

第十三届新物理研讨会

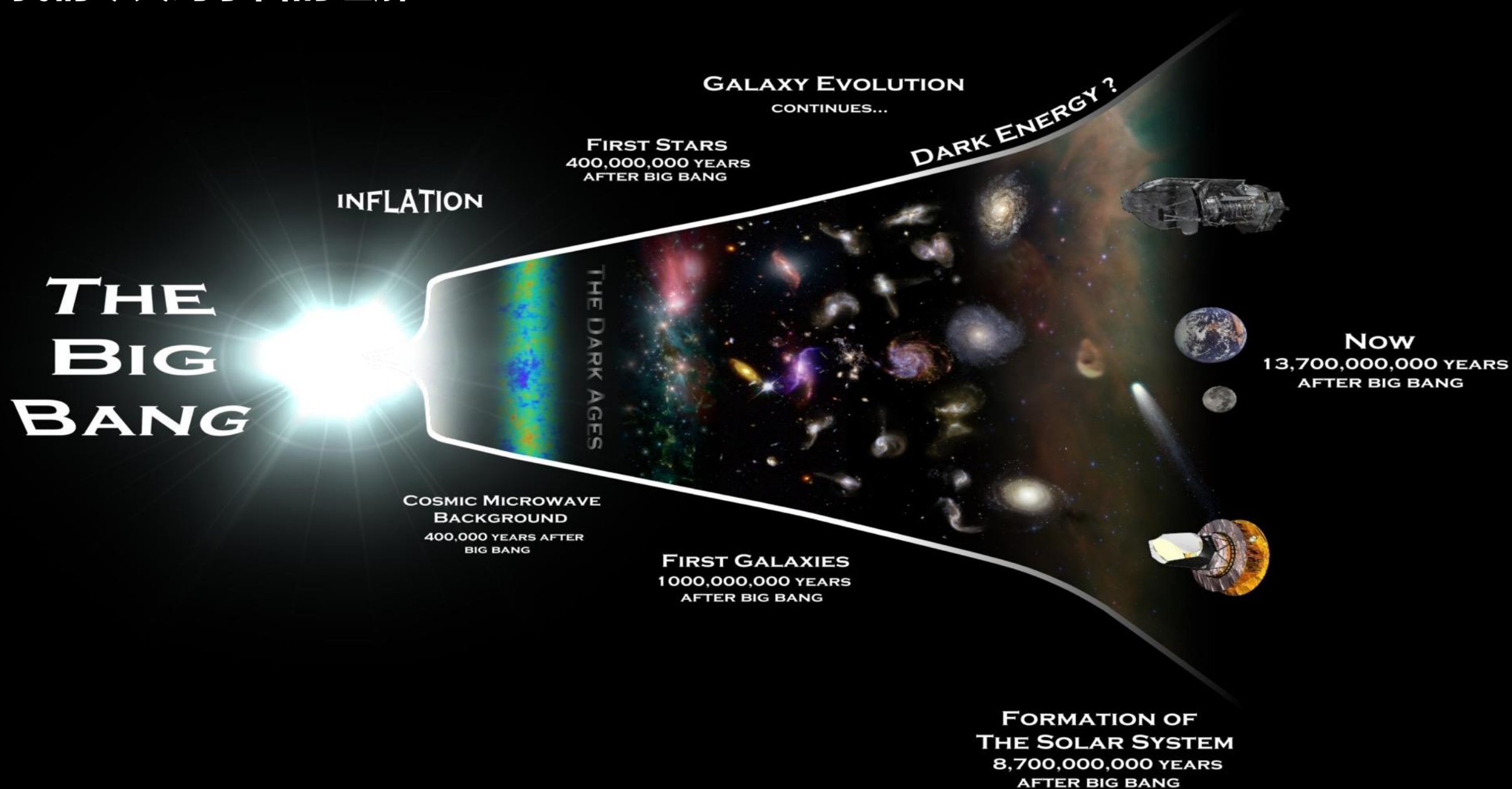
21厘米宇宙学

张鑫

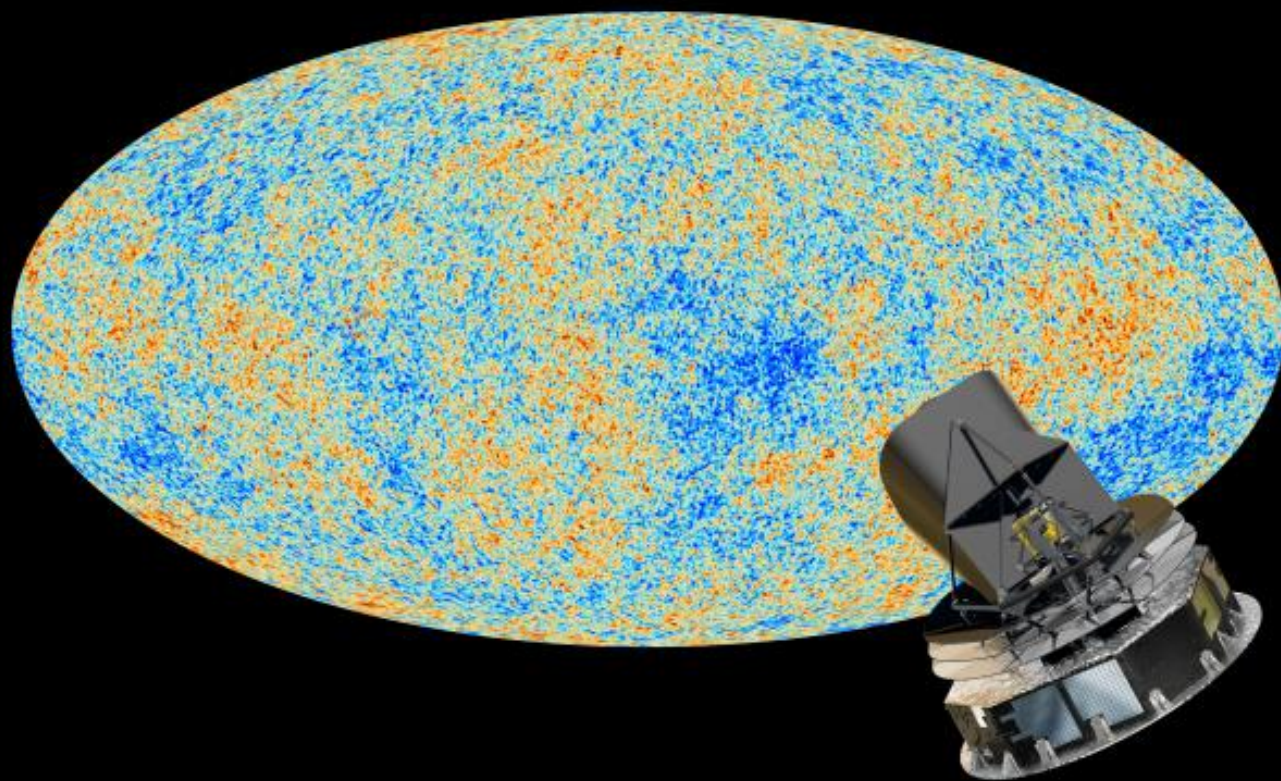
东北大学

山东大学·威海 2024年9月5-10日

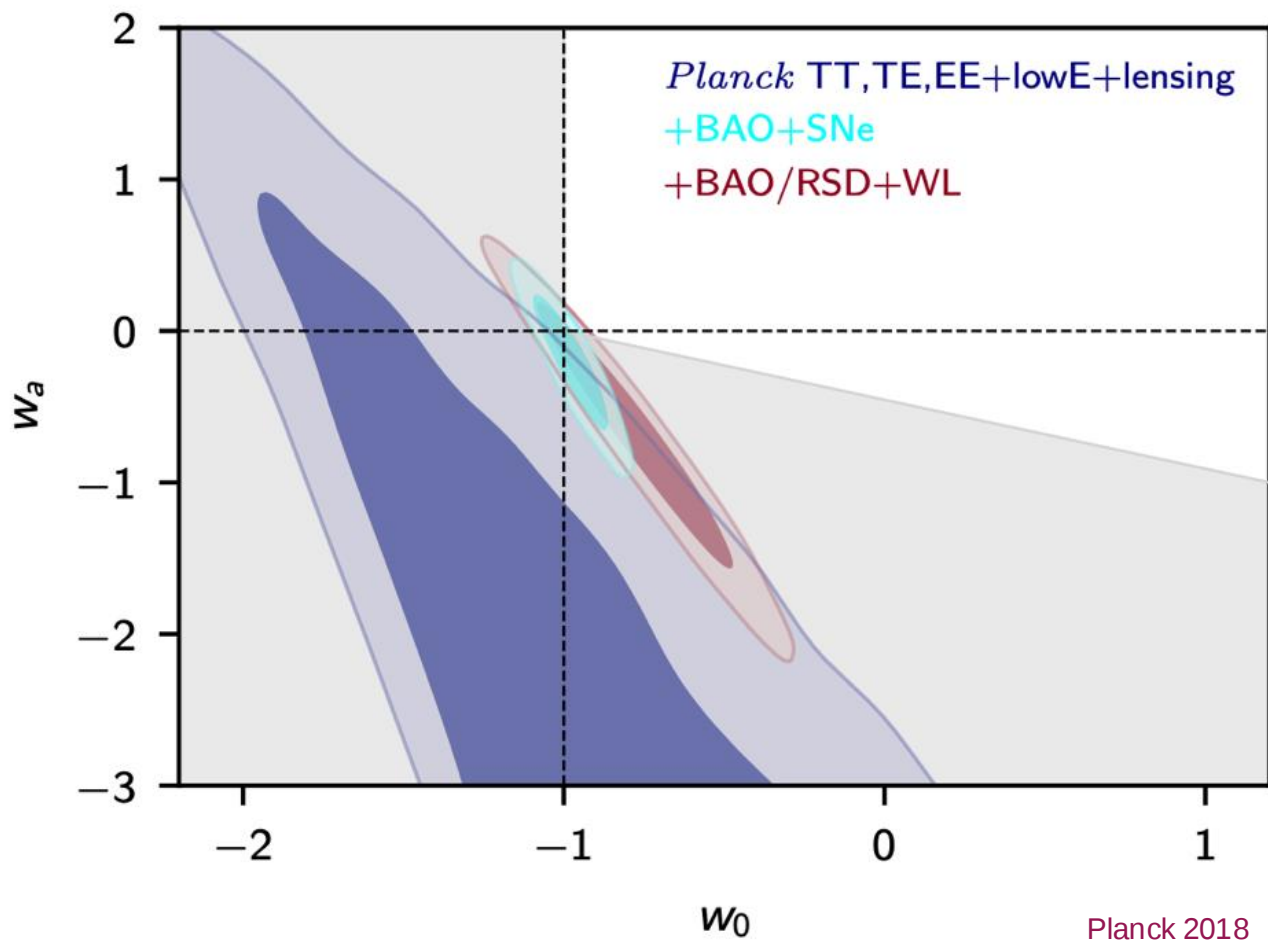
我们今天对宇宙的理解



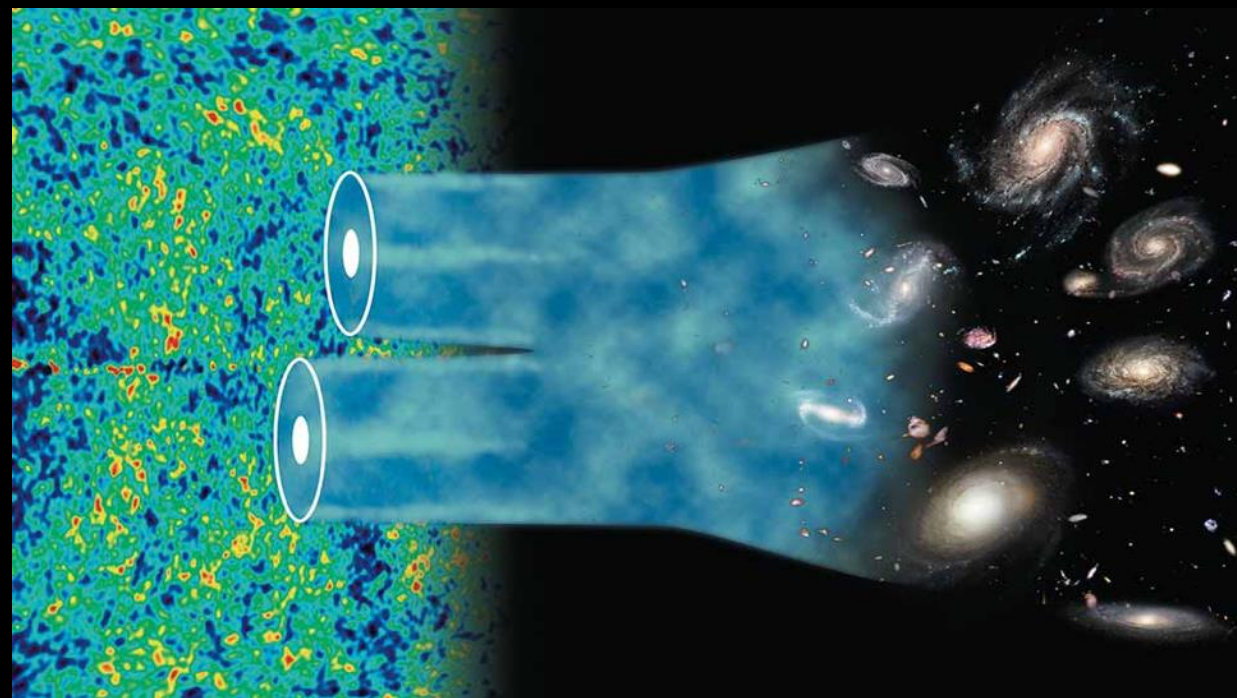
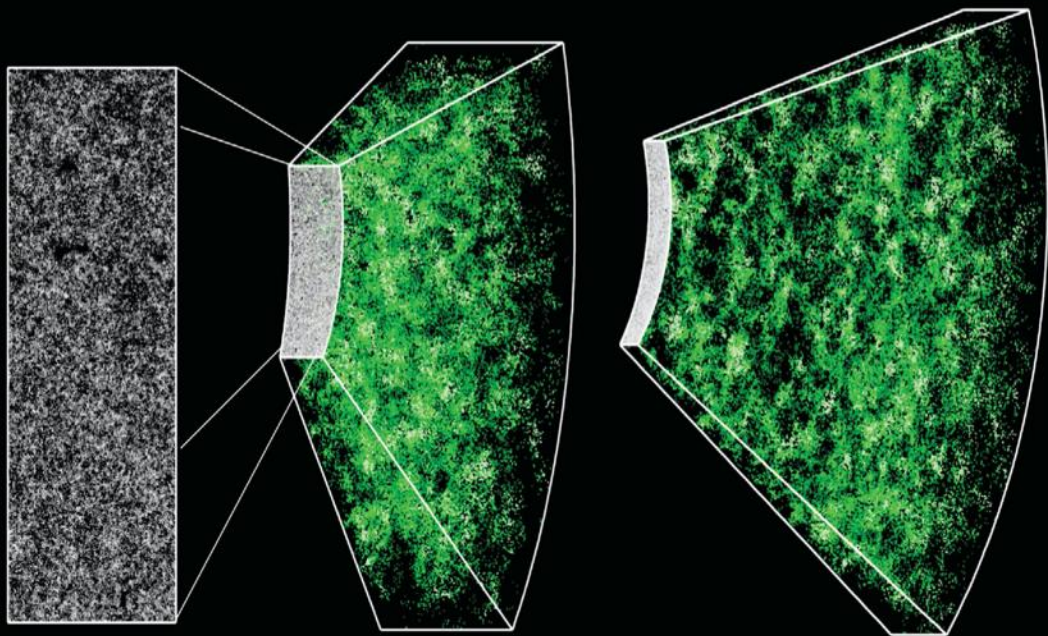
如何了解这一切？



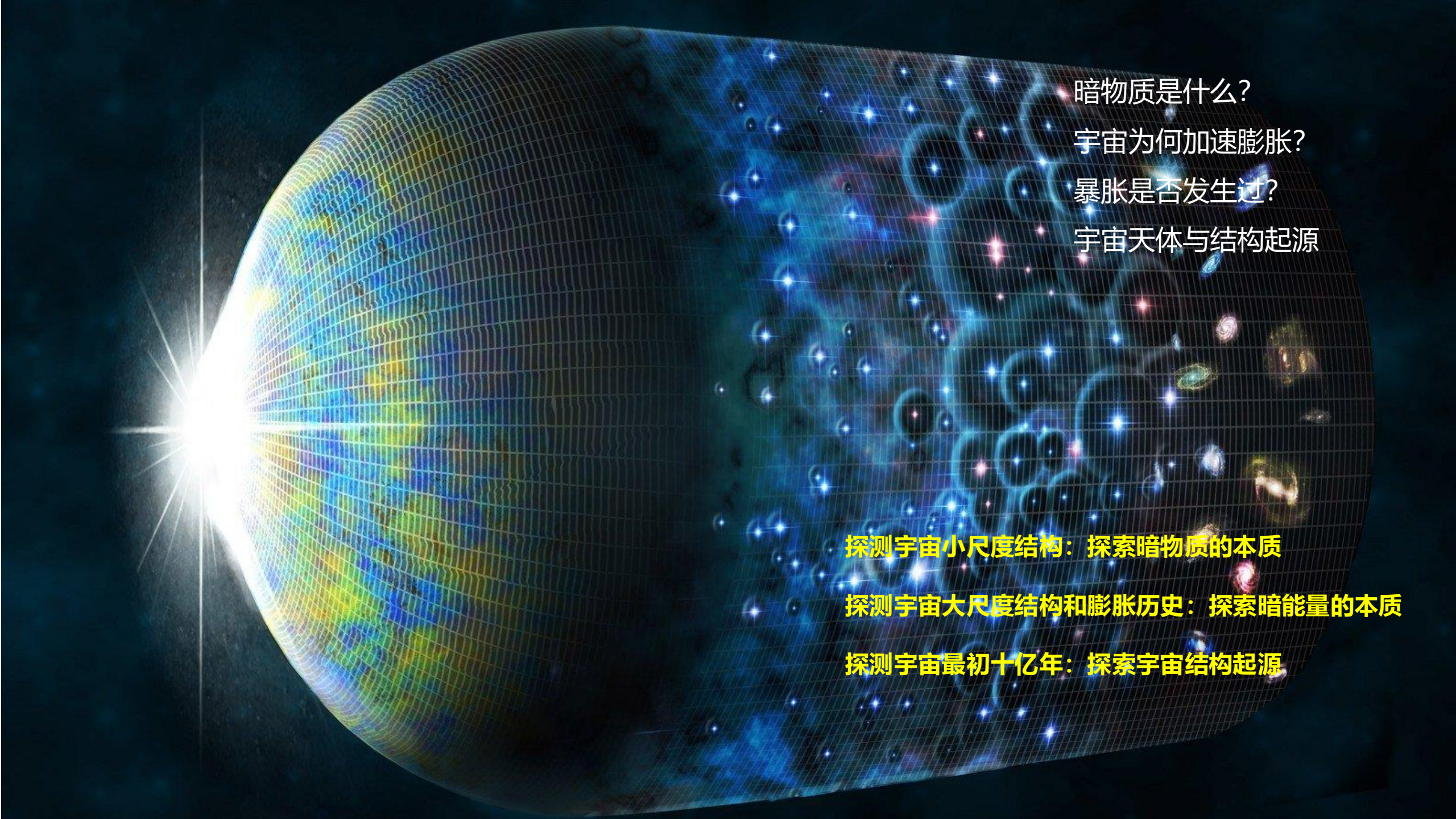
- 宇宙学观测的发展
- CMB：宇宙年龄38万年，快照，精确测量
- 温度各向异性：各种宇宙学模型可以比对，调整参数，确定参数
- Λ CDM模型拟合得很好
- 精确确定宇宙学参数



- 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)



