

2021年高能物理非加速器物理战略研讨会

原初引力波探测 实验技术介绍

报告人：刘聪展

2021年5月 @高能所



汇报提纲



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

- 1** 原初引力波实验简介
- 2** 原初引力波实验关键技术
- 3** 原初引力波实验发展趋势
- 4** 小结

1

原初引力波实验简介



1. 简介：从AliCPT-1说起



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

至今**尚未探测到**原初引力波，是**机遇、更是挑战**。

AliCPT-1望远镜基本情况：

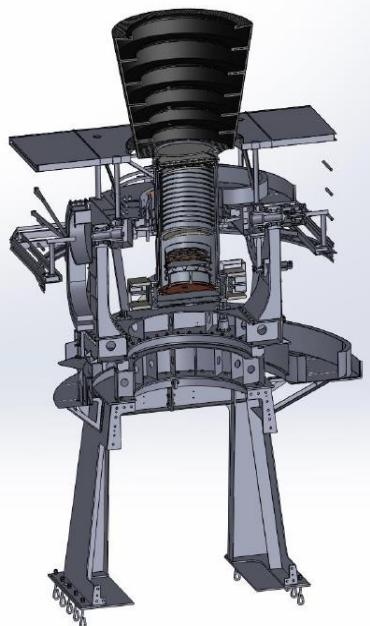
- **阿里地区5250米**，小口径高灵敏CMB极化望远镜；
- 首次得到**最高精度的北天区CMB极化天图**；
- 给出北天区r值或上限 **$r \sim 0.01$** （目前 ~ 0.05 ）

