

宇宙背景ニュートリノ崩壊光探索のための サブミリサイズ石英基板集光器の開発

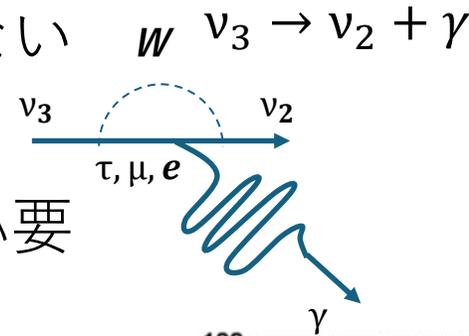
柏木 隆城

宇宙史研究センター2024年度第1回構成員会議

成果報告会

2024/7/2

- ▶ 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



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

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

→ 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

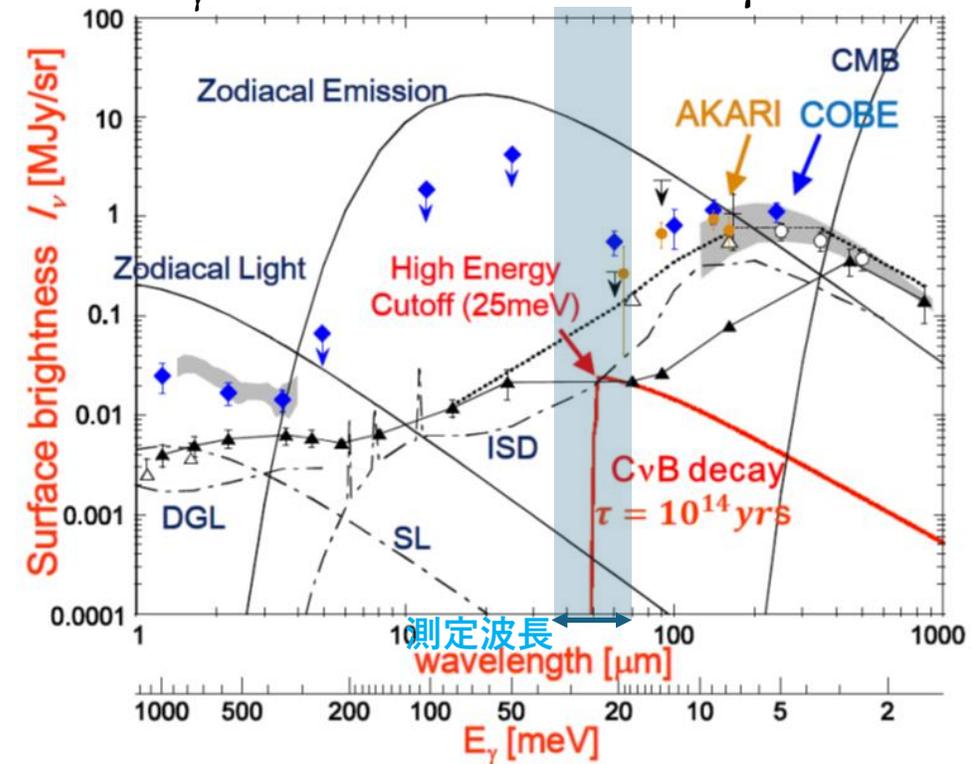
・ 目的

宇宙背景ニュートリノの崩壊光検出

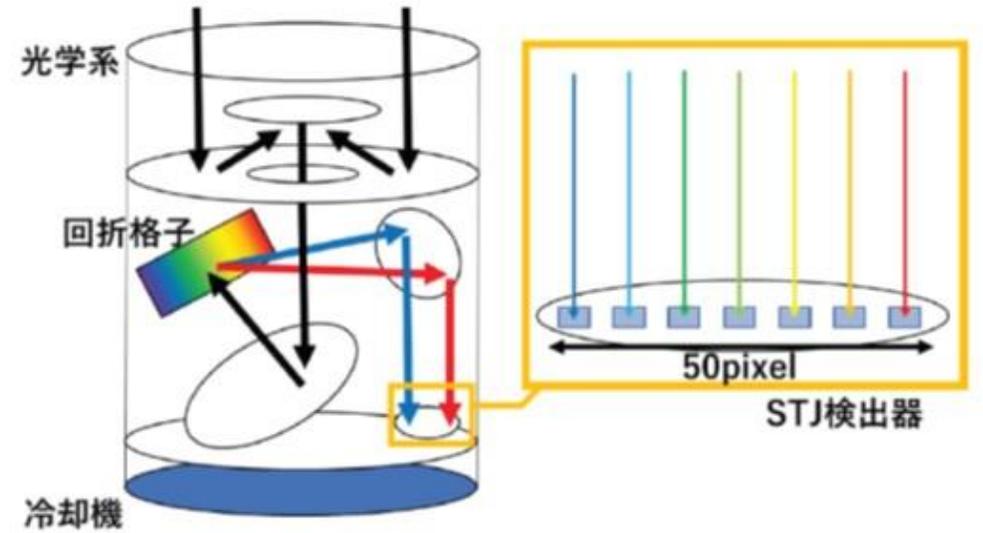
崩壊光測定によるニュートリノの質量測定

40~80 μm の遠赤外光を測定

→ Nb/Al-STJ を使用する



- 回折格子で波長ごとに分光
→ Nb/Al STJに入射
- 回折限界による焦点面での光の広がりを十分に含むために、受光素子の受光面積は直径 **400 μm** を必要とする。
- 集光器で **40 μm 角**のSTJに集光する。
→ **サブミリサイズ集光器の設計を行った**



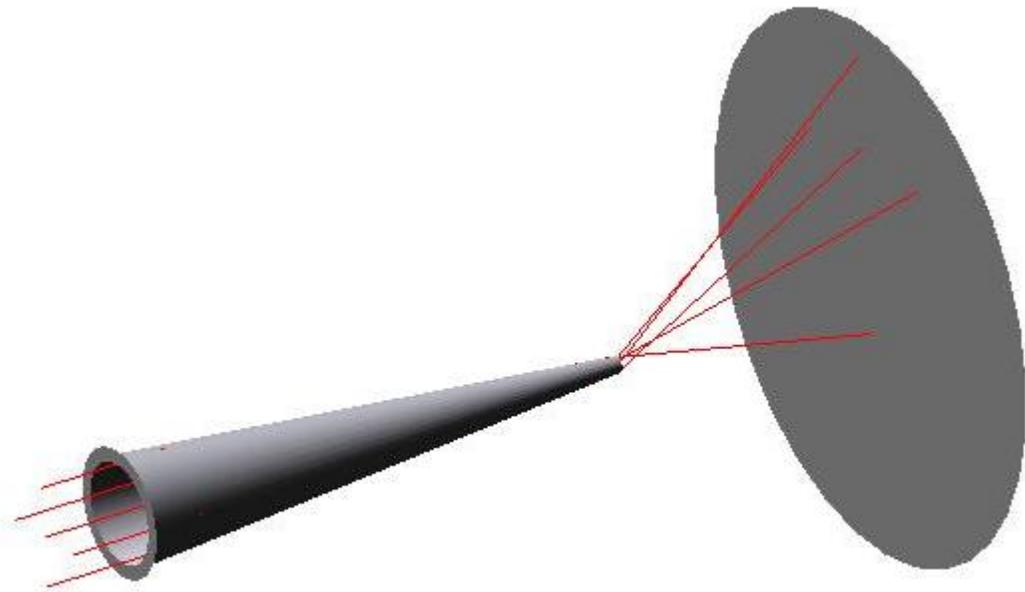
COBAND実験における光学系の概要

表 3: 集光器への入射角度分布

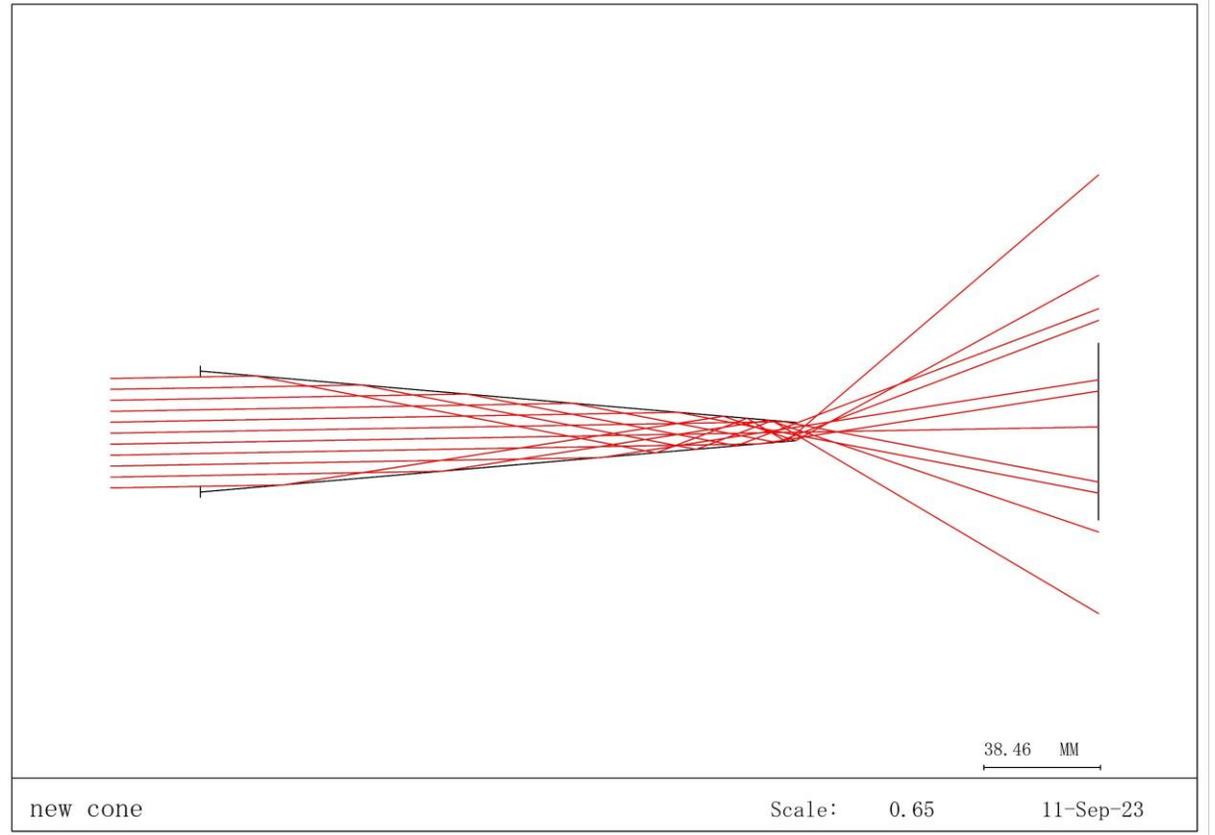
角度 [°]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
割合 [%]	0.00	2.12	3.78	5.66	7.46	9.30	11.1	12.8	14.6	16.1	16.8

