宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索に向けた遠赤外波長用サブミリサイズ集光器の開発

柏木 隆城

令和7年度 第1回 宇宙史研究センター(TCHoU)構成員会議・成果報告

2025/7/8

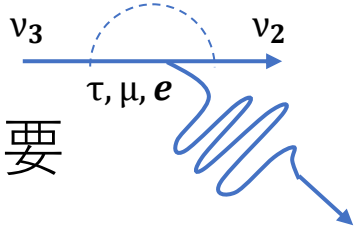
CosmicBackgroundNeutrinoDecay実験

- ニュートリノの質量絶対値は求められていない
- ニュートリノの寿命は非常に長い
- 崩壊現象を見るには多量のニュートリノが必要

→**宇宙背景ニュートリノ**

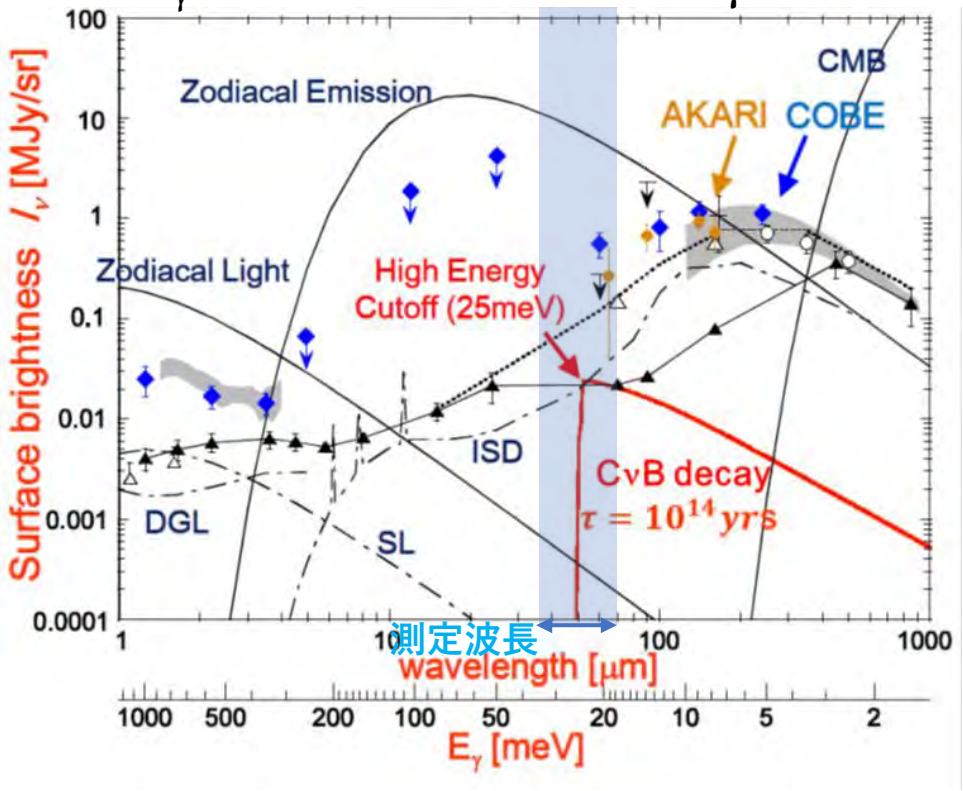
- ロケット実験を行い、ニュートリノの寿命下限値を$> 10^{12}$年から10^{14}年まで引き上げる

W $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$



ニュートリノ崩壊光のエネルギーを測定できれば絶対質量を決定できる

$$m_3 = \frac{m_3^2 - m_{1,2}^2}{2E_\gamma}$$



・目的

宇宙背景ニュートリノの崩壊光検出

崩壊光測定によるニュートリノの質量測定

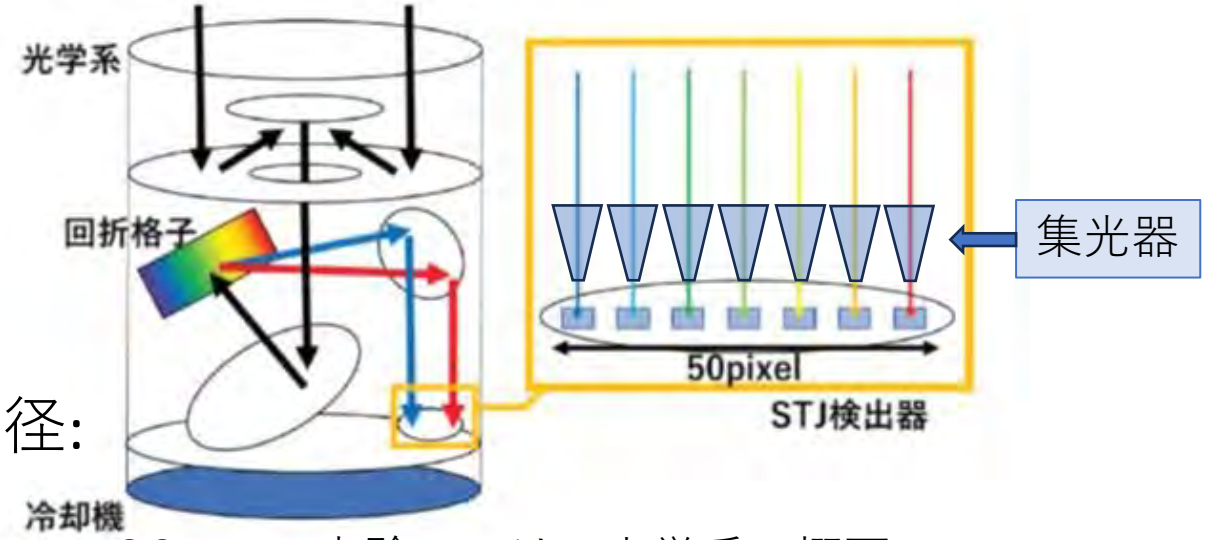
40～80μmの遠赤外光を測定

→Nb/Al-STJを使用する

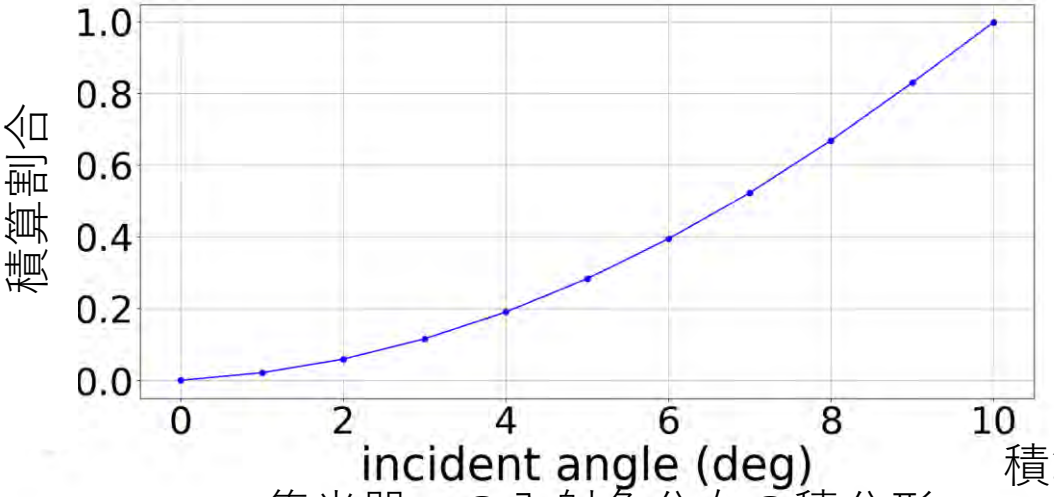
COBAND実験における光学系

- 回折格子で波長ごとに分光
  →Nb/Al STJに入射

- 光学系の回折限界による焦点面でのスポット径:
  直径400μm
- 40μm角のSTJに集光する必要がある
  →サブミリサイズ集光器の設計を行った

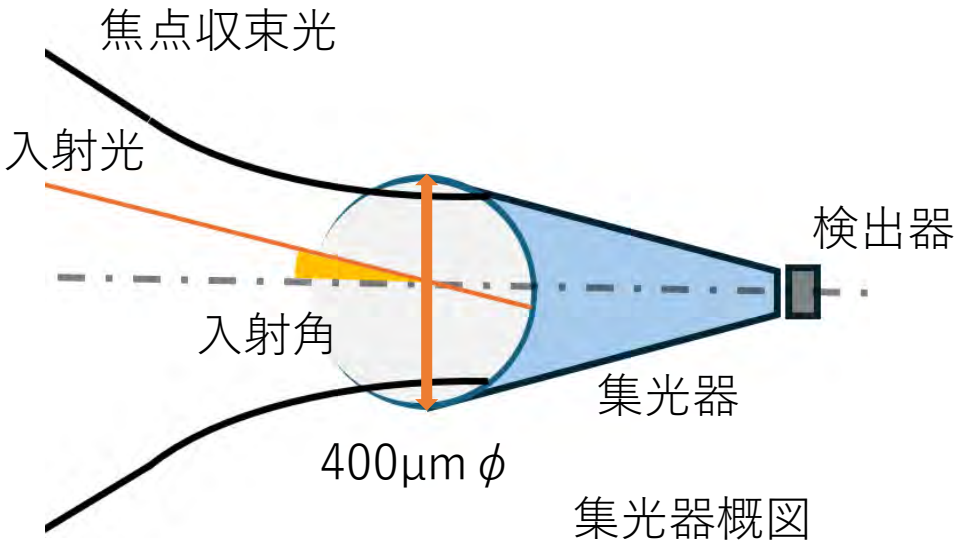


COBAND実験における光学系の概要



集光器への入射角分布の積分形

積算割合 $= \frac{\int_0^{\theta} f(\theta) d\Omega}{\int_0^{80^\circ} f(\alpha) d\Omega}$



