

CTA報告 181 :

大・中口径望遠鏡カメラSiPM化に向けた、集光器への多層膜蒸着による夜光低減の検討

芳賀純也^A, 奥村暁^{AB}, 田島宏康^A

名大ISEE^A, 名大KMIA

日本物理学会 第76回年次会大会 3/14

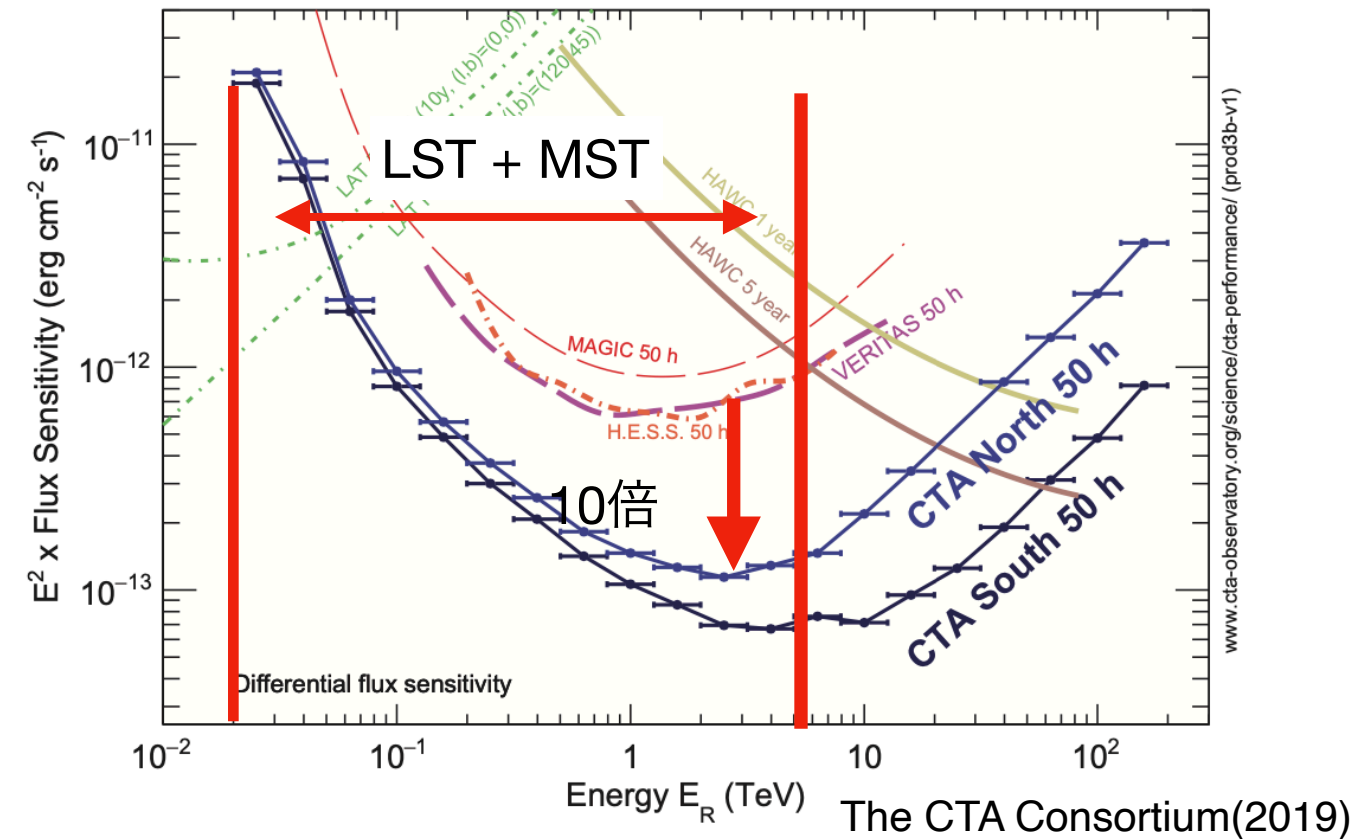
CTA計画

CTA : Cherenkov Telescope Array

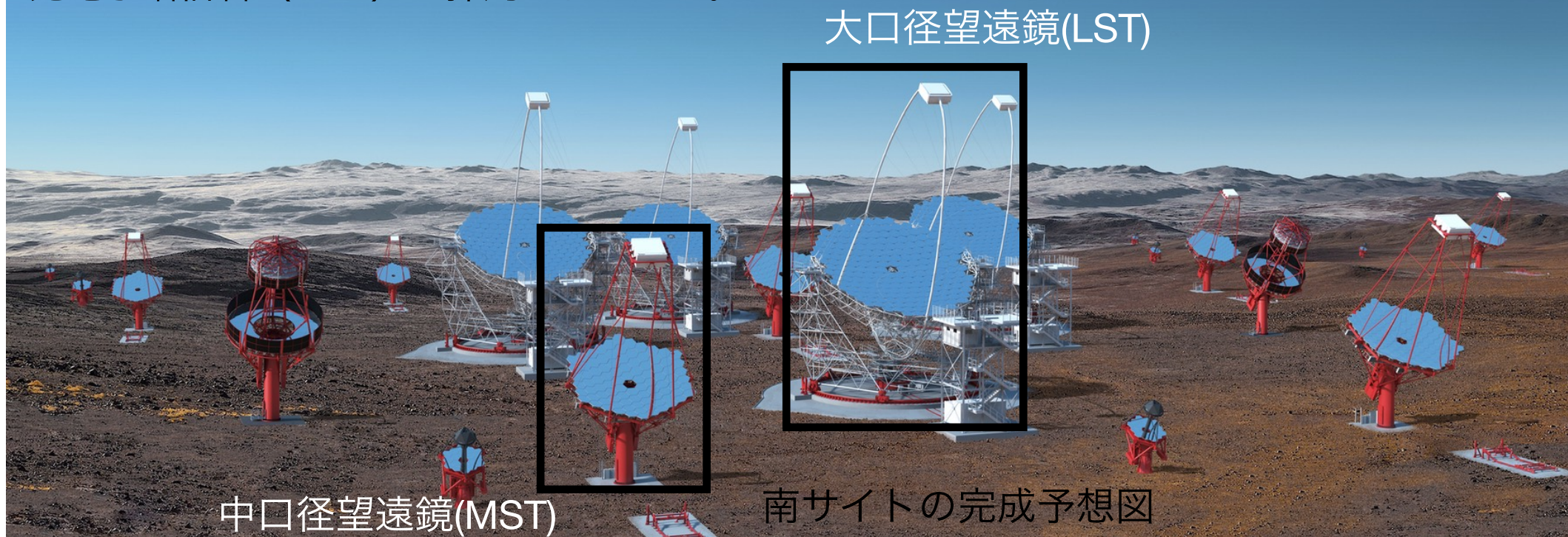
次世代のガンマ線天文台

- ・ 大中小の望遠鏡を配置
- ・ 現行の望遠鏡に比べ、
 - ・ 10倍の感度向上
 - ・ 広いエネルギー領域 (20 GeV - 300 TeV)