集光器のモデル

光学シミュレーション(Code-V)上で集光器に厚みを合わせたモデルを設計



円錐形集光器に条件を合わせたモデル



円錐形集光器の2D描画

光線の集光器に対しての入射角度は 1° になっている

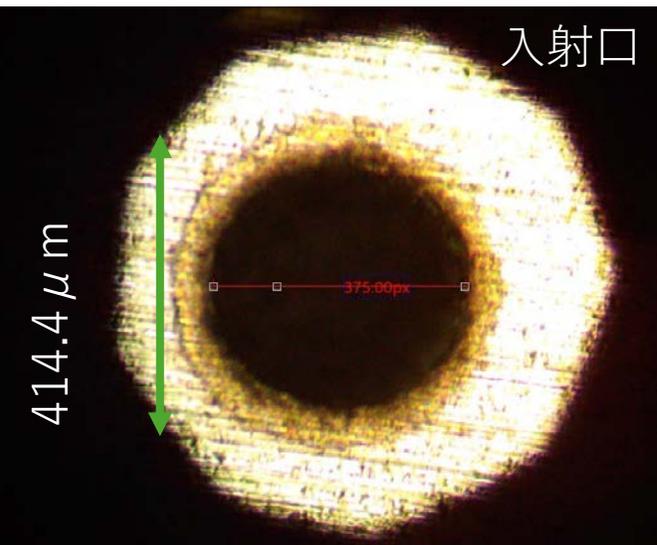
集光器に入射した光線のうち射出口から出てきた光線の割合(光線通過割合)を求める
→作製したサンプルと比較

集光器のサンプル

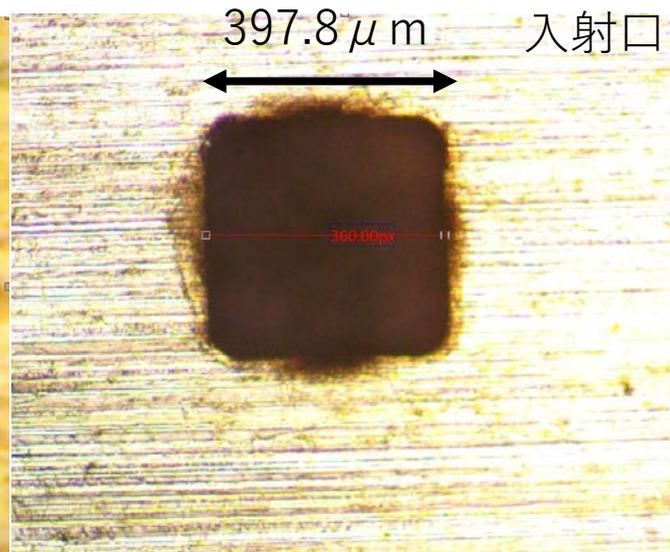
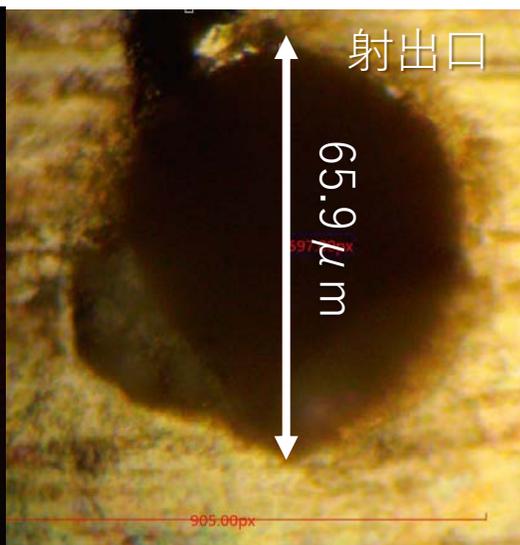
超短パルスレーザーを用いて、

- ウィンストンコーン
- 円錐
- 角錐
- (+円柱・角柱)

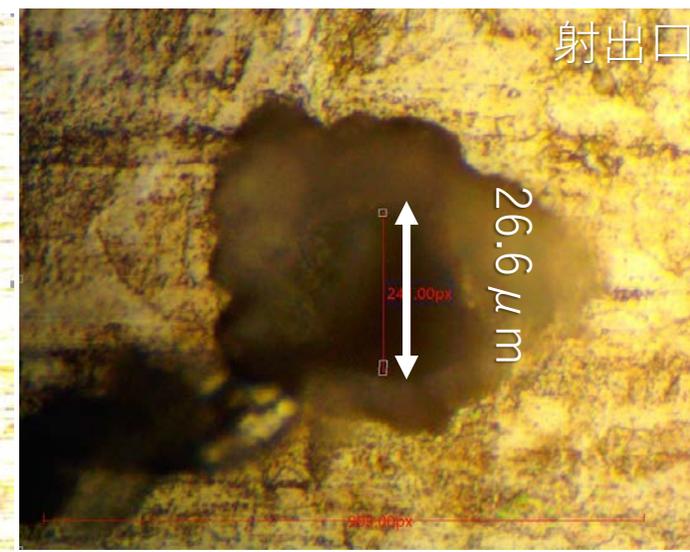
形の集光器を各2つ作製(AI製(50mm×50mm×1.6mm厚))
可視光レーザーでの光線通過割合を測定。



