

3月23日 2020年度 TCHoU workshop 素粒子構造研究部門パラレルセッション

# COBAND実験のための ロケット搭載型遠赤外光学素子 の設計開発

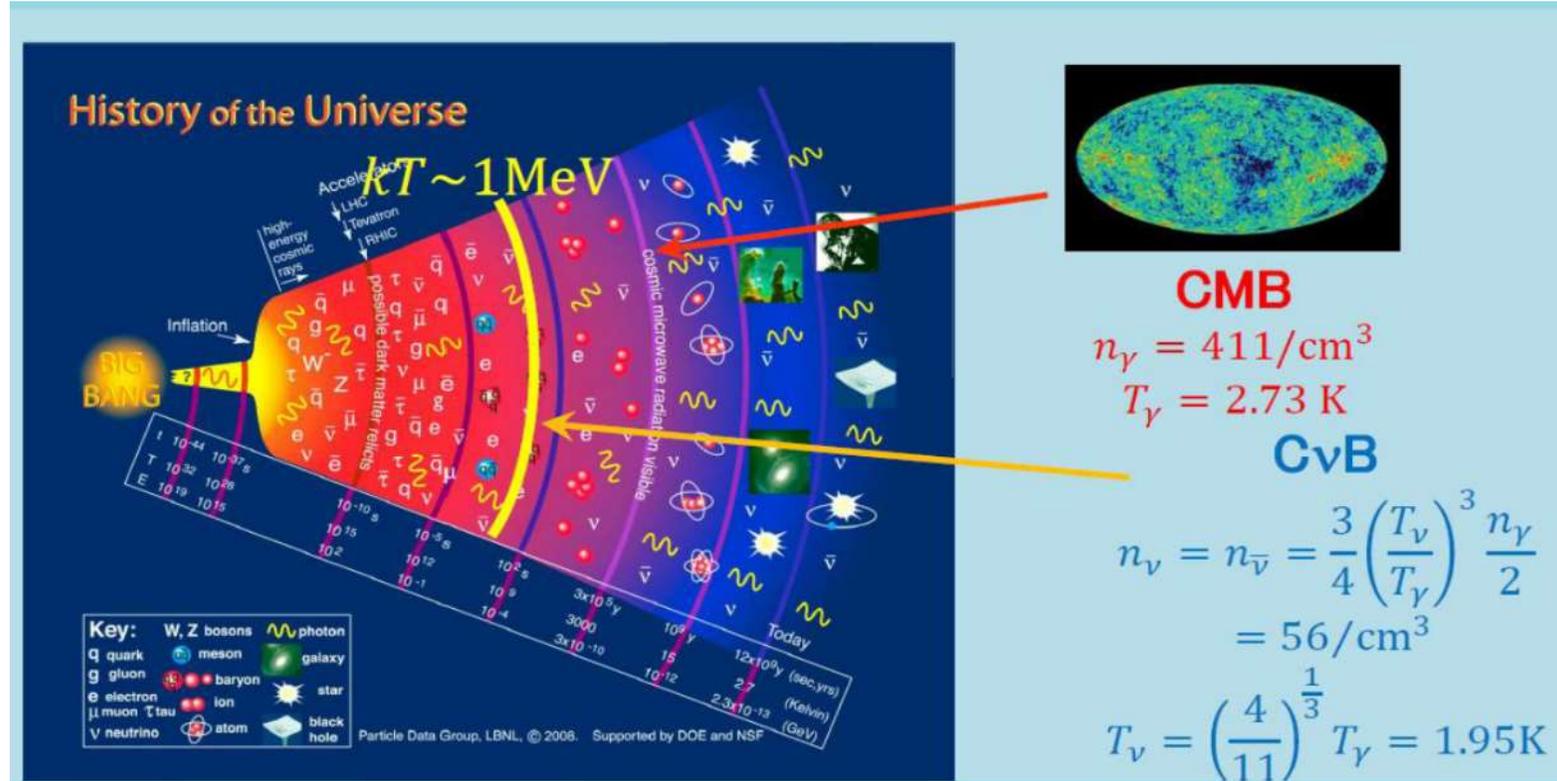
---

筑波大学 物理学専攻 素粒子実験グループ

博士課程前期2年 前川群

# 実験背景

## 宇宙背景ニュートリノとは？



ビッグバンの残骸

理論上は存在しているが、直接検出された事例は一度もない。

# COBAND実験の目的

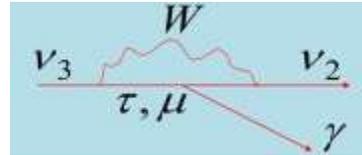
大気圏外でSTJ検出器を搭載したロケットを打ち上げ、宇宙背景ニュートリノ崩壊を観測する。(COBAND実験)

## ・ニュートリノ質量の測定

質量の二乗差はニュートリノ振動実験で判明している

→ニュートリノ崩壊の光子エネルギー(遠赤外域)でニュートリノ質量を決定する

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$



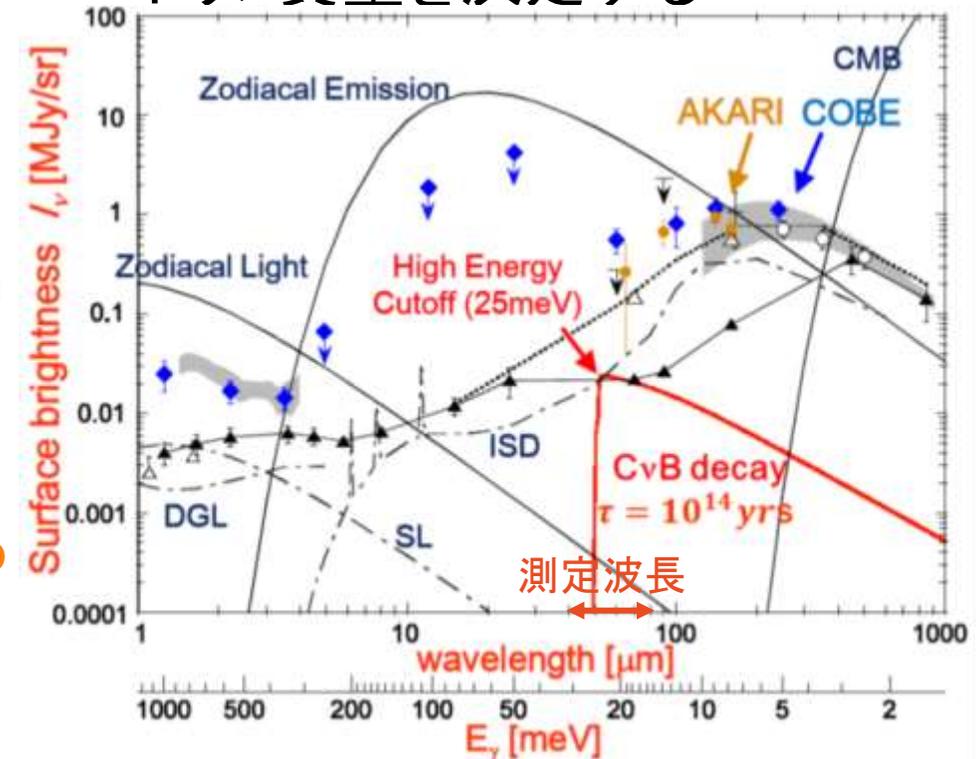
## ・宇宙背景ニュートリノの直接検出

ニュートリノは長寿命( $\tau > \text{約} 10^{17}$ 年: 左右対称モデル)