集光器概図

Al基板集光器サンプル

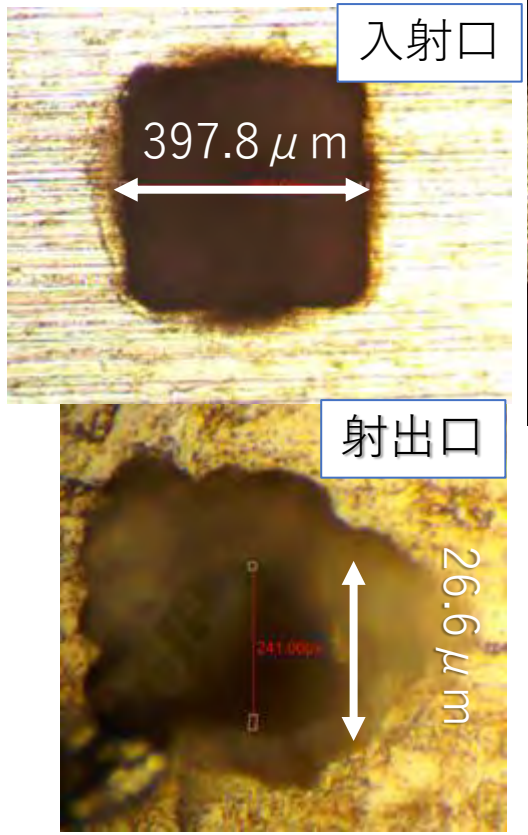
Al基板(50mm×50mm×1.6mm厚)を加工した集光器サンプルを作製

超短パルスレーザーを用いて複数形の集光器を試作

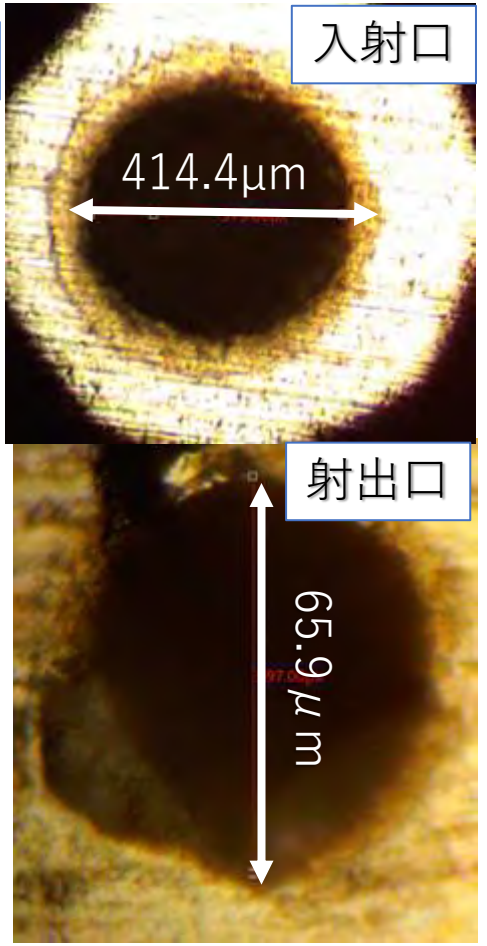
可視光レーザーでの集光効率を測定

→満足のいく集光効率は得られなかった

集光器種	最大集光効率
ウィンストンコーン (1)	1.10%
ウィンストンコーン (2)	0.90%
円錐 (1)	5.20%
円錐 (2)	3.90%
角錐 (1)	7.00%
角錐 (2)	2.70%



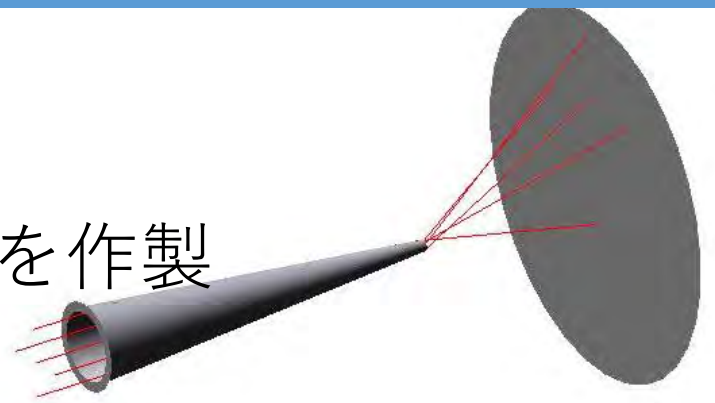
角錐形集光器のサンプル

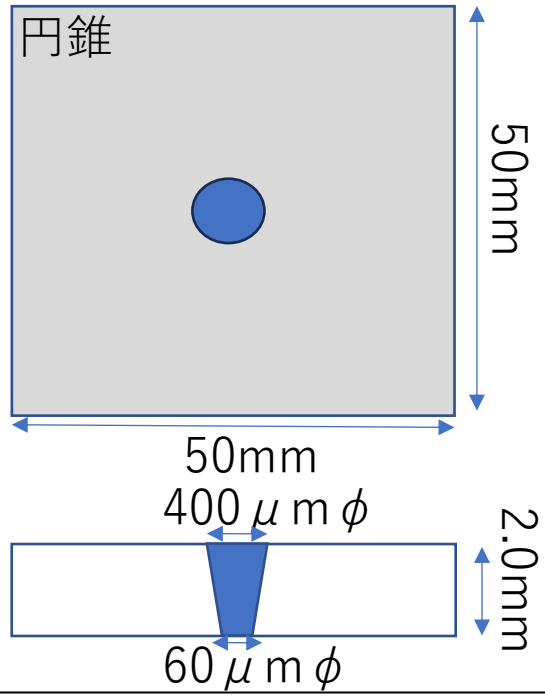


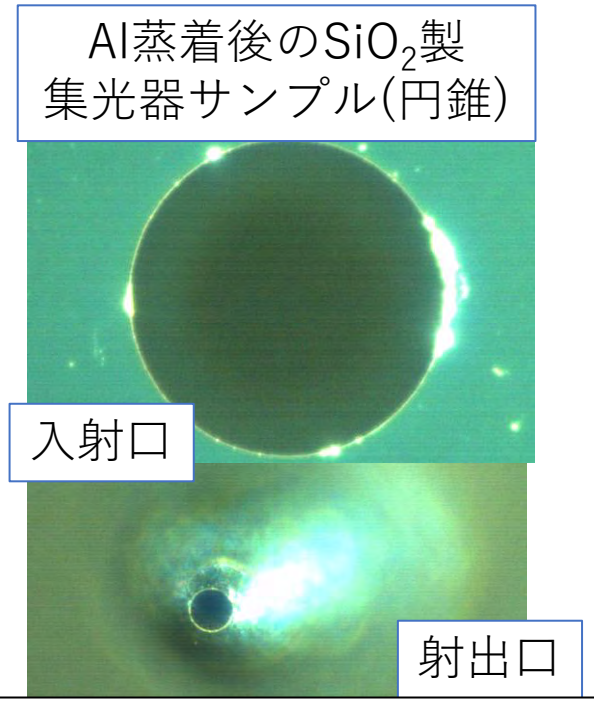
円錐形集光器のサンプル

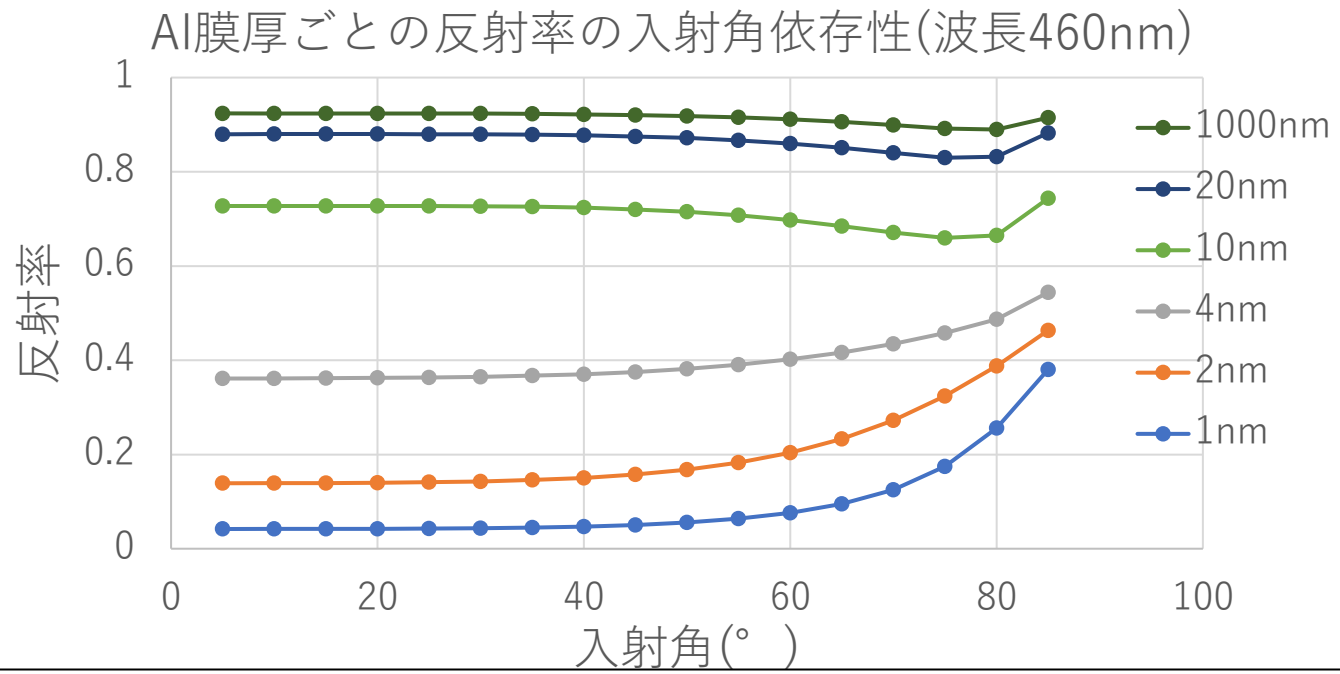
SiO_2製集光器の作製

- SiO_2製基板を円錐形に微細レーザー加工
- 表面にAlを真空蒸着した集光器サンプルを試作
- 寸法等サンプルに合わせたシミュレーションモデルを作製
- 円錐形集光器の側面は蒸着が難しく
  (セルフシャドーイング効果)膜厚が反射率に影響
- →Al膜厚も加味して作製したサンプルと比較



