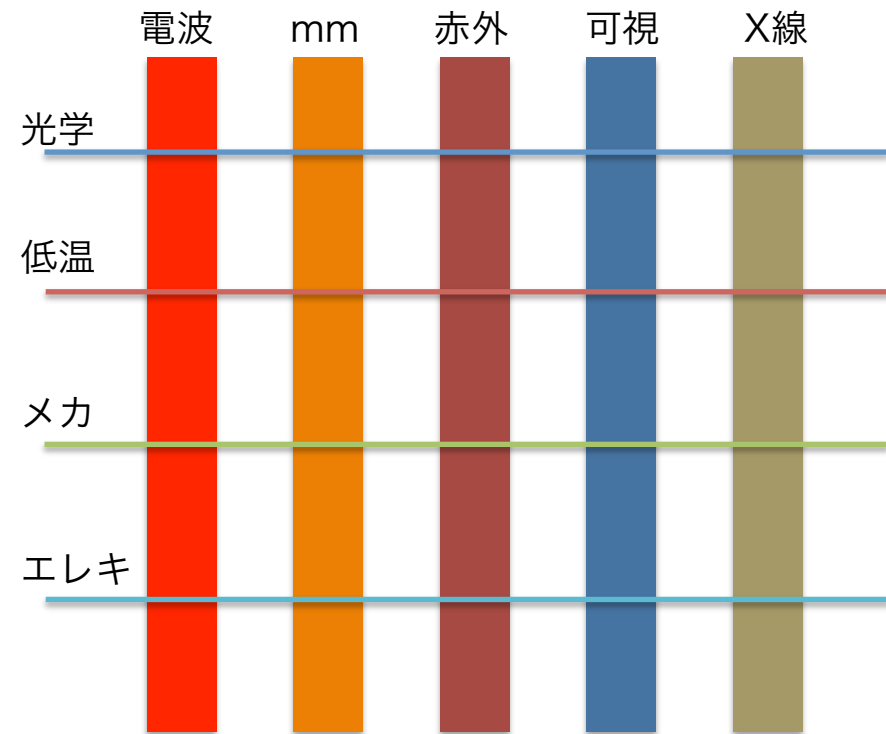


2015-12-8 可視赤外線観測装置技術ワークショップ@東北大学  
松村知岳、片坐宏一、宇都宮真、山本亮 (ISAS/JAXA) 、菅井肇 (IPMU)

# CMB偏光観測のための低温連続 回転式偏光変調器の開発

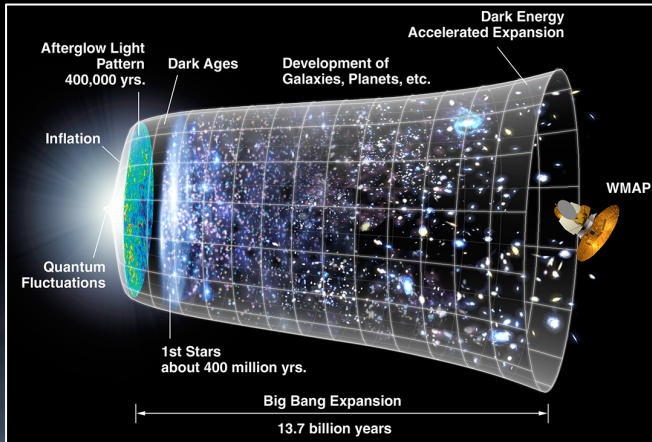
# 目次

- 簡単に目的を紹介
- 求められる機能要求
- 開発状況
- 現状の課題



# サイエンスの紹介

宇宙の晴れ上がり 38万年



宇宙の始まり

重力+量子

インフレーション期  
~ $10^{-38}$  sec

原始重力波

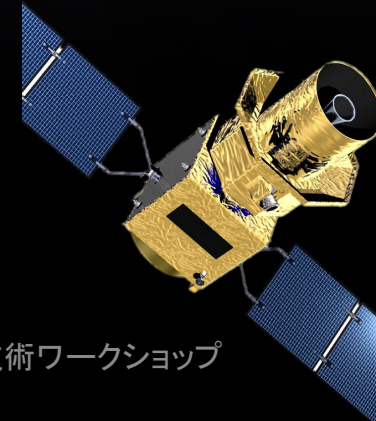
フォトン

インフレーション仮説の検証

もしインフレーション仮説が正しい場合、インフレーションによる原始重力波がCMB偏光に与える影響を調べることによって実験的に検証が可能である。

December 8, 2015

可視赤外線観測装置技術ワークショップ

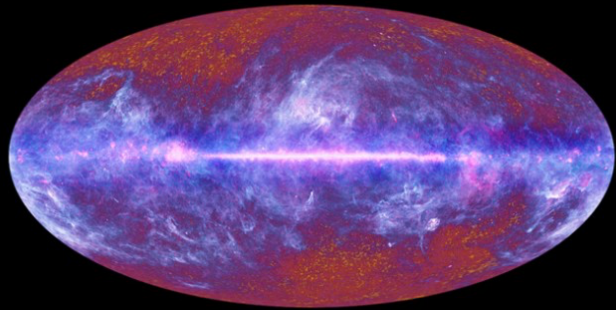


CMB偏光観測により  
インフレーション仮説の検証を目的とした  
将来科学衛星

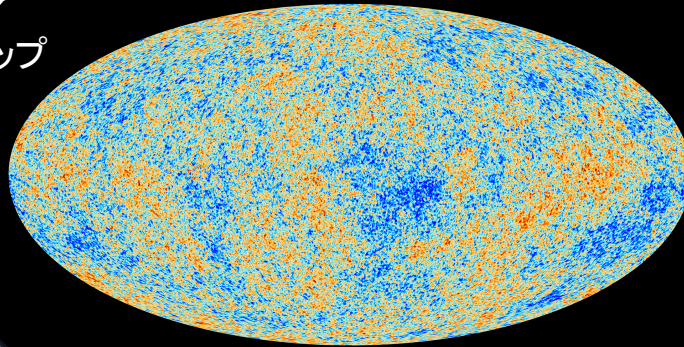
LiteBIRD

(2020年代前半打ち上げ)

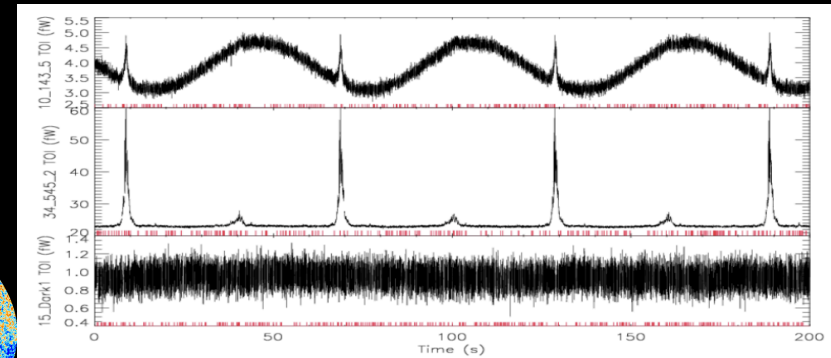
# S/NのSとN



ESA Planck全天サーベイ  
温度揺らぎマップ



S: 偏光シグナルの揺らぎ



例) Planck HFIのデータ時系列

CMBは3Kのミリ波。ゆえに、すべての装置は低温にすることで熱放射寄与を下げる。一方で、もし装置（光学系、検出器等）の温度が揺らぐと、装置由来の揺らぎとシグナルの揺らぎが縮退してしまい、シグナルを削ることになる。

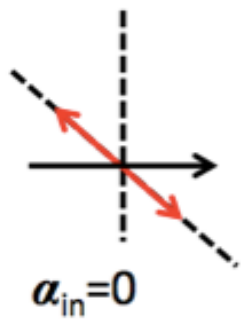
(参考：温度揺らぎは $10\mu\text{K}$ 、偏光揺らぎは $1\mu\text{K}$ 、インフレーション由来の偏光揺らぎは $10\text{nK}$ 。)

