

西安电子科技大学

《空间科学导论》

课程报告



题目： Preliminary Introduction to Aerospace Science and Technology

学院： 空间科学与技术学院 专业： 空间科学与技术

学号： 20009100716 班级： 2016029

姓名： 王梦祥

完成时间： 2022 年 6 月 1 日

# 目录

一、综述与背景 .....	1
1.1 中国空间科学发展的路线图 .....	1
1.2 摆脱“航天大国，空间科学小国”的尴尬 .....	1
1.3 课程内容 .....	1
二、FAST 天眼 .....	3
1 基本情况 .....	3
2 关键技术 .....	3
2.1 总括 .....	3
2.2 主动反射面整网变形控制 .....	4
3 成果分析 .....	7
3.2 首批数据结果（2017-10-10） .....	8
三、SKA—平方公里阵* .....	9
1 基本情况 .....	9
2 关键技术 .....	11
2.1 SKA 稀疏低频阵列系统功能指标分析 .....	11
2.2 SKA 低频孔径阵列系统架构的研究 .....	13
2.3 SKA 大数据的应对与挑战 .....	15
四、韦伯望远镜* .....	17
1 基本情况 .....	17
2 关键技术 .....	21
2.1 詹姆斯·韦伯太空望远镜低温热控系统分析 .....	21
五、引力波探测 .....	23
1 基本情况 .....	23
2 关键技术：GW150914 全过程解读 .....	25
2.1 技术背景 .....	25
2.2 GW150914 .....	25
六、黑洞探测 .....	27
1 基本情况 .....	27
2 技术研究历史 .....	29
七、引用文献 / References .....	31

八、部分进度日志 .....	33
----------------	----

## 一、综述与背景

吴季说：“爱因斯坦曾经预言，自然科学将逐渐向宏观和微观两个前沿转移。而空间科学的研究正是既瞄准宏观的太空和宇宙，又瞄准微观的粒子和生命起源。因此可以说，空间科学是产生重大科学突破的前沿科学。”

中科院在《2016—2030 空间科学规划研究报告》中较为完善地分析了空间科学技术情况和基本未来规划。该规划报告主要由近 30 位科学家合力完成，阐述了至 2030 年中国空间科学拟研究的前沿科学问题，提出了中国至 2030 年发展战略目标、空间科学计划及所包含的科学卫星任务，绘制了至 2030 年中国空间科学发展路线图。

### 1.1 中国空间科学发展的路线图

《2016—2030 空间科学规划研究报告》提出这样的战略目标：至 2030 年，要在宇宙的形成和演化、系外行星和地外生命的探索、太阳系的形成和演化、太阳活动及其对地球空间环境的影响、地球系统的发展演化、超越现有基本物理理论的新物理规律、空间环境下的物质运动规律和生命活动规律等热点科学领域，通过系列科学卫星计划与任务以及“载人航天工程”相关科学计划，取得重大科学发现与创新突破，推动航天和相关高技术的跨越式发展。

为了实现这样的目标，报告提出了共 23 个空间科学计划，至 2030 年预期要发射总计 20 颗左右的科学卫星。这些科学计划包括“黑洞探针”计划、“天体号脉”计划、“链锁”计划、和“火星探测”计划等。

### 1.2 摆脱“航天大国，空间科学小国”的尴尬

从载人航天到嫦娥探月，中国航天技术有了飞速发展。然而，中国空间科学却始终与国际先进水平有很大差距，处于“既是航天大国，又是空间科学小国”的尴尬境地。

中国科学院院士顾逸东等科学家也不止一次呼吁：希望能够改变中国航天领域“重技术、轻科学”的现状。吴季也说：“目前在空间科学领域，我国还是知识的使用国，我国空间科学家大量使用国外科学卫星公开发布的数据。”由于数据首先被国外科学家使用，这种“寄人篱下”的研究工作很难产生重大原始创新成果。

从经济发展的角度看，美国、欧盟等国家的经验也都证明，空间科学是技术创新的强大推动力。吴季举例说：“比如目前手机上使用的高分辨率相机，就是普遍采用了来自深空探测技术领域的 CMOS 成像技术。”空间科学要想有突破，必须采用新的探测方法，这样的发展趋势，不仅可以持续产生新的科学突破，还能极大带动相关技术的发展，并延伸至其他应用领域，带来潜在经济效益。

### 1.3 课程内容

本份资料为空间科学导论课程报告，主要目的在于对当前重点空间科学相关技术主动探索，研究相关资料，了解科学前沿，理解空间科学研究现状等。

本次作业主要涉及深空探测的当前最前沿领域，具有较高开拓视野的价值。具体话题包含：**Fast** 天眼、**SKA** 平方公里阵、韦伯望远镜、引力波探测、黑洞观测（第一张黑洞照片）。具体报告内容包括不限于基本情况（功能性能）/关键技术/处理数据方法、做出哪些成果。首先，我对各研究领域做了初步的了解，同时对其中几个领域做了进一步探究。其中课堂展示的主题为 **SKA** 和**韦伯望远镜**。

- 1、到课：请假和旷课超过三次者，不能参加期末考试，重修这门课；
- 2、每周作业：周报；
- 3、撰写四个报告：基本情况（功能/性能）/关键技术/处理数据方法、做出那些成果
  - （1）Fast——天眼
  - （2）SKA——平方公里阵
  - （3）韦伯望远镜
  - （4）引力波探测
  - （5）黑洞观测——第一张黑洞照片

图 1 作业实际要求（原图）2022 夏

## 二、FAST 天眼

——500 米口径球面射电望远镜

### 1 基本情况

500 米口径球面射电望远镜（英语：Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope，简称 FAST）又被称为“中国天眼”，是中国科学院国家天文台的一座射电望远镜，其落成后至今仍是为世界上最大的单口径望远镜。

FAST 主体工程于 2011 年开工，2016 年落成；是目前世界第一大的填充口径（即全口径均有反射面的）射电望远镜；若是不局限于球面无线电望远镜，则属于仅次于俄罗斯 RATAN-600 环状射电望远镜的，世界第二大的单一口径射电望远镜。



图 2 从上面观察的 FAST（2020 年）

### 2 关键技术

#### 2.1 总括

FAST 系统由主动反射面系统、馈源支撑系统、测量与控制系统、接收机与终端及观测基地等几大部分构成。主动反射面是由上万根钢索和 4450 个反射单元组成的球冠型索膜结构，其外形像一口巨大的锅，接收面积相当于 30 个标准足球场。其创新设计方案为西安电子科技大学首提，由悬索支撑的馈源舱与馈源定位技术也源自该校。

##### 主动反射面系统：

FAST 有一个固定在自然凹陷的渗穴景观（岩溶）中的主反射器，将接收到的电波聚焦在悬挂在其上方 140 米（460 英尺）的“馈源舱”的接收天线上。主反射器用穿孔铝板制成，由悬挂在轮缘上的钢缆网支撑，

FAST 的表面由 4,450 片每边长约 11 米（36 英尺）的三角形组成测地线圆顶的形式。位于下方的 2,225 个绞车使其成为主动表面，可以拉动面板之间的接头，将柔性钢缆支架变形为与所需天空方向对齐的抛物面天线。

##### 馈源支撑系统：

反射器上方是由六个高塔支撑，使用绞车伺服机构移动的一个轻型的电缆

机器人"馈源舱"。

### 测量与控制系统:

接收天线安装在斯图瓦平台的下方,可以提供精细的位置控制,并补偿风运动等的干扰,使指向精度可以高达 8 弧秒。

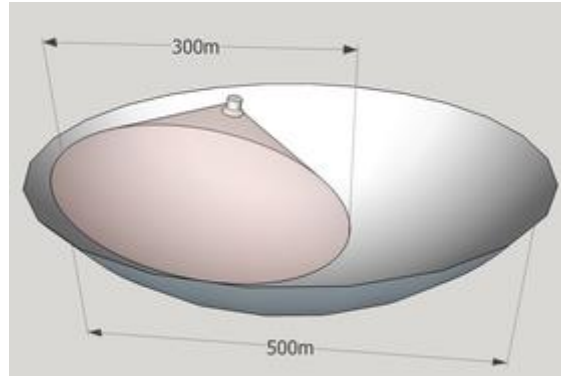


图 3 在 500 米圆盘内的 300 米口径图解

在天顶角 60 度的最大范围内,有效的照明光圈会降低至 200 米,当有效且无损耗的照明光圈为 300 米时,角度为 26.4 度。

尽管反射器的直径为 500 米 (1,600 英尺),但一次只能使用直径 300 米的圆 (维持正确的抛物面形状的吸收器照亮面)。

接收机与终端及观测基地:

它的工作频率在 70MHz 至 3.0GHz,此参数接近抛物面镜可以设置的精确度上限。它可以略有改进,但三角形段的大小限制了可以接收的最短波长。此范围由馈源舱下的 9 个接收器覆盖,1.23–1.53GHz 频带是氢线周围的频率,使用澳大利亚联邦科学与工业研究组织制造的 19 束接收器。这是澳洲科学院和中国科学院合作的澳中天体物理研究联合会的一部分。

搜集到的大量资料将由澳大利亚伯斯国际电波天文学中心 (International Center for Radio Astronomy, ICRAR) 和欧洲南方天文台开发的次世代档案系统 (Next Generation Archive System, NGAS) 储存和维护。

## 2.2 主动反射面整网变形控制

### 2.2.1 主动反射面结构及精度要求

FAST 主动反射面技术是 3 项创新的核心,500 米口径反射面是主动变形的,有效照明口径 300 米,在照明口径内实时的调整反射面形成瞬时抛物面。反射面支撑结构采用整体索网张拉设计 (图 4): 交叉的钢索编织成整体索网悬挂在周边的圈梁上,4 600 个尺度 11 米三角形单元安装在整体索网上拼合成 500 米口径球冠。在 2 300 个交叉索的节点处安装下拉索和驱动机构,控制系统控制驱动机构对索网进行预张拉,使索网在储备足够预应力下形成初始球面,观测时,控制下拉索的长度和张力,在钢索不松不断的前提下使反射面在有效照明口径内形成瞬时抛物面。因此需要实时调整节点的位置,将照明口径内所有节点的位置控制在限定误差范围内,每个节点沿径向最大行程 0.95 米,要求反射面索网节点控制精度 1 毫米,控制频率 2 赫兹。如此大规模的联动系统的整体控制,非常复杂和困难,FAST 主动反射面整网变形控制策略及相关研究是

实现反射面整网变形调整的基础和核心技术。

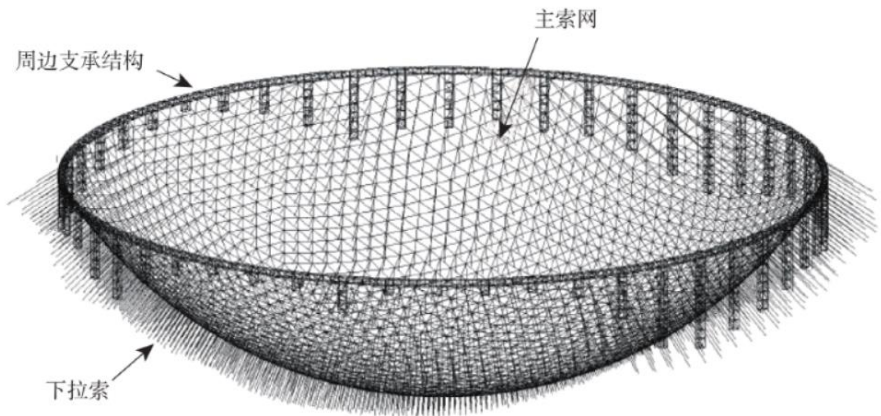


图 4 主动反射面索网支撑结构

2.2.2 主动反射面控制系统构

2 300 套控制器分布在潮湿的 KARST 洼地中。由于控制网络在规模和可靠性上的要求，采用现场总线技术。在控制器内存储有控制算法、自适应模型和控制数据，在控制器与上位机失去联系时仍能独立工作。总线控制网络分三层结构，上层为中央监控机；中间层为交换层；下层为促动器控制器。上层和中间层通过以太网方式连接，中层和下层通过现场总线网络连接。控制器接收并处理测量系统的反馈信息、主控指令和控制数据，按照统一的变位策略根据建立好自适应控制模型生成促动器控制指令，执行对促动器的运动控制。控制器同时具有定期检测现场状态和报警的功能，系统构成如图 5 所示。

