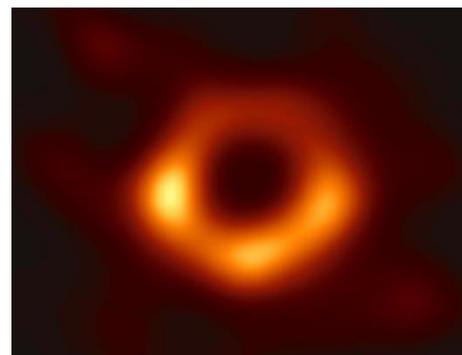
宇宙加速膨胀（1998）

2011年诺贝尔物理学奖



引力波直接探测（2015）

2017年诺贝尔物理学奖



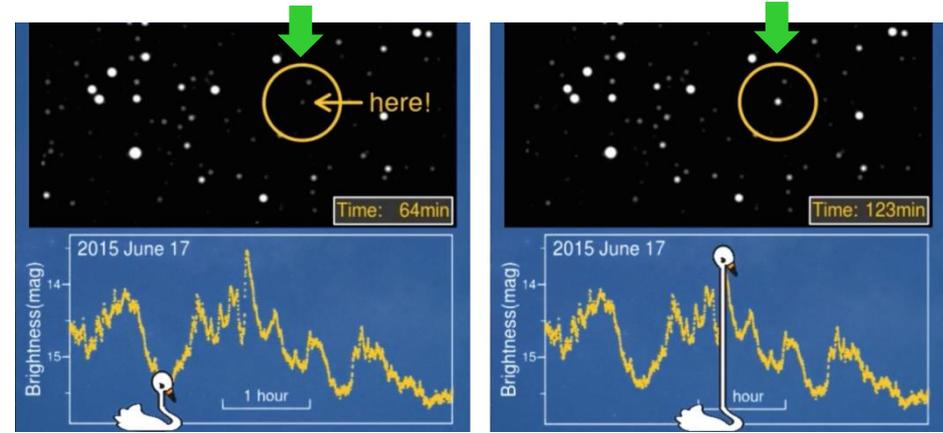
利用“事件视界望远镜”拍到的首张黑洞照片（2019）  
2020年诺奖

1990年以来天文学最重要的4个发现，都与时域天文研究相关

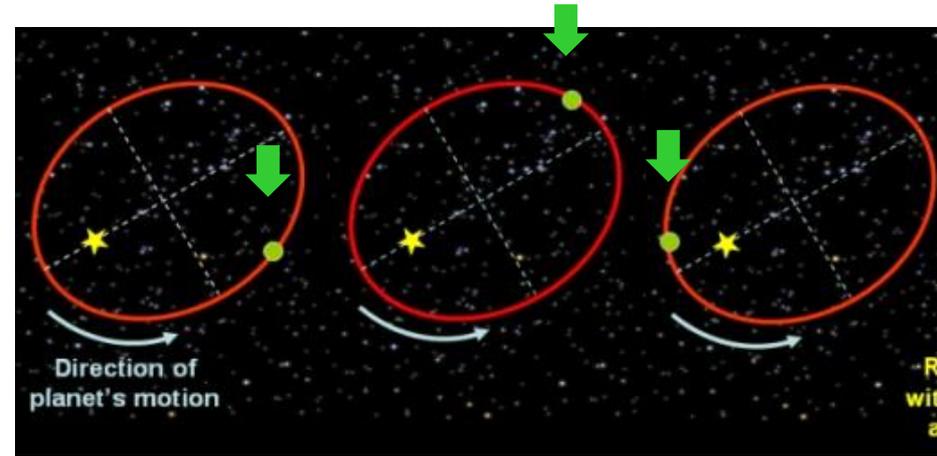
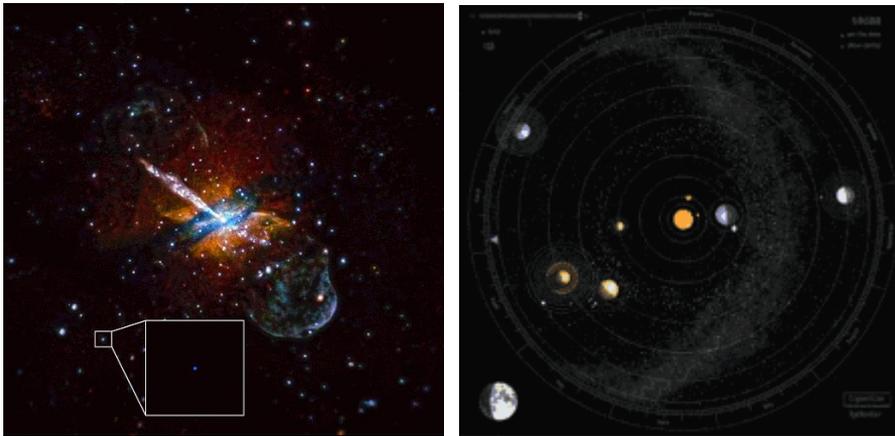
# 时域天文 (Time-domain astronomy)

- ◆ 时域天文：研究**天体光度**和**天体位置**随时间变化
- ◆ 光度变化天体：超新星、活动星系核、伽玛暴、快速射电暴、引力波、**黑洞潮汐瓦解事件**等
- ◆ 位置变化天体：外**太阳系天体**搜寻、普查；空间碎片监测；星际天体发现等

光度变化的天体

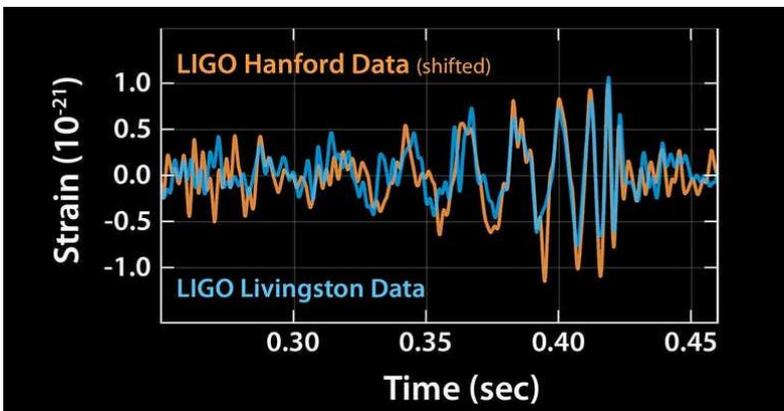
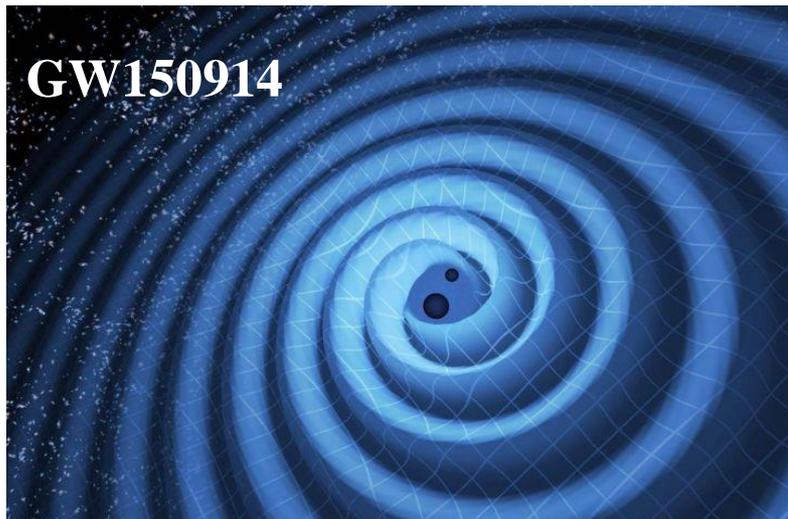


位置变化的天体

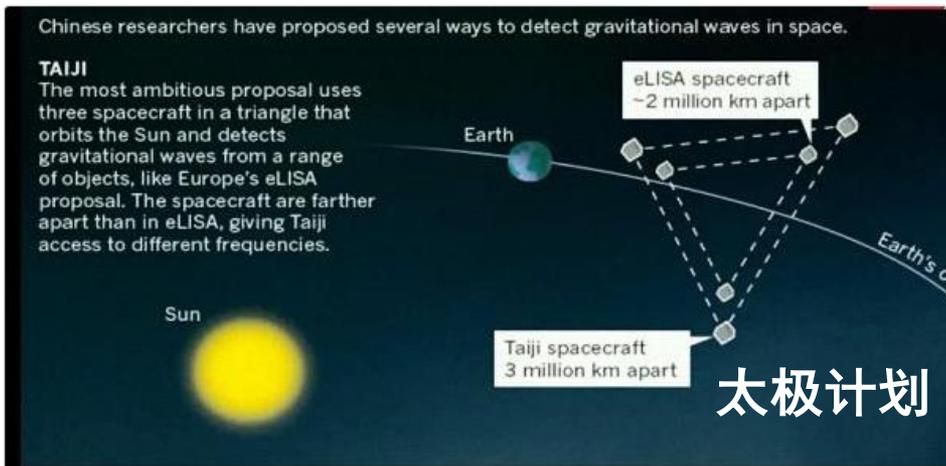
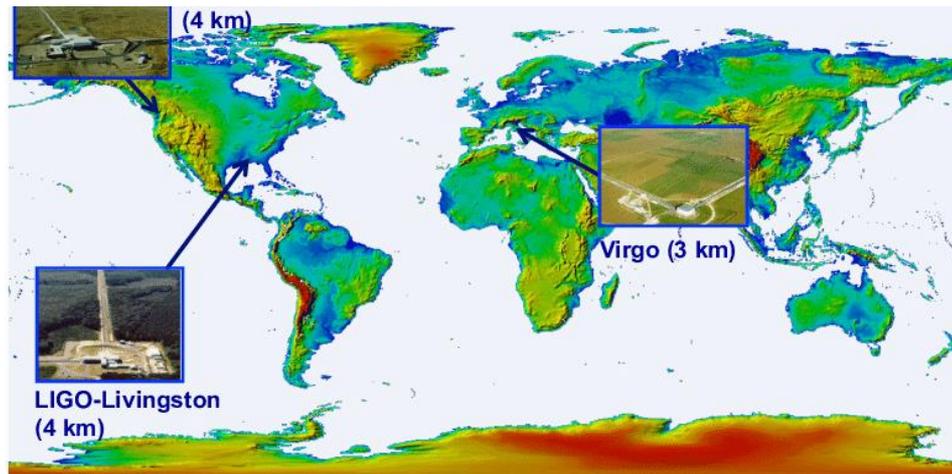


时域天文为什么重要？时域天文对观测有何要求？

# A. 引力波电磁对应体



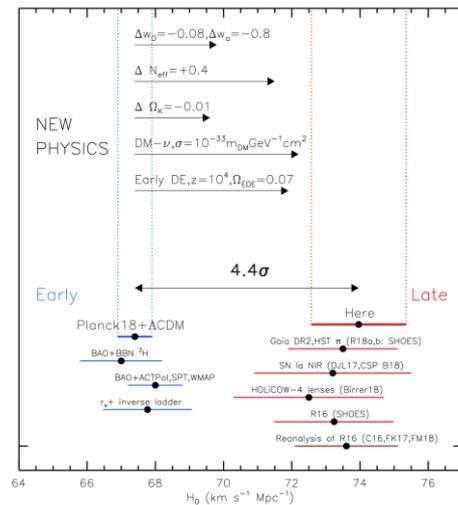
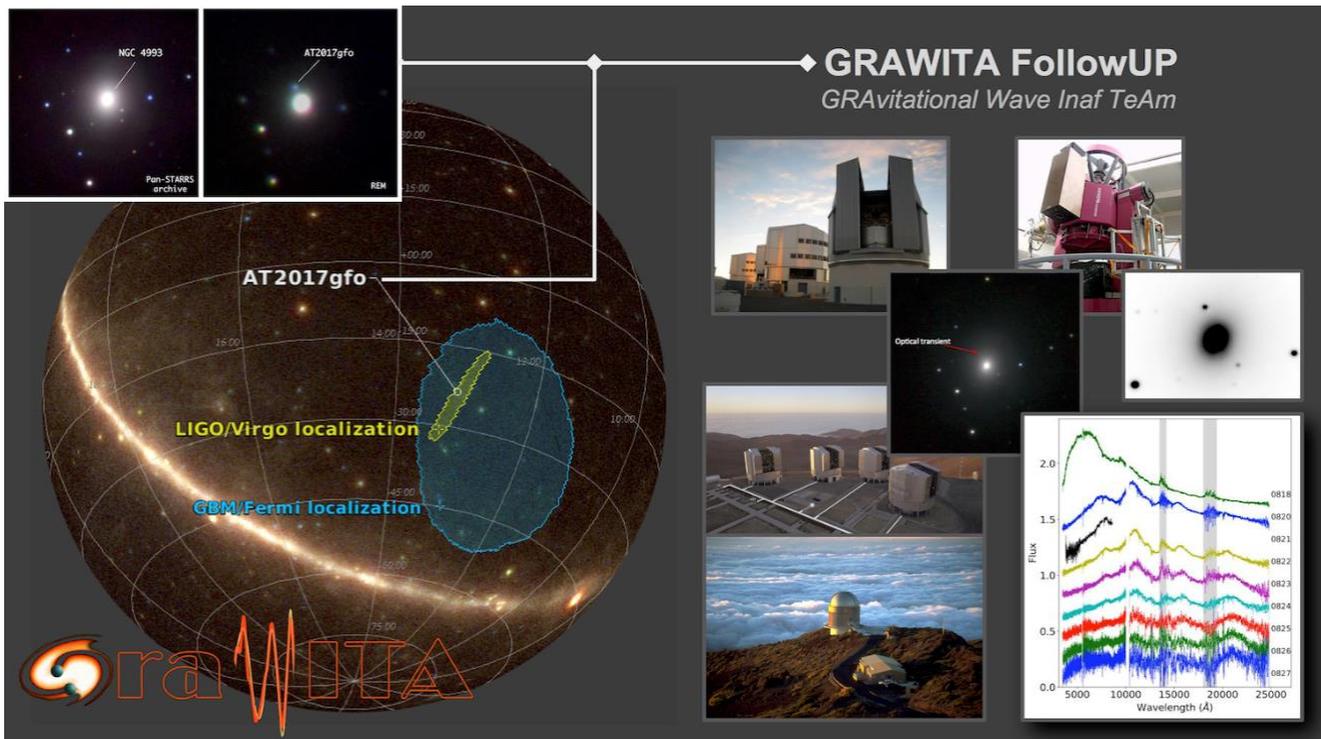
2016年2月11日，LIGO团队发布首次直接探测到双黑洞并合触发引力波事件，世界范围引起轰动。