→シグナルのみをノイズ揺らぎよりも高い周波数帯域に変調したい。

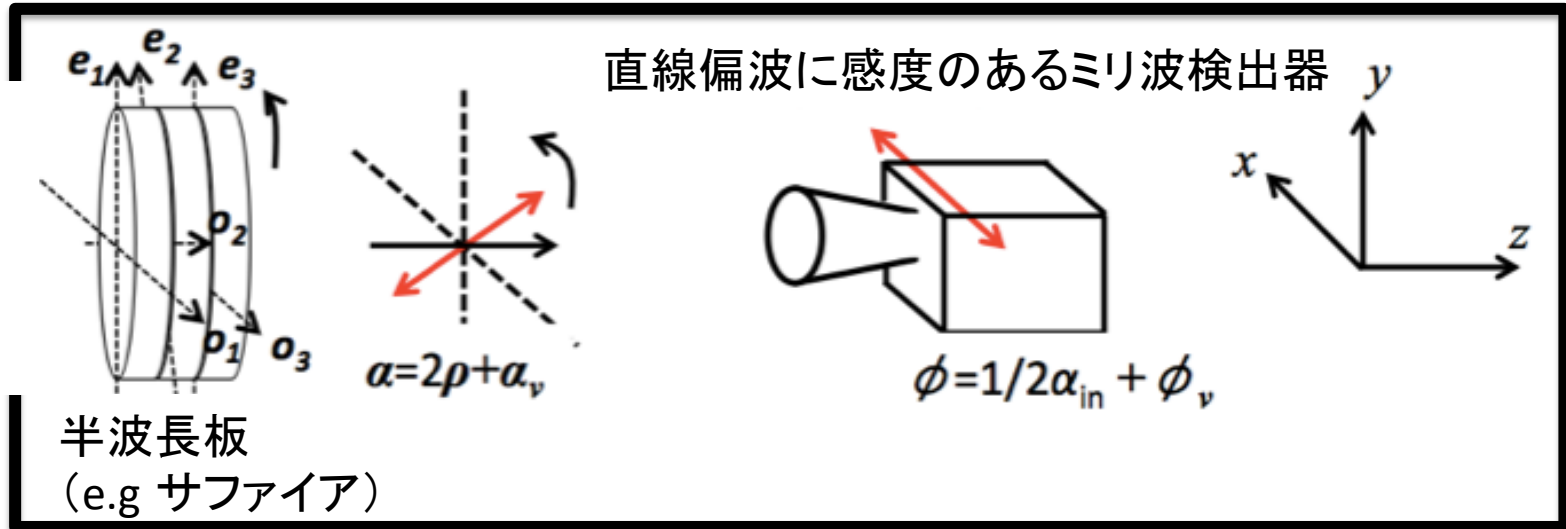
# 連続回転半波長板変調器

光学系

入射偏波

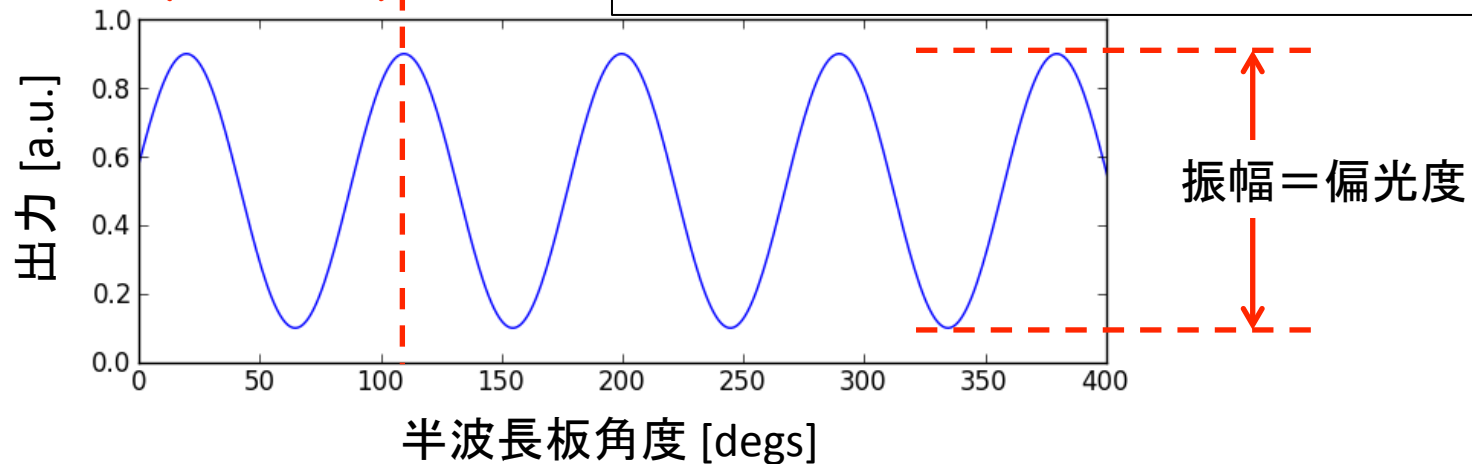


(I,Q,U)



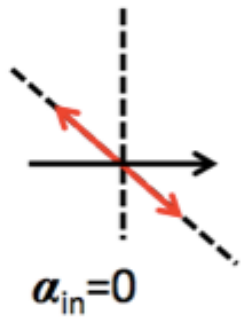
位相 = 偏光角度

直線偏波に対して変調がかけられる。  
変調周波数 = 半波長板の回転数 × 4

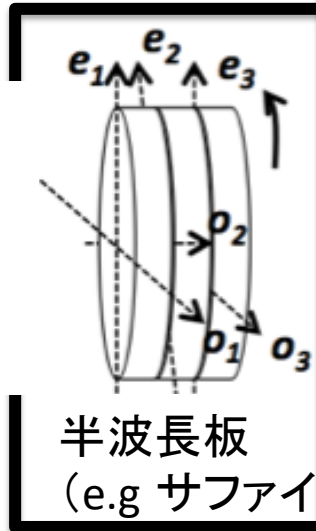


# 連続回転半波長板変調器

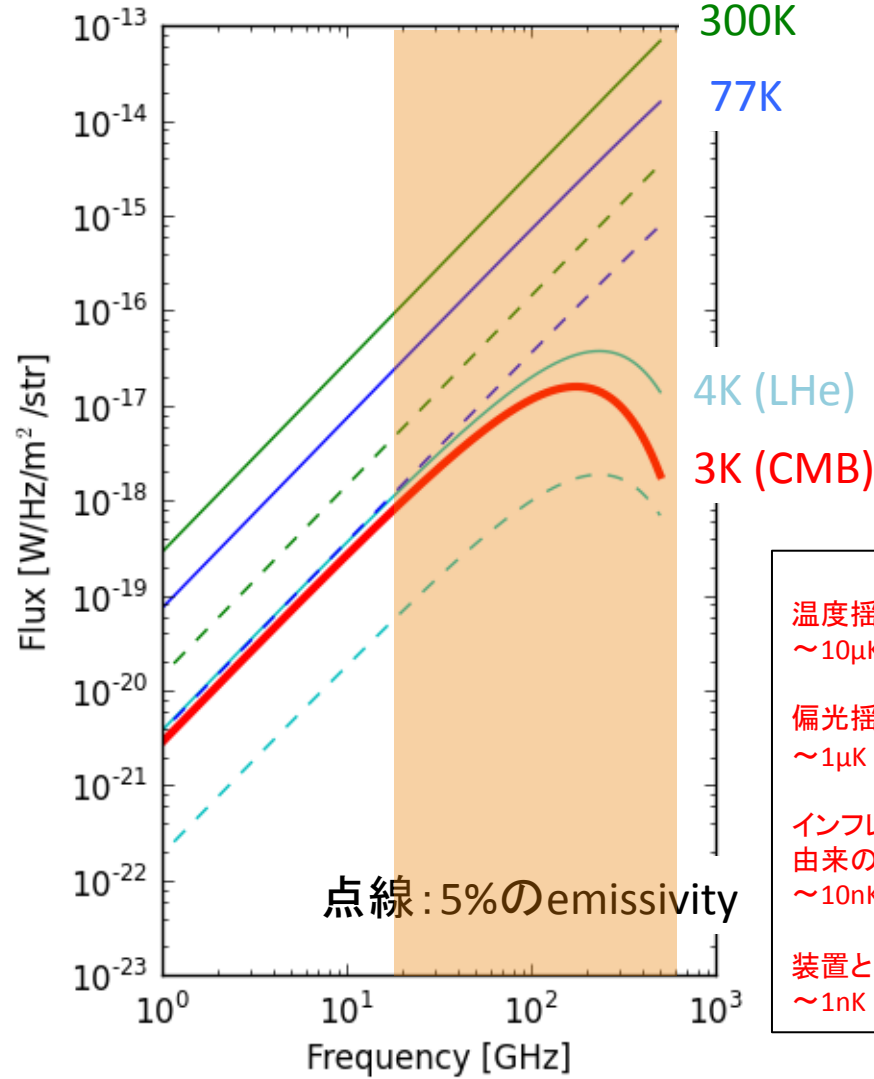
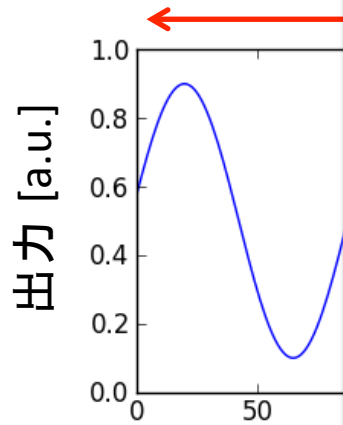
入射偏波



(I,Q,U)