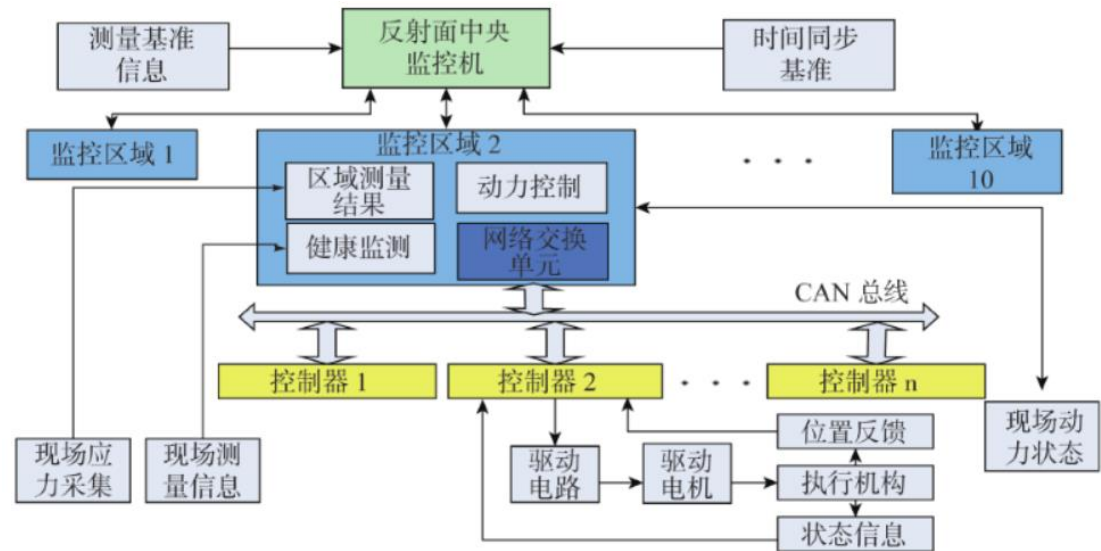


图 5 主反射面控制系统构成

2.2.3 主动反射面变位策略

FAST 主反射面整体索网包含 2 300 节点，在正常运行时，大约有 1 000 个节点参与变形和协调工作，其中有效口径内 800 多节点，边缘与球面衔接部分



约 200 多节点，如何使各向索长变化量最小且边缘平滑过渡是整网的变形过程优化控制的关键技术之一。反射面基准球面按规定的变位策略变化成瞬时抛物面时，节点位移引起三个方向上索长变化：下拉索沿球面半径方向即球心与节点连线方向；主索经度方向 (经向图 6 a)，抛物面顶点、节点及有效口径边沿方向；主索纬度方向 (纬向图 6b)，抛物面上等曲率环向。三个方向索长变化量的大小直接与促动器行程、索径和主索预应力储备相关。由球面变成瞬时抛物面时，节点在径向和经向产生位移，纬向只在应力储备范围内发生索长变化不发生纬向位移，根据球面和抛物面的对称性，变形策略优化可简化到二维空间，用圆弧线和抛物线替代球面和抛物面。以球面球心为坐标原点，圆弧和抛物线方程如下。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ x^2 + 4Dfy + 4Df(R+h) = 0 \end{cases}$$

其中，球面半径  $R=300$  米，抛物面口径  $D=300$  米，焦比  $f$  是抛物面焦距与口径之比， $h$  是抛物面顶点到基准球面间的距离。

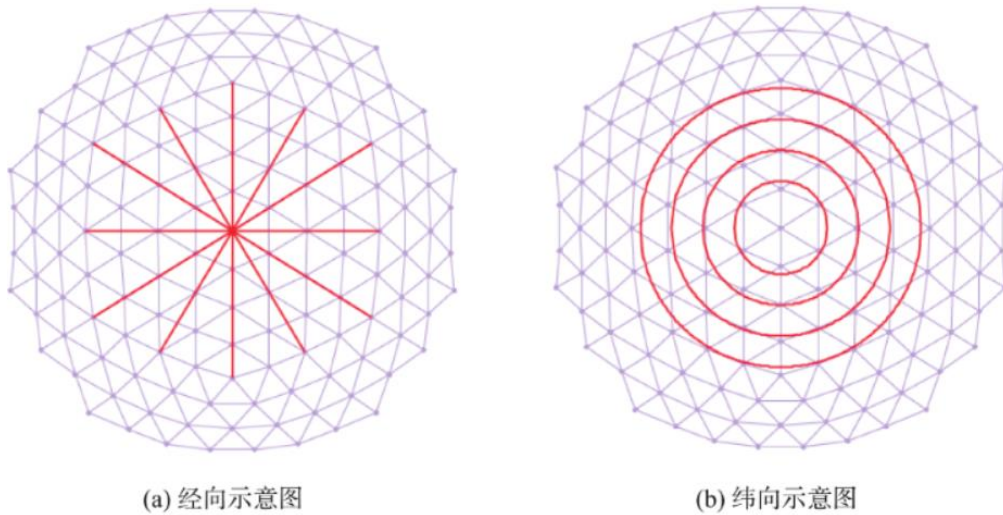


图 6 节点运动索长变化方向示意图

主索节点位置径向变化量主要与促动器行程和抛物面边缘状态有关，抛物面边缘节点径向位移越趋于零，边缘过渡越好；经向纬向变化量是球面变成抛物面时两向的弧长差，主要影响主索应力储备和索径，经向索长变化量也是节点产生侧偏的主要原因。因此需通过优化  $f$  和  $h$  两个参数得到最优变位策略，达到边缘平滑且索长变化较小的目的，经优化当  $f=0.4611$ ； $h=0.4732$  米时为最优解，圆弧和抛物线方程见式如下：

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 300^2 \\ x^2 + 2 \times 276.6470y + 1.6625 \times 10^5 = 0 \end{cases}$$

### 2.2.4 节点位移控制建模

在抛物面成型过程中，要求节点处于瞬时抛物面上，由球面和抛物面方程可知球心与节点的连线交球面和抛物面两点，当地锚点、节点和球心共线时两点间距离为理论上球面变抛物面节点的调整量设为  $\Delta r$ 。

实际情况中，由于制造、安装和调整等误差的存在，当索网处于中性球面时，节点和地锚点都与设计的理论位置存在偏差，这使得索网节点不在地锚点和球心连线上，即三点不能严格共线，此时由于静态侧偏引起的径向调整量变化设为  $\Delta LS1$ ，该部分可通过初始标定确定；由球面变为抛物面时节点在控制运动过程中，经向索长变化会引起节点经向位移，此时由于动态侧偏引起的径向调整量变化设为  $\Delta LS2$ ，由于索网之间的相互约束，索网节点的运动不能严格按照理论计算方向运动， $\Delta LS2$  存在不确定性；下拉索在受力和外界温度变化的条件下，索长发生变化影响节点调整量变化设为  $\Delta LF$  和  $\Delta LT$ ，由于需要实时测量索力和温度变化确定  $\Delta LF$  和  $\Delta LT$ ，测量准确度和测量效率使  $\Delta LF$  和  $\Delta LT$  有不确定性；当下拉索比较长且内力较小时还应考虑悬链线效应，设其影响为  $\Delta LC$ ，该部分也可通过标定和试验测试来确定。综上，FAST 整网中的各个节点相互耦合，其独立的位移控制不能完全按照理论模型运行，会受到多种因素的响和干扰，运动过程中位移控制模型是多变量、非线性的，建立的节点位移控制模型应该是筛选出强相关参量解相关后的模型，最终得到简化模型，具体  $k$  值可采用统计学习等方式得到数值解。

跟踪观测时各相关因子都是时间函数，节点调整量模型为：

$$dr(t)=f_{dr}(t)+\Delta L_{SI}+k_1f_{\Delta LS2}(t)+k_2f_{\Delta LF}(t)+k_3f_{\Delta LT}(t)+\Delta L_C$$

其中  $\Delta LS1$  通过标定得到确定数据解，下拉索保持不松且经过长下拉索试验确定悬链线效应影响可忽略  $\Delta LC=0$ ，式中各相关函数均可得到解析解，各影响因子的权重参数  $k$  是建模过程中需解决的问题。

FAST 整网的天文观测工作模式是重复往返的，由于各个节点之间的密切联系和相关作用的复杂性，决定着某个节点的位移控制轴是不会完全相同的，也就是说，对于某个节点在天文观测过程中，其运动轨迹有一定的随机性，但其有很强的统计特性，可利用随机统计理论，对 FAST 整网中各个节点的位移控制模型进行研究，如果其控制模型具有自适应和自学习机制，对模型进行简化和优化，可得到每个节点影响因子权重参数的最优解。短下拉索索力、温度和悬链线影响权重低，侧偏带来的径向偏差是主要矛盾，长下拉索恰恰相反，造成各节点参数不尽相同，当然具体到每一个节点建模时不同影响因子的权重的最终确定，除了根据大量试验的统计结果进行优化得到外，还需考虑节点间相互耦合作用，对其整网控制过程和控制策略进行优化，达到整网最优的平均性能。

## 3 成果分析

### 3.1 最近的科学任务

FAST 的网站列出了下列项目做为这架电波望远镜的科学目标

- (1) 大规模中性氢的巡天调查

- (2) 脉冲星的发现
- (3) 领导国际 VLBI 的网络
- (4) 检测星际分子
- (5) 检测星际通信讯号
- (6) 脉冲星计时阵列

FAST 望远镜于 2016 年 10 月加入 SETI 的突破倾听专案，以寻找宇宙中的智慧外星通信。

### 3.2 首批数据结果（2017-10-10）

国家天文台研究员李菂对 FAST 取得的首批成果进行了发布：FAST 望远镜调试进展超过预期；我国射电望远镜首次发现脉冲星，探测到数十个优质脉冲星候选体，其中两颗通过国际认证。李菂和国家天文台研究员姜鹏、澳大利亚科学及工业研究院 Parkes 望远镜科学主管 George Hobbs 等专家，就 FAST 首次发现脉冲星的过程、脉冲星研究工作在科学领域的重要意义、FAST 未来工作计划等进行了深入解读，并回答了记者提问。

FAST 作为“国之重器”，是我国“十一五”重大科技基础设施之一，于 2016 年 9 月 25 日竣工进入试运行、试调试阶段。国家天文台牵头国内多家单位，在 FAST 科学和工程团队密切协作下，经过一年的紧张调试，现已实现指向、跟踪、漂移扫描等多种观测模式的顺利运行，调试进展超过预期及大型同类设备的国际惯例，并且已经开始系统的科学产出。

FAST 团组利用位于贵州师范大学的 FAST 早期科学中心进行数据处理，探测到数十个优质脉冲星候选体，经国际合作，如利用澳大利亚 64 米 Parkes 望远镜，进行后随观测认证，目前两颗脉冲星已通过系统认证，一颗编号 J1859-0131（又名 FP1-FAST pulsar #1），自转周期为 1.83 秒，据估算距离地球 1.6 万光年；另一颗编号 J1931-01（又名 FP2），自转周期 0.59 秒，据估算距离地球约 4100 光年。两颗脉冲星分别由 FAST 于今年 8 月 22 日和 25 日在南天银道面通过漂移扫描发现。这是我国射电望远镜首次新发现脉冲星。

**搜寻和发现射电脉冲星是 FAST 的核心科学目标。**银河系中有大量脉冲星，但由于其信号暗弱，易被人造电磁干扰淹没，目前只观测到一小部分。**具有极高灵敏度的 FAST 是发现脉冲星的理想设备**，FAST 在调试初期发现脉冲星，得益于卓有成效的早期科学规划和人才、技术储备，初步展示了 **FAST 自主创新的科学能力**，开启了中国射电波段大科学装置系统产生原创发现的激越时代。**未来，FAST 将有望发现更多守时精准的毫秒脉冲星，对脉冲星计时阵探测引力波做出原创贡献。**

未来两年，FAST 将继续调试，以期达到设计指标，通过国家验收，实现面向国内外学者开放。科研人员将进一步验证、优化科学观测模式，继续催生天文发现，力争早日将 FAST 打造成为世界一流水平望远镜设备。

