

中国SKA科学进展和规划

沈志强

(中国科学院上海天文台)

(第十一届SKA暑期学校, 厦门, 2026年8月19-26日)

目录

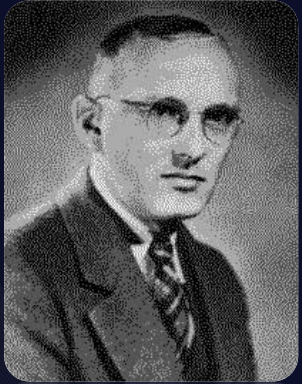
- 一、SKA基本情况
- 二、SKA最新进展
- 三、中国SKA科学进展和规划

平方公里⁴阵列³射电²望远镜¹ (Square Kilometre Array: SKA)

1. S国际天文界建造的**世界最大**综合孔径射电望远镜
2. SKA的科学可能产出多项**诺奖级成果**
3. 中国是SKA的**首倡国**和**创始成员国**
4. SKA是中国参加的**第二个国际大科学工程**
(国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划)



射电天文学的诞生源于一个偶然的发现！

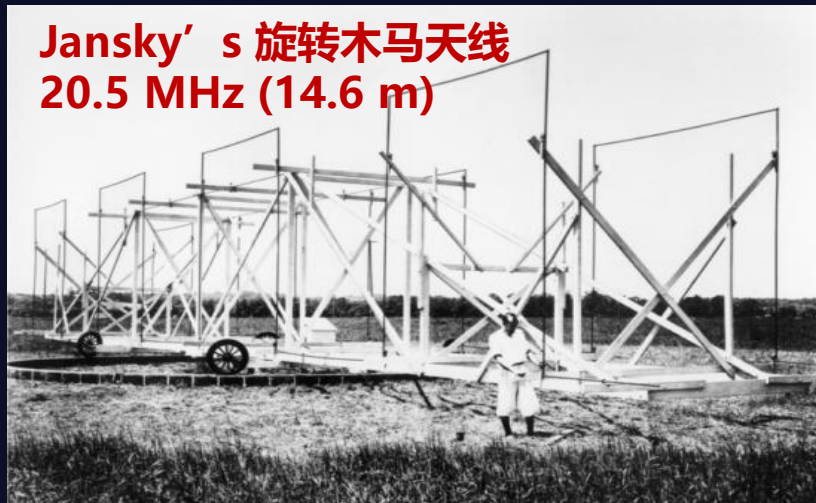


Karl Guthe Jansky
(1905.10.22-1950.2.14)

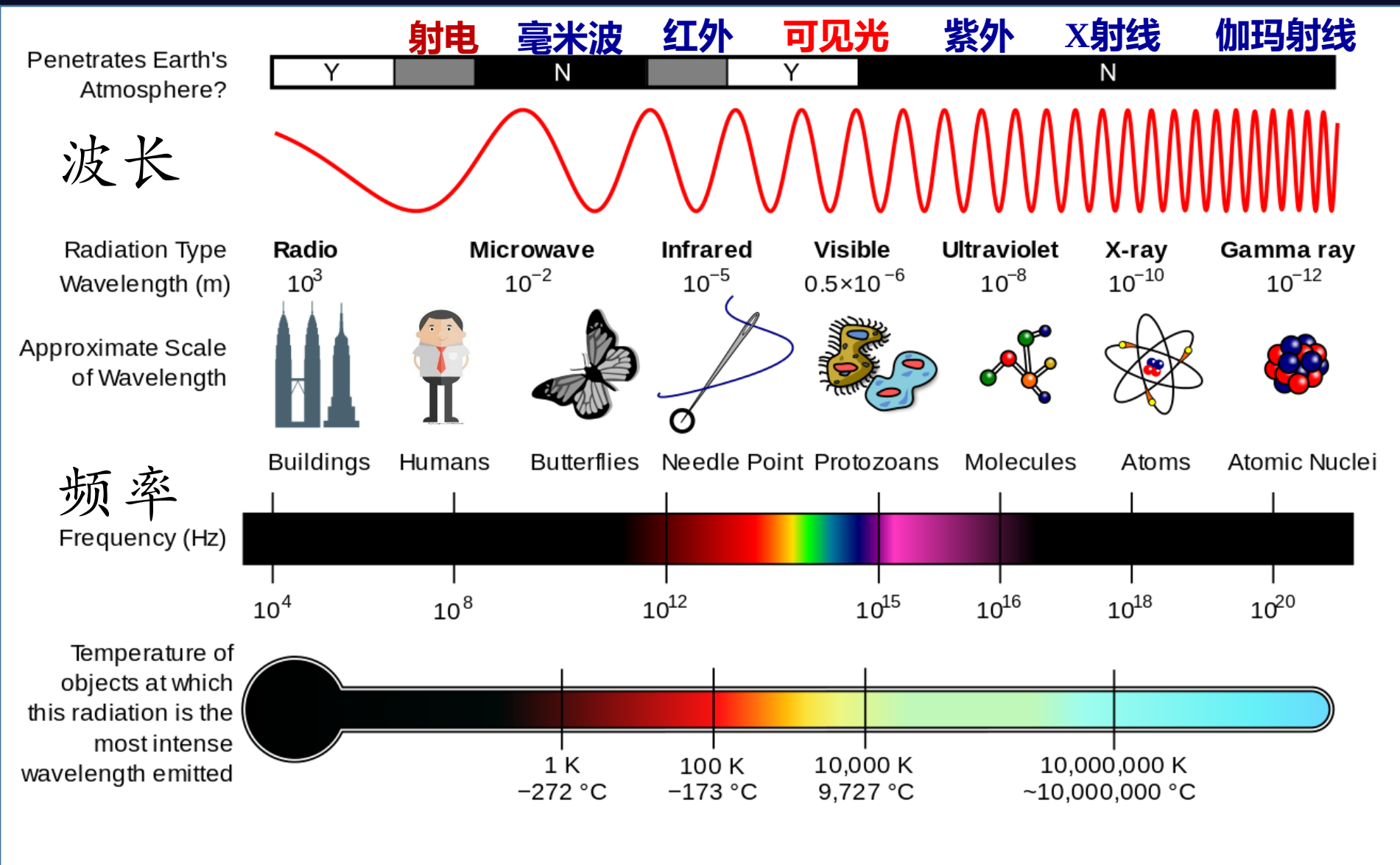
美国贝尔实验室的工程师央斯基为了探究可能影响横跨大西洋的无线电电话业务的静电干扰，建造了一座“旋转木马”天线，其底座可以旋转，以便“倾听”来自天空不同方向的“噪声”。经过数月观测，央斯基于1932年在频率20.5兆赫（约14.5米波长）上发现并确认了来自银河系中心的射电辐射，**该发现于1933年正式发表，由此标志着射电天文学的诞生。**

为了纪念这位射电天文学先驱，国际天文学联合会（IAU）于1973年通过决议，用“央斯基（jansky）”作为天体射电流量密度的单位。

Serendipity happens to those people who are both prepared and open minded.
机缘巧合青睐那些有准备且思想开放的人。



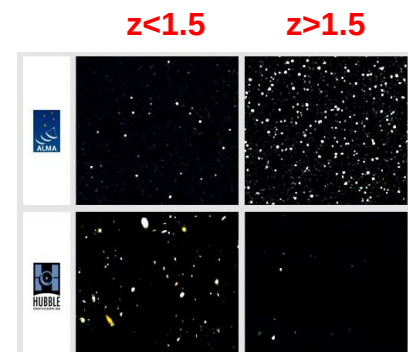
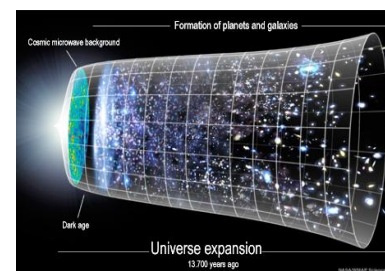
电磁波：波长×频率=光速 (=30万公里/秒)



射电天文谱段特点



- ◆ 超宽电磁谱段：覆盖几MHz到几十THz（频率跨度 10^7 ）
- ◆ 超高探测灵敏度：毫央斯基~微央斯基 ($1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)
 $1 \text{ Jansky} = 0.000,000,000,000,000,000,000,001 \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
signal from a cell phone 1km away: 110,000,000 Janskys
signal from the sun: 1,000,000 Janskys
- ◆ 超高空间分辨率：射电VLBI约为哈勃空间望远镜的500倍
- ◆ 超高频谱分辨率： 10^{-7}
- ◆ 宇宙尺度上的探测能力



射电天文学90+年

- ✓ 20世纪60年代四大天文发现（类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波背景辐射）均来自**射电**天文观测
- ✓ 迄今为止，14项授予天文学的诺贝尔物理奖中有6项（星际分子x1，综合孔径x1、脉冲星x2，CMBx2）是**射电**天文学的成就
- ✓ 目前国际最大地面天文项目ALMA和SKA都工作在**射电**波段

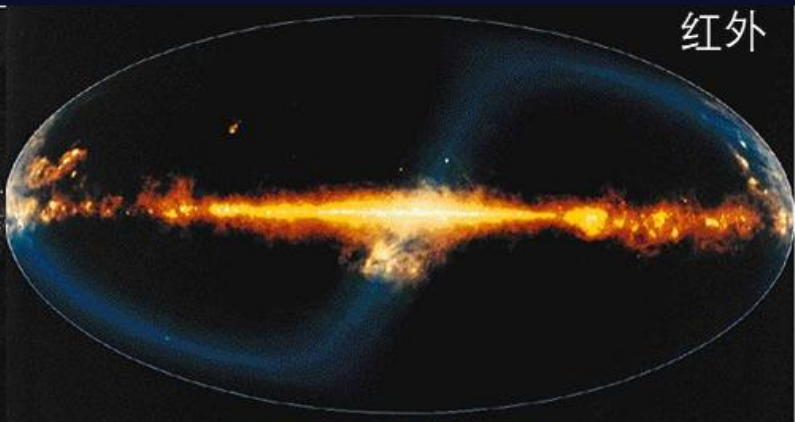


银河系全景图

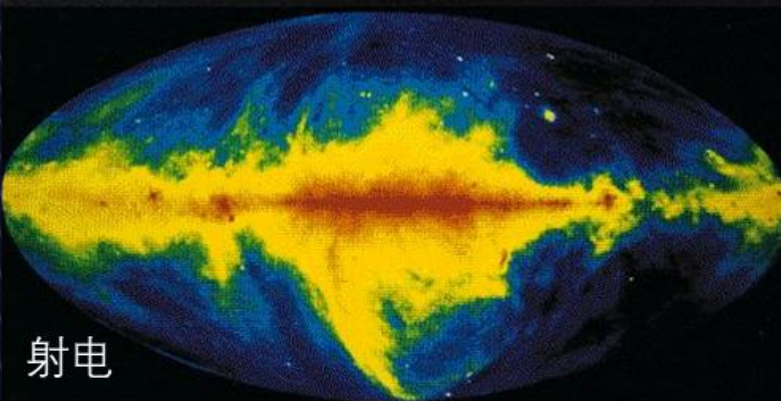
可见光



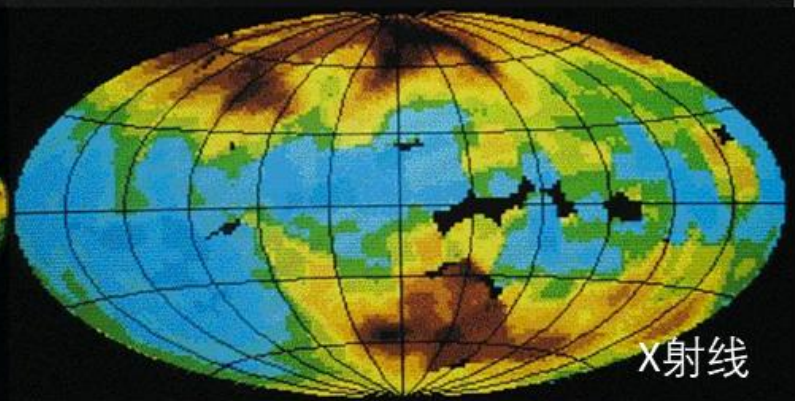
红外



射电

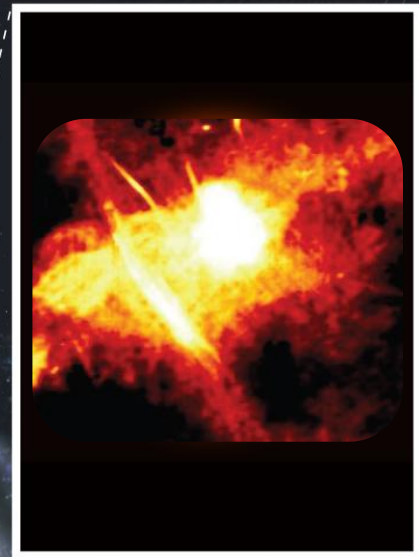


X射线



银河系中心在可见光波段上永远是漆黑一片，这是由于受到大量尘埃和气体的遮挡，使得从银河系中心发出的**1万亿个光子**中，**只有1个光子**可以到达地球被我们看到。