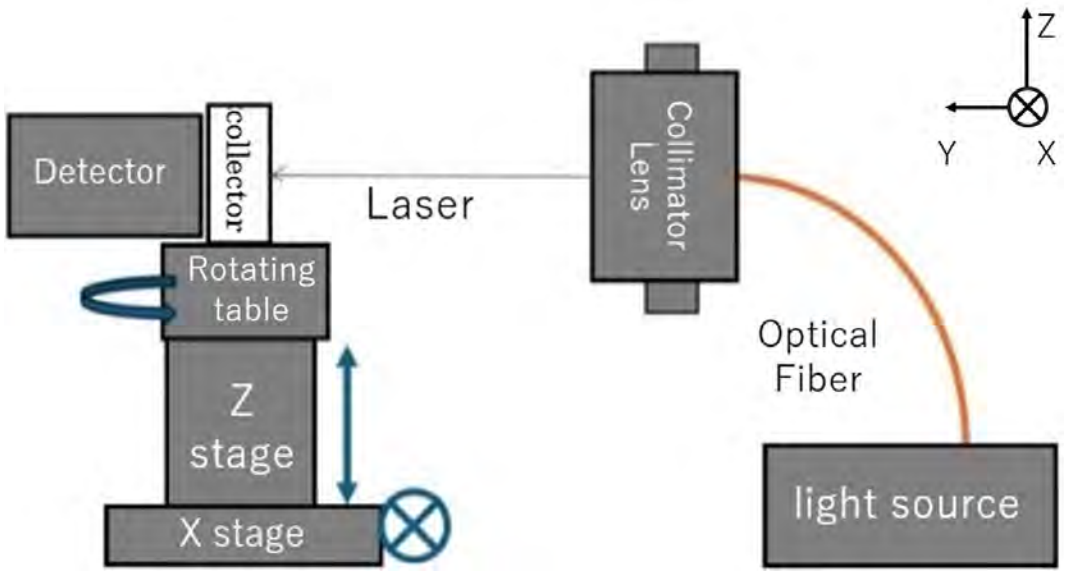


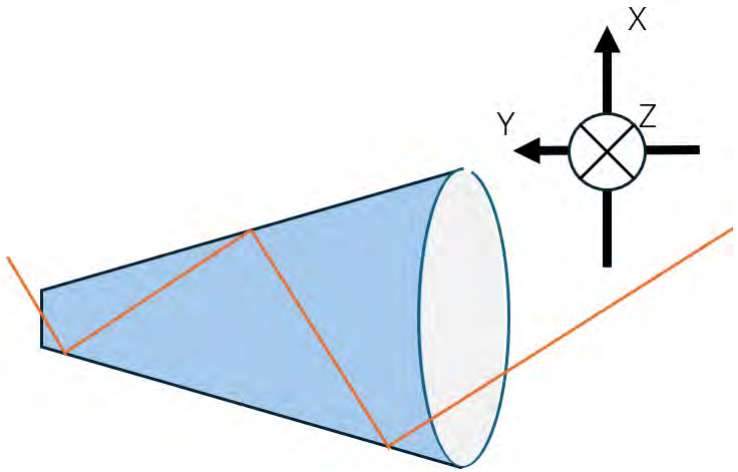




集光器性能評価のセットアップ

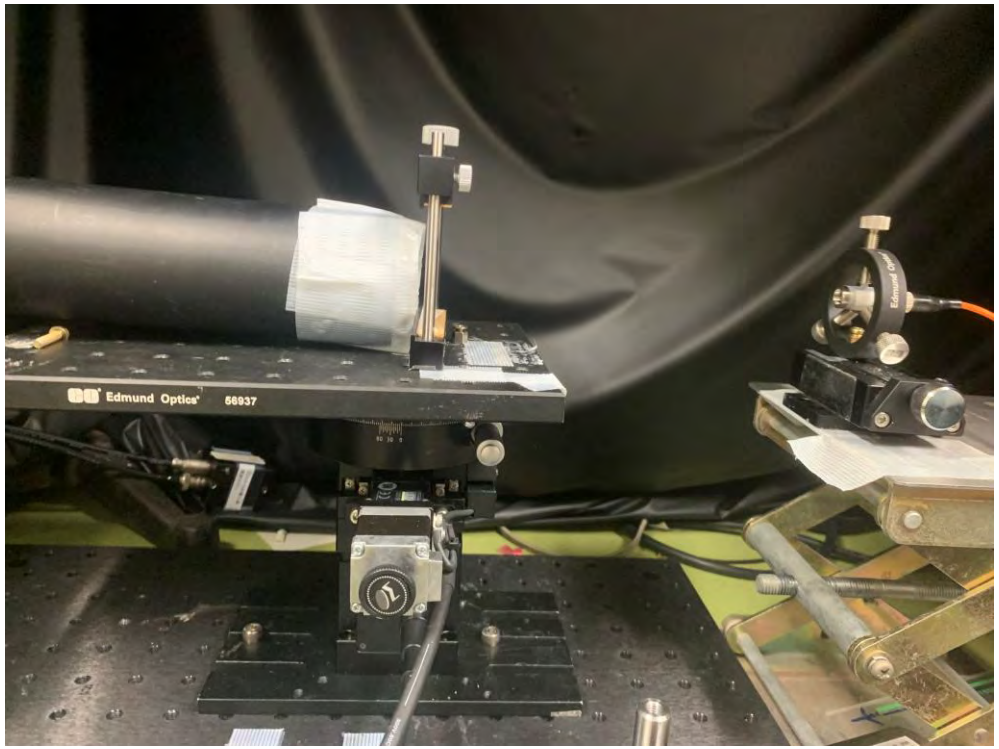
入射角依存性測定における配置





集光器俯瞰図

- 集光効率$=\dfrac{\text{円錐光量}}{400\mu m\Phi\text{ピンホール光量}}$
- 集光器への入射角度ごとにX,Z軸スキャン
- シミュレーションと比較

