

ASTE搭載用 TESボロメータカメラの開発

泉拓磨

東大天文学専攻修士1年

開発チーム

- **NRO/NAOJ**
 - T.Oshima、 A.Hirota、 T.Sato、 H.Iwashita、 J.Maekawa、 Y.Otomo、 R.Kawabe
- **Hokkaido Univ.**
 - T.Takekoshi、 T.Minamidani、 S.Nakatsubo
- **Univ. Tokyo**
 - T.Izumi、 K.Suzuki、 S.Ikarashi、 Y.Tamura、 K.Kohno
- **UCBerkley** (Bolometer wafer、 horn array、 etc)
 - B.Westbrook、 A.Suzuki、 A.T.Lee、 W.L.Holzapfel
- **McGill Univ.** (readout)
 - M.Dobbs、 A.Gilbert
- **Cardiff Univ.** (optical filters)
 - C.Tucker、 P.A.R.Ade、 P.Mauskopf

Outline

- Bolometer開発の目的
- システムの概要
- TES Bolometerの測定

ASTE望遠鏡

- 口径：10m
- アタカマ砂漠@チリ
- 標高4800m
- FoV最大10'
- リモート観測可能
- 2002年から観測開始



カメラで目指すサイエンス

- 遠方サブミリ波銀河の探査

- AzTEC観測で大量発見
- サンプル数の大幅増加
- 赤方偏移推定

→ 270G, 350G, 650Gでの観測

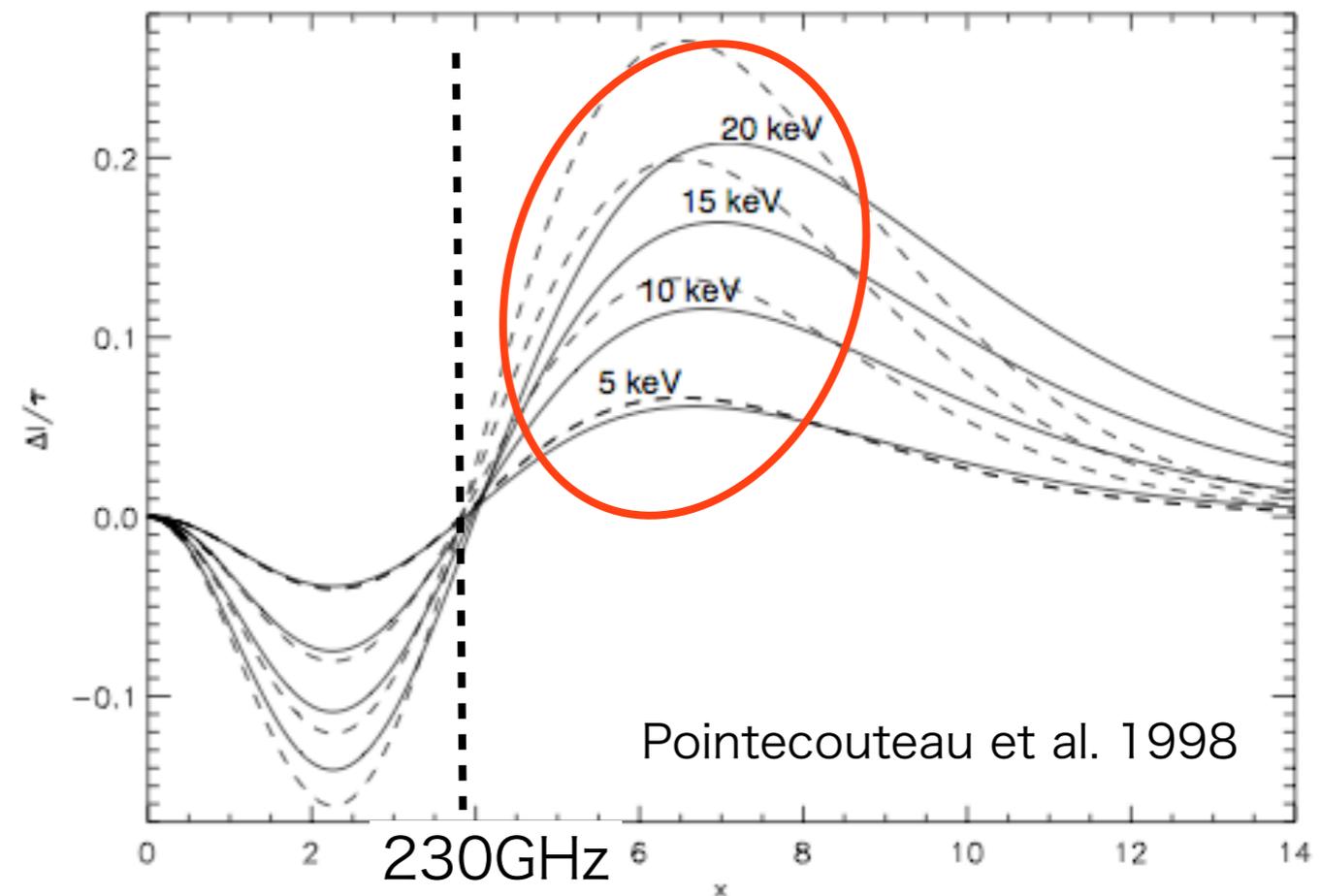
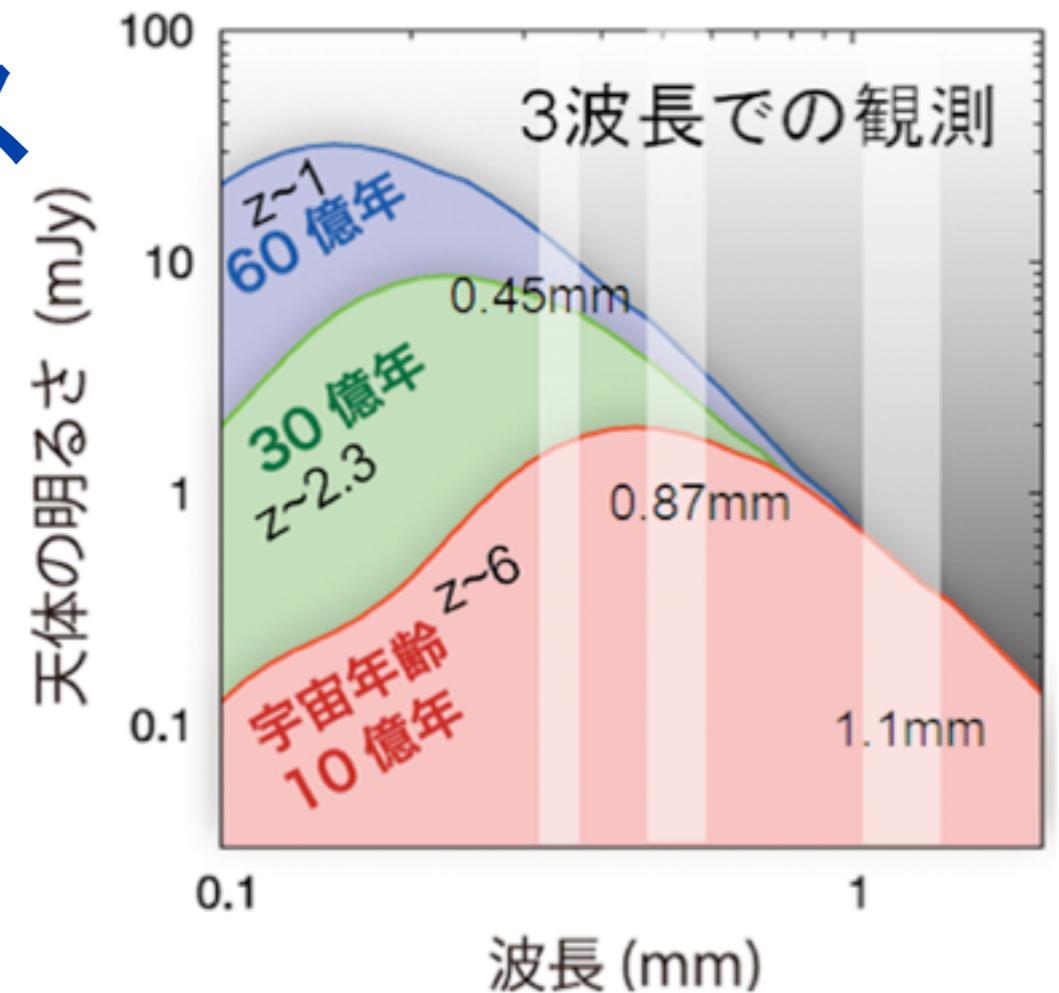
- Sunyaev-Zel'dovich効果
による銀河団高温ガス診断

- 超高温ガスの温度測定
- cluster merging?

