

下一代光学时域巡天：司天工程

中国科学院国家天文台 商朝晖

代表司天工程推进联盟

丽江CVO 2022.07.19

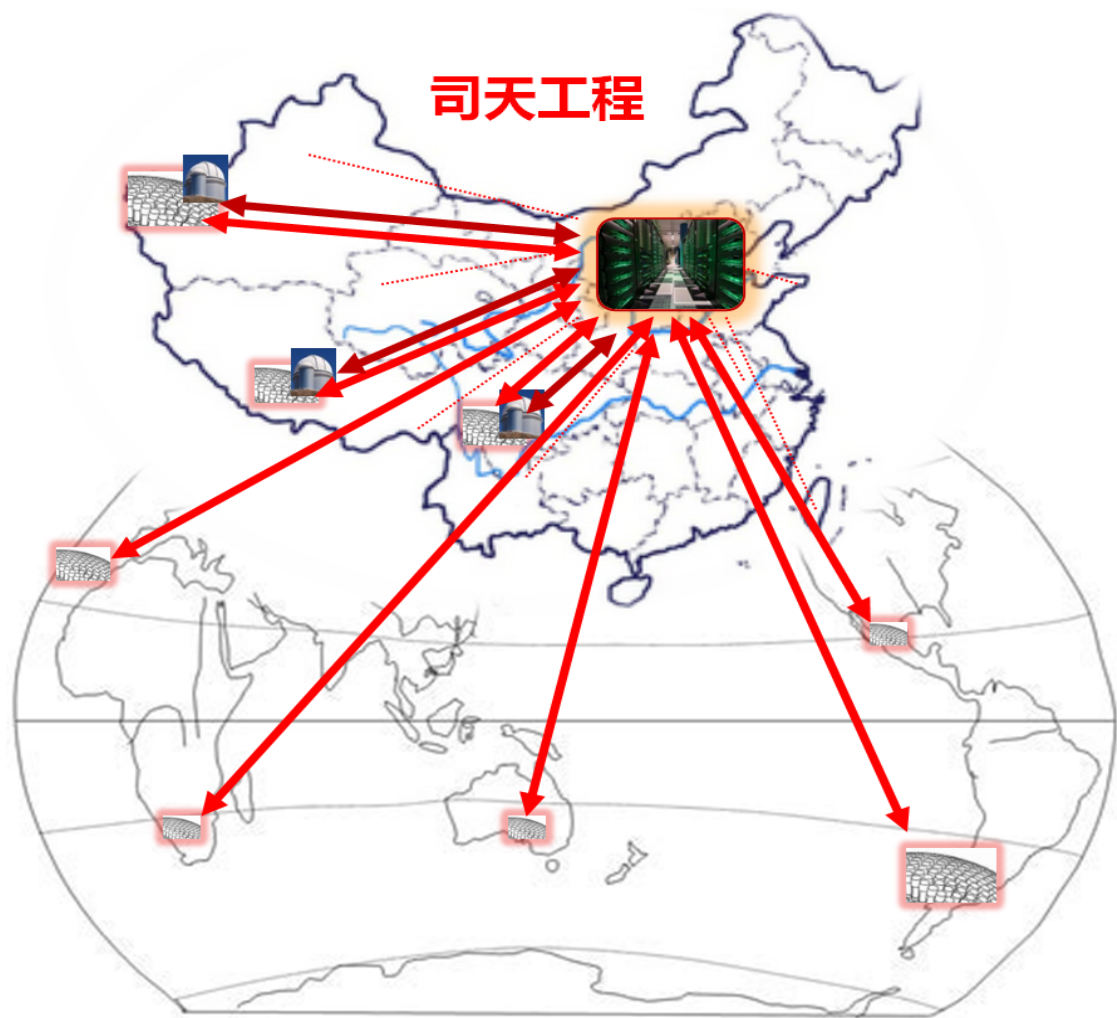
瞄准天文前沿、孕育重大突破

时域天文学与司天工程

——面向动态宇宙的光学大型望远镜阵

中国科学院国家天文台 刘继峰

代表司天工程推进联盟



报告内容

- 时域天文的重要性、成就和问题
- 现有时域巡天项目的突出问题
- 司天工程提供的解决方案
- 司天工程与VO



自然科学基金委《天文学十四五及中长期规划》景益鹏+

多信使天文学：使用引力波、中微子、宇宙线等**非电磁手段**来研究致密天体性质、丈量宇宙时空、追踪剧烈天体物理过程、**检验基本物理规律**

时域天文学：采用多波段、多时标方式研究**动态宇宙**，通过**重复观测**来揭示宇宙中各类天体的变化，**发现和探索新天体**、揭示未知的新现象、新规律

行星大科学：关乎生命起源的行星大科学，是集系外行星、太阳系行星、天体生物学、天体化学、地质学研究方法于一体的高度交叉学科，旨在探索行星与**生命的起源和演化**

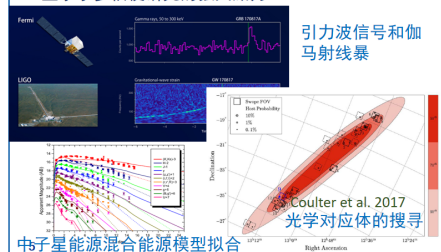
多波段、手段联合观测：不同侧面、不同类型天体更加全面的信息

大天区面积深度巡天：覆盖尽可能多的天体类型和数量

高频采样、长期持续监测：暂现源和变源的长期/短时标的变化特点

引力波暴电磁对应体：

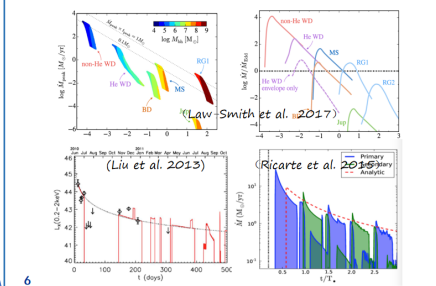
- 2017年，人类再次从一对中子星的并合事件中，首次实现了**引力波和多波段电磁波的联合探测**
- 有力推动了**短伽马射线暴起源和宇宙中超铁元素（如金、银、铀等）起源**等重大科学问题的解决，显示了多信使研究的强大威力



+++

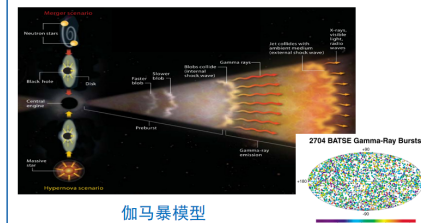
黑洞潮汐撕裂恒星事件 (TDE)

- 发生概率低
- 科学意义显著**：理解超大质量黑洞 (SMBHs) 的起源及其宇宙学成长历史、黑洞吸积物理、引力波多信使观测等



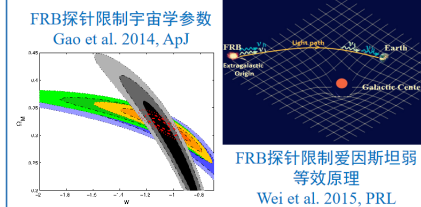
超新星与伽马射线暴：

- 超新星是大质量恒星在演化末期经历的剧烈爆炸，反映恒星演化最后时刻的空间结构和物理性质
- 伽马射线暴是宇宙中最为剧烈的恒星尺度爆发现象，是**研究早期宇宙的探针**，可用于探索第一代/早期恒星、早期金属丰度、宇宙再电离等

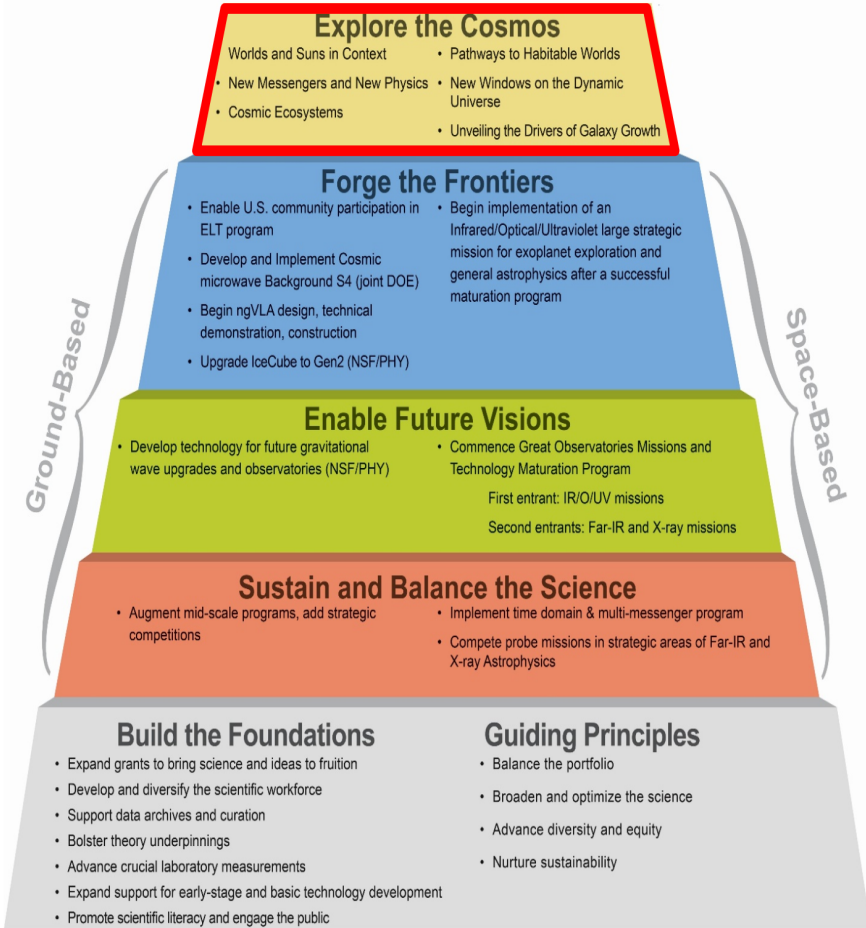


快速射电暴 (FRB)

- 一种持续时间仅为数毫秒的爆发性、脉冲式射电辐射天文现象，瞬时辐射流量可达数十央斯基 (Jy)
- 全新的天体物理现象，起源未知**
- 是从无线电到高能伽马射线，甚至中微子、引力波天文台的探测对象，是从**时域天文学到干涉成像多课题的研究目标**



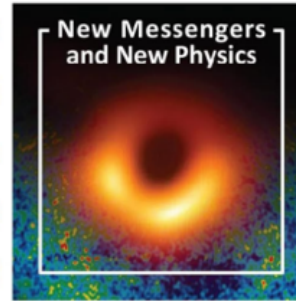
Realizing the Astro2020 Program: Pathways From Foundations to Frontiers



Priority Area: Pathways to Habitable Worlds

We are on a path to exploring worlds resembling Earth and answering the question: "Are we alone?" The task for the next decades will be finding the easiest of such planets to characterize, and then studying them in detail, searching for signatures of life.

