



非加速器物理研讨会

阿里原初引力波探测计划

研究进展介绍

报告人：李虹

中国科学院高能物理研究所

2021. 5. 16

提纲

1. 中国CMB实验的科
学机遇
2. 阿里实验研究进展
3. 未来方向



为什么要探测原初引力波？

THE BIG BANG

INFLATION

COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND
400,000 YEARS AFTER
BIG BANG

THE DARK AGES

FIRST STARS
400,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

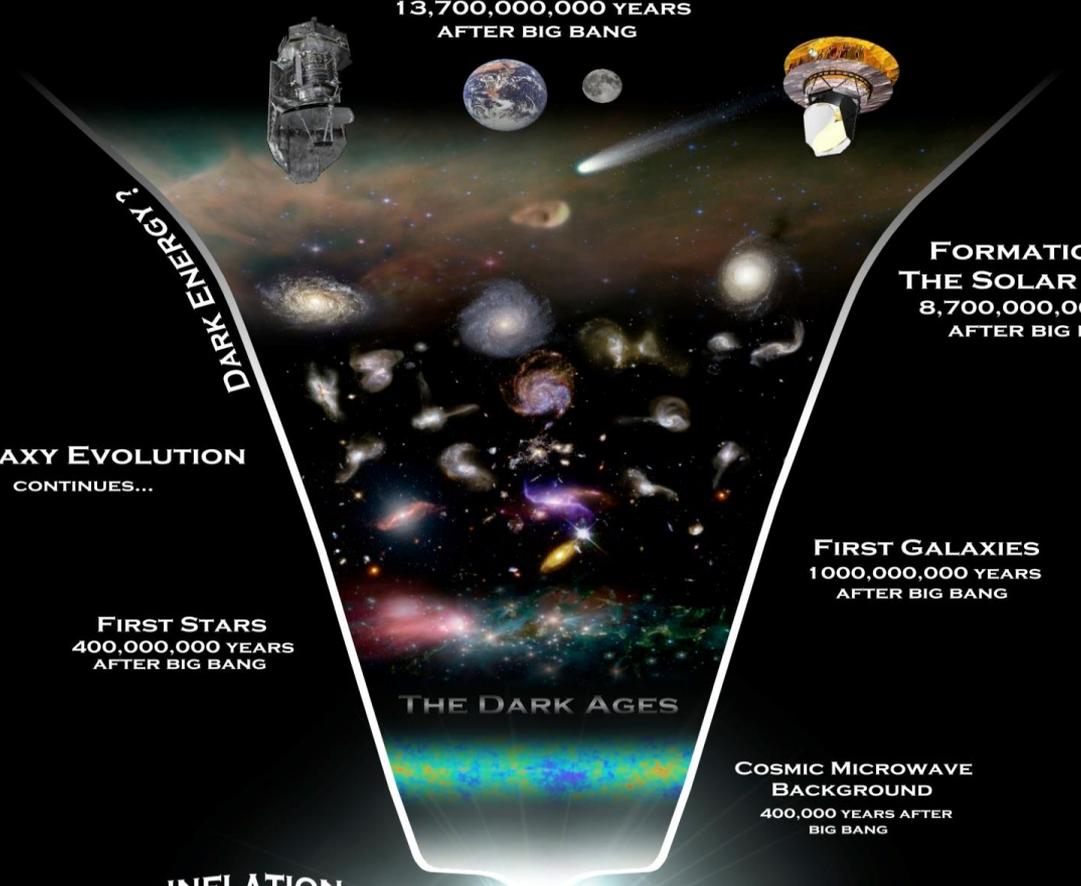
FIRST GALAXIES
1 000,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

GALAXY EVOLUTION
CONTINUES...

DARK ENERGY ?

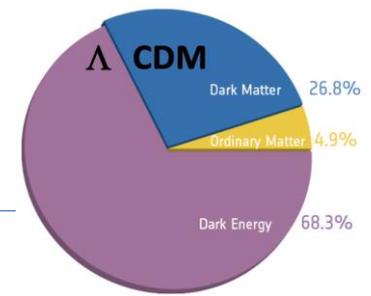
FORMATION OF
THE SOLAR SYSTEM
8,700,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG

Now
13,700,000,000 YEARS
AFTER BIG BANG



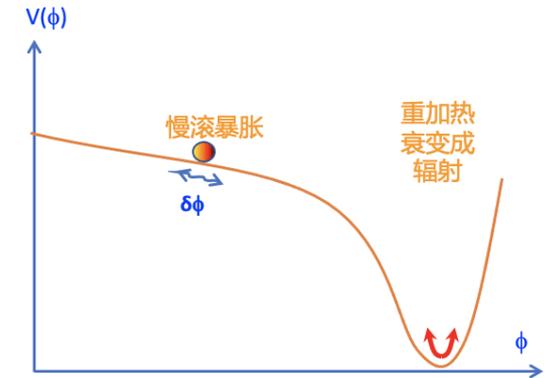
Inflationary Λ CDM

Successfully phenomenological description

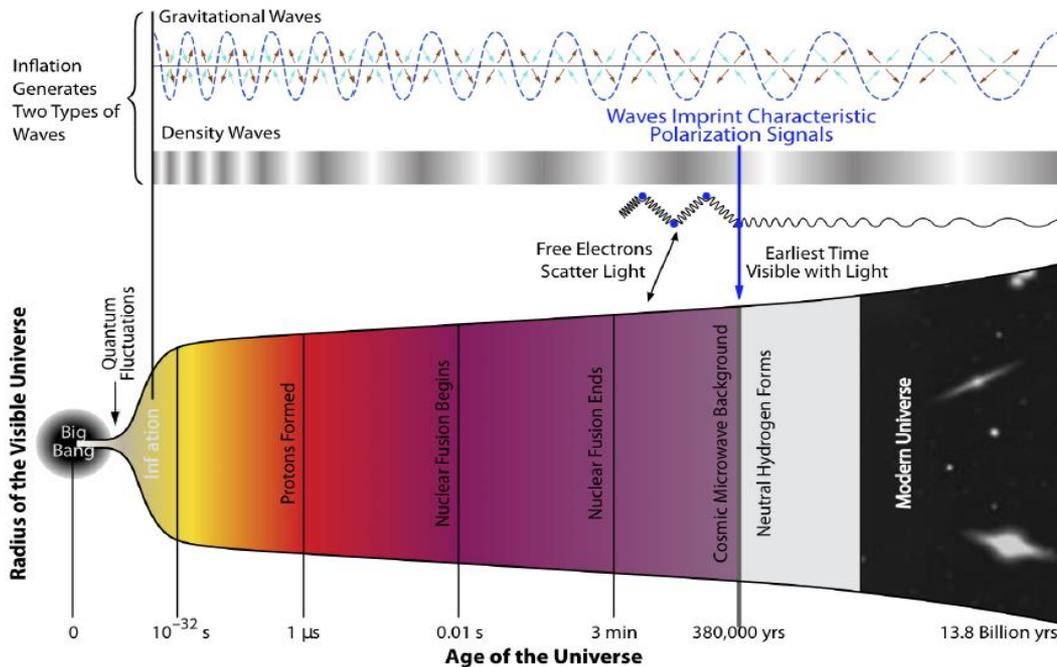


Precision cosmology !