# 引力波电磁对应体

GW170817: 70多个空间地面望远镜参与观测

2017年10月16日，第一个**引力波电磁对应体**被发现：被评为2017年度Science十大突破之首。

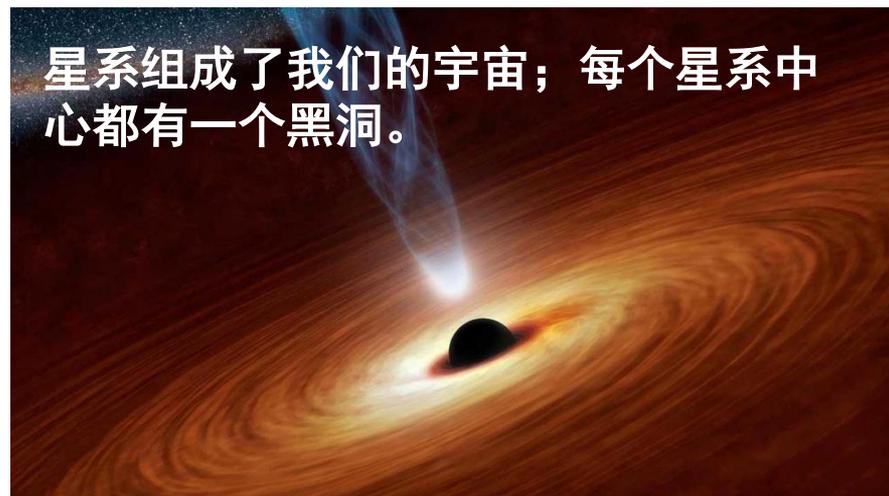


引力波电磁对应体观测，是引力波在天体物理领域应用的基础：独立于现有方法的**宇宙学参数测量（标准汽笛）**；约束极高密度下的**物质相互作用规律**等。

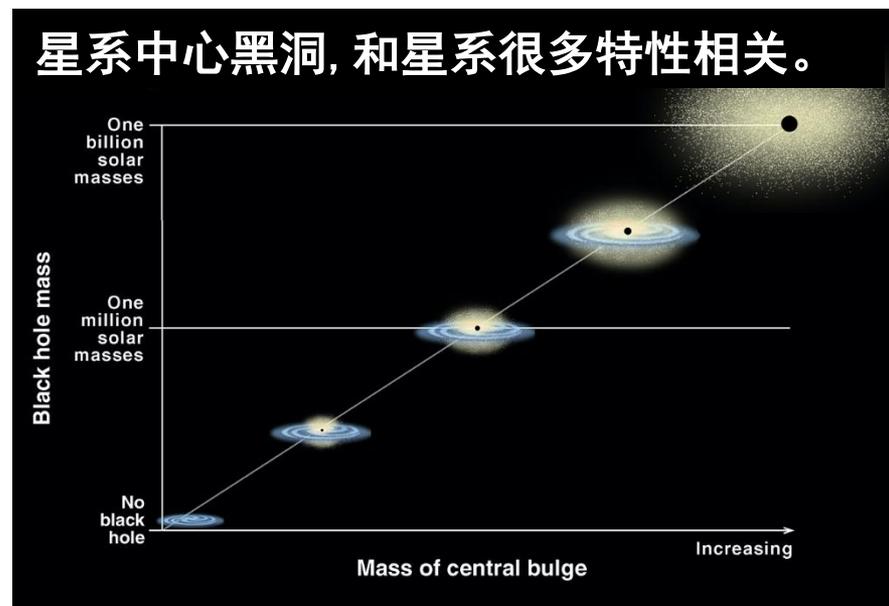
# B. 黑洞的本质是什么？



SCIENCE杂志列出的125个科学前沿问题之一：**What is the nature of black holes?**



星系组成了我们的宇宙；每个星系中心都有一个黑洞。



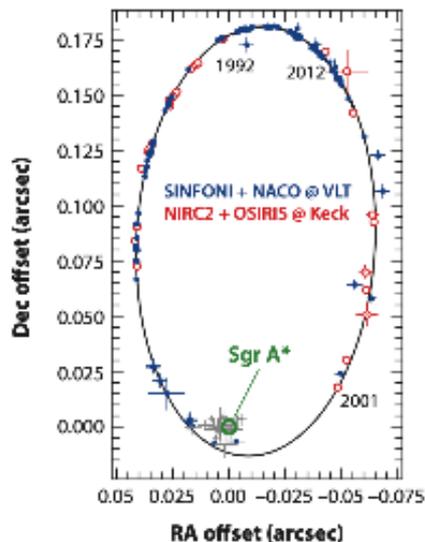
星系中心黑洞, 和星系很多特性相关。

# 如何发现黑洞？

## 黑洞潮汐瓦解恒星事件 (TDE)



目前只能利用**运动学方法**，探测近邻、少数几个大星系中心的大质量黑洞



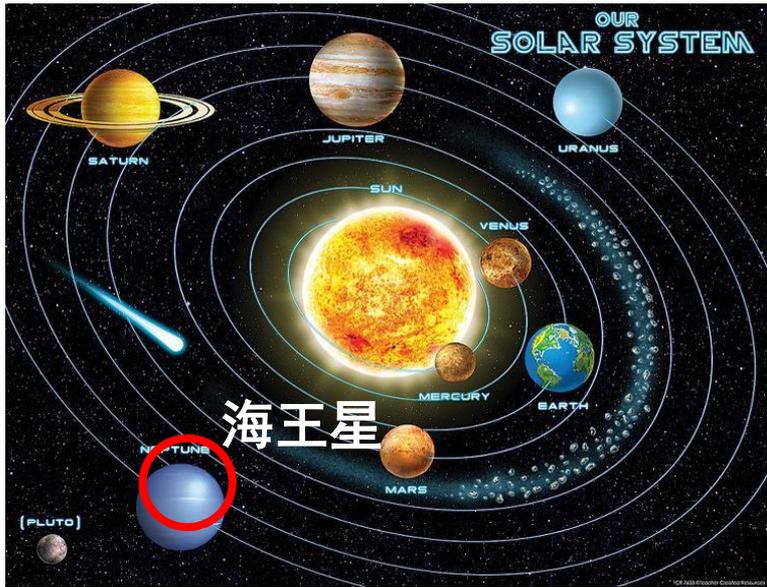
TDE: 恒星运动到黑洞附近被黑洞引力瓦解，黑洞吸积物质，**变亮**。

TDE提供了探测**(不同质量) 黑洞**的有效方法: 时域天文的一个应用

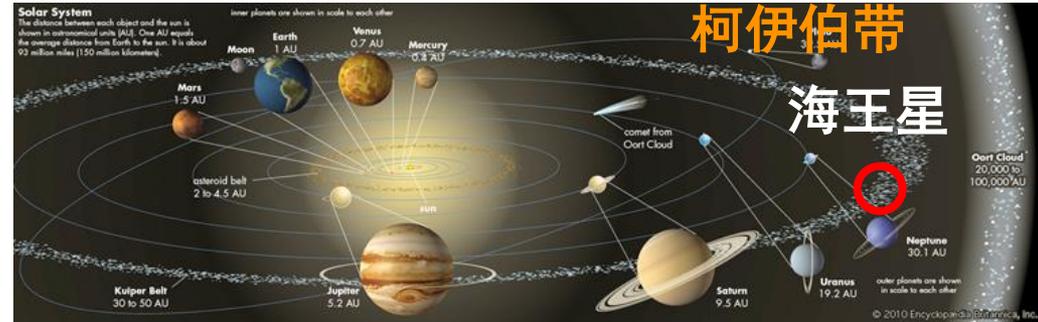
发生概率低: 目前已知 TDE ~ 50例，**需要大天区、重复观测发现**。



# C. 太阳系全景普查

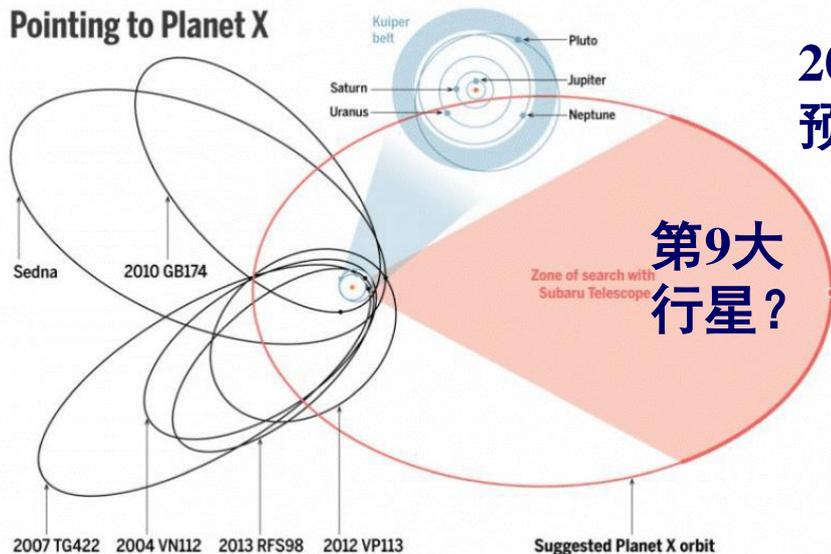


第一个柯伊伯带天体发现获得了**邵逸夫奖**



1992年，柯伊伯带天体发现，颠覆了对**太阳系边界**的认知：太阳系如何组成？如何起源？

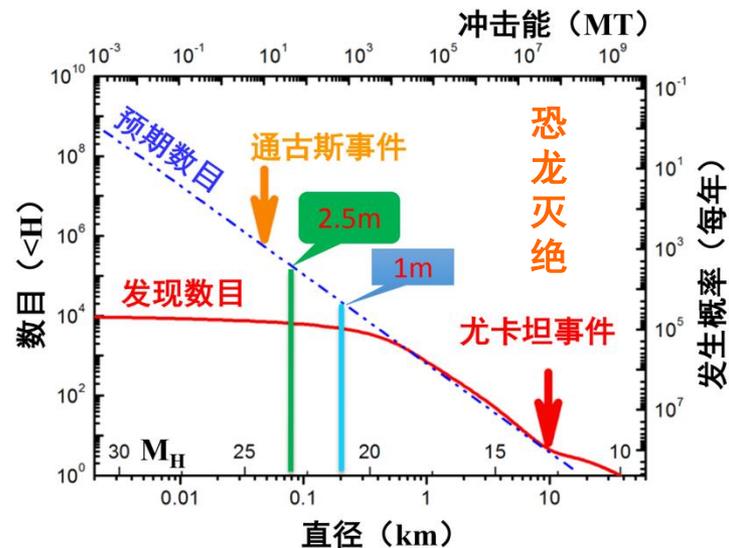
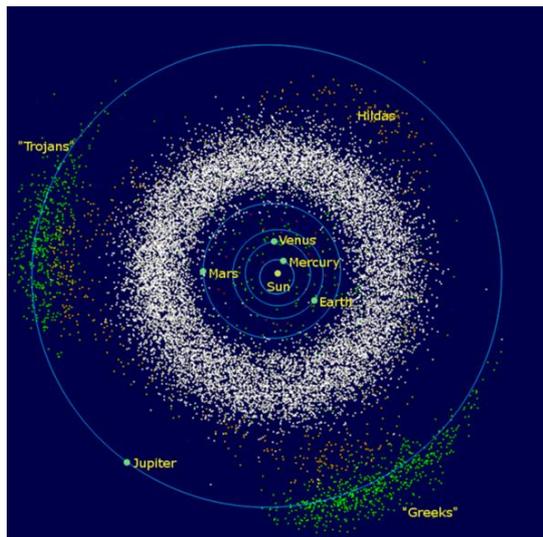
2015年以来，对外太阳系天体轨道分析，预测应该存在**第9大行星**：如何搜寻？



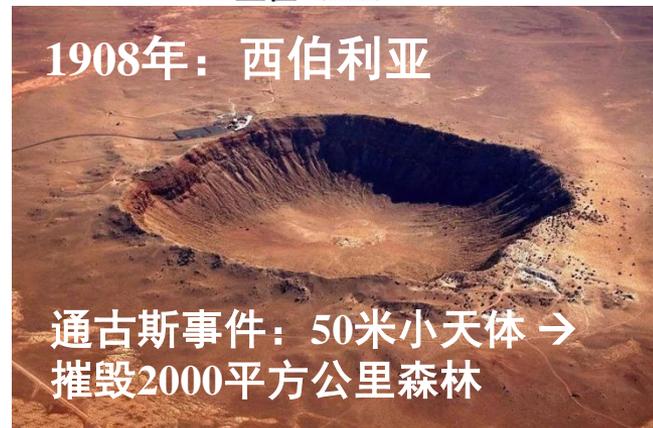
时域天文：重新认识太阳系，研究太阳系的组成、起源。

外太阳天体距离远，暗；运动范围大：需要**深度、大视场巡天**观测。

# 空天环境感知

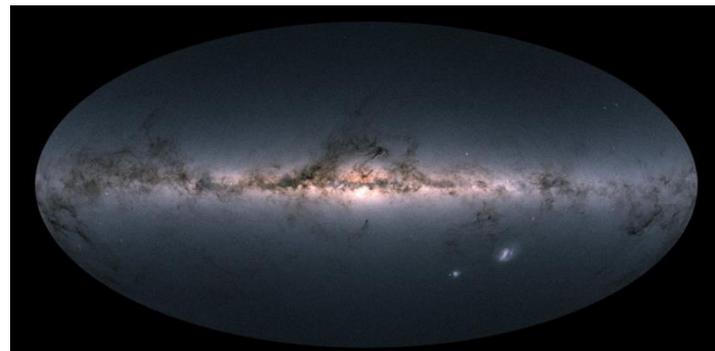
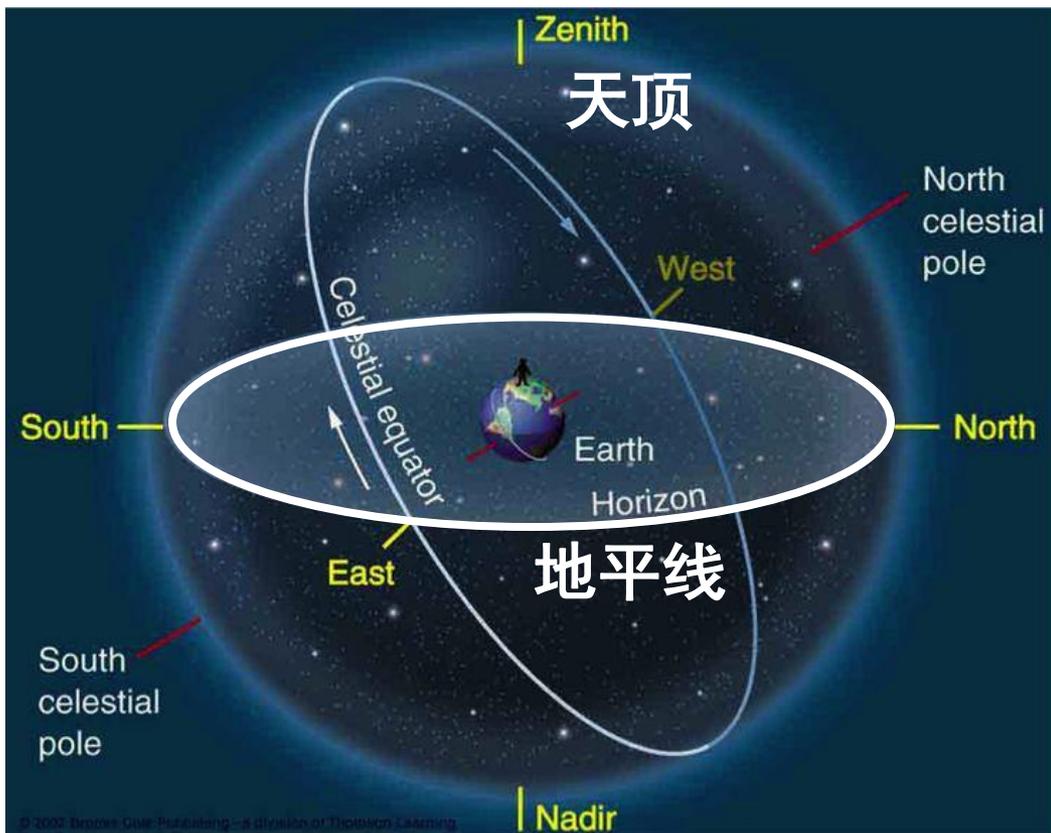


