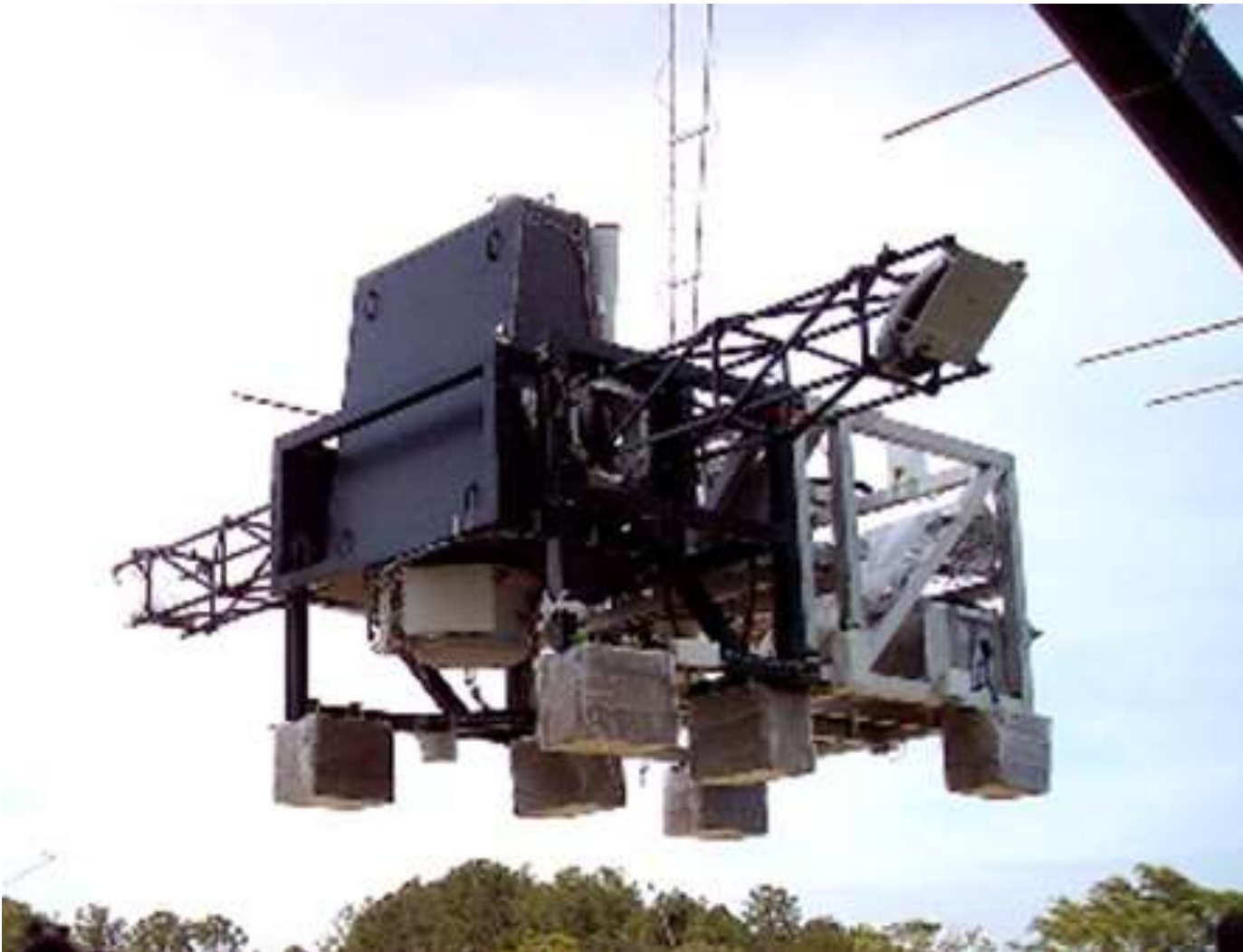


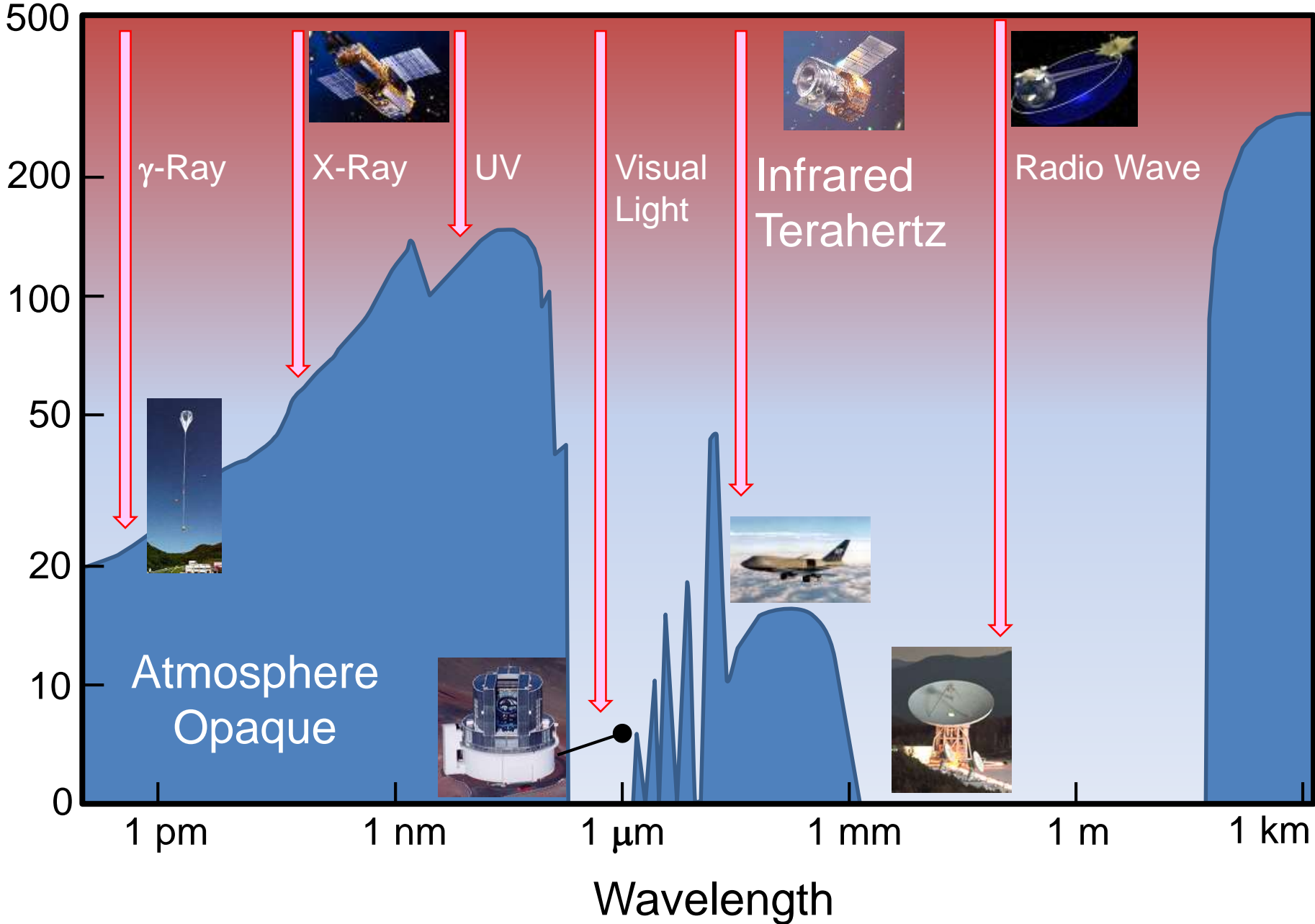
気球搭載遠赤外線干渉計 FITEと南極干渉計への応用 (Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment)



芝井 広
佐々木彩奈
伊藤 哲司
中道みのり
大山照平
谷 貴人
住 貴宏
松尾太郎
小西美穂子
須藤 淳
山本広大 (阪大理)

成田正直
土居明広
吉田哲也
斎藤芳隆
(ISAS/JAXA)
河野裕介
(国立天文台)

Altitude (km)

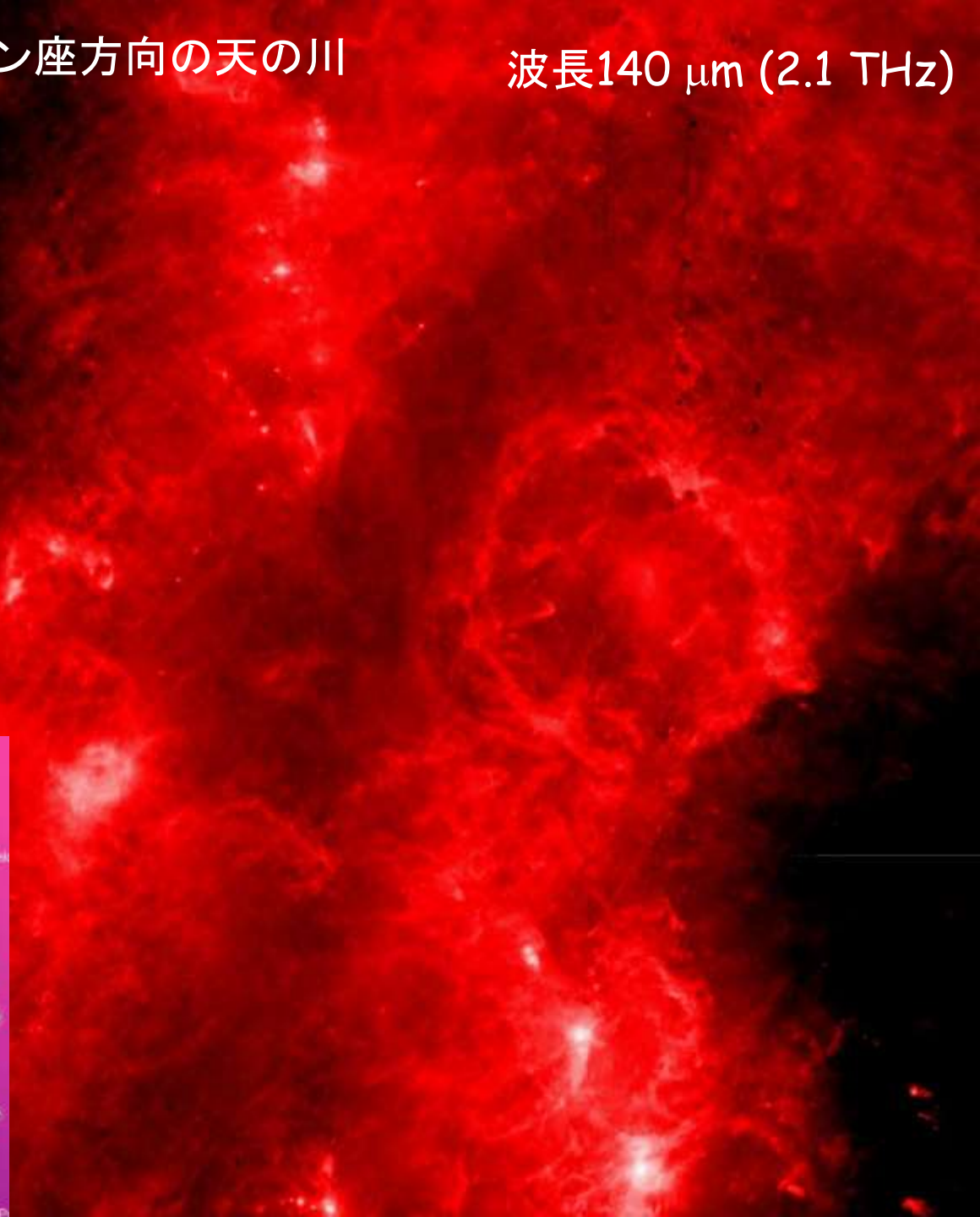
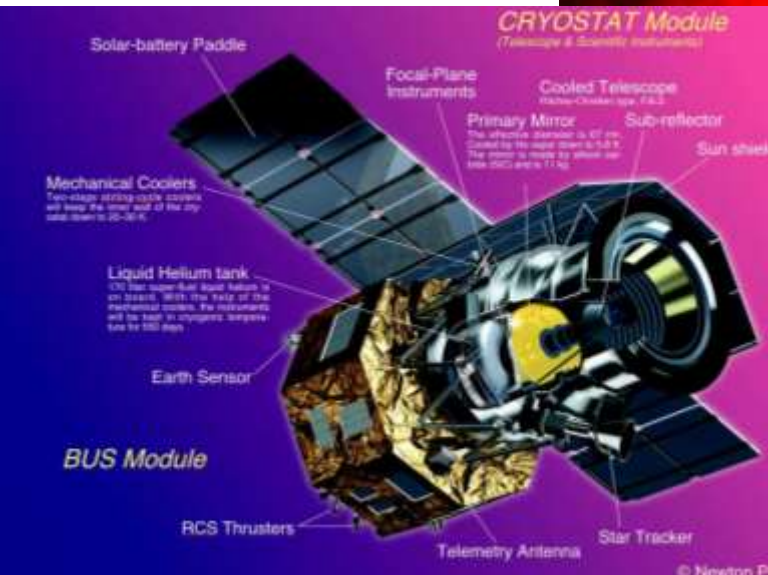


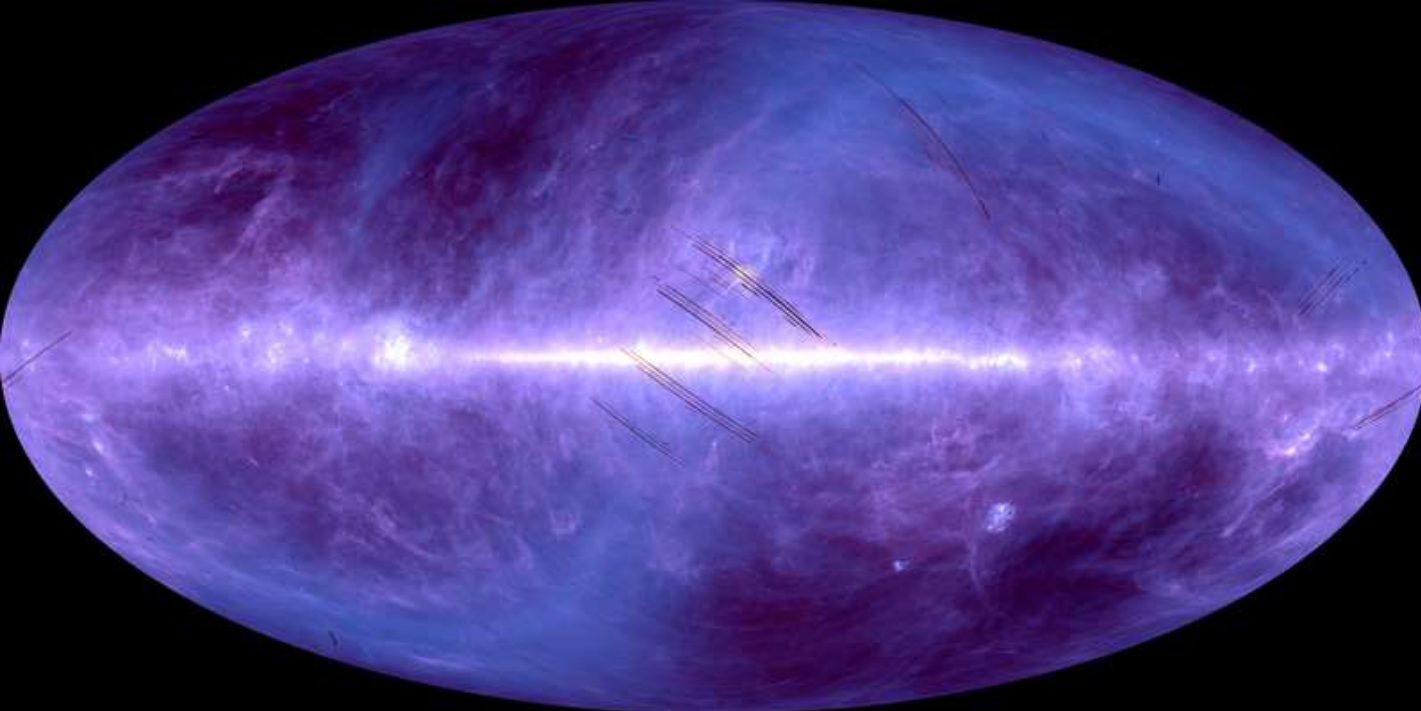


オリオン座方向の天の川

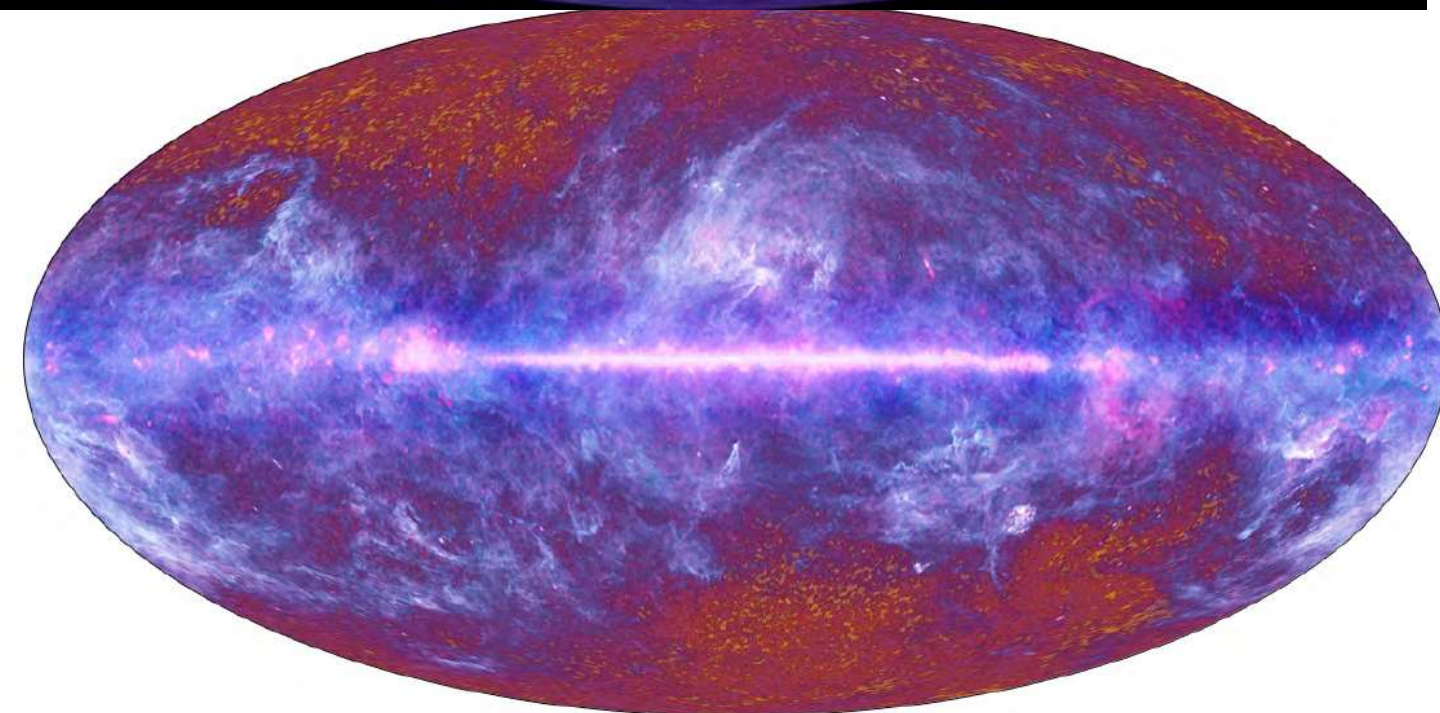
波長140 μm (2.1 THz)