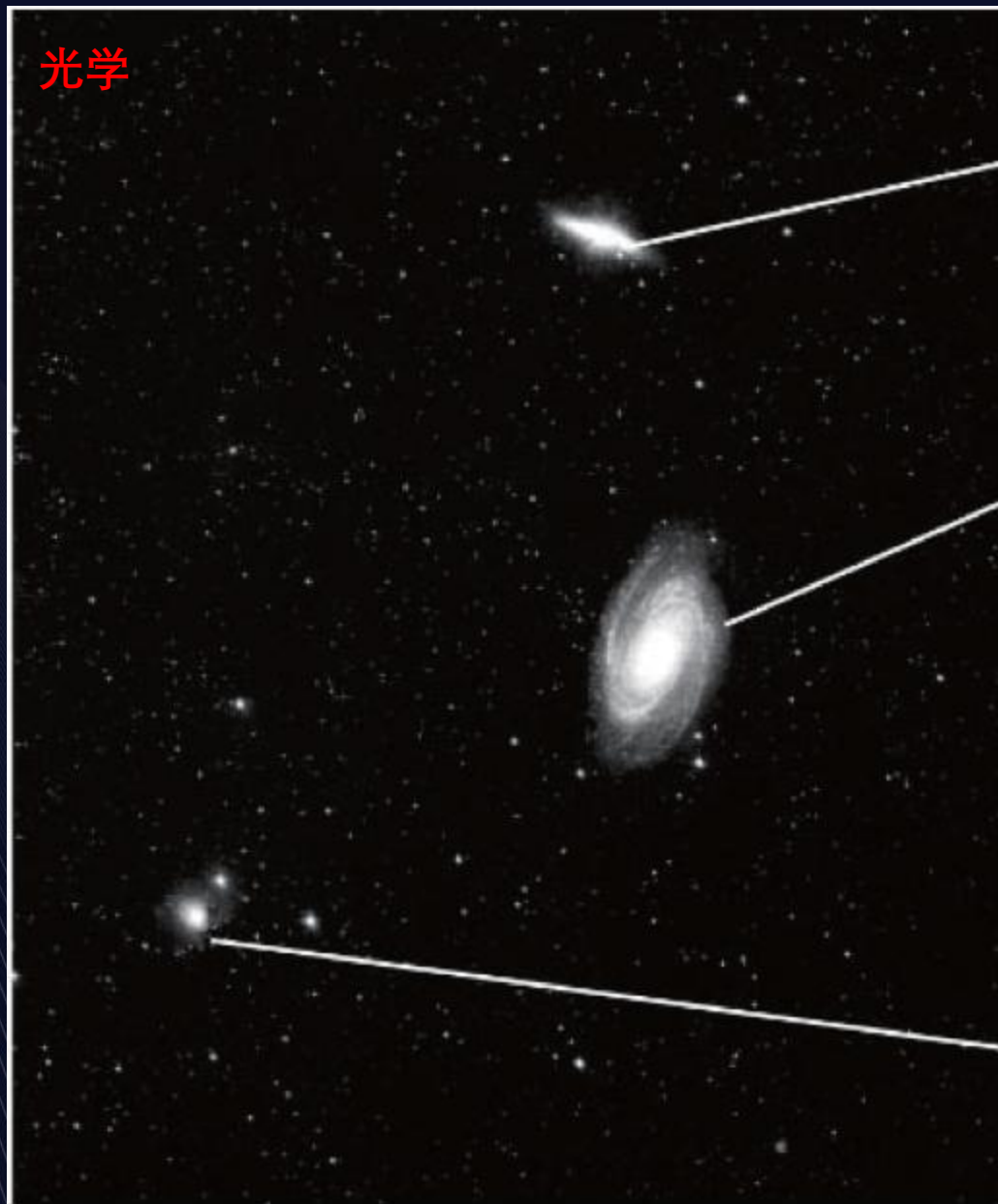
太阳



贝塞尔计划绘制的银河系结构图

图片版权: Xing-Wu Zheng & Mark Reid BeSSeL/NJU/CFA

光学

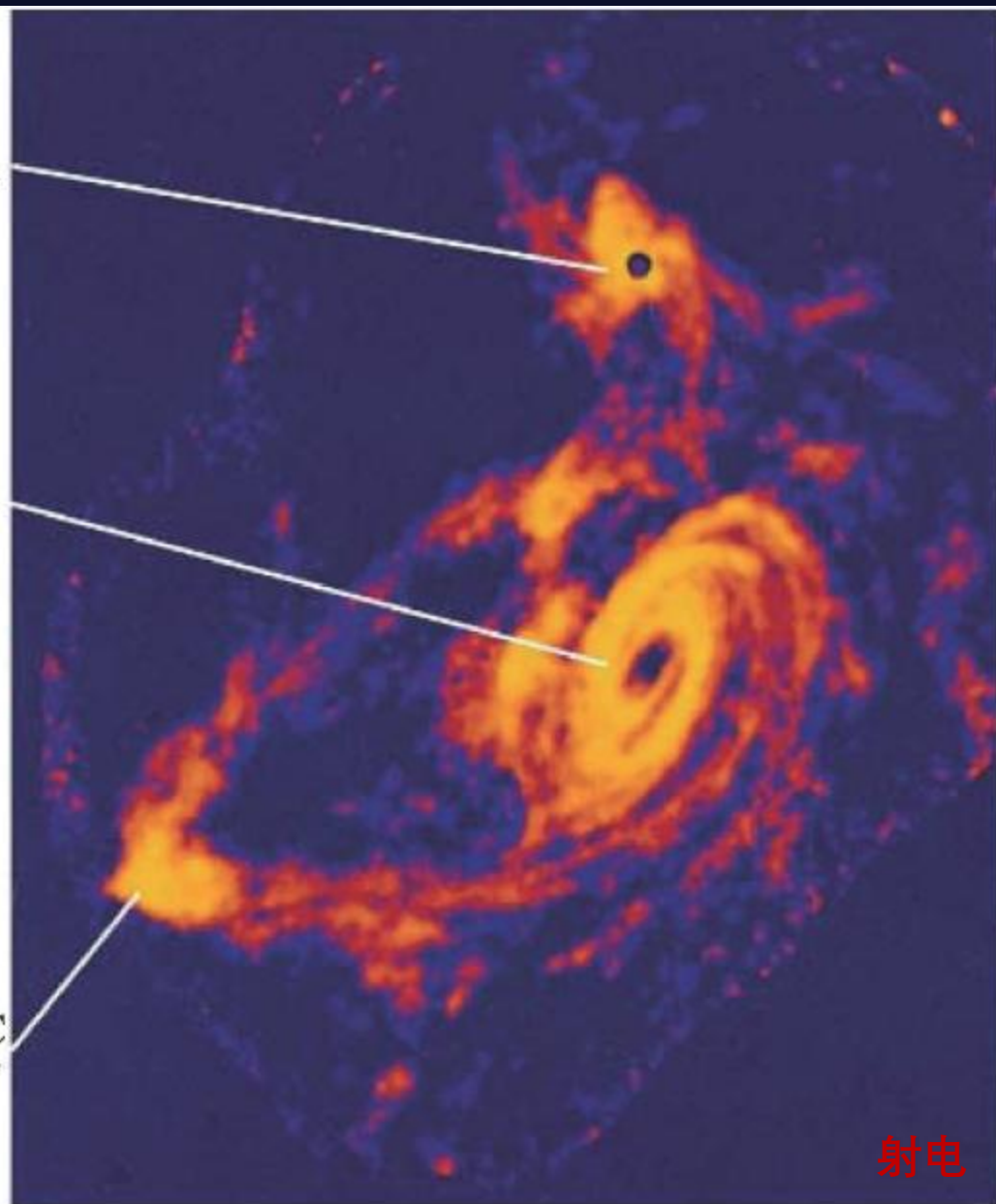


M82

M81

NGC
3077

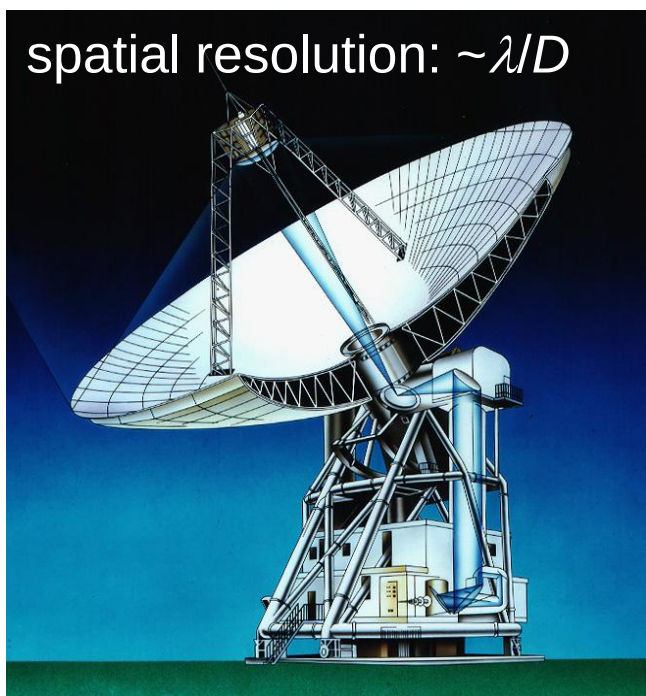
(a)



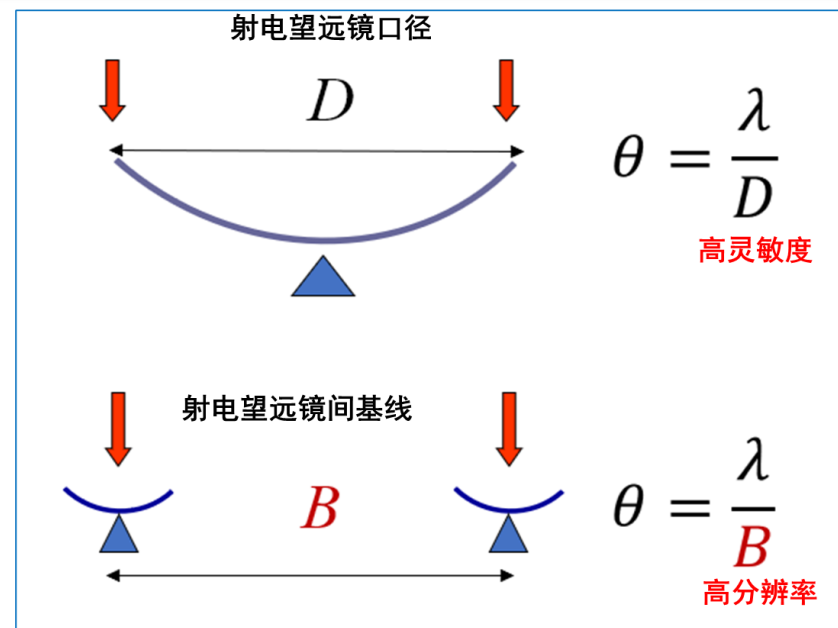
射电

(b)

阵列：实现更高空间分辨率



单口径



干涉仪：综合孔径（1952年：1974年诺奖）
甚长基线干涉测量VLBI（1967年）

- 单口径的射电望远镜的角分辨率约为 λ/D ，比光学望远镜要低得多
光学波长 V波段 $\lambda=5500\text{\AA}$ vs. 射电波长 C波段 $\lambda=6\text{厘米} \sim 10^5$ 光学波长
- 一个直径为10千米（km）的射电望远镜的角分辨率与一个直径1米的光学望远镜的理论角分辨率相当
- 综合口径射电望远镜阵：B：几km $\sim$ 200 km（MERLIN）
- VLBI网：B：1,000 km $\sim$ 10,000 km（EHT, CVN等），400,000 km（Lovex）
- SKA1：B：74 km（SKA-Low），150 km（SKA-Mid）

阵列组阵优势

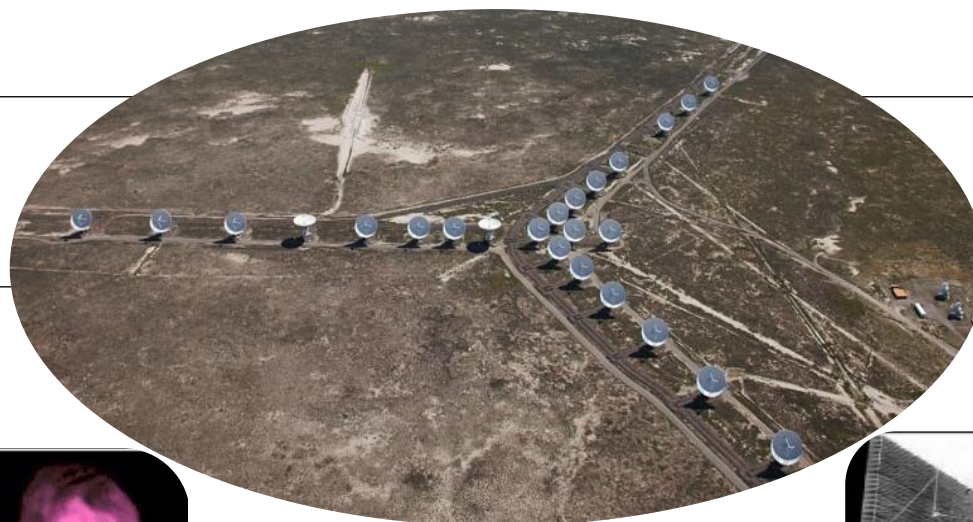
利用多个天线合成虚拟口径，相比传统单体望远镜，具有**基线长、分辨率高；综合口径大、灵敏度高；视场大、指向灵活**等优点。

基线长，1.03km~36.4km

分辨率：0.2"~ 0.04"

综合口径大，130m

高灵敏度，1~10 μ Jy



VLA

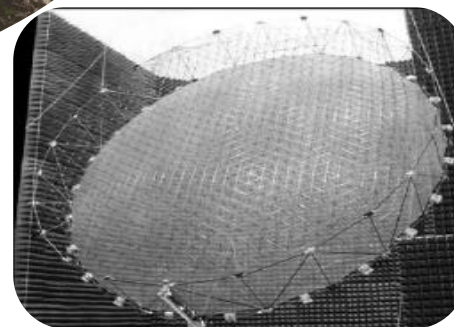
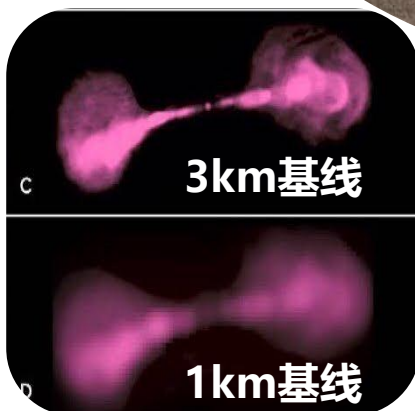
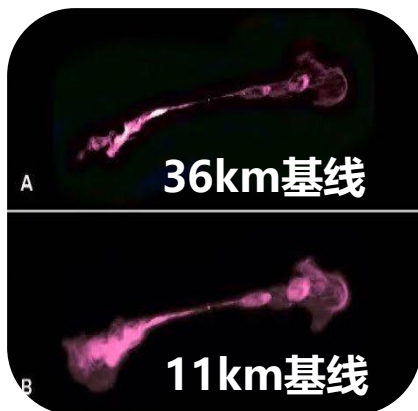
27台25米射电望远镜

