

近紫外線観測装置構想

千葉工業大学 惑星探査研究センター
秋田谷 洋・諸隈 智貴

本講演の概要

一見敷居が高そうな
「近紫外線(=300-400nm~u-band)の観測」
を目指します。

「近紫外線の感度を最優先した観測装置」を
「低コスト・短期間で製作」して、
「手近な国内外望遠鏡に装着して早期に観測する」

ことを構想しています。

多様な研究分野が創生された現在において「近紫外線」の観測情報は、（古くとも新しい）ユニークな役割を果たすと期待しています。

「近紫外線」を軸に、多様なサイエンスの提案や議論をいただけますと幸いです。

Contents

1. 背景
2. 観測装置構想
3. 装置開発状況
4. まとめ

1. 背景

千葉工業大学・惑星探査研究センター (PERC)

- 「学部・学科」・「大学院」とは独立した「研究センター」の1つ
- 研究員36名 (嘱託・非常勤含)

研究員



准教授
荒井 朋子
Tomoko ARAI



副研究員 小林 正博 Masahito KOBAYASHI
副研究員 野田 浩二 Koji NODA
主幹研究員 千穂 博紀 Hiromi SENOH
主幹研究員 樋藤 智貴 Tomomi MICHIKAWA



主幹研究員 秋山 洋亮 Hiroaki MIYAMA
主幹研究員 大野 宗祐 Shota OHNO
主幹研究員 石橋 高 Kyo SHIBASAKI
主幹研究員 黒澤 結介 Kosuke KURABAYASHI



主幹研究員 石丸 亮 Ryo SHIMIZU
主幹研究員 山田 学 Mamoru YAMADA
主幹研究員 秋田 裕洋 Hiroyuki AOTANI
研究員 奥平 悠 Daianyu OKUGAWA



研究員 前田 遼介 Ryohei MASUDA
研究員 三宅 直崇 Naomasa MIYAKE
研究員(嘱託) 木村 聡 Hiromi KIMURA
研究員(嘱託) 平井 隆之 Takayuki HIRAM



研究員(嘱託) 岡本 美也 Takaya DAIZUMOTO
研究員(嘱託) 野田 徹郎 Tetsuya HARADA
非常勤主幹研究員 和田 豊 Yuhiko WADA
非常勤研究員 松本 蓮沙 Roshu Y. MATSUAMOTO



非常勤研究員 吉田 二美 Fumi YOSHIDA
非常勤研究員 洪 翕 Fung HONG
非常勤研究員 河口 優子 Yuki KAWAGUCHI
非常勤研究員 庄山 直秀 Takayoshi SUDO

学部・学科	大学院	
機械工学科	機械工学専攻	
機械電子創成工学科	機械電子創成工学専攻	
先端材料工学科	先端材料工学専攻	
電気電子工学科	電気電子工学専攻	博士後期課程 工学専攻
情報通信システム工学科	情報通信システム工学専攻	
応用化学科	応用化学専攻	
電気電子情報工学科(平成28年4月募集停止)	機械サイエンス専攻(令和2年4月募集停止)	
デザイン科学科(平成28年4月募集停止)	電気電子情報工学専攻(令和2年4月募集停止)	
	未来ロボティクス専攻(令和2年4月募集停止)	

学部	大学院	
建築学科	建築学専攻	
創造工学科	都市環境工学専攻	
都市環境工学科	都市環境工学専攻	
デザイン科学科	デザイン科学専攻	

学部	大学院	
未来ロボティクス学科	未来ロボティクス専攻	
生命科学科	生命科学専攻	
知能メディア工学科	知能メディア工学専攻	

学部	大学院	
情報工学科	情報科学専攻	博士後期課程 情報科学専攻
情報ネットワーク工学科	情報ネットワーク工学専攻	

学部	大学院	
経営情報科学科	マネジメント工学専攻	博士後期課程 マネジメント工学専攻
プロジェクトマネジメント学科	プロジェクトマネジメント工学専攻	
金融・経営リスク科学科	金融・経営リスク工学専攻	

研究センター
産業用ロボット制御研究センター (AIRC)
惑星探査研究センター (PERC)
変革センター (CRT)
人工知能・ソフトウェア技術研究センター (STAIR)
地球学研究センター (Geo-Cosmo Inst.)
次世代海洋資源研究センター (ORCeNG)
日本文化再生研究センター (IRJ)
数理工学研究センター (RCME)

千葉工業大学・惑星探査研究センター (PI)

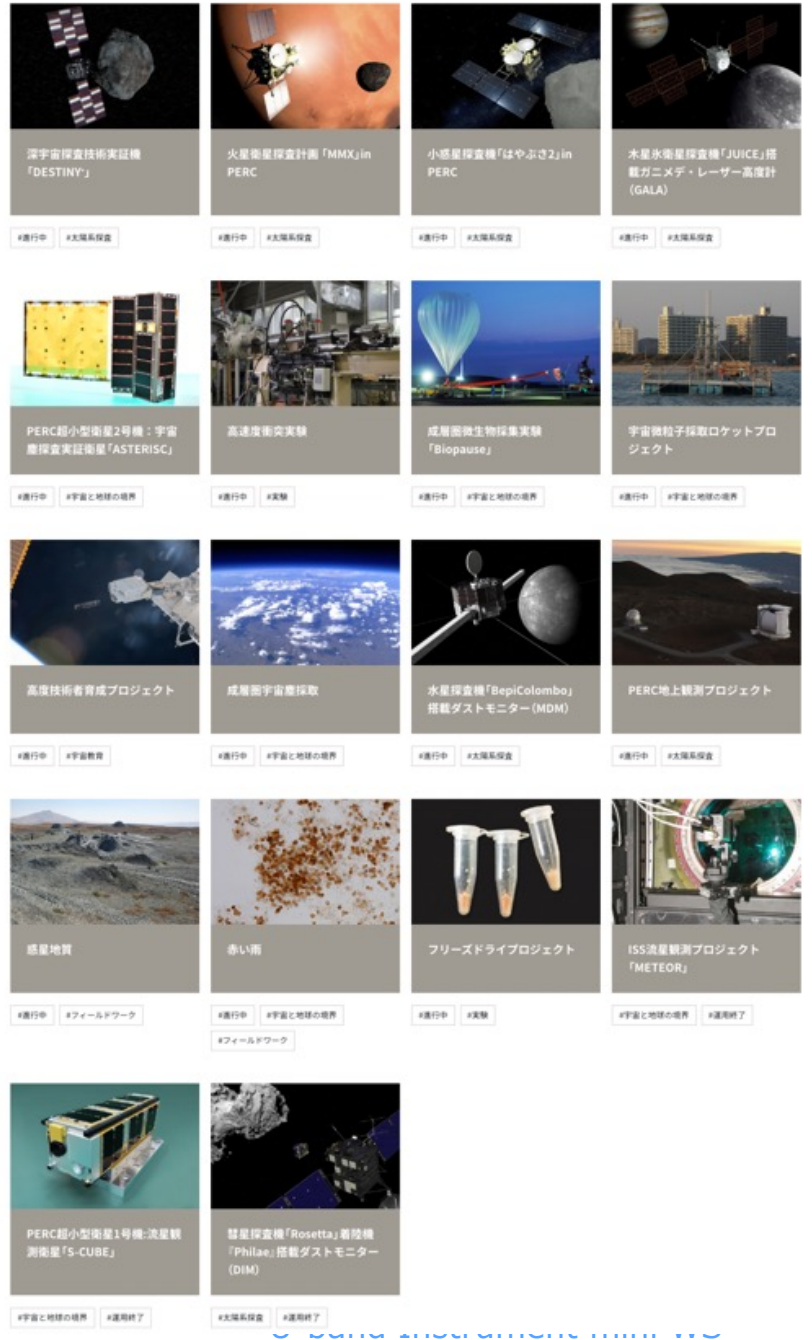
□ 2009-

- 宇宙・惑星・生命の起源や進化、生命とそれを育む惑星の成り立ち
- 宇宙空間での観測活動を支えるための最先端の技術開発

→ 太陽系内探査、地球圏の観測、実験、関連技術開発が主

□ 2021/2- 観測天文学分野新設

- 秋田谷 21/2- ・ 諸隈 22/2-
- 現在3年目



装置構想に至った経緯1

- FY2021- パミール高原天文台計画
 - パミール高原（タジキスタン東部）に天文台を建設、時間領域観測天文学を推進
 - 標高4350m、乾燥、高透過率、好天。Mauna Keaと遜色ない良サイト
 - u-band機能がユニーク→装置検討を開始