AliCPT-1**性能指标国际一流**：

- 同类实验中口径最大（BICEP系列）
- 探测器数量最多
- 北半球不可替代
- 国内外17家科研单位参与实验

只待接收机到达站点集成

参数	AliCPT-1
频率	95/150GHz
口径	72cm
F 参数	双折射式, f/1.4
探测器数量	1700*(1~19)
FOV	16.7°



1. 简介：从AliCPT-1说起

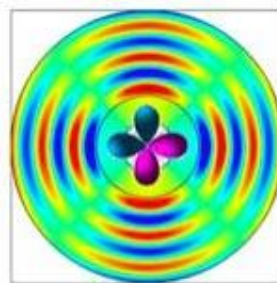


目标：张标比 r

可观测效应：
T、E/B-mode角功率谱

复杂的数据处
理pipeline

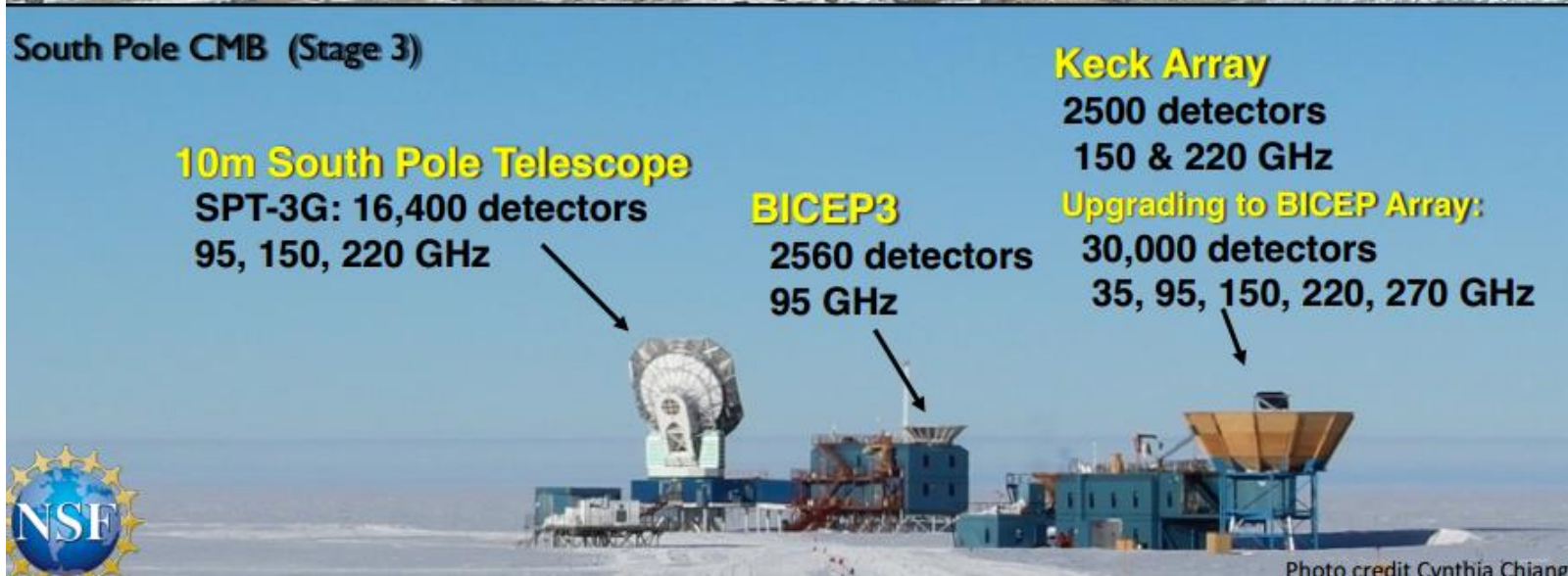
观测数据：
巡天CMB光子正交方向功率
分布



原初引力波导致最后散射面
上光子的 ($l=2, |m|=2$) 的
四极矩分布，产生B模式偏振。



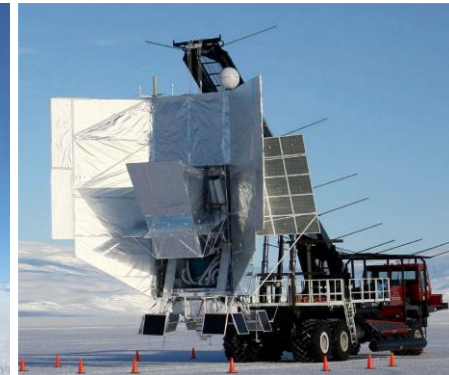
原初引力波观测的最佳手段：宇宙微波背景辐射 (CMB)