円錐形集光器のサンプル



角錐形集光器のサンプル



可視光(465nm)を用いた集光効率の測定

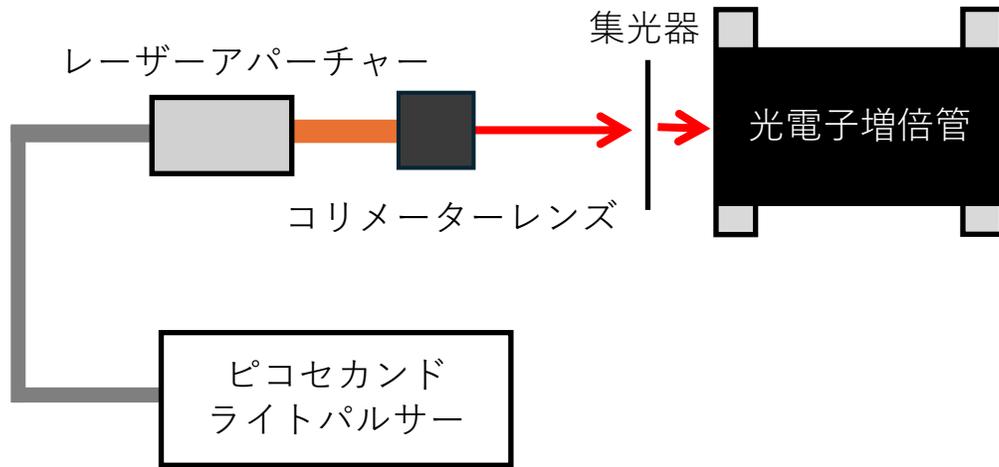
平行光 (波長465nm)を集光器に入射

→PMTで測定。

・角錐光量/角柱光量 円錐・ウィンストンコーン光量/円柱光量

より光線通過割合を求める。

→満足のいく光線通過割合は得られなかった

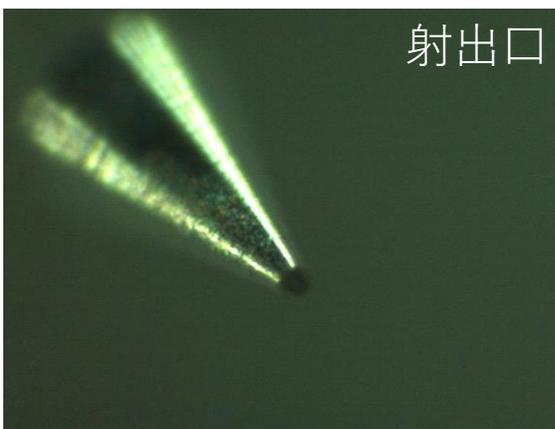
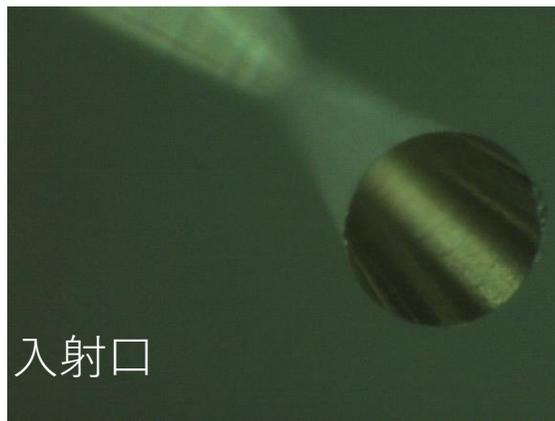
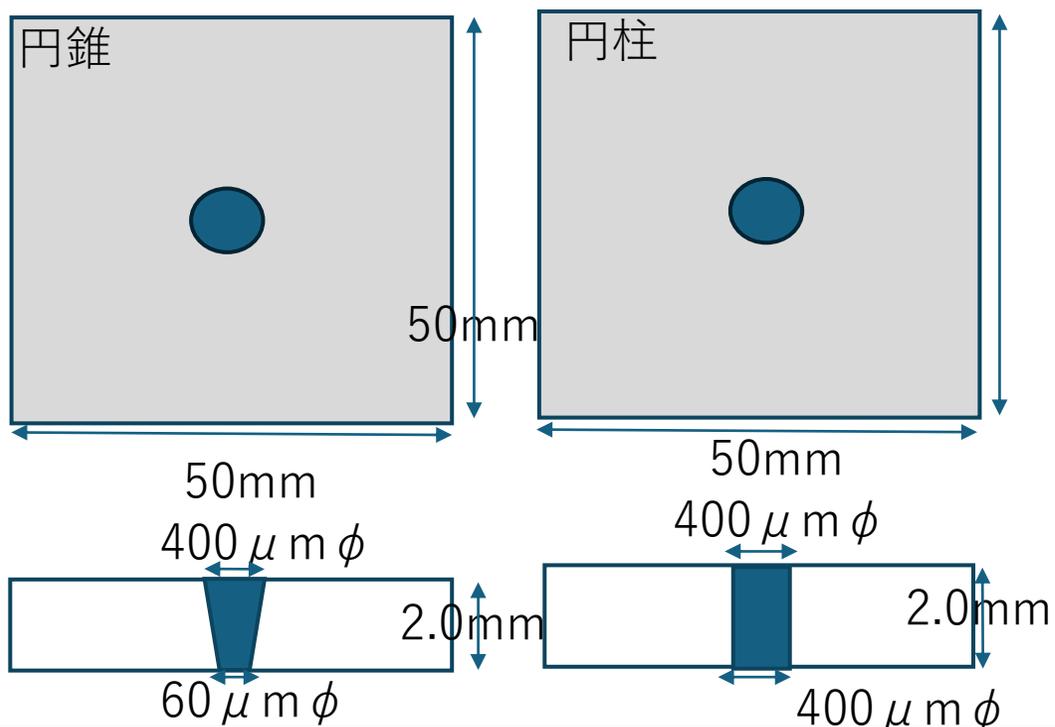


可視光実験における配置

集光器種	最大光線通過割合
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%

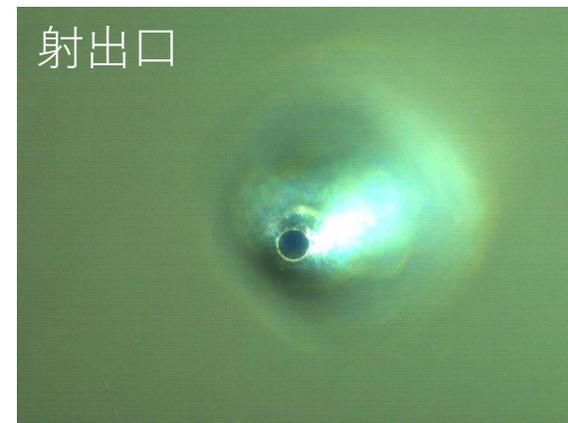
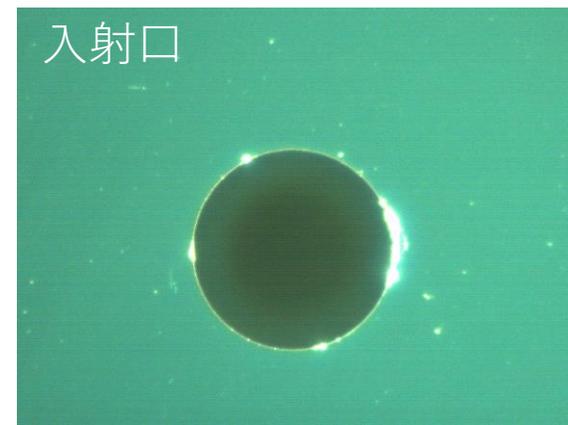
SiO₂製集光器の作製

- ▶ AI製集光器を試作したが、思ったような精度ではなかった
- ▶ 高精度に作製できるSiO₂製円錐形集光器サンプルを試作
- ▶ 表面にAlを蒸着(100nm)
- ▶ 性能評価を行う

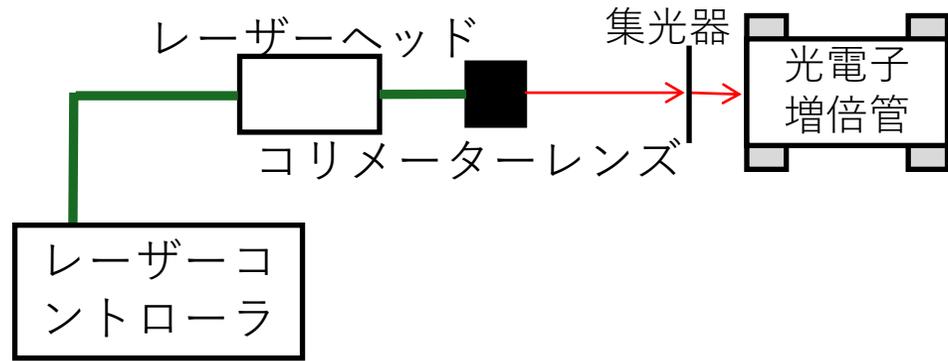


Al蒸着前の集光器のサンプル(円錐)

Al蒸着後の集光器のサンプル(円錐)

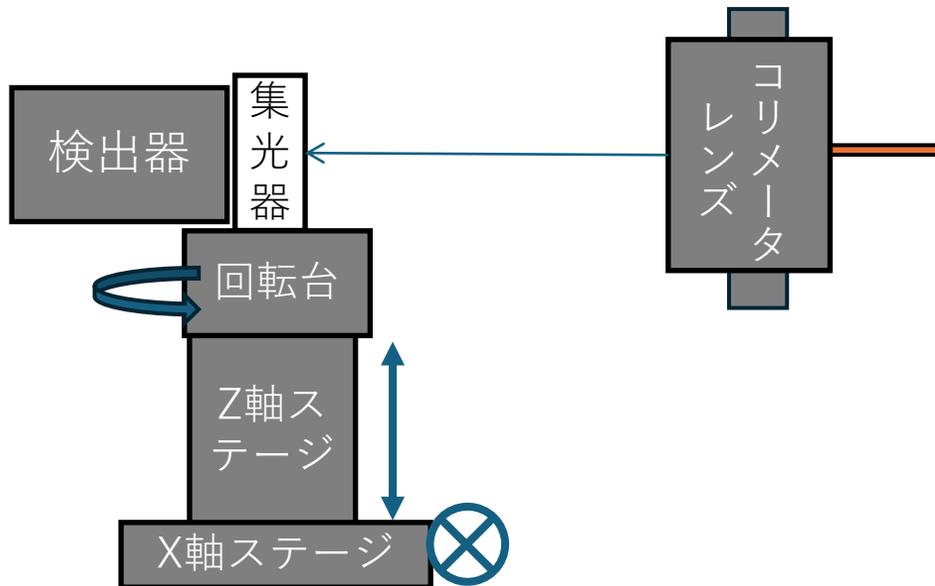


集光器性能評価のセットアップ



- 円錐光量/円柱光量より **光線通過割合** を求める
- 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