灵活指向

单天线惯量小，易转动

易建造

多节点构建，化难为易，节约成本和周期



大口径**无法转动**
仅能改变馈源位置



组阵可调节每一个子望远镜指向，更加灵活

平方公里：确保最高探测灵敏度



FAST高灵敏度带来新的科学发现：
快速射电暴FRB、HI星系大样本等。



SKA由分布于澳大利亚和南非两地的数千个天线组成，**总接收面积达一平方公里**，配以先进的信号采集记录系统，将是国际上最灵敏的望远镜阵列，带给人类革命性的科学发现，颠覆我们对宇宙的认识。

SKA通过捕捉来自宇宙最深处的微弱无线电信号，研究宇宙的诞生、第一批恒星和星系的形成，以及引力的本质，将带来革命性的科学发现！

首要科学目标II

检验引力理论

(强引力场, 引力波) Testing General Relativity
(Strong Regime, Gravitational Waves)

首要科学目标I

宇宙第一缕曙光

(第一批恒星, 星系) Cosmic Dawn
(First Stars and Galaxies)

生命摇篮

(行星, 分子寻找地外文明) Cradle of Life
(Planets, Molecules, SETI)

Galaxy Evolution
(Normal Galaxies $z \sim 2-3$)

星系演化

Cosmology
(Dark Energy, Large Scale Structure)

宇宙学

(暗能量, 大尺度结构)

宇宙磁场
(起源, 演化)

Cosmic Magnetism
(Origin, Evolution)

Exploration of the Unknown

探测未知世界

Broadest range of science of any facility, worldwide

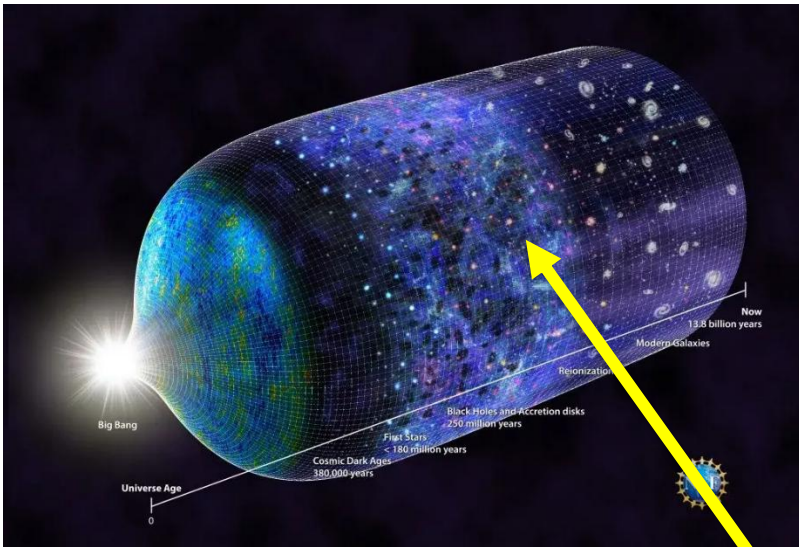
SKA是宏伟科学目标驱动的望远镜

(2014年12月, SKA投票推举的13个优先观测领域)

Science Goal	SWG	Objective	SKA1 Component	Hours
1	<i>CD/EoR</i>	EoR - I. Imaging	LOW	2500
2	<i>CD/EoR</i>	EoR - II. Power spectrum	LOW	5000
4	<i>Pulsars</i>	Reveal pulsar population	LOW + MID	13000 + 3200
5	<i>Pulsars</i>	High precision timing	MID + LOW	2400 + 800
13	<i>HI</i>	Resolved HI out to $z \sim 0.8$	SUR	5000
14	<i>HI</i>	ISM in the nearby Universe.	MID	2000
15	<i>HI</i>	ISM in our Galaxy	SUR	3000
18	<i>Transients</i>	Fast Radio Bursts	MID	10000
22	<i>Cradle of Life</i>	Map dust grain growth	MID	6000
27	<i>Magnetism</i>	All-Sky magnetic fields	SUR	18000
32	<i>Cosmology</i>	Gravity on super-horizon scales.	SUR	5500
33	<i>Cosmology</i>	Non-Gaussianity and the matter dipole	SUR	2500
37+38	<i>Continuum</i>	Star formation history of Universe	MID + SUR	6000 + 5300

首要科学目标I: 宇宙第一缕曙光探测

首要科学目标II: 脉冲星与检验引力理论

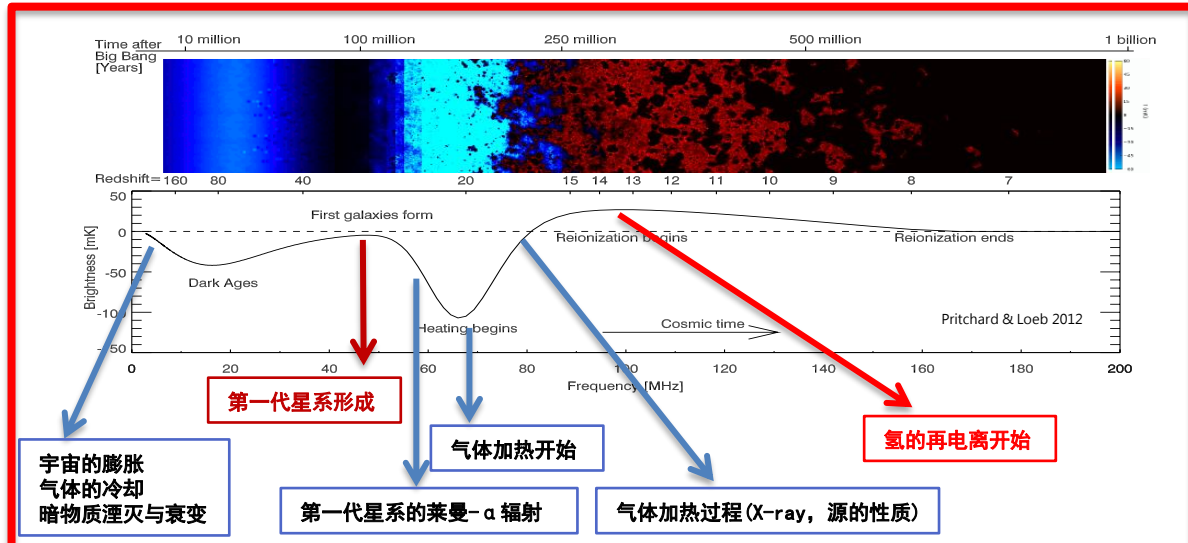


宇宙黎明和再电离探测 (CD/EoR)

or

宇宙第一缕曙光探测

微波背景辐射CMB
(两次诺贝尔奖) 的
同等量级的重要发现!



0、根据最新观测数据，**宇宙大爆炸 (Big Bang)** 发生在 137.99 ± 0.21 亿年前。这个时刻标志着**空间、时间、物质和能量**的起源，是我们所知的物理定律开始生效的起点。大爆炸前 10^{-43} 秒，宇宙从量子背景中出现，初始状态是一个**温度极高、密度极大**的点，此时所有基本力（引力、电磁力、弱核力和强核力）都统一为一种超力。大爆炸后的瞬间，宇宙经历了一场不可思议的暴涨过程。宇宙在过去138亿年的历史中，先后经历了“黑暗时期”（Cosmic Dark Ages）、“宇宙黎明”（Cosmic Dawn）、“宇宙正午”（Cosmic Noon）等阶段。

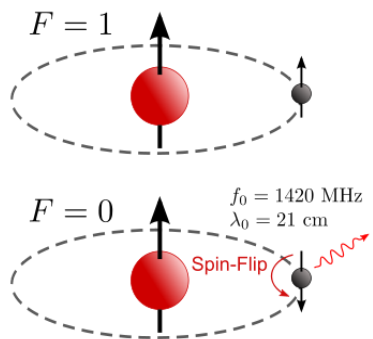
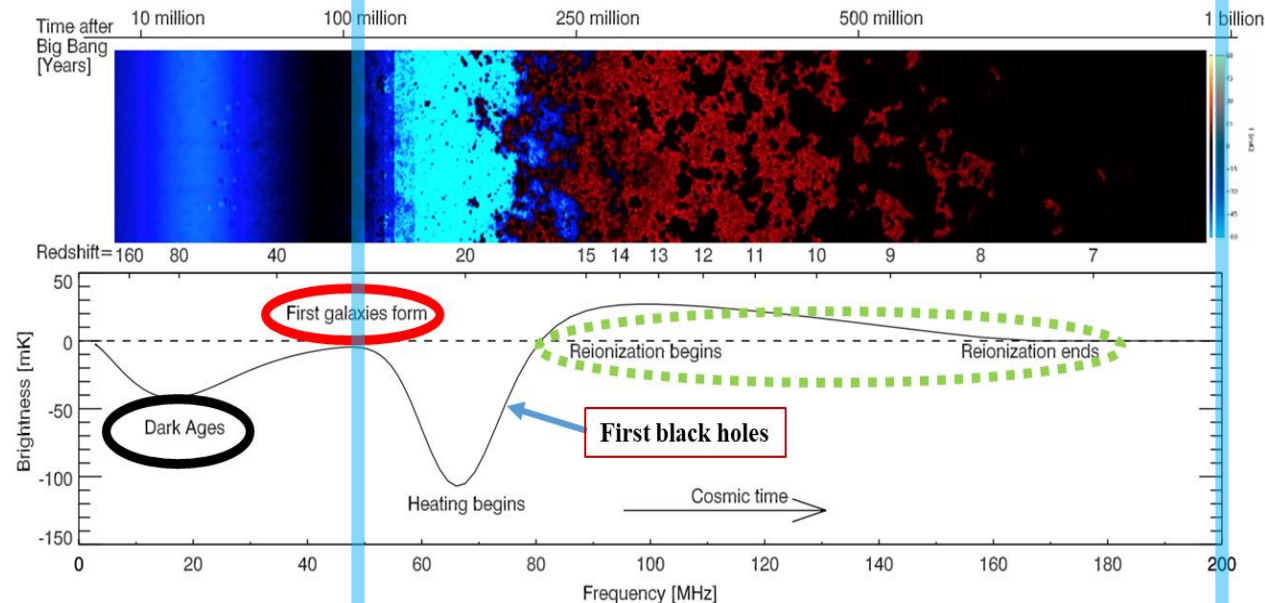
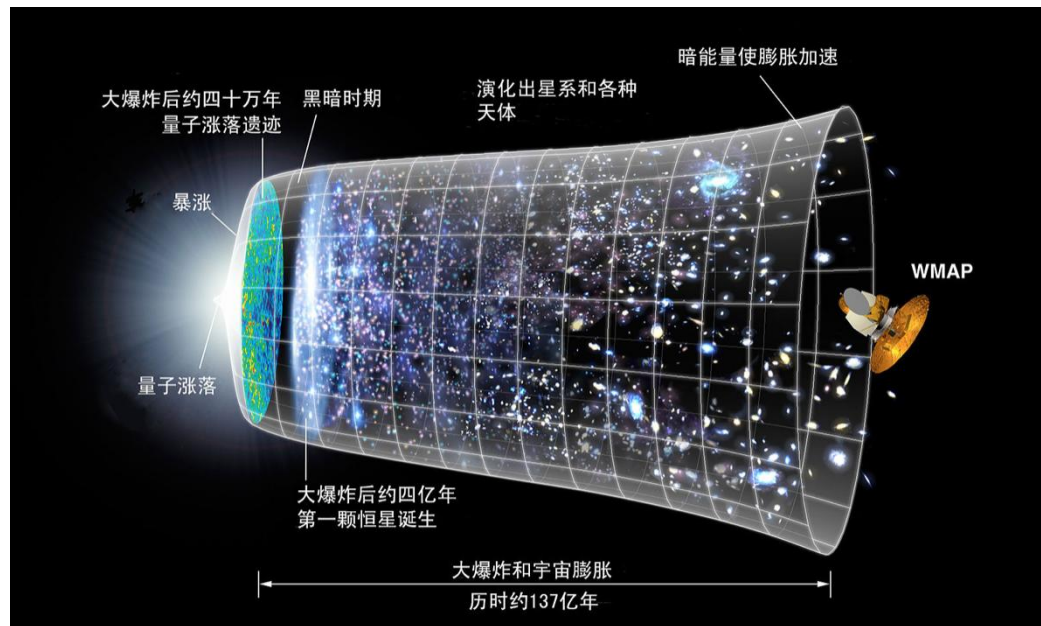
1、宇宙**大爆炸**后**38万年**时，宇宙膨胀和冷却，原子核（质子）与电子复合成为中性氢（HI）原子，光子得以自由地传播，成为我们看见的宇宙最早光—**宇宙微波背景辐射 (CMB)**。

2、到之后**约1亿年**，宇宙没有任何发光天体，陷入彻底的**黑暗时期**，但在暗物质引力的作用下，原初密度扰动逐渐增长，中性气体在密度略高处聚集，形成宇宙大尺度结构的雏形，为下一阶段做准备。

3、宇宙**大爆炸**后**约1~4亿年**的**宇宙黎明**时期，在引力作用下，气体云坍缩，宇宙第一批发光天体（恒星和星系）开始形成并发出“第一缕曙光”，宇宙开始从寂静走向光明，拉开再电离时期的序幕。