暗物质是什么？

宇宙为何加速膨胀？

暴胀是否发生过？

宇宙天体与结构起源

探测宇宙小尺度结构：探索暗物质的本质

探测宇宙大尺度结构和膨胀历史：探索暗能量的本质

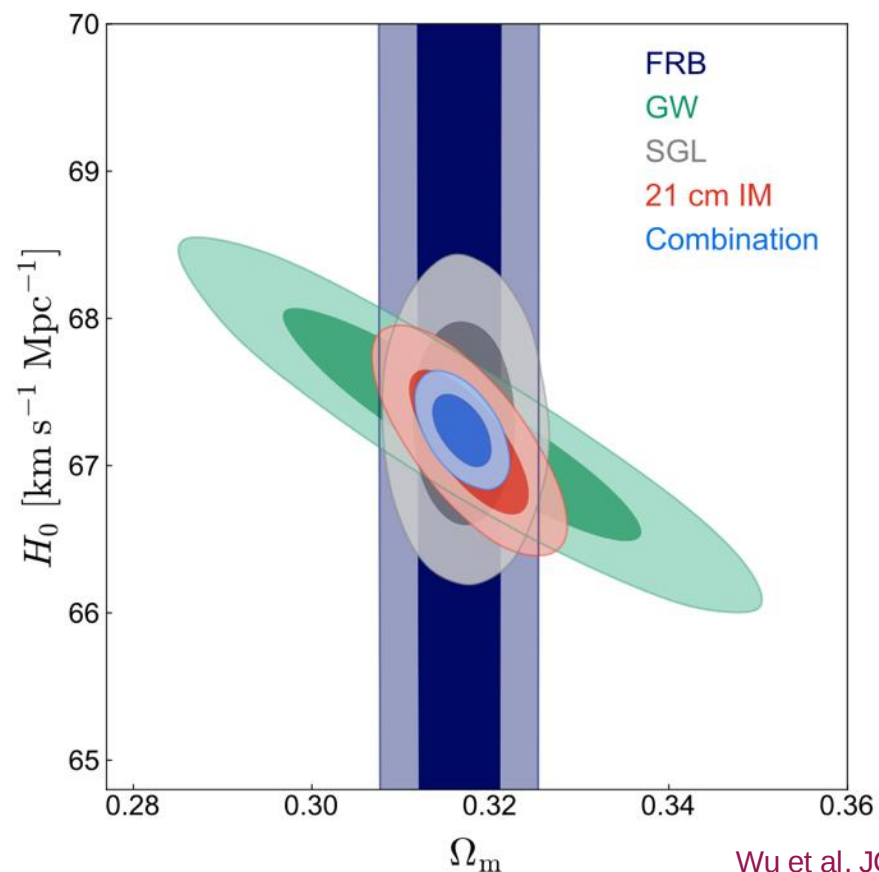
探测宇宙最初十亿年：探索宇宙结构起源

早期宇宙与晚期宇宙不一致性：哈勃常数危机

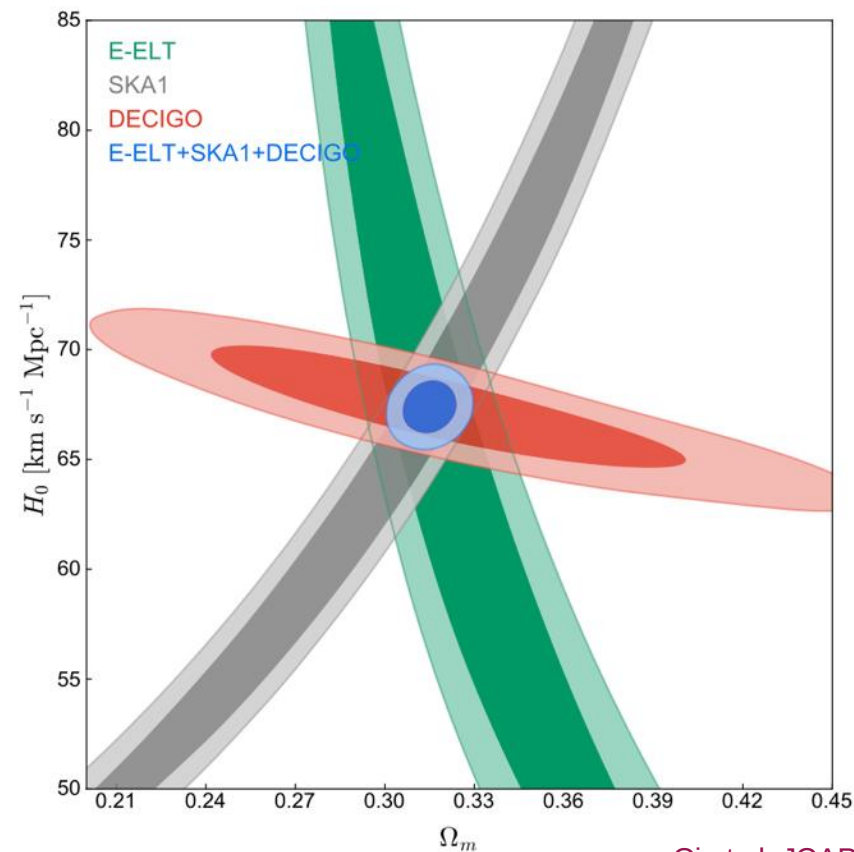
67 OR 73?



打造探索晚期宇宙的精确探针



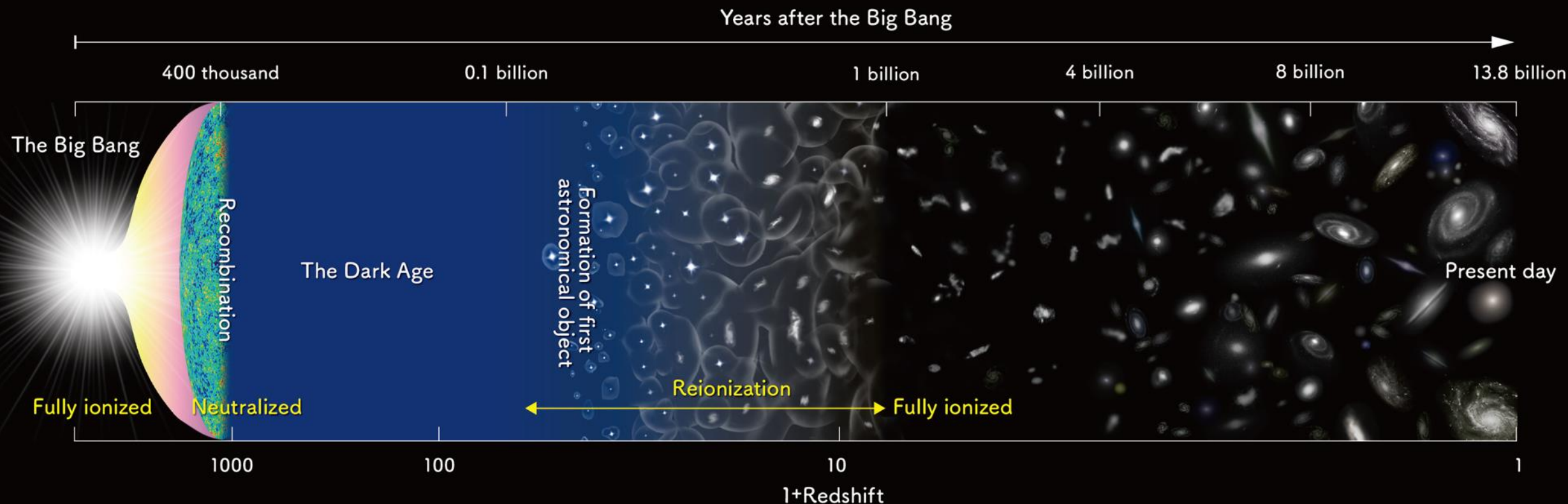
Wu et al. JCAP 2023



Qi et al. JCAP 2021

- 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



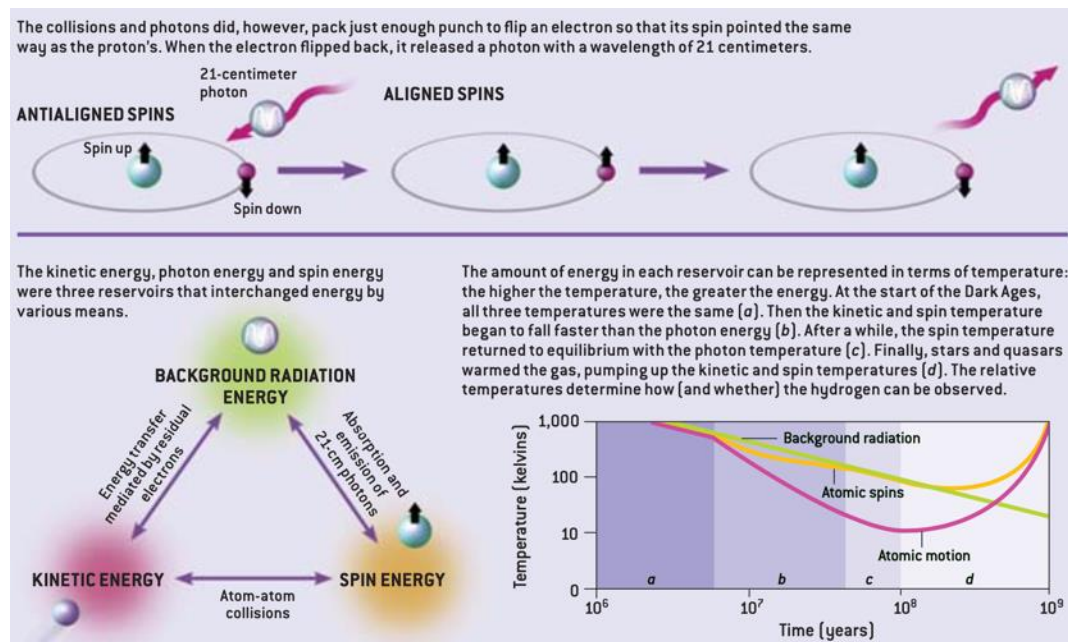
探索宇宙结构起源的关键：探测宇宙最初十亿年

婴儿时期照片，成年照片，唯独缺失童年照片

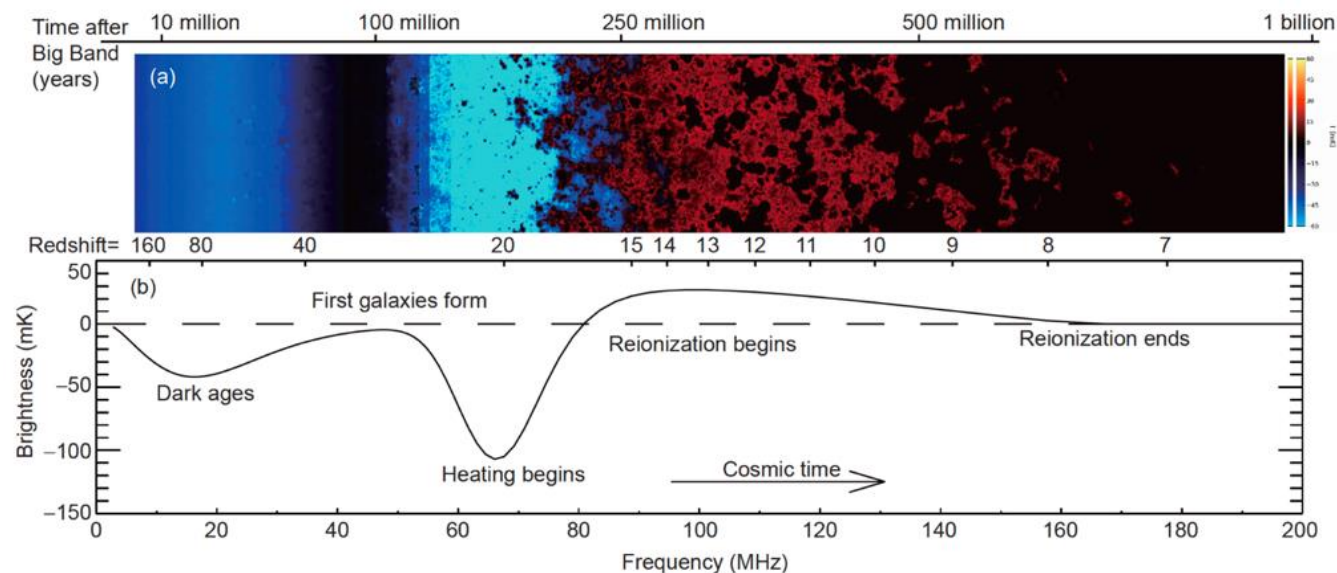
中性氢原子21厘米辐射——探索宇宙最初十亿年的几乎唯一手段

探索基础物理：暗物质与暗能量的性质

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：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
- 以CMB为背景光源，探测21厘米吸收（黑暗时代，宇宙黎明）和发射（再电离）
- 宇宙黎明和再电离：全天空平均谱，大尺度三维结构（功率谱，直接成像）
- 以高红移射电亮的点源为背景光源（射电噪类星体）：21厘米森林（小尺度结构）

中频21厘米：大尺度结构，暗能量射电探测

Line Intensity Mapping (LIM)

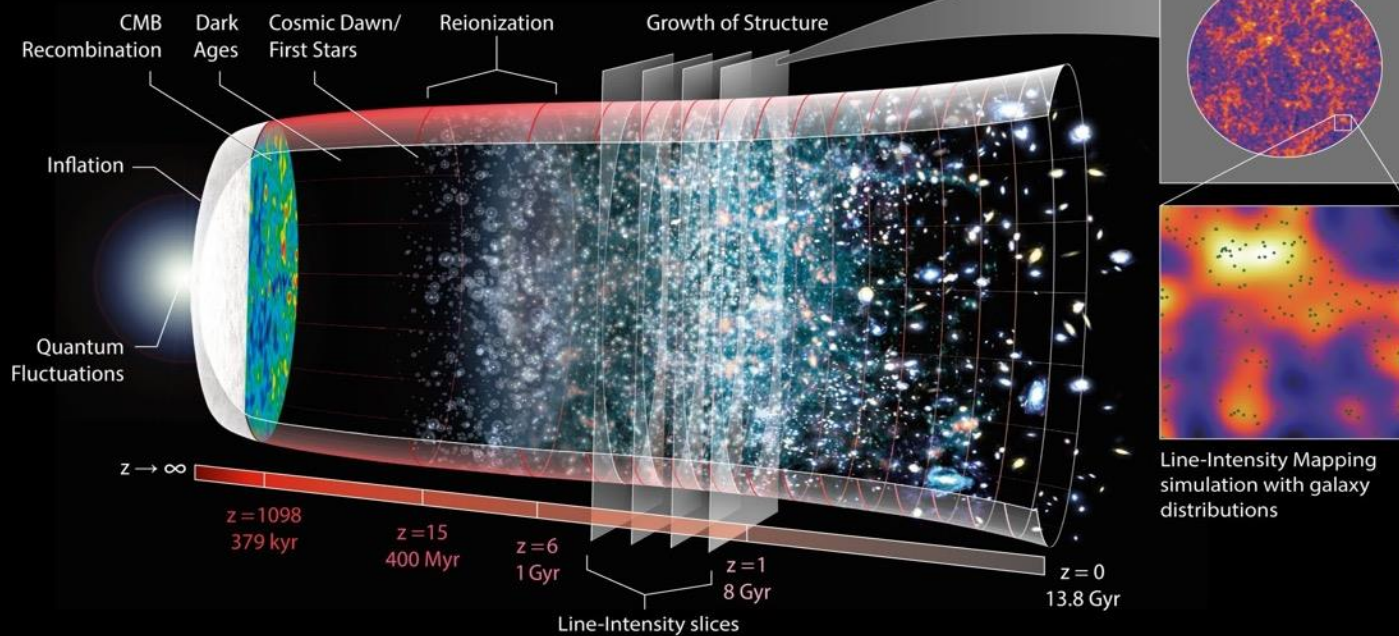


Image Credit: NASA-GSFC LAMBDA

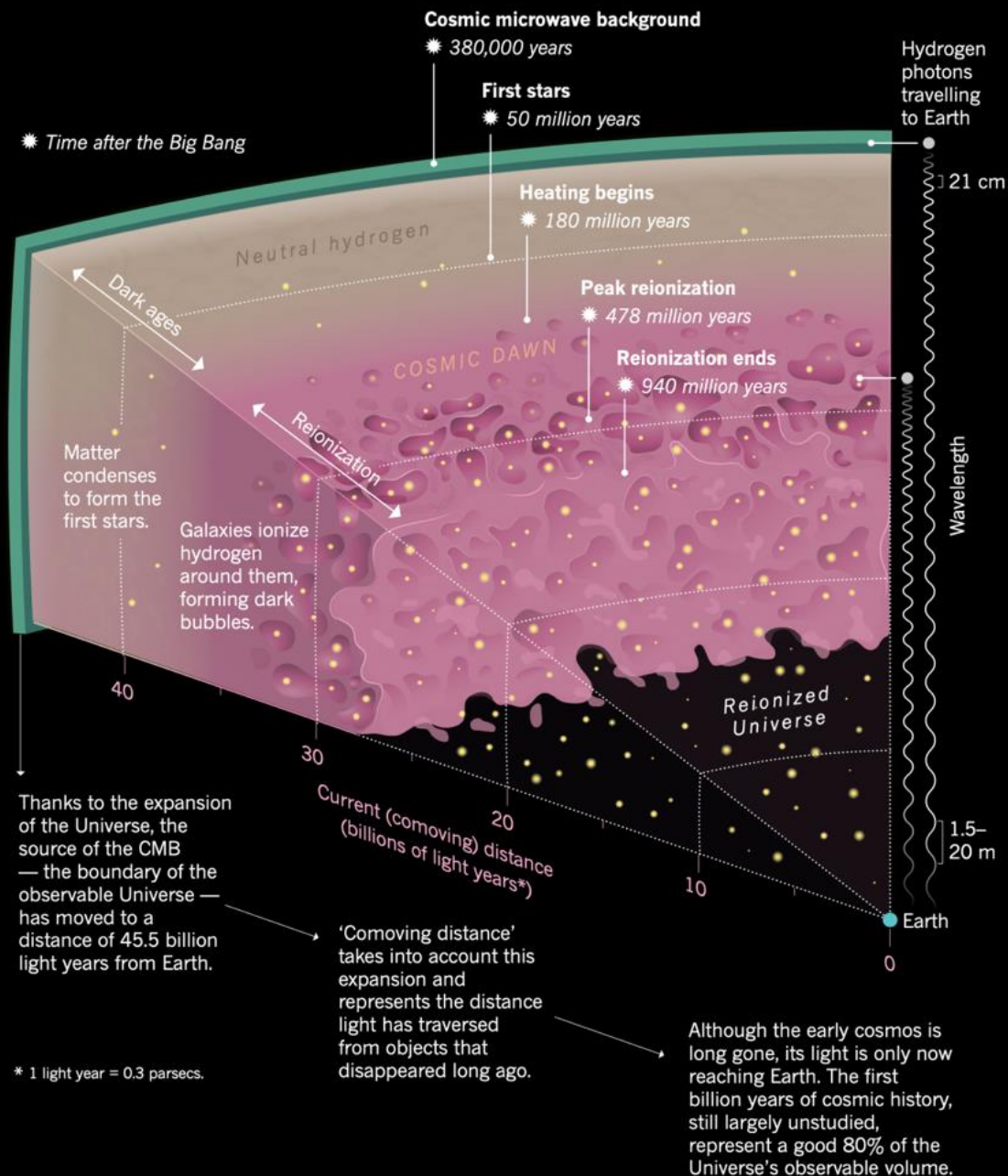
后再电离时代，中性氢主要在星系中

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



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

探测宇宙整个演化历史

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)