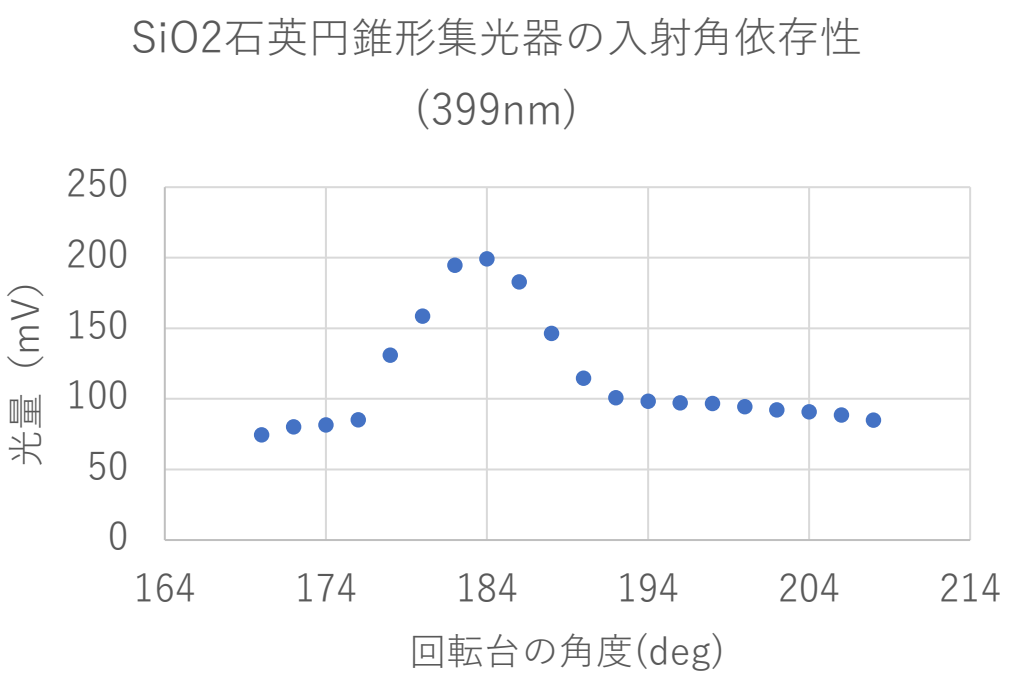


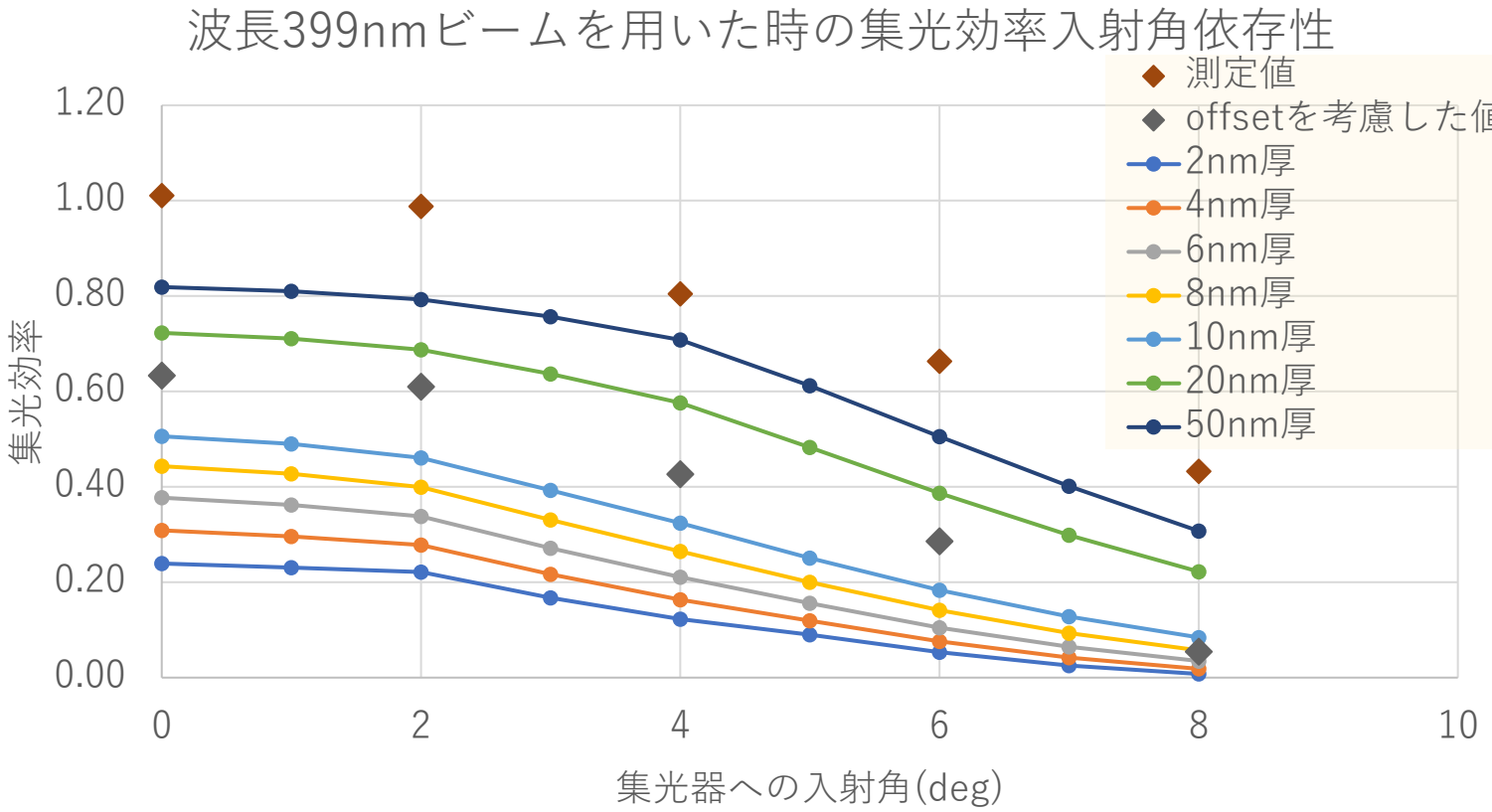
実際のセットアップ

可視光(399nm)を用いたSiO2集光器の集光効率の測定

平行光（波長399nm)を集光器に入射し、PMTで測定

→中心から外れた角度で透過光(offset)が見える（後述）



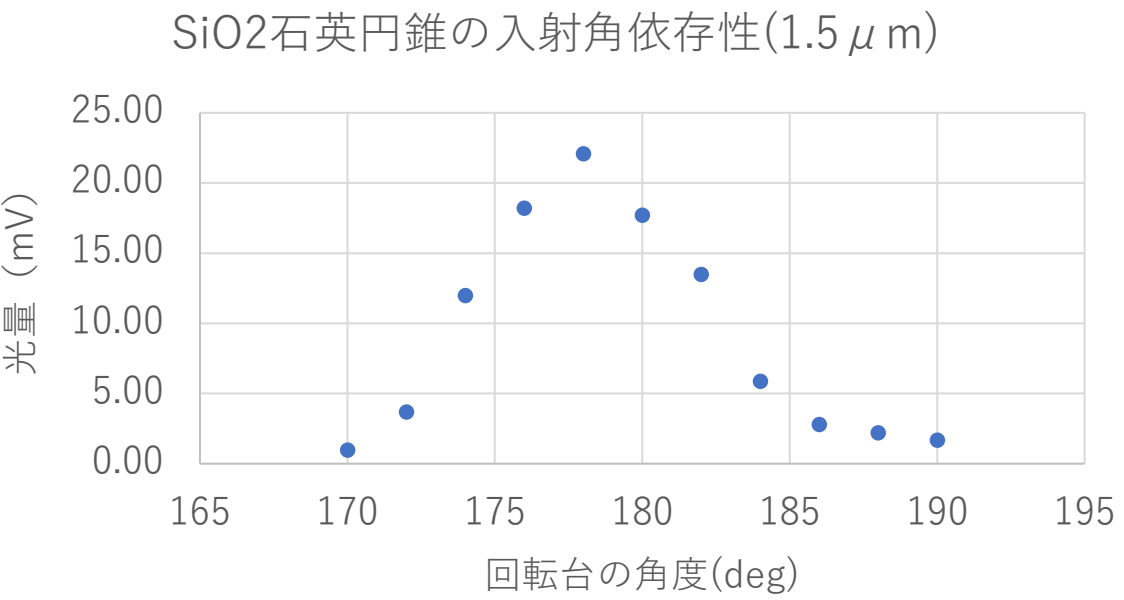


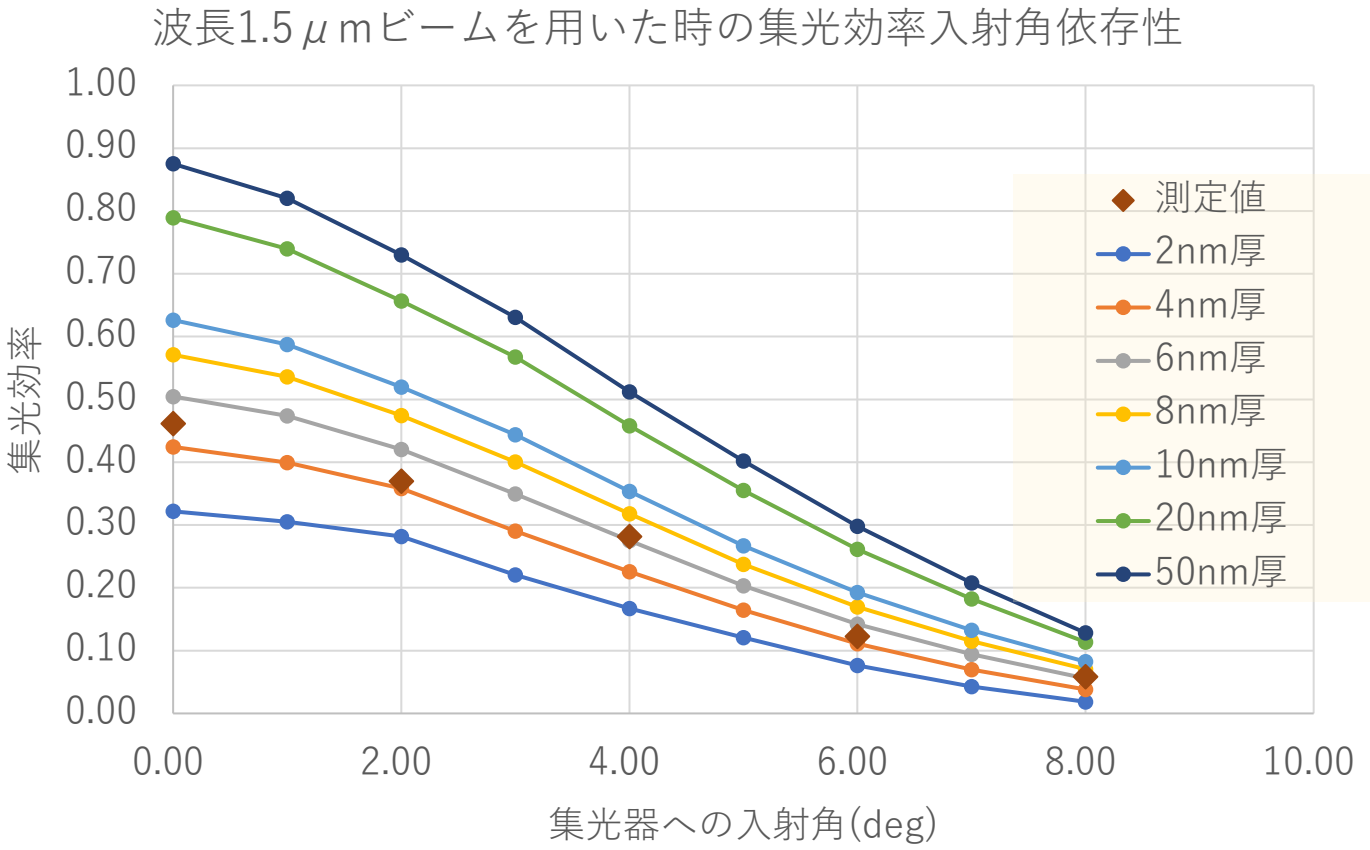
集光効率	63%

近赤外光(1.5μm)を用いたSiO2集光器の集光効率の測定

可視光と同様の測定を近赤外光で行う

PbSe検出器でチョッピングビームを測定





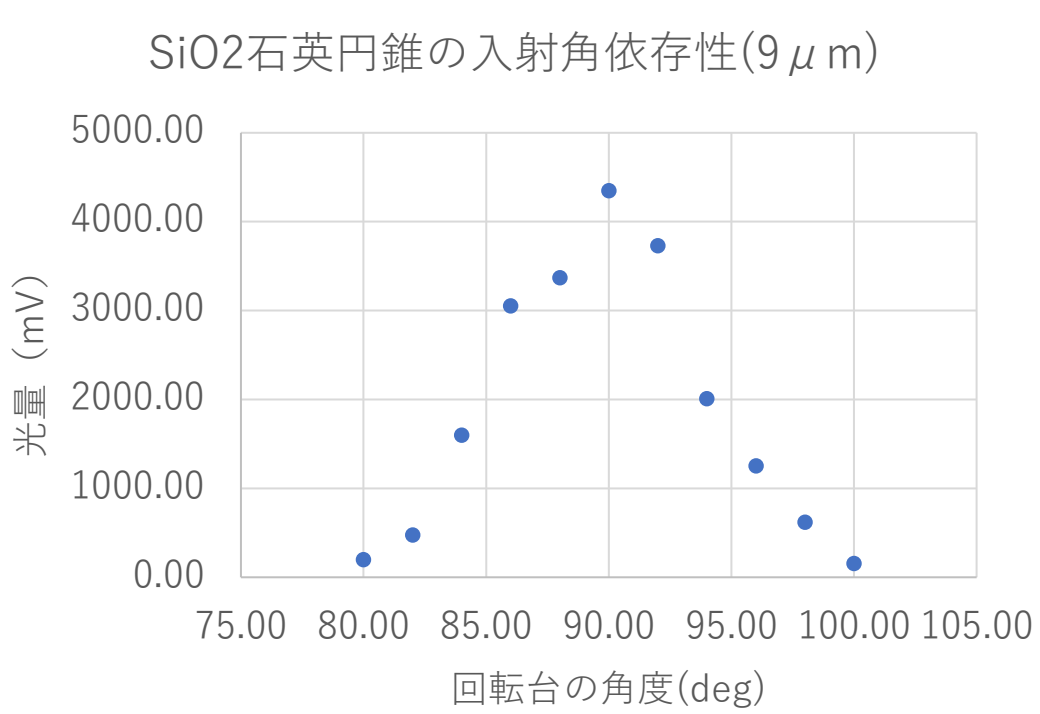
集光効率	46%