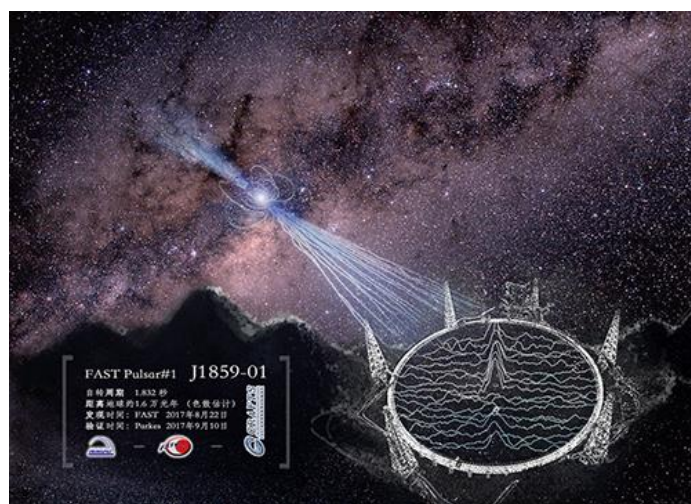


图 7 FAST 观测脉冲星示意图

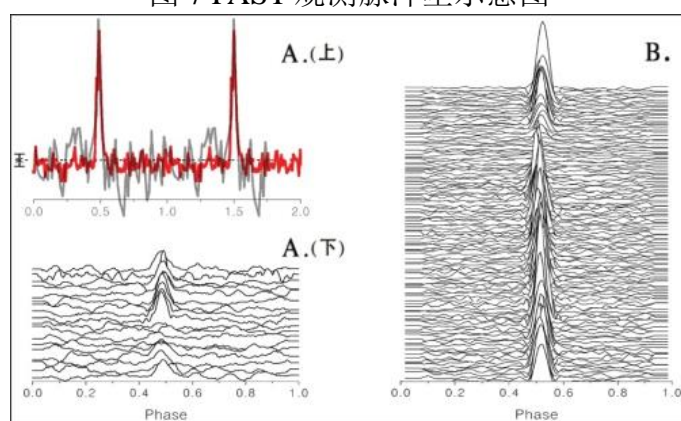


图 8 新发现脉冲星的归一化平均脉冲轮廓和单脉冲

A（上）为 FP1 平均脉冲轮廓，FAST 通过约 52.4 秒漂移扫描（红色）产生信噪比为 Parkes 望远镜 L 波段积分 2100 秒结果（灰色）信噪比的 3 倍，表现出 FAST 高灵敏度优势。A（下）为 FP1 单脉冲轮廓。B 为 FAST 采用跟踪观测 5 分钟，获得的另一颗新脉冲星 FP2 的单脉冲轮廓。

### 三、SKA—平方公里阵\*

#### 1 基本情况

平方千米阵（英语：Square Kilometre Array，缩写为 SKA）是计划中的下一代巨型射电望远镜阵列，工作在 0.10–30GHz 的波段，有效接收面积可以达到大约 1 平方公里，灵敏度将比目前世界上最大的射电望远镜还要高 50 倍。平方千米阵将由上千台天线组成，其中有一半天线位于中央直径 5 公里的区域内，另有四分之一的天线散布在周围 150 公里的区域内，其余的分布在大约 3000 公里的范围内，呈螺旋形排列。平方千米阵预计能够探测到宇宙大爆炸之后第一代恒星和星系形成时发出的电磁波、揭示磁场在恒星和星系演化过程中的作用、探测暗能量产生的种种效应，甚至有人希望能够接受到地外智慧生命发出的无线电信号。



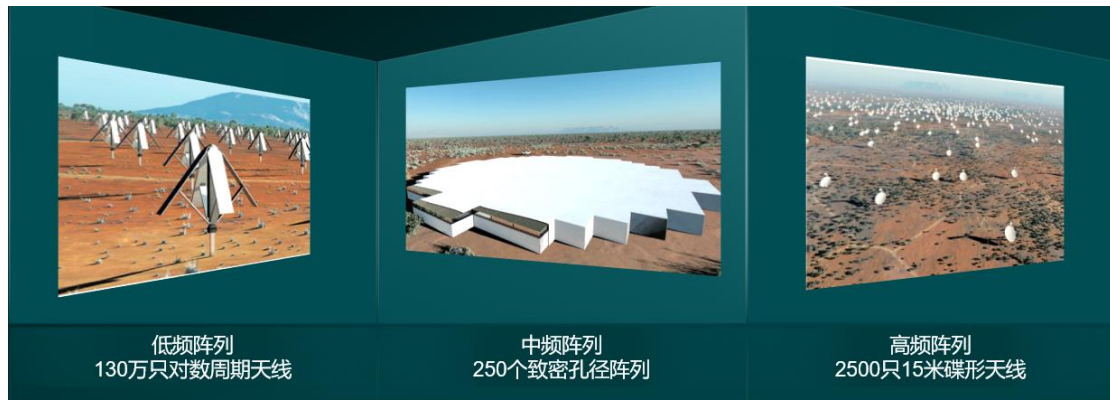


图 9 SKA 基本组成

平方千米阵计划始于 1993 年。在国际无线电科联在日本京都举行的大会上，10 个国家的天文学家联合提议建造接受面积为 1 平方公里的巨型射电望远镜阵。初期选址有澳大利亚、南非、中国、阿根廷四个国家参加了角逐。2006 年 9 月，中国和阿根廷的方案分别由于地理条件以及电离层不稳定而遭到否决。澳大利亚和南非因良好的无线电环境成为最后的候选者。澳大利亚的候选台址位于其西部，距离米卡萨拉（Meekatharra）大约 100 公里，南非候选站址位于北开普省的卡鲁盆地，距离卡那封（Carnarvon）大约 95 公里，部分天线将位于博茨瓦纳、纳米比亚、莫桑比克、马达加斯加、毛里求斯、肯尼亚、加纳等周边国家。

平方千米阵计划将于 2008 年左右选定最终建造地点，2010 年开始建造，2015 年试运行，2020 年开始全面运行。整个项目预计将耗资 16 亿美元。

2012 年 5 月 25 日，计划团队原定于 2016 年开始在南非、澳洲等地兴建平方千米阵。但在多次延期和费用上升之后，加上预期计划不会在当地有基建工程。2019 年 3 月 12 日，澳大利亚、中国、意大利、荷兰、葡萄牙、南非、英国共七个创始成员国在罗马签署 SKA 天文台公约。新西兰政府于 2019 年 7 月 4 日宣布退出本计划。2021 年 8 月 31 日，中华人民共和国批准《成立平方公里阵列天文台公约》。

SKA 拟由包括 100 万支天线单元的低频孔径阵列(low frequency aperture array, LFAA)、2500 面抛物面天线(dishes)阵列以及中频孔径阵列(mid-frequency aperture array, MFAA) 组成，分布在 3000 公里基线内形成望远镜阵列，其中 LFAA 采用稀疏布阵方式, MFAA 采用致密布阵方式。



图 10 SKA

## 2 关键技术

### 2.1 SKA 稀疏低频阵列系统功能指标分析

#### 2.1.1 系统指标

作为天文学射电望远镜的应用,主要是要完成对深空目标微弱信号的探测和成像识别,低频孔径阵列(LFAA)系统工作频率为 50\_675 MHz,主要的天文学实验 EoR (Epoch of Reionisation, 再电离时期) 需求的射频范围为 50\_350 MHz,所以在系统设计时尽量考虑 50\_350 MHz 的工作频率,同时兼顾 350\_675 MHz。

#### 2.1.2 系统指标功能分析

以上功能指标是天文学家根据天文学观测试验对射电装置提出指标要求. 频率在 UHF 频段,主吴曼青等:世界最大综合孔径望远镜 SKA 低频数字阵列系统研究要解决天文学实验 EoR 的任务,比 LOFAR 系统的频段要高一点,非常适合采用稀疏布阵的数字阵列架构体制,可以实现高灵敏度和大视场;其次,可以将大带宽分解为两部分,瞬时带宽被分为 325 MHz(50~375 MHz) 和 300 MHz (375~675 MHz) 两段,通过开关滤波器, A/D 采样频率选为 800 Msps,后面处理装置保持一致.

灵敏度是天文学上的一个关键指标,是指射电天文望远镜“最低可测”的能量值,提高灵敏度的常用方法是降低接收机本身固有的噪声,增大接收天线阵的面积,延长观测积分时间等. 灵敏度指标定义为  $A_{\text{eff}}=T_{\text{sys}}$  (其中  $A_{\text{eff}}$  为天线的有效孔径,  $T_{\text{sys}}$  为系统温度)。其中,

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{rec}} + |(\lambda/0.2008)^{2.55} + (f/10)^{1.8} + 2.7$$

$$A_{\text{eff}} = N_{\text{stat}} N_{\text{elem}} \min \left\{ \frac{\pi D_{\text{stat}}^2}{4 N_{\text{elem}}}, \frac{2}{3} \right\}$$

一般低频在 110 MHz 时接收机的温度在 35 K 左右,根据工作频率和上式计算出的  $T_{\text{sys}}$  即可推算出天线有效孔径(这里视天线的有效孔径为物理孔径),原则

上天线的孔径越大越好,但是要综合考虑场地大小、电磁环境、工程造价等因素;由于来自外太空的电磁信号非常弱,而且极化不确定,在这种目标信号极化宽开的情况下,天线单元为水平和垂直双极化工作,这样导致系统的成本重量加倍;FoV (field of view, 视场) 是指天线瞬时波束扫描范围,即天线阵的最小子阵波束宽度(第一级波束形单元数),一般其单位是平方度,是两个主截面波束宽度的乘积(站级的天线孔径是圆形);天线分布的决定因素主要是天文学 UV 面成像需要,每两站波束相关处理, Fourier 变换后可以得到天文学的 UV 平面上形成一个点, UV 平面再通过 Fourier 卷积得到天图,所以天图的清晰程度决定于 UV 平面的均匀性, UV 平面的均匀性直接与天线阵的分布以及站级波束的增益、副瓣、指向精度等电性能指标相关,理论上天线阵的分布只要不是规则的,有无数种布局方式,结合地球自转和公转,一般天文学上比较认可的是中心密集,外围稀疏再加旋臂的方式。

SKA 低频孔径阵列作为 SKA 众多工作包中一部分,整个系统规模包括了约 100 万个双极化天线单元, 4000 个站, 每个站由 16 个子阵(tile) 构成, 每个子阵包括 16 个单元,主要的系统功能指标特性如下:

(1) 瞬时带宽是指射频前端瞬时采样的信号带宽,这取决于 A/D 的性能和功耗的平衡,还有采样时钟的性能;这里系统的工作频带为 50\_675 MHz,带宽达到了 12.5 倍频,为了降低采样率和采样位数,系统考虑将前端射频信号通过开关带通滤波器组设置两个“窗口”,然后分别采样,将采样率降到 800 Msps 和 700 Msps.

(2) 视场即子阵波束宽度,也就是 Tile 级的单元数,子阵直径,需要满足在 350 MHz 时任一截面的方向图满足大于  $5^\circ$  的要求.

(3) 扫描角度即随机布阵的 256 单元(站规模)阵列的天线性能需要实现  $\pm 6^\circ$  性能,这在随机布阵优化是要严格限定天线单元间距的最大值.

(4) 数据传输量主要是指天线端接收下来的射频信号经 A/D 采样后的数字信号的规模,为了提高合成波束的性能, A/D 后的数字信号会被信道化处理,导致高性能芯片需要处理和传输的数量急剧增加,数据传输和合成的运算量直接决定了芯片的性能参数,也是需要解决的重点.

(5) A/D 采样位数: 采样位数及 A/D 的量化位数,决定了 A/D 芯片的输入动态,即输入的大信号和小信号之比.