系外行星及宜居性
宿主恒星活动性
系外行星生命信号



Priority Area: New Windows on the Dynamic Universe

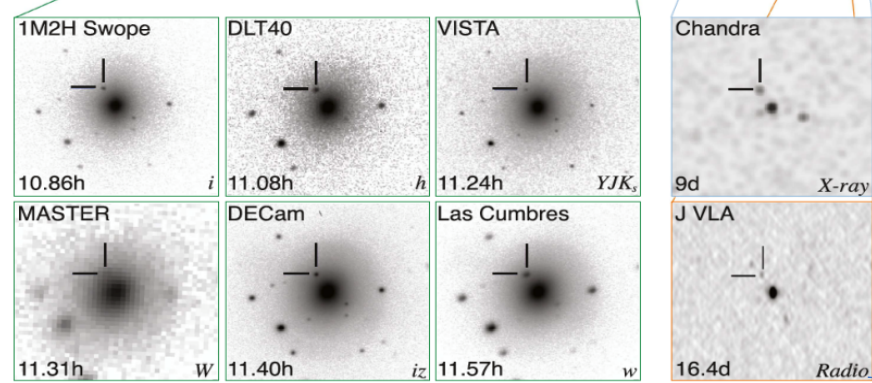
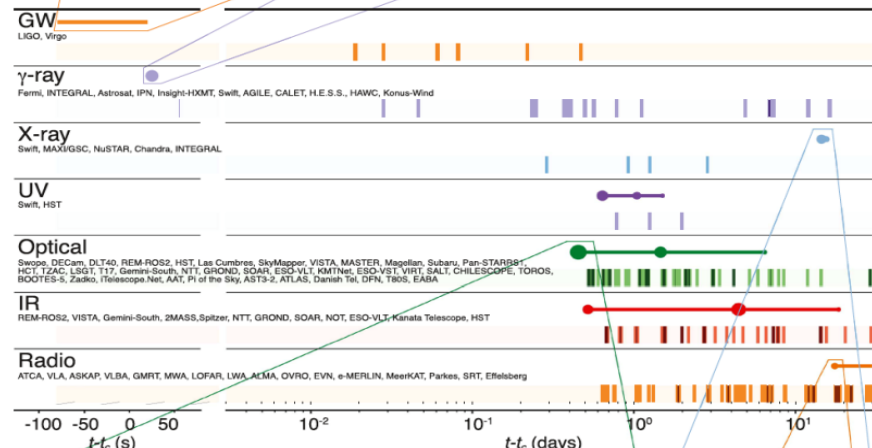
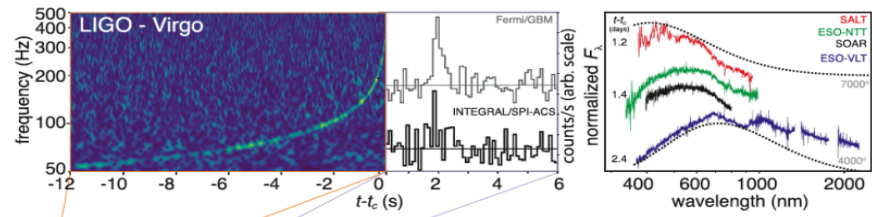
The New Windows on the Dynamic Universe priority area involves using light in all its forms, gravitational waves, and neutrinos to study cosmic explosions on all scales and the mergers of compact objects

动态宇宙新窗口
多信使多波段
瞬变天体
致密天体



Priority Area: Unveiling the Drivers of Galaxy Growth

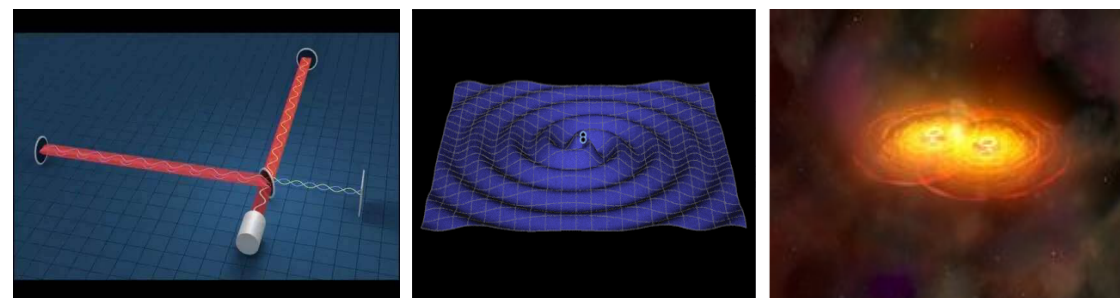
The priority area involves unveiling the drivers of galaxy growth, focusing on processes affecting galactic scales



引力波探测获2017年诺贝尔物理学奖



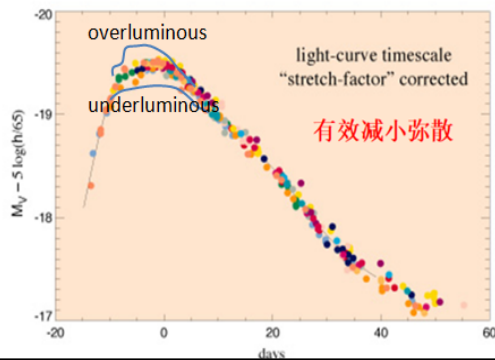
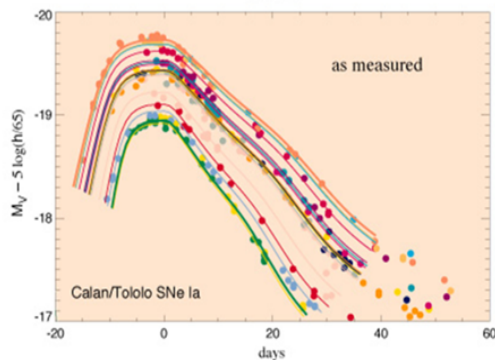
-> **引力波天文学**：致密天体并合之电磁对应体



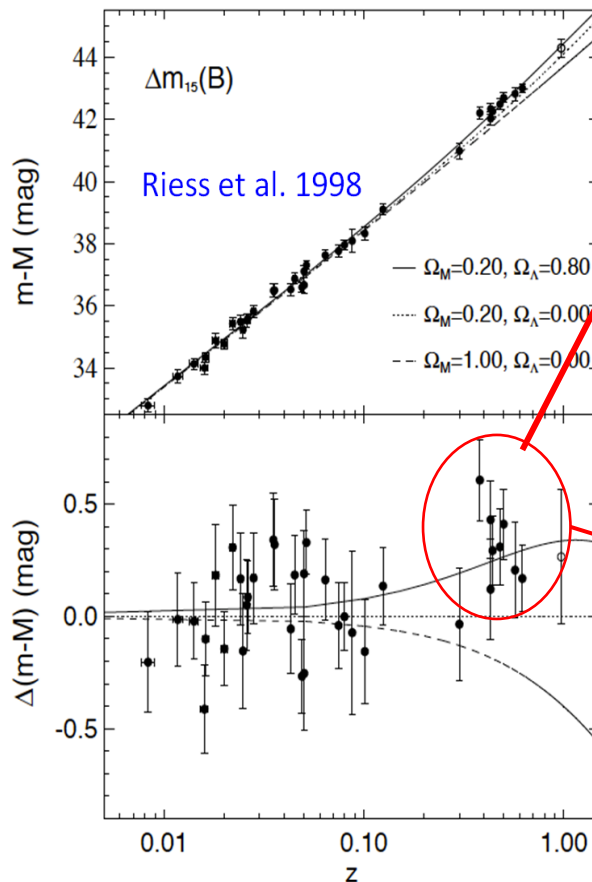
GW170817的电磁对应体观测

- **光学发现**：11小时后探测到 \leftarrow 1米Swope巡天
- **触发后随**光学光谱：1天之后获取
- 探测到后期光变和光谱可以由中子星重元素衰变解释，但反映更关键物理的早期信息被丢失，因此无法区分最核心追求的致密天体模型！
- **问题**：需要五个小时内的极早期光变来区分模型！

Ia型超新星和宇宙学



SNIa：可标准化烛光



SNIa看起来比纯物质膨胀宇宙预想的暗！



2011年诺贝尔奖物理学
宇宙在加速膨胀
→存在“暗能量”

