

# 用氢原子探索暗物质与暗能量

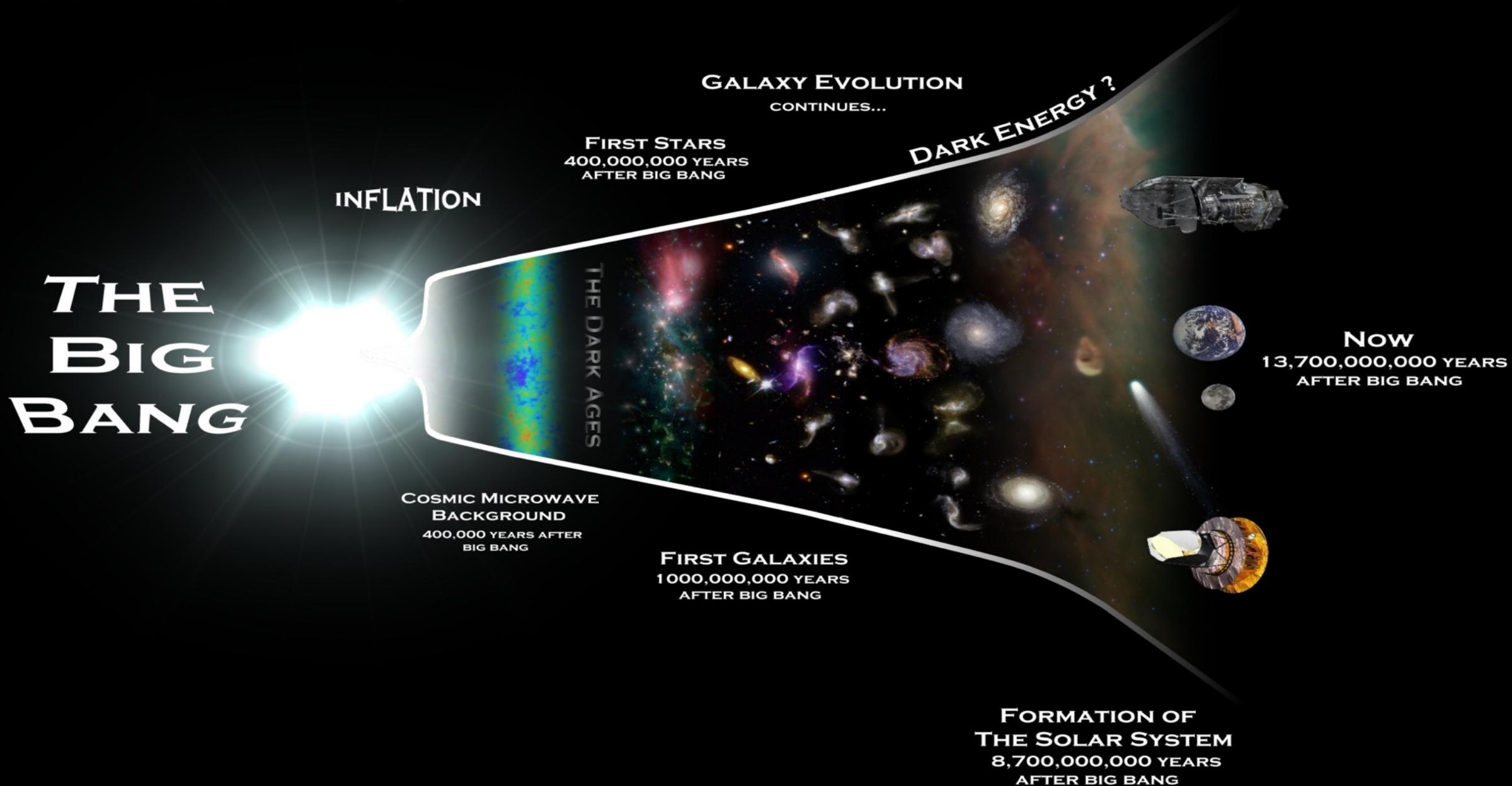
张鑫

东北大学

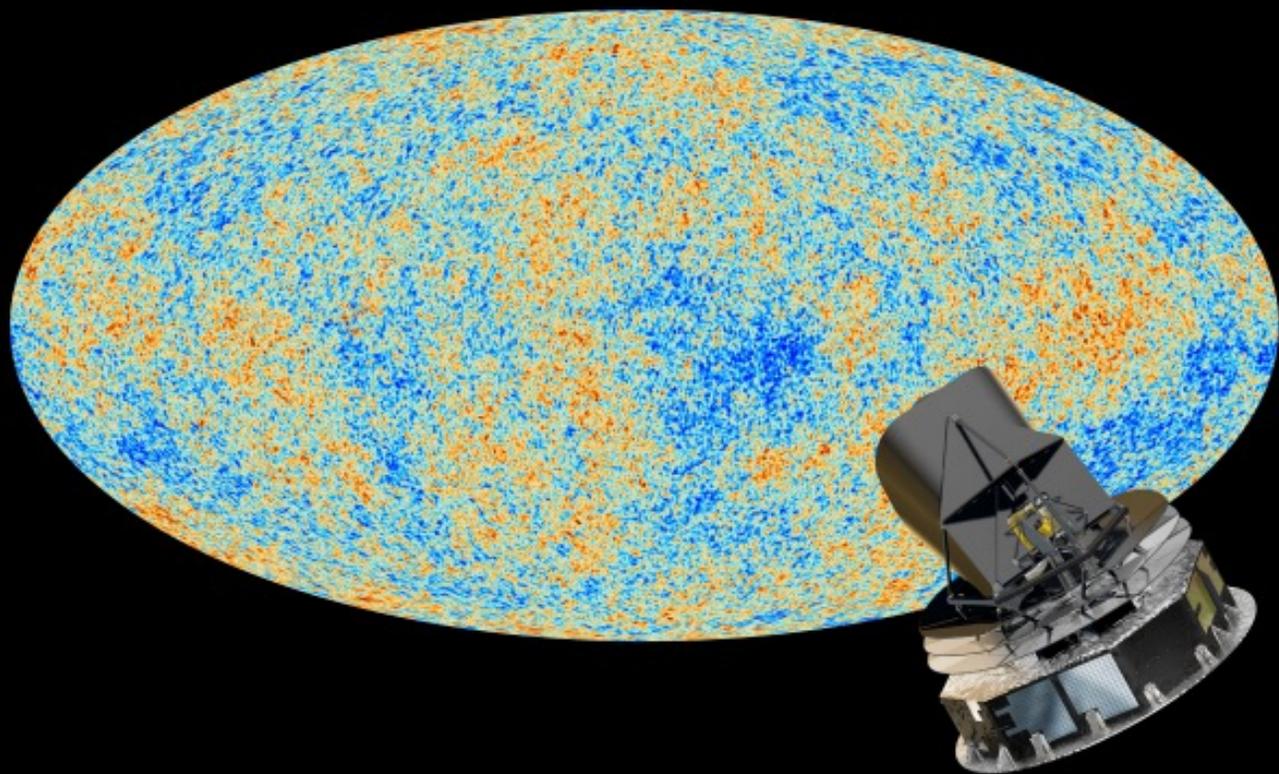
中科院高能物理研究所

2023.5.10

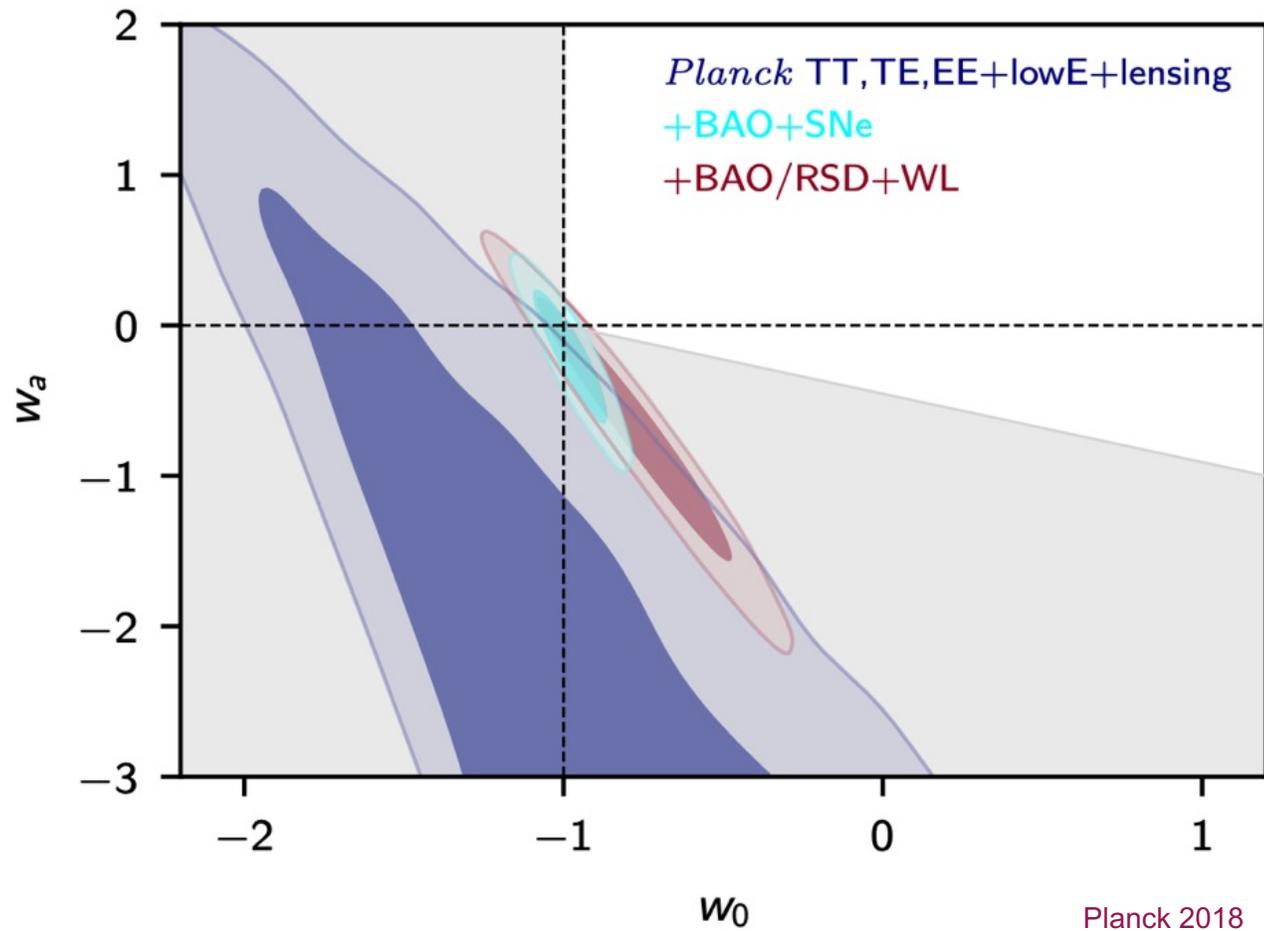
# 我们今天对宇宙的理解



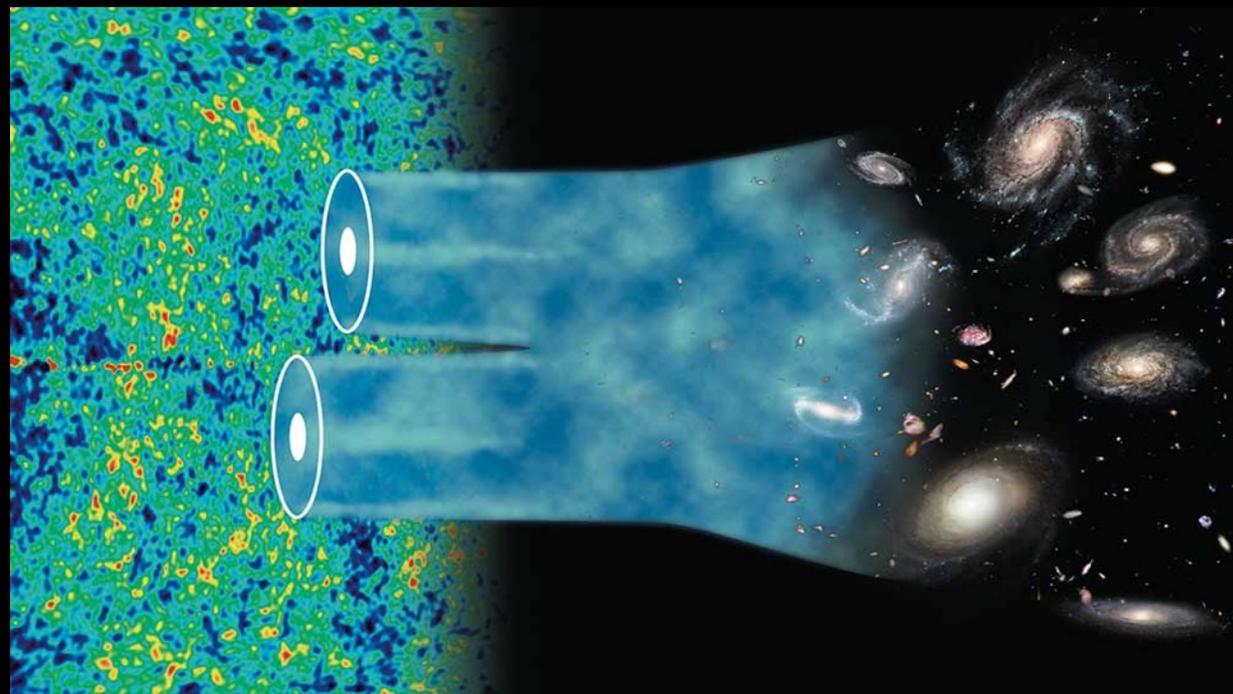
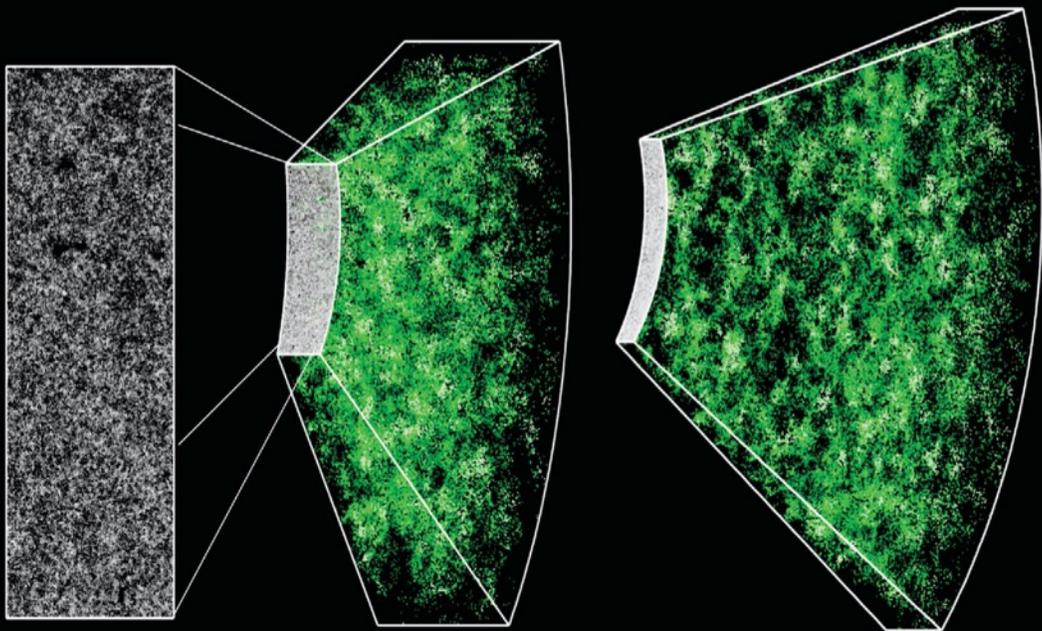
# 如何了解这一切？



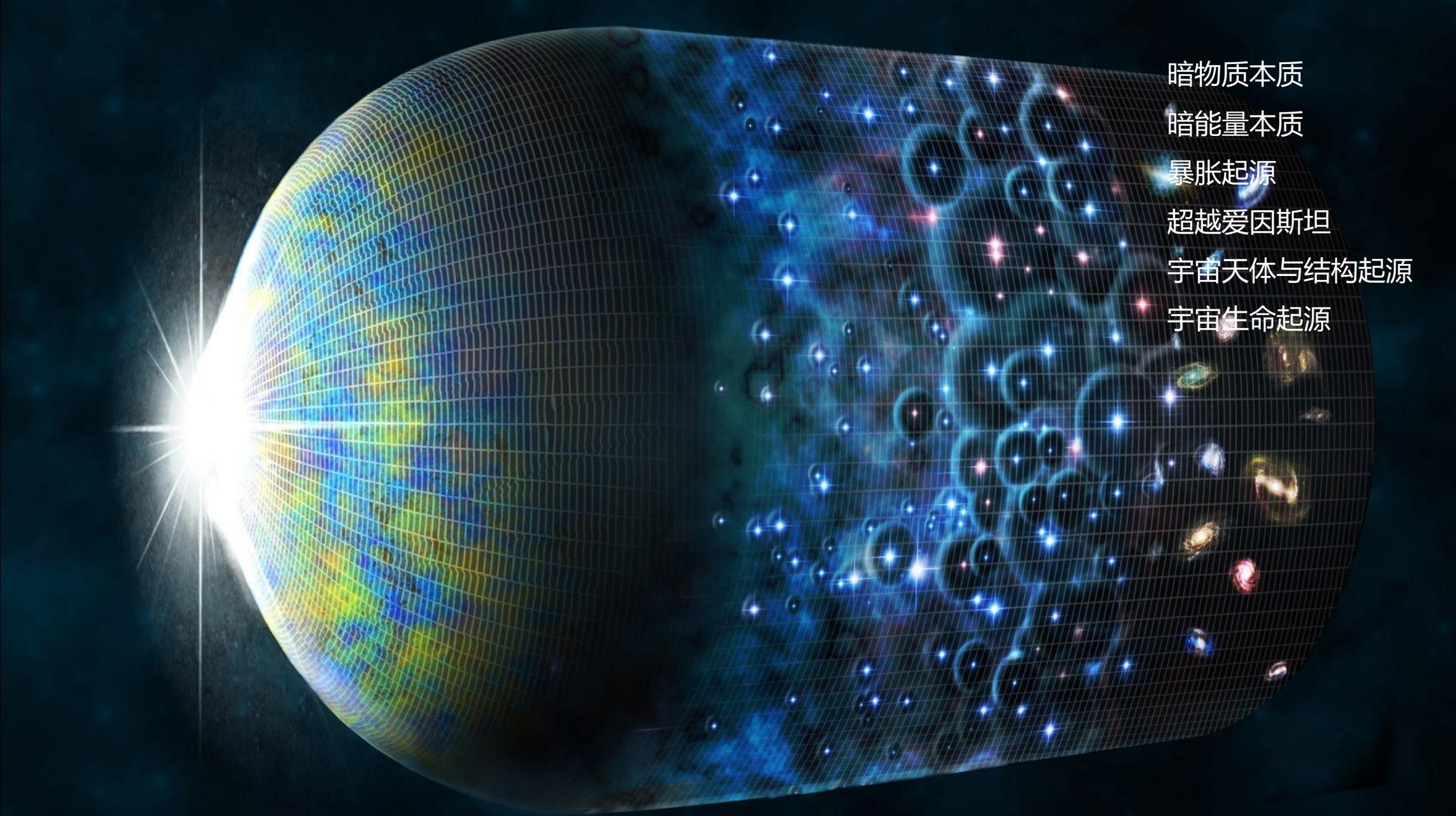
- 宇宙学观测的发展
- CMB：宇宙年龄38万年，快照，精确测量
- 温度各向异性：各种宇宙学模型可以比对，调整参数，确定参数
- $\Lambda$ CDM模型拟合得很好
- 精确确定宇宙学参数



- 晚期宇宙演化，难以用早期宇宙观测确定
- 比如，暗能量
- 晚期宇宙观测：安全护栏——与CMB联合，打破参数简并



- 晚期宇宙观测
- LSS : 星系红移巡天 , 3D Map——BAO , 标准尺
- SN : 标准烛光
- Planck 2018, CBS (w. lensing):  $w$  precision 3% ( $w$ CDM);  $w_0$  precision 8%,  $w_a$  error 0.3 ( $w_0w_a$ CDM)