Balloon Experiments



SPIDER

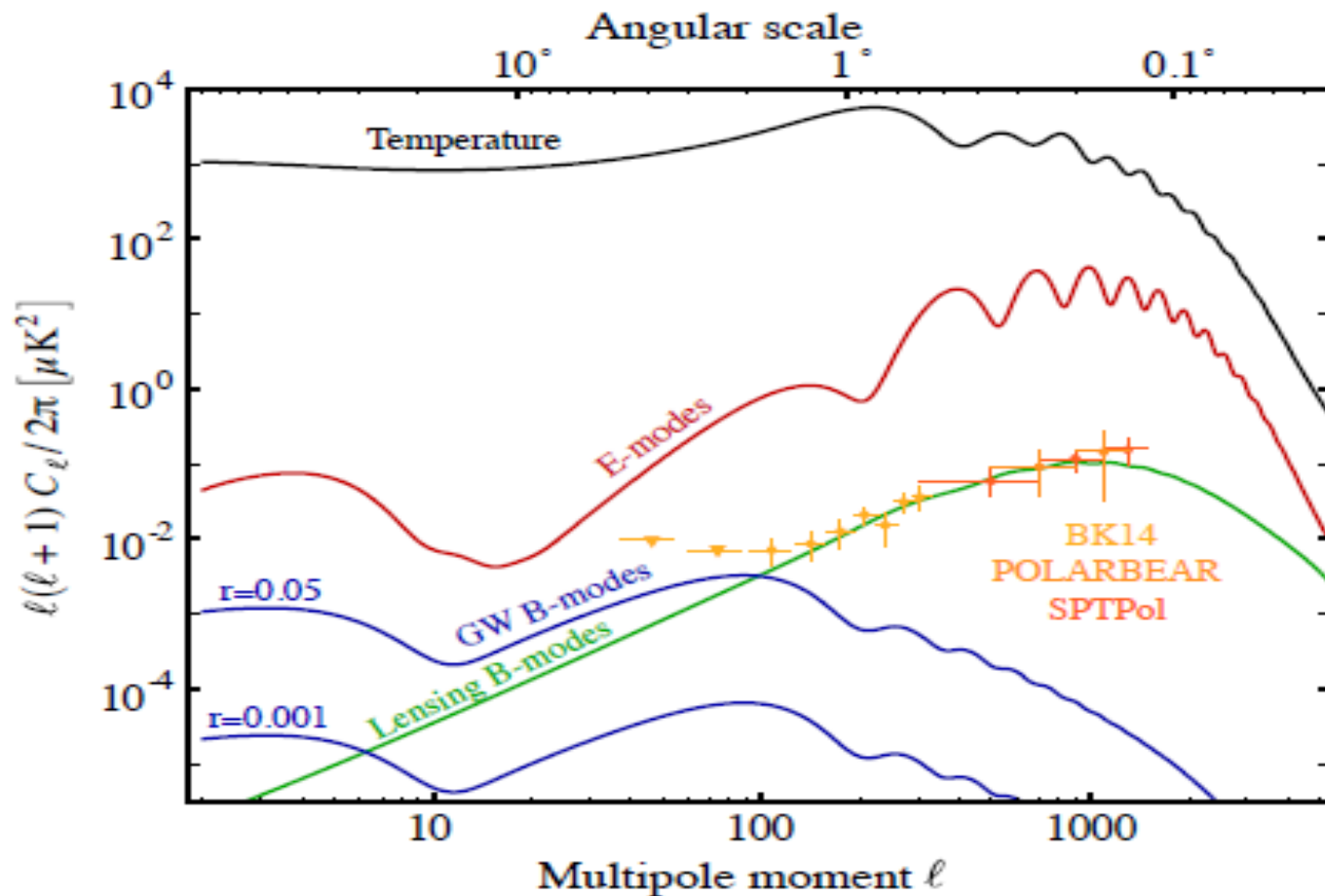


EBEX

北半球/
最高海拔/
最高灵敏度



AliCPT-1



$T = 2.73K \rightarrow$ 实测

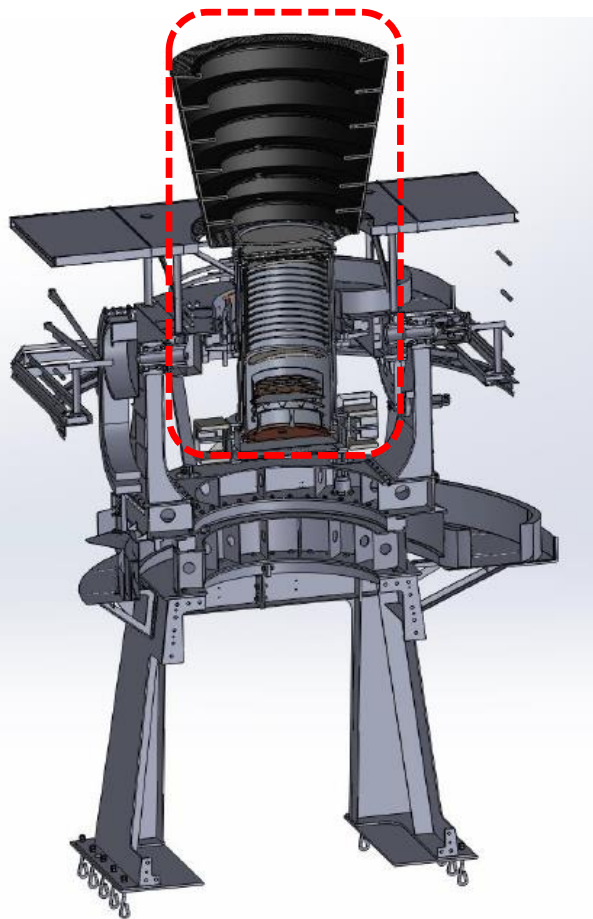
B-mode 即原初引力波信号极其微弱： $\sim$ 几十nK

精心设计望远镜

- 现有的诸多实验，至今**尚未探测到**原初引力波，是**机遇、更是挑战**。
- 原初引力波探测成为当前宇宙学领域最重要的实验科学目标！

2

原初引力波实验关键技术



- 折射式或反射式
 - Lens / mirror
- 杂散光抑制
 - 红外辐射
 - 地面反射

光路系统

4-10K

探测器系统

- 天线阵列
 - 多频段、宽频
- 探测器阵列
 - TES or mKIDs