- ◆ 直径 > 40米近地天体总数 ~ 30万颗: ~ 2000颗为潜在威胁天体
- ◆ 受望远镜口径限制, 目前估计只发现了其中 ~ 3%: **探测、监视和证认潜在有威胁近地天体, 需要深度、大视场巡天观测**



时域天文: 研究暗物质暗能量本质, 探测黑洞等致密天体, 获知太阳系组成等, 是天文学新兴研究领域。由于事件发生概率低/天体运动范围大: 时域天文研究**需要开展大天区、深度、高频次巡天观测。**

## 2. 时域天文对观测设备要求



天区在二维平面投影

监测宇宙中各类天体变化  
(静: 拍照片 → 动: 录视频) → 高频次 (几天观测一次) 观测

整个天球面积 ~ 4万平方度; 位于南 (北) 半球的望远镜, 能够分别观测南 (北) 天球 ~ 2万平方度天区 → 望远镜需要具备快速巡天能力: 大视场。

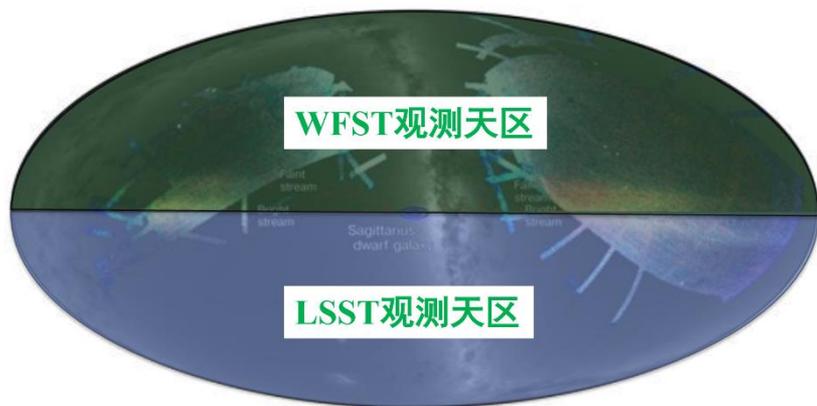
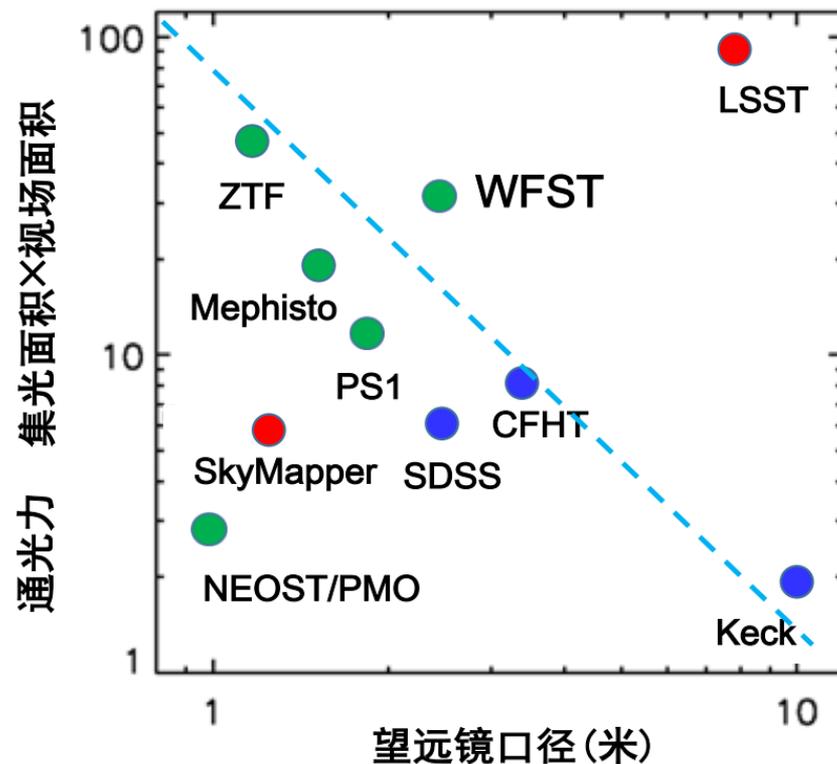
# 时域天文对观测设备要求

科学目标 观测要求	光度变化 天体	近邻宇宙	位置移动 天体	设备要求 关键指标
巡天面积	2万平方度	2万平方度	>1万平方度	<b>≥ 3 度大视场</b>
巡天深度	r ~ 23等	r ~ 25等	w ~ 24等	<b>口径 ≥ 2.5米</b>
巡天时长	高频次	6年	1年	<b>视场直径 ≥ 3 度</b>
测光精度	高精度0.1%	高精度0.1%	1%	<b>高像质 (80% &lt; 0.4")</b>
定位精度	0.1角秒	高精度 (0.03角秒 = 1/10像元)		
波段要求	多色 (ugriz)	多色(ugriz)	宽波段w	<b>ugrizw</b>

望远镜终端设备：口径 ≥ 2.5米（**看得见**）、≥ 3度大视场（**看得快**）、高精度（**看得清**）、宽波段（**看得好**）

# 3. 时域巡天设备国内、外现状

项目名称	口径 (米)	视场 ( $\square^\circ$ )	通光力 ( $A\Omega$ )	极限 星等	天区 位置
<b>SkyMapper</b>	<b>1.3</b>	<b>5.6</b>	<b>6.0</b>	<b>21.0</b>	<b>南</b>
<b>LSST</b>	<b>8.4</b>	<b>9.6</b>	<b>308</b>	<b>24.7</b>	<b>南</b>
CNEOST	1.0	3.00	2.00	20.0	北
ZTF	1.2	47	53.0	20.4	北
Mephisto	1.6	3.14	18.9	22.3	北
PS1	1.8	7.0	13.5	21.8	北
<b>WFST</b>	<b>2.5</b>	<b>6.55</b>	<b>29.3</b>	<b>23.0</b>	<b>北</b>

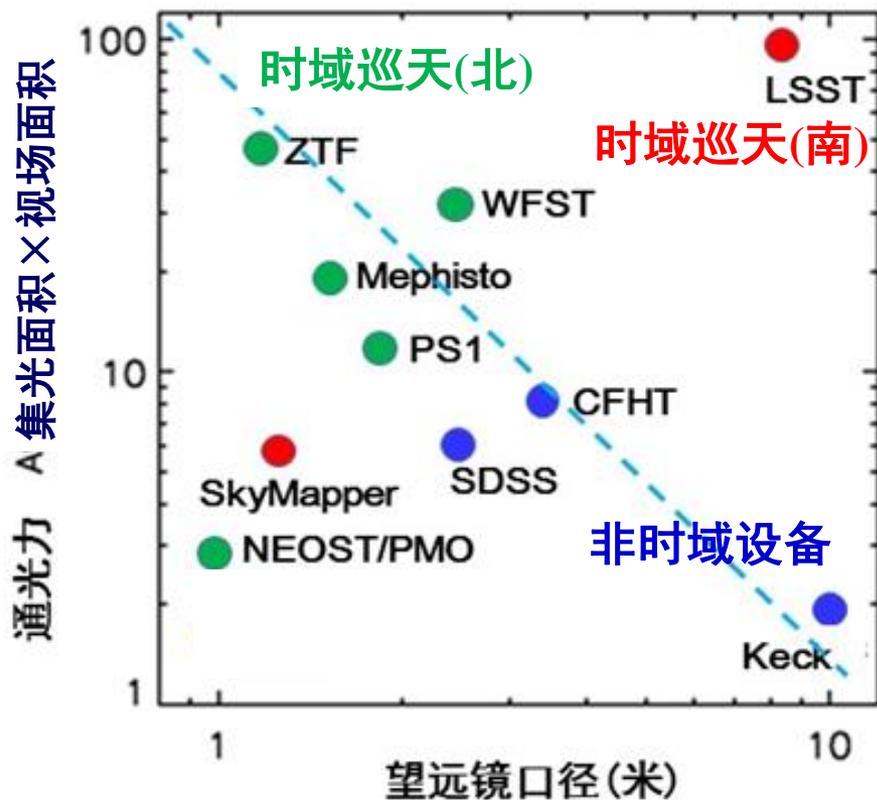


BATC、南山1米镜、CNEOST / 2.16m、2.4m / LAMOST



# 时域巡天设备国内、外现状

项目名称	口径 (米)	视场 ( $\square^\circ$ )	通光力 ( $A\Omega$ )	极限 星等	天区 位置
PS1	1.8	7.0	13.5	21.8	北
ZTF	1.2	47	53.0	20.4	北
SkyMapper	1.3	5.6	6.0	21.0	南
LSST	8.4	9.6	308	24.7	南
BATC	0.6	1.0	0.3	20.0	北
NEOST	1.0	3.0	2.0	20.0	北
WFST	2.5	6.55	29.3	23.0	北

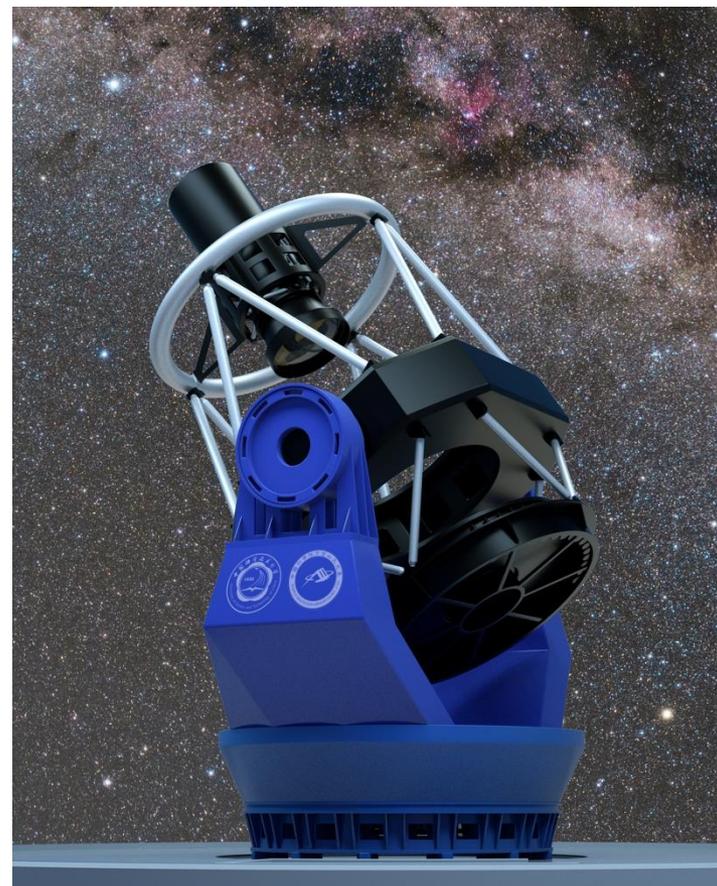
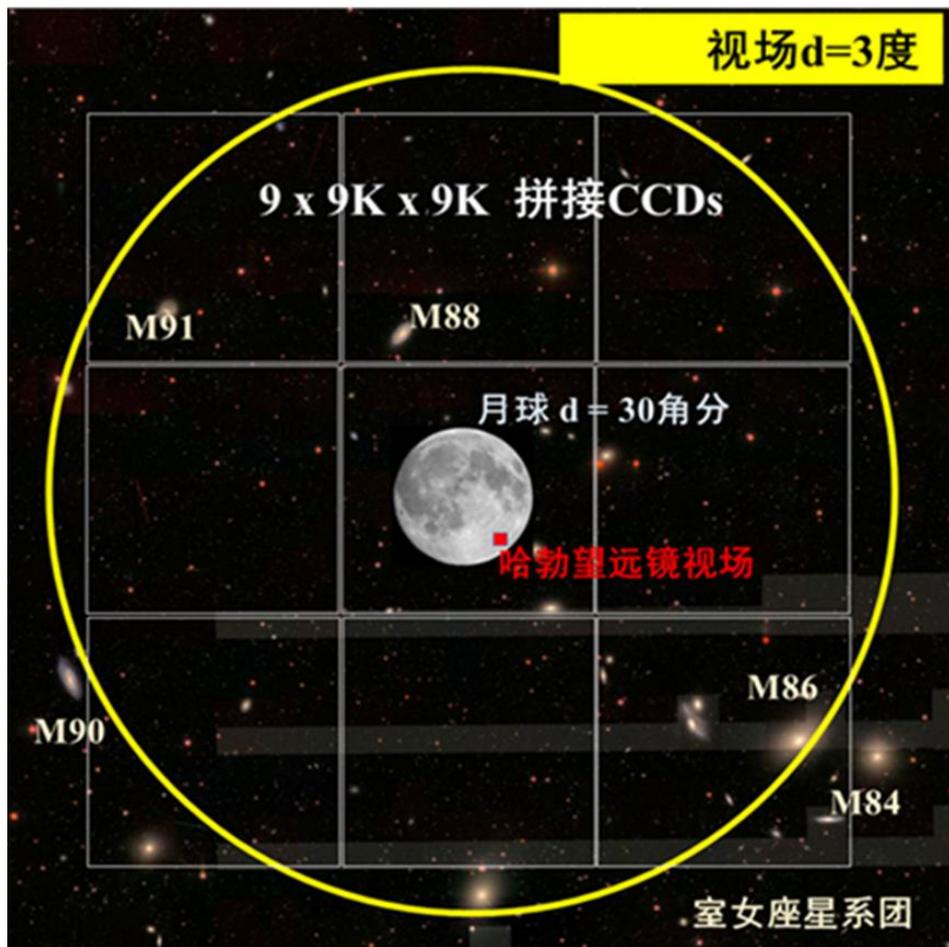


- 国际上已有一批中等、大口径**精测望远镜**：口径大，**视场小**；适合观测**暗弱天体**，**不适合时域巡天观测**
- 近年来，国际上已经陆续出现若干台**大视场时域巡天望远镜**，包括ZTF、PS1等；但**望远镜口径较小**