存在问题：

- ❑ 黄金样本测距精度差：10%！
- ❑ 选择效应和系统误差不清楚！
- ❑ Ia型超新星前身星和物理本质不确定
因为缺少超新星爆发极早期信息

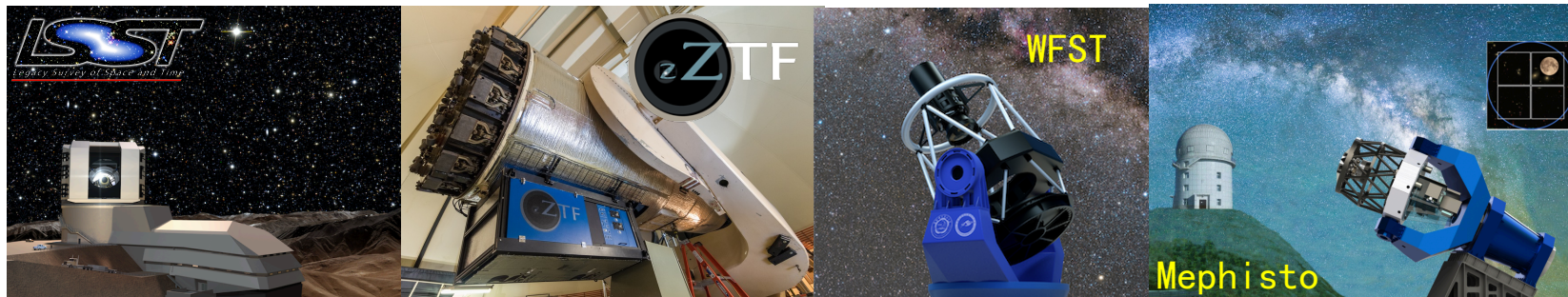
时域天文学的关键：快速+深度巡天



- 天文学的发展已经进入全面探索动态宇宙的新阶段，除引力波等热点问题外，也瞄准未知的新现象和新理论。
- 大天区和**高频次**的光学巡天是时域天文发展的重要方向。

项目	口径 (米)	视场 (平方度)	巡天面积 (平方度)	Cadence
LSST	8.4	9.6	20000	3-4 天
ZTF	1.22	47	30000	~ 3天
WFST	2.5	6.5	20000	~ 4天
Mephisto	1.6	3.1	26000	~ 2周

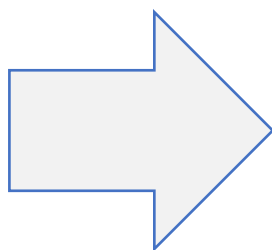
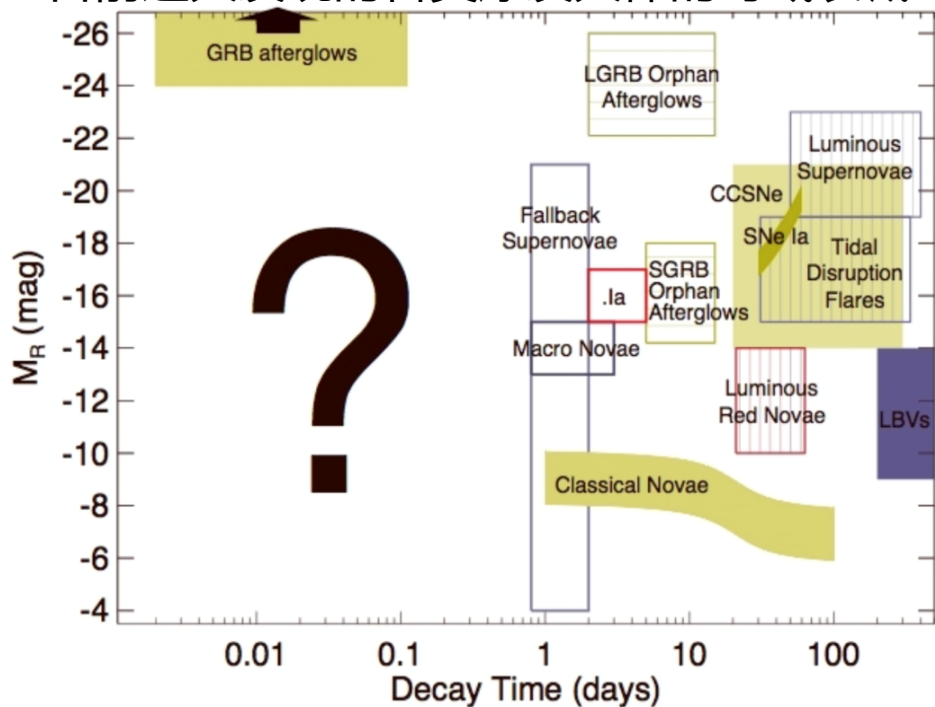
- 技术接近瓶颈，单台望远镜已无法同时满足大天区、深星等、**短时标**时域巡天的需求。



如何迅速捕捉爆发天体？并快速有效分类？



目前巡天发现的各类爆发天体的时域衰减时标 --> 需要进行大天区高频率多色深度巡天 并对罕见机会源快速响应



司天工程：高频率多色深度全天巡天

- 现有巡天采样间隔：>3天
- 司天工程采样间隔：30分钟，提高两个量级
- ◆ 同一天区三色同时成像祛除假源、选取罕见源
- 深度：单次曝光探测极限21等
- 时域观测模式的变革：“巡视” → “深度凝视”
- 对罕见机会源即时触发后随光谱观测

宇宙彩色录像机

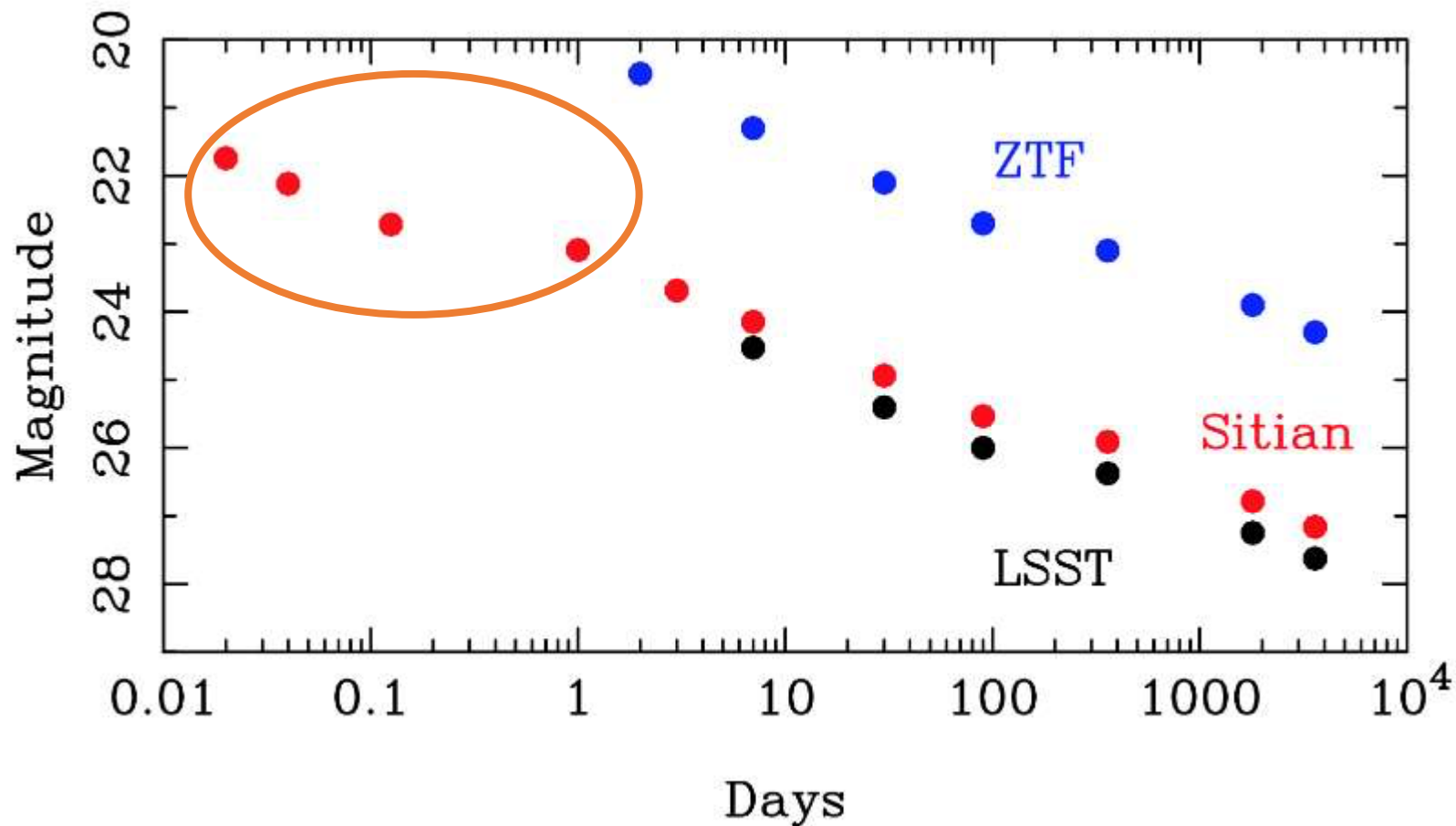
即时发现+证认、回放历史记录



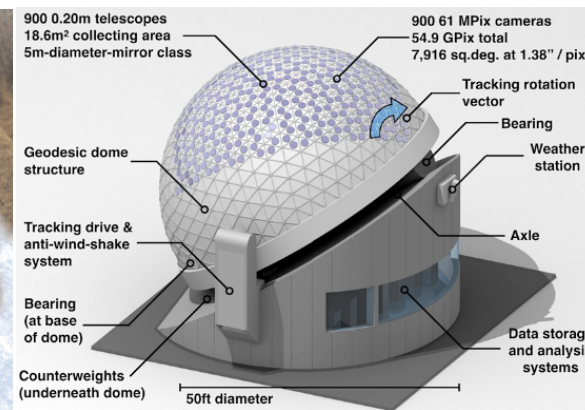
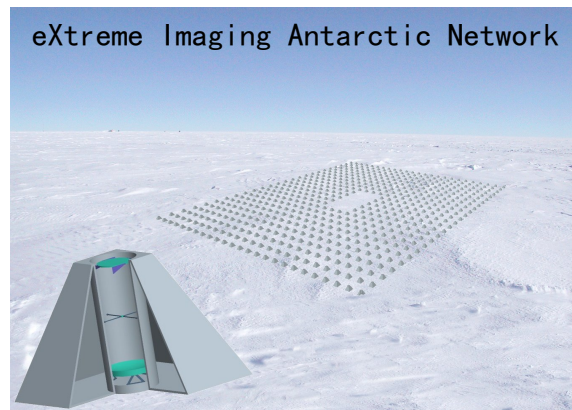
如何迅速捕捉爆发天体？并快速有效分类？