- 信号读出
 - μ Mux SQUID

~百mK

低温恒温器

- 观测策略制定
- 数据筛选及重建
- 地面环境污染扣除
- 前景扣除
- CMB 弱引力透镜效应扣除

数据分析平台

TES: Transition Edge Sensor Bolometers

$$\text{NEP}^2 \equiv S_{\text{tot}} = S_{\text{opt}} + S_G + S_J + S_{\text{readout}}$$

1. 光子噪声:

$$S_{\text{opt}} = 2h\nu P_{\text{opt}} + \frac{\xi P_{\text{opt}}^2}{\delta\nu}$$

2. 热连接噪声:

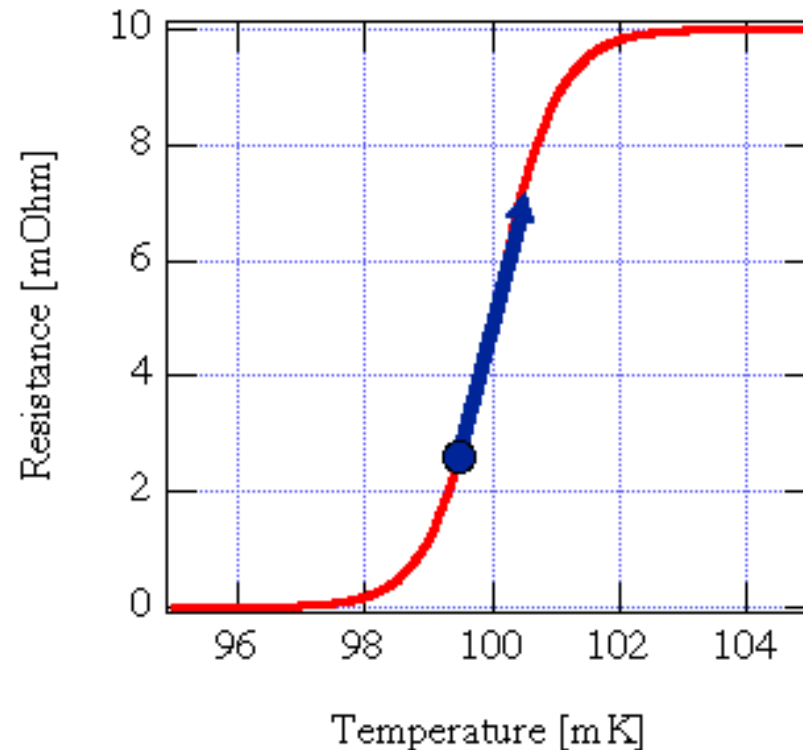
$$S_G = 4\gamma_{\text{NE}} k_B T_c^2 G$$