→110個/cm<sup>3</sup>存在する宇宙背景ニュートリノを利用

宇宙背景ニュートリノ崩壊はカットオフの形状

→このカットオフの波長(エネルギー)を観測で捉える

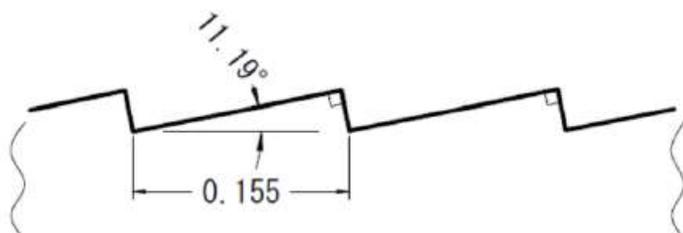


宇宙赤外線エネルギー分布図

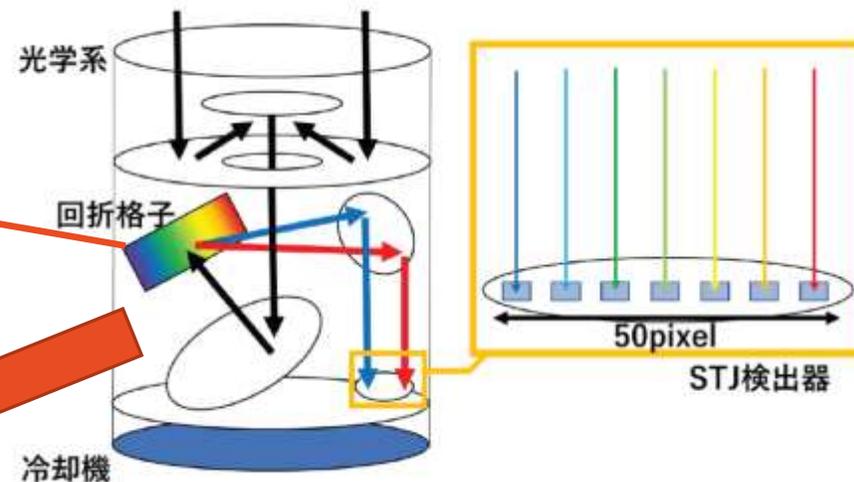
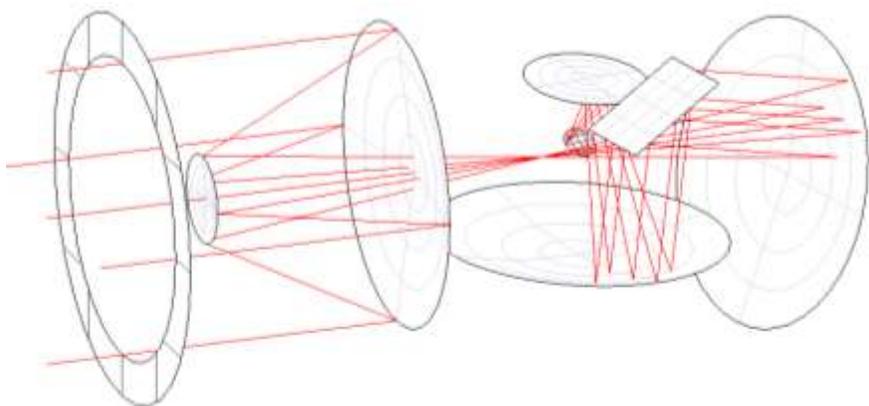
# COBAND実験における本研究の位置づけ

本研究はCOBAND実験の光学系および光学素子の設計開発を行った。

- ・回折格子性能確認(2%のエネルギー分解能)



- ・光学系設計(20%の集光効率)



Nb-Al STJ のエネルギー分解能 10%(範囲:15-30meV)  
→ 回折格子を用いて40-80 $\mu$ mを0.8 $\mu$ m毎に集光.  
エネルギー分解能を約2%以下に高める

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 1 \sim 2\%$$

# 回折格子設計

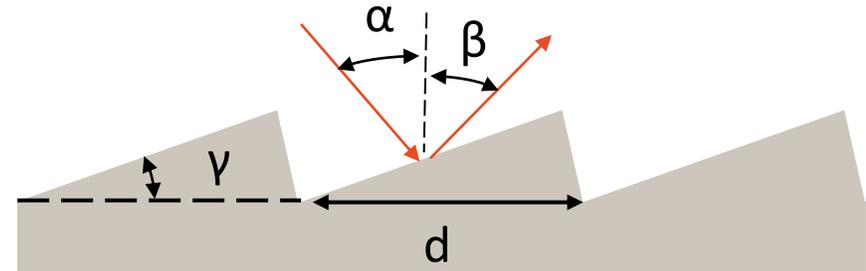
40-80 $\mu\text{m}$ を分光するための回折格子を設計した。

要求性能・想定条件

波長 $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	40-80
最大回折効率波長 $\lambda_b$ ( $\mu\text{m}$ )	50
1次回折の分散角 $ \beta_{80} - \beta_{40} $ (deg)	< 16
入射角(deg)	45

上記の条件,右の式に従い,  
溝幅とブレード角を決定した。

溝幅 $d$ ( $\mu\text{m}$ )	365	155
ブレード角 $\gamma$ (deg)	5.12	11.19
1次回折の分散角 $ \beta_{80} - \beta_{40} $ (deg)	7.5	15.7
サイズ[縦 $\times$ 横 $\times$ 高さ ( $\text{mm}^3$ )]	50 $\times$ 50 $\times$ 10	



入射角と回折角の関係

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = n\lambda$$

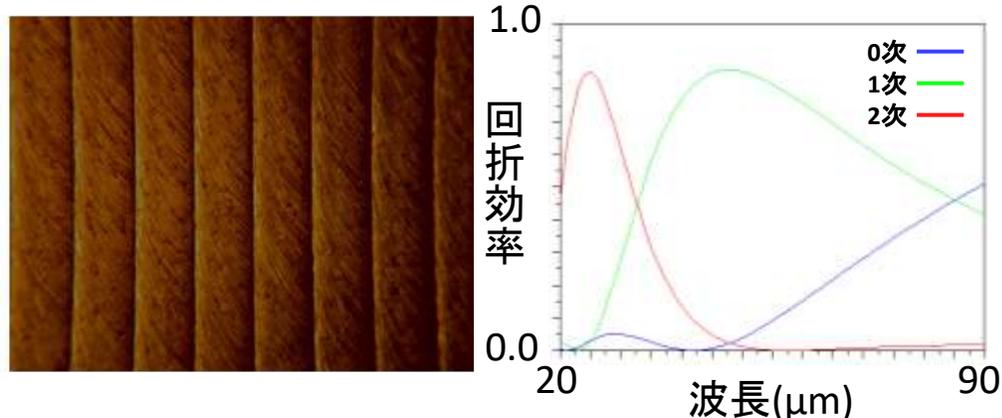
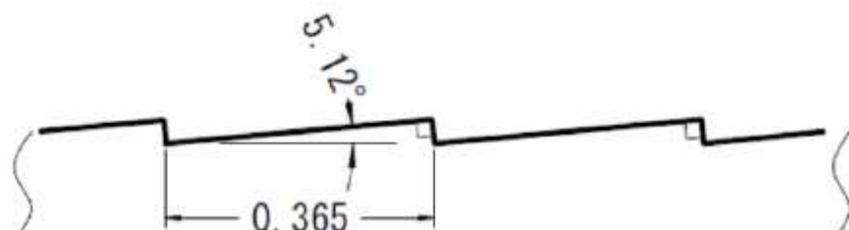
$\lambda_b$ とブレード角  $\gamma$ の関係