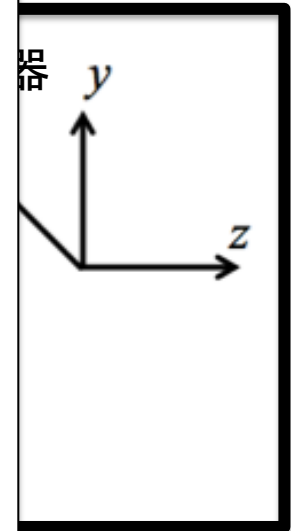


位相 = 偏光



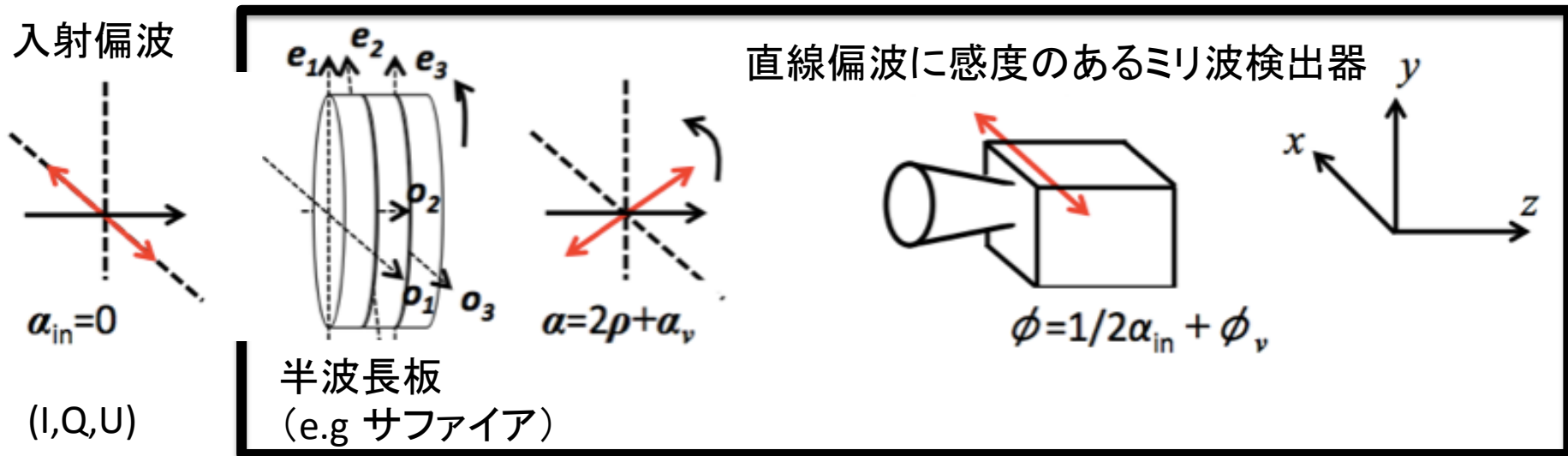
- 温度揺らぎ  
~10 $\mu$ K
- 偏光揺らぎ  
~1 $\mu$ K
- インフレーション  
由来の偏光  
~10nK
- 装置として求める安定性  
~1nK

光学系



# 冷却連続回転半波長板変調器

光学系

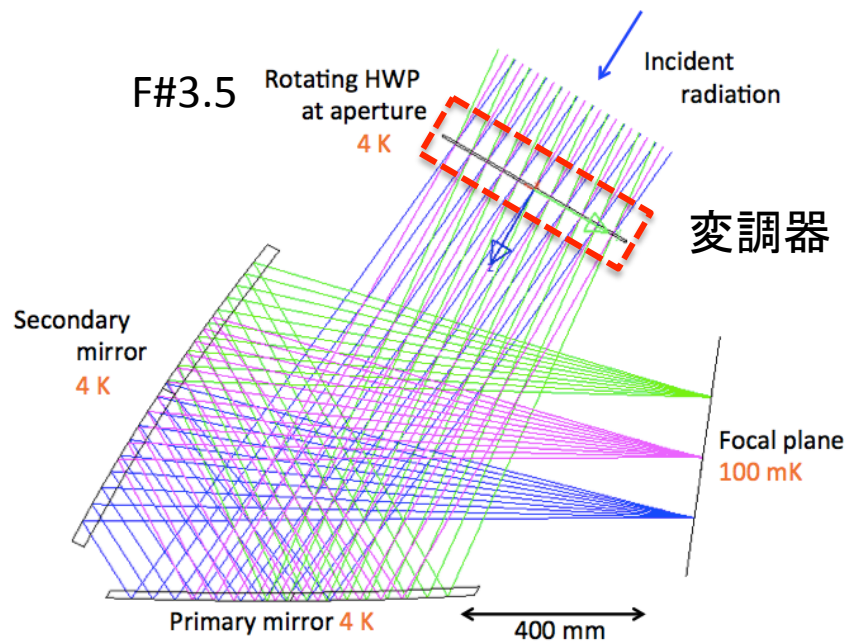


## 要求

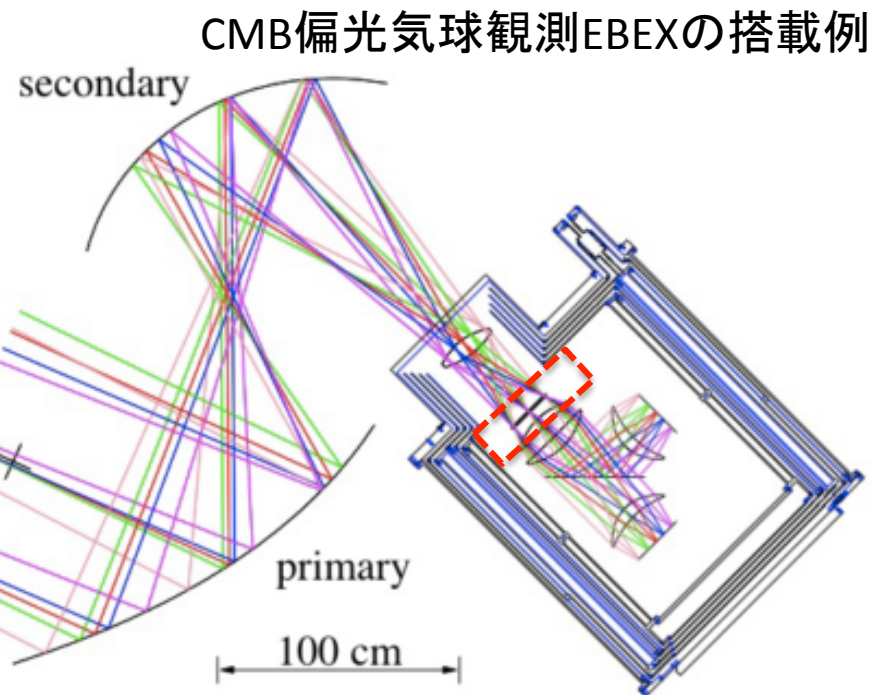
- 光学系に複屈折材料である半波長板（サファイア、メタマテリアル等）を導入。
  - 素子そのものの熱放射を抑えるために冷却。
- 変調をかけるためには半波長板を冷却化で回転。
  - 冷却化で使用可能な軸受け。