→ 230G以上での観測が重要！

- 銀河系、近傍銀河

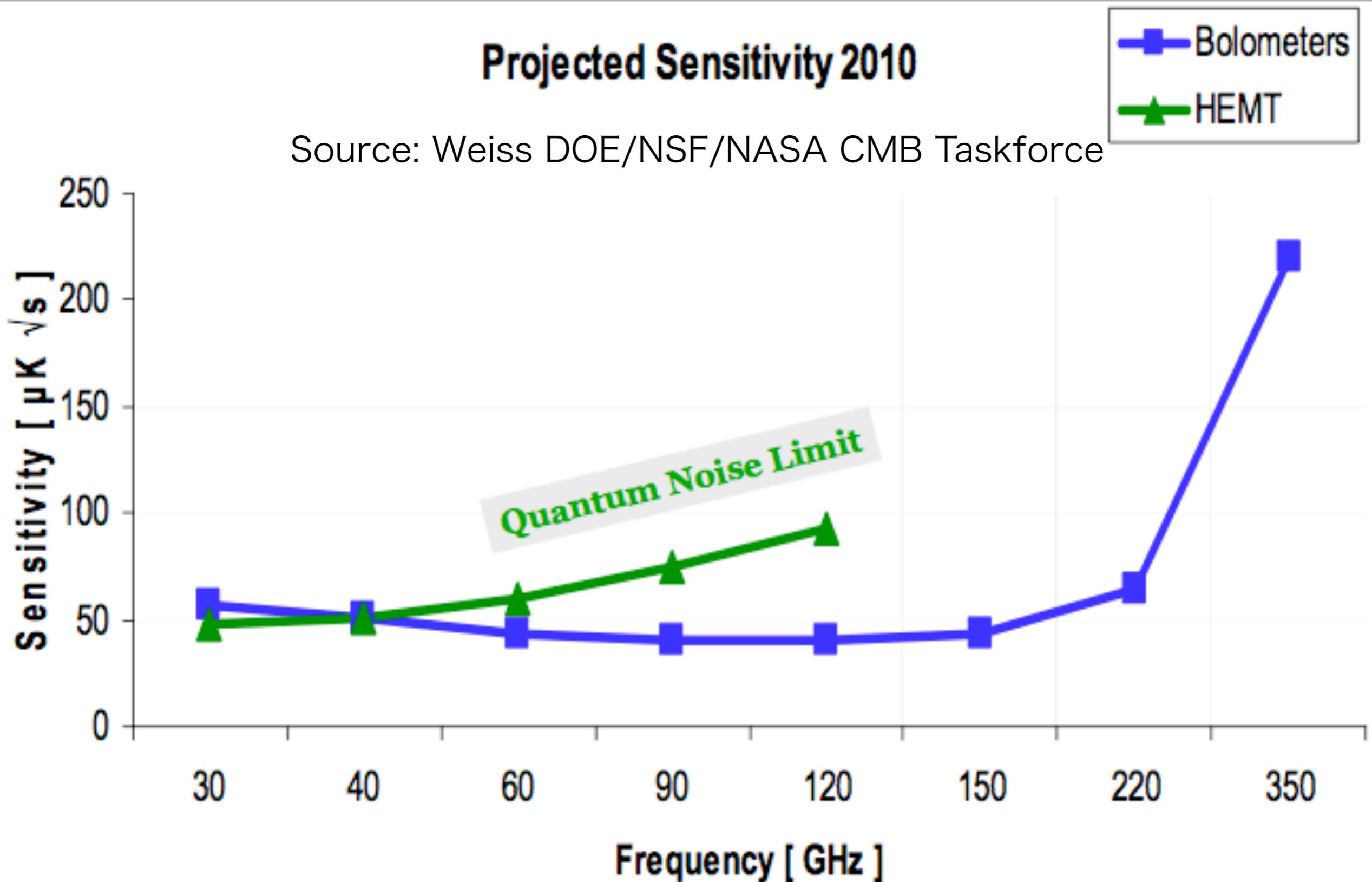
- 星形成、分子雲コアや低温ダスト



なぜBolometerか？

Projected Sensitivity 2010

Source: Weiss DOE/NSF/NASA CMB Taskforce

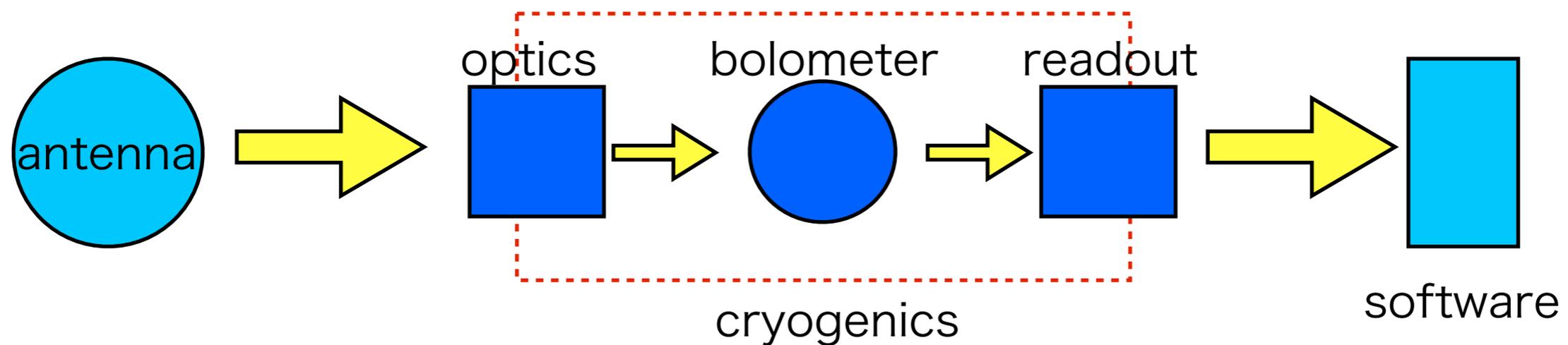


Outline

- Bolometer開発の目的
- システムの概要
- TES Bolometerの測定

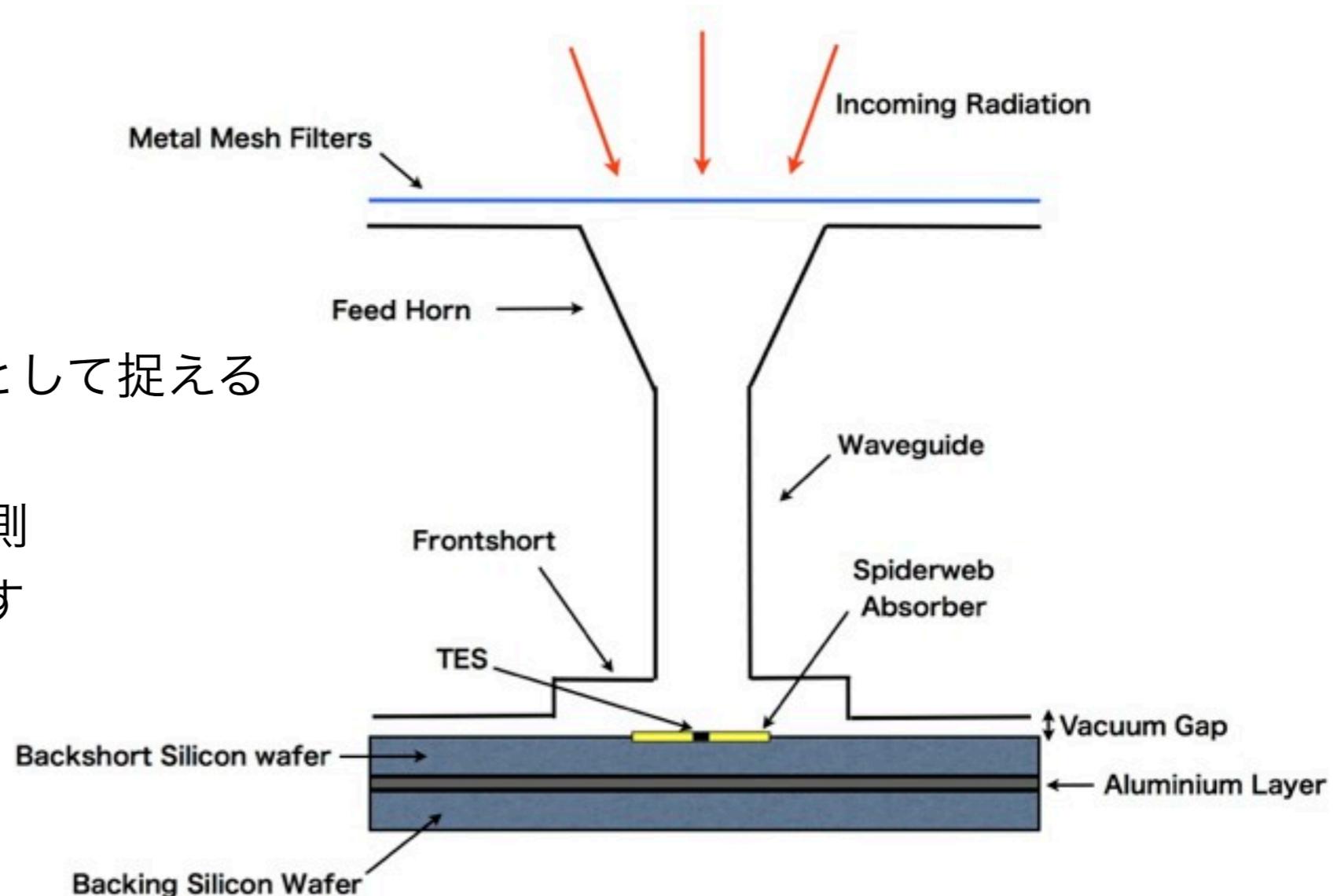
Components

- Optics
- Cryogenics
- Bolometer Array
- Readout

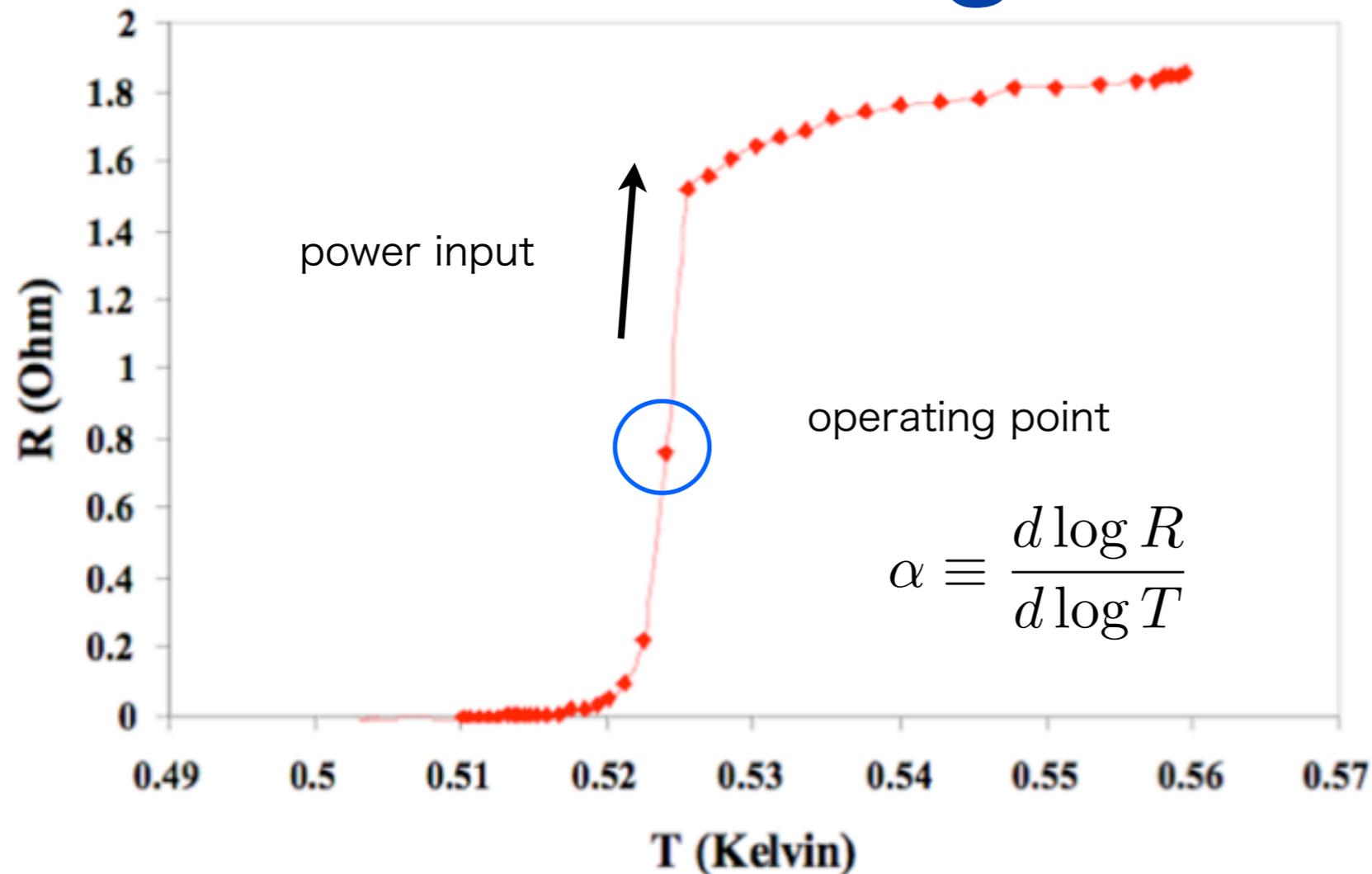


Bolometer

- 極低温で用いる受信機
 - $T < 0.5\text{K}$
- 入射した輻射を温度上昇として捉える
 1. 吸収体で輻射を吸収
 2. **温度計**で温度上昇を計測
 3. 電気信号として読み出す
- 温度計として...
 - 半導体
 - 超伝導遷移端センサー
(Transition Edge Sensor = TES)
→ 本カメラ



Transition Edge Sensor = TES



超伝導-常伝導の遷移の際の、