司天工程与LSST、ZTF探测能力对比



- 未来的短时标时域巡天，利用大规模**望远镜组阵**是唯一选择。
 - 射电天文的组阵重在干涉（VLA、ALMA、SKA）；
 - 光学望远镜的组阵巡天需求日趋急迫。



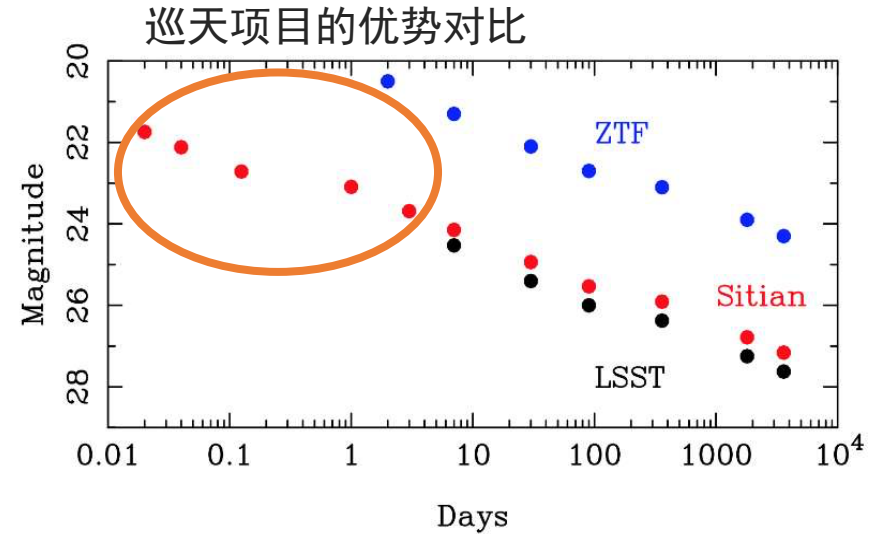
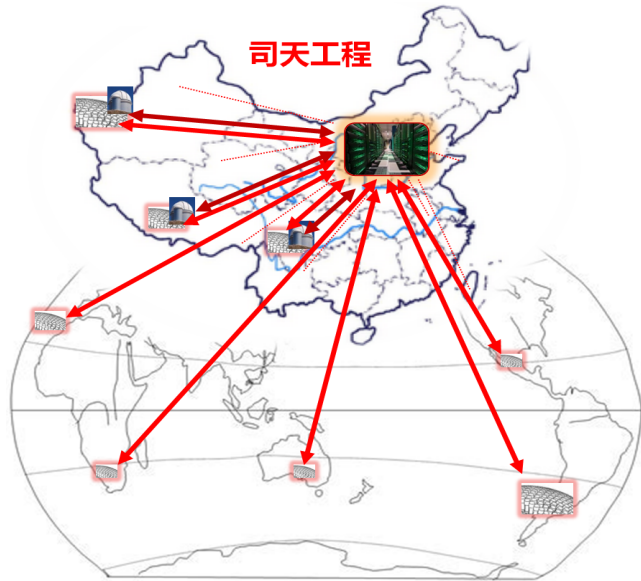
- 早期南极“XI AN计划”概念；
- 400台小望远镜；
- 固定指向。

- 紫台MASTA；
- 空间碎片观测；
- 20台小望远镜；
- 指向跟踪。

- Argus Optical Array (arXiv:2107.00664)；
- 900台小望远镜（20cm）；
- 同步跟踪；
- 低成本。

➤ 司天工程：发现与精测的超级平台

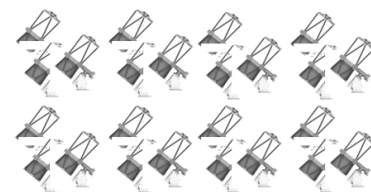
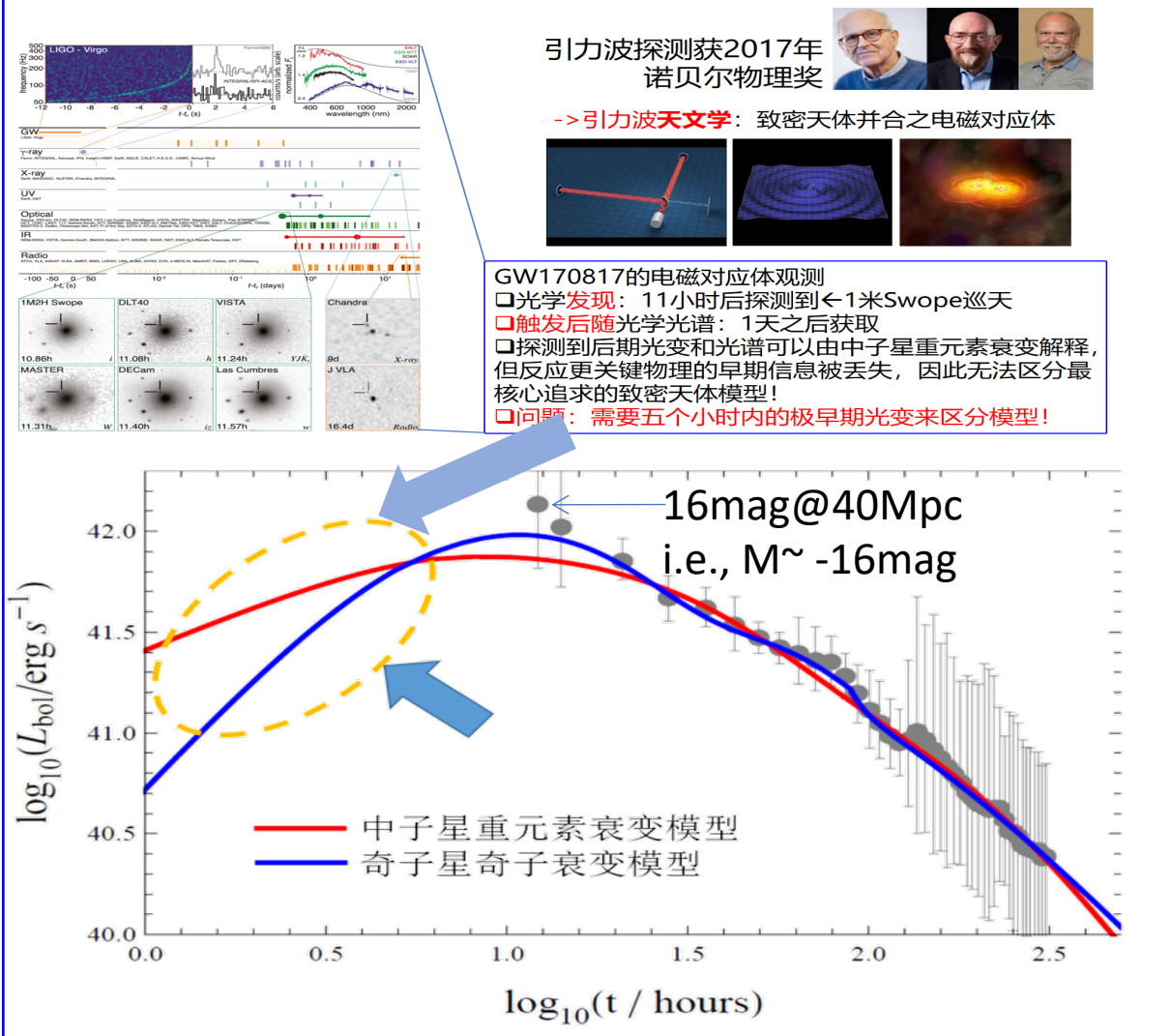
- 大规模米级望远镜：实现每30分钟、10000平方度的三色成像；
- 后随光谱望远镜：获取瞬变源即时光谱。



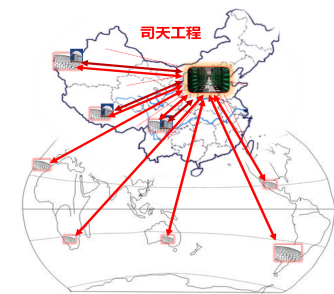
司天的挑战：

- 数以百计的望远镜有机组成**单一**大设备（司天阵）；
- 跨台站、全球化布阵；
- **无人值守**，自动巡天。

引力波暴电磁对应体研究的成绩与问题



司天工程优势



1. 全天区覆盖保障不会遗漏引力波暴的电磁对应体（千新星），无需重新费时定位搜寻
2. 基于宇宙录像，可以获得爆发前历史信息，以及爆发半小时内开始的早期多色数据
3. 专有光谱望远镜对电磁对应体即时发现做出即时反应，获得关键的极早期光谱演化数据
 - 保证获得五个小时内的极早期光变数据和光谱数据，区分中子星/奇子星模型，获得致密天体状态方程
 - 研究千新星的极早期物理，获得并合产物的早期光谱数据，研究超铁元素形成

那么，司天工程能探测到多少千新星呢？

□要能够揭示千新星辐射峰的基本轮廓（特别是上升段），预计望远镜极限星等至少要比辐射峰值深2个星等左右。

□对于预期不同的峰值绝对星等，相应的探测率（**单次曝光极限星等21 Mag**）：

绝对星等	-17 Mag	-16 Mag	-15 Mag	-14 Mag
极限距离	400 Mpc	250 Mpc	160 Mpc	100 Mpc
每年探测率	5.9-99	1.5-25	0.4-6.3	0.1-1.6