→ 本発表ではこの試作機について現状を報告。

# 冷却連続回転半波長板変調器 + 搭載光学系例



CMB偏光衛星  
LiteBIRDの搭載検討例



CMB偏光気球観測EBEXの搭載例

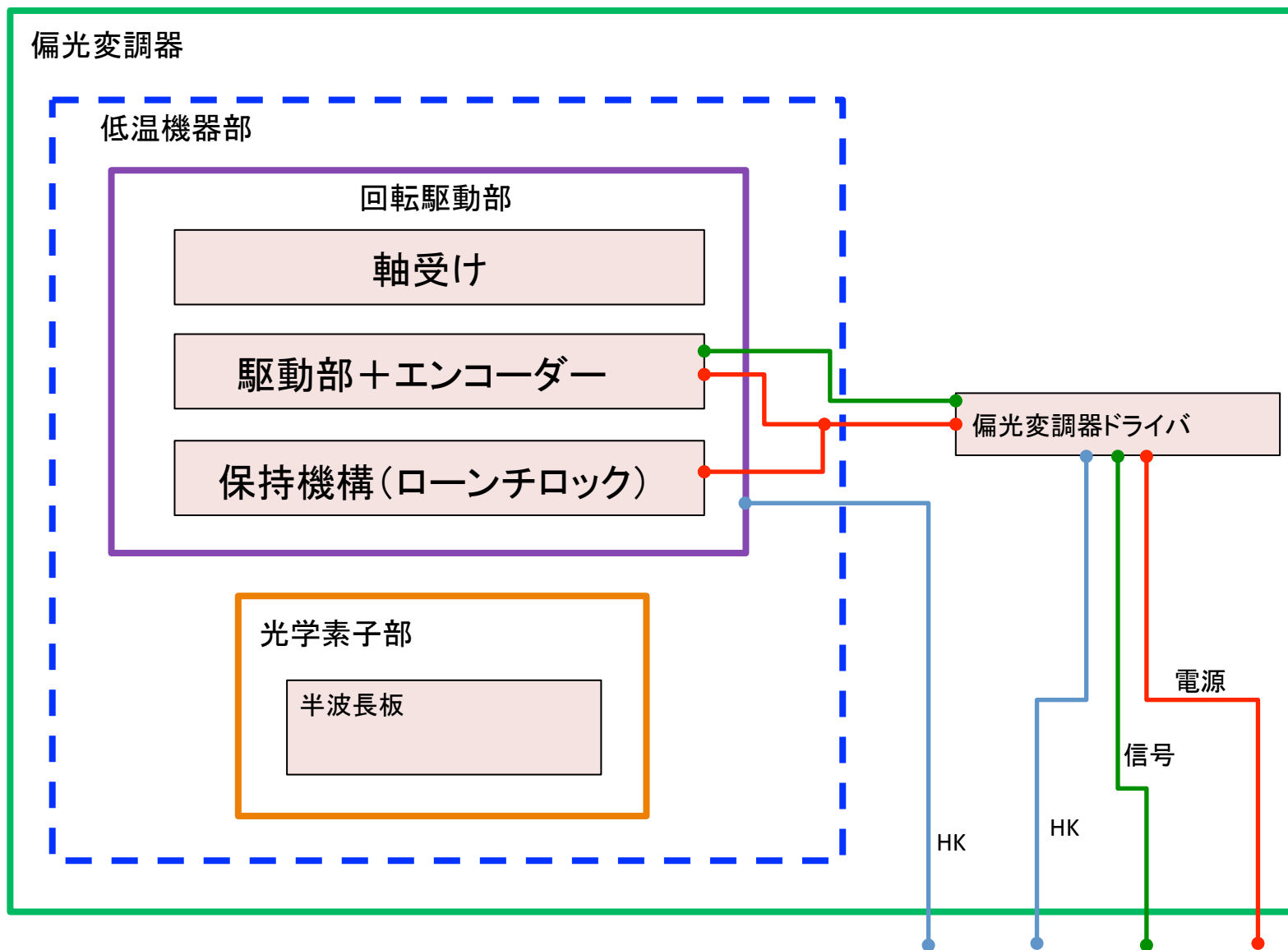


# 機能要求

機能項目	要求値
波長板直径	~400 mm
運用環境温度	波長板を< 10 K(TBD)に維持。
回転数	~1 Hz
許容発熱	< ~3 mW
エンコーダー精度	< 0.1 度以下
運用期間	3 年間

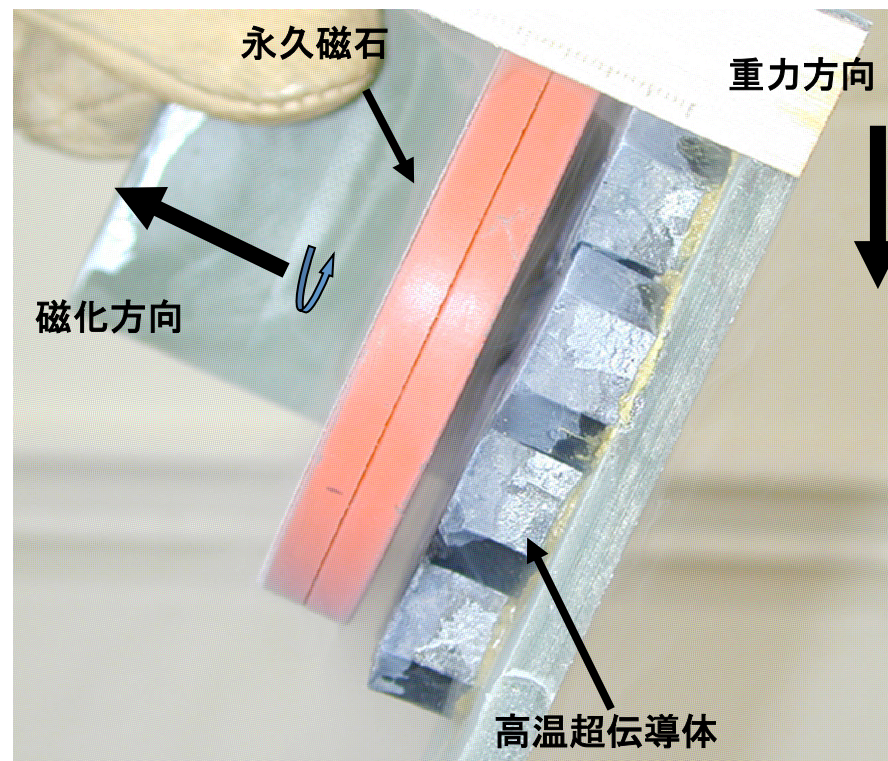
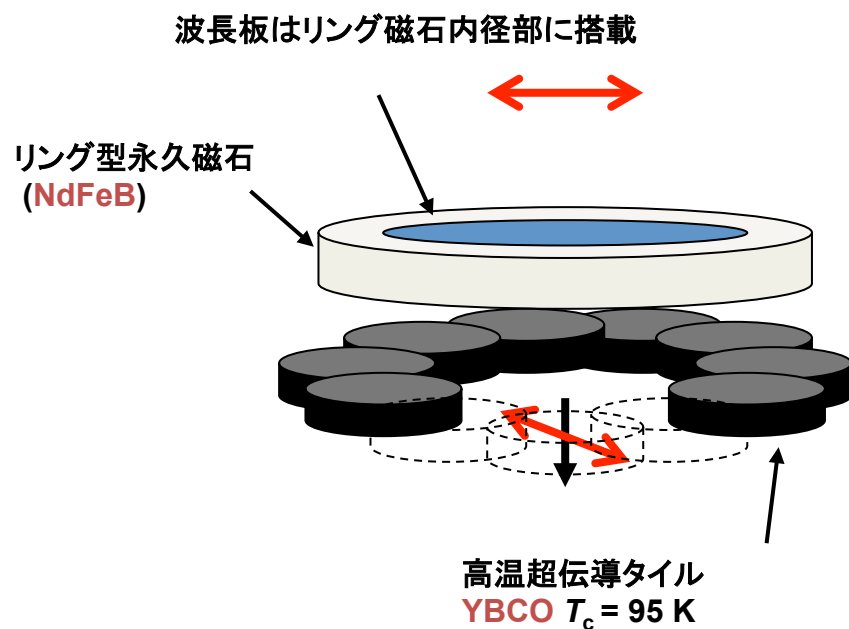
CMB観測には地上、気球、衛星などありますが、ここでは衛星搭載を見据えて開発中。

# 要求されるコンポ



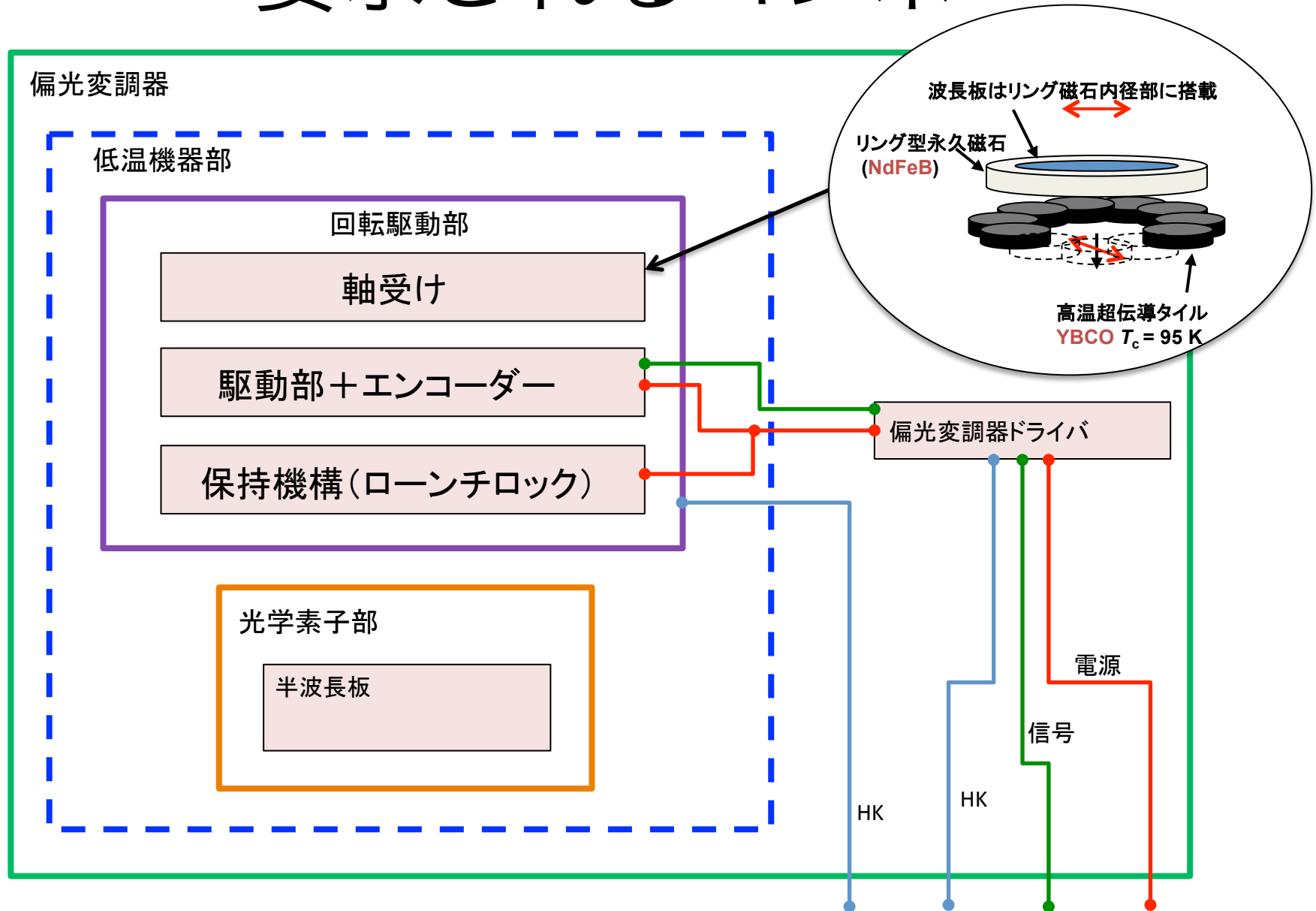
# 軸受けの選択

初期検討にて、冷却状態でメカニカルな軸受け方法は振動及び発熱により断念。



冷却状態を利用して非接触式軸受けを候補とする。

# 要求されるコンポ



# 冷却連続回転半波長板軸受けの試作 1号機

開口径(半波長板直径)  $\Phi 65\text{mm}$   
想定動作温度  $\sim 4\text{K}$  (今回は  $77\text{K}$ )  
想定回転速度  $\sim 1\text{Hz}$