抵抗の急激な変化を利用する温度計

(APEX-SZのTES R-T curve)

- **Advantage**

- 半導体技術との親和性：アレイ化技術が成熟している
- 低インピーダンス → 読み出しに**SQUID**を利用可能
 - Multiplexingが実現している
- 低インピーダンスにより振動に強い → 無冷媒の（機械式）冷凍機、高速スキャン

- **Disadvantage**

- Saturation Power (カロリメータでいうSaturation Energy)

TES bolometer array

- **Array design**

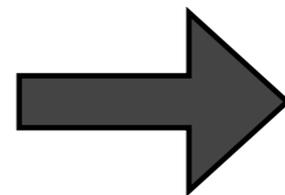
- SPTのspider web type absorberを元に設計
それプラス、より高い周波数への最適化をしている。
 - smaller dimensions
 - higher optical load (20/30/50pW@270,350,650GHz)
- one 4" wafer per color
- 270/350GHzの各周波数特有の設計

- **Coupling to optics**

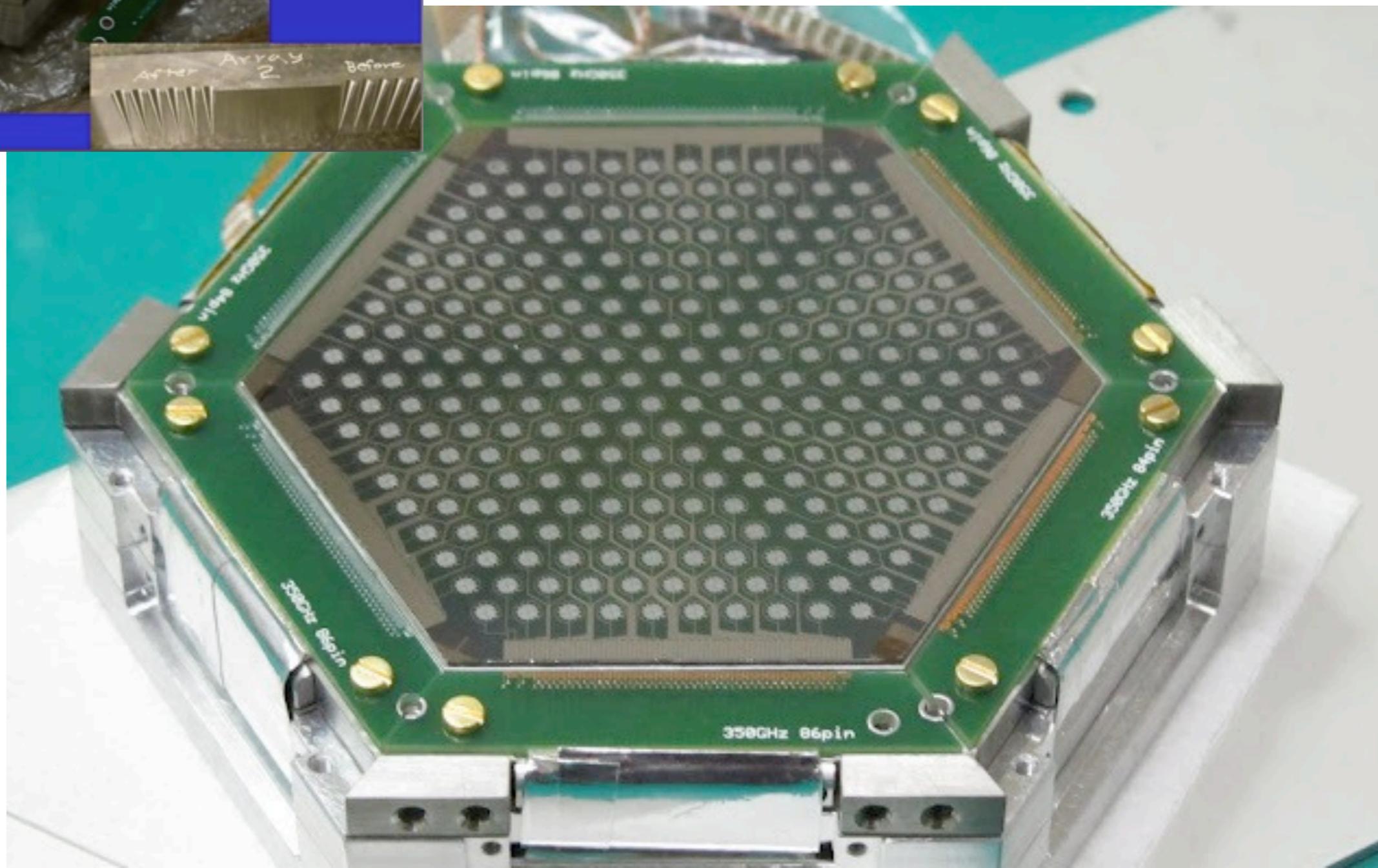
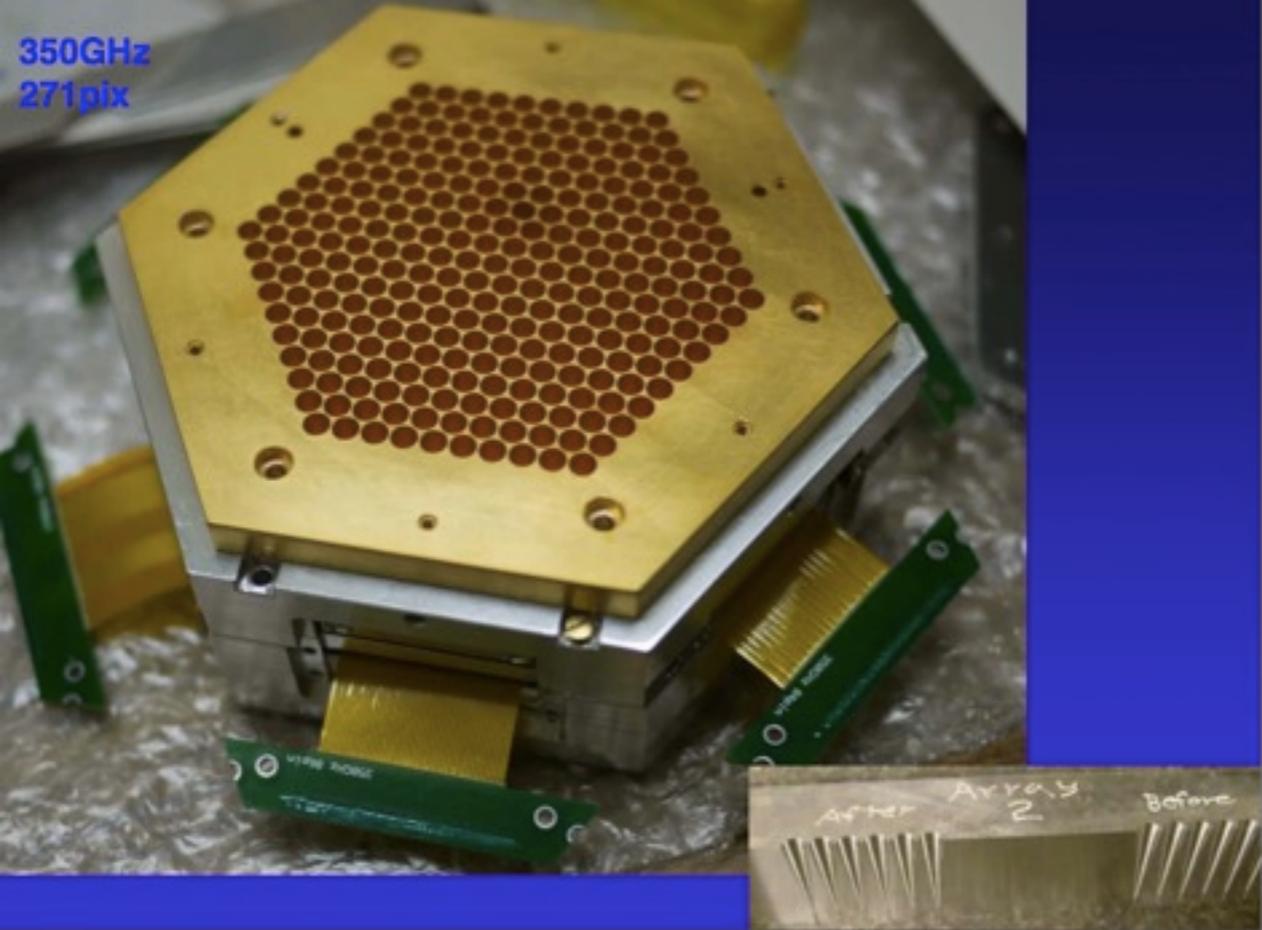
- conical horn array

