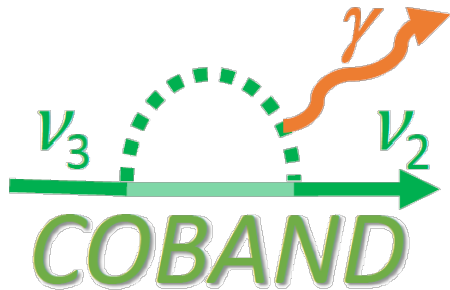


# COBAND実験

2018 Nov. 22<sup>nd</sup>

飯田崇史(筑波大)

for the COBAND collaboration



# 自己紹介

- ・名前: 飯田崇史(いだたかし)
- ・所属: 筑波大学・助教



ツイッターやっています。  
フォローしてください！！

2005年～ 東大宇宙線研

神岡で**スーパーカミオカンデ実験**。

超新星爆発からの宇宙背景ニュートリノ探索で修士、博士論文

2010年～ クイーンズ大学(カナダ)

**SNO+実験**(2重ベータ崩壊探索、太陽ニュートリノ観測)

2013年～ 大阪大学

**CANDLES実験**(2重ベータ崩壊探索)、暗黒物質探索

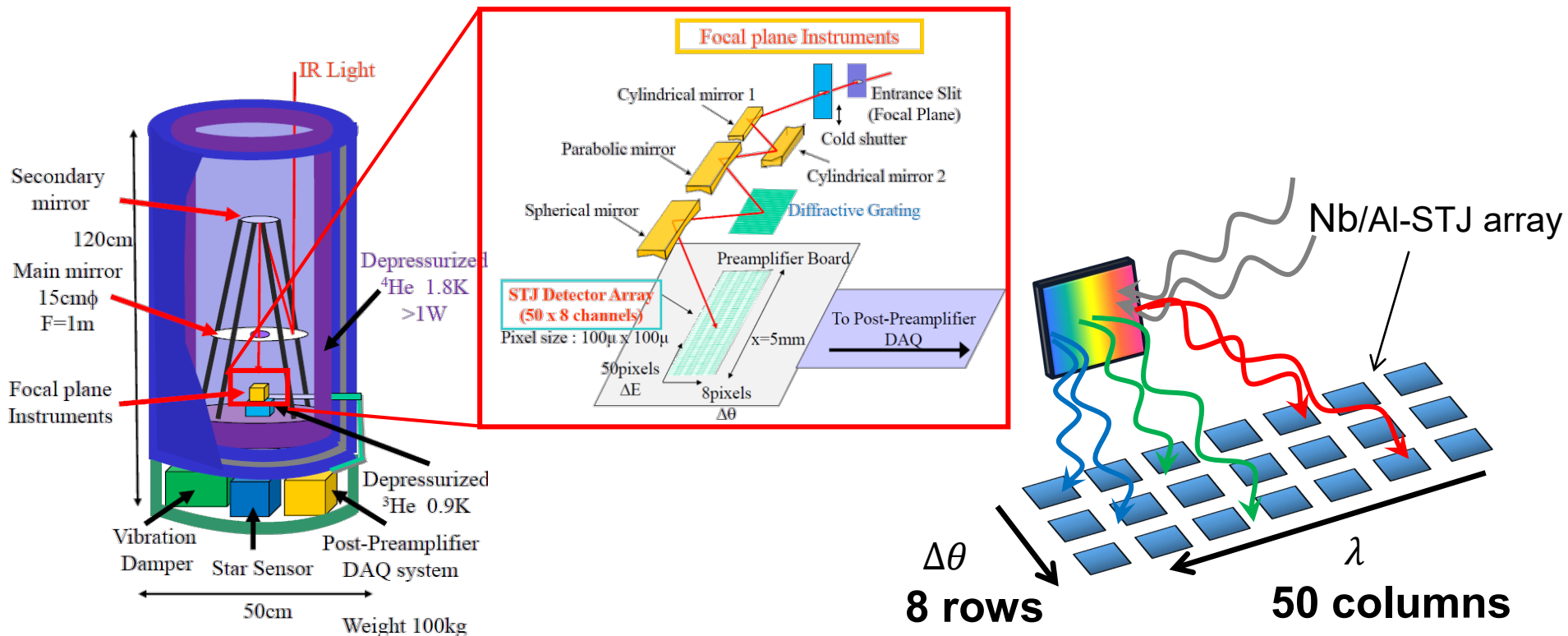
2017年～ 筑波大学

**COBAND実験**(ニュートリノ崩壊探索)、他

← イマココ

# 今日のお話

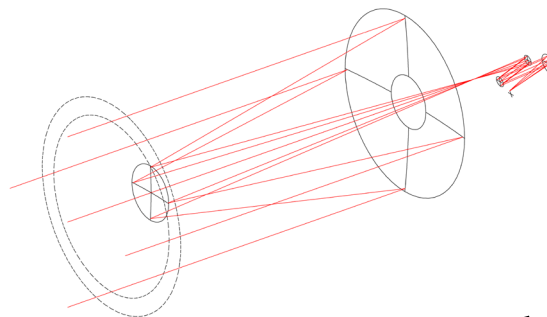
STJ検出器と極低温アンプに関しては、前回の6月に、武内先生から報告があった。



今回は、望遠鏡や回折格子といった**光学系**の現状報告をする。  
宇宙観測のプロからのアドバイス大歓迎です！！！！

# 目次

- COBAND実験イントロ
- 光学系設計
- 回折格子
- 今後の予定

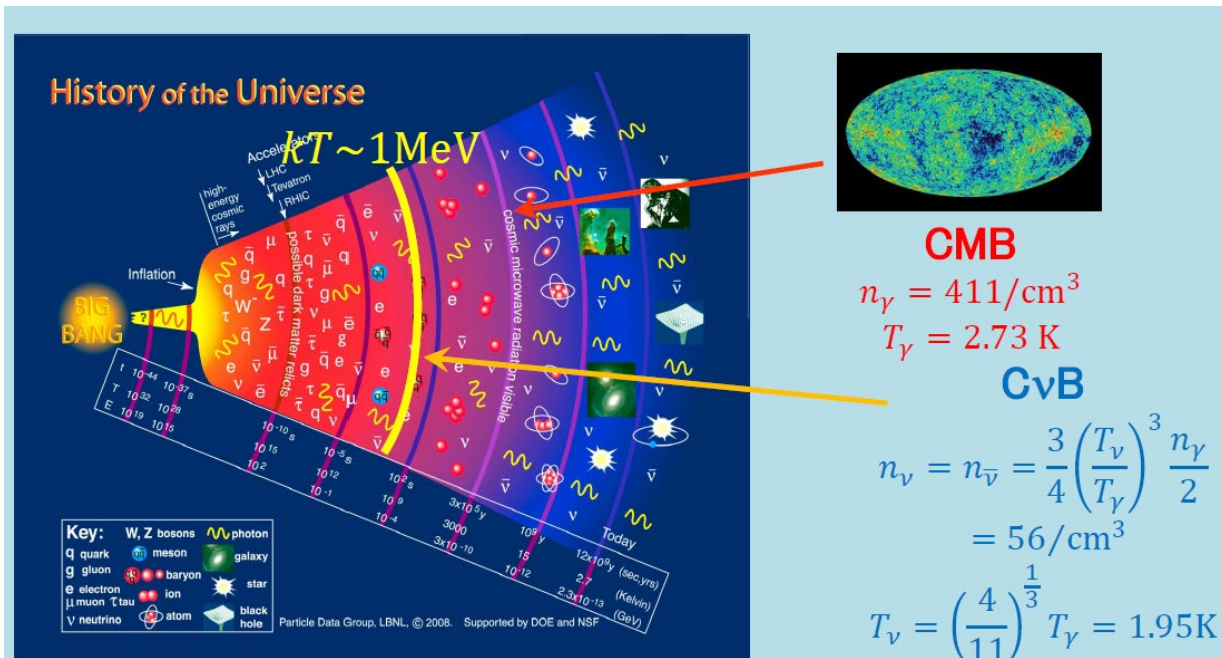


**Good morning  
everyone!!**



# COBAND実験

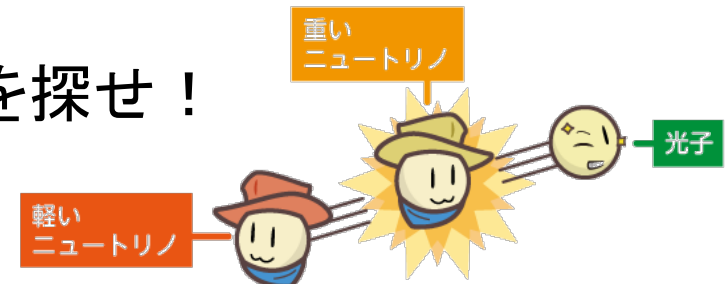
## COsmic BAckground Neutrino Decay search



光の背景放射  
 ~30万年後

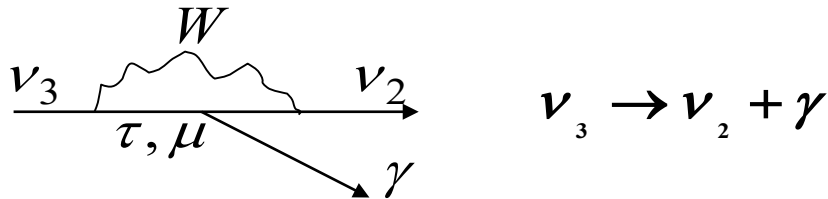
ニュートリノ背景放射  
 ~1秒後

- 未発見の宇宙背景ニュートリノ(CνB)を探せ！
- $110/\text{cm}^3$ の密度で存在している。
- それが崩壊して出た光をとらえる。



# ニュートリノ崩壊

- 素粒子標準理論において、**ニュートリノだけが質量未測定**。
- 他の素粒子よりも数桁小さい。

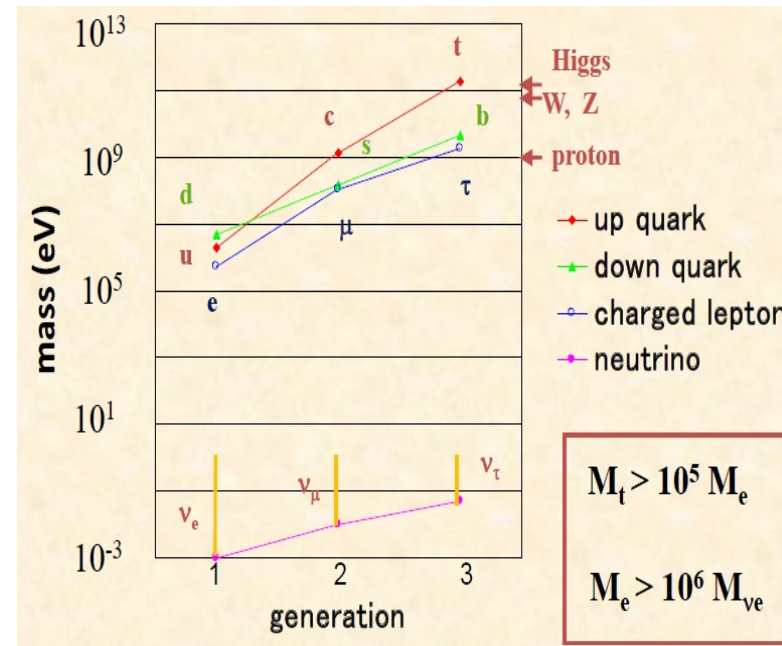


$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

Using  $\Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.09) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$E_\gamma = 10 \sim 25 \text{ meV}$  at  $\nu_3$  rest frame.