現在の詳しい開発状況は「CTA報告172：全体報告」を参照



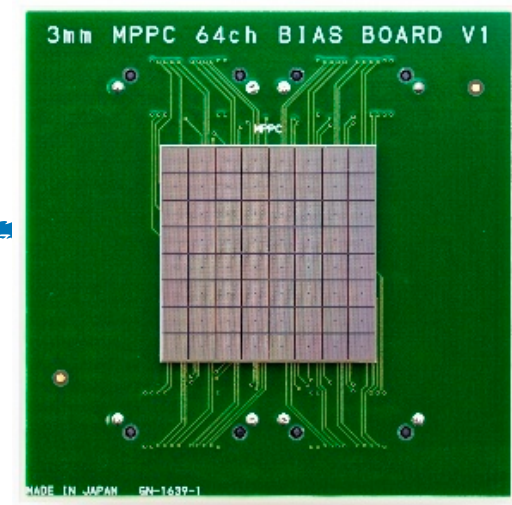
LSTとMSTの焦点面カメラでは
光電子増倍管 (PMT) が採用されている。



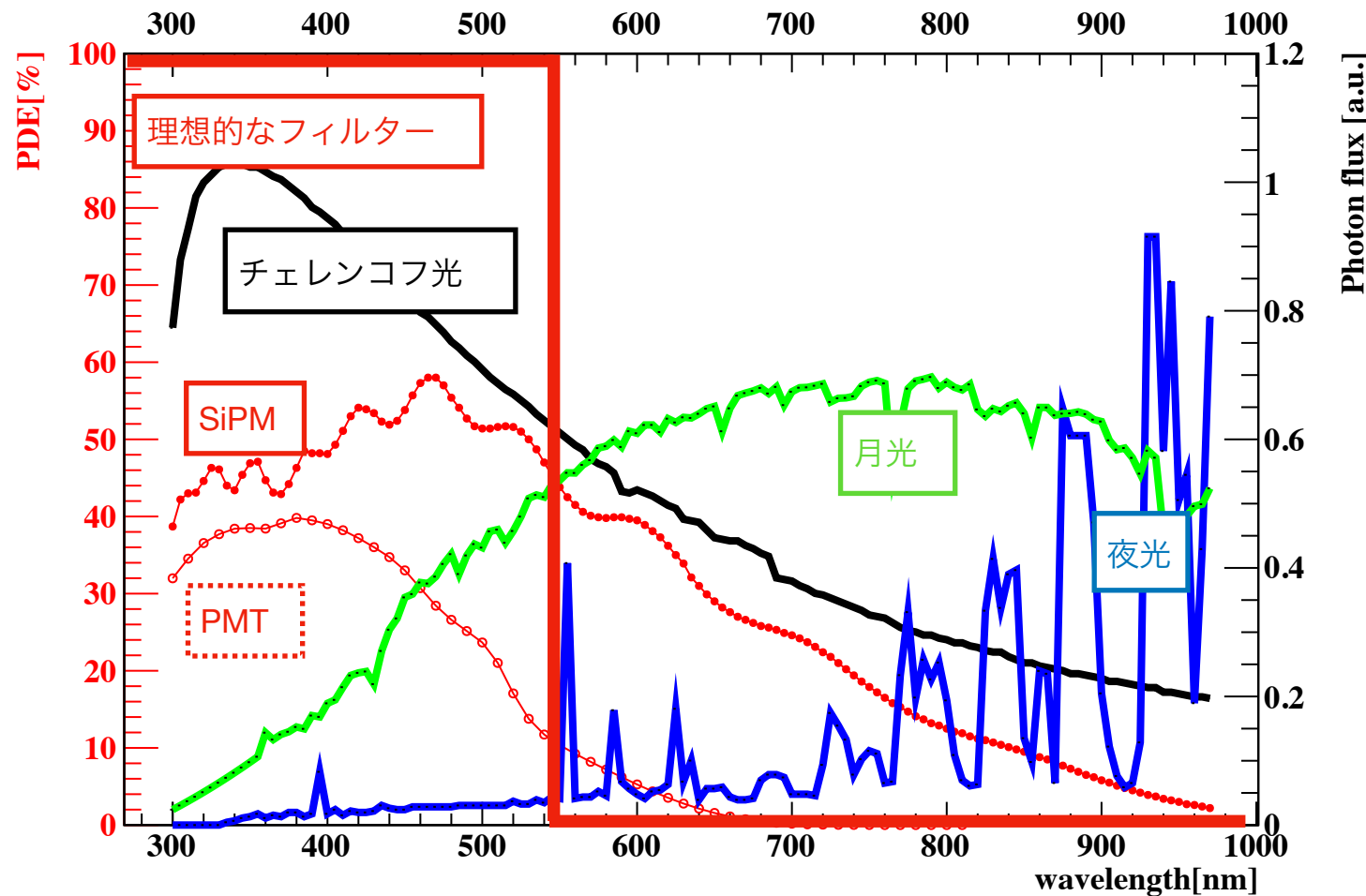
写真提供：Gabriel Pérez Díaz, IAC / Marc-André Besel, C

将来的なLST・MSTのカメラSiPM化

我々は将来的な展望として、半導体光検出器
(Silicon PhotoMultiplier, SiPM) の採用を検討している。



Nakamura et al.(2019)



SiPMの利点

- ・ PMTに比べ高い光検出効率 → チェレンコフ光の検出量が1.5倍
- ・ 受光量に起因する劣化が起きないため月光下での観測が可能となる。 → 観測時間の拡大

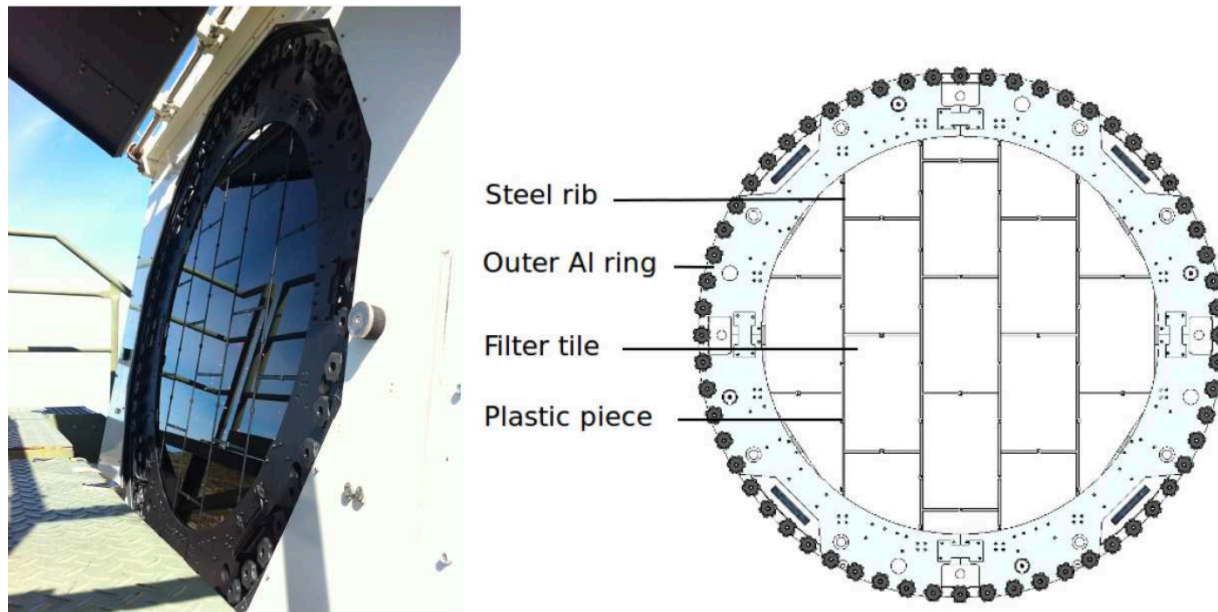
SiPMの短所

- ・ PMTに比べ、長波長の夜光への感度が高い → 夜光検出量が4.7倍
- チェレンコフ光の夜光に対するSN比の悪化
- 550 nm程度にカットオフを持つフィルターが必要

バンドパスフィルター

先行研究の例

1.MAGIC（ガラスによる吸収型）

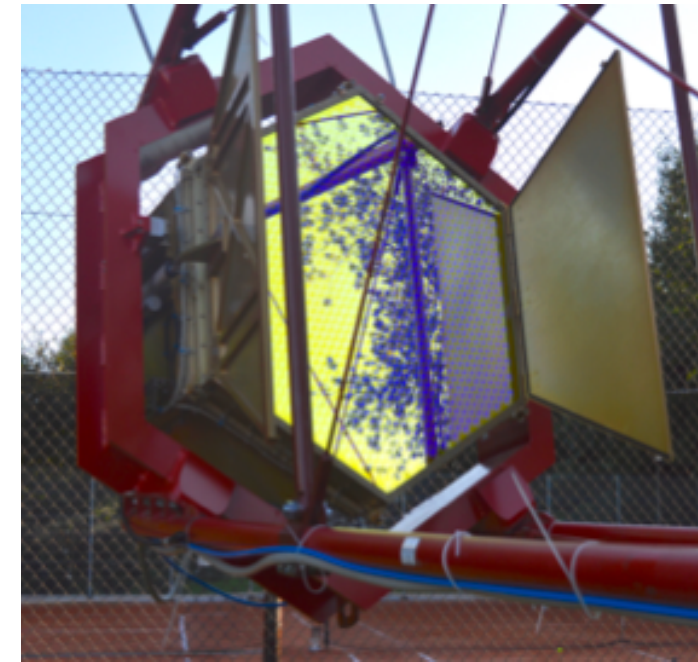


M.L.Ahnen et al. (2017)

1の長所と短所

- ：長波長の光をほとんど落とすことが可能
- ✗：カットオフ位置の調整が困難
- ✗：つけ外しの手間があり、台数の多いCTAでの運用は現実的でない

2.SST-1M（多層膜による反射型）



<https://www.cta-observatory.org/cta-prototype-telescope-sst-1m-catches-first-glimpse-sky/>