- **Bolometer NEP (expected)**

- 60aW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @270GHz
- 70aW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @350GHz
- 100aW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @650GHz



Background noise limited



350GHz pixel

2mm

Spiderweb
Absorber

0.25mm

0.17mm

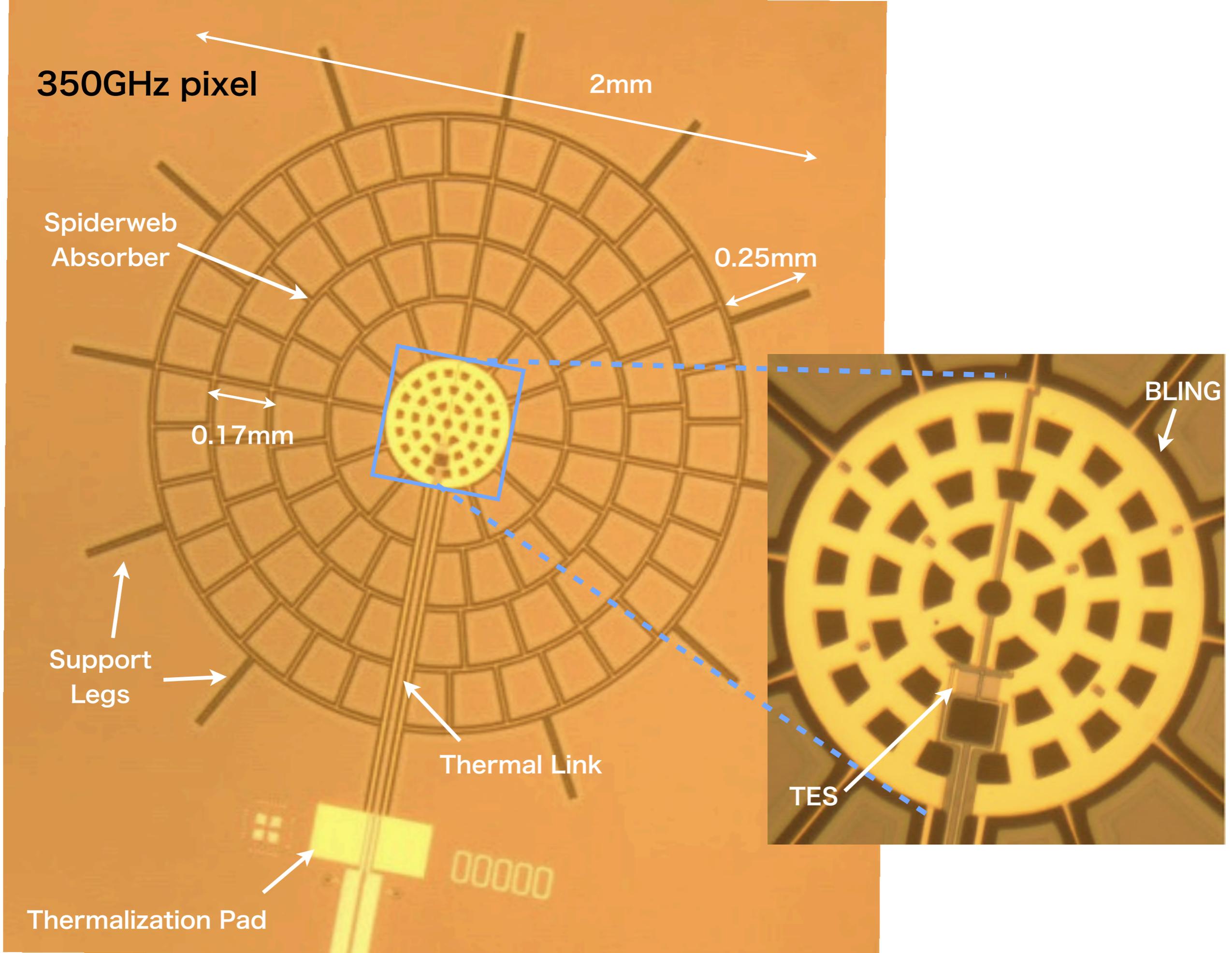
Support
Legs

Thermal Link

Thermalization Pad

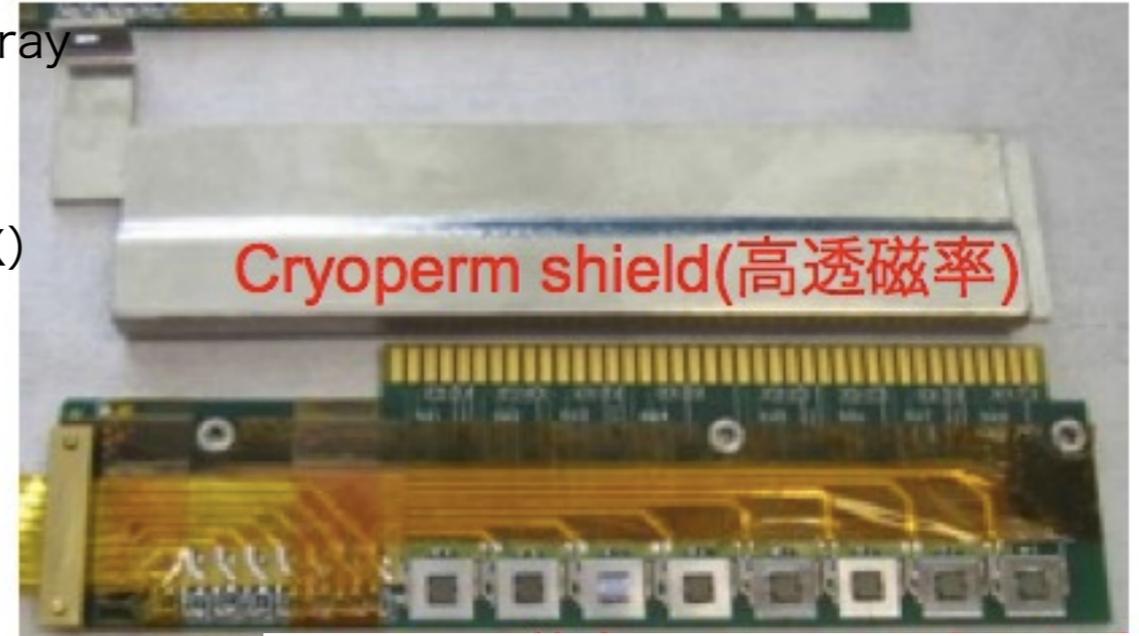