3. Johnson 噪声:

$$S_J = 4k_B T_c P_{\text{bias}} \frac{(\mathcal{L} + 1)^2}{\mathcal{L}^4} (1 + \omega^2 \tau^2)$$

~ 几十 aW/sqrt(Hz)

TES bolometers possess a long record of CMB science results from well-characterized kilopixel arrays. In particular their noise properties have been demonstrated to **be sufficient** for CMB-S4 needs.



$$\begin{aligned} \delta P &\rightarrow \delta T_{\text{TES}} \rightarrow \delta R_{\text{TES}} \rightarrow \delta I_{\text{TES}} \rightarrow \\ \delta \Phi &\rightarrow \delta V_{\text{out}} \end{aligned}$$

2.关键技术: TES



- 国内TES研制处于器件制备探索阶段

- 无正交线偏振TES探测器应用实例

清华大学、中科院微系统所、上海科技大

学: X-ray TES

紫金山天文台: THz天文

高能所: CMB应用

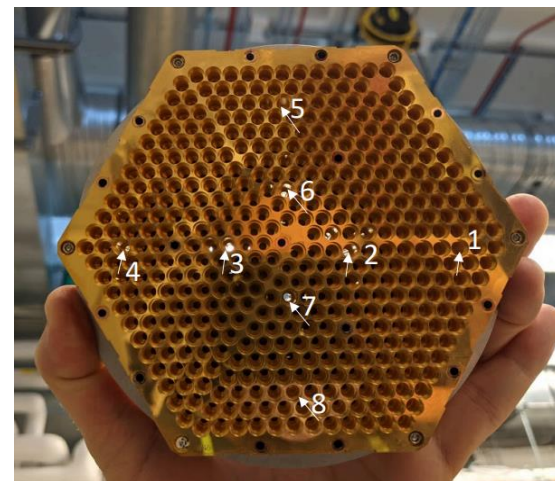
- 美国, 1704dets/6吋, 技术成熟

➤ NIST

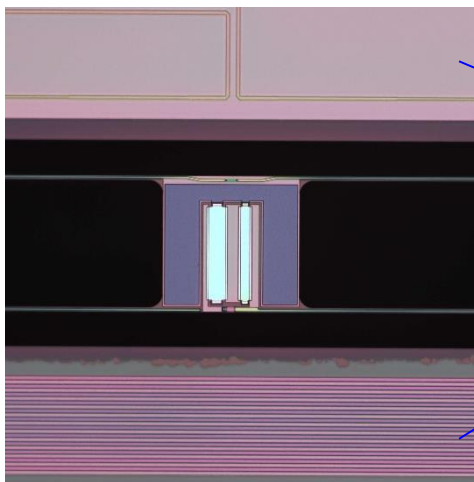
➤ Argonne, FermiLab, SLAC

➤ JPL

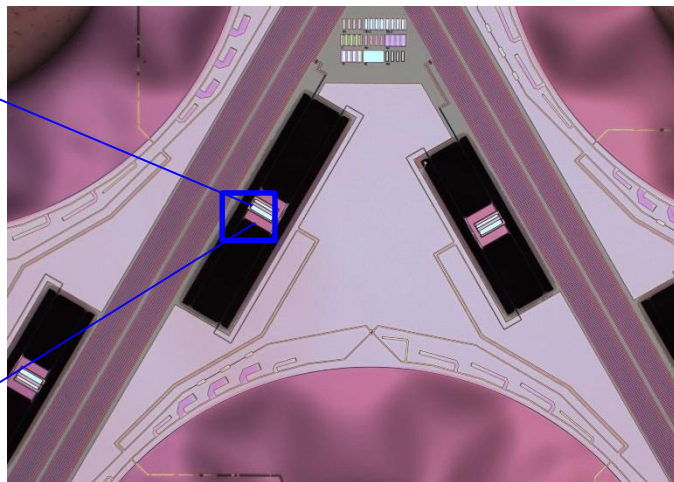
➤ Berkeley, Caltech



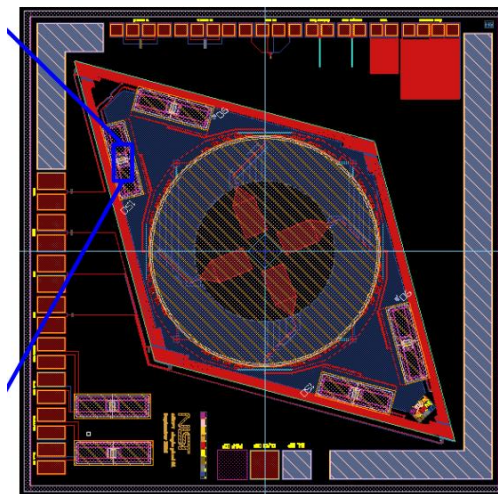
Feedhorn阵列



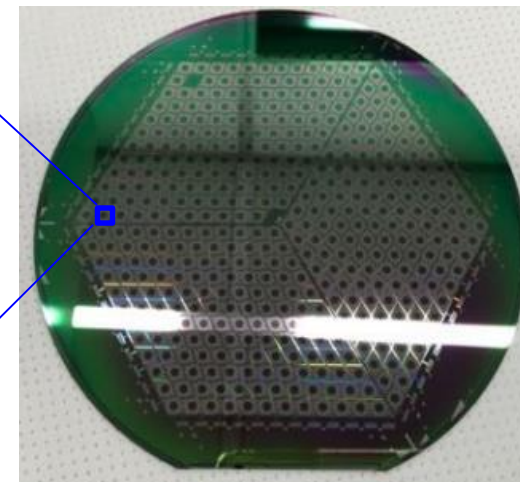
~ 150um*25um



TES像素镜检照片
(左/右: 90GHz/150GHz)