- But
 - fundamental questions remain unanswered
- Inflation ?**
- incomplete theoretical foundation



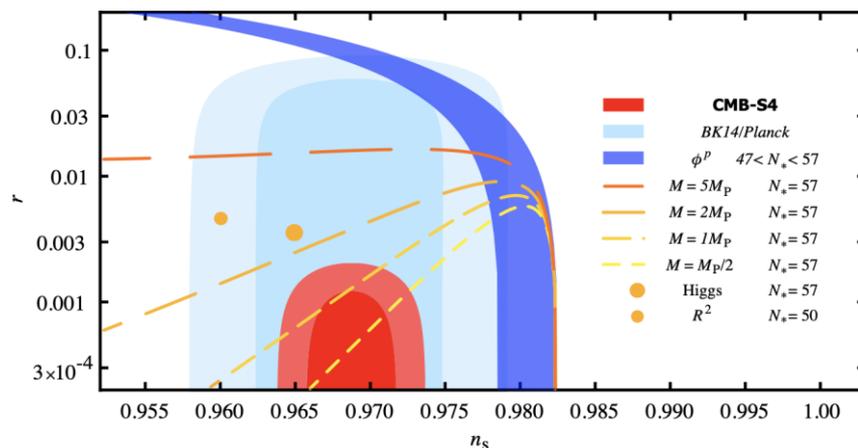
History of the Universe



原初引力波最佳探测手段 – B 极化

■ 关键科学问题

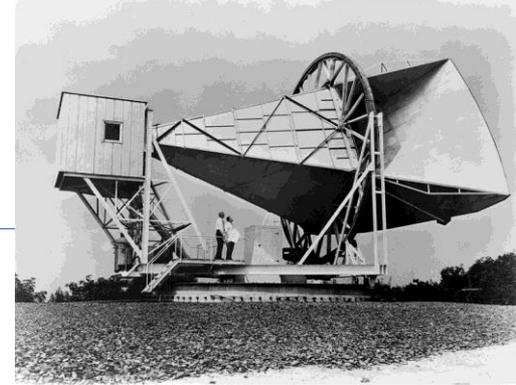
- 精确测量张标比参数, r
- 测量inflation场的能标
- 限制各类暴胀, 及候选早期宇宙学模型, 探索宇宙起源的奥秘
- 测量极化旋转角, 检验CPT对称性



- **重大科学机遇：原初引力波尚未被发现，有望近期取得突破** 😊
- **异常挑战：原初B 模式信号微弱** 😊

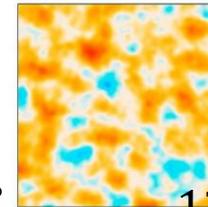
CMB 研究：1964 ~ 2021

- 1964年，A.Penzias 和R. Wilson 发现CMB；
(获得1978年诺贝尔物理学奖)
- 1989年，COBE卫星发射，FIRAS组首次测到CMB黑体谱，
DMR首次探测到CMB的各向异性；
(获得2006年诺贝尔物理学奖)
- 2000年，BOOMERanG 首次测到第一声学峰
- 2002年，DASI首次测到CMB E模式偏振
-
- 2001-2010年，WMAP卫星对全天的温度和偏振给出了精确的测量
- 2009-2013年，Planck卫星给出了目前对全天CMB温度和偏振最精确的测量
- 2012-2014年，SPT和POLARBEAR探测到由弱引力透镜产生B模式偏振
- 2014年，BICEP2合作组提供CMB B模式的精确测量



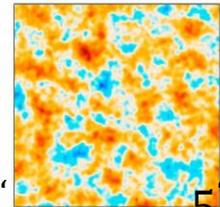
COBE

7°



WMAP

12'



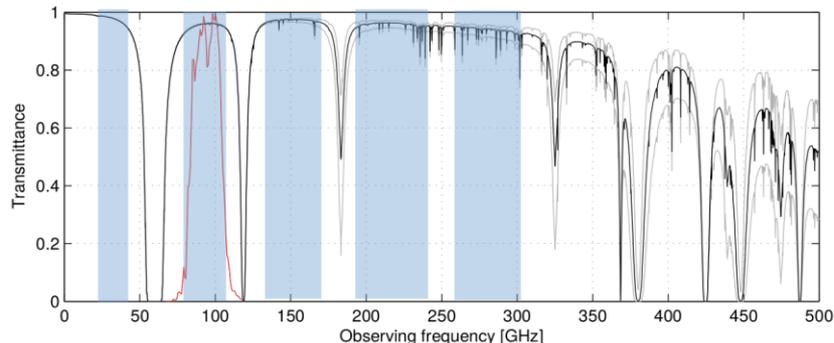
Planck

5'

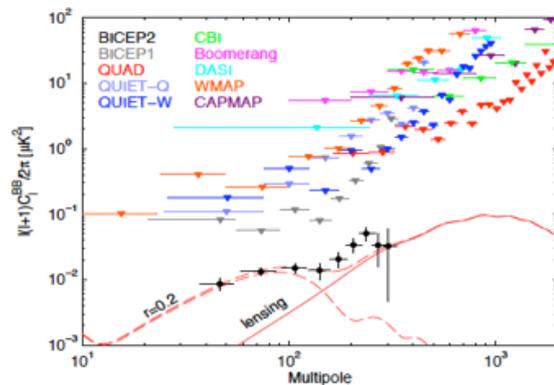
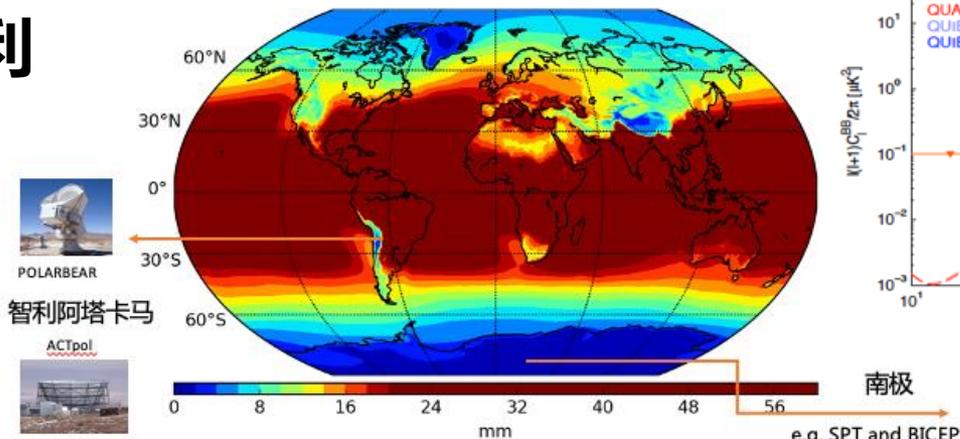