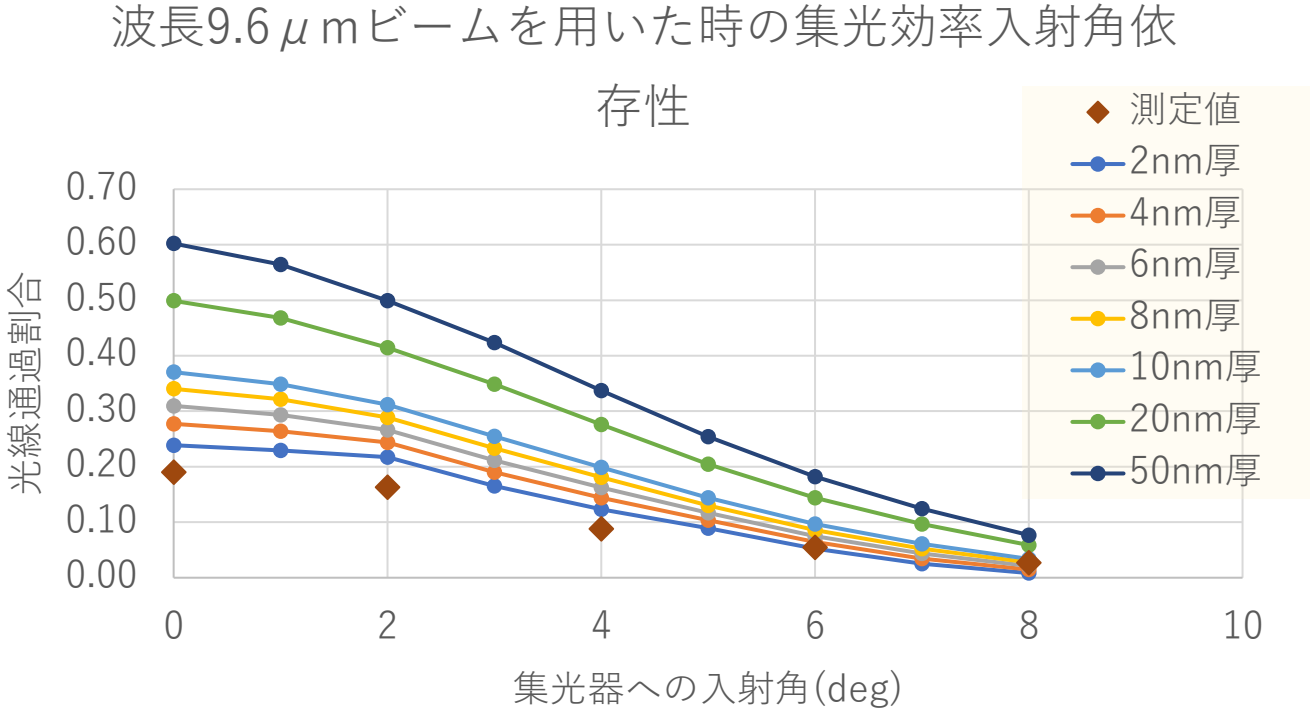
遠赤外光(9.6μm)を用いたSiO2集光器の集光効率の測定

これまでと同様の測定を遠赤外光で行う

中部大学の遠赤外ビーム(波長9.6μm)を用いて測定

→通過光線の検出ができた





集光効率	19%

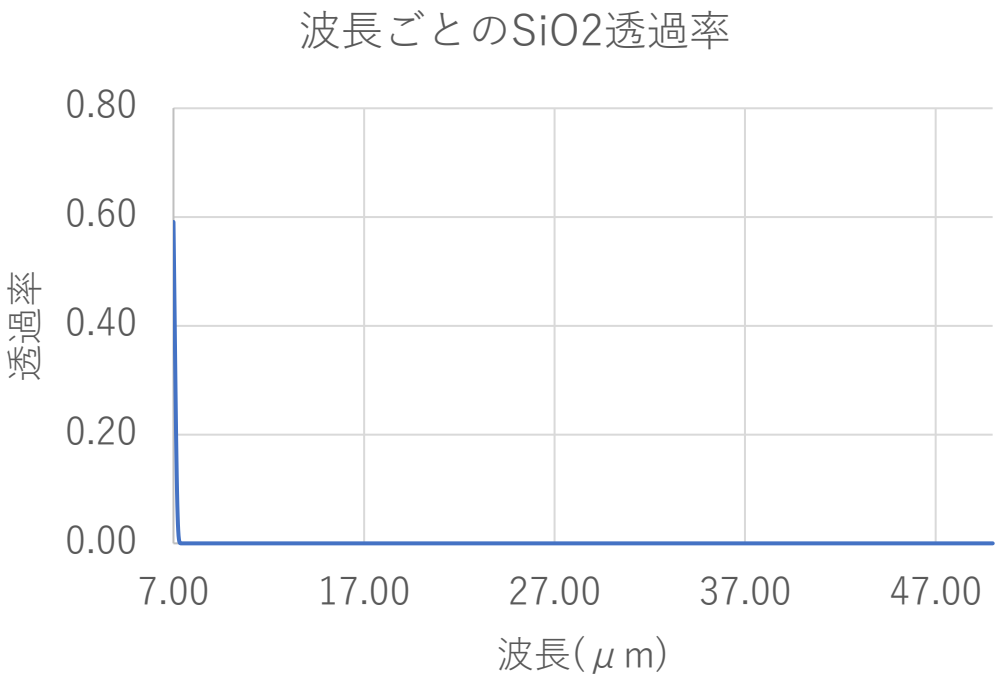
遠赤外光(57.2 μ m)を用いたSiO2集光器の集光効率の測定

波長9.6 μ mと同様の測定を波長57 μ m光で行う

中部大学のビームを用いて測定

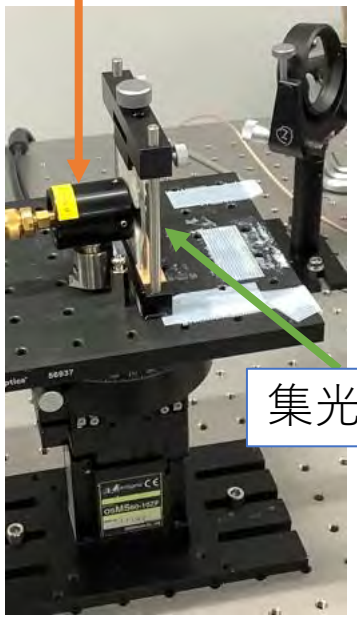
→通過光線は検出されなかった

→集光器壁面の蒸着が薄く、反射されなかった？

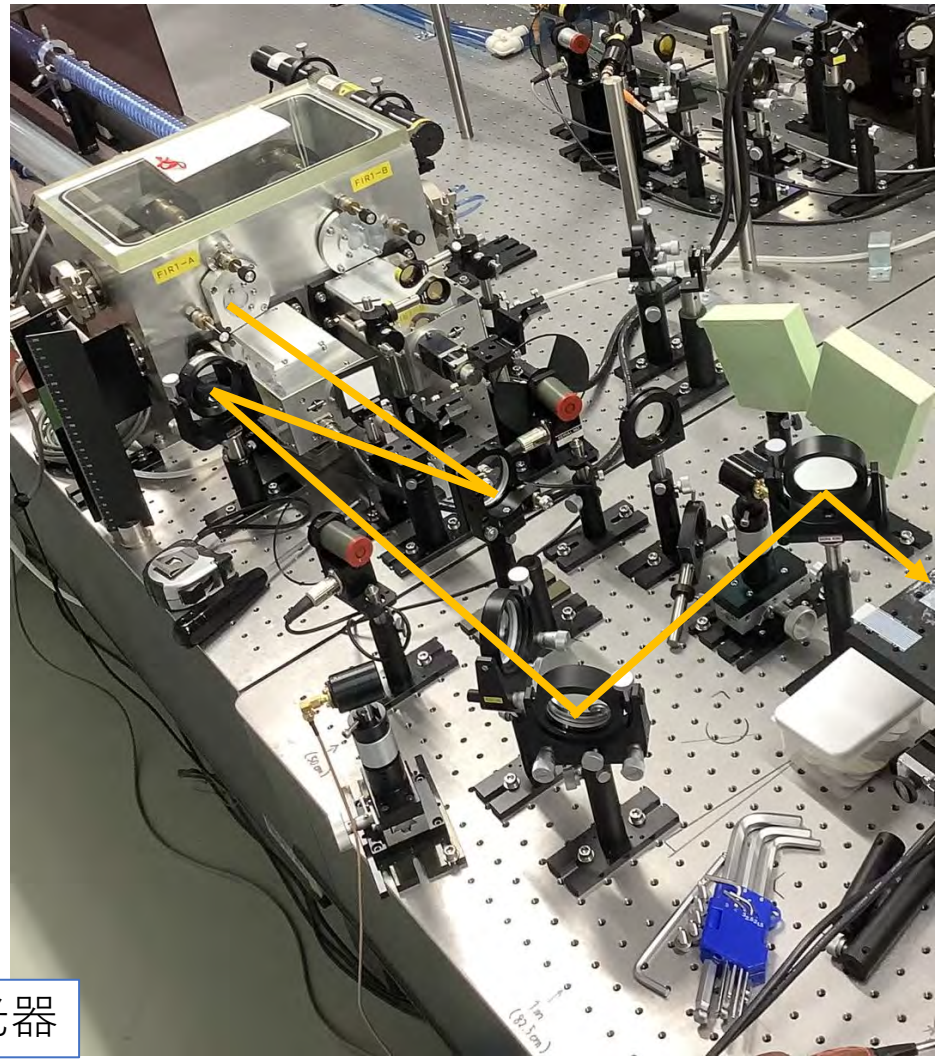


Povola et al. 1972 より