暗物质本质

暗能量本质

暴胀起源

超越爱因斯坦

宇宙天体与结构起源

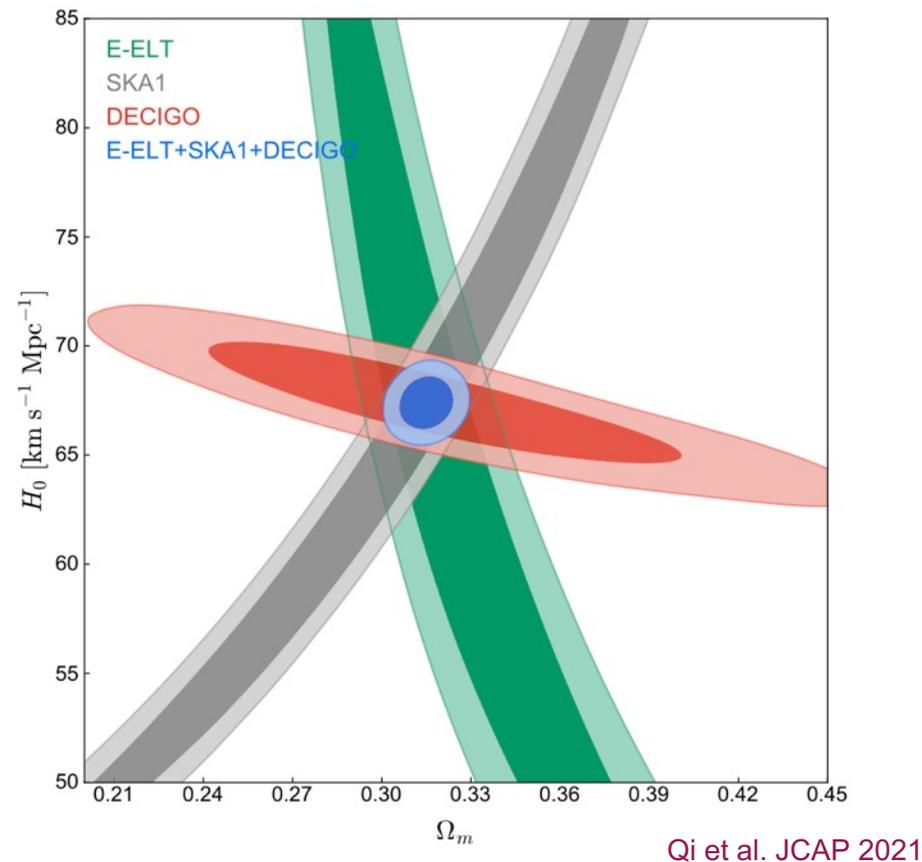
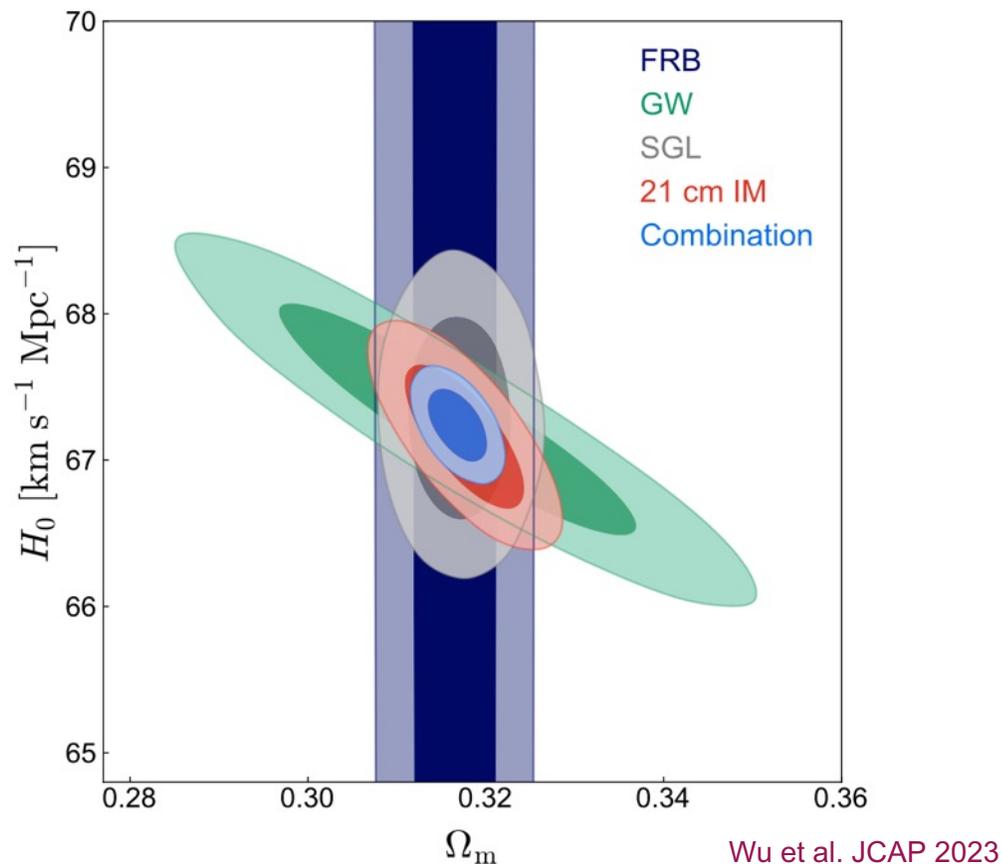
宇宙生命起源

# 早期宇宙与晚期宇宙不一致性：哈勃常数危机

67 OR 74?

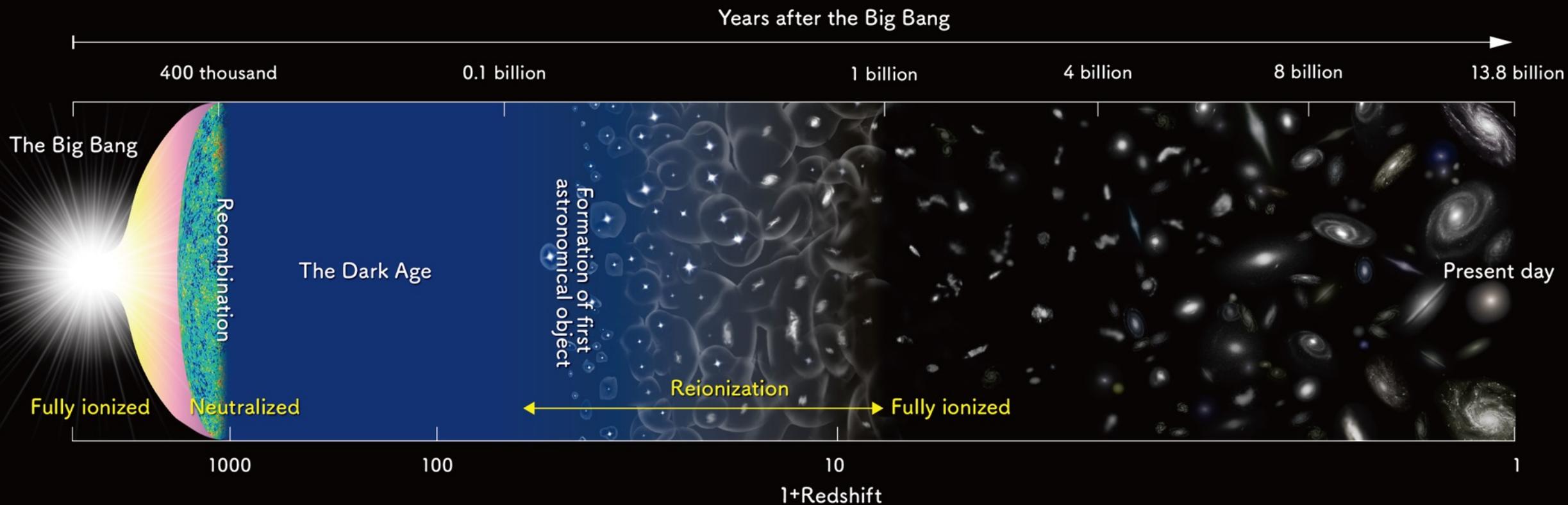


# 打造探索晚期宇宙的精确探针



- 破局的关键手段：晚期宇宙观测
- 综合打造晚期宇宙精确探针
- 目标：不用CMB，即可精确测量宇宙学参数（比如暗能量、哈勃常数）
- 传统探针之外，新探针：打开新的观测窗口，多信使、多波段协同和联合

# 早期宇宙：最初十亿年的历史

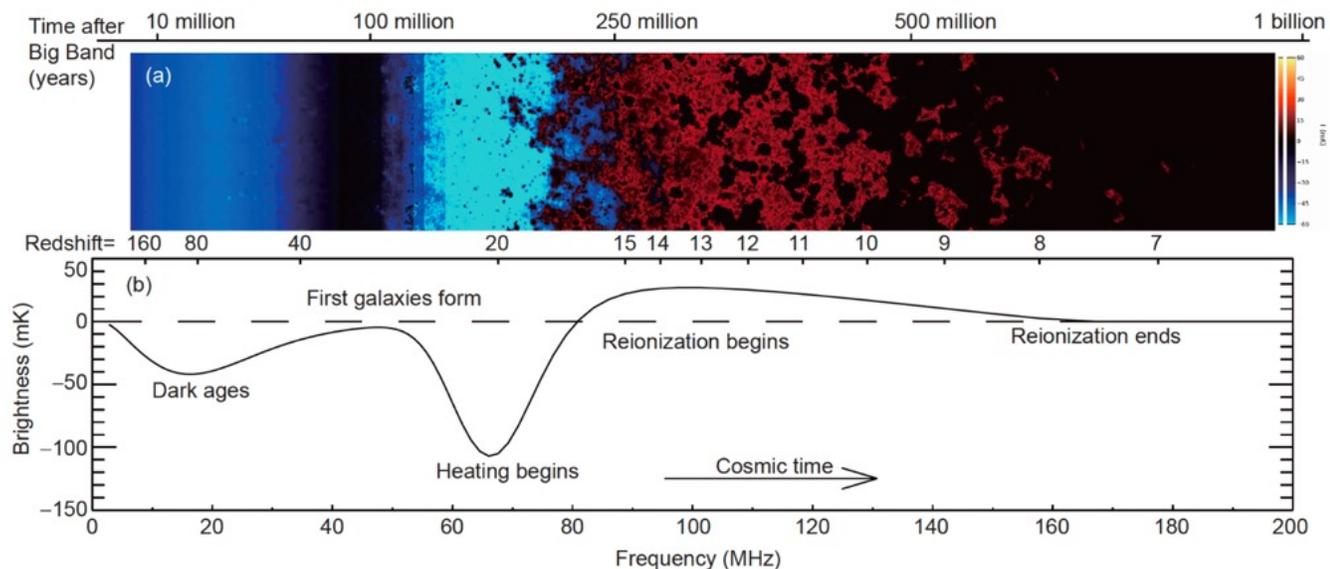
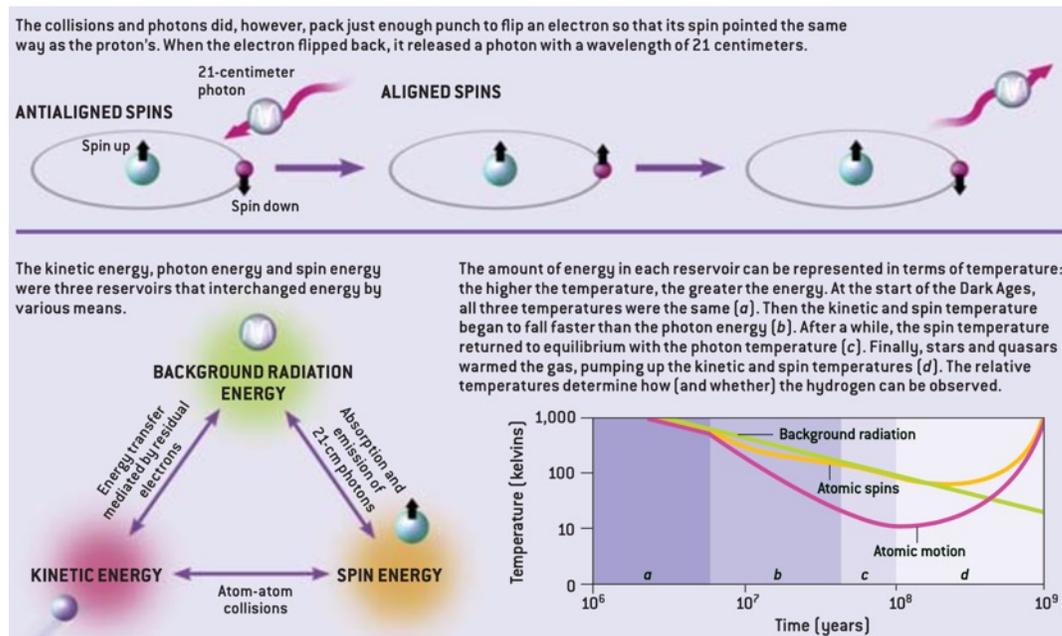


宇宙最初十亿年：最后一块未被探索之地

婴儿时期照片，成年照片，唯独缺失童年照片

中性氢原子21厘米辐射——探索宇宙最初十亿年的几乎唯一手段

# 低频21厘米：探测宇宙最初十亿年



- 中性氢原子21厘米辐射：基态电子自旋翻转，1420 MHz
- 自旋温度与CMB温度比较（亮温度）：吸收或发射21厘米光子
- 黑暗时代（吸收），宇宙黎明（吸收），宇宙再电离（发射）

- 黑暗时代：红移约30-1100，频率在45MHz以下，波长被拉伸到6.5米以上
- 宇宙黎明：红移约10-30，频率约为45-130MHz，波长被拉伸至2.3-6.5米
- 宇宙再电离：红移约6-10，频率约为130-200MHz，波长被拉伸至1.5-2.3米
- 整体谱：21厘米亮温度全天平均值
- 断层扫描：每个红移切片的21厘米亮温度涨落
- 21厘米森林：高红移射电点源，探索小尺度结构
- 宇宙大尺度结构3维天图：功率谱，成像

# 低频21厘米：吸收线森林，暗物质射电探测

高红移射电电源（类星体），再电离时期的中性氢21厘米吸收森林

对小尺度结构敏感

提供暗物质探针：温暗物质小尺度压低效应

SKA-Low探测

其他观测无法触及的尺度和红移段



# 中频21厘米：大尺度结构，暗能量射电探测

## Line Intensity Mapping (LIM)

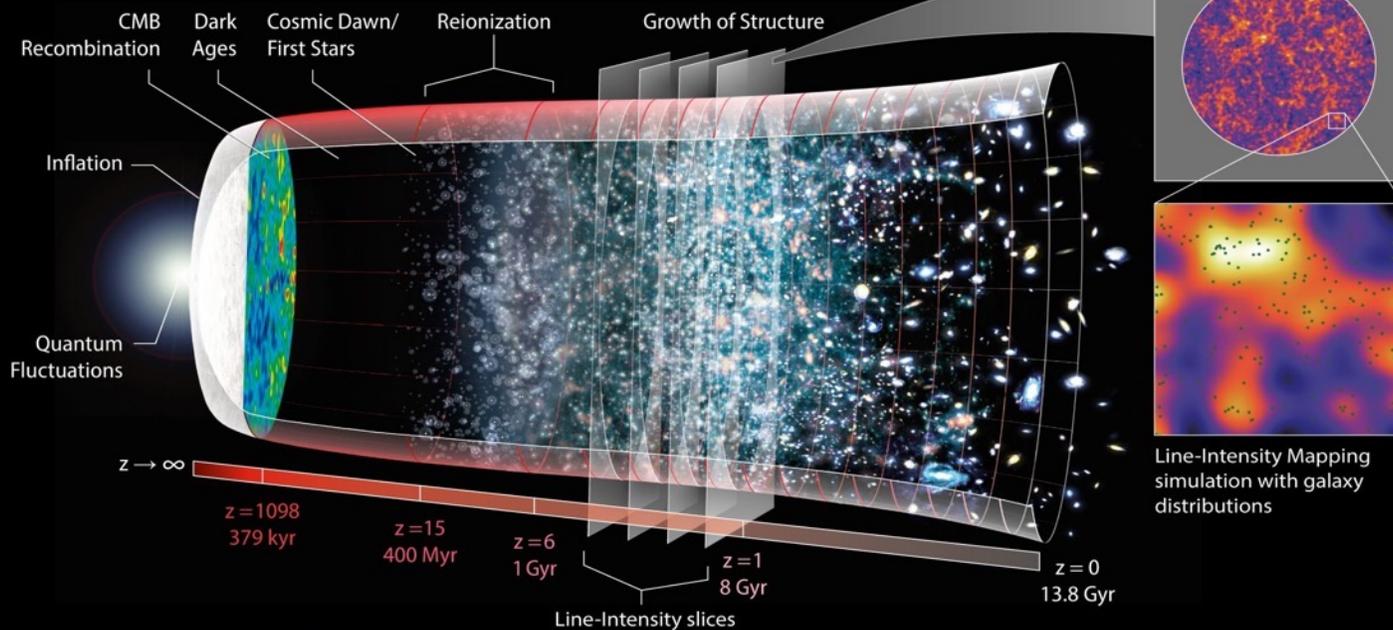


Image Credit: NASA-GSFC LAMBDA

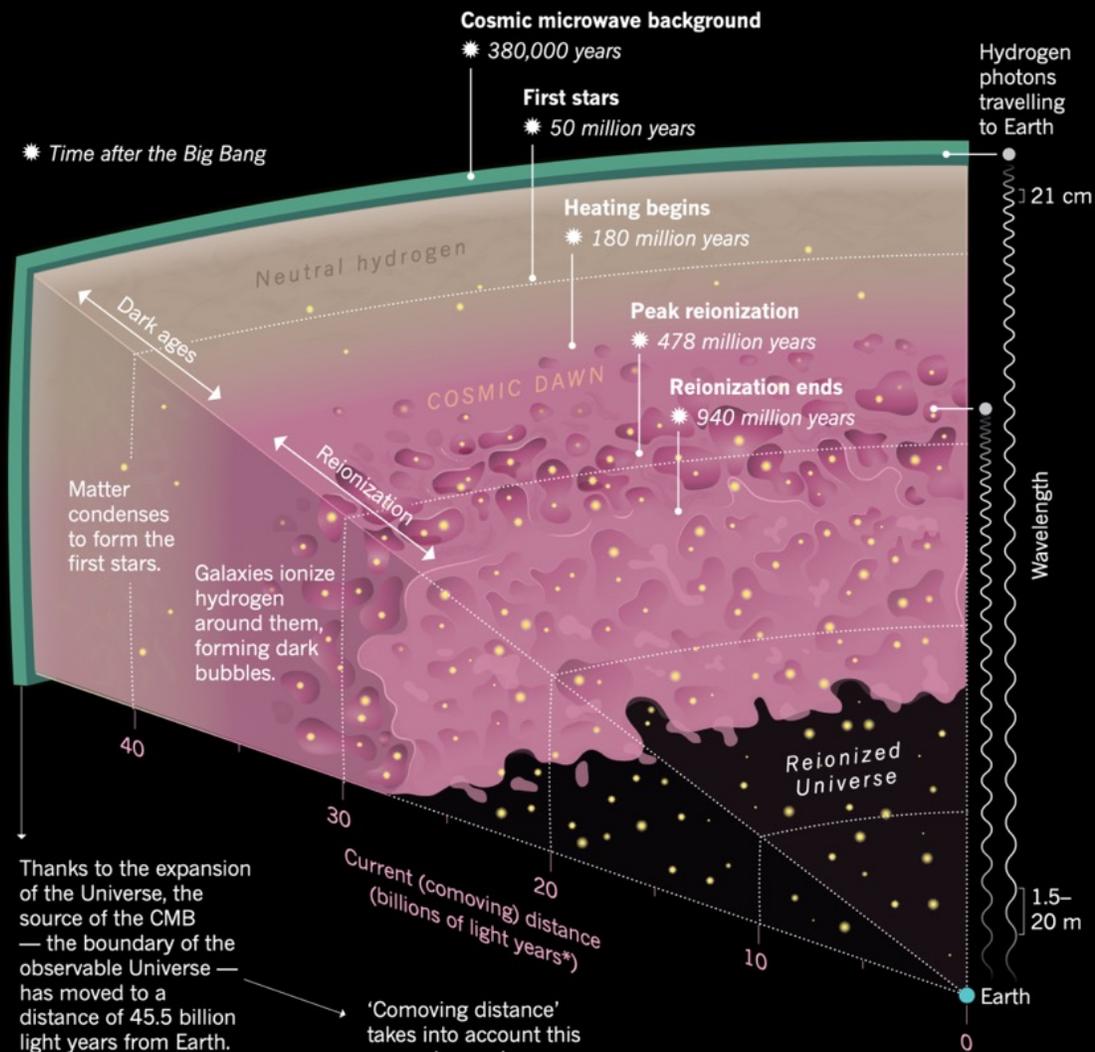
后再电离时代，中性氢主要在星系中

利用21厘米信号绘制大尺度结构物质分布

只关心大尺度，不分辨单个星系，高效巡天

强度映射：低角分辨率，每个像素包含很多星系

优势：巡天速度快，体积大，红移深



\* 1 light year = 0.3 parsecs.

'Comoving distance' takes into account this expansion and represents the distance light has traversed from objects that disappeared long ago.

Although the early cosmos is long gone, its light is only now reaching Earth. The first billion years of cosmic history, still largely unstudied, represent a good 80% of the Universe's observable volume.

## 机遇与挑战并存

巨大机遇：

打开宇宙学观测新窗口

红移的21厘米信号：断层扫描

探索宇宙整个演化历史

巨大挑战：

21厘米宇宙学信号极其微弱，前景污染强

实际观测面对各种复杂系统效应

叠加系统效应，前景减除更加困难

# 平方公里阵列射电望远镜 (SKA)

- 建成后将成为世界最大射电望远镜
- 科学目标极为广泛，覆盖诸多领域，将深刻影响天文学与基础物理未来几十年发展
- 在检验基础物理、探索宇宙演化等方面发挥至关重要的作用
- 比如：宇宙再电离，超低频引力波，快速射电暴，宇宙膨胀历史和暗能量，宇宙磁场等
- 中性氢21厘米线的宇宙学探测：宇宙黎明与再电离，宇宙膨胀历史，暗能量，超越爱因斯坦.....