4、宇宙**大爆炸**后**约3~10亿年**，第一代恒星、星系及黑洞发出的紫外光辐射开始逐步电离周围广泛分布的HI气体直至整个宇宙几乎完全被电离，这一持续数亿年的过程被称为**宇宙再电离**，它将最早的宇宙结构形成与我们人类今天观察到的复杂宇宙联系在一起，是人类所认知的宇宙演化历史中的一块重要空白。

宇宙黎明和再电离探测



- 中性氢（氢原子）基态超精细结构能级之间跃迁：电子和质子的自旋排列引起的磁矩导致21cm(1420.406 MHz) 辐射-射电天文观测到的第一条谱线
- 宇宙膨胀，21cm谱线红移到低频，**中性氢谱线是记录宇宙演化进程的“时光机器”！**
- 宇宙黎明和再电离探测探针：**21cm谱线吸收或发射谱特征，红移 $z=6-27$ ，对应频率 ν : 50 MHz - 200 MHz**

SKA-Low（50 MHz - 350 MHz）的科学目标：揭示宇宙第一代恒星星系黑洞的形成及气体再电离过程，理解宇宙如何从黑暗走向光明。

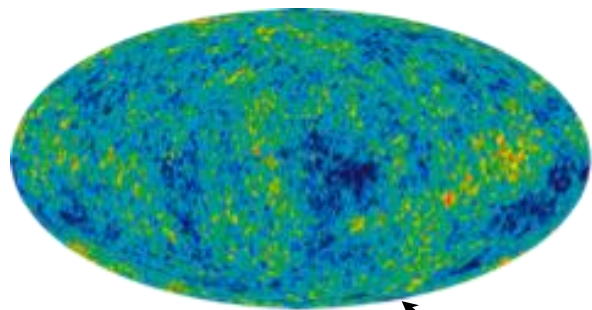
$$\nu = 1420 \text{ MHz} / (1 + z)$$

$$\lambda = 21 \text{ cm} (1 + z)$$

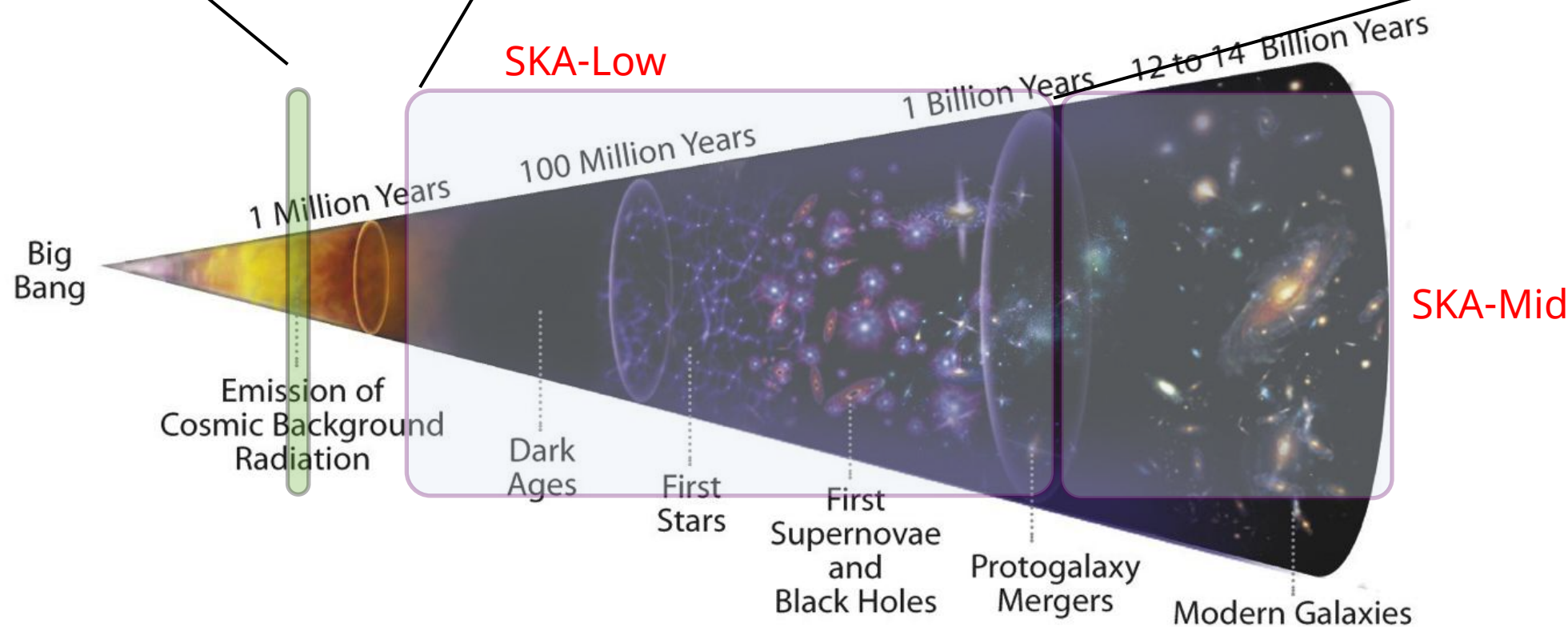
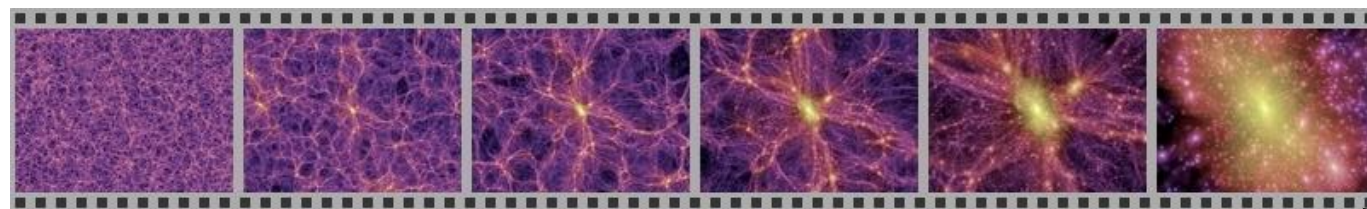
挑战：前景是信号的 **~ 10000 倍！**

SKA-Low的深场观测—再电离时代

大约 40 万年的宇宙微波背景CMB



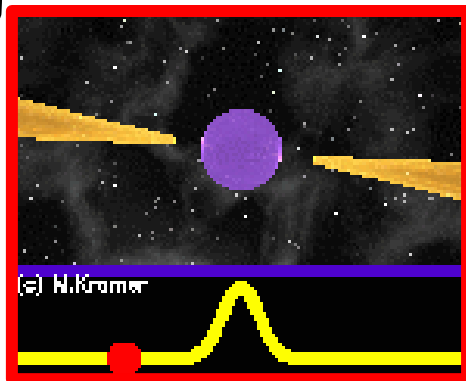
SKA-Low将观测HI的演化，获得从黑暗时期到宇宙黎明到第一个星系形成的演化电影！



脉冲星科学

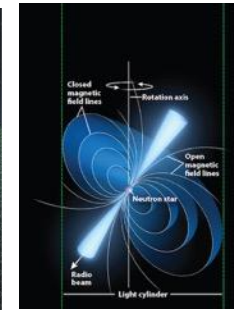
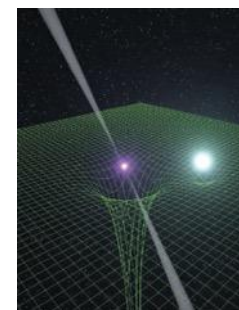
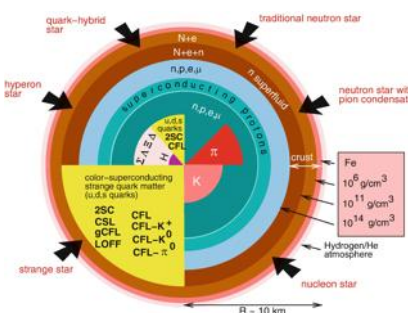
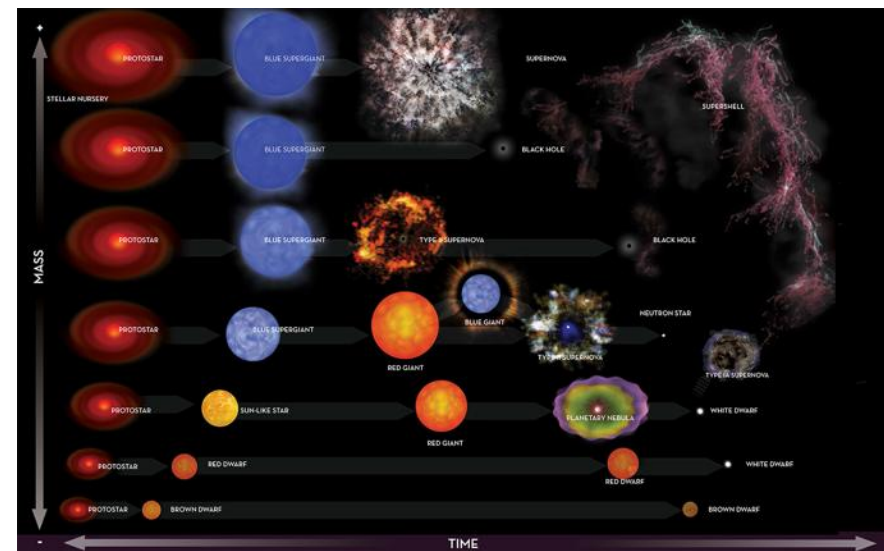
1. 脉冲星是大质量恒星演化到晚期塌缩的产物，集四种基本相互作用于一体，是基本物理过程的实验室。

内部密度为核物质密度
表面引力场是相对论性的
中微子不透明
具有宽带电磁脉冲辐射



2. 脉冲星是天然的宇宙探测器

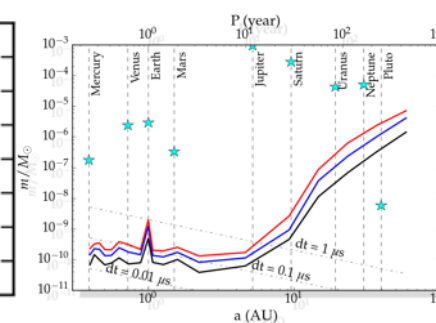
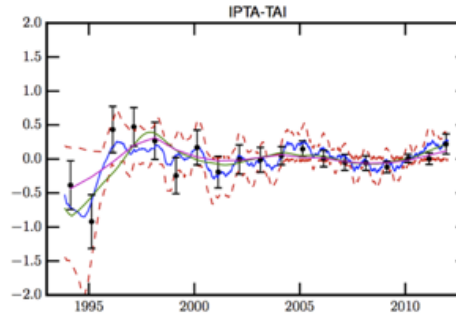
引力理论检验
纳赫兹引力波直接探测
长期稳定时间标准
探测太阳系动力学（空间基准）