$$\lambda_b = 2d \cos(\alpha - \gamma) \sin \gamma$$

# 回折格子のモデル

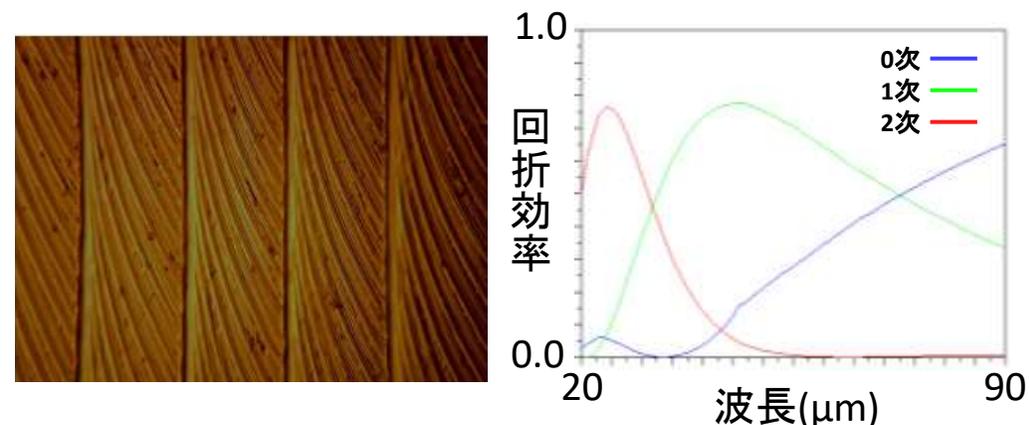
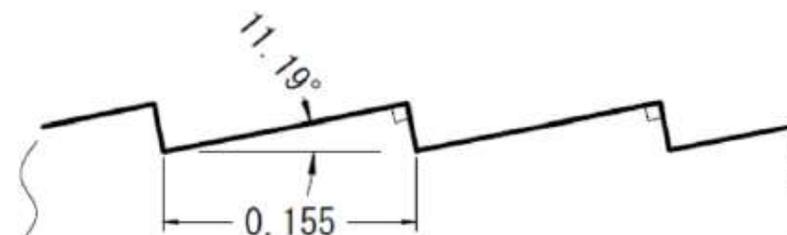
2種類の回折格子を設計した.

365 $\mu\text{m}$ モデル



TE偏光 回折効率-波長依存性

155 $\mu\text{m}$ モデル



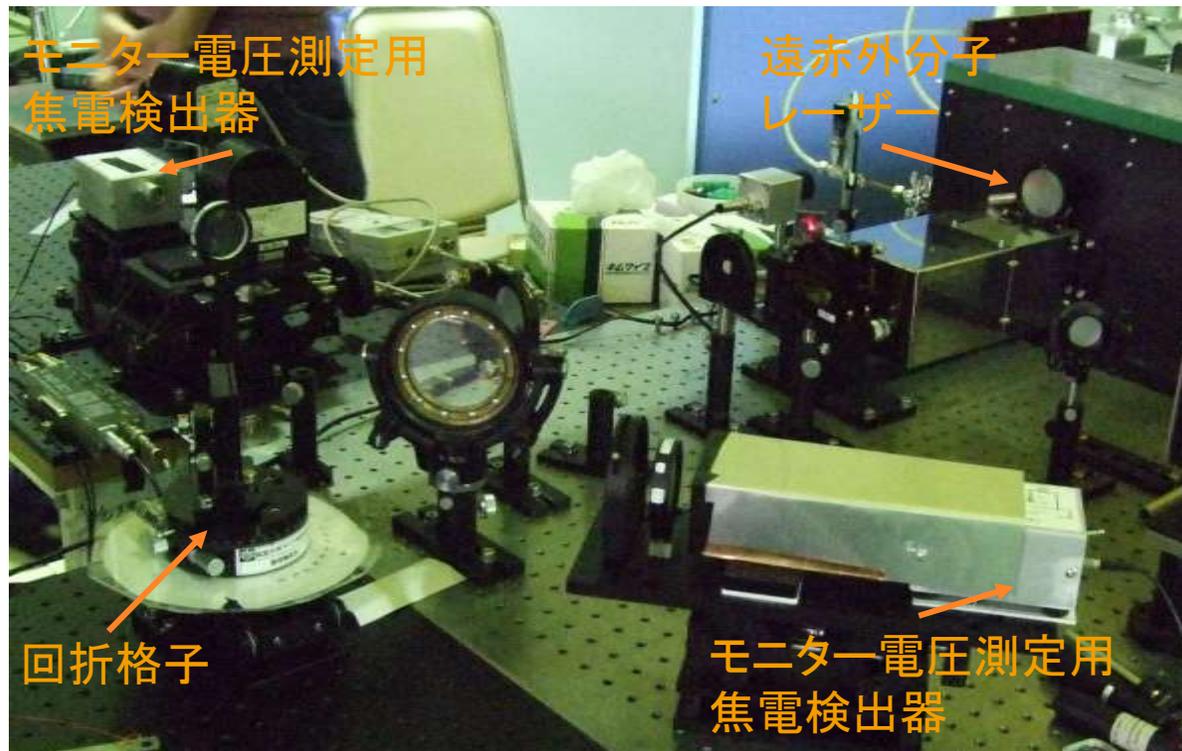
TE偏光 回折効率-波長依存性

Al材質を切削加工し,表面にAuとAlの2種の厚さ100nmの金属真空蒸着を行い,計4種の回折格子を製作した.



# 回折格子の実験の様子

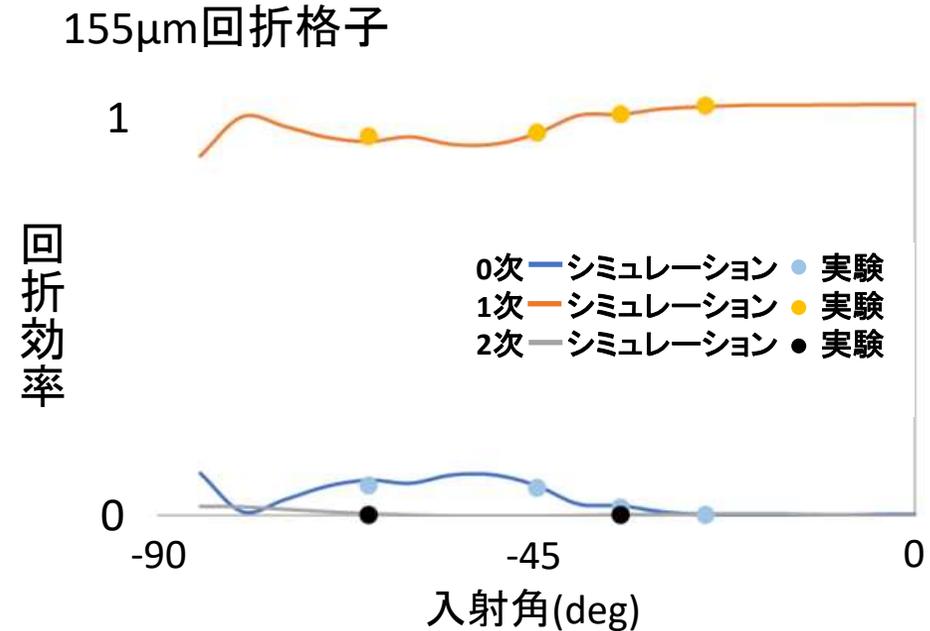
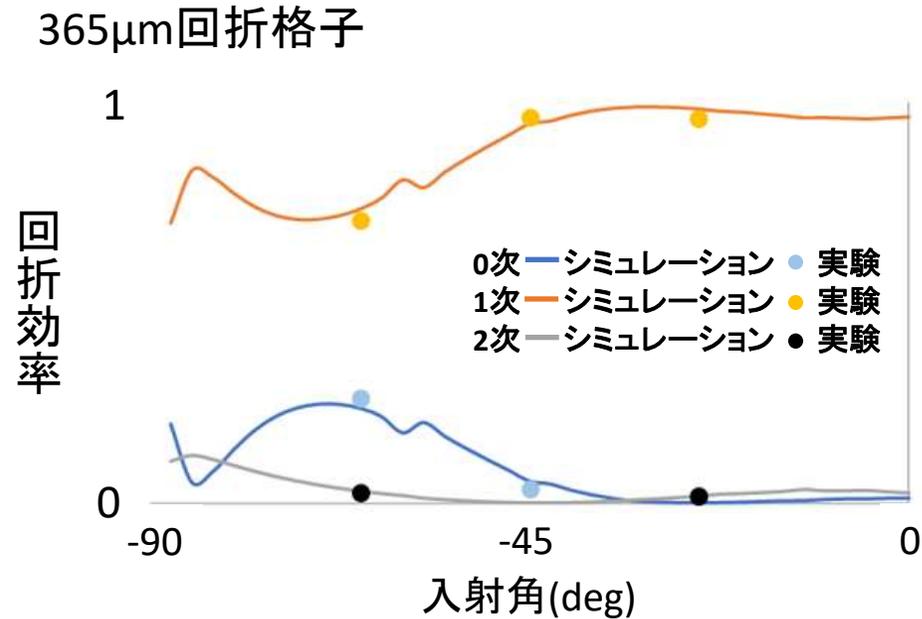
回折格子の性能を2回の福井大(遠赤センター)での実験で検証.