# SKA-Mid

THE SKA'S MID-FREQUENCY TELESCOPE



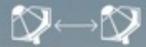
LOCATION:

**SOUTH AFRICA**



**197 DISHES**

(INCLUDING 64 MEERKAT DISHES)



MAXIMUM BASELINE:

**150km**



FREQUENCY RANGE:

**350 MHz–  
15.4 GHz**

WITH A GOAL OF 24 GHz

# SKA-Low

THE SKA'S LOW-FREQUENCY TELESCOPE



LOCATION:

**AUSTRALIA**



**131,072  
ANTENNAS**

SPREAD ACROSS 512 STATIONS



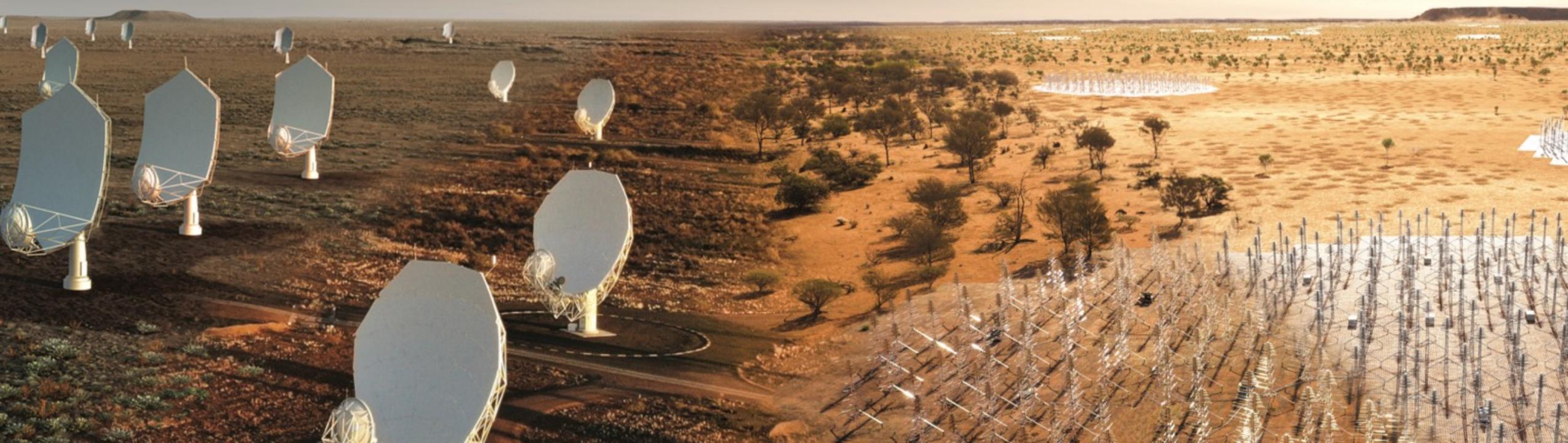
MAXIMUM BASELINE:

**~65km**



FREQUENCY RANGE:

**50 MHz–  
350 MHz**

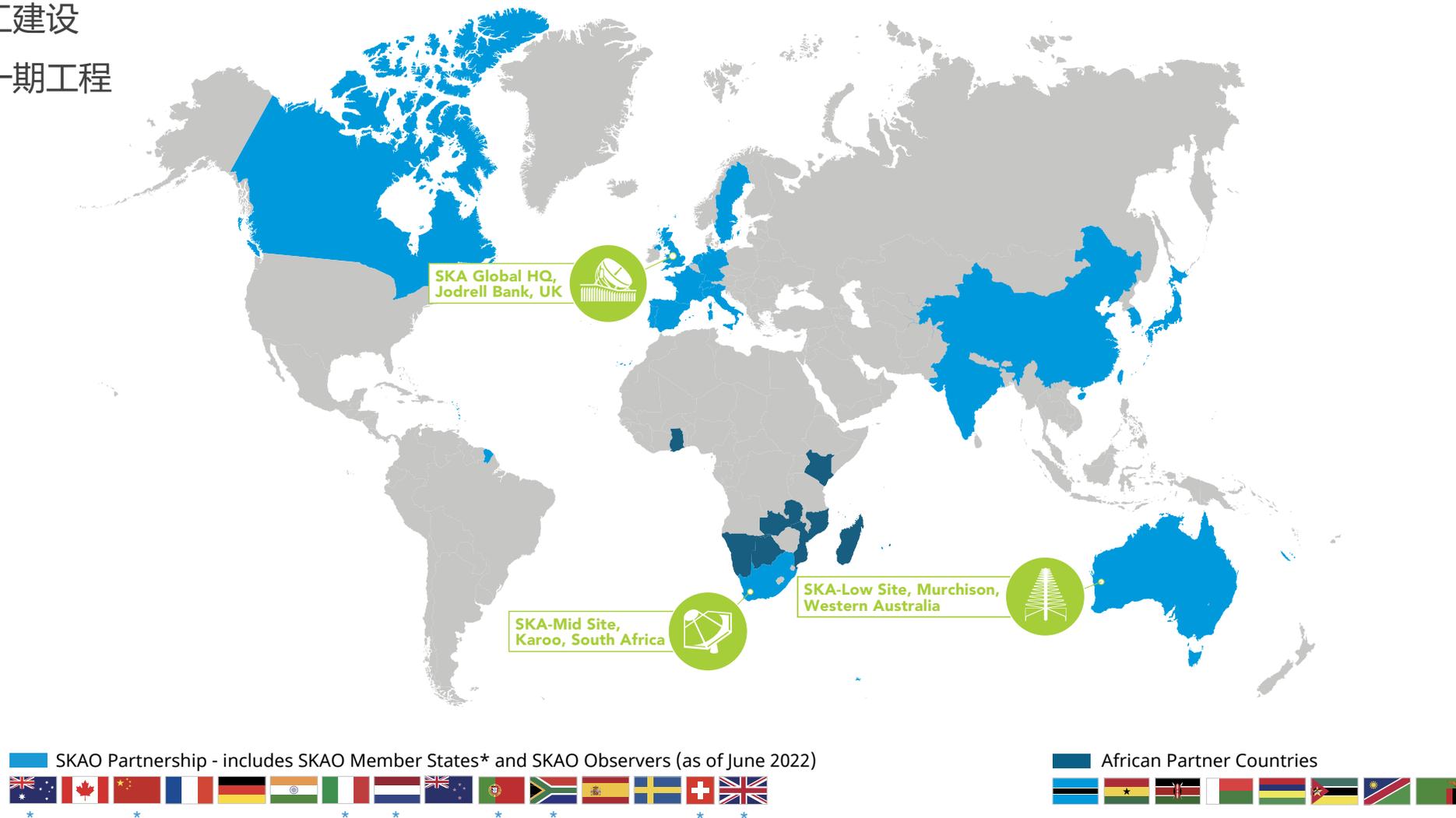


# SKA：国际大科学工程

2021年4月29日，全国人大常委会批准《成立平方公里阵列天文台公约》

2022年底开工建设

2028年建成一期工程



# 探索基础物理：暗物质与暗能量

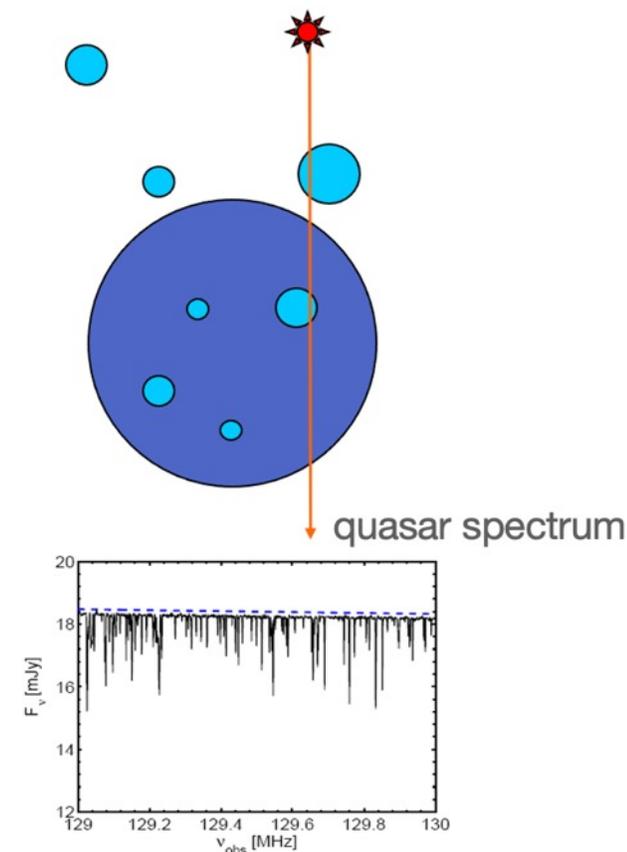
- 再电离-21厘米森林：温暗物质
- 后再电离-21厘米强度映射：暗能量



# 利用低频21厘米探测暗物质？



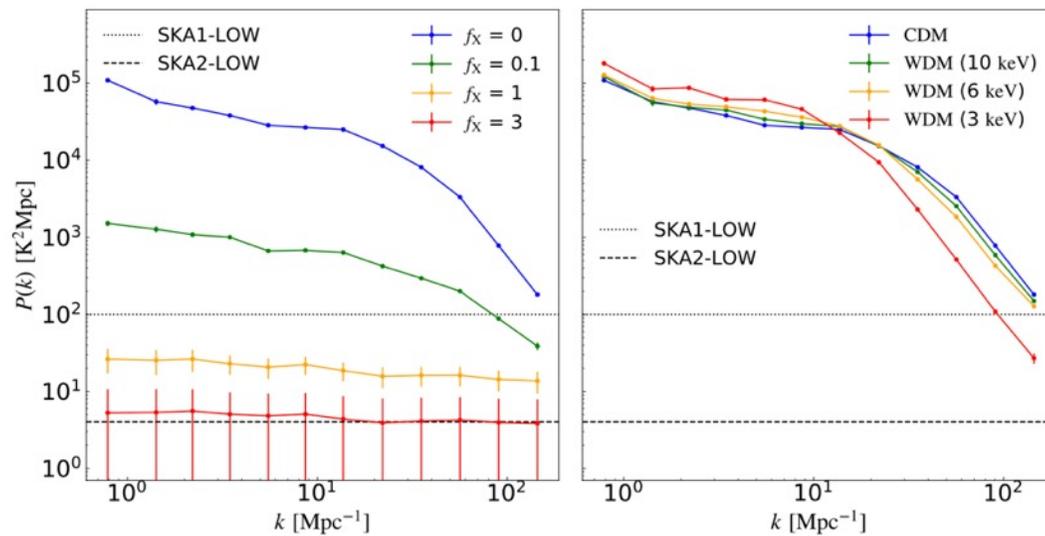
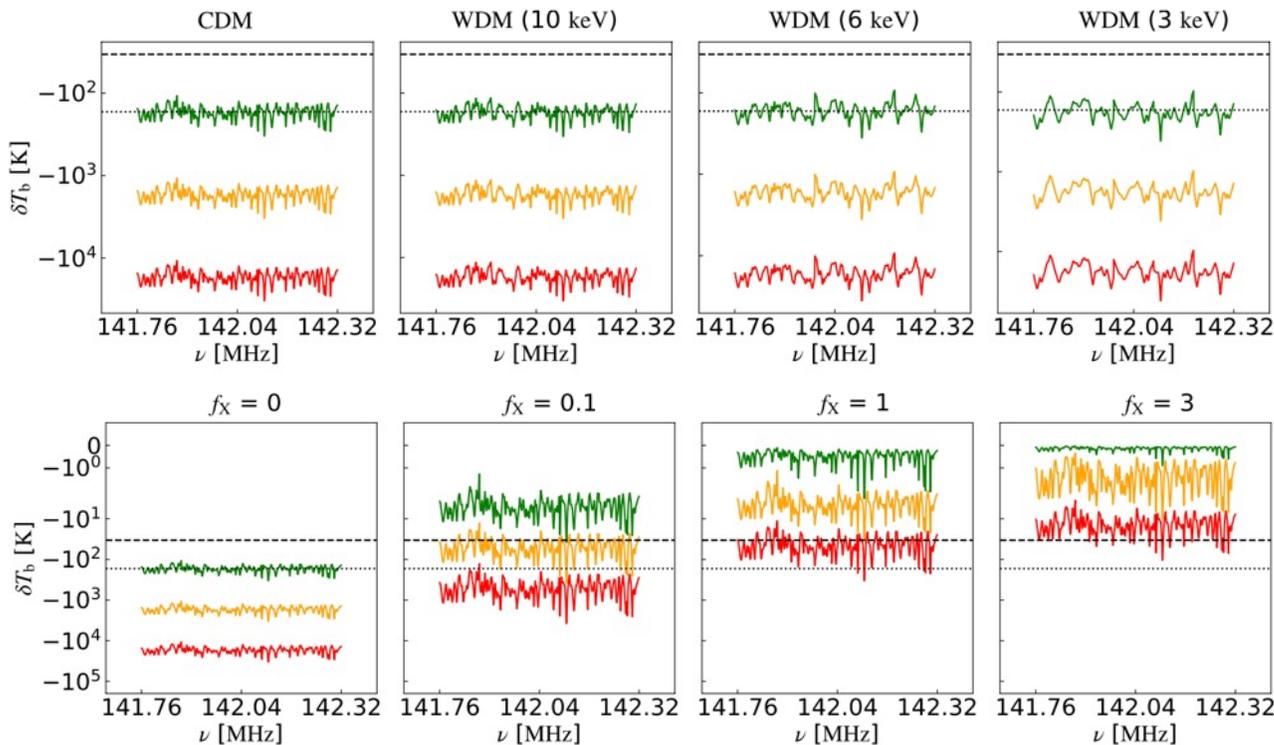
SKA-Low



- 冷暗物质在星系尺度的问题：温暗物质？（Cold OR Warm?）
- 温暗物质：大尺度与冷暗物质没差别，但小尺度结构少
- 关键是小尺度上的测量：低红移宇宙——星系尺度强透镜，Lyman- $\alpha$ 森林，银河系卫星星系
- 急需新方案、新探针
- 再电离时期**21厘米森林**：提供温暗物质的低频射电探测方案
- 21厘米森林：背景源为高红移射电点源，探测小尺度结构（百万倍太阳质量小暗晕）
- 但同时早期宇宙加热过程（X射线加热）也敏感——压低信号，且与暗物质形成一定的简并

XuYD et al. MNRAS 2011

# 21厘米森林信号：一维功率谱测量



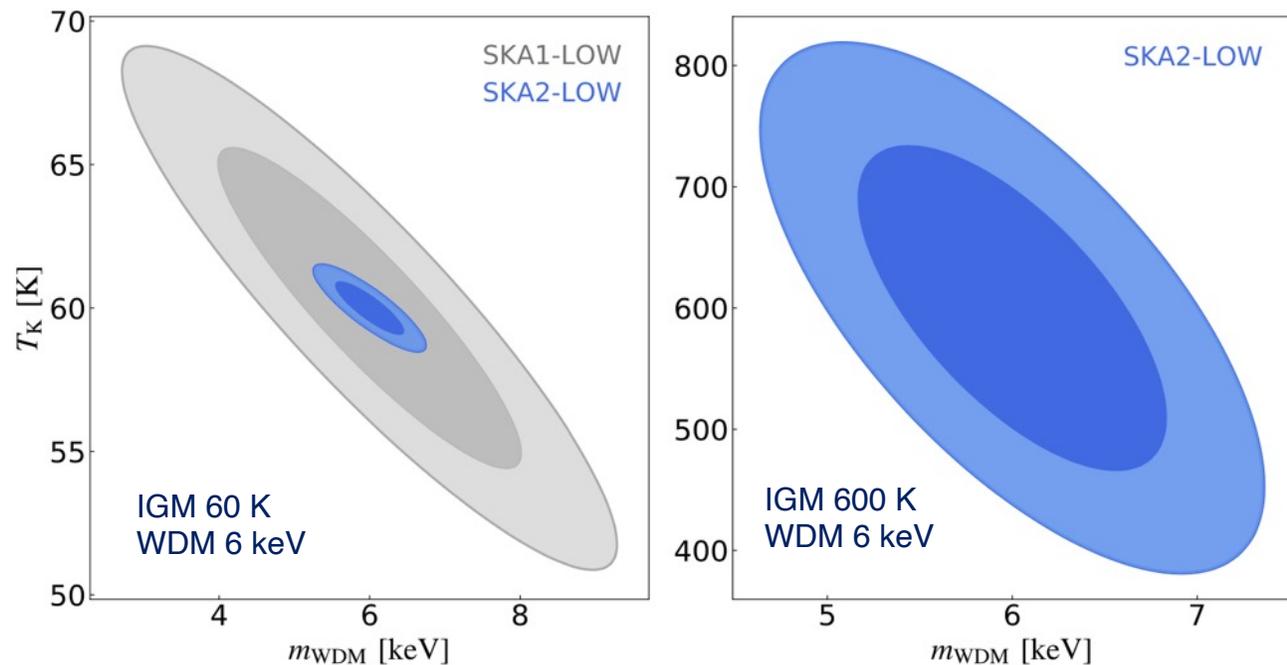
SKA灵敏度  
100小时积分时间

ShaoY, XuYD, et al. 2023  
**Nature Astronomy** (accepted in principle)

- 暗物质与宇宙加热同时影响21厘米森林信号
- 温暗物质：信号数密度减少
- 宇宙加热：信号幅度降低

- 提出解决方案：测量一维交叉功率谱，抑制噪声，提升探测灵敏度
- 一维功率谱的幅度和形状（倾斜）：对二者进行区分
- 低加热：SKA1有能力探测至较小尺度
- 高加热：SKA2仍可实现探测（多个背景源可用的情况下）

# 21厘米森林一维功率谱：同时测量温暗物质质量与宇宙加热历史



徐怡冬 副研究员  
国家天文台



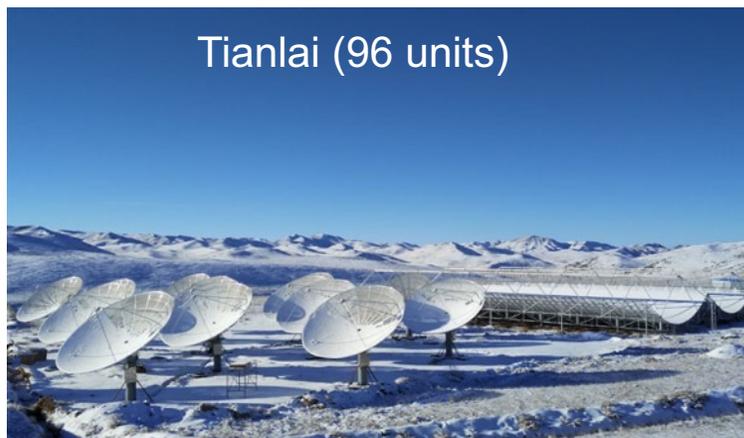
邵悦 博士生  
东北大学

ShaoY, XuYD, et al. 2023  
**Nature Astronomy** (accepted in principle)

- 低温IGM情况：SKA1可测量（质量20%，温度6%）；SKA2精确测量（质量5%，温度1%）
- 高温IGM情况：SKA2可测量（质量10%，温度15%）
- 未来可观测到多少高红移射电背景点源？

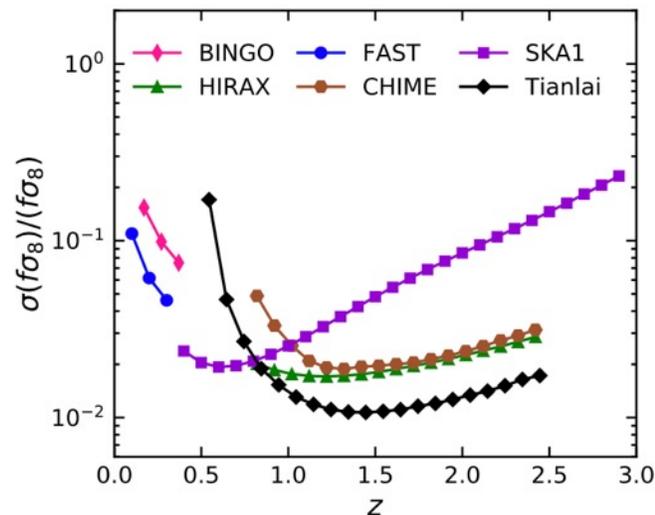
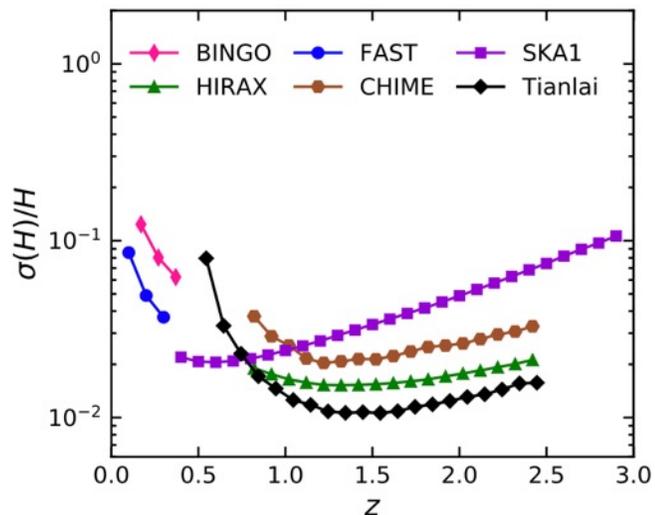
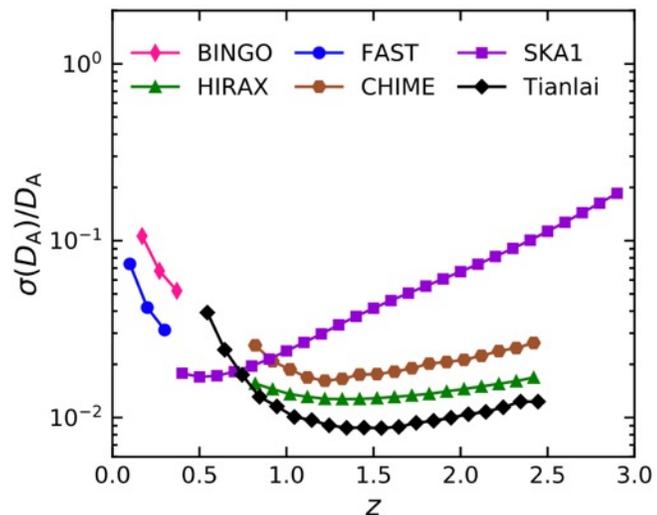
高红移暗物质探针：其他观测手段无法触及的尺度和红移段

# 中性氢强度映射巡天实验：暗能量射电探测



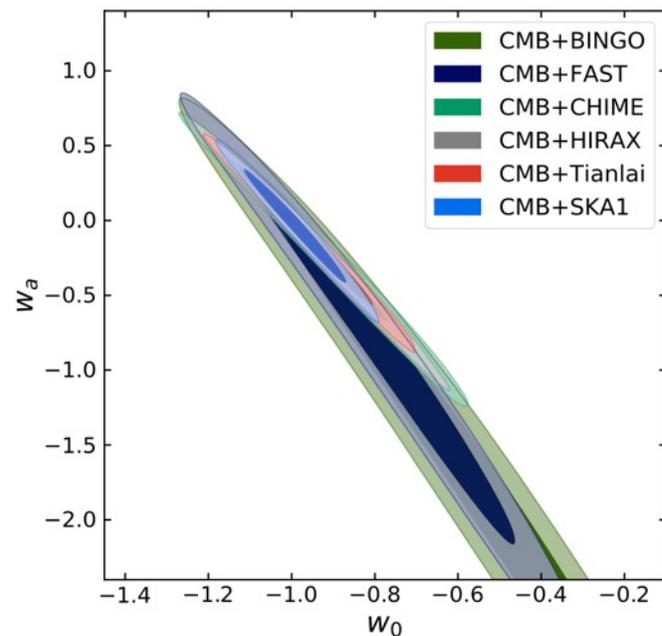
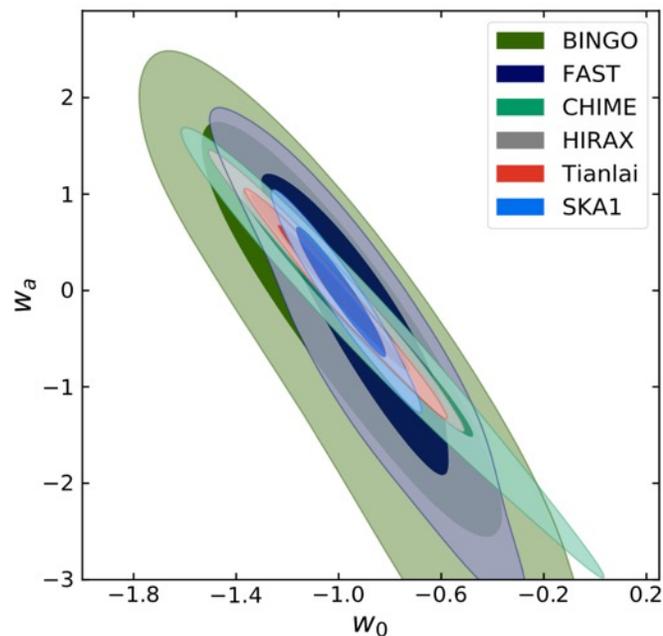
- 已运行或在建，强度映射实验均刚起步
- 在暗能量测量方面能力如何？