「あかり」成功！
2006年2月22日打上げ
遠赤外線全天サーベイ





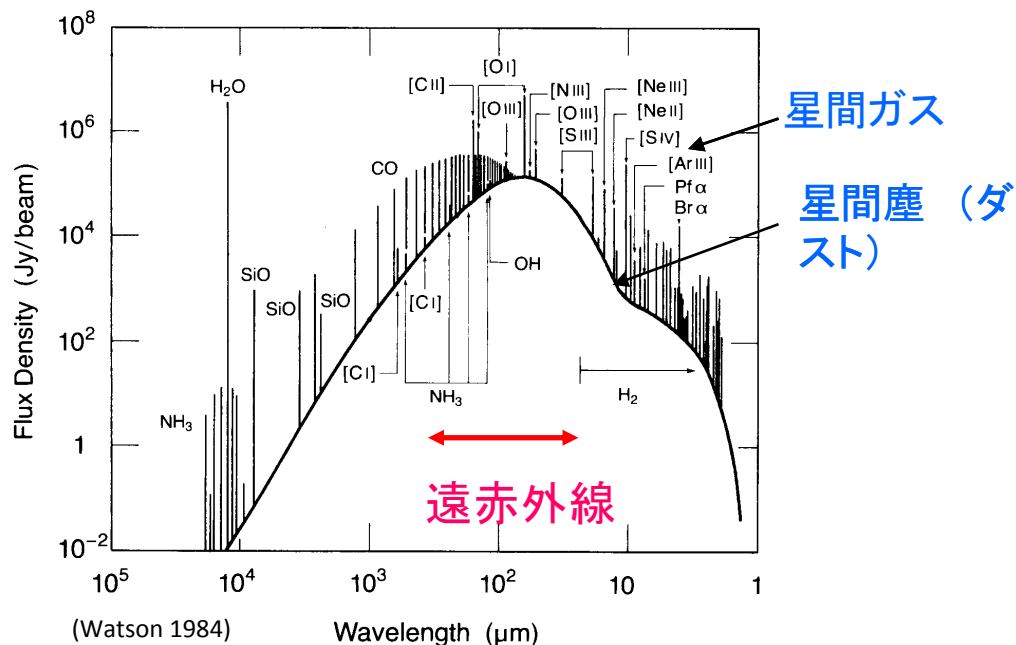
「あかり」
遠赤外線
全天マップ



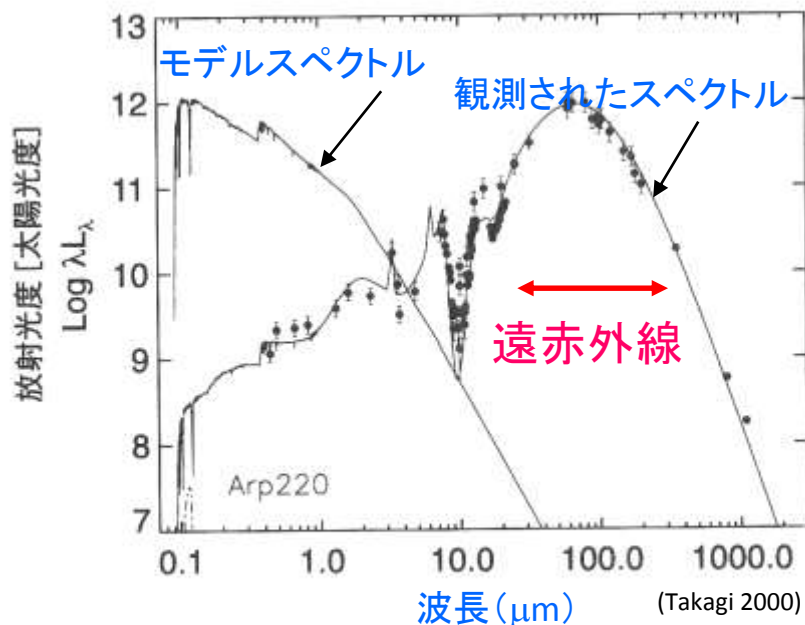
Planck
ミリ波
全天マップ

遠赤外線観測の重要性と観測条件

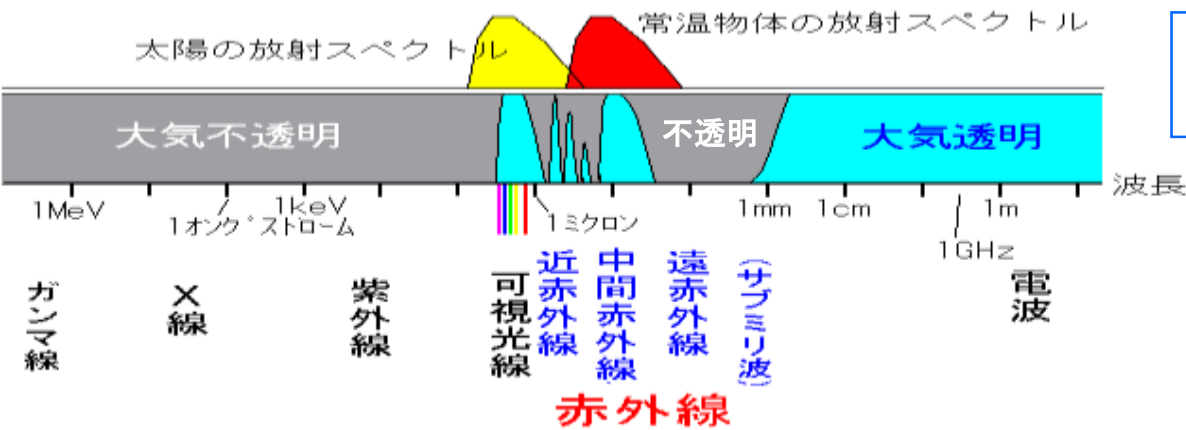
恒星誕生の場: Orion-KL



スターバースト銀河: Arp220



大規模星生成領域ではエネルギーが遠赤外線に変換されて放射される。

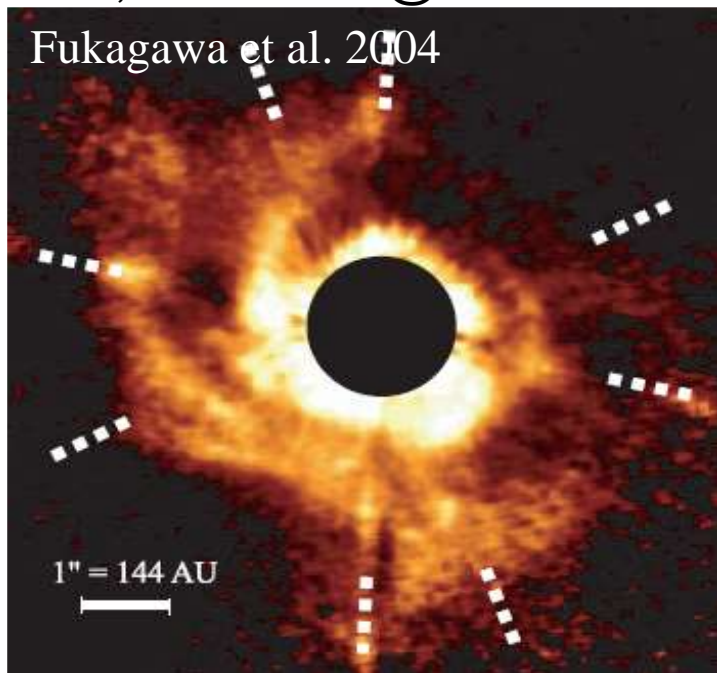


スペースからの観測が必須

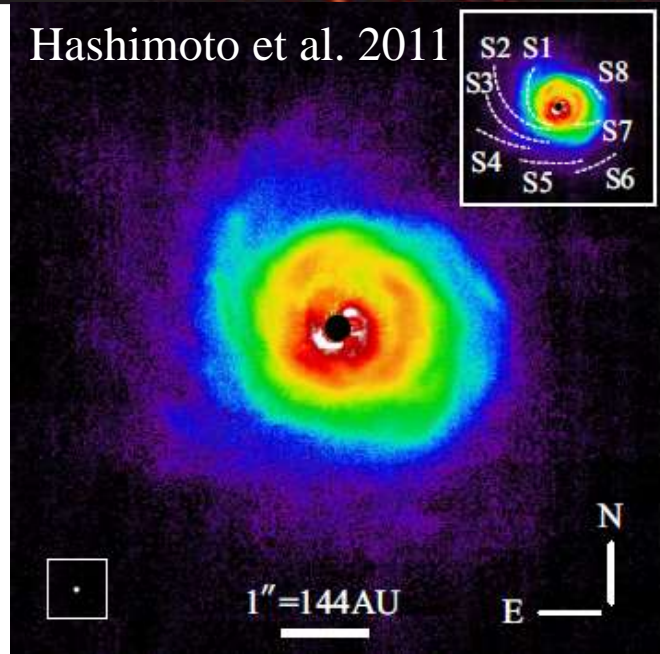
AB Aur, Enhanced-I@1.6 microns

原始惑星系円盤 / 残骸円盤

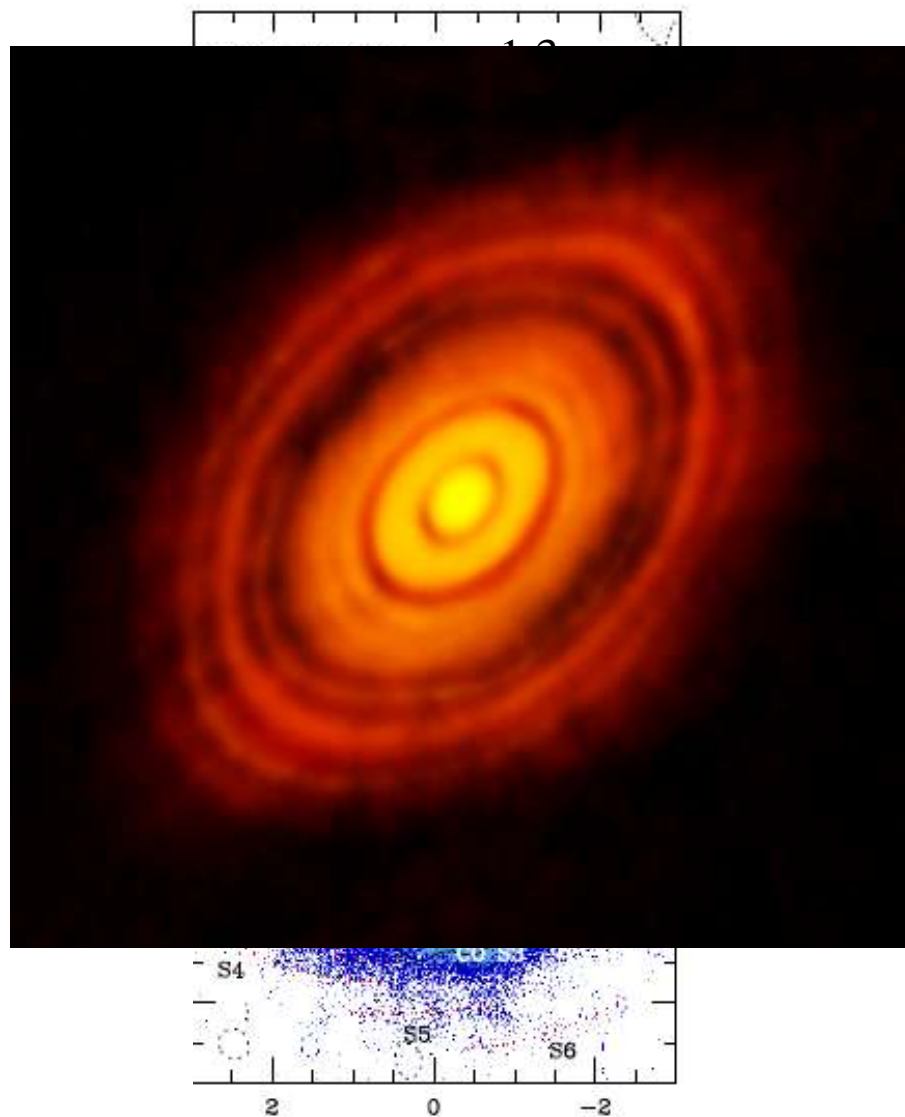
Fukagawa et al. 2004



Hashimoto et al. 2011



AB Aur, PI@1.6 microns



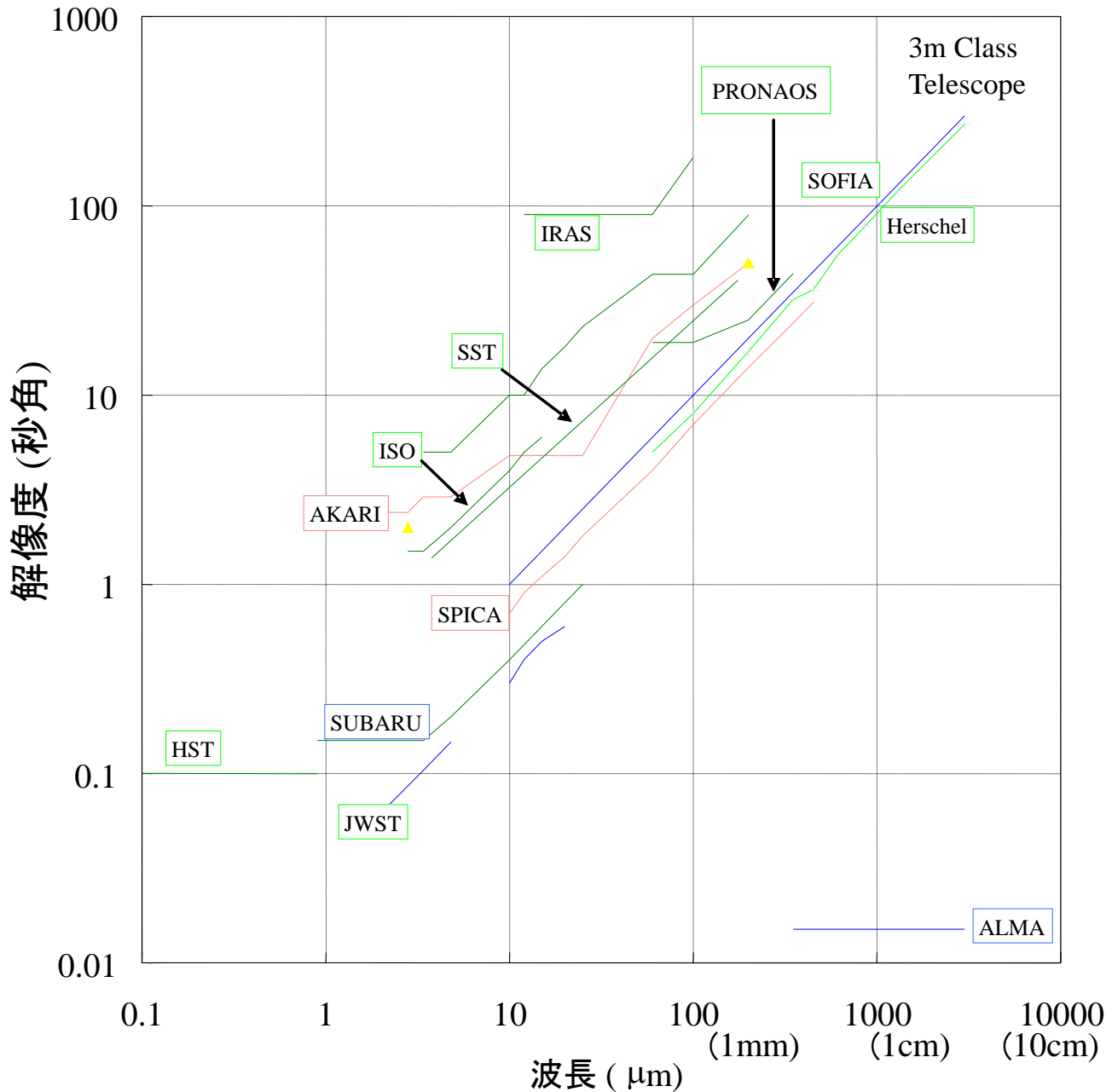
Tang et al, 2012

もっと細かく
見たい!
解像度を
上げたい!

遠赤外線は星間
物質から天体が
誕生しつつある
状態に最も敏感

電波や可視、近
赤外線と比べて
解像度が悪い

さまざまな望遠鏡の解像度



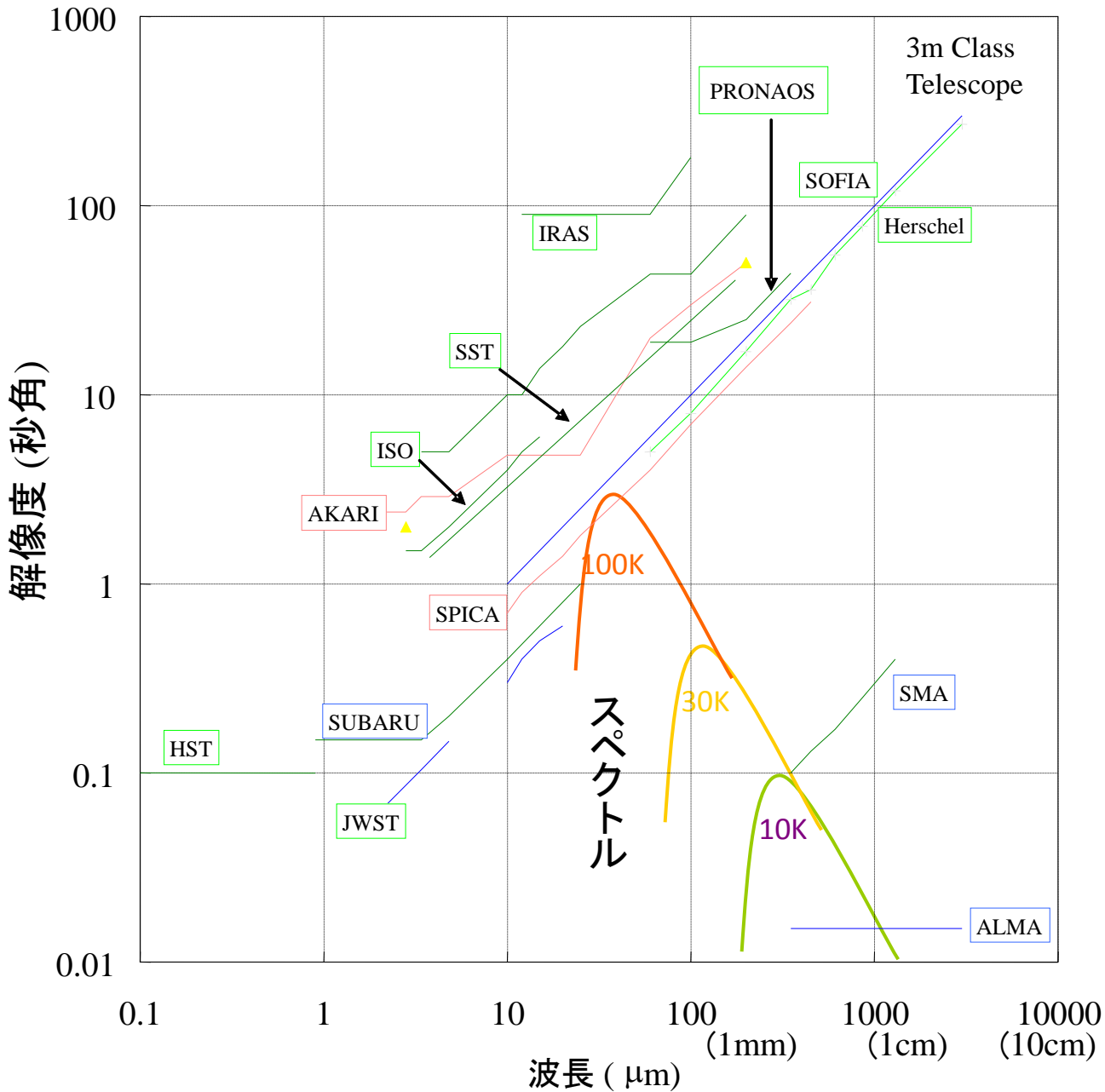
VSOP, CHARA, VLT/MIDI, ,,,,

もっと細かく
見たい!
解像度を
上げたい!

遠赤外線は星間
物質から天体が
誕生しつつある
状態に最も敏感

電波や可視、近
赤外線と比べて
解像度が悪い

さまざまな望遠鏡の解像度



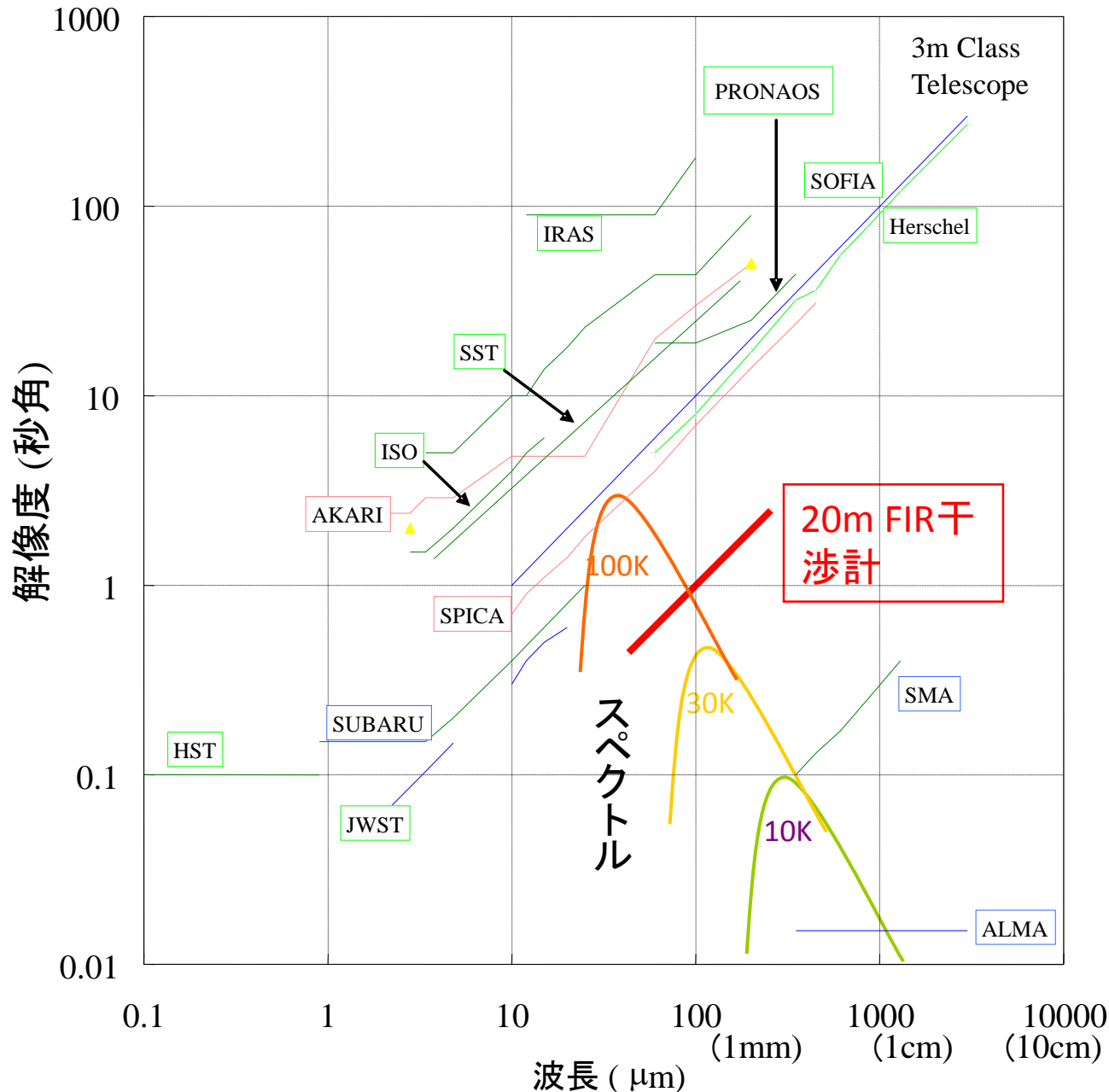
VSOP, CHARA, VLT/MIDI, ,,,,

もっと細かく
見たい!
解像度を
上げたい!