BLING

TES



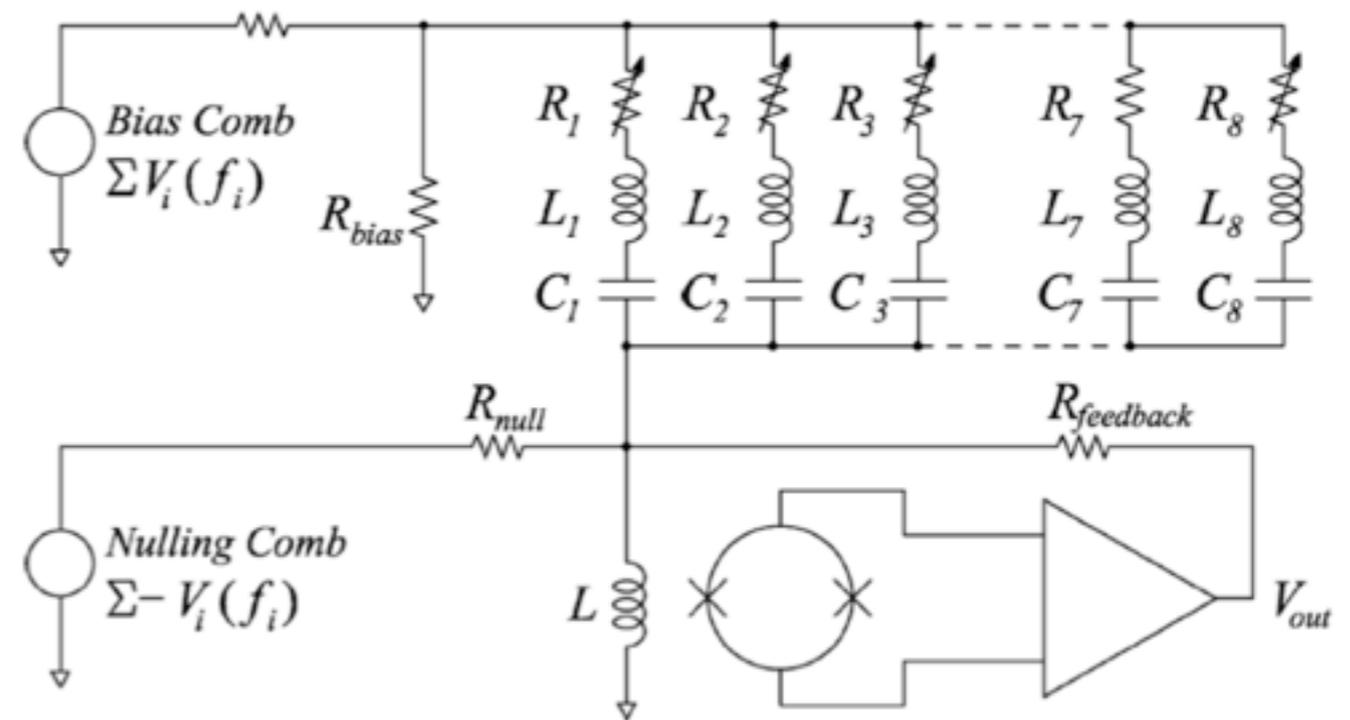
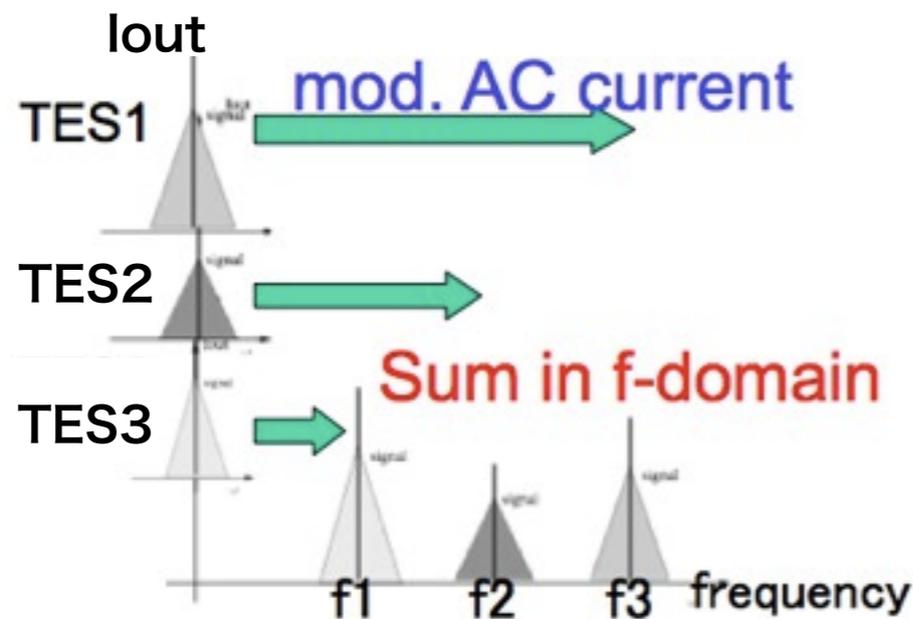
SQUID+Multiplexer (fMUX)

- SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)
: ボロメータ出力の読み出しに利用。NIST製 100 series array

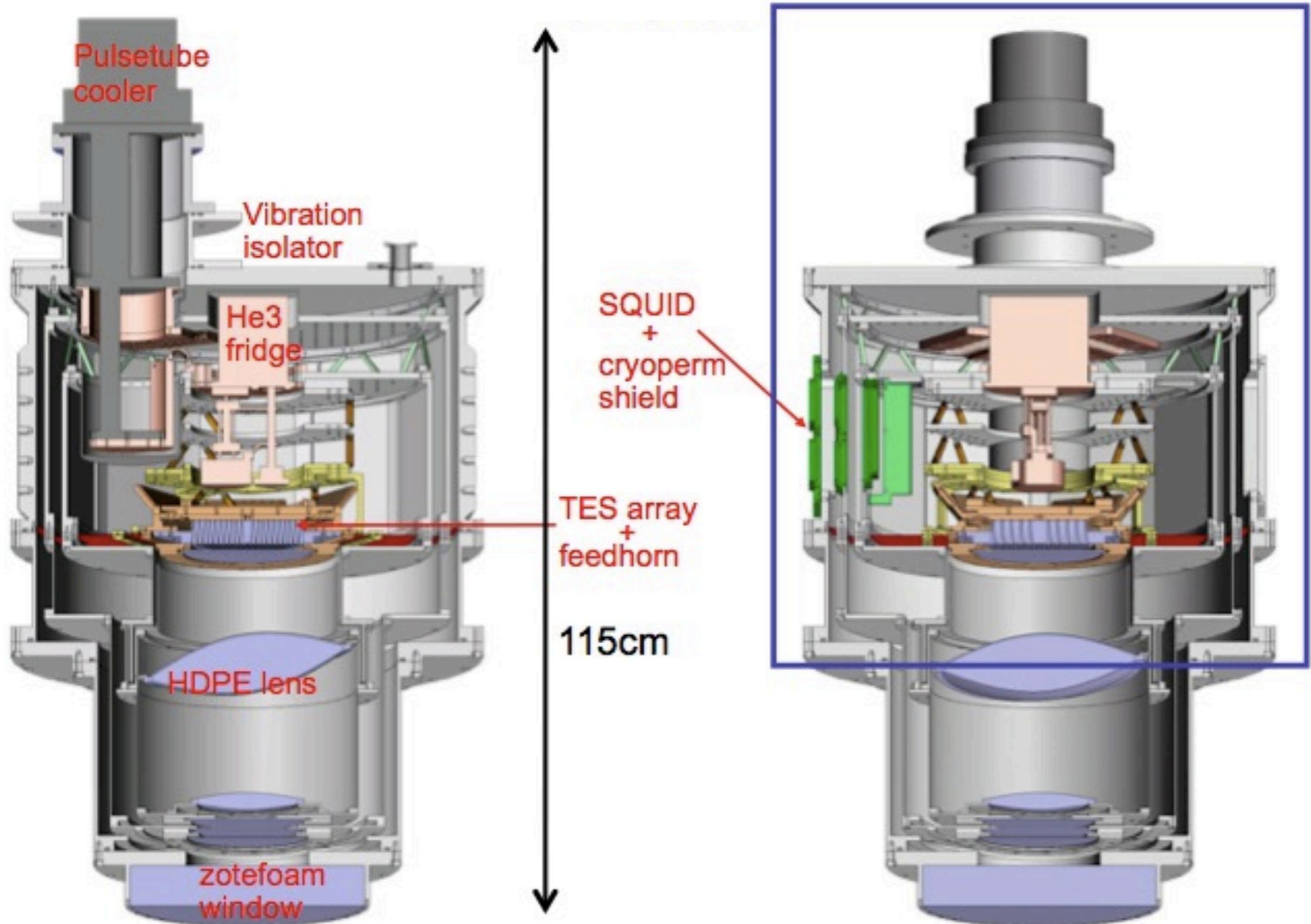


- 分割方式 :
 - 周波数分割方式 (frequency domain multiplexing=fMUX)
 - Shunt feedback方式 (feedbackコイルを介する)
 - ☆No extra power(thermal dissipation)@250mK stage

