

※写真はイメージです



# ニュートリノ崩壊光探索 COBAND実験用 遠赤外光学系設計開発



**COBAND**  
宇宙背景ニュートリノ崩壊探索  
Cosmic Background Neutrino Decay search

2021 Jun. 25<sup>th</sup>

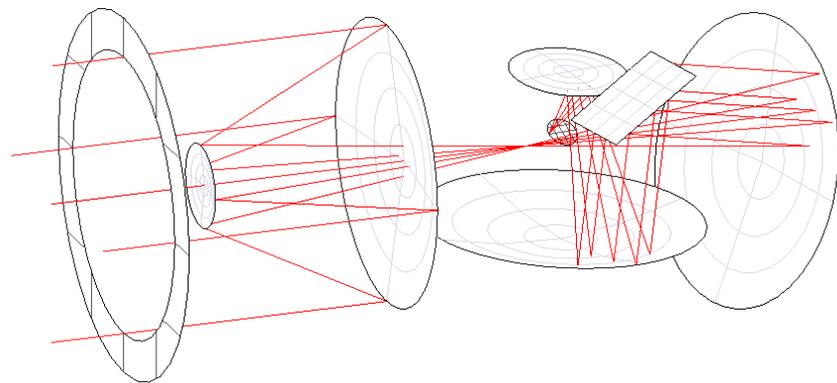
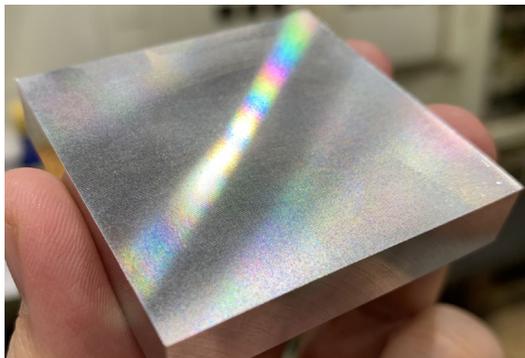
飯田崇史(筑波大)

for the COBAND collaboration

宇宙史研究センター(TCHoU)構成員会議@Zoom

# 目次

- ニュートリノ崩壊
- COBAND実験
- 光学系開発
  - 遠赤外用回折格子
  - 光学系全体
- まとめと今後

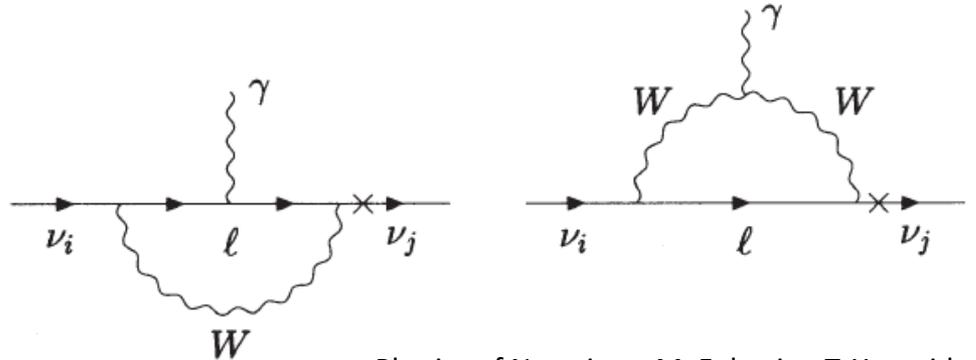


# Neutrino decay in standard model

Two body decay

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

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



Physics of Neutrinos, M. Fukugita, T. Yanagida (2003)

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.

## ○崩壊確率 in SM

$$\Gamma(\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma) = \frac{m_{\nu_i}^3}{8\pi} \left(1 - \frac{m_{\nu_j}^2}{m_{\nu_i}^2}\right)^3 \left[|\mu_{\bar{\nu}_j \nu_i}|^2 + |d_{\bar{\nu}_j \nu_i}|^2\right]$$

$$\simeq \frac{\alpha m_{\nu_i}^5}{128\pi^4} G_F^2 \frac{9}{16} \left(\frac{m_\tau}{m_W}\right)^4 |U_{j\tau}^\dagger U_{\tau i}|^2.$$