可視光実験における配置



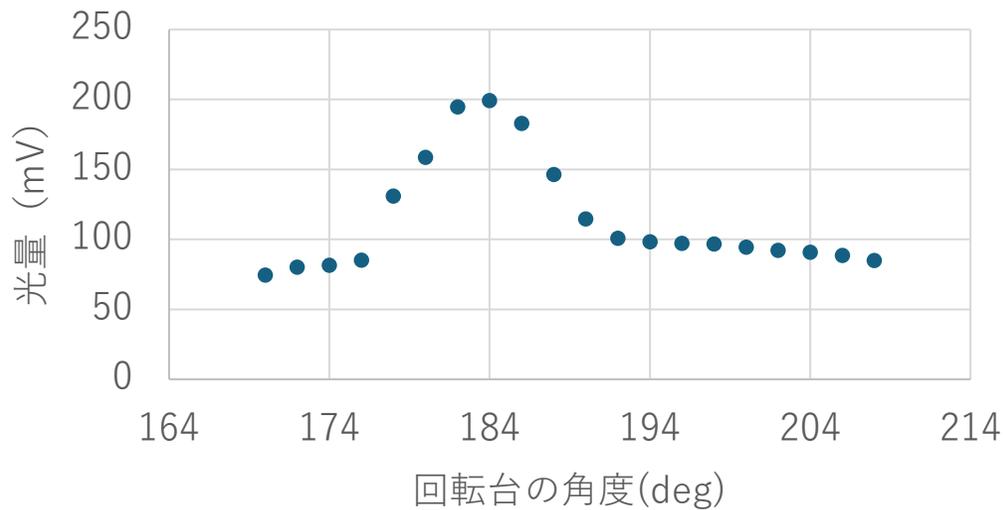
実際のセットアップ

可視光(399nm)を用いたSiO₂集光器の光線通過割合の測定

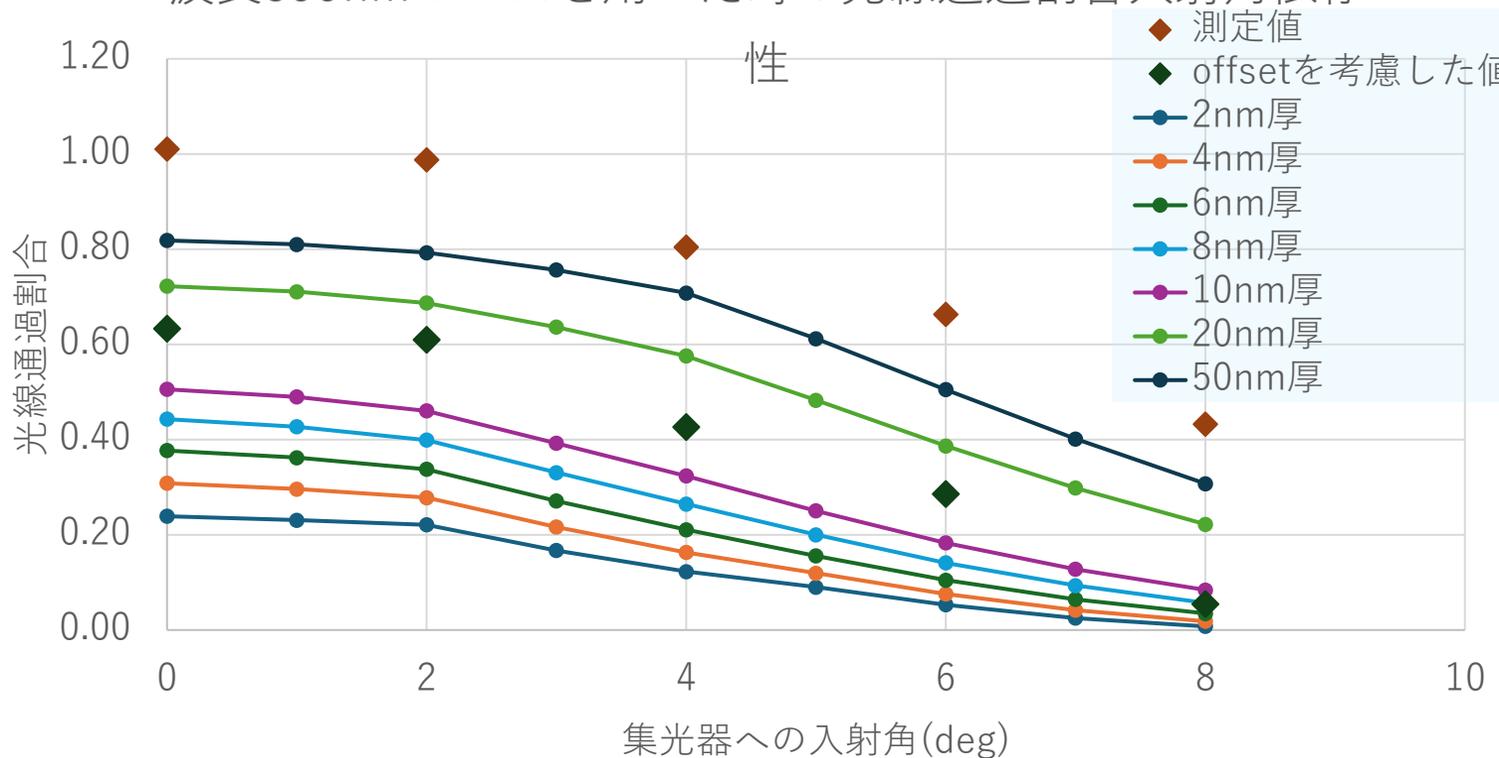
平行光 (波長399nm)を集光器に入射し、PMTで測定

→中心から外れた角度で透過光(offset)が見える (後述)

SiO₂石英円錐形集光器の入射角依存性
(399nm)



波長399nmビームを用いた時の光線通過割合入射角依存性



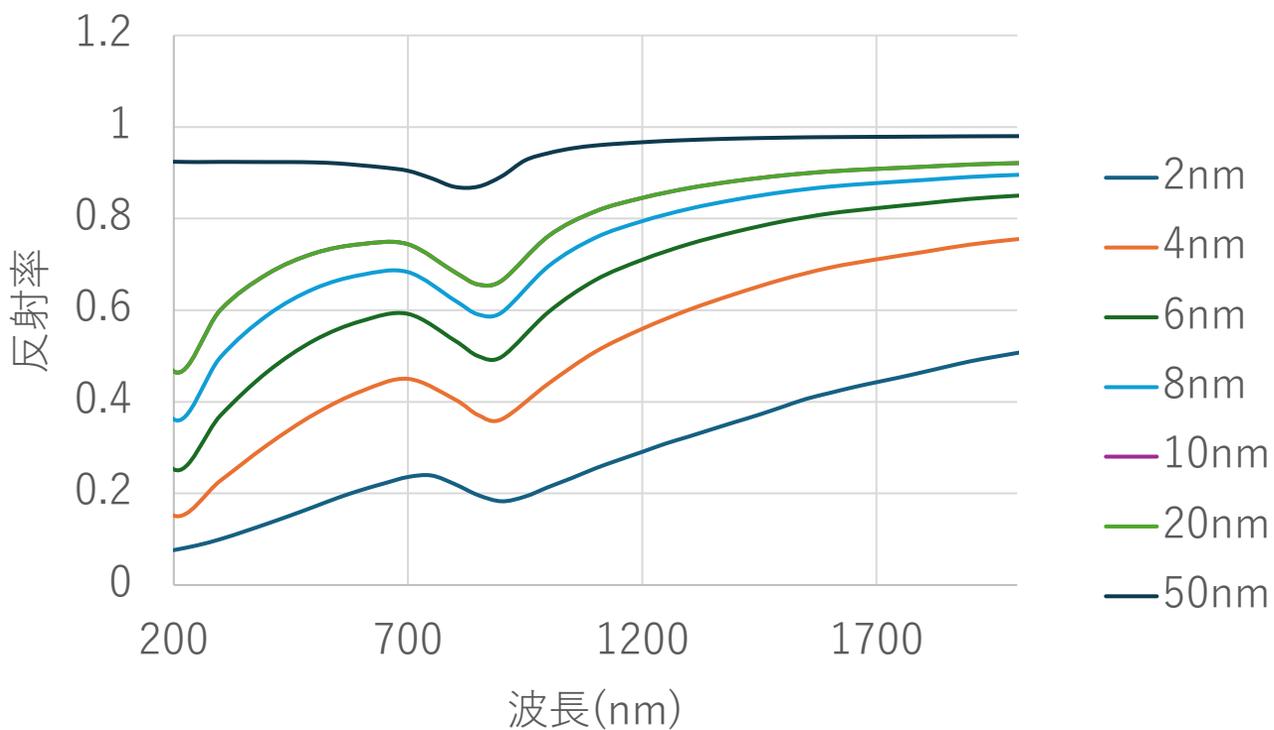
光線通過割合

63%

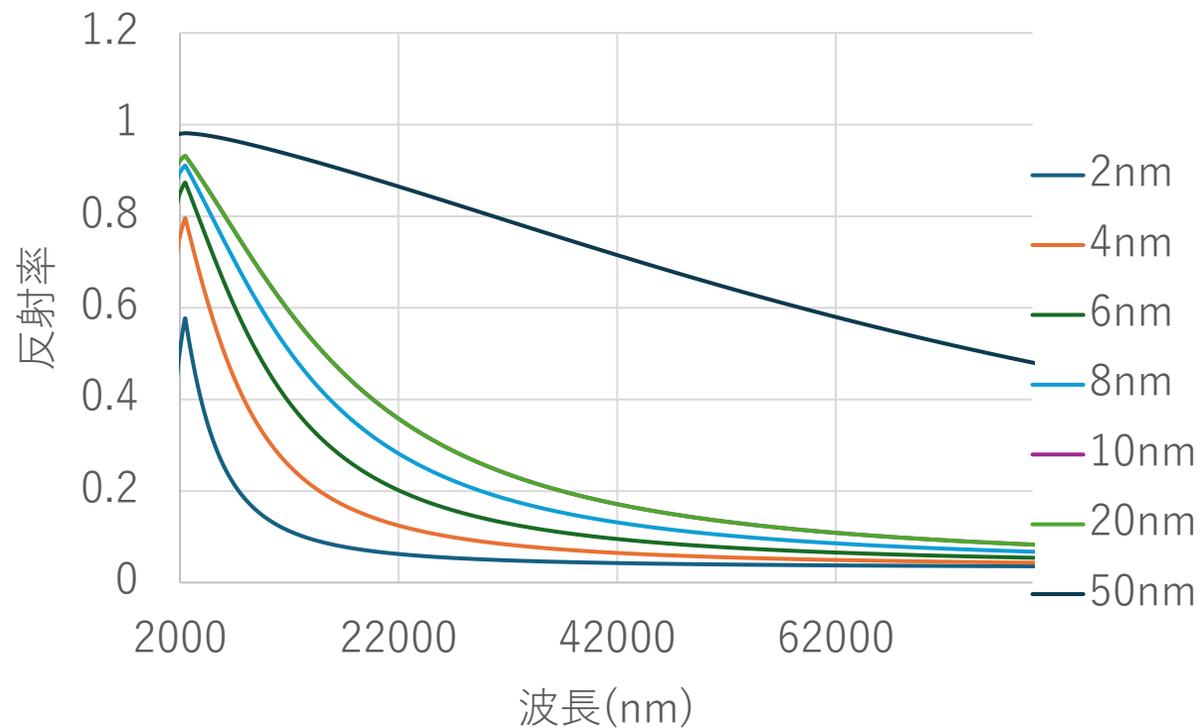
Al膜厚ごとの反射率

各波長での光線通過割合から集光器壁面のAl膜厚を求めたい

Al膜厚ごとの反射率(200nm~2 μ m)