遠赤外線は星間
物質から天体が
誕生しつつある
状態に最も敏感

近赤外線、可視光、紫外線、電波
解像度が悪い

さまざまな望遠鏡の解像度



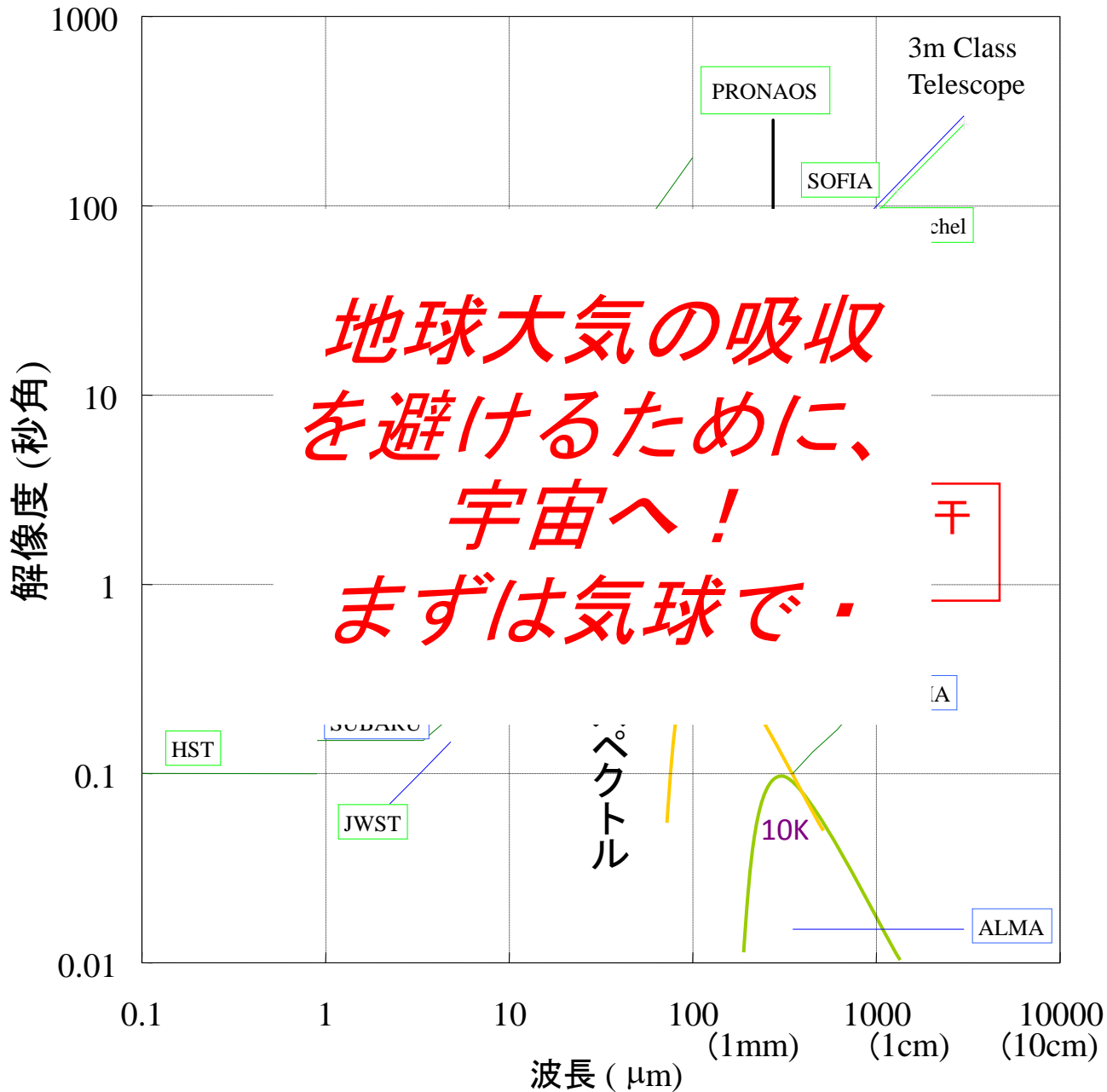
VSOP, CHARA, VLT/MIDI, , , ,

もっと細かく
見たい！
解像度を
上げたい！

遠赤外線は星間
物質から天体が
誕生しつつある
状態に最も敏感

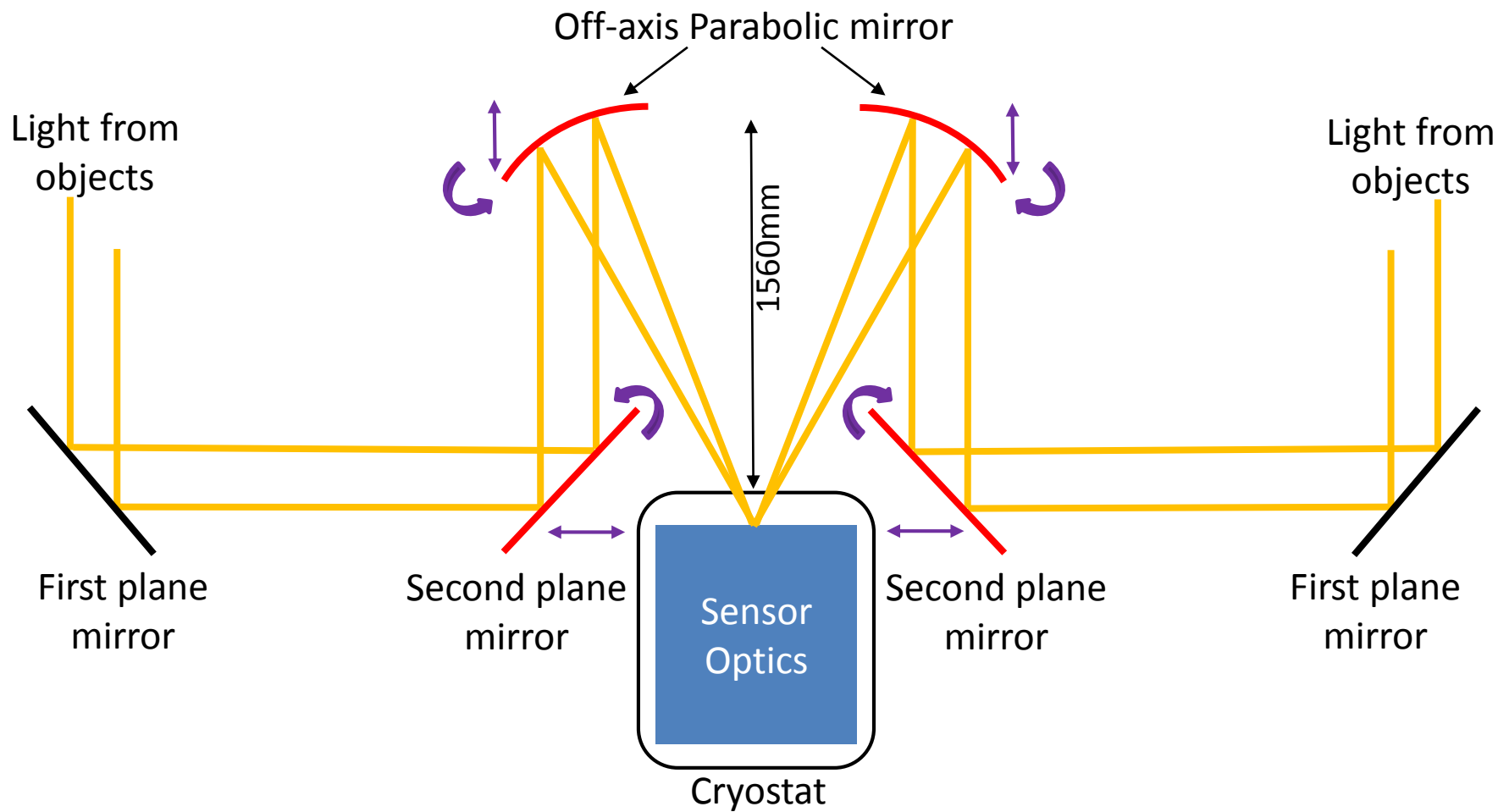
近赤外線、可視光、
紫外線、電波、
解像度が悪い

さまざまな望遠鏡の解像度



VSOP, CHARA, VLT/MIDI, , , ,

FITE干涉計概念圖



遅延線不要の像再生法の発案・原理実証 (Matsuo et al. 2008)

Along the S-Axis, Optical Path Difference is generated.

$$\vec{b} \cdot \vec{\varphi}$$



Fourier Transformation of Visibility on the S-Axis

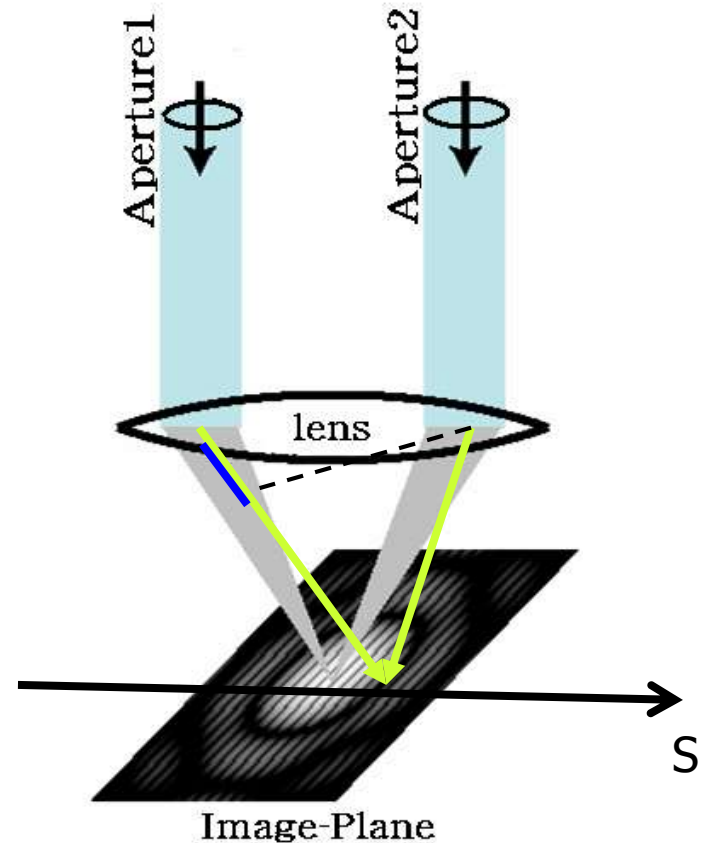
$$\int ds \Gamma_{12}^{(r)} e^{2\pi i \frac{v}{c} \vec{b} \cdot \vec{\varphi}} = \iint d\xi d\eta I_S(\xi, \eta, \nu) e^{-2\pi i \vec{u} \cdot \vec{\theta}}$$



Fourier Transformation on (u,v) plane

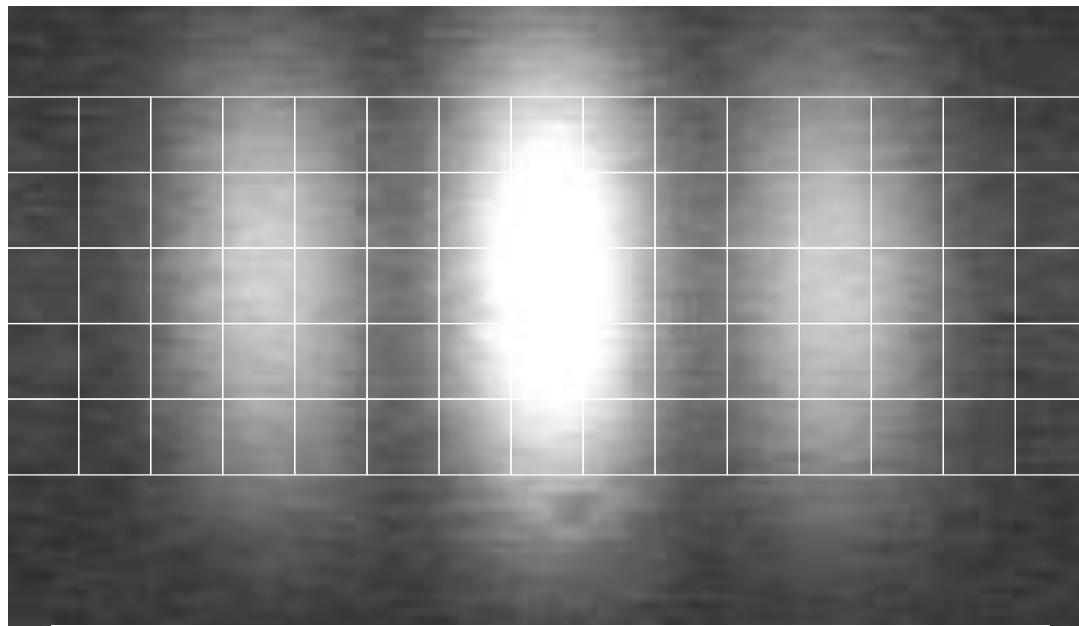
$$I_S(\xi, \eta, \nu) = \iint dudv \left\{ \int ds \Gamma_{12}^{(r)} e^{2\pi i \frac{v}{c} \vec{b} \cdot \vec{\varphi}} \right\} e^{2\pi i \vec{\theta} \cdot \vec{u}}$$

Source Image Can be Reconstructed without Delay Line



Simulation of FITE Interferometer (BL:8m)

Interference Pattern at 1 μ y Focus

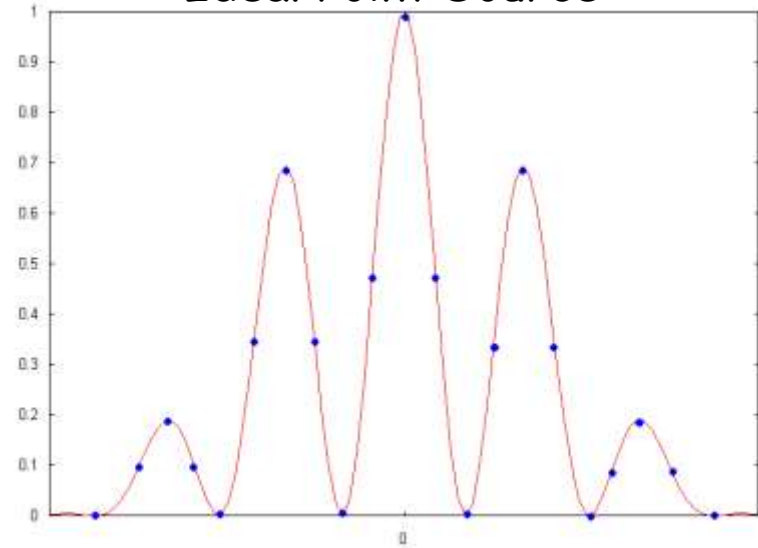


22.5 mm (15 pixels)

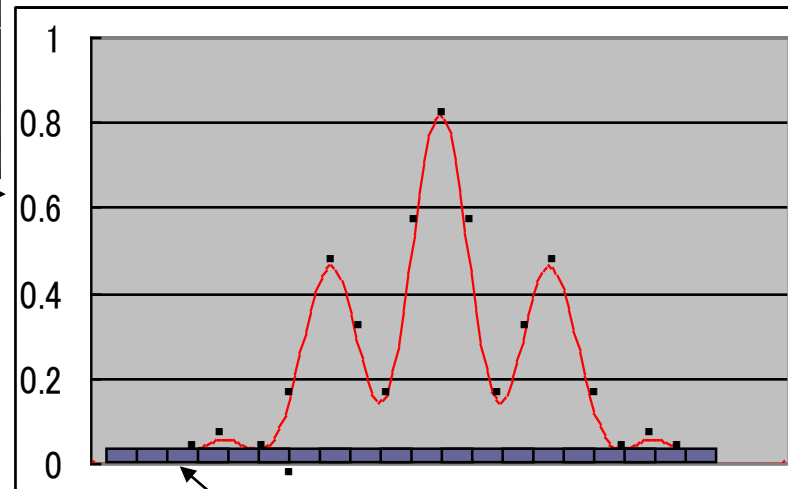
(A Monochromatic Point-like Source)

Just like the Michelson's stellar interferometer

Ideal Point Source

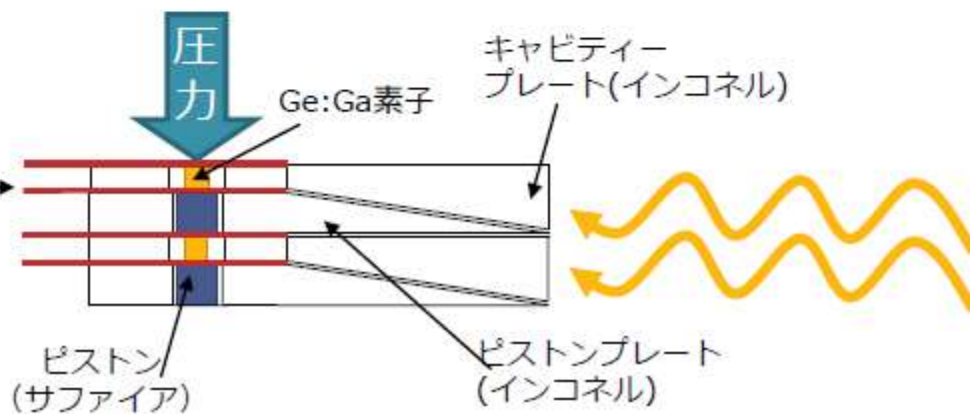
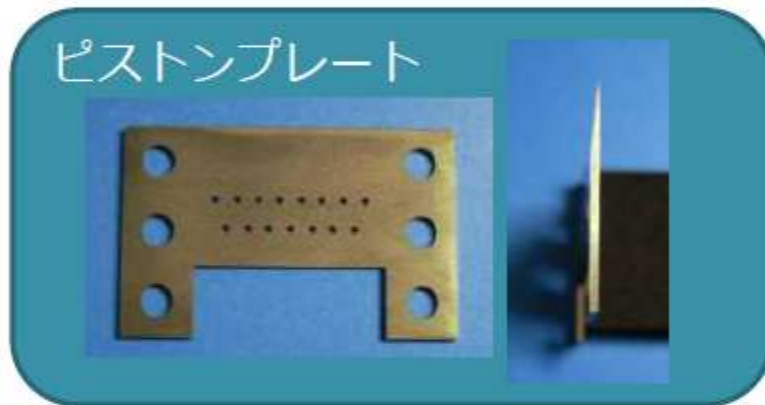
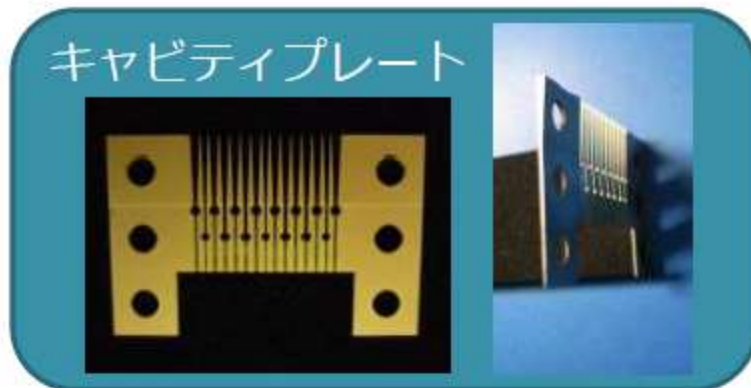
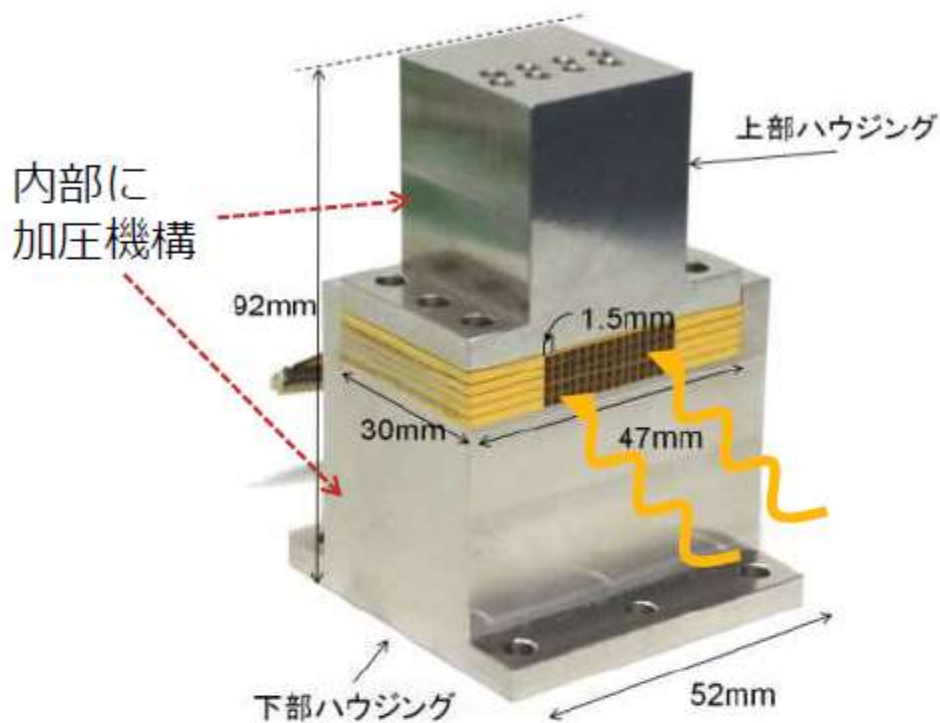


5" Disk Source



FIR Linear Array

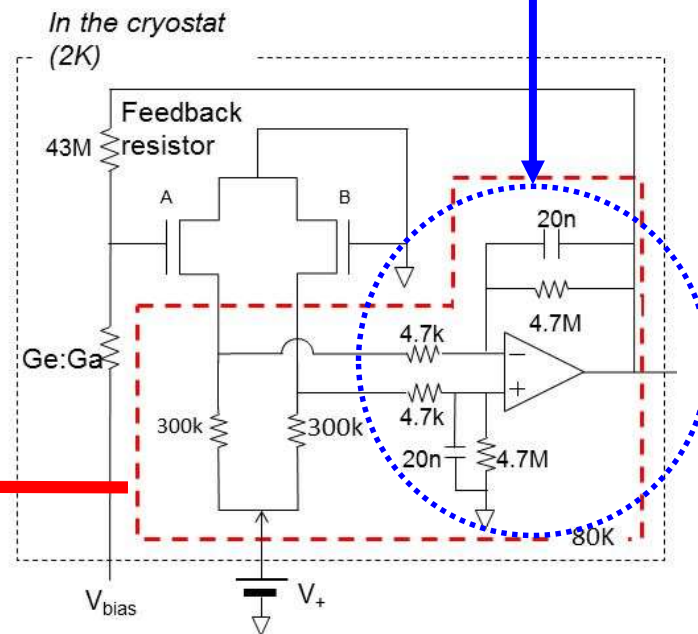
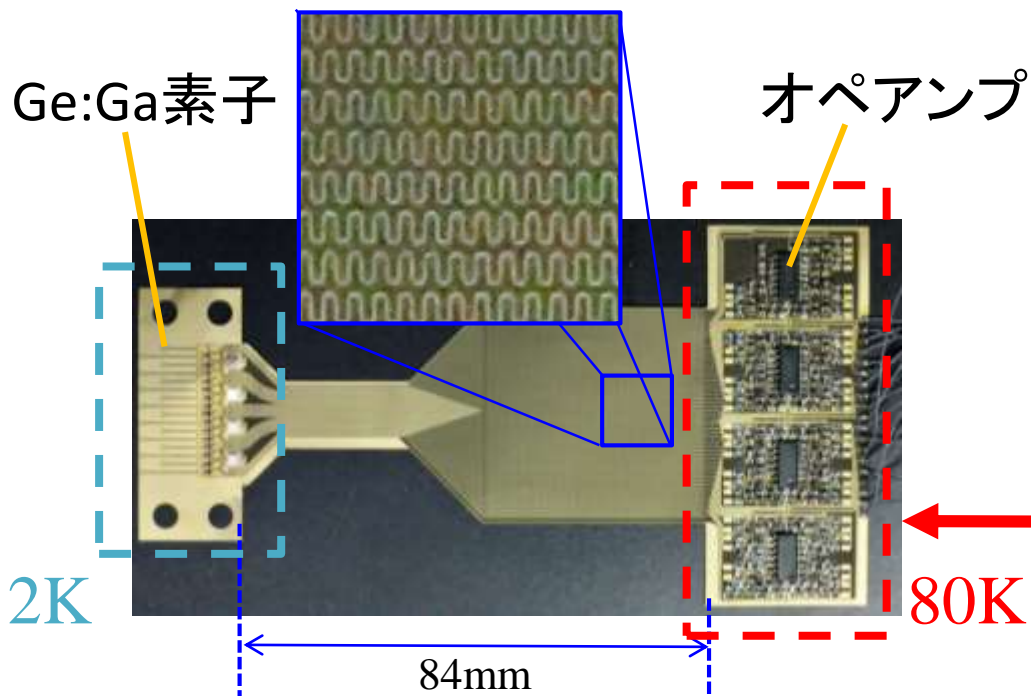
新遠赤外線アレイ (Stressed Ge:Ga 15 × 4 Pixels)