- $\Delta m^2$  はニュートリノ振動実験で分かっている。
- $E_\gamma$  (ニュートリノ崩壊光のエネルギー)**を測れば、ニュートリノ質量を決定できる。



## ○予想されるニュートリノ寿命

- $\tau \sim O(10^{43})$  [year] in the standard model
- $\tau > 10^{17}$  [year] in the Left-Right symmetric model\*

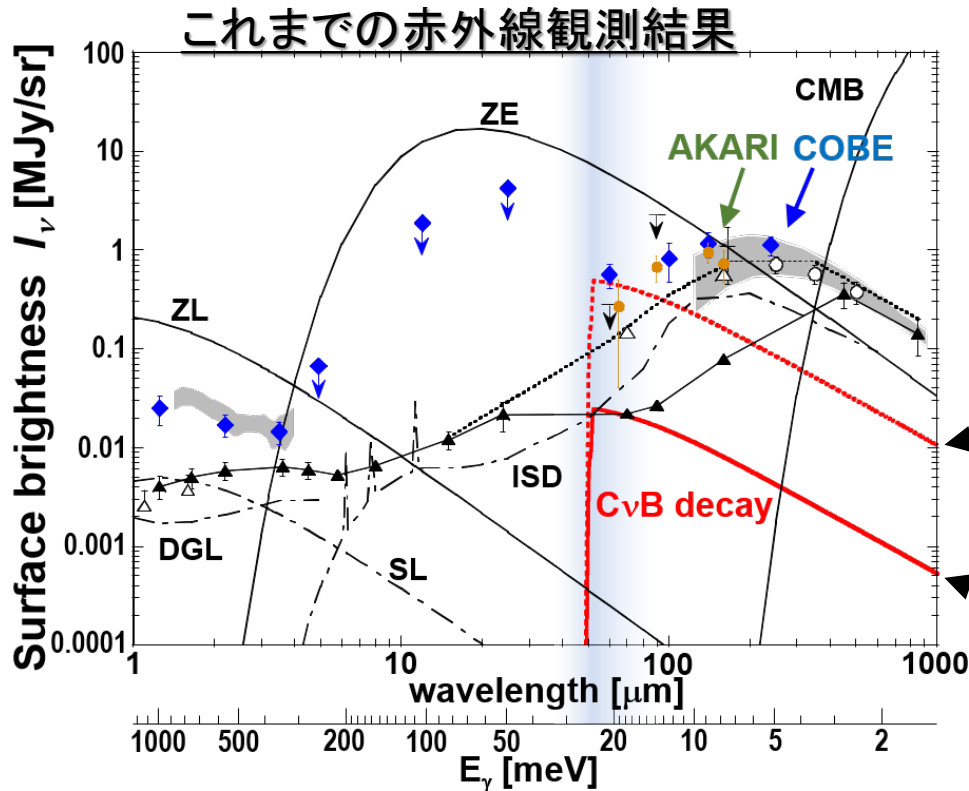
\*: PRL, 38, 1252 (1977)  
PRD, 17, 1395 (1978)

※ Current experimental lower limit :  $\tau > 10^{12}$  [year]

# ニュートリノ崩壊光のE分布

## ◎CνB崩壊光のスペクトル

- ✓ ニュートリノ質量で決まる位置で鋭いカットオフ！ (40-80μm)
  - $m_1 \ll m_2 < m_3$ ,  $m_3 = 50 \text{ meV}$ ,  $m_2 = 10 \text{ meV}$  と仮定すると、
  - $E_\gamma(\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma) = 24 \text{ meV} (\lambda=51\mu\text{m})$
- ✓ 赤方偏移によって低E側にテール



黄道輻射 (Zodiacal Emission)  
 $I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$

宇宙背景赤外輻射(CIB)  
 $I_\nu \sim 0.1 \sim 0.5 \text{ MJy/sr}$

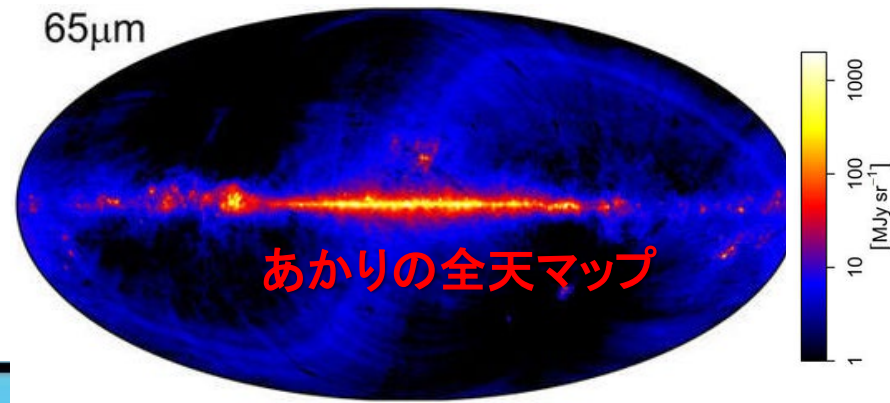
$\tau = 5 \times 10^{12} \text{ yrs}$   
 $I_\nu \sim 0.5 \text{ MJy/sr}$

**Excluded (S.H.Kim 2012)**

$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$   
 $I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$

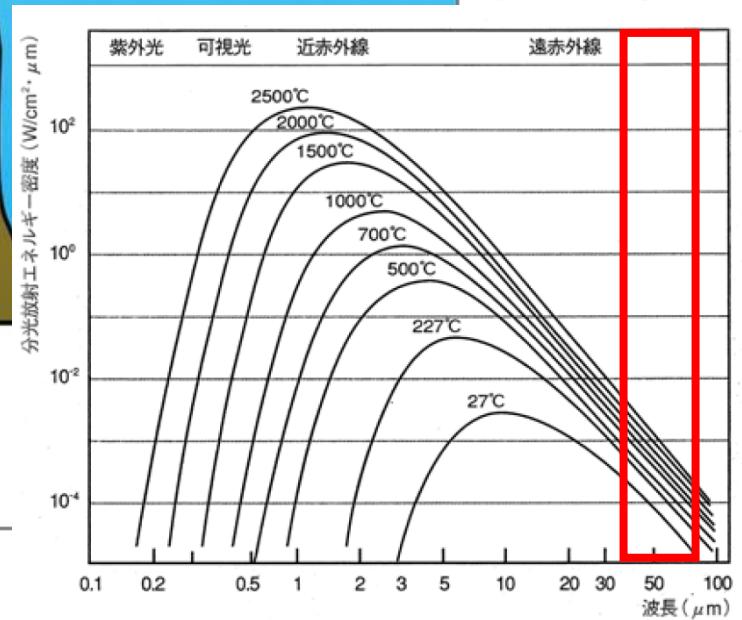
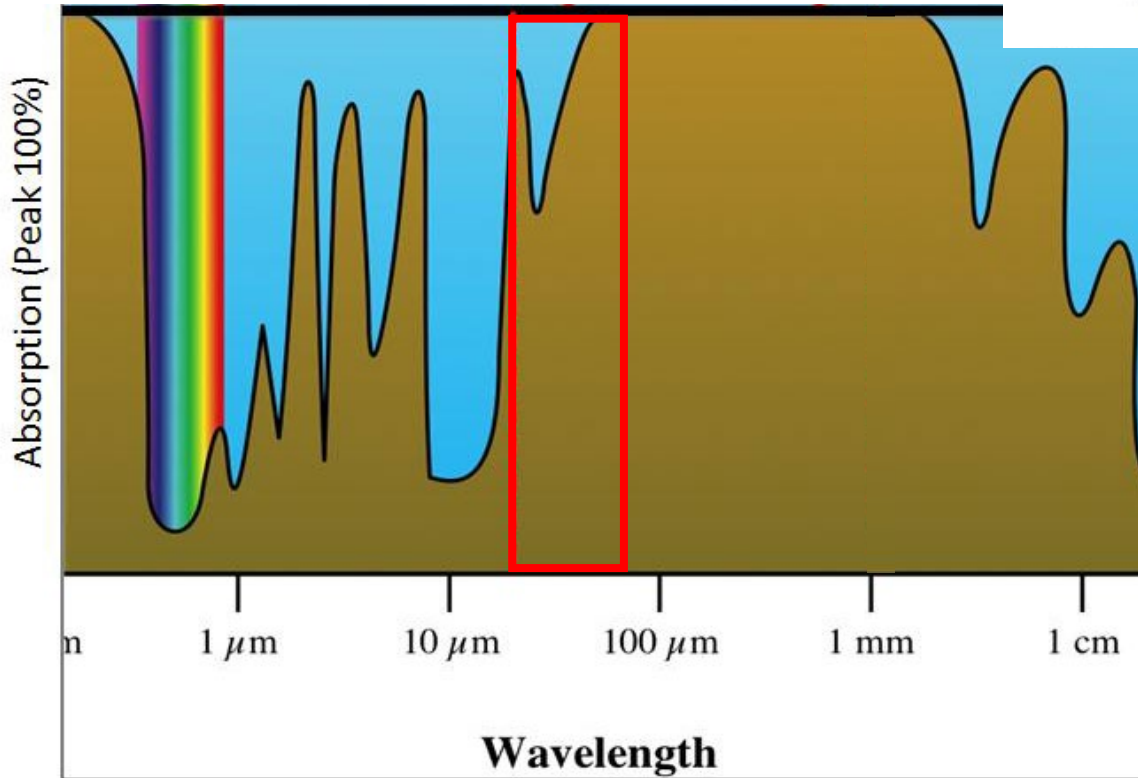
**Next target!!**

# 遠赤外線の光



我々の見たい領域

我々の見たい領域



大気に吸収されるので宇宙で観測する必要あり。  
熱放射で出てくる光がバックグラウンドになりうる。

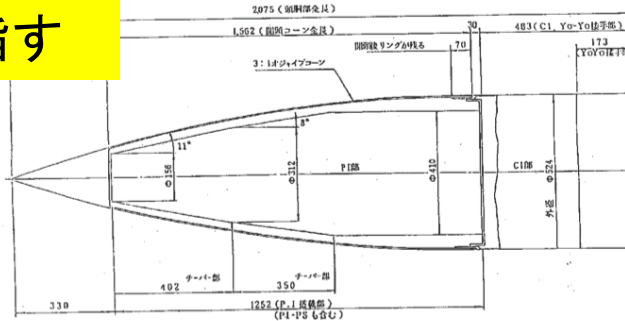


# COBANDロケット実験

ニュートリノ寿命感度で、  
 $\tau(\nu_3) = 0(10^{14}) \text{ yrs}$  を目指す

## JAXA S-520ロケット

- Diameter: 520mm
- Payload: 100kg
- [http://global.jaxa.jp/projects/rockets/s\\_rockets/](http://global.jaxa.jp/projects/rockets/s_rockets/)



• 200-sec measurement at altitude of 300km in 20XX.