- Digital fMUX: DfMUX
 - FPGAを用いたcarrier生成、carrier nulling
 - ・従来は位相モニター用に1ch潰していた
 - 電力、コスト、スペースの大幅減
 - 実績 : SPT、PolarBearで採用
 - 回路バンド幅 : 2MHz
 - MUX数 : 16TES/1SQUID

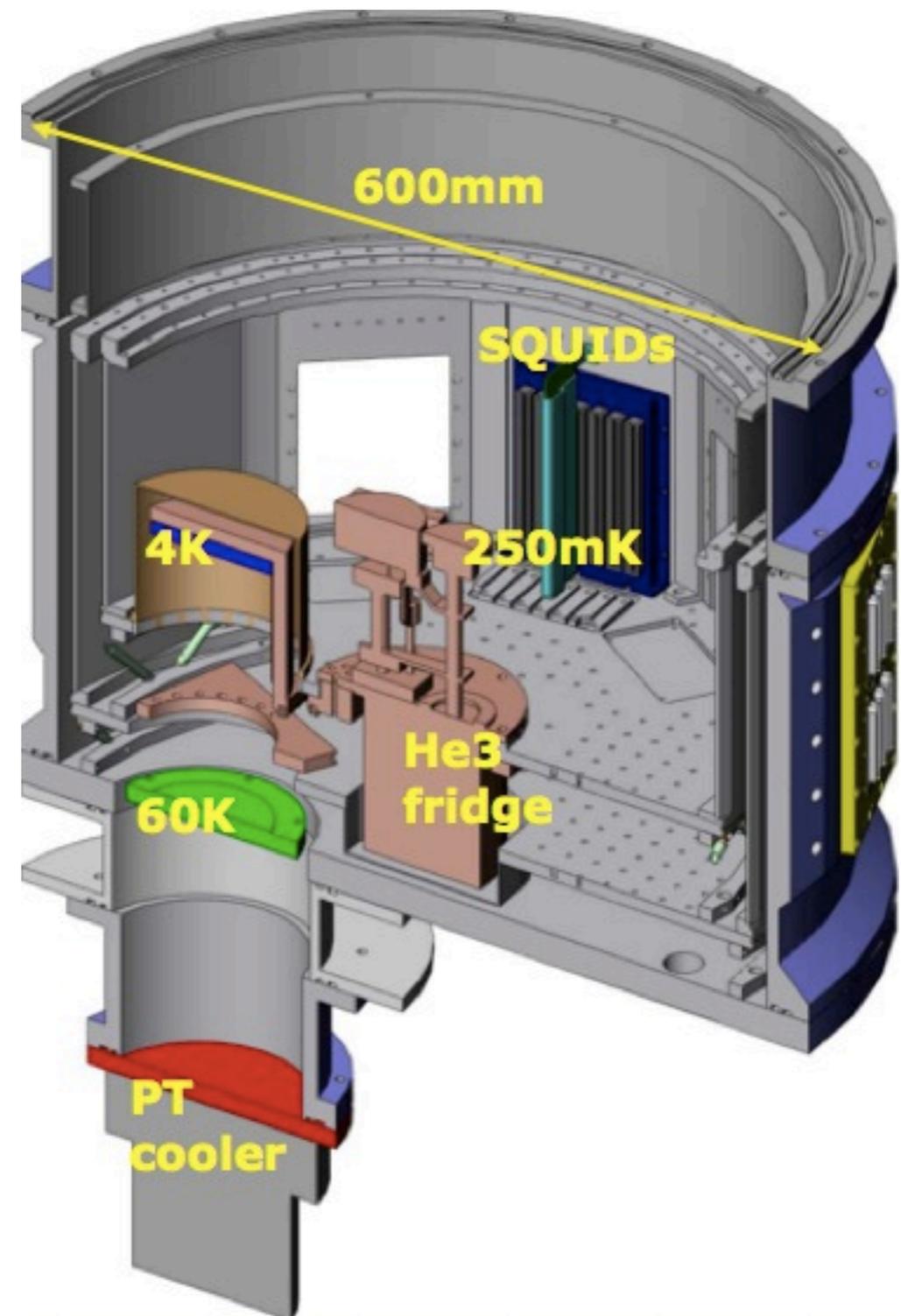


冷却系



冷却系

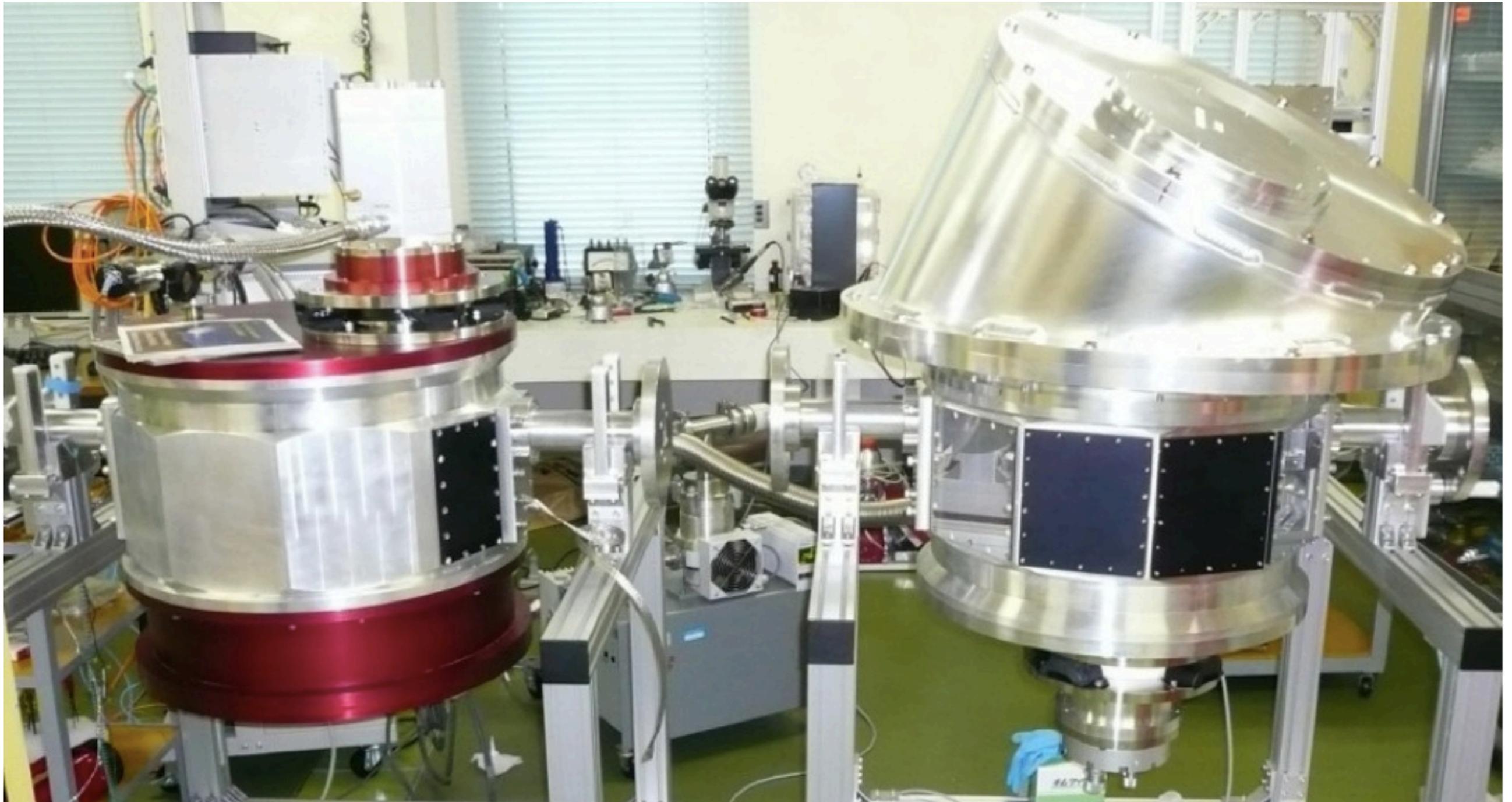
- Cryogenics
 - APEX-SZをコピー
 - revised thermal design
 - modification required from focal plane modules
- Dewar
 - Dewar1
 - * Backup&testing @NRO
 - Dewar2
 - * Observation@ASTE
- He3 sorption cooler
 - chase He-10 model
 - Ultrahead: $T=230\text{mK}$
 - Interhead: $T=330\text{mK}$
 - Hold time = 80hr@no load