# 中性氢巡天实验的比较



- 单碟模式： BINGO, FAST, SKA1-Mid
- 干涉阵模式： HIRAX, CHIME, Tianlai
- BAO和RSD测量预测
- FAST探测低红移
- SKA1在红移范围0.35-0.77有优势
- HIRAX ( 天籁-全、 CHIME ) 在0.77-2.55有明显优势
- 各实验之间的互补性

	BINGO	FAST	SKA1	HIRAX	CHIME	Tianlai
$z_{\min}$	0.13	0	0.35	0.77	0.77	0.49
$z_{\max}$	0.45	0.35	3	2.55	2.55	2.55
$N_d$	1	1	197	1024	N/A	N/A
$N_b$	50	19	1	1	1	1
$D_d$ [m]	40	300	15	6	N/A	N/A
$S_{\text{area}}$ [deg <sup>2</sup> ]	3000	20000	20000	15000	20000	20000
$t_{\text{tot}}$ [h]	10000	10000	10000	10000	10000	10000
$T_{\text{rec}}$ [K]	50	20	Eq. (2.13)	50	50	50

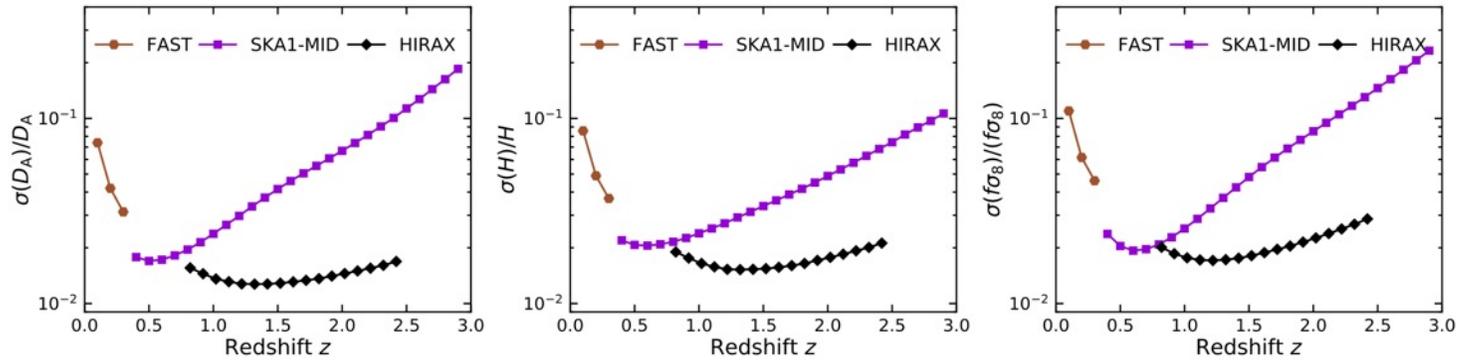


- Tianlai:  $\sigma(w) = 0.024$
- SKA1:  $\sigma(w) = 0.032$
- CMB+Tianlai:  $\sigma(w) = 0.014$
- CMB+SKA1:  $\sigma(w) = 0.013$
- Tianlai:  $\sigma(w_0)=0.16, \sigma(w_a)=0.47$
- SKA1:  $\sigma(w_0)=0.11, \sigma(w_a)=0.42$
- CMB+SKA1:  $\sigma(w_0)=0.08, \sigma(w_a)=0.25$
- CMB+Tianlai:  $\sigma(w_0)=0.11, \sigma(w_a)=0.31$

Wu & XZ, JCAP 2022

- 限制暗能量状态方程
- 21厘米单独：w精度可达2.5-3% ( SKA1-Mid、天籁-全 )
- 联合CMB：w精度约1.5%
- SKA1-Mid在 $0.35 < z < 0.77$ 的优势有利于测量暗能量演化 ( 对 $w_0$ 和 $w_a$ 限制最紧 )
- 联合CMB： $w_0$ 和 $w_a$ ，与CBS相当
- 作为晚期探针，中性氢巡天在暗能量精确测量方面将发挥重要作用

# 中性氢巡天实验的互补性：联合巡天策略

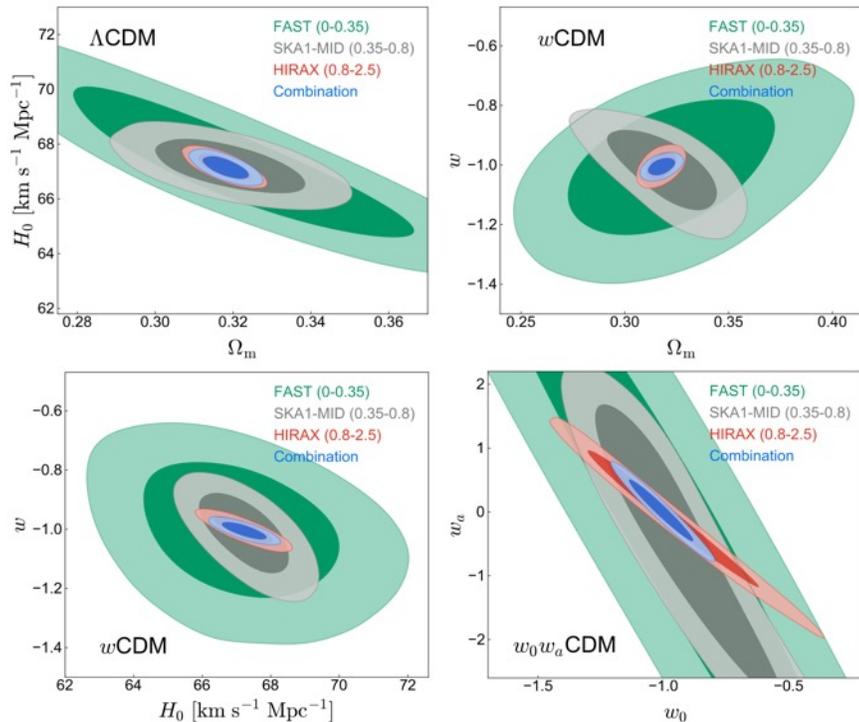


Model	Error	FAST	SKA1-MID (0.35-0.8)	SKA1-MID	HIRAX	FSH	CBS
$\Lambda$ CDM	$\sigma(\Omega_m)$	0.029	0.013	0.0066	0.0044	0.0039	0.006
	$\sigma(H_0)$	1.8	0.65	0.52	0.32	0.27	0.44
$w$ CDM	$\sigma(\Omega_m)$	0.032	0.017	0.0069	0.0049	0.0043	0.0076
	$\sigma(H_0)$	1.9	0.87	0.67	0.58	0.43	0.82
	$\sigma(w)$	0.15	0.089	0.033	0.03	0.019	0.033
$w_0w_a$ CDM	$\sigma(\Omega_m)$	0.035	0.052	0.019	0.029	0.012	0.0078
	$\sigma(H_0)$	2.1	1.7	1.2	2.4	0.84	0.83
	$\sigma(w_0)$	0.29	0.21	0.13	0.22	0.085	0.082
	$\sigma(w_a)$	3.5	1.4	0.57	0.71	0.32	0.32

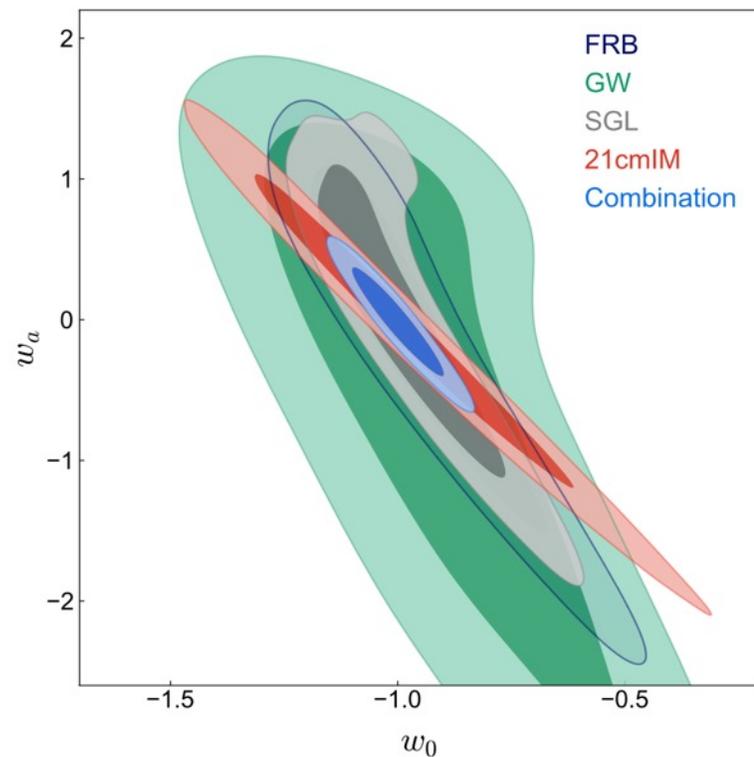
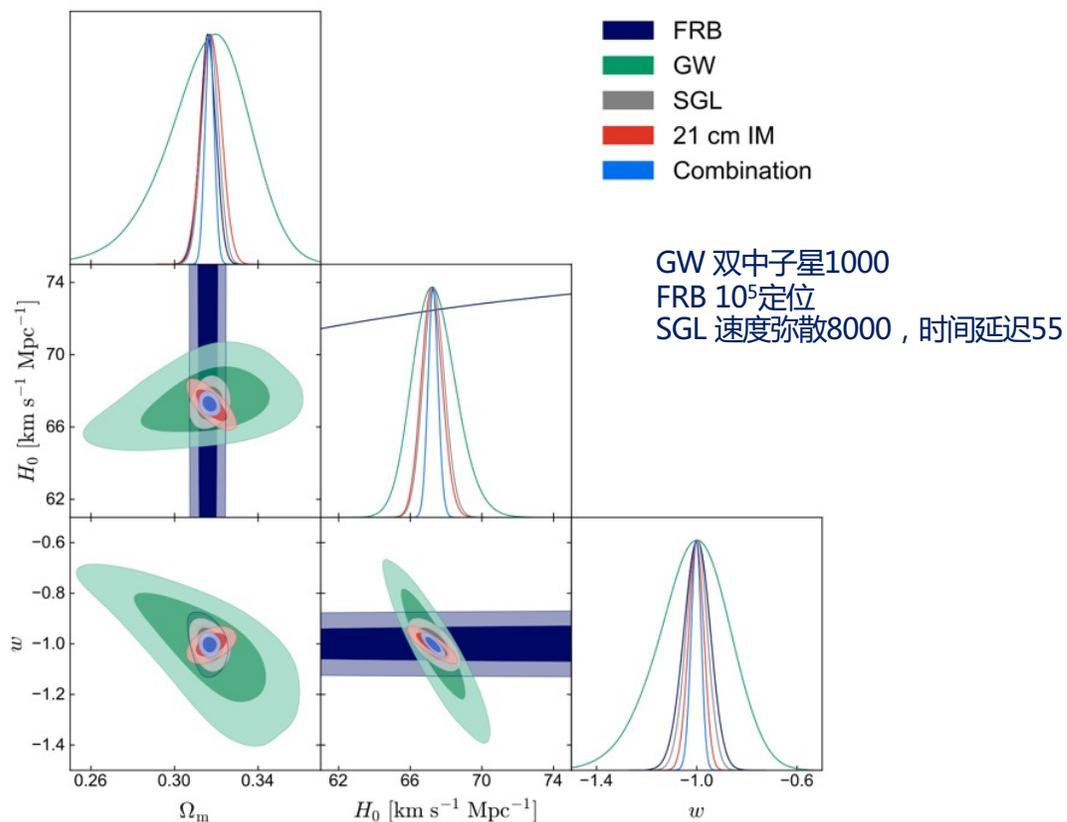
Wu et al. SCPMA 2023

FAST(0 < z < 0.35)+SKA1-MID(0.35 < z < 0.8)+HIRAX(0.8 < z < 2.5)

- 能力互补，可各自发挥所长，节约巡天时间
- 对w的限制好于CBS ( 0.019 vs 0.033)
- 对w<sub>0</sub>和w<sub>a</sub>的限制与CBS相当
- 联合巡天策略：（当代）21厘米单独即可成为强大的宇宙学工具
- 21厘米与其他观测联合：有望实现晚期宇宙精确探针



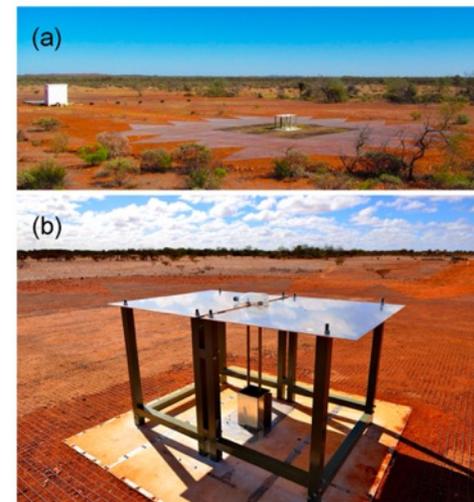
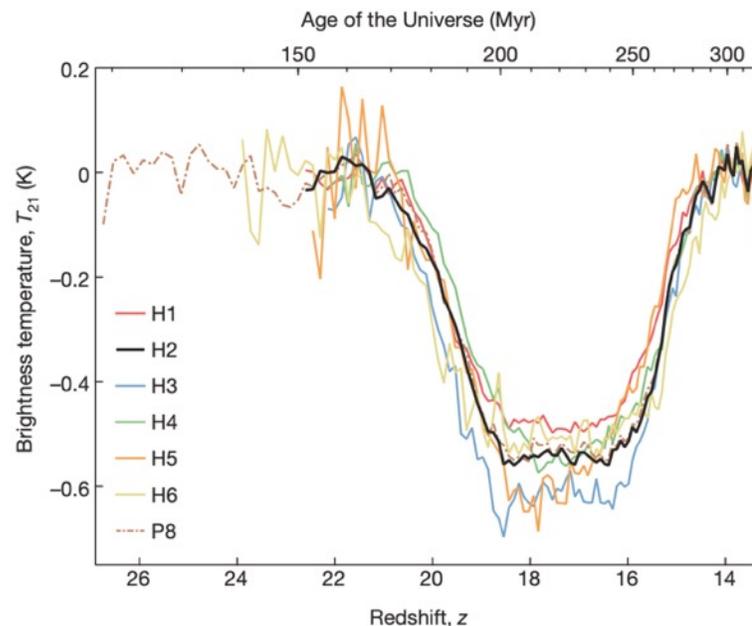
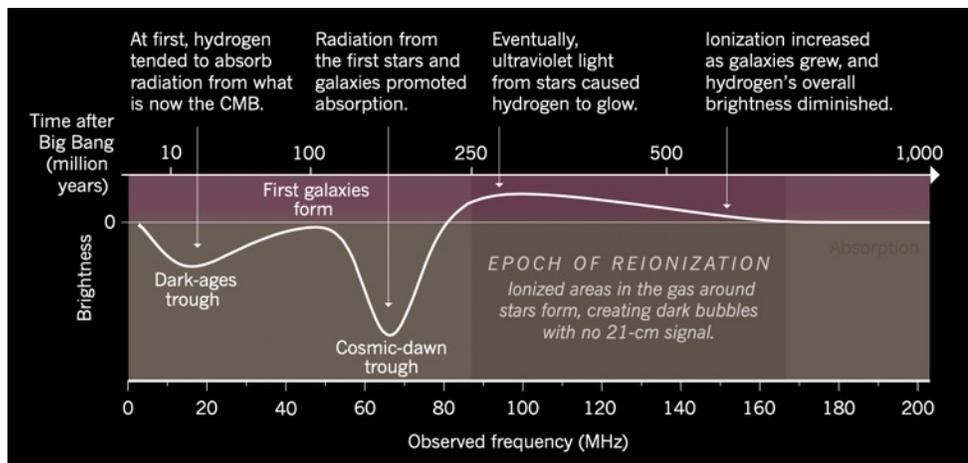
# 综合打造探索晚期宇宙精确探针



Wu et al. JCAP 2023

- 独立于CMB，仅用晚期宇宙观测，实现宇宙学参数精确测量
- 测量 $H_0$ 达0.2%，测量暗能量 $w$ 达2%（ $w_0$ 精度6.6%， $w_a$ 误差0.25），优于CBS
- 21厘米观测在联合限制中发挥主导性作用

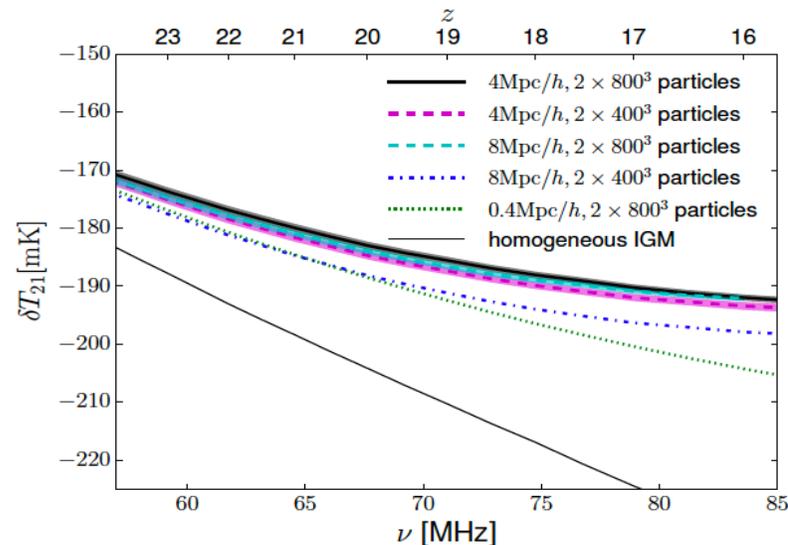
# 21厘米宇宙学信号的探测：低频探测



Bowman et al. Nature 2018

- 2018年，EDGES实验宣称探测到宇宙黎明信号
- 吸收深度远超预期，引起很多理论解释以及质疑
- 2022年，SARAS实验：否定EDGES实验的结果

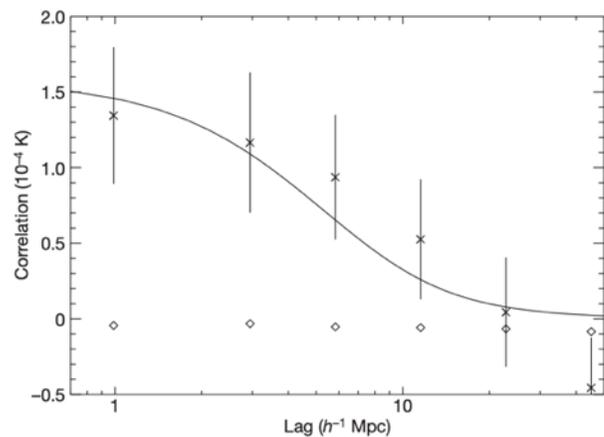
Singh et al. NA 2022



吸收深度甚至应该更浅一些：  
不均匀气体分布、激波加热导致标准宇宙学模型下的最大信号在红移17减弱15%

Xu et al. ApJ 2021

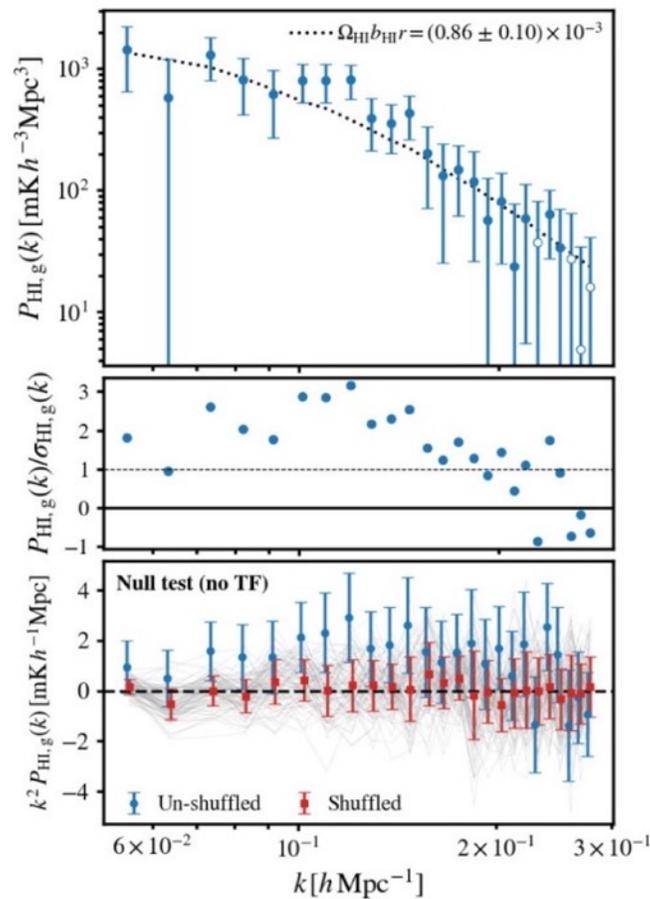
# 中性氢强度映射的实际观测



Chang et al. Nature 2010



绿岸 GBT



Cunnington, LiYC, et al. MNRAS 2023



MeerKAT

李毅超 副教授  
东北大学

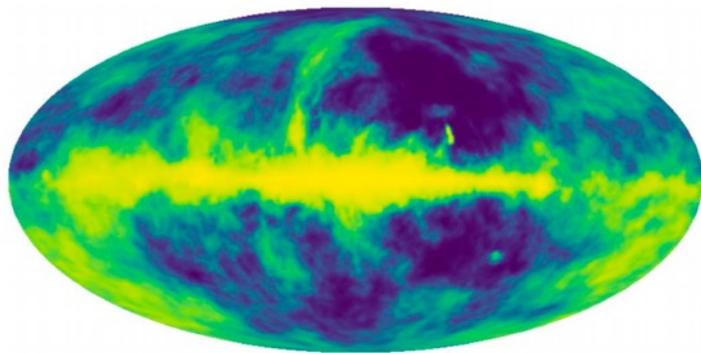
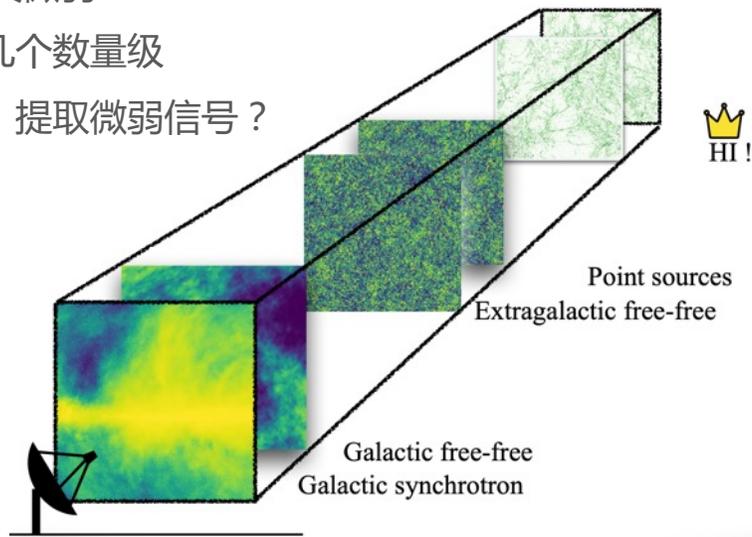
- 21厘米强度映射自相关信号（宇宙学）尚未被探测到
- 已有一些实验探测到了中性氢和光学巡天的互相关功率谱
- 最强探测（李毅超主导的工作）：MeerKAT（10.5小时）与星系（WiggleZ）互相关，7.7倍标准偏差统计显著性
- 自相关功率谱探测，任重道远，仍需持续努力