光学系担当



筑波大学  
 University of Tsukuba



OKAYAMA UNIVERSITY



国立大学法人  
 静岡大学



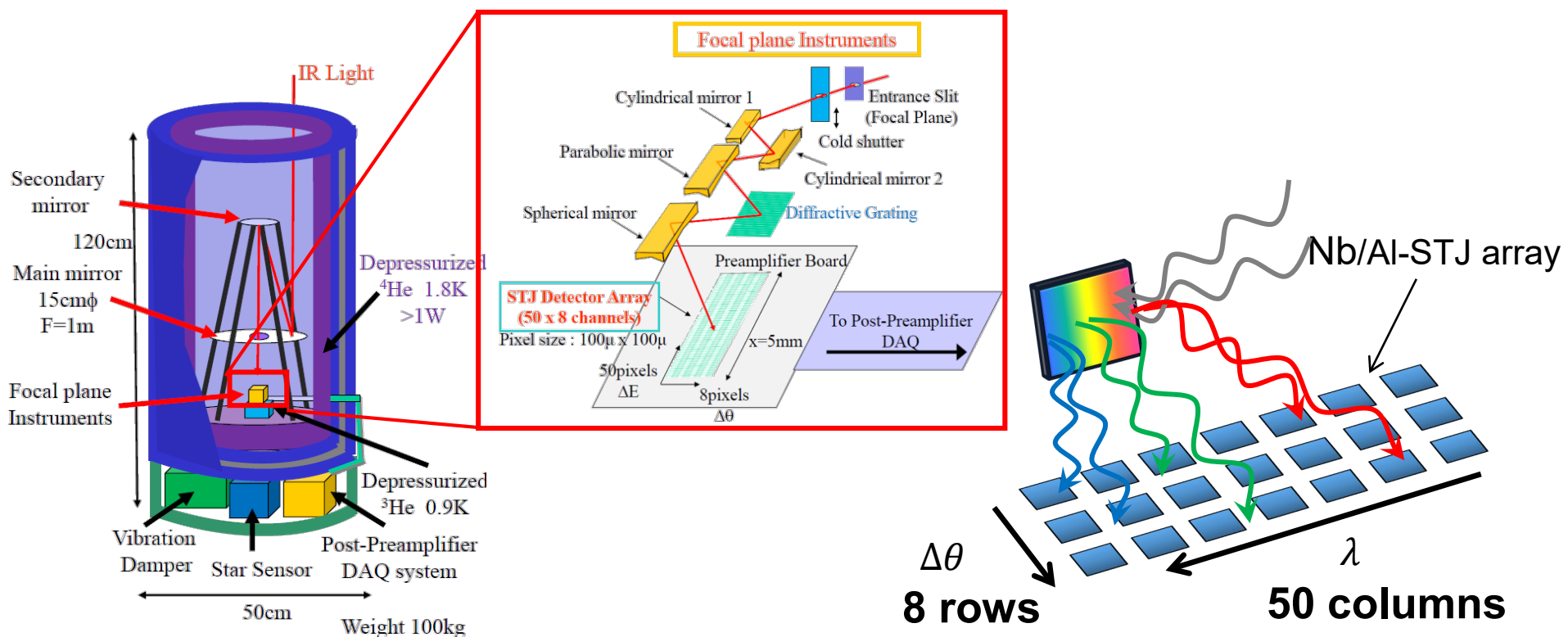
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY



近畿大学  
 KINKI UNIVERSITY

# COBAND実験光学系

- $\lambda = 40\text{-}80 \mu\text{m}$  (16-31 meV) の光を回折格子で分光。
- Nb/Al-STJを用いて遠赤外一光子をカウント。
- 50(波長方向) x 8(空間方向)で計400 pixel使用。



## ◎検討事項

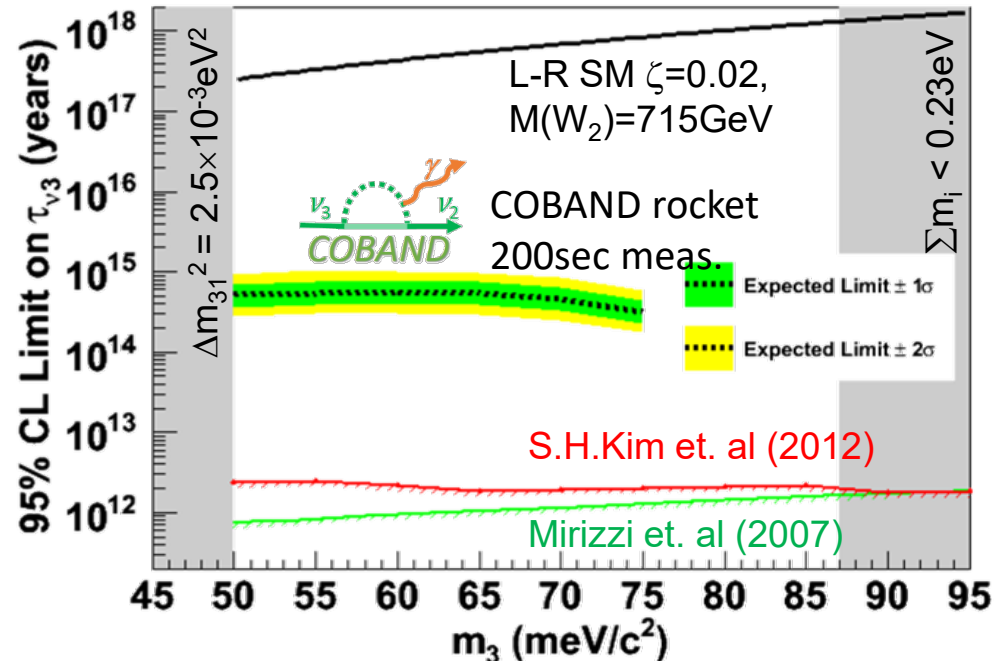
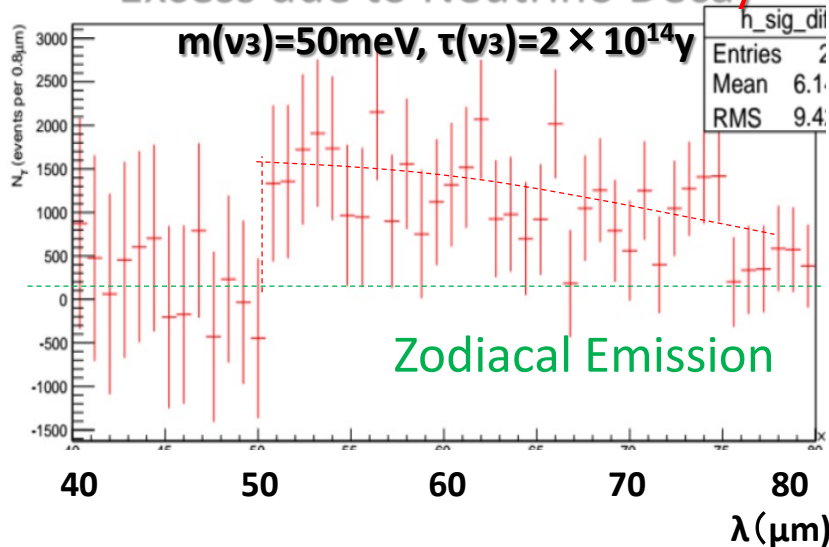
望遠鏡の構造、焦点距離、回折格子 等々

# ニュートリノ崩壊光に対する感度

以下のパラメータを仮定してシミュレーション

- 望遠鏡主鏡口径: 15 cm
- 8行 × 50列 ( $\lambda$ : 40  $\mu\text{m}$  – 80  $\mu\text{m}$ ) の S T J 検出器アレイ。
- 1 pixelの視野角: 100 $\mu\text{rad}$  × 100 $\mu\text{rad}$
- 測定時間: 200秒
- 光子検出効率: 100%

## Excess due to Neutrino Decay



- $\nu_3$  寿命が  $2 \times 10^{14}$  年なら  $5\sigma$  levelで測定が可能。

# 光学設計

## 一般的な反射望遠鏡の種類。

### ○凹面鏡

本実験では、後段の光学系が複雑で場所を取るので不向き。

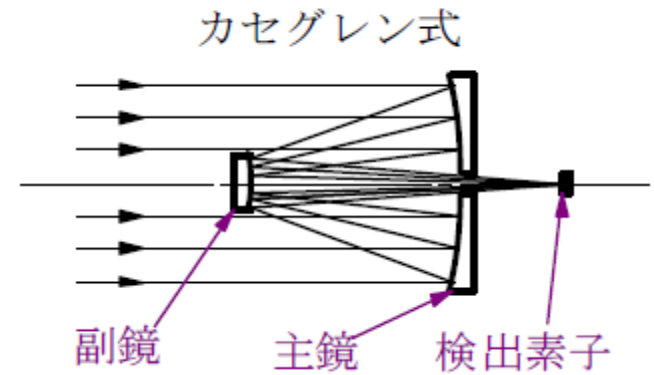
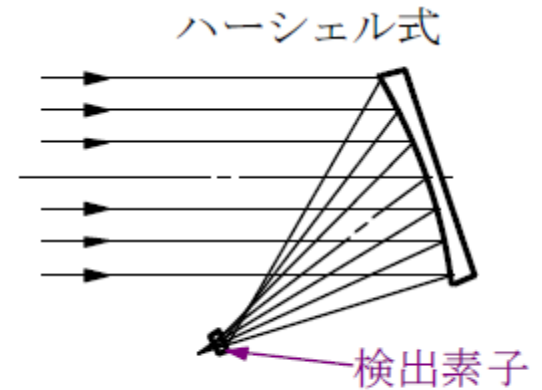
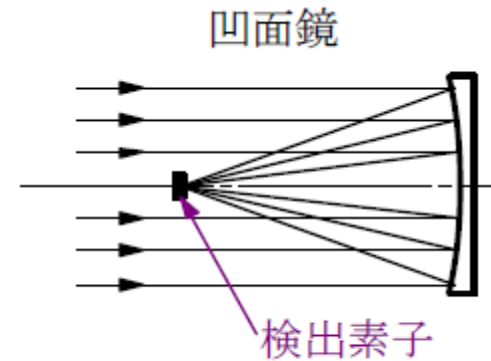
### ○ハーシェル式(軸外し型)