焦電検出器



スキャンのセットアップ



遠赤外測定セットアップ

各波長での集光器光線通過割合

399nm:63%

1.5μm:46%

9.6μm:19%

57.2μm:検出できず

57.2μm光が見えない理由

→蒸着AIの膜厚が不足？

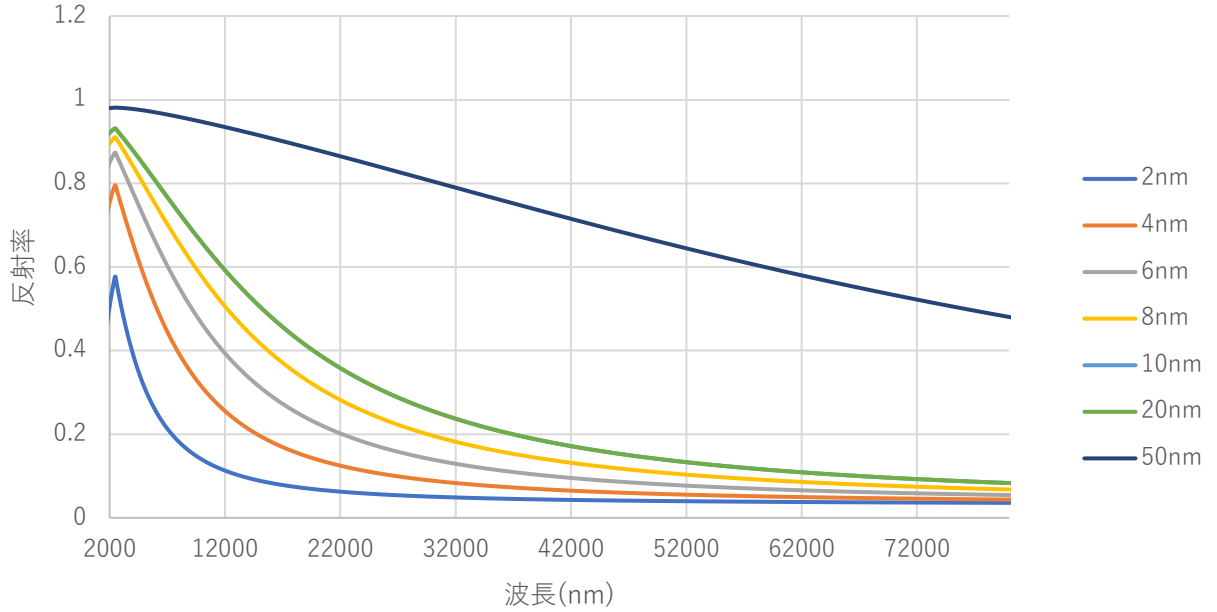
現時点での膜厚の評価を正しく行いたい

→透過光の影響を除く必要がある

→集光器裏面にAI蒸着を行った

裏面蒸着後の円錐(裏面)

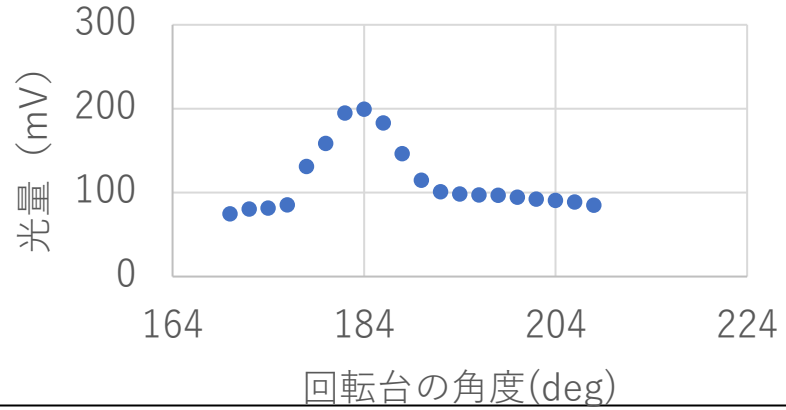
AI膜厚ごとの反射率(2~80μm)



FILMETRICSによる薄膜反射率シミュレーション

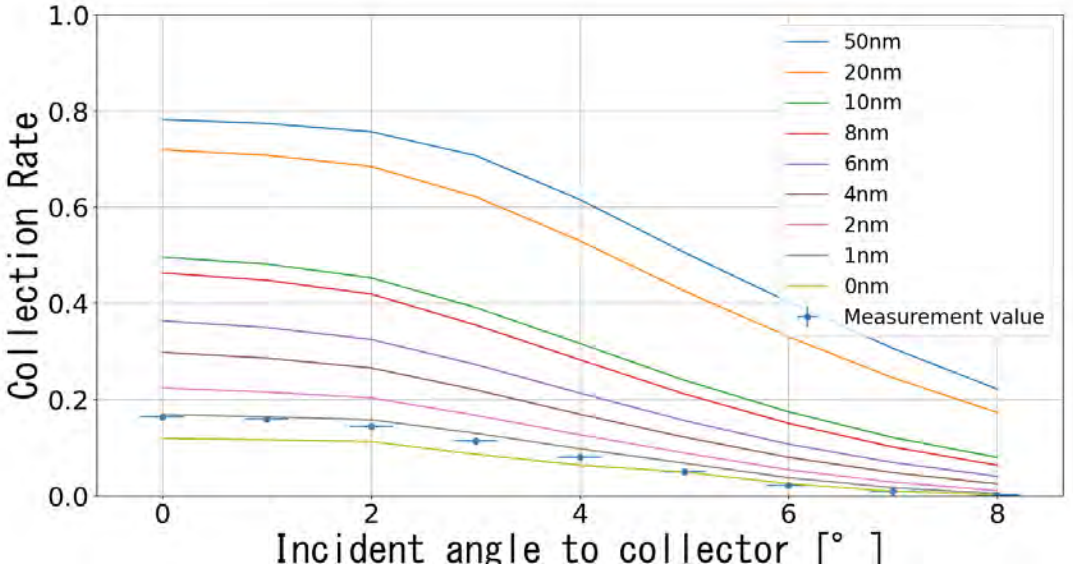
SiO2石英円錐形集光器の入射角依存性

(399nm)