北半球缺少高像质、大通光力时域巡天观测设备：迫切需要研制**中等口径、大视场巡天望远镜及其终端设备**！

# 4. 大视场巡天望远镜 WFST

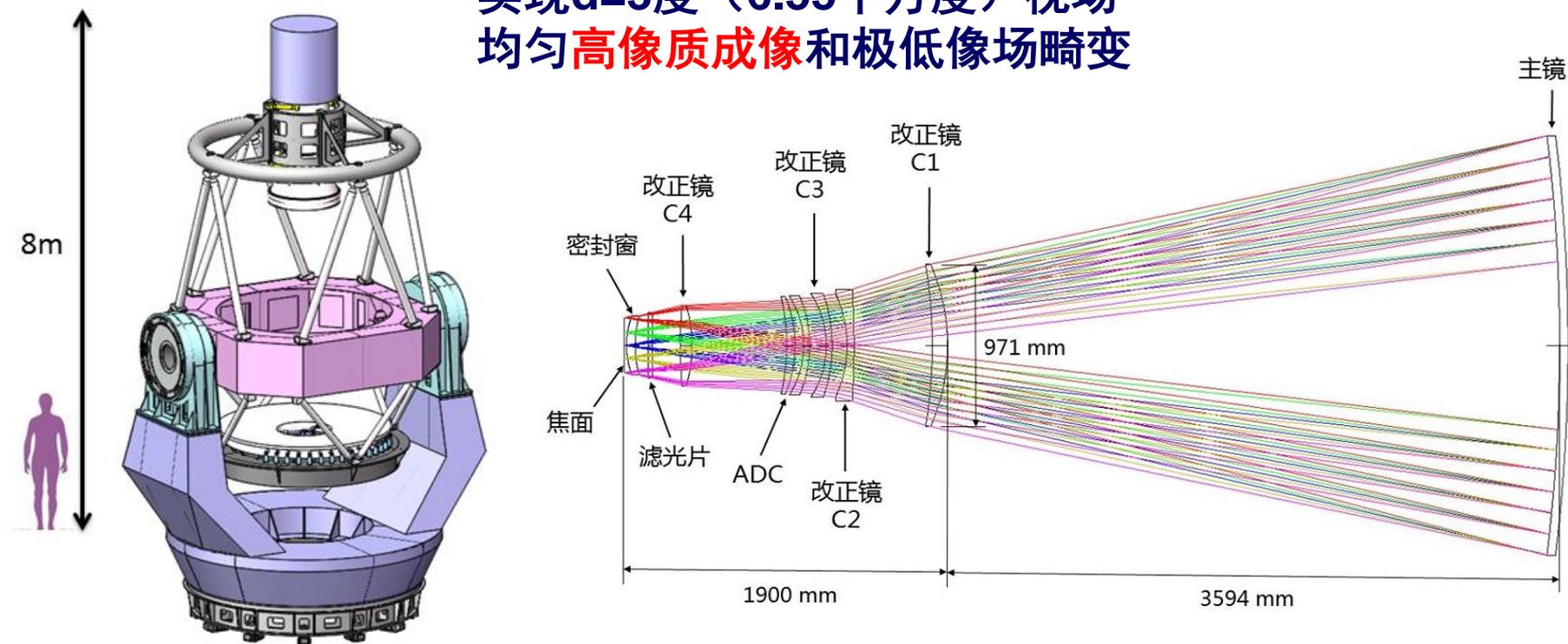
望远镜口径2.5米, 视场3度: 巡天速率每小时600平方度; 3天可以观测北天球一次 → 时域天文、太阳系普查、银河系近场宇宙学



Wide Field Survey Telescope

# A. WFST技术特色 - 大视场高精度光学

实现 $d=3^\circ$ （6.55平方度）视场  
均匀**高像质成像**和极低像场畸变

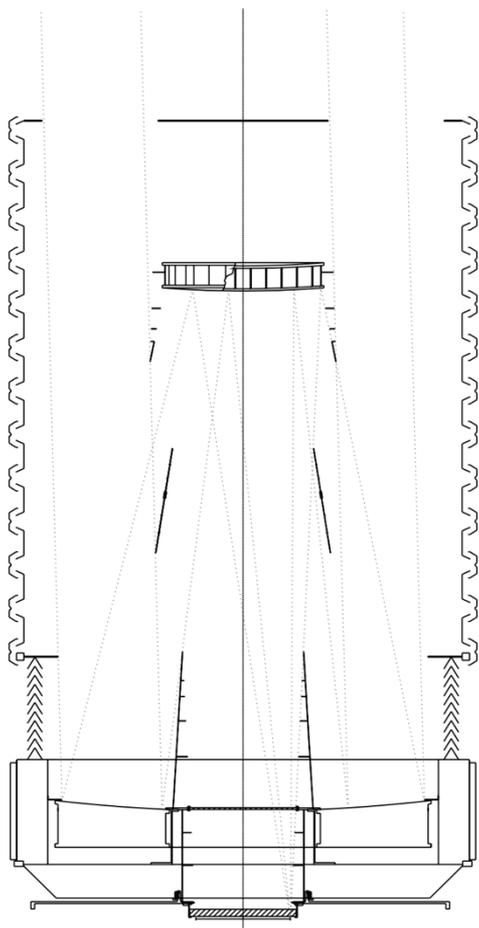


**主焦系统 + ADC + 主动光学**

**配备大气色散补偿改正器（ADC），实现超宽波段高像质观测**

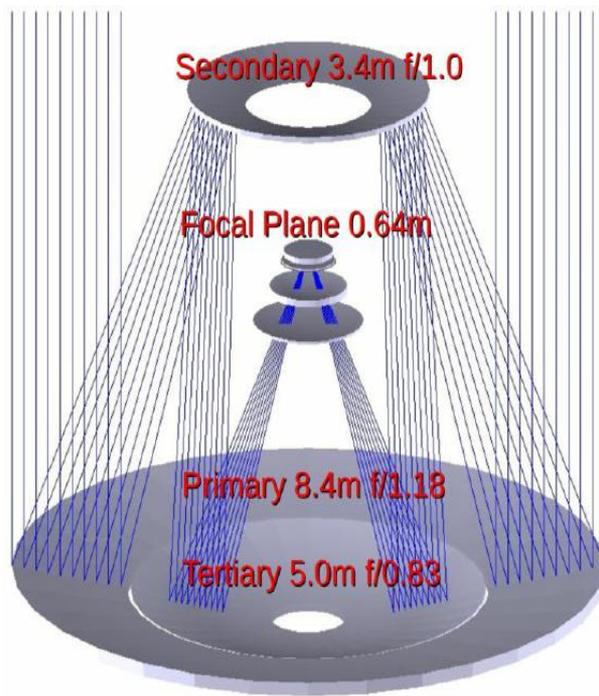
- ◆ 具备**高紫外透过率**特性，对高能暂现源等有更高的探测灵敏度
- ◆ 通光面积大、杂散光少，系统探测**灵敏度高**，具备强巡天能力

# 望远镜光学系统



**SDSS: R-C系统**

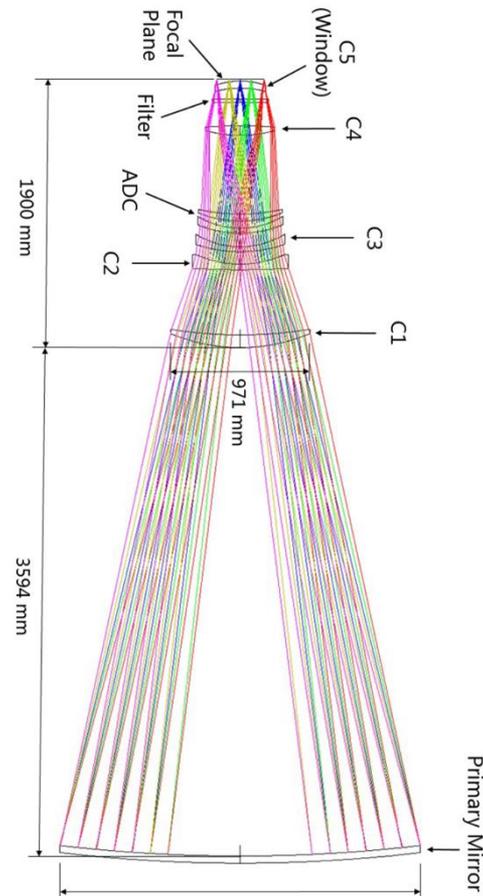
副镜尺寸1.3米, **挡光严重**



**LSST: 三镜系统**

第三镜尺寸5米, **挡光严重**

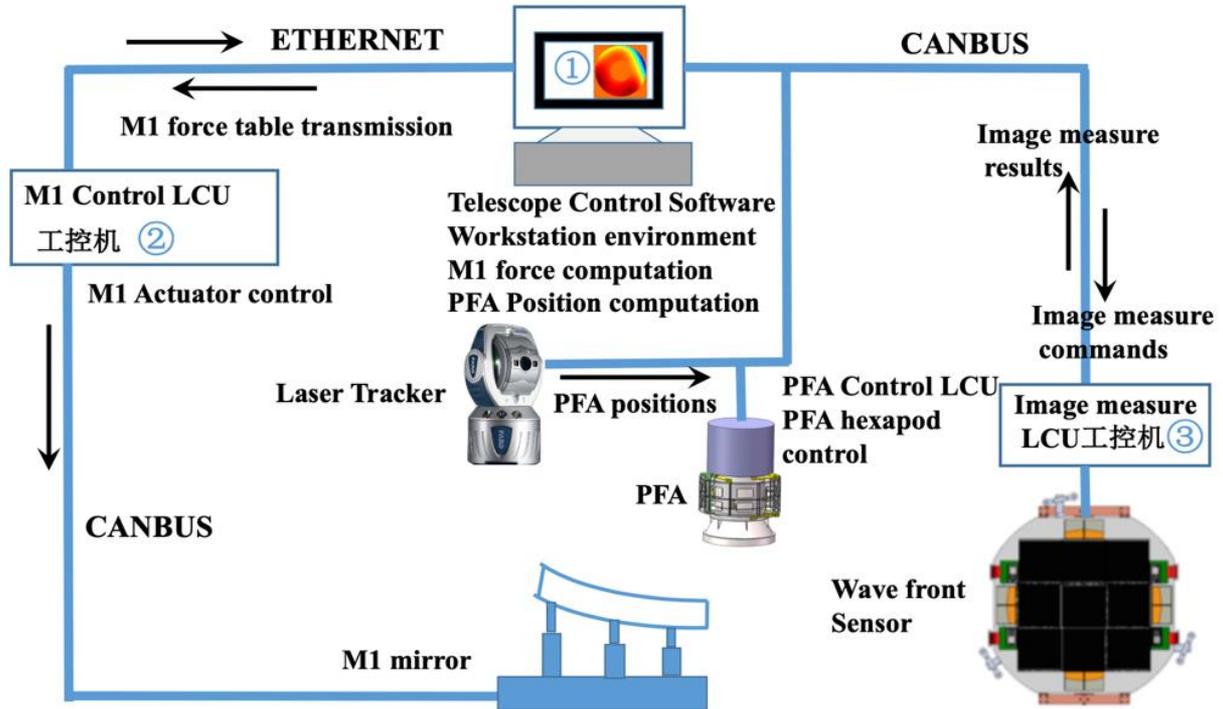
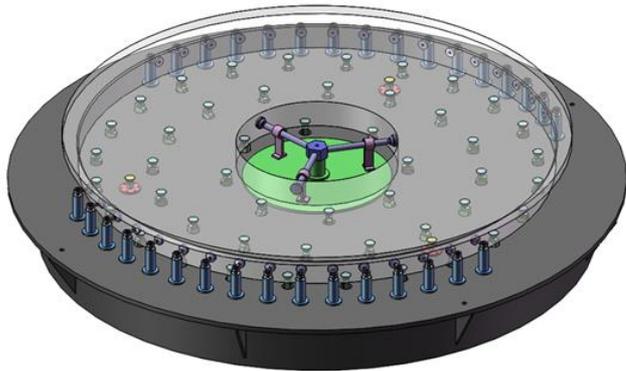
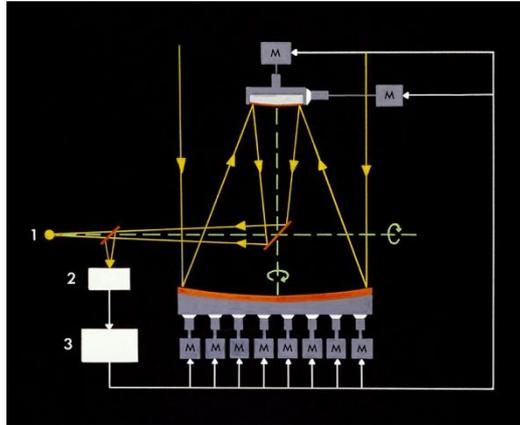
第三镜和主镜同胚, **加工困难**



**WFST: 主焦系统**

透镜尺寸0.97米, **挡光少**

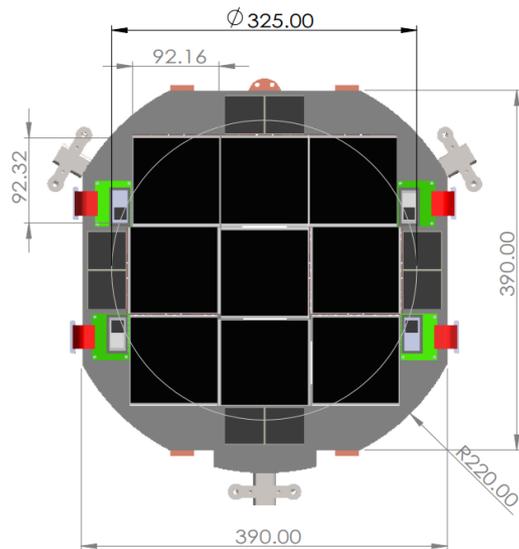
# 主动准直和主镜面形主动矫正



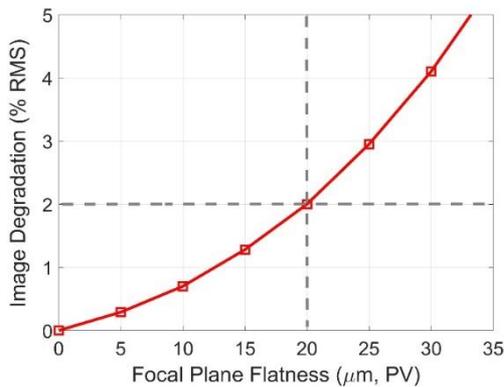
- ◆ **主动准直：** 实时调整主焦装置的前后、偏心和倾斜度，保证像质
- ◆ **主镜面形主动矫正：** 实时矫正主镜重力形变和热形变，保证像质

# B. WFST技术特色 - 大靶面CCD拼接

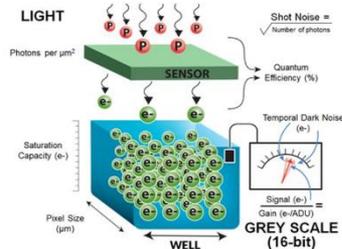
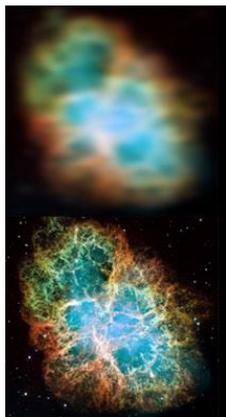
- ◆ **相机视场大**：直径  $d = 325\text{mm}$ 
  - ◆ **大靶面**：采用9片  $9\text{K} \times 9\text{K}$  CCD芯片拼接，像元数  $\sim 7.5$ 亿 (读出控制电子学、制冷)
  - ◆ 相机靶面国内最大、达到国际先进水平
- ◆ **成像质量高**：在零下100度、真空，焦面平整度优于20微米 (CCD拼接)
- ◆ **北半球巡天能力最强的光学时域观测设备**