强弱相互作用

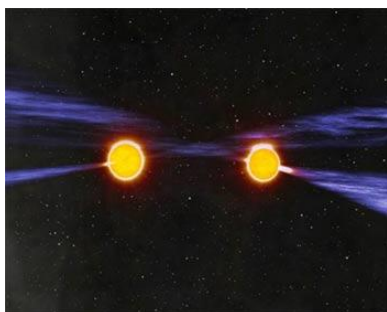
引力

电磁

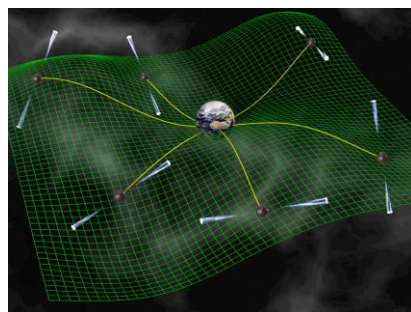


构造时间标准

探测太阳系动力学



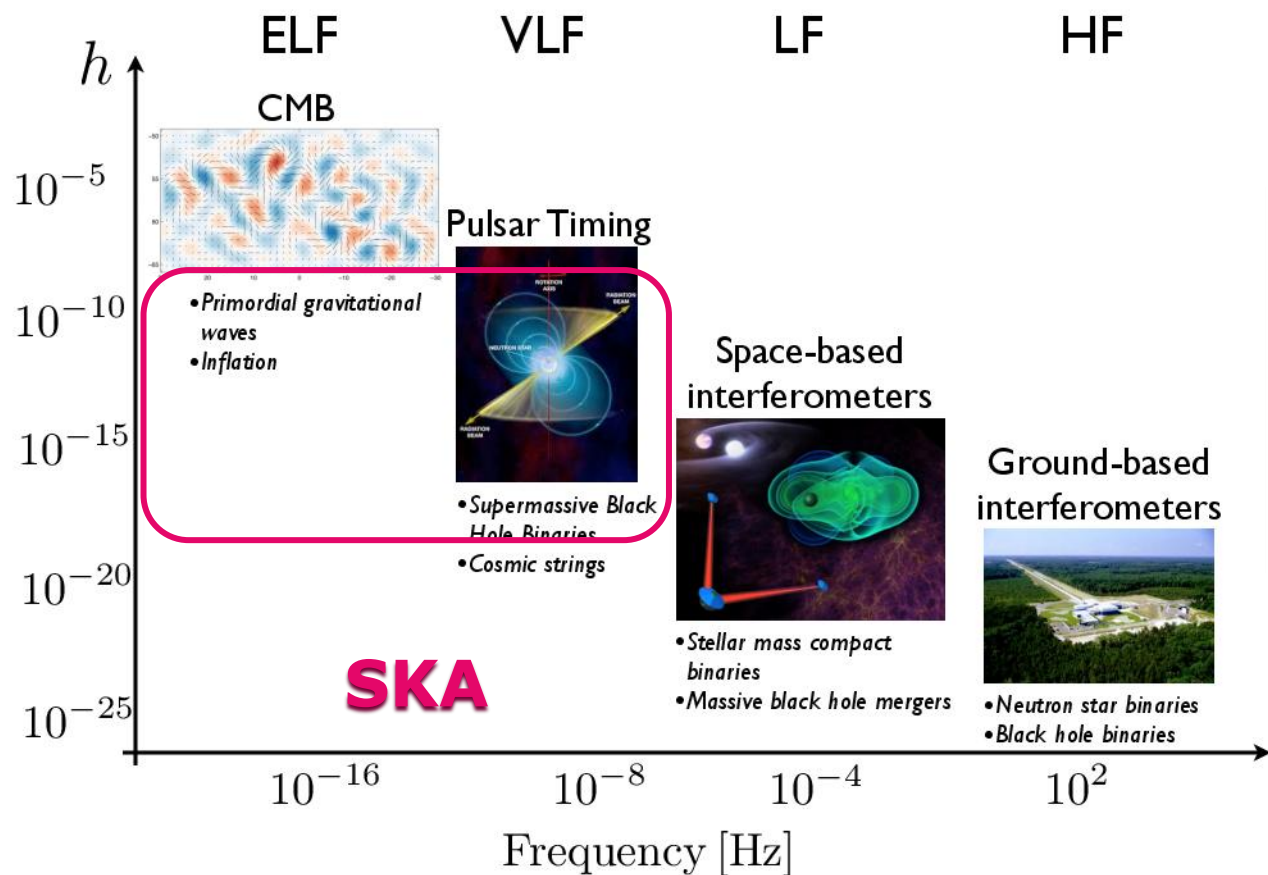
精确检验引力理论



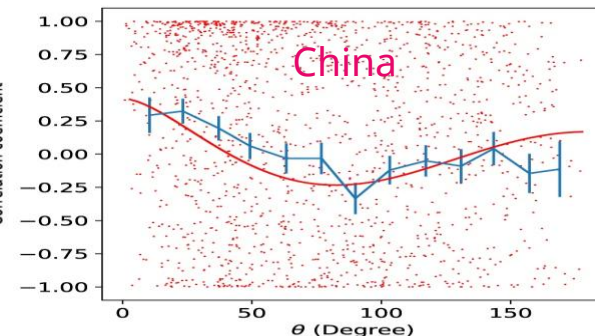
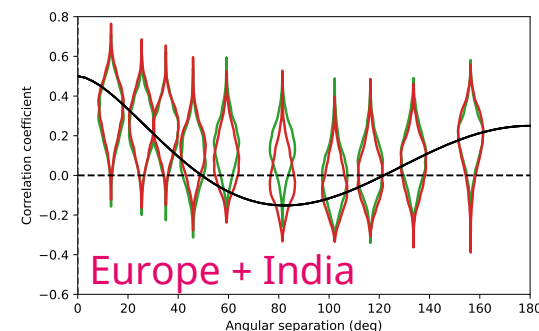
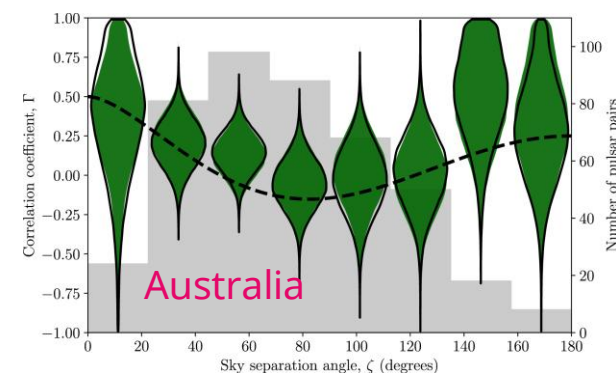
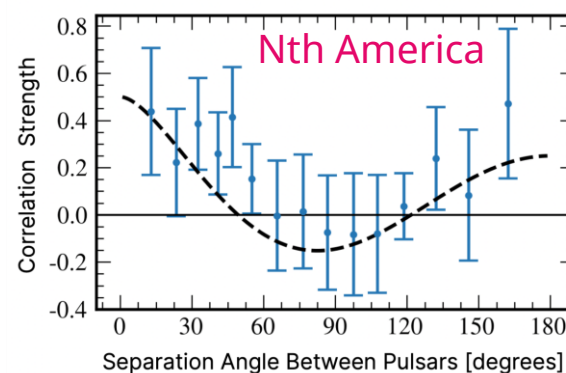
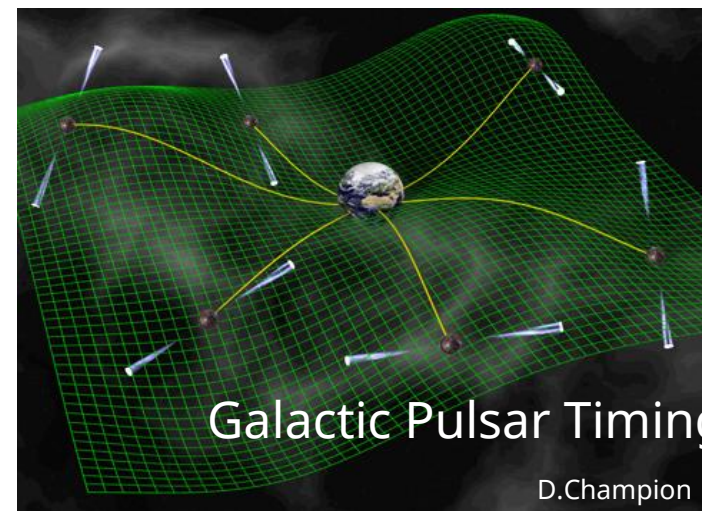
探测纳赫兹引力波

脉冲星引力波研究 (多信使物理)

The big picture of gravitational wave astronomy



PTAs: >10 years. MeerKAT: ~4 years



揭示纳赫兹引力波的随机背景!



SKAO Science Working Groups

SKAO
14个科学工作组
>1600 科学家



Cosmology (宇宙学)



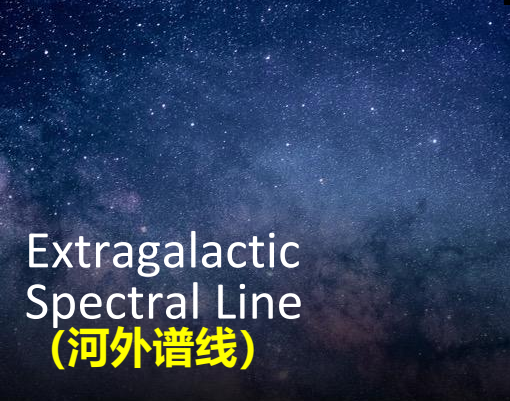
Cradle of Life (生命摇篮)



Epoch of Reionization (再电离)



Extragalactic Continuum (河外连续谱)



Extragalactic Spectral Line (河外谱线)



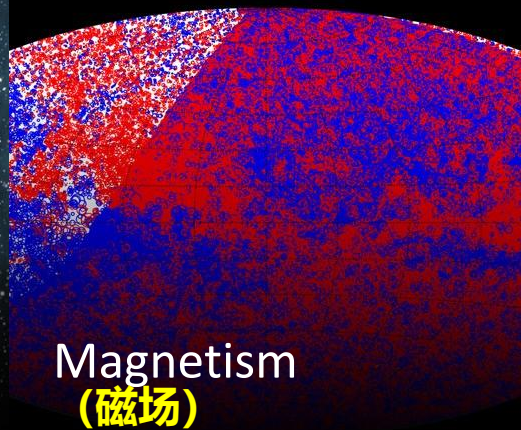
Gravitational Waves (引力波)



High Energy Cosmic Particles (高能宇宙线粒子)



HI Galaxy Science (中性氢星系科学)



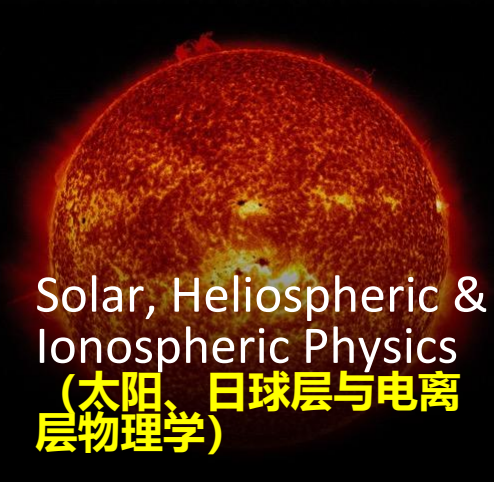
Magnetism (磁场)



Our Galaxy (银河系)



Pulsars (脉冲星)



Solar, Heliospheric & Ionospheric Physics (太阳、日球层与电离层物理学)



Transients (暂现源)



VLBI (甚长基线干涉测量)

SKA是宏伟科学目标驱动的下一代最先进的射电望远镜！



目录

- 一、SKA基本情况
- 二、SKA最新进展
- 三、中国SKA科学进展和规划

SKA工程建设

One Observatory, Two Telescopes, Three Sites

SKA-HQ

Jodrell Bank, UK

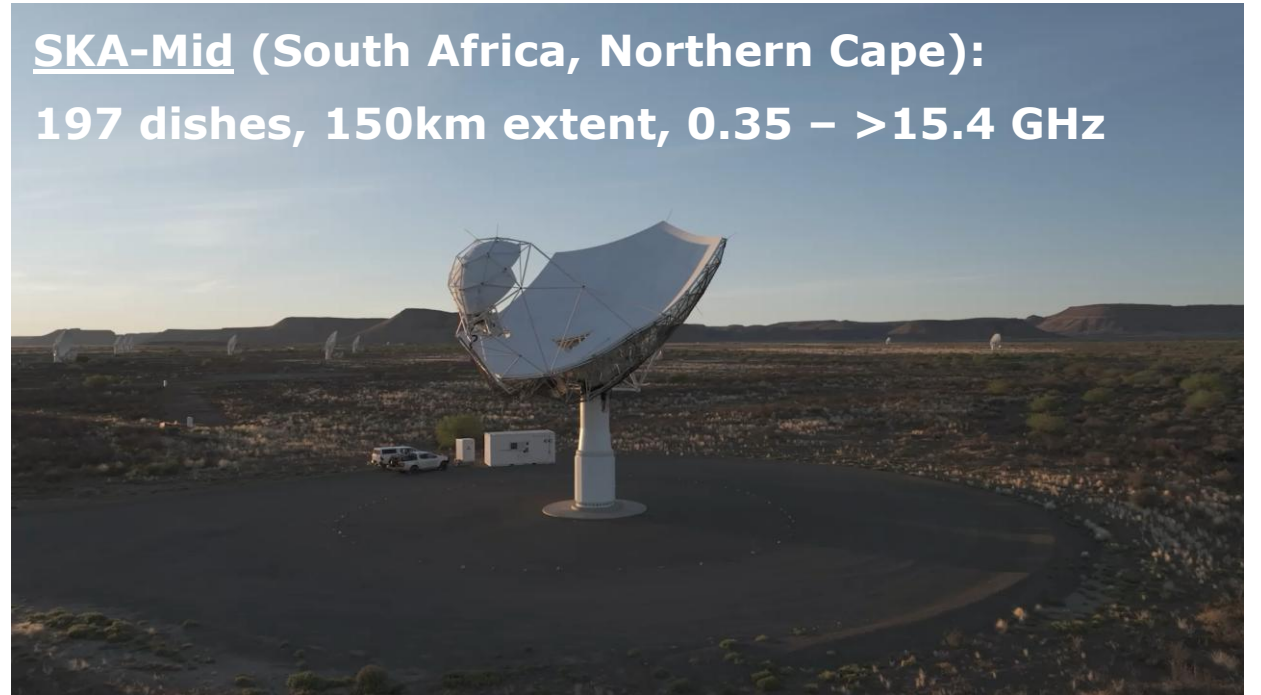


科学验证: ~2027下半年

正式运行: ~2030年

SKA-Mid (South Africa, Northern Cape):

197 dishes, 150km extent, 0.35 – >15.4 GHz

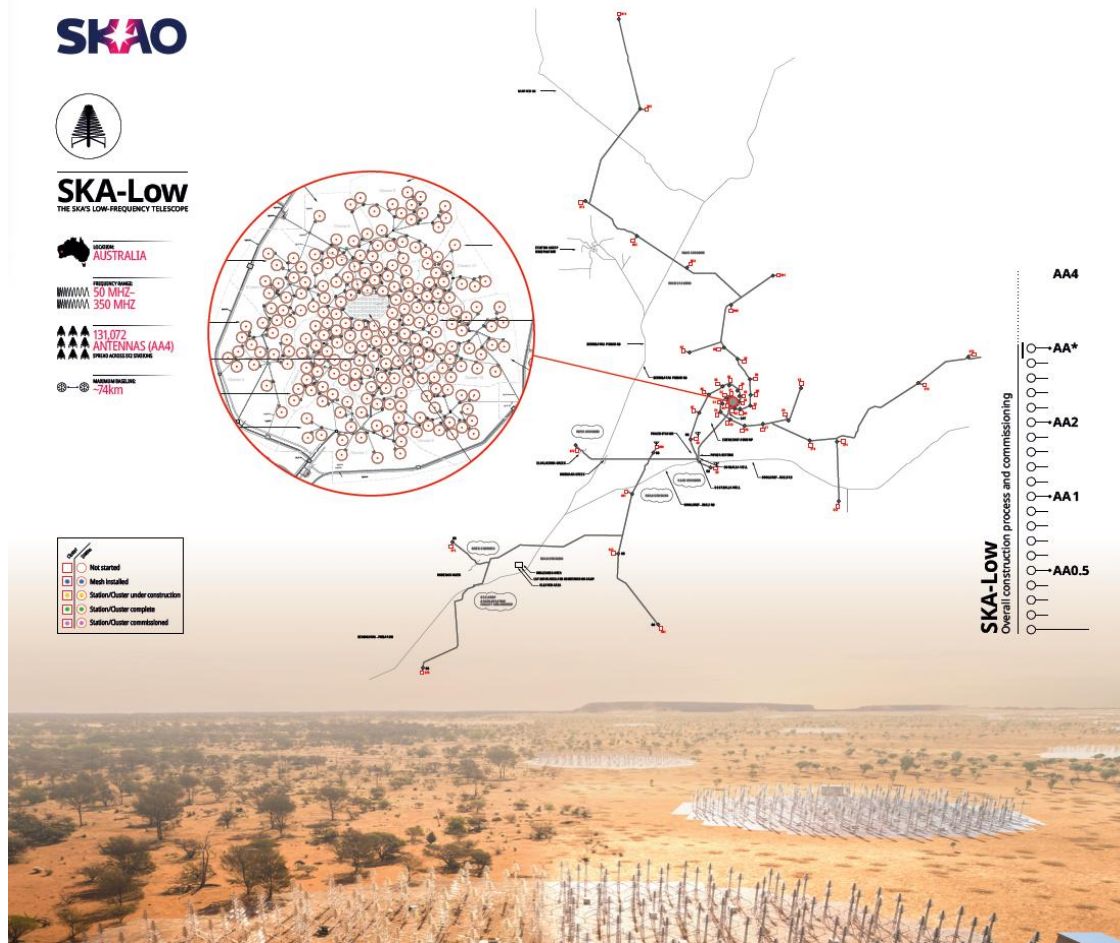


SKA-Low (Western Australia):