~GW170817

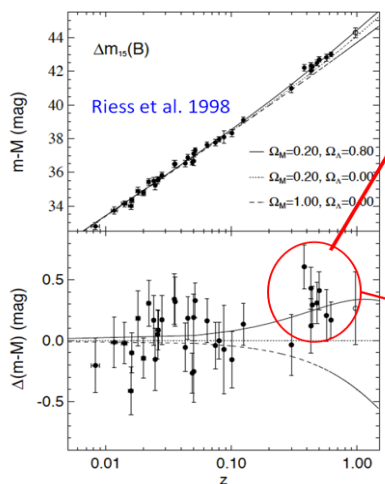
□对3小时获得的6幅图像进行叠加后的探测率（**叠加极限星等22 Mag**）：

绝对星等	-17 Mag	-16 Mag	-15 Mag	-14 Mag
极限距离	630 Mpc	400 Mpc	250 Mpc	160 Mpc
每年探测率	24-395	5.9-99	1.5-25	0.4-6.3

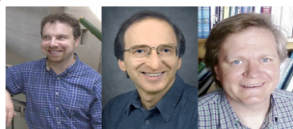
~GW170817

可基本保障
每年监测到
一例信号质
量较高的千
新星辐射峰

Ia型超新星与宇宙学研究的业绩与问题



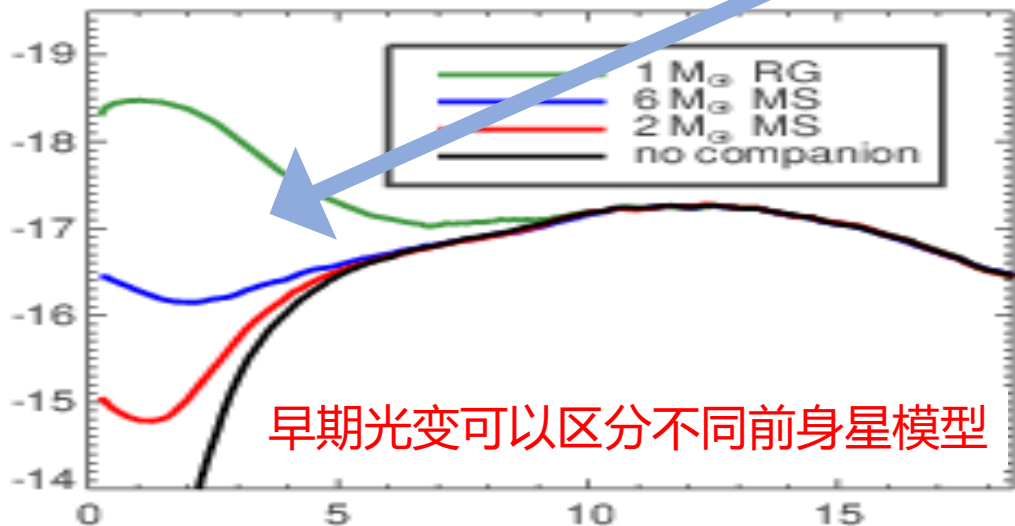
SNIa看起来比纯物质膨胀宇宙预想的暗!



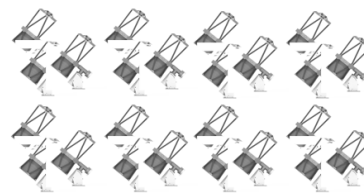
2011年诺贝尔奖物理学
宇宙在加速膨胀
→存在“暗能量”

存在问题:

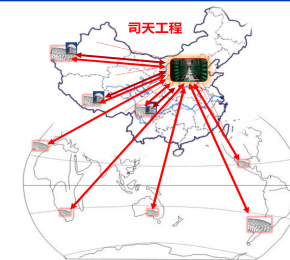
- ❑ 黄金样本测距精度差: 10%!
- ❑ 选择效应和系统误差不清楚!
- ❑ Ia型超新星前身星和物理本质不确定
因为缺少超新星爆发极早期信息



早期光变可以区分不同前身星模型



司天工程优势



1. 基于宇宙录像，可以获得超新星爆发前历史信息，以及爆发半小时内开始的早期多色数据
 2. 同时三色测光观测可以有效去除假变源，并基于颜色进行即时初步分类，确定光谱后随观测策略
- 预计每年发现数千颗**Ia型超新星**，可以确定前身星模型并进行细致分类，大幅度提高测距精度

司天工程优质Ia型超新星光变曲线年均样本数量

观测要求	曝光时间	超新星数
~-10天(S/N>50)	60s x 8	3737
极大时(S/N~100)	60s x 16	7455
~+30天(S/N>50)	60s x 16	5656

- 发现大质量恒星死亡的**核塌缩超新星**的极早期辐射（激波暴），限制前身星和爆发模型

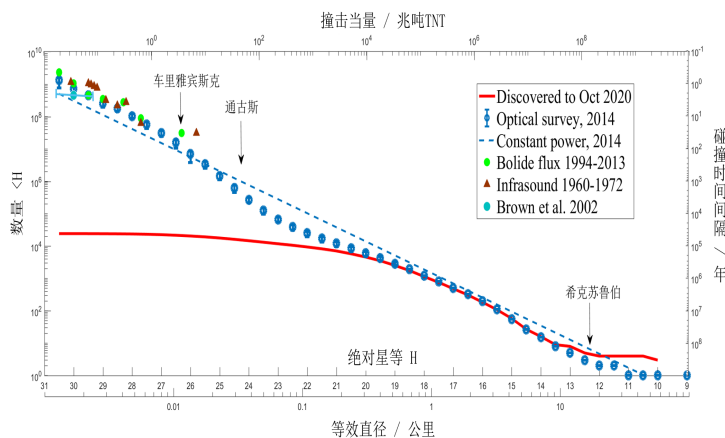
2018.9.5-12一周内新发现的穿过地月系的NEO

Aug 31 2018 12:26:48 UTC JD 2458362.018519
Fri Aug 31 2018 05:13:20 GMT-0700 (Pacific Daylight Time)

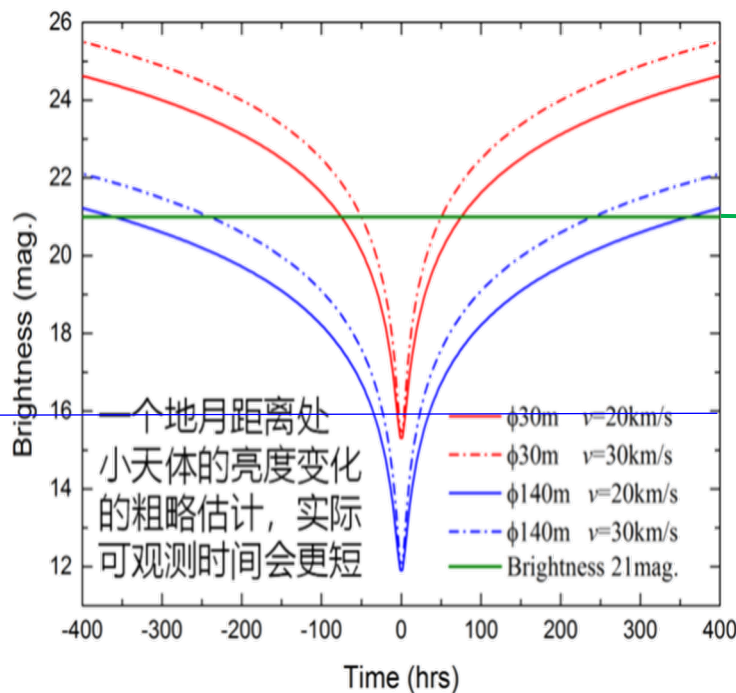


通古斯大爆炸

地基大视场相机阵
GWAC探测极限16mag
几乎没有预警时间！

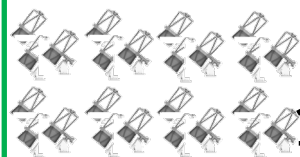


- 近地天体 (NEO) 坠落事件深刻地改变了地球，对地球环境造成深远影响并可能对人类生存环境造成致命破坏
- 目前40米大小的NEO被发现的比例 < 1%：此类小天体只有在距离地球非常近时才足够亮而被探测到，探测窗口甚至短于天的时标

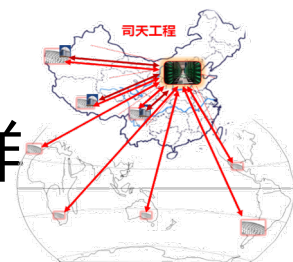


一个地月距离处
小天体的亮度变化的
粗略估计，实际
可观测时间会更短

司天工程优势



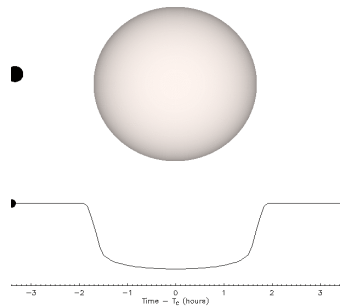
全天区高频率深度采样
及时发现灾害小天体



大小/米	观测概率/2年内	观测概率/20年内
10	0.53%	1.57%
20	1.56%	5.34%
40	3.89%	15.24%
100	12.89%	45.15%
140	19.57%	60.08%

司天工程的优势

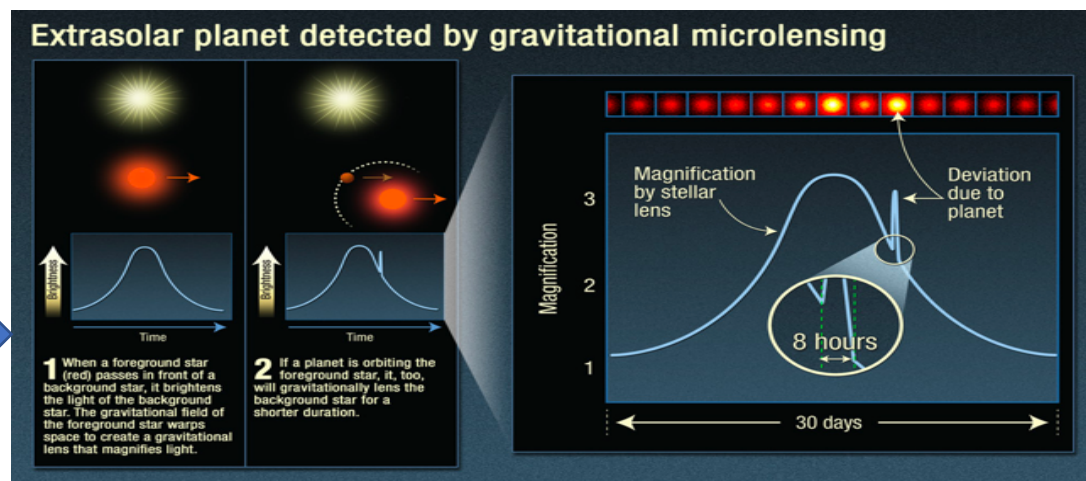
1. 视场：100倍于Kepler
2. 空间分辨率：高于TESS
3. 独特能力：连续、基线长、多色测光
4. 完备无偏：巨量恒星样本