像质退化



焦面平整度

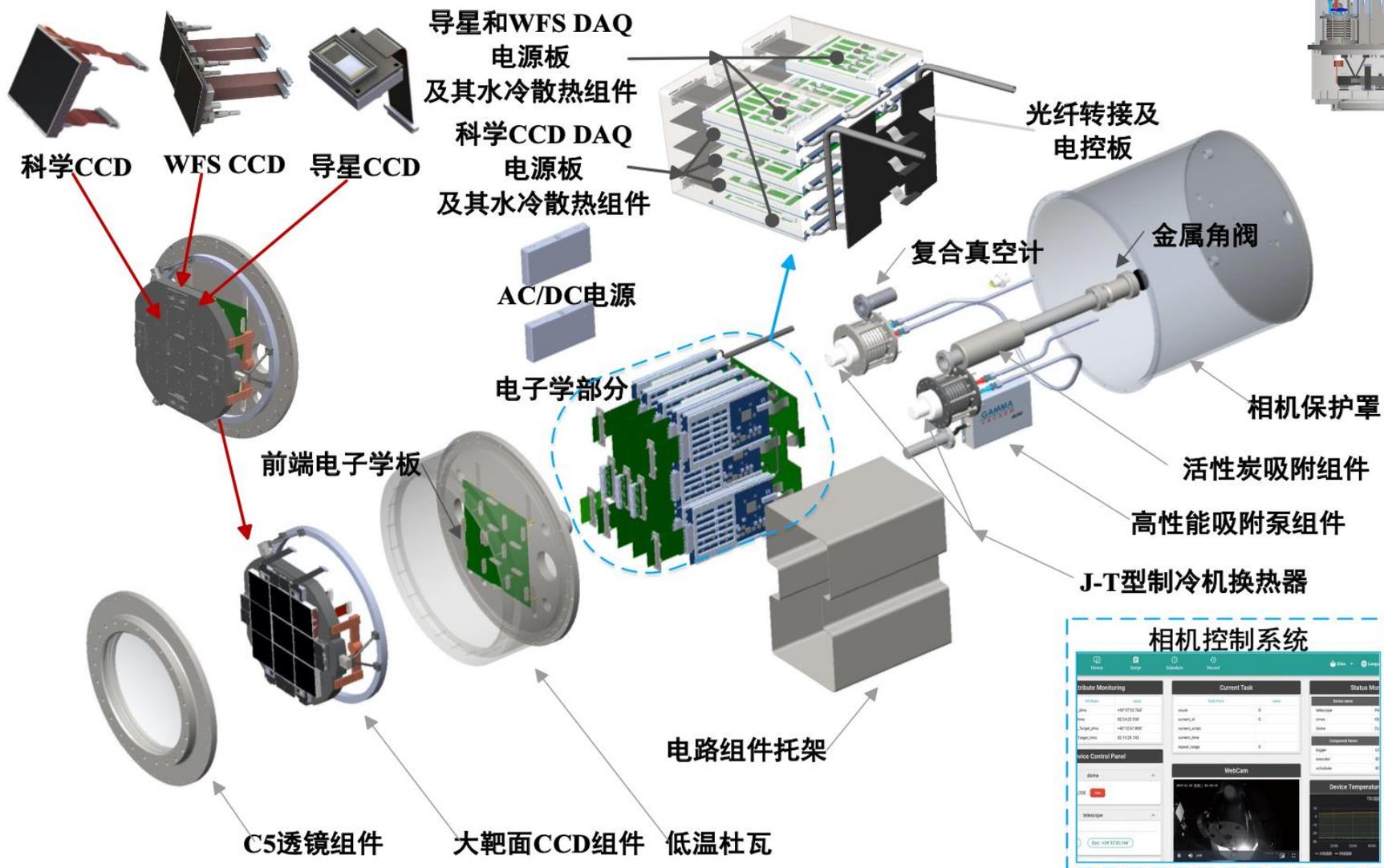
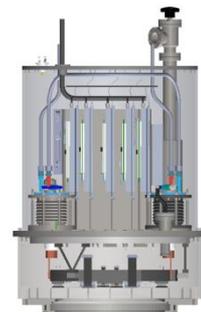


$10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$

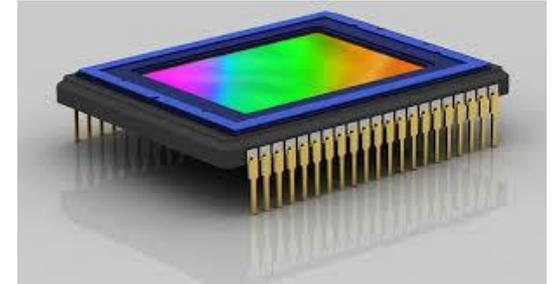
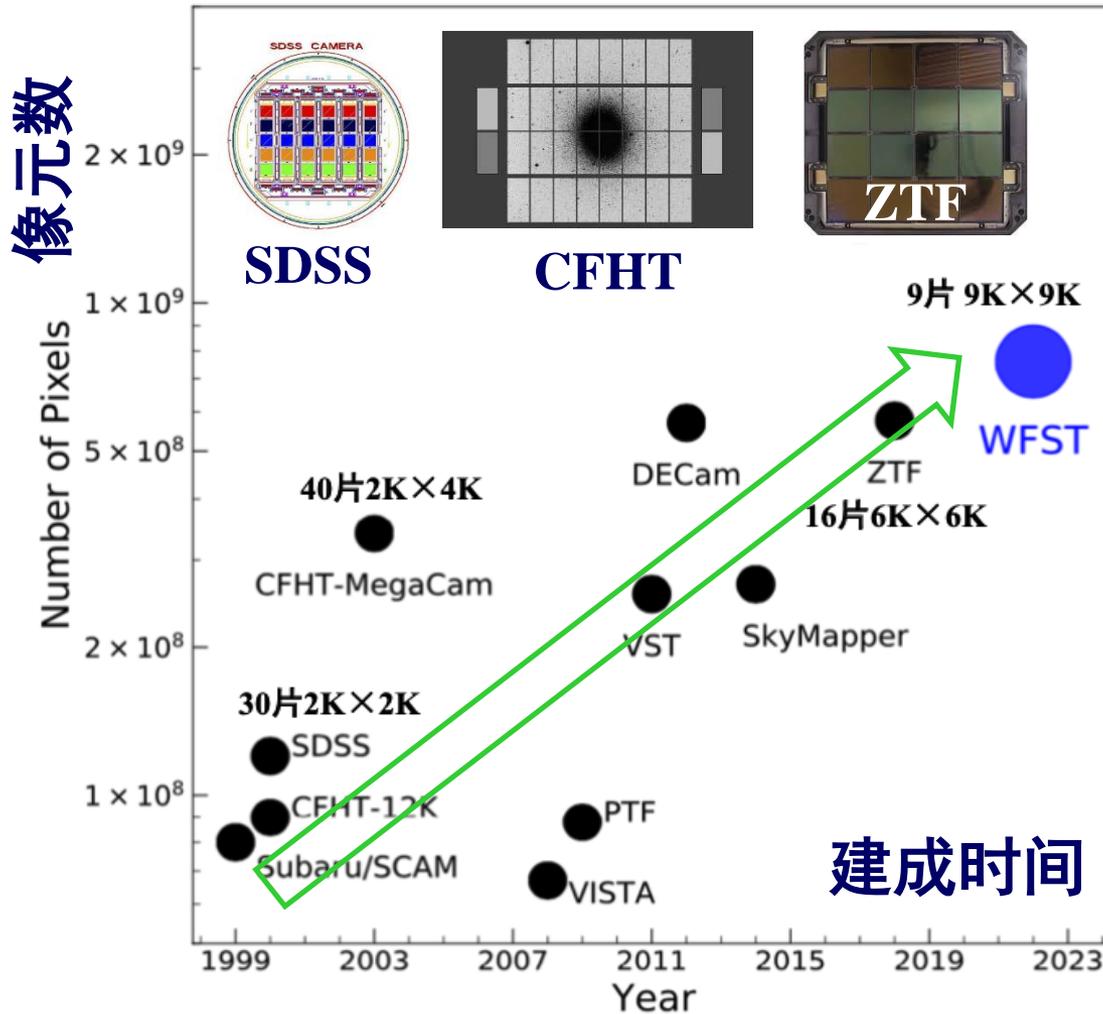


# 相机系统爆炸图

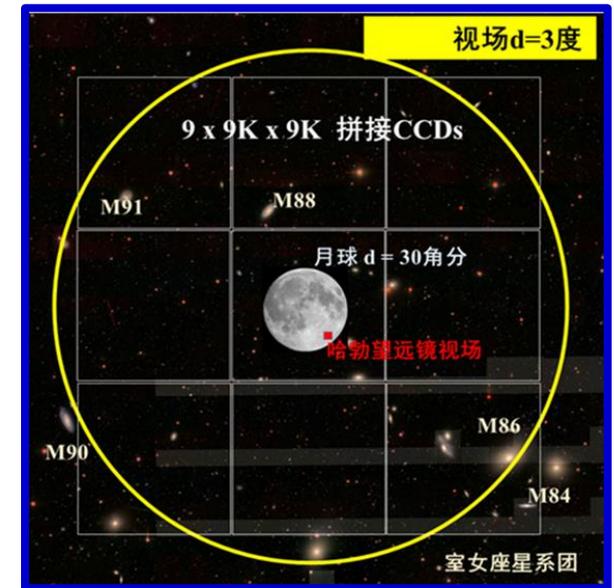
## 高集成度天文终端设备



# CCD相机 - 国际现状



电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD): 光/电转换器件



WFST大视场大靶面CCD相机，处于国际先进水平。

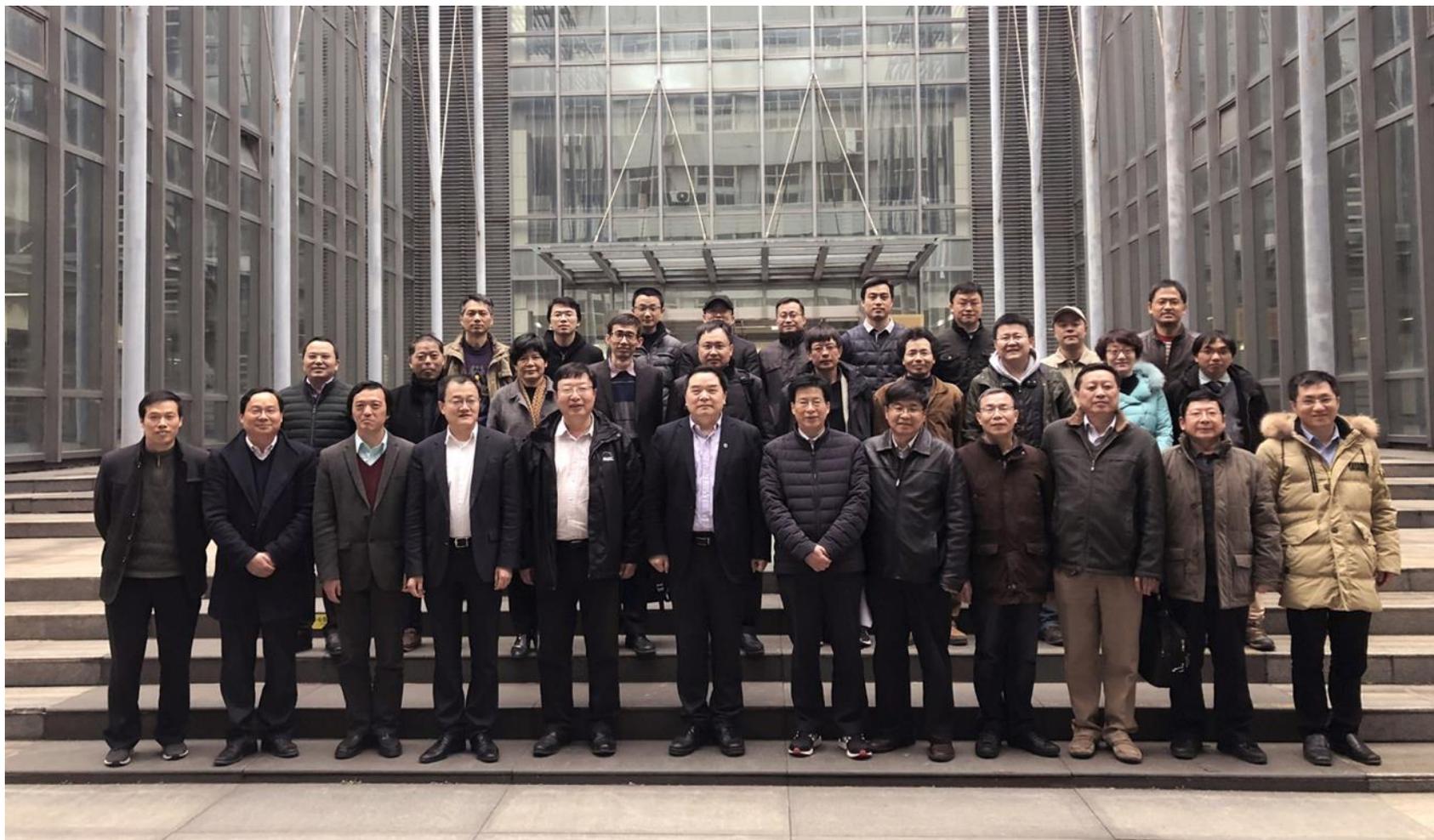
# 5. WFST 项目进展

- ◆ 主焦相机
- ◆ 望远镜本体
- ◆ 望远镜台址
- ◆ 数据分析和科学



# WFST 关键节点

- ◆ 2018年3月1日，**大视场巡天望远镜项目启动会召开**，项目造价 ~ 2亿元人民币



# WFST 关键节点

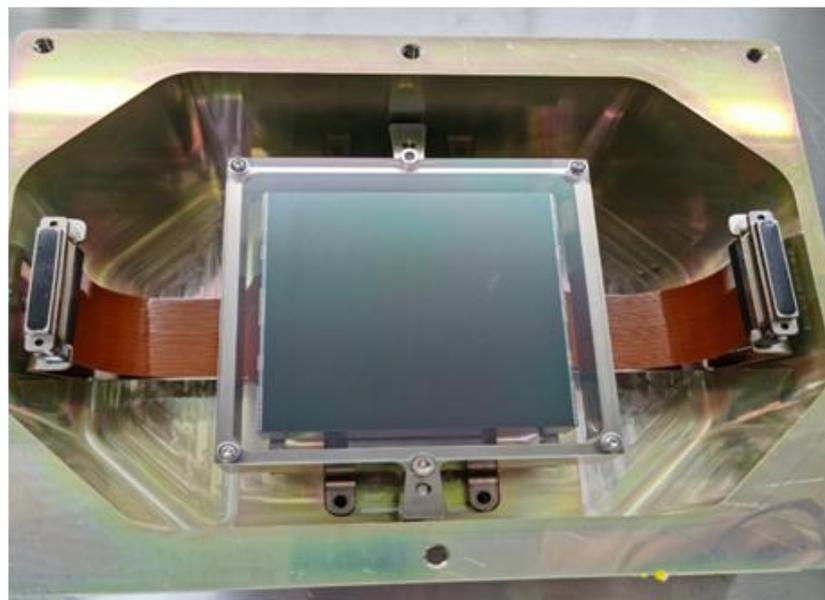
- ◆ 2019年3月12日：签署大视场相机科学CCD芯片采购合同，英国e2V公司，合同金额xxxx万元