Al膜厚ごとの反射率(2~80 μ m)



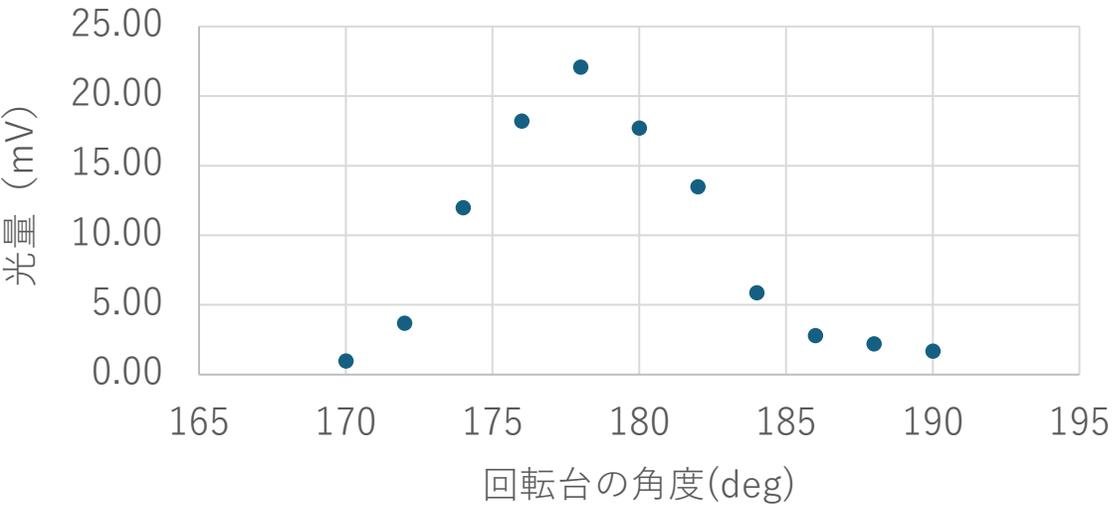
FILMETRICSによる薄膜反射率シミュレーション

近赤外光($1.5\ \mu\text{m}$)を用いたSiO₂集光器の光線通過割合の測定

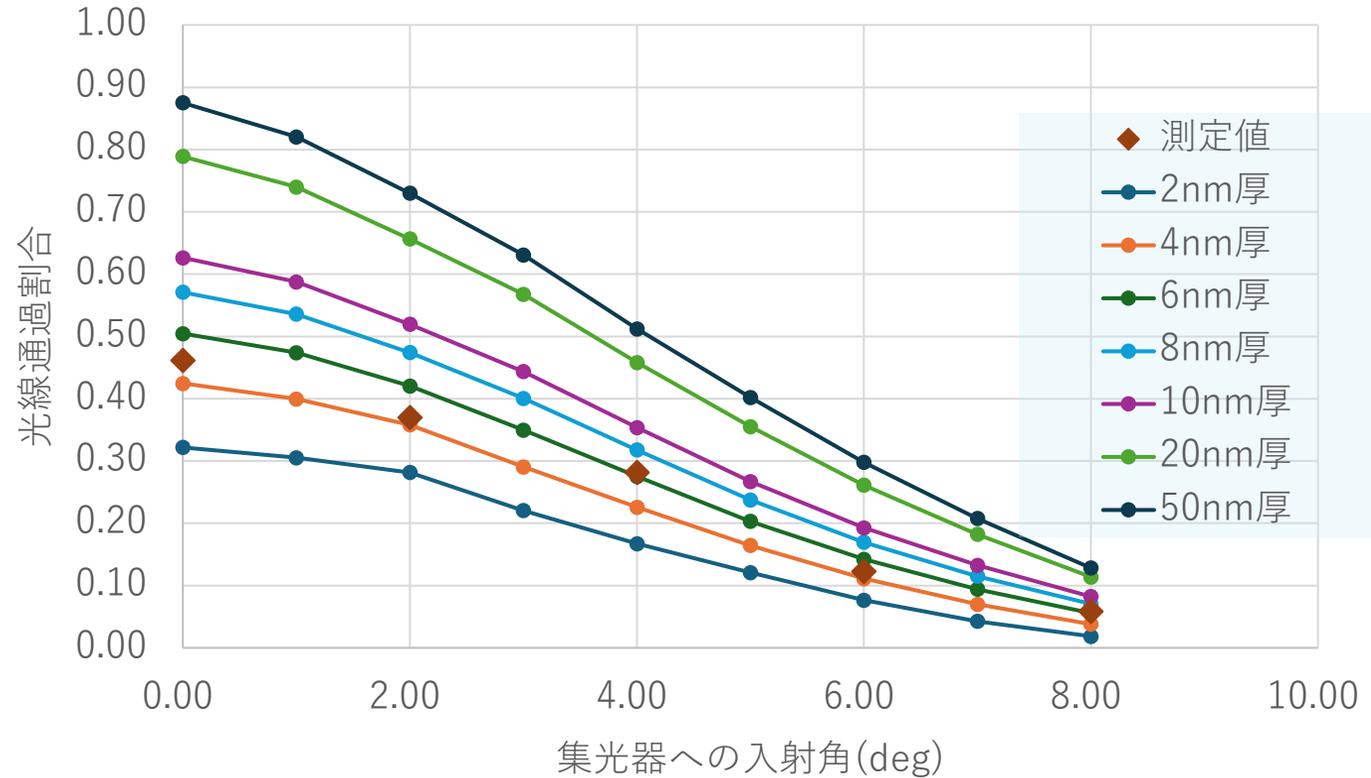
可視光と同様の測定を近赤外光で行う

PbSe検出器でチョッピングビームを測定

SiO₂石英円錐の入射角依存性($1.5\ \mu\text{m}$)



波長 $1.5\ \mu\text{m}$ ビームを用いた時の光線通過割合入射角依存性



光線通過割合 46%

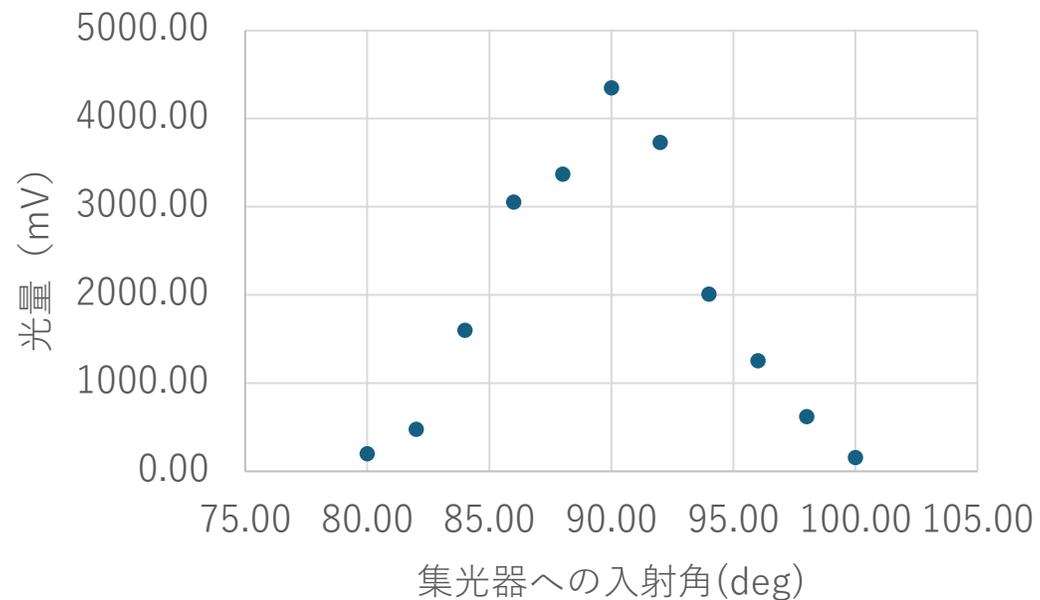
遠赤外光($9.6\ \mu\text{m}$)を用いたSiO₂集光器の光線通過割合の測定