主鏡に角度が付くため、収差が大きくなりやすい。迷光を少なく出来る。

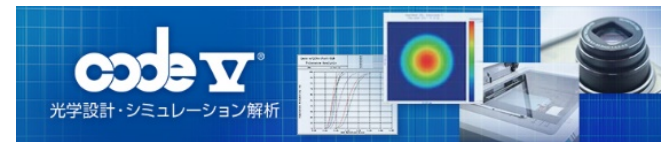
### ○カセグレン式

副鏡があるので、暗い像になる。副鏡の支え等の構造体で、迷光を作りやすい。収差は小さくしやすい。

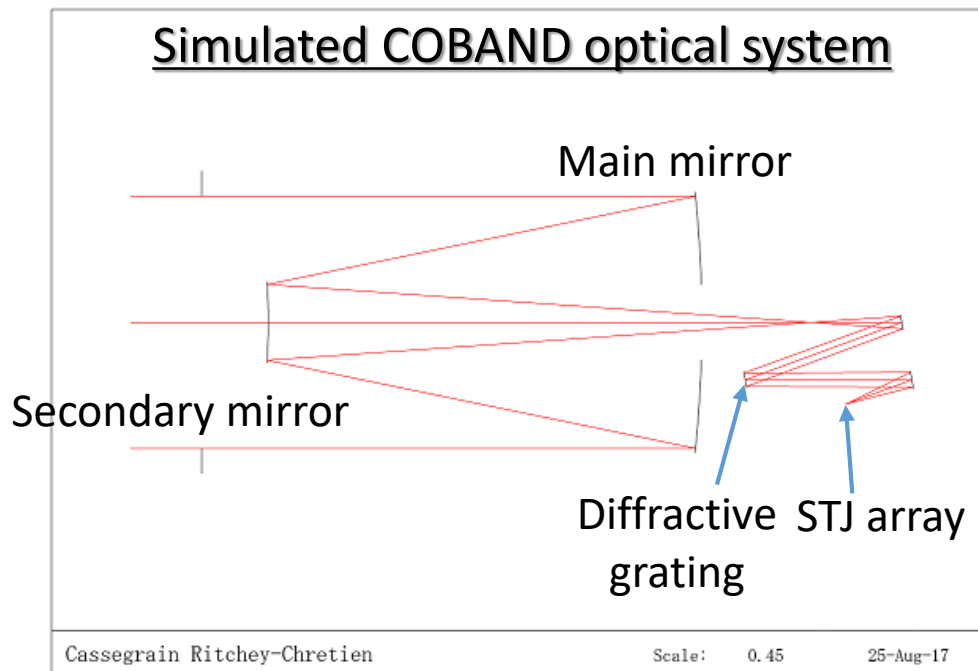
※迷光: 本来のルートを通らず検出器に入射する光。



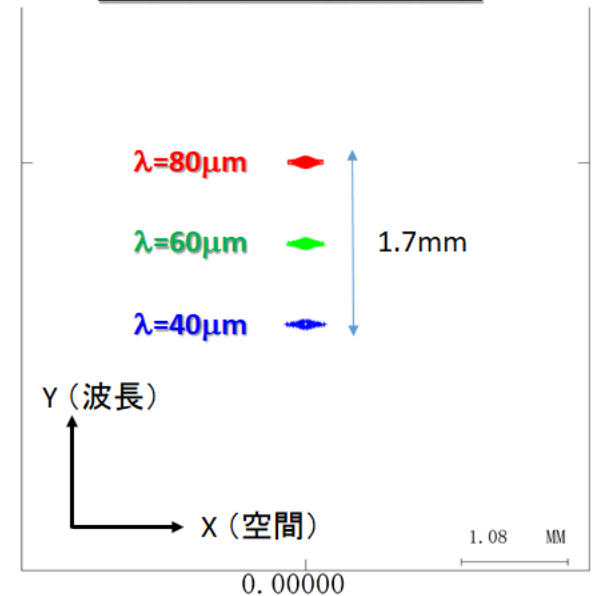
# 光学系シミュレーション



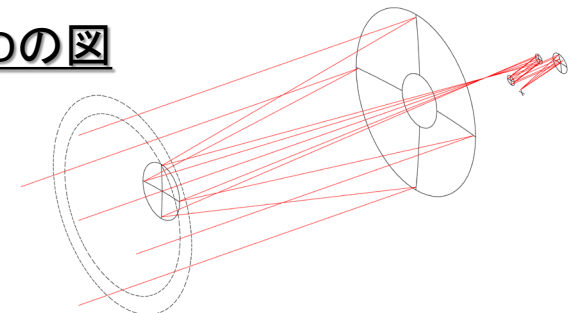
- Code-Vというソフトを使用して、COBAND光学系をシミュレーション。
- Cassegrain Ritchey Chretien型を採用。



## 幾何光学的解析結果

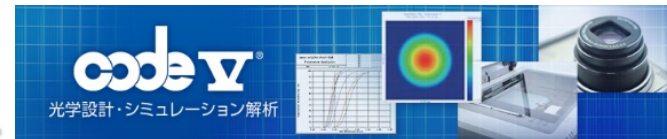


## 3Dの図



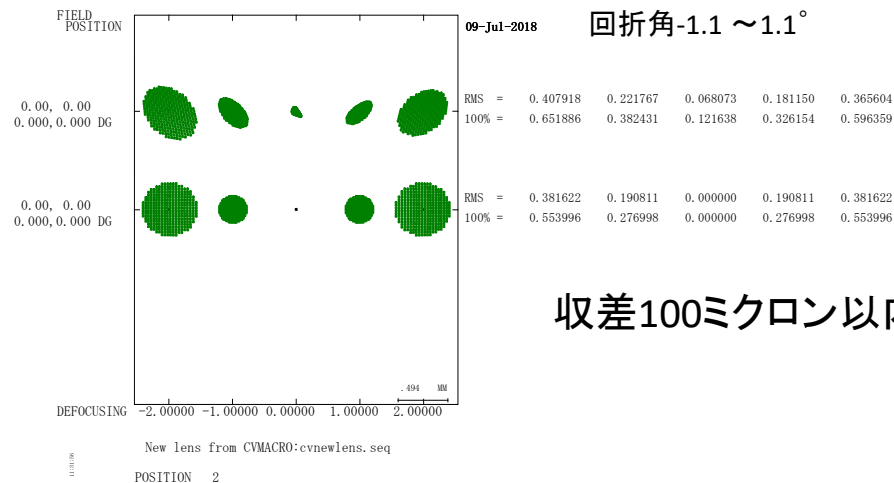
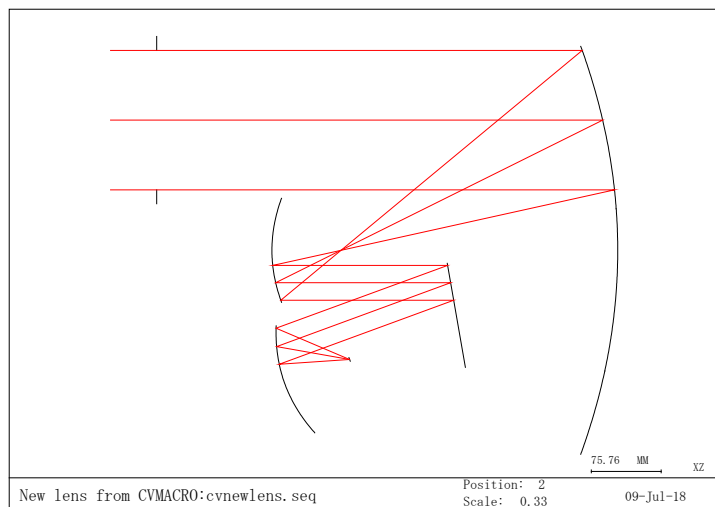
- とりあえず分光出来た状態。
- 波長方向の収差は約 $100\mu\text{m}$ を達成した。

# 別の光学系設計(関学)



- 主鏡の軸をずらした軸外し型望遠鏡を検討。
- 主に関学(松浦、橋本)が担当。

## 軸外し型

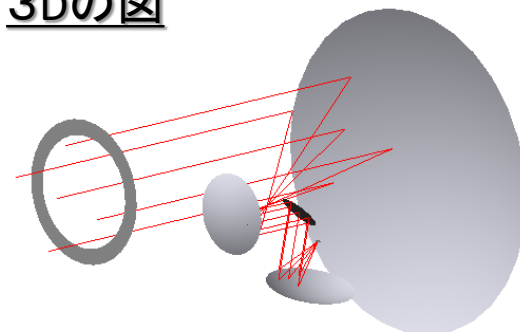


望遠鏡:F4  
焦点距離比:1:1

収差100ミクロン以内

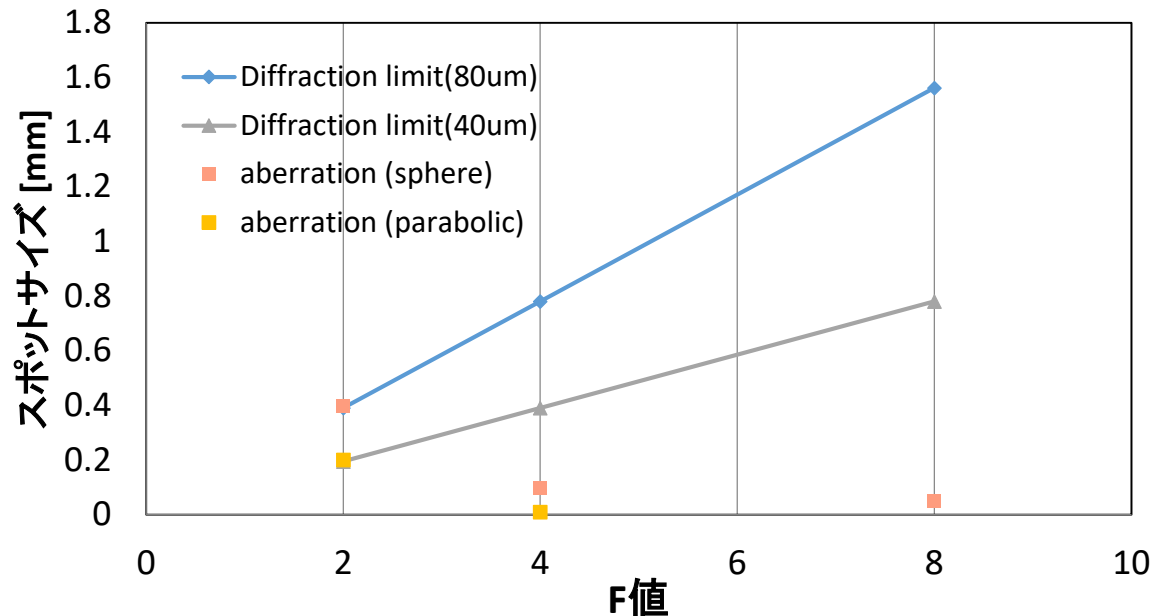
- 収差の面ではCassegrain Ritchy Chretienと大きな差が無いものが可能。
- 空間的に軸外し型が余裕あり? 配置等、要検討
- どちらが良いか、検討を進めている。