2019年11月21日，CCD290-99样片到货



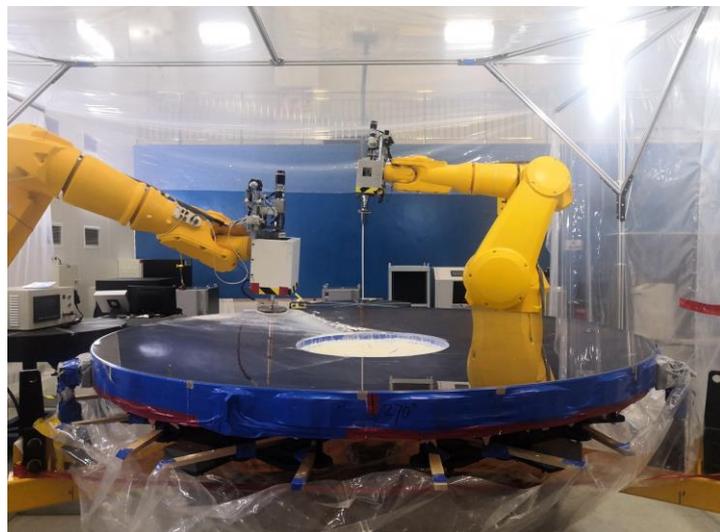
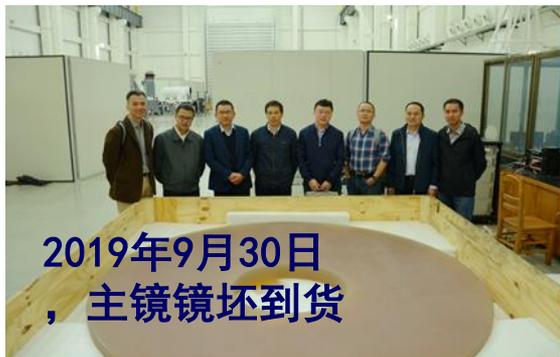
## 科学成像CCD芯片采购合同

货物名称及规格 Commodity and Specification	单价 Unit Price	数量 Quantity	总值 Total Amount	装运期限 Time of Shipment
大视场巡天望远镜 CCD 相机用科学成像 CCD 探测器芯片 Model: CCD290-99-5-F82 Brand: Teledyne e2v	GBP 80,000	1	GBP 80,000.00	合同生效后 4 个月内 WITHIN 4 MONTHS AFTER SIGNED THE CONTRACT
大视场巡天望远镜 CCD 相机用科学成像 CCD 探测器芯片 Model: CCD290-99-1-F82 Brand: Teledyne e2v	GBP 194,000	4	GBP 776,000.00	合同生效后 17 个月内 WITHIN 17 MONTHS AFTER SIGNED THE CONTRACT
大视场巡天望远镜 CCD 相机用科学成像 CCD 探测器芯片 Model: CCD290-99-1-F82 Brand: Teledyne e2v	GBP 194,000	6	GBP 1,164,000.00	合同生效后 24 个月内 WITHIN 24 MONTHS AFTER SIGNED THE CONTRACT
AHCC19B03069 Hefei China	TOTAL AMOUNT: GBP2,020,000.00			



# WFST 关键节点

- ◆ 2019年7月11日：与中科院光电所签署**望远镜本体建设合同**，合同金额xxxx万元，合同期30个月



## 望远镜本体建设合同

中国科学技术大学大视场巡天望远镜本体  
采购合同书

采购人（甲方）：中国科学技术大学

供应商（乙方）：中国科学院光电技术研究所

签订地点：安徽省合肥市

项目名称：中国科学技术大学大视场巡天望远镜本体采购

项目编号：ZF2019-06-0051

为进一步明确双方的责任，确保合同的顺利履行，根据《中华人民共和国合同法》之规定，经甲乙双方充分协商，特订立本合同，以便共同遵守。

**第一条** 货物的名称、品种、规格、数量和价格：（若货物过多则另附表，如有附表则必须加盖印章）

货物名称	规格型号	单位	数量	单价(万元)	小计(万元)	备注
------	------	----	----	--------	--------	----

本合同一式捌份，甲方执陆份，乙方执贰份，自双方当事人签字盖章之日起生效。

采购人（甲方）：（公章）

中国科学技术大学

地址：安徽省合肥市

法定代表人：包信和

委托代理人：张坤鹏

电话：0551-63600657

开户银行：中国工商银行蜀山支行营业部

账号：1842012188

供应商（乙方）：（公章）

中国科学院光电技术研究所

地址：四川省成都市

法定代表人：罗先刚

委托代理人：张坤鹏

电话：028-85100319

开户银行：中国银行双流光电所支行

账号：125255436815

2019年7月11日

2019年7月11日

# WFST 关键节点

## ◆ 2020年04月16日：《中国科学技术大学—海西州人民政府关于“大视场巡天望远镜项目”合作协议》签署

### （二）乙方职责

1. 成立大视场巡天望远镜项目建设协调领导小组，负责做好项目的协调和建设保障工作；项目建设期间，乙方须提供必要的工作、生活场所等支持甲方建设。

2. 大视场巡天望远镜项目在赛什腾山的建设用地由乙方保障，用地的提供应满足大视场巡天望远镜项目的建设需求。

3. 乙方筹措资金按甲方需求建设完成大视场巡天望远镜项目望远镜圆顶和道路、场地平整、通讯、电力等配套基础设施。2019 年底前完成场地平整；2020 年底前完成道路、输电线路、通信网络等基础设施，提供“三通”互联接口；2021 年 8 月底前完成大视场巡天望远镜圆顶建设，为望远镜安装提供支撑。

### 五、保密义务

甲乙双方在项目合作过程中互相提供的文件、资料、数据要严格保密，并只能在合作双方的业务范围内使用。

## 与海西州签署项目合作协议

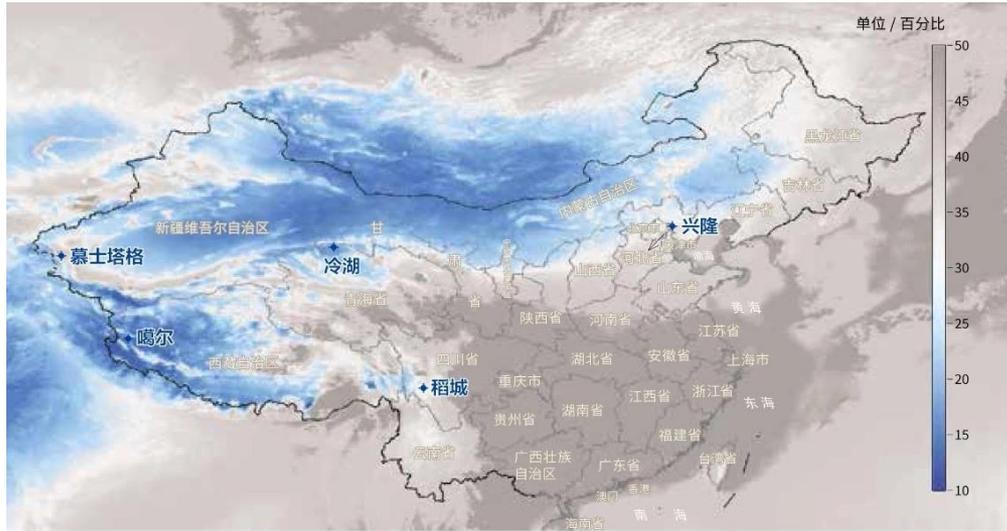
中国科学技术大学

海西州人民政府

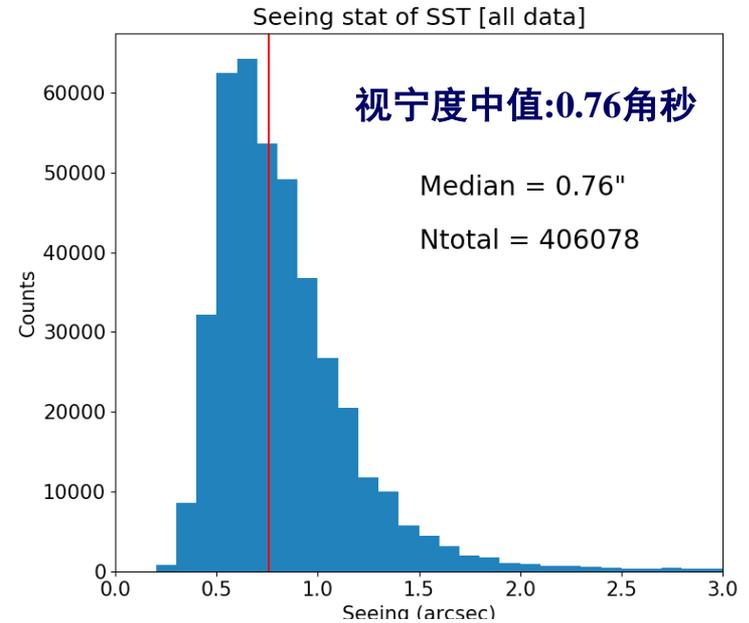
## 关于“大视场巡天望远镜项目” 合作协议

二〇二〇年四月

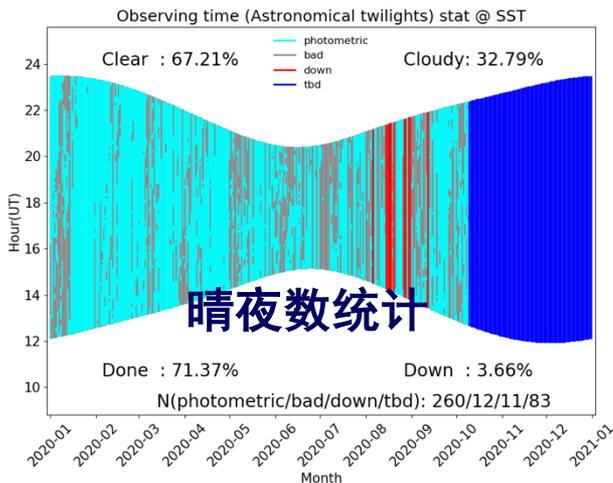
# 望远镜台址



◆ 望远镜台址：**青海省冷湖赛什腾山，海拔4200米**



台址视宁度监测数据（角秒）



晴夜数统计



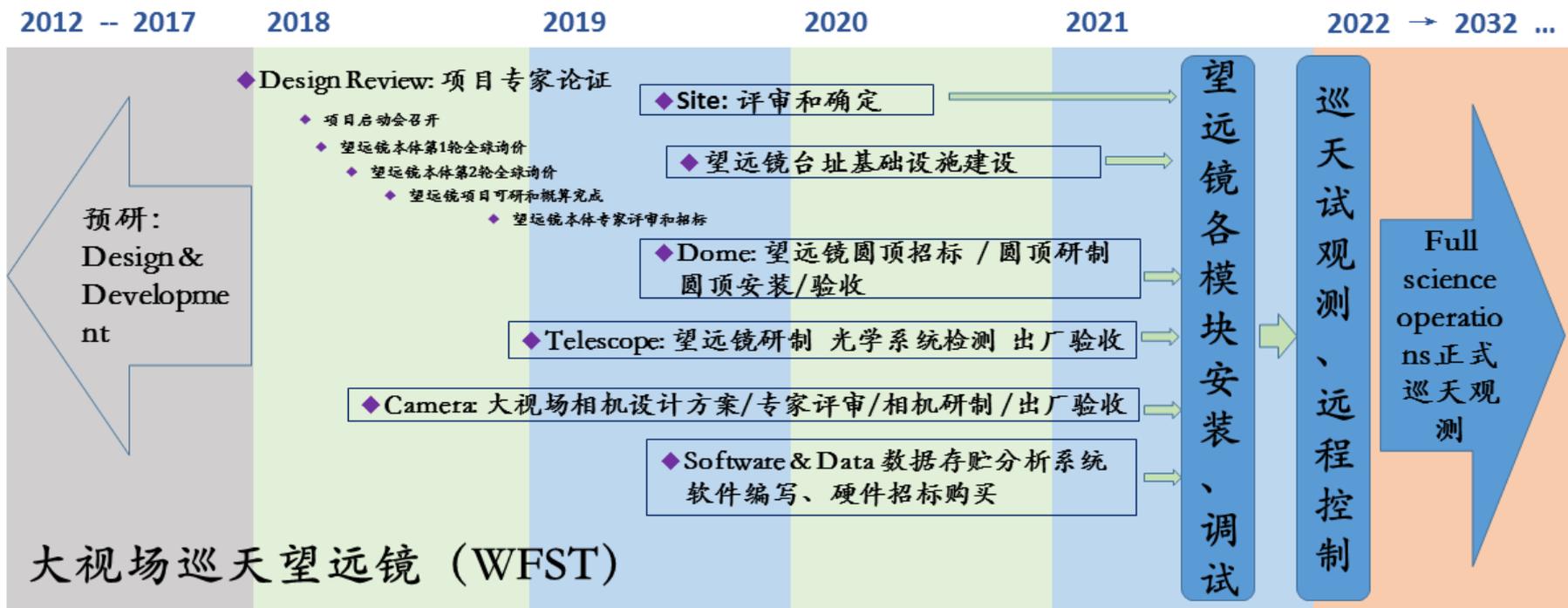
2017年以来的监测数据表明，冷湖赛什腾山台址年平均晴夜数多、夜天光背景低，视宁度优良，风沙少，是天文观测的理想台址。

# 数据分析和科学

- ◆ **WFST项目科学负责人：王挺贵**
- ◆ **数据处理分析负责人：范璐璐、郑宪忠**
- ◆ **科学工作组例会：每周五上午（蒋凝、肖琳、蔡振翼等组织）**
- ◆ **大视场巡天数据处理研讨会：数据处理pipeline需求及分工**
  - 组织协调：郑宪忠，范璐璐
  - 望远镜控制：王坚
  - 图像模拟与仿真：朱青峰，贾鹏，冒雨萌
  - 科学目标和巡天策略：郑宪忠，周旭，邹虎，王挺贵，王俊贤
  - 仪器和测光定标（实时处理 pipeline）：邹虎，盛振峰，
  - 图像相减，变源搜寻分类（Transit）：蒋凝，肖琳，孙天瑞，李晔
  - 光变曲线 pipeline：孙天瑞，蔡振翼，蒋凝
  - 移动天体搜寻：赵海斌，李彬，孙天瑞，秦礼萍
  - 静态图像叠加：郑宪忠，邵立，邹虎，蔡振翼，张淼森
  - 数据传输、存储、计算、释放、发布：吴雪峰，王挺贵，范璐璐



# 项目进展



2021年底望远镜建设完成，开展天文试观测；2022年-2032年开展正式天文巡天观测。

# WFST科学目标

- ◆ 对**动态宇宙**系统监测，证认一批暂现源，包括引力波源电磁对应体

- ◆ 每年探测：几十个到几百个致密天体并合事件；  
~ 千个超新星爆发事件；发现未知天文事件



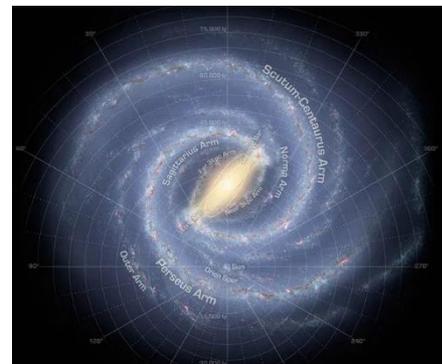
- ◆ 完成**外太阳系**区域的全景普查，发现新的太阳系矮行星，力争取得大行星重大发现