Figures credit: NIST

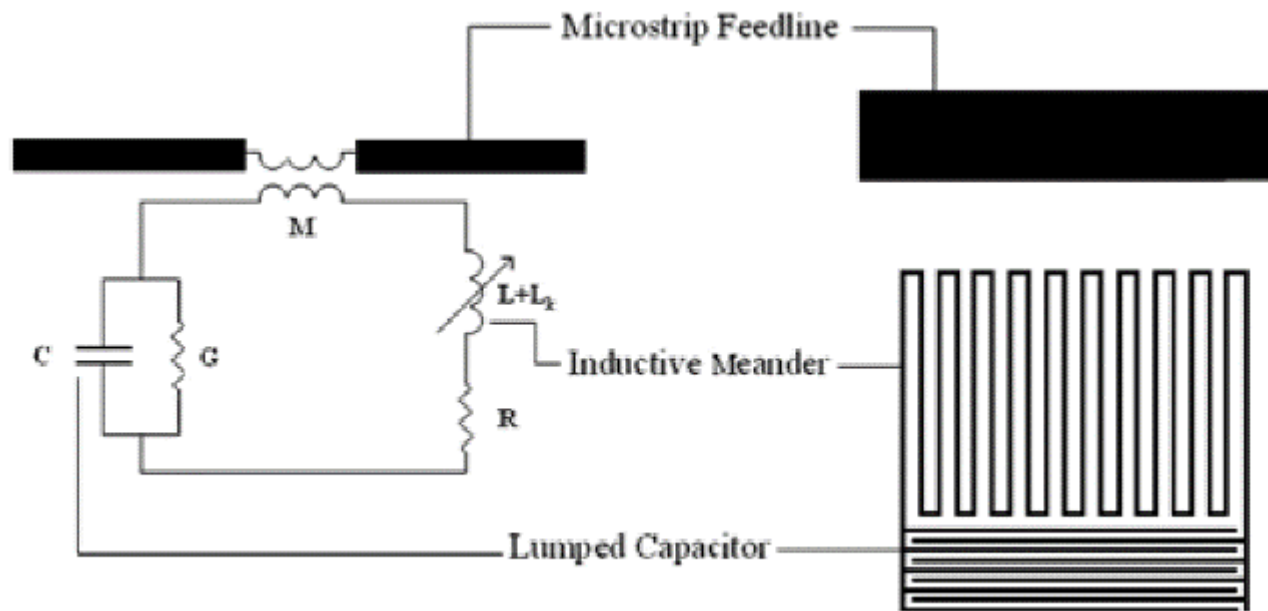


TES探测器阵列
6吋wafer

KIDs: Kinetic Inductance Detectors, 详见 缪巍 报告



Wavelength related KID

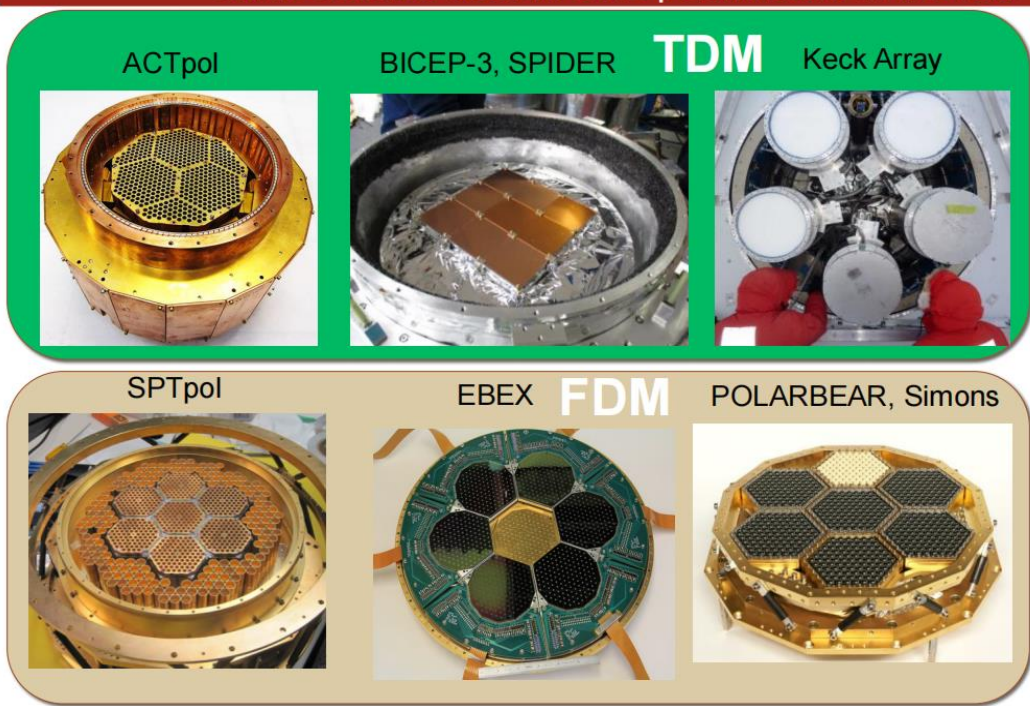


Lumped Element KID

优点: 易于加工, 读出电子学简单, 更适合高频探测;

缺点: 对薄膜质量要求较高, 目前的噪声水平相对TES较差, 但已经小于光子噪声; 目前应用相对偏少。

Some SQUIDs used in CMB polarimeters in the field



时分复用

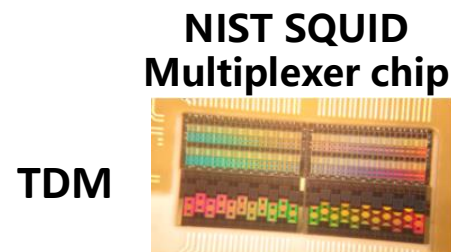
频域复用

采用超导量子干涉仪SQUID是目前唯一选择

上海微系统所, 计量院: TDM

高能所: μ Mux SQUID

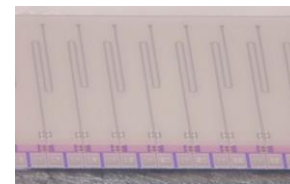
复用比 适用情形



100:1

中小规模阵列

μ Mux
Readout



2000:1

(超)大规模阵列

时分复用TDM 低温芯片开发难度更大
微波复用 μ Mux 室温电路开发难度更大

3

原初引力波实验发展趋势

美国

- CMB-S4: ~ 0.0005
 - 18小口径+3大口径, 共计50万Dets
 - 南极+智利
 - 30-280GHz
 - ~ 6 亿\$
- SO天文台: ~ 0.001
 - 3小口径+1大口径, 共计10万Dets
 - 智利
 - 25-280GHz
 - ~ 2.8 亿\$
- PICO: ~ 0.0001
 - 大口径, 1.3万Dets
 - 日地L2
 - 21-800GHz
 - ~ 10 亿\$