$V_1$ : モニター電圧  
 $V_2$ : 計測電圧

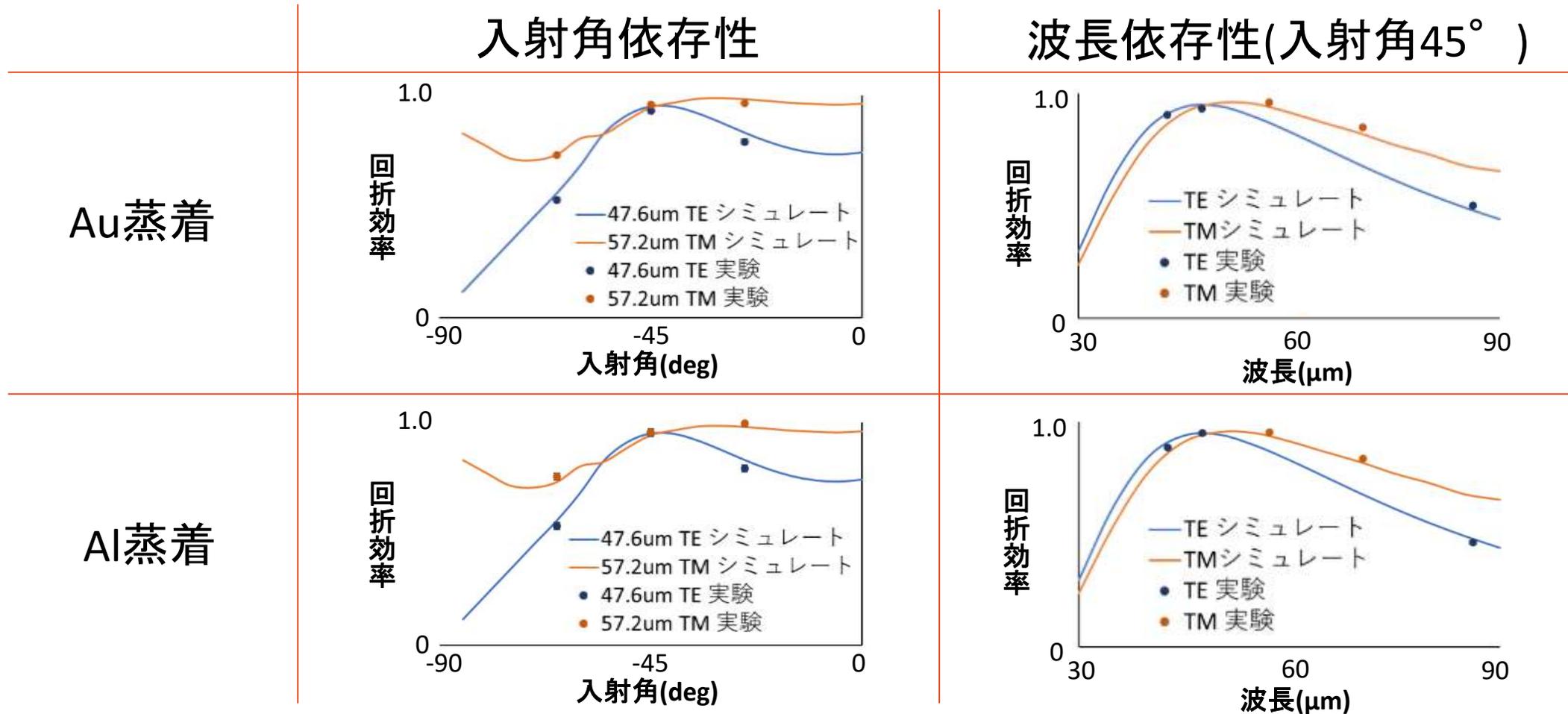
# 回折格子の実験結果(1回目)

溝幅による回折効率の入射角依存性を測定した.  
測定波長は $57.2\mu\text{m}$ TM偏光,回折格子表面の蒸着材質はAu.



回折効率の入射角依存性はシミュレーションと一致している. 入射角45度で365 $\mu\text{m}$ の方が測定波長全体の回折効率が高い.また,分散角が狭いほうが光学系の収差を抑えやすいので,365 $\mu\text{m}$ を使用することに決定した.

# 回折格子の実験結果(2度目)



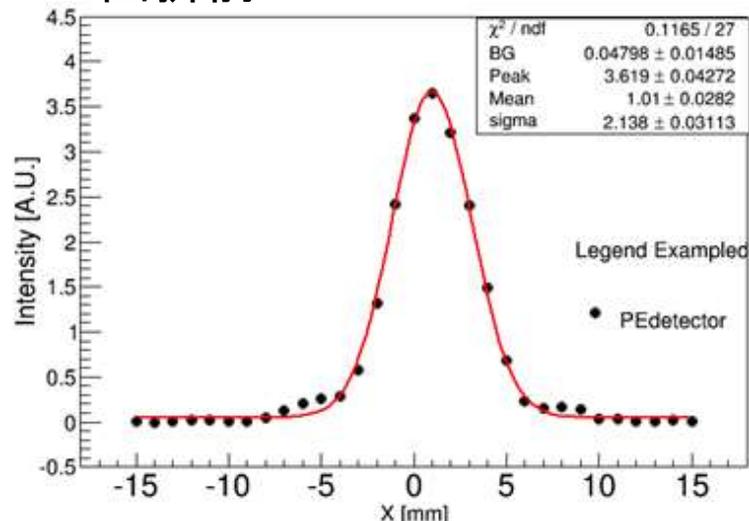
シミュレーションと非常に合致している.材質による差異は見られない.

# ビームプロファイル

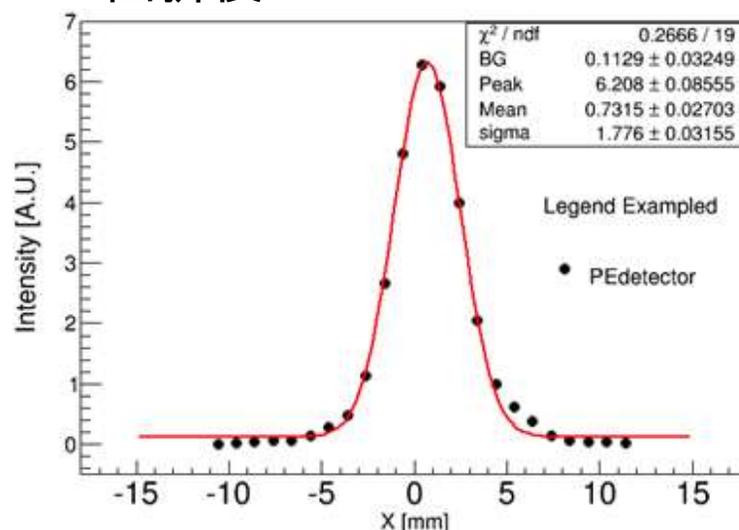
製作した回折格子には切削による微小の溝が存在する。  
この溝によって分解能の悪化が発生しているかを確認した。  
焦電検出器を0.5mmずつ動かして、電圧測定を行い、ガウシアンフィットを行った。