# 前景污染

21厘米信号极其微弱

前景明亮，强几个数量级

如何移除前景，提取微弱信号？

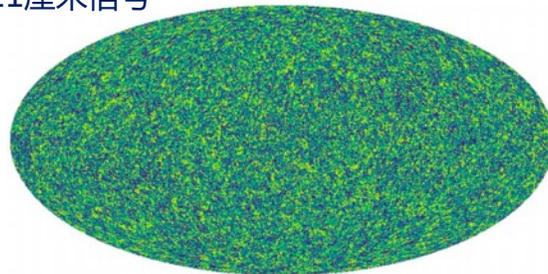


1000MHz天图

卷积了标准高斯波束

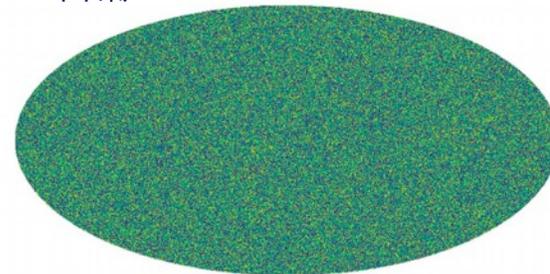


21厘米信号



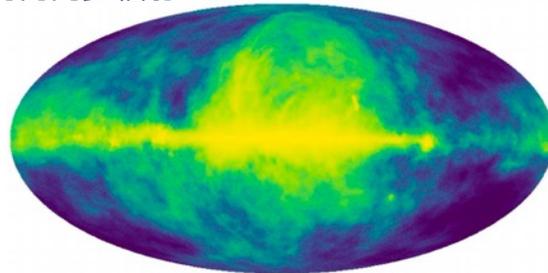
(a)

白噪声



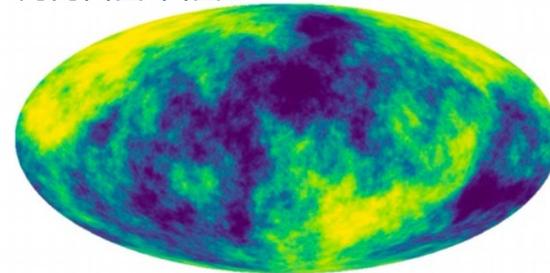
(b)

河内同步辐射



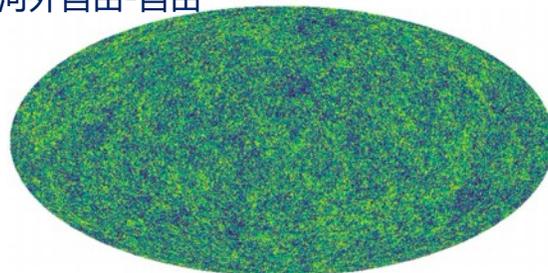
(c)

河内自由-自由



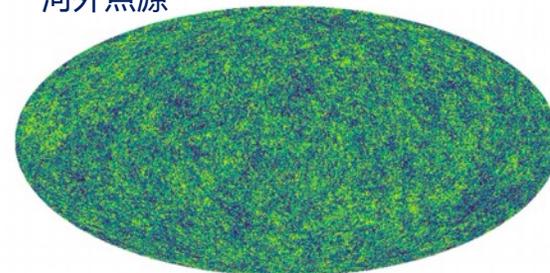
(d)

河外自由-自由



(e)

河外点源

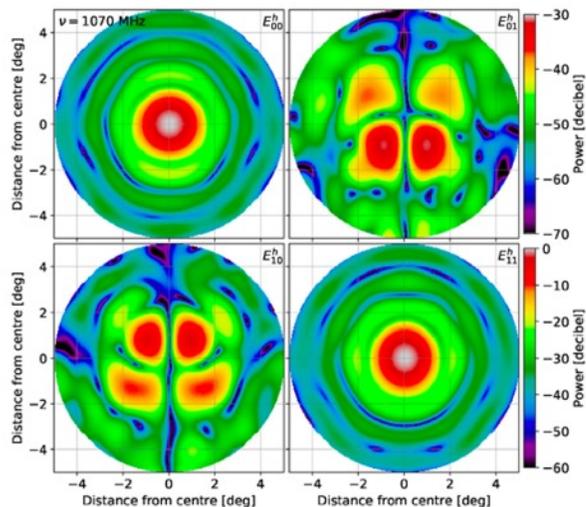


(f)

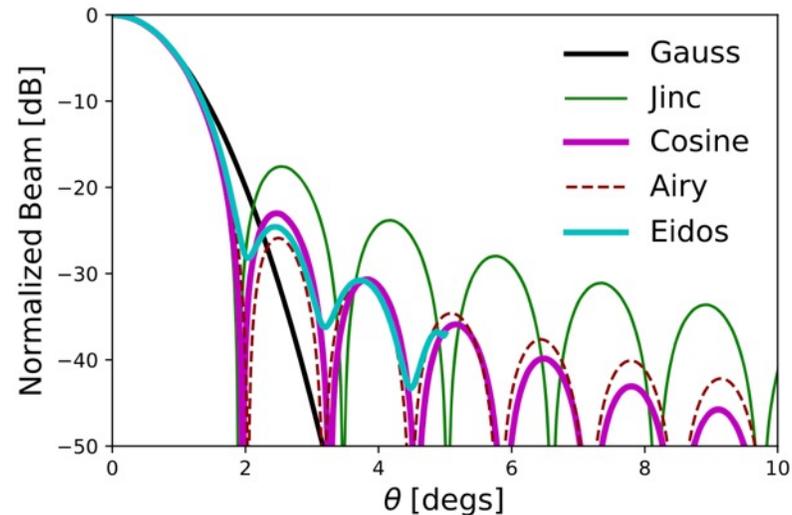
# 前景减除：当遇上系统效应



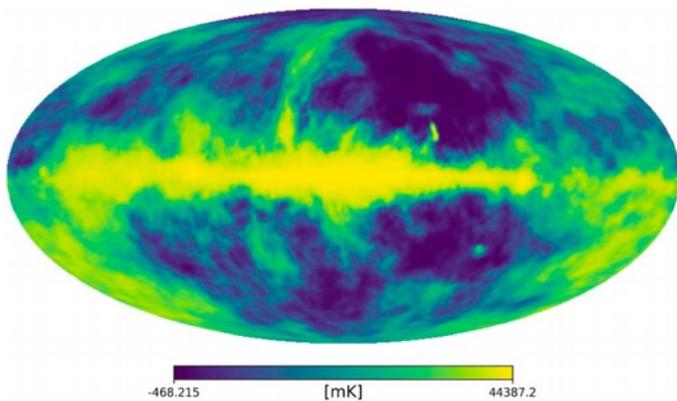
MeerKAT



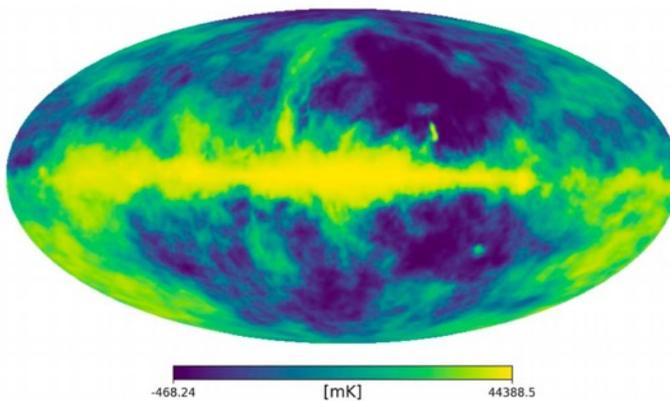
Asad et al. MNRAS 2021



Matshawule et al. MNRAS 2021



卷积标准高斯波束天图

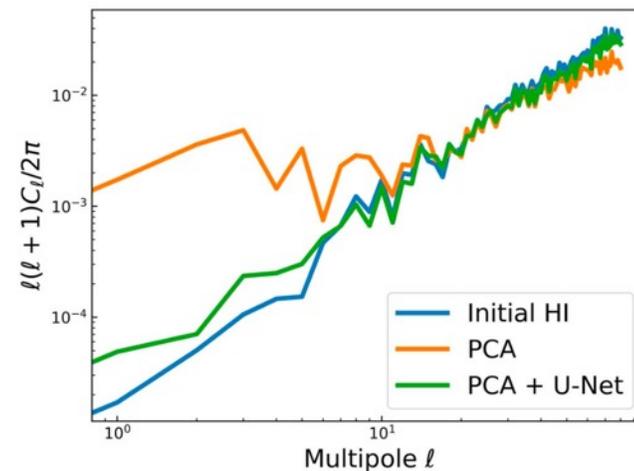
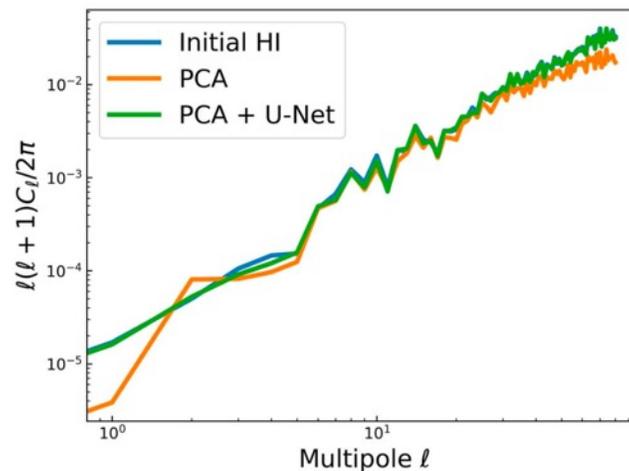
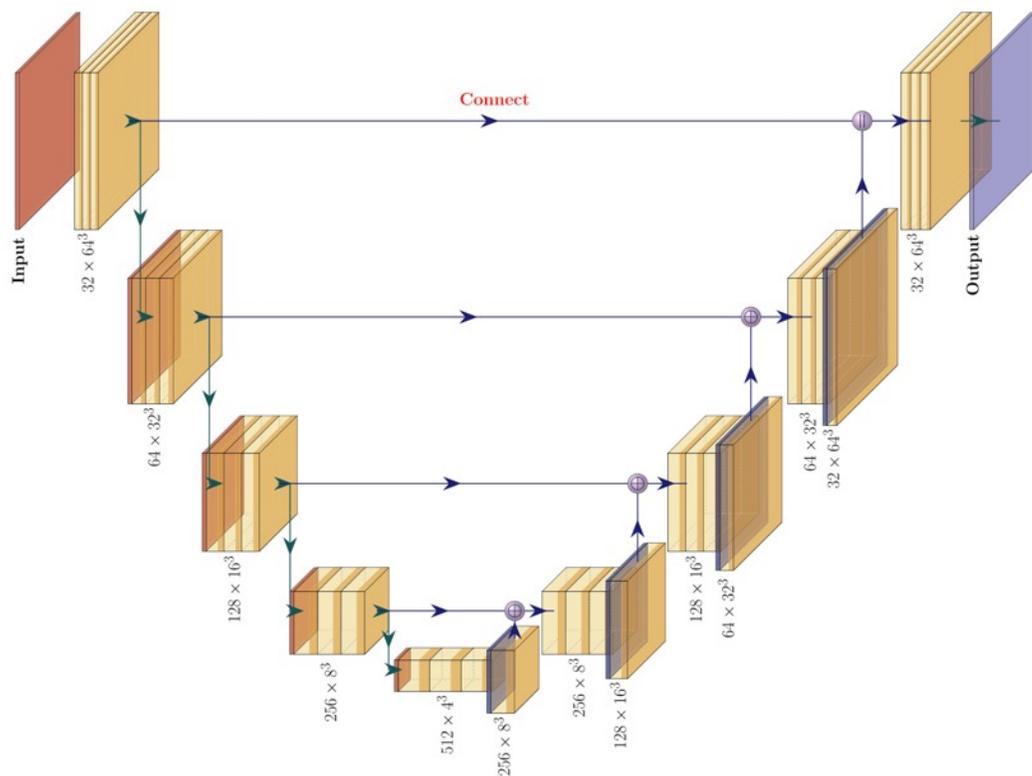


卷积真实波束天图

- 前景平滑：可用PCA等方法有效移除
- 但实际观测极为复杂：系统效应
- 波束旁瓣，极化泄漏，驻波，1/f噪声.....
- 前景叠加系统效应：PCA等方法失效

$$B_C(\nu, \theta) = \left[ \frac{\cos(1.189\theta\pi/\Delta\theta)}{1 - 4(1.189\theta/\Delta\theta)^2} \right]^2$$

# 深度学习：有效消除系统效应



Ni, LiYC et al. ApJ 2022

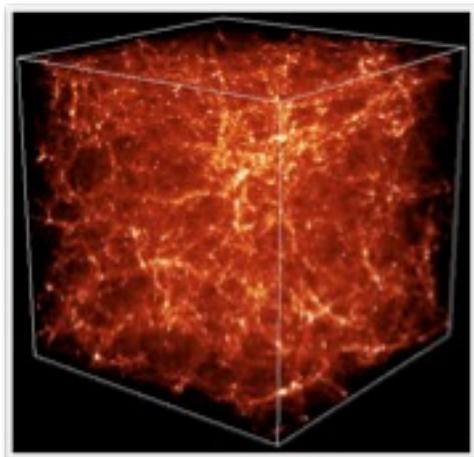
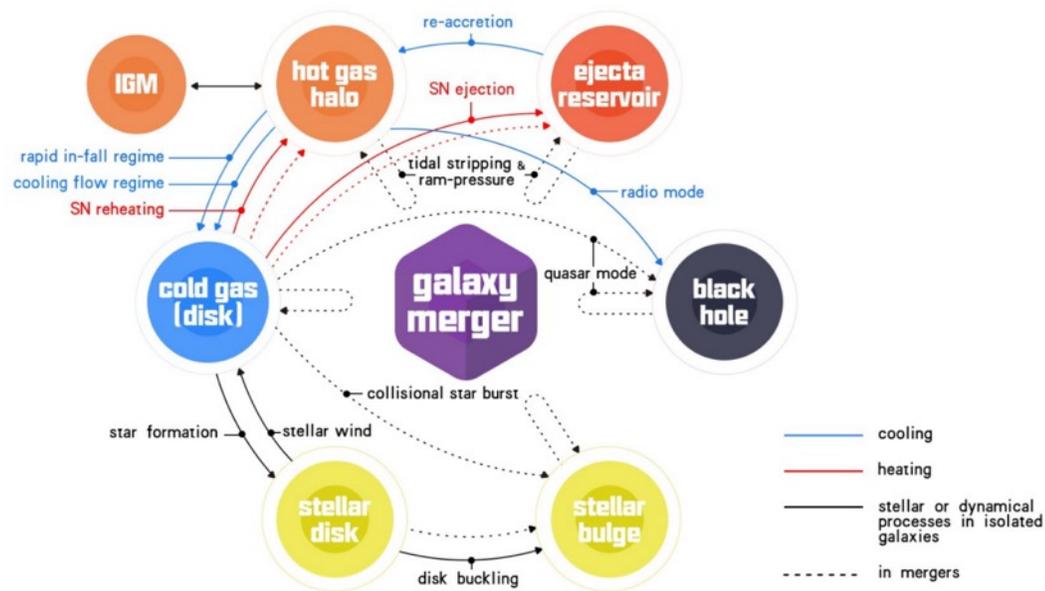
- 主波束效应：理想高斯波束模型 vs 贴近实际cosine波束模型
- PCA在理想情况有效，在实际情况中失效
- PCA+3D U-Net方法：有效消除主波束系统效应，恢复初始信号
- 一致性测试：在理想情况好27%，在实际情况好145%

只有魔法才能打败魔法



# 中性氢巡天：宇宙学模拟

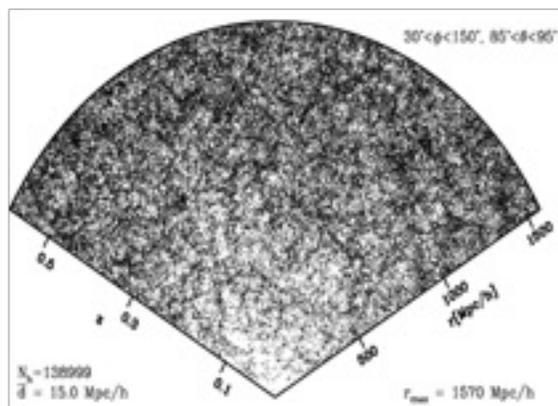
- 宇宙学参数估计：Fisher矩阵方法过于理想
- 前景残余和系统效应对宇宙学参数测量的影响？
- 仿真模拟不充分：缺乏适用于中性氢宇宙学研究的大尺度、高精度模拟样本
- 下一步目标：从超大规模模拟到宇宙学参数测量
- 实现端到端宇宙学模拟，为真正数据处理和宇宙学研究做好准备



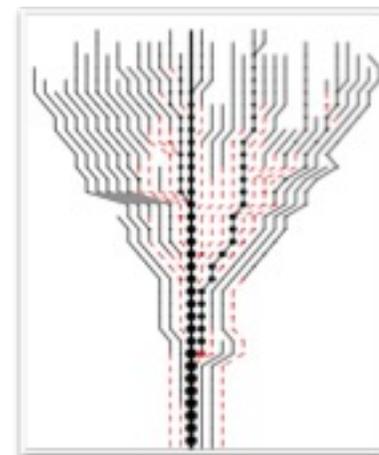
时间切片



暗物质晕表



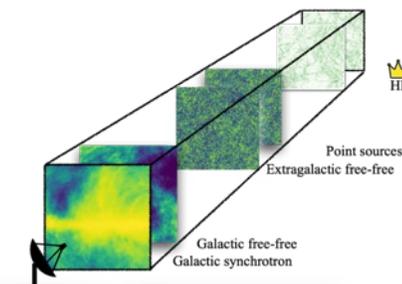
光锥



并合树

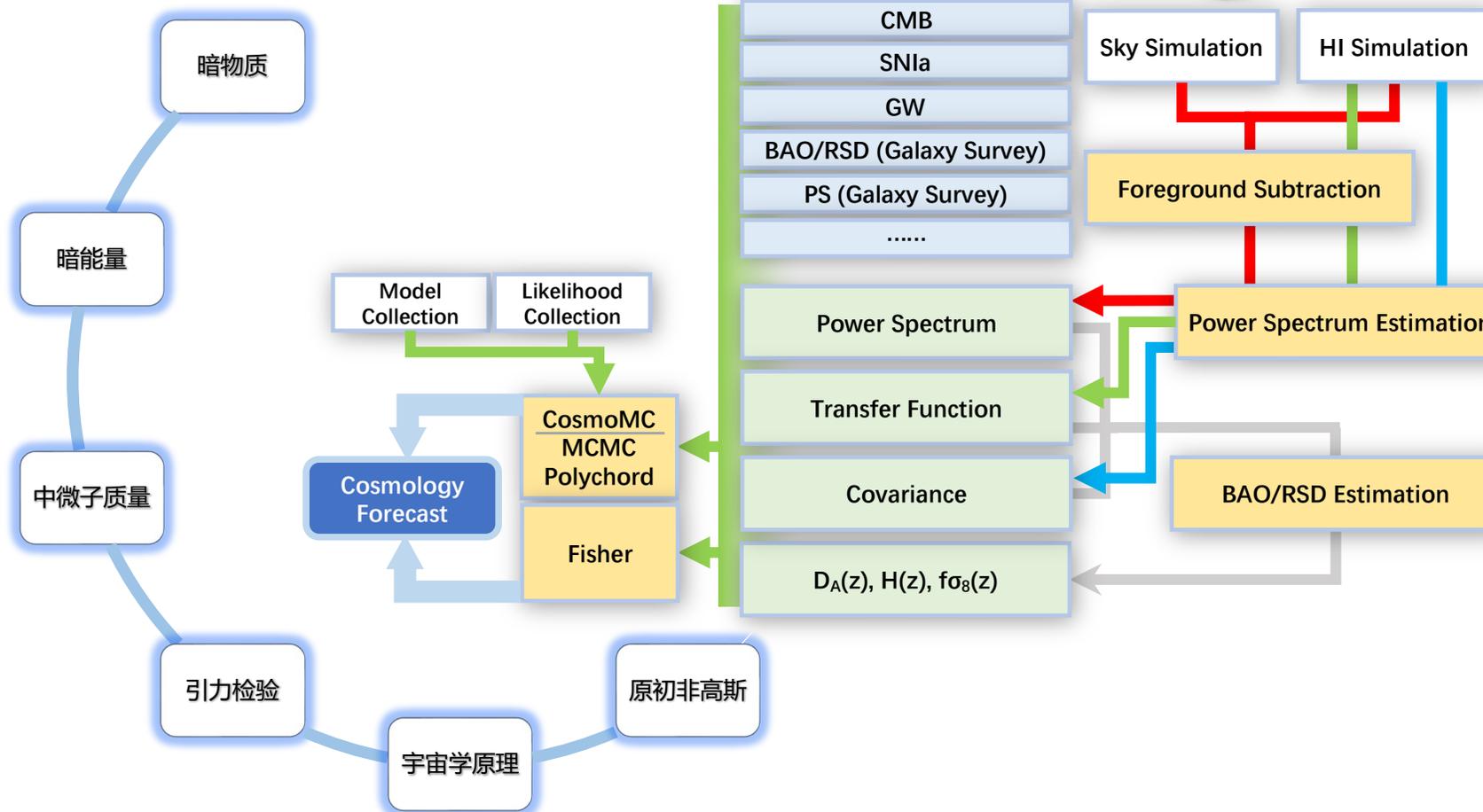
# 端到端宇宙学模拟

- 中性氢大尺度结构模拟：宇宙大尺度结构N体模拟，超大规模中性氢样本
- 观测仿真：逼近实际观测的中性氢巡天仿真数据
- 科学解释：宇宙学检验，晚期宇宙探针综合研究