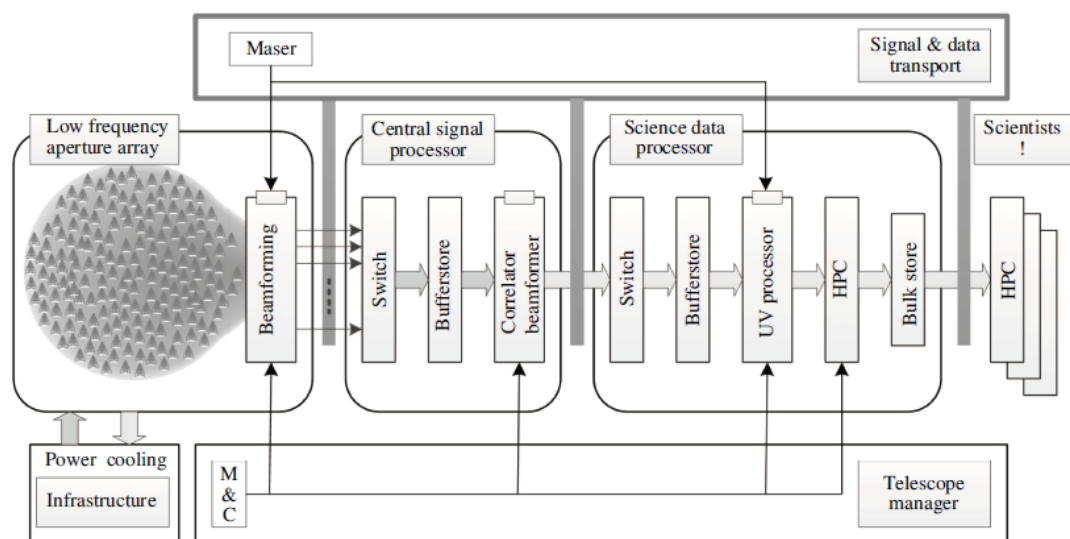




图 11 LFAA 信号流程图

## 2.2 SKA 低频孔径阵列系统架构的研究

### 2.2.1 LFAA 三种系统架构分析

低频孔径阵列主要由天线(含 LNA)、Tile 信号处理模块、时钟同步分系统和电源组成。

天线(含 LNA) 主要由满足工作频段的双极化接收天线组成, 完成对来自天体辐射的电磁波信号的接收, 每个天线单元直接在馈电端进行放大, 然后通过 e/o 转换为两种极化的光信号通过光纤传输到接收模块。

Tile 信号处理模块包含两个子模块, 分别是接收子系统和数据处理子系统。接收子系统主要完成将来自天线光信号进行光电转换, 然后通过开关滤波器组将 50\_675 MHz 的射频信号分成 300 MHz 和 325 MHz 两个频段; 数据处理子系统主要是接收子系统输出的射频信号通过 A/D 进行采样, A/D 后的信号进行信道化处理, 以提高校正精度和波束形成质量, 信道化和数字波束形成的处理都是通过高性能 DSP 处理芯片或 FPGA 完成; 数据处理子系统还具有部分站信号处理功能, 将当前 Tile 形成的波束和上一个 Tile 形成的波束进行相加, 然后送给下一个 Tile 波束进行相加处理, 最后得到站波束, 并送往中央信号处理进行相关或合成等运算。

时钟同步分系统主要完成中央信号处理分系统, 站内信号处理分系统和接收模块的时钟同步。具体 LFAA 系统信号流图如图 11 所示。

根据上述指标功能分析, 稀疏布阵需要, 基于数字阵列架构的 SKA1 低频孔径阵列基本架构如图 12 所示, 由 3 部分构建, 第 1 部分是系统前端的天线单元, 包括单元级数字化、稀疏布阵、分布式多站组阵等; 第 2 部分是中央处理装置、完成数字波束形成、站相关及 UV 成像等; 第 3 部分即天线前端和中央处理装置的衔接——高速数据传输, 将前端采集的信号实时快速送入中央处理装置。

上述是基本架构, 根据基本架构可以有 3 种方案考虑, 如图 13 所示。

第 1 种采用了分布式数字阵列架构方案, 系统的前端由 16 天线单元的子阵处理模块(tile pro-cessing module, TPM) 构建而成, 13 万支天线, 512 个站的 SKA1 低频孔径阵列系统共计有 8 千多个 TPM 模块, TPM 模块在处理完第一级数字波束形成后通过数字光纤拉远到后端中央处理设备(central processing facility, CPF) 进行站级波束形成, 以及相关处理和 UV 面观测成像, 特点是: 分布式构建、单元级数字波束形成、数字光纤拉远、时钟分布式前置。第 2 种采用单个天线单元信号采集的数字光纤拉远方案, 对双极化天线单元采集的信号进行宽带采样, 设计出合适的高度集成的 ASIC 专用芯片进行数据采集, 再使用数字光纤拉远, 将数据传送到后端中央处理设备中, 然后再进行灵活的数字波束形成, 包括子阵级和站级, 再进行相关处理和 UV 成像, 特点是: 单元级天线数字化处理、数字光纤拉远、专用模拟数字处理芯片。第 3 种采用单个天线单元进行接收放大之后, 直接进行射频模拟光纤(RFoF) 拉远, 共计 13 万支天线进行模拟光纤拉远, 统一将所有采集的射频信号引入到后端中央处理设备中处理, 进行模拟放大、开关滤波、数字采集与信道化、两级数字波束形成、站相关和 UV 成像, 特点是: 射频载光纤拉远 RFoF、稀疏布阵灵活、后端数字处理灵活。

上 3 种系统架构各有特点, 各有优势, 需根据需求、技术、应用、成本等多种实际因素加以选择。第 1 种和第 2 种系统架构采用数字光纤拉远方案, 1 个子阵仅使用两路数字光纤, 而第 3 种系统架构采用的射频载光纤拉远方案中 1 个子



阵使用 32 根模拟光纤。相比而言, 数字光纤拉远方案节约了大量光纤, 节约了成本; 同时数字光纤传输数字信号比射频载光纤传输模拟信号更稳定可靠, 受环境影响较小, 但射频载光纤拉远方案更易于扩展, 有利于工程建设。

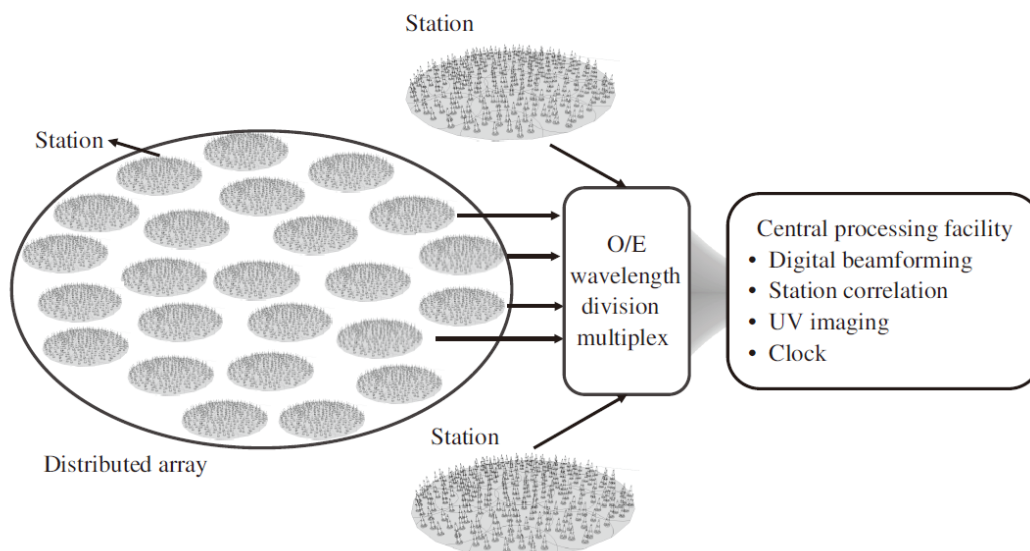


图 12 LFAA 系统基本架构示意图

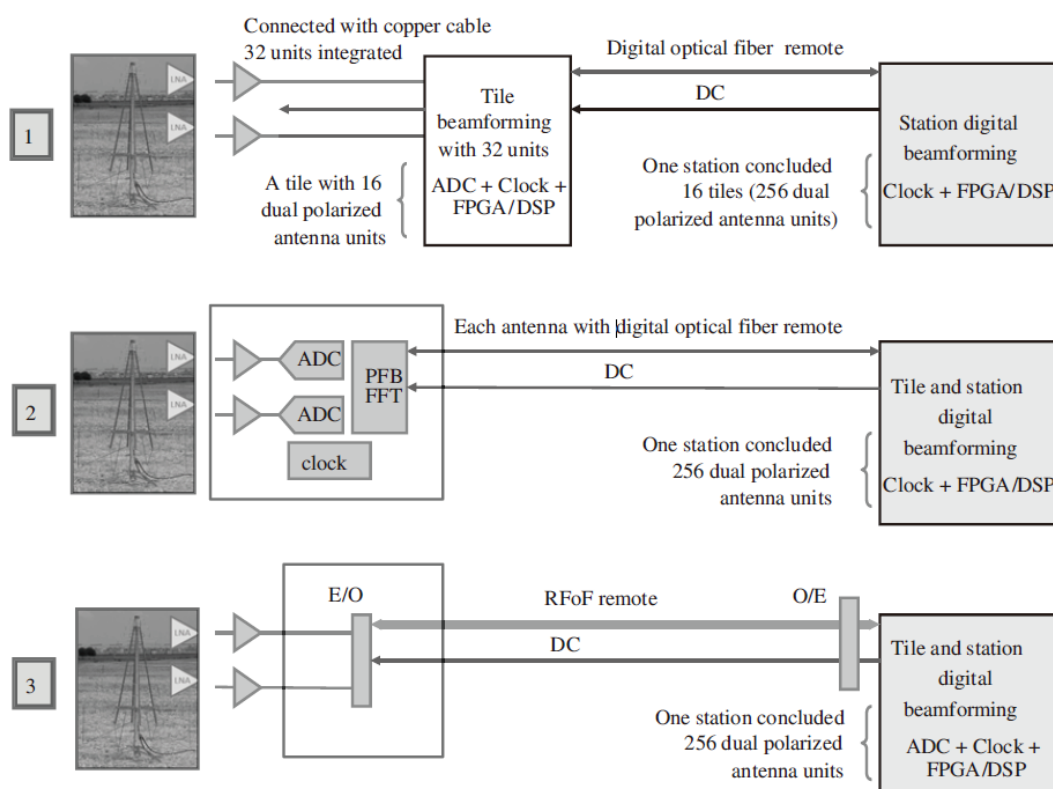


图 13 LFAA 三种系统示意图

## 2.3 SKA 大数据的应对与挑战

### 2.3.1 天文学已经进入大数据的时代

从 20 世纪 60 年代以来,天文学不断产生令人赞叹的成果,天文学正书写着人类自然科学发展的辉煌篇章。最精彩、最具突破性的天文发现越来越依赖于大型科研装置的协同运行,越来越依赖于海量数据的分析和挖掘;同时,科学成果的透明度、多样性、多学科之间的融会贯通使得人类的科技生活越来越丰富多彩。天文学真正进入了多波段、多信使时代,人们不仅能够使用多个观测设备同时探测同一天体,获得几乎整个电磁波谱的完整信息,而且还能够使用电磁辐射之外的其他信源,比如中微子和引力波来研究宇宙天体。一个最具代表性的例子是 2017 年 8 月天文学家首次发现两颗中子星的并合事例。地基激光引力波天文台(LIGO)和 VIRGO 引力波探测器首先发现了中子星并合过程产生的时空涟漪,随后最强大的太空望远镜和地面望远镜协同观测并合后的后随辐射,使得人们不仅增进了对引力波的认识,而且从观测上证实了短伽马暴、巨超新星等奇异天体,这让我们对天文学协同研究的强大威力有了新的理解。

以观测为基础的天文学曾长期受到数据匮乏的困扰,进入 21 世纪信息时代,天文学已经发生了重大的革命性变化。天文观测已经逐步进入大数据时代,当前科学研究方式和传播方式也发生着深刻演变。举个例子:超新星是宇宙中绚烂的烟花,我国有世界公认的关于超新星的最早天文记录。超新星在天体物理研究中有重要的地位,2011 年的诺贝尔物理学奖授予 3 位天文学家,他们的贡献是通过对超新星的观测发现宇宙正在加速膨胀。超新星是非常稀有的事件,在 10 年前捕获一颗超新星是相当困难的,因此每次观测到一个超新星也必然引起全球望远镜的追逐竞赛,大量研究不得不依赖于数值模拟和理论计算。而如今,光学巡天每年都能发现 1 000 多颗,超新星变得不再稀奇,深度有效地挖掘这些大型巡天积累的数据则有可能会产生更多新发现。随着 SKA 等下一代超级望远镜带来的天文观测能力的极大提升,在当前仍属于凤毛麟角的奇异天体在 5—10 年后都将成为常客。统计学、信息科学与天文学密切结合,为天文学家提供数据分析工具,基于对宇宙大数据的收集、整理、分析探索宏观宇宙的真理和天体的运行规律。

### 2.3.2 大数据典型应用—平方公里阵列(SKA)射电望远镜

天文学关注有关宇宙、天体和生命起源的最具有前瞻性的问题,这些问题的突破和解决将极大地推动自然科学基础理论,促进人类科技水平的整体进步。由宏伟科学目标驱动的 SKA 射电望远镜是我国参加的最大的天文领域国际合作大科学工程。SKA 建成后将成为世界上最大的天文实验装置,为人类探索宇宙起源奥秘创造新的机会。SKA 由包括中国在内的 11 个正式成员国以及 10 多个观察员国参与,建设和运行天文大望远镜已经成为一个国家综合实力的真实体现和重要标志。SKA 总部位于英国,SKA 低频阵列(SKA-low)包括 130 万个对数周期天线,拟建于澳大利亚西部沙漠;SKA 中频阵列(SKA-mid)包括 2 500 个碟形天线,拟建于南非以及南部非洲的无线电宁静区域,这两处是经过天文学家十几年评估和测评后优选出来的最佳台址。望远镜的总接收面积高达 1 平方公里,频率几乎连续覆盖 50 MHz—20 GHz 的范围,比目前厘米波段最大的射电望远镜阵的灵敏度提高约 50 倍、巡天速度提高约 10 000 倍。