2の長所と短所

- ：カットオフ位置の調整が可能
- ✗：オプティカルクロストーク（OCT）の増加
- ✗：LST・MSTでの使用に向けた巨大化は技術的に困難

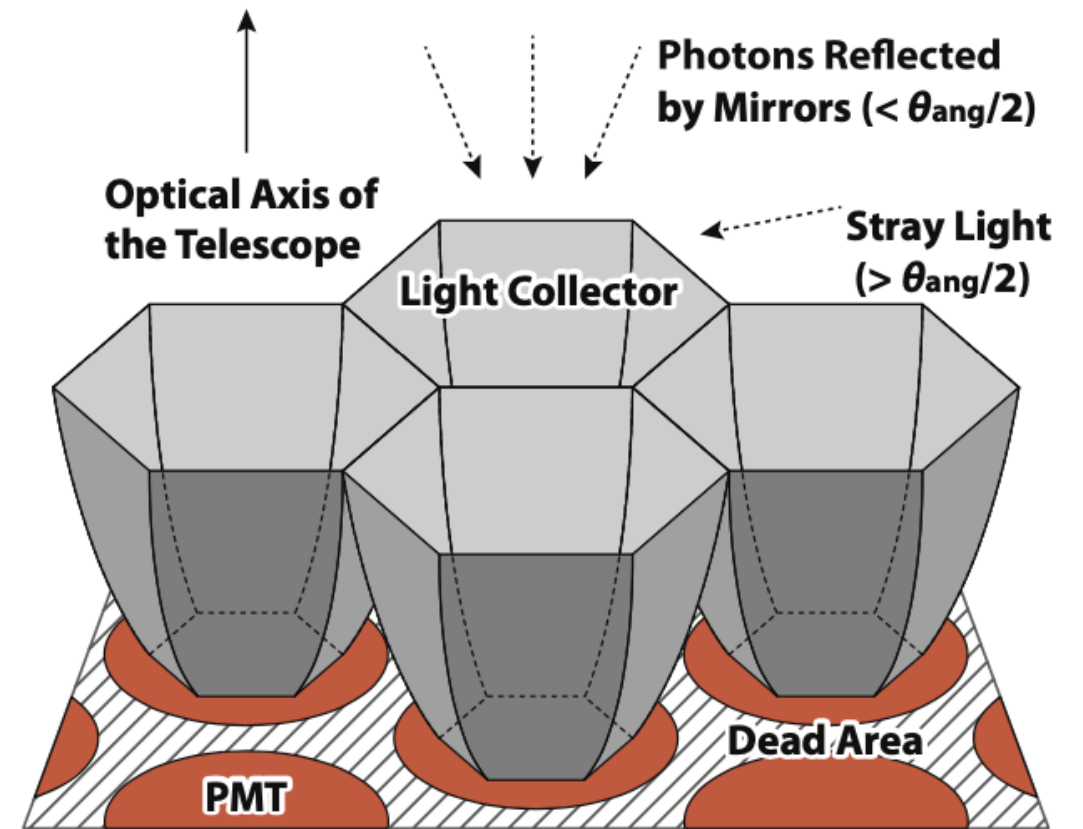


第3の手法として、集光器への多層膜蒸着による手法が製作技術的に可能かを検討した

集光器 (Light Collector)

集光器の役割

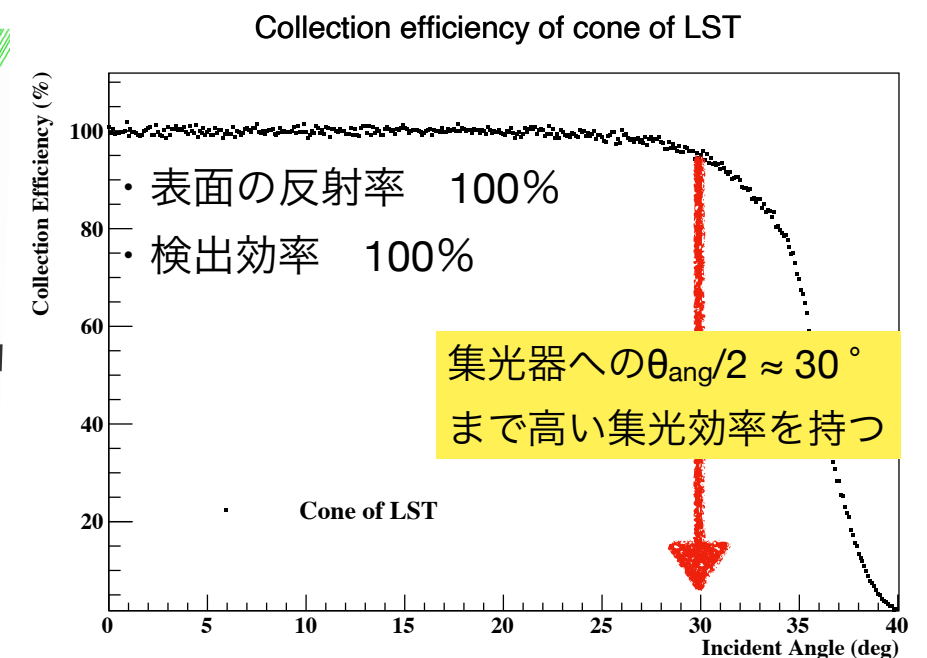
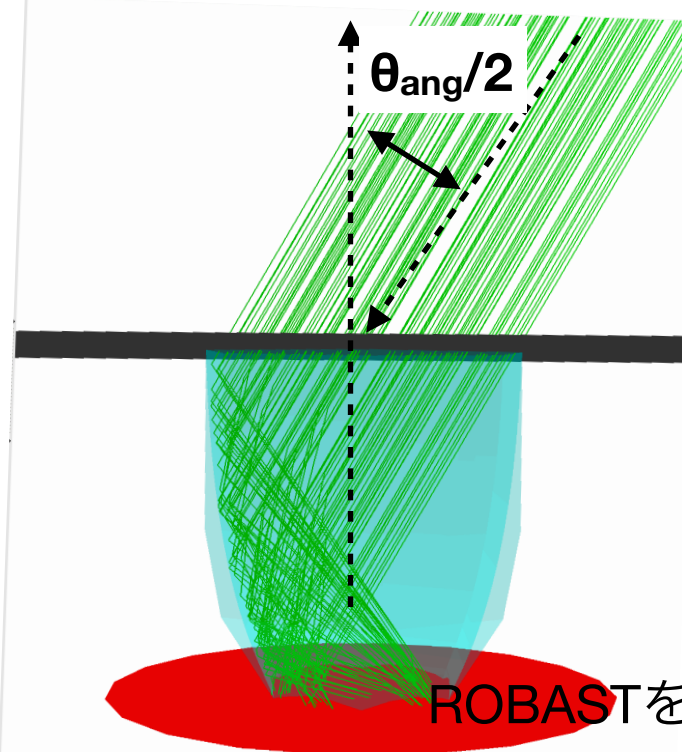
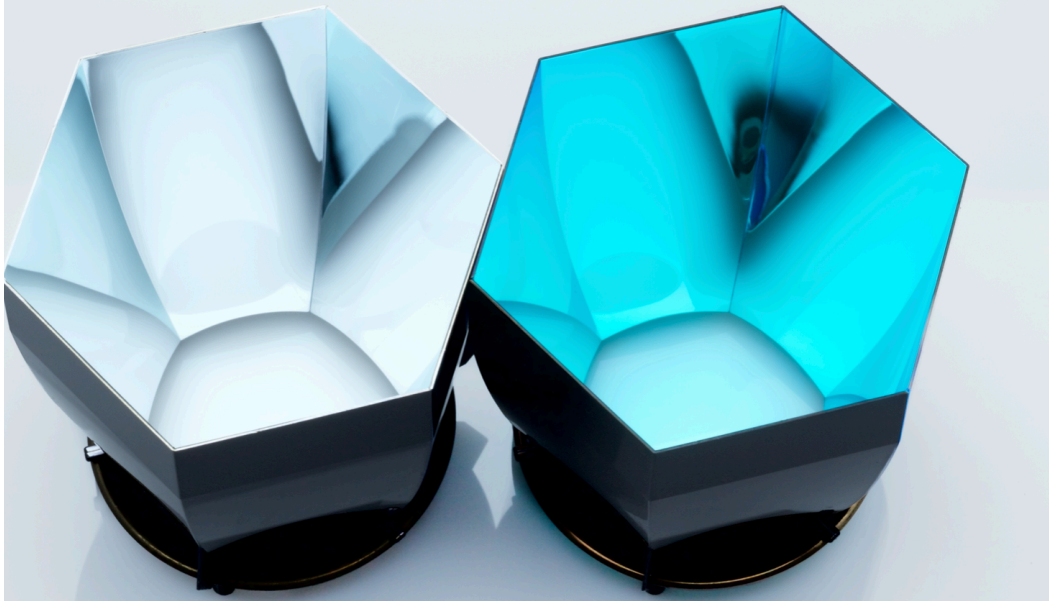
- ・ 焦点面での不感領域を減らす。
- ・ 望遠鏡の主鏡以外からの入る光（バックグラウンド）を低減
- ・ **長波長の夜光を吸収（本研究）**



A.Okumura (2012)

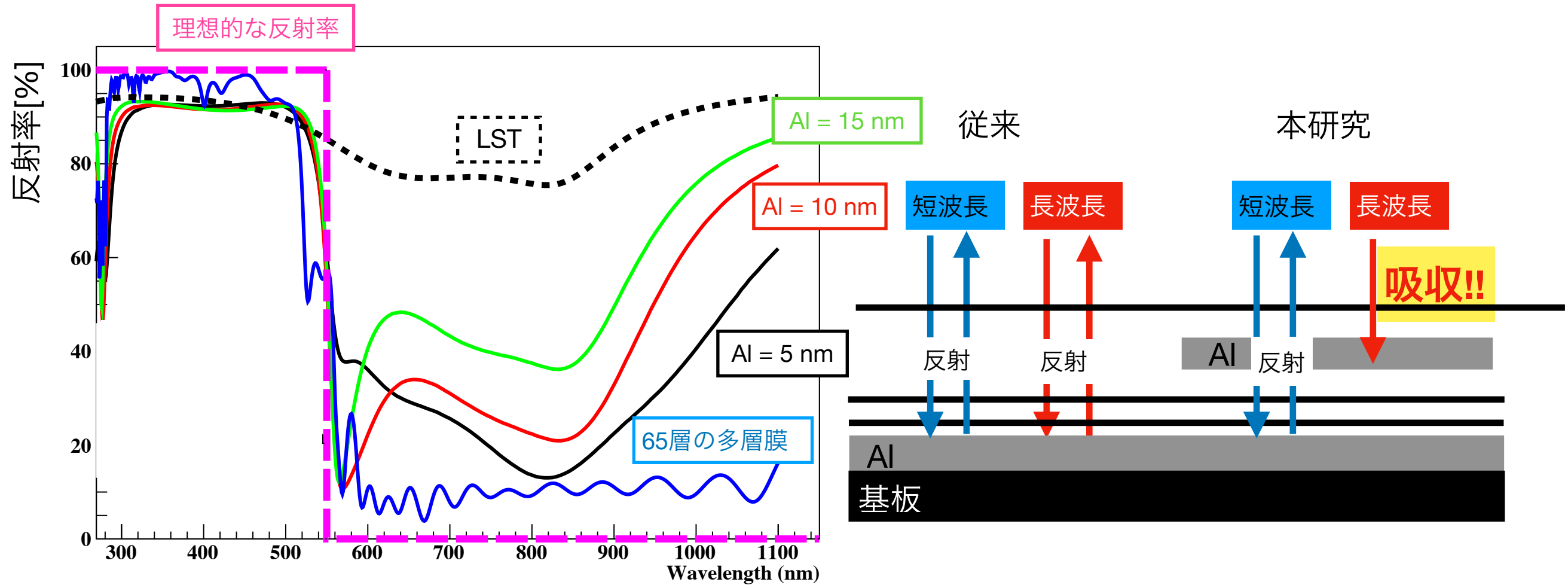
LST集光器

試作集光器



ROBASTを用いた集光効率シミュレーション

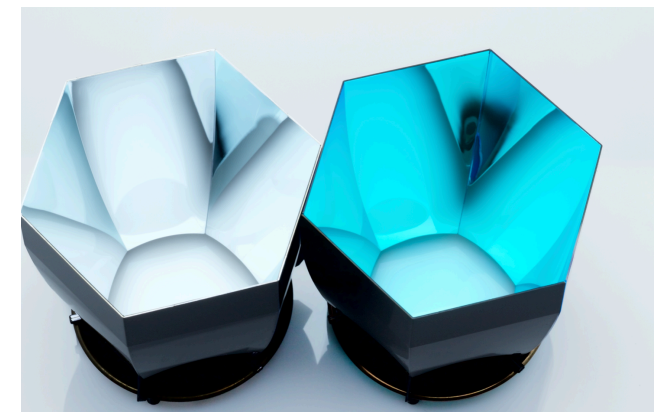
多層膜設計



- ・ 数十層の多層膜で理想に近い反射率を原理的には実現可能（例：65層）。
しかし総膜厚が大きく、基板の変形や製作費用の増大を招く→総膜厚を抑えたフィルターが必要

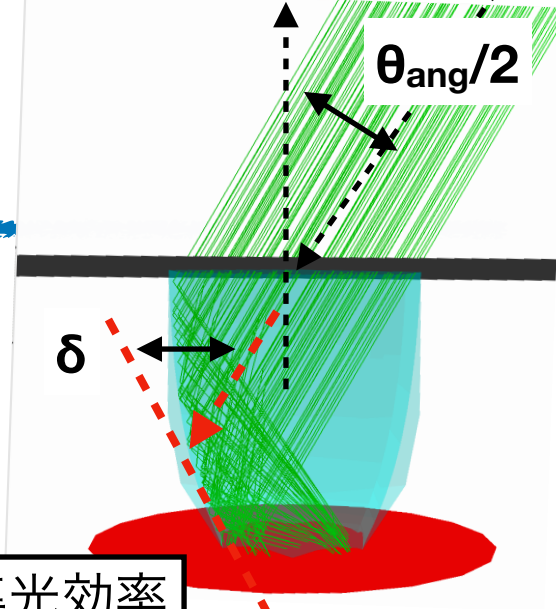
本研究

- ・ アルミ（Al）層を2層持つ、550 nm以上の光を吸収する計8層の新しい多層膜を提案し（東海光学）、それを蒸着した集光器が技術的に製作可能かを確かめた。
- ・ 試作品（Al層膜厚15 nm）の集光率、検出量のシミュレーション結果などを報告する

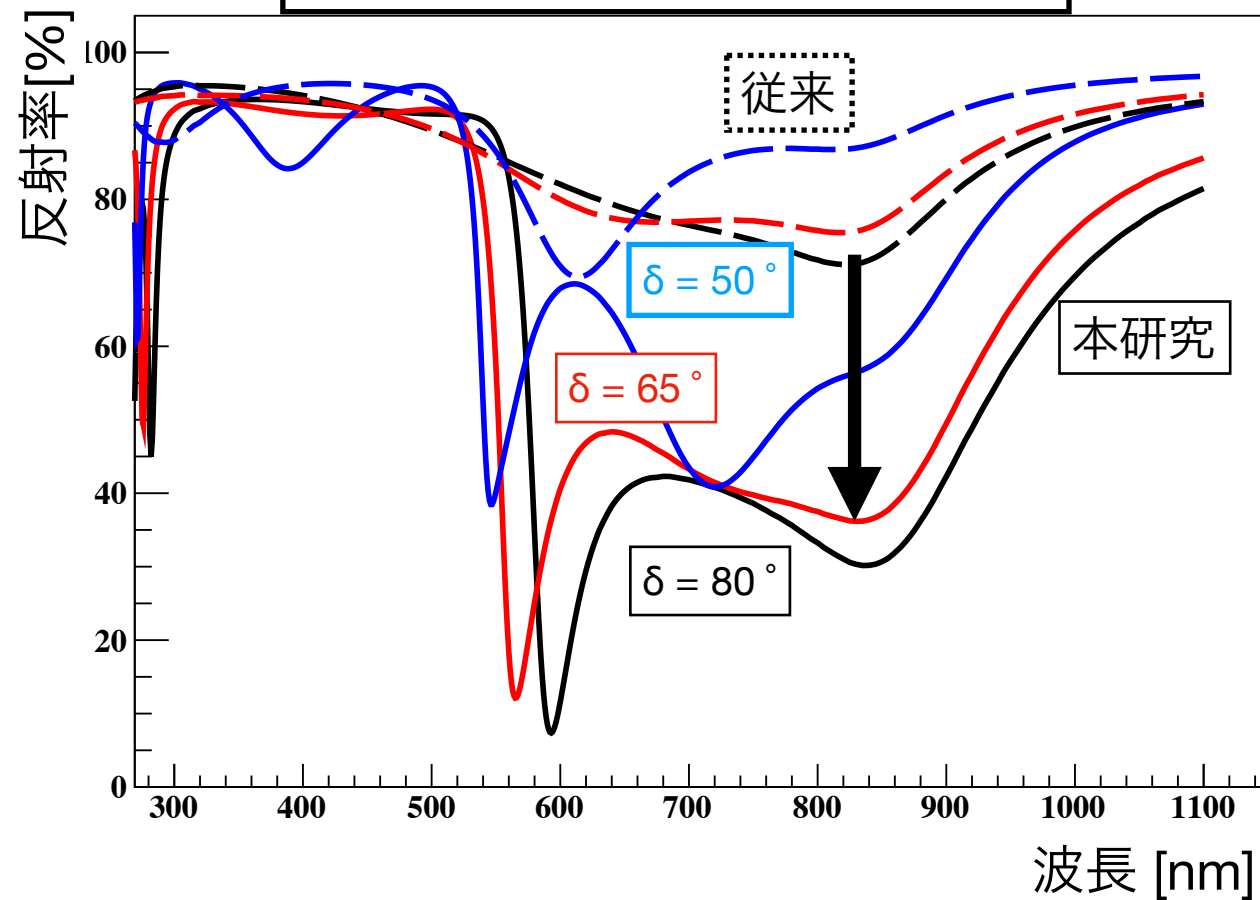


集光器内面に成膜した場合の集光効率

光線追跡シミュレーターROBASTを用いたシミュレーション結果

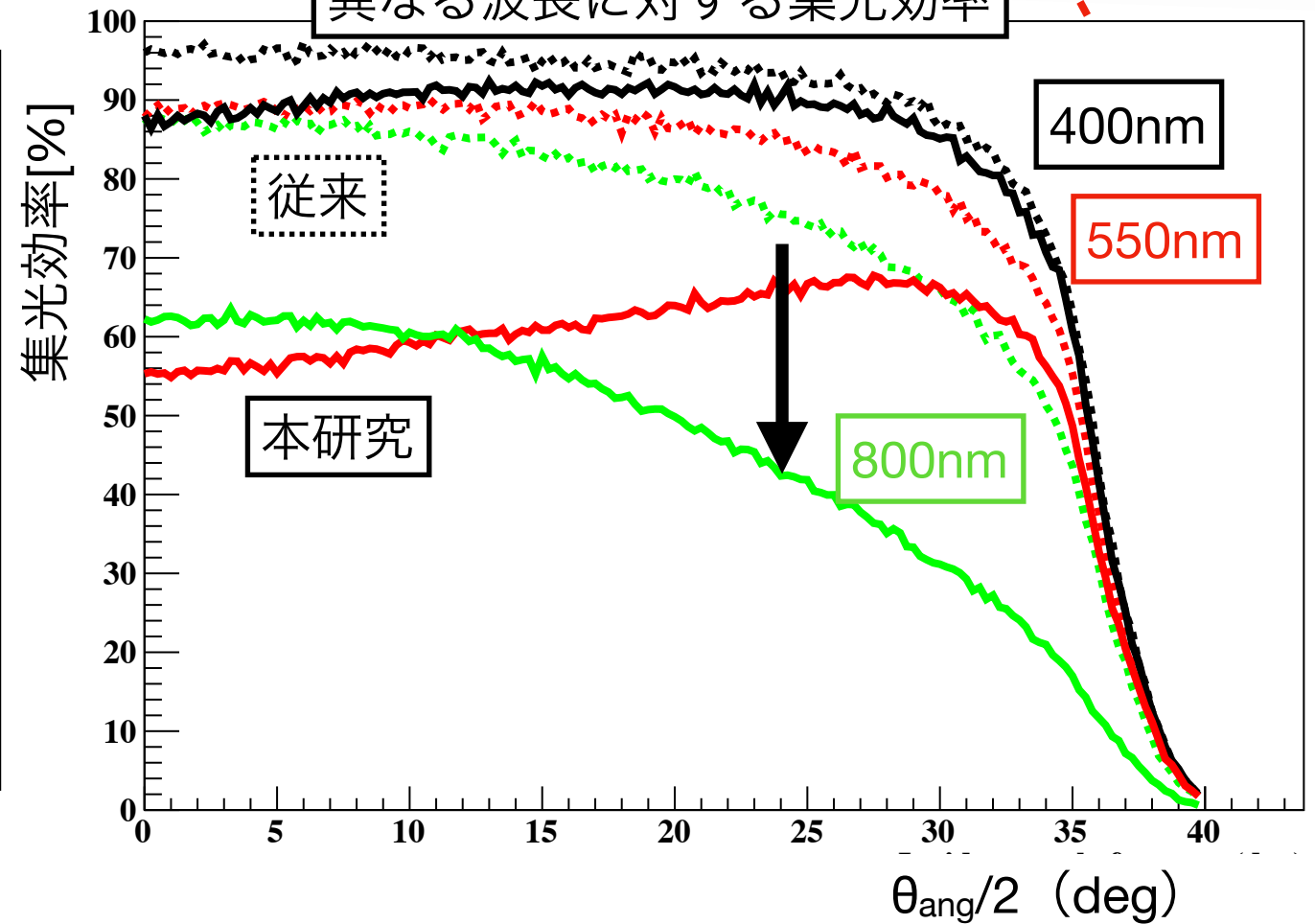


異なる入射角度に対する反射率



50 - 80 °程度の入射角度範囲で従来に比べ長波長の反射率を落とすことを確認した。

異なる波長に対する集光効率

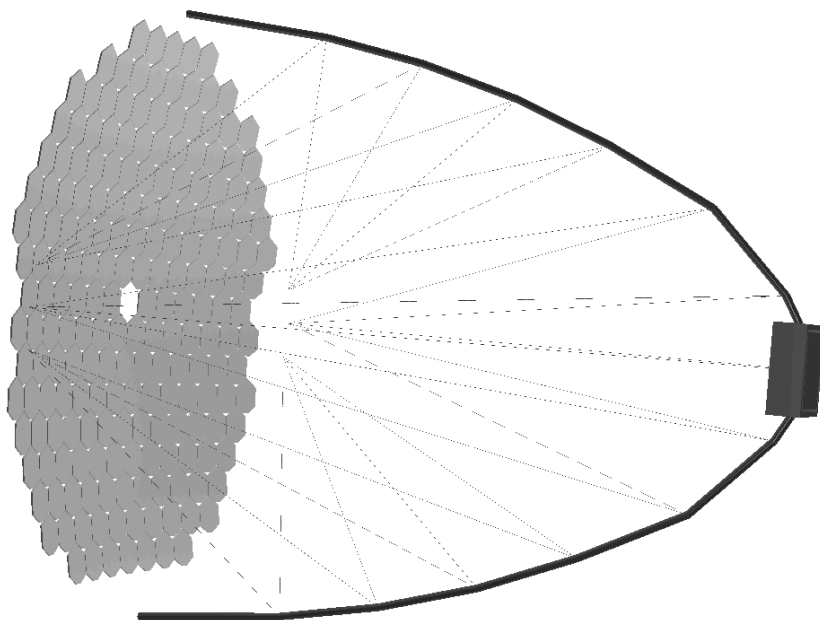
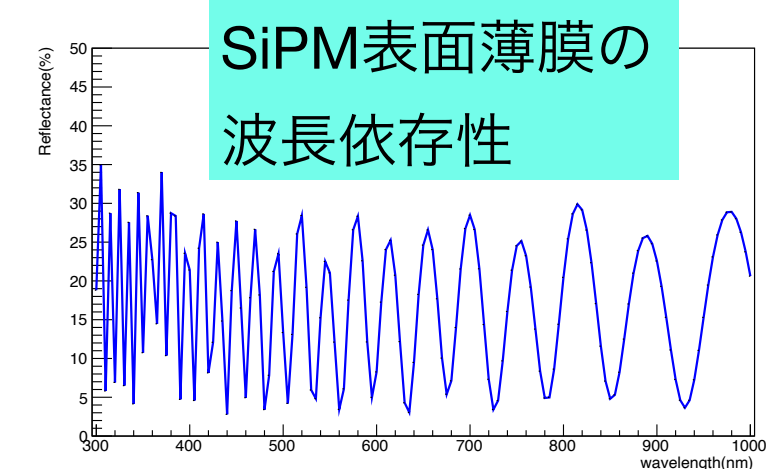
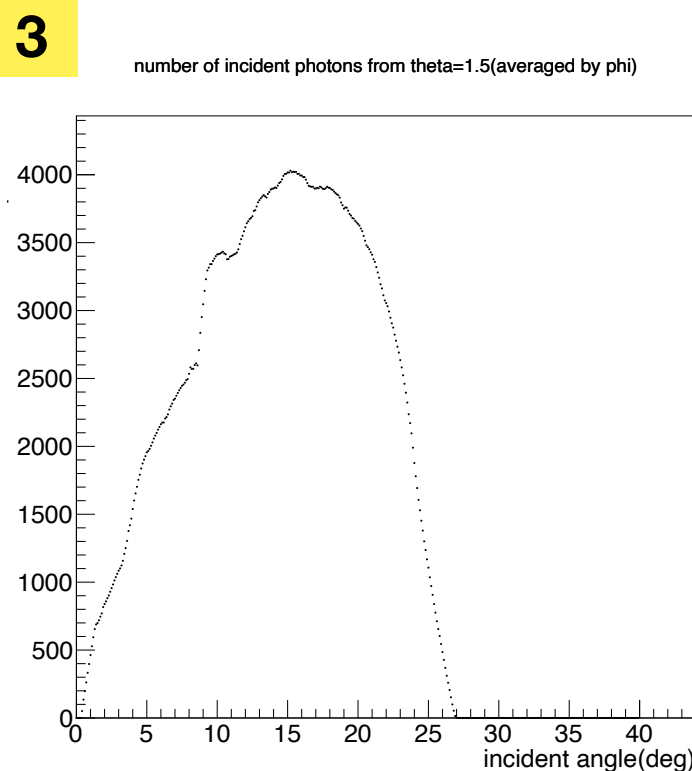
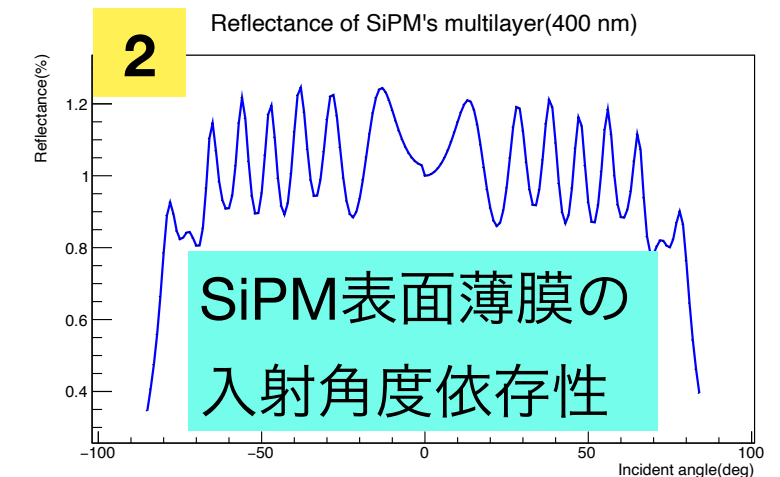
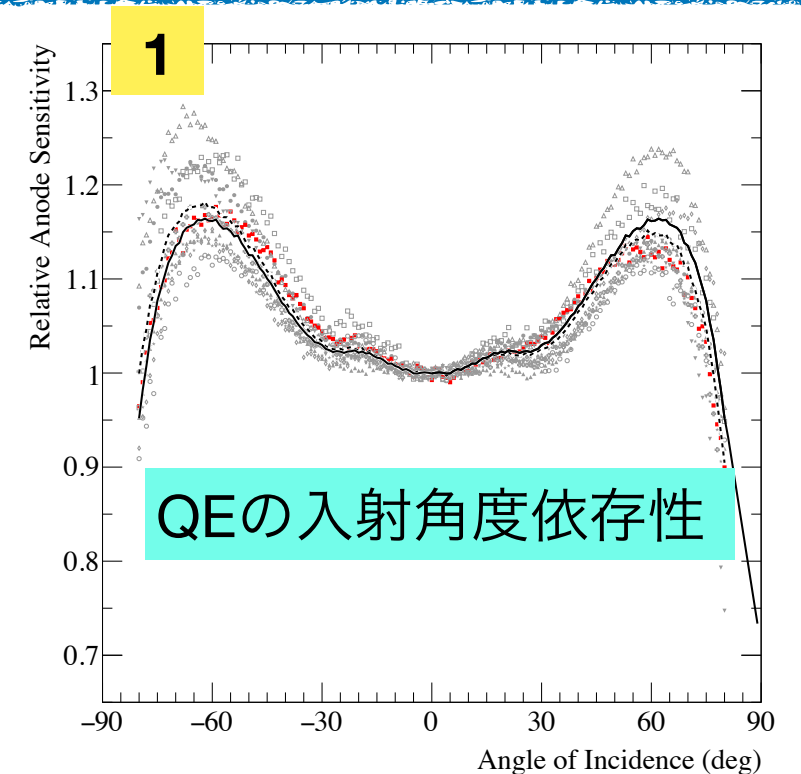


多層膜を蒸着した集光器は、短波長では従来のコーティングと同程度の集光効率を得られ、長波長で集光効率を落とすことがわかった。

この集光効率に加え、望遠鏡（LST）の要素を考慮して検出量の概算を求める

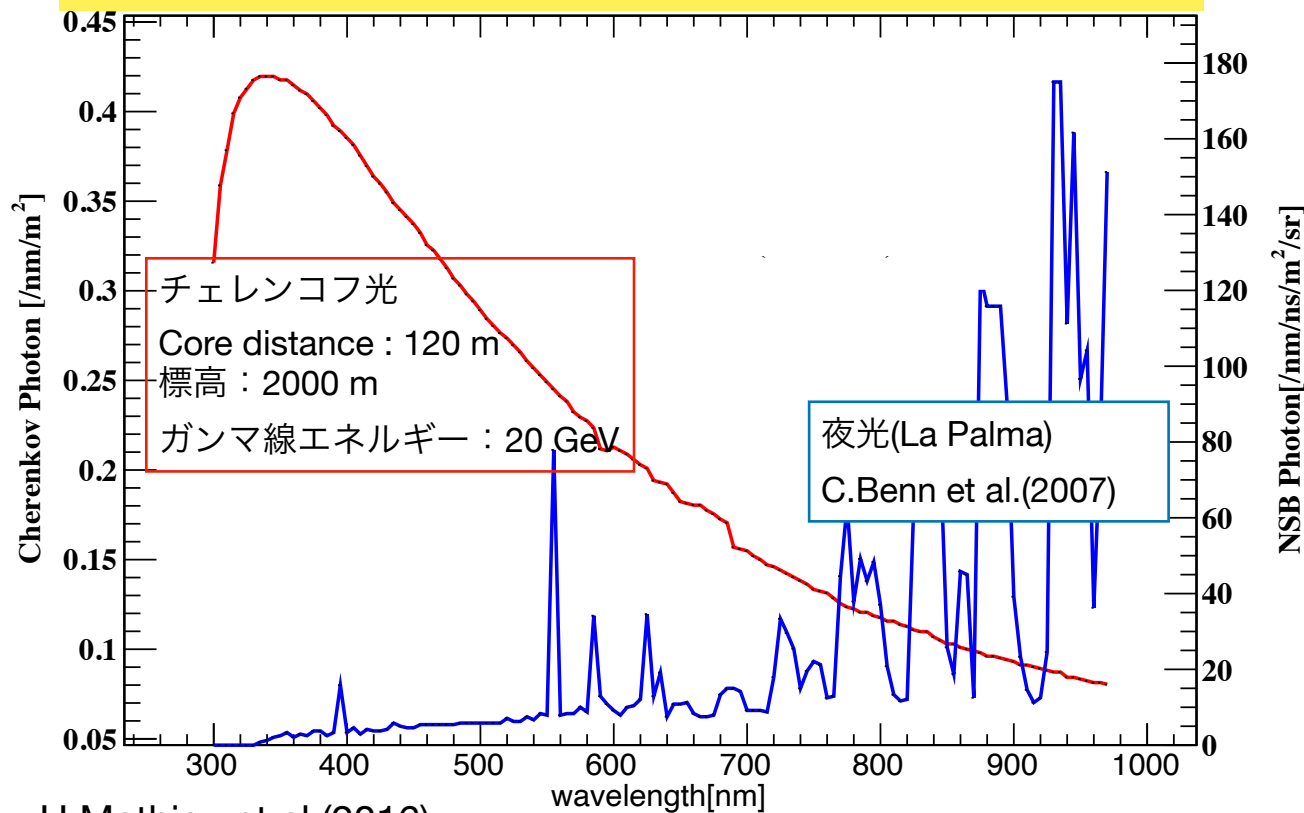
検出量を求める上で考慮した点

1. PMTの量子効率 (QE) の入射角度依存性
2. SiPM表面薄膜の反射率の入射角度・波長依存性
3. 望遠鏡の焦点面への入射角度分布
→ 集光器への入射角度分布



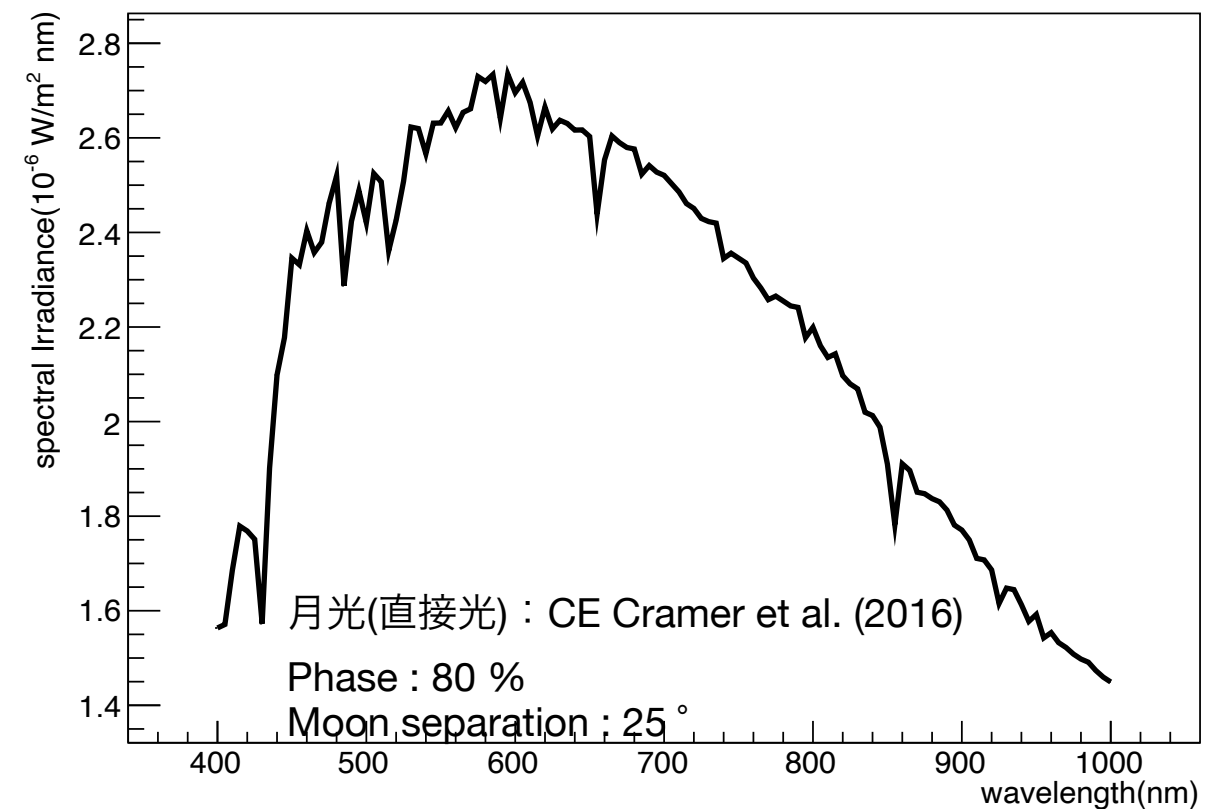
多層膜案ごとの検出量のシミュレーション結果

チェレンコフ光と夜光のスペクトルデータ



H.Mathieu et al.(2016)