- ✓ ニュートリノ質量の小ささで抑制  
カイラリティ反転が起きづらい。  
 $\Gamma \propto m_\nu^5$
- ✓ GIM機構で抑制  
以下の項の主要部分がキャンセル

$$\tau(\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma) \geq 4 \times 10^{29} \text{yr} (m_{\nu_i}/30 \text{eV})^{-5}$$

$$\sum_\ell U_{j\alpha}^\dagger U_{\alpha i} F([m_{\ell\alpha}/m_W]^2),$$

SMでは、 $10^{43}$  year以上の寿命が予想される。

$$F(x) \sim -\frac{3}{2} + \frac{3}{4}x, \quad (x \ll 1)$$

# Neutrino decay in Left-Right symmetric model

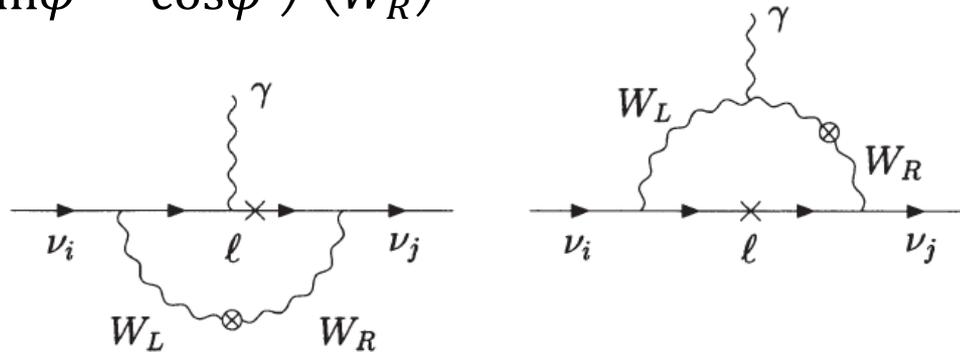
## OLR対称模型

$$SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$$

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_L \\ W_R \end{pmatrix}$$

質量固有状態、カイラリティ固有状態の混合。

$\phi$ は、混合角。



$$\Gamma(\nu_i \rightarrow \nu_j + \gamma) = \frac{\alpha}{8\pi^4} G_F^2 \sin^2 \phi \cos^2 \phi m_\tau^2 m_{\nu_i}^3 \left(1 - \frac{m_{\nu_j}^2}{m_{\nu_i}^2}\right)^3 \times (|U_{j\tau}^\dagger V_{\tau i}|^2 + |V_{j\tau}^\dagger U_{\tau i}|^2).$$

- ✓ 中間状態のレプトンによるカイラリティ反転が許容。 →  $\Gamma \propto m_\tau^2 m_\nu^3$
- ✓ 重い $\tau$ のダイアグラムが顕著に効いてくる。 → GIM抑制がない

$$\tau(\nu_3 \rightarrow \nu_{2,1} + \gamma) \gtrsim 1 \times 10^{12} \text{ yr} (m_{\nu_3}/10 \text{ eV})^{-3}$$

**LR対称模型では、 $\tau \simeq 10^{17}$  yearの寿命もありえる。26桁のブースト！**

# Recent result of XENON1T



最近の結果からLR対称模型をサポートしうる結果(?)を紹介

- 2020年にイタリア・LNGSの暗黒物質探索実験XENON1Tが、低エネルギー側で電子反跳信号の超過を報告！

Phys. Rev. D., 102, 072004 (2020)