欧洲

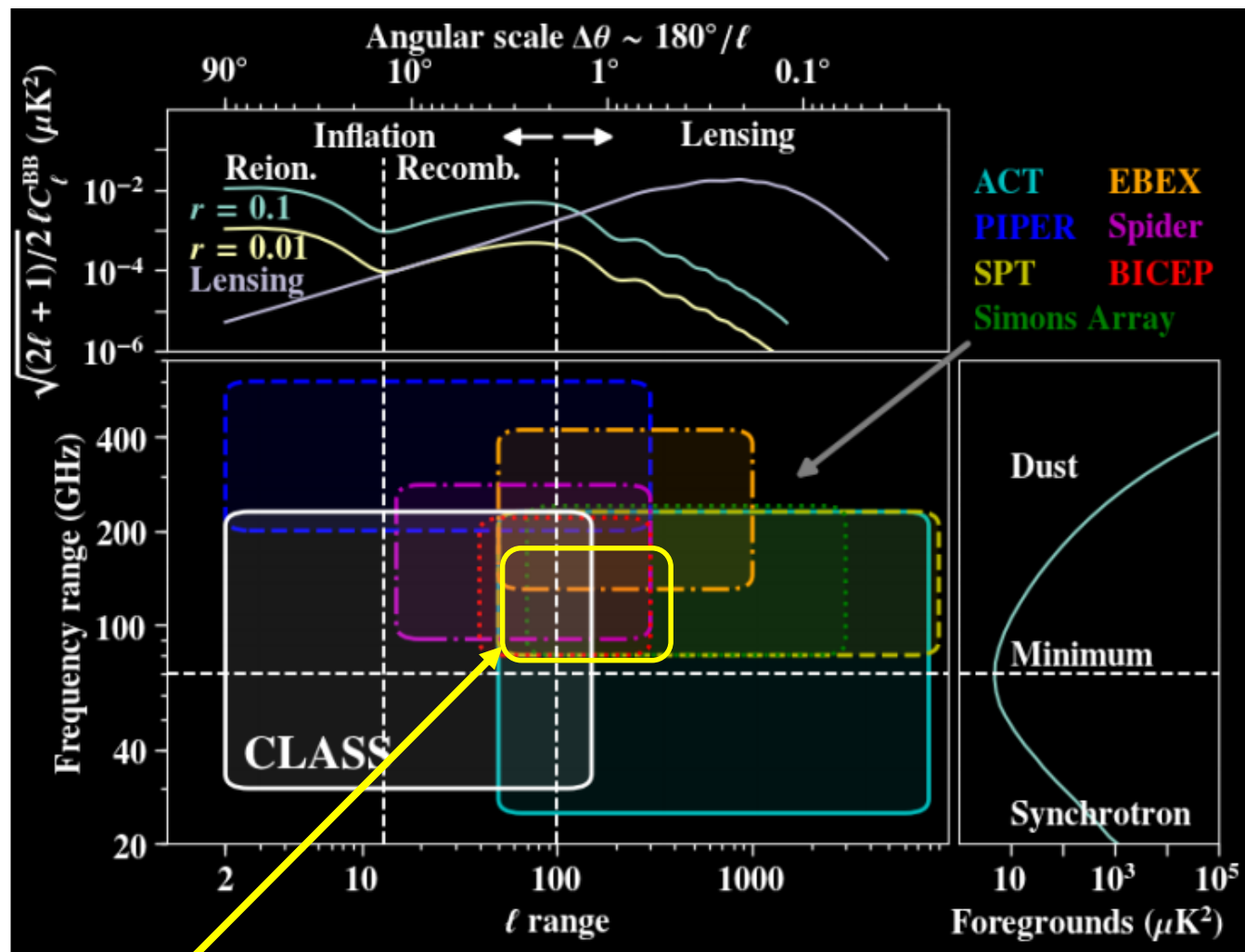
- ECMB
 - Tenerife
 - NIKA2
 - QUBIC
- COrE+
 - 大口径, 5000Dets
 - 60-800GHz
 - ~ 7 亿€

日本

- LiteBird: 0.001
 - 小口径, $\sim 3k$ 探测器
 - 34-448GHz
 - ~ 4 亿\$

规划中实验的几个特点：核心是提高 r 精度

- 覆盖更多频段
 - 地面实验覆盖全部大气窗口
 - 大小口径望远镜相结合，地面实验迈向 $r \sim 0.001$
- 覆盖更大天区
 - 多台址，南北半球联合观测
- 更多探测器数量、更好的性能
 - 迈向10万量级
 - TES工作温度 $\sim 100\text{mK}$
- 实验费用高
 - 超过10亿RMB
- 走向空间CMB实验
 - 探测器效能100:1， r 推进到 $(1\text{E-}4 \sim 1\text{E-}5)$ 量级



AliCPT-1

地面实验，角尺度和频段选择

3. 发展趋势：我国的CMB实验



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

- 基本与美国的路线图一致。
- 实现从0到1， 从跟跑到并跑， 需要思考如何变成领跑。

3. 发展趋势：我国的CMB实验技术



- 围绕我国CMB实验路线图，开展核心技术自主研发
 - 实现TES探测器工作温度降低到 $\sim 100\text{mK}$ ，从单像素到高集成度阵列化的突破 – 多频段，多色阵列。
 - 实现 $\mu\text{Mux SQUID}$ 超过1000:1复用比的芯片突破。
- 扩展到空间CMB实验SCPT
 - 实现mKIDs阵列化突破，为450GHz以上频段储备技术解决方案。
 - 实现大冷量连续型空间应用深低温制冷机技术突破。

国内多家单位相互协作：

1. 通过AliCPT-1在国内形成了一支CMB实验技术队伍。
2. 高能所、国家天文台、紫台、上微所、苏州纳米所、理化所、计量院、天光所、合肥物质院等多家单位在AliCPT-1研制及后续专项项目中分工合作，在各自优势领域开展关键技术自主研发。