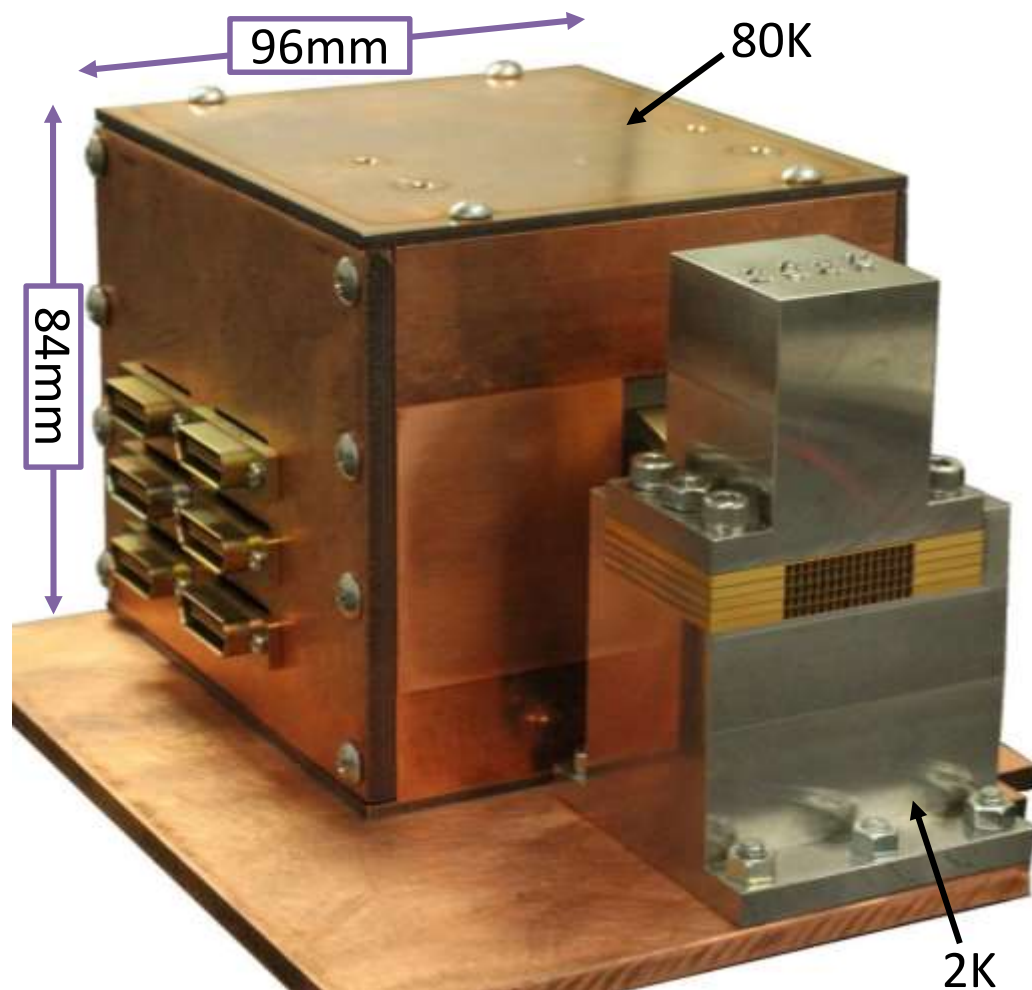
電極板の改善

- パターン間隔が狭く、距離を長くとったため浮遊容量が発生
 - ローパスフィルタを設置 ↳ 出力信号の発振
 - 差動増幅回路でオペアンプのゲインを1000倍に制限

差動増幅回路 + LPF



新遠赤外線アレイ＋低温部初段アンプ



5階中、下2階が不具合 → 15 × 3ピクセル

冷却光学系

(アルミ合金製光学系)

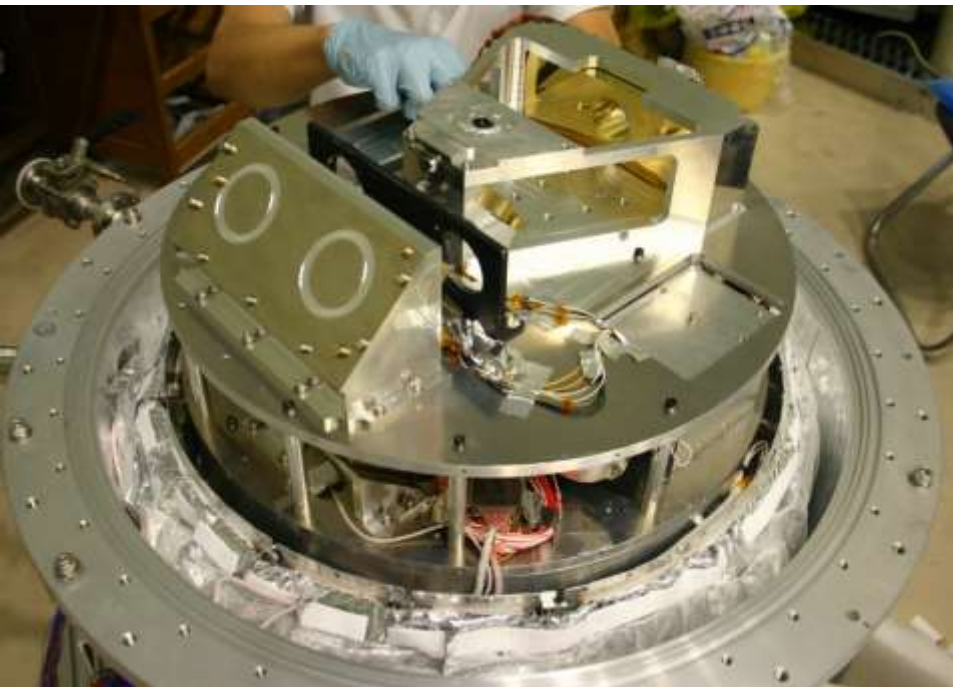
Kohyama et al., 2009

遠赤外ビーム (→遠赤外センサー)

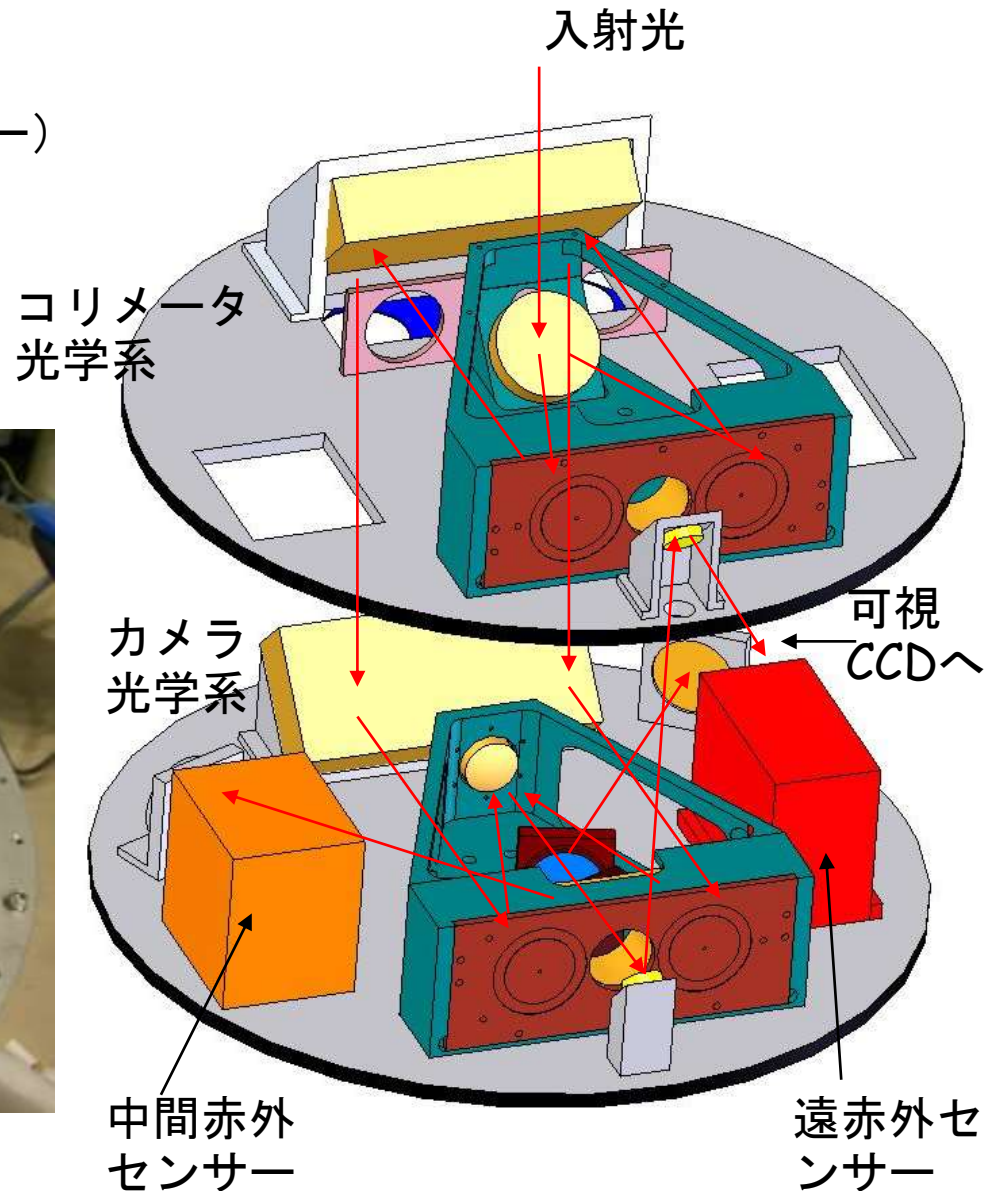
中間赤外ビーム (→中間赤外センサー)

可視光ビーム (→再度常温部へ)

ビームシャッター機構

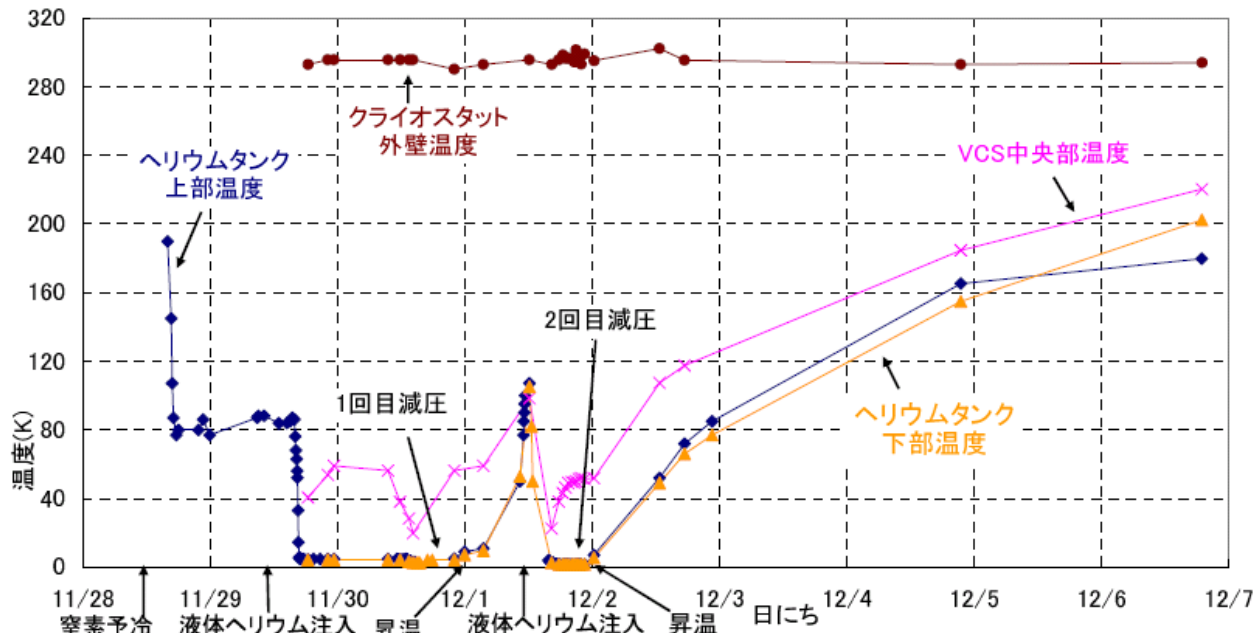


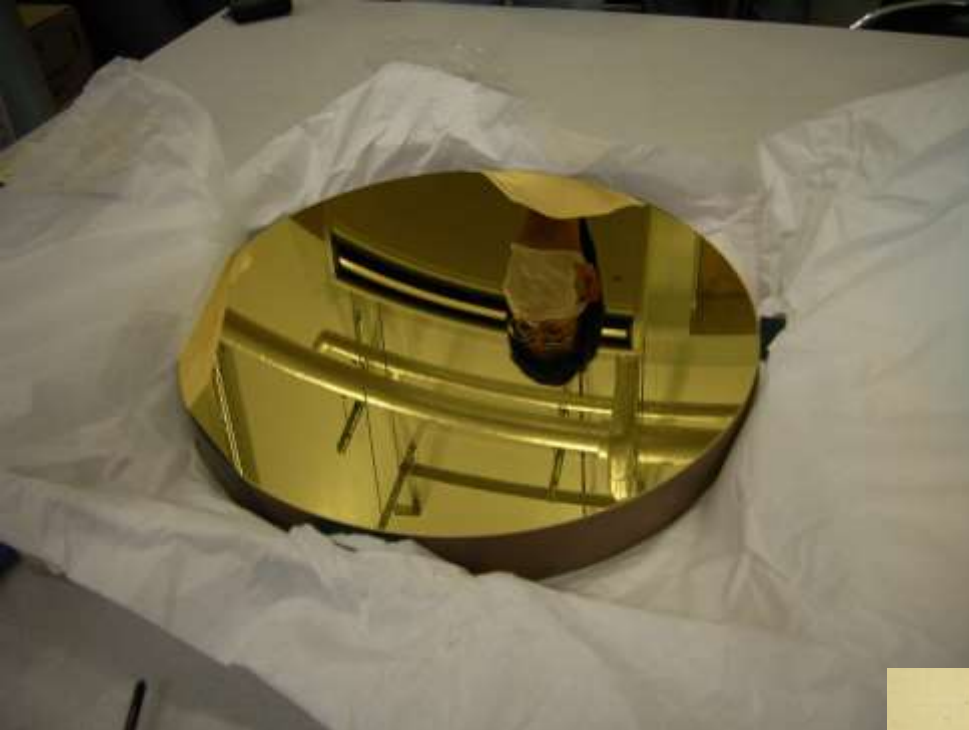
← 50 cm →



遠赤外線センサー用ク ライオスタット(1.6K)

外形: $\phi 680 \times 820\text{mm}$
 重量: 100kg (Al合金製)
 光学系: $\phi 400 \times 200\text{mm}$
 冷媒保持時間: 35時間



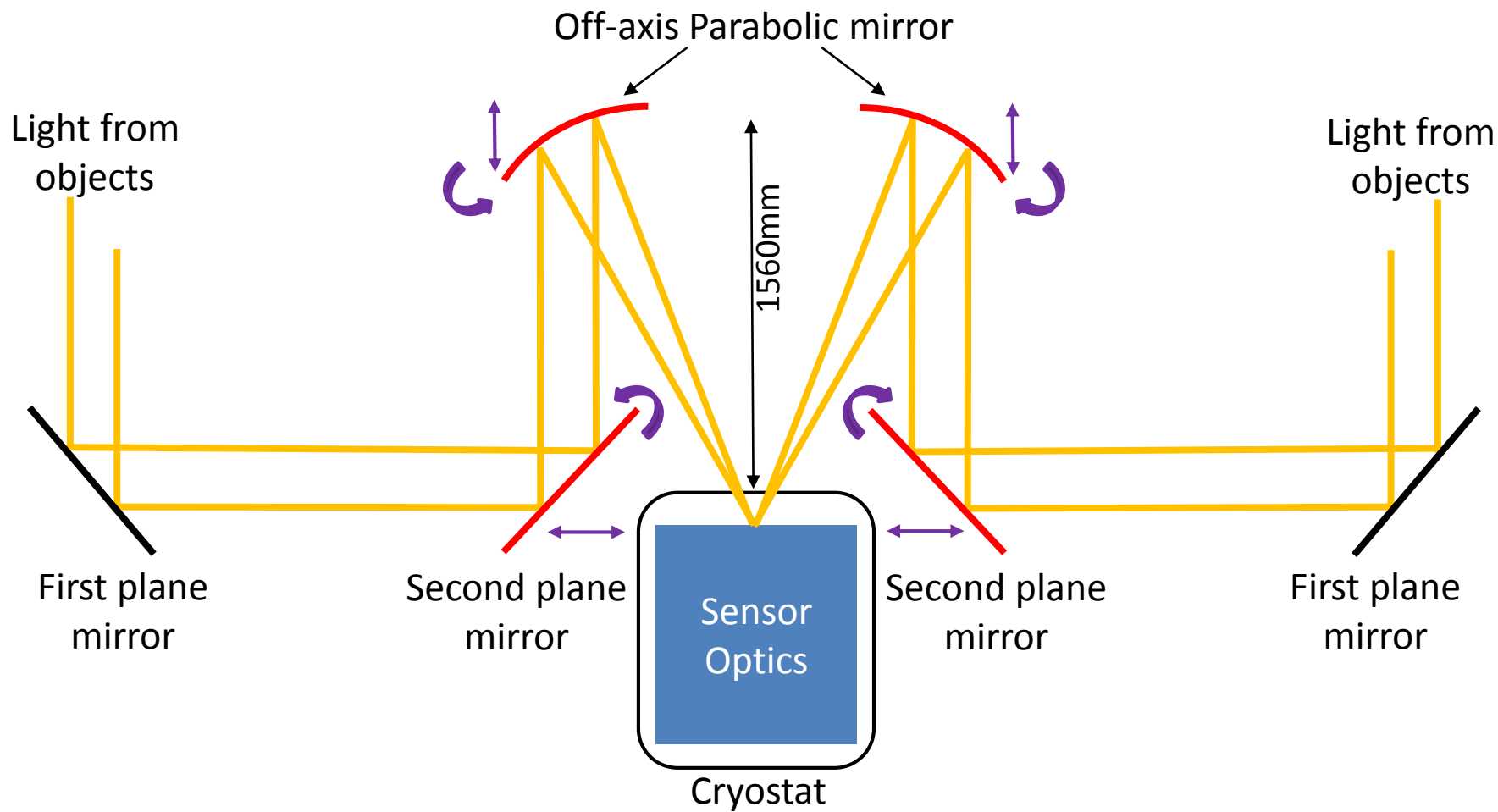


軸外放物面鏡
ゼロデュア
(口径412mm)



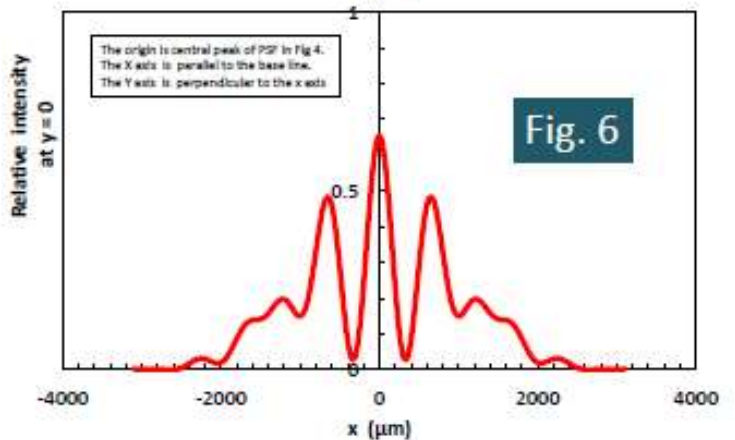
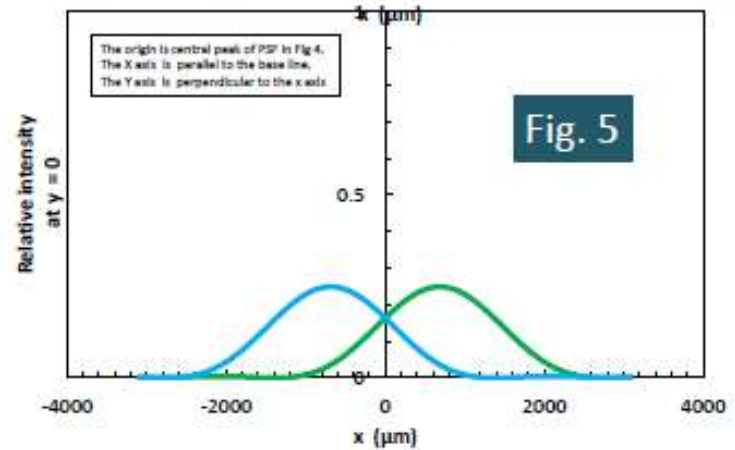
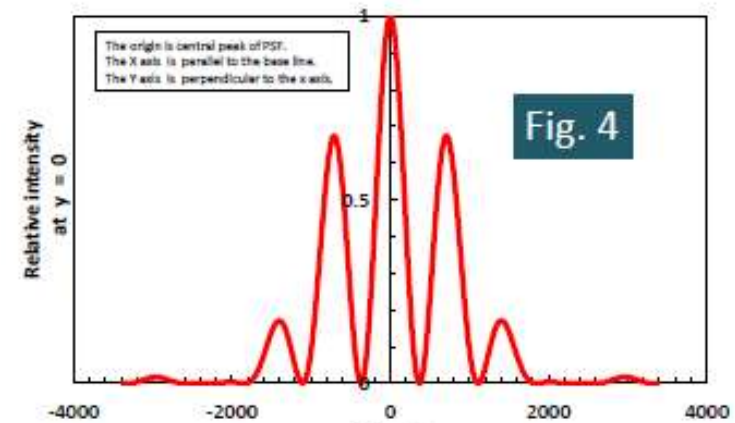
平面鏡 SiC
(450x600mm)

FITE干涉計概念圖

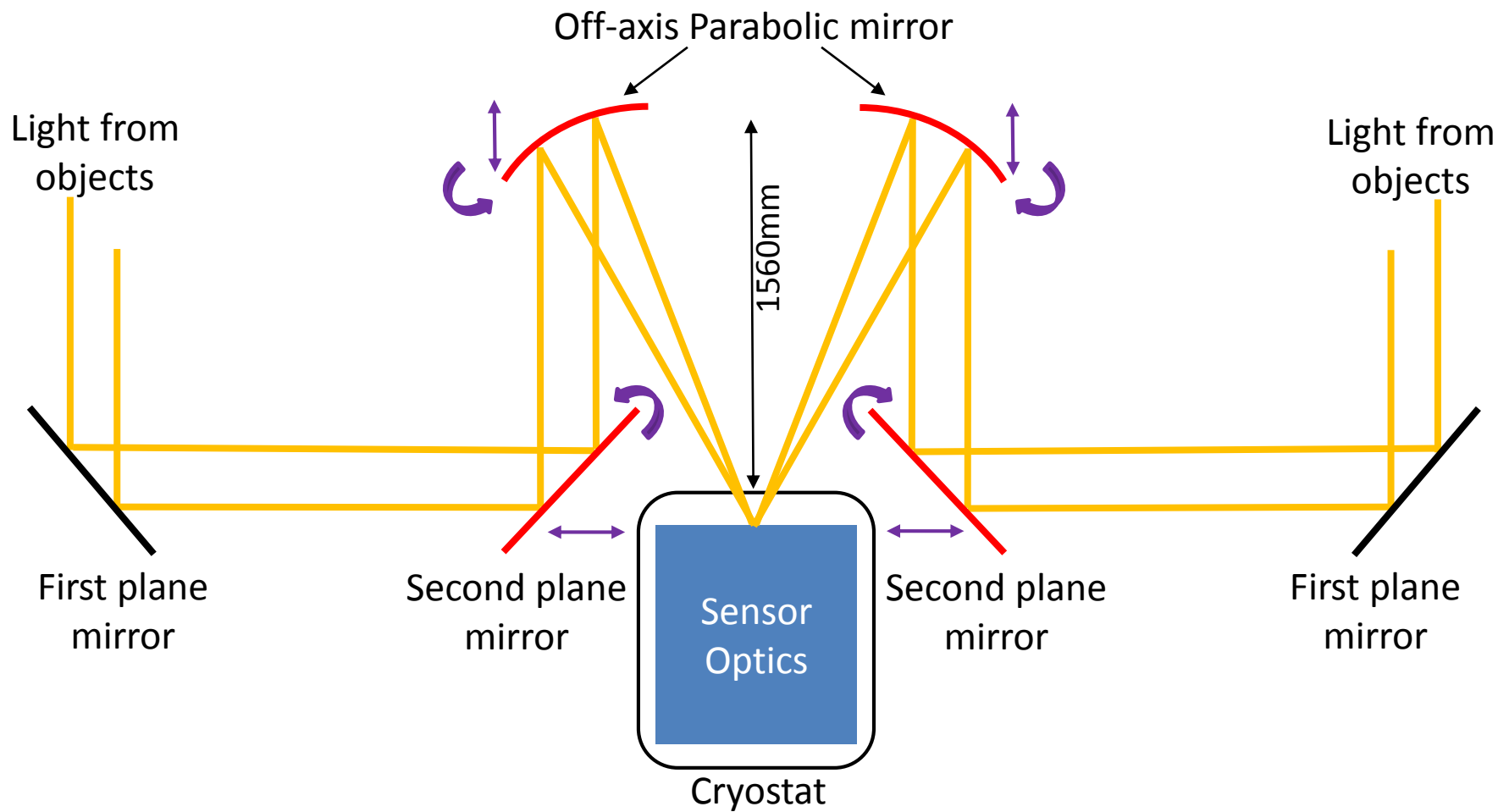


degrees of freedom considered

Tab.1		degrees of freedom	The minimum and maximum deviation
interferometer optics (Fig 2)	main parabolic mirror	displacement perpendicular to the optical axis	± 80 micron
		displacement parallel to the optical axis	± 15 micron
sensor optics (Fig3)	collimator mirror	displacement perpendicular to the optical axis	± 20 micron
		displacement parallel to the optical axis	± 10 micron
		tilt	$\pm 30''$
	camera mirror(concave)	displacement perpendicular to the optical axis	± 20 micron
		displacement parallel to the optical axis	± 10 micron
		tilt	$\pm 30''$
	camera mirror (convex)	displacement perpendicular to the optical axis	± 20 micron
		displacement parallel to the optical axis	± 10 micron
		tilt	$\pm 30''$
	each plane mirror	tilt	$\pm 10''$
the surface accuracy of each optical element in the interferometer optics		4th-order Zernike polynomial	rms wave front error fixed to 1micron
		5th-order Zernike polynomial	
		6th-order Zernike polynomial	



FITE干涉計概念圖



新放物面鏡調整機構 — 準平行ルメカニズムの創案 —

シリアルメカニズム
平行ルメカニズム



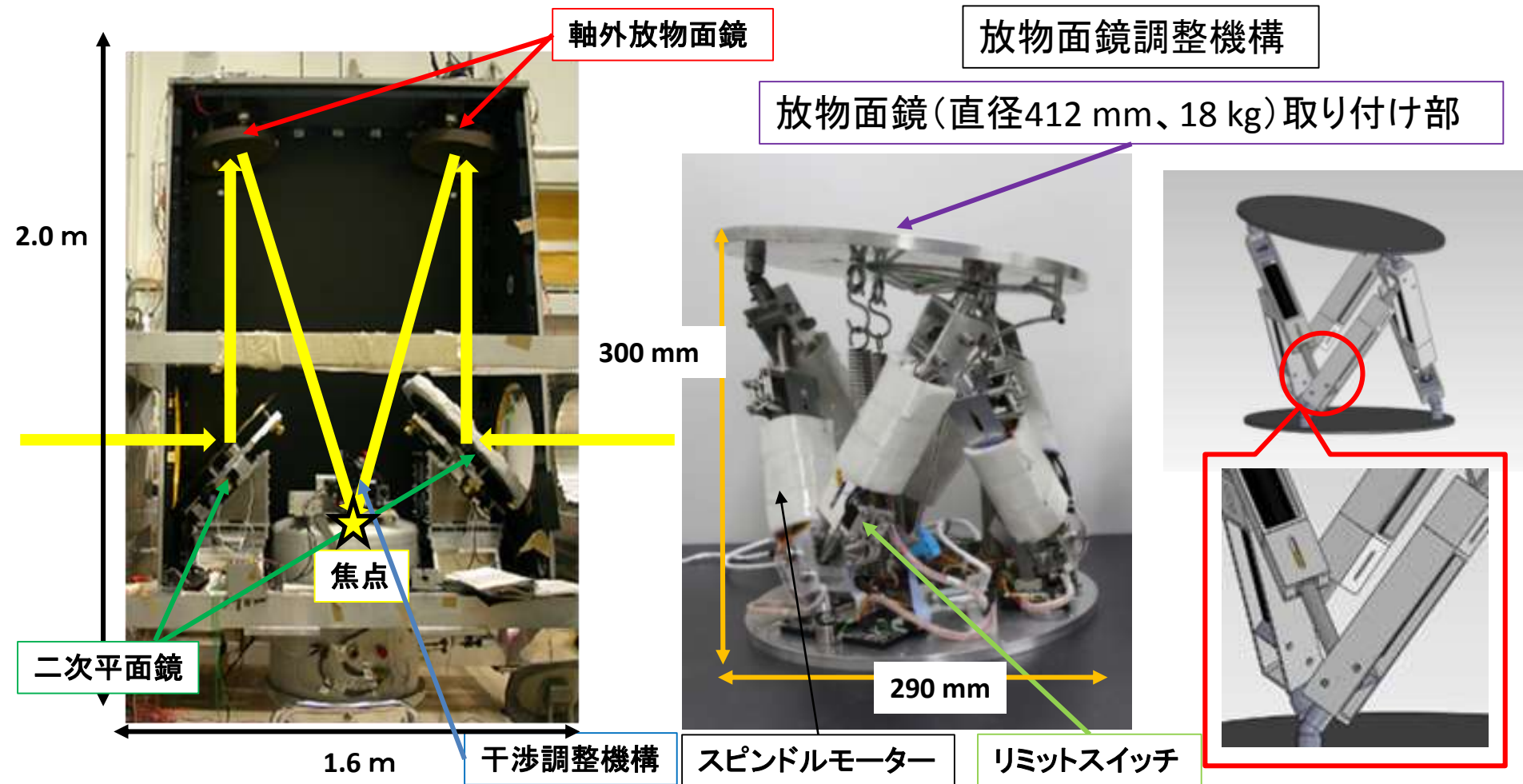
準平行ルメカニズム

Hexapod@、Stuart Mechanism

軸外放物面鏡

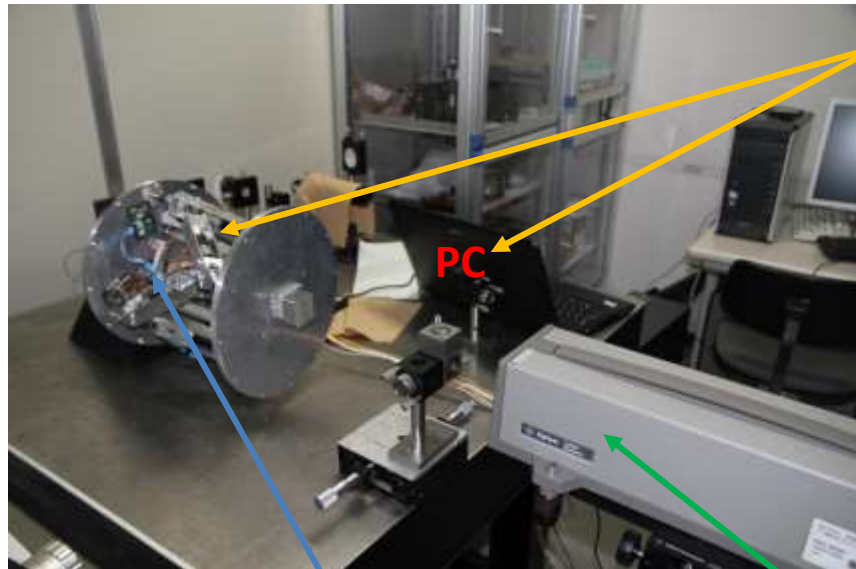
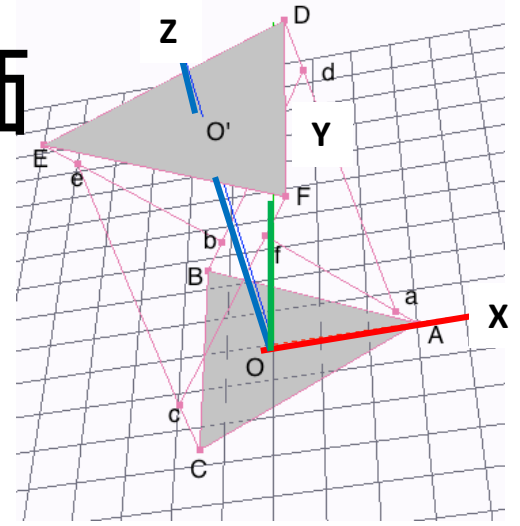
放物面鏡調整機構

放物面鏡(直径412 mm、18 kg)取り付け部



放物面鏡調整機構の性能評価

1、1次の多項式近似式で制御プログラムを作成

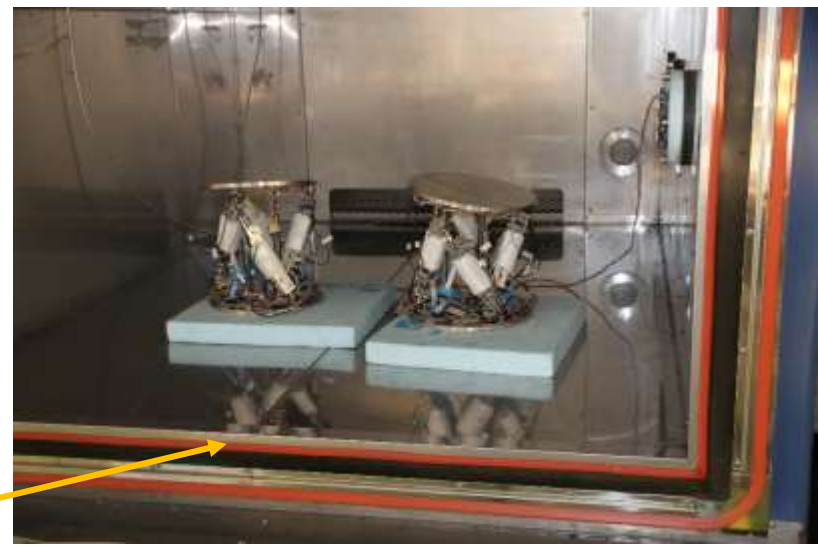


CAN通信で制御

調整機構

レーザー測長器

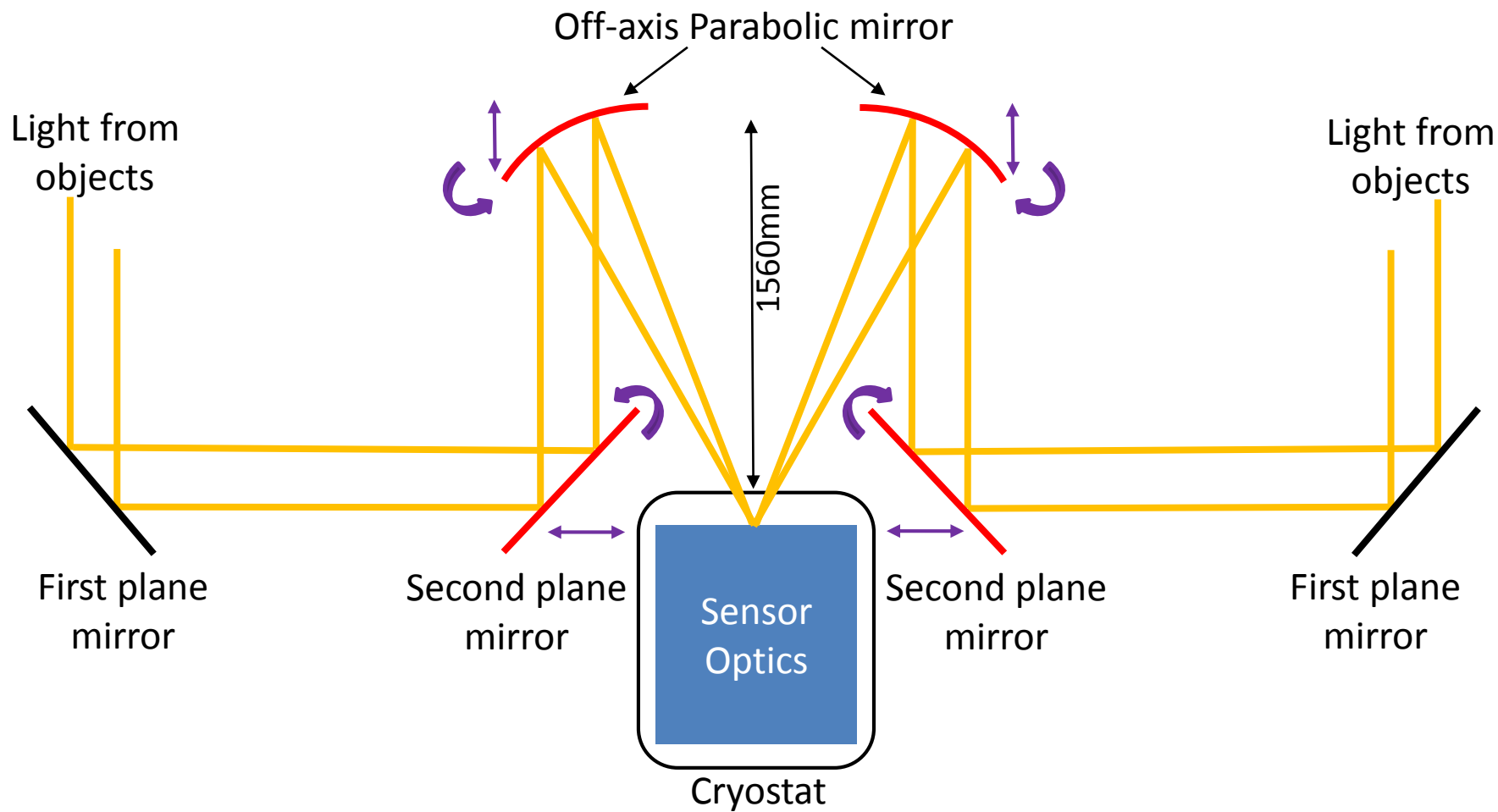
2、制御プログラムを用いた
レーザー測長器による光学試験



真空恒温槽

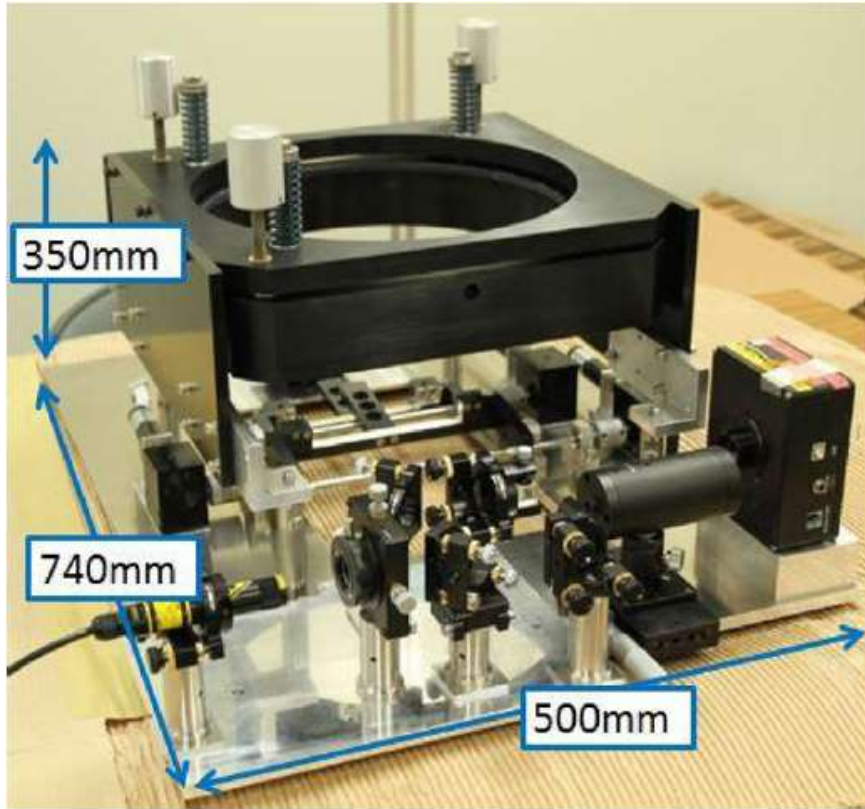
3、35000 mの気球高度の環境
(0.01気圧、-50°C)を想定した
真空低温試験

FITE干涉計概念圖



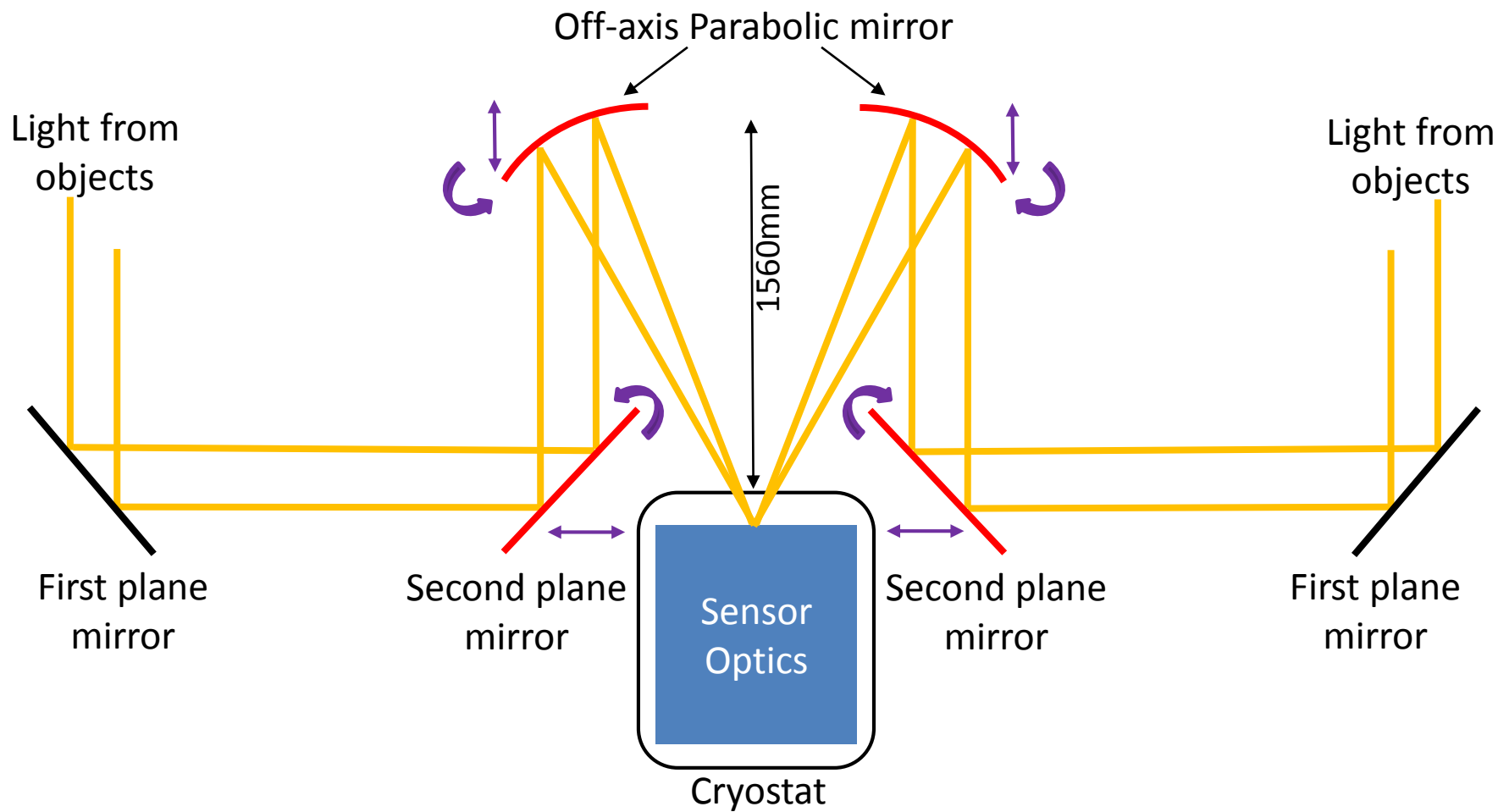
新干渉計調整装置

Sasaki et al. (2014)

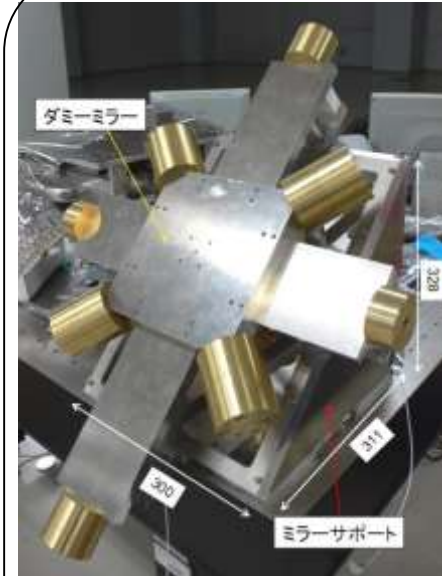
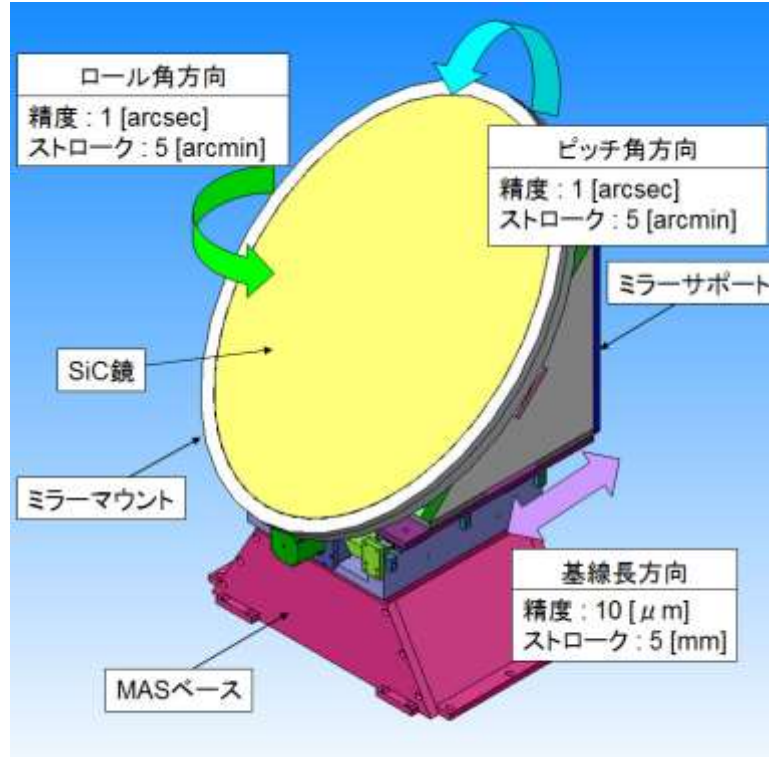
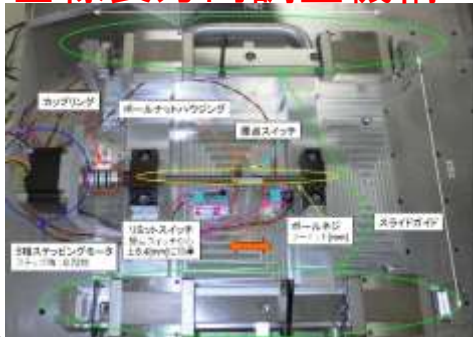


(左)市販のシャックハルトマン波面センサーを改造し、視野内の2ビームを独立かる同時に波面計測する装置。
(右)高精度の参照球面(300mm径)も新規開発した。

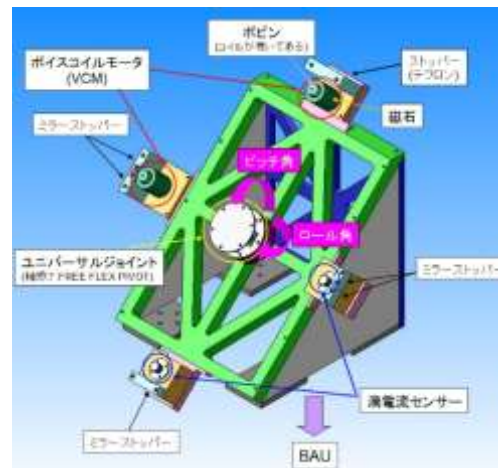
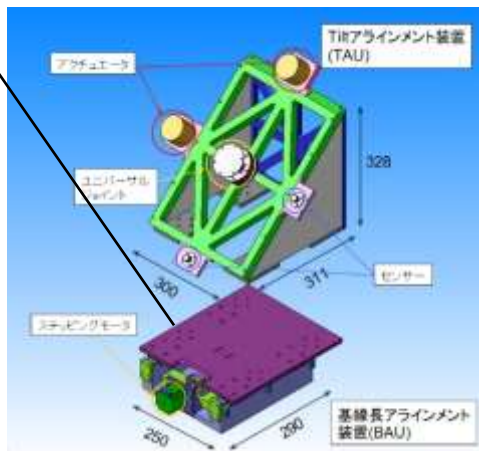
FITE干涉計概念圖



二次平面鏡によるアライメント



ティルト調整機構



FITE新ゴンドラフレームの製作 (オーストラリア用)

●I/F、条件

●強度

●地上で吊下げた状態で地球の重力を10倍にしても、破壊に至らない(破壊強度を越えない)。

(オーストラリアの場合)

●クラッチ・ロック

●組み立て室から打ち上げ場所への移動時にはロックが必要

●打ち上げ直前のブーム旋回時一接続部の間隔拡大で対処

●スリッピング

●なくすことで機構が簡素化

●ゴンドラ構造本体

●CFRP角パイプ接着構造を基本

●概念設計

●応力解析(ANSYS)

●製作前試験

●CFRP角パイプ座屈試験

●工場作業環境測定

●製作

●接着剤の真空脱泡

●接着面積の保証(超音波探傷)

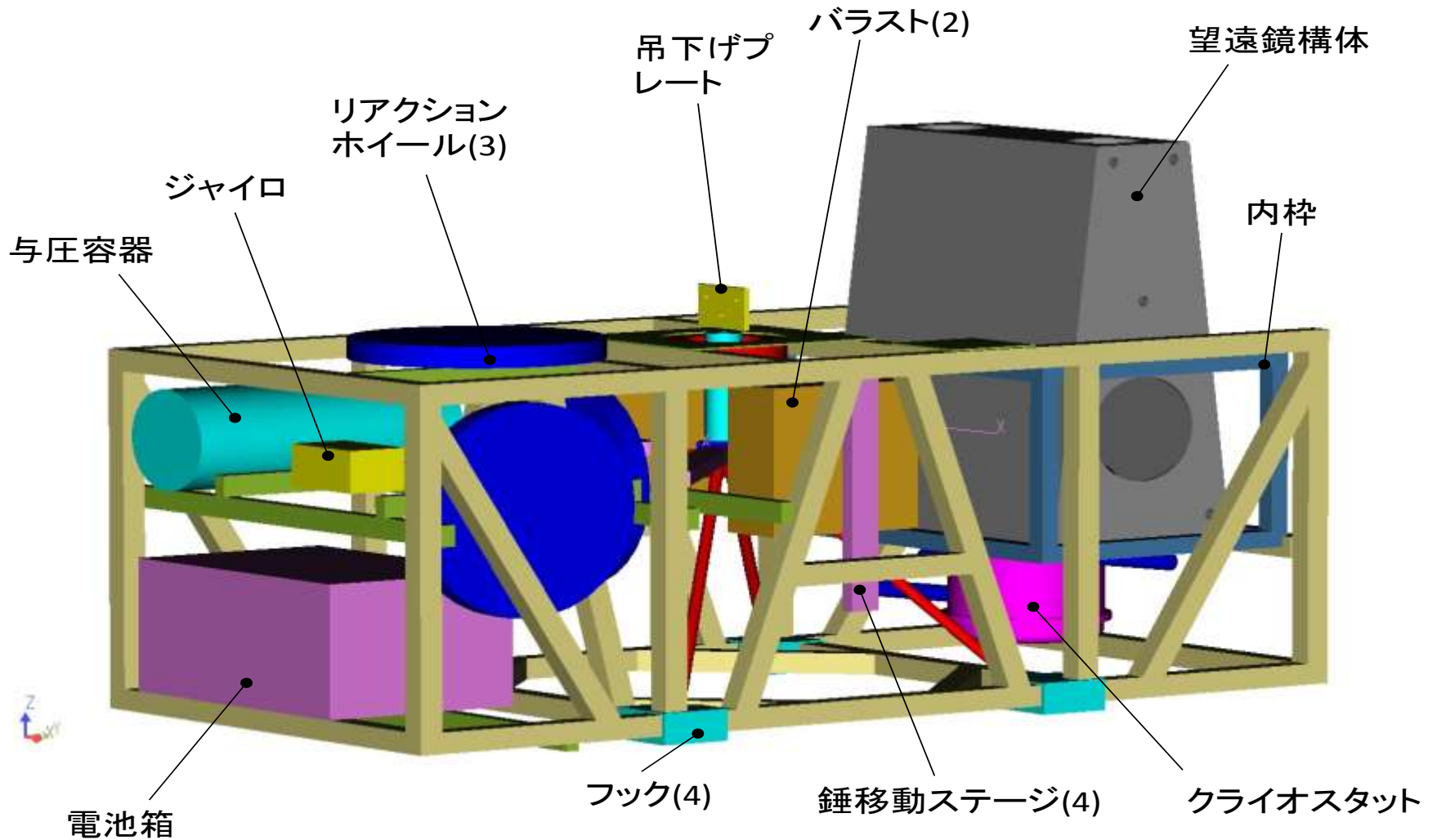
●試験

●構造機能試験棟の強度試験装置で荷重試験(25トン)

●塗装

●白色遮熱塗装

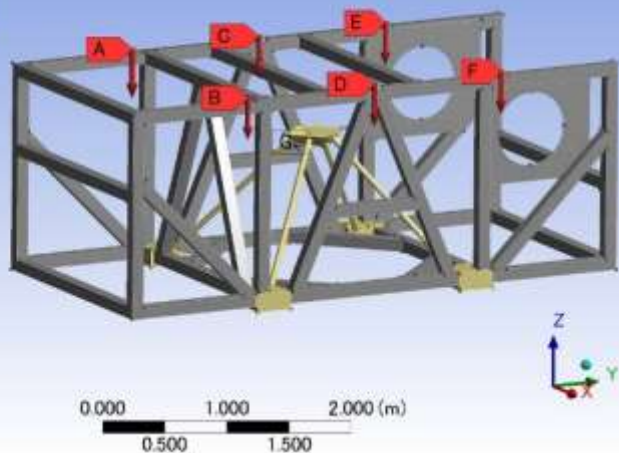
新・全体構造



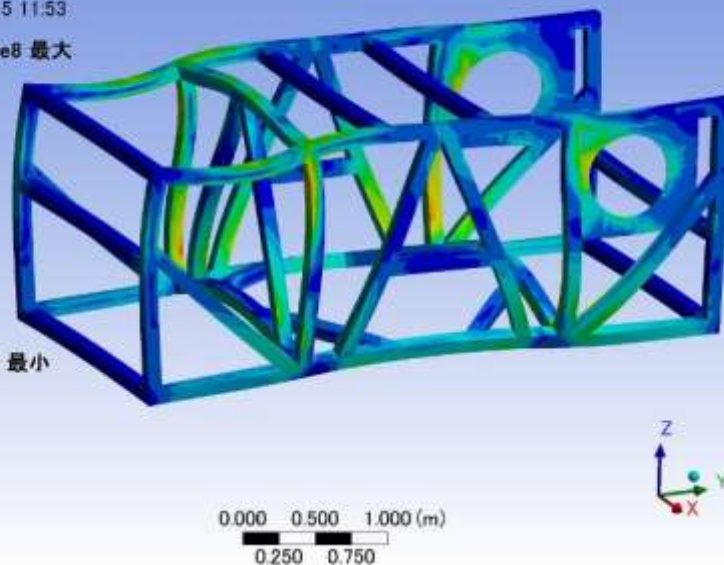
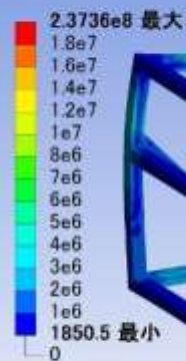
(干渉計アーム部は省略)

A: 静的構造
 静的構造
 時間: 1. s
 2013/09/15 11:51

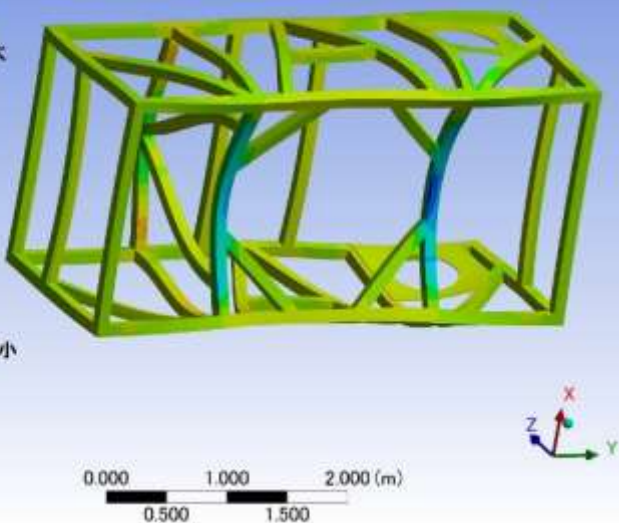
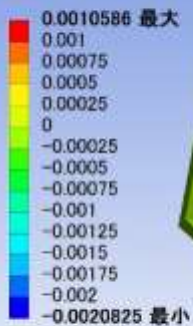
- A 力: 40000 N
- B 力 2: 40000 N
- C 力 3: 40000 N
- D 力 4: 40000 N
- E 力 5: 40000 N
- F 力 6: 40000 N
- G 固定



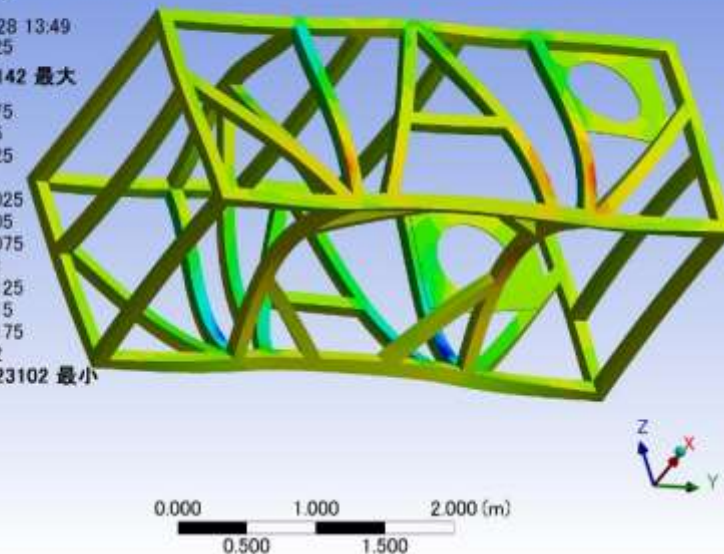
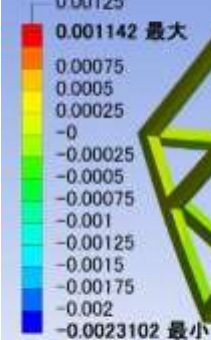
A: 静的構造
 相当応力
 タイプ: 相当応力 (ミーゼス)
 単位: Pa
 時間: 1
 2013/09/15 11:53



A: 静的構造
 垂直弾性ひずみX
 タイプ: 垂直弾性ひずみ(X 軸)
 単位: m/m
 全体座標系
 時間: 1
 2013/09/28 13:51



A: 静的構造
 垂直弾性ひずみZ
 タイプ: 垂直弾性ひずみ(Z 軸)
 単位: m/m
 全体座標系
 時間: 1
 2013/09/28 13:49



CFRP角パイプ圧縮座屈破壊試験 (製造ロットも検査)

	最大荷重 [kN]	最大荷重 [トン]	変位 [mm]	破壊時圧力 [GPa]	比例部の収縮 係数[GPa]
厚さ 3mm①	204.3	20.83	5.26	0.176	73
厚さ 3mm②	202.85	20.69	5.62	0.174	73
厚さ 5mm①	679.6	69.30	11.11	0.358	55
厚さ 5mm②	620.55	63.28	6.32	0.327	55
材質データ(ベスファイト 60%一方向)				1.6-2.2	140

表 1：破壊時の荷重と変位



図 1：試験機器

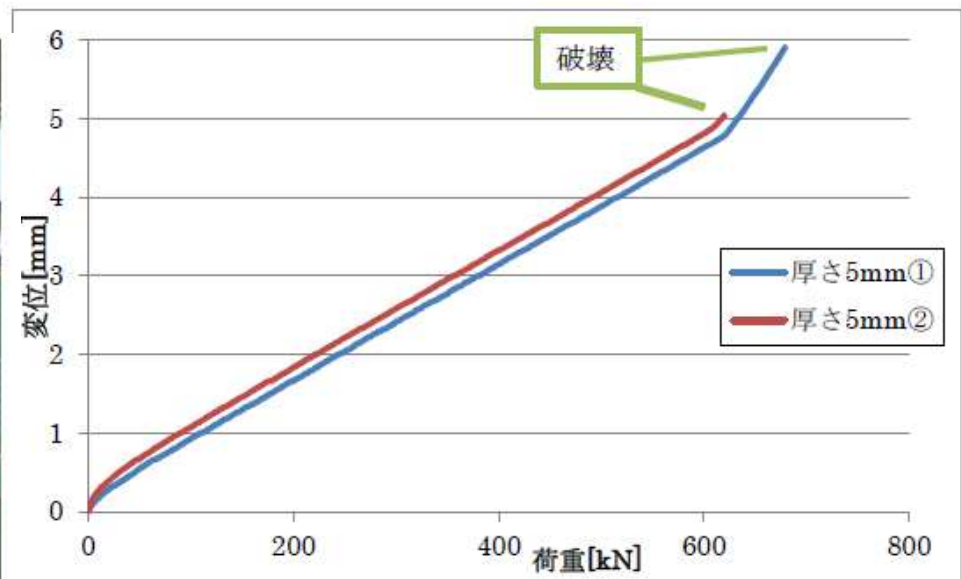
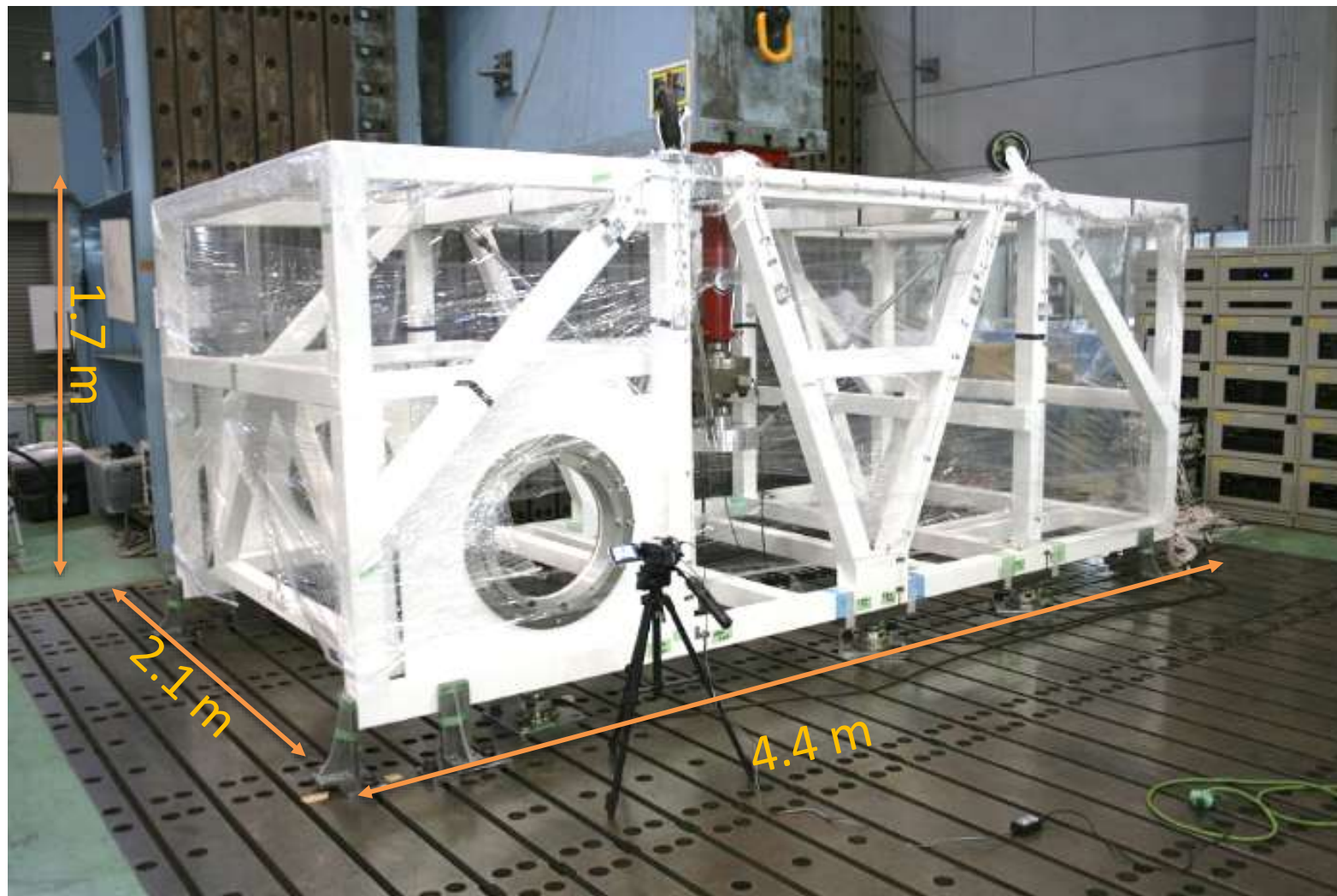


表 3：厚さ 5mm パイプの荷重と変位

新ゴンドラフレーム

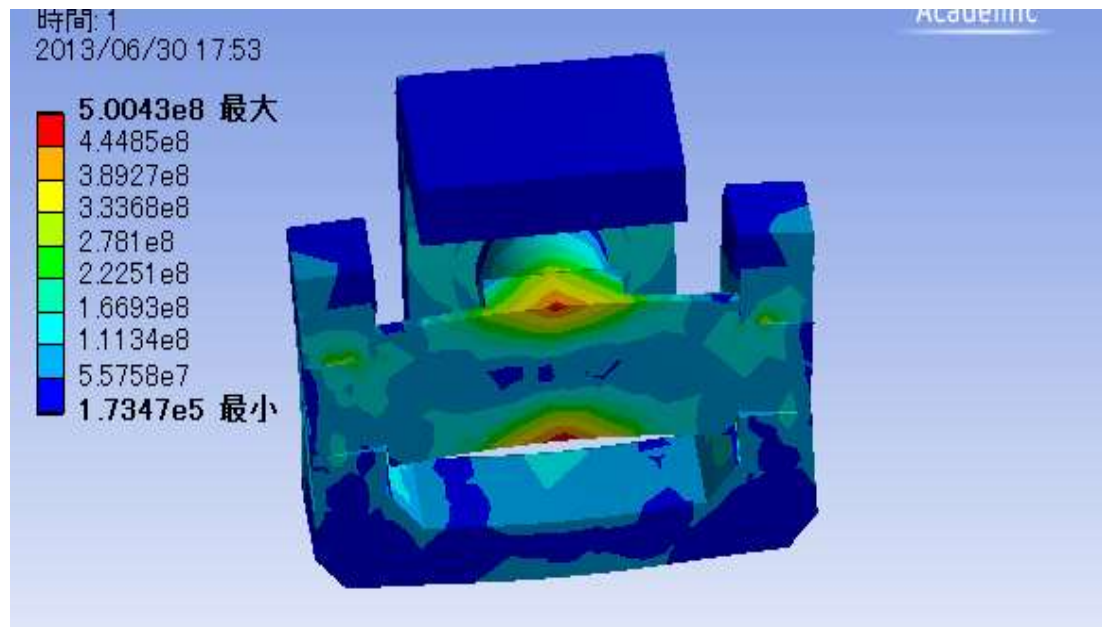
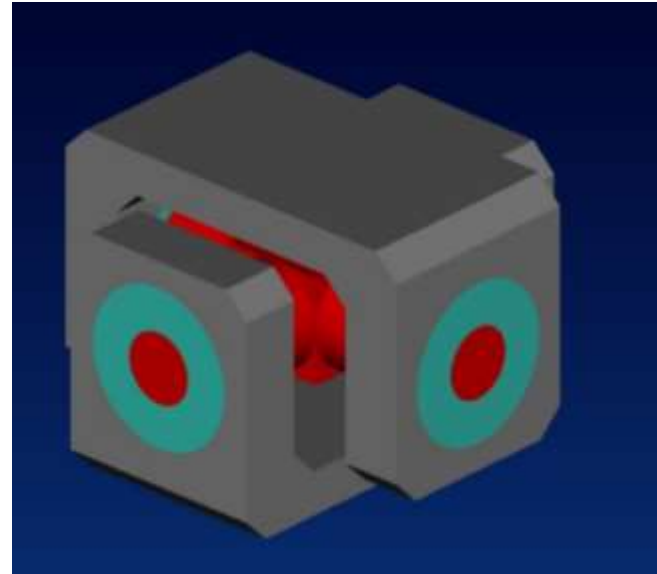


CFRP角パイプ接着構造
遮熱白色3重塗装
約100kg (外枠フレームのみ)

接着部の超音波探傷一合格
静荷重10g (25トン)の強度試験実施

ユニバーサルジョイント強度試験

25トン静荷重に耐える
ユニバーサルジョイント
を製作、試験した。



望遠鏡部(旧)