FREQUENCY RANGE:
**350 MHz–
15.4 GHz**
WITH A GOAL OF 24 GHz



MAXIMUM BASELINE:
150km

SKA-Low

THE SKA'S LOW-FREQUENCY TELESCOPE



LOCATION:
AUSTRALIA



**131,072
ANTENNAS**
SPREAD ACROSS 512 STATIONS



FREQUENCY RANGE:
**50 MHz–
350 MHz**



MAXIMUM BASELINE:
~65km

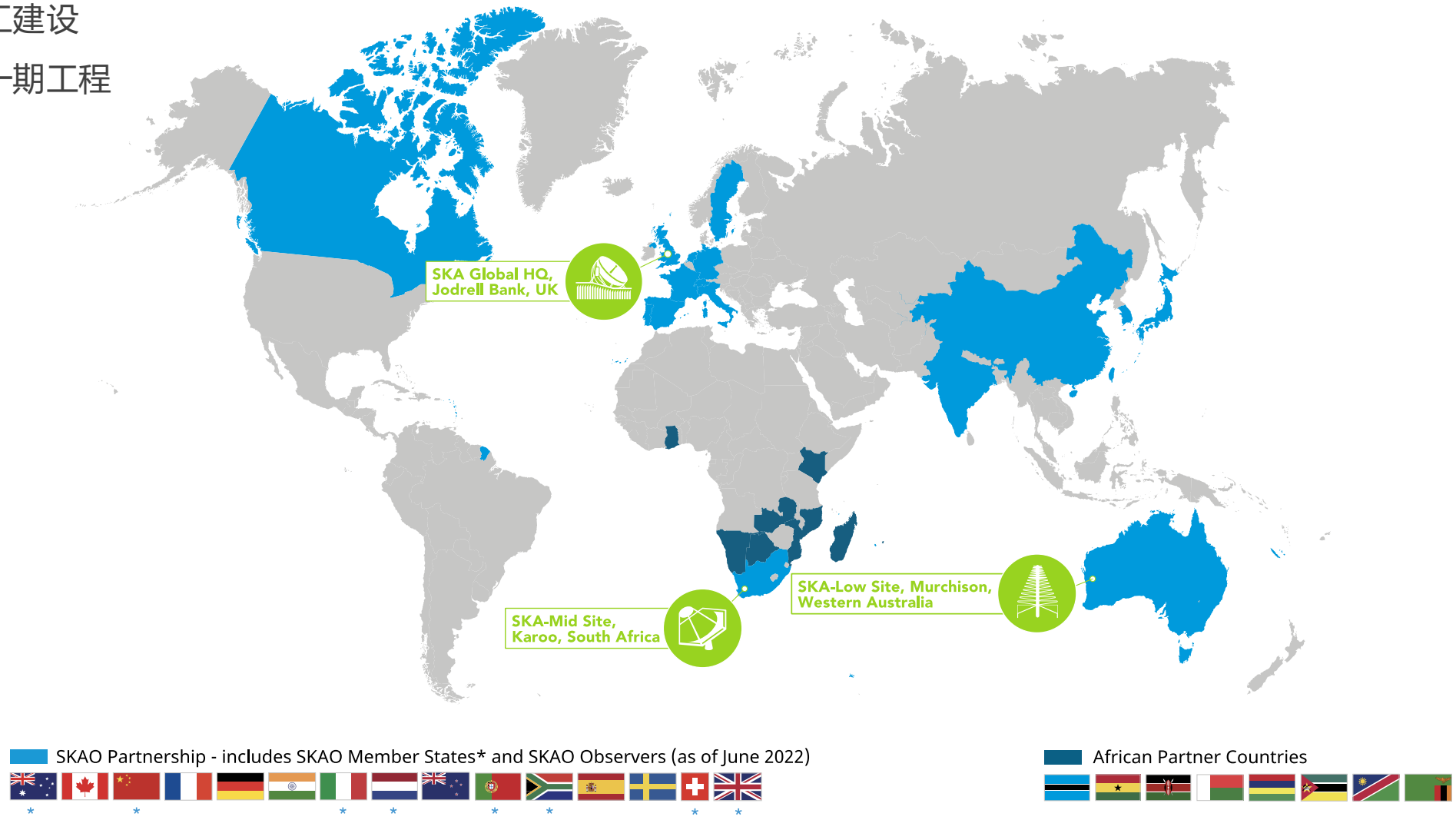


SKA：国际大科学工程

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

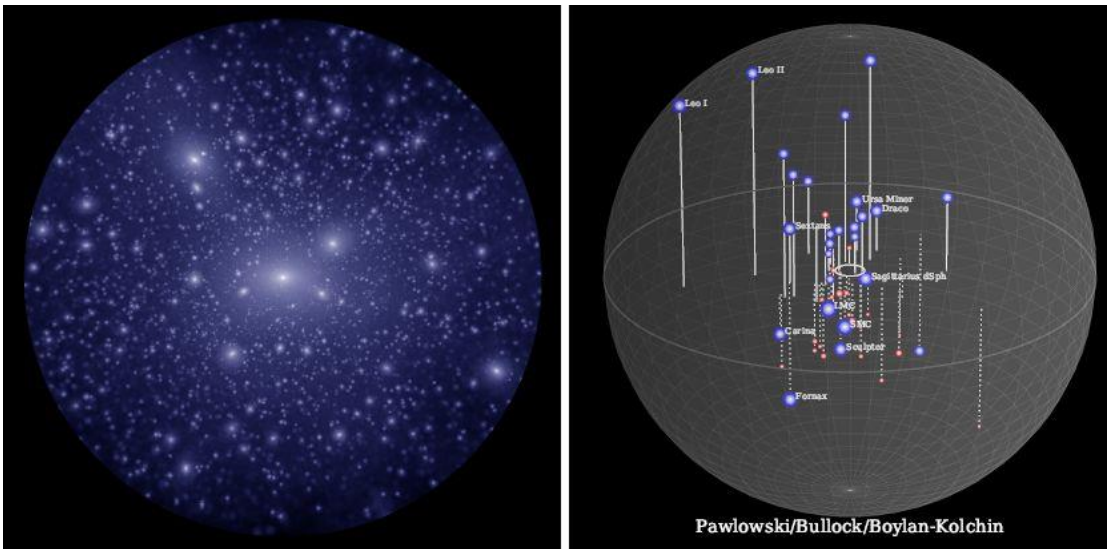


探索基础物理：暗物质与暗能量

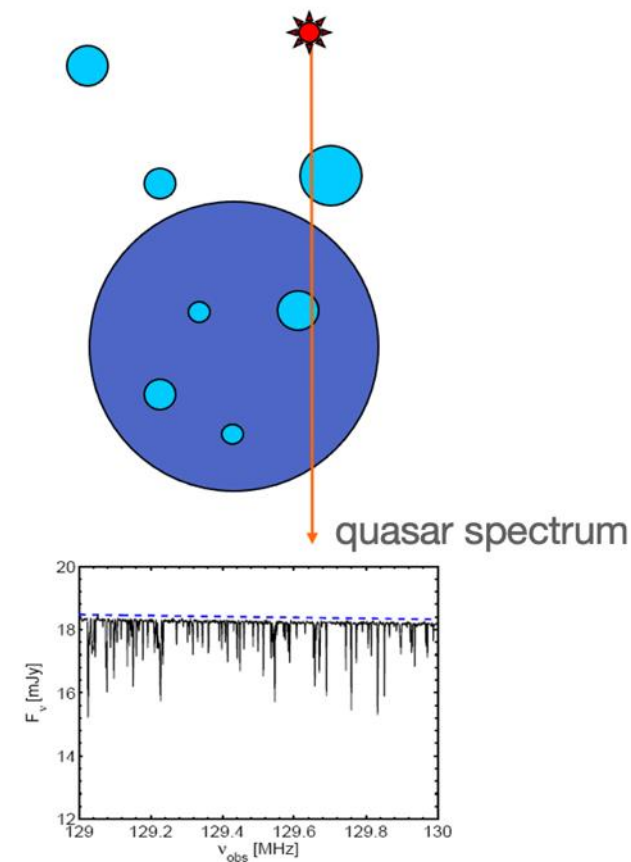
- 再电离-21厘米森林：温暗物质
- 后再电离-21厘米强度映射：暗能量



利用低频21厘米探测暗物质？

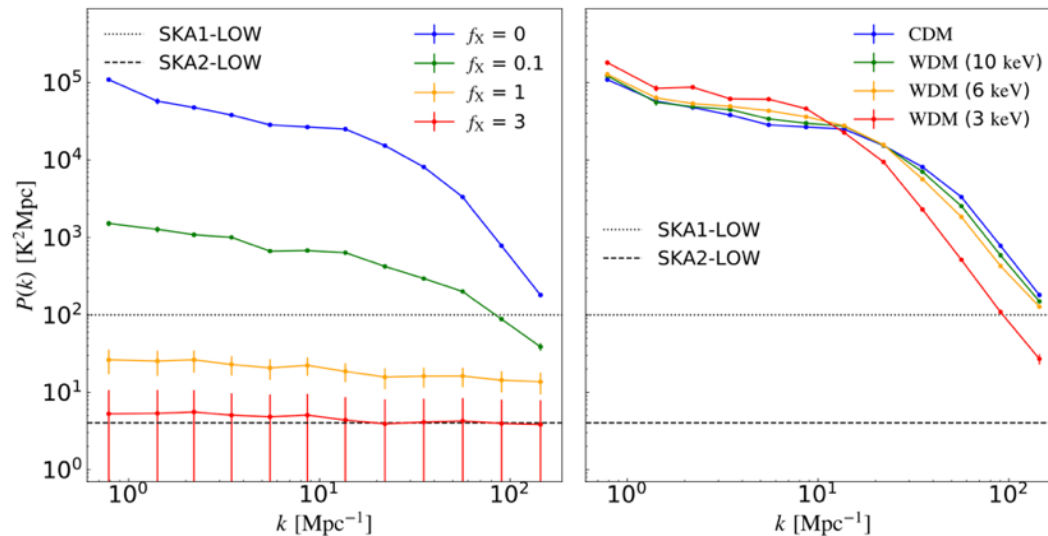
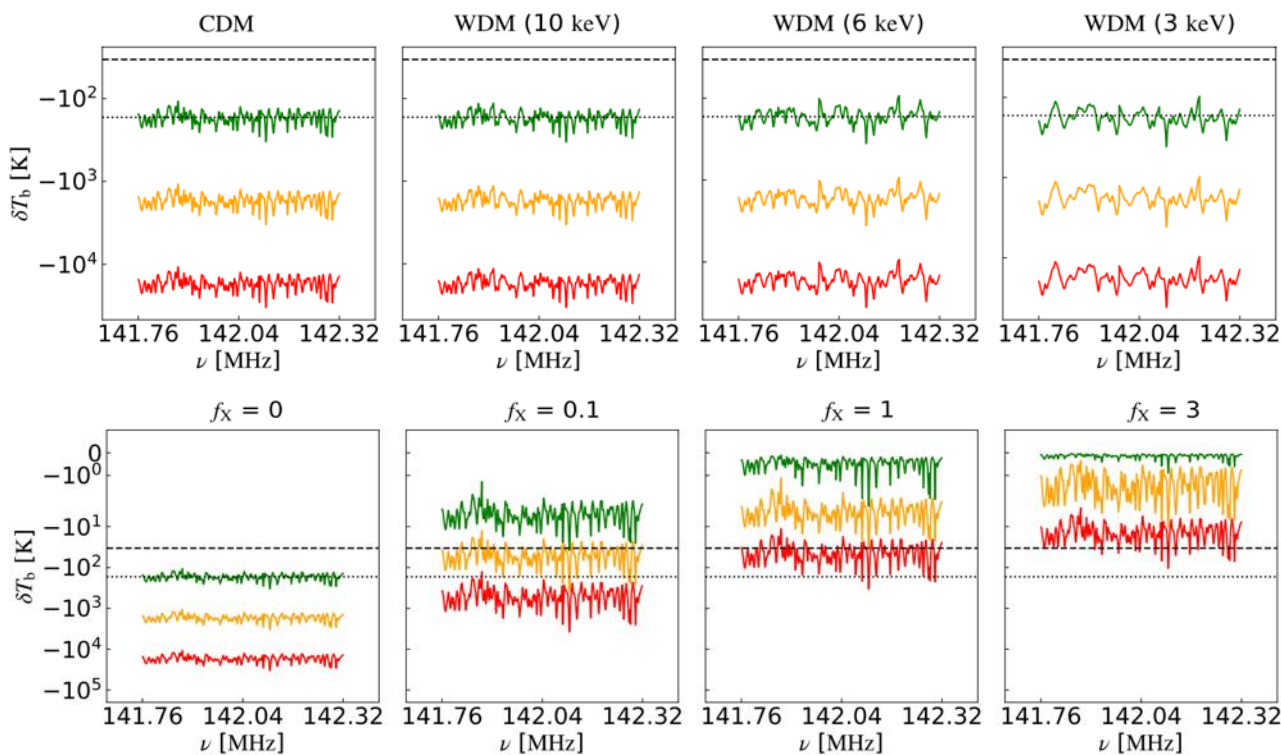


- 冷暗物质在星系尺度的问题：温暗物质？（Cold OR Warm?）
- 温暗物质：大尺度与冷暗物质没差别，但小尺度结构少
- 关键是小尺度上的测量：低红移宇宙——星系尺度强透镜，Lyman- α 森林，银河系卫星星系
- 急需新方案、新探针
- **21厘米森林**：提供温暗物质的低频射电探测方案
- 背景源为高红移射电点源，探测小尺度结构（百万倍太阳质量小暗晕）
- 温暗物质 vs 冷暗物质：吸收线数目少；计数产生限制
- 但同时早期宇宙加热过程（X射线加热）也敏感——压低信号，且与暗物质形成一定的简并



XuYD et al. MNRAS 2011

21厘米森林信号：一维功率谱测量



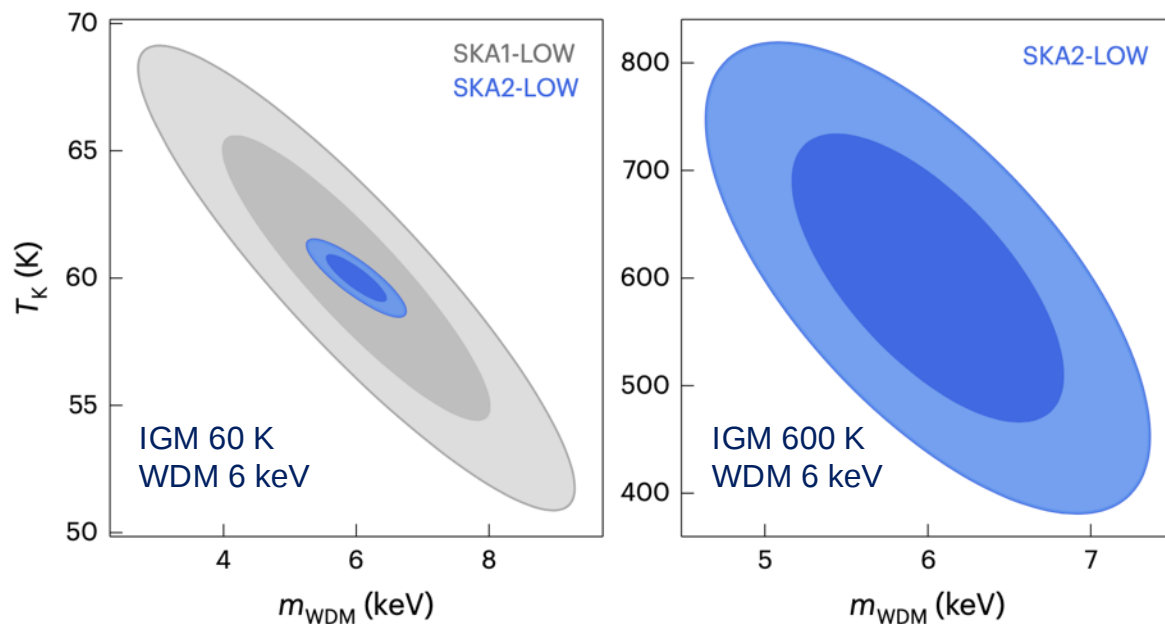
SKA灵敏度
100小时积分时间

ShaoY, XuYD, et al. 2023
Nature Astronomy

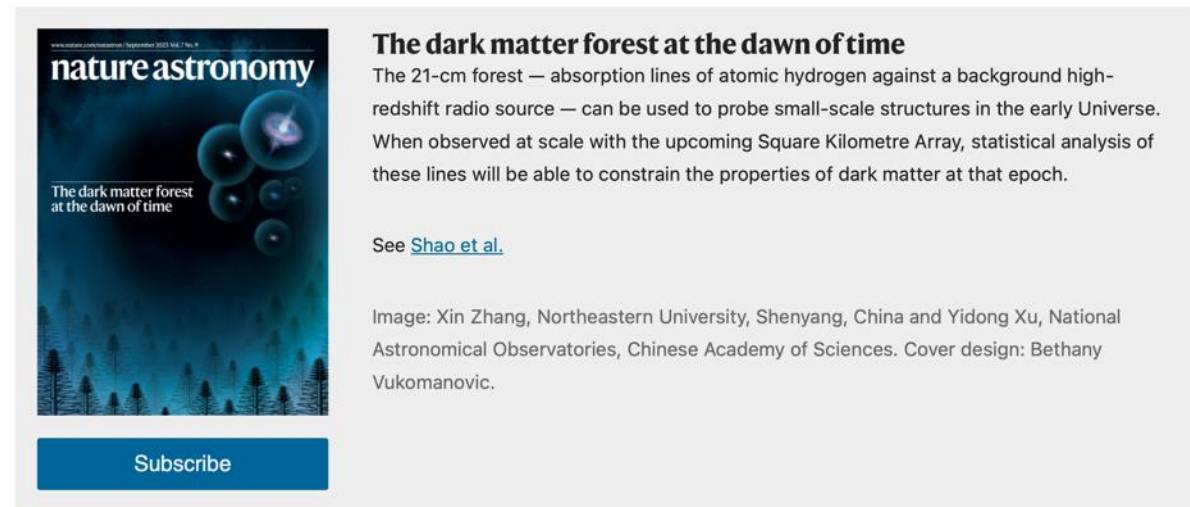
- 暗物质与宇宙加热同时影响21厘米森林信号
- 温暗物质：信号数密度减少
- 宇宙加热：信号幅度降低
- 问题：如何提取微弱信号？如何区分（测量）两种效应？

- 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



Volume 7 Issue 9, September 2023



The dark matter forest at the dawn of time

The 21-cm forest — absorption lines of atomic hydrogen against a background high-redshift radio source — can be used to probe small-scale structures in the early Universe. When observed at scale with the upcoming Square Kilometre Array, statistical analysis of these lines will be able to constrain the properties of dark matter at that epoch.

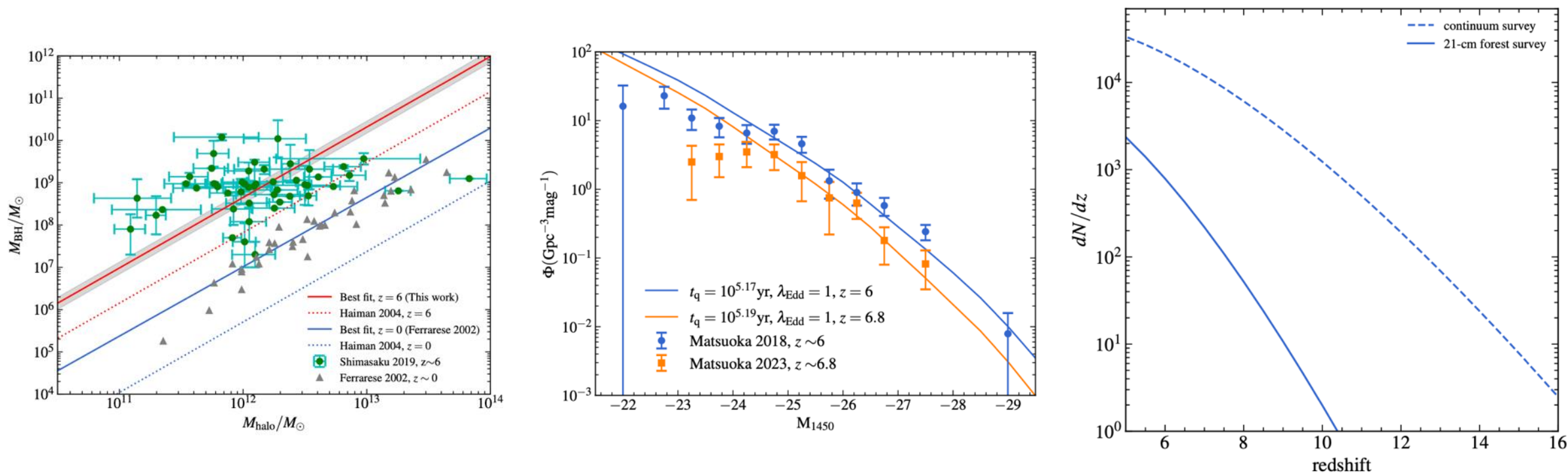
See [Shao et al.](#)

Image: Xin Zhang, Northeastern University, Shenyang, China and Yidong Xu, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences. Cover design: Bethany Vukomanovic.