## 晚期宇宙精确探针

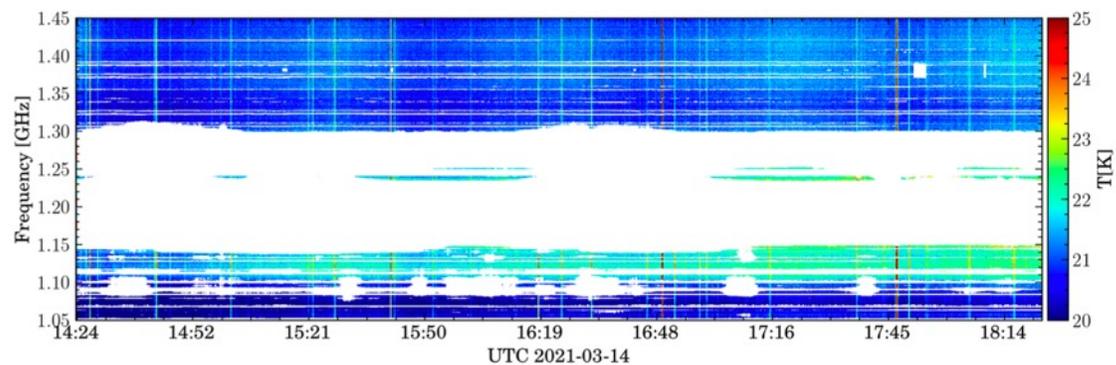
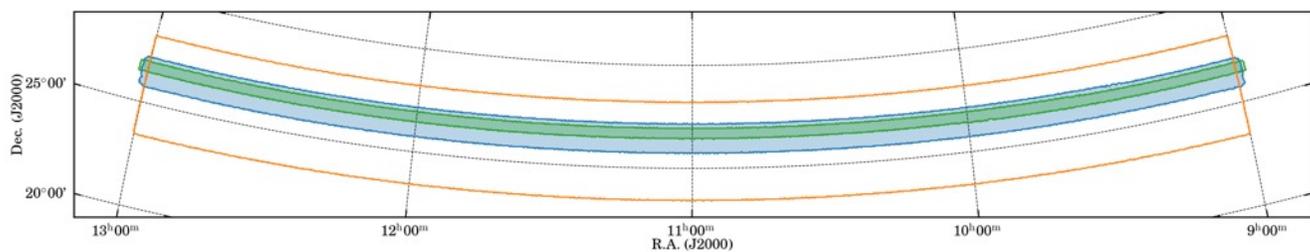
- 标准烛光与标准尺
- 弱引力透镜
- 星系团
- 引力波标准汽笛
- 快速射电暴
- 强引力透镜



# 中国天眼：中性氢强度映射巡天

主要科学目标：  
脉冲星（快速射电暴）  
中性氢

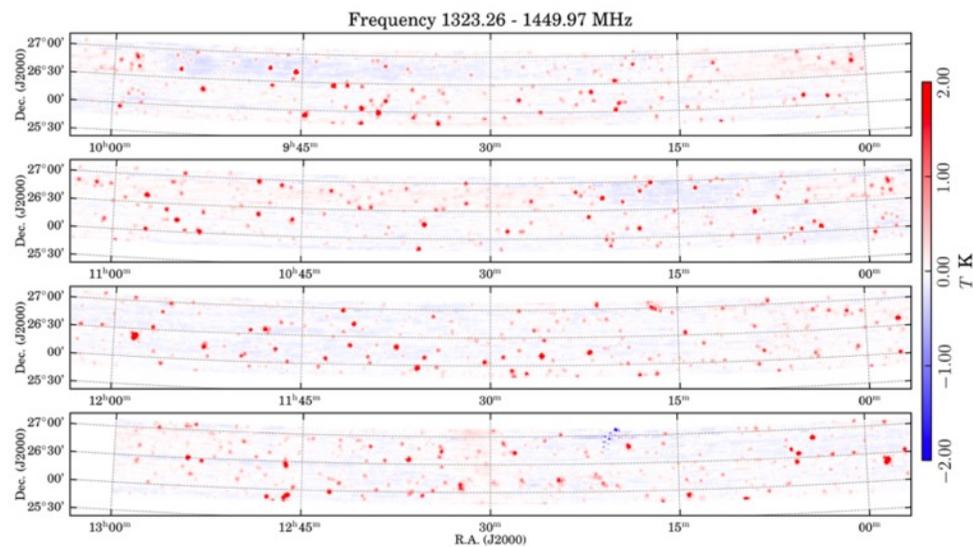
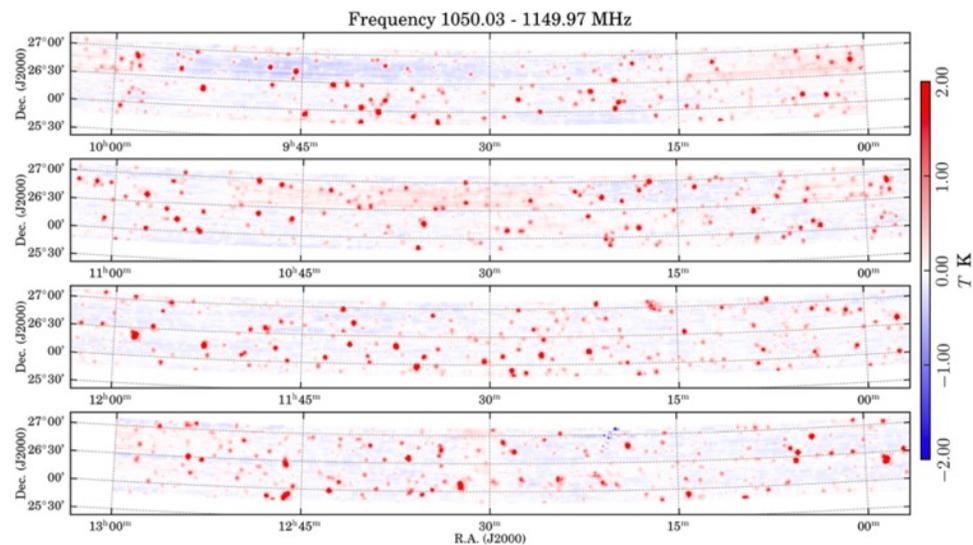
世界上最大、最灵敏单口径射电望远镜  
2020年通过国家验收  
2021年向全世界开放



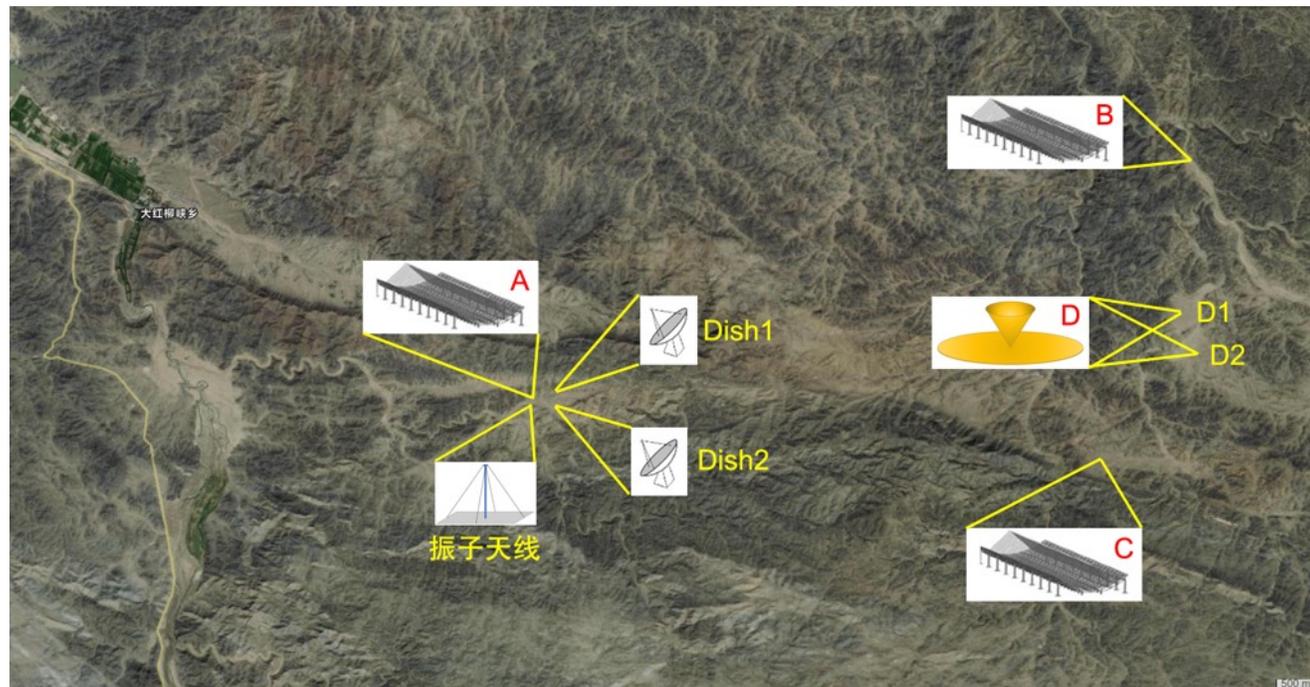
LiY et al. in prep.

FAST 100小时巡天，有望实现国际首次中性氢强度映射自相关功率谱探测  
(或红移空间畸变效应探测)

- FAST漂移扫描巡天：计划巡天200平方度，已完成120平方度
- 2019-2021，2021年7个夜晚28小时观测（已完成60平方度观测数据处理）
- 人工射频干扰：1150-1320MHz频段无法使用
- 两段强度图：1050-1150MHz，1320-1450MHz
- 已完成定标校准

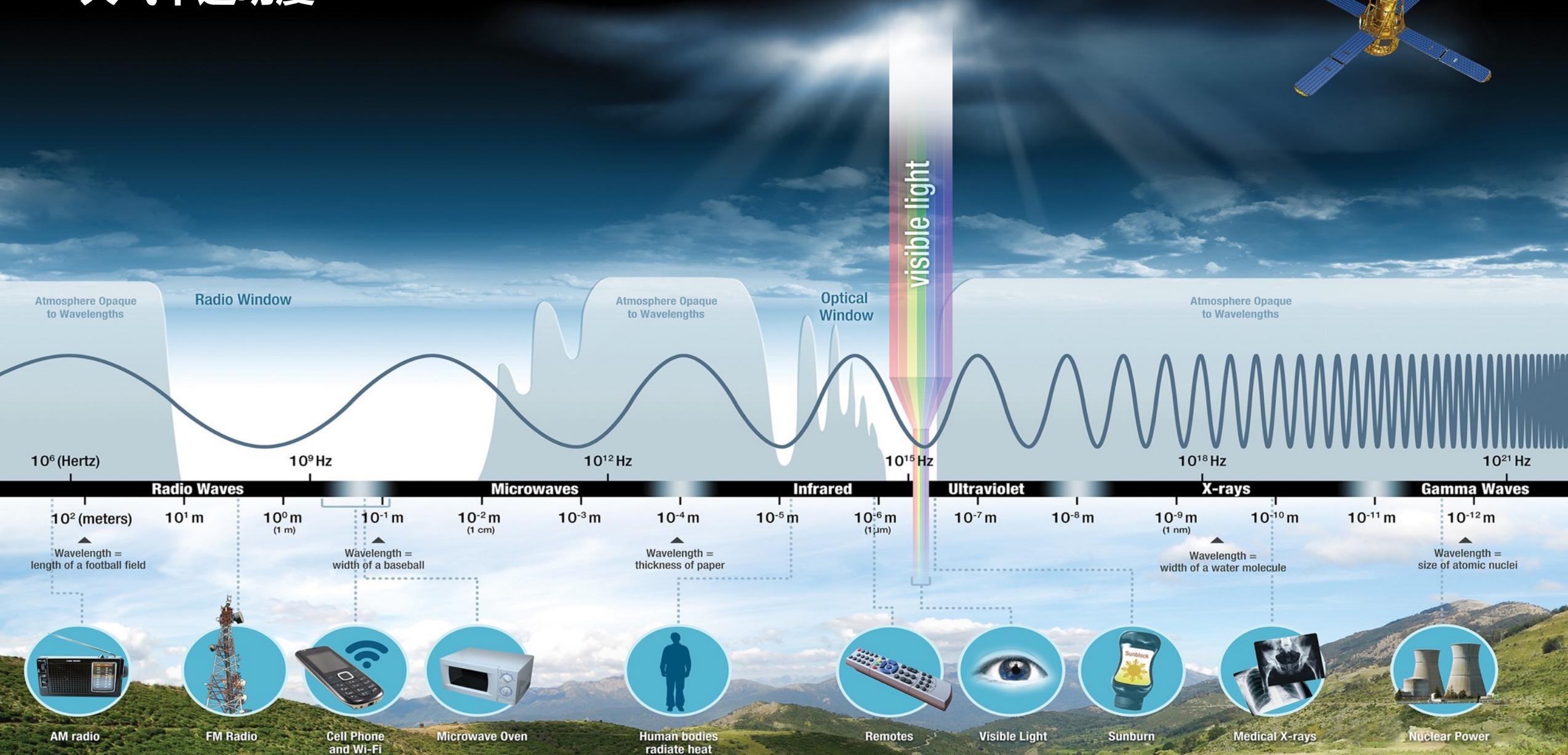


# 天籁计划二期工程

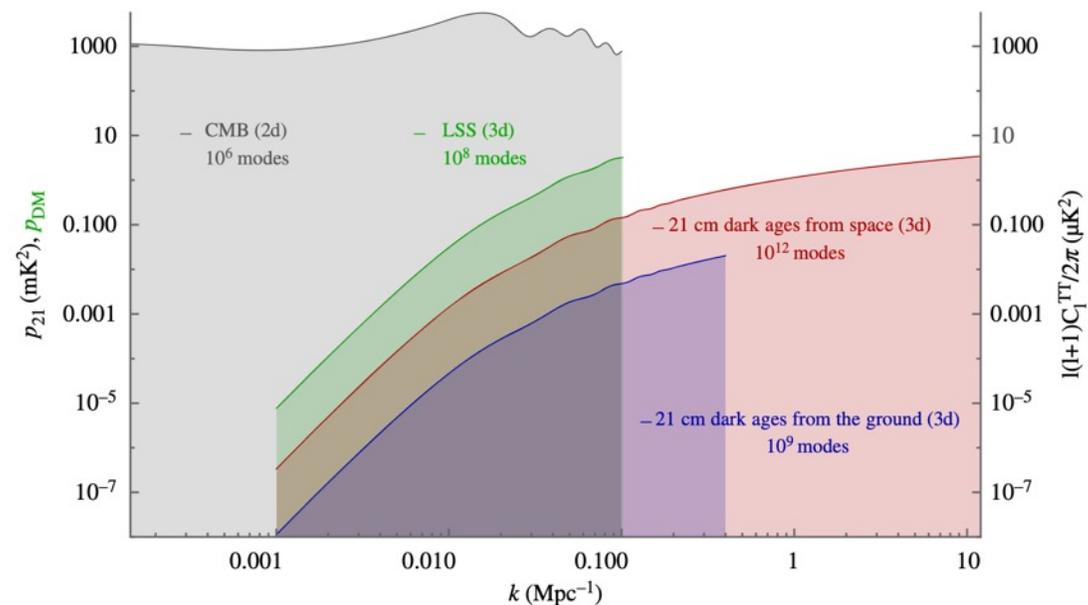
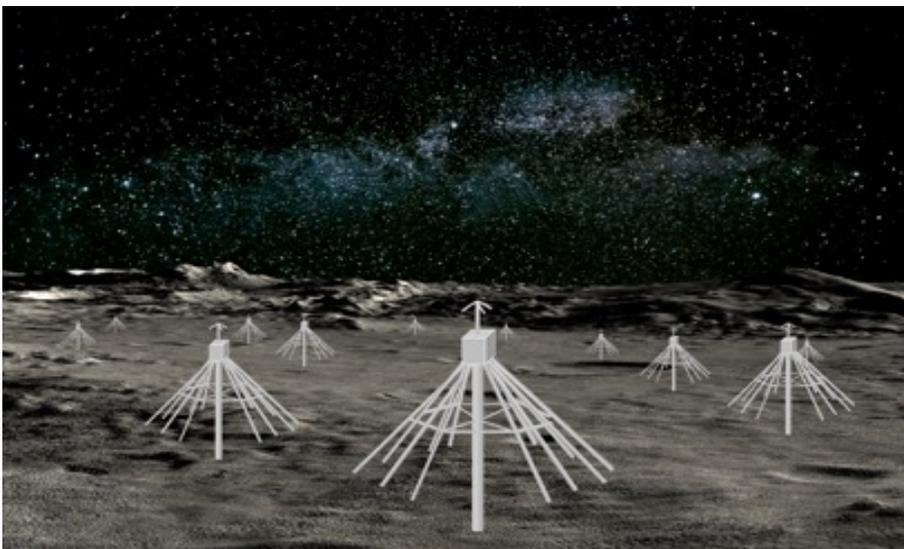


- 天籁计划一期工程（新疆巴里坤县红柳峡乡）：3个柱面天线（15米宽，40米长，96个双极化接收单元），16个碟形天线（6米）
- 天籁计划二期工程（4个天线阵列）：东北大学，国家天文台，科技部
- 一期+二期：短基线、长基线联合
- 中性氢巡天：暗能量射电探测
- 快速射电暴探测：搜寻，强定位能力

# 大气不透明度



# 宇宙学的极限：月球背面的低频射电阵列

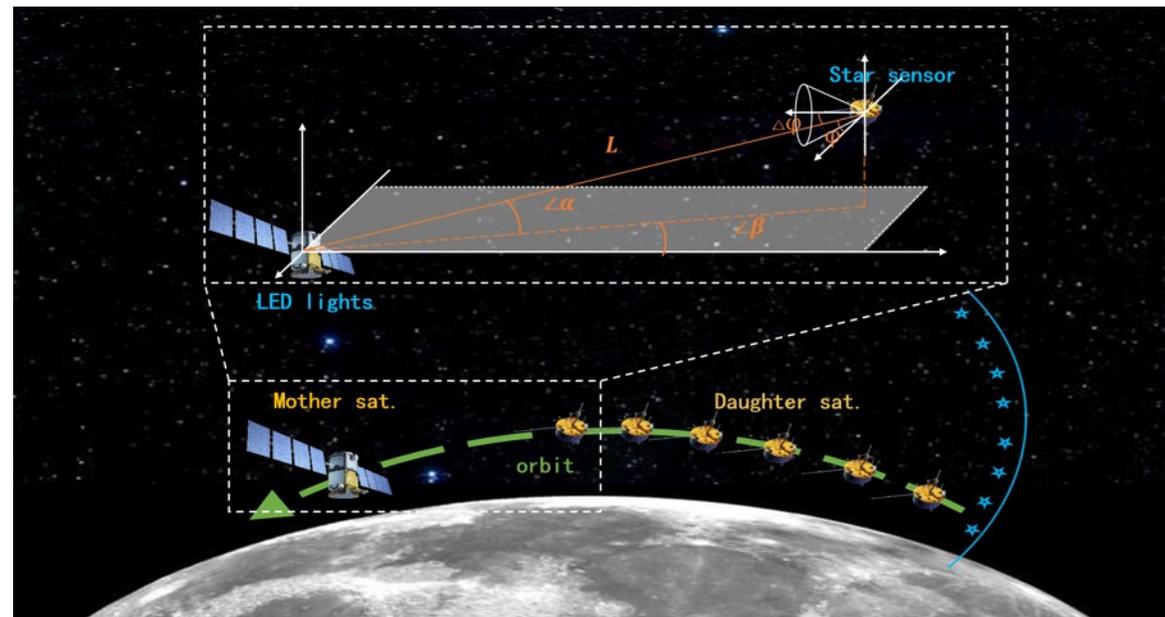
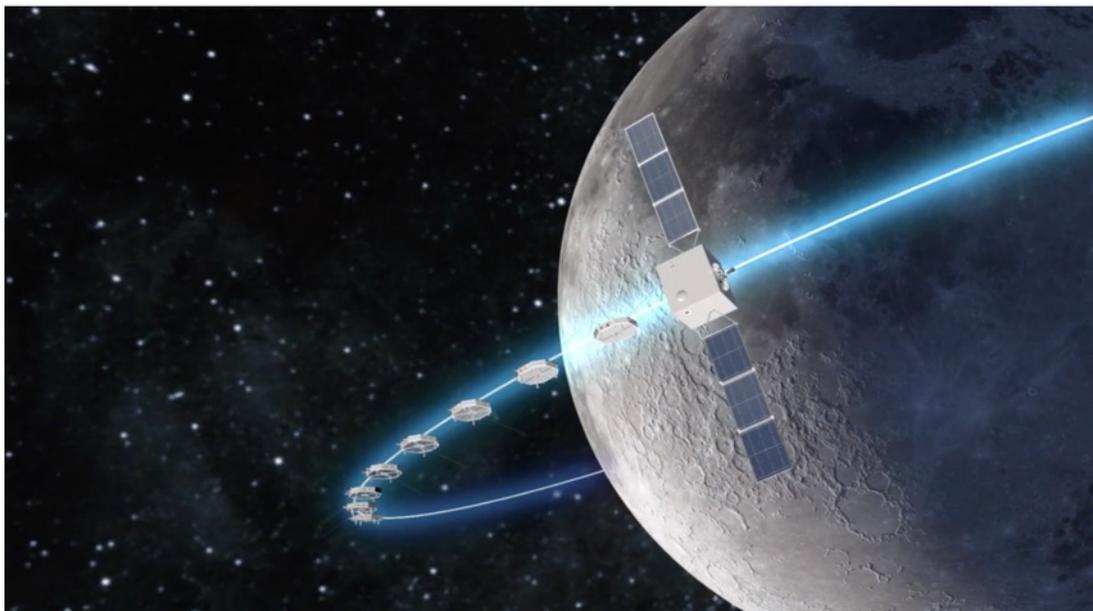