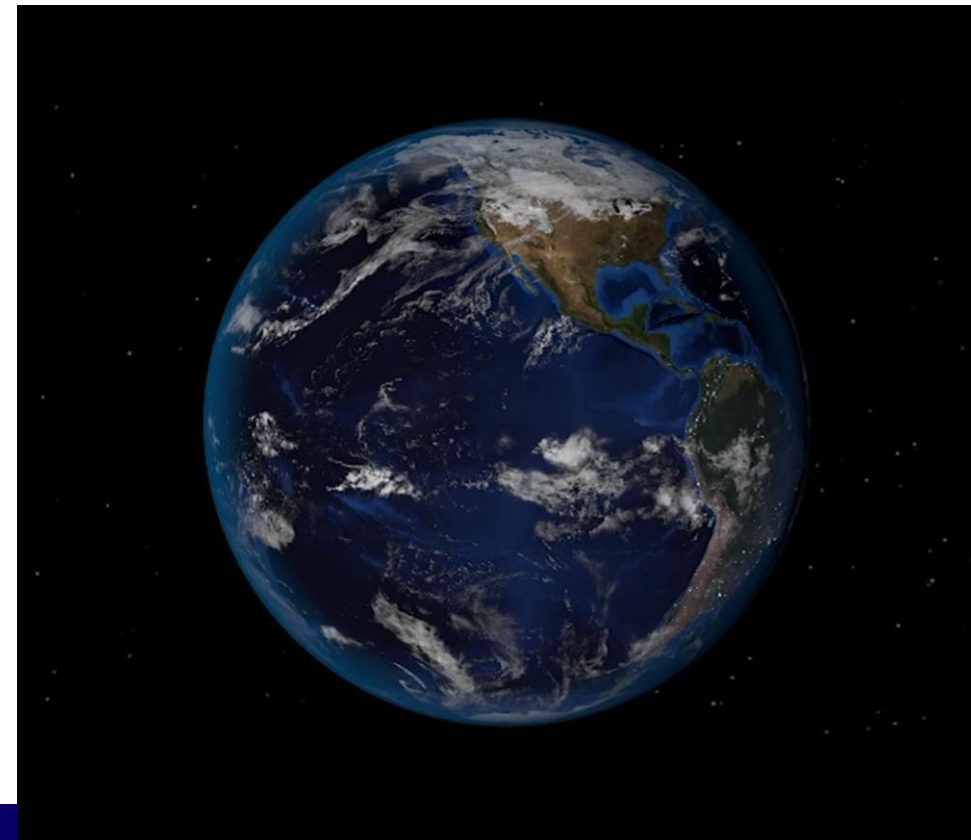
131,072 antennas, 74km extent, 50-350MHz



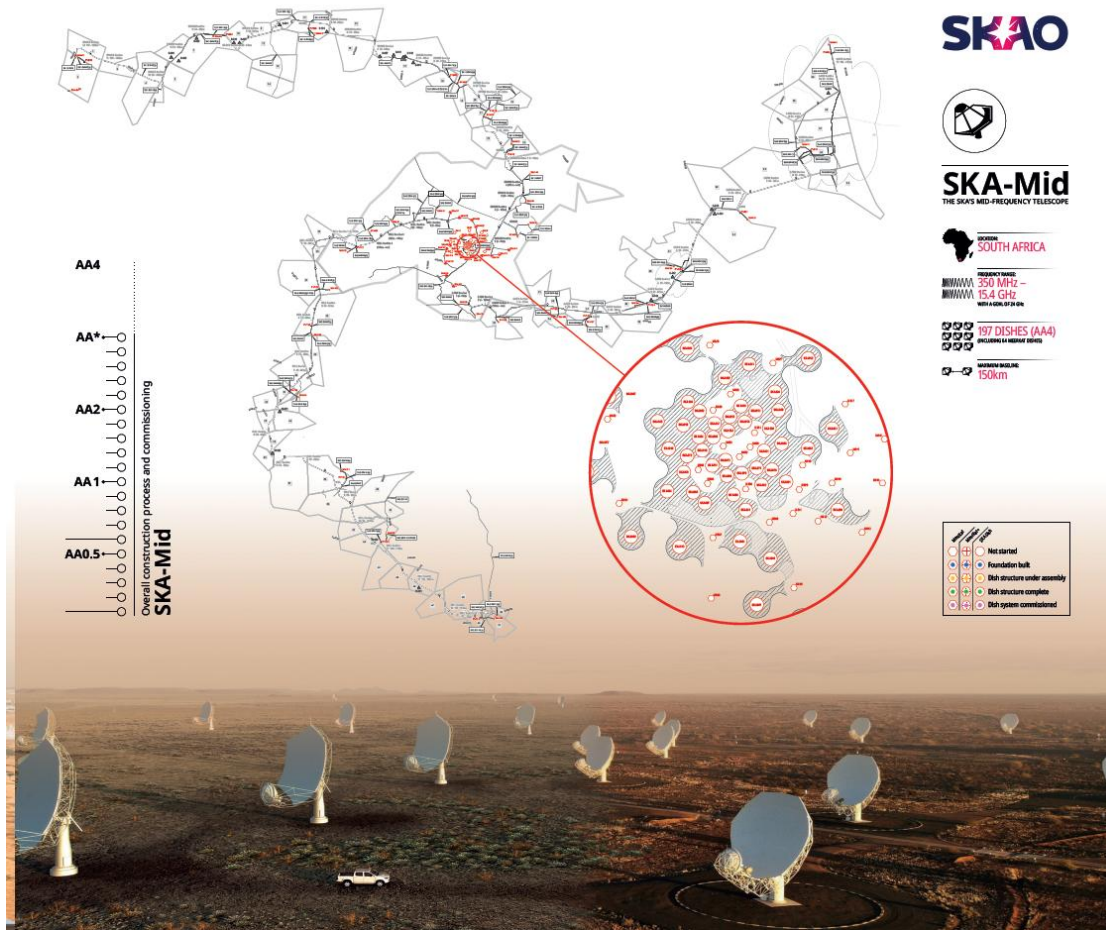
SKA-Low in Australia



- 131,072 log-periodic antennas, spread across 512 stations
- Frequency range: 50 MHz - 350 MHz
- Maximum distance between antenna stations: 74km
- 230km of tracks, 670km of fibre, 325km of power cables and 103,000 steel sheets for station ground-planes.



SKA-Mid in South Africa



- 197 fully steerable dishes, including the existing 64 MeerKAT dishes
- Frequency range: 350 MHz - 15.4 GHz
- Maximum distance between dishes: 150km
- 450km of roads/tracks, 650km of fibre, 250km of power cables and 109 foundations for SKA-Mid dishes



SKA区域中心(SRCs)

SKA宏伟科学目标对SKA大数据的采集、传输、运算、存储等提出挑战。

每年存储 > 710PB

算力 ~ 22PFlops

网络100Gbps

SKA区域中心网络是SKA天文台的重要组成部分，是SKA与科学用户之间的唯一接口

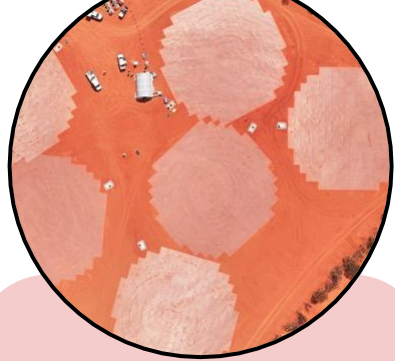
- 一个联邦式的全球SRC网络，将提供用户数据访问，托管SKA科学档案，并支持SKA社区。
- 将接收、整理并提供约710PB/年的SKAO科学产品。



SKAO science milestones

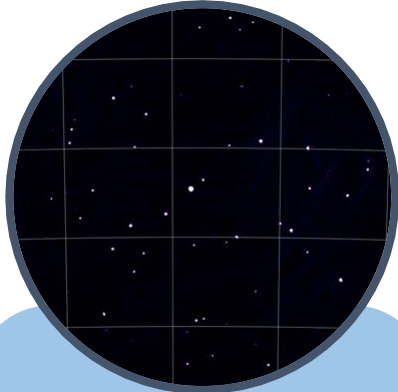
SKAO 科学里程碑

Community involvement starts



Construction

- Building antennas, dishes, roads etc!
- Followed by Assembly, Integration and Verification



Commissioning

- SKAO activity
- Collaborative across system verification and science commissioning



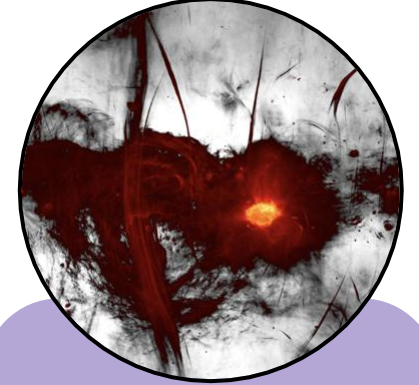
AA2



AA*

Science Verification

- A full dress rehearsal of the end-to-end system for every mode of operation
- Once modes and pipelines are working, the community can submit target ideas
- Data will be publicly available for scrutiny
- Build trust and fostering an early science return



Cycle 0

- Shared-risk PI projects
- SRCNet resources ready for user
- proprietary periods

科学调试：天线（能动）

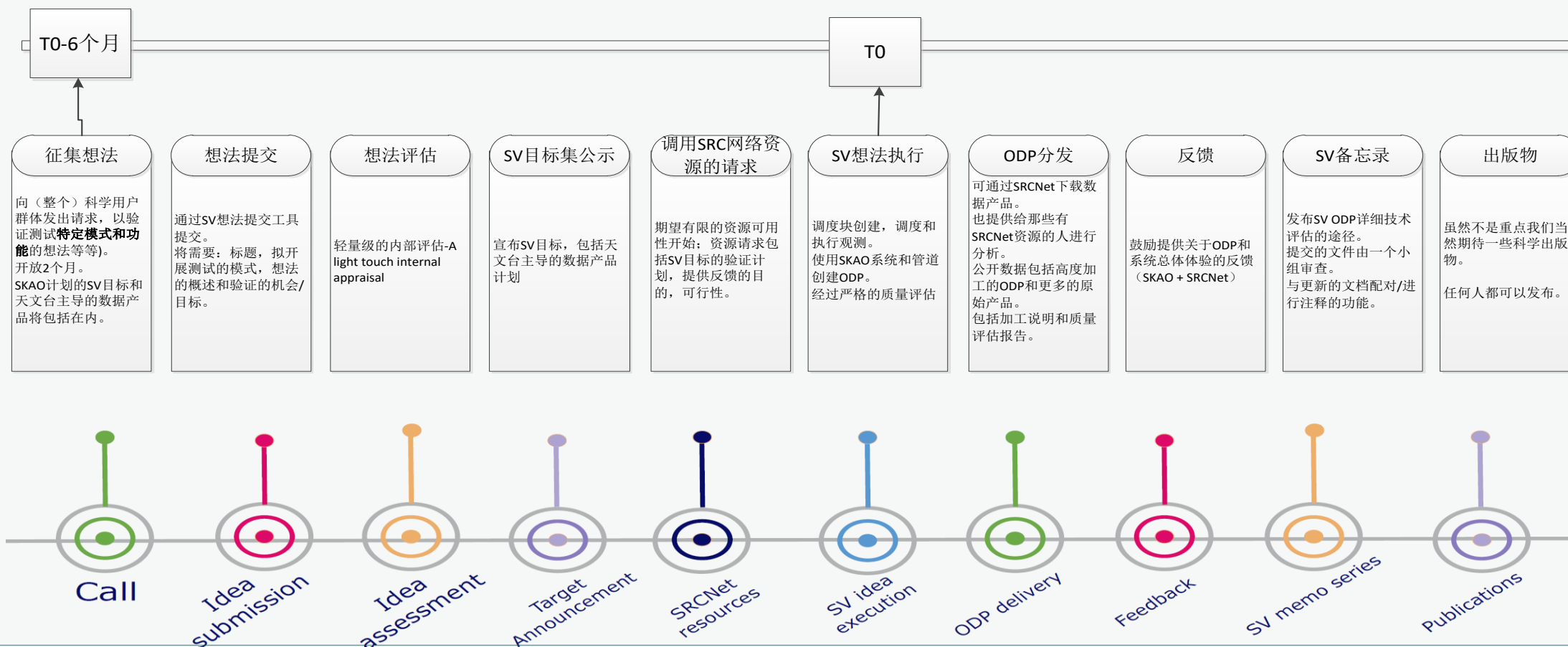
科学验证：数据（能用）@科学目标



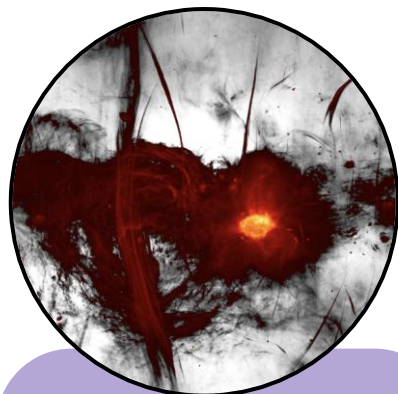
SV (科学验证)