- ◆ ~ 1百万颗太阳系天体的轨道和物理参数
- ◆ ~ 3000颗 尺寸 > 140米的近地天体监测

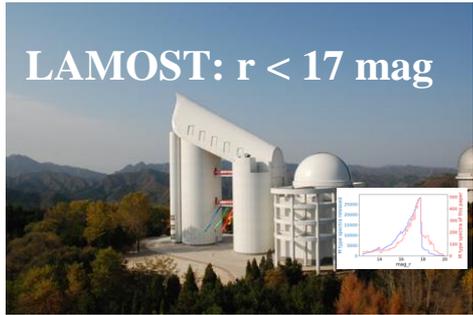
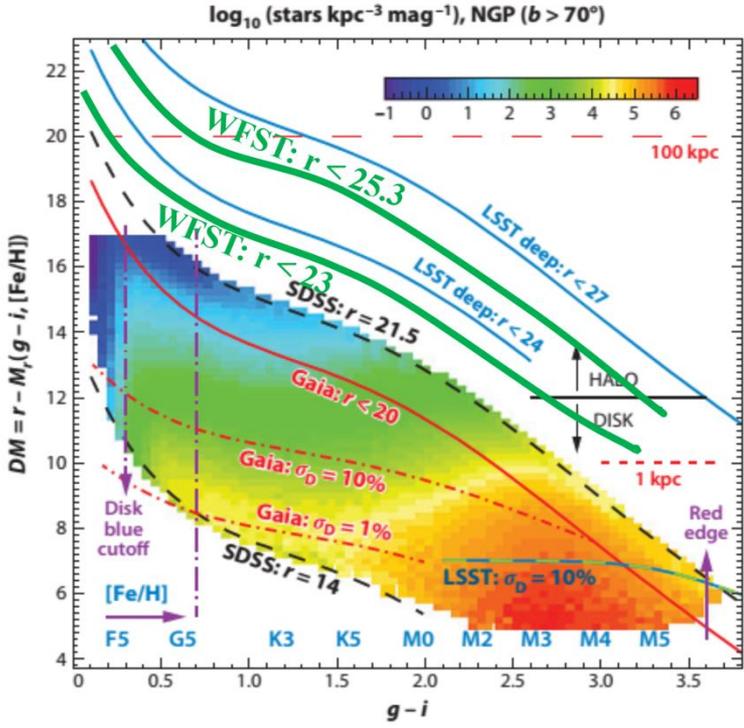


- ◆ 实现对**近邻宇宙和银河系**组成、结构和形成有整体性的认识：数据累积

- ◆ ~ >40-80新发现本星系群的矮星系（**暗物质探测**）
- ◆ ~ 10万颗  $r < 23$ 等近邻恒星（视差、自行）星表
- ◆ ~ 50亿颗  $r < 25$ 等天体高精度测光星表（传世数据）



# 银河系和近场宇宙学

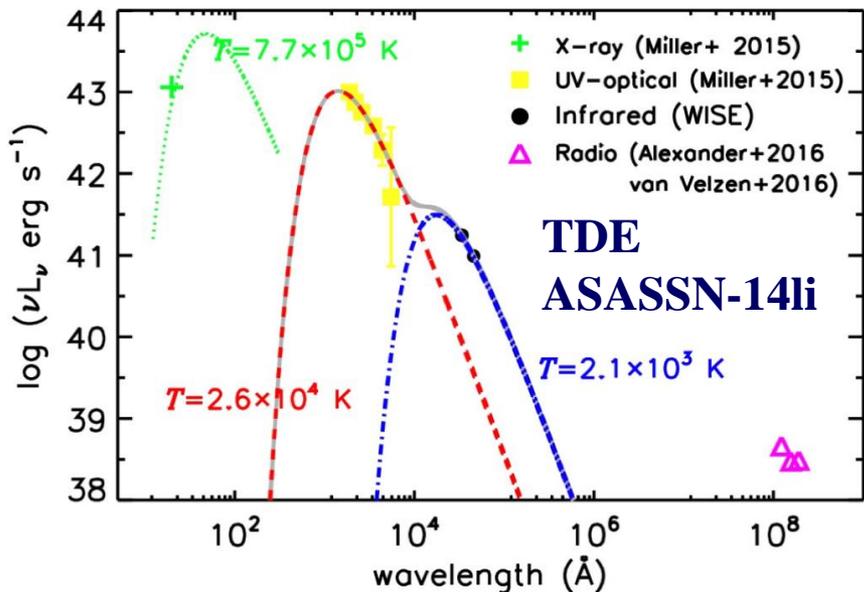


6年巡天，每波段100次数据积累，**r = 25星等**  
**深场巡天**：银河系的组成和历史；发现矮星系（第一代星系遗迹：**星系考古学**）和UDGs（**暗物质少**）等暗星系，开展近邻宇宙整体物质分布和结构演化研究；**提供传世星表**。

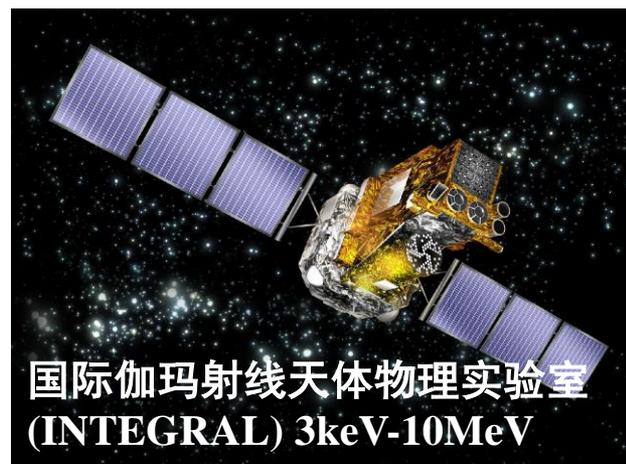
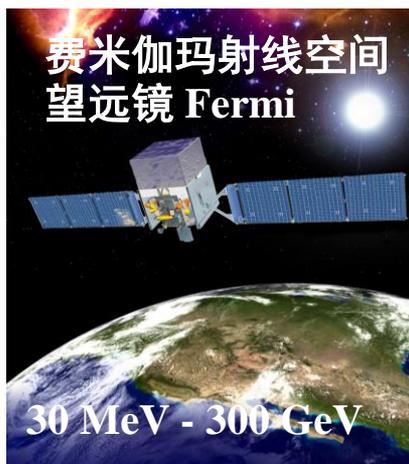
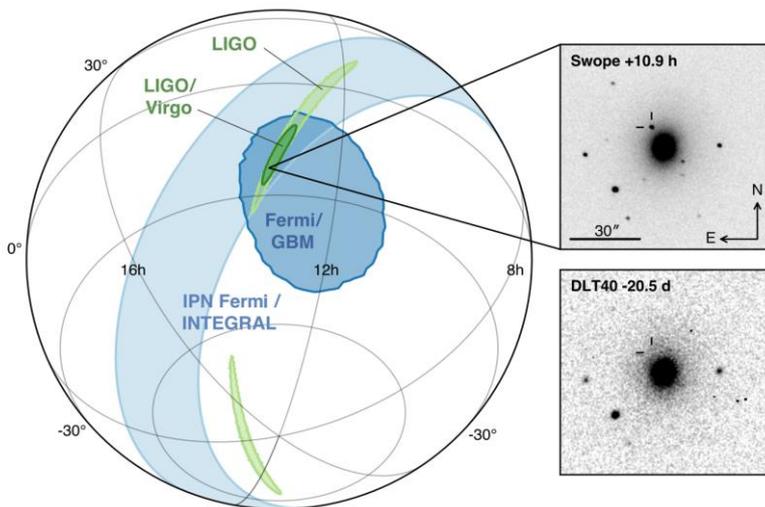


# 6. 中国时域巡天设备

## 与我国时域设备协同观测

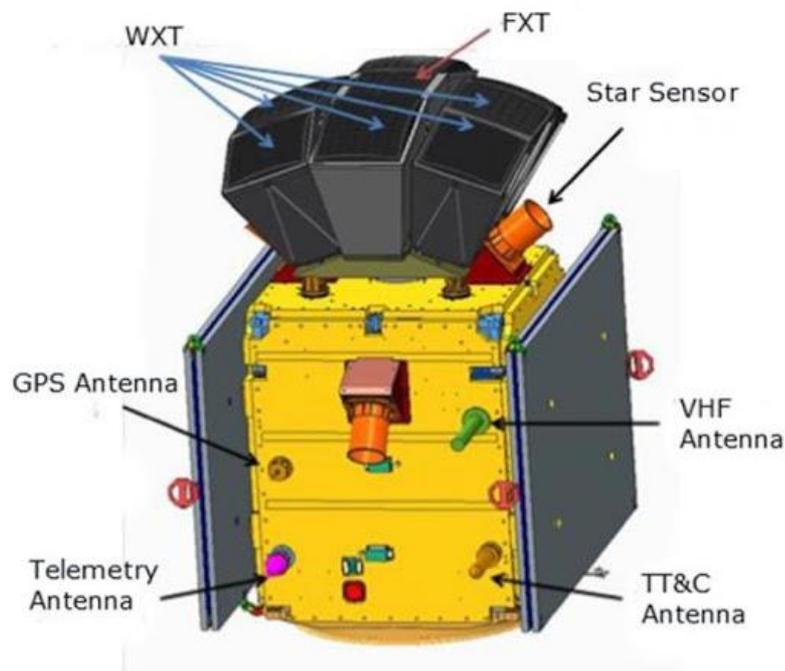
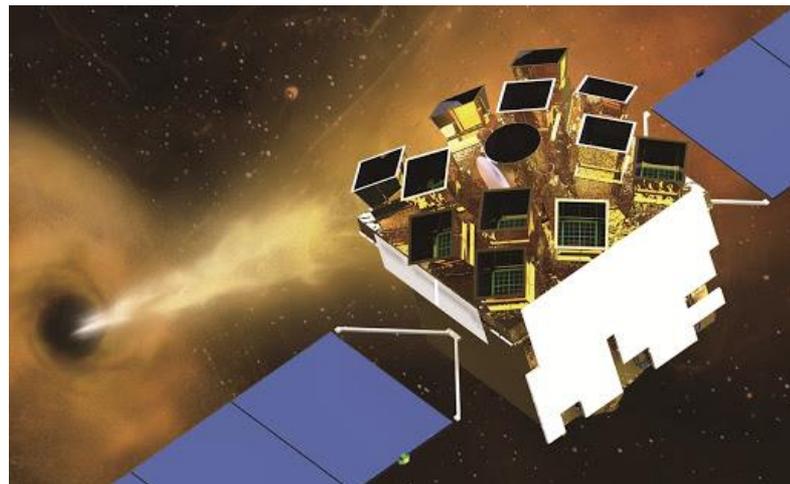


- ◆ TDE、引力波、伽玛暴、超新星等时域天文现象，都具有**多波段、多信使**（宇宙线、引力波、中微子等）特点
- ◆ 空间卫星和引力波探测设备，**空间分辨率较低**：需要地面光学巡天精确定位和发现其光学对应体等
- ◆ WFST与我国未来几年里**空间与地面**时域巡天设备开展**多波段协同观测**，有助于提升解决关键科学问题能力

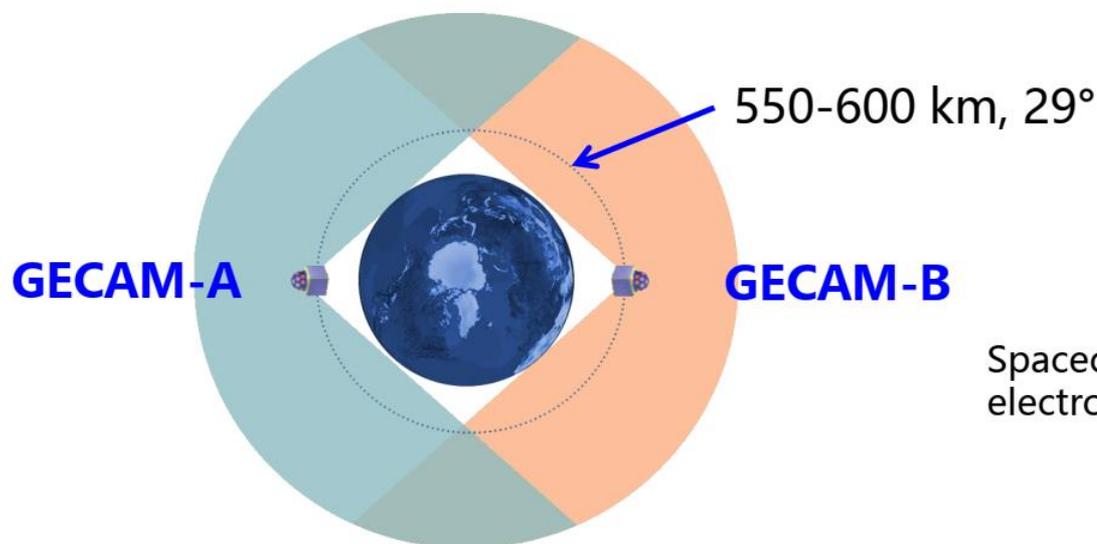


# 爱因斯坦探针（Einstein Probe, EP）卫星

- ◆ 中国科学院空间科学战略性先导专项一期，4颗科学卫星：**悟空**、**墨子**、**慧眼**和实践十号
- ◆ 爱因斯坦探针卫星：**空间科学先导专项二期**
- ◆ 主要科学目标：
  - ◆ 宇宙各类 **X 射线** 暂现源、爆发源系统普查监测
  - ◆ 大样本 X 射线源的时变监测
- ◆ 大视场龙虾眼望远镜
  - ◆ 能段 0.2-4.5keV
  - ◆ **分辨率 4.6角分**
  - ◆ 视场60度x 60度
- ◆ 预计于2022年发射升空