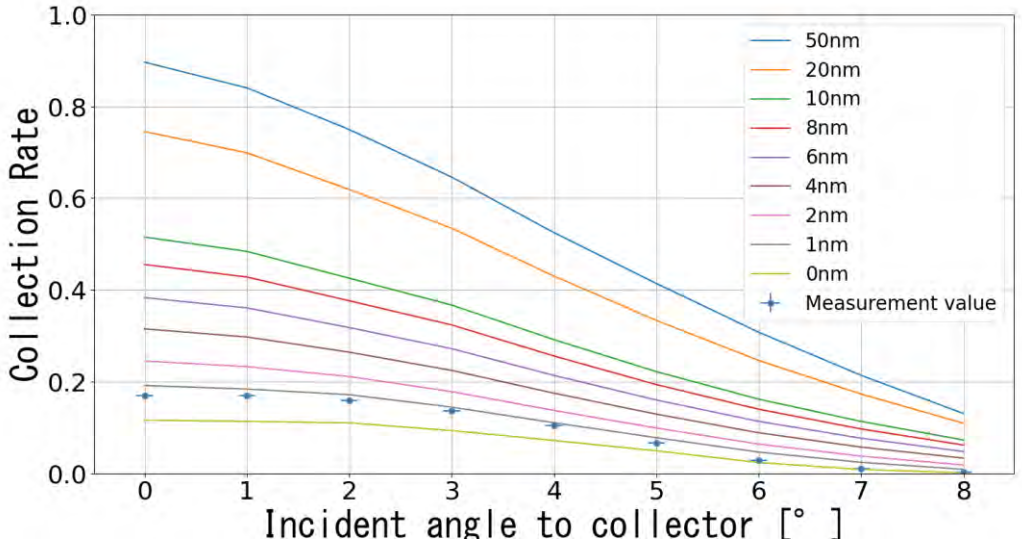


可視光(460nm) ～近赤外光(1.5 μm) SiO_2集光器の集光効率測定

- 裏面蒸着した集光器の集光効率の入射角依存性を求める
- 460nm,1.5μm光源で入射角依存性測定
- Al膜厚1nm前後のシミュレーションと一致



460nm光源を用いた時の集光効率入射角依存性



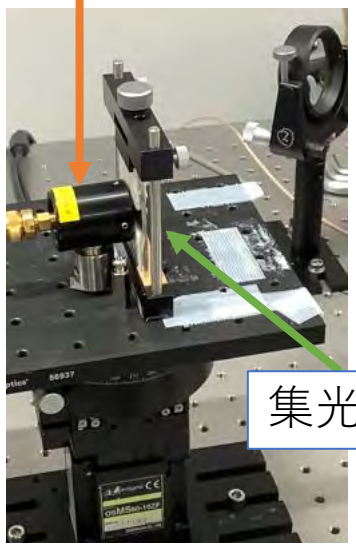
1.5μm光源を用いた時の集光効率入射角依存性

光源波長	集光効率(0deg)	評価膜厚
460 nm	16.4 %	0.82 ± 0.04nm
1.5 μm	16.1 %	0.74 ± 0.11nm

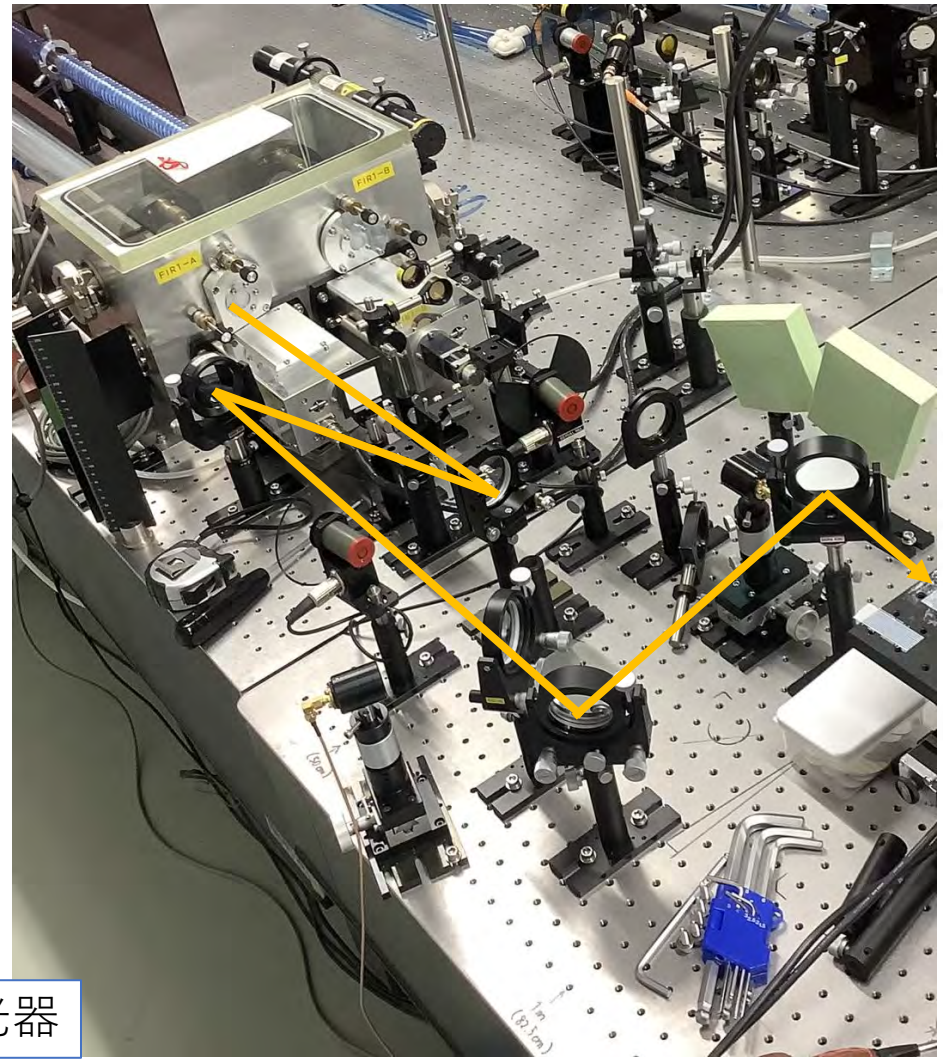
遠赤外光での集光効率評価

中部大学に設置された遠赤外ビームラインで集光器の性能評価

焦電検出器

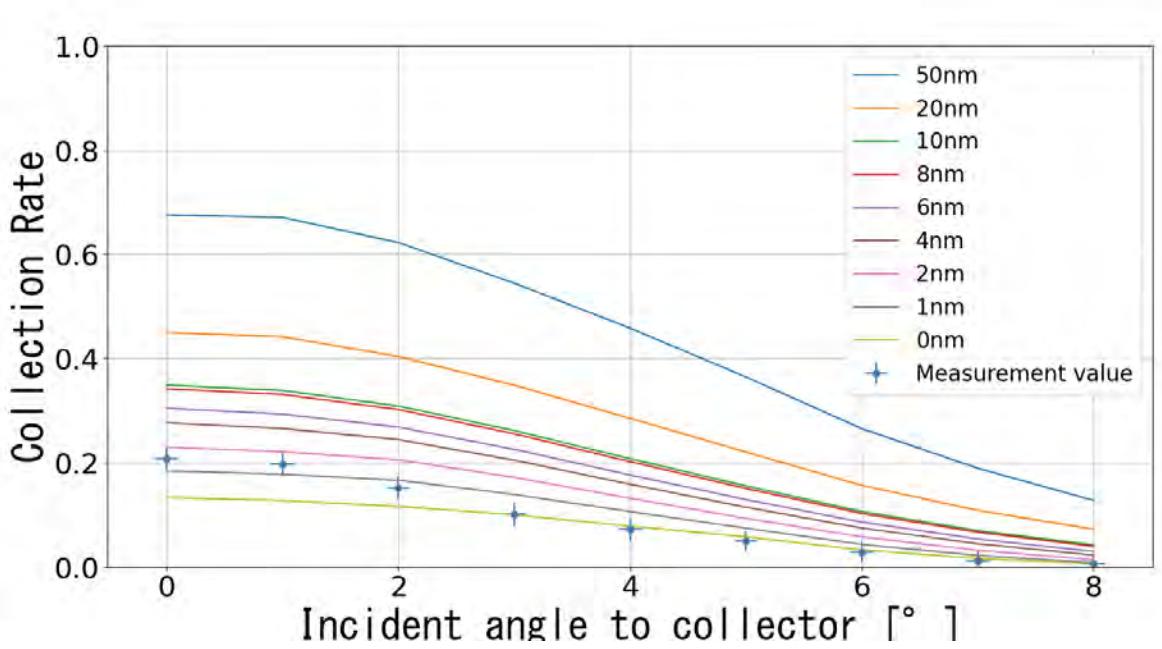


スキャンのセットアップ



遠赤外測定セットアップ

9.3μm光源を用いた時の集光効率入射角依存性



9.3 , 47.6 , 57.2 μmで評価

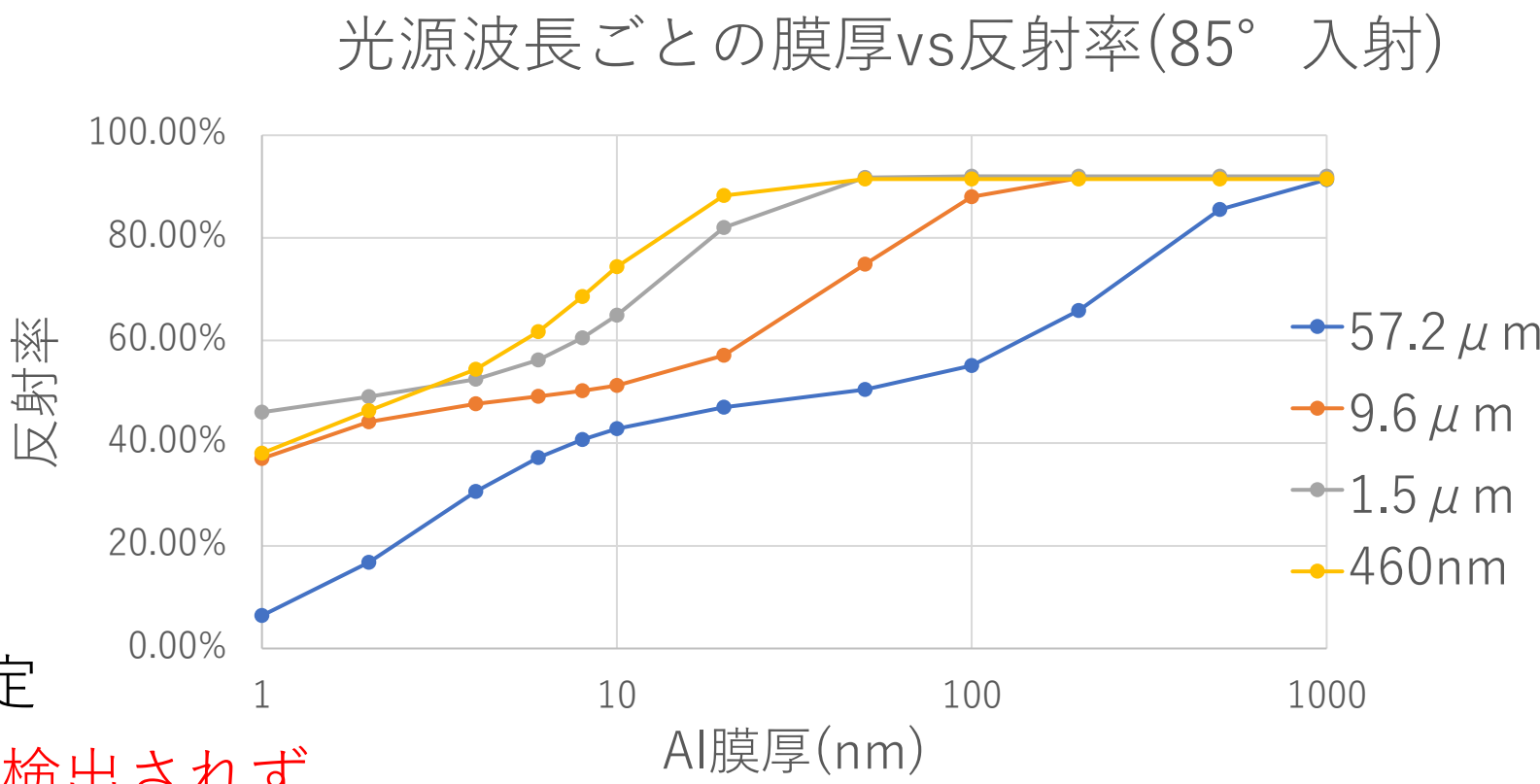
9.3μmでは20%程度の集光効率を得た

47, 57μmでは通過光線を検出できなかった

光源波長	集光効率(0deg)	評価膜厚
9.3μm	20.8%	1.01 ± 0.07 nm

各波長での集光効率評価

ビーム波長	集光効率	評価膜厚(nm)
460 nm	16.4 %	0.82 ± 0.04
1.5 μm	16.1 %	0.74 ± 0.11
9.3 μm	20.8%	1.01 ± 0.07
57.2 μm	検出できず	