広視野カメラ

吊下げ部

望遠鏡構体

仰角駆動部

制御部

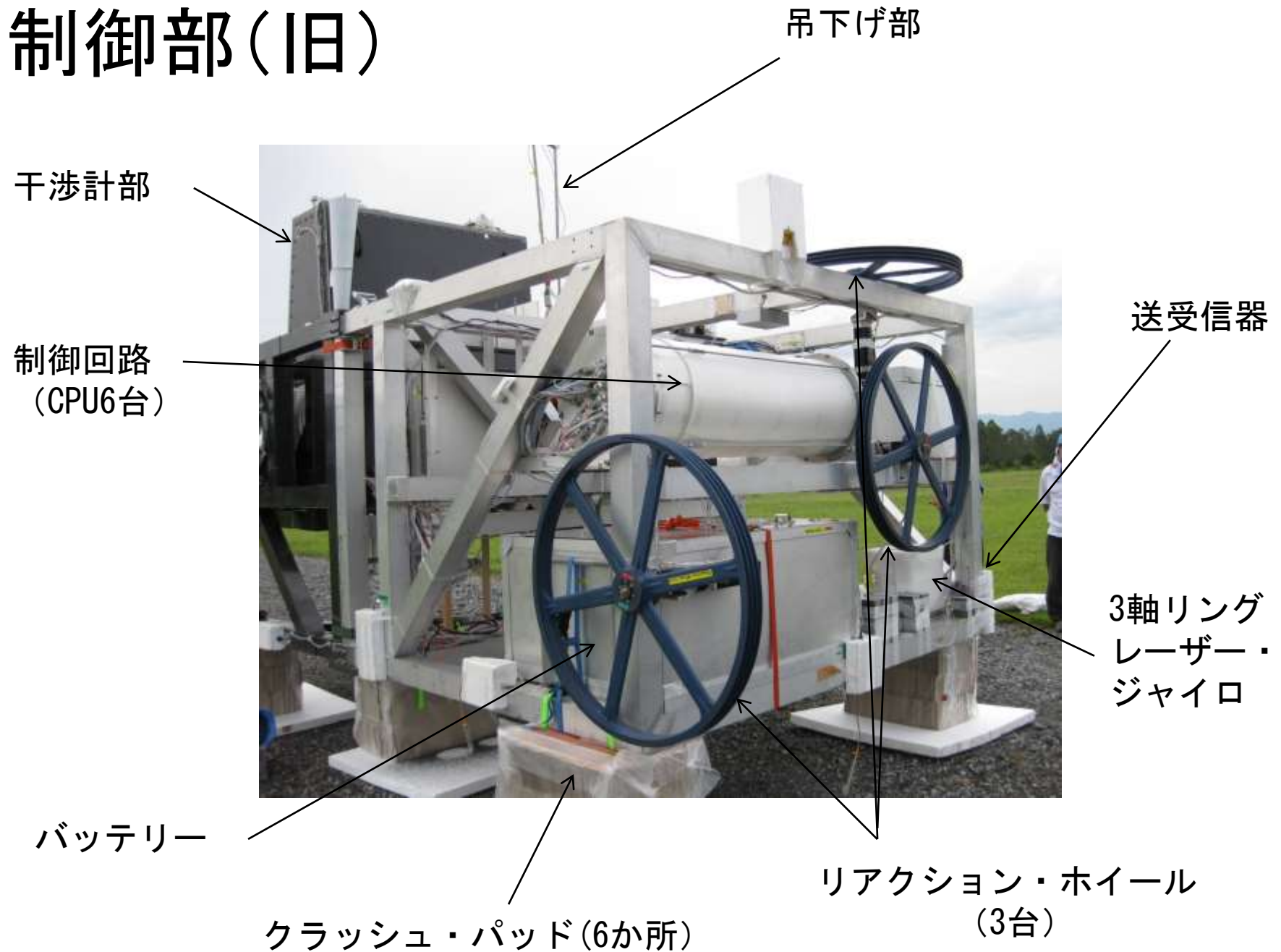


一次平面鏡

クライオスタット

干渉計腕

制御部(旧)



1秒角精度の姿勢制御のために

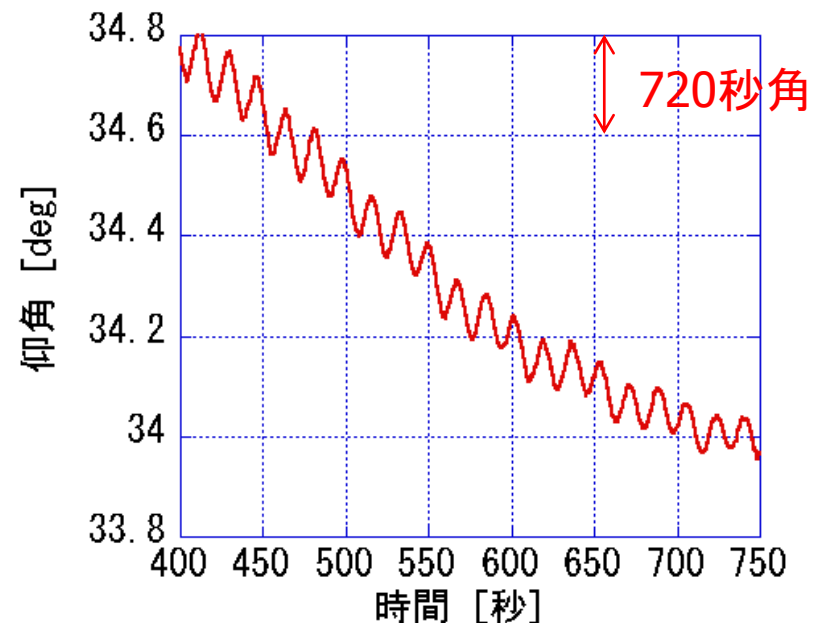
従来の気球搭載望遠鏡では経緯台方式が採用された。

方位角: ゴンドラを鉛直軸周りに回転

仰角: ゴンドラ内で望遠鏡水平軸周りに回転

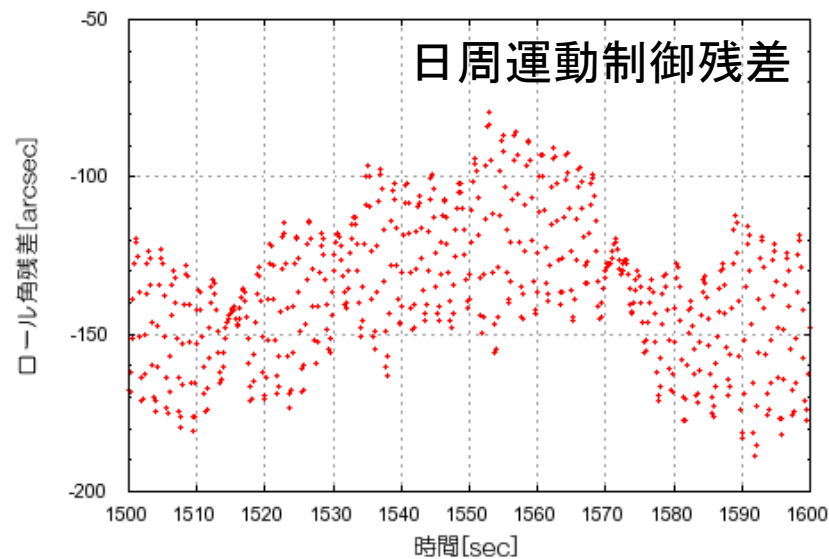
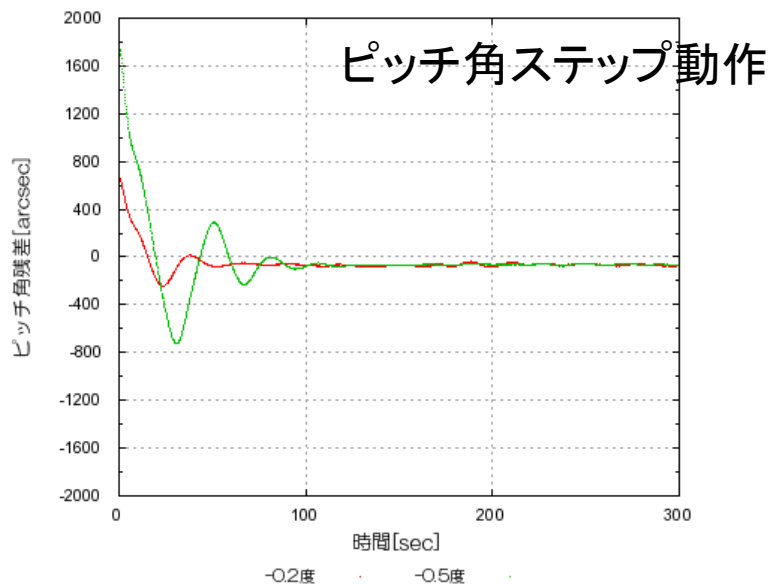
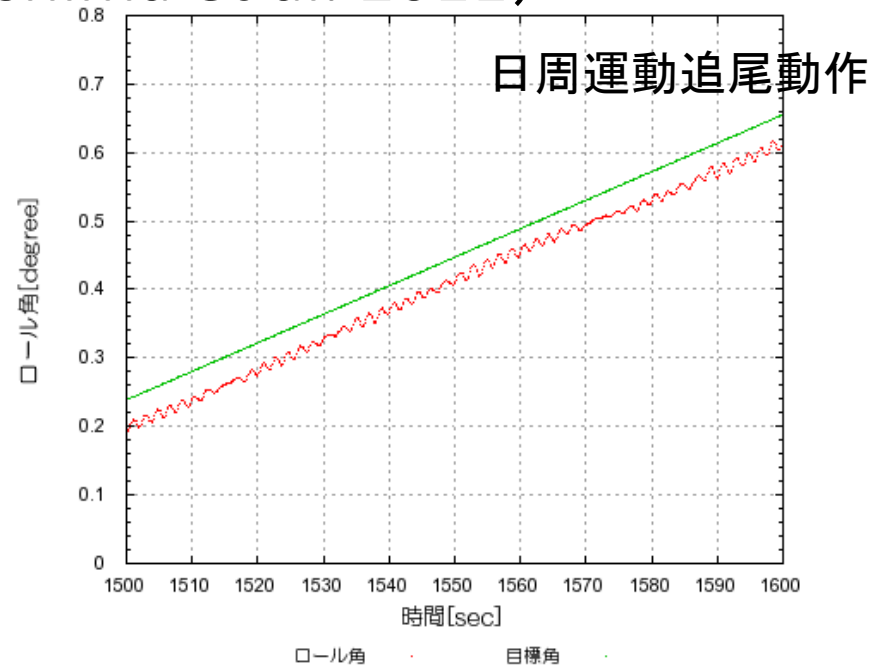
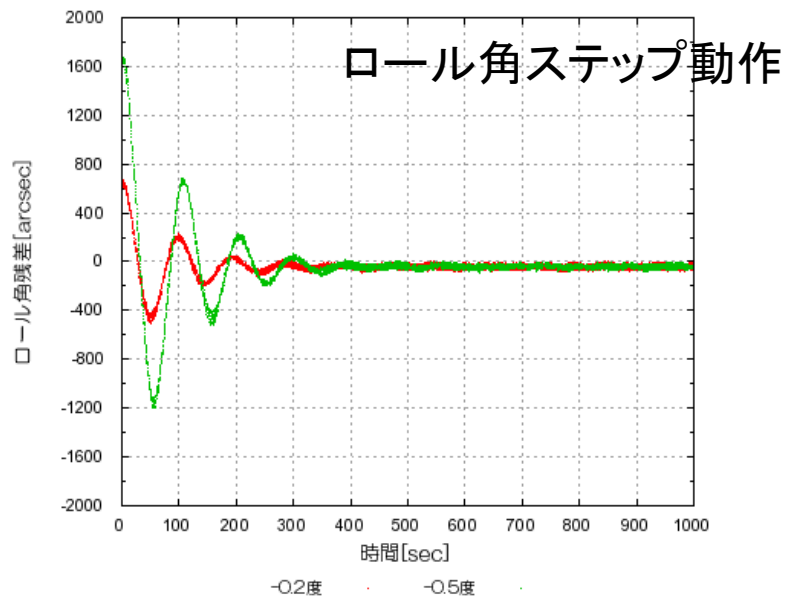
経緯台方式では、ゴンドラの振り子運動の影響を大きく受ける。

→ 重心を吊り点とする
3軸姿勢制御の採用
によって、1秒角の姿勢
安定性に目途



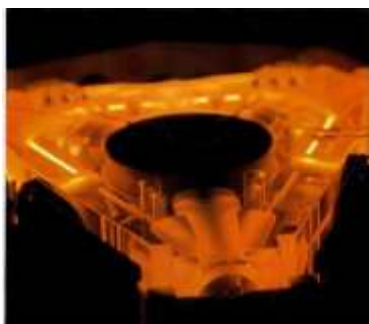
気球フライト中の振り子運動

姿勢制御試験結果 (Nakashima et al. 2011)



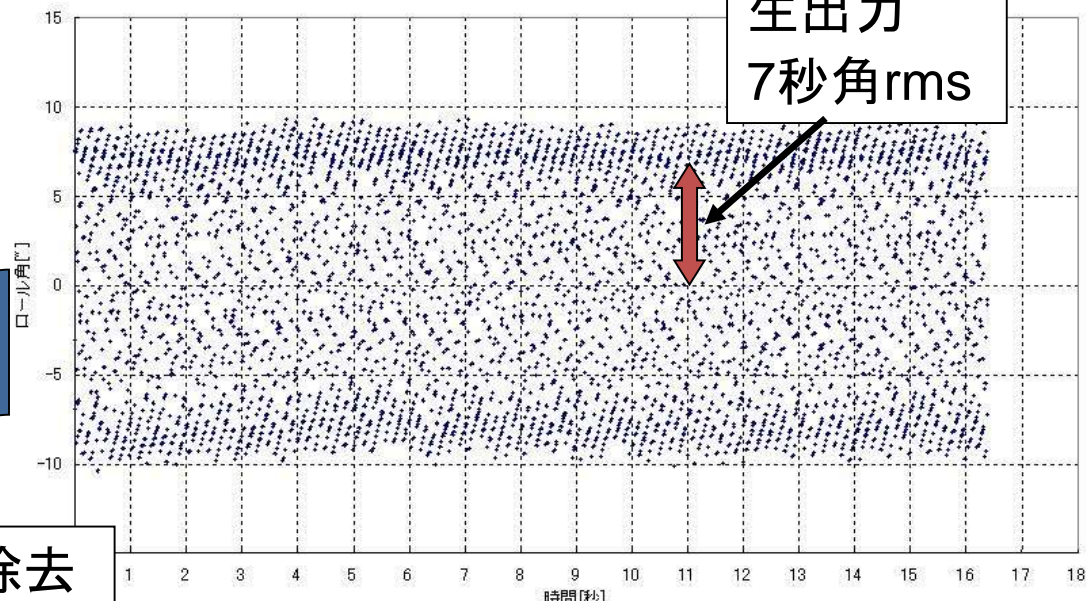
姿勢センサー

(3軸リングレーザージャイロ)



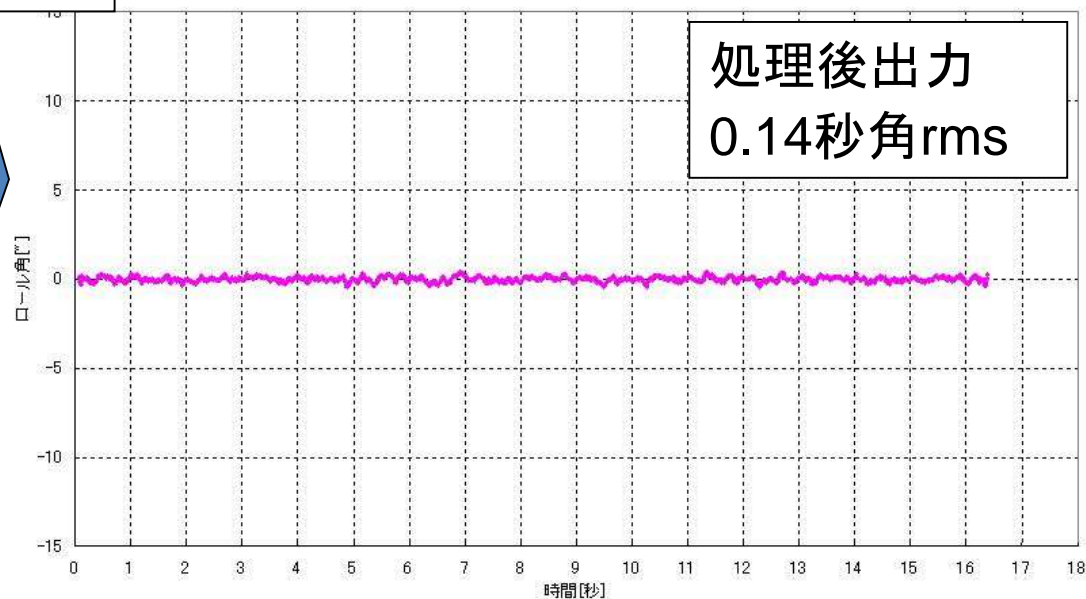
周期成分除去
+ 10Hz LPF

ジャイロデータ



生出力
7秒角rms

移動平均-20個



処理後出力
0.14秒角rms

メーカー提示性能
角度分解能: 20秒角
(250Hzサンプリング)
ドリフト: 極めて小さい

新しい星像中心検出アルゴリズム

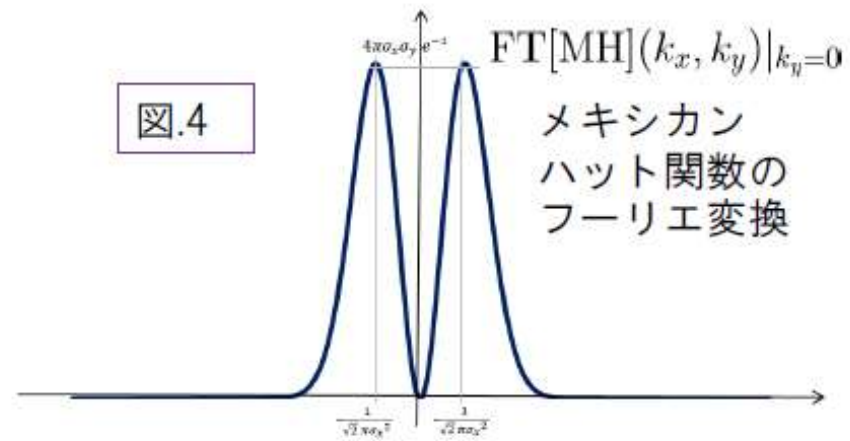
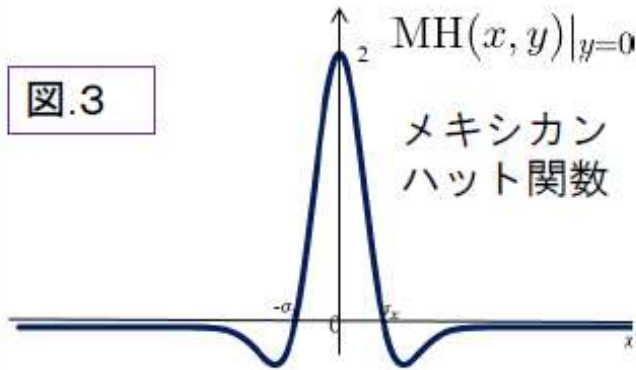
2つのステップ

①ノイズ低減 ②星像中心検出(2段階検出法)

使用言語:C++

(Borland C++ Compiler5.5)

①ノイズ低減



σ はPSF径程度

- ・ 画像情報にメキシカンハット関数(図.3)を畳み込み
⇒ 高周波ノイズ・低周波バックグラウンド・
フラットむらの同時低減(図.4)
所要時間0.34s(1024×1024のFFT2回分)

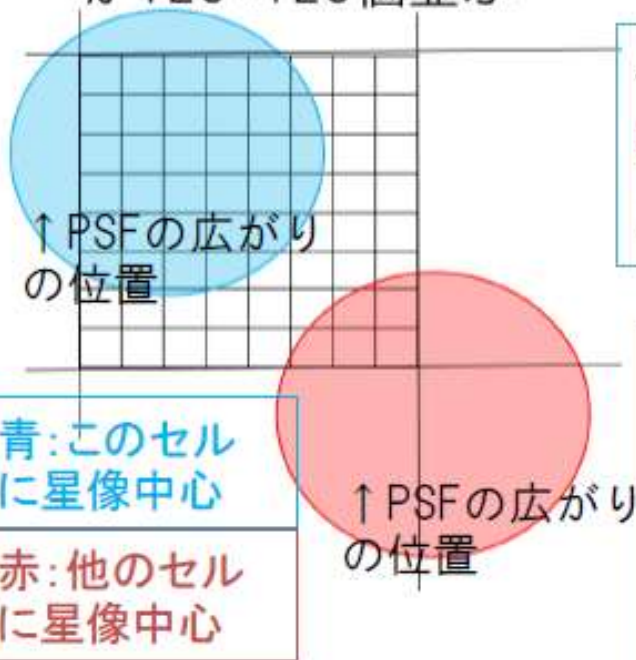
②星像中心検出(2段階検出法) 全ピクセルを8*8pixelごとにセルに分割

採用した仮定:

$N > N(\text{上のセル})$ and $N > N(\text{左})$ and $N \geq N(\text{右})$ and $N \geq N(\text{下})$

⇒そのセル内に星像の中心がある。

↓一つのセル。これが128*128個並ぶ



N:セル内の代表点16ピクセルのうち
明るさが敷居を超えた物の数

→星像中心があるとされたセル内の
明るさ重心のまわり、15*15pixelで明
るさ重心をとることを2回繰り返す

所要時間0.03s

(cf.ガウシアンフィッティング法の場合0.23s)

①+②所要時間計0.37s $< (2\text{Hz})^{(-1)}$

位置決定精度

0.1pixel程度 (1.5" 程度) (推定)

新OPC環境試験

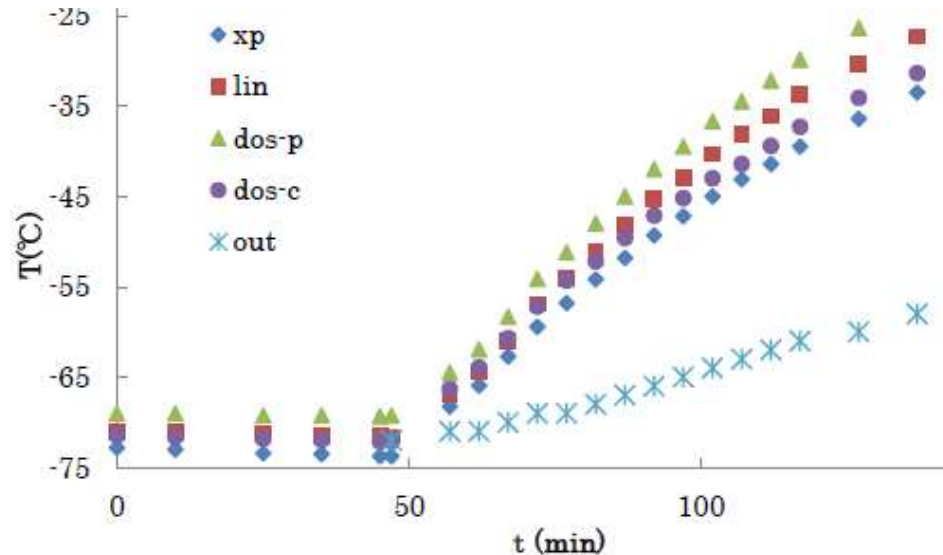
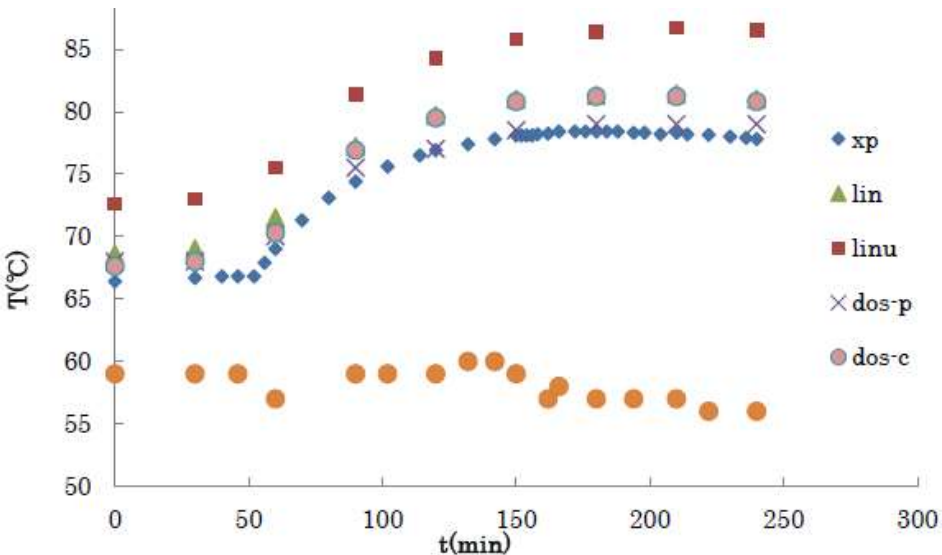