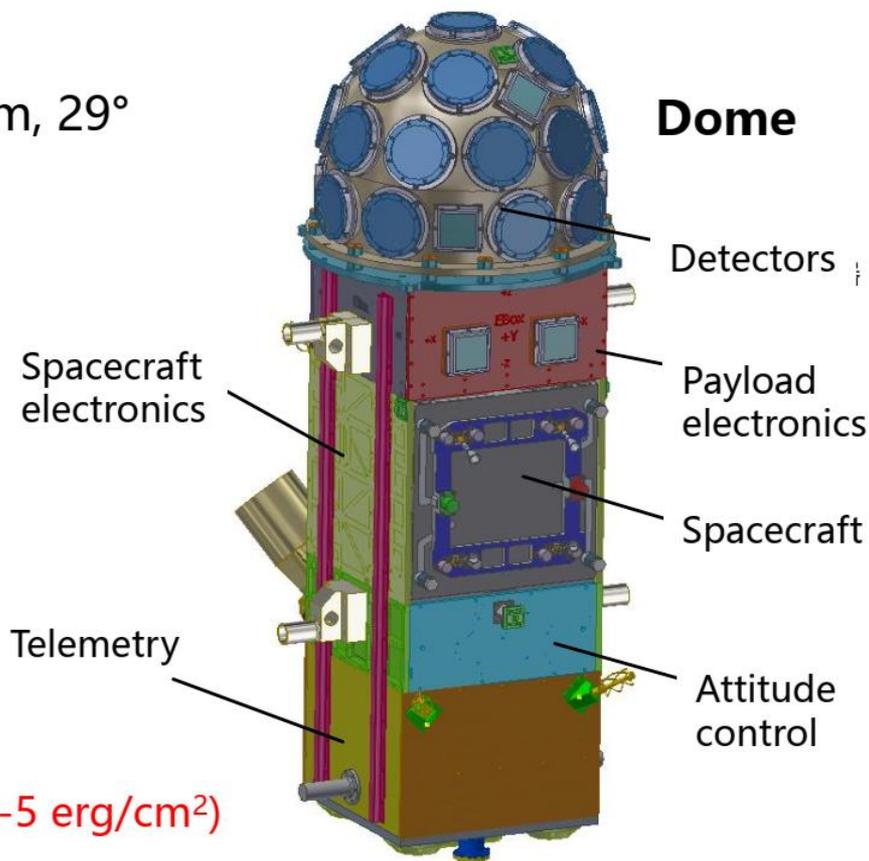
# GECAM



## ● Characteristics

- **FOV:** 100% all-sky
- **Sensitivity:**  $\sim 2 \times 10^{-8}$  erg/cm<sup>2</sup>/s
- **Localization:**  $\sim 1$  deg (1- $\sigma$  stat.,  $1 \times 10^{-5}$  erg/cm<sup>2</sup>)
- **Energy band:** 6 keV – 5 MeV

## ● Planned to launch by the end of 2020



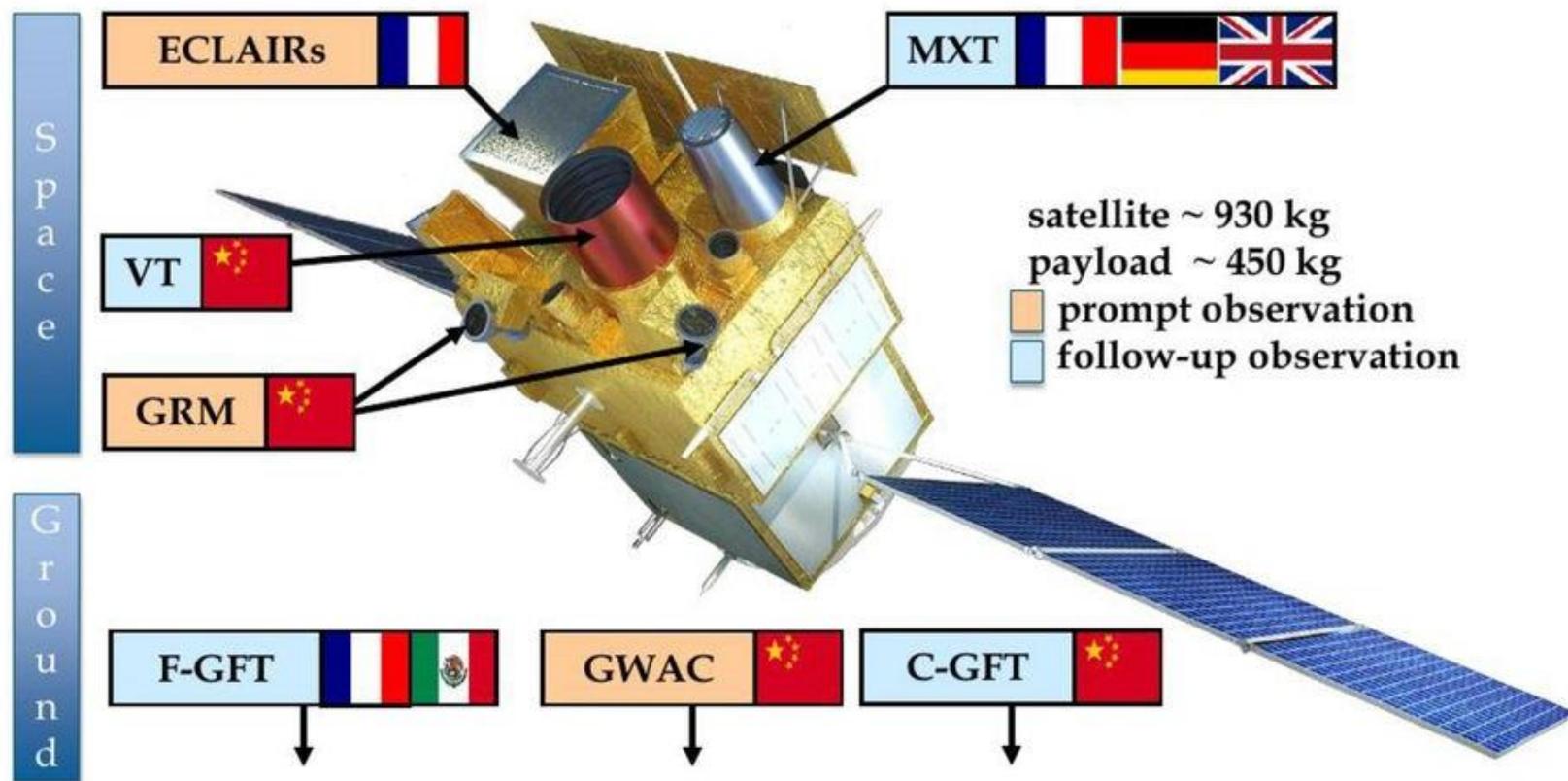
**GECAM satellite**  
(~140 kg for each)

引力波暴高能电磁对应体全天监测器，GECAM：空间科学先导专项二期，包含两颗微小卫星，位于地球的两侧，可联合监测全部天区。

# SVOM 天基多波段空间变源监视器

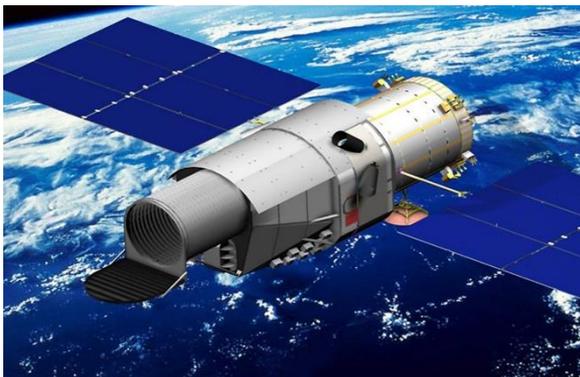
« Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor »

Launch in Dec. 2021, for 3+2 years

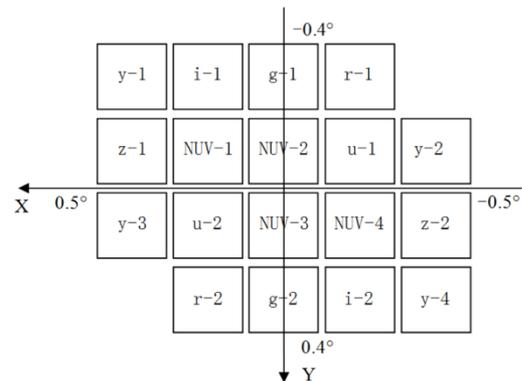
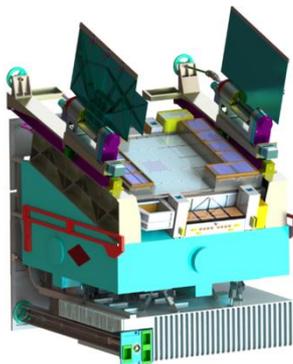


中法合作空间观测项目，目标是探测伽马射线暴并确定其特征，计划于2021年发射（ $\gamma$ -射线、X-射线、光学（45厘米，FoV21x21角分）望远镜。

# CSST



2025年  
-  
2035年

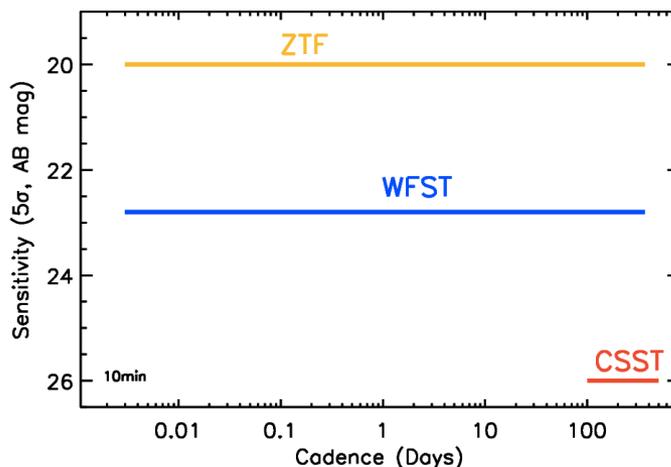
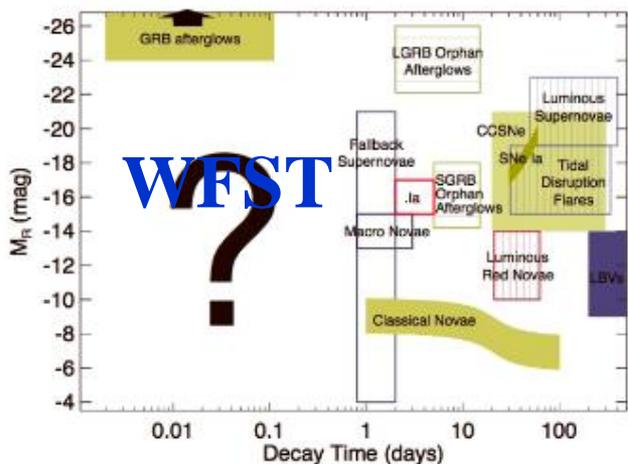


空间站2米望远镜 (CSST)

巡天模块整体结构模型

滤光片排布方式

CSST: 主镜2米, 视场1.1平方度, 17500平方度NUVugrizY巡天, 观测2次,  $r=25.5$ 星等; 400平方度深场巡天, 观测10次,  $r=26.5$ 星等。主要科学目标: 星系宇宙学



- ◆ **WFST: “分钟 -- 月”量级的爆发事件观测, 提供新科学机遇探索空间**
- ◆ **近场宇宙学: WFST和CSST互补**

# 总结

- ◆ **时域天文学**是美国《2010年天体物理学十年规划》中重点指出的未来发展方向。未来10-20年将是天文学“金矿”型重大前沿科学领域！
- ◆ **地面光学广域时域巡天**：高效搜寻和监测天文动态事件，开展时域巡天观测研究，发现、探索各类新天体、新现象，研究新物理。
- ◆ **大视场巡天望远镜**：主镜口径2.5米、视场直径3度；3晚可以观测北天2万平方度天区一次。**北半球光学图像巡天能力最强时域设备。**



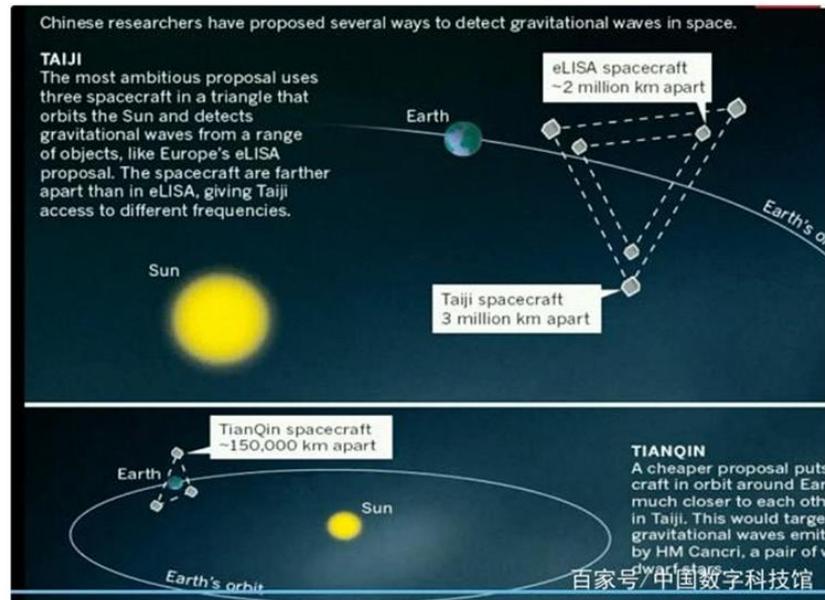
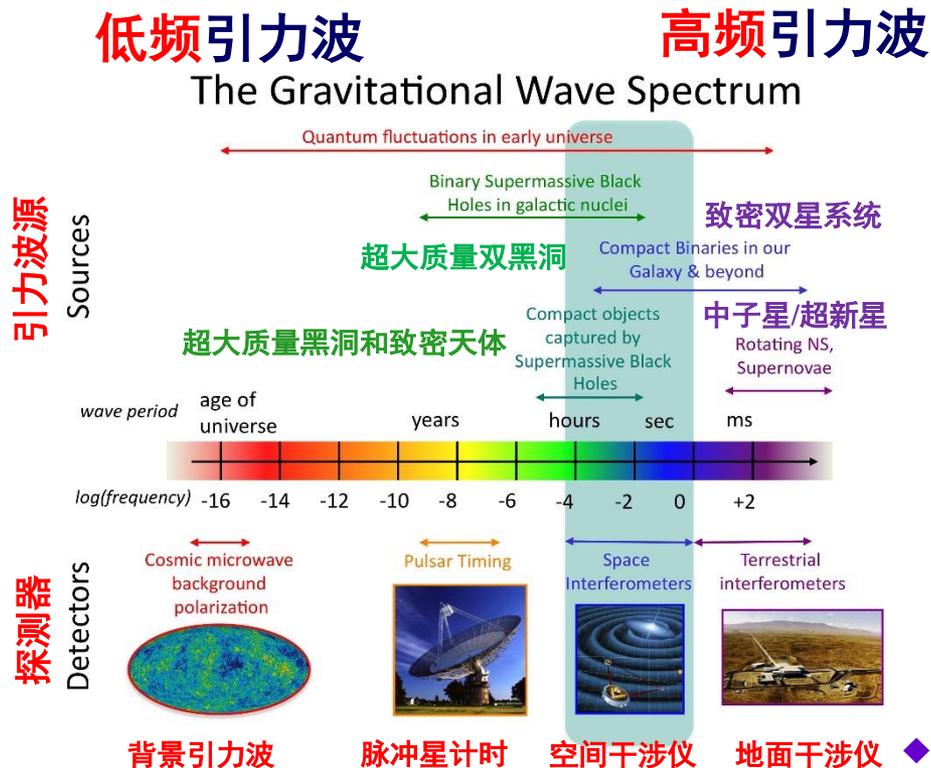
## Industrial Revolution in Astronomy 天文学工业革命

地面光学广域时域巡天 →  
大规模时域和传世数据 →  
更为广阔的探索空间!





# 引力波探测



- ◆ **WFST核心科学目标之一是致密星并合引力波事件研究：高频引力波**
- ◆ **WFST可观测双致密星并合、黑洞俘获致密星等引力波电磁对应体**

- ◆ **太极计划：发射三颗卫星组成边长300万公里的等边三角形，绕日运行，彼此形成6路干涉激光**
- ◆ **天琴计划：在10万公里高度的地球轨道上，部署三颗绕地卫星，组成臂长17万公里的等边三角形编队**