我国西藏阿里地区拥有优秀的台址

- 空间Planck卫星已退役，下一步CMB实验以地面为主
- 当前的地面CMB观测主要集中在南半球的南极极点和智利



大气窗口

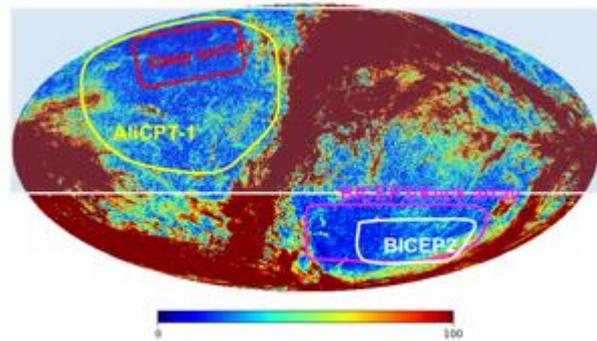


e.g. SPT and BICEP



- 需要北天实验，南北协同观测，实现全覆盖式搜索

机遇和挑战



➤ 开辟新的探测窗口，亟待相互验证

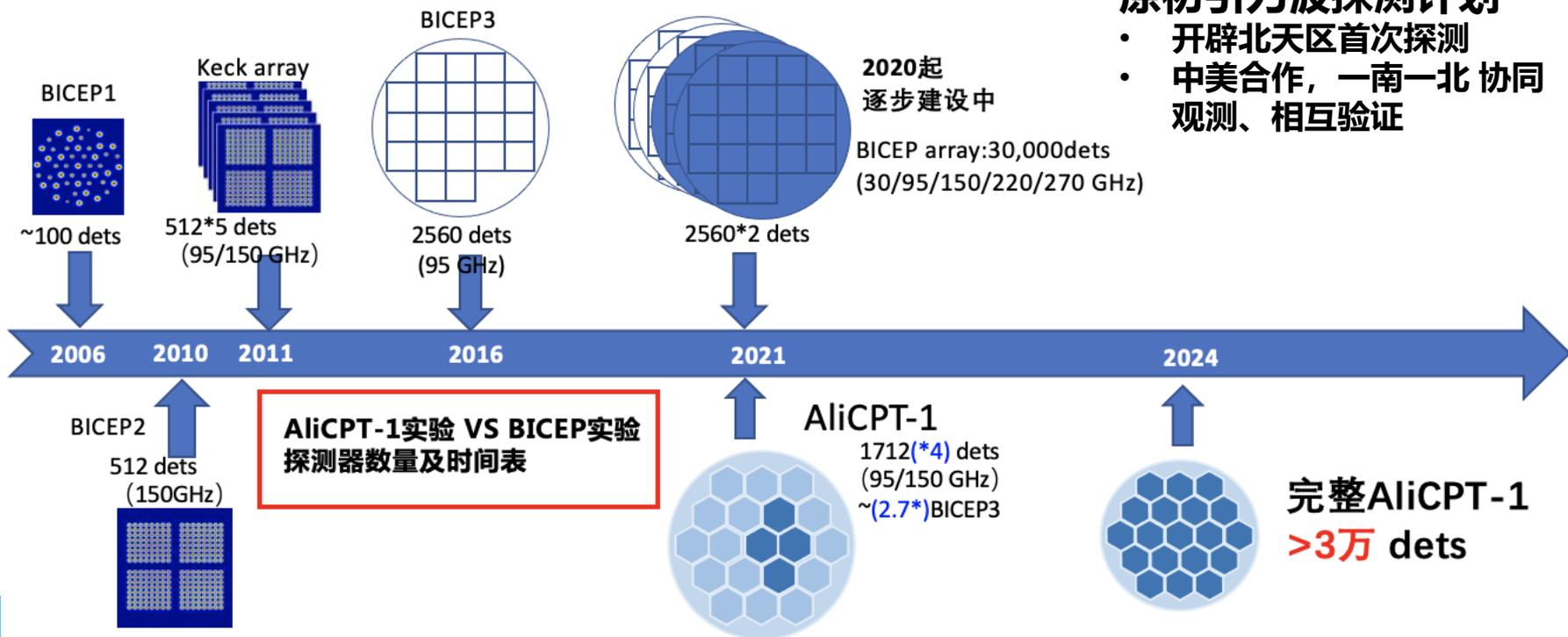
- 扩大天区覆盖，增加北半球实验台址（阿里计划）
- 南北协同观测，相互验证

➤ 提高探测能力和信噪比

- 增加探测器数量，开展多频段探测

2014年5月,张新民带领的宇宙学团队提出阿里原初引力波探测计划

- 开辟北天区首次探测
- 中美合作，一南一北协同观测、相互验证



阿里原初引力波探测实验2016年底正式启动，在中科院B类先导等的支持下，**从零开始**，克服高原、疫情、国际环境及经费不足等方面的困难，经过4年多的努力已完成各系统的研制和建设。

1.完成台址基本设施建设

2.完成观测环境监测

3.完成高速高精度基座研制

4.完成低温光路及恒温器研制

5.完成焦平面探测器研制

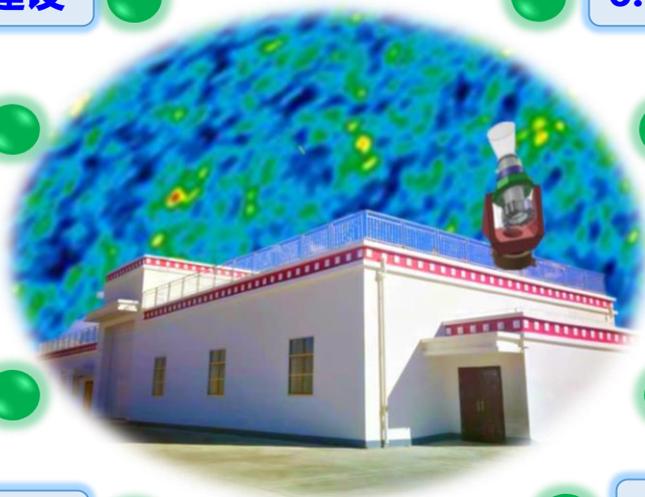
6.完成望远镜标定设施研制

7.完成望远镜控制系统开发

8.建成网络数据传输系统

9.建成科学数据计算平台

10.开展核心技术自主研发



台站设施齐备

基础设施

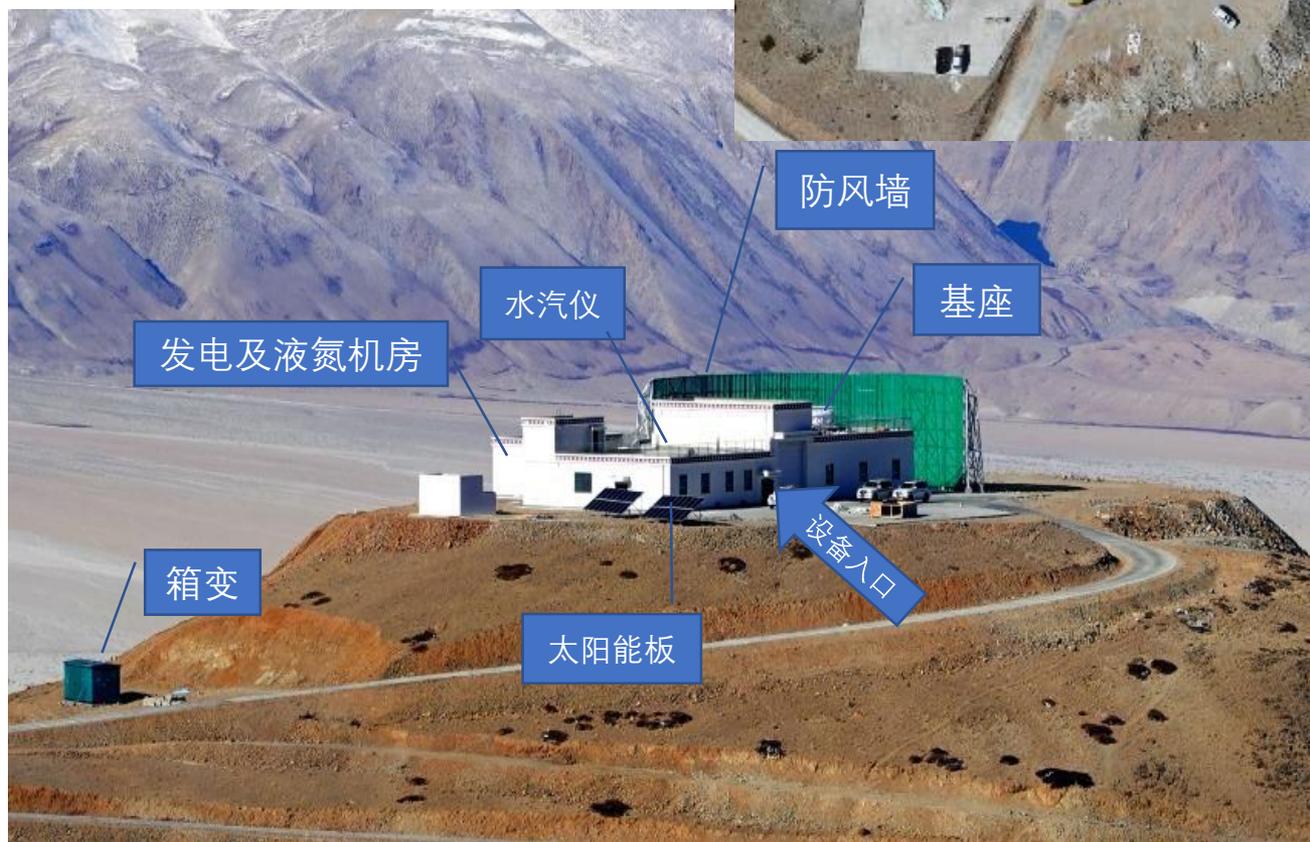
- 铺装道路
- 观测仓
- 防风墙

实验设备

- 基座及配套设备
- 星敏相机
- 远场/近场标定设备
- 制冷机相关：
PT/Chiller/
压缩机
- 水汽仪RPG
- EMI电磁监测设备
- 多台气象站