これまでと同様の測定を遠赤外光で行う

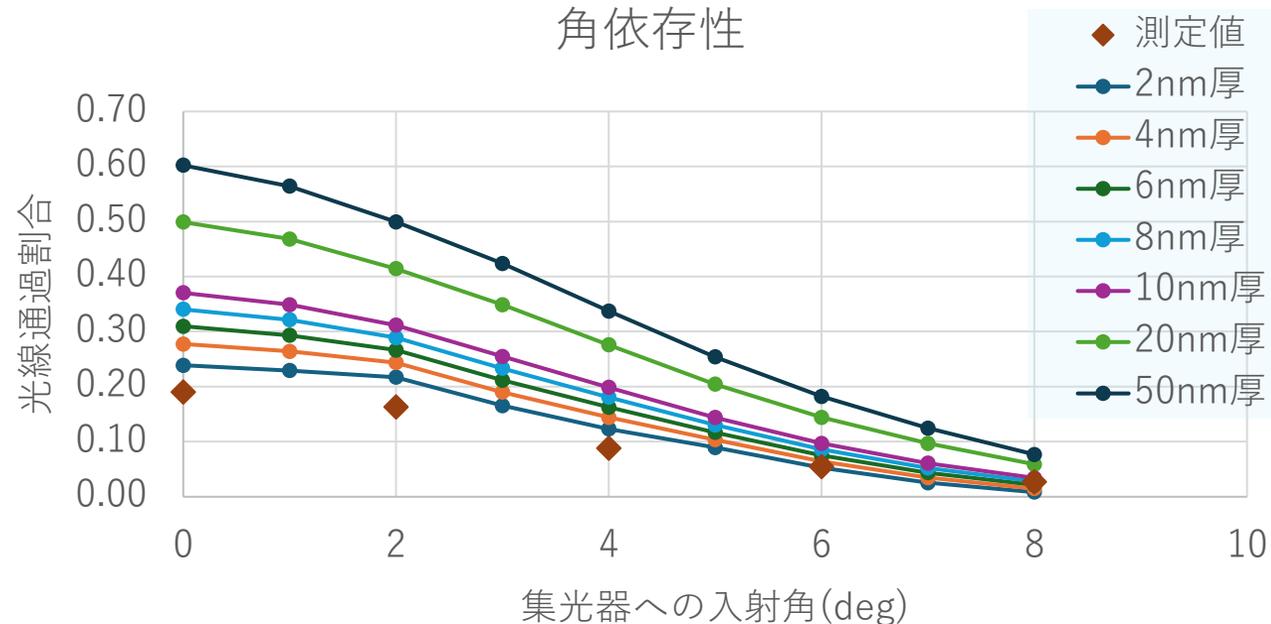
中部大学の遠赤外ビーム(波長 $9.6\ \mu\text{m}$)を用いて測定

→通過光線の検出ができた

SiO₂石英円錐の入射角依存性($9\ \mu\text{m}$)



波長 $9.6\ \mu\text{m}$ ビームを用いた時の光線通過割合入射角依存性



光線通過割合 19%

遠赤外光(57.2 μm)を用いたSiO₂集光器の光線通過割合の測定

波長9.6 μm と同様の測定を波長57 μm 光で行う

中部大学のビームを用いて測定

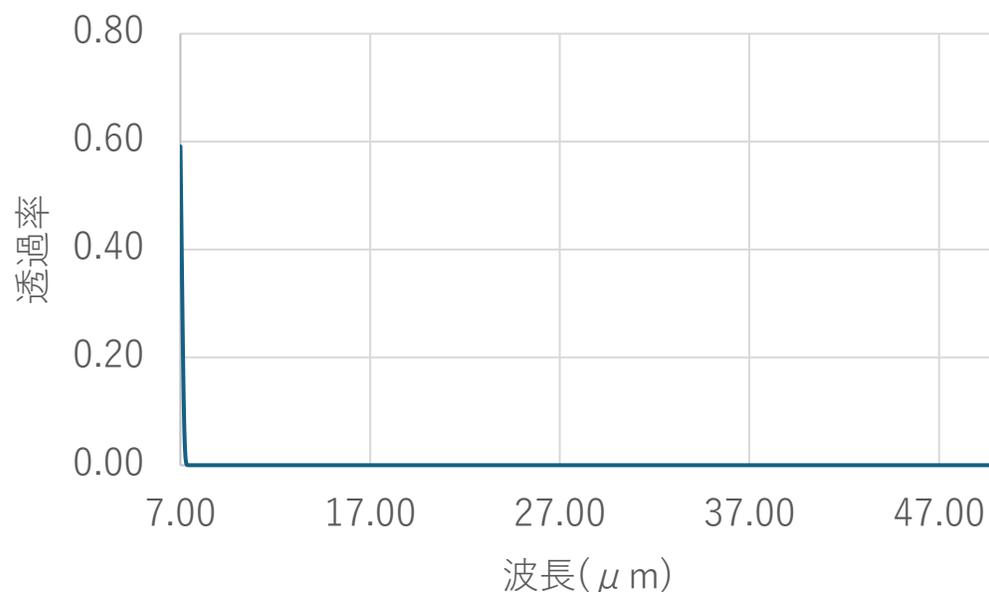
→通過光線は検出されなかった

→集光器壁面の蒸着が薄く、反射されなかった？

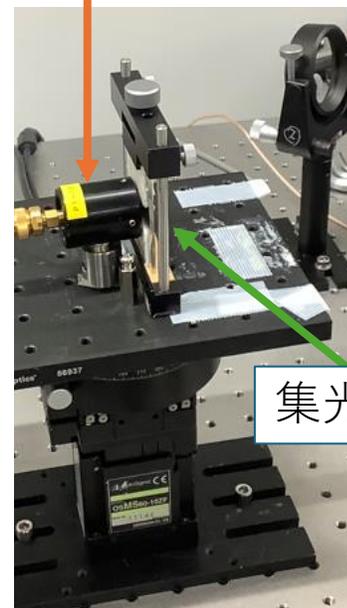
焦電検出器



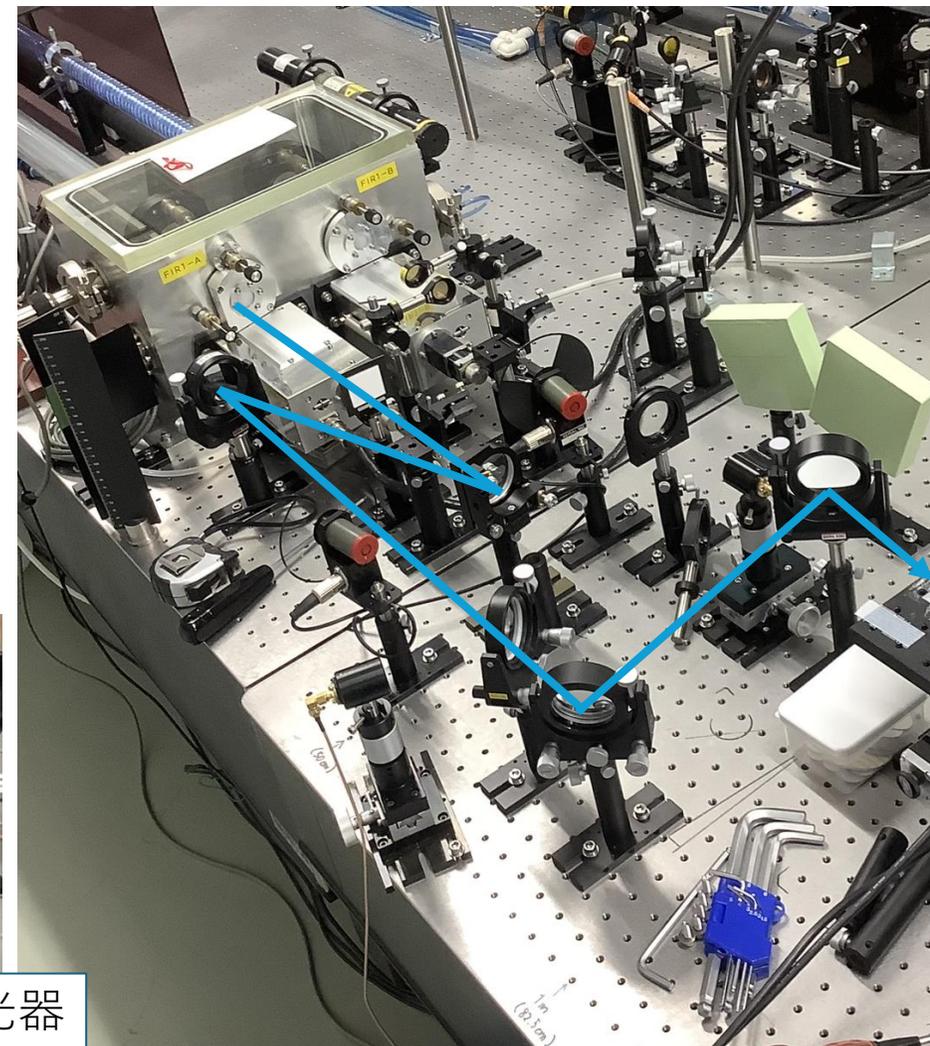
波長ごとのSiO₂透過率



Povola et al. 1972 より



集光器



遠赤外測定セットアップ

スキャンのセットアップ

各波長での集光器光線通過割合

399nm:63%

1.5 μm :46%

9.6 μm :19%

57.2 μm :検出できず

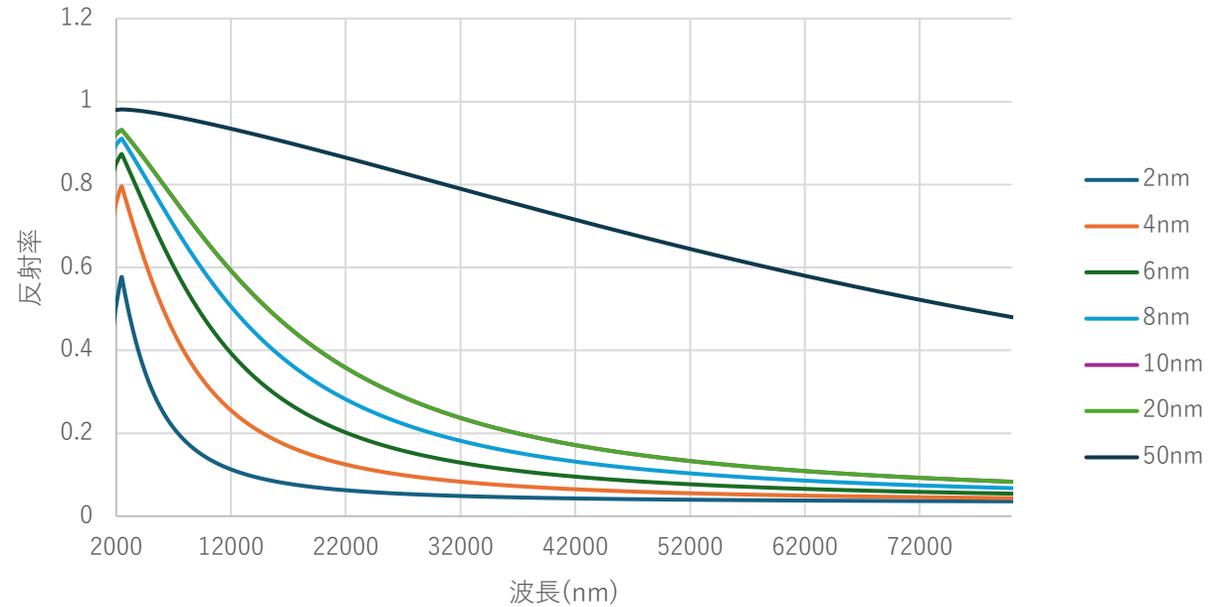
57.2 μm 光が見えない理由

→蒸着Alの膜厚が不足？

現時点での膜厚の評価を正しく行いたい

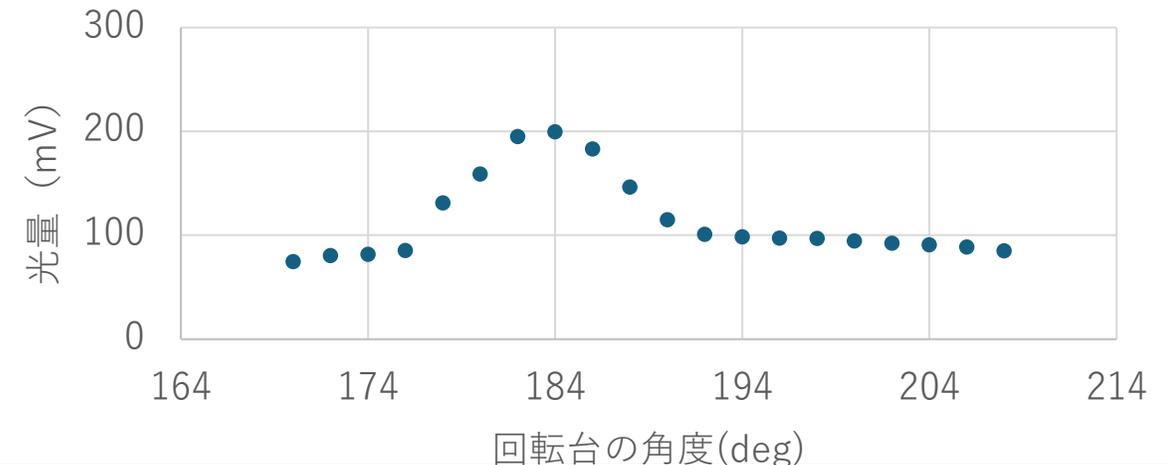
→透過光の影響を除く必要がある

Al膜厚ごとの反射率(2~80 μm)



FILMETRICSによる薄膜反射率シミュレーション

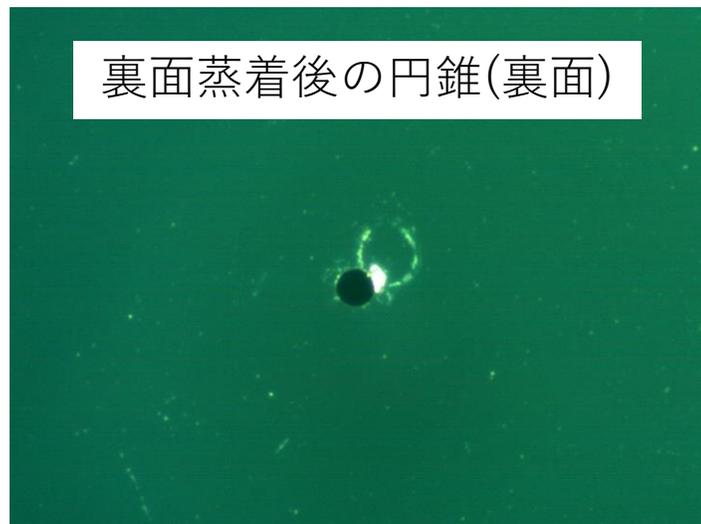
SiO₂石英円錐形集光器の入射角依存性(399nm)



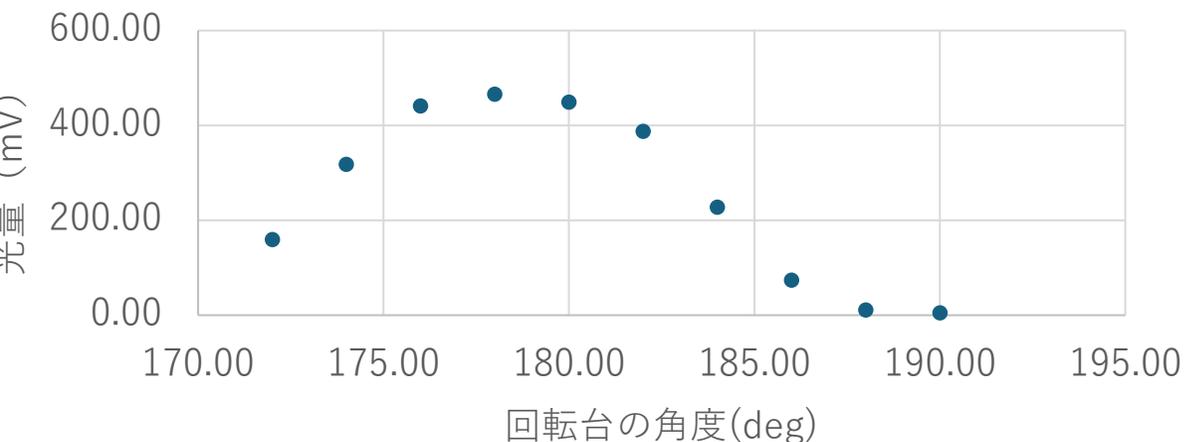
裏面蒸着後のSiO₂集光器の光線通過割合の測定(399nm)

➤ 透過光の影響を抑えるため集光器裏面を蒸着

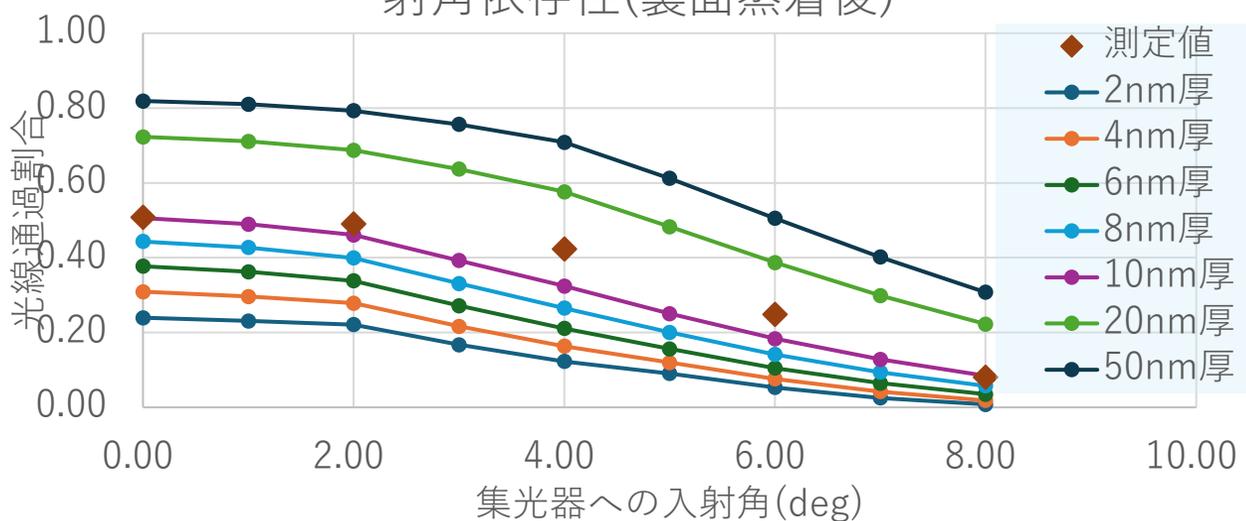
➤ 可視光での透過光(offset)が抑えられた



裏面蒸着後のSiO₂石英円錐の入射角依存性
(399nm)