✓ 科学验证 (SV) 10步安排

- SV的主要目的是验证SKA端到端系统的科学能力、整体工作流程和可用性。
- 目标是从SKA科学用户获得关于SKA数据、SKAO运行和SRCNet的广泛反馈。
- SV阶段数据将完全公开；SV数据将不归任何个人/团体所有。
- 科学验证有10个环节，安排如下图（T0 为执行SV观测的时间）。



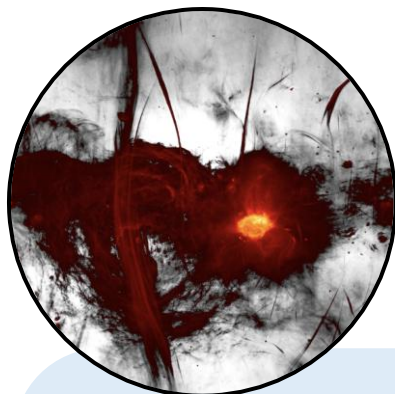
科学时间表 - 主要科学项目 (KSP)



Credit: I. Heywood, SARAO

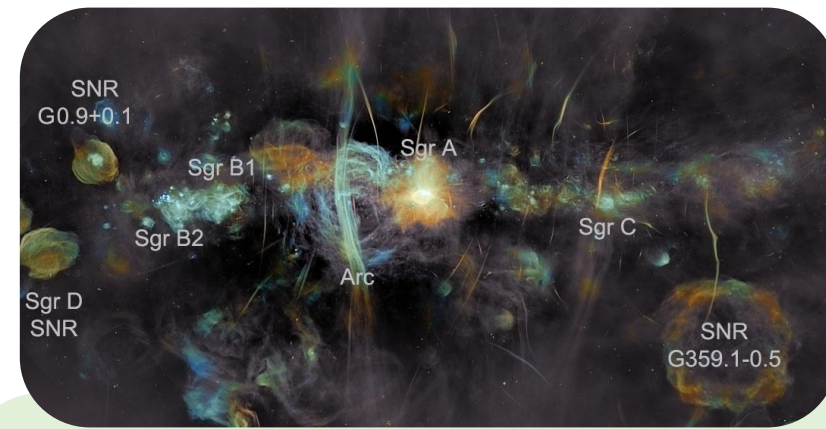
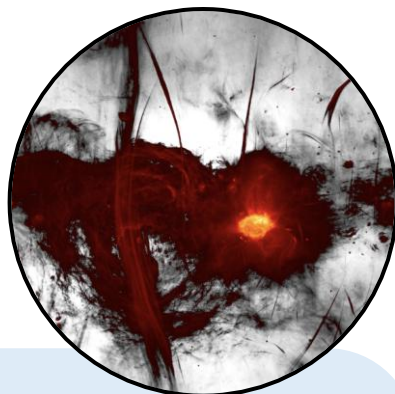
Cycle 0

- Shared-risk PI projects



Cycle 1-2

- PI projects (standard)
- New modes (PI shared risk)
- KSP preparations?



Cycle 3+

- PI projects (standard)
- New modes (PI shared risk)
- **First KSP projects (TBD)?**
- New capabilities (progress to AA4?)

Credits: I. Heywood, SARAO
J.C. Munoz-Mateos



2030

2031

2032

2033



2032

2033

2034

2035



All dates subject to change!

KSP Roadmap Planning

Reminder that Key Science Projects (KSPs) are:

- large, multi-investigator projects;
- that address a significant scientific area;
- are expected to be transformative and;
- will produce data of very high legacy value.

KSPs will require the commitment of substantial resources from SKAO and/or SRCNet. Project teams are also expected to commit significant resources.

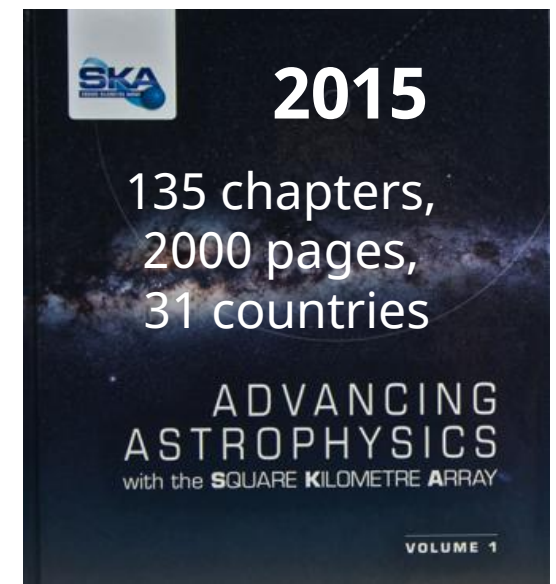
The *first* KSPs will start from Cycle 3 to ensure adequate system and operational maturity and an appropriate set of capabilities are in place. But the *road* to KSPs starts sooner...



Advancing Astrophysics with the SKA II SKA Science Case Refresh

Rationale:

- 10 years since Advancing Astrophysics with the SKA (AASKA)
 - What science is still relevant; what science is new?
 - New astronomers who will use SKA, what are their ideas?
- Telescope specifications and expected science performance now well defined & mature
- Demonstrate to the science community the advances that will be enabled by SKA



AASKAII: an astounding array of science...



Table of Contents

- **Science Working Group overviews**

- *Linking Science Themes Across the SKA Community*

- **Sun, Earth and Planets**

- *Exploring Solar Activity, Heliospheric Processes, and Planetary Systems*

- **Formation and evolution of stars**

- *From Molecular Clouds and Protoplanetary Disks to Supernova Remnants and Magnetars*

- **From the Milky Way to distant galaxies**

- *Structure of Galaxies, Interstellar and Circumgalactic Medium, Magnetic Fields, Star Formation, Active Galactic Nuclei and Cosmic Evolution*

- **The Cosmos**

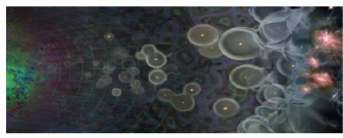
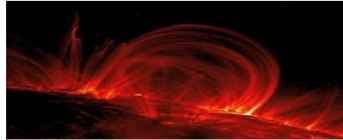
- *Cosmology, the High-Redshift Universe, Large-Scale Structure and Fundamental Physics*

- **The extreme Universe**

- *Pulsars, Compact Objects, Transient Phenomena, High-Energy Particle Astrophysics, and Multi-Messenger Astrophysics*

- **Methods and techniques**

- *Interferometry, VLBI, Imaging, Calibration, Scientific Inference for SKA Science, Citizen Science, AI*



目录

- 一、SKA基本情况
- 二、SKA最新进展
- 三、中国SKA科学进展和规划

中国SKA首要任务

顶层设计（SKA科学研究）



- 秉承“**以确保丰硕科学回报为唯一原则**”的战略指导思想
- 优先布局中国SKA科学研究领域方向和开展前期预研准备
- 培养形成一支优秀的中国SKA科学研究团队
- 取得首批和系列科学成果和发现



确定中国SKA科学方案

2014年4月16-17在上海召开的“SKA科学目标及相关重要问题研讨会”上讨论确立了“2+1”中国SKA科学目标

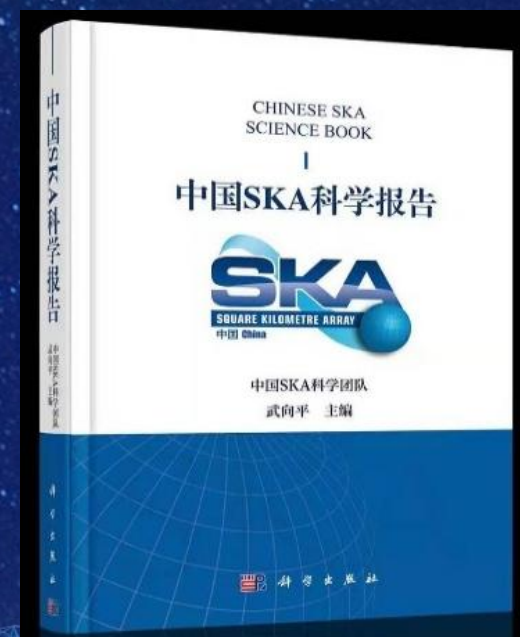


《中国SKA科学报告》

科学出版社出版，2019.11

(380页 56.7万字)

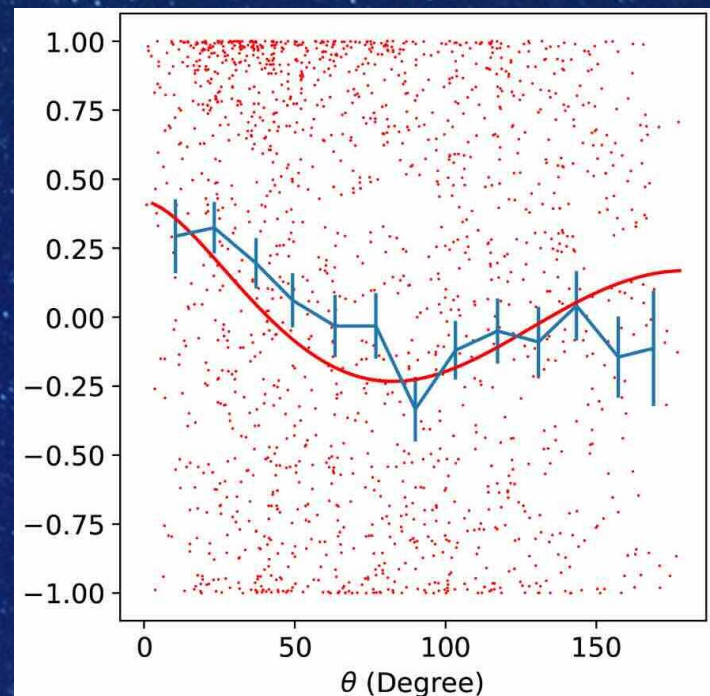
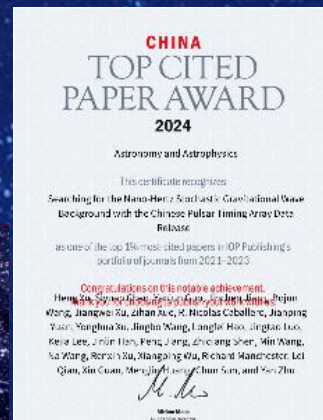
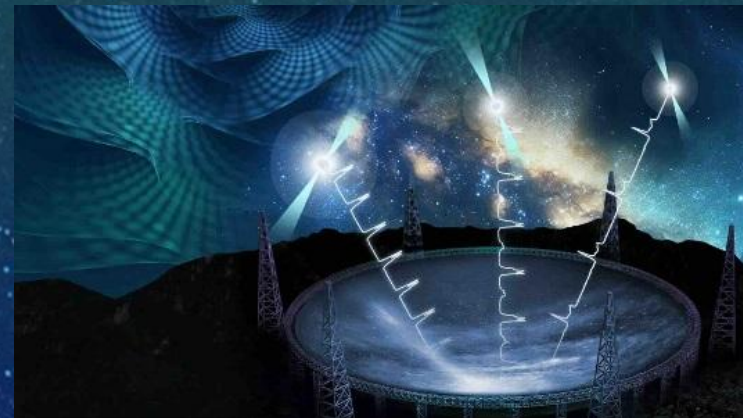
系统分析中国射电天文现状，绘制中国参与SKA的宏伟科学蓝图。是我国参与SKA开展科学研究的重要指导性文件。



脉冲星搜寻、测时和引力理论检验

SKA中频频段先导脉冲星测时试验，使用**3.5年FAST数据**探测到**纳赫兹引力波**背景存在的关键证据，信噪比达到 **4.6σ** ，为国际上同期最高水平。

- 入选**Science**杂志评选的**2023年度十大科学突破**
- 美国物理学会**2023年度重要事件（首位）**
- 入选2023年中国十大科技进展新闻，2023年度中国重大科学、技术与工程进展
- 获得2024年国际基础科学大会（ICBS）评选的**前沿科学奖**
- 论文获得2024年IOP中国**高被引文章奖**、RAA杂志2024年重大贡献奖