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

- 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（射电噪类星体）？【理论分析 (Niu, et al., 2024)】
- 没有解析模型连接暗物质性质和21厘米森林观测信号，如何开展观测限制？【深度学习(Sun, et al., 2024)或构造解析模型(Shao+ in prep)】

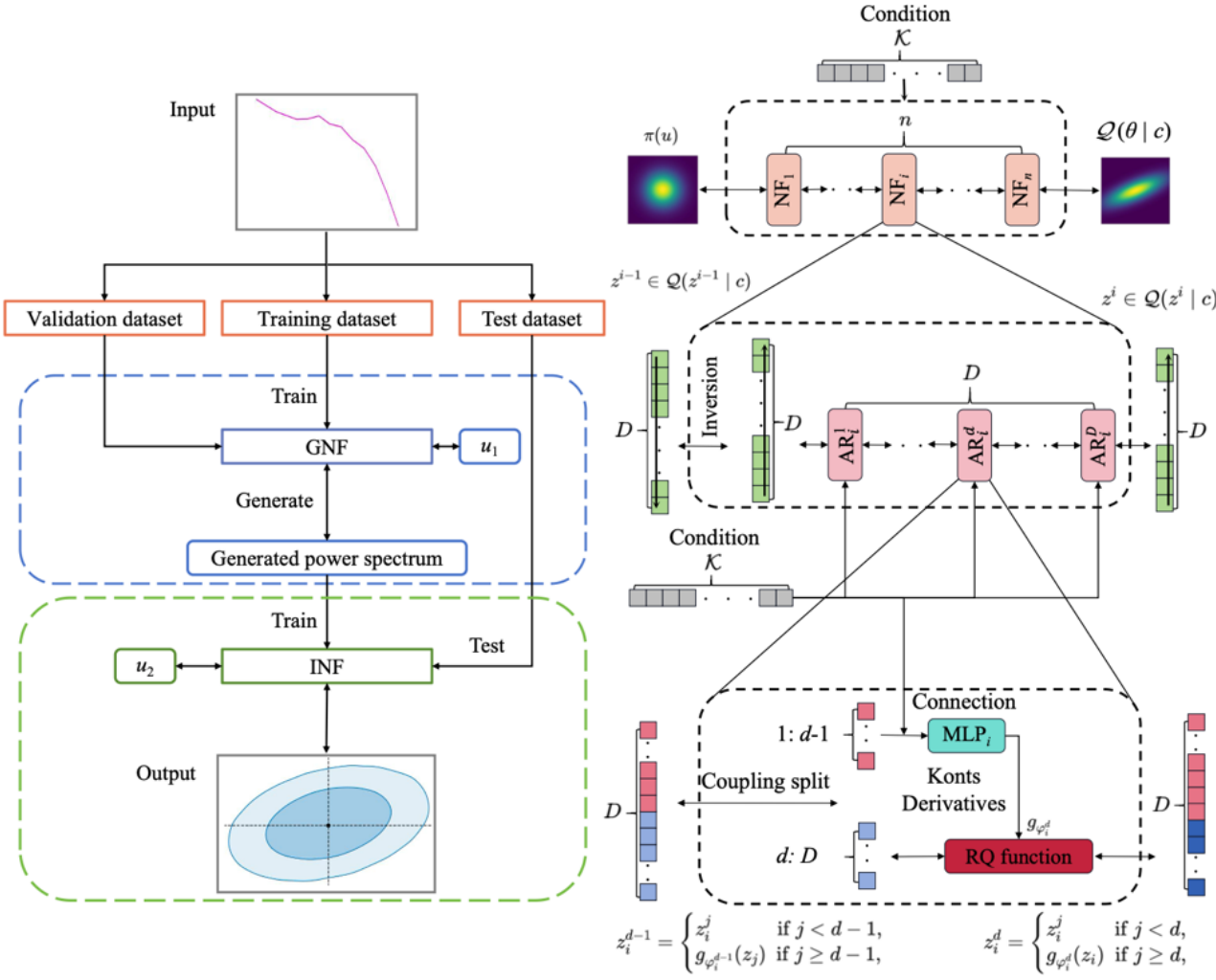
高红移射电噪类星体的观测前景展望



- 拟合超大质量黑洞-暗晕质量关系（红移6）、类星体质量分布（紫外，红移6左右）
- 最终得到射电噪类星体的红移分布，SKA的观测预测
- SKA的一年观测：红移6以上，上千个射电噪类星体，或可用于21厘米森林观测
- 红移9以上（左右）：约20个/年

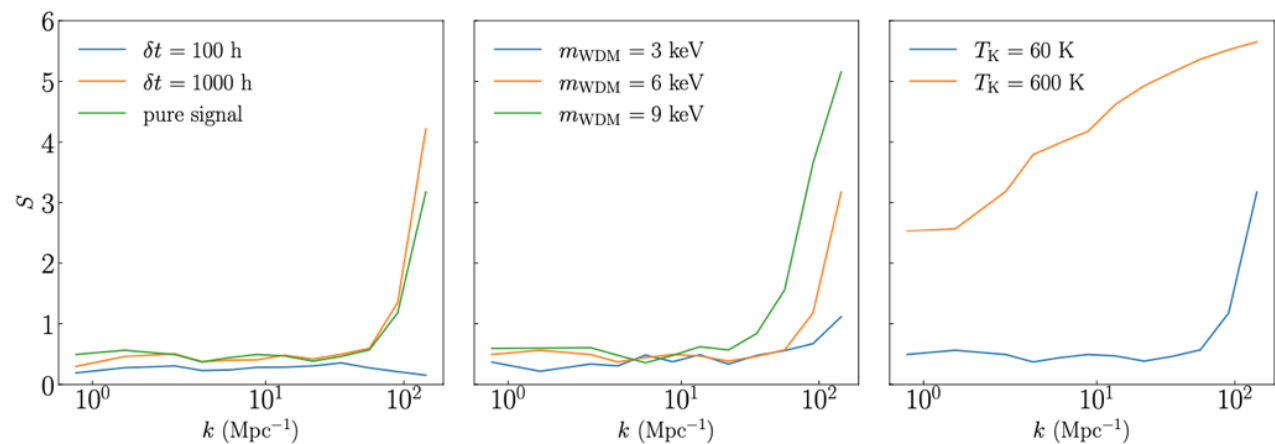
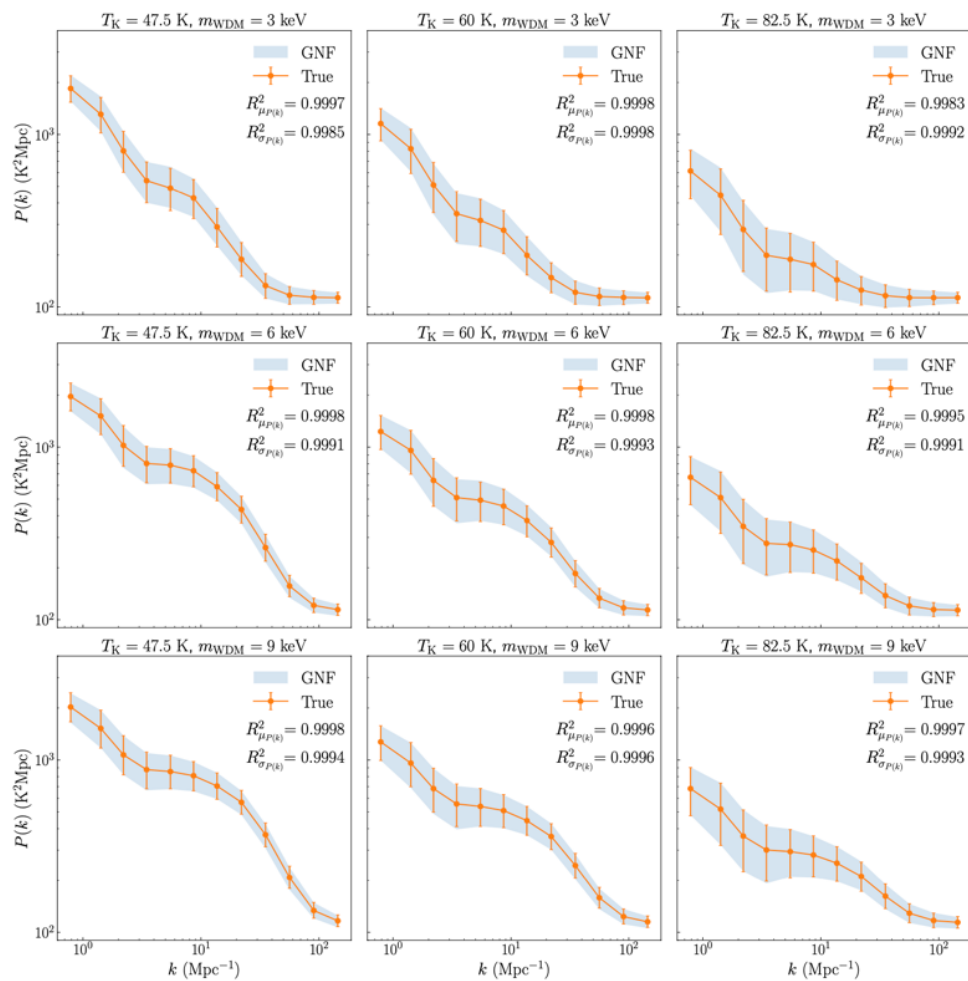
Niu et al. 2024.

基于AI的数据生成与参数推断：解决无解析模型与小尺度非高斯问题



- 无解析模型：一般只能靠超大量数值模拟，在参数空间的每个点都生成一份模拟样本
- 构造似然函数（假设高斯），贝叶斯推断
- 消耗大量计算资源和时间
- 仍有问题：小尺度上功率谱测量的分布具有非高斯性（引力结团的非线性性，辐射的非定域性）
- 贝叶斯推断：失效
- 破解方法：神经网络（归一化流）—— 数据生成，无似然推断
- 生成网络GNF：只需要小模拟样本，生成大量样本
- 推断网络INF：无似然函数，适用于非高斯情况

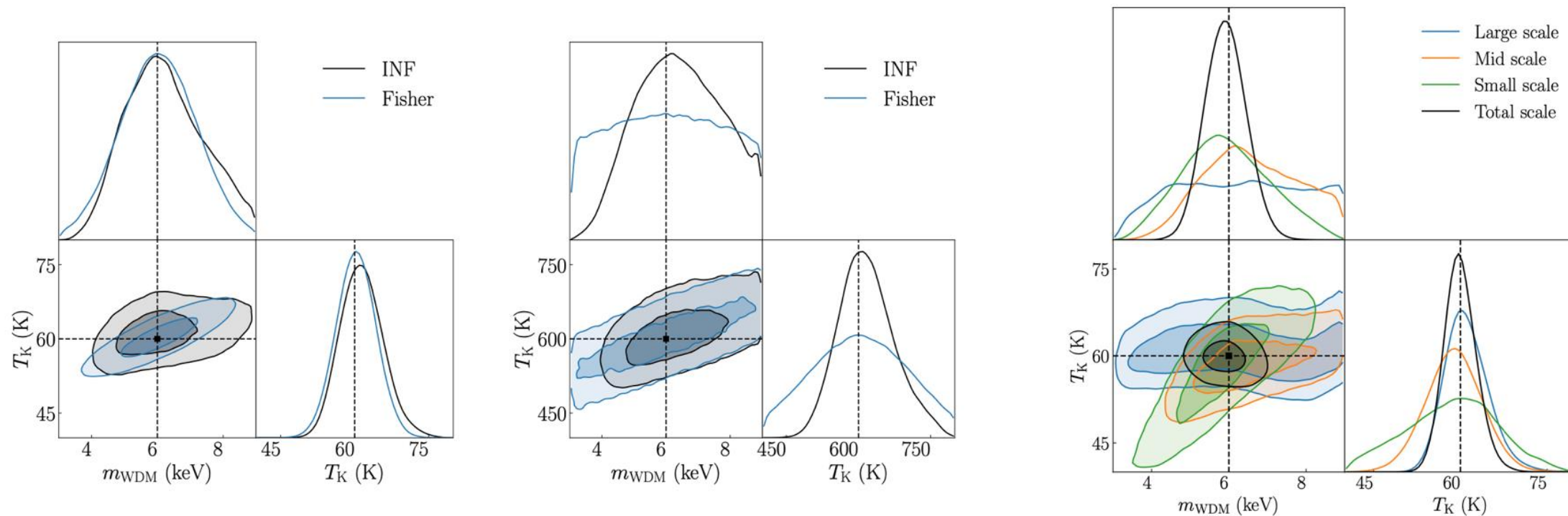
数据生成



Sun et al. 2024

- 数据生成：与模拟样本高度一致
- 偏度参数：小尺度非高斯特性
- 同时解决参数空间非均匀分布问题

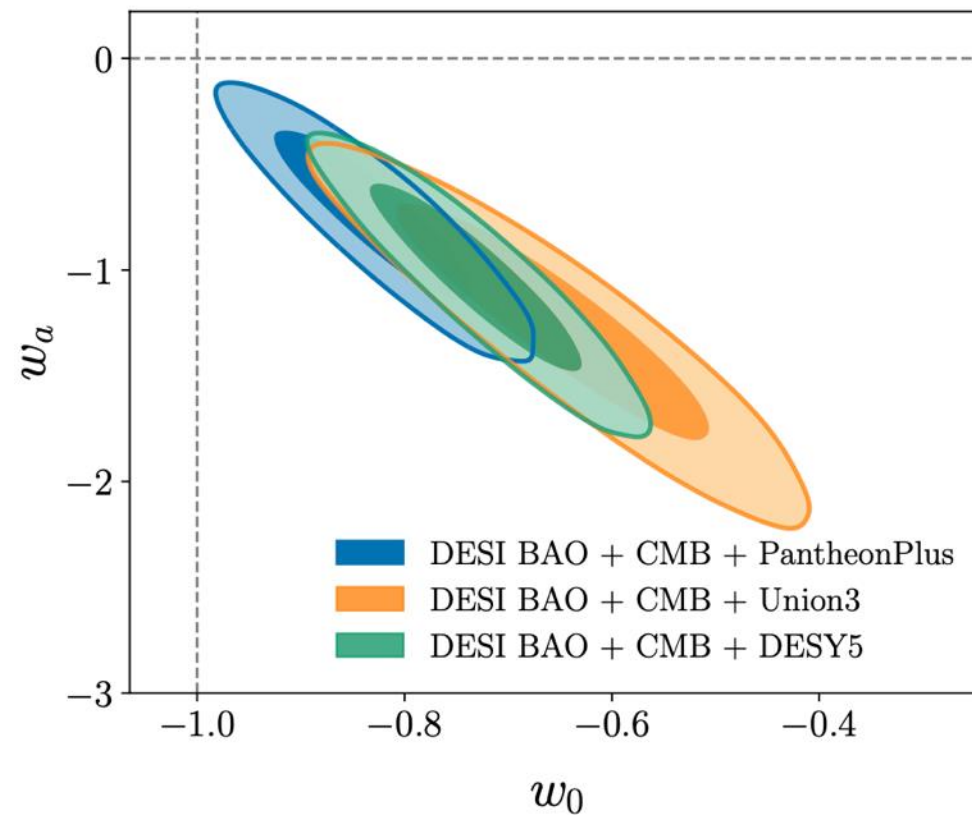
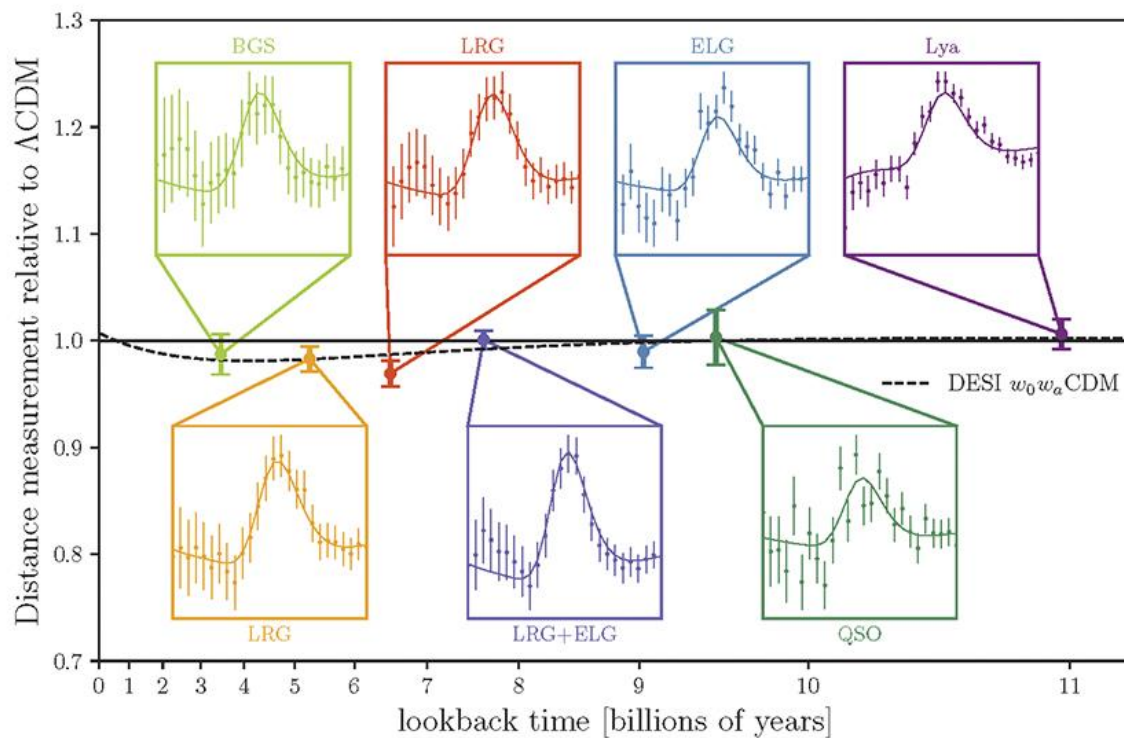
无似然函数参数推断



- 非高斯问题：超大模拟+贝叶斯推断（Fisher矩阵），消耗计算资源，且结果不准
- 深度学习驱动的非似然参数推断方法：完美解决问题

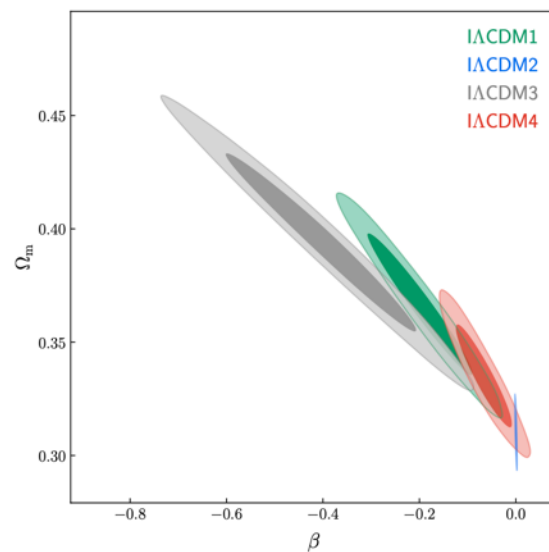
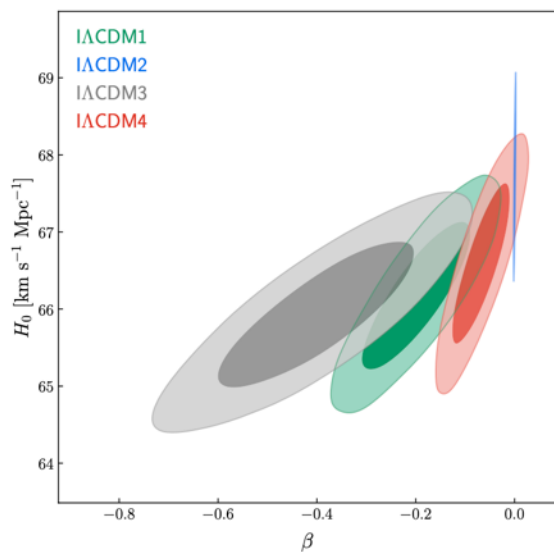
Sun et al. 2024

暗能量：DESI的最新结果



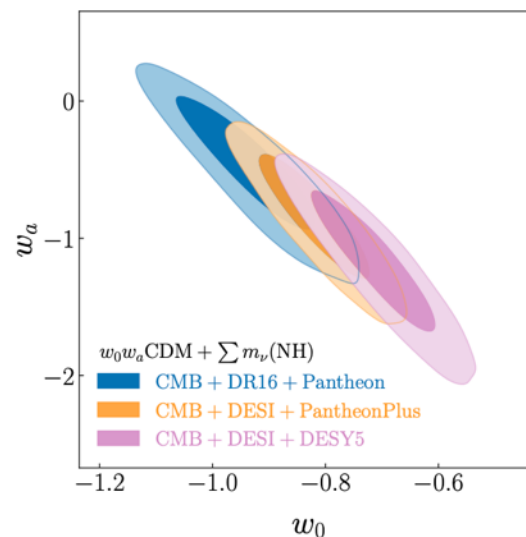
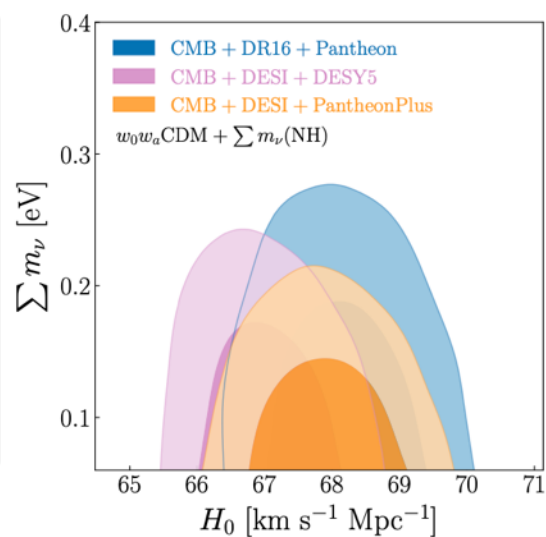
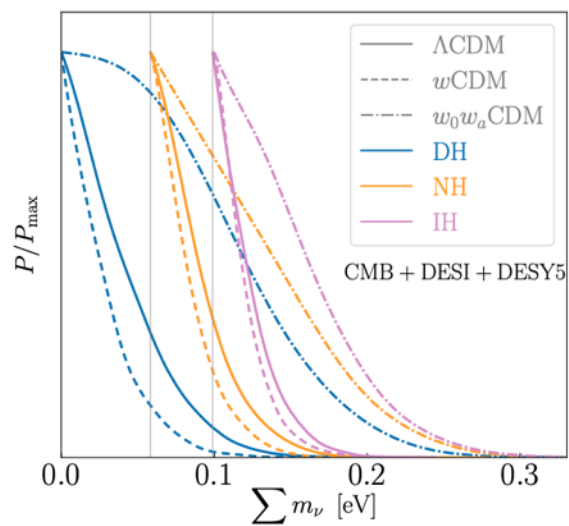
DESI 2024, 2404.03002

- 有偏离 Λ CDM的迹象
- CMB+BAO (DESI)+SN: 最高达 3.9σ (2.5σ , 3.5σ , 3.9σ)