辅助设备

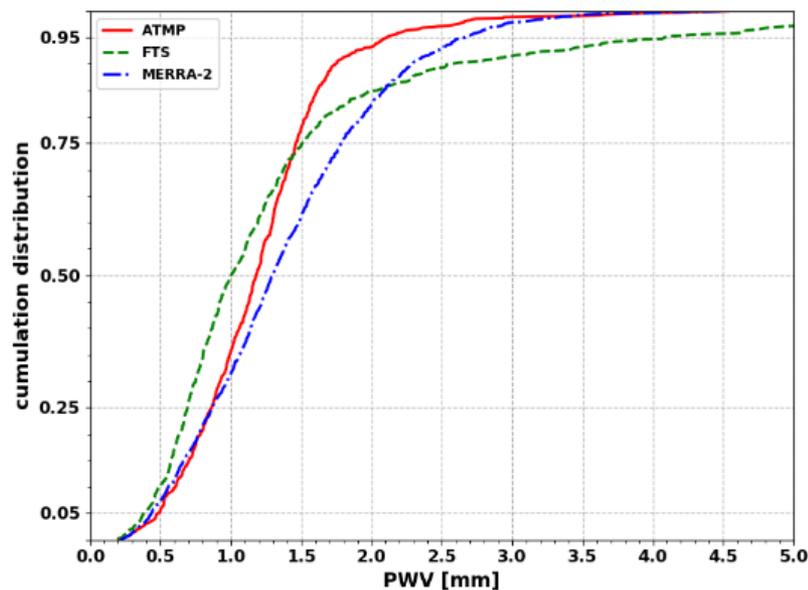
- 供电系统
- 专线网络系统
- 弥散式供氧系统
- 空调系统
- 液氮制备
- 远程监控系统



B1点观测站全貌

台址观测环境与智利相当

	PWV [mm]				
	5%	25%	50%	75%	95%
MERRA-2	0.44	0.87	1.30	1.78	2.67
FTS (Ali-A)	0.38	0.68	0.98	1.50	4.09
FTS (Ali-B)	0.35	0.63	0.90	1.37	3.76



太赫兹傅立叶光谱仪 (FTS) 从2017年至2021年积累了超过500天的台址大气状况数据:

- 太赫兹傅立叶光谱仪大气透过率测量数据与气象卫星数据一致。
- 阿里台址90GHz/150GHz大气透过率中值约98%。
- 阿里台址冬季中值水汽沉降量(PWV)约为1 mm, 最优可达0.35 mm, 是优良CMB观测台址。

基于气象数据、卫星数据以及本项目FTS数据获取的PWV对比, 结果相当。

完成望远镜基座研制

- 完成了国内首台原初引力波望远镜基座研制，具有高负载能力、高扫描速度、高指向精度的特点。
- 实现2吨负载下5度/秒最大转速，修正后指向精度好于10角秒。
- 完成在海拔5250米站点的安装测试，具备观测状态。

基座在B1站点测试现场

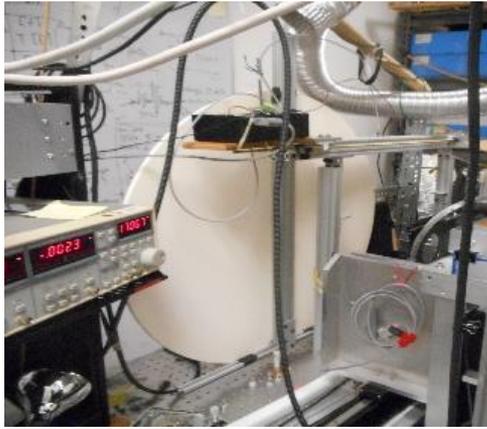


只待接收机到达站点集成

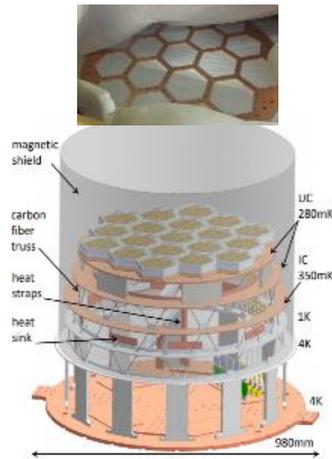


完成低温光路及恒温器研制

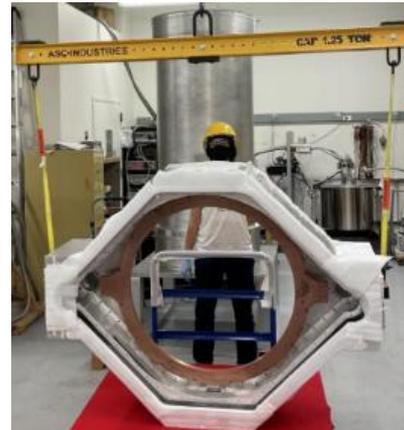
- 外轮廓直径约1m（对比BICEP3为73cm），是同类实验中最大的50K/4K恒温器。
- 焦平面直径635.6mm，可容纳19个6吋探测器模块，探测器总数大于3万个，是国际同类实验中单体镜筒探测器数量最多的。



4K冷光学：大面积氧化铝陶瓷微波透镜性能测试



焦平面示意图及实物照片



恒温器VJ base



恒温器外观

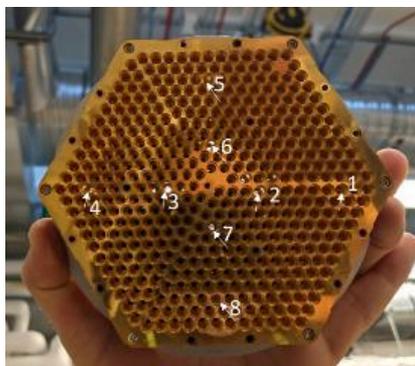
完成第一个探测器模块研制

- 完成了6吋探测器阵列的制备

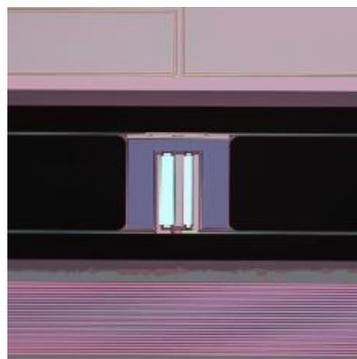
- 实现了多项不同以往的新特性以改善性能：差分电阻、微带线优化、TES优化、暗像素和暗TES探测器设计。
- 1个模块集成了1716个探测器，每个探测器都是由一个Al/Mn TES和一个Al TES串联组成，分别用于科学观测和实验室定标。
- Al/Mn合金TES, 420mK Tc。



波导板



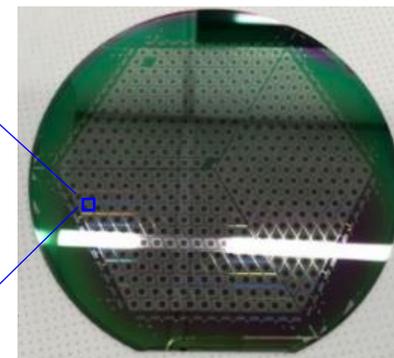
Feedhorn阵列



Figures credit: NIST



TES像素镜检照片
(左/右: 90GHz/150GHz)



TES探测器阵列

完成标定系统研制

- 完成大尺寸可调式高精度微波反射镜面
 - 2m*3m , 实测平整度约 0.04mm (需求 <0.1mm) 。
- 自主完成W/D波段压控快速扫频式远场标定源, 国际首次用于同类实验的远场标定 (取代黑体标定源) 。



远场标定源桅杆(28米)