駆動用磁石  
(固定子側はラボ試験用に磁石式ギヤ及び、  
チェンバー外からのモーター及びシャフトにより  
駆動方式を採用)

入射偏光

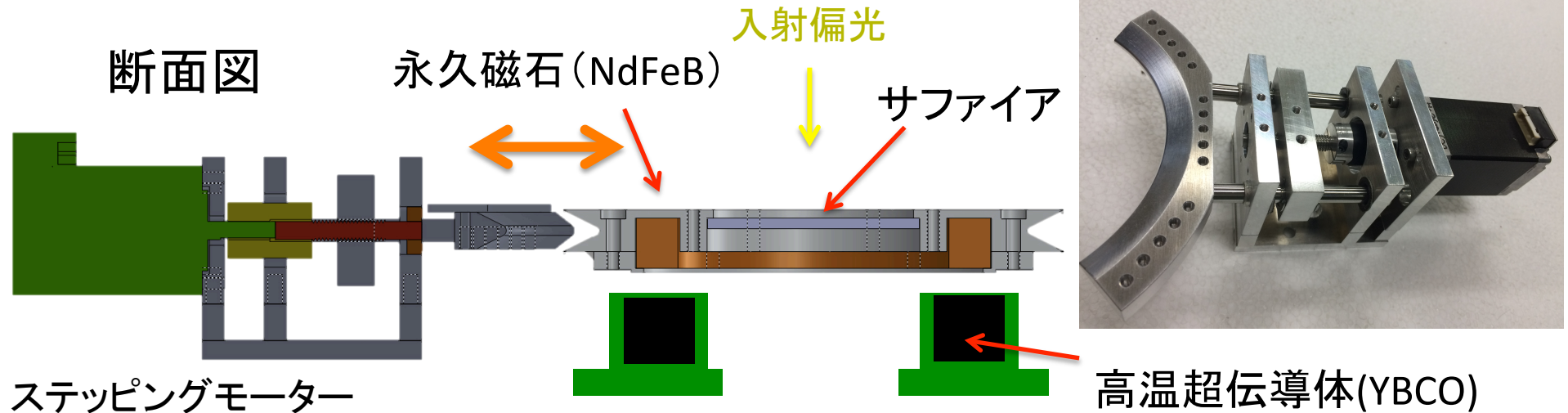
光学式エンコーダー及びチョッパー

超伝導軸受けを用いた。  
(リング型NdFeB永久磁石と  
バルクYBCOを採用)

50mm

極低温ホール素子

# 低温保持機構



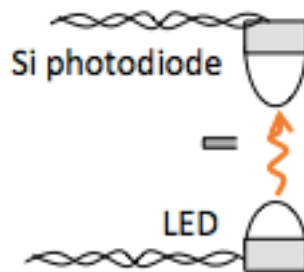
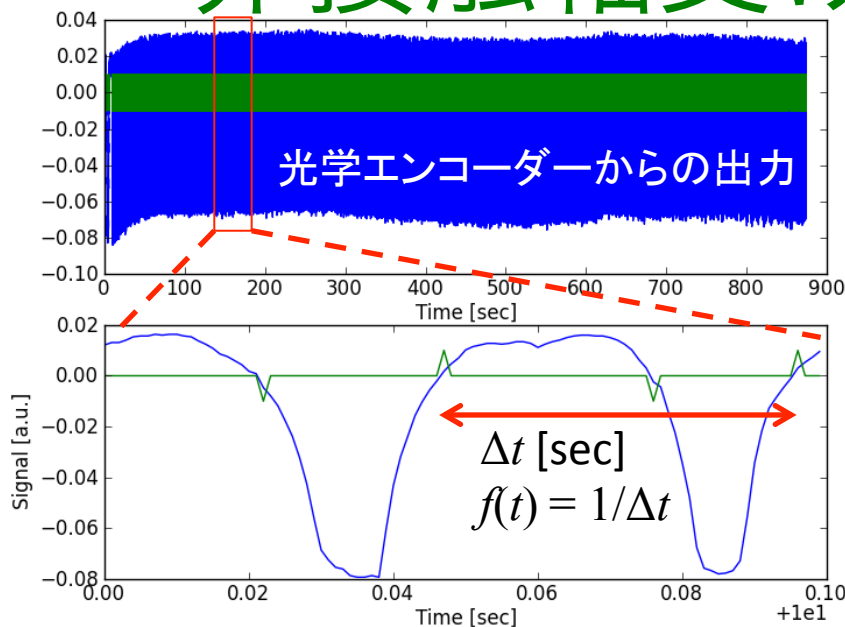
Warm launchを想定し、常温下では保持。Launch lockも兼ねる。打ち上げ後、軸受けの高温超伝導体が臨界温度以下にて回転子を離し、非接触による浮上を実現させる。

バルクのYBCOは第二種超伝導体。臨界温度は94K。



液体窒素で動作確認は十分。今回は、試作機の動作確認を液体窒素温度で試験。

# 非接触軸受けの摩擦係数測定



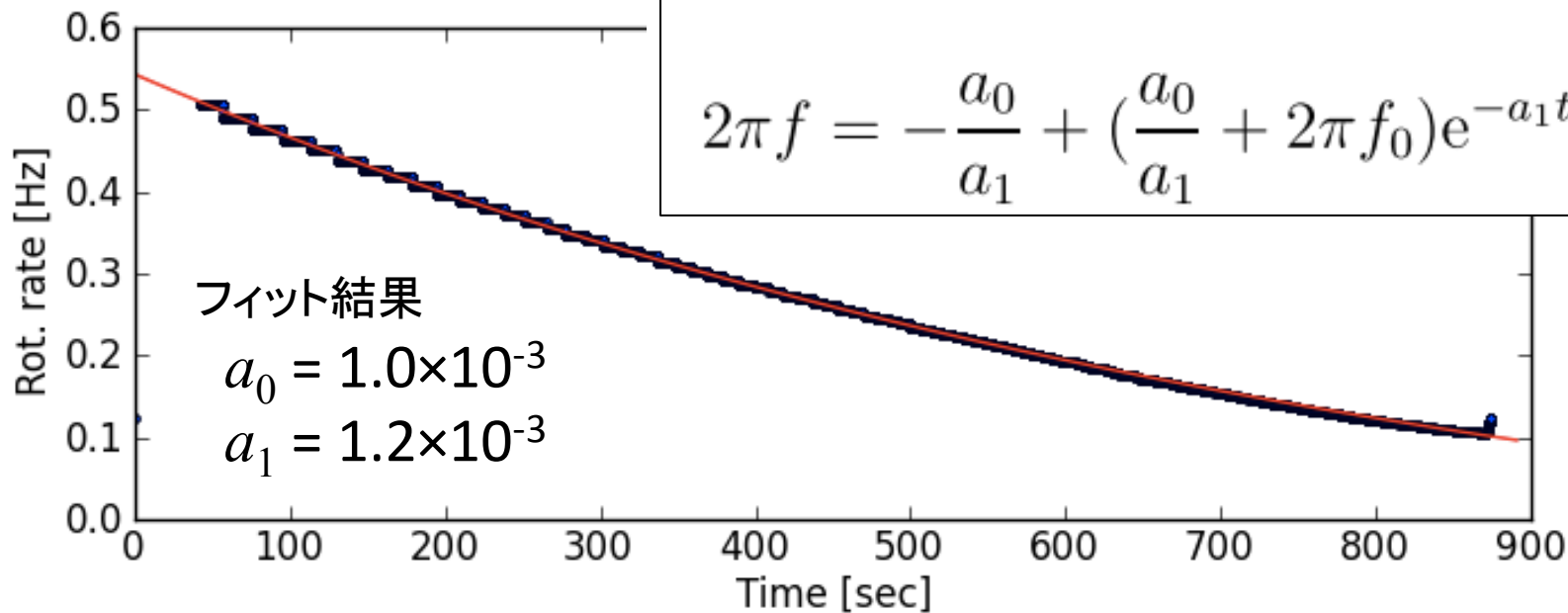
LEDとシリコンPDで光学エンコーダーを構成。~10Kで<math>50\mu\text{W}</math>の発熱。

ヒステリシス効果

渦電流、空気抵抗

$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = -a_0(T) - 2\pi a_1(T) f.$$

$$2\pi f = -\frac{a_0}{a_1} + \left(\frac{a_0}{a_1} + 2\pi f_0\right) e^{-a_1 t},$$



# 摩擦とエネルギーロス

$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = \boxed{-a_0(T)} - \boxed{2\pi a_1(T)f}.$$