COVID-19・宇露情勢・人的連携の変遷により天文台は実現困難となった

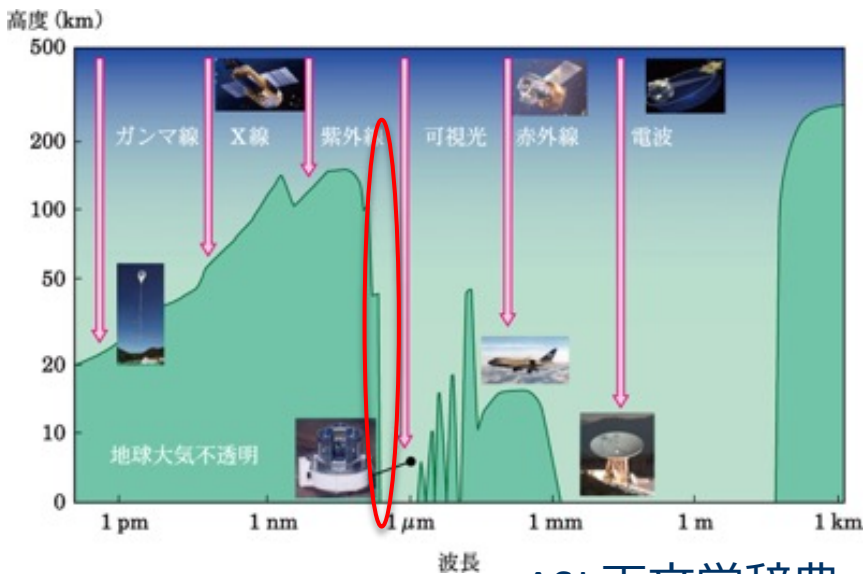
2023-07-20

装置構想に至った経緯2

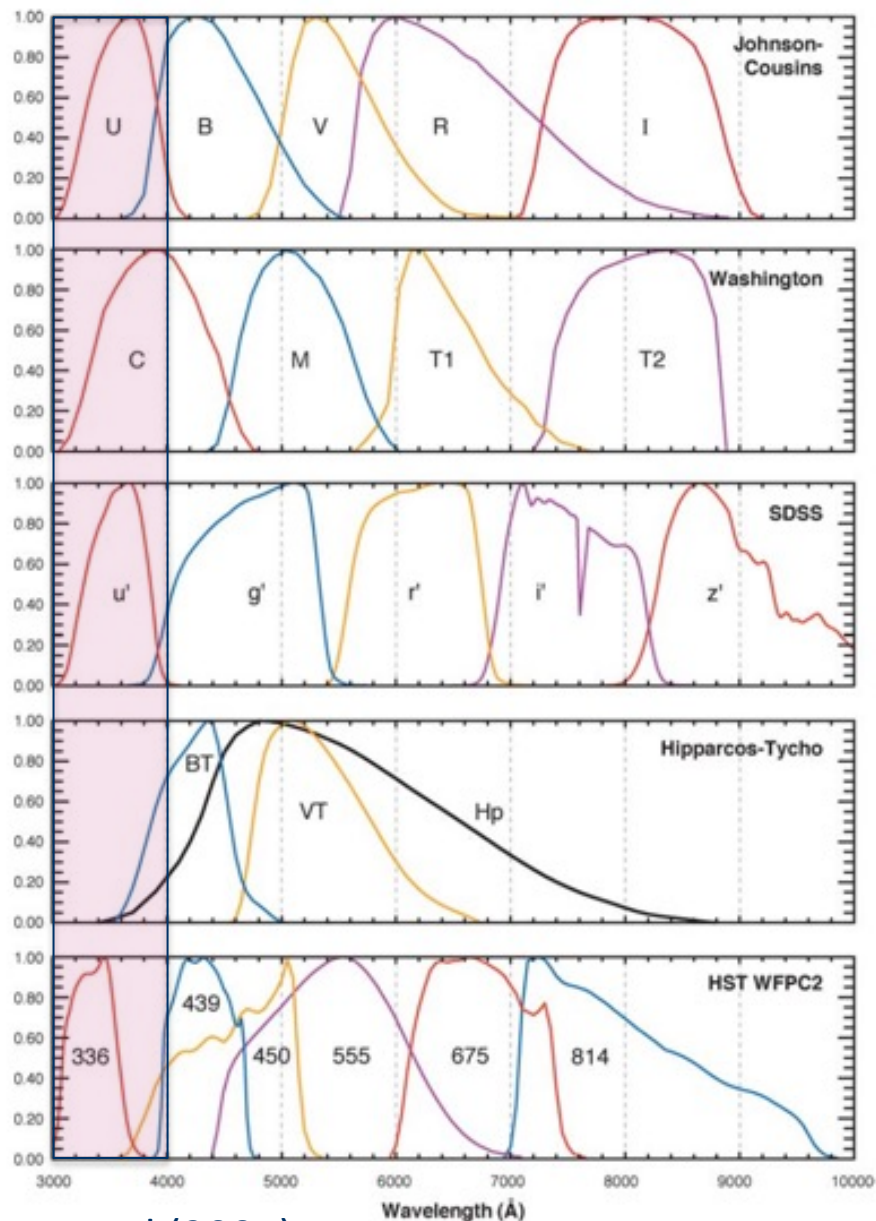
- FY2022- 「近紫外線装置」構想をパミール高原天文台計画とは独立に推進
 - 地上からの「近紫外線」観測はマイナーになりつつある
- いまいちど、
 - 近紫外線の感度に注力した観測装置を開発・製作
 - 国内外の身近な望遠鏡に装着する。そして、
 - 研究分野が刷新された現代において、近紫外線観測データを軸に観測天文学を発展させる
- 装置設計・開発・製作、サイエンス検討、観測環境調査、予算獲得を本格化
- PERC「観測天文学」グループ(HA, TM)の主プロジェクトとして推進

近紫外線

- 300-400 nm を想定
 - 紫外線=「波長が1nmから400 nm程度の電磁波の名称。……」(ASJ 天文学辞典)
- 広義での「(地上からの)可視赤外線観測天文学」における「最短波長帯」
 - ~U-band, u-band



ASJ 天文学辞典



Bessel (2005)

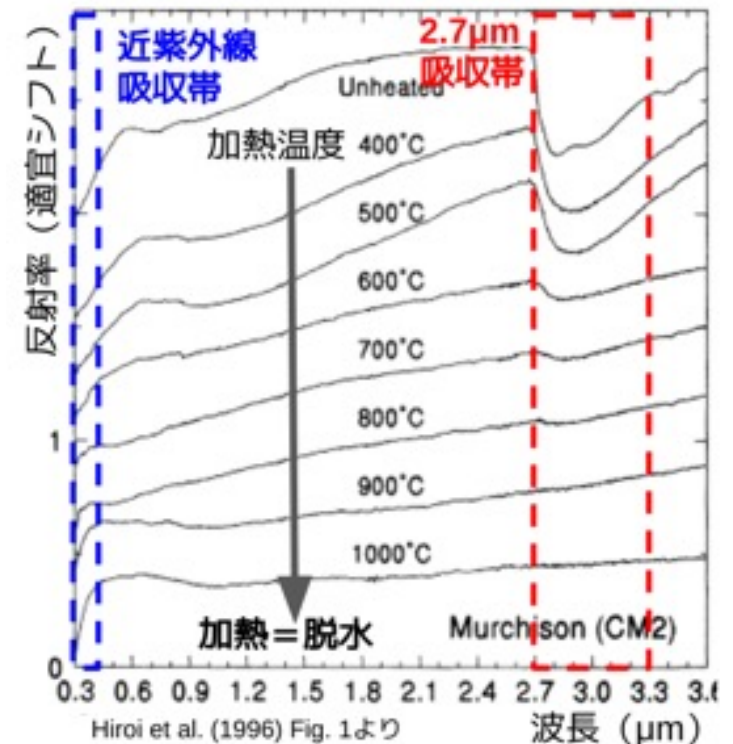
サイエンスケース (FY2022時点での検討)

- C型小惑星近紫外線吸収帯
 - 水の含有・脱水過程のプローブ
- 重力波対応天体・中性子星連星合体における「青いキロノバ」成分の検証
- 突発天体: 高エネルギー・高温現象の黒体放射

$$T_{\text{peak}} \sim 3e6[\text{nm} \cdot \text{K}] / \lambda[\text{nm}]$$

$$\sim 1e4 \text{ K} / (\lambda[\text{nm}] / 300[\text{nm}])$$

加熱したマーチソン隕石 (~C型小惑星と同等) の反射スペクトル



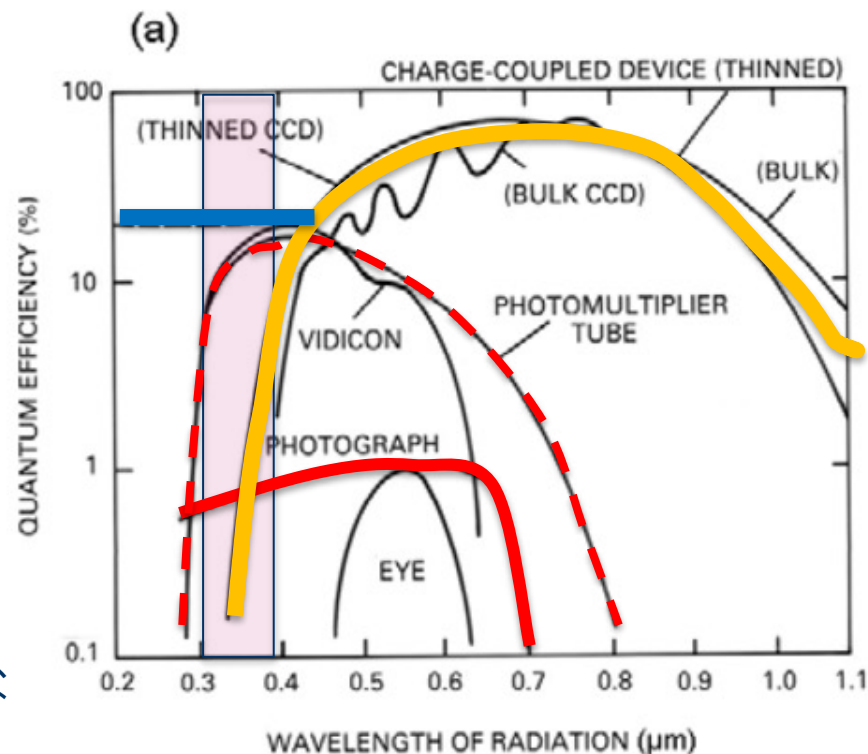
本mini WSで提案議論をお願いします

近紫外線をとりまく観測装置環境

1. 写真乾板・光電子増倍管時代
 - U-bandは標準の1つ
2. アレイ検出器(CCD・CMOS)時代
 - 感度ピークが長波長側に移行・広帯域化
 - 長波長側への関心の高まり。移行（光赤方偏移天体・発展した赤外線観測との接続）
3. 近年は近紫外線感度をもつアレイ検出器も出てきた（長波長側とのトレードオフは必要）

現状分析(私見)

- 広帯域化で観測波長の選択肢が広がった。
→空の透過率が低い・光学系コストが高い近紫外線は削られがち
- 近紫外線の科学的価値が低下したわけではない
→良サイトの大きい計画では対象になる。しかし、効率是最適とも限らない



McLean (2008)

“Electronic Imaging in Astronomy (2nd ed.)”

本計画の狙い・意義

Q. 近紫外線の透過率はそこまで低いのか？

A. 端からあきらめるほど低くはありません。国内でも実施するに値します。

Q. 近紫外線対応すると装置コストがかかるのでは？

A. 欲張りません。近紫外線のみを追求した検出器・光学系の装置でコストを抑えます。

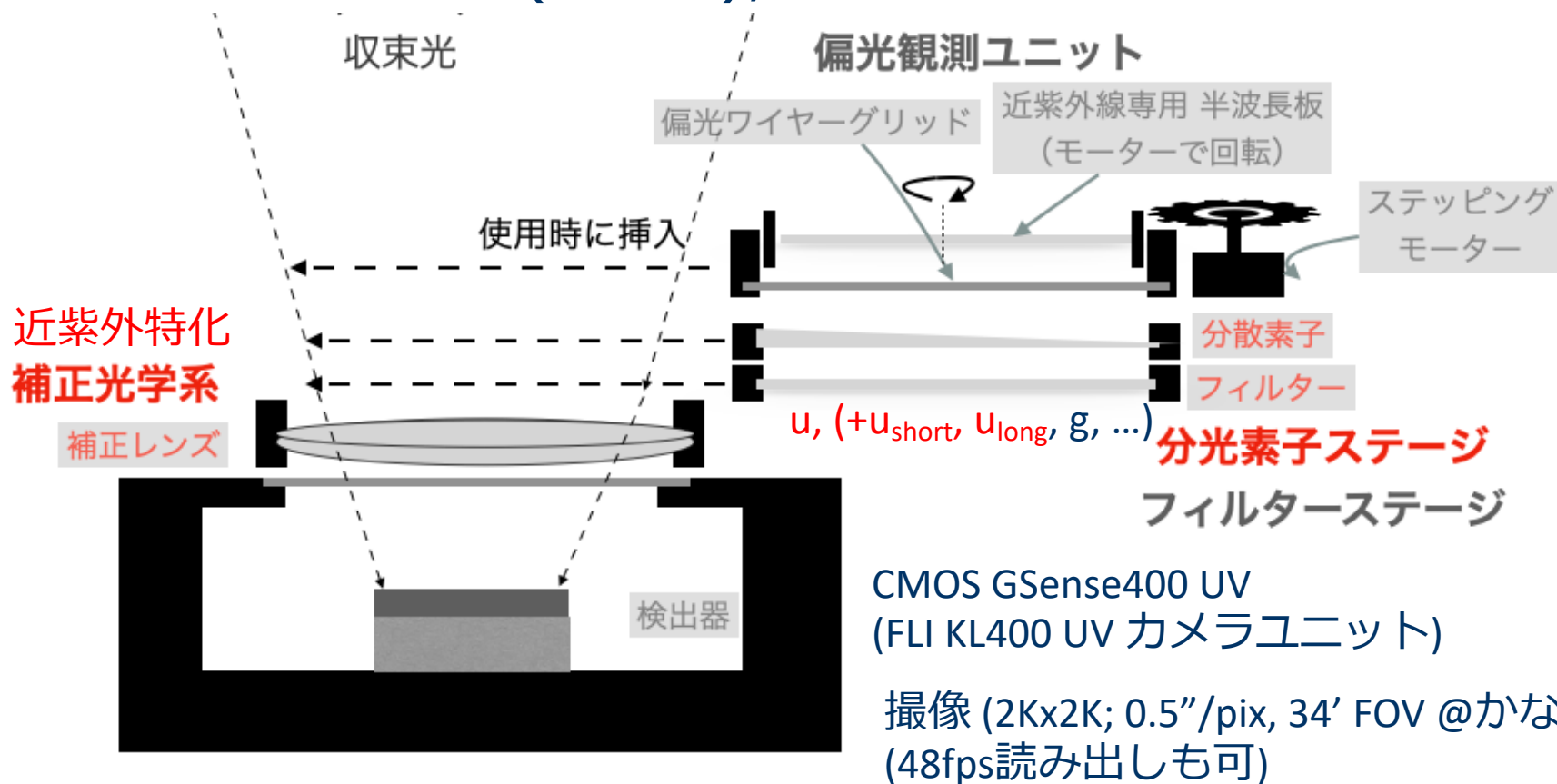
Q. 近紫外線だけでサイエンスができるのか？

A. 欲張りません。他の波長は他の望遠鏡・装置に任せます。

2. 観測装置構想

装置概念設計

- 撮像(u-band, 狭帯域, ...; FOV 5' @1.5m, F/12.2), スリットレス分光($R \sim 40$), 直線偏光

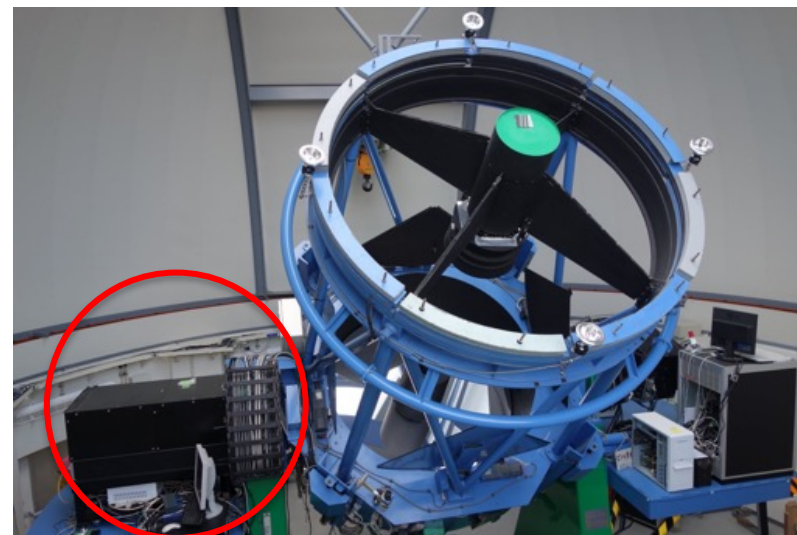


望遠鏡: 初期は東広島天文台かなた1.5m 第2ナスミス焦点を想定。

将来的には、国内外で使える望遠鏡へ持ち込み。(アリゾナ大と検討開始)

初期: かなた望遠鏡

- 東広島天文台 口径1.5m かなた望遠鏡 第二ナスミス焦点
- メリット
 - 地理的アクセスが良い
 - 観測時間を確保しやすい
 - 開発者(HA)が望遠鏡・装置設置部・インタフェースを熟知
- デメリット
 - M3分の効率減 (CsはHONIRが常駐)
 - 視野・装置ローテータなし



HONIRメンテ・取り外し時は
Csに装着できる?

U-band Instrument mini WS

装置仕様

□ mini WS web page

□ https://www.perc.it-chiba.ac.jp/astr/ubandinst/instrument_spec/

U-band Instrument Specification

Specification

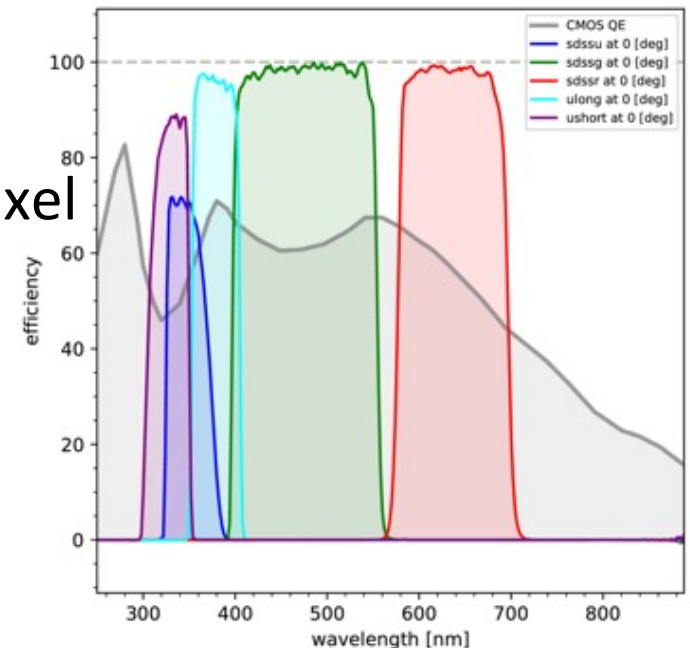
- detector: CMOS Gpixel GSENSE 400 BSI-UV: [specification \[pdf\]](#)
 - 2048 x 2048 pixel (11 um/pixel)
 - readout noise: 1.4 e-/pix
 - camera module: [FLI KL400BI](#) w/ G1 shutter, peltier cooler
- optics: designed for 1.5m Kanata telescope (Hiroshima University)
 - @2nd Nasmyth focus (no rotator)
 - optimized for 300-400nm
 - F/10.0
 - field-of-view: 5.0 x 5.0 arcmin²
 - pixel scale: 0.146 arcsec / pixel
 - designed by PhotoCross
- filters
 - u, g, r, u-short, u-long
 - transmission curve (filter only): [figure](#)
- total throughput at airmass=1.2 ([figure](#), [ascii file](#))
 - w/o filters
 - 0.04 at 310nm
 - 0.18 at 350nm
 - 0.30 at 400nm
 - w/ u-band filter
 - 0.09 at 330nm
 - 0.13 at 350nm
 - 0.14 at 360nm (peak)
 - 0.04 at 380nm
- sensitivity by assuming nominal sky brightness (AB mag)
 - S/N=5: 18.0-19.0 (t=10 sec), 19.0-20.0 (t=100 sec)
 - S/N=20: 16.5-17.5 (t=10 sec), 18.0-19.0 (t=100 sec)
- stellar density in u-band
 - statistics from SDSS (i.e., high galactic latitude) u-band data: [figure](#)
- maximum exposure time for a single exposure / image motion
 - no instrument/image rotator available at 2nd Nasmyth focus of Kanata telescope
 - ~20-30 sec in most cases (background limit even in nominal sky brightness assumption above)
 - depending on hour angle and object's Declination
 - [figure](#)
- differential atmospheric dispersion
 - [figure](#)
- Kanata telescope
 - tracking accuracy: 1-2 arcsec / 5 minutes

Schedule (as of June 23, 2023)

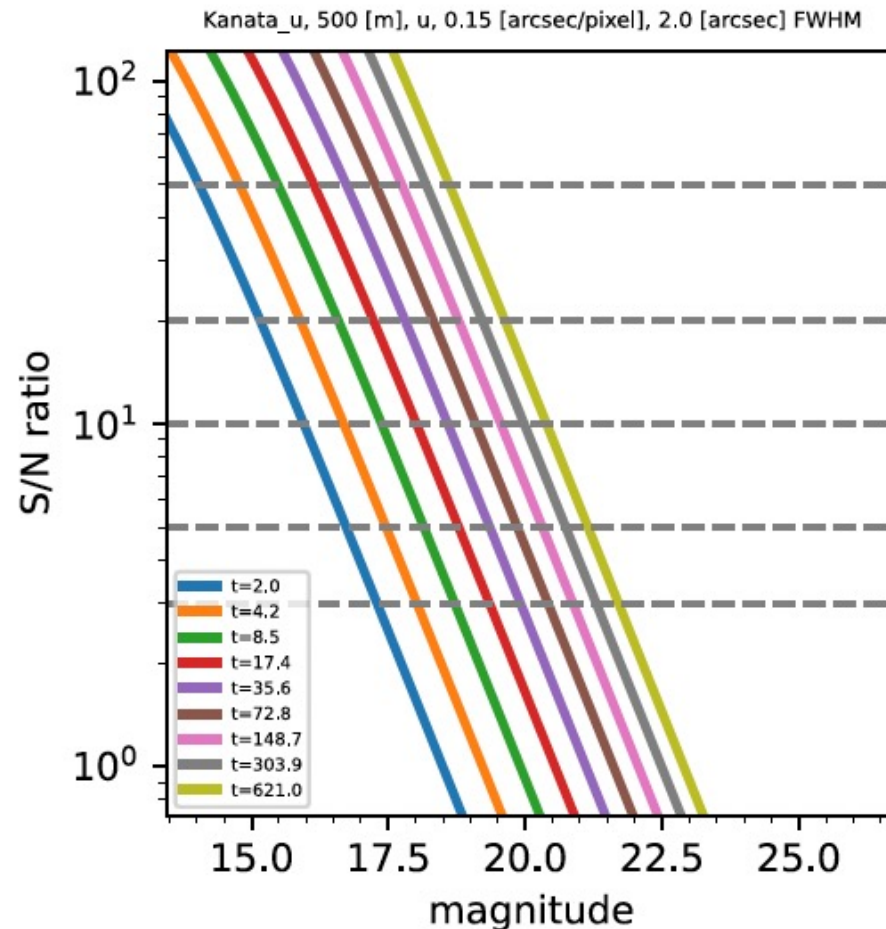
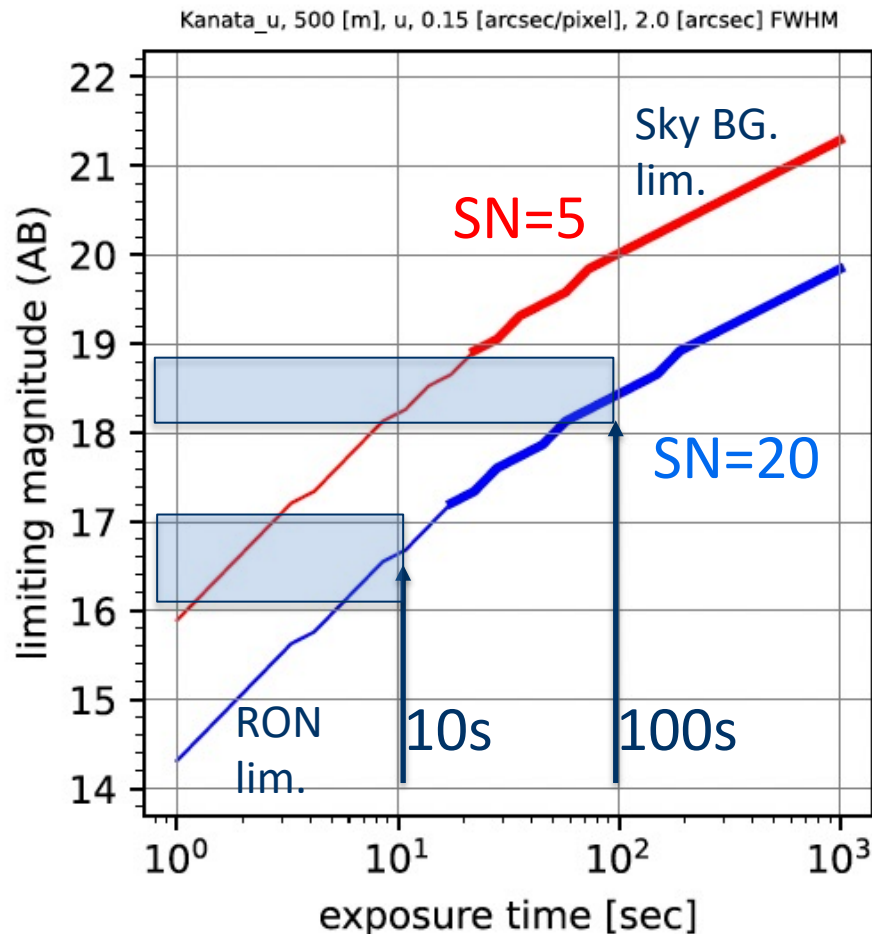
- first light at Kanata telescope in FY2023 winter

主要仕様値

- detector: CMOS Gpixel GSENSE 400 BSI-UV
 - 2048 x 2048 pixel (11 $\mu\text{m}/\text{pixel}$), readout noise: 1.4 e-/pix
 - camera module: [FLI KL400BI](#) w/ G1 shutter, peltier cooler
- optics: 1.5m Kanata telescope (Hiroshima University)
 - @2nd Nasmyth focus (no rotator)
 - optimized for 300-400nm
 - FoV: 5.0 x 5.0 arcmin², 0.146 arcsec/pixel
- filters
 - u, g, r, u-short, u-long



u-band 限界等級 (@かなた, secz=1.2)



S/N=5: 18.0-19.0 (t=10 sec), 19.0-20.0 (t=100 sec)

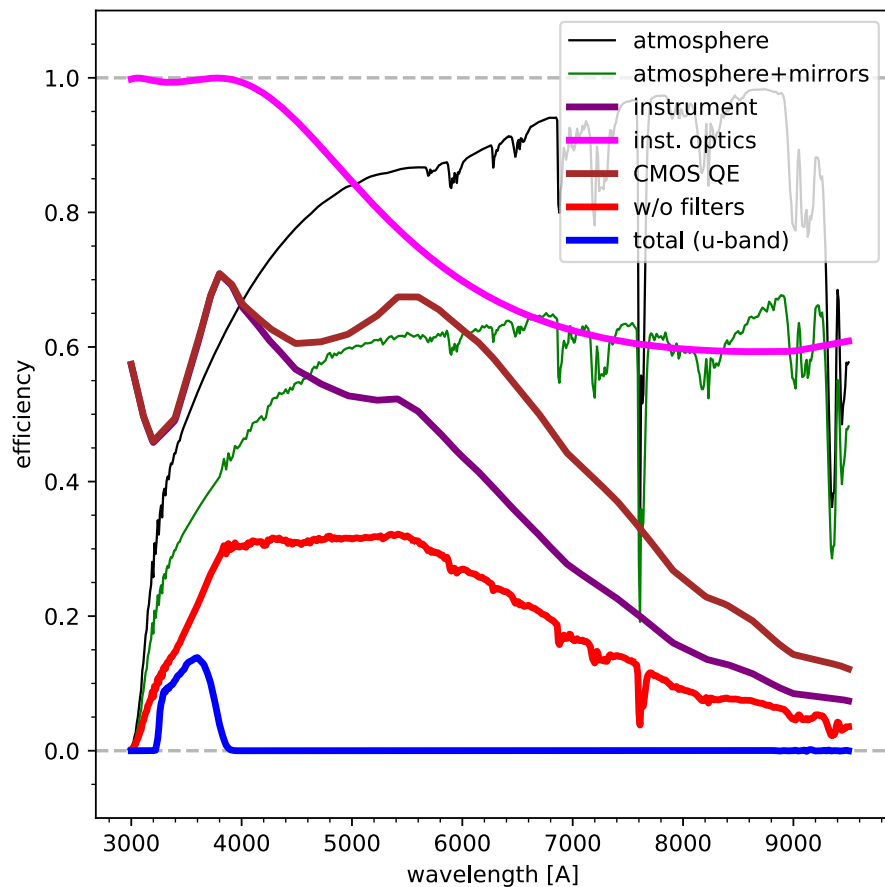
S/N=20: 16.5-17.5 (t=10 sec), 18.0-19.0 (t=100 sec)

注記事項

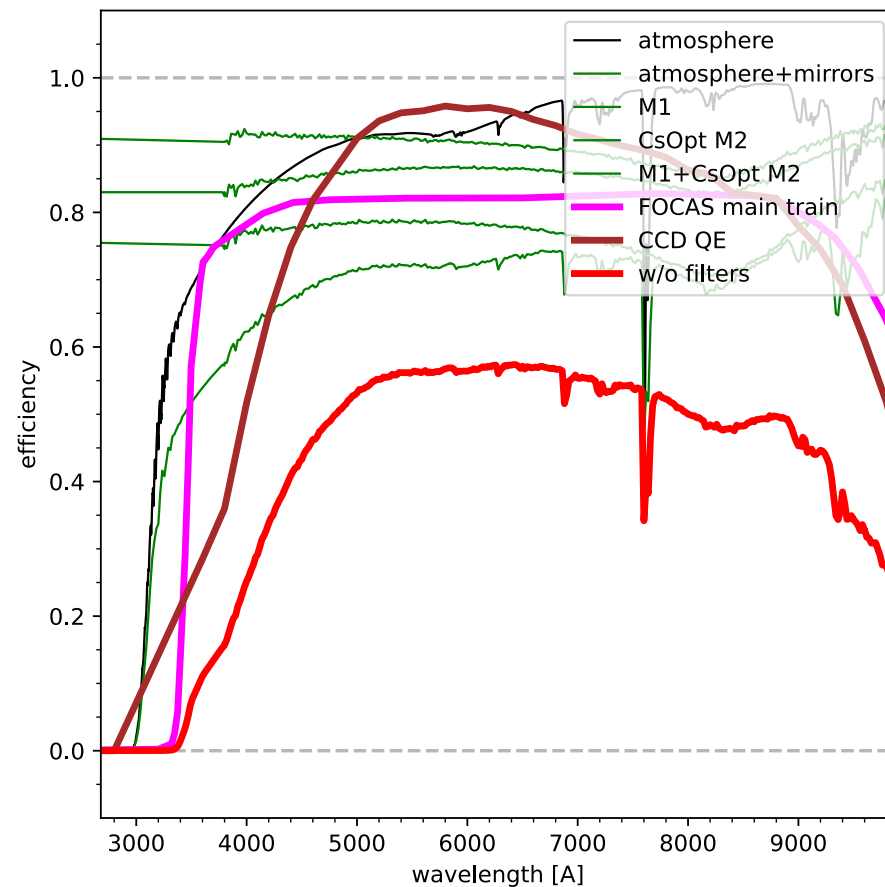
- 相対測光 / stellar density
 - 1 object per FoV (25 arcmin^2) となるのは、 $u=17$ magでも「SDSSの2/3くらい」
 - 「視野内に相対測光をする星がない」ケースがありうる
- maximum exposure time in a single exposure
- かなたNs2; □ローテータがない(ガイダーもない)
 - 長い積分に制限。tmax $\sim 20\text{-}30 \text{ sec}$ (おおよその目安)
 - tracking accuracy: 1-2 arcsec/5 minutes

装置効率の推定 (TM)

Our Instrument



SUBARU FOCAS



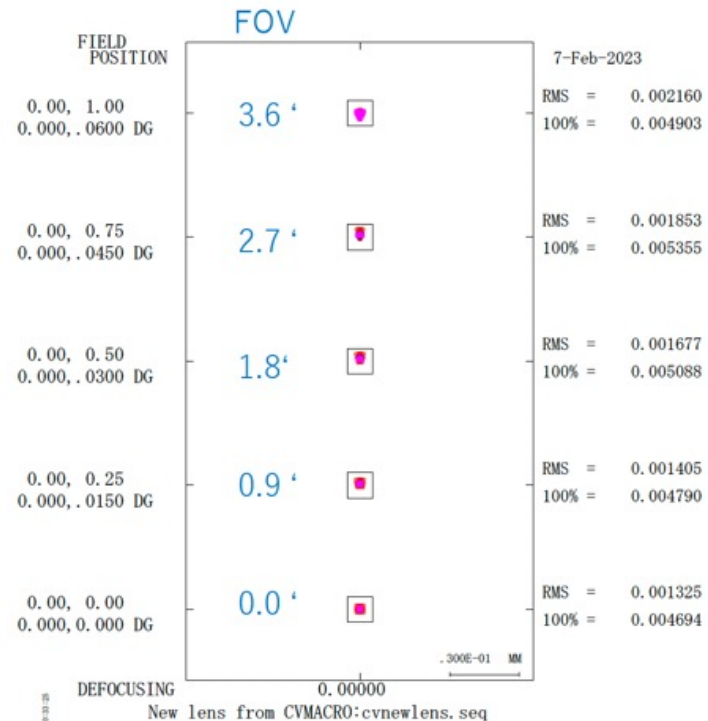
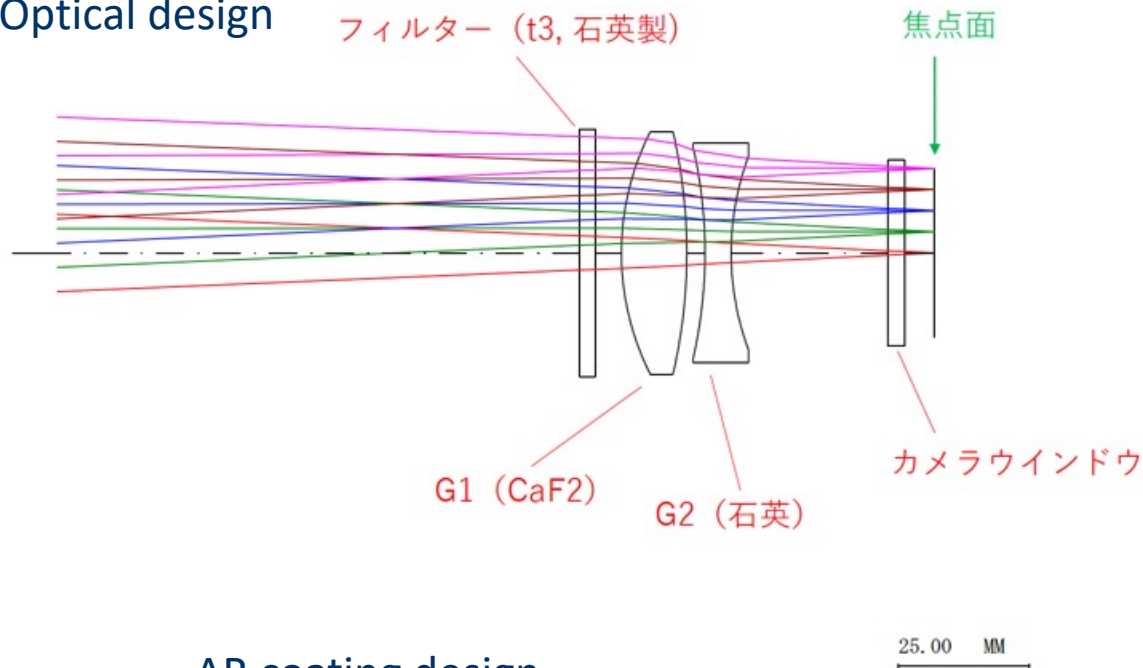
光学設計

2パターンを設計

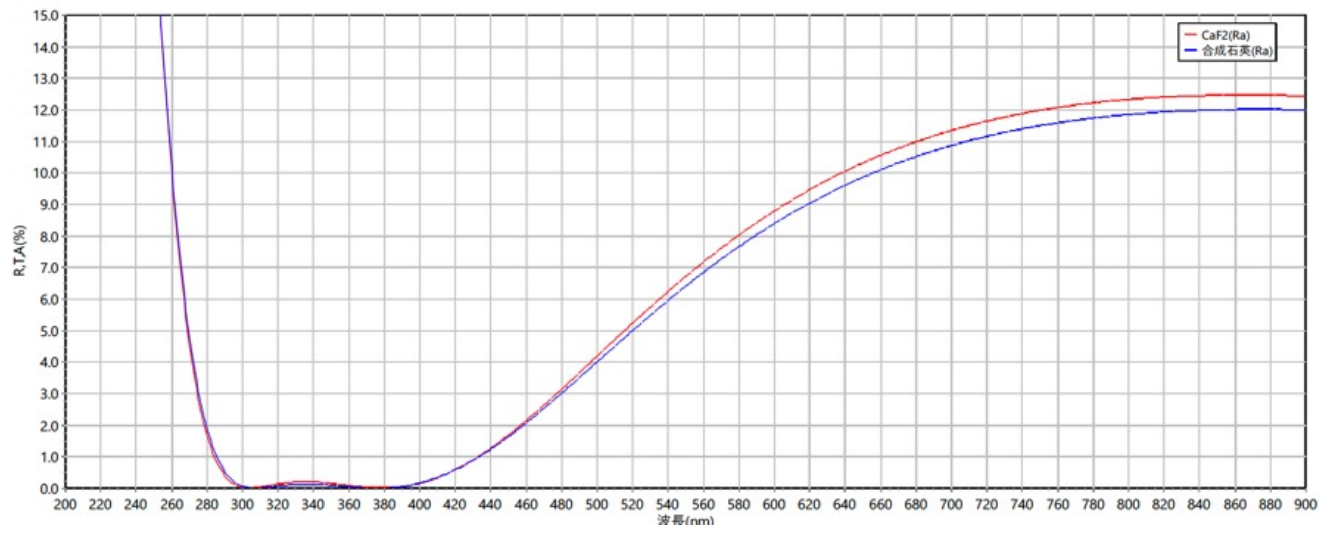
- 初期成果用(F変換なし・狭視野・低コスト) (当面はこちらを製作) FOV 5'x'5'
- 本格運用期用(F変換あり・広視野・高コスト)

項目	仕様値	設計結果	コメント
波長	300 - 400 nm	300,330,360,400nm	
FOV	4.23' x 4.23' 以上	5.0' x 5.0'	かなた望遠鏡に取付けた場合
合成F/#	< 12.2	10.0	合成F/#はレンズ枚数を優位に増やさない範囲で小さくする
センサーピクセルサイズ	11 μ m	11 μ m	FLI社製 KL400UV
センサーフォーマット	2048 x 2048 pixel ²	2048 x 2048 pixel ²	
結像性能 (Encircled Energy)	> 80%	93%	For 2-pixel diameter circle
フィルター／偏光板サイズ	Φ 50mm	Φ 50mm	
フィルター／偏光板厚さ	t3mm	t3mm	合成石英製

Optical design



AR coating design



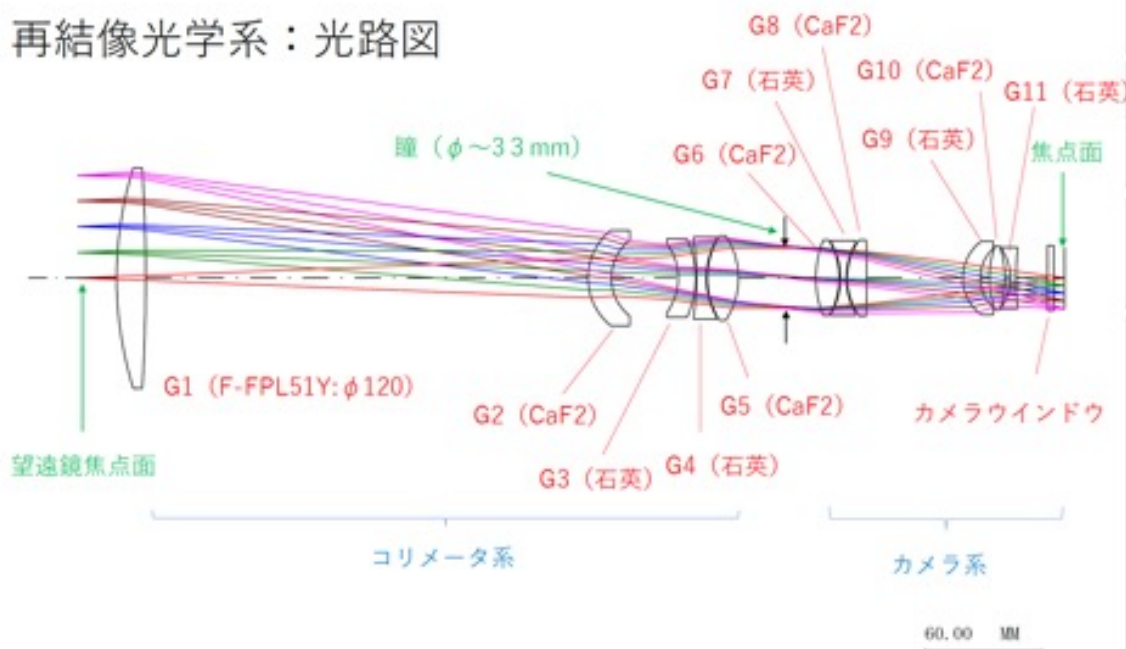
波長：300nm、330nm、360nm、400nm

ボックスサイズは1ピクセルサイズ (11μm x 11μm) を示す。

光学設計: 広視野版

項目	仕様値	設計結果	コメント
波長	300 - 400 nm	300,330,360,400nm	
FOV	13.9' x 13.9' 以上	14.1' x 14.1'	かなた望遠鏡に取り付けた場合
合成F/#	< 3.6	3.55	
センサーピクセルサイズ	11 μ m	11 μ m	FLI社製 KL400UV
センサーフォーマット	2048 x 2048 pixel ²	2048 x 2048 pixel ²	
結像性能 (Encircled Energy)	> 80%	84%	For 2-pixel diameter circle
想定フィルター ／偏光板サイズ	Φ 50mm	Φ 50mm	
その他	フィルターターレットおよび偏光解析部挿入のための準平行光からなる瞳を設けること	光路図を参照	

再結像光学系：光路図



タイムライン

□ FY2022

- 装置概念設計
- 光学設計
- 観測環境評価(机上)
- 基本機器購入(CMOSカメラ・SQMほか)
(いまここ)

□ FY2023

- 装置本体製作(外部資金次第)
- かなたでの初期観測 (冬のFLを目指す)
- 観測環境調査 (実地)

□ FY2024-

- 観測(国内、海外展開)
- 装置の改良・刷新

予算計画

□ 内部経費

- FY2021-: 惑星探査研究センター経費

- 基礎検討、CMOSカメラモジュール、小型光学素子、光学設計、etc.