W波段和D波段毫米波源



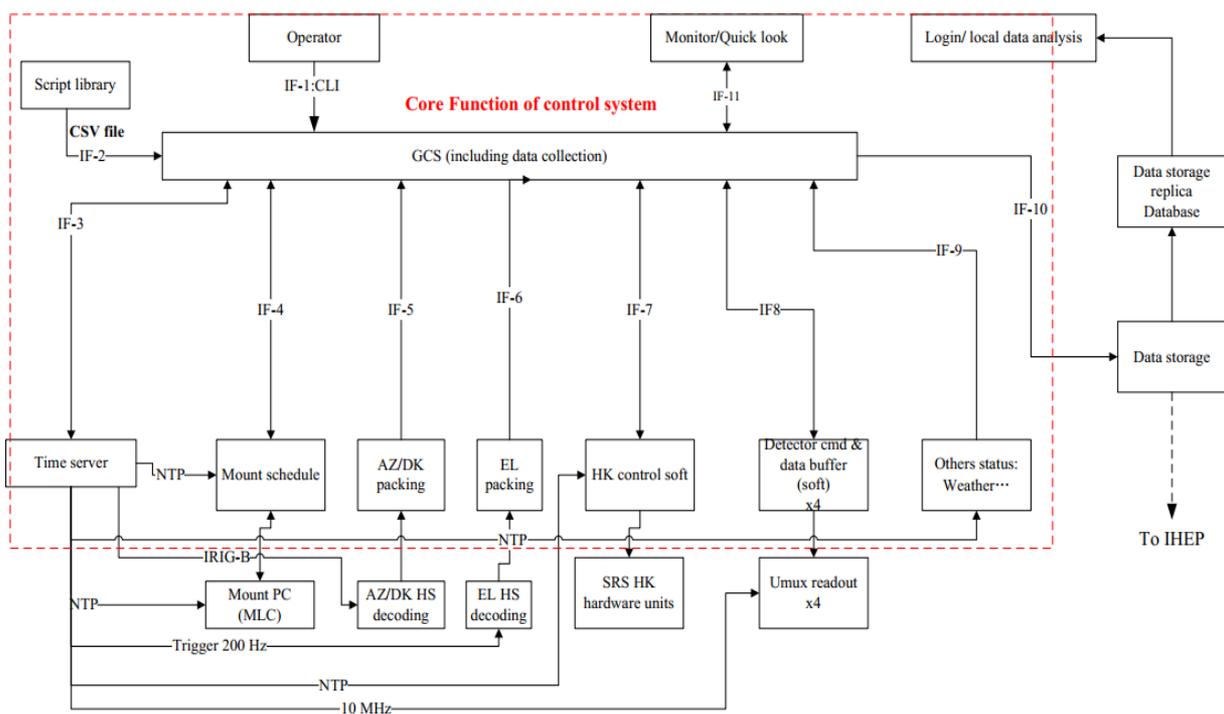
W波段和D波段毫米波源



高精度微波反射镜面

完成控制系统开发和部署

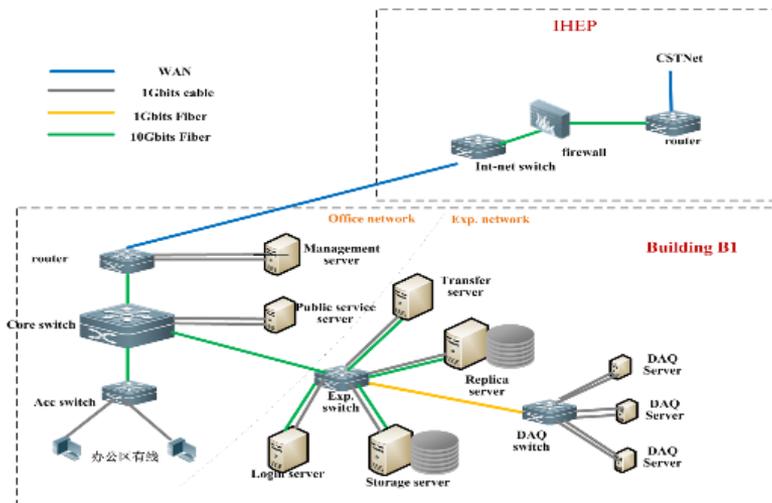
- 自主开发完成并部署了控制系统软件 (General Control System, GCS)。
- 通过 GCS 控制在站设备运行，完成科学数据和工程数据采集。
- 具备关键参数快视和查询的功能，可以快速判断仪器运行状态。



控制系统框架示意图

建成网络数据传输系统

- 完成了B1站点网络建设及B1站点数据存储传输系统部署，可高可靠性地存储2个月的科学数据。
- 开通了高能所-B1站点网络专线，望远镜运行时带宽100Mbps，可近实时的将数据从B1站点传回高能所。
- 建立了故障微信报警等机制。



AliCPT实验网络拓扑图



依托于高能所计算平台的AliCPT站点运行情况实时监视

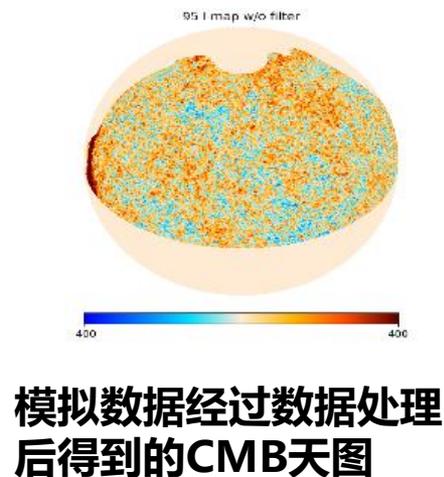
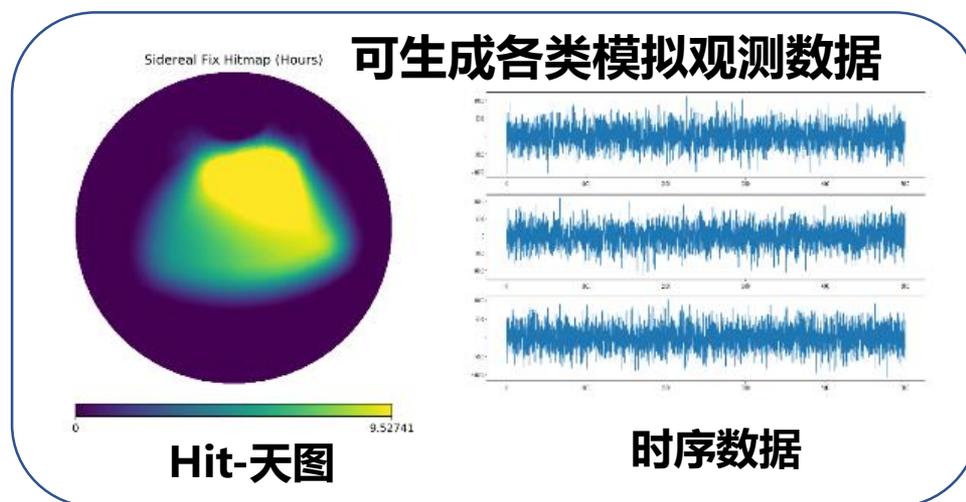
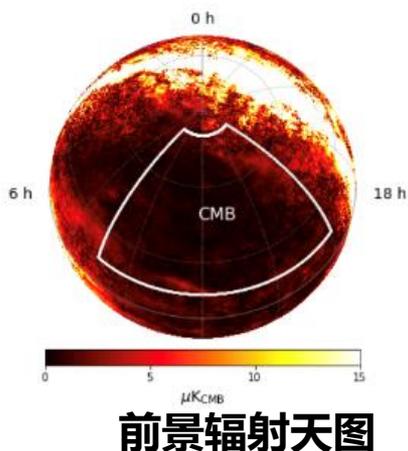
完成科学数据计算平台搭建工作