波長47.6 $\mu$ m, 回折格子:365 $\mu$ m\_Al蒸着

回折前



回折後

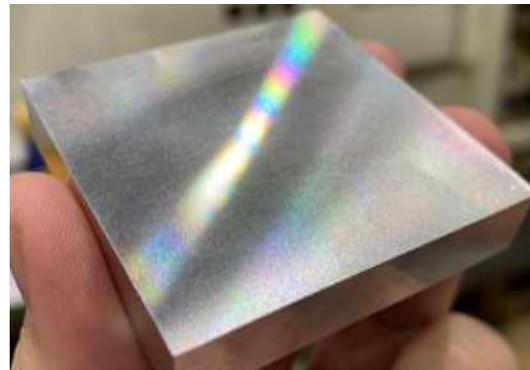
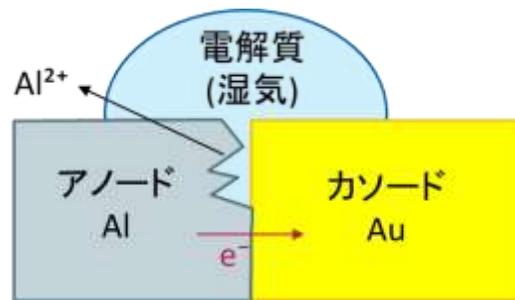


	ビーム幅 $4\sigma$ (mm)
回折前	$8.55 \pm 0.13$
回折後	$7.10 \pm 0.13$

回折前後でビームの広がりは見られない。  
切削跡の影響は無いと考えられる。

# 回折格子のまとめ

- ・シミュレーションと実験の回折効率に違いはほぼない  
→365 $\mu\text{m}$ の回折格子を用いたほうが良い  
また,50 $\mu\text{m}$ 付近において回折効率は最大になることが確認できる.
- ・Au蒸着とAl蒸着による回折効率に違いはほぼない  
→異種金属接触腐食の危険性と蒸着にかかる料金を考えると  
Al蒸着の方が有用である.



Al蒸着の365 $\mu\text{m}$ の回折格子を今後用いる。  
また,光学設計においても,その回折格子を用いた状態を想定して設計する。

# 光学系設計

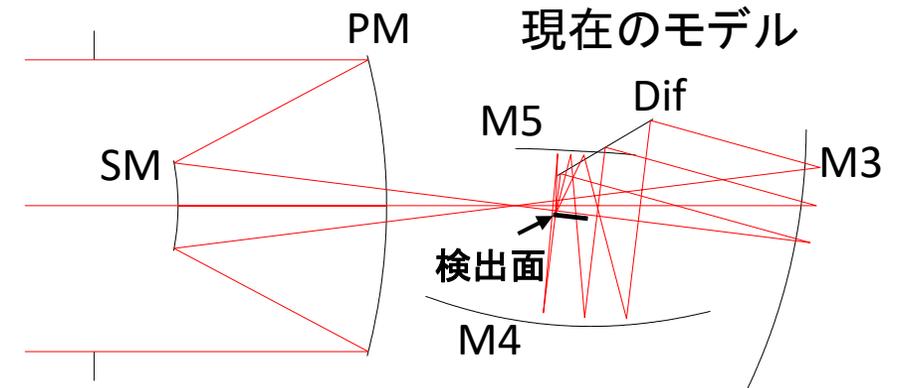
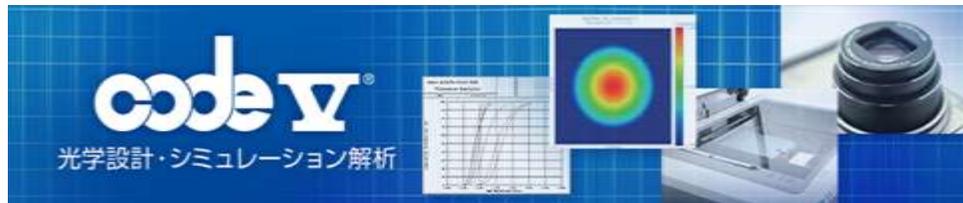
下記の条件のもと,光学設計を行った.

制限・想定条件:

主鏡直径(mmΦ)	200	視野角(deg)	0.021
奥行(mm)	500	集光効率(%)	20
検出サイズ(umΦ)	400		
焦点距離(mm)	546		

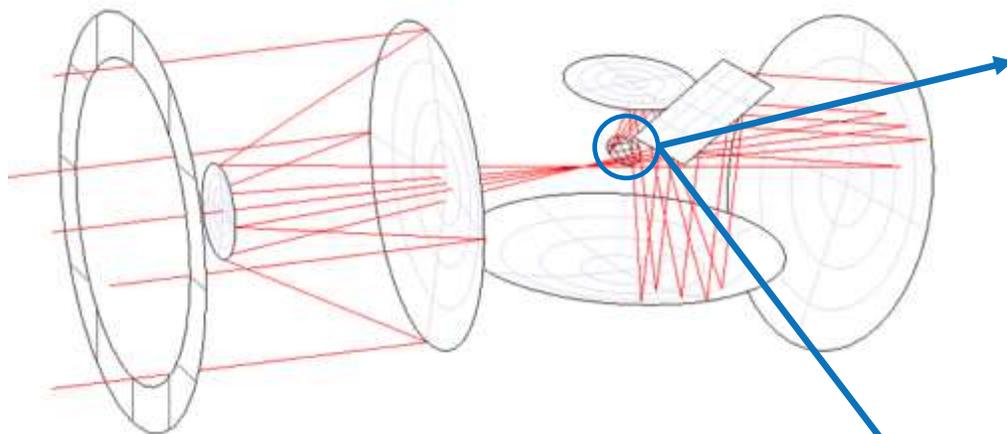
Fナンバー(光学系の明るさの指標)  
 $F/\# = \text{焦点距離} / \text{主鏡直径} \approx 2.73$

設計はCODE-V(光学設計プログラム)を用いて行った.  
現在の光学系は反射鏡5枚と回折格子1枚  
で構成されている



# 集光効率の算出

現在の光学モデルから集光効率を計算する。

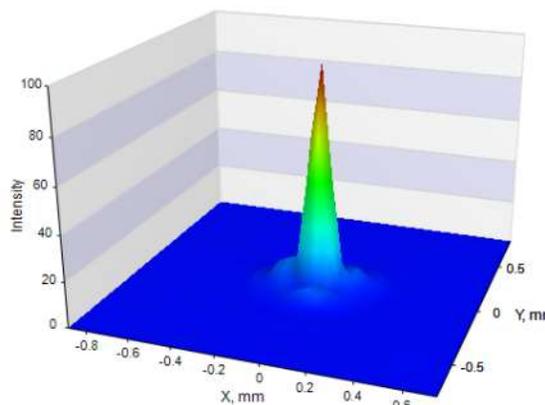


集光効率

= 回折格子の効率

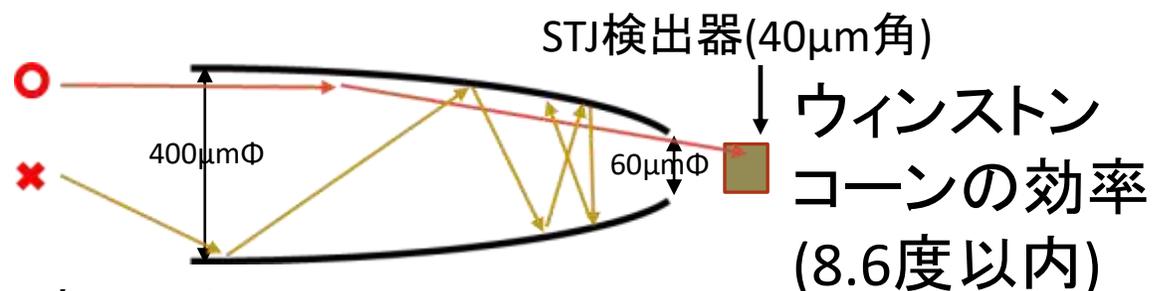
× エンサークルドエネルギー

× ウィンストンコーンの効率



エンサークルド  
エネルギー  
(スポット径  
400um内部の  
光量の割合)

エアリーディスク(回折像の大きさ)  $D_{airy} = 2.44 \cdot F/\# \cdot \lambda$   
→ 波長, F値が大きいとエンサークルドエネルギーが低くなる.



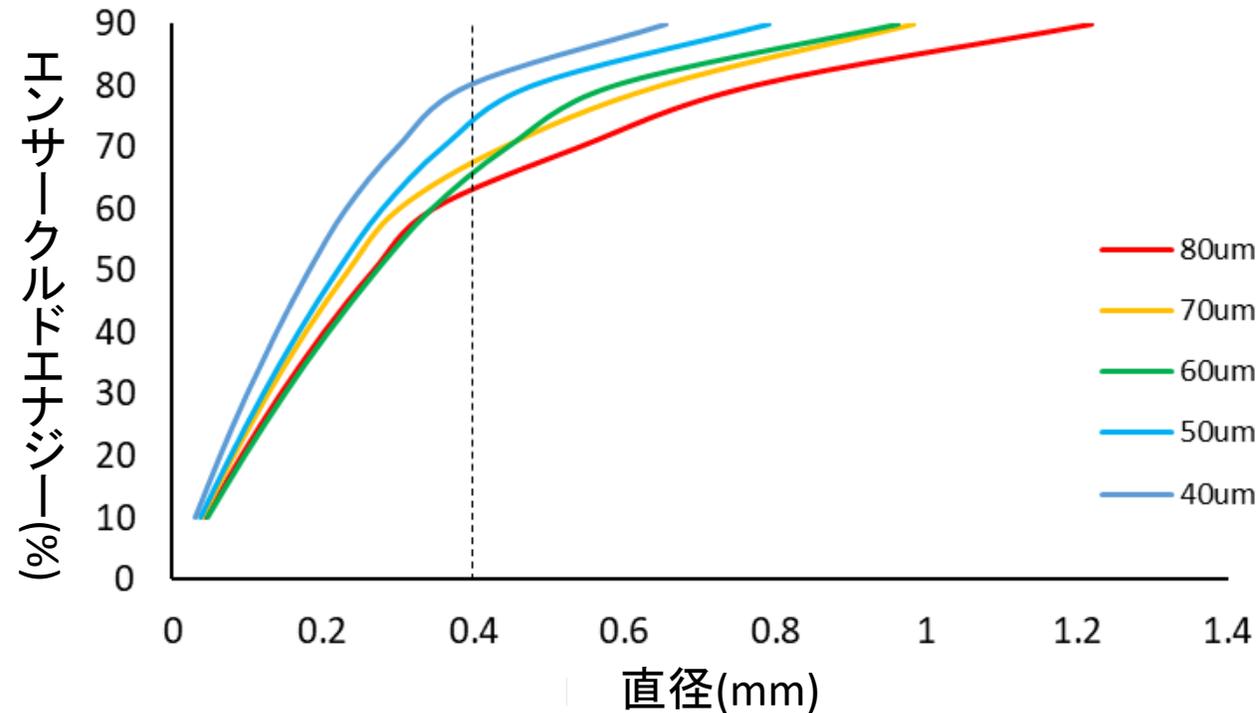
ウィンストンコーン

(口径縮小を行い,角度制限を伴うライトガイド)

# 光学系の性能予測

Code-Vのシミュレーションで前頁の二つを調べた。

エンサークルドエネルギー

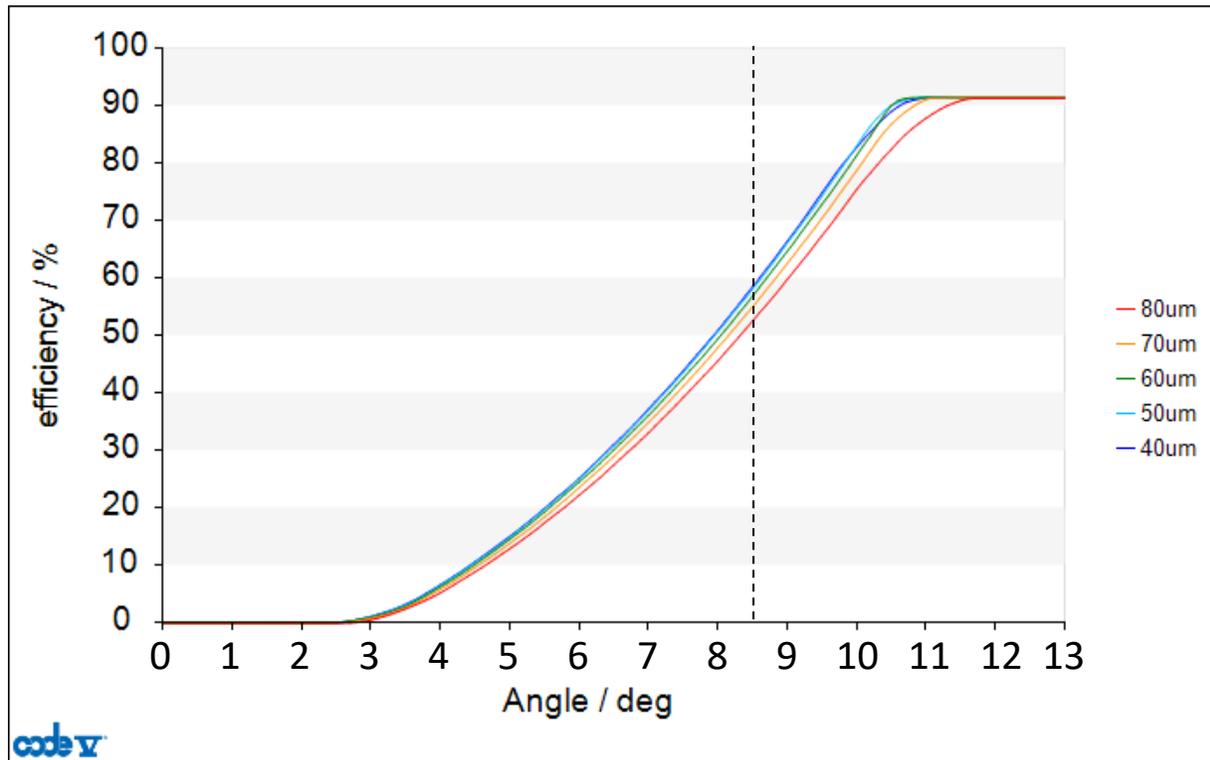


波長(um)	効率(%)
40	82.0
50	75.1
60	66.7
70	69.4
80	64.6

# 光学系の性能予測

Code-Vのシミュレーションで前頁の二つを調べた。

## ウィンストンコーンの効率



波長(um)	効率(%)
40	60.0
50	59.6
60	58.5
70	56.5
80	54.1

# 光学系の性能まとめ

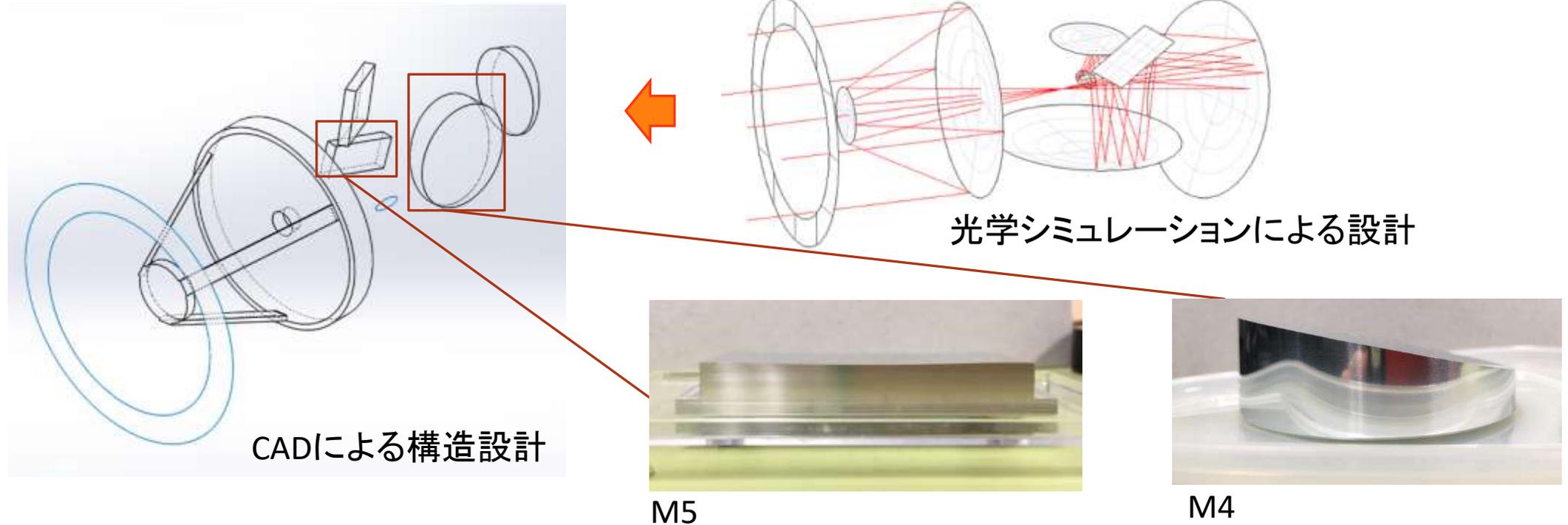
波長 ( $\mu\text{m}$ )	エンサークルド エネルギー(400 $\mu\text{m}$ $\phi$ ) (%)	ウィンストンコーン の効率(< 8.6度) (%)	回折効率 (%)	集光効率 (%)
40	82.0	60.0	76.8	37.8
50	75.1	59.6	85.3	38.2
60	66.7	58.5	75.6	29.5
70	69.4	56.5	62.7	24.6
80	64.6	54.1	51.1	17.8

40-70 $\mu\text{m}$ は効率が目標値20%以上を達成している。

この光学系で試作を行い、光学系全体の性能計測を行っていく。

# 試作ミラーの製作

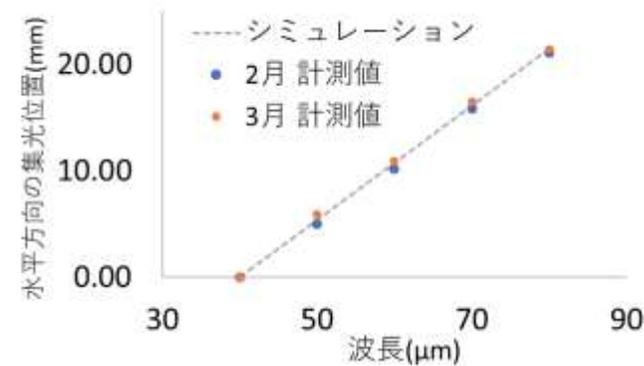
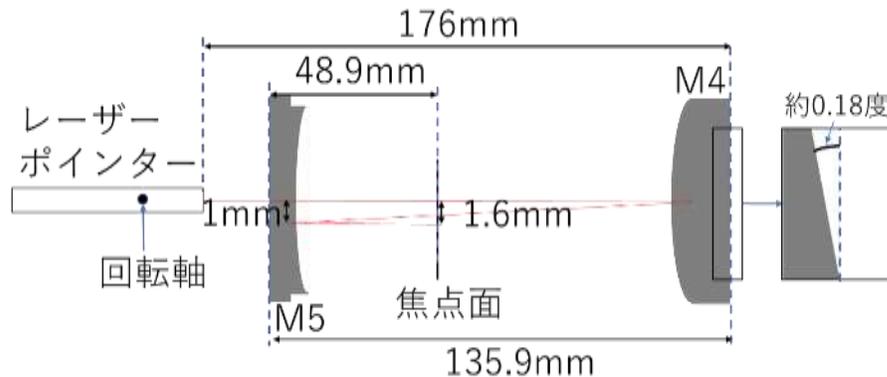
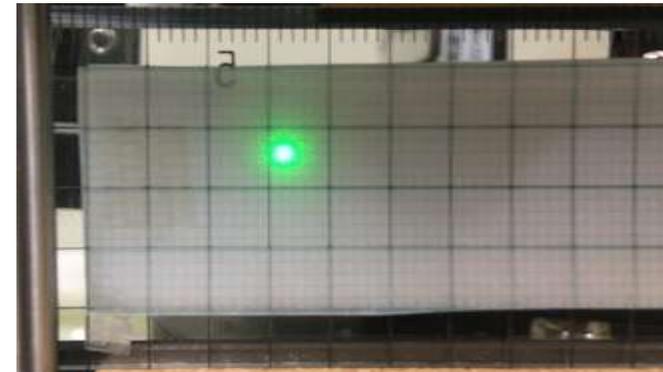
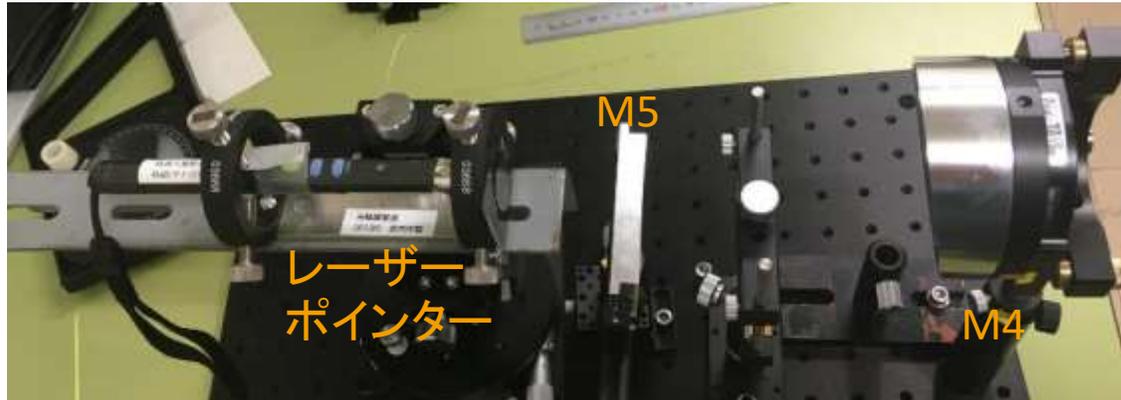
設計したミラーの試作を行っており,現在はM4,M5のミラーを製作した.



全部のミラーを試作すると費用が掛かってしまうので,回折格子以降の光路を再現し,市販のレーザーポインターで光路の再現を試みた.

# 試作ミラーの性能の確認

試作ミラーの性能を確認した。



光学装置を組み、各波長の回折角を再現し、集光位置の確認を行った。  
→波長40-80μm間の水平距離は予想対し2%以内のズレで再現できた。

# まとめ

---

ニュートリノ崩壊探索実験のための光学系,光学素子の開発を行った.

## 回折格子の設計開発評価

- ・ 実験結果はシミュレーションを矛盾なく再現した.
- ・ Al蒸着とAu蒸着の回折効率の違いはない.
- ・ 溝幅 $365\mu\text{m}$ のAl蒸着回折格子を使用する.

## 光学系の設計開発

- ・ シミュレーションでは集光効率は37.8-17.8%
- ・  $40\text{-}70\mu\text{m}$ は目標の集光効率20%以上を達成した.
- ・ 試作機の性能を確認する作業に移っていく。

現在は試作の段階の差し掛かっている.光学系全体の試作品を作成し、分光実験や冷却器などを用いた耐環境実験を行っていく予定である.