- 探测暗物质与暗能量的相互作用
- 支持暗能量衰变为暗物质，且Q正比于暗能量密度
- CMB+BAO(DESI)+SN: 最高可达3σ

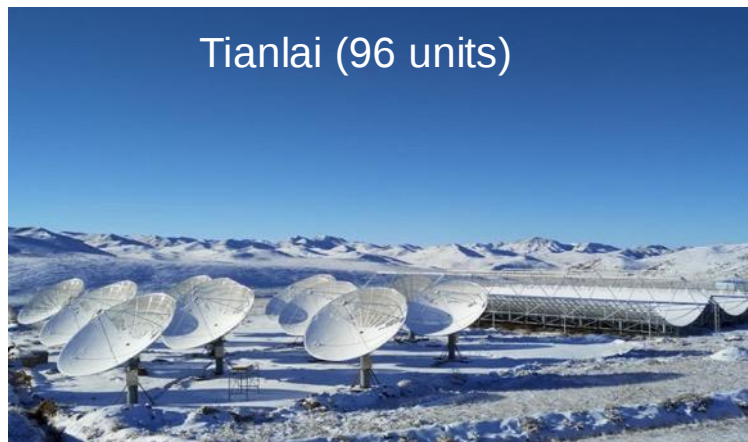
Li, et al., 2024



- 暗能量性质严重影响中微子的宇宙学称重 XZ 2016
- 当前: w 从小于-1变为大于-1, 使得中微子质量上限显著提高
- CMB+BAO(DESI)+SN: 上限从 0.13 eV变为0.2 eV (正排序)

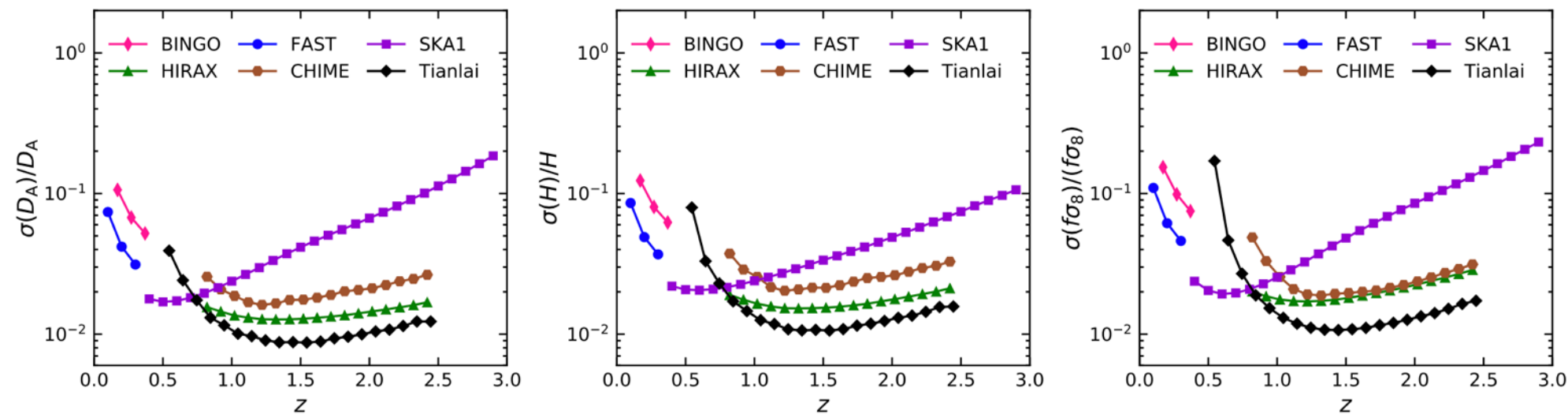
Du, et al., 2024

中性氢强度映射巡天实验：暗能量射电探测



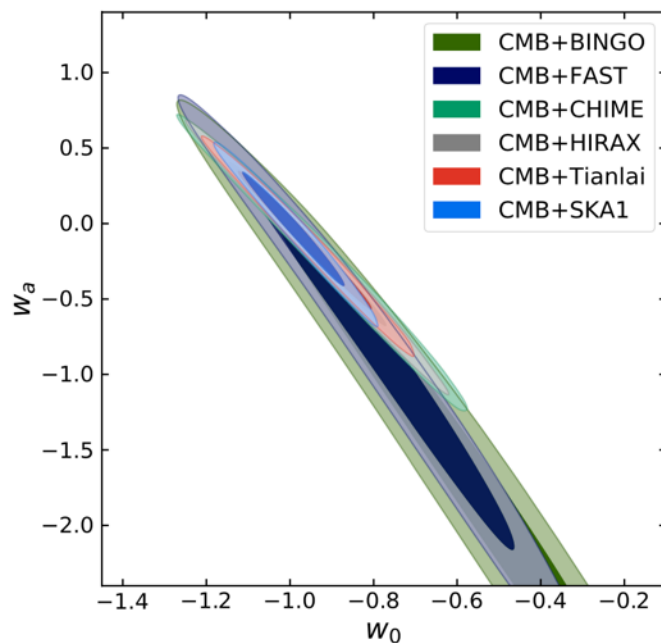
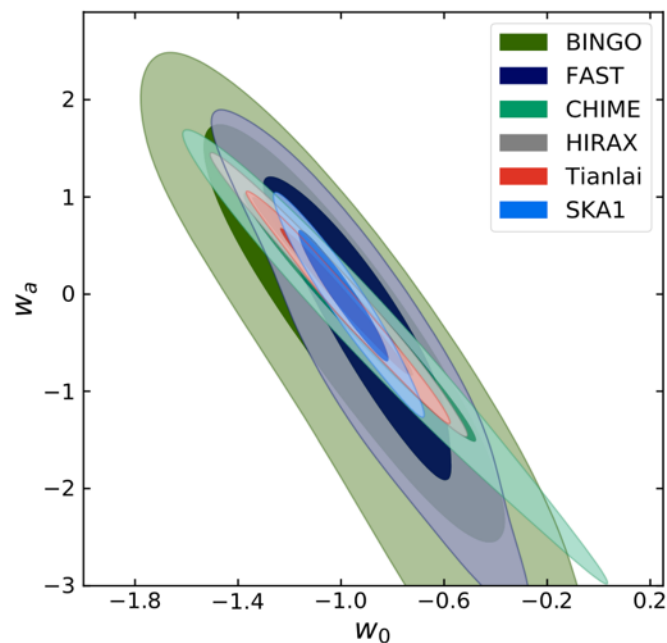
- 已运行或在建，强度映射实验均刚起步
- 在暗能量测量方面能力如何？

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_{area} [deg ²]	3000	20000	20000	15000	20000	20000
t_{tot} [h]	10000	10000	10000	10000	10000	10000
T_{rec} [K]	50	20	Eq. (2.13)	50	50	50



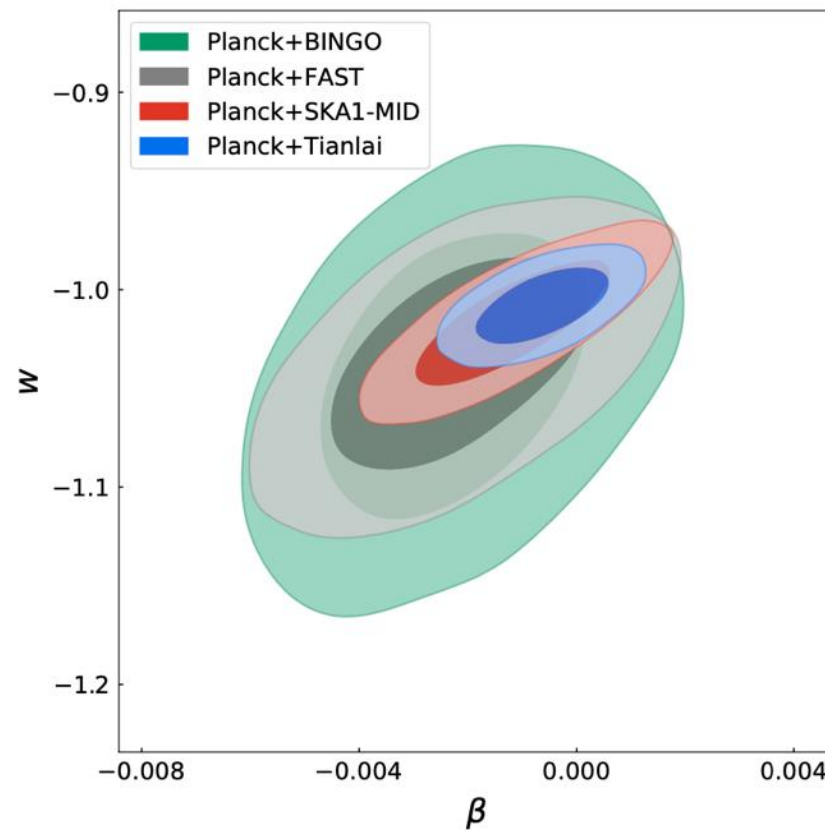
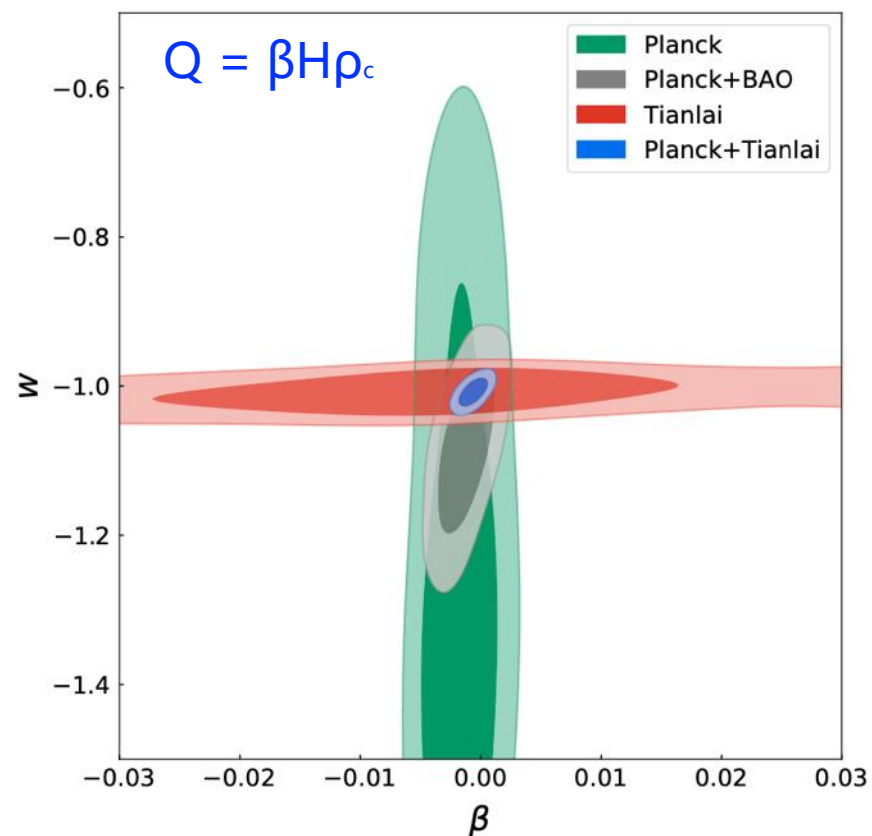
- Tianlai: $\sigma(w) = 0.024$
- SKA1: $\sigma(w) = 0.032$
- CMB+Tianlai: $\sigma(w) = 0.014$
- CMB+SKA1: $\sigma(w) = 0.013$
- Tianlai: $\sigma(w_0)=0.16, \sigma(w_a)=0.47$
- SKA1: $\sigma(w_0)=0.11, \sigma(w_a)=0.42$
- CMB+SKA1: $\sigma(w_0)=0.08, \sigma(w_a)=0.25$
- CMB+Tianlai: $\sigma(w_0)=0.11,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

Wu & XZ, JCAP 2022

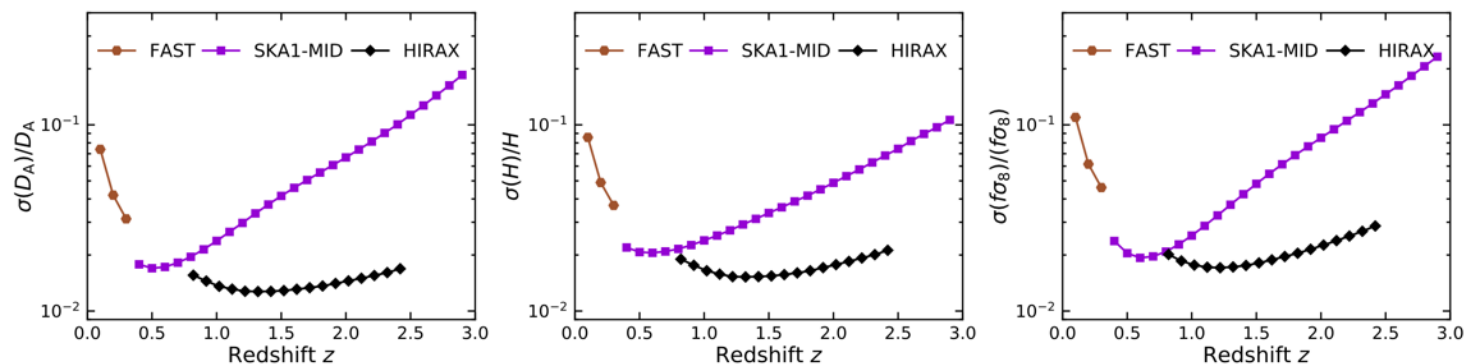
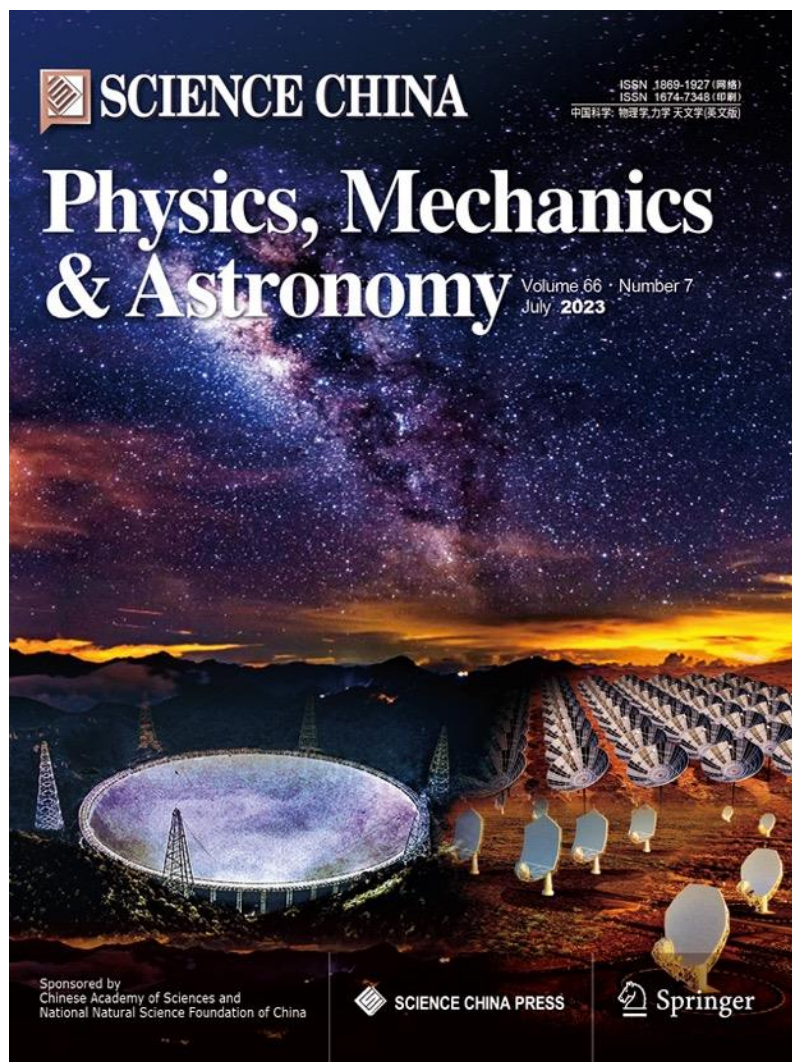
- 限制暗能量状态方程
- 21厘米单独: w 精度可达2.5-3% (SKA1-Mid、天籁-全)
- 联合CMB: w 精度约1.5%
- SKA1-Mid在 $0.35 < z < 0.77$ 的优势有利于测量暗能量演化 (对 w_0 和 w_a 限制最紧)
- 联合CMB: w_0 和 w_a , 与CBS相当
- 作为晚期探针, 中性氢巡天在暗能量精确测量方面将发挥重要作用

测量相互作用暗能量的策略

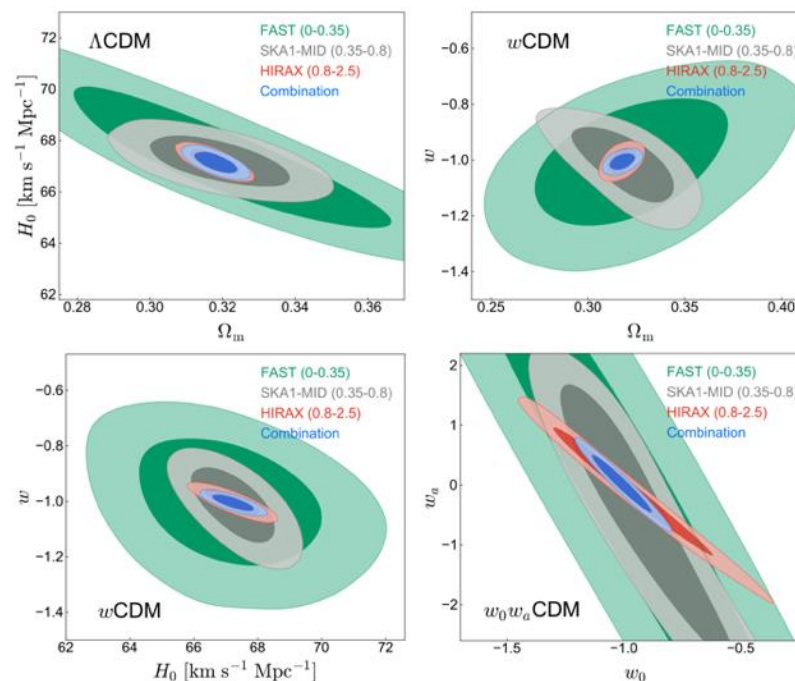
- 中性氢巡天可在晚期宇宙精确测量暗能量EOS，因此可在IDE ($Q = \beta H\rho_c$) 测量方面发挥重要作用
- 与CMB互补性：CMB-alone可精确测量 β ，中性氢巡天可精确测量 w



中性氢巡天实验的互补性：联合巡天策略



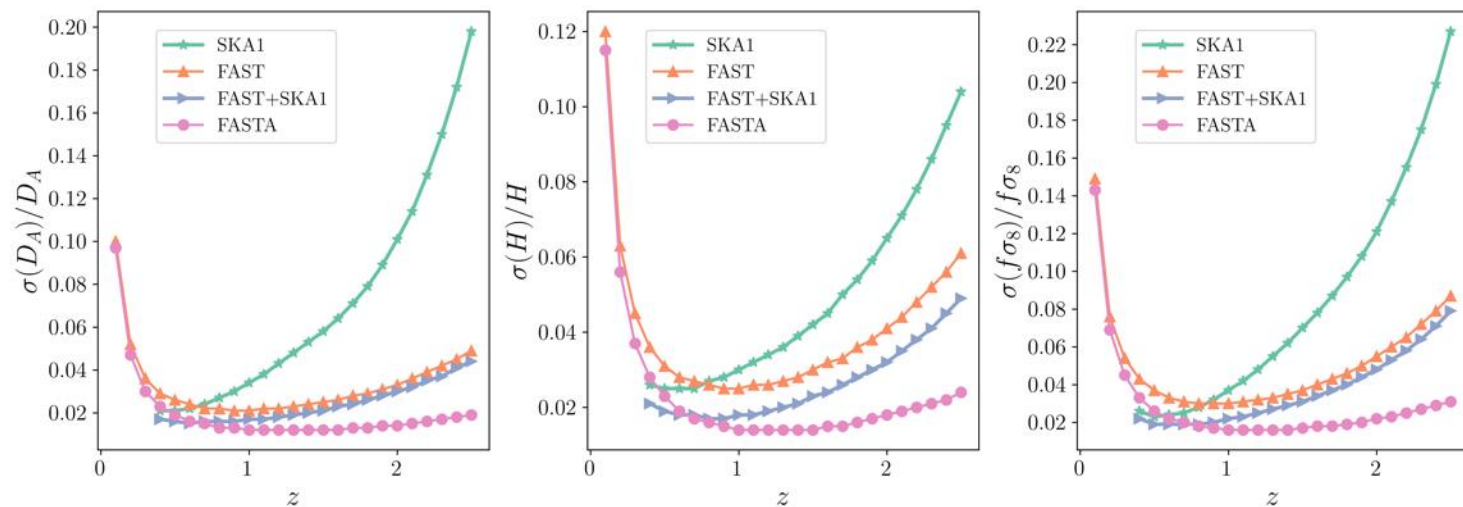
Wu et al. SCPMA 2023



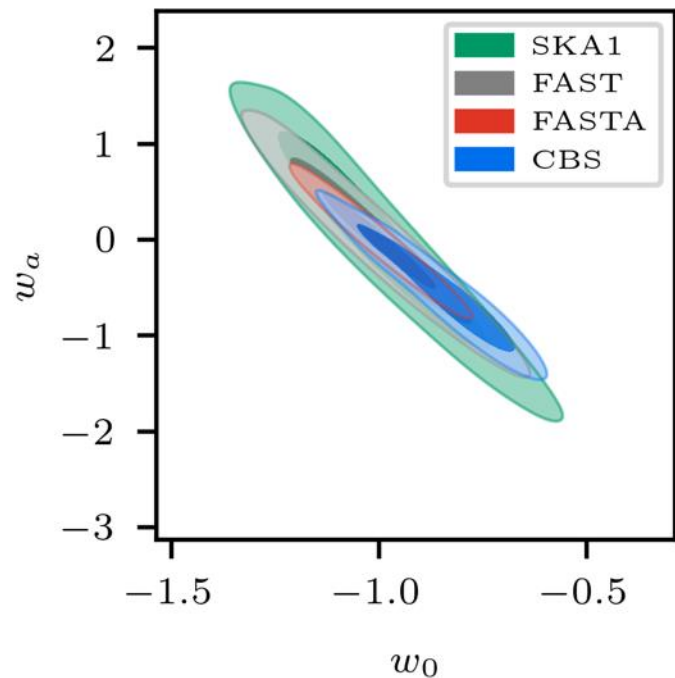
- 能力互补，可各自发挥所长，节约巡天时间
- 对 w 的限制好于CBS (0.019 vs 0.033)
- 对 w_0 和 w_a 的限制与CBS相当
- 联合巡天策略：（当代）21厘米单独即可成为强大的宇宙学工具
- 21厘米与其他观测联合：有望实现晚期宇宙精确探针