月光のスペクトルデータ



	チェレンコフ光(20GeV) [phe/cone]	夜光 [phe/cone/5ns]	月光 [phe/cone/5ns]	S/N (月光なし) 相対値	S/N (月光あり) 相対値
(PMT)	1.5倍 🍑 23.0	1.4倍 🍑 1.4	—	1.4	—
従来 (SiPM)	34.9	6.6	58.3	1.0	1.0
本研究 (SiPM)	31.6	4.7	44.9	1.1	1.0

- ・ 光検出器のSiPM化によってチェレンコフ光の検出量は1.5倍、夜光検出量は4.7倍となる。
- ・ 本研究のフィルターで、チェレンコフ光は1.5倍から1.4倍に減ってしまう。
- ・ 夜光を0.7倍に低減することができ、SN比が改善される。

多層膜案ごとの $\sqrt{S+N}/S$ の比較

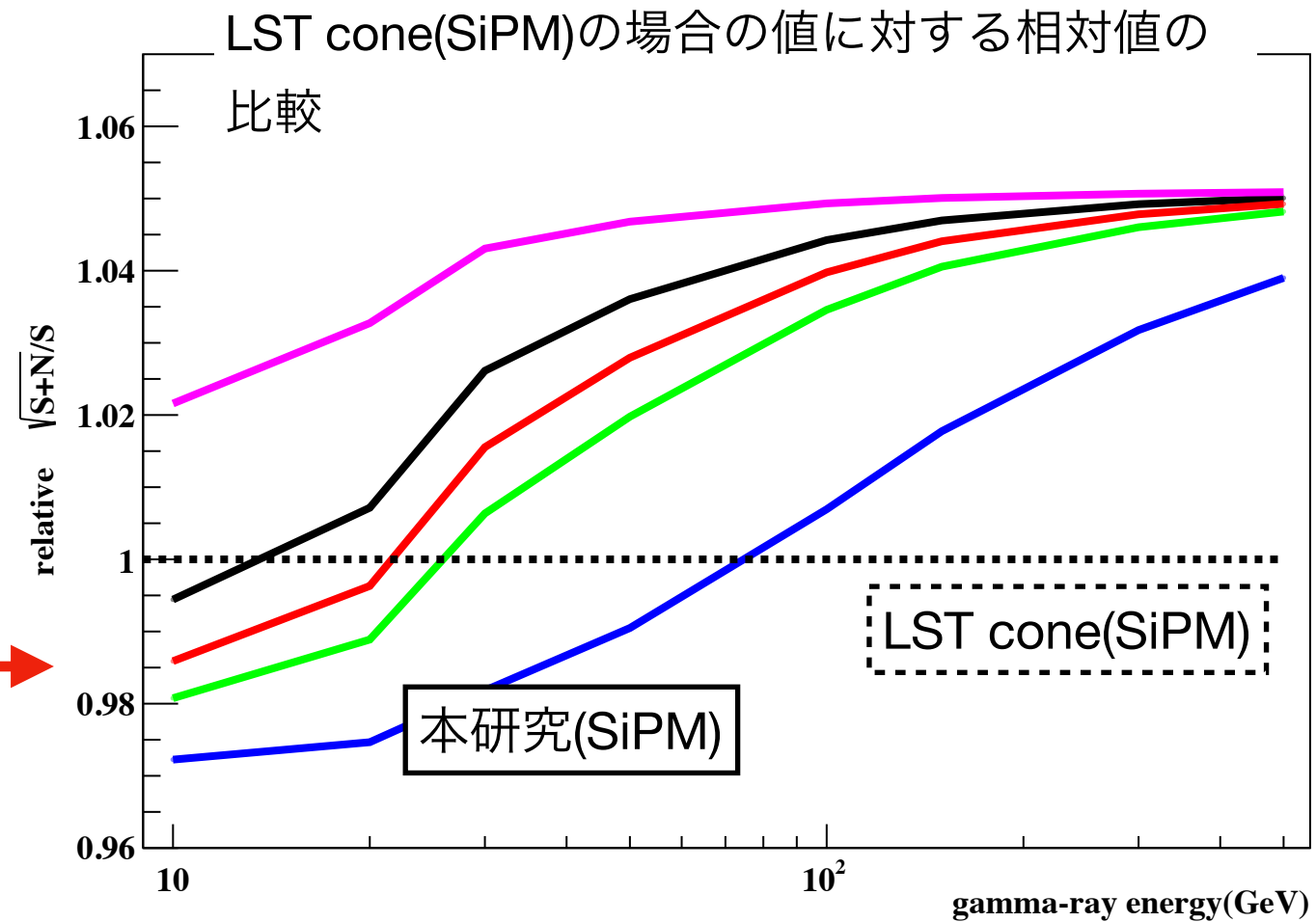
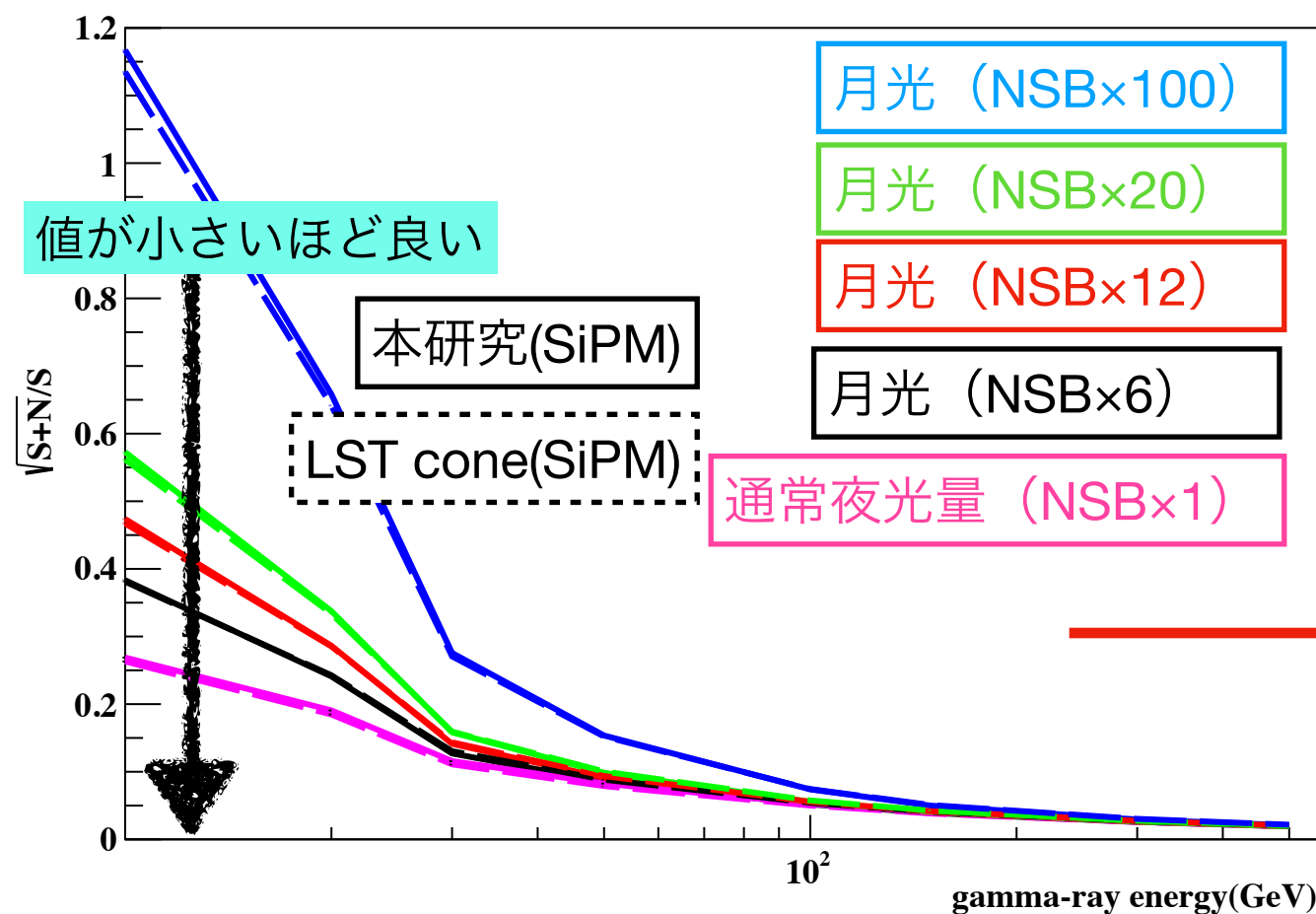
$$\frac{\sqrt{S+N}}{S} = \frac{\sqrt{\text{チェレンコフ光+夜光の検出量(5ns)}}}{\text{チェレンコフ光の検出量}}$$