DEWARs

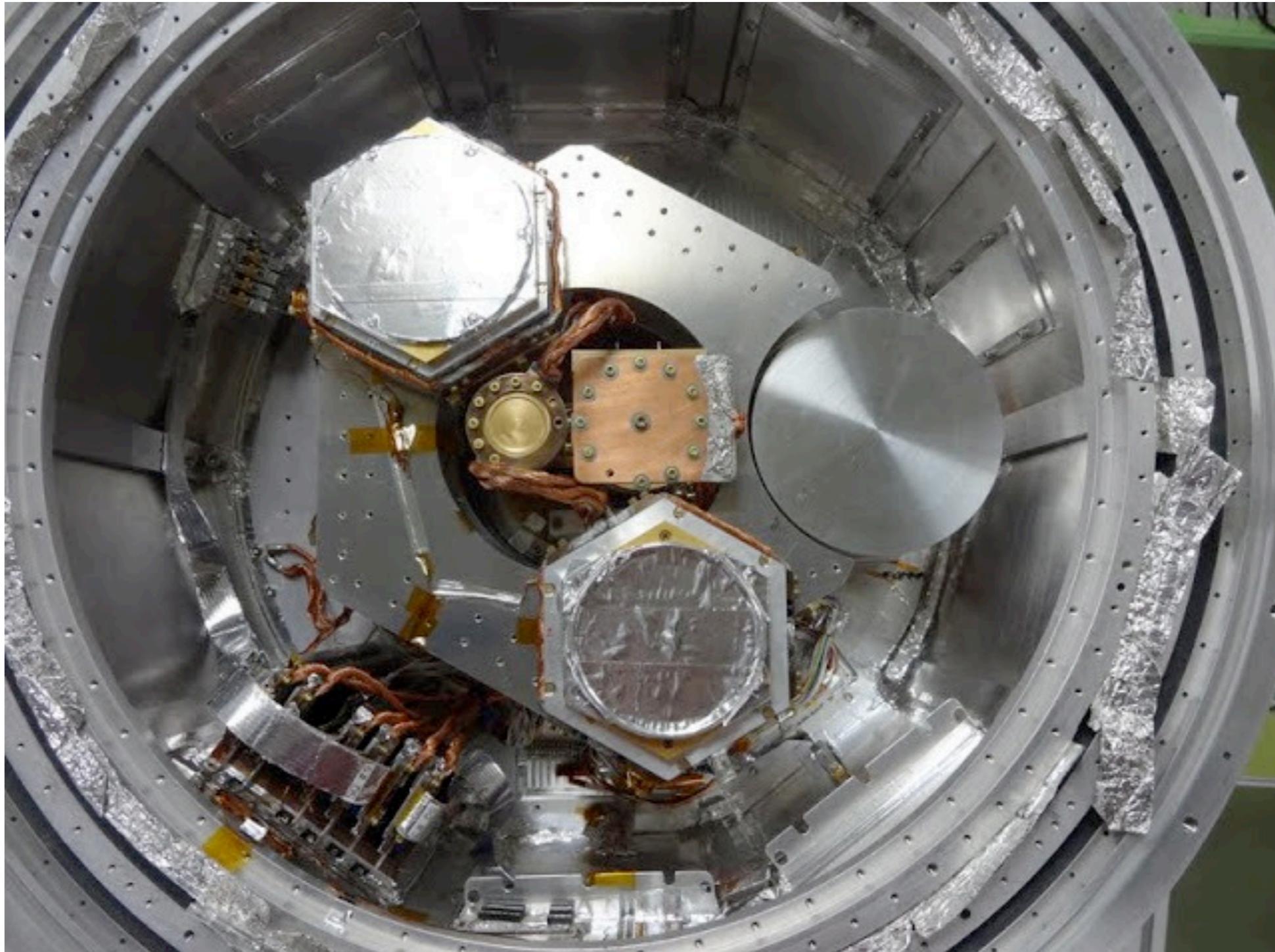
Dewar 1
for test

Dewar 2
for astronomical observation



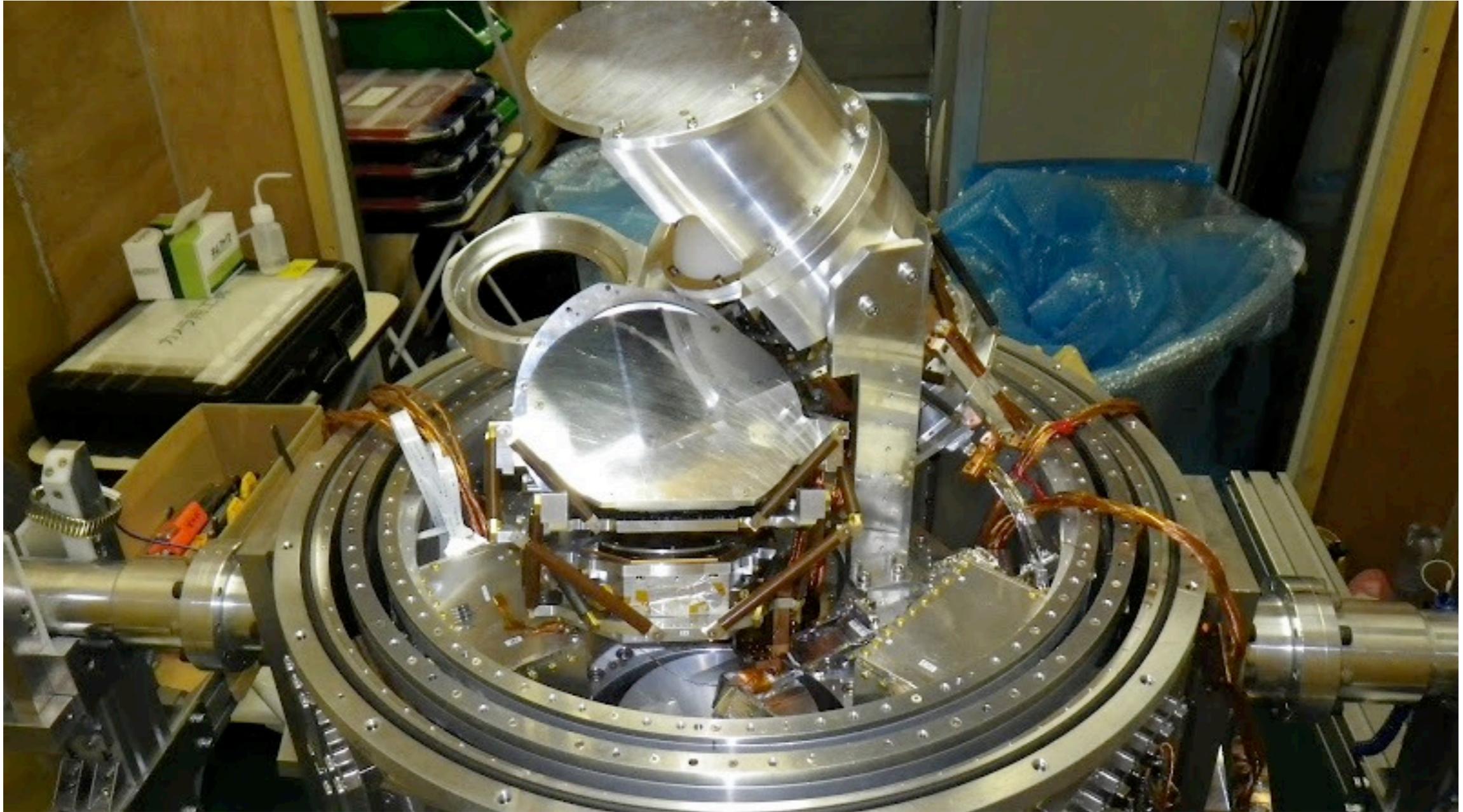
Inside of Dewar

テスト用



Inside of Dewar

本番用

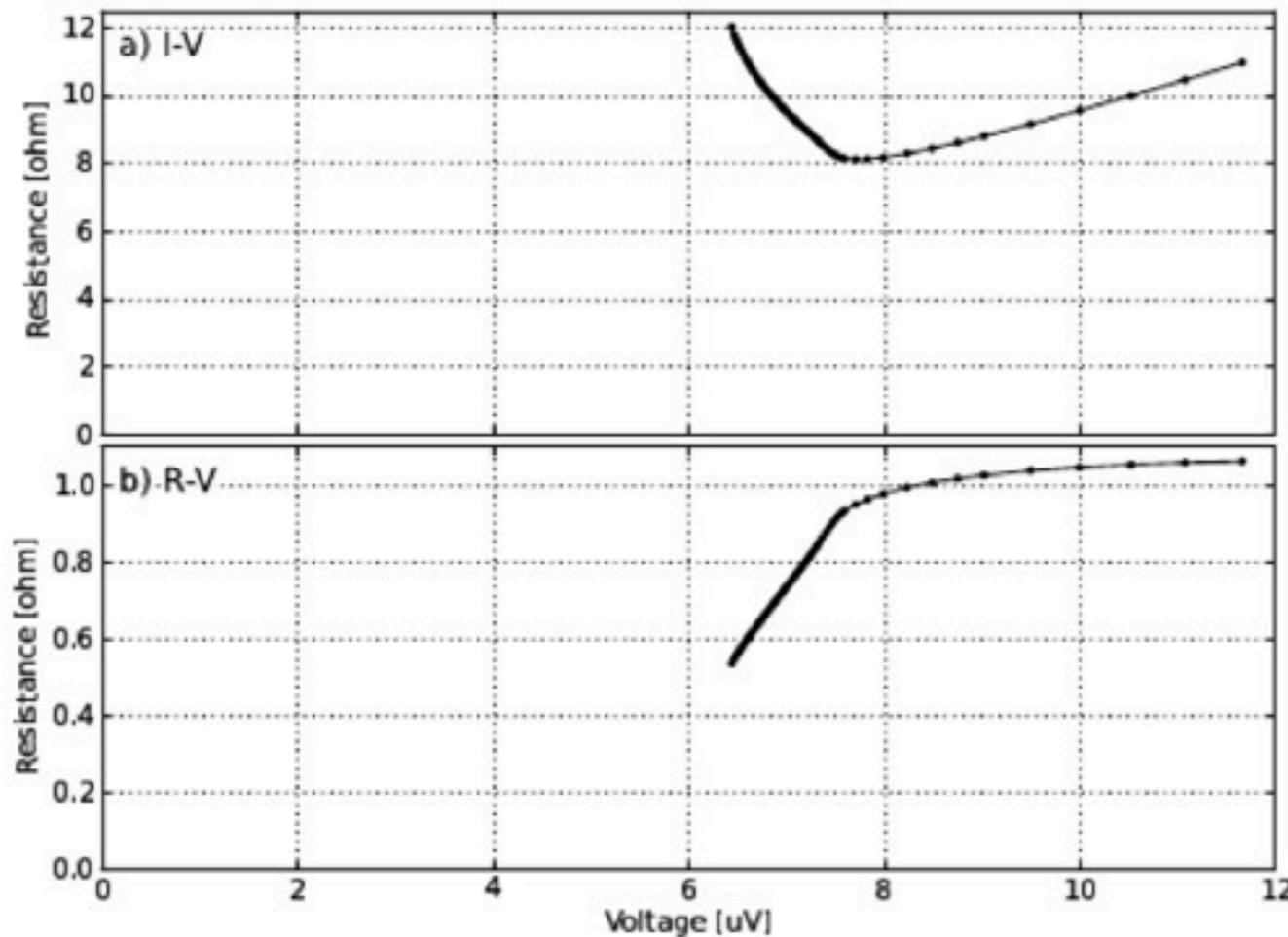


Outline

- Bolometer開発の目的
- システムの概要
- TES Bolometerの測定

ものすごく素性の良いボロメータ素子の場合...

実測：TESボロメータのダイナミックレンジ



$$P_{sat} = f_{sat} * P_{opt}$$

$$NEP_{phonon}^2 \sim 4kT^2G \propto P_{sat}$$

$$NEP_{photon}^2 \sim 2h\nu P_{opt}$$

	Design	Measured
Psat	66pW	63pW
Gbar	330pW/K	330pW/K

- ボロメータに入射するパワーは、大気、光学系、冷却系、吸収体などの様々な要素が影響し予測が難しい
→ 想定するPsatにsafety factorを考慮した入射パワーの上限Poptを設けて観測効率の低下を防ぐ。
- f_{sat} が十分でない場合→ボロメータが飽和
- f_{sat} が大きすぎる場合→ $G = P_{sat}/(T - T_0)$ が増大

実測：ETF回路の発振

- 大気変動の除去や望遠鏡のマッピングスピード向上のためには、速いスキニングスピードに耐えられるように、 τ_{eff} は小さい方が良い。
→我々のボロメータは高い ループゲイン \mathcal{L}_0 のETFで作動させている。

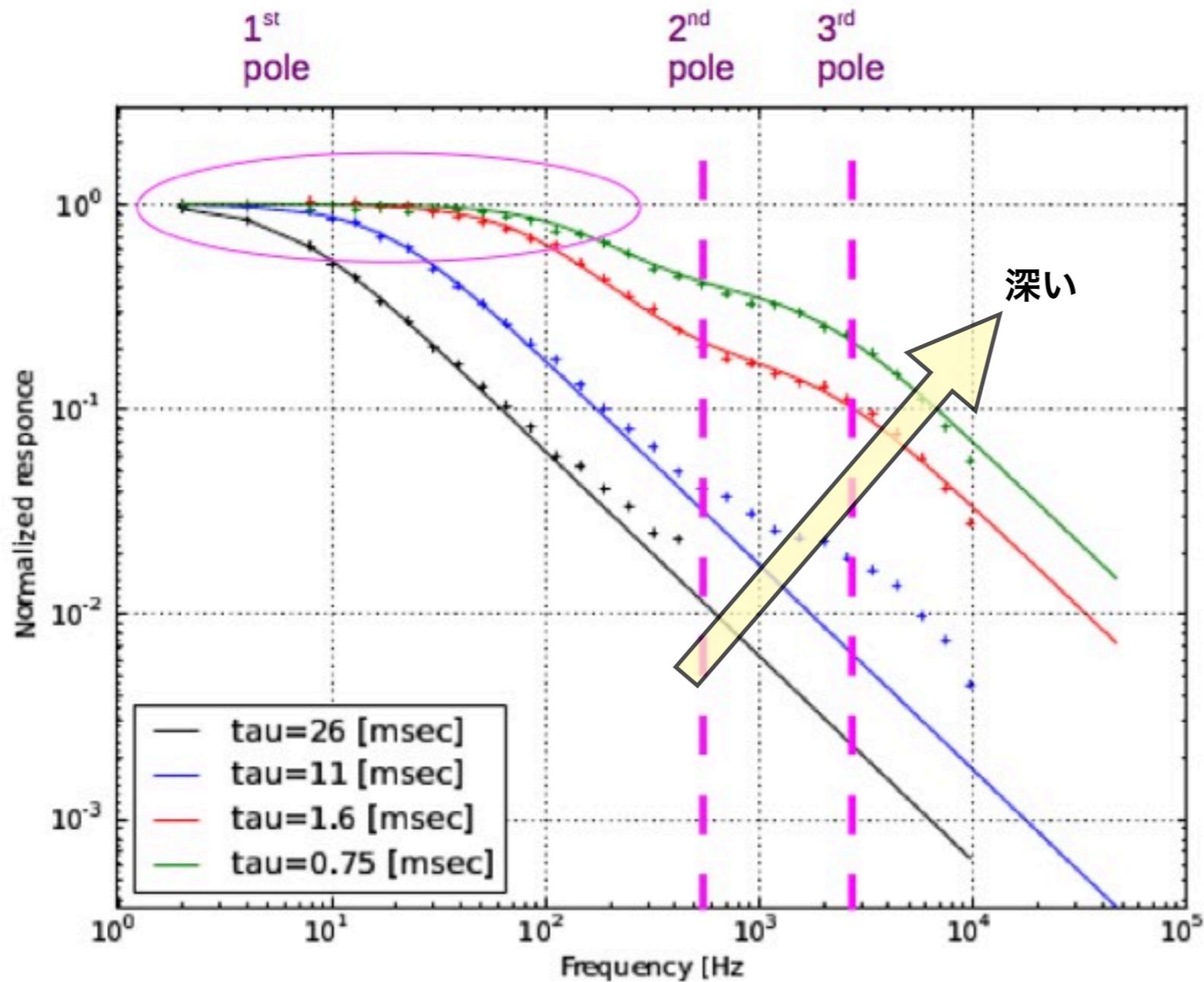
- しかし、 \mathcal{L}_0 が大きすぎると、

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_0}{1 + \mathcal{L}_0} = \frac{1}{1 + \mathcal{L}_0} \frac{C}{G} \ll \tau_{ele} = \frac{2L}{R_{TES}}$$