BACK UP

---



# 実験背景

## ニュートリノとは？

- ・素粒子、フェルミオン、レプトンに属する
- ・電荷はない
- ・質量はものすごく小さいけどある

## ニュートリノ振動とは？

飛んでいる間にニュートリノの種類が変わる現象

→ニュートリノには質量が存在している！

	第一世代 (first)	第二世代 (second)	第三世代 (third)
レプトン (LEPTON)	● 電子ニュートリノ	● ミューニュートリノ	● タウニュートリノ
	● 電子	● ミューオン	● タウ
クォーク (QUARK)	● アップ	● チャーム	● トップ
	● ダウン	● ストレンジ	● ボトム

## T2K実験



# スポット径

エンサークルドエネルギー

光線を集光すると「点」が出現する。レンズ及びミラーの口径が大きいと回折で広がり、光量が分散する。エンサークルドエネルギーは指定した円の大きさにその光量がどの程度入っているかを示している。

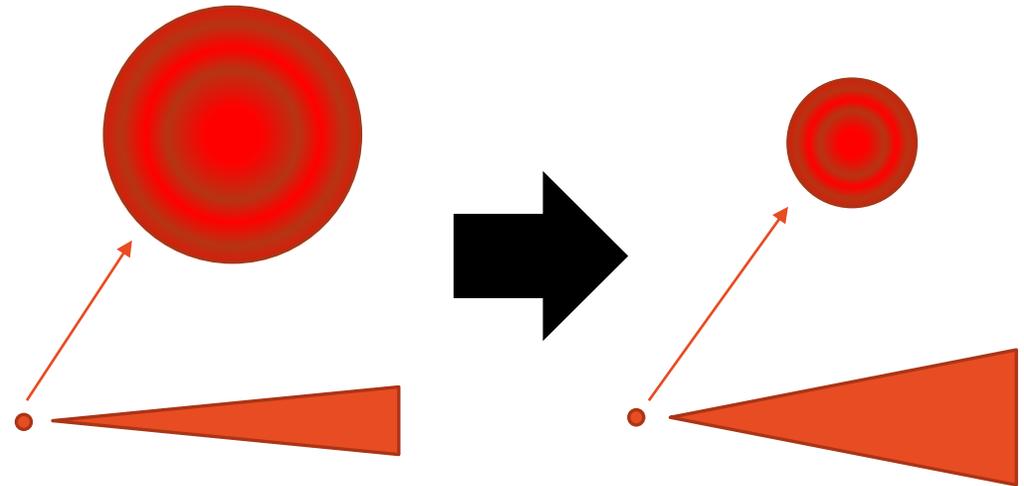
エアリーディスク(回折限界)

エンサークルドエネルギーの指標、値が大きいほどエンサークルドエネルギーの悪化を示す

$$D_{Airy} = 2.44 \times F/\# \times \text{波長}$$

$$F/\# = \tan^{-1} \theta$$

単純な集光で40-80um,10度以内だと回折限界は



# 入射角度の制限

---

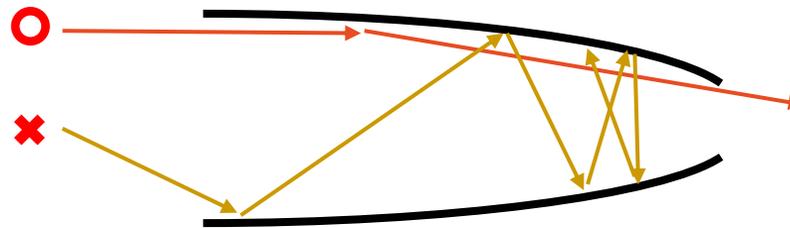
## 入射角度を制限する理由

焦点面の400umの穴に光線を入れた後,60umに縮小し,STJに伝達させる。  
そのライトガイドとして、「ウィンストンコーン」を使用している。

## ウィンストンコーン

### 入射角

迷光をカットするのに優秀だが、今回はそれがネックになっている。



# 回折格子設計

## 回折角の分解能

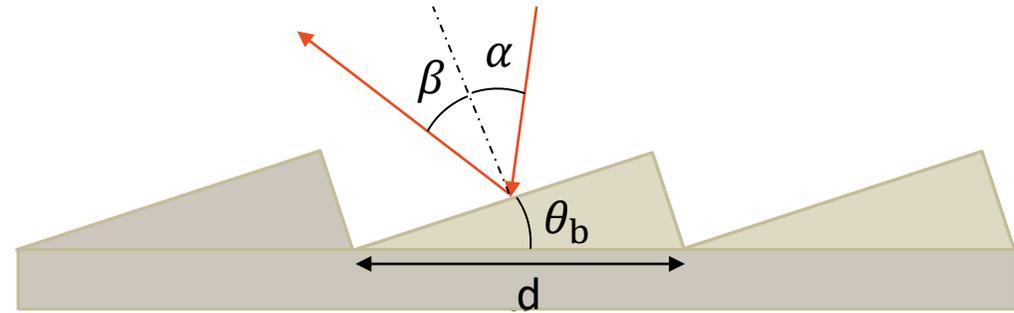
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{d}{mW}$$

( $m$ : 回折の次数,  $d$ : 溝幅,  $W$ : 回折格子の幅)

溝幅365 $\mu\text{m}$ , 回折格子の幅を50mm, 回折次数1と仮定すると,

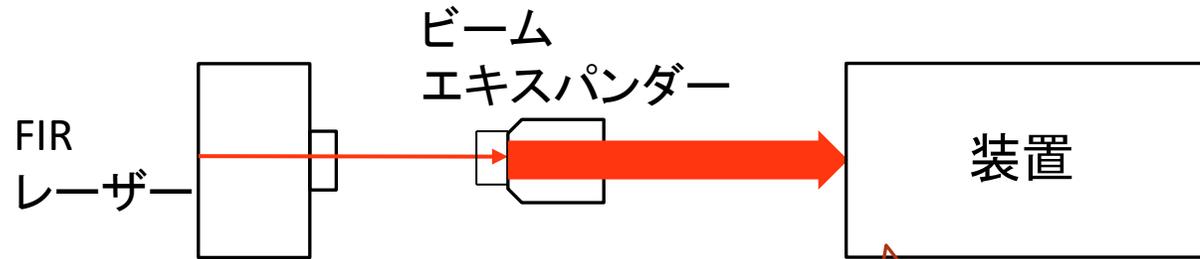
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.73\%$$

ただし, 光学系を通しての分解能はこの分解能に劣る.



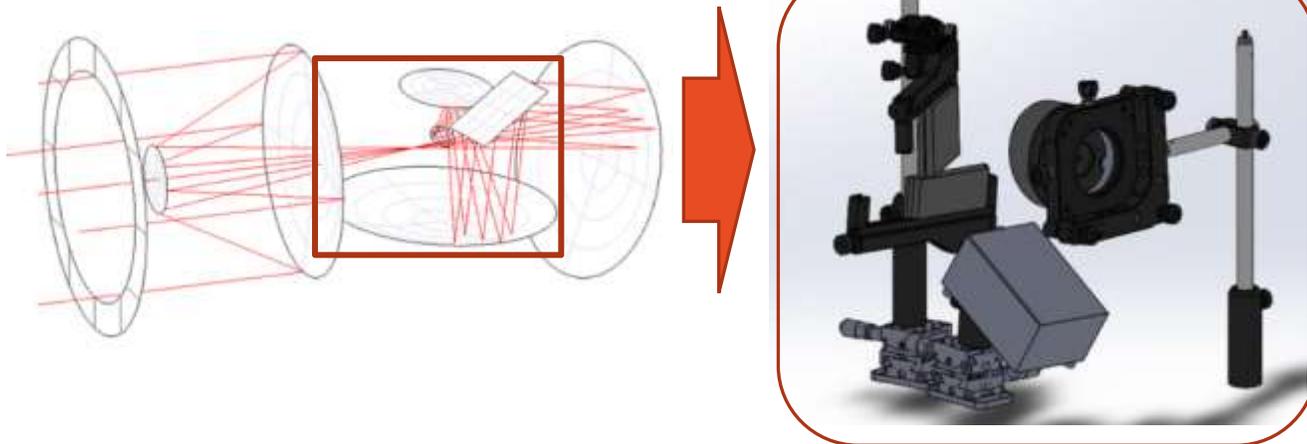
# 実験予定図

時期の都合上、光学系全体ではなく、回折格子以降の光学系で実際に性能を調べる予定。



実験設備：  
福井大赤外線センター

調査項目  
・結像性能  
(結像位置、スポットサイズ)



集光効率の調査は  
回折格子以前のミラーが  
作成されてから調べる。