エネルギー 分解能の
大小関係を見ることができる

$S \propto$ ガンマ線エネルギー

$\sqrt{S+N}$: 全検出量の揺らぎ

※実際には読み出し回路のノイズや
OCTを考慮する必要あり



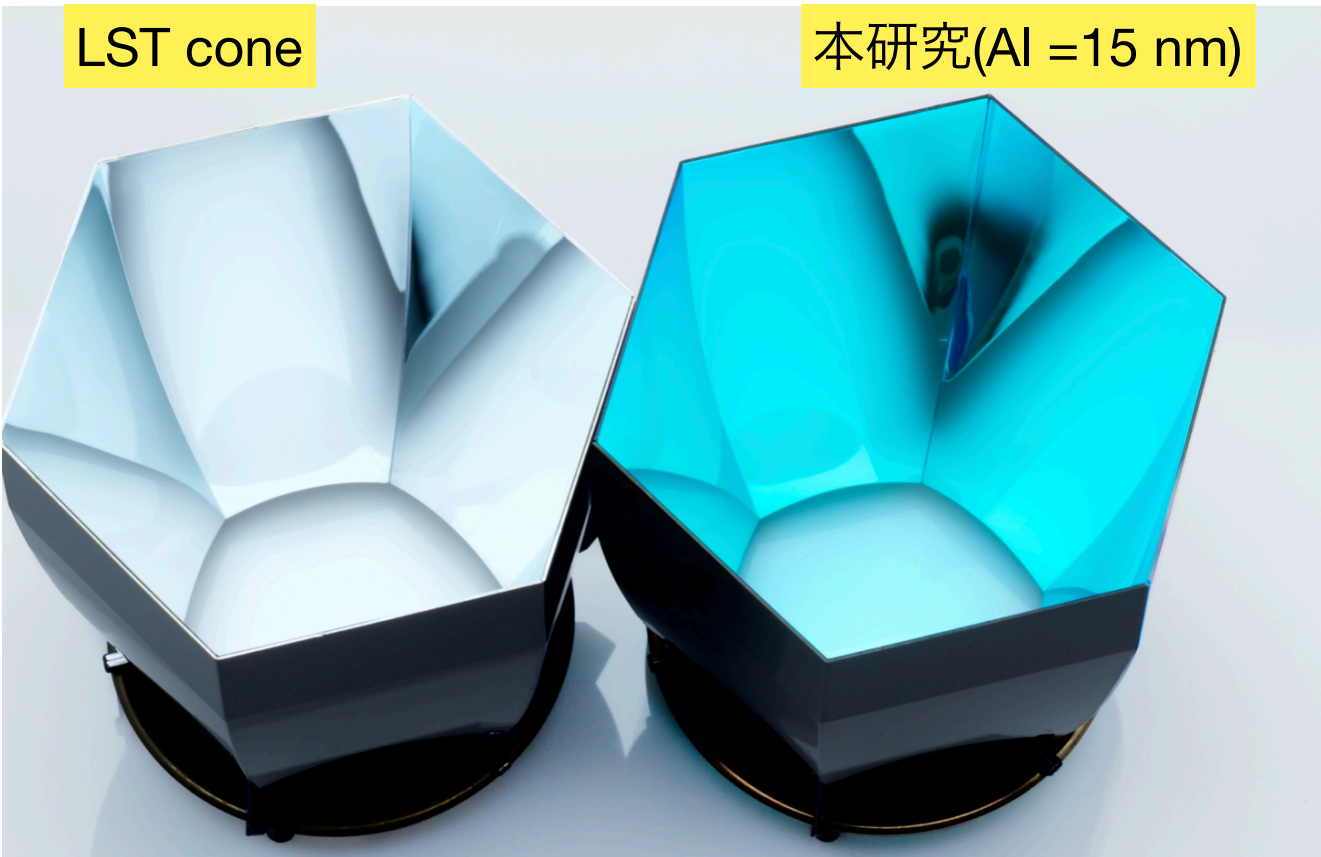
月光量が少ない場合、本研究のフィルターを使用することで値は悪化することがわかった。

月光量が少ない場合ではシグナルがノイズに比べ十分に多いため、 $1/\sqrt{S}$ に比例し、より多くのシグナルを集めることが求められる。改善にはカットオフ位置の調整が必要。

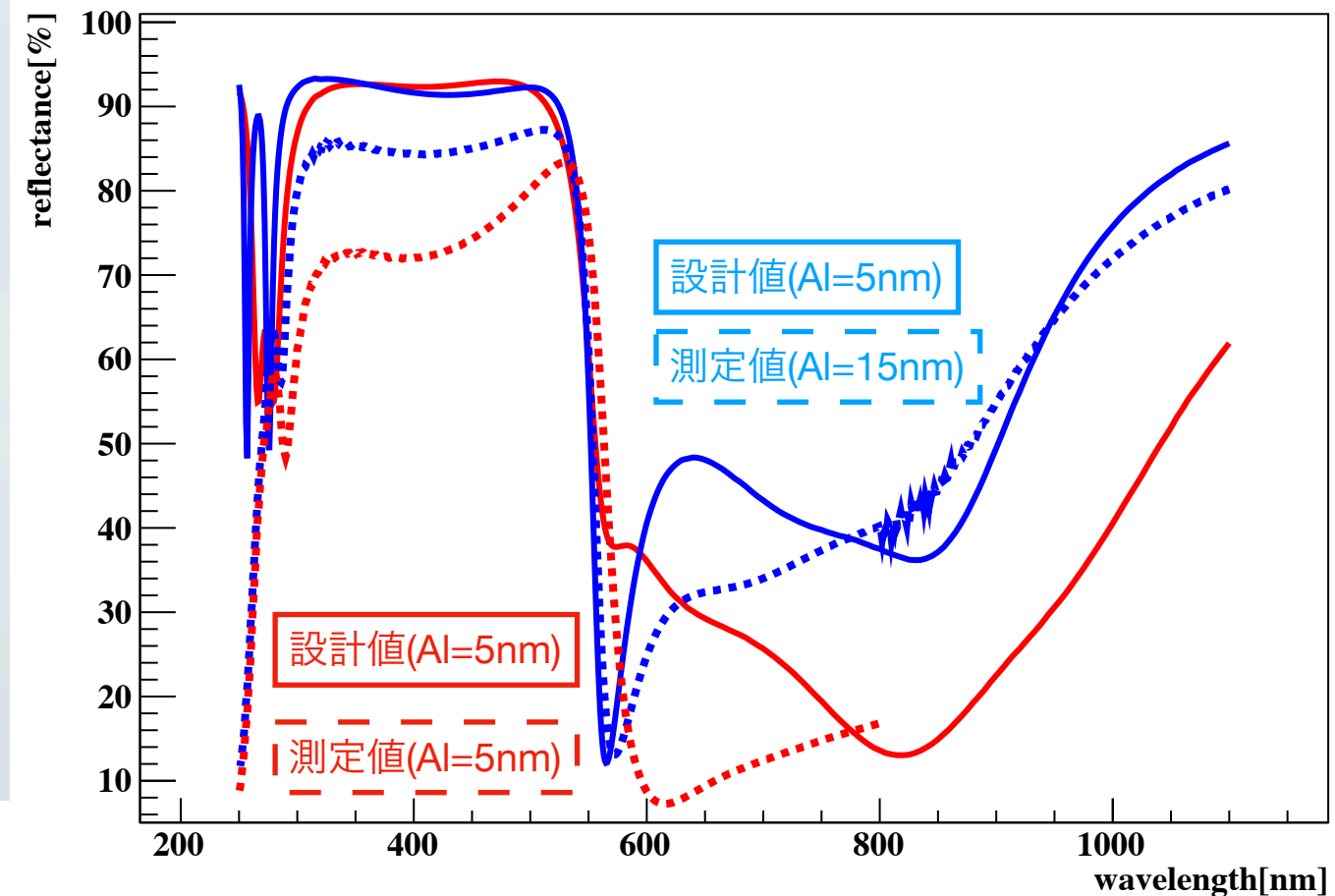
試作品

LST cone

本研究(Al =15 nm)



設計値と測定値の比較



東海光学によってAl層（膜厚15 nm）を含んだ多層膜を蒸着した集光器の試作が完成し、技術的に製作可能であることが明らかになった。今後実測を行い、性能評価を行う予定。

今後の課題

- ・ 短波長での反射率低下の改善。
- ・ Al層が15 nmより薄い場合での膜質の維持

まとめと展望

まとめ

- ・本研究では、集光器への多層膜蒸着を用いた夜光低減の検討を行なった。
- ・集光器への多層膜蒸着による手法は技術的に可能であることが明らかとなった。
- ・2つのAI層を持つ計8層の新しい多層膜を提案し（東海光学）、夜光の検出量を30 %程度低減が期待される。

展望

- ・実測を行い、試作の性能評価
- ・多層膜設計の改善