## 3Dの図



# 収差と回折限界の折り合い

- 光学系の持ちうる解像力の限界を回折限界といい、以下の式で決まる。
- $s = 1.22 \times f\lambda / D = \lambda F$        $f$ : 焦点距離、 $\lambda$ : 波長、 $D$ : 主鏡直径
- F値 (=  $f/D$ ) を小さくすれば回折限界は小さくなるが、収差が大きくなるので、そことトレードオフ。良い値を決める必要がある。



- ✓ シミュレーションの収差と回折限界の計算を比較すると、  
**F値=2**で二つの大きさが釣り合うことが分かった。
- ✓ **この結果を使って今後、詳細な光学設計を進めていく予定。**

# 回折格子

光学系の肝ともいえる最重要パーツ

遠赤外用の回折格子はレア。。。

堀場製作所で既製品を購入 (< ¥20万)

※特注すると1000万コースと言われた

- サイズ: 50mm × 50mm × 6mm
- ブレーズ角: 26° 45'
- 溝間隔: 50μm

$$\beta = \arcsin \left( \frac{n\lambda - d \sin \alpha}{d} \right)$$

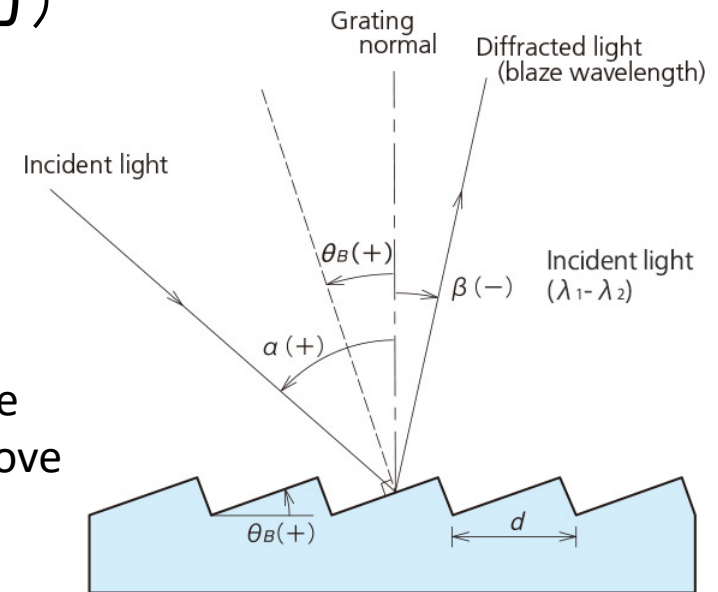
$\alpha$ : Incident angle  
 $\beta$ : Reflected angle  
 $d$ : Interval of groove  
 $\lambda$ : Wavelength

$\alpha=45^\circ$   $d=50\mu\text{m}$   $n=1$  を仮定

**40-80 μm の波長を分光可能！！**



※回折光の出る方向、回折効率などは実験結果に大きな影響を与えるのでしっかり理解する必要あり。

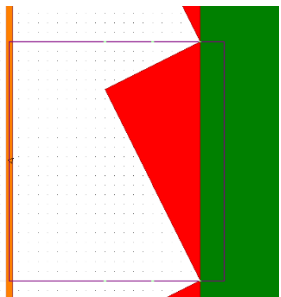


$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\beta$ [degree]
40 $\mu\text{m}$	5.3°
60 $\mu\text{m}$	29.5°
80 $\mu\text{m}$	63.2°



# 回折格子シミュレータ **DiffractMOD**

- 回折効率、回折角をシミュレーションして実験と比較したい！！
- **DiffractMOD**というシミュレーションソフト(Code Vの会社と同じ)
- **RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis、厳密結合波解析) 法**
- 計算速度や精度の観点から回折光学素子の計算で用いられる。
- マクスウェル方程式からスタートして回折効率を計算してくれる。
- 右下の図のように各レイヤーステップごとに計算。
- 回折格子のX方向比誘電率をフーリエ級数展開で近似。
- ステップの刻み幅や、級数展開の次数で精度が決まるが、もちろん精度を上げるとCPUも食ってしまう。
- 将来的にはこれを使って回折格子を設計したい。



CADでこんなのを書いて、  
無限にこれを並べる

RCWA法の概念図

**これで手持ちの回折格子を  
シミュレーションしてデータと比較**

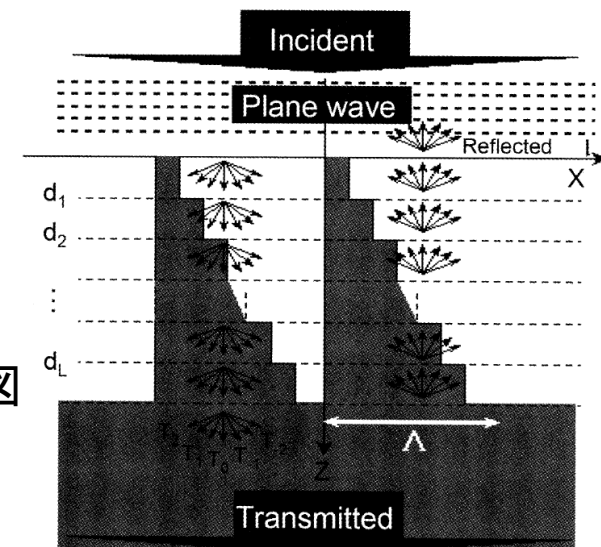
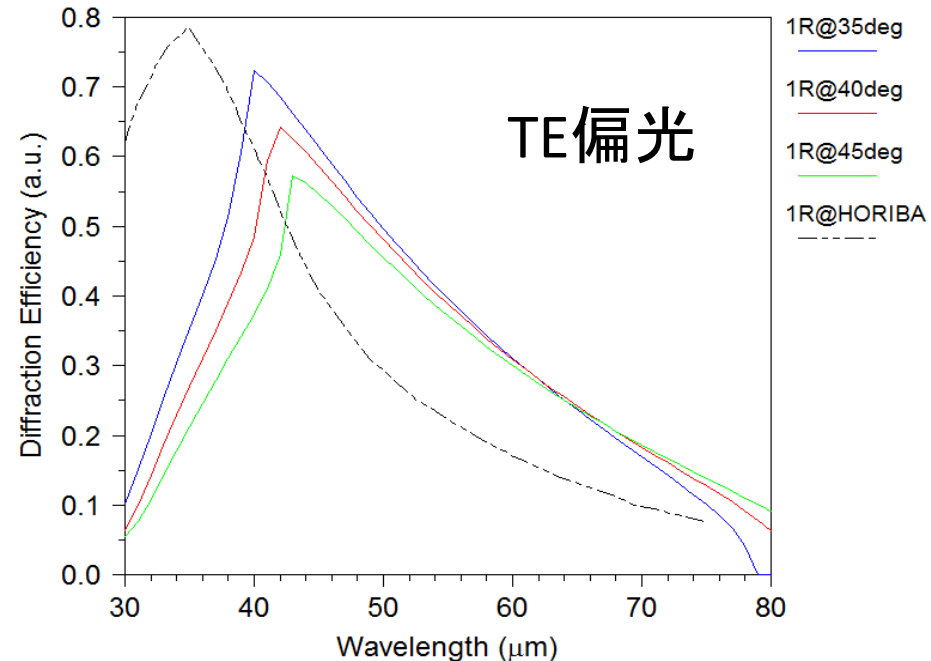
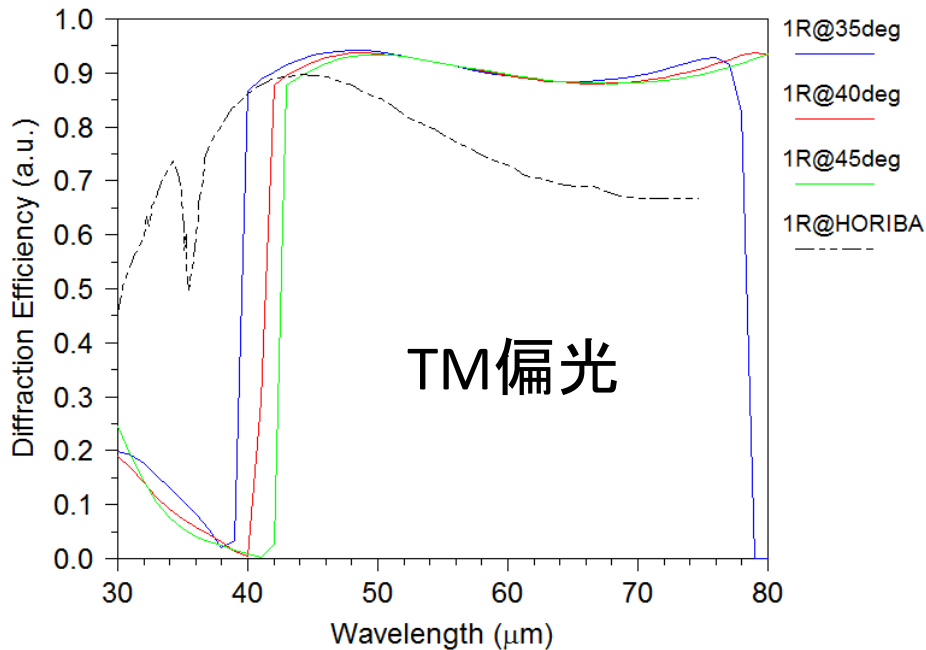


Fig. 2 Model of lightwave propagation based on RCWA.

# シミュレーション結果

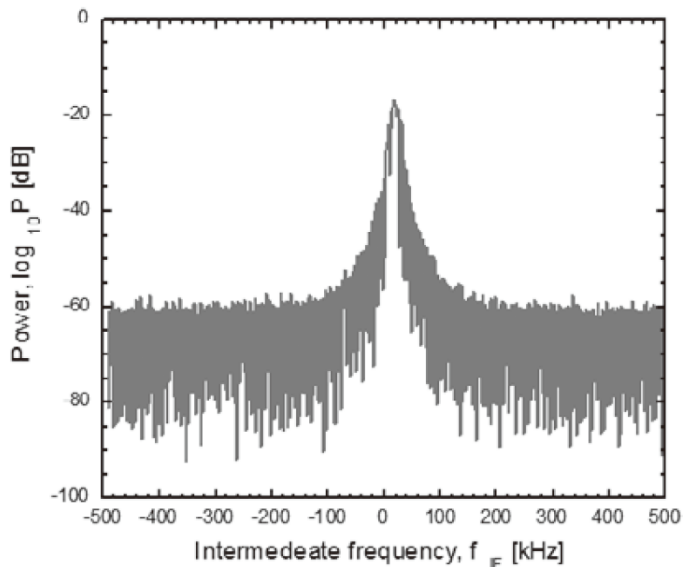
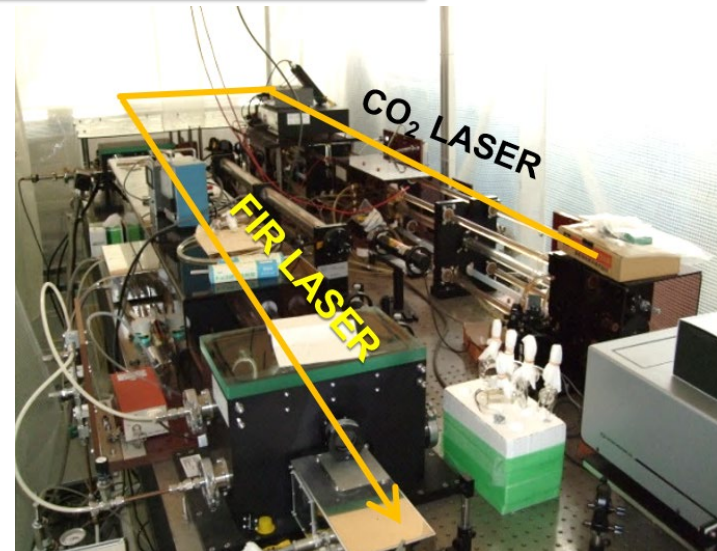
- 入射角ごとの回折効率(35度、40度、45度)
- 参考として、堀場にもらった値をプロット(入射角度等の測定条件の詳細は不明)
- 形は良く似ているが、完全に一致はしない。
- シミュレーションはそれなりに正しそうなので次は実験と比較！

compre each input angle(TM)



# 福井大学での回折格子試験

- 福井大学遠赤外領域研究開発センター
- 遠赤外線分子レーザー装置
- CO<sub>2</sub>レーザーの光をCH<sub>3</sub>OD等に吸収させて、出てくる遠赤外の光を利用。
- 分子を変えることで様々な波長の光が利用可能となる。

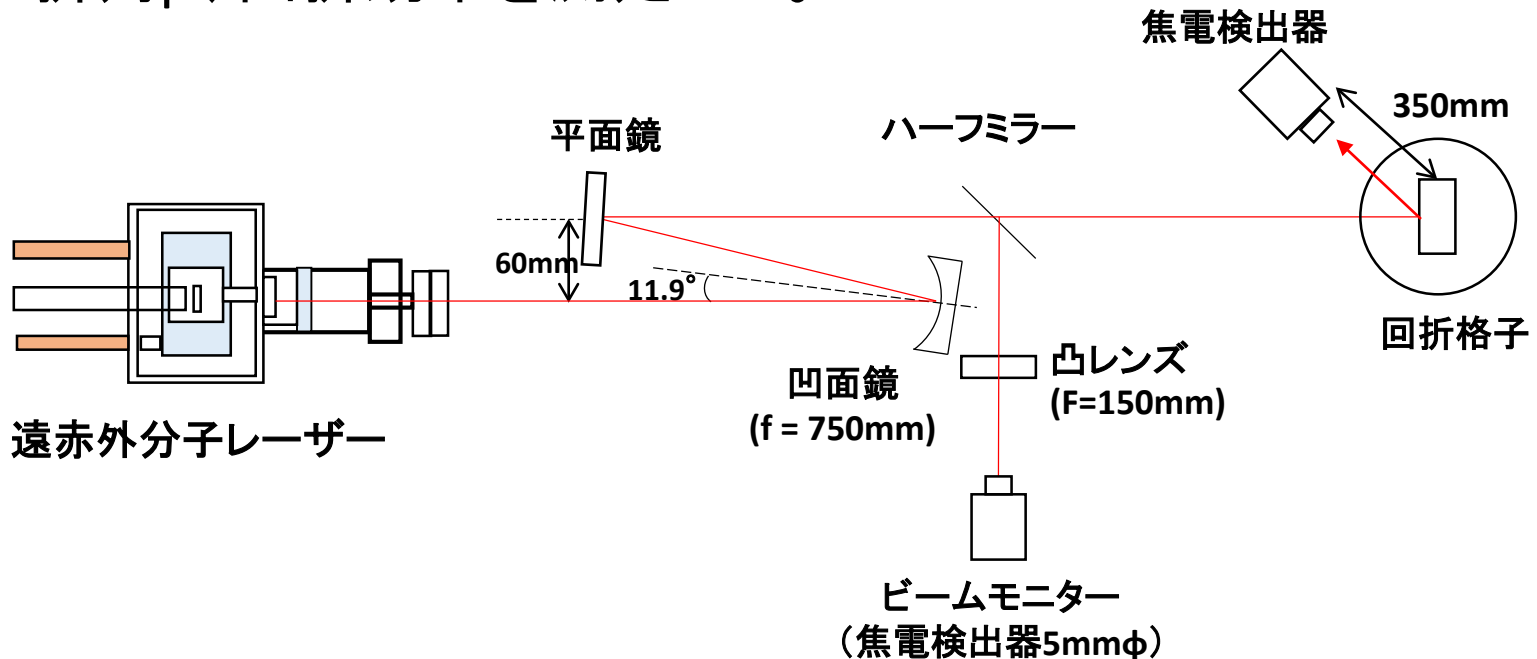


発振波長 [μm]	試料ガス	偏光方向	FIR出力 [mW]	CO <sub>2</sub> 出力 [mW]
42.6	CD <sub>3</sub> OH		2.0	71.4
47.6	CH <sub>3</sub> OD		36.6	66.5
57.2	CH <sub>3</sub> OD	⊥	28	68.6
70.5	CH <sub>3</sub> OH	⊥	30	71.4

強度や偏光方向を考慮し、今回は4種類の波長を測定した。

# 実験セットアップ

- レーザーからの出力は数mrad広がっているため、凹面鏡を用いて平行光を作った。
- また、レーザーは共振管の温度変化等により、強度が若干不安定なので、モニターとの比を取った。
- 回折格子を回転させて、各波長ごとに入射角を変えながら、回折角 $\beta$ 、回折効率を測定した。



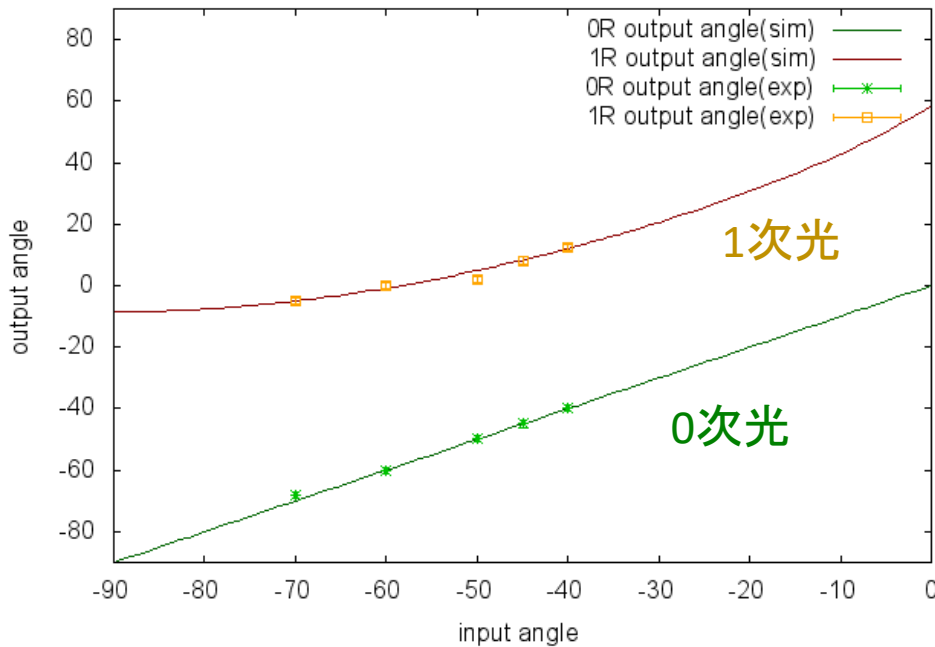
# 回折角測定結果 (TE偏光)

## 測定結果とシミュレーションの比較

点: データ  
線: シミュレーション

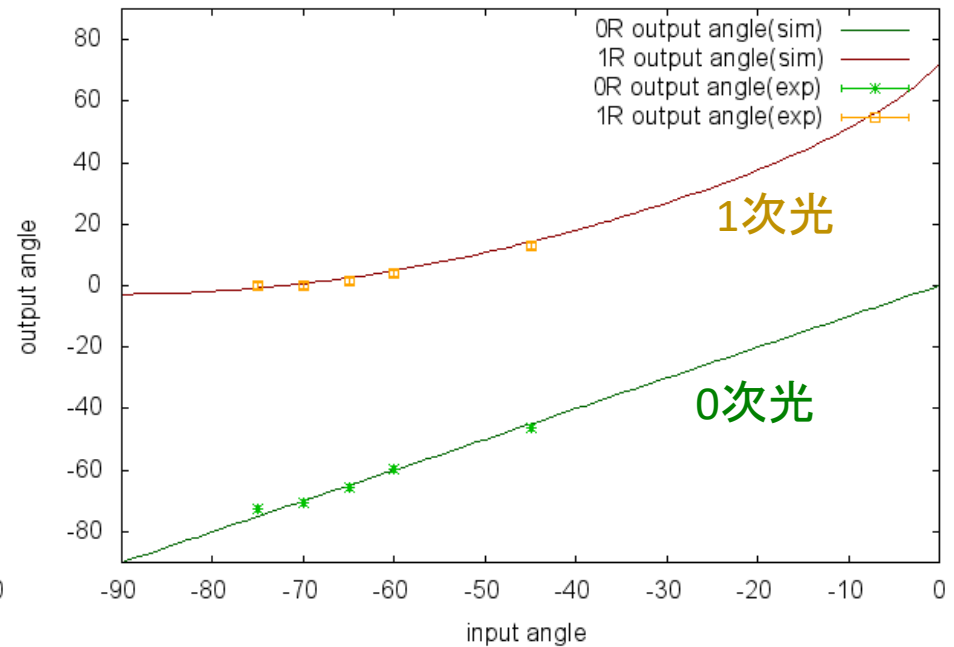
42.6  $\mu\text{m}$

42.6um(angle)



47.6  $\mu\text{m}$

47.6um(angle)



$$\beta = \arcsin\left(\frac{n\lambda - d \sin \alpha}{d}\right)$$

横軸:  $\alpha$   
縦軸:  $\beta$

ほぼ一致！！

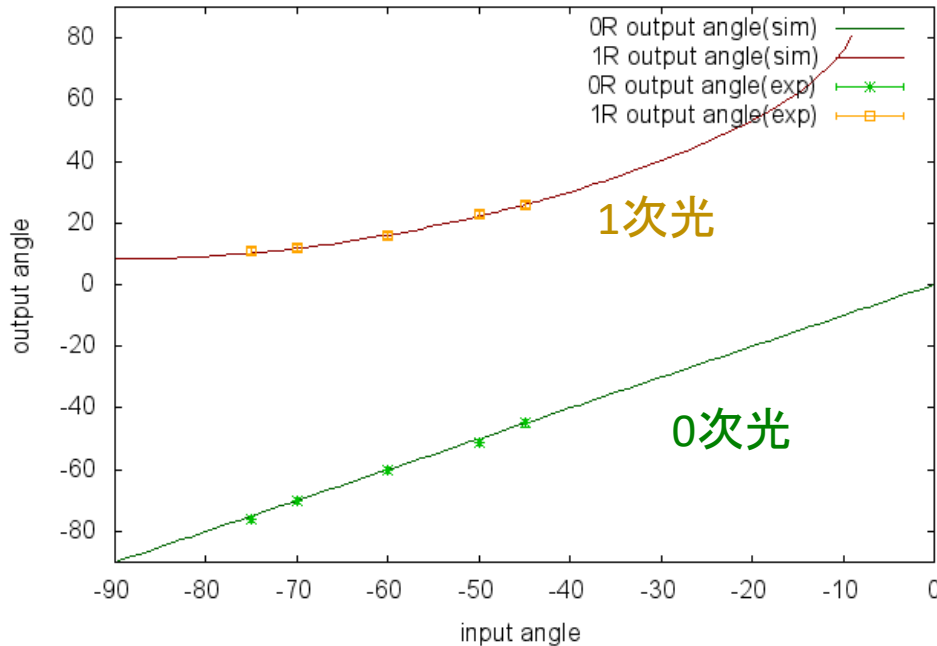
# 回折角測定結果 (TM偏光)

## 測定結果とシミュレーションの比較

点: データ  
線: シミュレーション

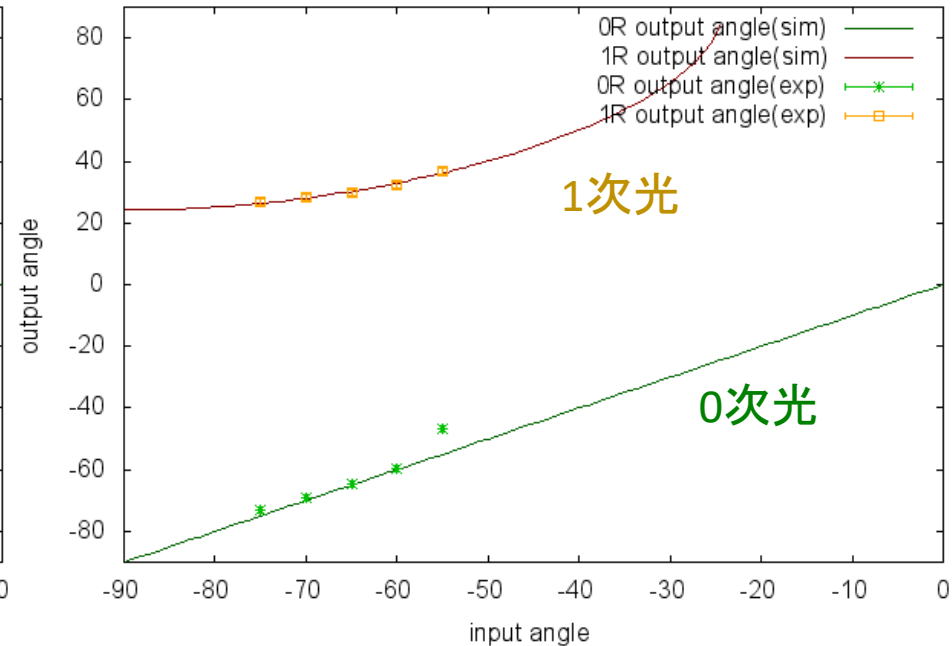
57.2  $\mu\text{m}$

57.2um(angle)



70.5  $\mu\text{m}$

70.5um(angle)



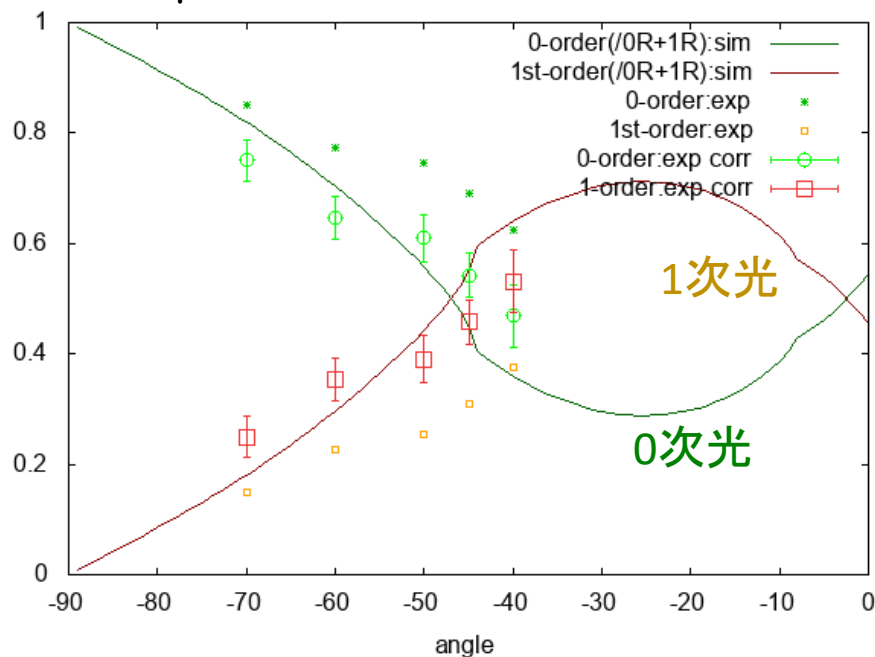
1点だけ外れた。ほぼ10度の違いなので、測定時に目盛りを見間違えた可能性。

# 回折効率測定結果 (TE偏光)

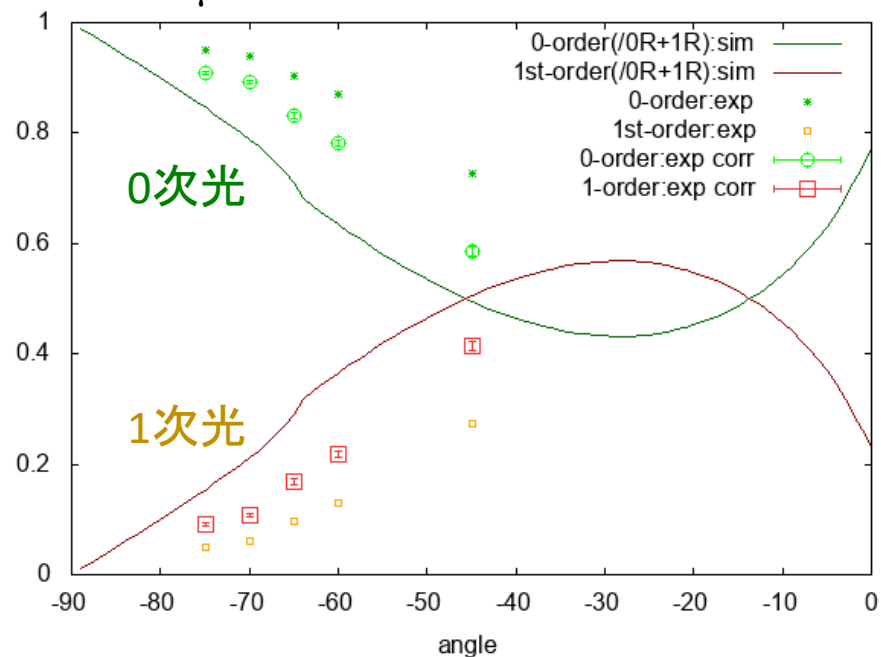
## 測定結果とシミュレーションの比較

点: データ  
線: シミュレーション

42.6  $\mu\text{m}$  42.6um(sim 0R+1R, corr. Pow<sub>R1</sub>)



47.6  $\mu\text{m}$  47.6um(sim 0R+1R, corr. Pow<sub>R1</sub>)