4台、OS3種、
光ファイバーI/F 2系統

フライト環境

気温：-60~60℃

気圧：1/100気圧程度

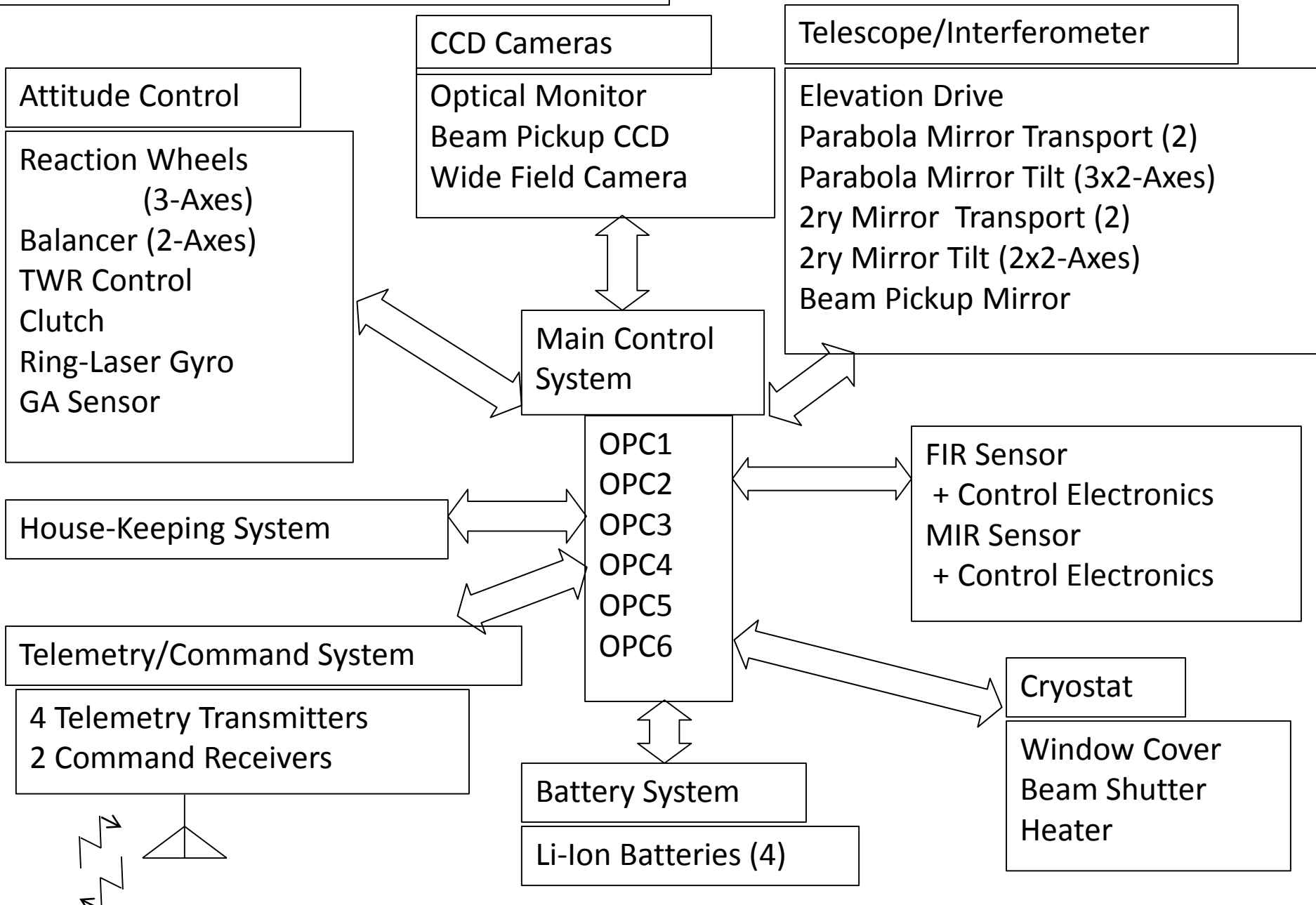


FITE 主要諸元

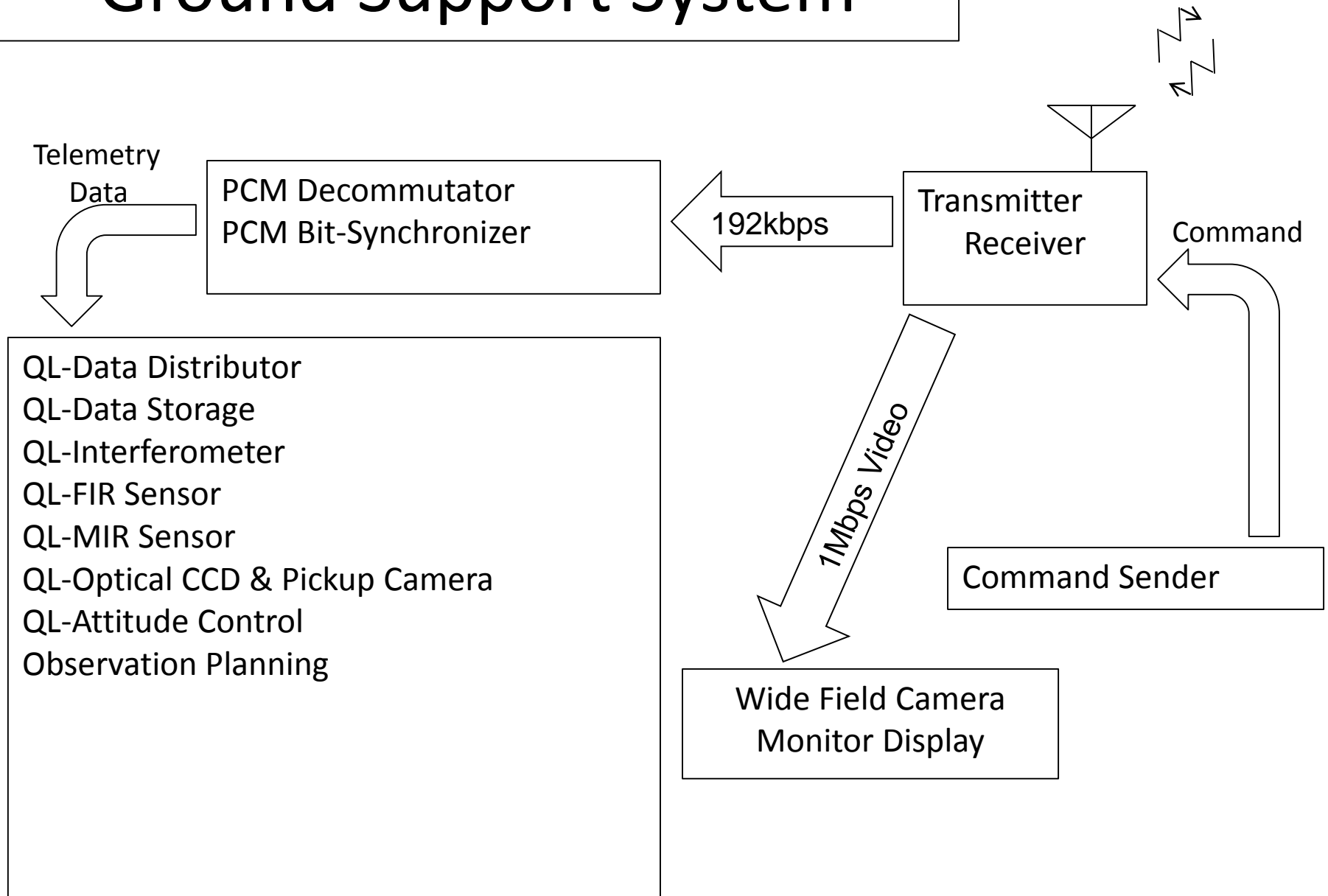
人工衛星と同等の自律制御装置

- 構造
 - 外形 : 8.5m x 4.4m x 2.5m (H)
 - 重量 : 1620 kg (バラスト含まず) バラスト 800 kg
 - 構造材 : CFRPパイプ接着構造
- 望遠鏡 / 干渉計
 - 干渉計 : 2ビーム Fizeau型干渉計
 - 鏡 : 平面鏡 4 枚 (SiC) + 軸外放物面鏡 2 枚 (Zerodur)
 - 口径 : 40 cm (直径)
- センサー
 - 遠赤外線 : 15 x 5 素子アレイ - > 15 x 3 素子アレイ
 - ビームモニター : 中間赤外線アレイ (320x240素子) + CCD 4 個
 - クライオスタット : 超流動ヘリウム (30 リットル)
- 制御システム
 - 搭載制御回路 : CPU 6 台 + 機能ボード + 耐環境PC 4台
 - 可動制御箇所 : 25 箇所
 - 電池 : 360 AH @ 24 volts (リチウムイオン二次電池)
 - データ伝送レート : 56 kbps + 800kbps
 - 地上システム : QL 8 台 + ビデオカメラモニター

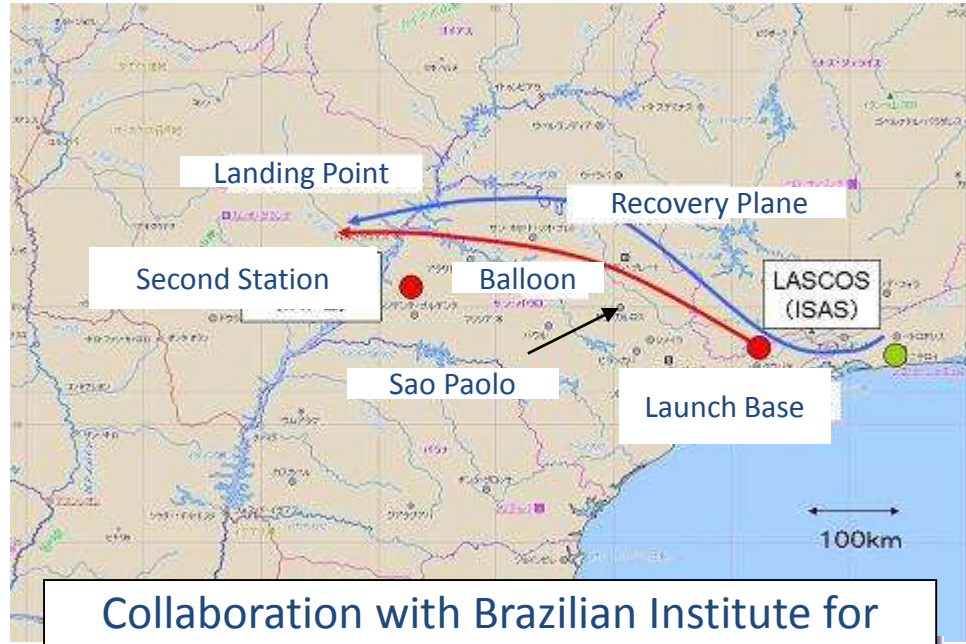
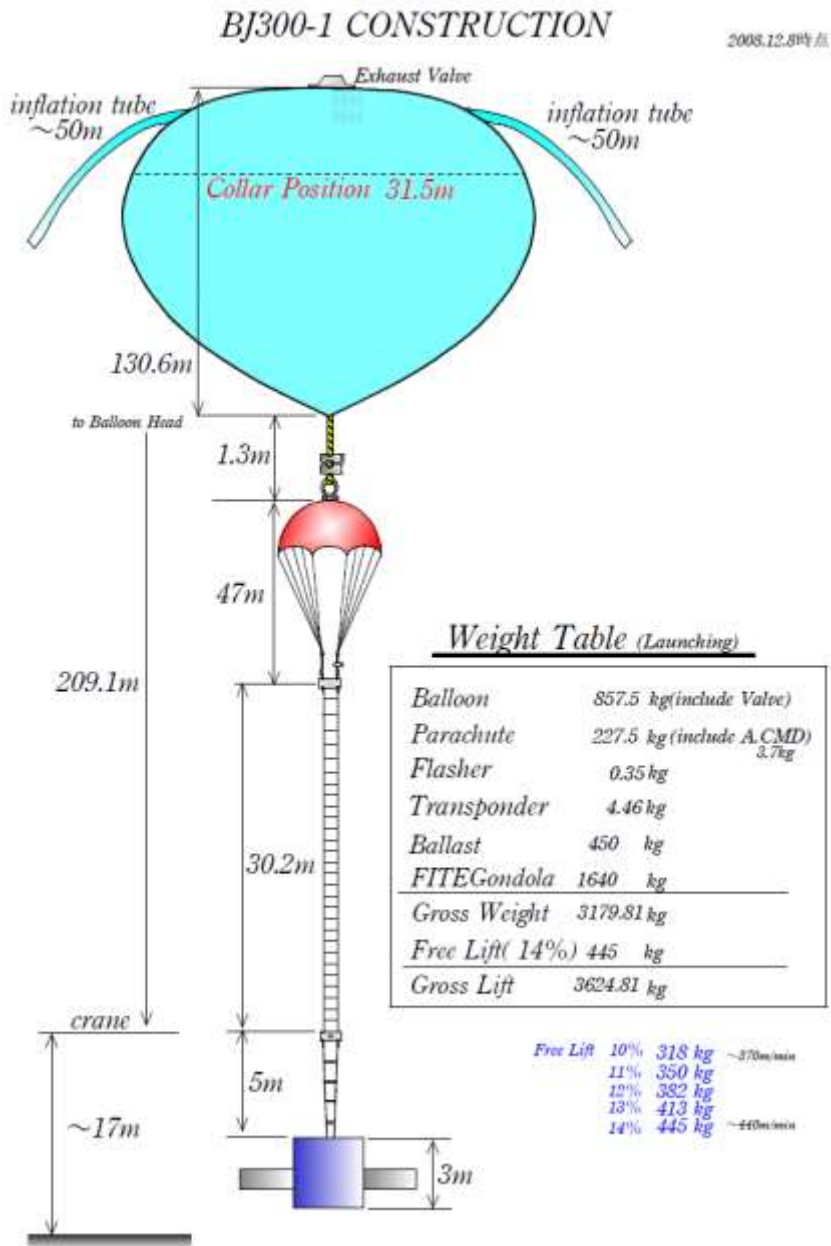
FITE Control System



Ground Support System




Attempts - in 2008 & 2010 in Brazil



Collaboration with Brazilian Institute for Space Science (INPE)





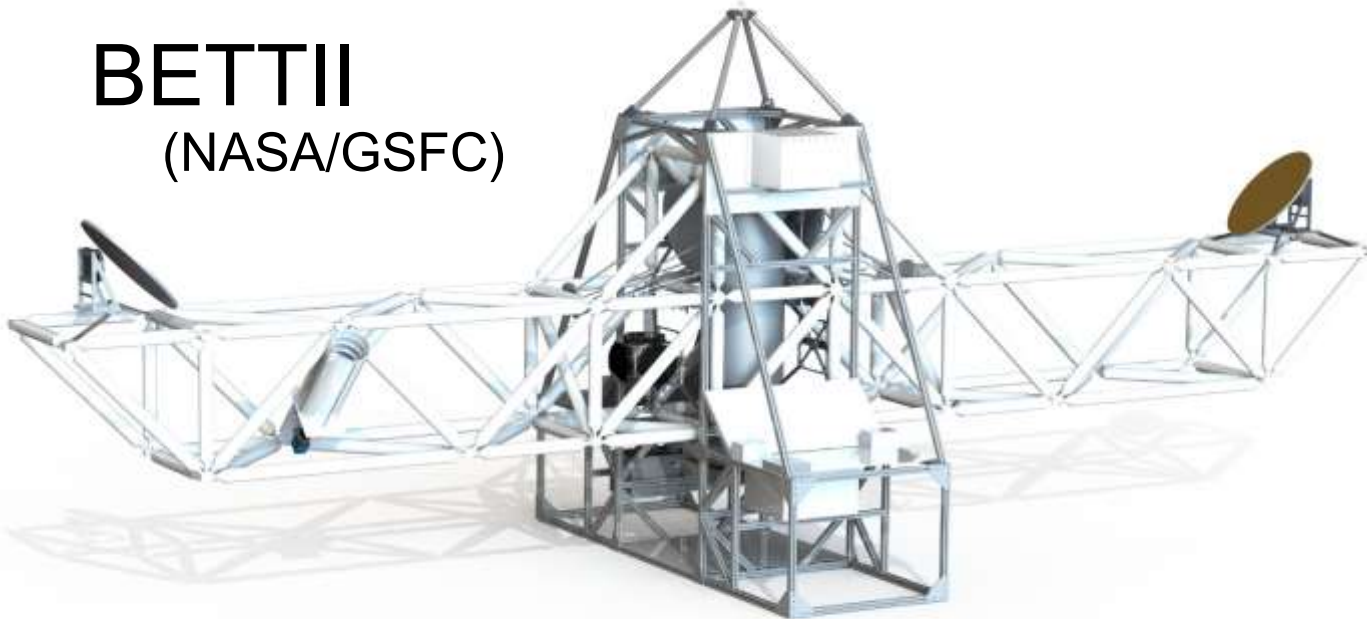
2017年にオーストラリア
アリススプリングス基地
からフライトを希望

For Future

May contribute to important
them in these sciences

- Disc
first
– by
M
go

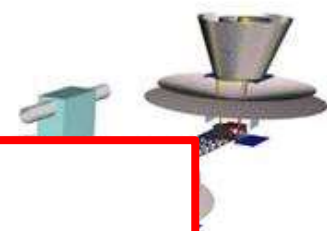
BETTII
(NASA/GSFC)



- Disc
– by
hi

space-borne MIR
interferometer (TPF/Darwin)

TPF-I (NASA)
DARWIN (ESA)



ALADDIN (France)

Barillot et al., 2006, SPIE-6268

Instrumental parameters	
Baselines	4 – 30 m
Telescope diameter	1 m
Number of warm optics	5
Warm optics temperature	230 K
Warm throughput	80%
Warm emissivity	20%
Number of cold optics	15
Cryogenic temperature	77 K
Cold throughput	10%
Science waveband	3.1 – 4.1 μm (<i>L</i>)
Fringe sensing waveband	2.0 – 2.4 μm (<i>K</i>)
Tip-tilt sensing waveband	1.15 – 1.3 μm (<i>J</i>)

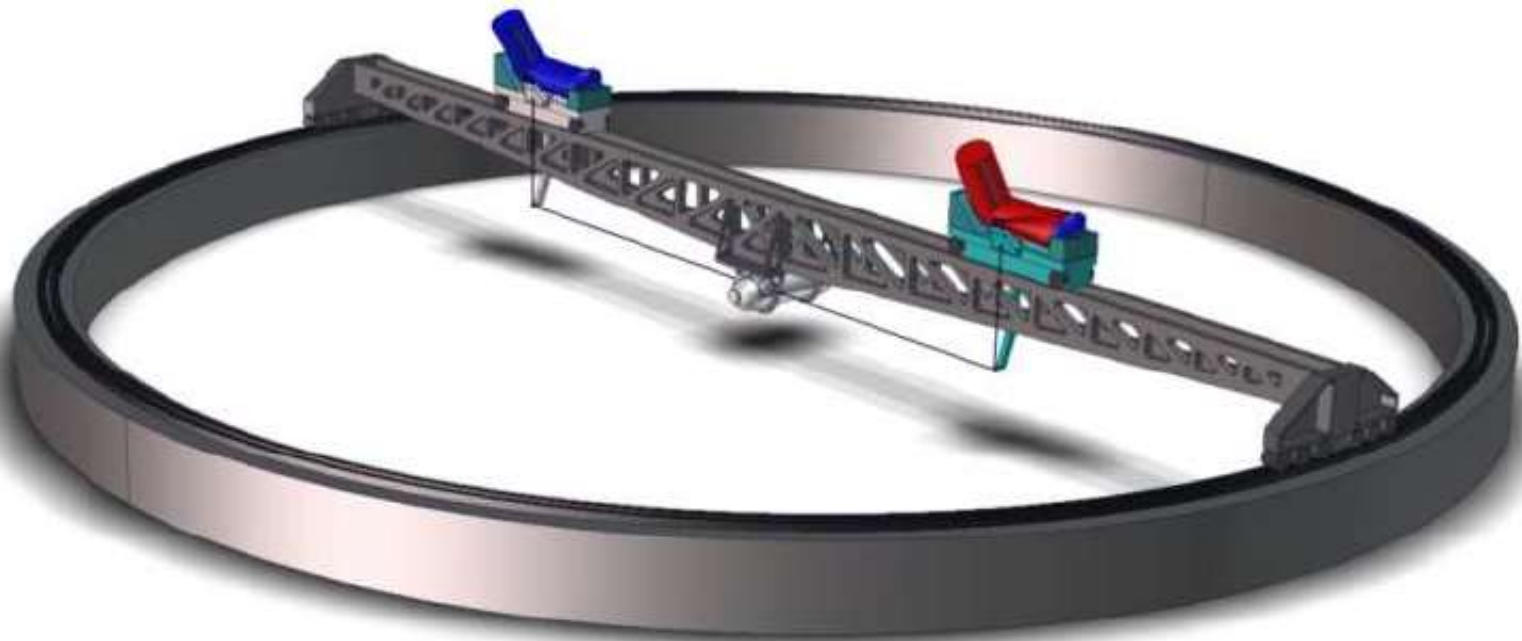


Fig. 1. Overview of the ALADDIN infrastructure. A 40-m rotating truss bearing the siderostats is mounted on a 30-m high structure (not represented). The light beams collected by the two siderostats are fed into off-axis telescopes and routed towards the nulling instrument cryostat by fixed relay optics (only five reflections outside the cryostat).

南極赤外線干渉計への応用

- ALADDIN
- 中間・遠赤外線なら、FITE型のFizeau干渉計が有効。
 - 高性能アレイセンサー(2Kx2K)が使える。
 - 軸外し放物面鏡の製作が容易。
 - 長い遅延線が不要(微調整、光路差操作分のみ必要)
- 技術
 - 気球環境と南極環境は似ている。(低温+リモート)
 - 新OPC、光ファイバー
 - –70度でも動作するオールインワンCPU + 光ファイバーリンク
 - 準平行メカニズムを用いた光学マウント
 - 光学系の精密調整駆動用