□ 外部資金

- × FY2023-: 科研費基盤(B) (PI: HA, Co-I: 川端, 浦川, 谷津)

- ○ FY2023-2025: 東レ科学研究助成 (PIO: TM, Co-I: HA, 川端) 1300万円

□ 今後 ~2.5年: 現予算+内部経費で活動

- 初期装置製作、かなたでの初期観測

□ その後: 追加外部資金獲得へ

- 高機能装置製作、国内外望遠鏡への展開

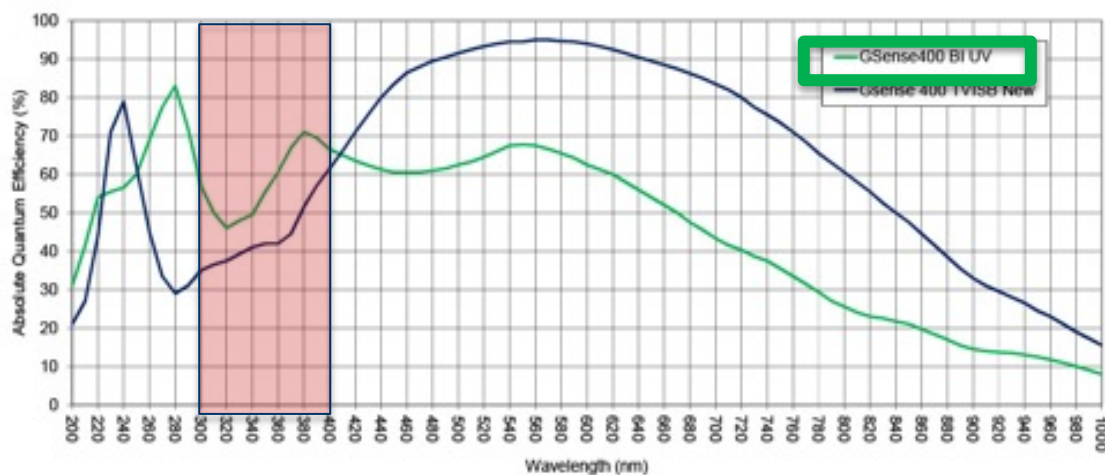
観測環境の基礎調査

検出器

- CMOSセンサー
Gsence400 BI UV
- 2024 x 2024 pix
- 11 μm/pix

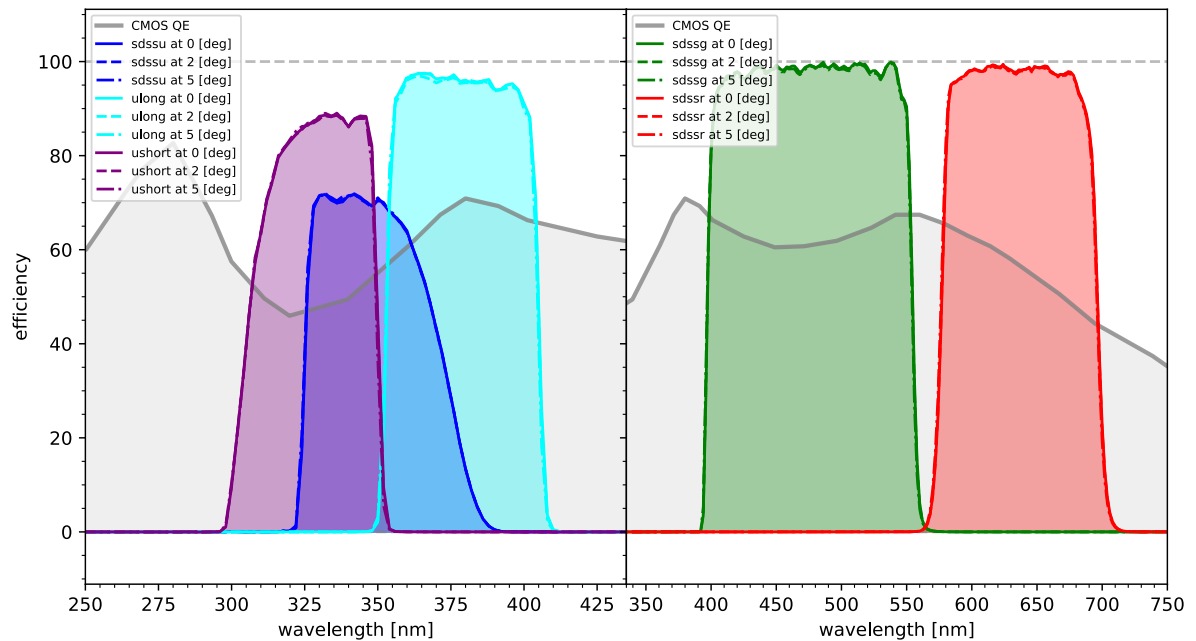
- FLI KL400 冷却カメラモジュール

- 駆動試験・性能評価を開始



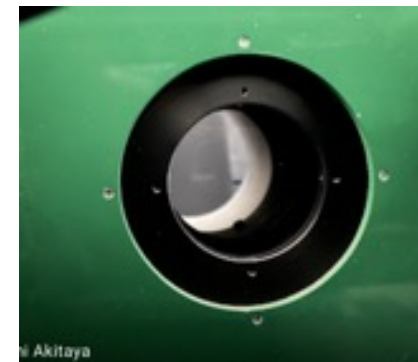
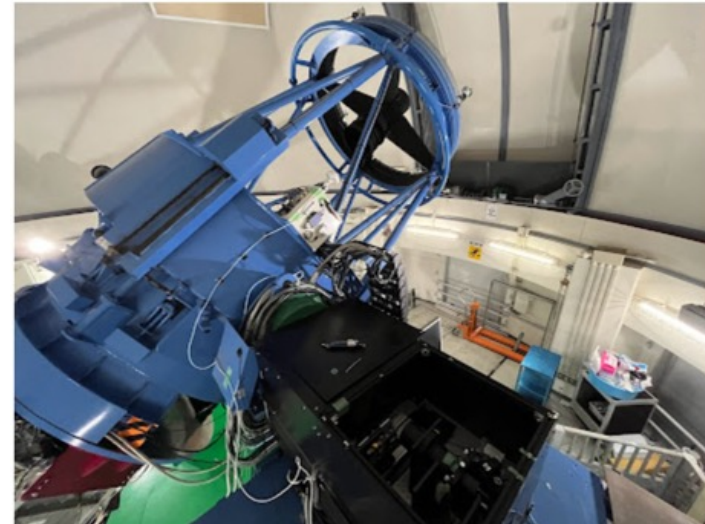
フィルター透過率測定

- NAOJ ATCオプトショップ
- 導入予定フィルターの分光透過率を測定



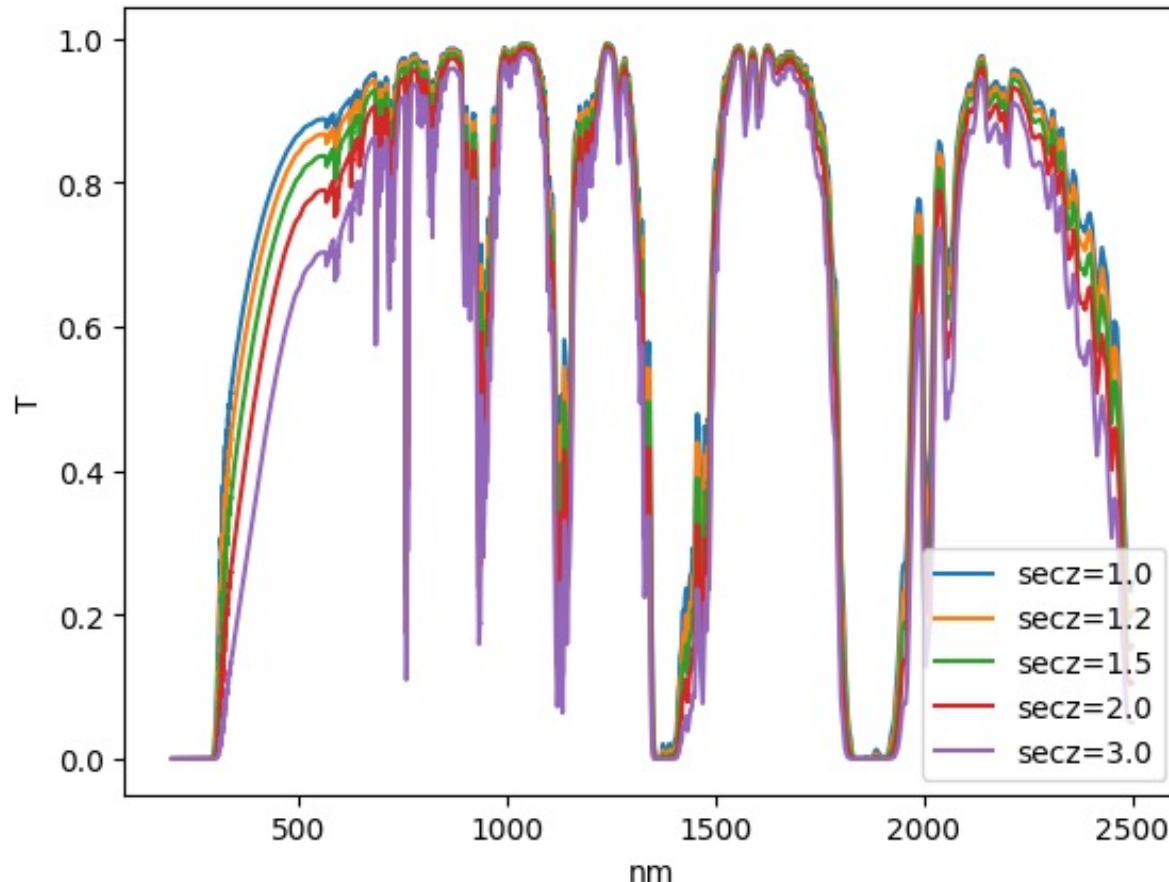
初期観測準備: 第2ナスミス 光学窓除去

- BK7 + ARコート of 光学窓2枚 あり
 - 望遠鏡高度軸エンコーダの気密保護のため
 - 300-400nmは非透過
- ウィンドウを除去・エンコーダを独立に気密保護する機構を導入 (西村製作所)
 - 9-11月内の早期に実施



LOWTRAN7 大気モデルモデル (Kneizys+88)

利用コード例: https://gitlab.com/hiroshi.akitaya/site_survey

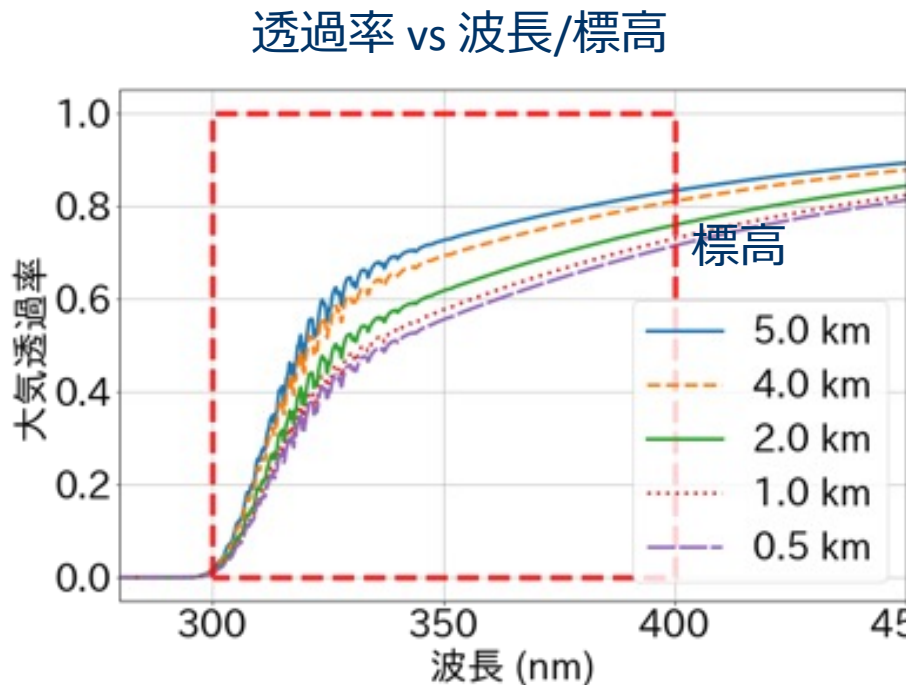


標高 511.2 m (かなた), model: 'Midlatitude Summer'