作为下一代担当引领作用的射电天文观测设施,SKA 将对射电天文学的发展产生深远影响。SKA 的强大观测能力体现在其超高灵敏度(mK)、超大视场

(数十度)、超快巡天速度、超高频率分辨率 (kHz)、超高时间分辨率 (纳秒)、超高空间分辨率 (亚角秒), 这些技术特点使得 SKA 产生前所未有的超大数据量。SKA 的建设主要分为两个阶段: 第一阶段 (SKA1) 将按照全规模的 10% 来建造, 预计 2020 年开建; 第二阶段 (SKA2) 将完成其余 90% 建设工程, 不过目前尚未确定具体计划。SKA1-low 每个台站的数据产生率为 2 Tbps, 总的的数据流是 1 Pb/s。据此规模递推, SKA2 至少产生 10 倍以上的实时数据流。从上述数据可知, SKA 产生的数据量是空前巨大的, 即使经过相关处理后数据量极大降低了, 但输入到科学数据处理器 (SDP) 的数据也达到了 4 GB/s, 是当之无愧的科学大数据。SKA 超大规模的数据流需要及时地以实时模式处理掉, 否则会造成整个数据处理管线 (pipeline) 的堵塞甚至崩溃。采用实时模式、多并发任务、数据流管线系统的处理方式是 SKA 数据处理的几个典型特点, 也是新型科学大数据处理的典型应用。

作为史上最大的射电望远镜, SKA 不仅承载孕育世界级科研成果的使命, 而且将产生世界上最大规模的数据, 因此我们需要充分认识到 SKA 数据处理的巨大挑战。由于 SKA 工程极其庞大及复杂, 为了攻克关键技术、降低技术风险, 包括中国在内的多个国家先后建设了一些探路者和先导项目, 每个项目相当于 SKA 总体规模的 1% 左右, 并基于这些先导望远镜开展了相关的科学预研究和技术攻关。这些先导设备在理解 SKA 科学目标、建立和逐步完善天空模型、开发和测试数据处理软件、培养急需的人才队伍等方面发挥了积极作用, 在 SKA 发展历程中处于不可忽视的地位。需要指出的是, 尽管如此, 这些先导项目的数据量远远不能达到 SKA1 规模, 因此与建立真实的验证参考还有一定的距离。

### 2.3.3 SKA 科学计算的挑战

与传统望远镜相比, SKA 更像是一个“软件”望远镜, 它不仅集成了当代信息计算技术的最新成就, 而且提出了新的问题。以 SKA-low 为例, 其旨在探测微弱宇宙信号, 这些低频阵列以 10 Pb/s 速度产生出世界上最大规模的数据流, 远远超出了全世界互联网的流量。按照 SKA 的数据流规模, 估计在建设的第一阶段每年需要输送到区域数据中心进行深度分析的科学数据就达到了每年 300 PB, 随着望远镜的全面运行, 这个数据量必然会逐步增加。到了 SKA2 阶段, 从 SKA 天文台产生的预处理数据的规模将扩展到 SKA 先导项目的 100 倍以上, 达到 EB 量级。SKA 两个最重要的科学方向——宇宙再电离和黑暗时期探测、用脉冲星计时阵精确测量引力, 需要积累未校准的原始数据; 如果考虑到保存一定时间的原始数据, 那么 SKA 天文台的数据存储需求将提高至少一个量级。

以 SKA 先导项目 MWA 为例, 经过 4 年的运行, MWA 积累了 24 PB 的科学存档数据。其中一个科学目标是 GLEAM 巡天任务, 第一期巡天已经包含了 30 多万颗星系, 存档数据量达到 1 PB 以上。第二期巡天已经开始, 灵敏度提高了 4 倍以上, 数据量预期高达 6.5 PB。而 MWA 只占到 SKA-low 规模的 1%, SKA 数据量由此可见一斑。据初步估计, SKA1 阶段的科学数据处理器所需要的计算能力为 260 PFlops (即每秒 260 千万亿次浮点运算), 相当于我国超级计算机“天河二号”的 8 倍, “神威·太湖之光”的 3 倍。SKA 巨大的计算需求必然对现有科学计算的架构和方式形成巨大冲击, 对 SKA 数据处理问题的解决有助于带动和提升相关产业的发展, 甚至引发革命性变化。

## 四、韦伯望远镜\*

### 1 基本情况

詹姆斯·韦伯空间望远镜（英语：James Webb Space Telescope, JWST），是已发射的红外线空间望远镜，原计划耗费 5 亿美元并于 2007 年发射升空。但由于各种原因，导致项目严重超支，发射时间数次推迟，最新预估总耗费高达 100 亿美元，发射时间为美国东部时间 2021 年 12 月 25 日 7 时 20 分。2019 年 8 月 28 日 NASA 表示该望远镜首次组装完毕。它是欧洲空间局（ESA），加拿大航天局和美国国家航空航天局(NASA)的共用计划。这是哈勃空间望远镜和斯皮策空间望远镜的后继计划。它旨在提供比哈勃空间望远镜更高的红外分辨率和灵敏度，观察物体的亮度比哈勃望远镜探测到的最微弱物体的亮度要低 100 倍。这将使天文学和宇宙学领域的广泛研究成为可能，例如对宇宙中一些最古老和最遥远的物体和事件（包括第一颗恒星和形成的第一个星系）进行高达  $z \approx 20$  [11] 的红移观测，以及潜在适居住太阳系外行星的详细大气特征。

它拥有一个总直径 6.5 米（21 英尺），被分割成 18 面镜片的主镜，放置于太阳—地球的第二拉格朗日点。这意味着其将在地球-太阳连线上地球背后的 150 万千米处绕 L2 以晕轮轨道运行，而非像哈勃空间望远镜那样绕近地轨道公转。一个由涂有硅和铝的聚酰亚胺薄膜(杜邦 Kapton)制成的五层大型遮阳板将保持它的镜片和四个科学仪器低于 50 K（-220 °C； -370 °F）。



图 14 韦伯太空望远镜地面图

此项目曾经称为“新一代空间望远镜”（Next Generation Space Telescope），2002 年以美国宇航局第二任局长詹姆斯·韦伯的名字命名。1961 年至 1968 年詹姆斯·韦伯担任局长期间曾领导阿波罗计划等一系列美国重要的太空探测项目。位于马里兰州的美国宇航局戈达德太空飞行中心(GSFC) 负责开发，望远镜的地面控制和协调机构是位于约翰霍普金斯大学的空间望远镜科学研究所（STScI）。主要承包商是诺斯洛普·格鲁门公司（Northrop Grumman）。

美西时间 2021 年 12 月 25 日上午 7:21 分，在法属圭亚那的欧洲空间局库鲁基地，负责运送的阿丽亚娜 5 号火箭顺利升空。送入太空后，韦伯空间望远镜将要航行约一个月，进入预定轨道，距离地球估计至少 150 万千米，在拉格朗日 L2 点运行，而非地球轨道。

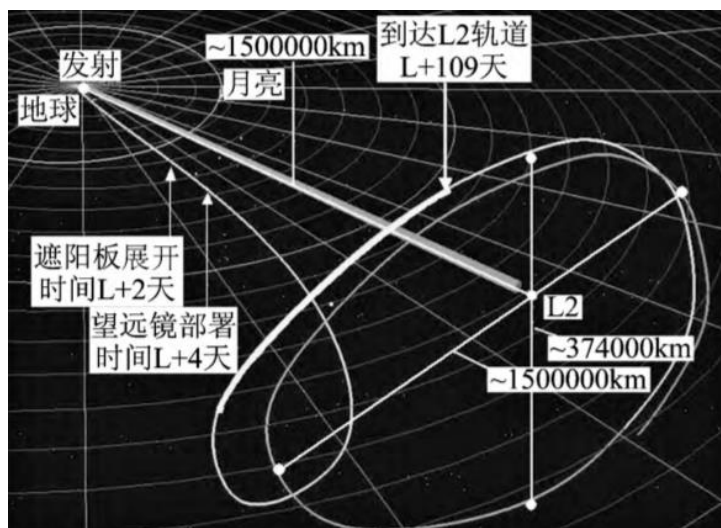


图 15 韦伯太空望远镜发射轨迹

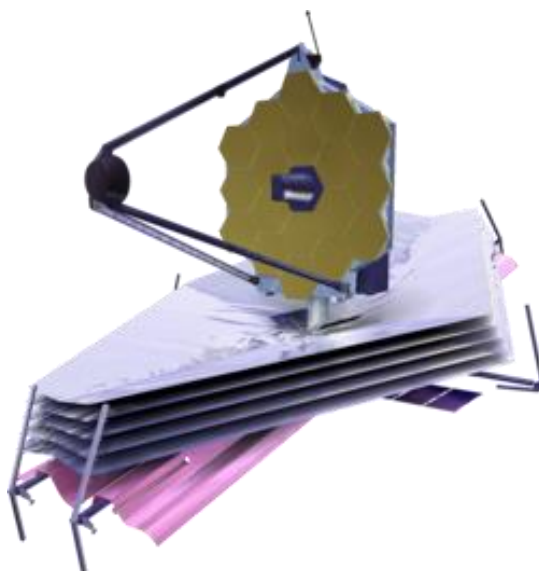


图 16 完全展开的韦伯望远镜想象图

JWST 主要由光学瞄准镜组件( OTE)、集成科学仪器模块( ISIM)、遮阳罩和飞船组成。JWST 上搭载的 ISIM 由 4 个主要有效载荷组成，包括近红外摄像机( NIRCам)、近红外光谱仪( NIRSpec)、中红外成像仪( MIRI) 和精导传感器/可调滤光片( FGS /TF)。

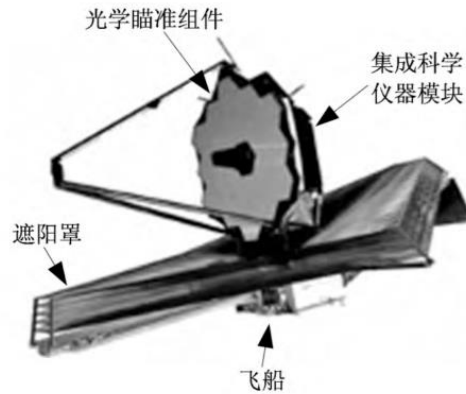


图 17 JWST 组成

NIRCam 由美国亚利桑那大学和洛马公司设计、制作并完成测试，是 JWST 的核心成像部分，**成像光谱覆盖范围 600 ~ 5 000 nm**，可对宇宙最早组成的恒星和星系进行视察。NIRCam 设计为多过滤、宽波段光度测量，装备一个日冕仪，可用于对如柯伊伯带一样的碎片星系团进行成像，且使大行星集合在恒星附近；NIRCam 也为 JWST 望远镜组件波阵面传感器服务。由 NIRCam 拍摄的间隔规则的图像数据可用于诊断望远镜波阵面误差且校正镜面传动机构位置。



图 18 近红外多目标色散光谱仪

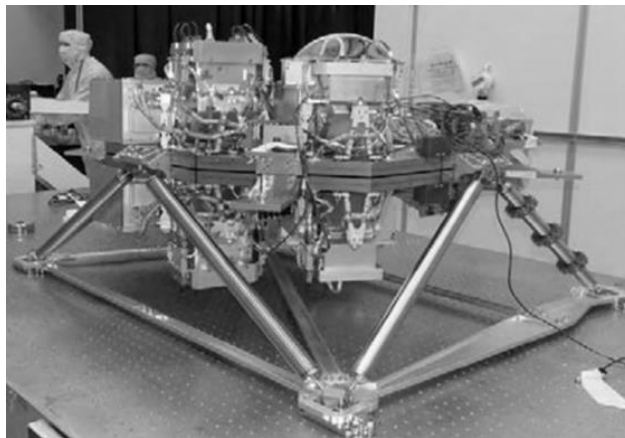


图 19 近红外和可见光段相机

多目标 NIRSpec 由欧洲航天局提供，可同步观测超过 100 个目标。结合 JWST 望远镜的敏感性，可帮助科学家理解早期宇宙星系的形成。NIRSpec 设

计的工作温度低于 30 K，且存活的非工作温度需低于 22 K，其敏感光谱段为 600 ~ 5 000 nm。NIRSpec 有 3 种观测模式: 使用菱镜的低分辨率模式、光谱分辨能力  $R = 1\,000$  的多目标模式以及光谱分辨能力  $R = 2\,700$  的全场观测或长狭缝分光模式。多目标模式依赖于复杂的微型百叶窗装置，允许在 NIRSpec 视场内同时观测到数百个独立的目标，其中 NIRSpec 探测器和微型百叶窗子系统由美国航空航天局(NASA)提供。