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

如果扩展FAST的接收机

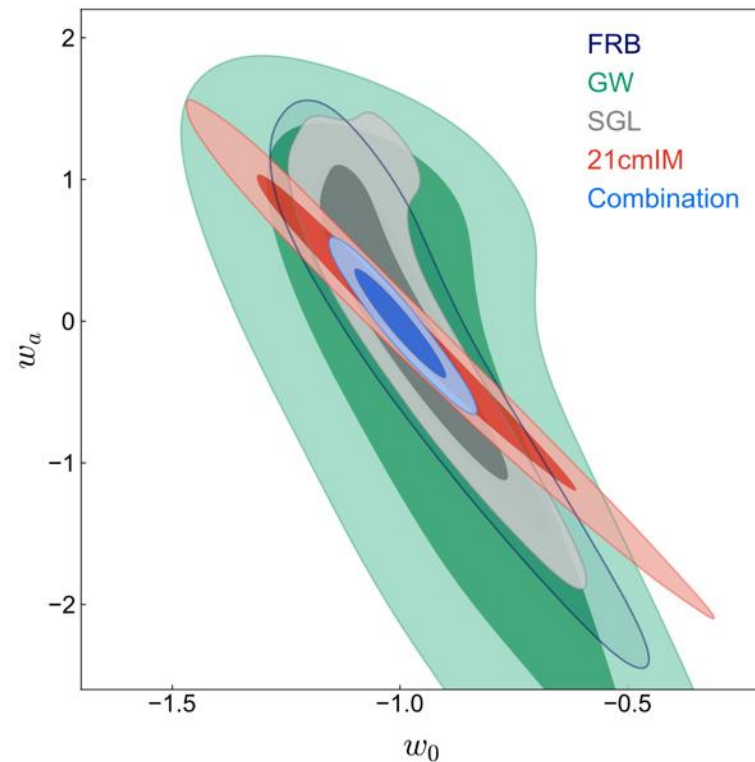
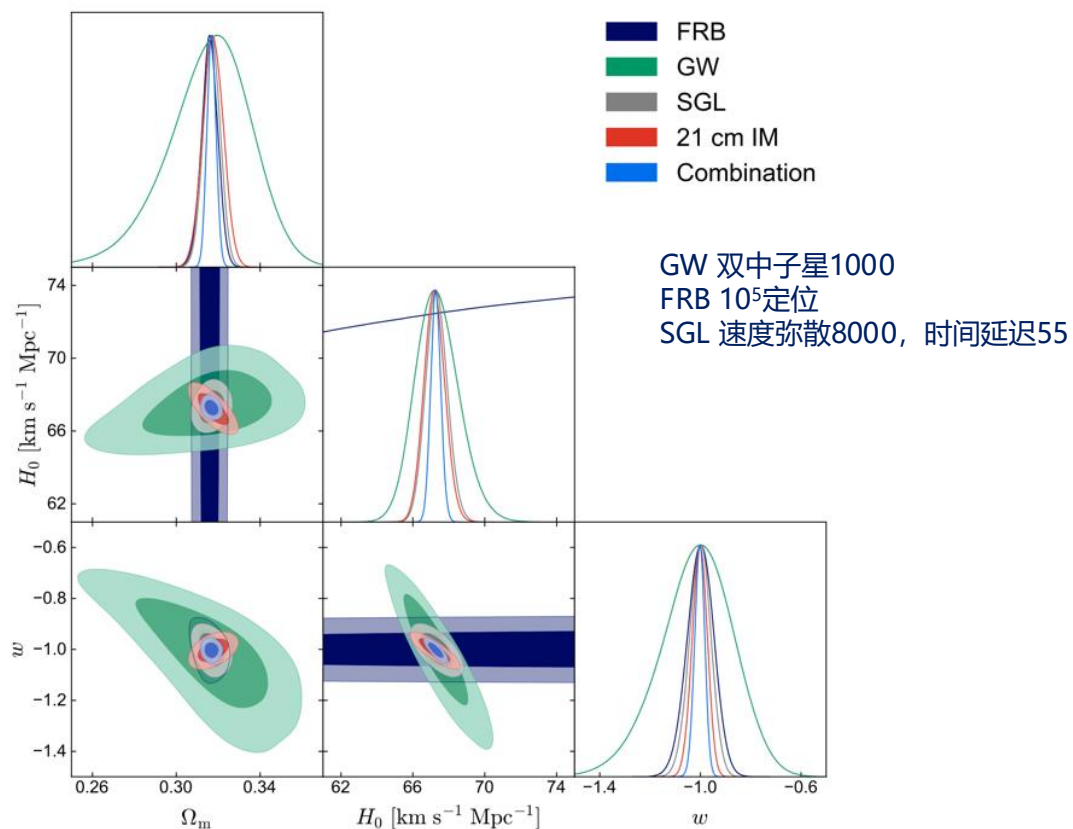


Pan et al. 2024



- SKA的碟子太小，高红移分辨率太低，所以高红移测量太差
- FAST更适合高红移测量，如果更换宽频接收机，高红移测量将比SKA好得多
- FAST视场小，扫描巡天慢，可以多造几个。。。
- 预期单独使用FASTA中性氢巡天，限制暗能量就比CBS更好
- FAST中性氢强度映射巡天实验目前的进展情况

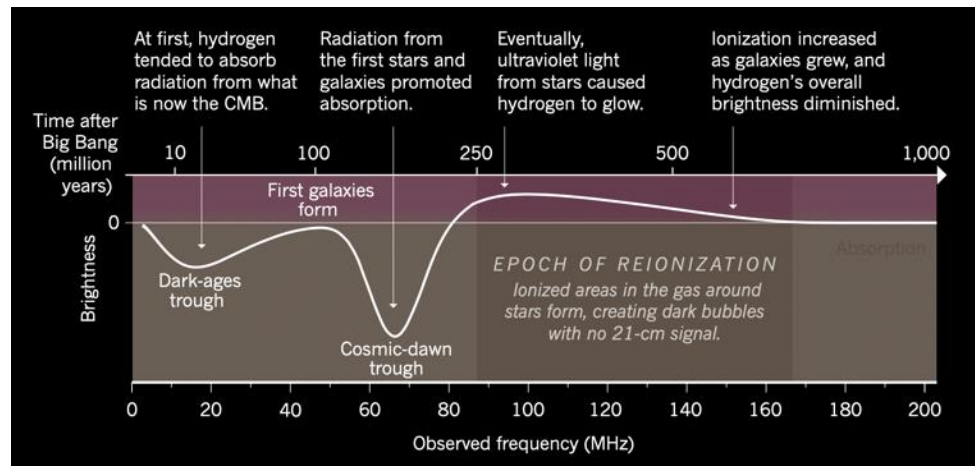
综合打造探索晚期宇宙精确探针



Wu et al. JCAP 2023

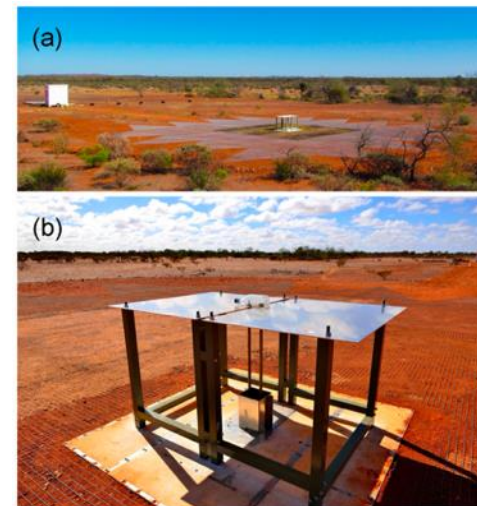
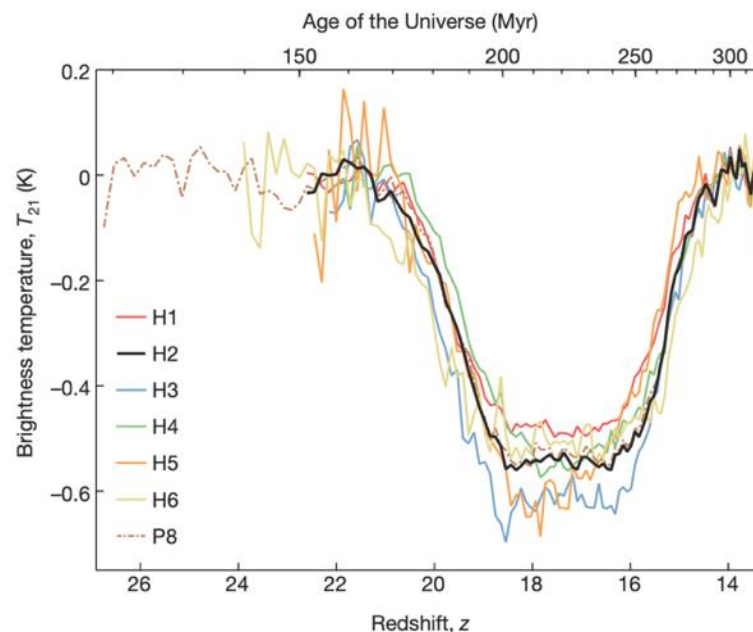
- 独立于CMB，仅用晚期宇宙观测，实现宇宙学参数精确测量
- 测量 H_0 达0.2%，测量暗能量 w 达2% (w_0 精度6.6%， w_a 误差0.25)，优于CBS
- 21厘米观测在联合限制中发挥主导性作用

21厘米宇宙学信号的探测：低频探测

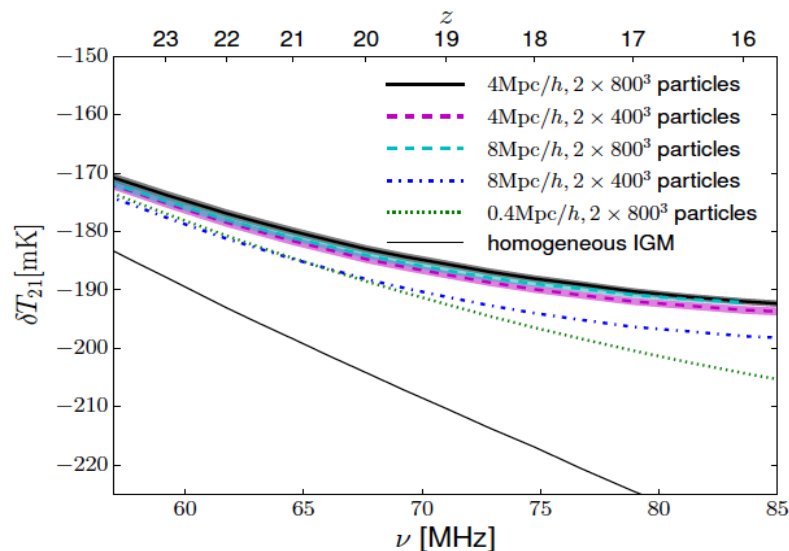


- 2018年，EDGES实验宣称探测到宇宙黎明信号
- 吸收深度远超预期，引起很多理论解释以及质疑
- 2022年，SARAS3实验：否定EDGES实验的结果

Singh et al. NA 2022



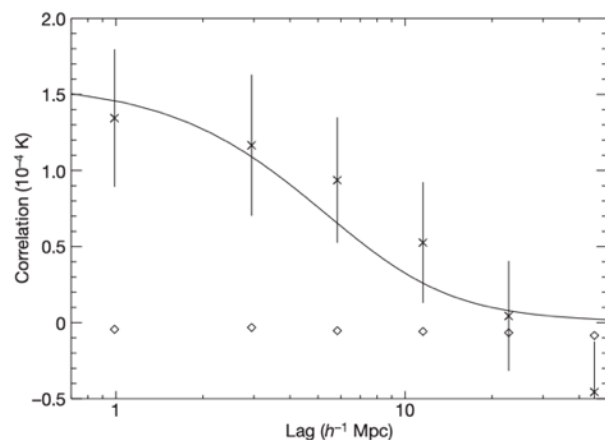
Bowman et al. Nature 2018



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

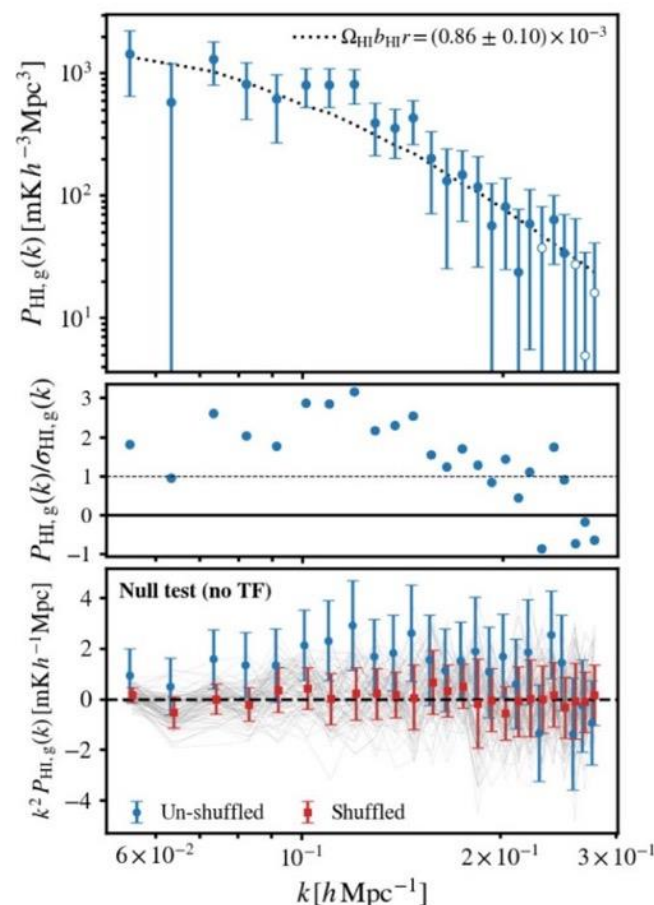
中性氢强度映射的实际观测



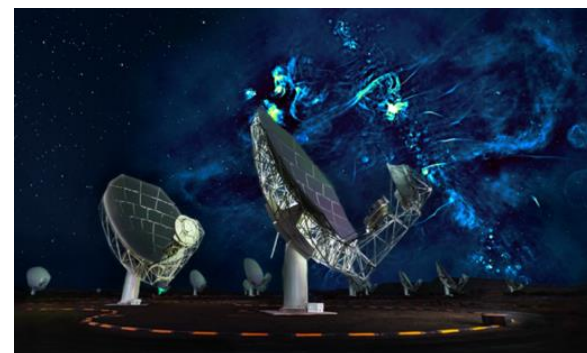
Chang et al. Nature 2010



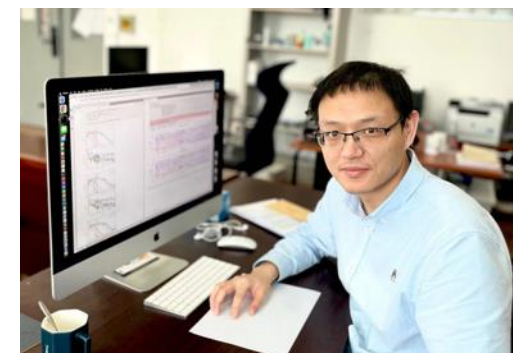
绿岸 GBT



Cunnington, LiYC, et al. MNRAS 2023



MeerKAT



李毅超 副教授
东北大学

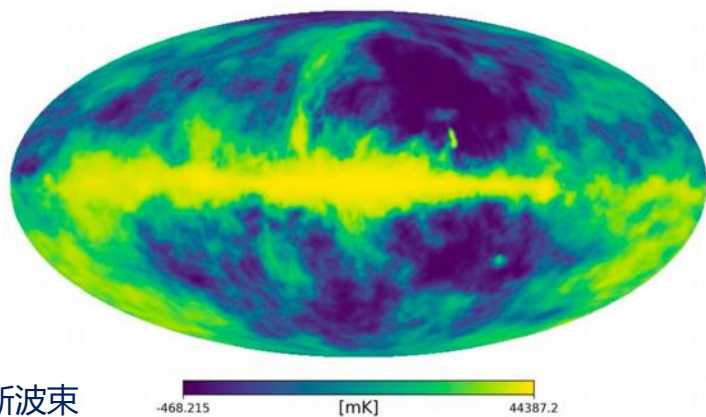
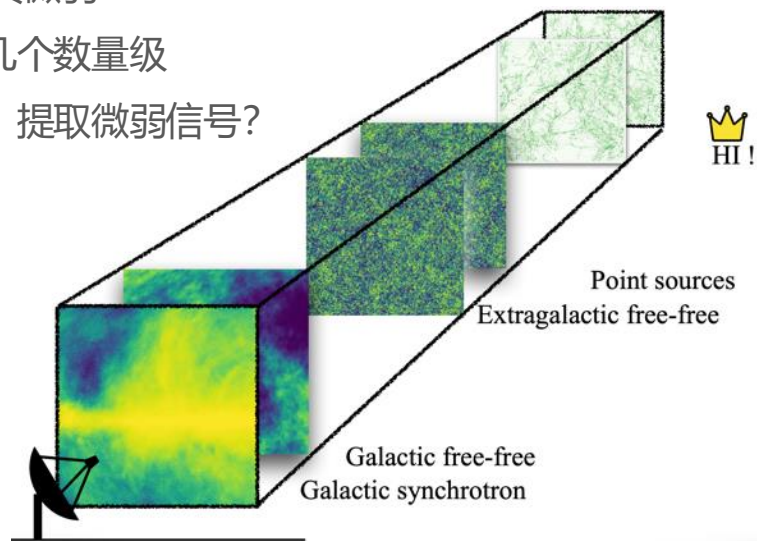
- 21厘米强度映射自相关信号（宇宙学）尚未被探测到
- 已有一些实验探测到了中性氢和光学巡天的互相关功率谱
- 最强探测（李毅超主导的工作）：MeerKAT（10.5小时）与星系（WiggleZ）互相关，7.7倍标准偏差统计显著性
- 自相关功率谱探测，任重道远，仍需持续努力