ヒステリシス効果

磁場の非一様性

Beamモデルより

$$a_0 \propto \frac{(\Delta B)^3}{J_c}$$

臨界電流

渦電流 (空気抵抗)

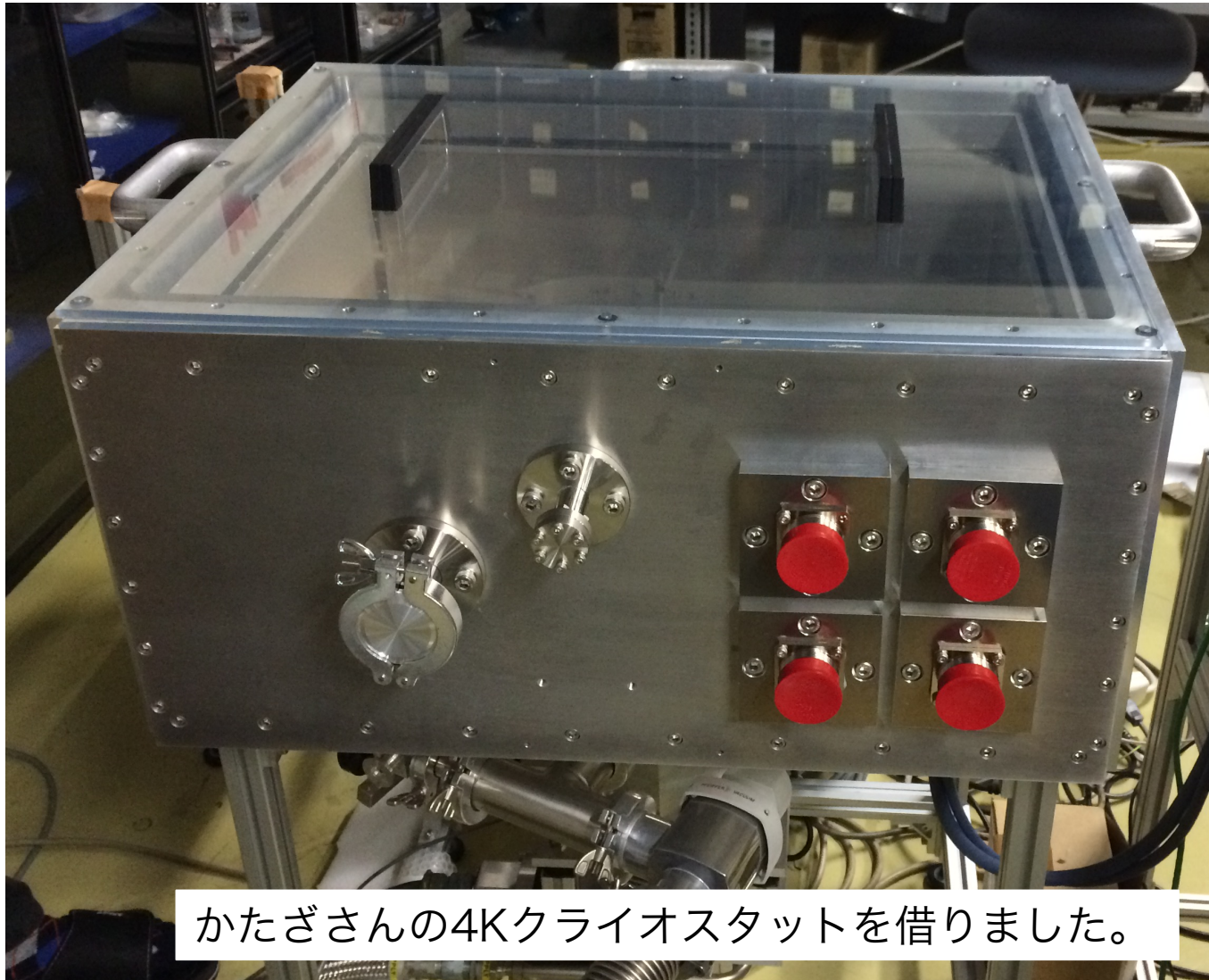
磁場の非一様性

$$a_1 \propto \sigma (\Delta B)^2 \omega$$

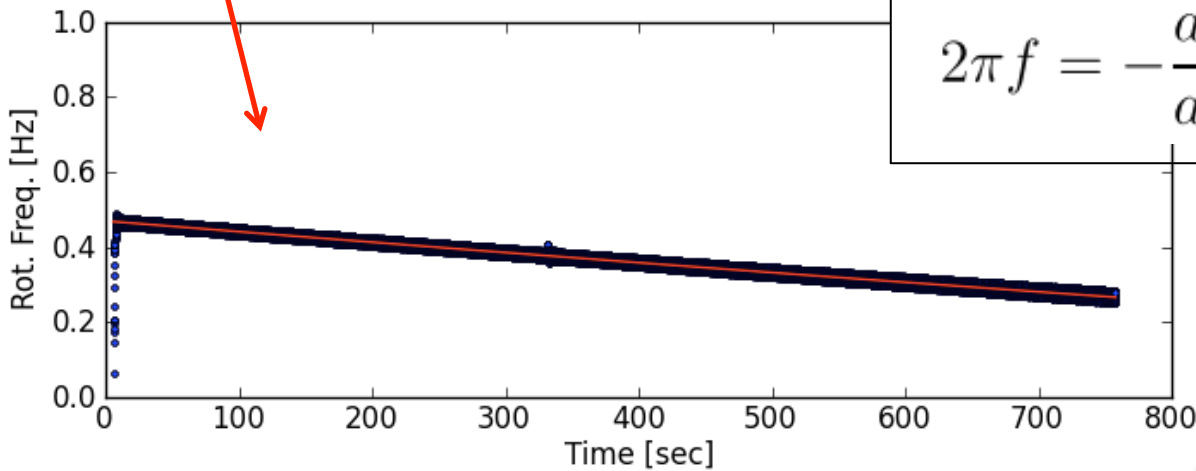
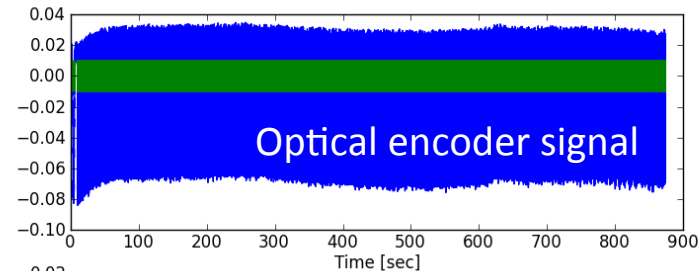
電気伝導率



# クライオスタットにて試験



# 摩擦係数測定



渦電流損失  
空気摩擦

ヒステリシス損失

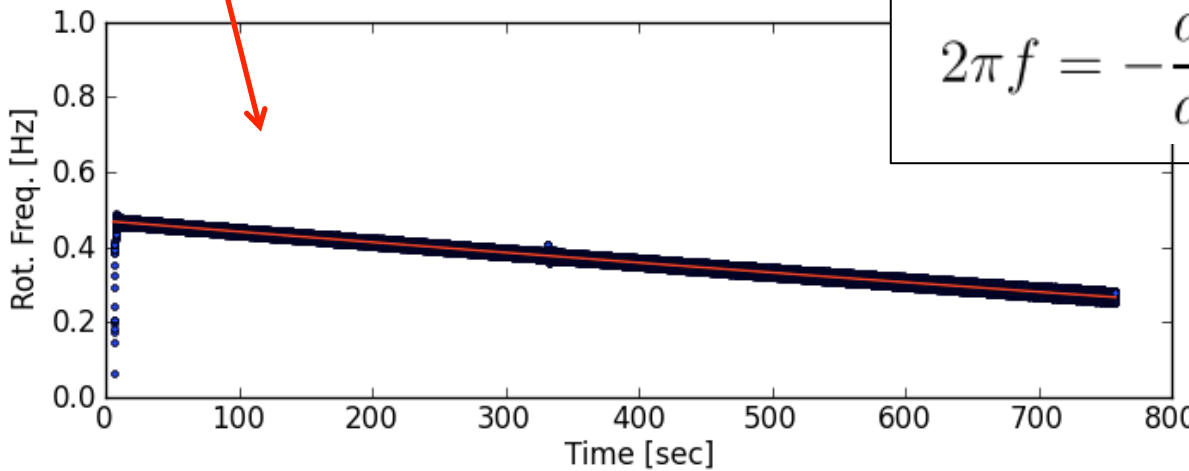
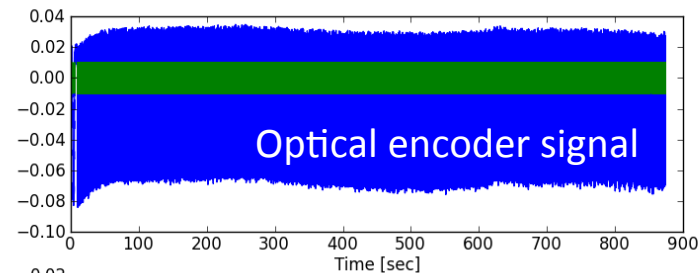
$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = -a_0(T) - 2\pi a_1(T) f.$$

$$2\pi f = -\frac{a_0}{a_1} + \left(\frac{a_0}{a_1} + 2\pi f_0\right) e^{-a_1 t},$$