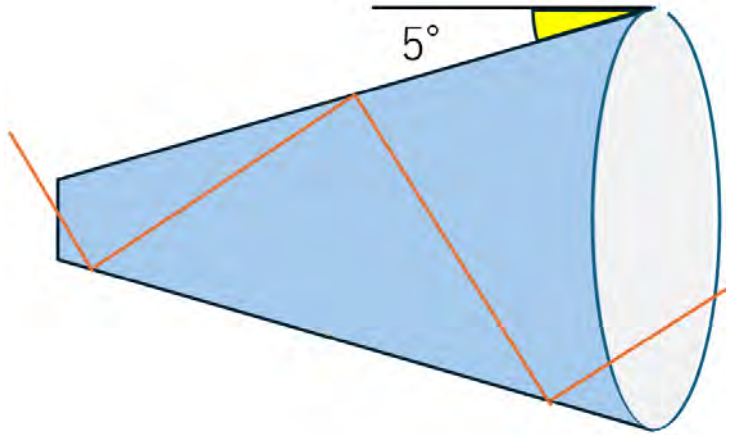
中部大学のビームを用いて測定

→やはり57.2μmの通過光線は検出されず

波長9 μm以下の光源での評価膜厚から

膜厚：0.86±0.034 nm

このときの57.2μmでの最大集光効率：約3 %



積算集光効率

(集光器への入射角分布)×(集光率の入射角依存性)=積算集光効率

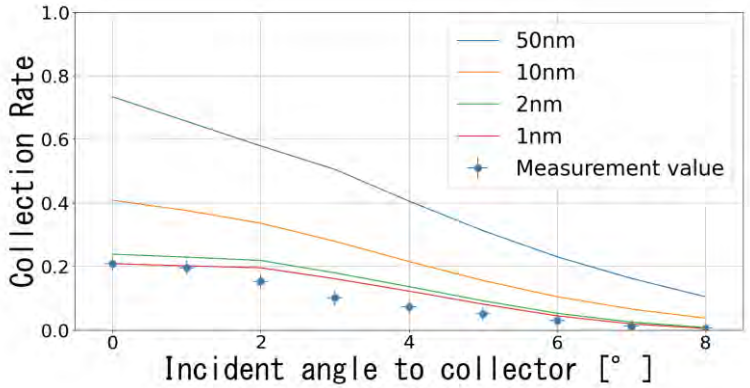
を計算

積算集光効率＞40%なら要求を満たす

集光器以外の光学系での受光効率	約28 %
COBAND実験全体の要求	10%以上

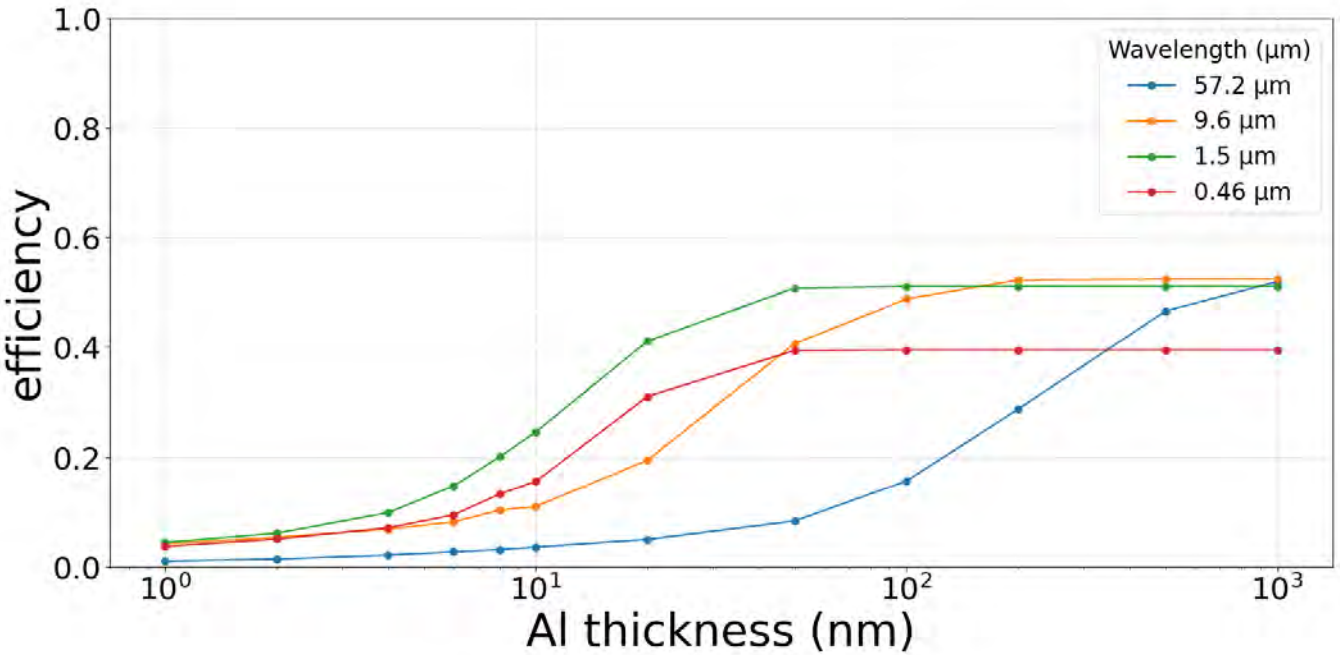
膜厚を500 nm程度まで厚くすれば遠赤外で40%以上の積算集光効率を得られる

入射角分布



入射角依存性

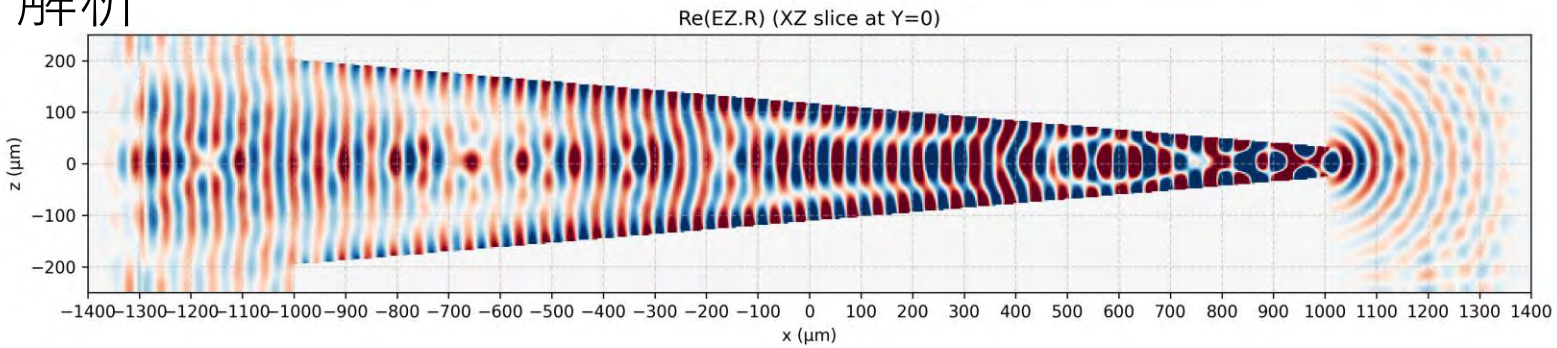
波長ごとの積算集光効率のAl膜厚依存性



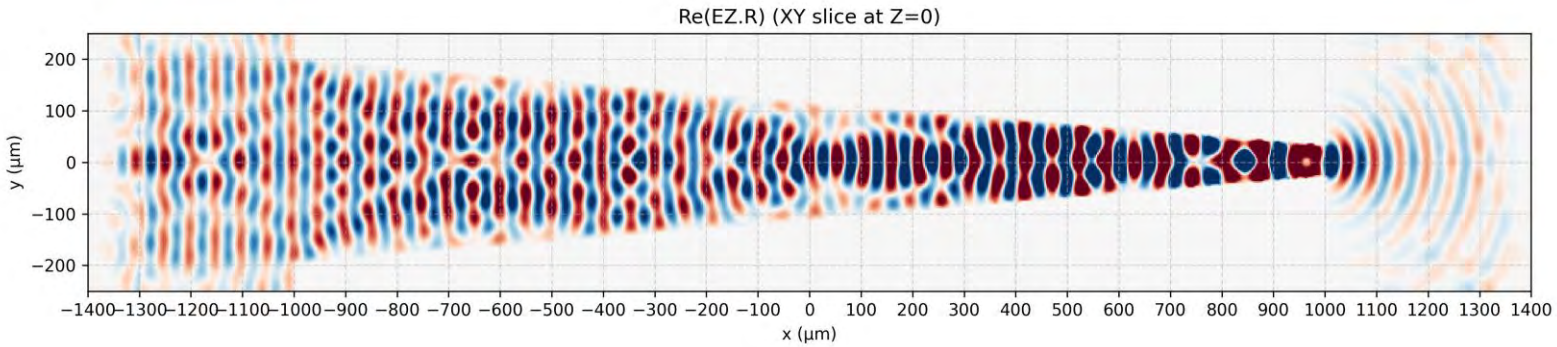
電磁波解析

pythonの電磁波解析ライブラリ(meep)を使用して集光器の電磁波解析を行った
YZ面にX方向に進行する平面波を設置
集光器壁面の反射率を1.0として解析
40%程度の集光効率を得た

波長[μm]	50
Resolution[1/μm]	0.3
セルサイズ[μm]	2800*500*500
PML[μm]	100*0*0
偏光	Z
傾き	0deg
Power x=-1000	2.70e+07
Power x=1000	1.10e+07



XZ面



YZ面

まとめ

- COBAND実験では遠赤外波長50μm域で宇宙背景ニュートリノ崩壊光検出を行うが、検出器のサイズ(40μm角)に合わせた集光器の設計が必要

- SiO_2製集光器サンプルを試作・性能評価
  - 波長57.2μmでは信号を検出できなかった
  - 可視光~波長10μm以下では20%程度の集光効率を得た
    →実験で使用できる範囲内
  - Al膜厚は0.86±0.034 nmと評価
  - 波長10μm以下での積算集光効率:4%程度

展望

- Alの膜厚を500nm程度まで増やせば40%以上の積算集光効率が得られる

→プラズマCVDを用いて製膜を行うことで、真空蒸着よりも立体的な構造に対応

→増膜した集光器で遠赤外測定

- 遠赤外領域電磁波的影響の評価のため、電磁波解析を行っている

バックアップ

- バックアップ