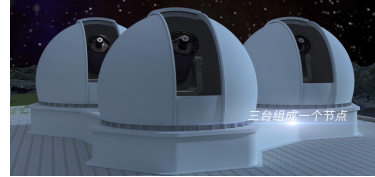
r波段星等范围	恒星数量	测光精度	行星出现概率	潜在可探测行星数量
<12	700万	0.1%	15%	1.05万
12-14	1500万	0.5%	5%	0.75万
14-15	2800万	1%	0.5%	0.14万
>15	>5000万	>2%	<0.1%	0.05万

预期产出

- 凌星法潜在探测行星数量约为**2万颗** (现有4000+)
- M型矮星周围的行星预计约为**500颗**
- 微引力透镜可探测约**500颗**冷行星



巨量恒星高频率采样的多色长期监测利于探测冷行星的微引力透镜

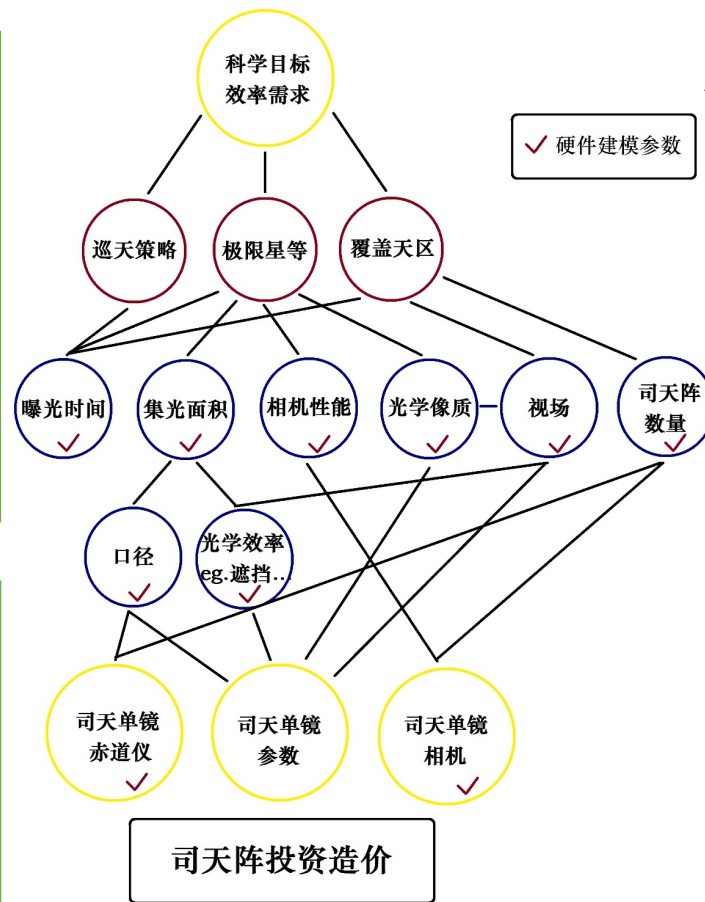


超大视场望远镜系统：

- 超大视场望远镜设计与研制
- 国产化、标准化硬件模块
- 硬件参数化模型：视场、巡天深度、巡天周期、造价等
- 南京天文光学技术研究所：1.2米司天阵原型望远镜
- 长春光学精密机械与物理研究所：1.2米大视场望远镜

大靶面拼接相机：

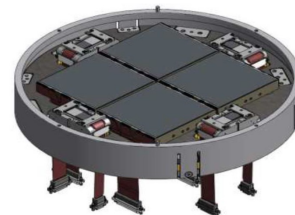
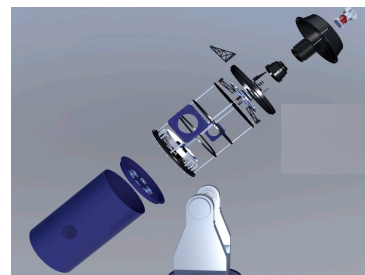
- 大尺寸CMOS焦面拼接技术（国产化）
- 大尺寸拼接焦面制冷、大型杜瓦真空长效自维持、CMOS多通道电子学、故障自诊断等关键技术
- 国家自然科学基金项目“大尺寸CCD拼接焦面关键技术研究”的支持，已完成关键技术小型CCD上的突破
- 科教融合项目：校园天文台建设，已完成小尺寸sCMOS相机研制技术验证



望远镜智能控制

智慧相机

工业化制造



中国科学院大学支持做原型样机

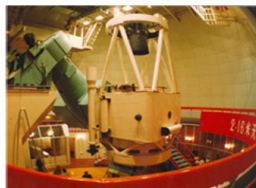


中国科学院 南京天文光学技术研究所
 国家天文台 Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology
 National Astronomical Observatories, CAS

司天工程-阵 原型样机

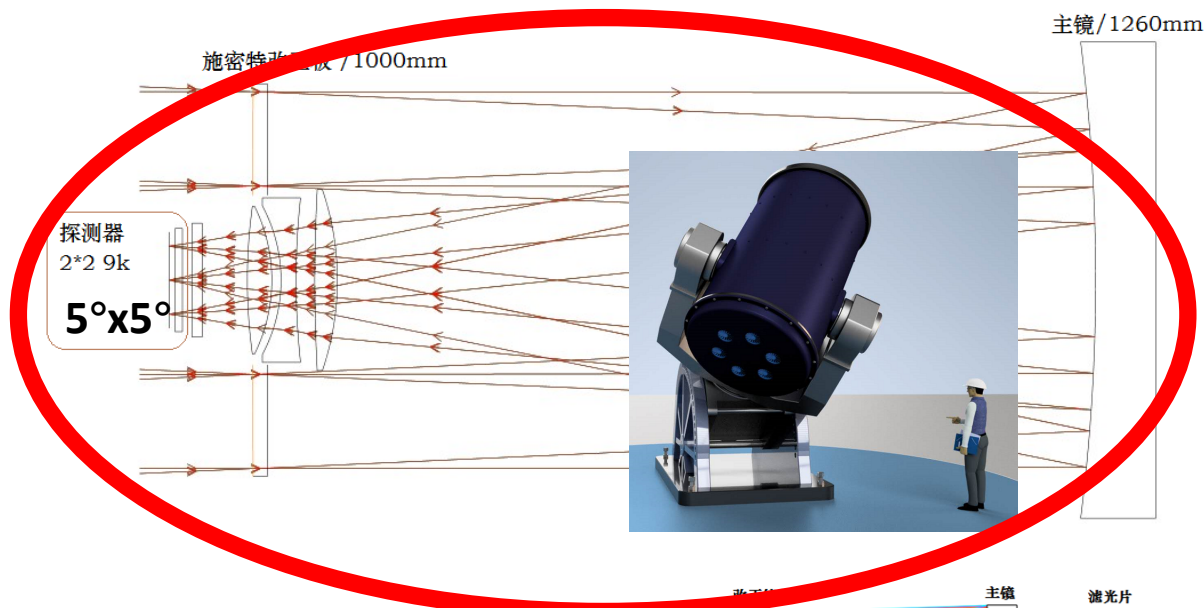
李正阳

2020-10-28



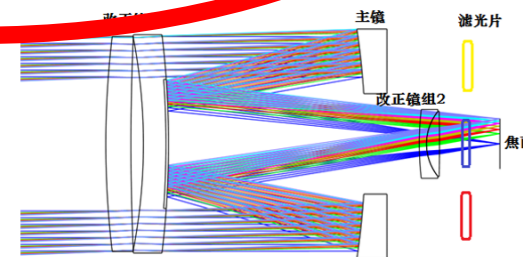
司天-北京会议 (讨论会议)

2020.12.20部分验收, 2021年底首光@兴隆



Mini司天节点 (3台3色)

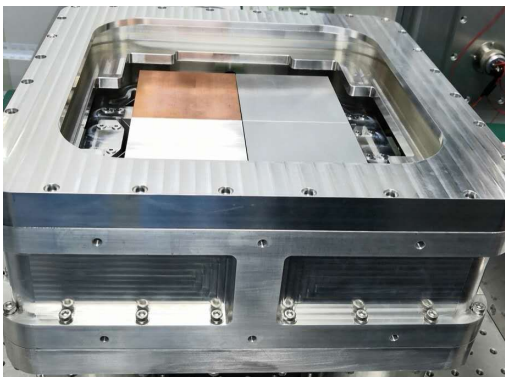
- 3台独立单色测光镜筒
- 直驱+雷尼绍光电码盘



望远镜口径: 300mm
 望远镜系统焦距: 3
 系统焦距: 900mm
 有效集光口径: 240mm
 望远镜视场: 焦面大小70mm (4.4°)
 系统像质: 80%能量集中在2个像素内, 视场像质均匀