前景污染

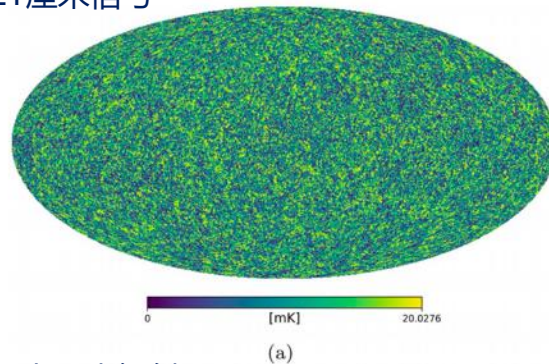
21厘米信号极其微弱

前景明亮，强几个数量级

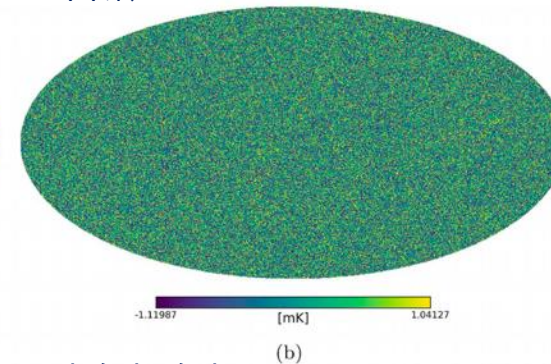
如何移除前景，提取微弱信号？



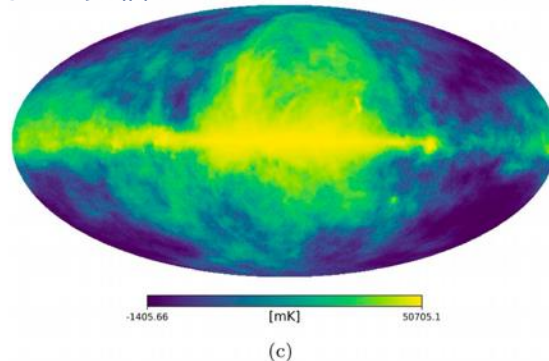
21厘米信号



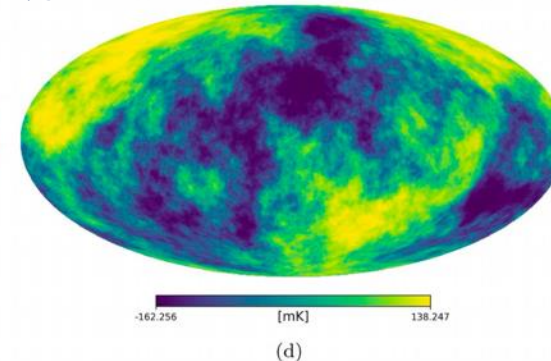
白噪声



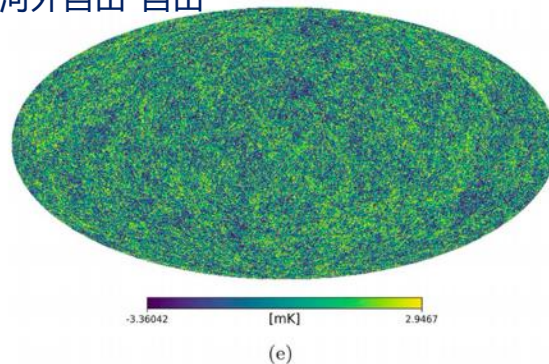
河内同步辐射



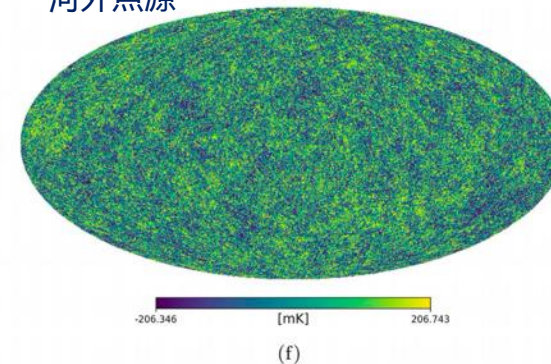
河内自由-自由



河外自由-自由



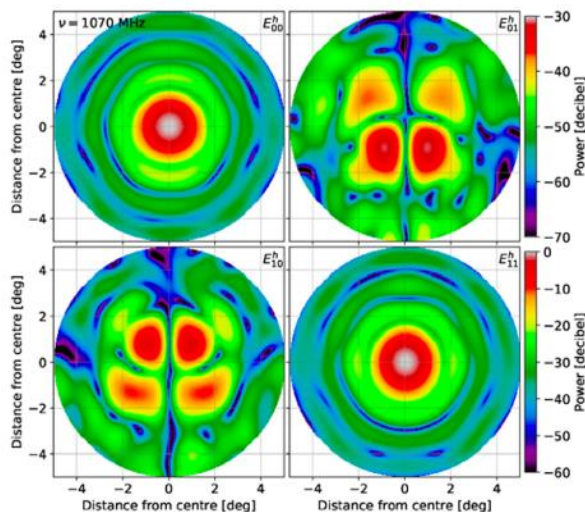
河外点源



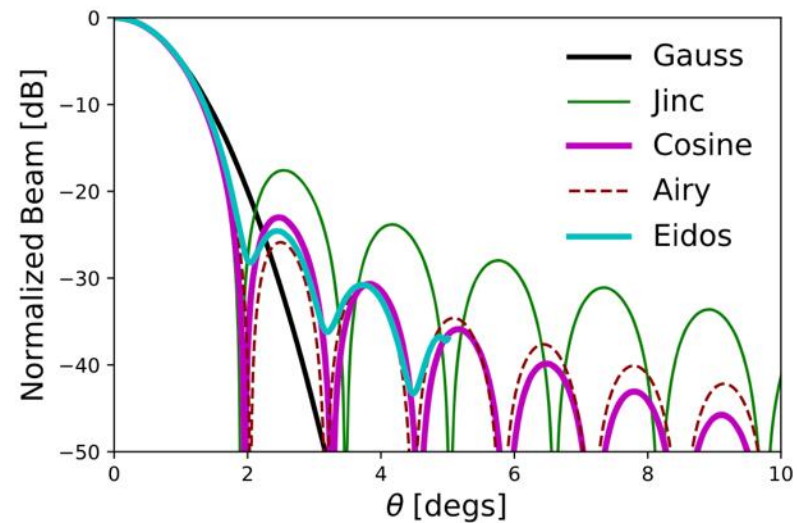
前景减除：当遇上系统效应



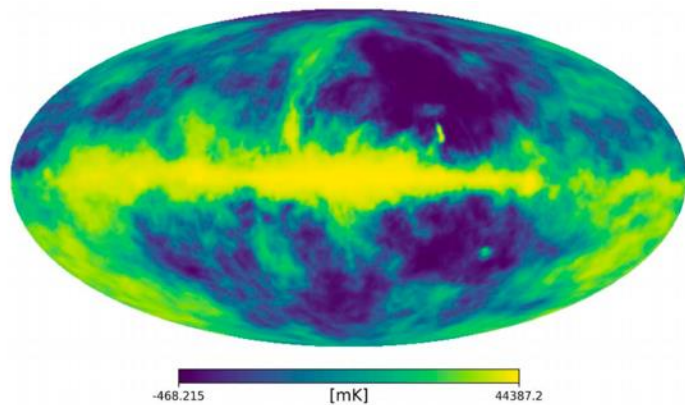
MeerKAT



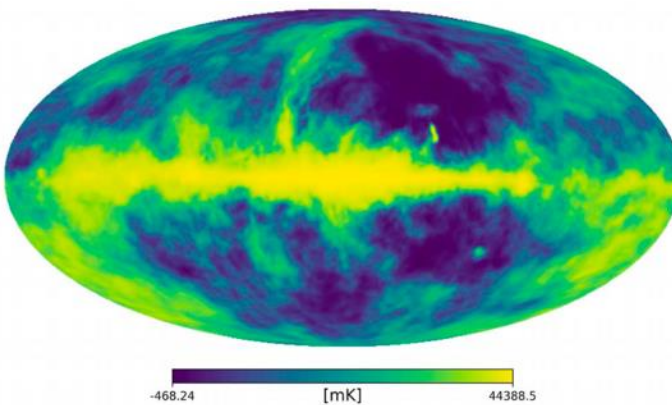
Asad et al. MNRAS 2021



Matshawule et al. MNRAS 2021



卷积标准高斯波束天图

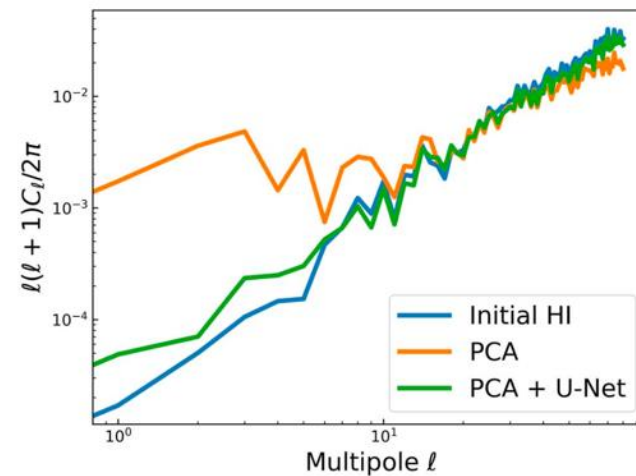
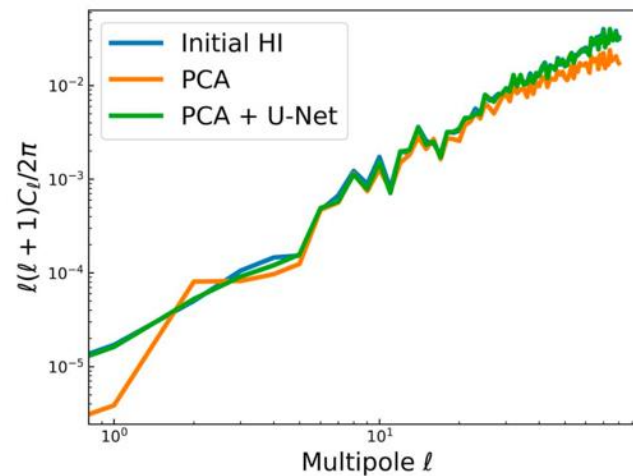
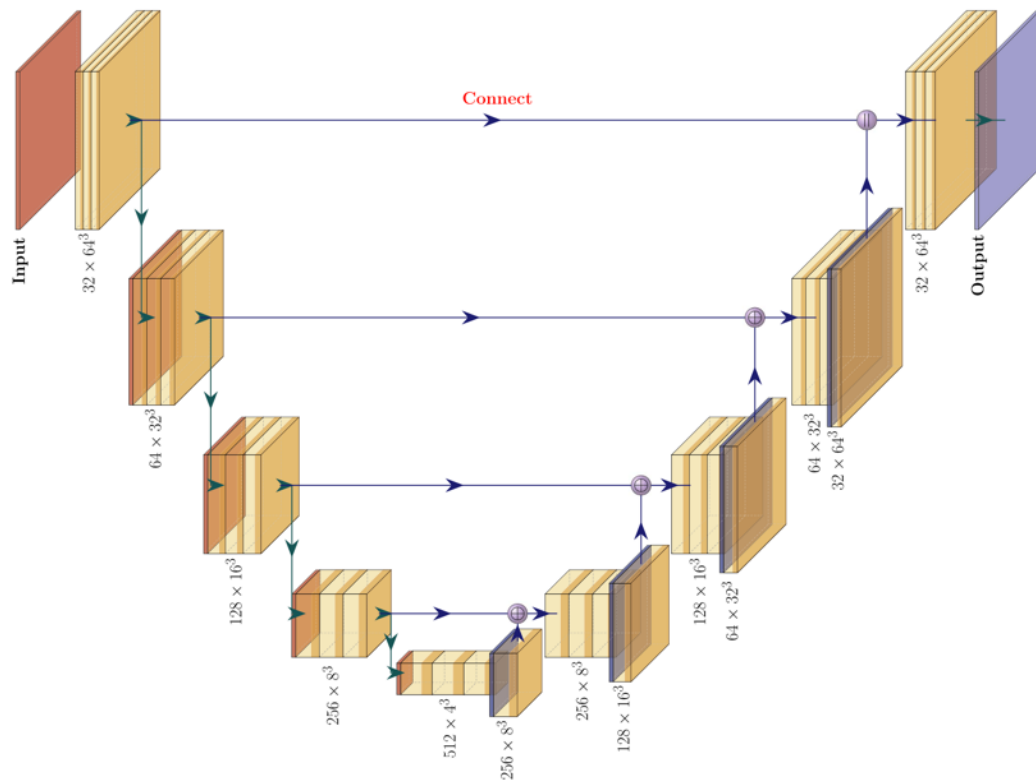


卷积真实波束天图

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

- 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

深度学习：有效消除系统效应

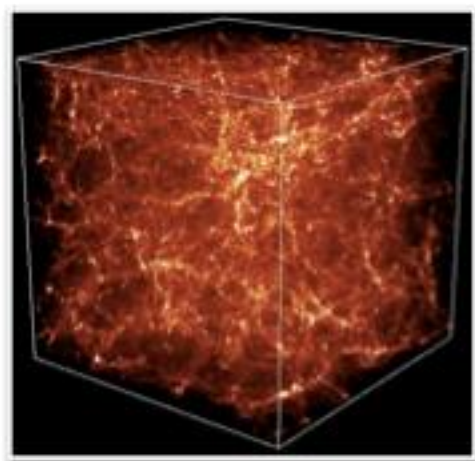
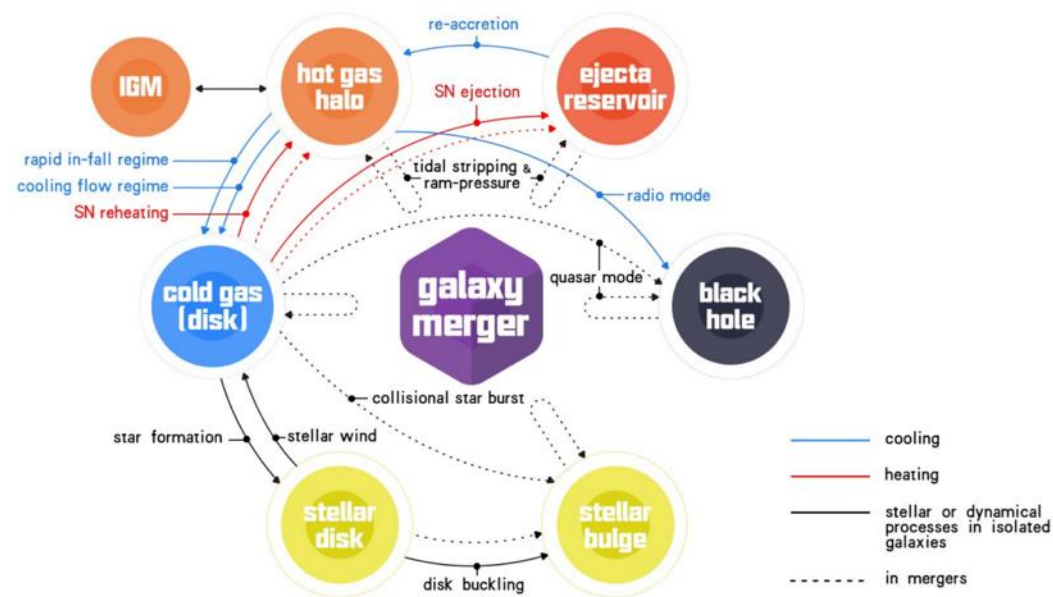


Ni et al. ApJ 2022

- 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%

中性氢巡天：宇宙学模拟

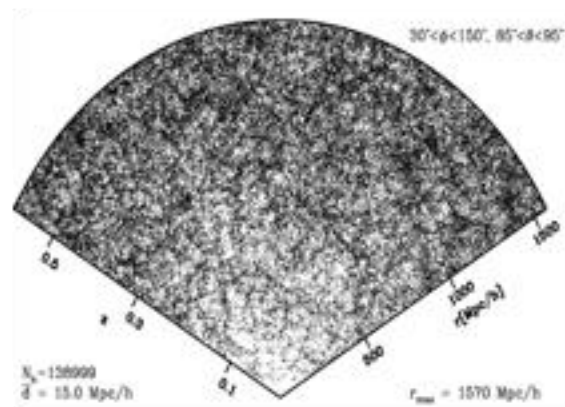
- 宇宙学参数估计：Fisher矩阵方法过于理想
- 前景残余和系统效应对宇宙学参数测量的影响？
- 仿真模拟不充分：缺乏适用于中性氢宇宙学研究的大尺度、高精度模拟样本
- 下一步目标：从超大规模模拟到宇宙学参数测量
- 实现端到端宇宙学模拟，为真正数据处理和宇宙学研究做好准备



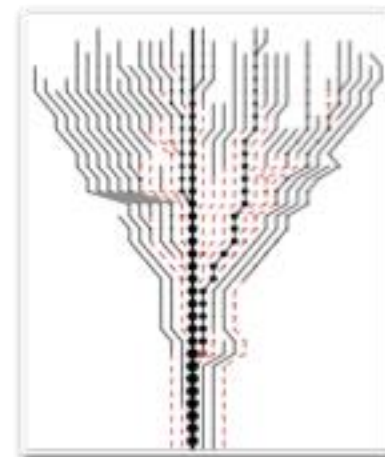
时间切片



暗物质晕表



光锥



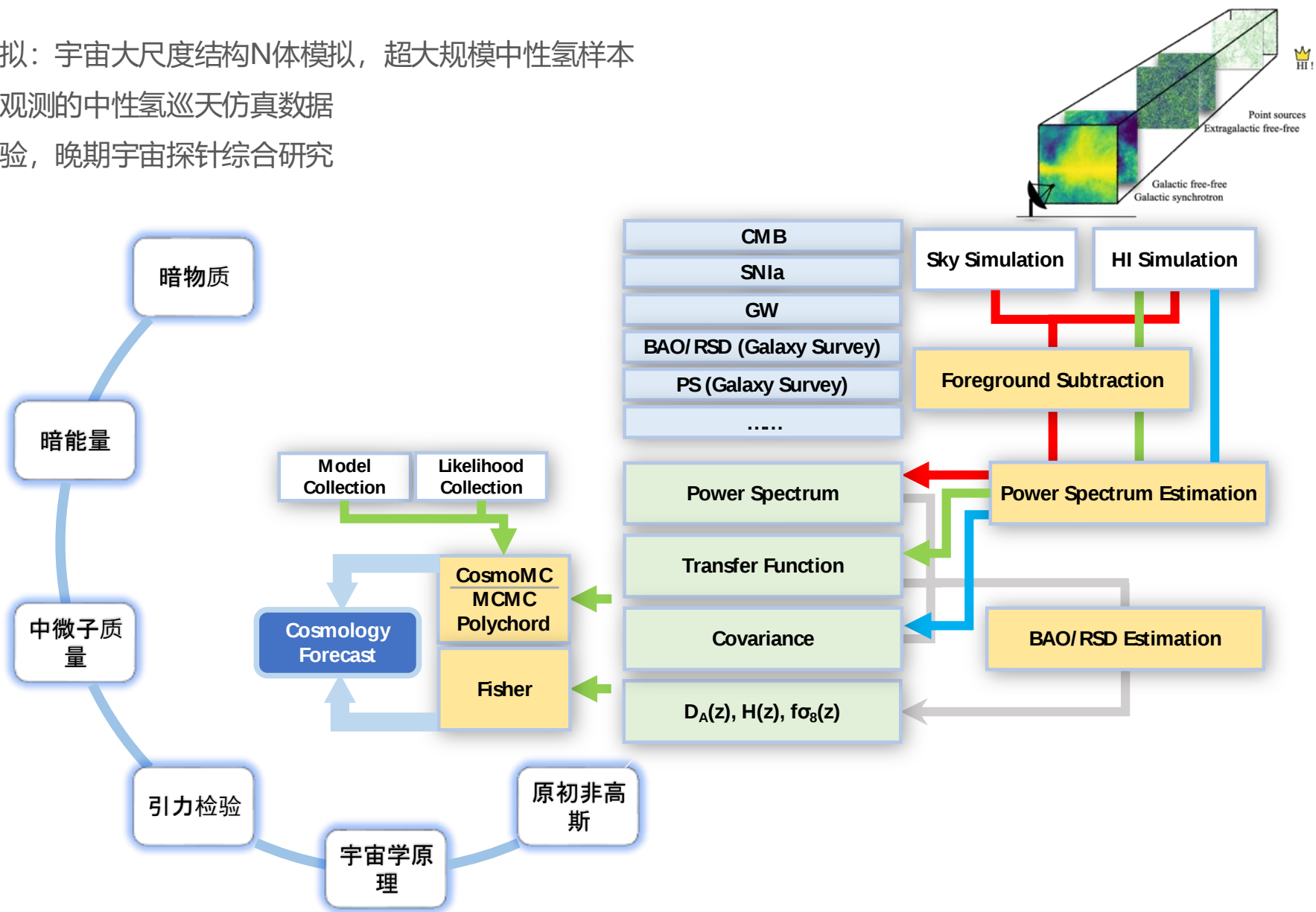
并合树

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



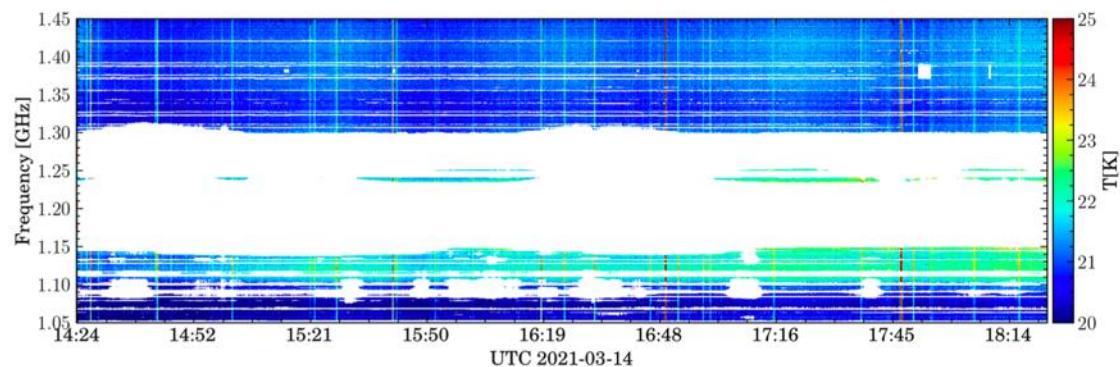
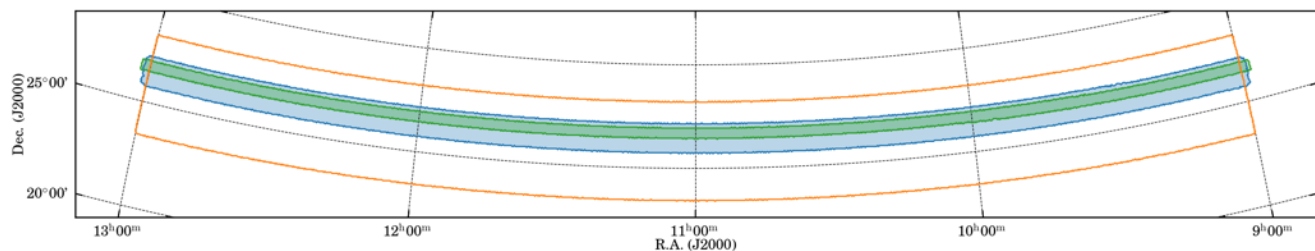
中国天眼：中性氢强度映射巡天