[https://gitlab.com/hiroshi.akitaya/site_survey/-/blob/main/atmosphere test/lawtran model curve tables-kanata.ipynb](https://gitlab.com/hiroshi.akitaya/site_survey/-/blob/main/atmosphere%20test/lawtran%20model%20curve%20tables-kanata.ipynb)

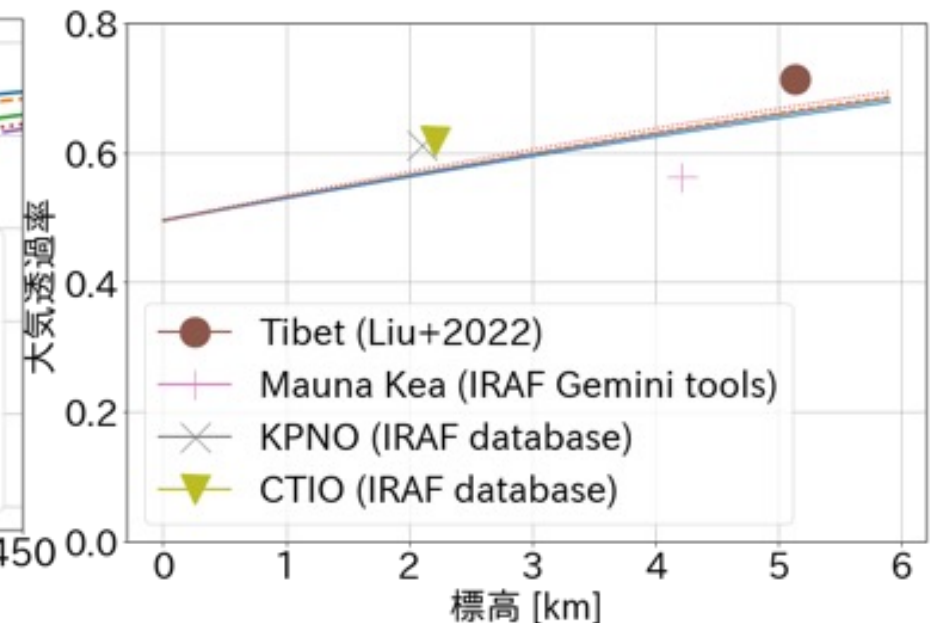
観測環境検討1: 大気透過率

LOWTRAN7 大気モデルを用いてu-band透過率を推定



Model: Subarctic winter

u-band 透過率・モデル&実測値

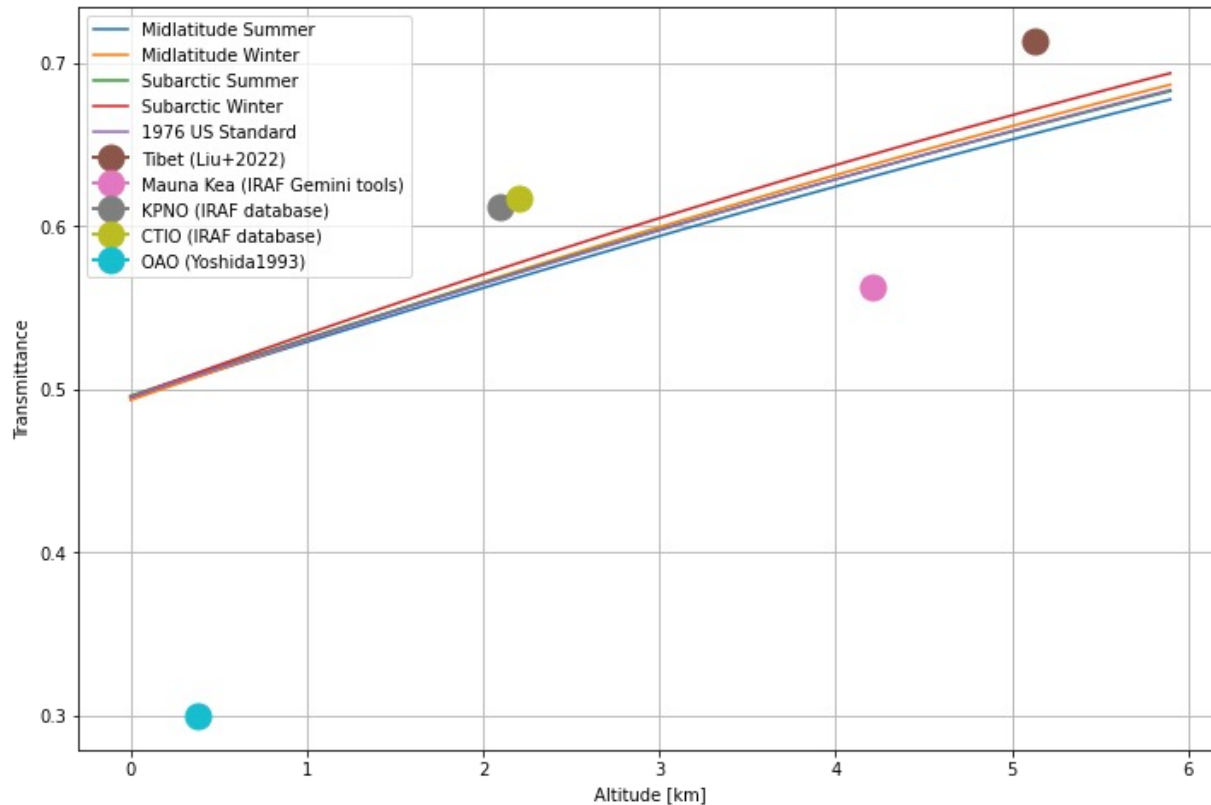


- ものすごく悪いわけではない
- 標高依存性が大きすぎるわけでもない

国内低標高ではモデルより悪くなることは予想される

(日本特有の水蒸気、人間活動によるエアロゾル) → 文献調査・実測を進める

u-band 透過率標高依存性



OAQデータは吉田道利氏のOAQ 188cm + SNGの評価値。
(必ずしも測光夜であったわけではなさそう)
柳澤氏提供による

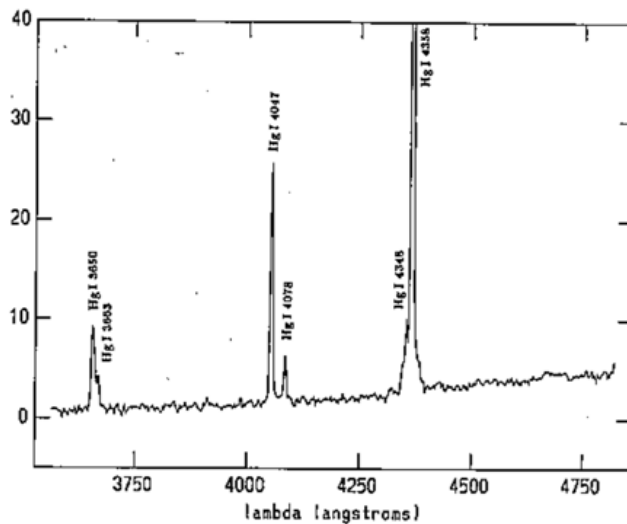
観測環境検討2: 空の輝度

文献調査

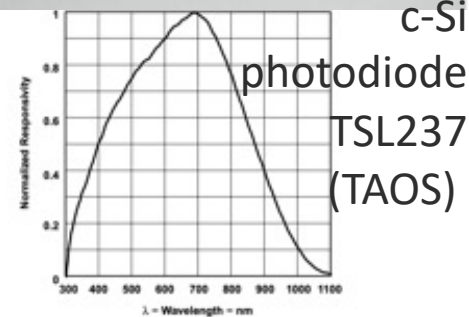
- APO: $\mu \sim 22.01$
[mag/arcsec²] [SDSS web page]
- 国内(特に最近は?) → 情報少ない

国内サイトで空輝度を測定する

- Sky Quality Meter (Unihedron社)改造
 - 標準フィルター・レンズ除去
 - SDSS b, g, rフィルター装着
- CMOSカメラ + 簡易分光器



岡山夜光輝線 (Iye+91)



c-Si photodiode TSL237 (TAOS)

4. まとめ

まとめ

- 「近紫外線(=300-400nm~u-band)観測」を目指して、
 1. 「この波長の感度に注力した観測装置」を
 2. 「低コスト・短期間で製作」して、
 3. 「手近な望遠鏡(かなた)に装着して早期に観測」します。
- 「基礎検討」「観測環境調査」「外部資金確保」を進めています。
- 今年度内の装置製作・初期観測を目指します。

本WSにおいて、

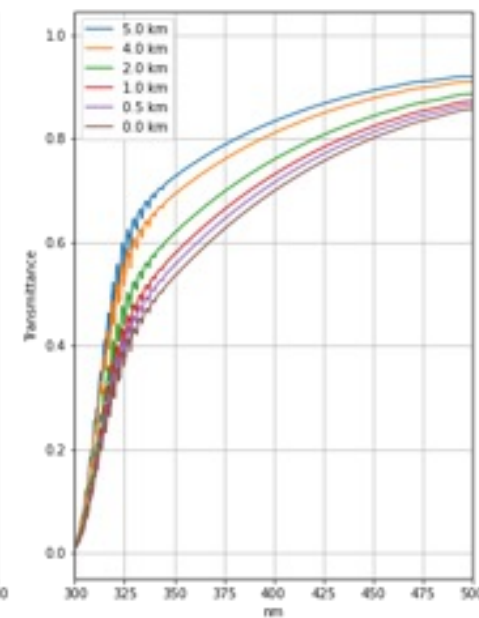
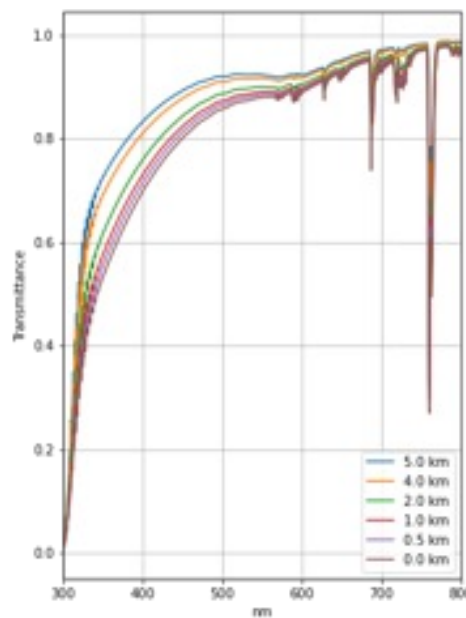
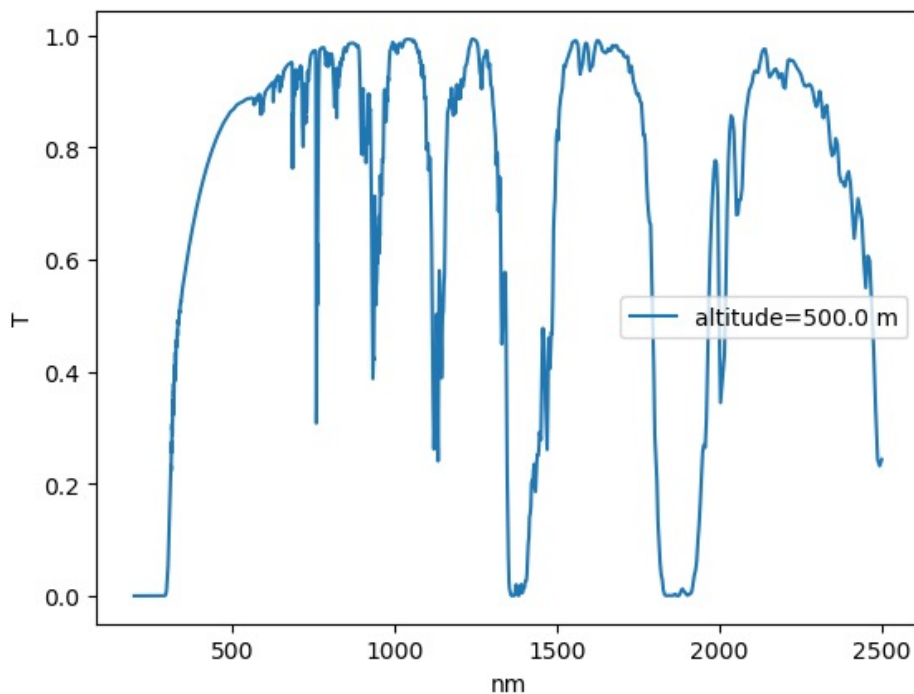
- サイエンスケース
- 観測技術（キャリブレーション等）
- 装置機能の改善・追加