真实尺寸样机

- ✓ 杜瓦真空维持
- ✓ 拼接焦面制冷
- ✓ 探测器拼接工艺

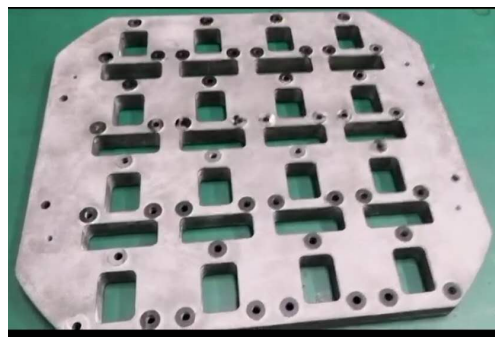


探测器拼接焦面研究

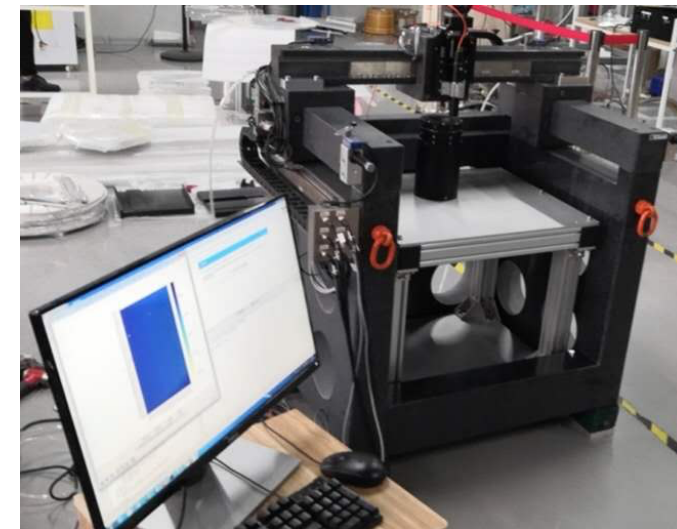
- ✓ 焦面 $> 200\text{mm} \times 200\text{mm}$
- ✓ 碳化硅材料基座
- ✓ 平面度 $p-v \leq 1\mu\text{m}$



9kx9k探测器
2x2拼接基座



4kx4k探测器
4x4拼接基座



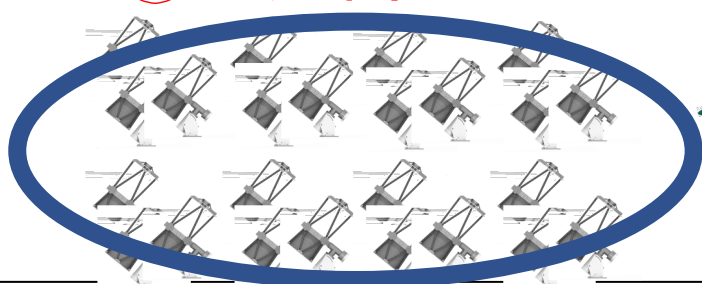
400mmx400mm非接触式
三维光学检测设备



16通道CCD控制器与
9Kx9K芯片尺寸对比

9Kx9K背照cmos的2x2拼接相机
国台贾磊团队

①司天阵~7米单镜~LSST



米级大视场望远镜阵列

- **实现**：30分钟内对天顶1万平方度天区的三色成像，分辨率1角秒/像元，单色单次曝光探测极限21等
- **需要**：54架25平方度视场的米级望远镜，**有效集光面积与8.4米LSST相当**，叠加图像深度相当，但是具有彩色录像功能，且目标造价只有LSST八分之一
- **最终**：全球多台站布置，**实现不间断观测**；南北半球两个司天阵，覆盖全天。

◎司天大脑



望远镜阵列集群控制系统

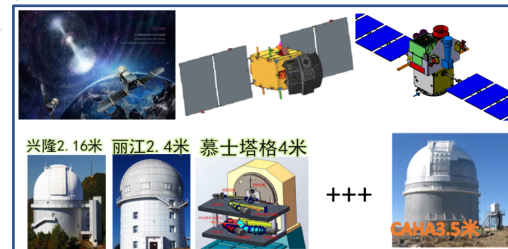
- 全球多站点子单元**任意组合**快速响应
- **海量数据**的实时处理分析
- 瞬变源即时分类及**即时后随**观测
- 海量数据的传输、存储、搜索

②证认网络



二/四/六米后随光谱望远镜

- 配置大视场多目标光纤光谱仪，实现对21等中低色散光谱观测
- 瞬变源的**即时后随光谱**



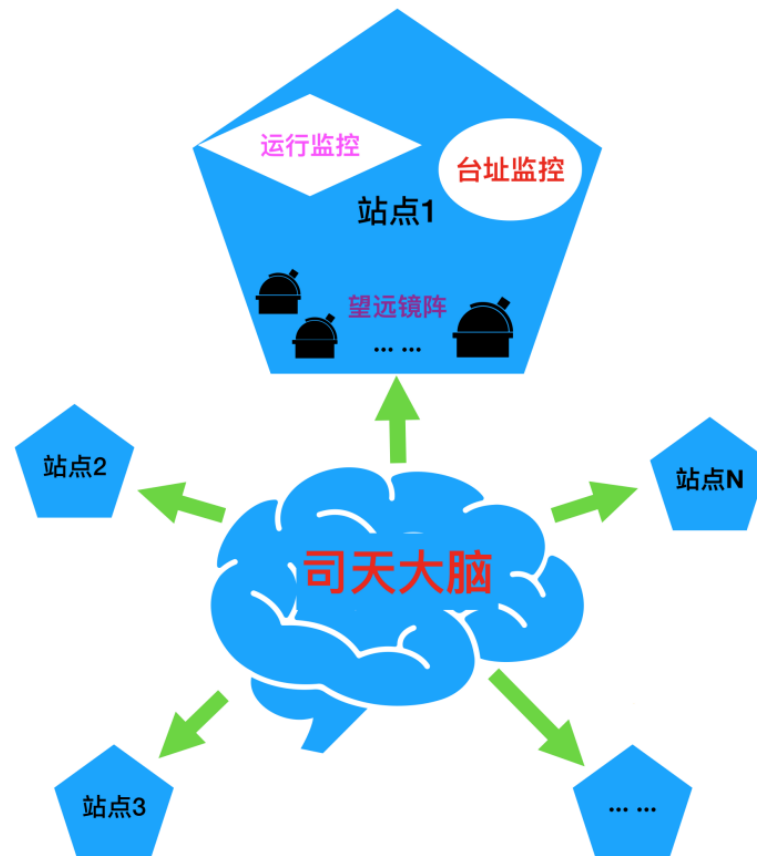
③联测网络

其它国内和国际、地面和空间、光学和其它波段的众多望远镜

司天工程之**司天大脑**（运控+数据-->VO）

与其他大科学工程不同，司天工程的内核是软件工程！

- 采用**集群望远镜阵列控制技术**，实现多种观测模式：巡天模式、突发事件模式和快速密集观测模式（相当于一个超大视场7-8米级的测光望远镜~ LSST）
- 实现**快速实时**处理和暂现源的即时预警