- 科学数据计算平台包括数据模拟系统、分析系统及天图分析的关键技术，实现端到端的全流程数据模拟和分析。



完成科学数据计算平台搭建工作

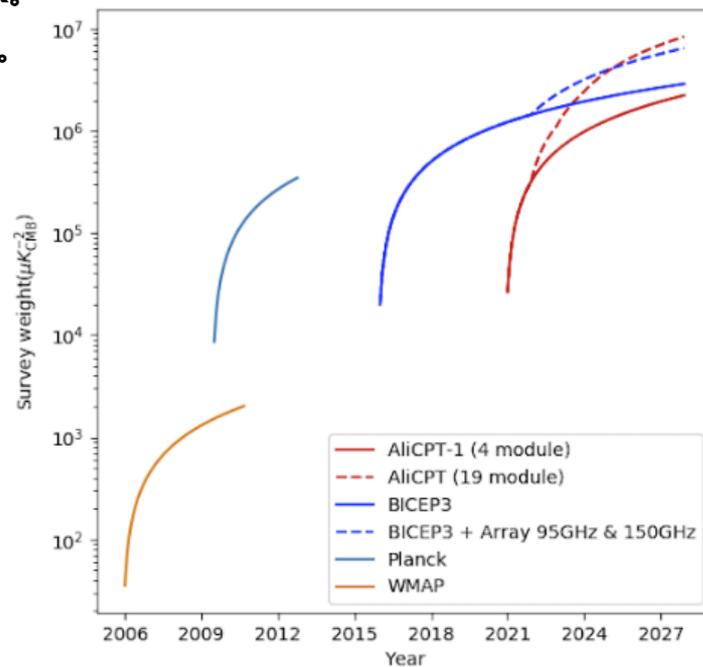
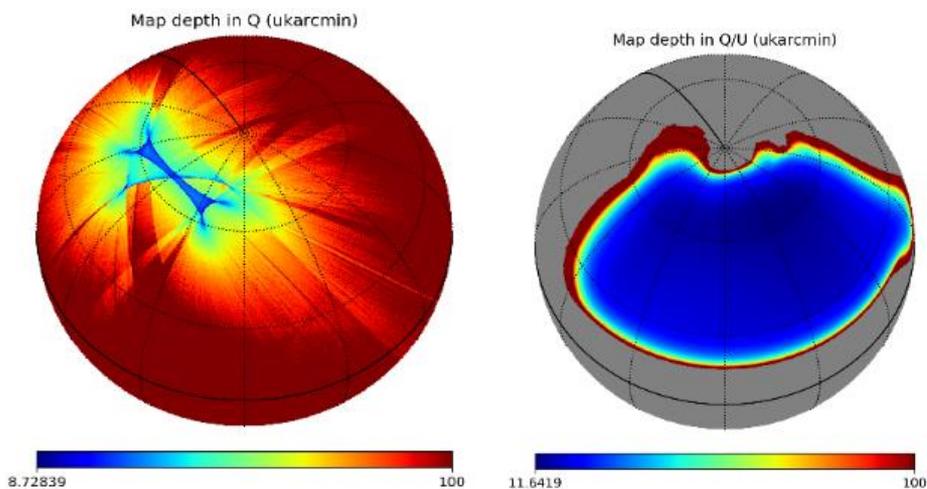
- 综合考虑台址位置、考虑躲避太阳、月亮等强辐射源，制定扫描策略。
- 基于模拟系统实现对微波天空的模拟、大气辐射的模拟、系统噪声模拟。基于扫描策略生成完整观测季的模拟数据，实现探测灵敏度科学分析，并开展盲测试分析，不断提升数据分析平台的分析能力和可靠性，考察望远镜性能。



完成科学数据计算平台搭建工作

提高灵敏度是核心目标

- 模拟表明4模块AliCPT-1单观测季CMB极化观测灵敏度可超过PLANCK。
- 19模块的全状态AliCPT-1在3-5个观测季后超过BICEP系列实验灵敏度。



灵敏度对比 (左: PLANCK/143GHz; 右: AliCPT-1/4 模块/观测季)

AliCPT望远镜灵敏度及与同类实验对比

望远镜技术自主研发

见刘聪展报告

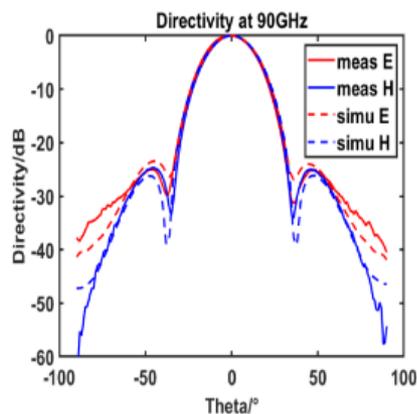
- 成功开发了单像素90GHz正交线偏振的TES探测器。
- 成功研制单像素90GHz硅堆叠波纹喇叭原理样机，与NIST测试结果水平相当。
- 基于全国产化技术完成了中小口径氧化铝陶瓷微波透镜（18-110GHz）的原理性验证和初步性能测试（高纯度、高致密度、低损耗角正切）。



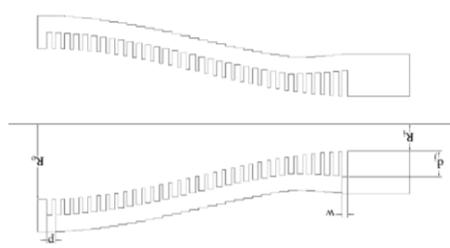
90GHz TES单像素探测器



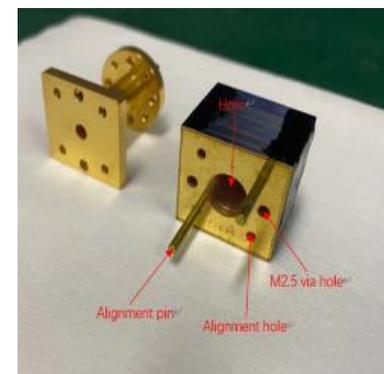
国产氧化铝陶瓷透镜验证件



90GHz方向束测试结果



硅堆叠波纹喇叭原理样机



ALiCPT 合作组

- 阿里原初引力波探测计划已经凝聚国内外近100名学者参与研究，除牵头单位高能所外，国内参研单位包括国家天文台、上海交通大学、中国科技大学、清华大学、理化所、北京师范大学、云南大学、中电54所、台湾大学等，国外核心参研单位有Stanford、NIST、ASU、CNRS/APC等研究机构。
- 在科技部重点专项的进一步支持下，后续加入的团队包括中山大学、紫金山天文台、南京天光所、山东大学、扬州大学、安徽大学、西藏大学等。



1.完成台址基本设施建设

2.完成观测环境监测

3.完成高速高精度基座研制

4.完成低温光路及恒温器研制

5.完成焦平面探测器研制

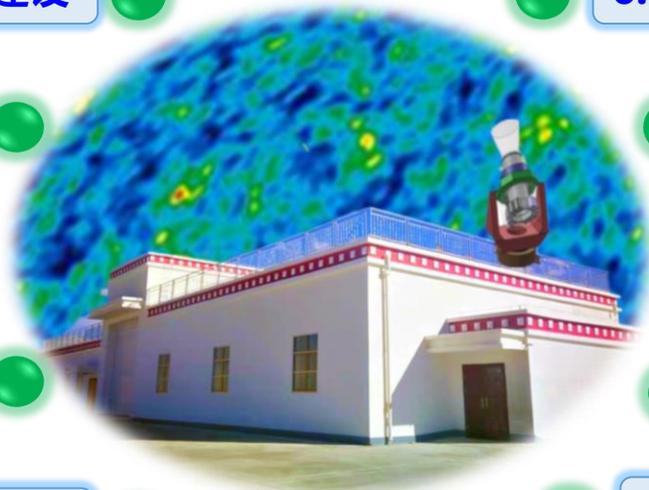
6.完成望远镜标定设施研制

7.完成望远镜控制系统开发

8.建成网络数据传输系统

9.建成科学数据计算平台

10.开展核心技术自主研发

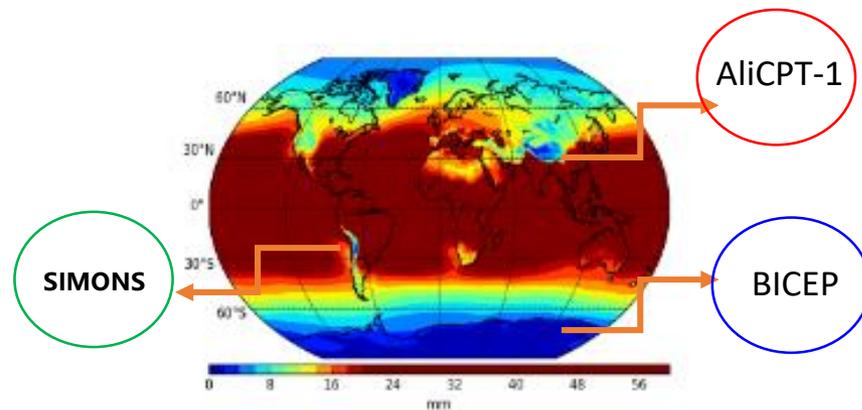


之后，在科技部“引力波探测”重点专项的支持下，将开展阿里原初引力波望远镜的在站总装、运行和观测，产出科学成果，同时发展关键技术，进一步提升望远镜的探测能力，成为与南极、智利比肩的原初引力波探测基地。

AliCPT-1

项目		频段 (GHz)	探测器数量	备注
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	BICEP3的~2.7倍
BICEP3		95	2560	正运行