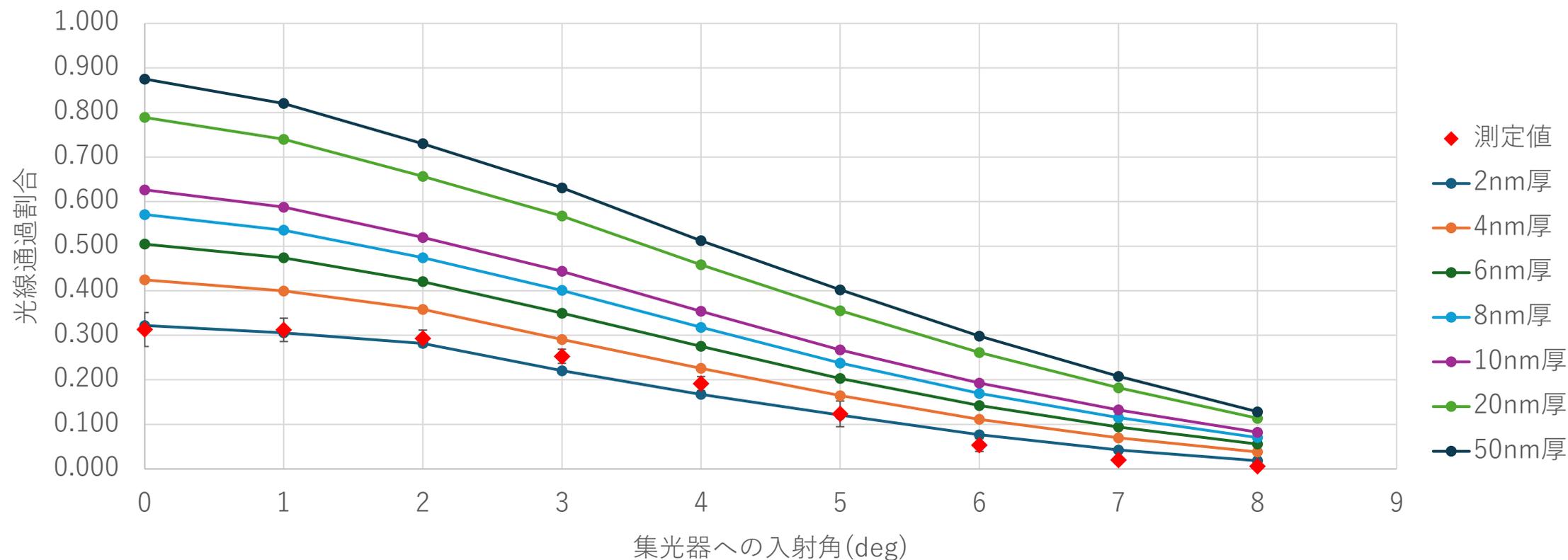
波長399nmビームを用いた時の光線通過割合入射角依存性(裏面蒸着後)



光線通過割合 51%

これまでの結果を加味すると集光器壁面のAl膜2~10nm厚?

波長1.5 μmビームを用いた光線通過割合入射角依存性(裏面蒸着)



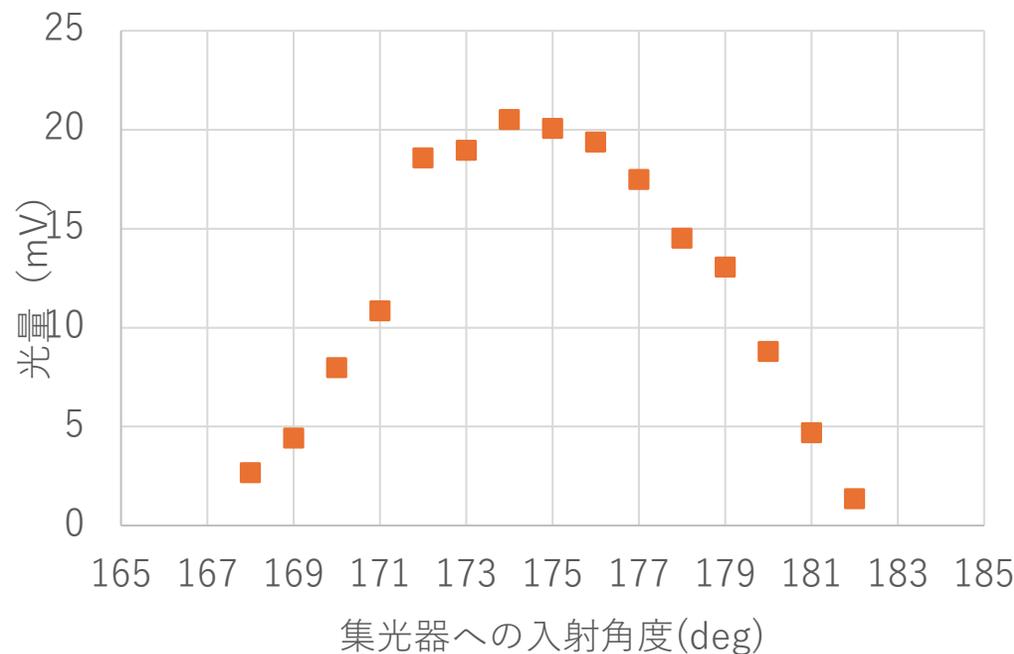
光線通過割合 31%

裏面蒸着後のSiO₂集光器の光線通過割合の測定(850nm)

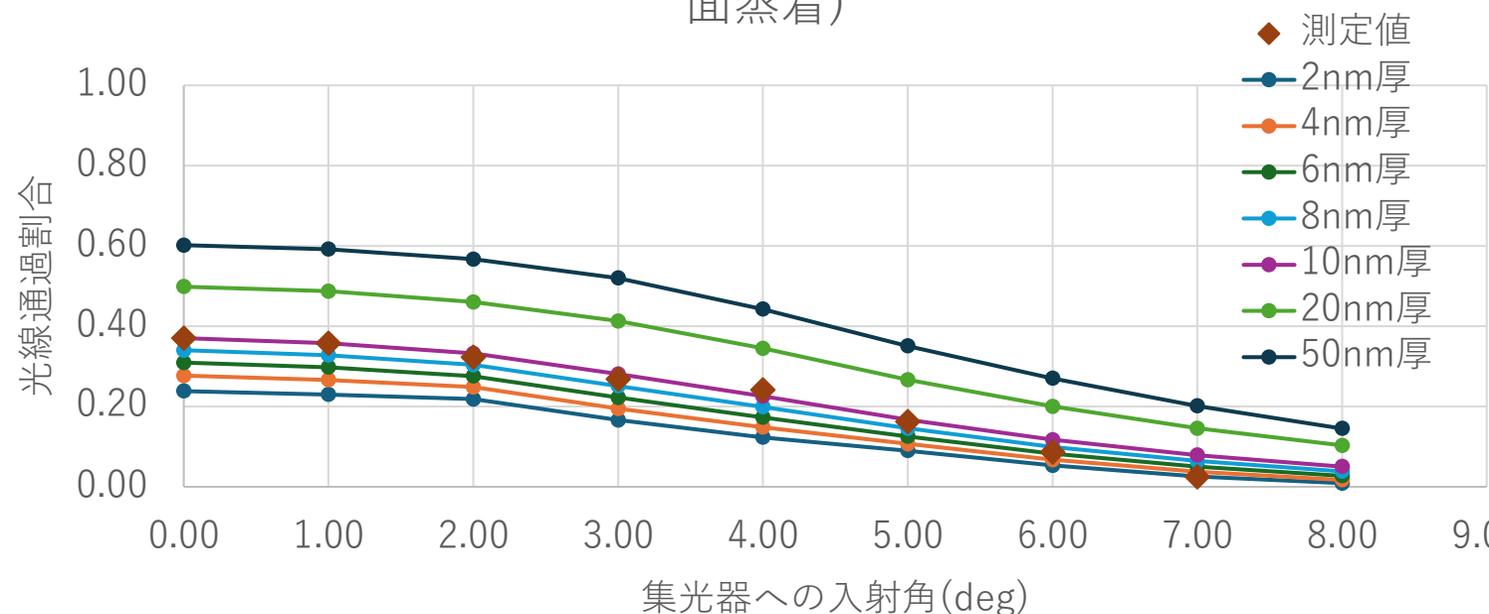
➤850nmビームを使用して測定(MPPPC検出器を使用)

➤現在詳細を測定中

裏面蒸着後円錐の入射角依存性
(850nm)



波長850nmビームを用いた光線通過割合入射角依存性(裏面蒸着)



光線通過割合 38%

- COBAND実験では遠赤外波長 $50\ \mu\text{m}$ 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($40\ \mu\text{m}$)に合わせた集光器の設計が必要。
- SiO₂製集光器サンプルを試作
 - 399nm , $1.5\ \mu\text{m}$, $9.6\ \mu\text{m}$, $57.2\ \mu\text{m}$ で評価を試みた
 - $57.2\ \mu\text{m}$ では信号を検出できなかったが、 $9.6\ \mu\text{m}$ 波長では20%の光線通過割合を得た
 - 実験で使用できる範囲内
 - 透過光の影響を排除するため、集光器基板裏面をAI蒸着
 - 399nm , $1.5\ \mu\text{m}$ で評価
 - 反射光の影響のみの性能評価ができた

- 誤差の評価のため、各波長ごとの入射角依存性の統計量を増やす
- 光線通過割合の増加のため、集光器のAl蒸着の膜厚を今の10倍程度に増やす
- 膜厚を増した集光器で遠赤外光での測定を目指す