の提案・議論をいただければ幸いです。

BACKUP SLIDS

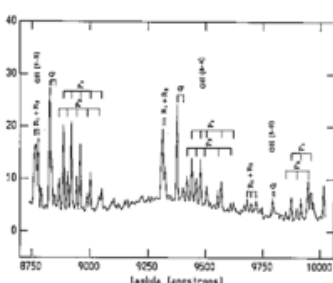
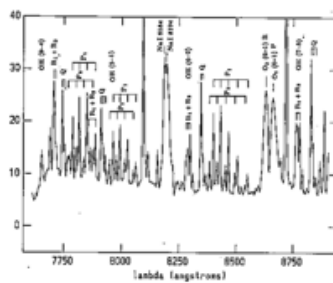
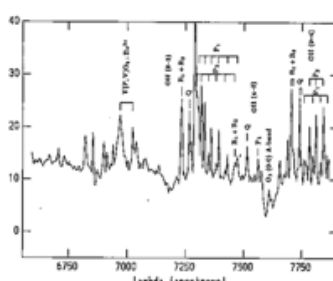
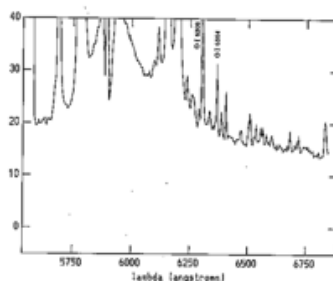
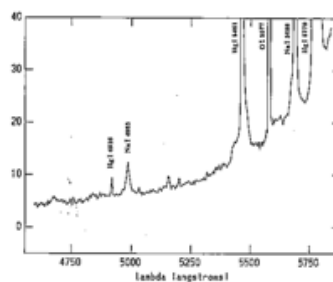
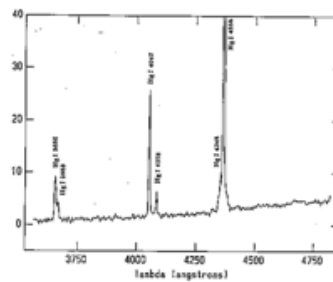
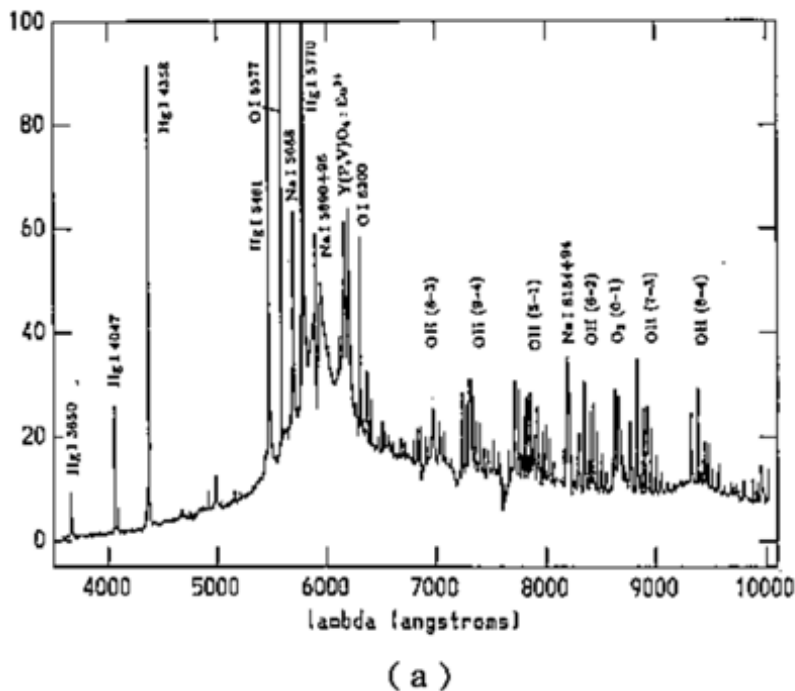
LOWTRAN7 model

- FORTARANベースの大気モデル
- 0 to 50,000 cm^{-1} at a resolution of 20 cm^{-1} .
- wrapper pythonモジュール *lowtran* から利用可能
 - <https://github.com/space-physics/lowtran>



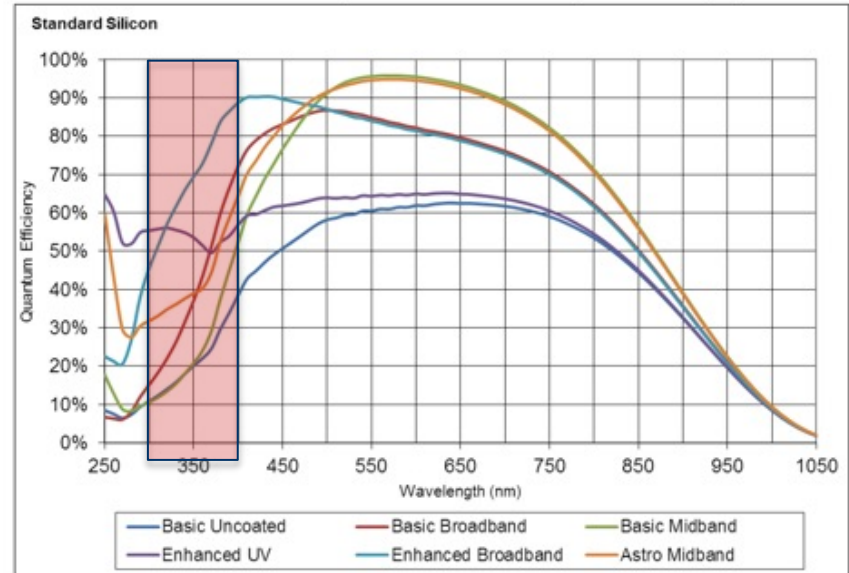
岡山天体物理観測所の夜光スペクトル

□ 家, 西原, 菅井 (1991), 国立天文台報, 1, 221



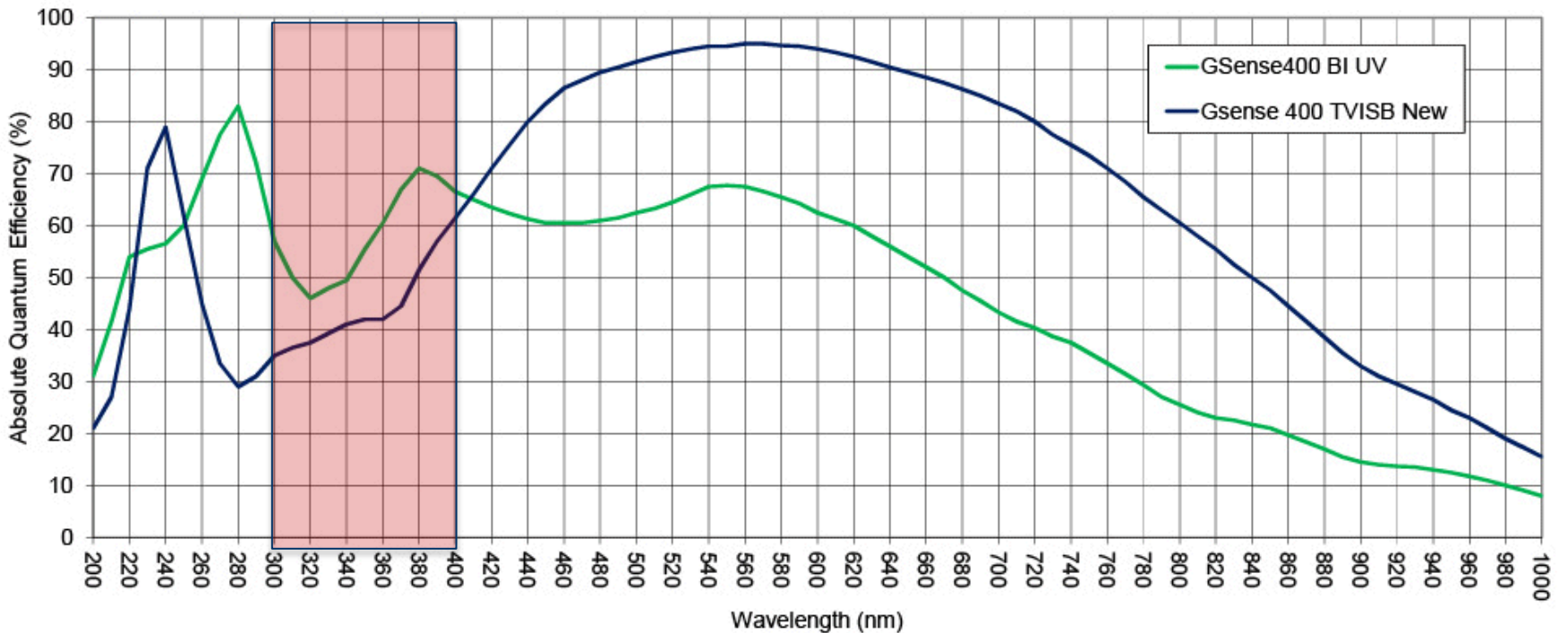
QEs of Sensors

TYPICAL SPECTRAL RESPONSE (At -35 °C for Standard Silicon, -85 °C for Deep Depleted Silicon)



Teledyne e2v
42series

GSense400



SQM