- AliCPT-1性能具有国际一流水平
- 同类实验中口径最大



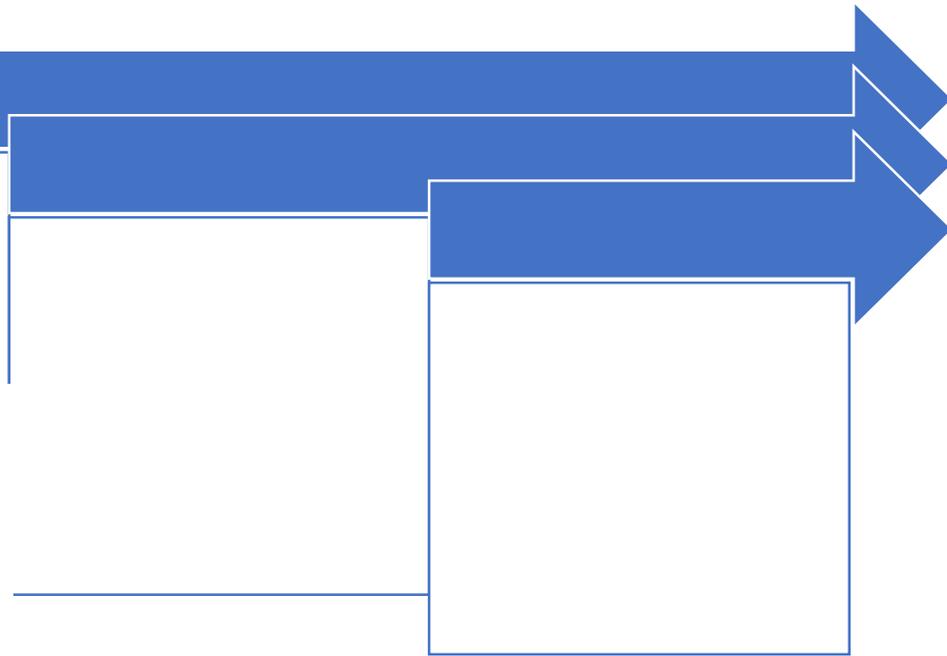
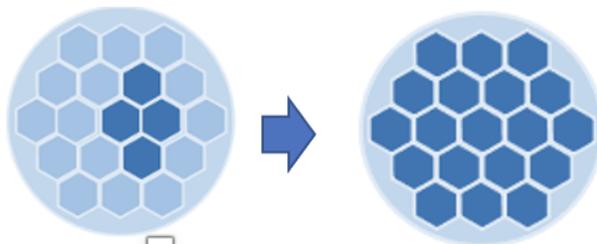
下一步

升级焦平面探测器

提高灵敏度

降低噪声

增加探测器数据



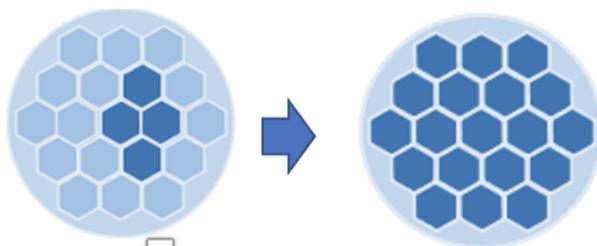
下一步

升级焦平面探测器

提高灵敏度

降低噪声

增加探测器数据

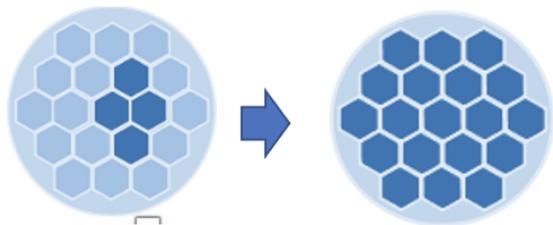


项目		频段 (GHz)	探测器数量	备注
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	BICEP3的~2.7倍
	19 模块	95/150	32338	BICEP Array同频段的~2倍 (与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)

升级焦平面探测器

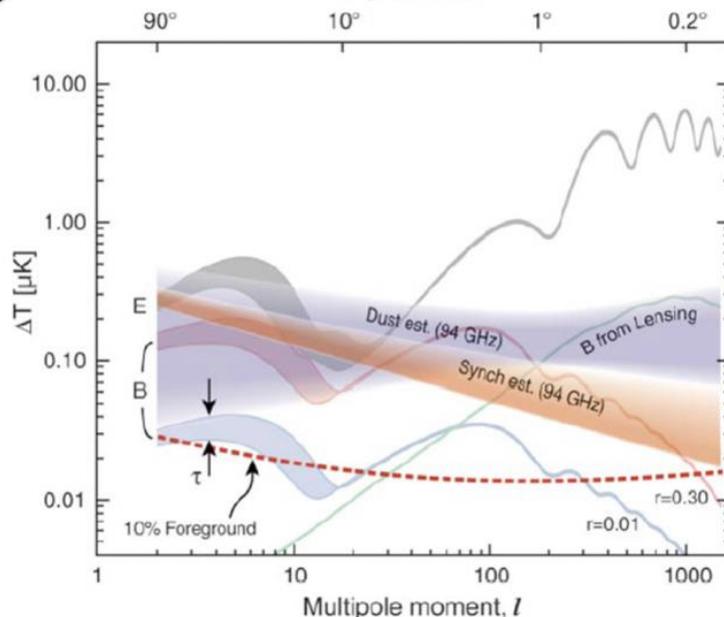
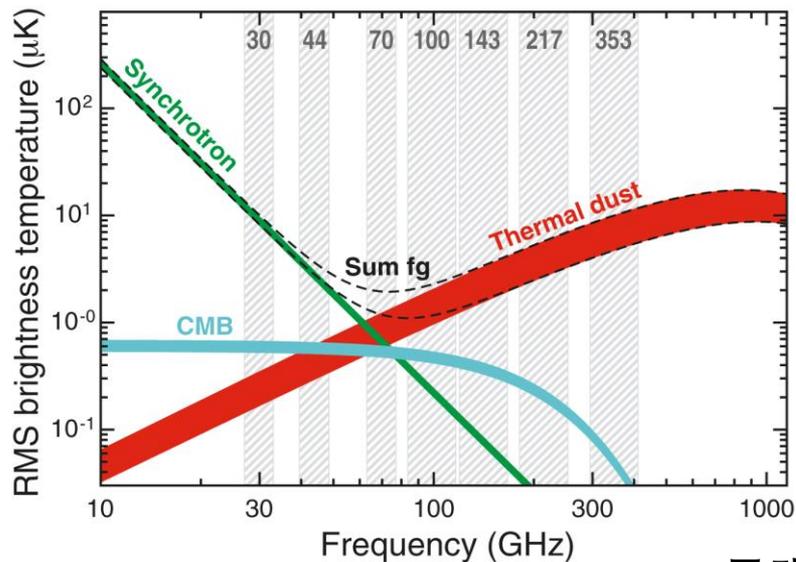
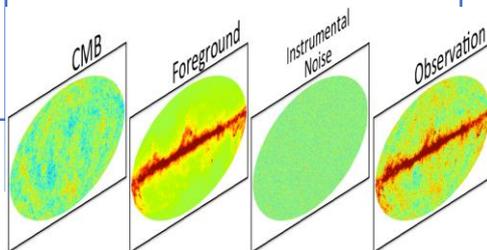
- 提升灵敏度
- 降噪

增加探测器数据



增加频段

- 去除前景污染
- 开展前景科学分析

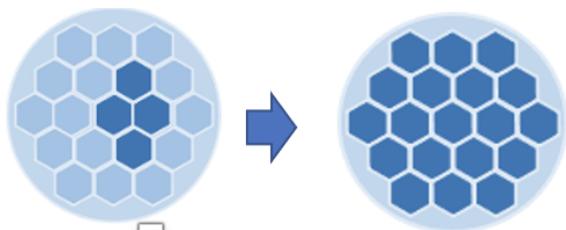


见张乐的报告

升级焦平面探测器

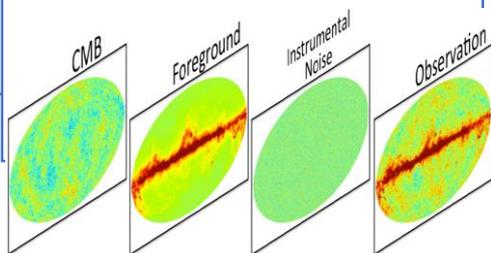
- 提高灵敏度

增加探测器数据



增加频段

- 去除前景污染
- 开展前景科学研究



项目		频段 (GHz)	探测器数量	备注
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	BICEP3的~2.7倍
	19 模块	95/150	32338	BICEP Array同频段的~2倍 (与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)
AliCPT 40GHz		30/44	300	与BICEP Array相当
BICEP3		95	2560	正运行