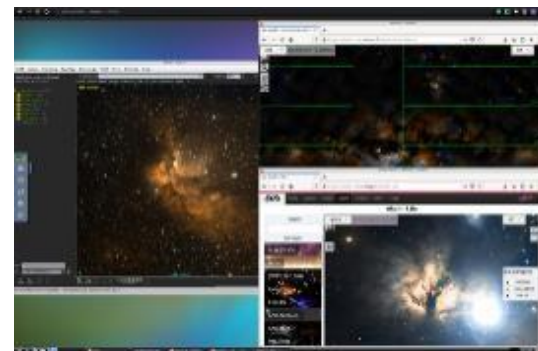
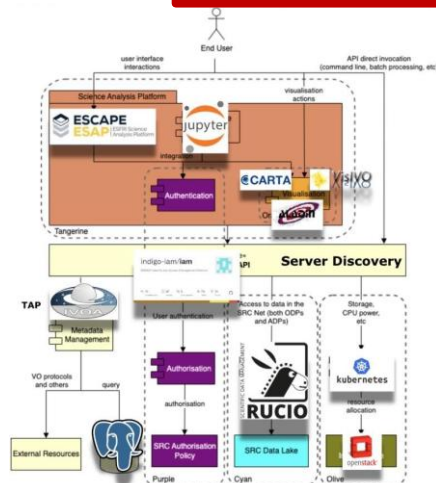
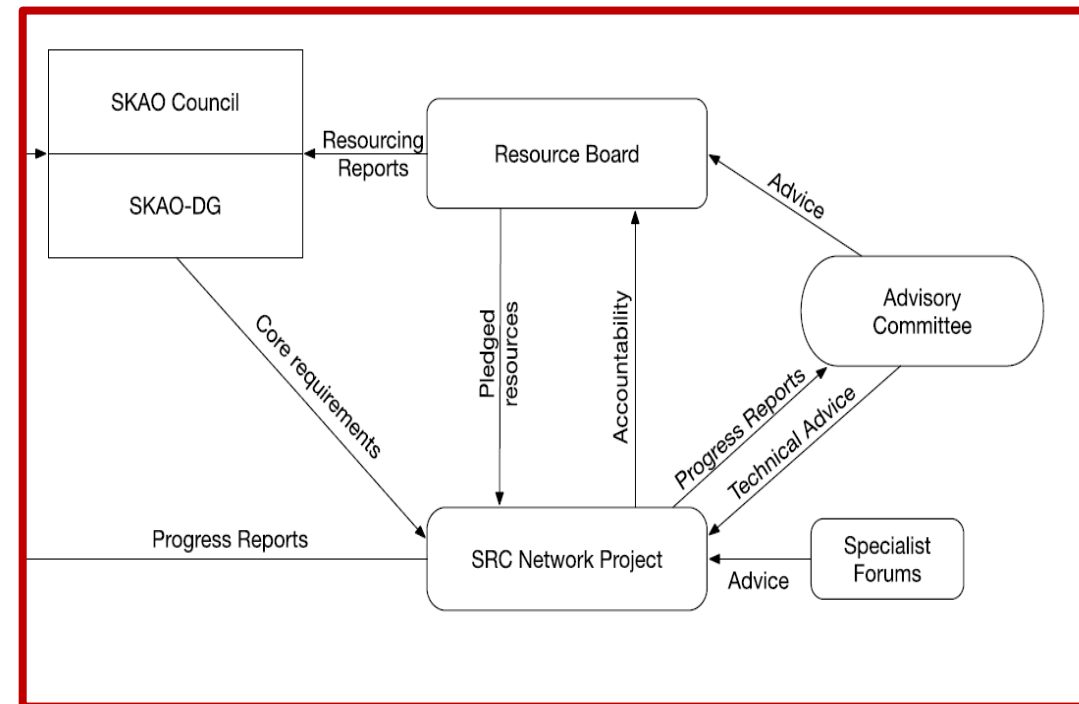


4.6σ ; CPTA, Xu et al. 2023 RAA

SKA区域中心网络 (SRCNet)

根据国际SRC网络架构的规划，建设SRCNet需要在全球部署若干个SRCNet节点，每个节点需具备以下主要功能模块：

- (1) 海量科学数据在多个位置的复制、分发和同步
- (2) 联合身份验证授权
- (3) 数据处理交互式界面
- (4) 高用户量和高数据量的科学数据可视化
- (5) 软件、容器和工作任务的分发
- (6) 具备全球服务的承载能力



中国SKA区域中心

总体目标：建成符合 SRCNet v0.3 标准的**中国SRCNet节点**，承担数据存
储、科学运算和传输三大主要功能，**支持区域中心软件研发和SKA科学验证**，
全力保障我国科学家实现从观测数据到科学成果转化，完成SRCNet 资源委
员会对我国**认捐资源**的要求

- 建成中国SKA 区域中心节点系统，实现与国际SRCNet 的接入，性能参数达标，符合国际SRCNet技术要求
- 开展 SRCNet 国际联测，具备50Gb/s带宽能力，完成与4 个国家节点的数据传输链路实验，完成SRCNet调试和测试任务，顺利运行 SKA 科学验证的软件
- 编制完成《中国SKA 区域中心全面建设实施方案》，形成核心团队，支撑科学团队参与国际 SRCNet 开发联测与科学验证



中国SKA科学的最大挑战：如何把观测数据转化为科学发现？

中国SKA科学准备的第一阶段（2020-2025年）是全面布局科学方向、提升中国SKA科学竞争力、广泛吸纳优秀青年人才参与，奠定中国SKA科学基础。

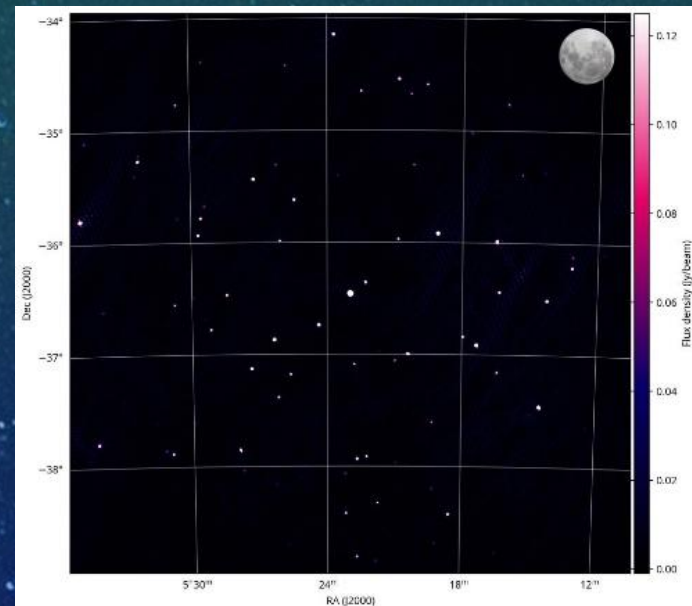
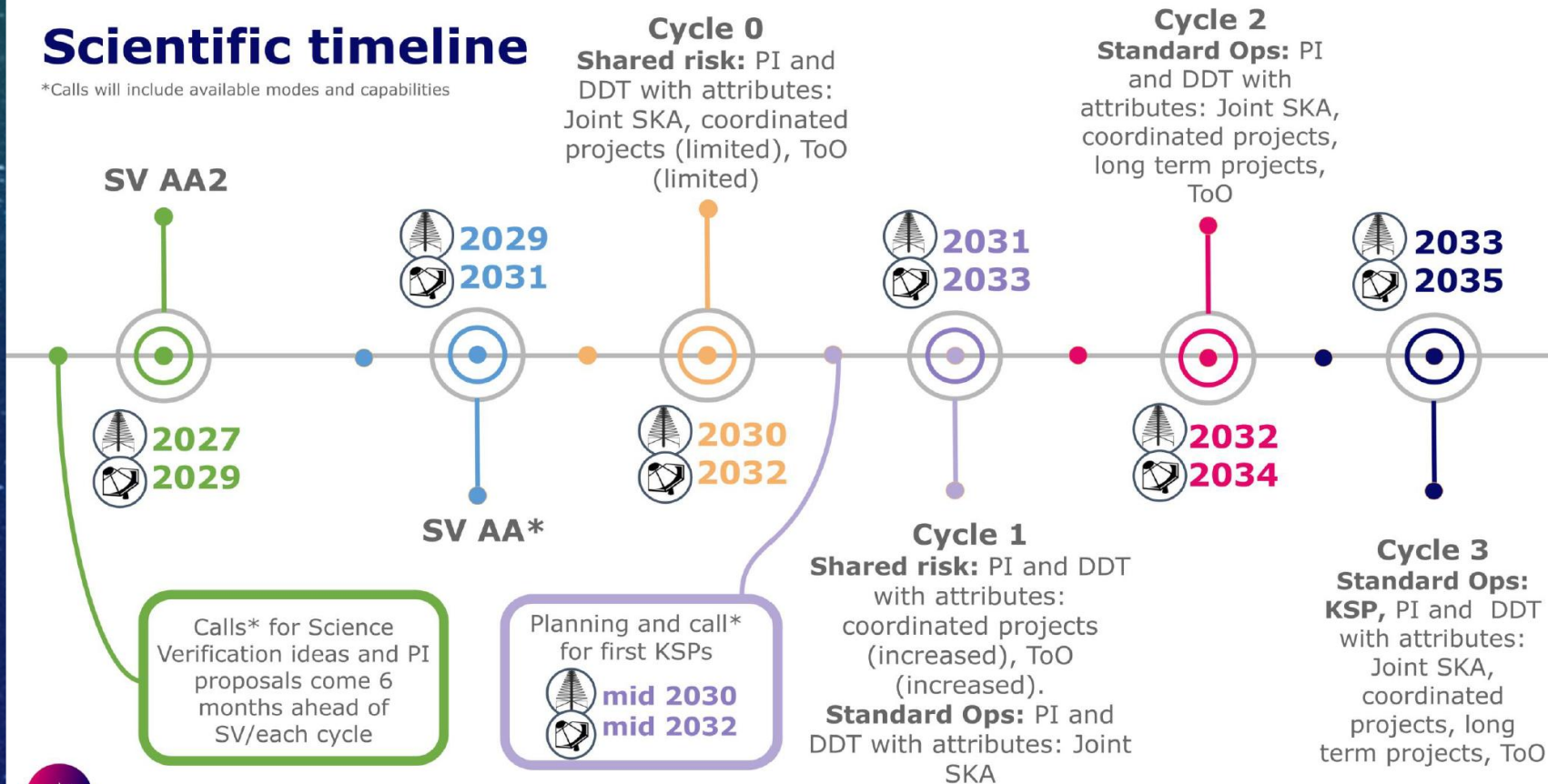
中国参与SKA始终秉承“以确保丰硕科学回报为唯一原则”的战略指导思想，优先布局了两个重点突破领域（宇宙再电离探测；脉冲星搜寻和测时）和8个具有中国特色的研究方向。在科技部SKA中国办公室统一领导、全国各科研院校大力支持、全体SKA科学团队成员积极参与下，我们**成功实施了第一期（2020年-2025年）中国SKA科学部署**，“2+1”战略布局的十大科学方向全面铺开，18项任务得到SKA专项经费支持，有力保障了中国参与SKA科学目标预研准备，吸引并培养了一批SKA科学研究有生力量，为中国SKA健康持续发展奠定了基础。

中国SKA科学准备阶段二期（2026-2030年）将聚焦中国SKA优势领域，致力于共同领衔（co-PI）若干SKA核心科学项目（KSP），致力于成功申请一批具有中国特色PI项目。

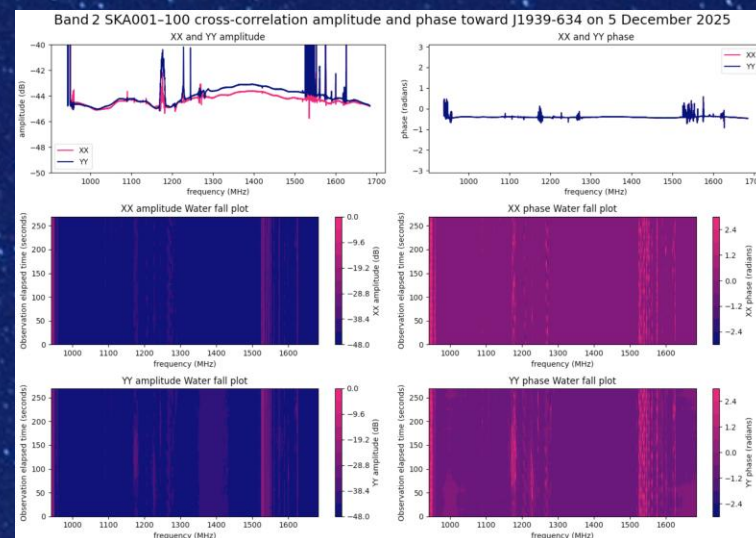
通过二期的布局和实施，我们要通过顶层设计，确保培育和遴选的项目未来获得与出资比例相匹配的SKA观测时间，确保首批SKA观测成果中有中国的显示度和贡献。

Scientific timeline

*Calls will include available modes and capabilities



2025.3.17: SKA-Low 首张宇宙图像 (4站)



2026.1.7: SKA-Mid 首次成功获得干涉条纹

- 确立中国SKA的首批科学目标，完成相应SKA科学团队组建，完成中国SKA区域中心建设，全面迎接SKA观测，把首批SKA观测数据快速转化成科学成果和发现。
- 鼓励围绕SKA科学的各种形式国际合作和交流，持续扩大中国SKA科学团队的话语权和影响力，提升在KSP的中方参与度以及作为科学用户的观测时间竞争力。

SKA低频天线



SKA英国总部

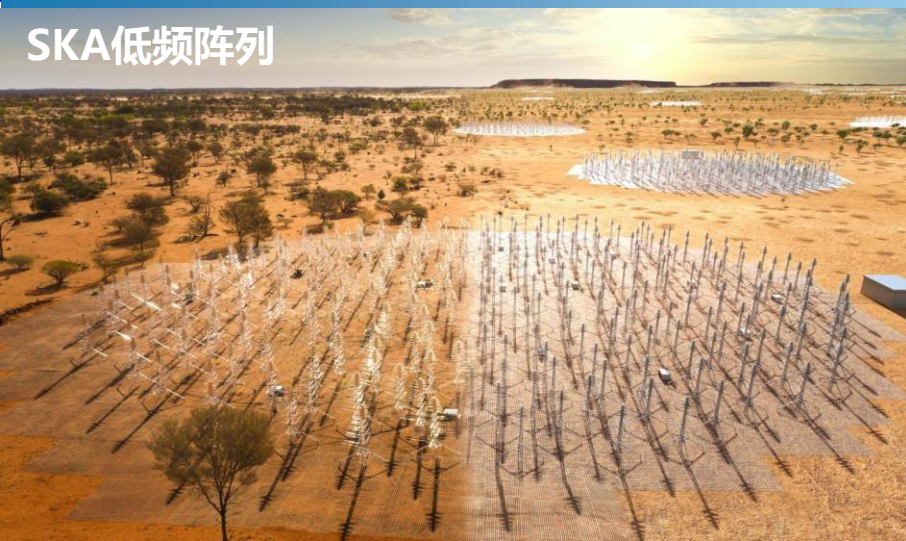


SKA中频天线



谢谢大家!

SKA低频阵列



上海天文台距SKA澳大利亚站址6469公里



SKA中频阵列