目标: 实现以TES（当前应用）、mKIDs（面向未来）探测器为核心的技术突破和储备，为后续实验项目顺利开展提供保障，也为其他领域未来需求提供技术支撑。

Detectors and instrumentation: a strategic review

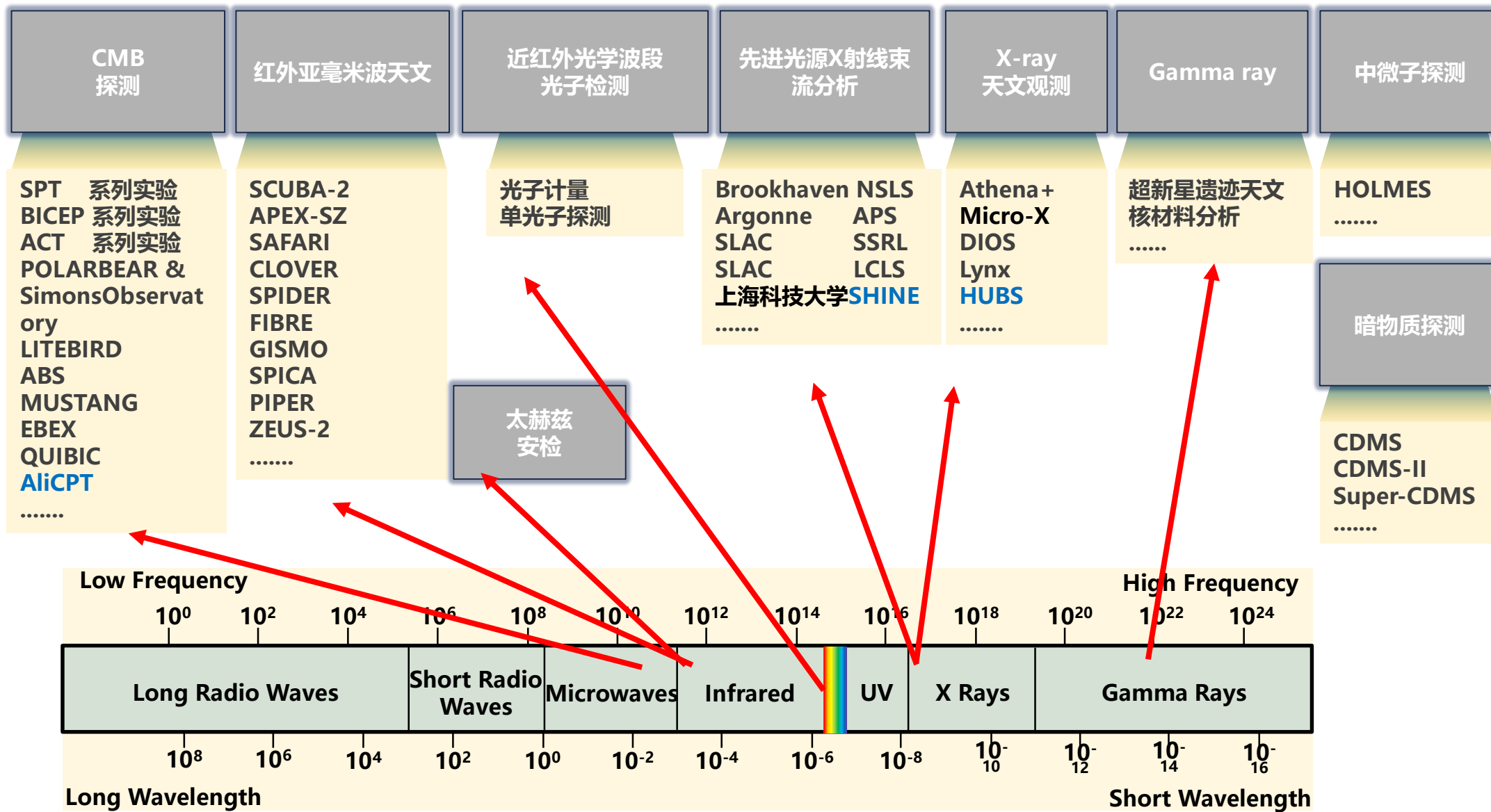
2019

Actions to consider:

- support research groups working in this area contributing to international collaborative instrumentation; consider potential opportunities in future facilities that can exploit **superconducting** detector technology

- New advances in this technology are enabling a step change in current instrumentation enabling **ground breaking new science**.
- The sensitivity of such devices **cannot be rivalled** by non-superconducting technologies and they have a wide range of applications in **astronomy**, and more widely in **electromagnetic radiation and quantum sensing**. ...also have applications in **Earth observation and climate change, medical imaging, quantum computing and security**.
- Superconducting detectors are the **only suitable technology** for a range of far infrared and sub-millimetre astronomy instrumentation applications aligned with the **science goals highlighted** in the STFC's science challenges, including cosmic microwave background anisotropies, star formation, and galaxy formation and evolution.

3. 发展趋势



- 科学机遇仍然存在
 - AliCPT-1望远镜及未来规划性能世界一流，北半球海拔最高灵敏度最高（未来若干年仍将保持领先）。
- 项目实施难度大
 - 未来10年是关键时期，国际竞争压力大。
 - 开展国际合作的同时，需掌握核心技术。
- 未来发展空间CMB计划SCPT十分必要
 - 必须要掌握核心技术

谢谢！

希望领导和专家们继续关注和大力支持我国原初引力波探测计划！



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences