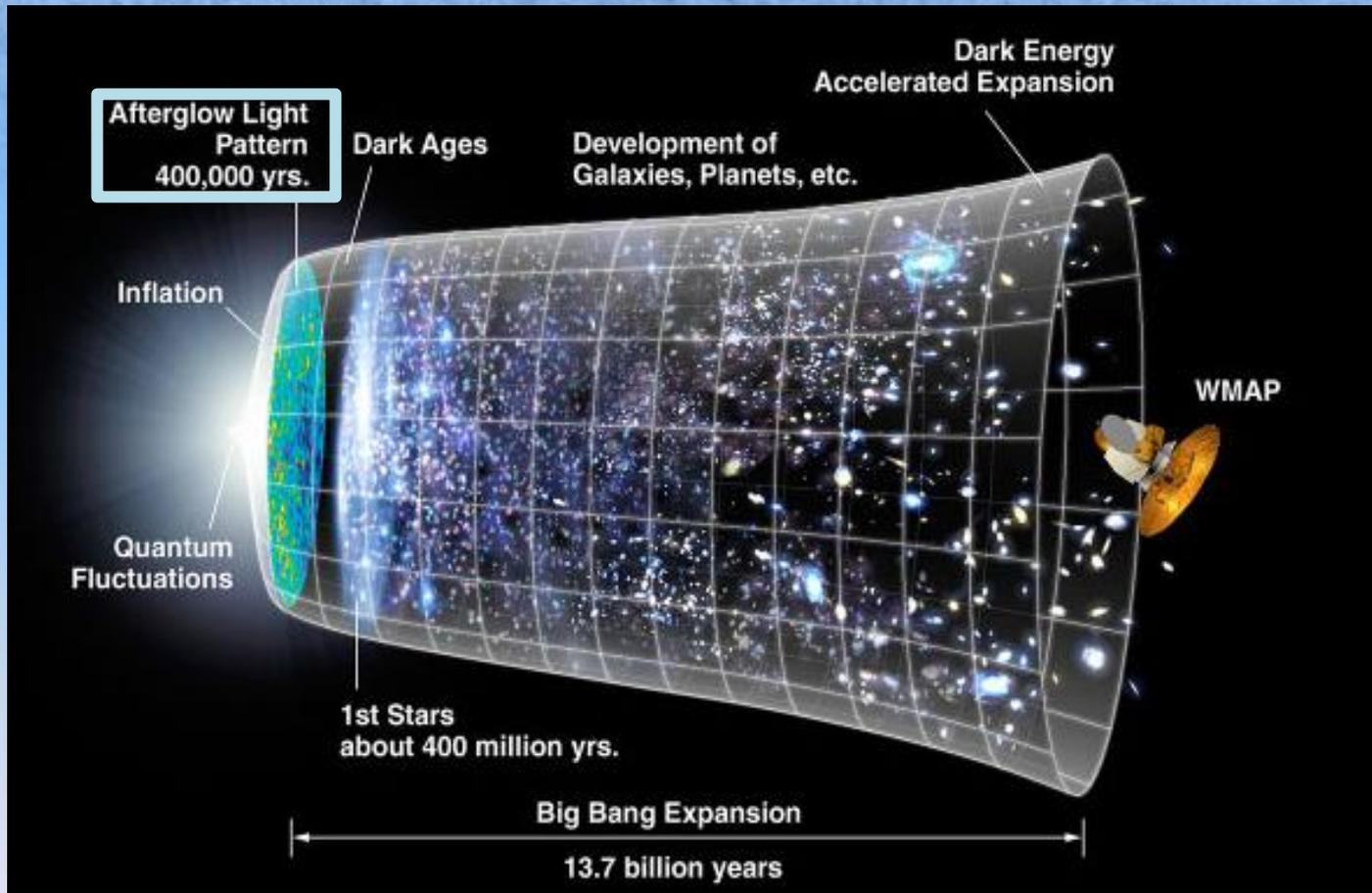


宇宙マイクロ波背景放射偏光測定用 小型科学衛星Lite BIRD

岡山大学 服部香里

宇宙マイクロ波背景放射とは？ (Cosmic microwave background : CMB)



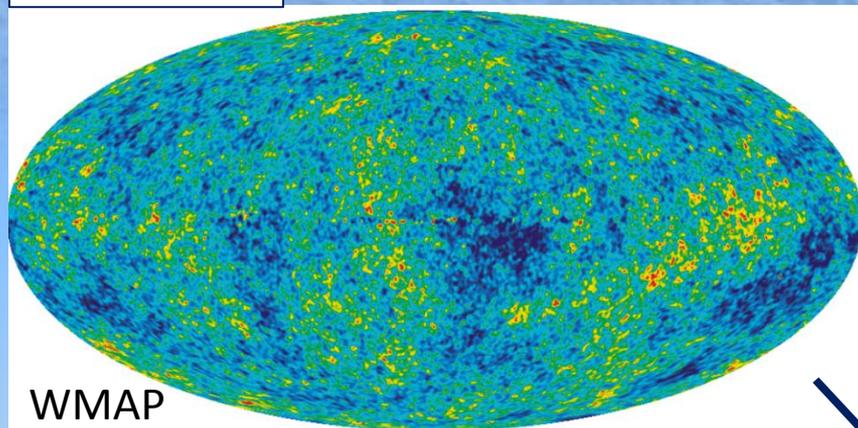
「宇宙の晴れ上がり」
宇宙が放射に対して
透明になったときの
スナップショット

2.725 Kの非常に
一様な放射

最も大きな非等方性
= 10^{-3} (地球の運動)

Bモード偏光を見たい

温度ゆらぎ



Eモード・・・温度ゆらぎ

Bモード・・・原始重力波

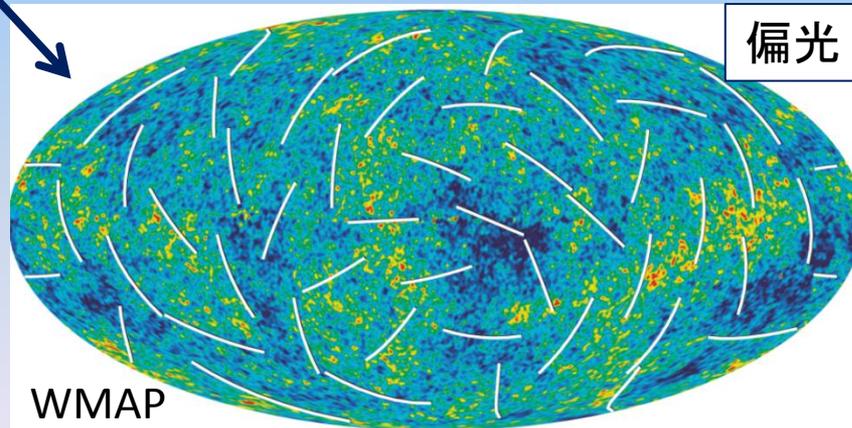
→初期宇宙の「直接」観測



プランクスケールの超高エネルギー物理
「不可能」とされてきた超弦理論のテストを
可能に

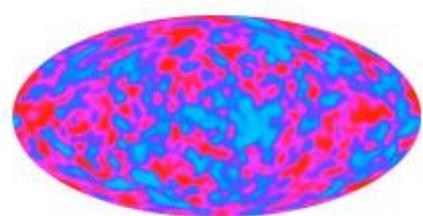
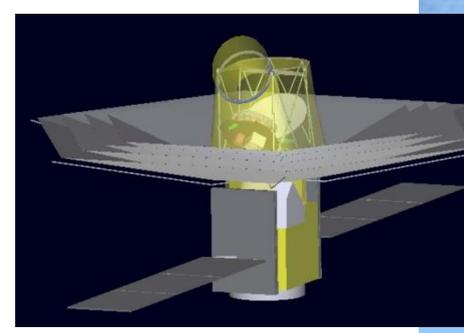
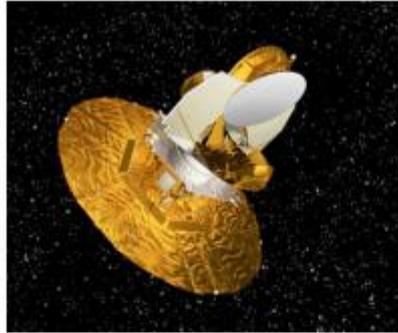
Bモードはまだ誰も見たことがない
nKの精度

偏光



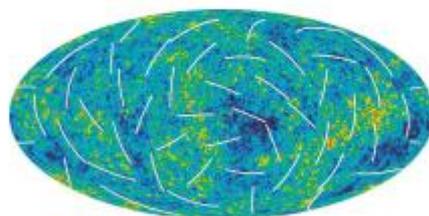
WMAP
Eモード

CMBの衛星観測



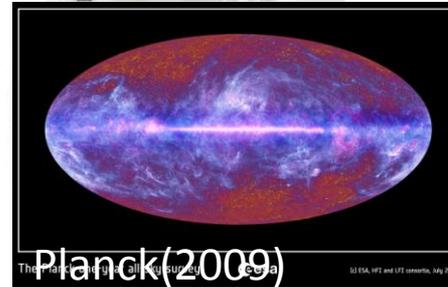
COBE (1989)

CMBスペクトル
温度揺らぎ



WMAP (2001)

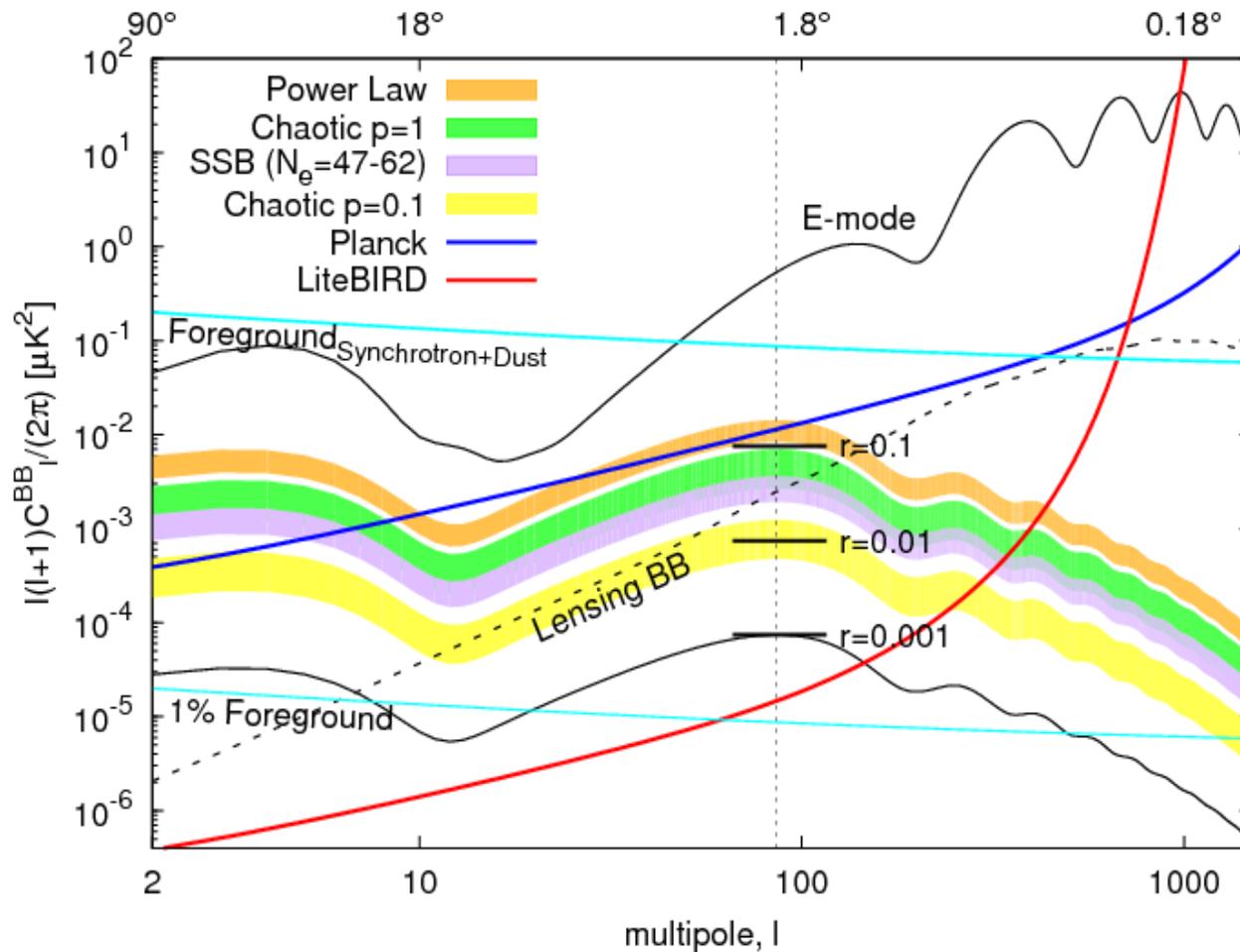
温度揺らぎの詳細観測
密度揺らぎによる偏光の観測



Planck (2009)

温度揺らぎの詳細観測
偏光の詳細観測

2020??
LiteBIRD???



原始重力波の振幅の2乗を、原始重力ポテンシャル
 (厳密には原始曲率揺らぎ) の2乗で割ったもの：

$$r = \frac{2(\langle h_+^2 \rangle + \langle h_x^2 \rangle)}{\langle \phi^2 \rangle}$$

WMAP
 $r < 0.22$

LiteBIRD ワーキンググループ

- 福家英之、松原英雄、満田和久、吉田哲也 (ISAS/JAXA) ⇒ **SPICA, DIOS, 大気球**
- 佐藤洋一、篠崎慶亮、杉田寛之 (ARD/JAXA)
- 石野宏和、樹林敦子、服部香里、三澤尚典、美馬覚 (岡山大理)
- Adnan Ghribi、William Holzapfel、Bradley Johnson、Adrian Lee、Paul Richards、Aritoki Suzuki、Huan Tran(UC Berkeley/LBNL) ⇒ **POLARBEAR, EBEX, APEX, EPIC, BICEP, SPT**
- Julian Borrill (LBNL) ⇒ **Planck, POLARBEAR, EBEX**
- 大田泉 (近畿大)
- 吉田光宏 (加速器/KEK)
- 石徹白晃治、片山伸彦、佐藤伸明、住澤一高、田島治、永井誠、永田竜、西野玄記、羽澄昌史、長谷川雅也、樋口岳雄、松村知岳 (IPNS/KEK) ⇒ **QUIET, POLARBEAR, (Planck, BICEP, EBEX 松村)**
- 木村誠宏、鈴木敏一、都丸隆行 (低温セ/KEK) ⇒ **POLARBEAR**
- 柳沼えり (総研大)
- 小松英一郎 (UT Austin) ⇒ **WMAP**
- 鵜澤佳徳、関本裕太郎、野口卓 (ATC/NAOJ)、
- 茅根裕司、服部誠 (東北大理) ⇒ **QUIET (茅根)**
- 高田卓 (筑波大)
- 大谷知行 (理研)
- 高木雄太、中村正吾、村山慧 (横浜国大)

- コンサルタント : 小玉英雄 (KEK)、中川貴雄 (JAXA)、川邊良平 (NAOJ)

ミリ波を見たい

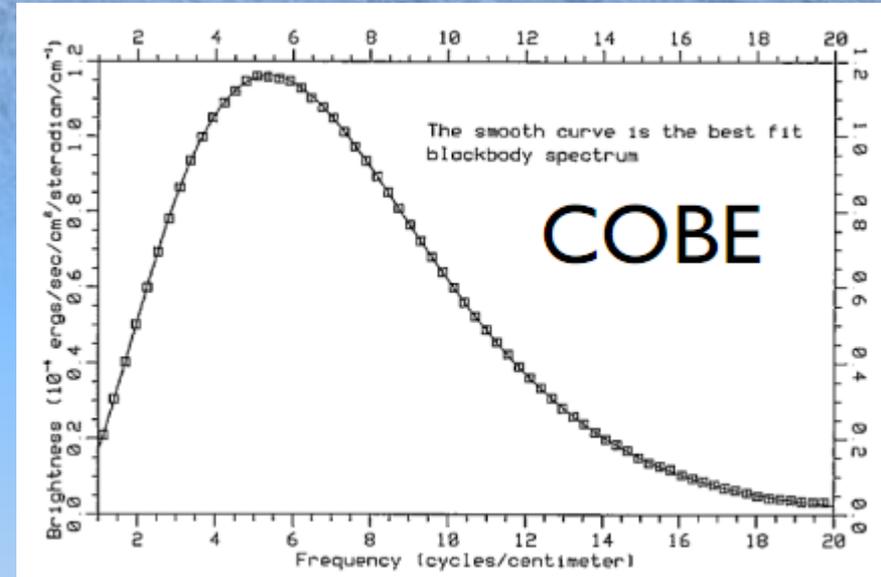
(2.725 ± 0.002) Kの黒体放射
160GHz(0.68 meV)でピークを持つ
プランク分布



ミリ波に感度があり
非常に低ノイズな検出器



超伝導検出器



ボロメータ

アブソーバでの吸収→温度上昇



TES (Transition Edge Sensor)

クーパ対破壊型

2Δ (Cooper対破壊)がmeVオーダー



STJ (Superconducting Tunnel Junction Sensor)

MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)

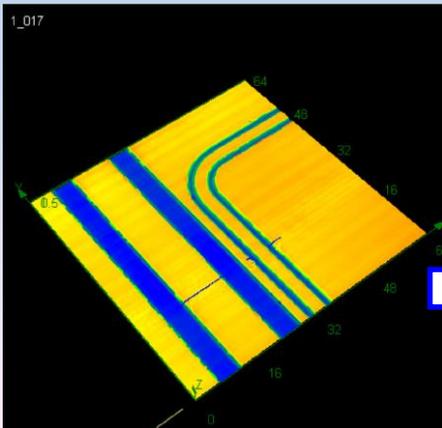
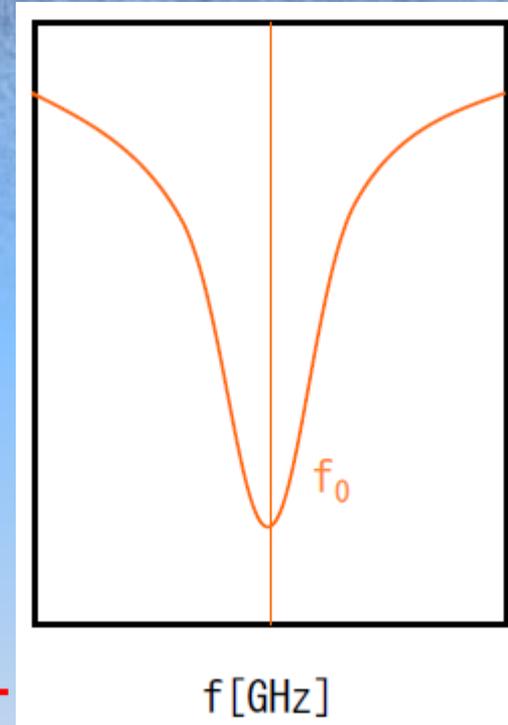
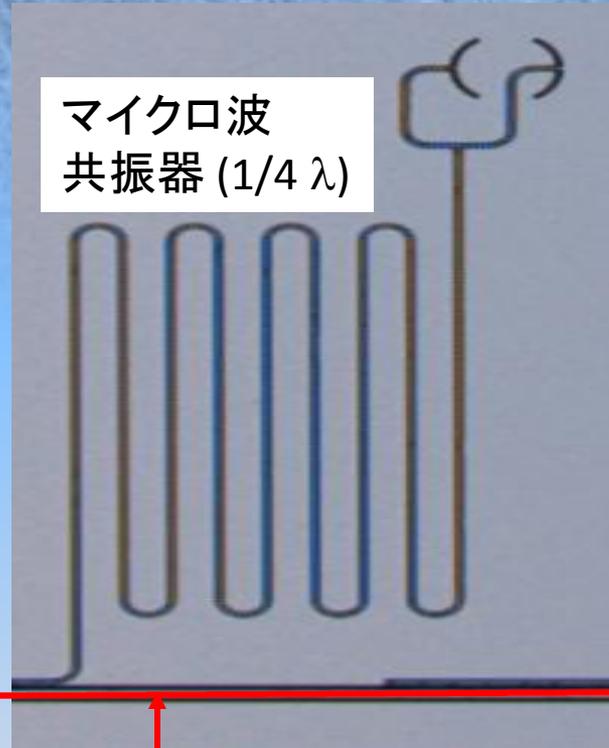
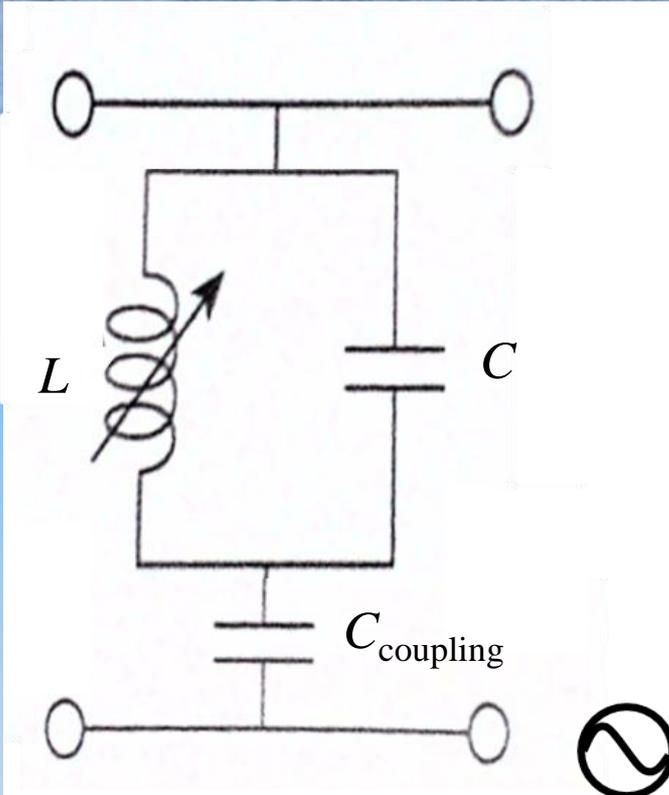
ダークマター (CDMS)
X線 などなど



Day et al. Nature 425, 817–821, 2003

一本の線で複数チャンネル読める
→熱流入の抑制・消費電力低減

MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)



5GHz feed line 共振周波数 f_0 でマイクロ波の吸収が起こる

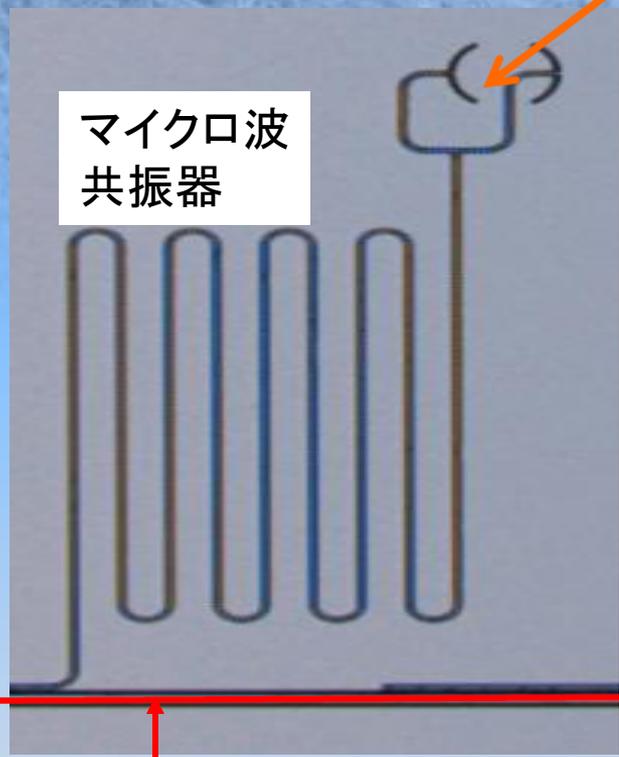
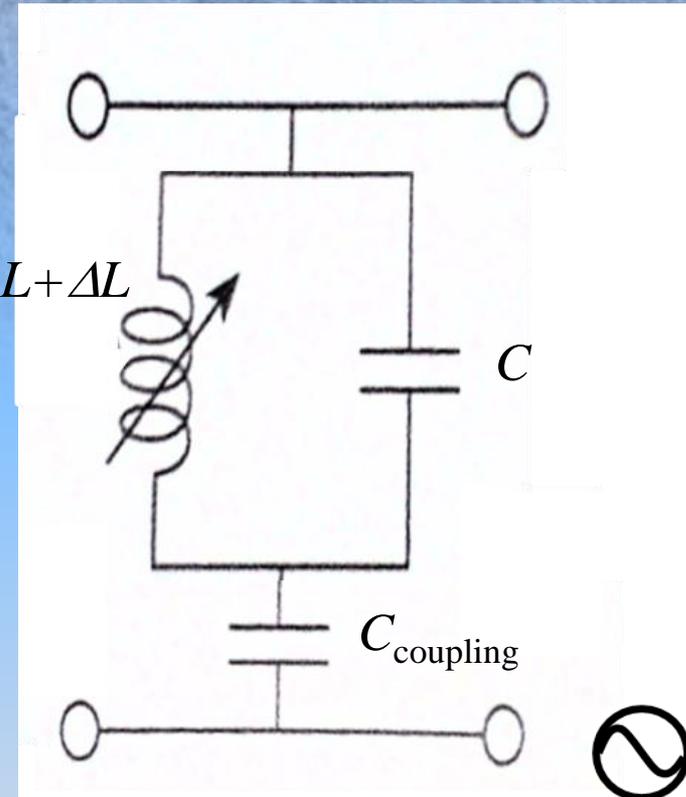


Nb, Al等

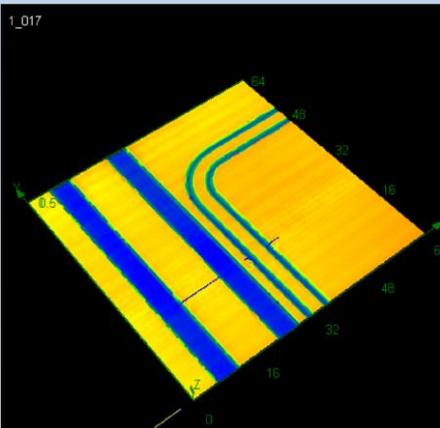
基板

MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)

CMB (~100GHz)



**Kinetic Inductance
が変化**



5GHz feed line

$$L = L_m + L_k$$

L_m : magnetic inductance

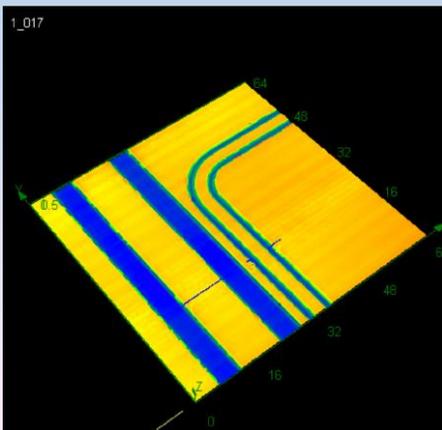
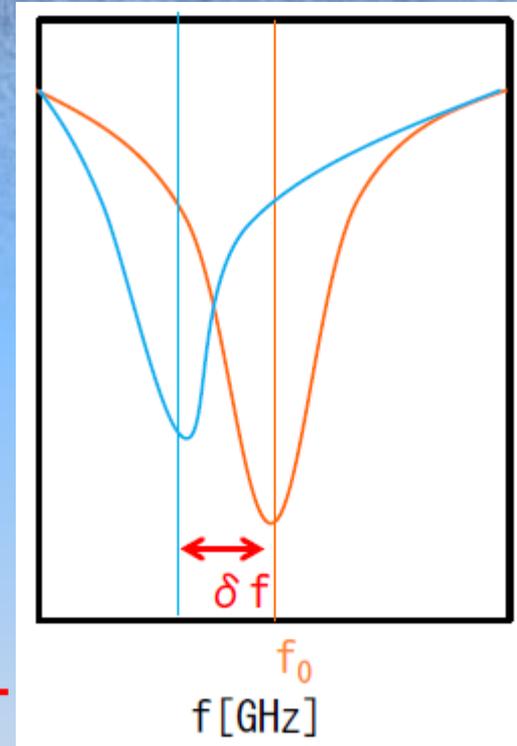
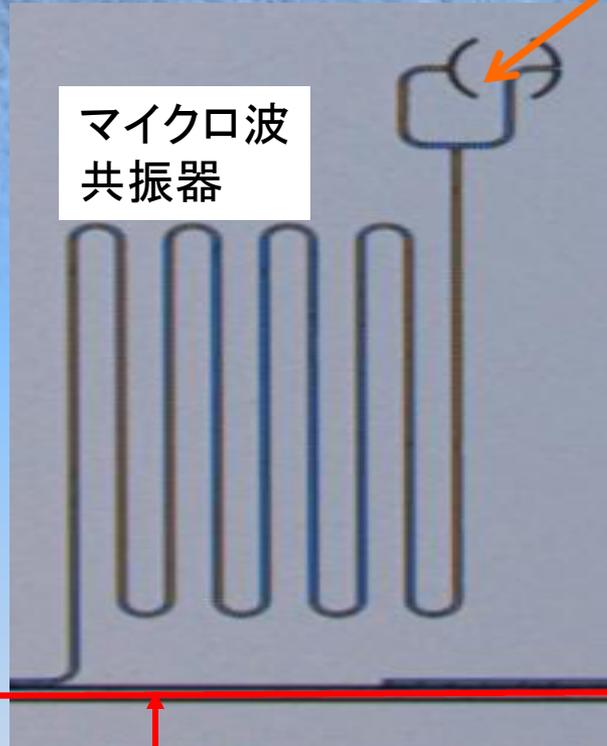
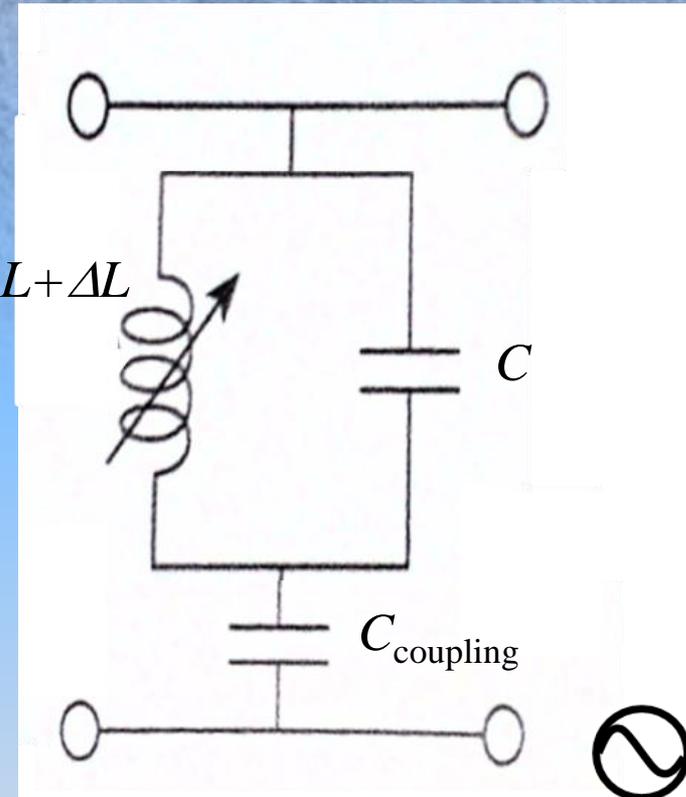
L_k : kinetic inductance

電子の慣性

常伝導体では $L_k = 0$

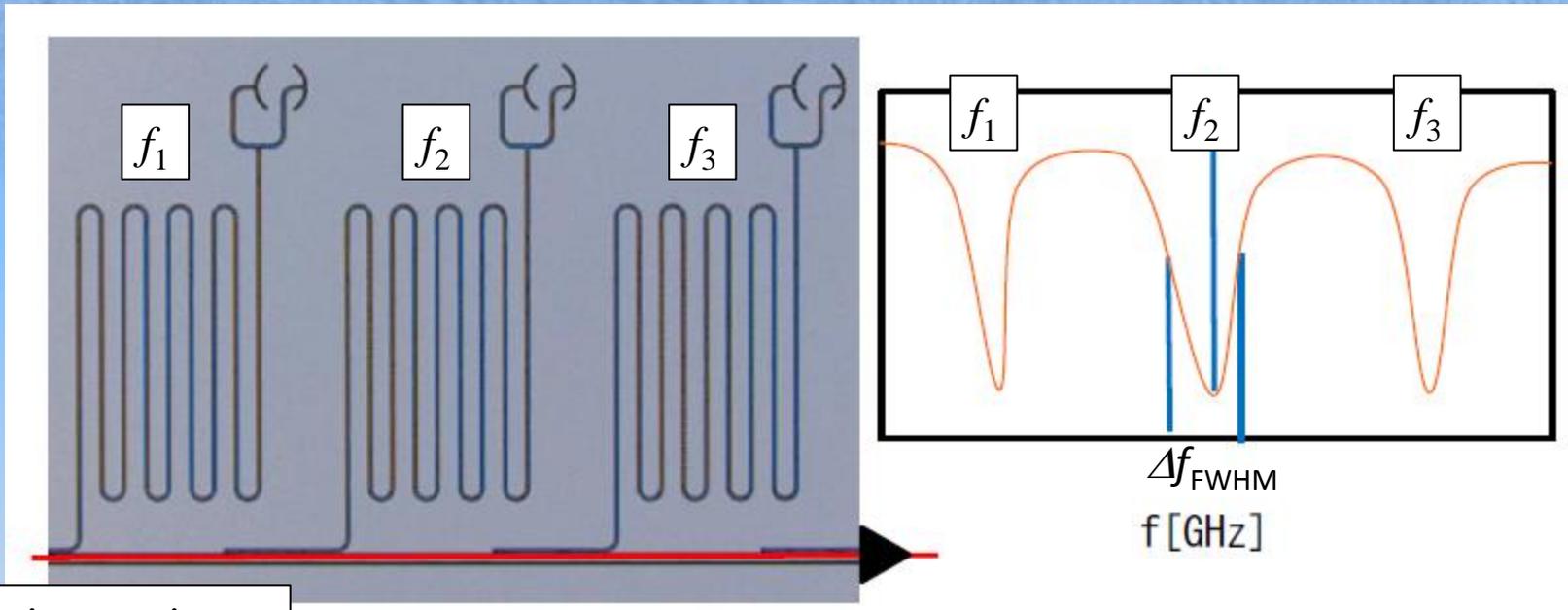
MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector)

CMB (~100GHz)



ΔL に応じて共振周波数 f がずれる

多チャンネル読み出し



$$\sin\omega_1 t + \sin\omega_2 t + \sin\omega_3 t$$

帯域50 MHzのADCで
Q値= 2×10^5 の($\Delta\omega_{\text{FWHM}} = 0.03$ MHz)MKIDを
共振周波数を0.3 MHzずつ変えて一本の線で読み出し
→ 166 ch同時読み出し

$$Q = \frac{\Delta\omega_{\text{FWHM}}}{\omega}$$

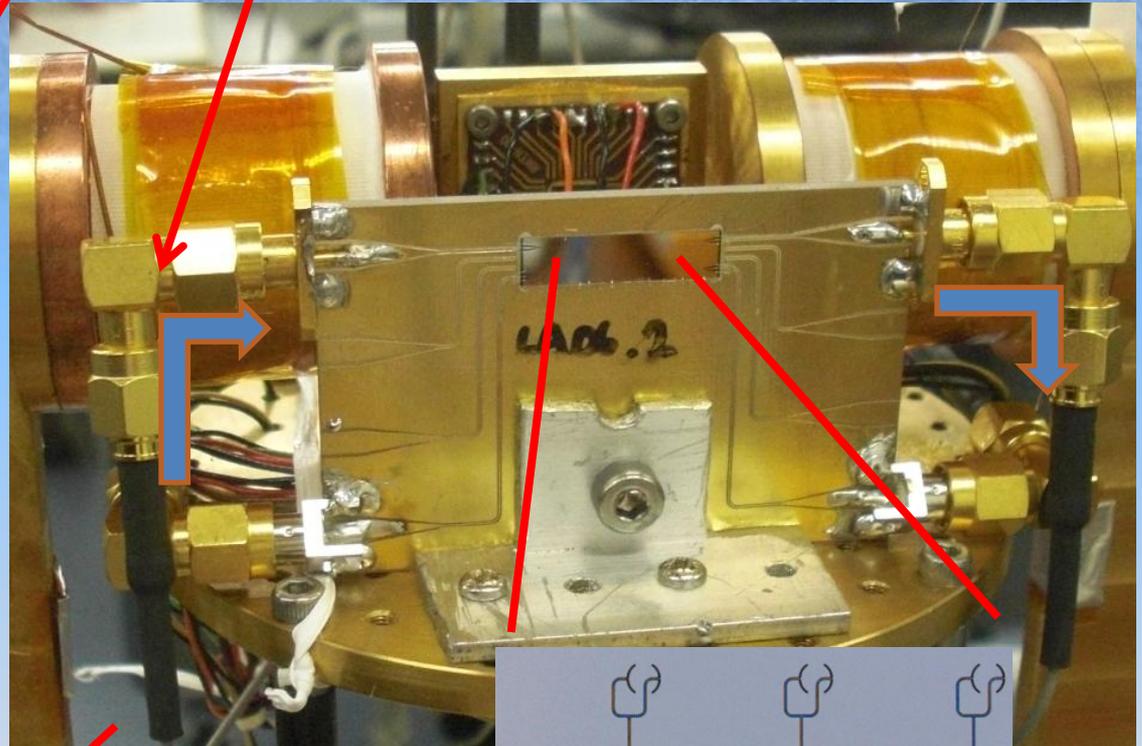
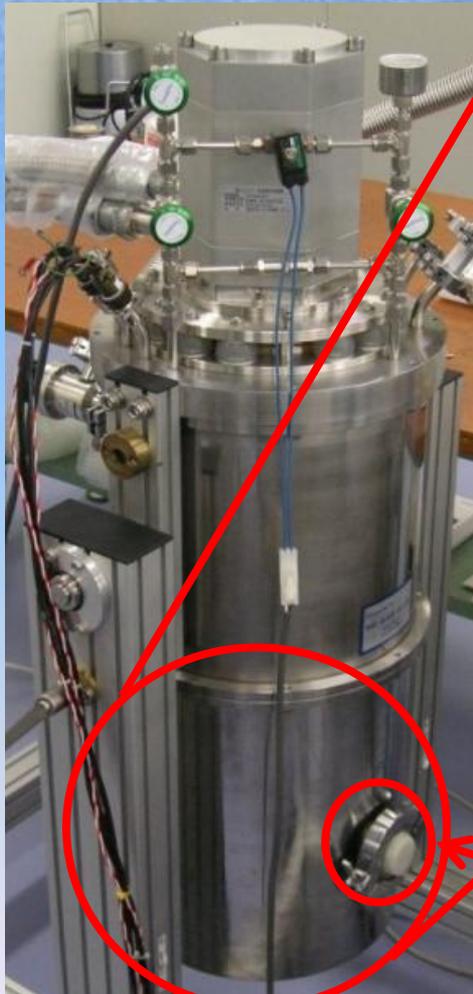
素子作成@KEKクリーンルーム



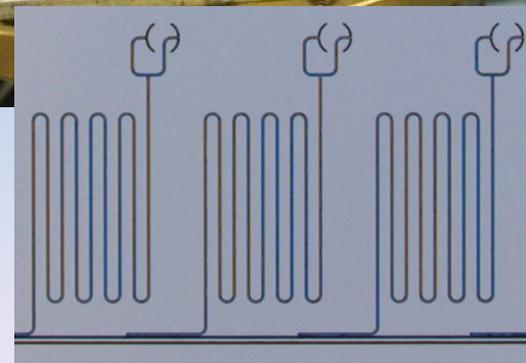
冷凍機実験のセットアップ

Sorption refrigerator(0.3K)

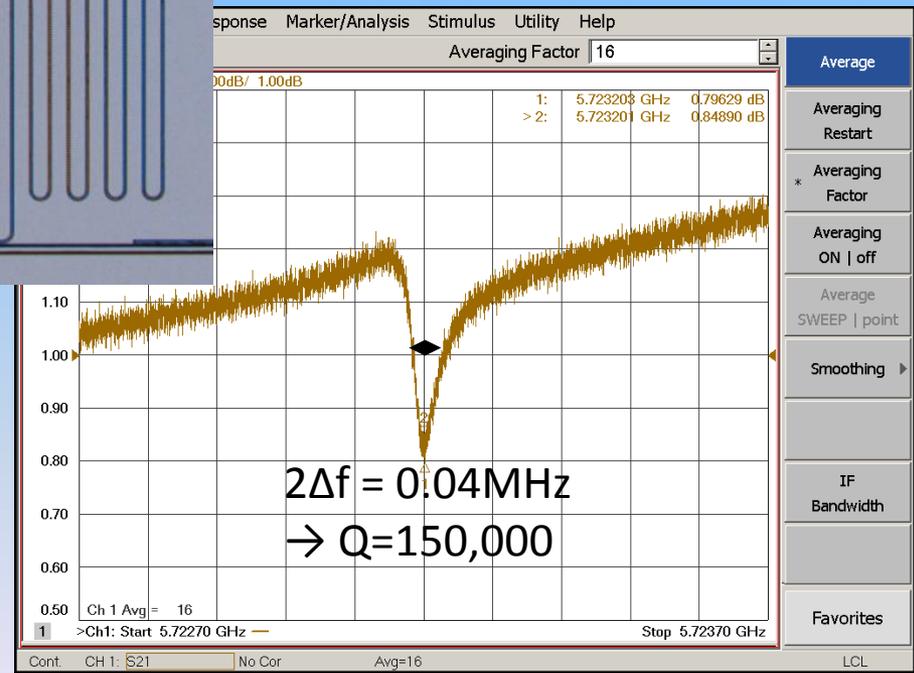
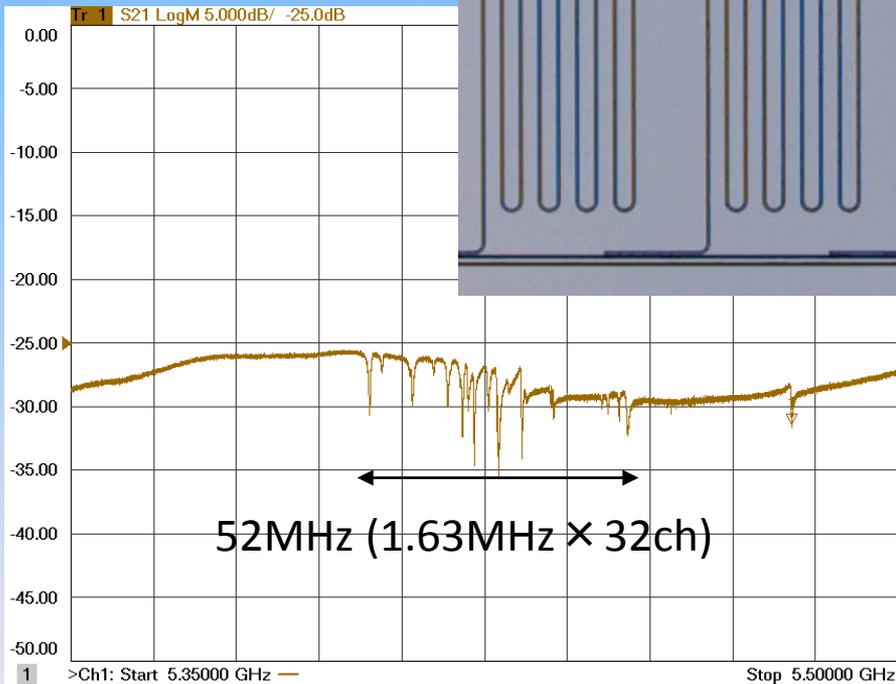
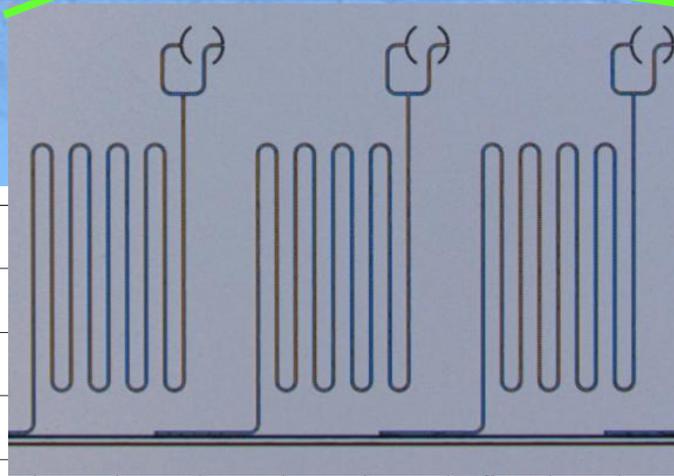
同軸ケーブル



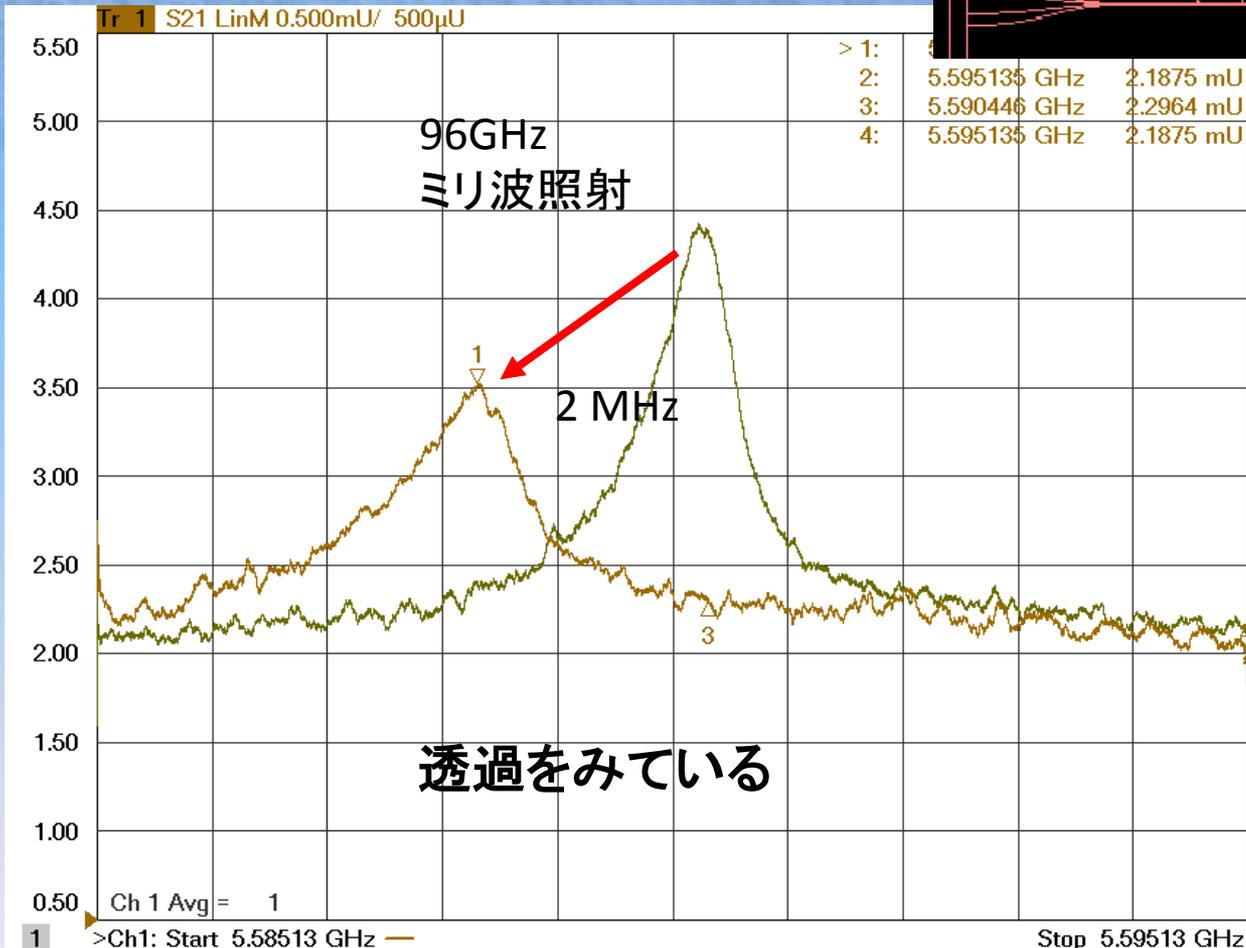
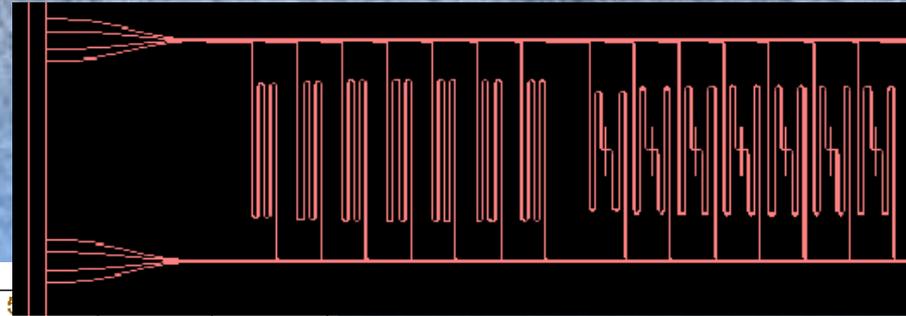
Polyethylene window



Nb-MKIDs 32 ch



ミリ波照射



ミリ波に感度のある
Al-MKIDsで試験

Q~5000程度
@ 0.34 K



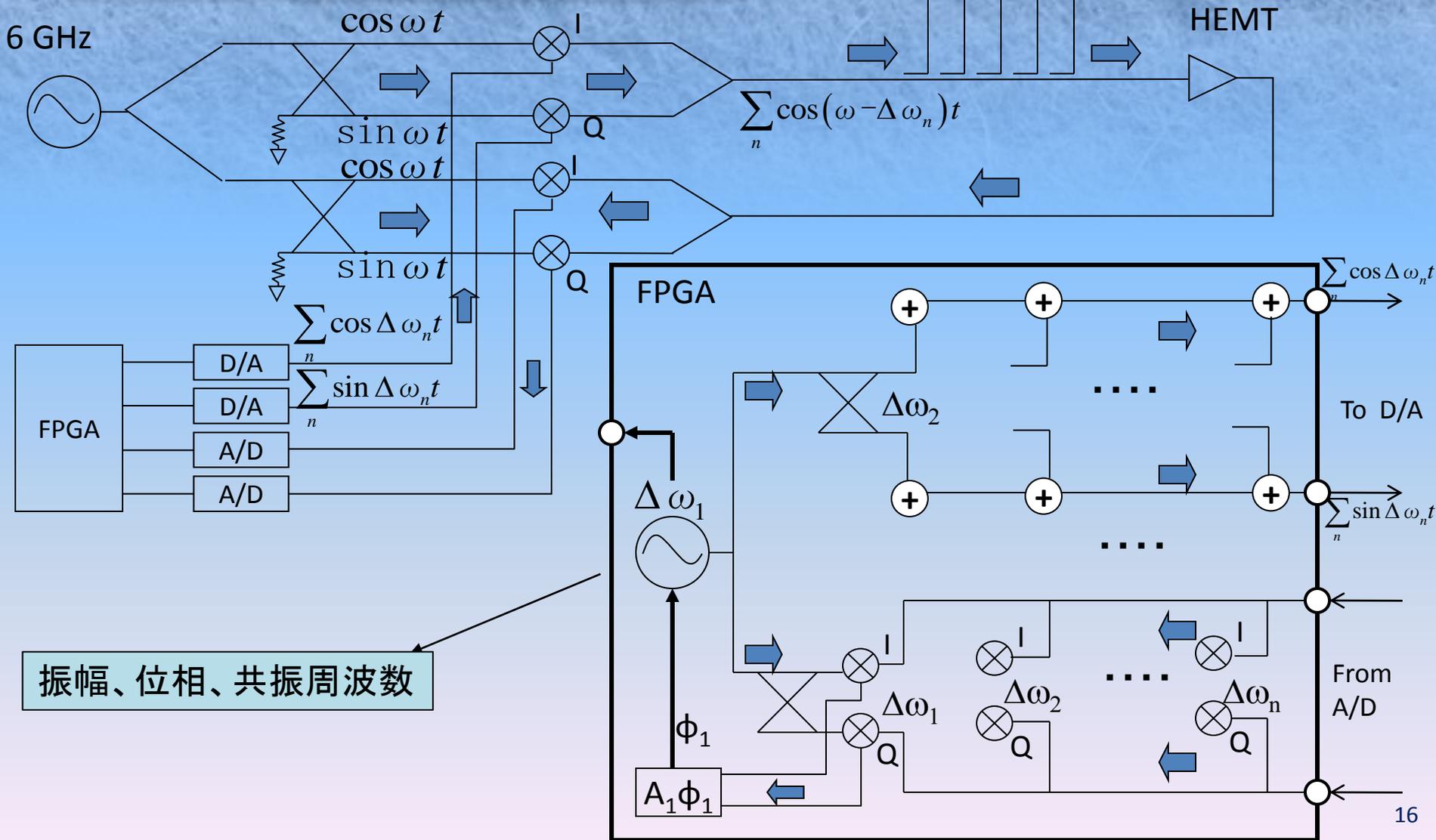
希釈冷凍機(100 mK)で
試験する必要有

多チャンネル読み出し

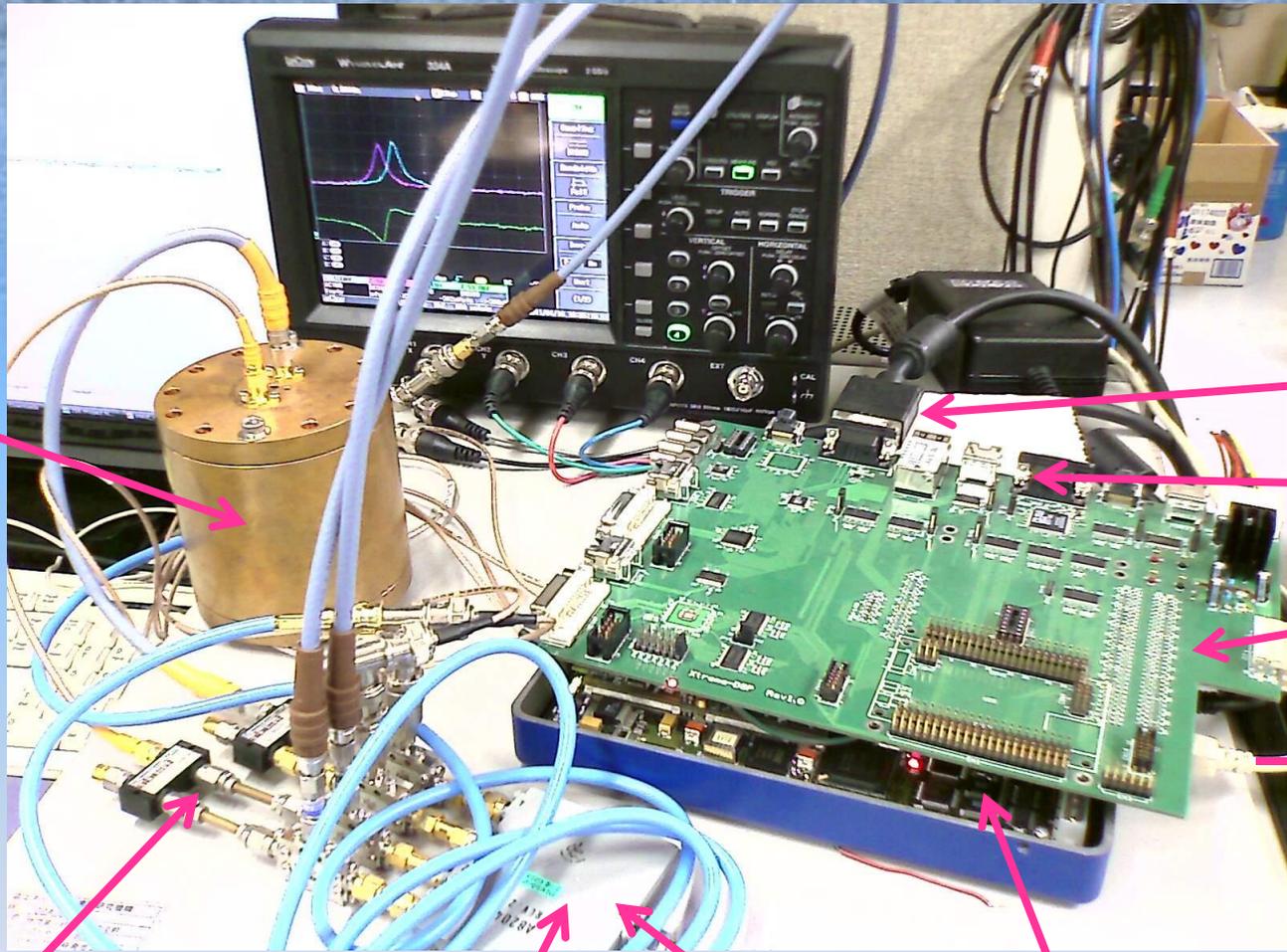
Track resonance frequency ($=\omega+\Delta\omega_1, \dots, \omega_n$), amplitude (A_1, \dots, A_n), and phase (ϕ_1, \dots, ϕ_n)

MKIDs $\times 32$?

$(\omega - \Delta\omega_1) \dots (\omega - \Delta\omega_{32})$



セットアップ



共振空洞
5.105 GHz
本試験では
MKIDsに接続

analog RGB

digital RGB

変換ボード

to USB
レジスタR/W
DMA転送

IQ mixer

Divider

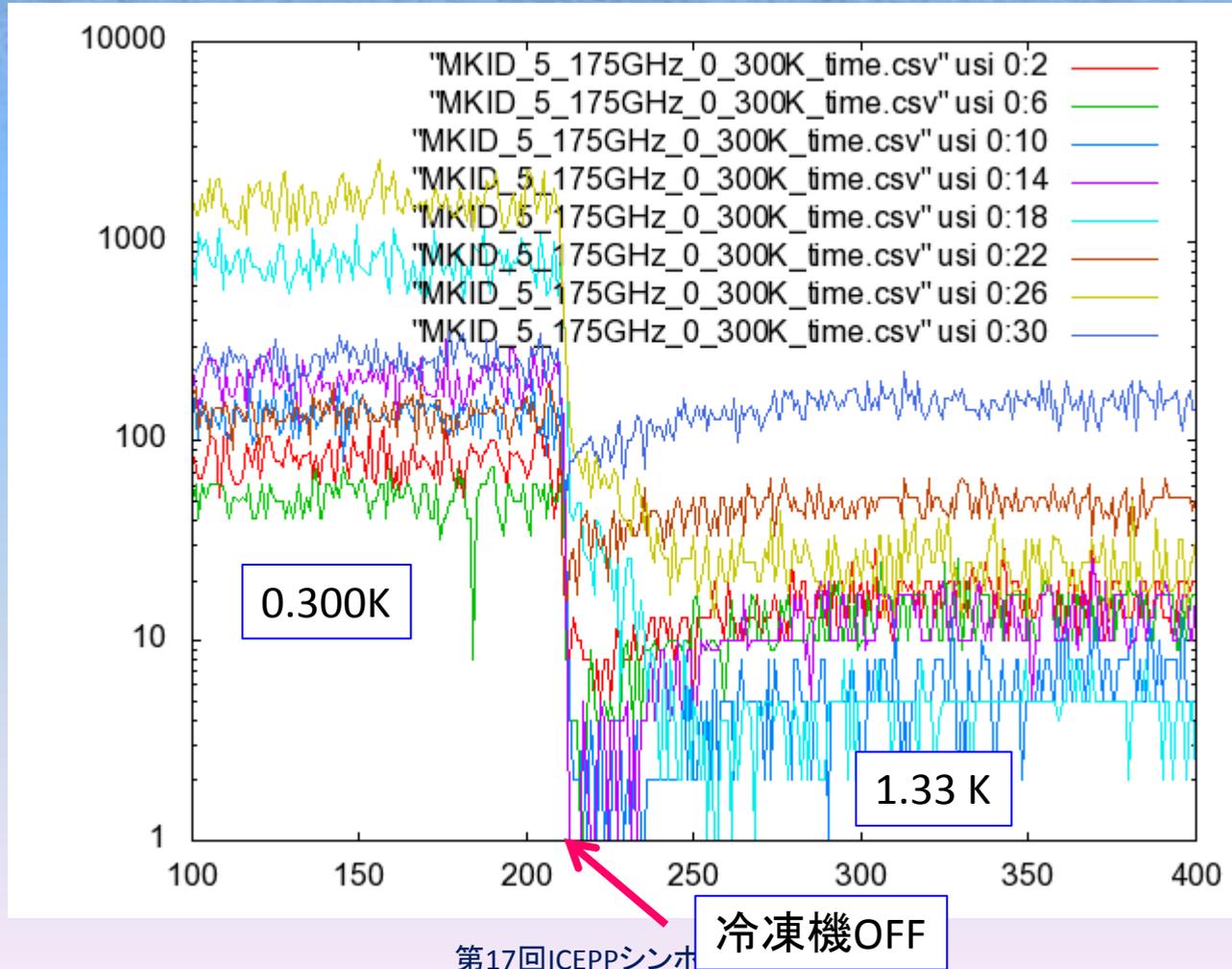
from signal
generator

評価ボード

FPGA Virtex-4 105 MHz
14 bit ADC 105 MHz
14 bit DAC 105 MHz

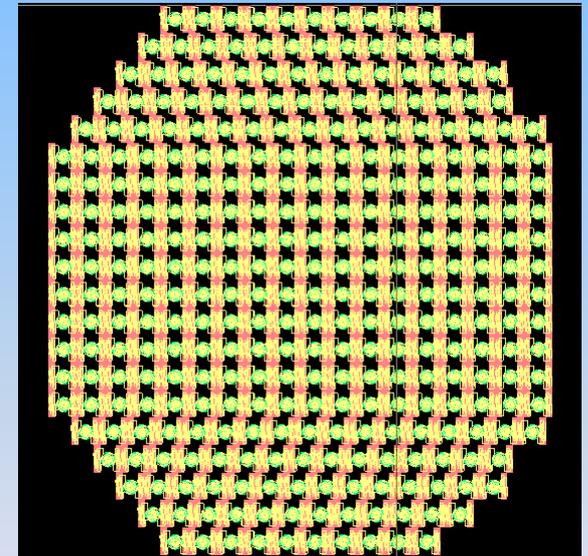
多チャンネル同時読み出し試験

8チャンネル同時読み出しで時間変化を追い、
期待通りのデータが得られた



まとめ

- Bモード偏光 → 原始重力波 → 初期宇宙の直接観測
- nKオーダーの感度が必要
- 小型科学衛星LiteBIRDを飛ばす！(2020?)
- 焦点面検出器として2,000 chの検出器が必要
候補の一つとしてMKIDを開発中
- 素子製作・冷凍機の評価系がKEKにそろっている
- Q値 = 10^5 を達成
- ミリ波を検出
- 多チャンネル同時読み出しに成功



多チャンネル多色MKIDs

backup

LiteBIRD: 衛星の構成

打ち上げ時期: 小型衛星3-4号機として2018年頃の打ち上げ。

観測期間: 1年以上。

軌道: 太陽同期軌道。

地球周回以外にL2での観測も議論中。

ロケット: イプシロンロケット。

重量: 400 kg(バス部を含む)

姿勢: 太陽と地球に背を向けたスピン衛星。

搭載機器:

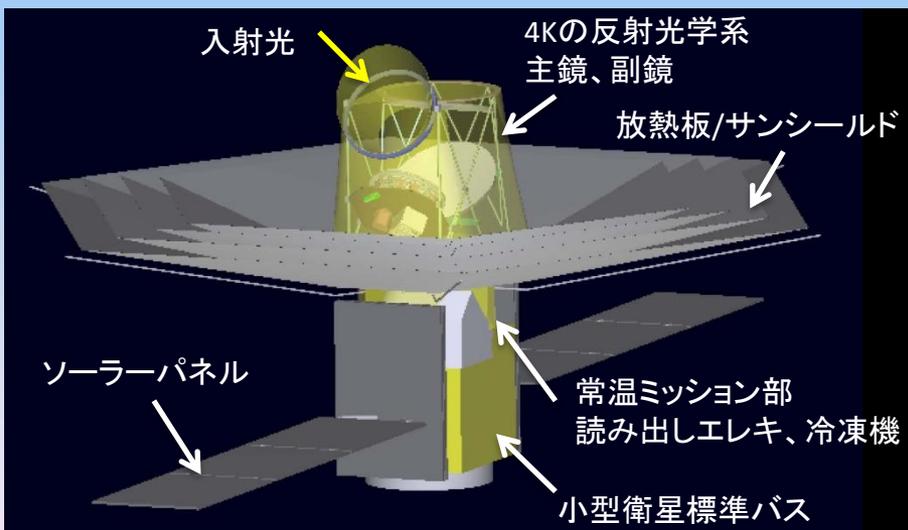
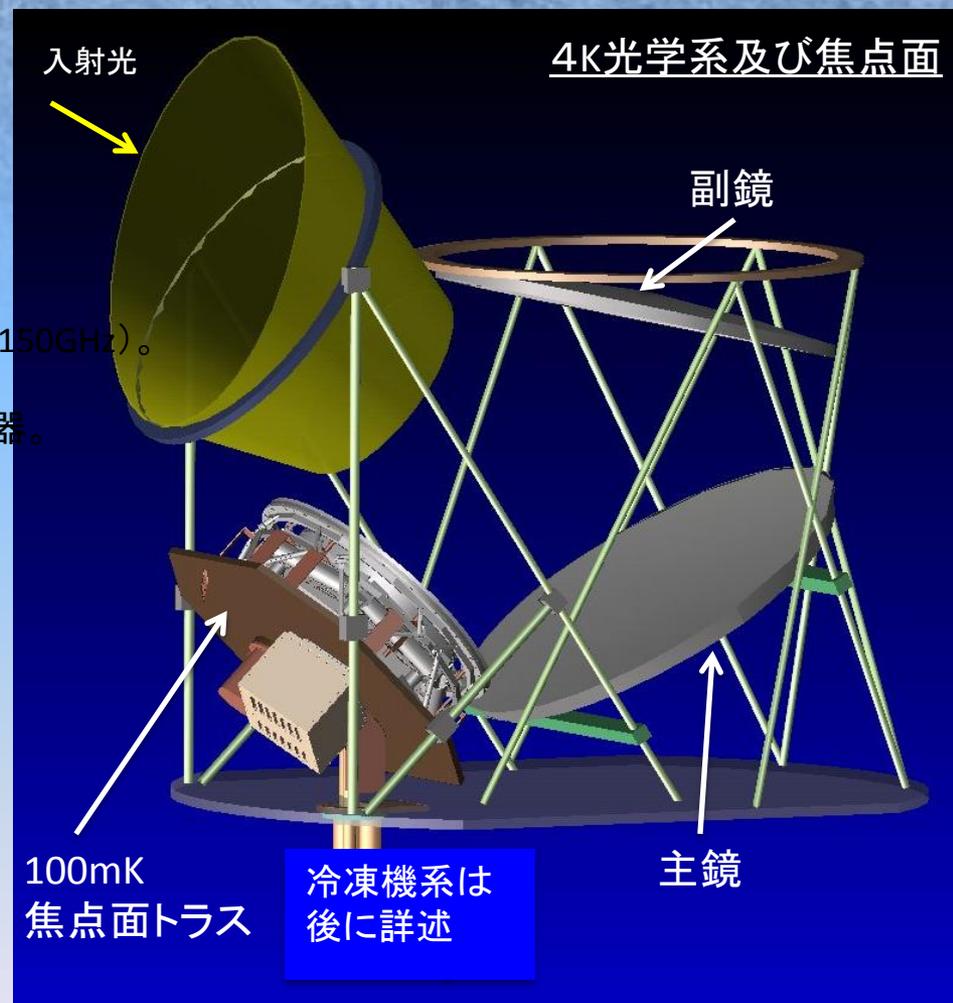
ミリ波反射型望遠鏡

解像度: 30 arcmin.の解像度(@150GHz)。

検出器

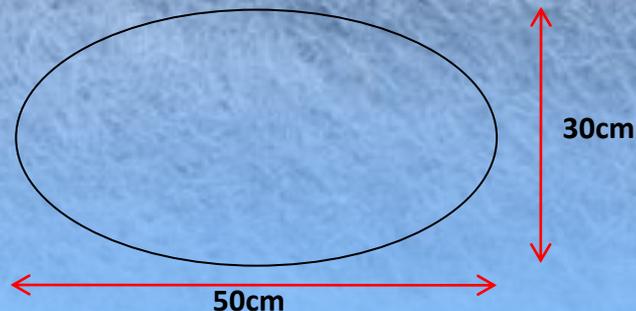
動作温度100 mKの超伝導検出器。

帯域: 50-250 GHz

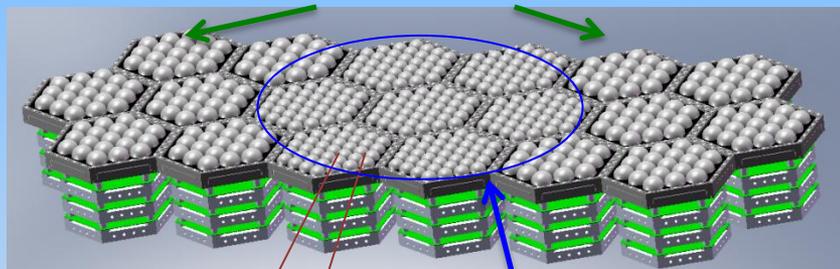


LiteBIRD: 光学系

この光学系で利用可能な焦点面



60/80/100GHzピクセル



100/150/220GHzピクセル

CMBだけでなく、前景放射(シンクロトン放射およびダスト放射)も同時に全天観測。

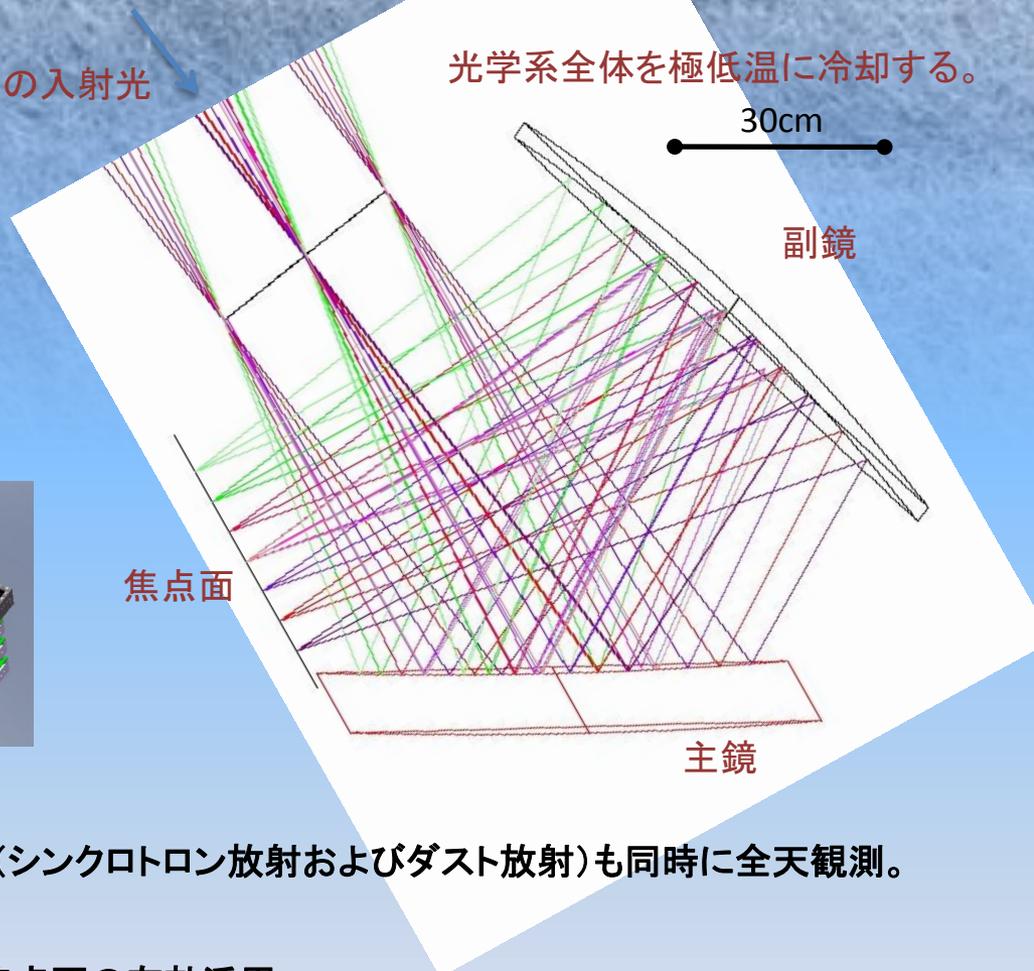
小型科学衛星に適した、
実験感度を上げるための焦点面の有効活用

1つのピクセル(レンズ)で6つの検出器

- 直交する2つの直線偏光
- 3つのバンドをカバー

光学系全体を極低温に冷却する。

空からの入射光



レンズの直径



偏光検出器数 ~2000
実験感度 2 uK·arcmin