Silk, Philosophical Transactions A 2020

- 月球背面：屏蔽地球电离层干扰，探测宇宙超长波
- 探测黑暗时代： $z = 25-75$  (20–60 MHz)
- 观测万亿模式数（小至0.1Mpc尺度）

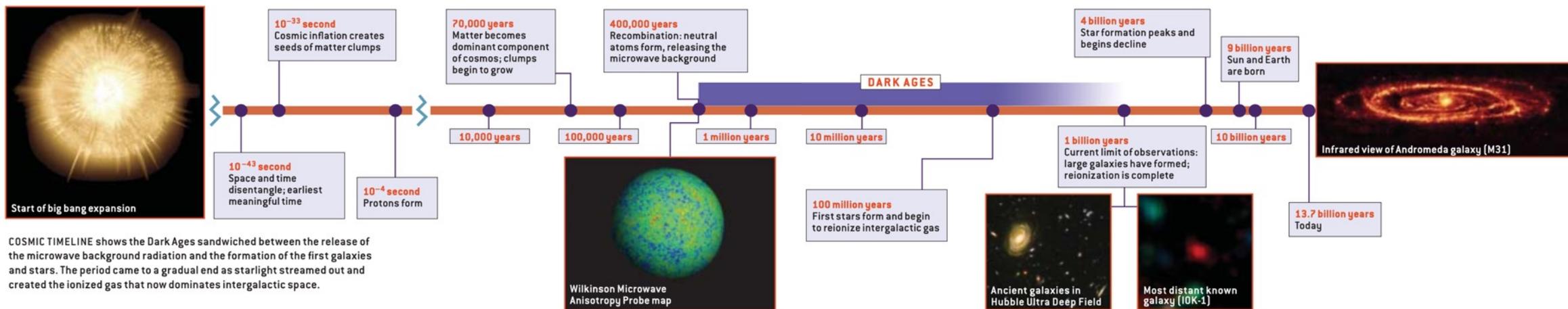
$l = 14\,000$  k/Mpc  
LSS:  $z=1$ ; 21 cm ground:  $z=27$ ; 21 cm space:  $z=50$

# 鸿蒙计划



- 超长波射电观测是目前已知的唯一直接观测宇宙黑暗时代的手段
- 电磁频谱中最后一个空白
- 超长波天文观测阵列DSL：10颗小卫星，线性编队，绕月飞行
- 1 MHz—30 MHz：高分辨率天空图像
- 30 MHz—120 MHz：高精度全天频谱（宇宙黎明）
- 期待首个超长波天图、黑暗时代晚期和宇宙黎明测量结果：科学意义重大

# 总结



- 21厘米将成为探索宇宙的强大工具：探测宇宙整个演化历史（前再电离，后再电离），断层扫描
- 探测宇宙最初十亿年（黑暗时代，宇宙黎明时期，宇宙再电离时期），揭示宇宙天体和结构起源
- 探测宇宙大尺度结构
- 基础物理：探索暗物质和暗能量本质
- 早期宇宙（再电离时期）：21厘米森林，同时测量温暗物质质量和宇宙加热历史
- 晚期宇宙：强度映射，暗能量射电探测
- 最大挑战：前景减除，系统效应，深度学习将发挥重要作用
- 尚未探测到中性氢大尺度结构自相关信号，FAST巡天有望取得首个突破性进展
- 未来：21厘米强度映射将在综合打造晚期宇宙精确探针方面发挥重要作用

# 21世纪：基础物理与天文学结合



- 20世纪理论物理学的主旋律：量子化、对称性、相位因子
- 21世纪：物理学被各种应用问题主导，缺乏诗意和哲学品质
- 重大基础性革命：天文物理学领域

杨振宁 《晨曦集》



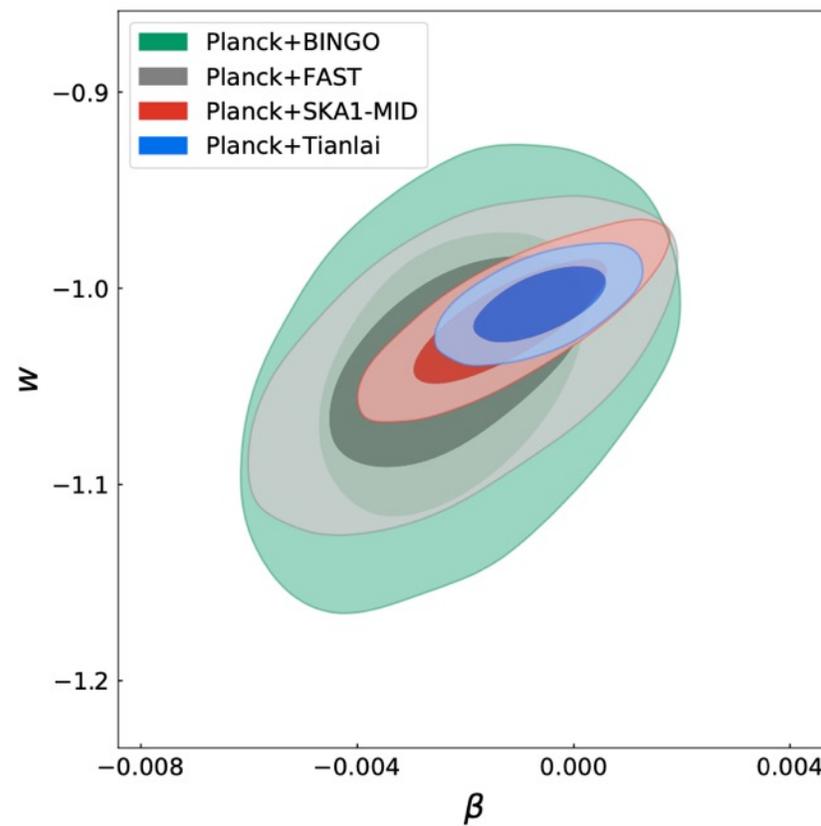
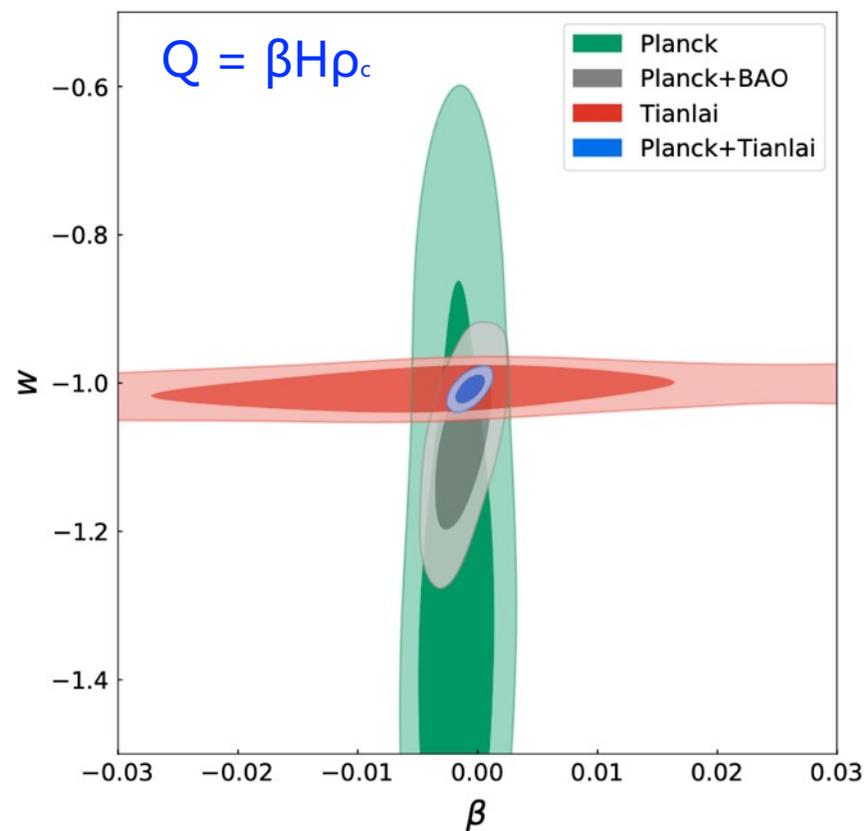
谢谢！

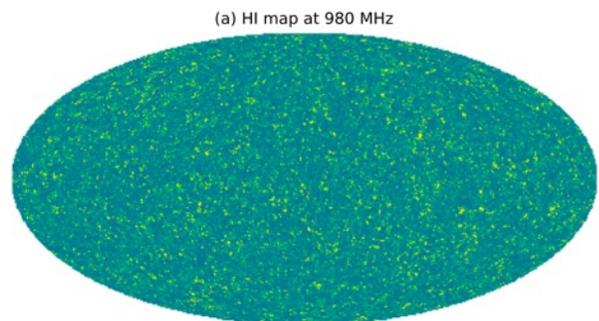


**Backup**

# 测量相互作用暗能量的策略

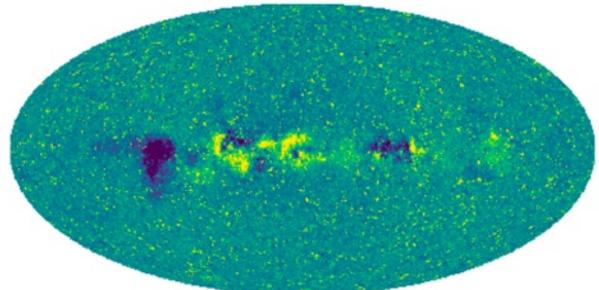
- 中性氢巡天可在晚期宇宙精确测量暗能量EOS，因此可在IDE ( $Q = \beta H \rho_c$ ) 测量方面发挥重要作用
- 与CMB互补性：CMB-alone可精确测量 $\beta$ ，中性氢巡天可精确测量 $w$





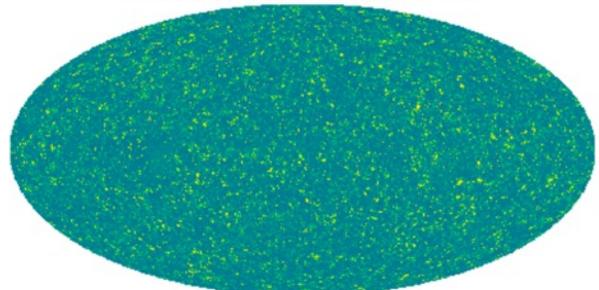
-0.36445 0.603366

(b) sky map with PCA-3 at 980 MHz



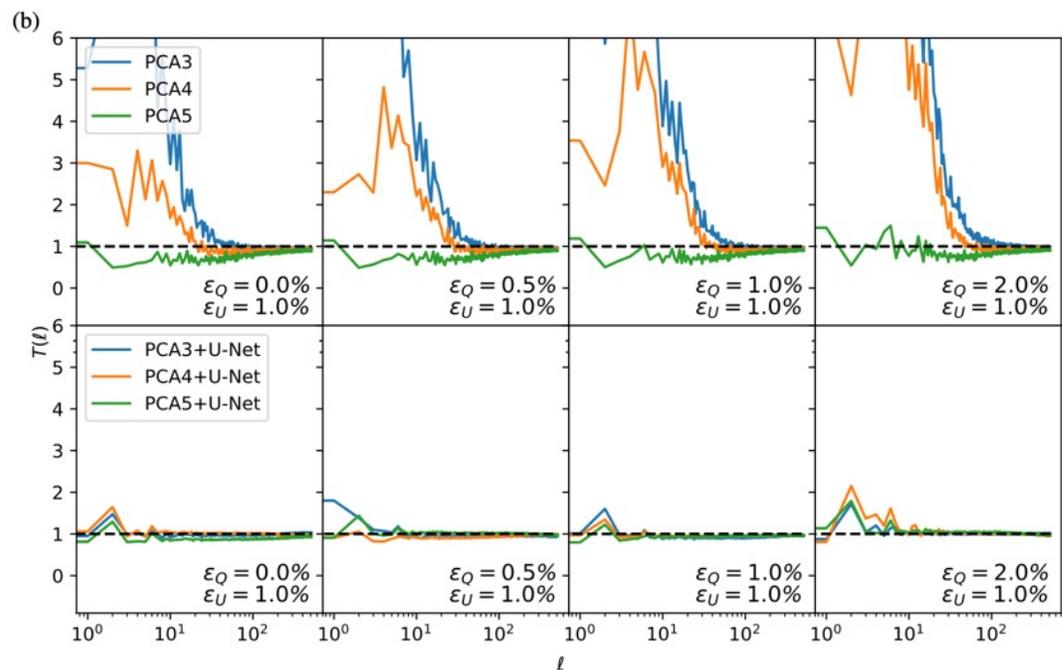
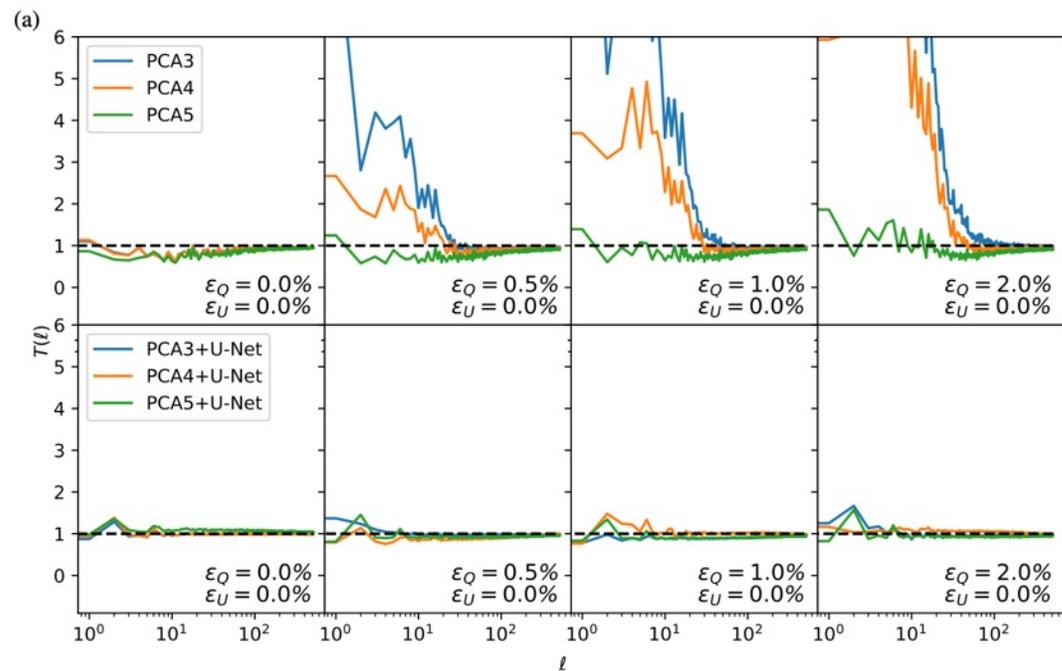
-0.535725 0.509901

(c) sky map with PCA-3 + U-Net at 980 MHz



-0.354426 0.565298

Gao, LiYC et al. 2023

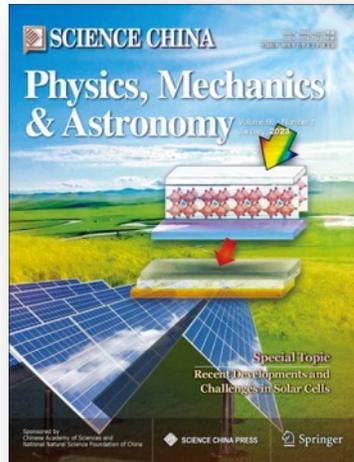


- 极化泄漏的情况
- PCA：不足或过激
- U-Net：进一步移除或者补偿
- 可有效消除极化泄漏

# 中国科学：物理学 力学 天文学 SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy

SCI  
5.203  
IMPACT  
FACTOR | Q1

主编：谢心澄 院士

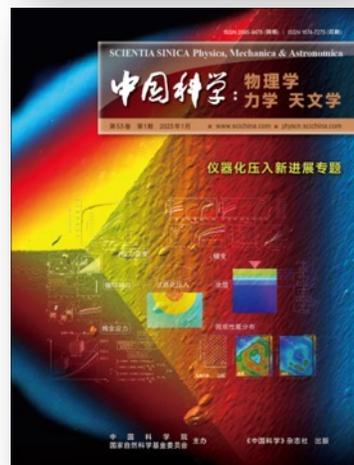


## 英文版：Science China Physics, Mechanics & Astronomy

- **Editor's Focus**栏目：瞄准**PRL**录用水平，快审快发
- JCR **Q1区**，中科院文献情报中心期刊分区表物理大类**1区Top**期刊
- 接受后**实时在线**预出版，优秀成果**限时免费阅读**
- 国内外公众媒体多渠道**新闻宣传**和**精准推送**



Editor's Focus

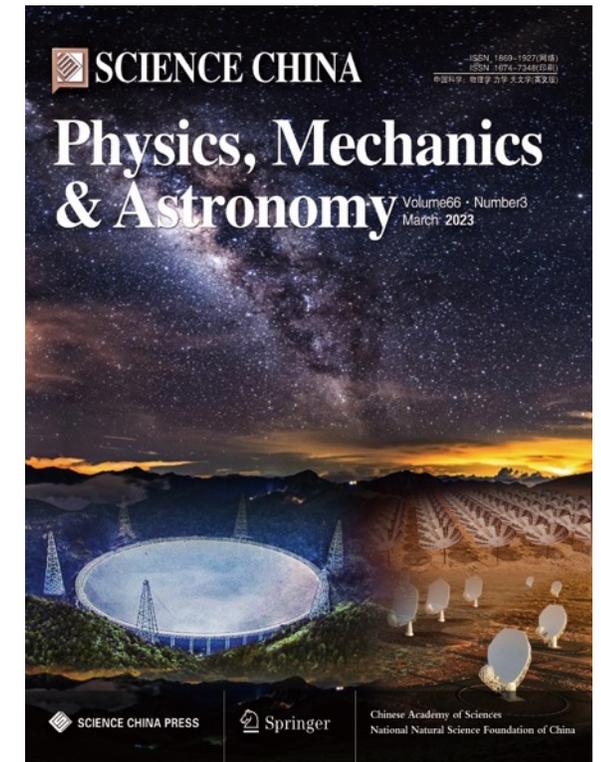


## 中文版：中国科学：物理学 力学 天文学

- 中文核心期刊，并被**ESCI, Scopus**国际数据库收录
- 2021年度**中国百种杰出学术期刊**
- **特色专题**出版，已组织专题(辑)**70**余期



扫描二维码  
关注期刊最新动态



中性氢巡天实验的联合巡天策略

Supervised by



Sponsored by



Published by



# 引力波：打开探测宇宙新窗口

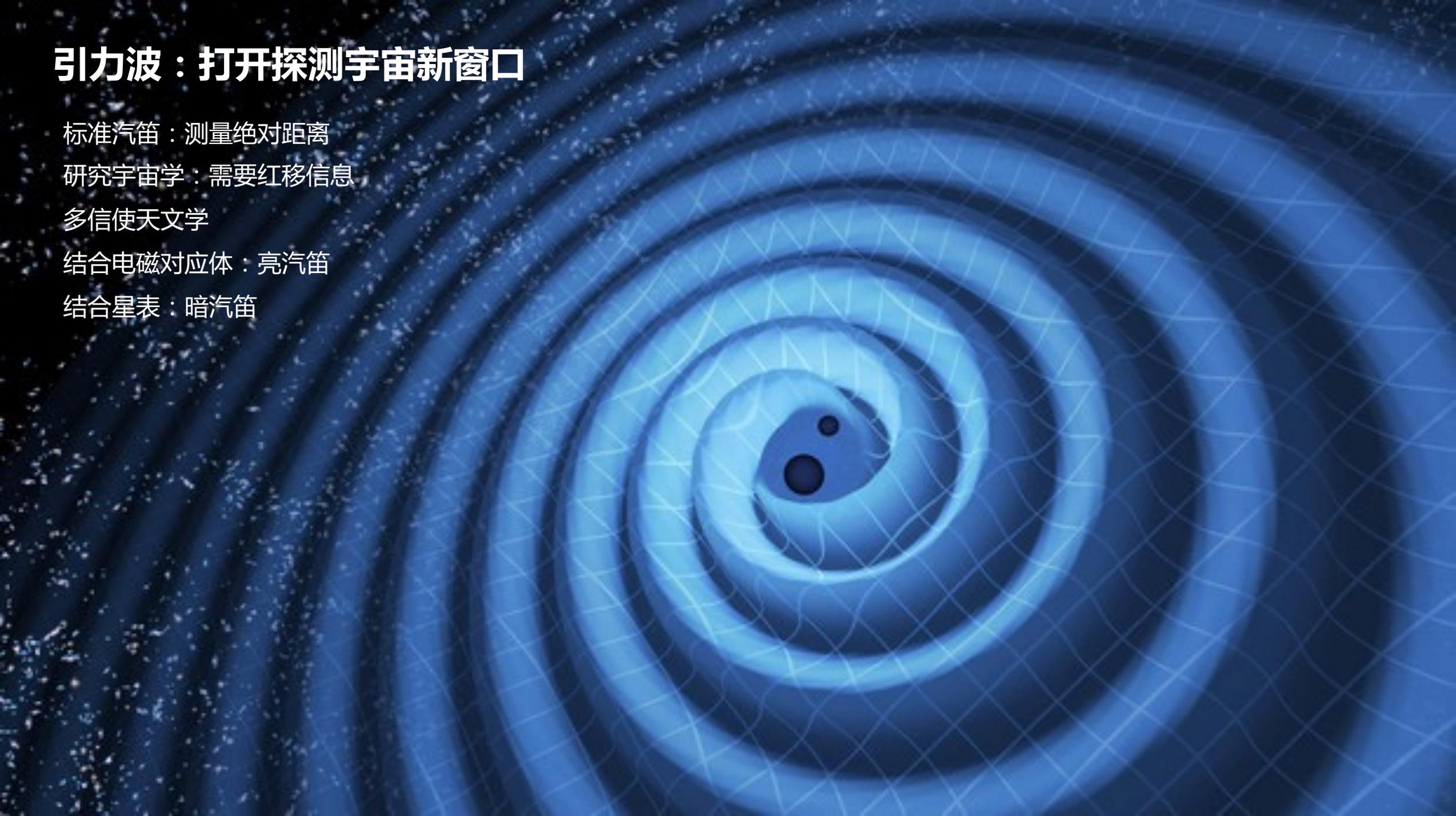
标准汽笛：测量绝对距离

研究宇宙学：需要红移信息

多信使天文学

结合电磁对应体：亮汽笛

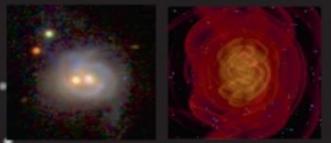
结合星表：暗汽笛



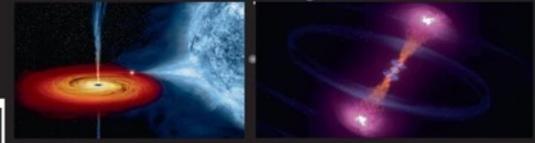
Sources



Big Bang



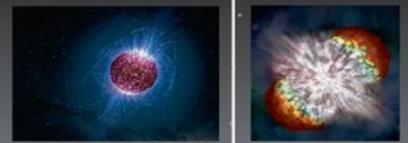
(Super-)massive black hole inspiral and merger



Compact binary inspiral and merger



Extreme-mass-ratio inspirals



Pulsars, supernovae

不同波源，频率跨越20个数量级

不同探测器

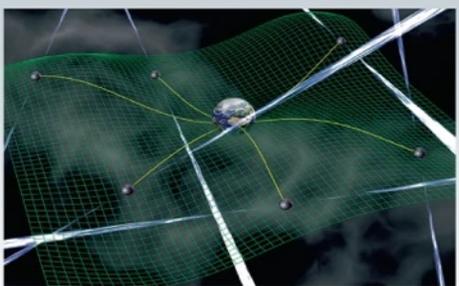
富饶土壤：基础物理，天体物理，宇宙学

Wave period

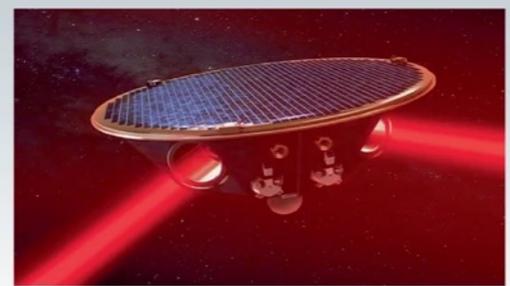
Wave frequency



Radio pulsar timing arrays



Space-based interferometers

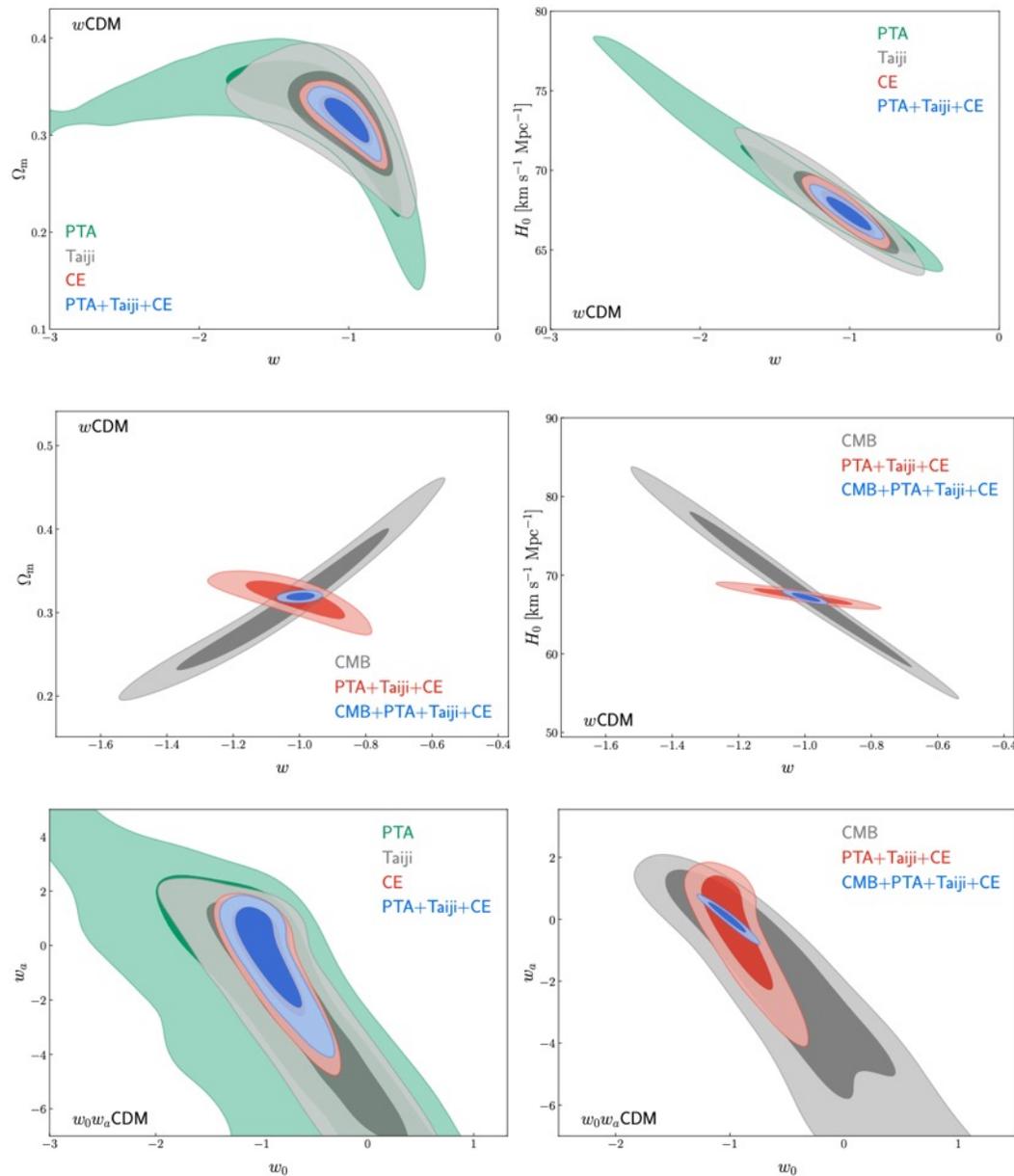
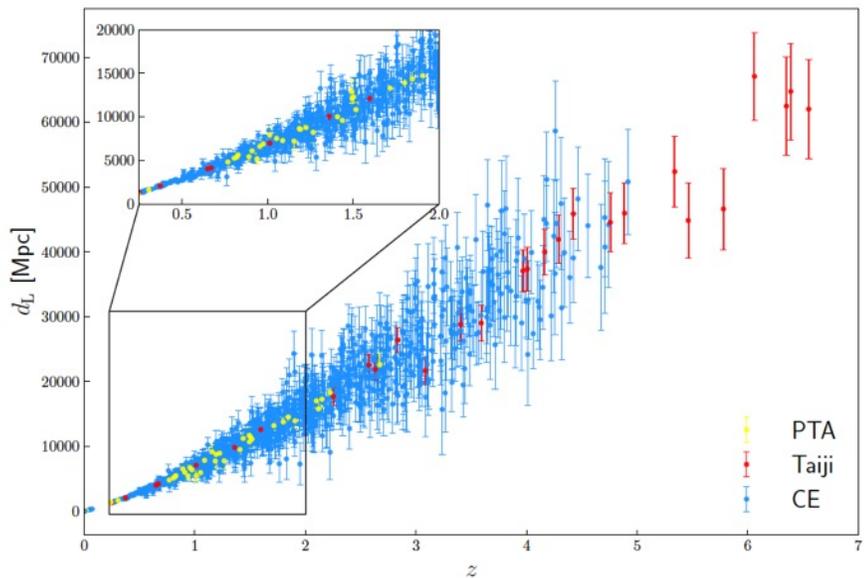


Terrestrial interferometers



Detectors

# 标准汽笛：多波段探测与联合

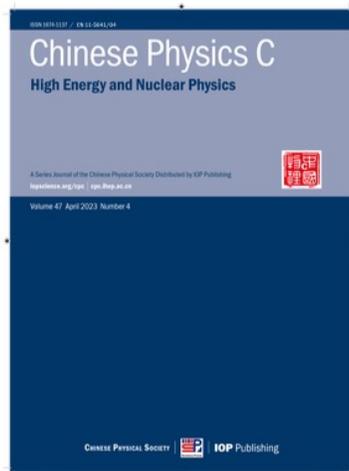


- 地面（中高频）：双中子星（几百上千）
- 空间（低频）：双大质量黑洞（几十个）
- 脉冲星计时阵列（超低频）：双超大质量黑洞（几十个）
- 引力波亮汽笛：测 $H_0$ 达0.5%，测 $w$ 只有10%
- 所以，单独测哈勃常数很好，测暗能量能力不太行
- CMB+GW：与CBS能力相当

Jin et al. PRD 2021

Jin et al. CPC 2023

# Chinese Physics C



**IF: 2.944**

Monthly founded in 1977

## Sponsored by:

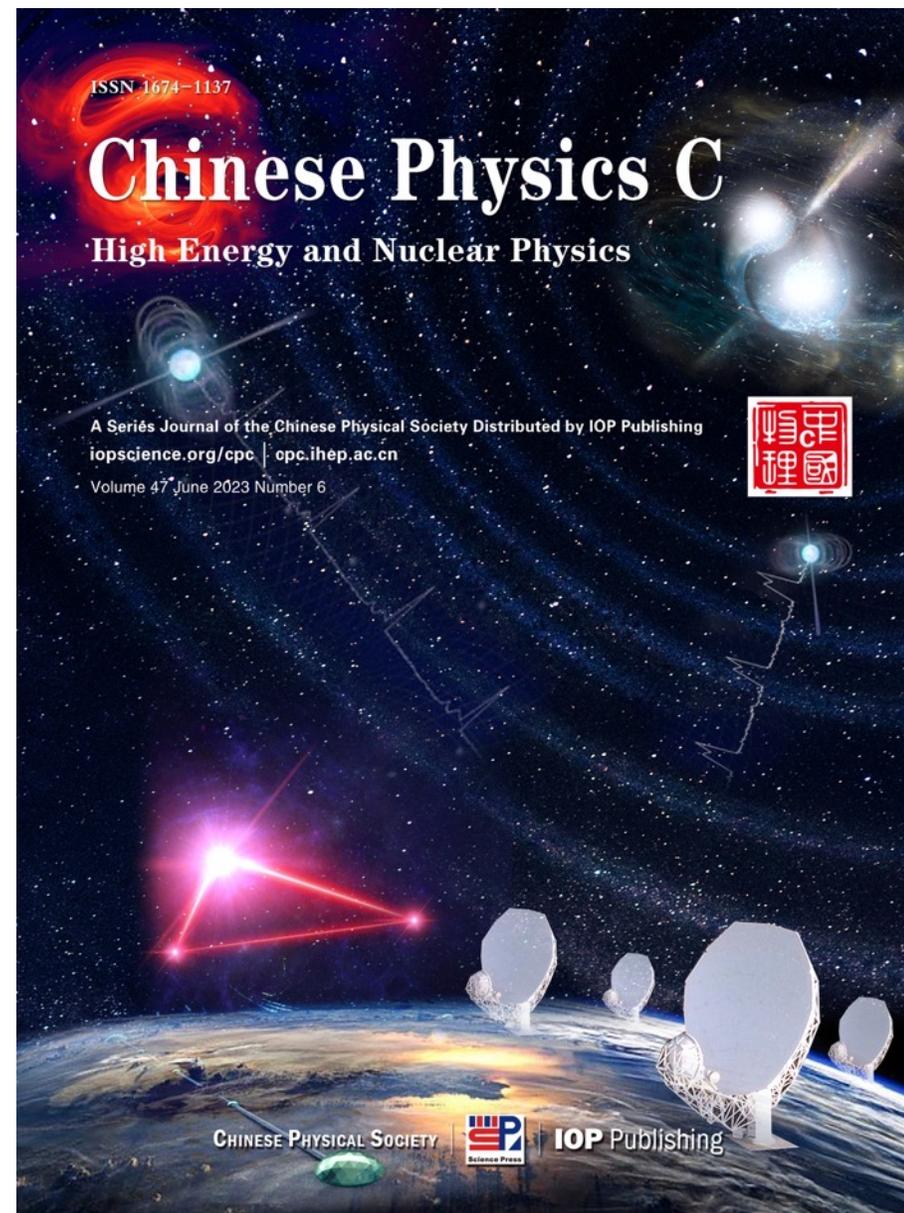
- Chinese Physical Society
- Institute of High Energy Physics, CAS
- Institute of Modern Physics, CAS

**ISSN 1674-1137 CN 11-5641/04**

Original research articles, letters and reviews Covering theory and experiments in the fields of

- Particle physics
- Nuclear physics
- Particle and nuclear astrophysics
- Cosmology

标准汽笛：多波段探测与联合



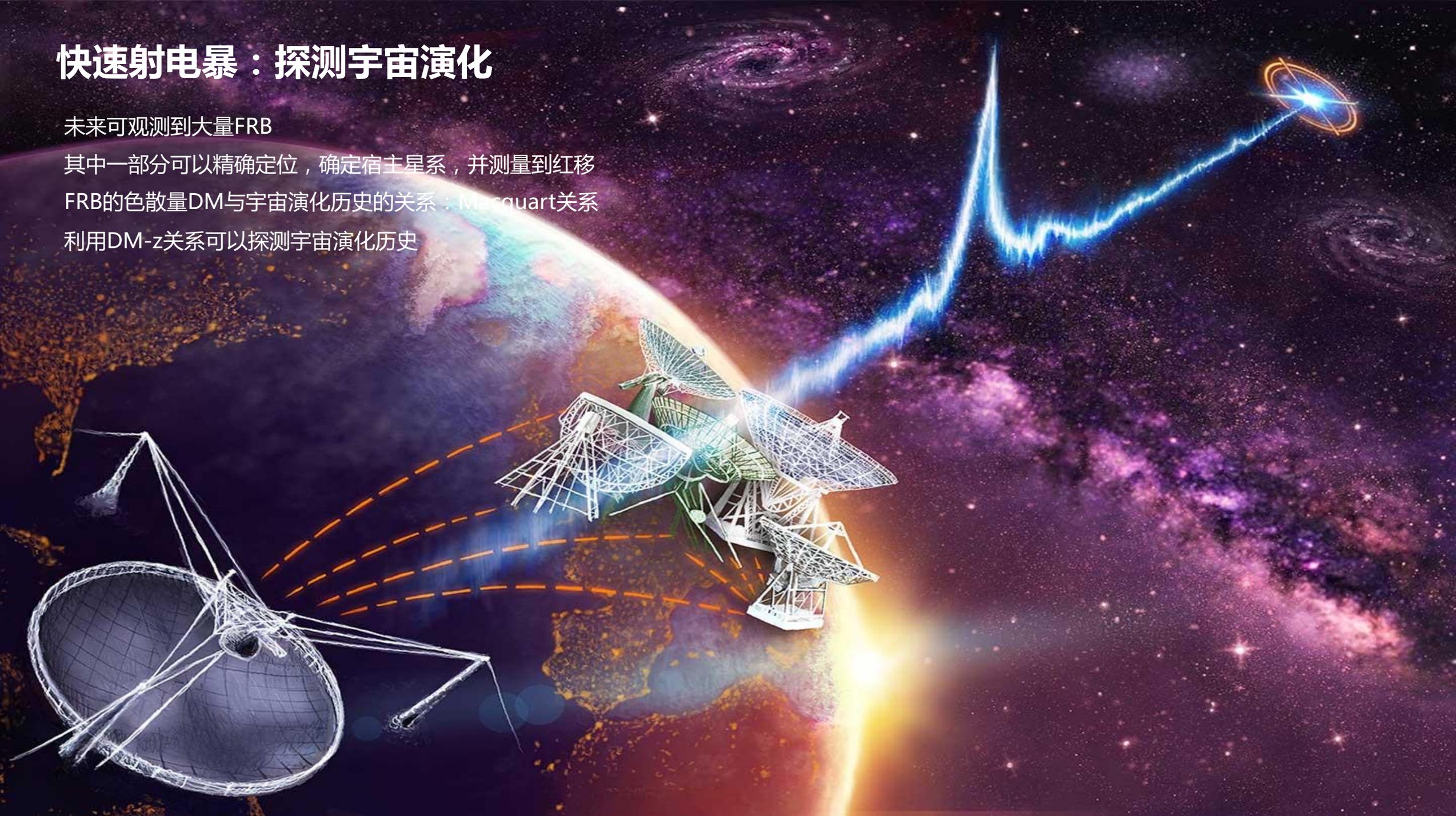
# 快速射电暴：探测宇宙演化

未来可观测到大量FRB

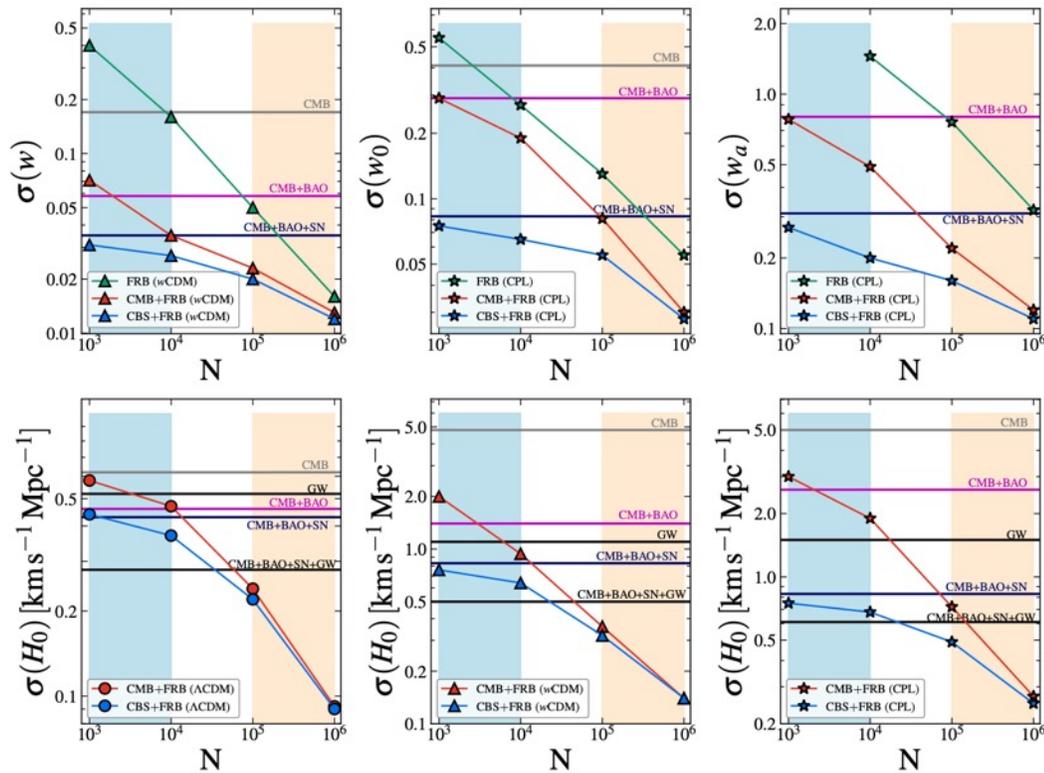
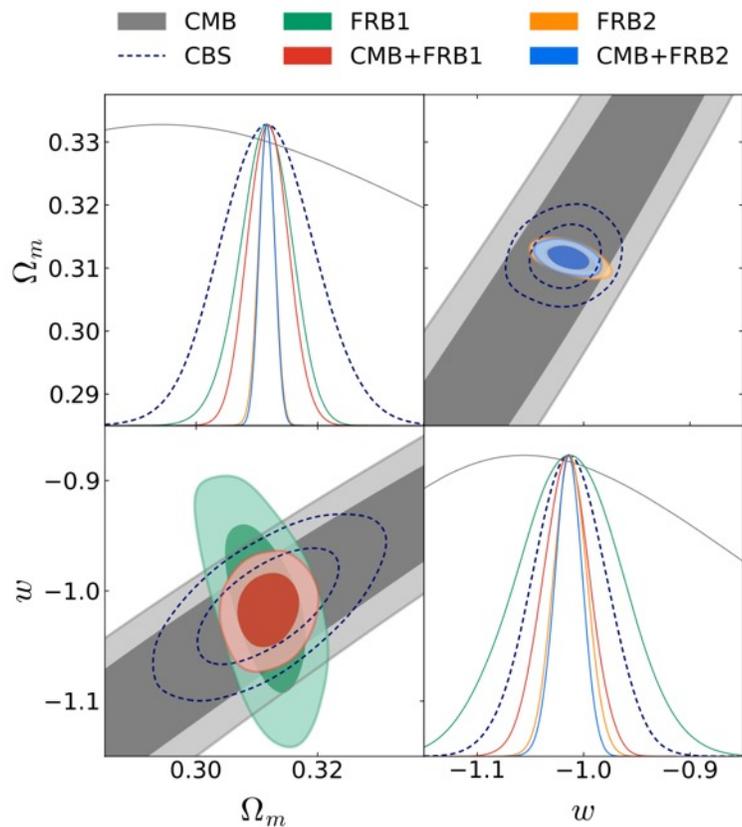
其中一部分可以精确定位，确定宿主星系，并测量到红移

FRB的色散量DM与宇宙演化历史的关系：Macquart关系

利用DM-z关系可以探测宇宙演化历史



# 快速射电暴：未来的强大宇宙学工具



pre-SKA SKA

Zhang et al. in prep.

- 成为有用的宇宙学工具：需要约 $10^4$ 可定位的FRB Zhao et al. ApJ 2020
- SKA时代，10年观测可获得 $10^5$ - $10^6$ 定位FRB
- 有 $10^5$ FRB，对暗能量的限制：FRB+CMB好于CBS
- 有 $10^6$ FRB，对暗能量的限制：FRB-alone好于CBS