摩擦による期待される発熱

	$a_0$ [1/s <sup>2</sup> ]	$a_1$ [1/s]	Dissipation power for ID=65 mm	Dissipation power for ID=420 mm
LN2 at room pressure	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	73 $\mu$ W	
Cryostat				
• HTS = 10-15 K	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-4}$	19 $\mu$ W	
• P < 10 <sup>-4</sup> torr				

# 摩擦係数測定



$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = -a_0(T) - 2\pi a_1(T) f.$$

$$2\pi f = -\frac{a_0}{a_1} + \left(\frac{a_0}{a_1} + 2\pi f_0\right) e^{-a_1 t},$$

渦電流損失  
空気摩擦

ヒステリシス損失

摩擦による期待される発熱

	$a_0$ [1/s <sup>2</sup> ]	$a_1$ [1/s]	Dissipation power for ID=65 mm	Dissipation power for ID=420 mm
LN2 at room pressure	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	73 $\mu$ W	20 mW
Cryostat				
• HTS = 10-15 K	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-4}$	19 $\mu$ W	5.2 mW
• P < $10^{-4}$ torr				

参考: 衛星仕様の4KJT冷凍機の冷凍能力は~35mW。

# 摩擦とエネルギーロス (1/2)

$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = -a_0(T) - 2\pi a_1(T) f.$$

ヒステリシス効果

磁場の非一様性  
Beamモデルより

$$a_0 \propto \frac{(\Delta B)^3}{J_c}$$

臨界電流

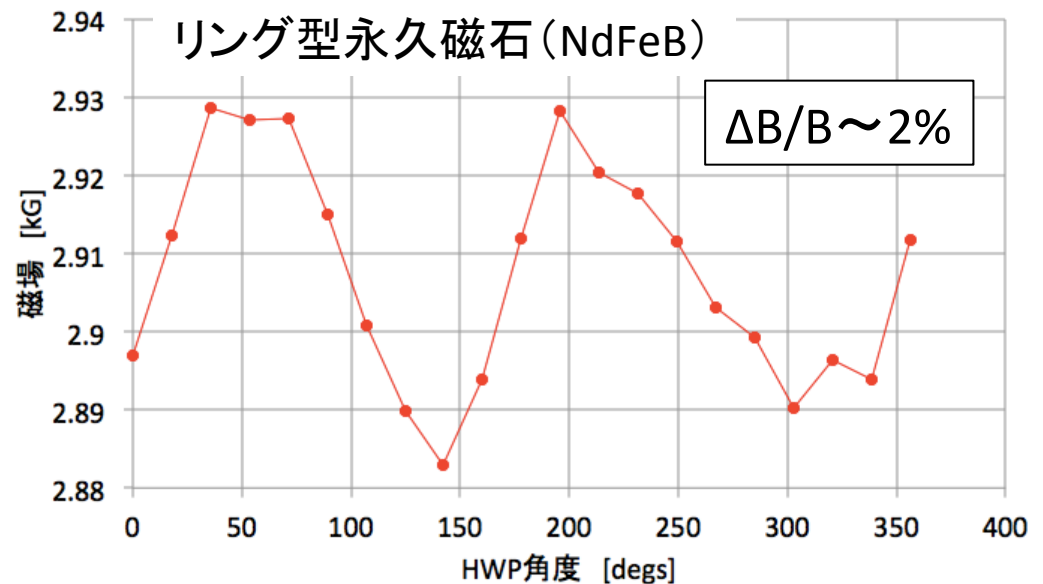
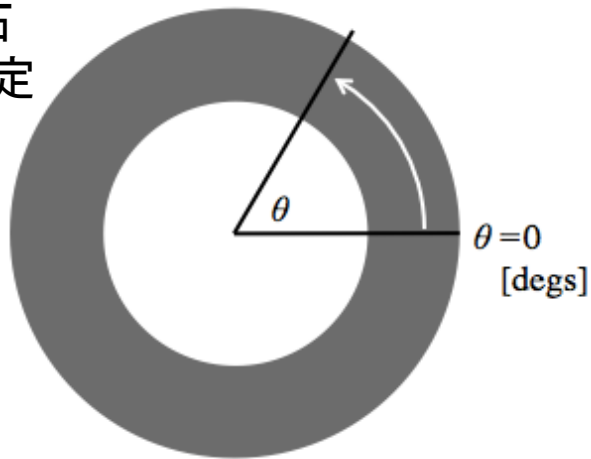
渦電流 (空気抵抗)

磁場の非一様性

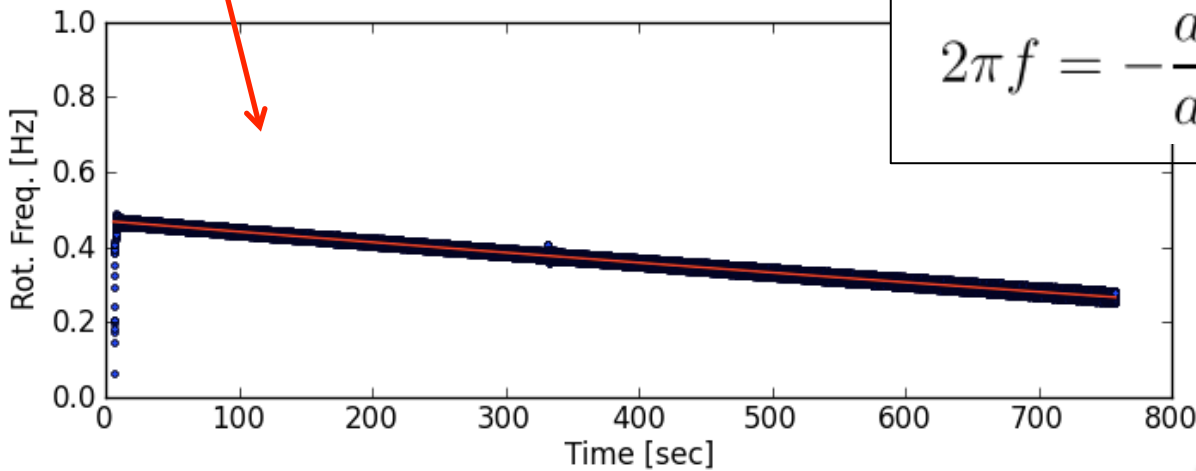
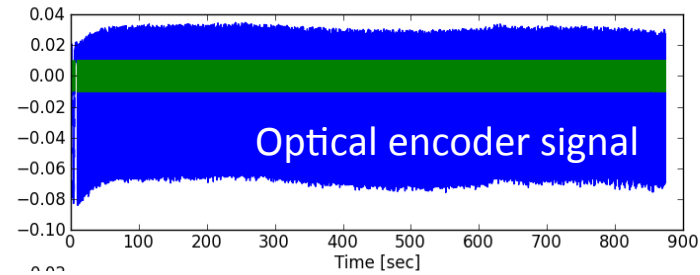
$$a_1 \propto \sigma (\Delta B)^2 \omega$$

電気伝導率

リング磁石  
の磁場測定



# 摩擦係数測定



$$\alpha(T) = 2\pi \frac{df}{dt} = -a_0(T) - 2\pi a_1(T) f.$$

$$2\pi f = -\frac{a_0}{a_1} + \left(\frac{a_0}{a_1} + 2\pi f_0\right) e^{-a_1 t},$$

渦電流損失  
空気摩擦

ヒステリシス損失

摩擦による期待される発熱

	$a_0$ [1/s <sup>2</sup> ]	$a_1$ [1/s]	Dissipation power for ID=65 mm	Dissipation power for ID=420 mm
LN2 at room pressure	$1.6 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-3}$	73 $\mu$ W	20 mW
Cryostat				
• HTS = 10-15 K	$1.3 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-4}$	19 $\mu$ W	5.2 mW
• P < 10 <sup>-4</sup> torr	$\div 8$	$\div 4$		