横軸: レーザー入射角度

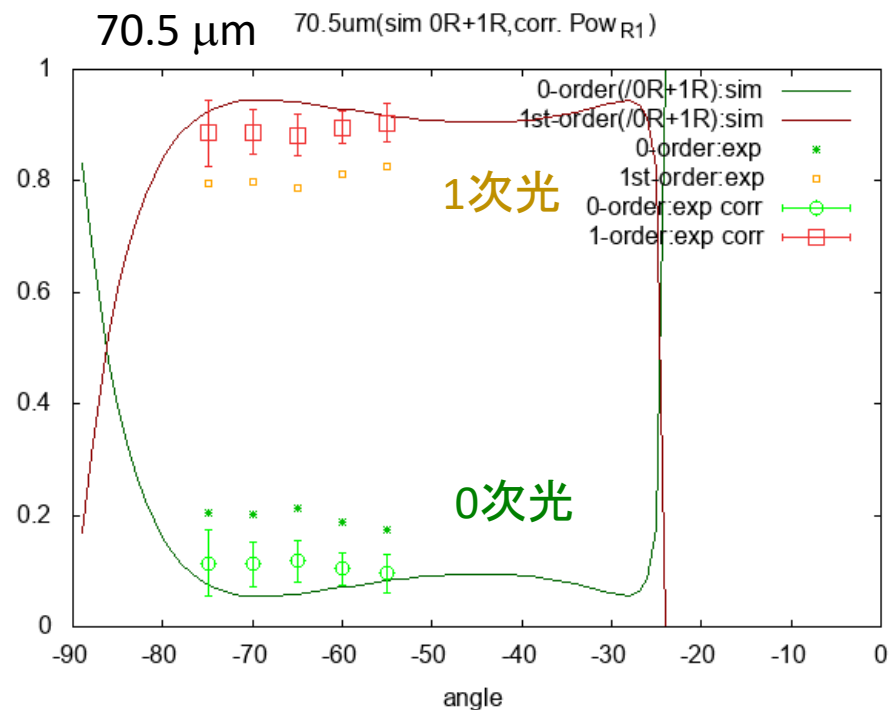
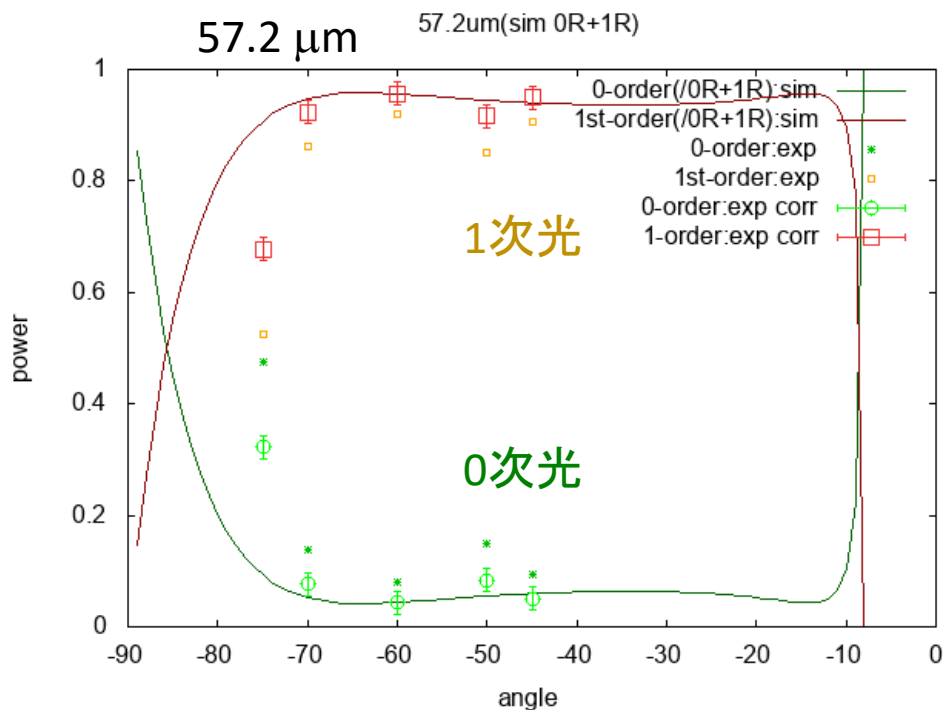
縦軸: 回折効率 = 1次光強度 / (0次 + 1次)

0次光の場合は分子が0次光の強度、強度は全てモニターとの比

# 回折効率測定結果(TM偏光)

測定結果とシミュレーションの比較

点: データ  
線: シミュレーション



横軸: レーザー入射角度

縦軸: 回折効率 = 1次光強度 / (0次 + 1次)

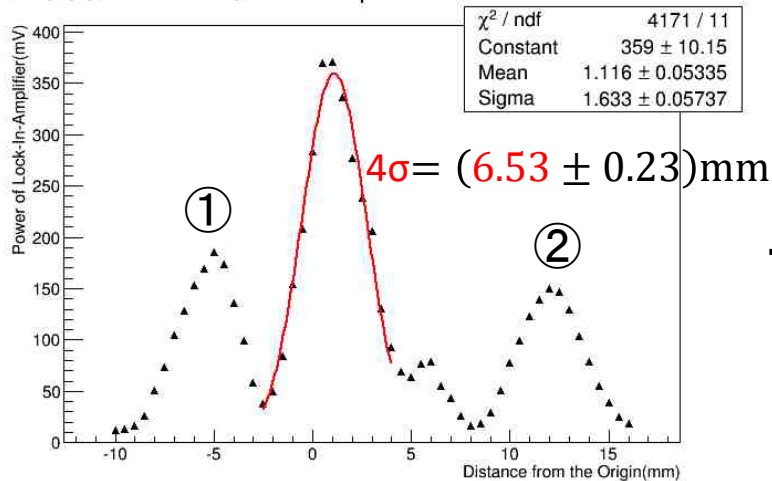
0次光の場合は分子が0次光の強度、強度は全てモニター強度で補正



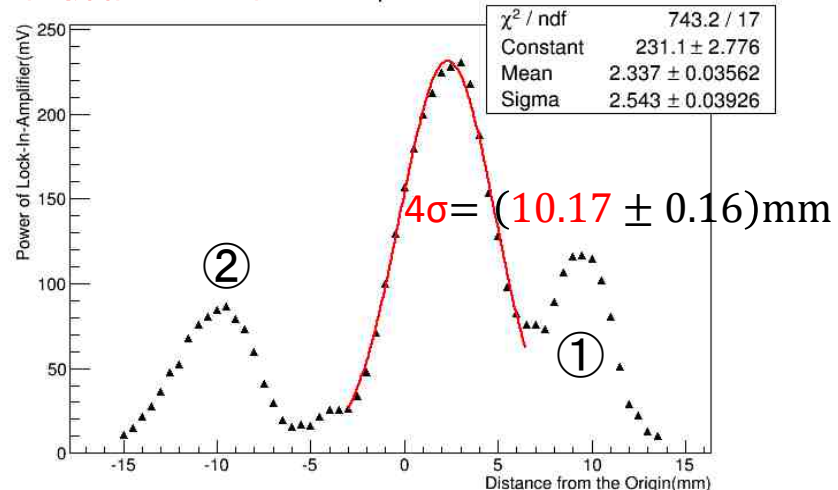
# レーザーの広がりを補正

- 回折格子入射前後のレーザー光を100 $\mu\text{m}$ ごとにスキャン。ビームプロファイルを測定した。波長57.2 $\mu\text{m}$ 、入射角45度のみ。
- 山が3つ見えているが、反射後もその形は保っている。
- 回折格子反射後、水平方向の幅が1.5倍程度広がっていた。0次光はほぼ影響なし。
- この形状を全ての波長、角度で仮定して補正をかけた。

回折格子反射前 beamprofile x



回折格子反射後 beamprofile x



水平方向のみなので、波長が広がっているかと考えたが、分子レーザーの波長は原理的に非常に単一。レーザーの広がりは、回折格子の分解能から来ているかもしれない。

水平方向

# 今後の予定

- 山が3つあるので、絞りを入れて一山の状態で再測定。
- 広がったとしても問題ないよう9mmの大きい検出器で測定を行う。
- **COBAND専用の回折格子(分散角=数度@40-80 $\mu$ m)**を作成。デザインを進めている。
- 特注は高いので、町工場レベルで作ってくれるところを探してます。精度数ミクロンで良い。**誰か良いところ知ってたら教えてください！！**
- F値=2で収差と回折限界が出来るだけ小さく出来、かつ空間的に余裕のある光学設計を行う。
- 光学系の試作をして、振動試験や冷却試験、分光試験等を行う。



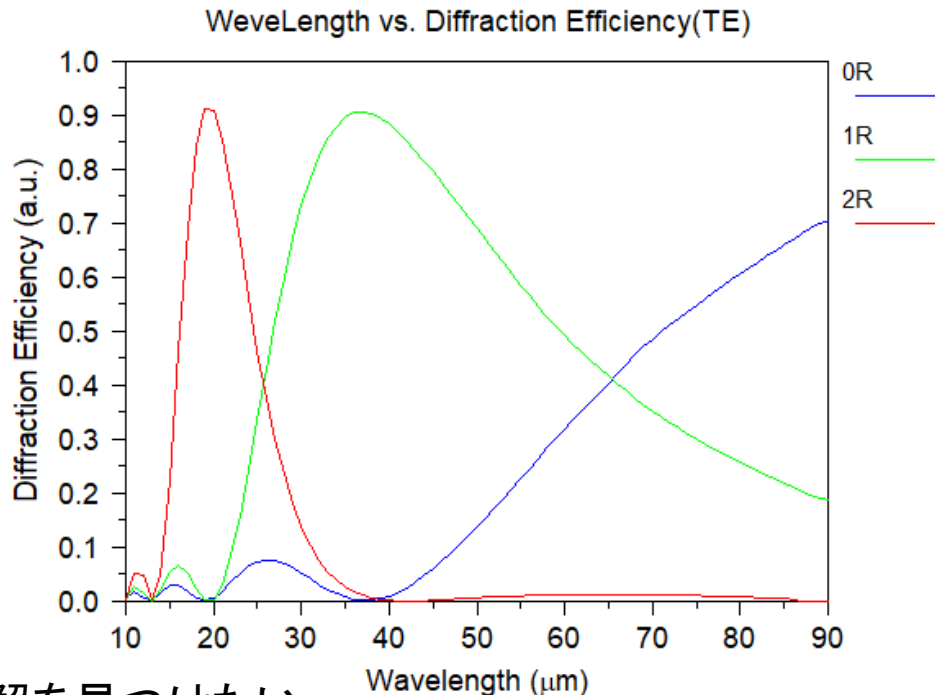
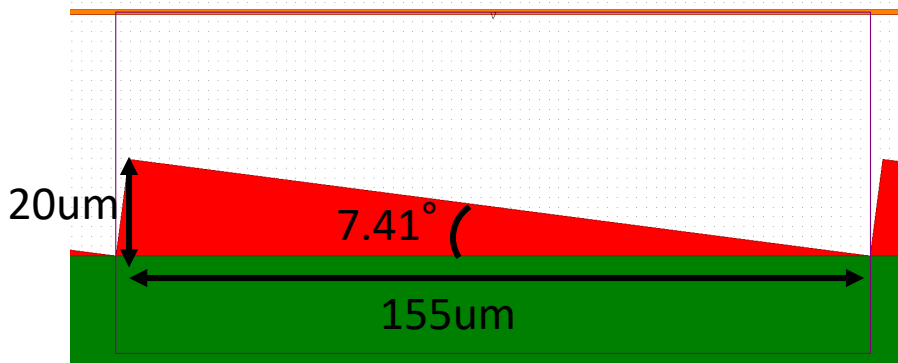
# COBAND用回折格子の設計

➤ 波長40 $\mu\text{m}$ ~80 $\mu\text{m}$ で回折角の変化が $16^\circ$  の回折格子の設計。  
光学系の収差を小さくするための要請。

➤ 溝幅 $d=155[\mu\text{m}]$ , ブレーズ角 $\theta=7.41^\circ$  で設計

➤ 波長による回折角の変化

$$\beta_{40} \sim 26.68 \quad \beta_{80} \sim 11.00 \quad @ \text{入射角} 45^\circ$$



長い光への回折効率が低くなる問題。

ブレーズ角、溝幅、入射角を変えて、良い解を見つけない。

# Backup



**Thank you everyone!!**