图 20 IABG 空间仿真中心 2.5 m 低温真空试验室内的 NIRSpec 地面试验模拟件

MIRI 由 10 个欧洲国家携手完成，相机敏感波段为 5 000 ~ 28 000 nm，包含一个中红外相机和一个成像分光计。MIRI 整体光学组件在 2012 年作为 ISIM 的最后一部分交付到戈达德航天中心。MIRI 的温度需低于 6 K，在遮阳罩阳面的氦气冷却装置为其提供了冷环境。MIRI 的 Si:As 探测器先利用脉管制冷机冷却到 18 K，再用循环节流制冷机冷却到 6 K。

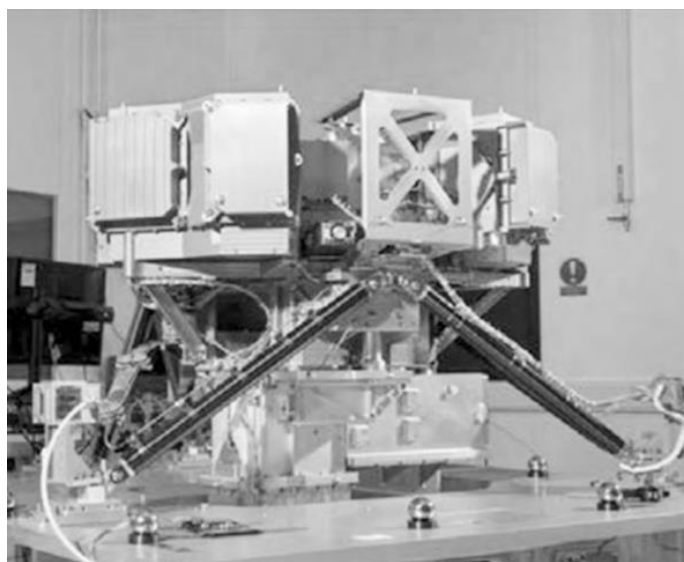


图 21 中红外相机和光谱仪 MIRI

FGS 由加拿大太空署提供，用于在科学仪器观测时保证瞄准线稳定。由 FGS 提供的度量被用来控制飞船的整体方位，也驱使指导镜面的图像稳定性。



## 2 关键技术

### 2.1 詹姆斯·韦伯太空望远镜低温热控系统分析

#### 2.1.1 背景

空间红外天文观测对于研究行星、恒星、星系以及宇宙的起源具有重要意义。背景温度直接影响了空间红外望远镜的成像效果，如何实现更低的制冷温度成为空间红外望远镜研究的热点。针对空间红外望远镜低温需求特点，进行了詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)的低温热控系统设计方案分析。

太空中许多区域充满了大范围、厚厚的气团和尘埃，阻挡了可见光的传输，而红外光则可以穿透这些云团和尘埃。借助红外望远镜可观测其它星体的构成、大气成分、探测新星体等，还可获得太空低温目标的信息。当探测目标信号十分微弱、信号距离相对较远、温度较低时，红外望远镜的光学系统与支撑结构的热辐射和杂散光就会成为影响探测性能的主要因素。为了消除望远镜自身散发出的红外线影响，必须采用适宜的热控技术将光学系统和相关支撑部件的温度冷却下来，这样才能有效地减少背景光子通量，发挥背景极限探测器的作用，从而提高探测器的灵敏度。

**JWST 是哈勃太空望远镜的继任者，它将成为人类有史以来建造的最大最强的太空望远镜，将检测红外辐射，并拥有在该波长和哈勃望远镜能看到的可见光范围都能看到的能力。韦伯的成功将能无视尘埃的干扰，探索更远的宇宙。**

#### 2.1.2 JWST 热控系统分析

韦伯望远镜尺寸大，并携带多个红外探测器和可见光探测器等温度敏感仪器，除了对温度水平有严格要求外，对温度梯度也有较高要求，这给热控系统带来巨大挑战。目前，韦伯望远镜热控系统主要采用被动热控设计方案，包括遮阳罩、辐射器、新型热控涂层、隔热安装、低热导率复合材料支撑结构和机械热开关等。

##### 2.1.2.1 遮阳罩

为了保证望远镜工作在红外光谱，JWST 必须保持在极低温(低于 50 K)状态。另外，望远镜自身的红外辐射也会影响科学仪器工作。因此，科学家们设计了一个大的遮阳罩以阻挡来自太阳、地球和月亮的光和热。韦伯的遮阳罩可将望远镜分隔成一个高温环境和一个寒冷环境。该遮阳罩能够有效阻挡大约 91 kW 的太阳能，只有不到 1 W 的热量渗入到冷侧。遮阳罩高温侧温度大概为 400 K，低温侧平均温度为 50 K 或者更低，科学设备被保护免受太阳光照射。遮阳罩由 5 层的耐热材料(称为硅涂层的聚酰亚胺)组成，每一层进一步偏转避免任何热或光线穿透前层。此外，由于 JWST 处在 L2 点上，可使得太阳、地球和月亮始终处于飞船的同一侧，避免地球和月亮阴影影响，维持一个恒定的遮阳罩和太阳电池阵环境。

发射时，遮阳罩被折叠 12 次以适应阿丽亚娜 5 火箭。一旦到达 L2 点，遮阳罩即被展开，展开面积约为  $21.197\text{ m} \times 14.162\text{ m}$ 。





图 22 韦伯太空望远镜核心部分通过深冻测试

#### 2.1.2.2 辐射器及新型热控涂层

通过遮阳罩的被动冷却措施，可使 OTE 和 ISIM 的温度低至 50 K，但是 NIRCam、NIRSpec 和 FGS/TF 工作温度为 36 ~ 40 K( 温度波动小于 0. 25 K)，且 MIRI 对热红外的敏感度高，工作温度为 6. 2 K( 温度波动小于 0. 1 K)。所以，在 JWST 上设计了大型辐射器，该辐射器可使科学仪器温度进一步降低至 40 K 以下。为了使辐射器有如此大的散热能力以保持科学仪器设备工作在可接受的温度范围，辐射器表面涂覆了一种由鲍尔宇航技术公司 ( BATC) 研发的低温发射率热控涂层材料鲍尔红外 BlackTM。

此外，为保证飞船上设备的温度处在设定的工作温度，在飞船上也设计了辐射器，该辐射器可把飞船上设备产生的多余热排散到空间。

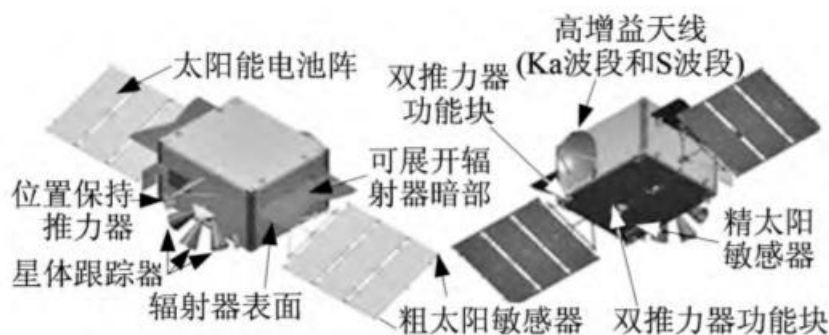


图 23 JWST 飞船上也设计了辐射器

#### 2.1.2.3 隔热安装及低导率复合材料

遮阳罩的使用是为了隔绝太阳、地球以及月亮的光和热，辐射器的使用是为了排散多余的热量，韦伯望远镜上其它的热控措施就是隔热安装以及低热导率复合材料的使用，这是为了减少热量的传导，保证科学仪器设备的低温环境。在韦伯望远镜设计时，低温 OTE 与常温飞船之间通过绝缘展开塔隔热安装，且提供的间距可使辐射量最小化。另外，望远镜支撑机构都为低热导率复合材料，有效降低了热传导影响。

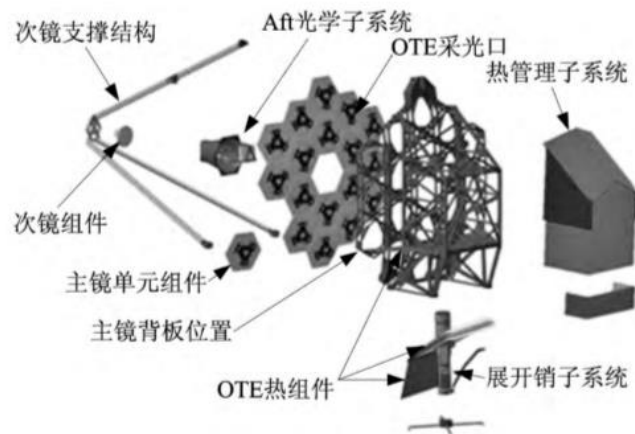


图 24 JWST 光学系统组件中低温 OTE 体现隔热安装

#### 2.1.2.4 低温热开关

热开关的采用也是 JWST 热控系统的一大特色，主要在两个地方进行了应用，一是用于维持固态氢杜瓦瓶的 6 K 低温环境，延长其使用寿命，主要是用在 MIRI 设备上；二是为 ISIM 上的另三个科学仪器设备提供需要的污染和超温控制。热开关主要原理是选用两种不同的材料，利用材料间不同的热膨胀系数实现热开关的闭合与断开。



图 25 ISIM 双热开关模拟板

## 五、引力波探测

### 1 基本情况

GW150914 是由激光干涉引力波天文台（LIGO）于 2015 年 9 月 14 日探测到的引力波现象，是人类首次直接探测到的引力波。相关探测结果由 LIGO、处女座干涉仪（Virgo）研究团队于 2016 年 2 月 11 日共同宣布。这束产生于双黑洞的引力波信号与广义相对论中对双黑洞旋近、并合以及并合后的黑洞会发生衰荡（英语：ringdown）的理论预测相符。同时 GW150914 也是人类对双黑

洞并合的首度观测，展示了双黑洞系统确实存在，且其并合在宇宙的目前阶段仍能发生。信号名称 GW150914 的意义为“引力波 2015 年 9 月 14 日”，GW 是引力波"Gravitational Wave"，150914 是发现日期。

对于引力波实验探寻已经超过了 50 年。其与物质间的作用十分微弱，以致爱因斯坦本人都怀疑其是否能被探测到。此次探测到的引力波所造成的时空变化相对于 LIGO 探测器的一个干涉臂而言，相当于头发丝的宽度之于地球与太阳外最近恒星的距离。然而在并合最后阶段，等价于约 3 倍太阳质量的能量在不到 1 秒的时间内以引力波的形式释出，瞬时功率非常巨大，大于可观测宇宙中所有星体发光功率总和。

此次探测验证了广义相对论最后一项未被证实的理论预测，同时开启了引力波天文学的新纪元。引力波就此作为一种粒子和电磁波之外的新的探针，将被用于探测过去未能探测到的天体现象，如中子星的诞生、演化以及衰亡以及宇宙诞生之初的图景。

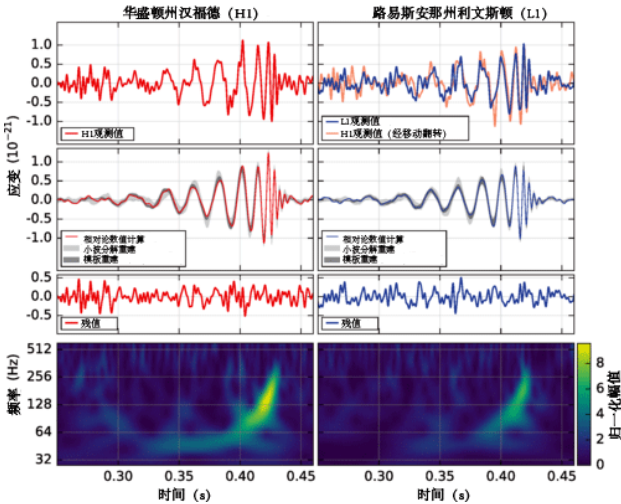


图 26 GW150914 探测结果及理论分析

400 多年前，“现代科学之父”伽利略把自制的望远镜指向了天空，开辟了天文学的新纪元。随着对科学认识的不断深化与技术水平的不断进步，现代天文学已经大大拓展了望远镜的观测能力，实现了从射电波段(波长  $>0.1 \text{ mm}$ )到伽玛波段( $<0.01 \text{ nm}$ )对各种天体进行全方面的精准探测。另外，天体物理学家还发展了对宇宙射线(主要成分为高能质子、核子、电子，及其反物质等)与中微子的观测。所有这些技术的实现，大大地推进了人类对宇宙的认识，引发了人们对宇宙的科学层面上的思考。