未来

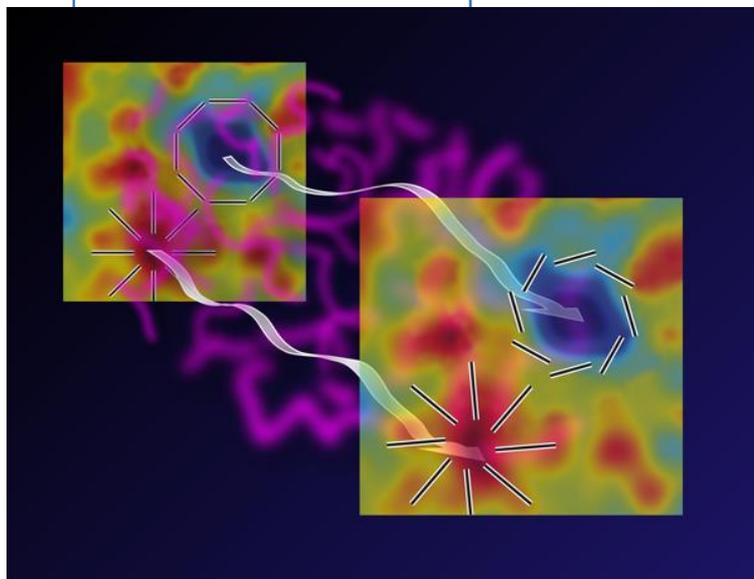
增加探测器数据

- 提升灵敏度
- 降噪

增加频段

- 去前景污染

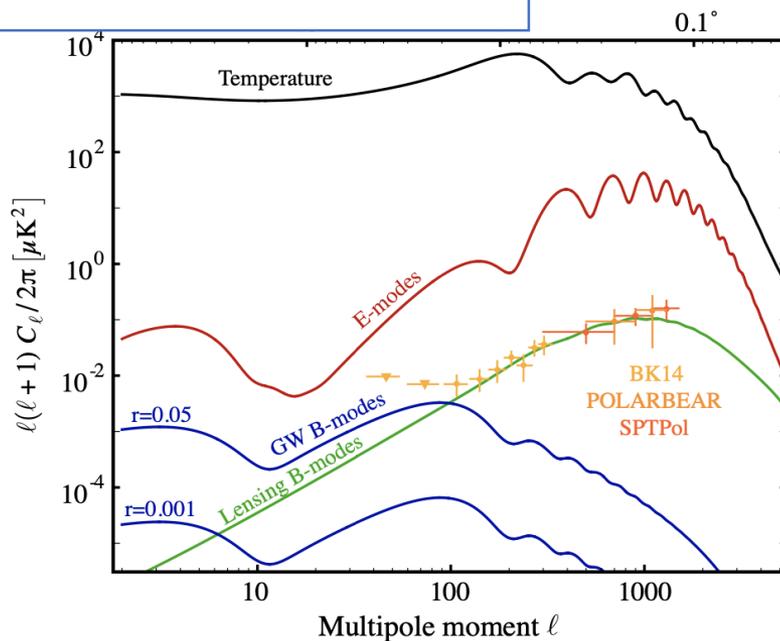
增加大口径



E → B

- 有效去除lensing 污染
- 提升天图分辨率
- 精确测量CMB Lensing B modes
- 同时开展Lensing 信号主导的宇宙学研究

见冯畅的报告



未来

增加探测器数据

提升灵敏度

降噪

增加频段

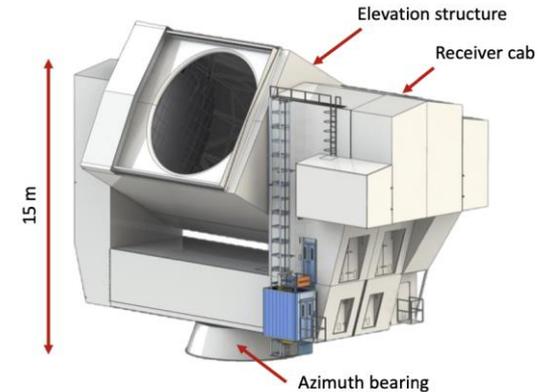
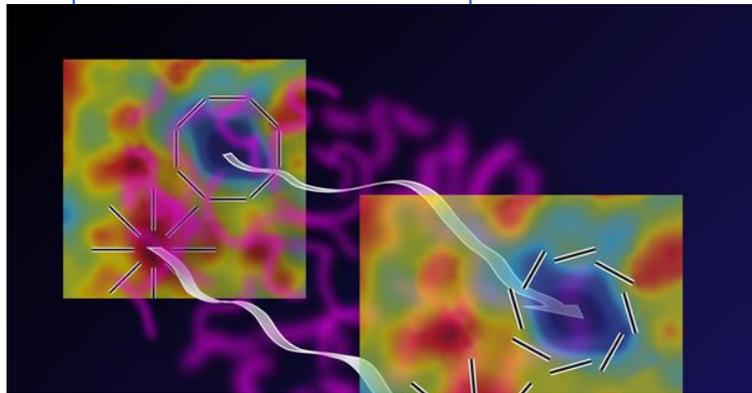
去前景污染

增设大口径

提高分辨率

精确测量CMB Lensing B modes

去除lensing 污染



BICEP3的~2.7倍

BICEP Array同频段的~2倍
(与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)

与BICEP Array相当

与Simons 相当

项目		频段 (GHz)	探测器数量	
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	
	19 模块	95/150	32338	BICEP Array同频段的~2倍 (与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)
AliCPT 40GHz		30/44	300	与BICEP Array相当
AliCPT-Larger aperture		220 /270	~ 30000	与Simons 相当



AliCPT-1

AliCPT与南极、智利，并肩成为三大基地

项目		频段 (GHz)	探测器数量	备注
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	BICEP3的~2.7倍
	19 模块	95/150	32338	BICEP Array同频段的~2倍 (与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)
AliCPT 40GHz		30/44	300	与BICEP Array相当
AliCPT-Larger aperture		40/95/150/20 /270	30000	与Simons 相当
BICEP3		95	2560	正运行
BICEP Array		30/40	192/300	2020年开始运行
		95	4056	建设中 (仍运行的原Keck Array, 288探测器)
		150	7776	建设中 (仍运行的原Keck Array, 512探测器)
		220/270	8112/12288	建设中 (仍运行的原Keck Array, 1024探测器)

- 与CMB S4 路线一致
- 北半球精确的测量

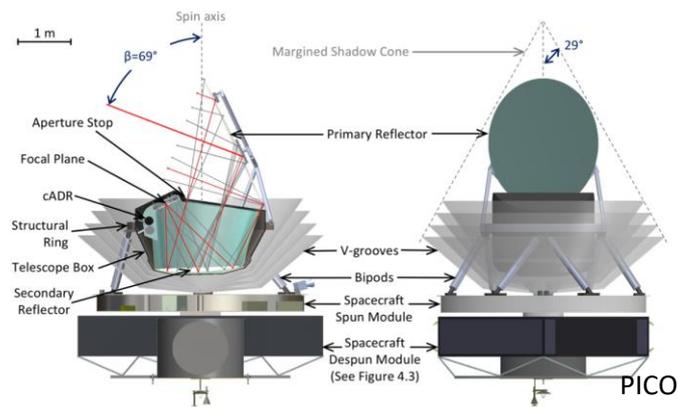


AliCPT-1

Far future:

项目		频段 (GHz)	探测器数量	备注
AliCPT-1	1 模块	95/150	1702	
	4 模块	95/150	6808	BICEP3的~2.7倍
	19 模块	95/150	32338	BICEP Array同频段的~2倍 (与SIMONS、BICEP Array总探测器数量相当)
AliCPT 40GHz		30/44	300	与BICEP Array相当
AliCPT-Larger aperture		220 /270	30000	与Simons 相当
SpaceCPT		更多频段	~ 1000 Planck	空间多频段、空间高分辨率

➤ 未来，基于自主技术，开展空间多频段、高分辨率





非加速器物理研讨会

阿里原初引力波探测计划

研究进展介绍

谢谢!

李虹

中国科学院高能物理研究所

2021. 5. 16

CMB S4