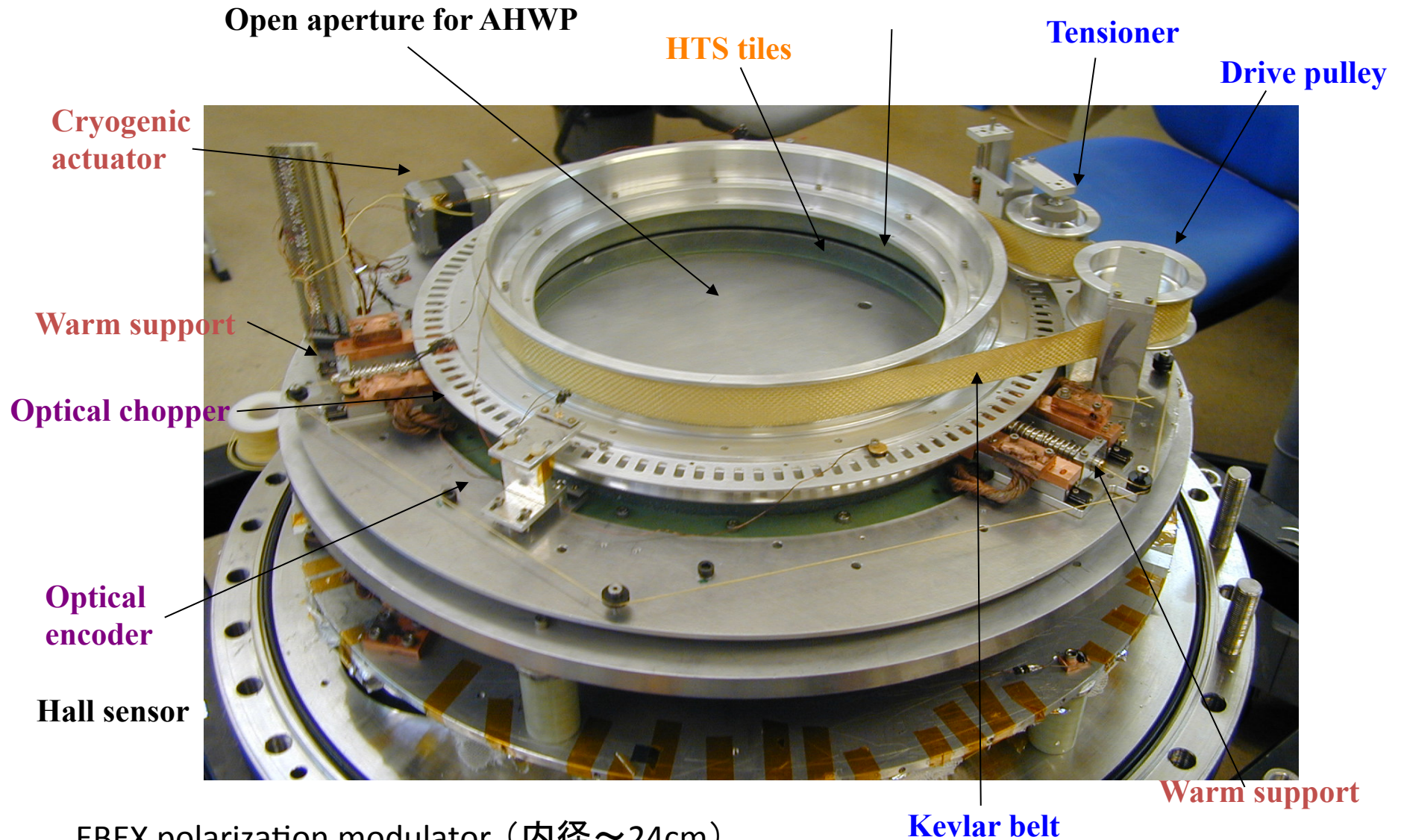
$\Delta B/B = 2\% \rightarrow 1\%$

# 現在の開発課題

- 保持機構
  - 打ち上げの振動耐性（ローンチロック）
  - 3つのアクチュエータ→1つに。
- 回転駆動機構
  - ベルト方式
  - ギヤカップル方式
  - 非接触モーター方式
- 発熱の低減
  - 一様な磁場を持つ永久磁石回転子
  - 渦電流を低減するための保持機構等の材料選択、及び渦電流を切るスリットを導入。
- 大型化（ $\phi 400\text{mm}$ ）
  - サファイア
  - 磁石のセグメント化に伴う一様な磁場を持つ永久磁石回転子
- 振動耐性
  - 割れる？

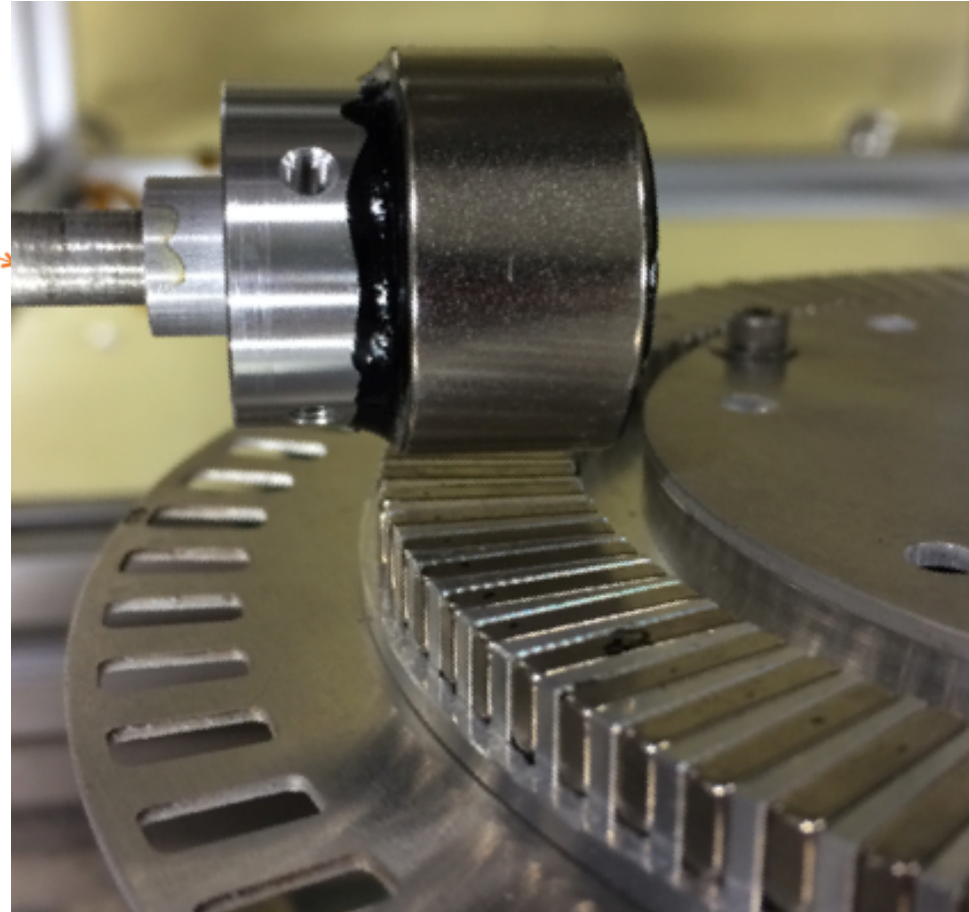
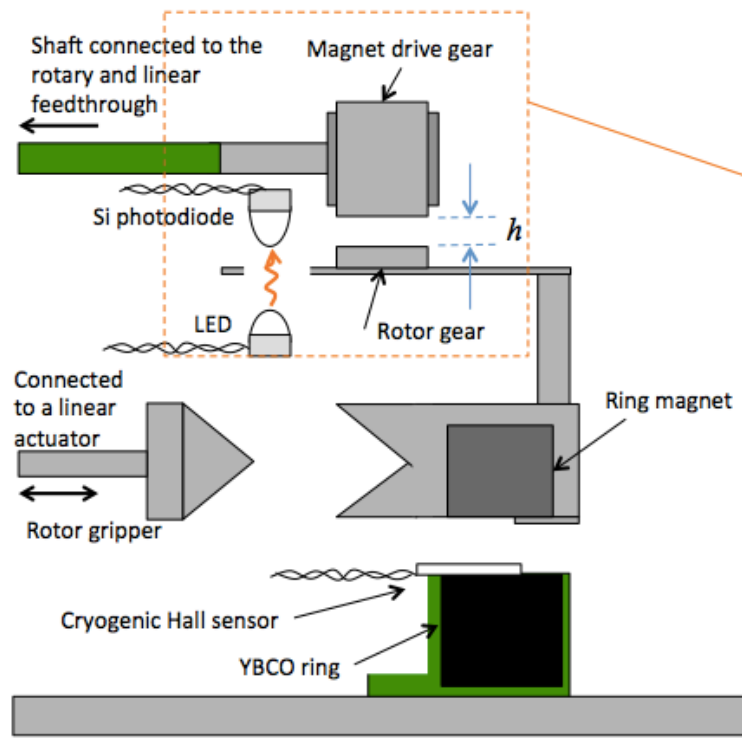
# ベルト式駆動系

Ring magnet



EBEX polarization modulator (内径~24cm)  
南極周回気球観測にて搭載され観測に用いられた。

# 磁気カップル式駆動系



非接触だが、外部モーターが必要。

AC motorは開発中。



# 現在の開発課題

- 保持機構
  - 打ち上げの振動耐性（ローンチロック）
  - 3つのアクチュエータ→1つに。
- 回転駆動機構
  - ベルト方式
  - ギヤカップル方式
  - 非接触モーター方式
- 発熱の低減
  - 一様な磁場を持つ永久磁石回転子
  - 渦電流を低減するための保持機構等の材料選択、及び渦電流を切るスリットを導入。
- 大型化（ $\phi 400\text{mm}$ ）
  - サファイア
  - 磁石のセグメント化に伴う一様な磁場を持つ永久磁石回転子
- 振動耐性
  - 割れる？

# まとめ

- インフレーション仮説の検証を目的としたCMB偏光観測のための偏光変調器を開発中。
- 偏光変調器は光学素子（波長板）と回転駆動部にて構成され、回転駆動部の開発を紹介した。
- 発熱を低減するため、超伝導軸受けを採用した。衛星搭載に向けて試作機（1号）の性能試験を行い、実機サイズBBM設計に向けた開発（バグ出し）を行っている。