但是，无论是电磁波段上的观测，还是宇宙射线和中微子的观测，都有一定的局限性。以电磁波段为例：(1) 并非所有的天体物理活动都有相应的电磁对应体。一般而言并不预期双黑洞合并事件会伴随任何强烈的电磁信号；(2) 即使存在电磁对应体(如双中子星合并事件)，由于光子与物质的相互作用较强，在致密环境下光深很大，只有表面处的光子才能辐射出来，所以它们不能提供天体物理活动深处的直接信息；(3) 在辐射出来的光子的传播过程中，由于宇宙中存在着大量的中性的与电离的介质，使得它们被宇宙学介质吸收、散射等，而难以到达地球。所以，我们需要一架全新的大视野的望远镜去深入理解宇宙上很多极端的(而又恰恰是至关重要的)天体物理学过程。引力波正是提供了这样一个崭新的“观测窗口”，能够克服电磁波观测、宇宙射线与中微子观测上的重重困难，

深入理解极端天体物理环境下的动力学过程。

## 2 关键技术：GW150914 全过程解读

### 2.1 技术背景

长久以来，人们一直纠结于引力波存在的真实性，直到 20 世纪 60 年代费曼用黏珠实验这一理想实验证明了引力波携带能量，从而证实了引力波的真实存在，之后 Bondi 将其广为宣传。从 20 世纪 60 年代起，陆续有人提出利用实验方法测量引力波的想法。虽然引力波十分微弱，对引力波的探测也十分困难，但很快就有直接探测到引力波的声称。虽然之后的观测并不支持这一探测，但这些早期的探索无疑激起了学界对于引力波的巨大兴趣。到目前为止，从低频到高频的许多波段，都有不尽相同的探测手段可用以探测引力波。

在高频段(kHz)，主要的探测方式是**共振棒探测器**。利用引力波和测试质量的共振来提取引力波信号。在低频段(10 Hz~3 kHz)的引力波探测主要由**地面激光干涉引力波探测器**主导。干涉仪利用高功率激光测量相距数千米的测试质量间的空间变化来寻找引力波。较低频(mHz)内的引力波由置于太空的数百万千米基线的**空间激光干涉仪测量**。**脉冲星计时阵列**则能测量超低频(nHz)的引力波，它利用的是精确测量脉冲星电磁脉冲到达地球的时间，并比较不同脉冲星脉冲到达地球时间的空间关联。此外还有利用**宇宙微波背景辐射(CMB)极化模式**测量宇宙原初引力波的方法。

### 2.2 GW150914

引力波事件 GW150914 的发现论文突破 100 次引用仅仅用了四周时间。在新闻发布会的时候，物理学评论快报(Physical Review Letter, PRL)的服务器由于不堪重负而宕机，最后临时扩增了 4 倍的服务器才勉强承受了大量的访问。

在这篇论文中，主要呈现了 3 个事实：**人类首次直接探测到引力波；恒星级双黑洞存在；黑洞与引力波的形式与爱因斯坦的预言没有出入**。这是在人类科技史上具有里程碑意义的一次重大发现。

为了确凿无疑地证明真地探测到了引力波，而非别的什么噪音，需要计算误警率，或者说，背景噪音产生类似数据的可能性，如何准确地估计这一数值并不是一个简单的任务。负责探测的软件实时地分析数据，**当得到的信噪比高于一个预设的阈值时，标志为可能的候选**，当多个探测器在相距一定时间内都有候选时，**被视为同时信号(coincidence)**，并计算总信噪比。人为的在两个探测器得到的候选中引入一个相同的时间平移(确保此平移长于光速通过地球的时长)，使用同样的方法，会得到一批完全不同的同时信号，并可以计算其相应的总信噪比。在 LIGO 公布的这批结果中，一共使用了 38.6 天的数据，其中有总长大约 17 天的时间两台探测器同时处于工作状态。以 0.1 s 为间隔不断平移数据，相当于累计了约 608000 年的数据。这么长的数据中，被探测到的 GW150914 是总信噪比最高的，因此误警率非常低，或者说显著性超过  $5.1\sigma$ 。

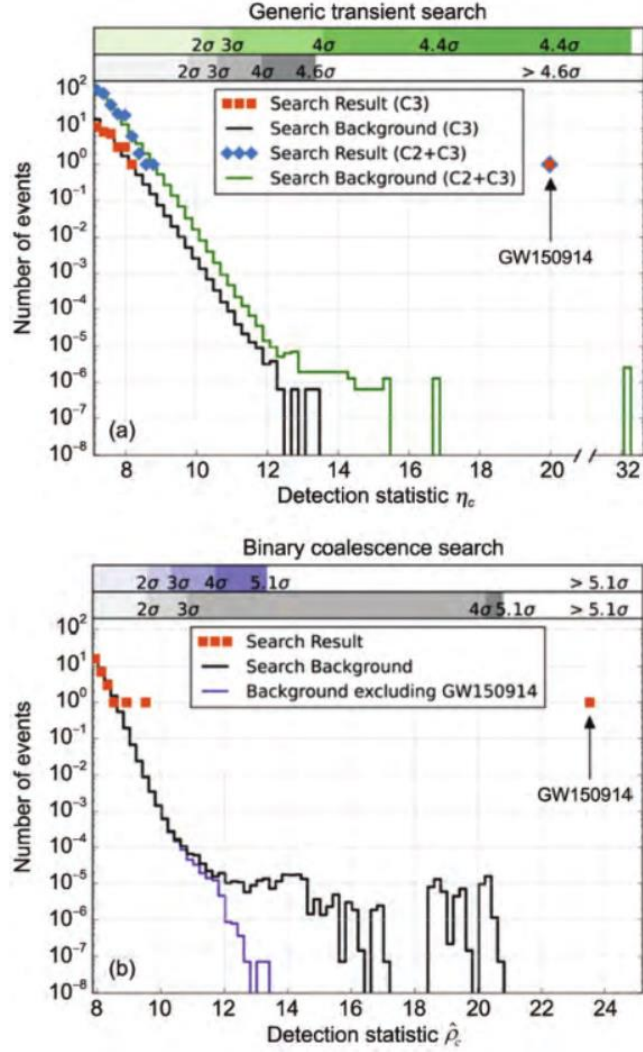


图 27 两种不同的探测方法测量的 p 值 (a) 利用探测非预设模板的引力波暴探测软件 cWB 得到的结果; (b) 利用专门测量双致密星并合信号的 pyCBC 得到的结果

此外，还探测到一个信噪比相对较低的候选体 LVT151012，意味着 2015 年 10 月 12 日探测到的 LIGO/Virgo 瞬变源 (transient)。对这个信号的分析表示它也是来自两个黑洞的并合，距离更远，达到  $1100^{+500}_{-500}$  Mpc，两个黑洞的质量分别为  $23^{+18}_{-5}$  和  $5^{+4}_{-5}$  倍太阳质量。

通过仔细分析数据，对这个信号的一些物理参数进行了限制，比如说，可以限制双黑洞的质量，双星系统的距离等。还可以更进一步对黑洞的自转做出限制。比较可惜的是，这次数据的信噪比相对来说还是不够高，所以不能对自转做出很好的限制，但至少可以说系统的总自转不大，这可以理解为两个黑洞的自转都比较小，或者是两个黑洞自转较大，但由于方向相反而抵消。

为了验证信号与广义相对论的预言是否一致，将广义相对论下拟合的最佳波形从数据中扣除，结果表明残余数据的性质与噪音一致。此外，把数据的旋近部分与铃宕部分分开进行拟合物理参数，得到的结果一致性很高。还可以调节与引力理论相关的参数，看得到的波形是否与观测结果一致，结论是没有足够的证据支持非广义相对论的替代引力理论。总而言之，可以证明，爱因斯坦是正确的。



通过这两次信号，还可以对宇宙中的双黑洞系统的并合事件率做出一定的限制。要注意到，由于我们不知道双黑洞系统的质量分布究竟是如何的，估计或多或少需要一定的假设，并且最终的结果受这些假设的影响很严重。我们可以假设三种情形，每一次探测都是一种独立的分类；黑洞质量分布与质量的对数成正比；黑洞数目是质量的幂律分布。利用一些统计学方法，可以计算出 3 种情形下的事件率，分别为：

$$83_{-63}^{+168} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}, 33_{-26}^{+62} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}, \\ 100_{-79}^{+201} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1} [179].$$

值得注意的是，图 28 所示，根据我们的计算，在接下来进行的第二次、第三次观测运行(O2, O3)颗粒无收可能性非常低，几乎确定会在将来看到更多的引力波信号！除此之外，LIGO 和 Virgo 科学合作组织仔细地研究了仪器的性质，以确保不会把噪音误当做信号。还仔细地研究了仪器的调校，确保在处理数据时把由调校带来的系统误差仔细地考虑进去。同时，研究了这一信号对于天文学的意义，特别对如何形成黑洞双星系统进行了讨论。这一信号的探测把我们预估的双黑洞事件率提高了，也可以研究由双黑洞并合事件产生的随机引力波背景，还同时对比了中微子探测器，看有没有与引力波事件成协的中微子。

LIGO 在探测到引力波信号的时候同时把警报传达给了实现签署过备忘录的合作伙伴，包括中国科学院新疆天文台南山望远镜在内的数十台望远镜对引力波可能的来源进行了观测。

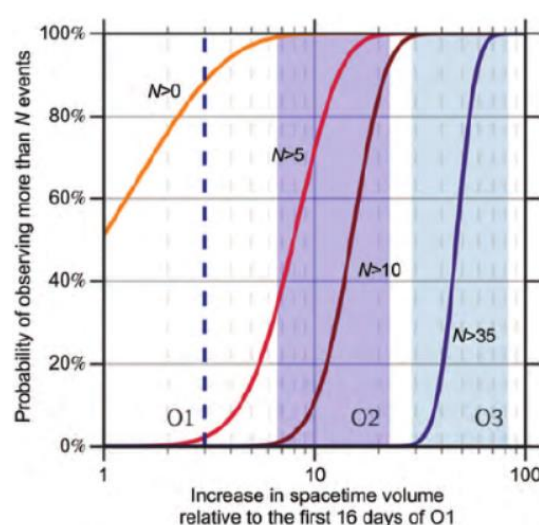


图 28 在未来探测到的 0,5,10,35 个事件的概率分布

## 六、黑洞探测

### 1 基本情况

黑洞（英语：**black hole**）是时空展现出极端强大的引力，以致于所有粒子、甚至光这样的电磁辐射都不能逃逸的区域。广义相对论预测，足够紧密的质量可以扭曲时空，形成黑洞；不可能从该区域逃离的边界称为事件视界（英语：**event horizon**）。虽然，事件视界对穿越它的物体的命运和情况有巨大影响，但

对该地区的观测似乎未能探测到任何特征。在许多方面，黑洞就像一个理想的黑体，它不反光。此外，弯曲时空中的量子场论预测，事件视界发出的霍金辐射，如同黑体的光谱一样，可以用来测量与质量反比的温度。**在恒星质量的黑洞，这种温度往往在数十亿分之一 K，因此基本上无法观测。**

最早在 18 世纪，约翰·米歇尔和皮耶-西蒙·拉普拉斯就考虑过引力场强大到光线都无法逃逸的物体。1916 年，卡尔·史瓦西发现了第一个能用来表征黑洞的广义相对论精确解（也就是史瓦西黑洞），然而大卫·芬克尔斯坦在 1958 年才首次发表史瓦西解做为一个无法逃脱空间区域的解释。长期以来，黑洞一直被认为仅仅来自数学上的好奇。在 20 世纪 60 年代，理论工作显示这是广义相对论的一般预测。约瑟琳·贝尔·伯奈尔在 1967 年发现中子星，激发了人们引力坍缩形成的致密天体可能是天体物理中的实体的兴趣。

预期恒星质量的黑洞会在恒星的生命周期结束的坍塌时形成。黑洞形成后，它可以经由吸收周边的物质来继续生长。透过吸收其它恒星并与其它黑洞合并，可能形成数百万太阳质量（ $M_{\odot}$ ）的超大质量黑洞。人们一致认为，大多数星系的中心都存在着超大质量黑洞。

黑洞的存在可以透过它与其它物质和电磁辐射（如可见光）的相互作用推断出来。落在黑洞上的物质会因为摩擦加热而在外围形成吸积盘，成为宇宙中最亮的一些天体。如果有其它恒星围绕着黑洞运行，它们的轨道可以用来确定黑洞的质量和位置。这种观测可以排除其它可能的天体，例如中子星。经由这种方法，天文学家在许多联星系统确认了黑洞候选者，并确定银河系核心被称为人马座 A\* 的电波源包含一个超大质量黑洞，其质量大约是 430 万太阳质量。

在 2016 年 2 月 11 日，LIGO 科学合作组和 Virgo 合作组宣布第一次直接观测到引力波，这也代表第一次观测到黑洞合并。迄 2018 年 12 月，已经观测到 11 件引力波事件，其中 10 件是源自黑洞合并，只有 1 件是中子星碰撞。在 2019 年 4 月 10 日，首次发布了黑洞及其附近的第一张影像：使用事件视界望远镜在 2017 年拍摄到 M87 星系中心的超大质量黑洞。

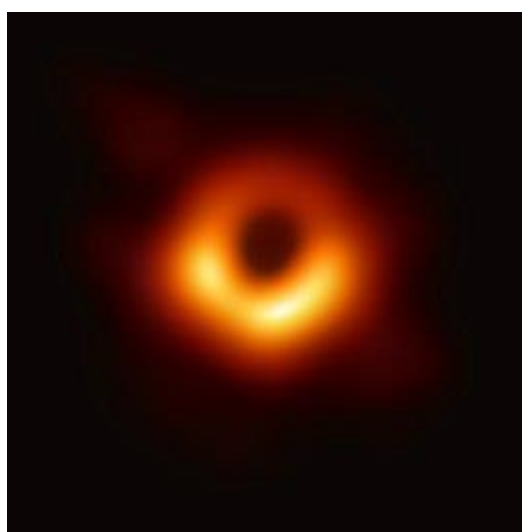


图 29 在巨大椭圆星系 M87 核心的超大质量黑洞，质量大约是太阳的 70 亿倍，如事件视界望远镜发布的第一张图片（2019 年 4 月 10 日）所示。可见眉月形的光环和中心的阴影，这是在黑洞事件视界周围的光环和光子捕获区引力的放大

视觉影像。眉月形肇因于黑洞的自转和相对论放射现象；阴影直径大约是事件视界直径的 2.6 倍

## 2 技术研究历史

黑洞本身是一个引力非常强的天体，要追溯黑洞的历史，要追溯到人们对万有引力的认识。

**万有引力的发现可以追溯到 17 世纪**，牛顿坐在苹果树下面看到苹果掉下来，激发了灵感。他不仅仅意识到这种现象，而且写下了公式，那就是有关于引力的万有引力公式。在此基础之上，牛顿得到了人们所熟知的逃逸速度公式。

在此之后，**更多科学家根据牛顿的理论作了进一步的应用和推广**。在 18 世纪的法国，数学家拉普拉斯想象在宇宙当中有可能会存在着一种天体，它非常致密，以至于从它自身发出的光都不能够从它周围逃脱出来。现在看来这天体就是最朴素的对于黑洞的一种想法。

到了 19 世纪，**更多科学家的观测对于牛顿的理论提出了一些挑战**。到 20 世纪初的时候，物理学家爱因斯坦首先提出了狭义相对论，在十年之后又提出了广义相对论，对引力提出了颠覆性的认识，比如认为引力场其实并不是由质量引起的，而是时空被质量、有质量物体弯曲以后的效应。

在爱因斯坦 1915 年提出广义相对论之后的几个月，德籍物理学家史瓦西得到了精确的爱因斯坦场方程解，这就是“没有转动黑洞的史瓦西解”。在史瓦西 1916 年得到这个解之后的几十年间，黑洞研究的进展其实非常缓慢。

在 20 世纪 30 年代末，美国的原子弹之父奥文海默和他的学生得到了一种学说：**恒星在死亡塌缩的时候有可能塌缩成一个致密的奇点，并且推导出了这个质量的下限，3.2 个太阳质量左右**。

当时间进入 20 世纪 60 年代的时候，黑洞的研究迎来了两项突破性进展：1963 年新西兰的数学家罗伊·克尔通过数学求解的方式第一次精确得到了爱因斯坦场方程的带有旋转黑洞的精确解。1964 年，用观测方法发现了第一颗恒星级的黑洞。**正是理论和观测同时的突破**，使得黑洞研究领域迎来了它的黄金时代，在接下来的二三十年，一大批天文学家、物理学家投身于这个领域。现在人们所知道的有关于黑洞知识基本上都是在这段时间内得到的。

在这一时期，有一位非常知名的相对论物理大师——普林斯顿大学的教授约翰·惠勒，他不仅学术研究非常出色，而且在科学传播方面也做了非常多的工作。黑洞这个名字经过他的推广，才得以被众人所知。另外，虫洞这个名词也是他提出的。

在惠勒之后，霍金进一步发现了所谓的霍金辐射，改变了之前经典广义相对论对于黑洞的认识。

到目前为止，科学家已经发现了非常多的黑洞，通过质量可以把它们分解为三大类：

**一类是恒星量级的黑洞，也就是说它的质量可以从 3 倍太阳质量到 100 个太阳质量之间。**

**第二类称之为超大质量的黑洞，它的质量起点是几十万倍的太阳质量，或者上百万倍的太阳质量，一直到几十亿倍甚至于上百亿倍的太阳质量。介于其中的这一类黑洞，称之为中等质量的黑洞。**但是对于中等质量的黑洞，现在观测的直接证据非常少，但是理论研究证明，它们应该是存在的，所以寻找中等



质量的黑洞也是目前研究的一个热门课题。

对于黑洞，它可以说是宇宙当中最为神奇，也是最为简单的一类天体。对于黑洞，只需要 3 个物理量就可以描述它，一个是它的质量，一个是它的转动，另外一个就是它的电荷。

在宇宙当中，气体几乎都是以等离子体状态存在，会存在非常多的自由电荷。如果一个黑洞带电，那很容易吸附周围的带电粒子而达到电力平衡。所以最终只剩下两个物理量，一个质量，一个转动，这个时候，就可以通过所谓的克尔度规来完整描述天体物理学当中的黑洞，科学家主要的任务就是测量黑洞的这两个基本量。

在银河系中，按照理论，还应该存在着上亿个恒星量级的黑洞。但遗憾的是人类到目前为止仅仅探测到了几十个，而且只有不到 20 个恒星量级的黑洞有非常精确的质量测量，其他将近上亿个的黑洞，现在并没有探测到。

## 七、引用文献 / References

- [1] 朱丽春.500 米口径球面射电望远镜(FAST)主动反射面整网变形控制[J].科研信息化技术与应用,2012,3(04):67-75.
- [2] Cas.《500 米口径球面射电望远镜取得首批成果》.(2017.10).[20220527].  
[https://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/zxjz/201710/t20171010\\_4617092.shtml](https://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/zxjz/201710/t20171010_4617092.shtml)
- [3] 余群,刘欣.詹姆斯·韦伯太空望远镜低温热控系统分析[J].飞航导弹,2018(02):72-76+90.DOI:10.16338/j.issn.1009-1319.2018.02.15.
- [4] 刘东立,吴镁,汪伟伟,甘智华.詹姆斯·韦伯太空望远镜低温制冷系统的发展历程[J].低温工程,2013(06):56-62.
- [5] 刘霞.韦伯望远镜即将开启太空之旅[N].科技日报,2021-09-06(004).DOI:10.28502/n.cnki.nkjrb.2021.004971.
- [6] 刘见,王刚,胡一鸣,张腾,罗子人,王晴岚,邵立晶.首例引力波探测事件 GW150914 与引力波天文学[J].科学通报,2016,61(14):1502-1524.
- [7] 吴曼青,曹锐,陶小辉,靳学明,洪一,秦浩,向海生,陈俐,张锦中,史鸿声,李庄,方佳,周新星,孙金中,刘小明,刘秉策,荣大伟,唐小兰,杨会越,王志勇,彭伟.世界最大综合孔径望远镜 SKA 低频数字阵列系统研究[J].中国科学:信息科学,2015,45(12):1600-1614.
- [8] 光明日报.《中科院发布<2016—2030 空间科学规划研究报告>》.(2016/3/18).[20220602].<https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/3/340884.shtml>
- [9] 吴季等.《2016—2030 空间科学规划研究报告》[M].科学出版社.2016
- [10] 苟利军.《苟利军:黑洞研究的历史》.(2019.11.28).[2022.6.9].  
[https://www.cas.cn/zjs/201911/t20191128\\_4725569.shtml](https://www.cas.cn/zjs/201911/t20191128_4725569.shtml)
- [11] 安涛,武向平,洪晓瑜,叶叔华,毛羽丰,郭绍光,劳保强.SKA 大数据的科学应用和挑战[J].中国科学院院刊,2018,33(08):871-876.DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.2018.08.016.
- [12] 彭勃,金乘进,杜彪,秦波,郑元鹏,卢雨,梁赞明,徐海光,赵公博,田文武,刘国玺,周建寨,冯贞国,师民祥,张一凡,金超,闫丰,伍洋,刘鸿飞,安涛,顾俊骅,牛传峰,耿京朝,朱岩,朱凯,于京龙,柴晓明,张立民,张翔,李婧楠,李硕,刘丽佳.持续参与世界最大综合孔径望远镜 SKA 国际合作[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2012,42(12):1292-1307.
- [13] 詹姆斯·韦伯:为何以他之名命名史上最先进太空望远镜?[J].卫星与网络,2021(09):58-60.
- [14] 许琦,冯羽静.一种基于专利引证密度的专利丛探测方法:专利池中的黑洞效应[J].情报杂志,2015,34(09):35-39.
- [15] 唐孟希,李芳昱,赵鹏飞,唐敏然.引力波、引力波源和引力波探测实验[J].云南天文台台刊,2002(03):71-87.DOI:10.14005/j.cnki.issn1672-7673.2002.03.009.
- [16] 黄玉梅,王运永,汤克云,康飞,张承民,徐军,郭有光.引力波理论和实验的新进展[J].天文学进展,2007(01):58-73.
- [17] 黄双林,龚雪飞,徐鹏,Pau Amaro-Seoane,边星,陈跃文,陈弦,房震,冯学锋,刘富坤,李硕,李想,罗子人,邵明学,Rainer Spurzem,唐文林,王龔,王瑛,臧云龙,刘润球.空间引力波探测——天文学的一个新窗口[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(01):38-59.

- [18]刘见,王刚,胡一鸣,张腾,罗子人,王晴岚,邵立晶.首例引力波探测事件 GW150914 与引力波天文学[J].科学通报,2016,61(14):1502-1524.
- [19]吴庆文.首张黑洞照片诞生——谈黑洞的前生今世[J].自然杂志,2019,41(03):157-167.
- [20]闫国锋,李长会,陈亮,张润涛,刘力加.平方公里射电望远镜阵 SKA[J].四川兵工学报,2010,31(10):124-127.
- [21]杜彪,伍洋,周建寨,张文静.平方公里阵中国验证天线光学设计[J].中国科学:信息科学,2015,45(08):1001-1013.

## 八、部分进度日志

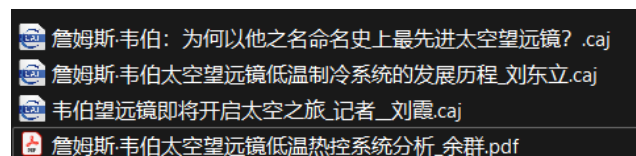
20220401 对 fast 部分进行查找

20220405 逐步完善整体文稿的结构，包括综述、研究方法、参考文献等。并对话题做出初步的资料查询，后期会对具体内容做出更改和完善。

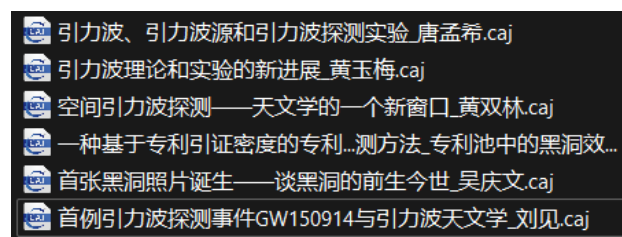
20220410 对 fast 进一步细化了解。主要在 fast 官方网站 <https://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/>

查阅相关咨询，对 fast 成果分析部分细化内容。

20220417 对韦伯望远镜做进一步的了解，查阅相关论文，对相关信息进行完善，主要集中于了解了 JWST 低温热控系统。具体查看论文如下：



20220424 对引力波探测做进一步的了解，就首例引力波探测事件做了一定分析，并对背后双黑洞合并过程进行简要了解。同时开始对黑洞做一些分析。本次参考论文如下：



20220501 对 SKA 进行了解，主要对 SKA 基本组成 IFAA、抛物面阵列和 MFAA 做了初步了解。