となり、ETF回路が発振してしまう。 τ_{ele} はバイアス回路の電氣的な時定数、 R_{TES} はTESの抵抗で $\sim 0.8\Omega$ 、 L はSQUIDの入力や配線の自己インダクタンスで $16\mu\text{H}$ 。

- Irwin et al. 1998によると、ETF下でボロメータが安定して動く条件は、

$$\tau_{eff} > 5.8 \times \tau_{ele} = 5.8 \times \frac{2 * 16\mu\text{H}}{0.8\Omega} \sim 230\mu\text{s}$$



- 3つのpole
- τ_{eff} (TES thermal)
 - $(C/G)/(1+L)$
 - $L(\text{loopgain})$ に応じて加速
- τ_{int} (BLING thermal)
 - (C/G_{int})
 - G_{int} は、BLING- TES間の thermal conductivity
- τ_{ele} (LCR circuit)
 - $2L/R_{\text{bolo}}$: これが想定 of 2~3 倍大きい ==> 寄生的なL?

Black: overbias ($L \sim 0$) - 1st pole only

Blue: turnaround ($L \sim 1$) - 2nd pole appears

Red: in transition ($L \sim 15$) - 3rd pole appears

Green: deep in transition ($L \sim 34$)

実際は...

症状と対処（予定）

- 出力の読めないSQUIDが多数存在！
- SQUID cntl card boxのシールド、固定強化
- Cryostat - Crate間の接続強化 => 効果はnot visible
- 同時に使用するSQUIDの数を減らしてみる（ケーブル本数を減らす） => 効果なし
- GNDの整理
 - 野辺山実験室は何を基準にすればいいのかよく分からん状態だった => 改善
- 電源のラインノイズ
 - ノイズカットUPSでもカットできていない？最終的にどうTES出力に影響しているかは不明。。
- 温度管理周りがネック？
 - 温度計ケーブルに触れると、bolometer time stream (SQUIDの出力)がジャンプ！
- Cryoelectronics boardの電源on/offでノイズが6~8[pA/√Hz]変化。Cryostat側でカットできていない ==> Noise filterの導入