司天体系结构

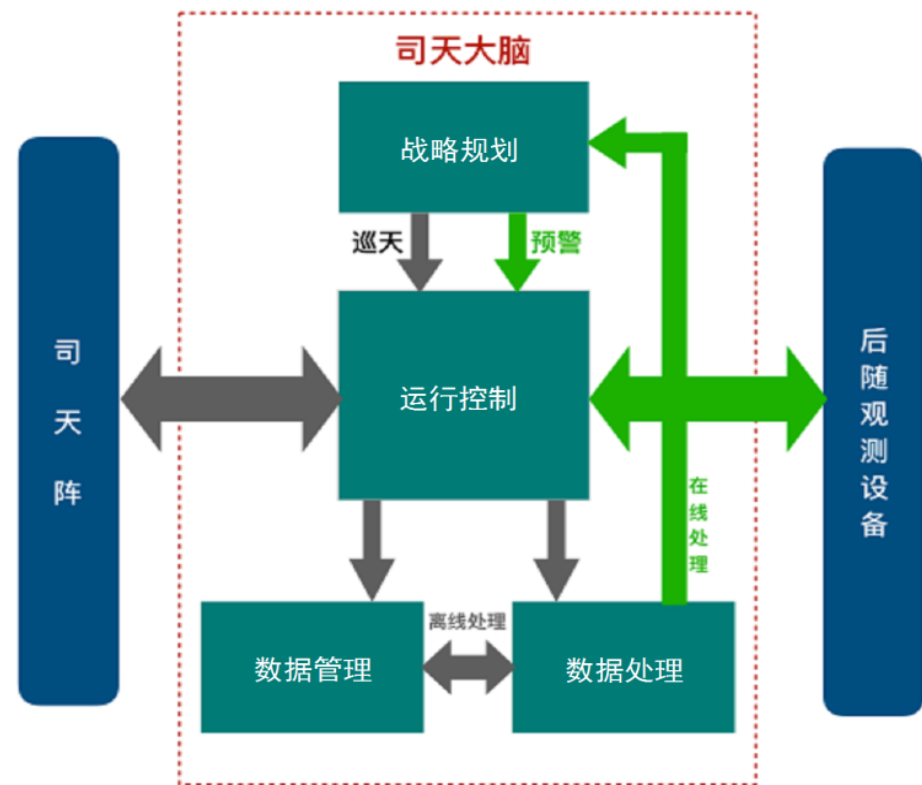
司天工程之**司天大脑**（运控+数据-->VO）

与其他大科学工程不同，司天工程的内核是软件工程！

- 实现百PB天文大数据的**人工智能数据处理与分析**
- 建立国际最大光学时域天文数据库（虚拟天文台）

司天数据量（含备份、数据处理）

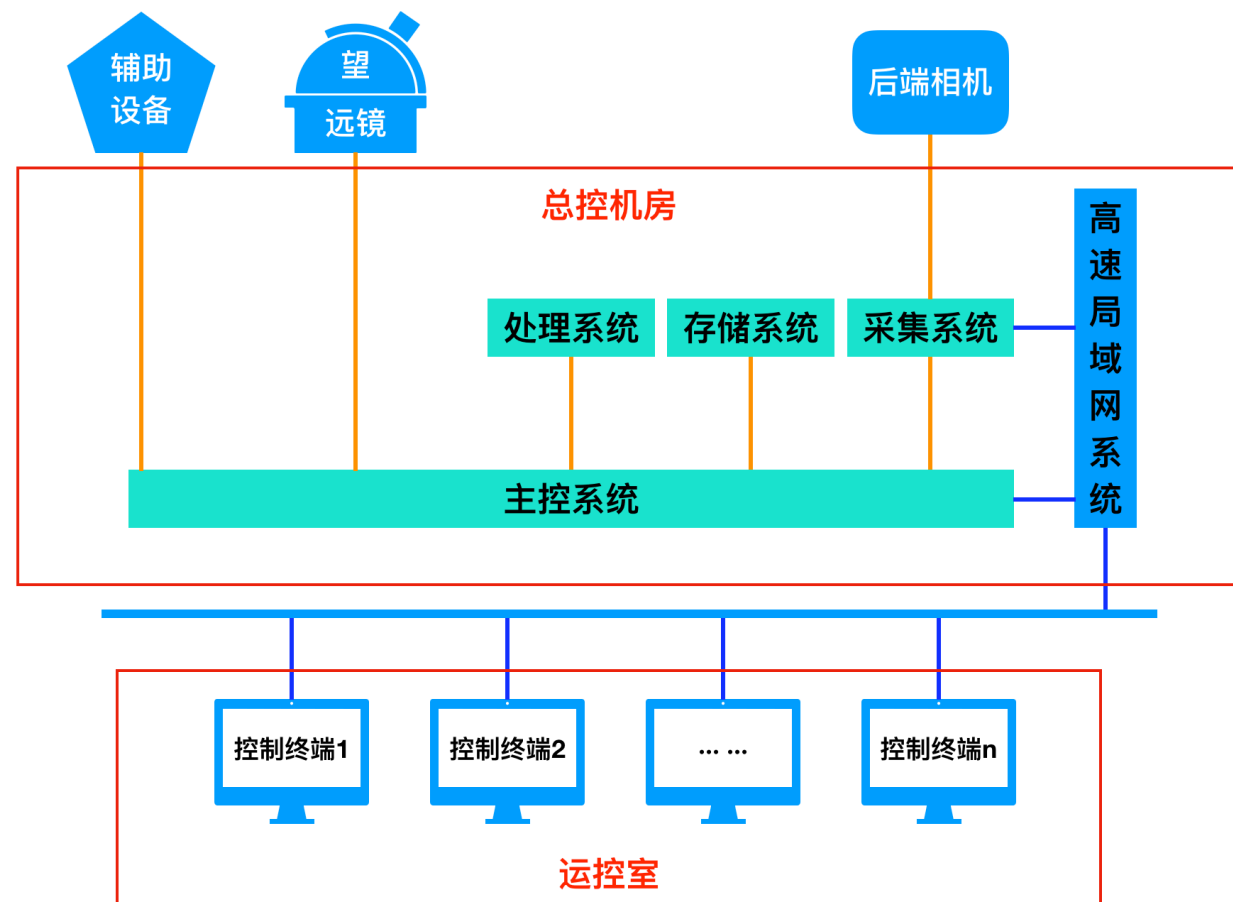
- 54台望远镜；相机：9kx9kx4 pix；1分钟曝光
- 年数据量：10² PB



司天体系结构

运控和数据系统：

1. 巡天规划 (+仿真)
2. 运行控制 (与硬件接口)
3. 运行辅助 (观测条件等)
4. 数据处理
5. 实时报警
6. 数据管理、可视化
7. 控制中心+数据中心 (硬件)
- ...



软件复用！

现场运控系统



独特录像模式保证巨大产出

解决重大问题中的关键问题

- ✓ Ia型超新星 → 宇宙学、暗能量
- ✓ 引力波电磁对应体 → 极端条件下的物质状态

提供爆发源至为关键的极早期或准同时数据

- ✓ 伽玛暴、孤儿伽玛暴余辉
- ✓ 黑洞潮汐撕裂恒星
- ✓ 快速射电暴、超亮X射线暴

全球不间断观测满足国家战略需求

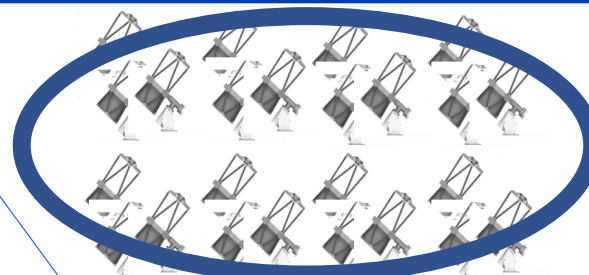
- ✓ 空间碎片监测与编目
- ✓ 中高轨卫星监测
- ✓ 近地小天体探测预警 → 预防文明灾难

高精度高频率采样的统一化多色数据

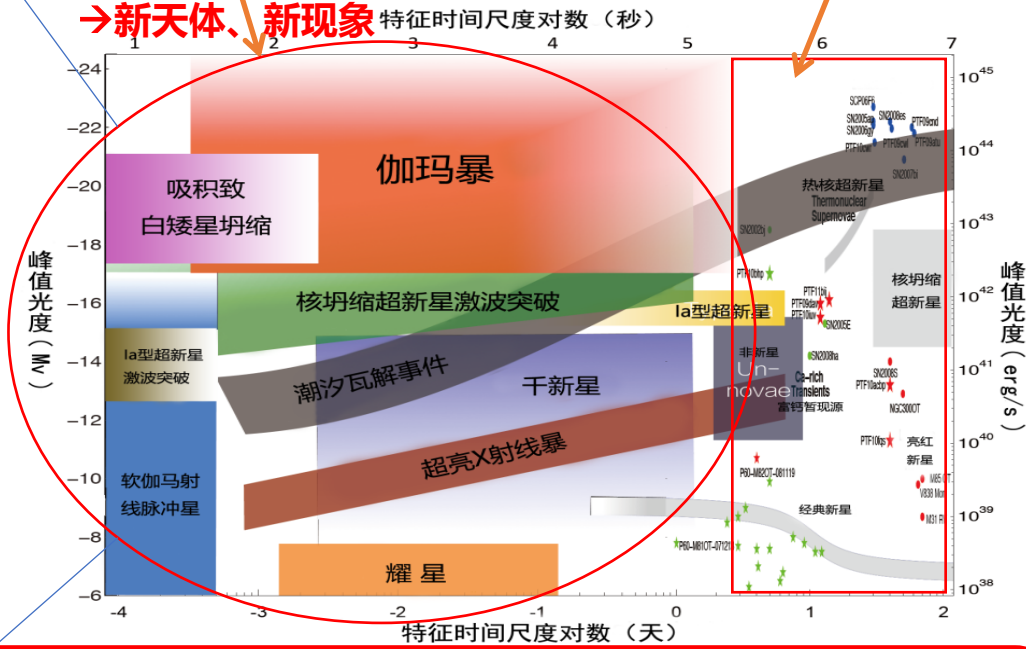
- ✓ 系外行星：相当于100个地面Kepler卫星
- ✓ 短时标时变天体：新的发现相空间
- ✓ 恒星短时标光变的完备描述

- ✓ 各种罕见天体：Ia、IIC、回光超新星等
- ✓ 太阳系天体：MBO、KBO、TNO
- ✓ 其它：微引力透镜等

全天区长时间录像：绝佳的教育、科普资料



司天工程
新的相空间+历史录像
→ 新天体、新现象



新时代的新基建
科学+技术+教育+科普

司天工程：集思广益、共同推进、开放共赢

在VO介绍需求，寻求合作



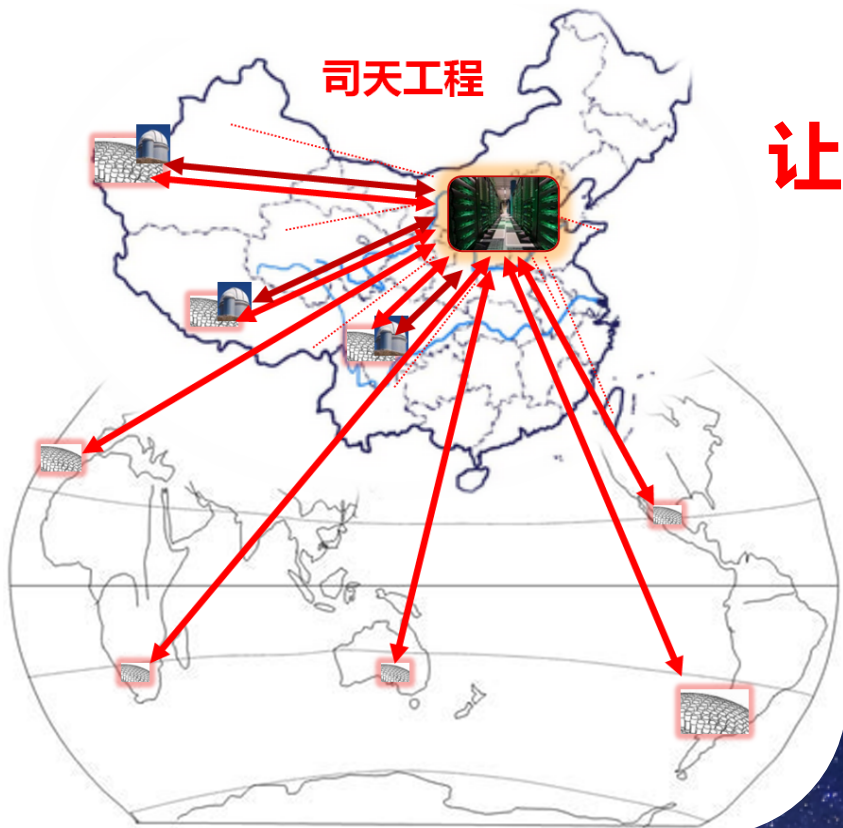
来自中科院各天文单位、清华、北大、南大、天大、藏大、太原理工等国内**近30家单位**的百余名科学技术人员共同推进

我们的征程是星辰大海



司天工程

让司天工程成为新时代的名片



宇宙彩色录像机

让天文学成为每个人的天文学