主要科学目标：

脉冲星（快速射电暴）

中性氢

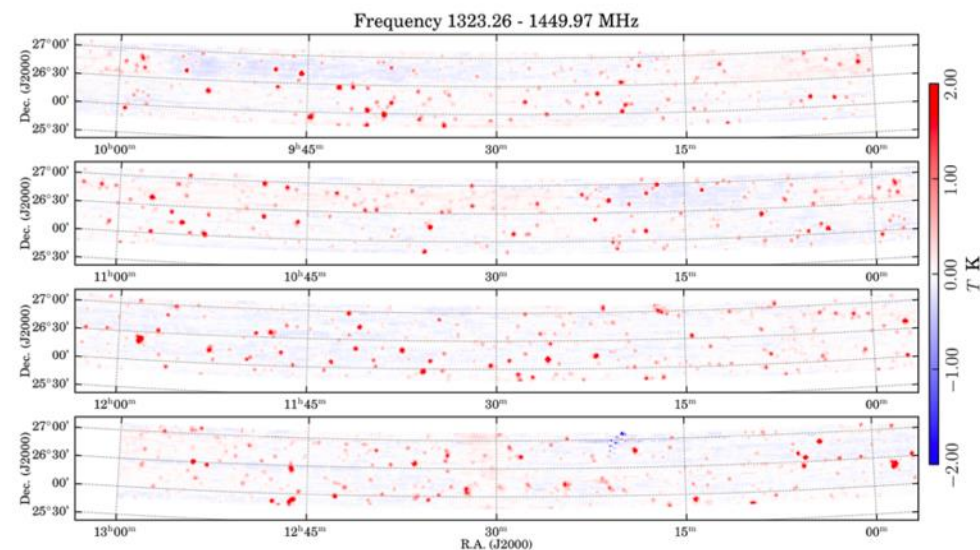
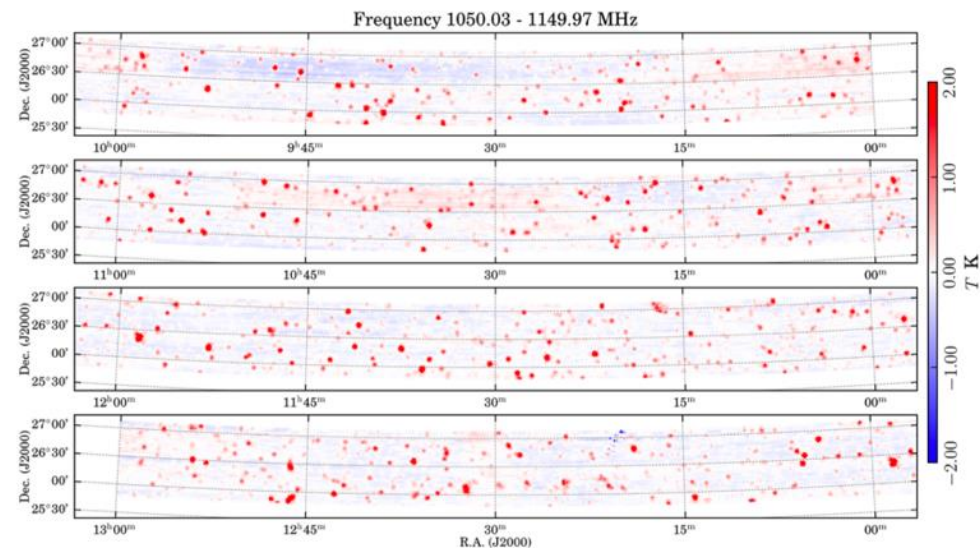
世界上最大、最灵敏单口径射电望远镜
2020年通过国家验收
2021年向全世界开放



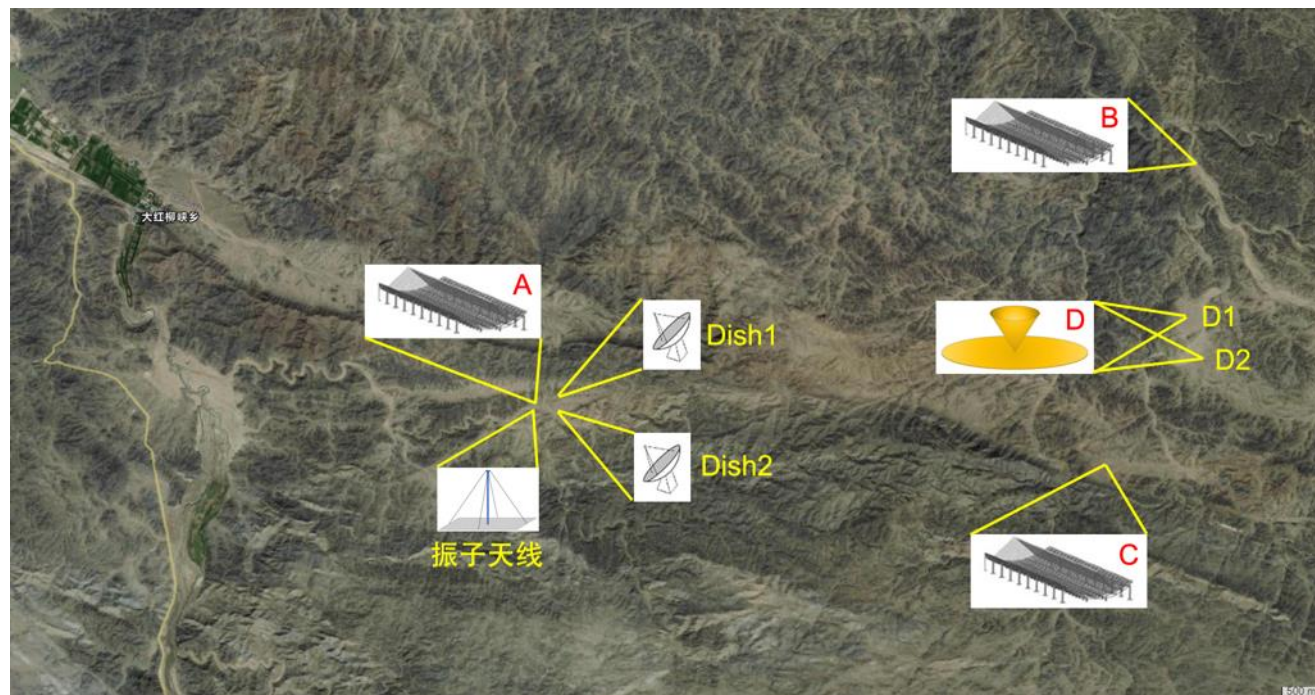
Li et al. ApJ 2023

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) **里程碑**

- 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



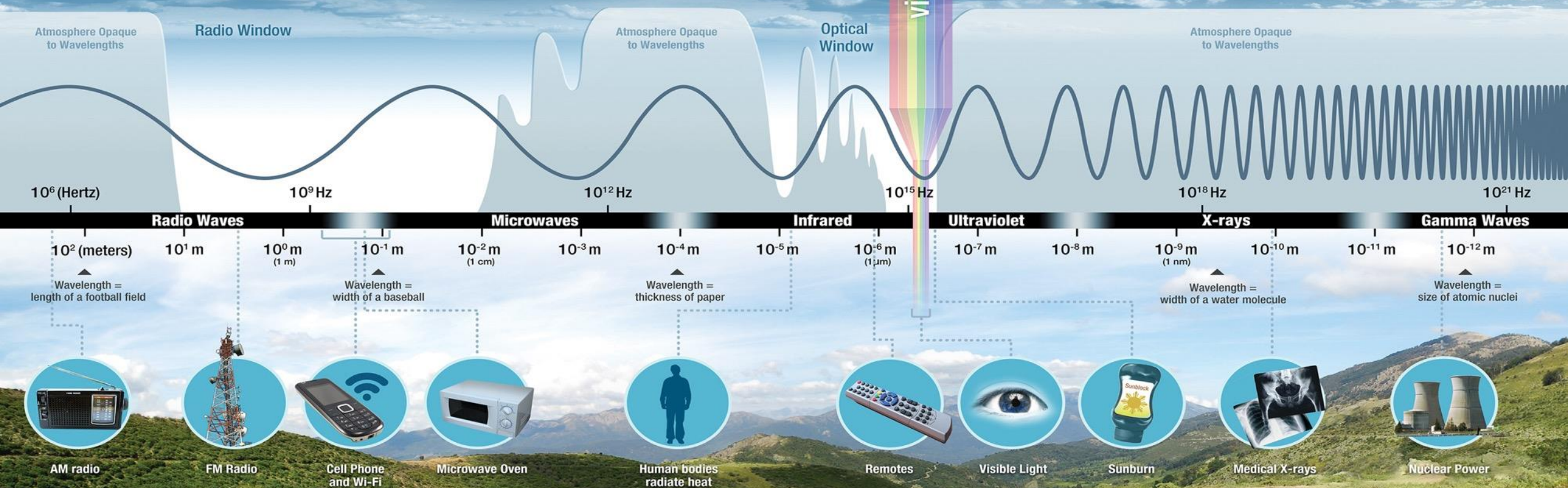
- 天籁计划（新疆巴里坤县红柳峡乡）：3个柱面天线（15米宽，40米长，96个双极化接收单元），16个碟形天线（6米）
- 中性氢巡天：暗能量射电探测
- 快速射电暴探测：灵敏度低，密集阵分辨率低
- 需要扩展：建设长基线阵

建设“多波束巡天射电望远镜阵列”（新疆）

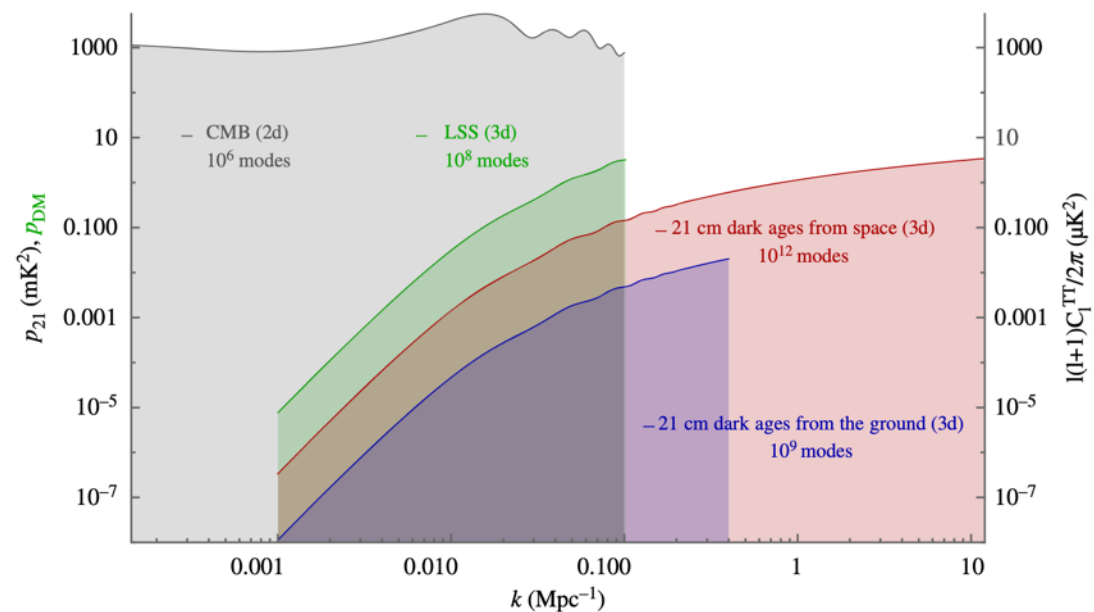
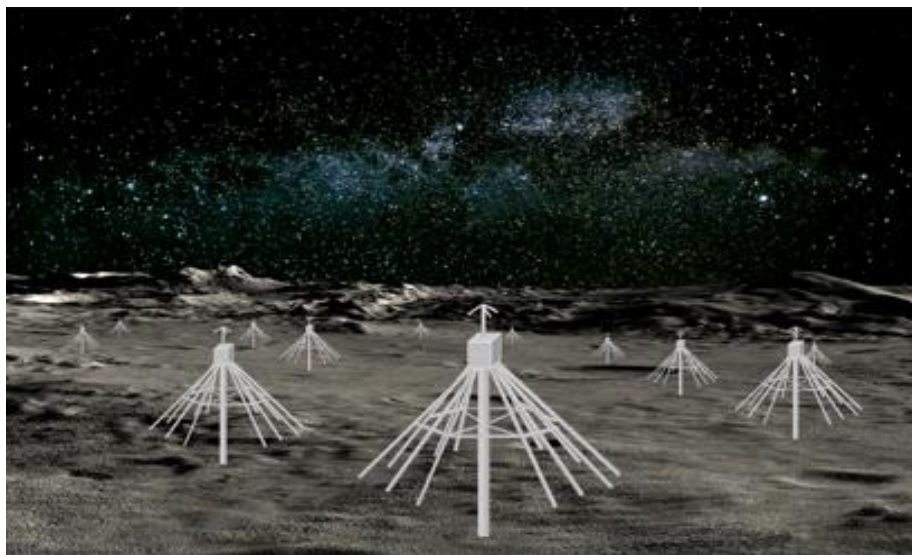


- 依托辽宁省宇宙学与天体物理重点实验室（东北大学）建设辽宁省首个天文观测设施
- 东北大学斥资424万元（项目负责人张鑫），与国家天文台联合建设
- 2023年初开工建设，建设期1年半，计划2024年完工并投入科学运行
- 拟作为“天籁计划”二期（长基线），与一期联合，对FRB搜寻并定位，以及开展中性氢巡天观测

大气不透明度



宇宙学的极限：月球背面的低频射电阵列



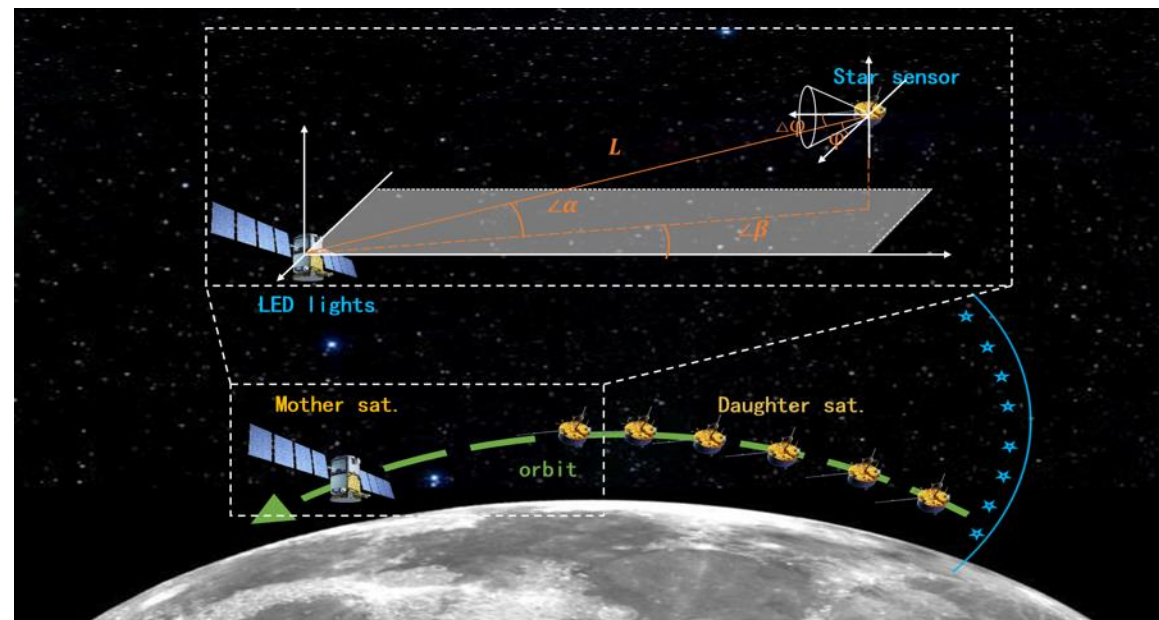
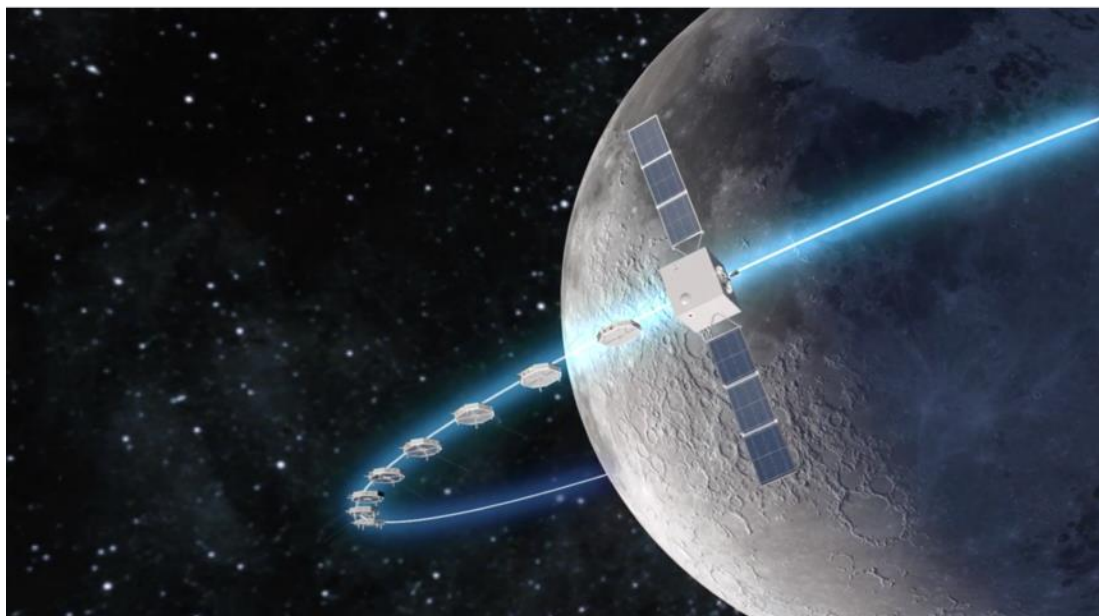
Silk, Philosophical Transactions A 2020

- 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： $z = 25\text{--}75$ (20–60 MHz)
- 观测万亿模式数（小至0.1Mpc尺度）

$l = 14\,000$ k/Mpc

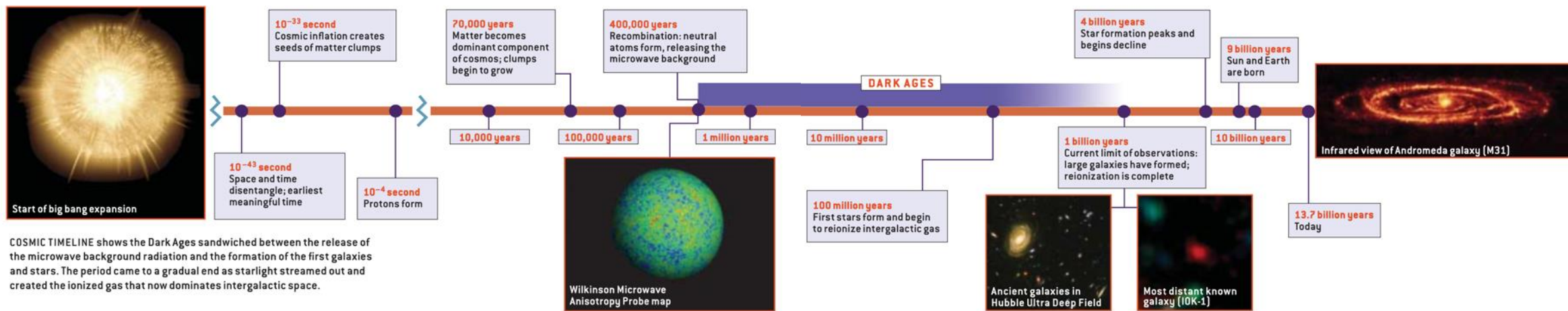
LSS: $z=1$; 21 cm ground: $z=27$; 21 cm space: $z=50$

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
- 基础物理：探索暗物质和暗能量本质
- 探测宇宙小尺度结构（早期宇宙）：21厘米森林，同时测量温暗物质质量和宇宙加热历史
- 探测宇宙大尺度结构（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!