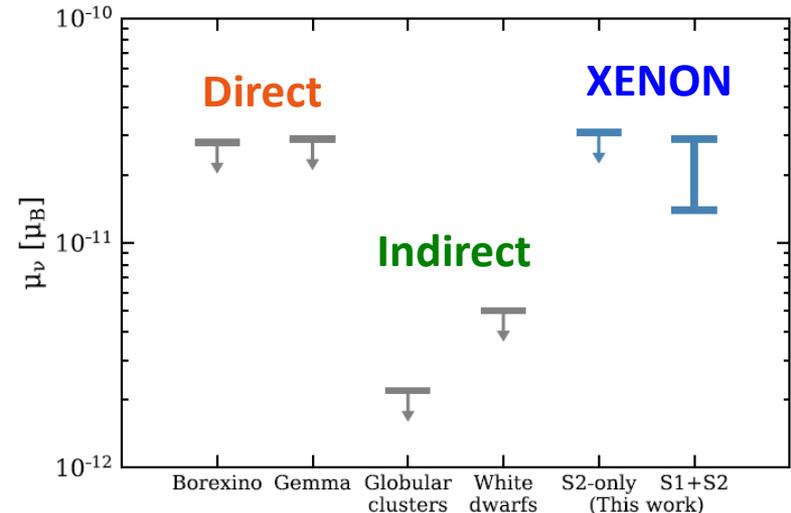
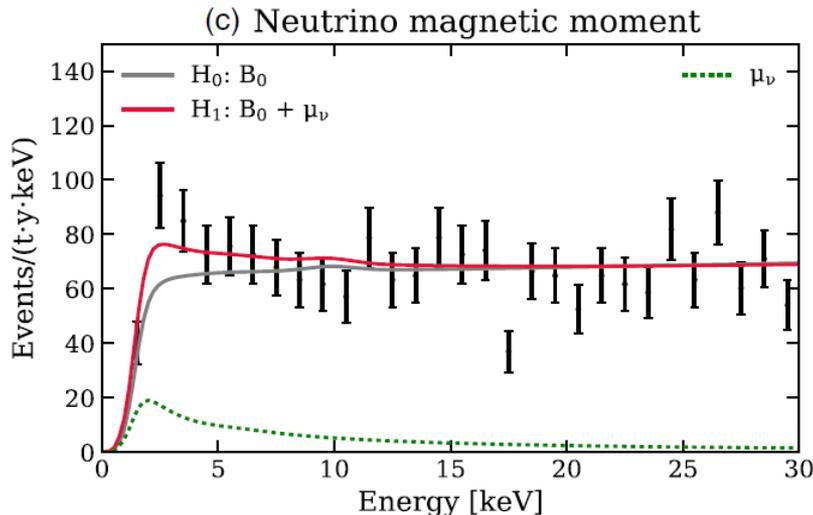
## ○ニュートリノ磁気能率による断面積

$$\frac{d\sigma_\mu}{dE_r} = \mu_\nu^2 \alpha \left( \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_\nu} \right),$$

\* 標準理論  $\mu_{\nu i} \sim 3.2 \times 10^{-19} (m_{\nu i}/1\text{eV}) \mu_B$

\* LR対称模型  $\mu_{\nu i} \sim O(10^{-11} \sim 10^{-12}) \mu_B$

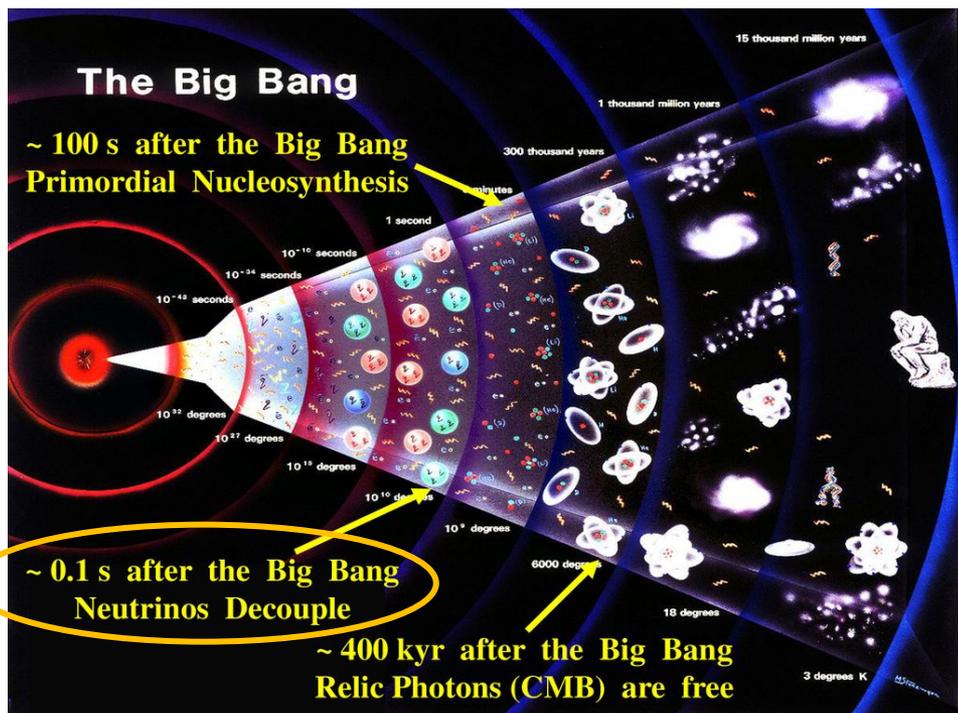
Physics of Neutrinos, M. Fukugita, T. Yanagida (2003)



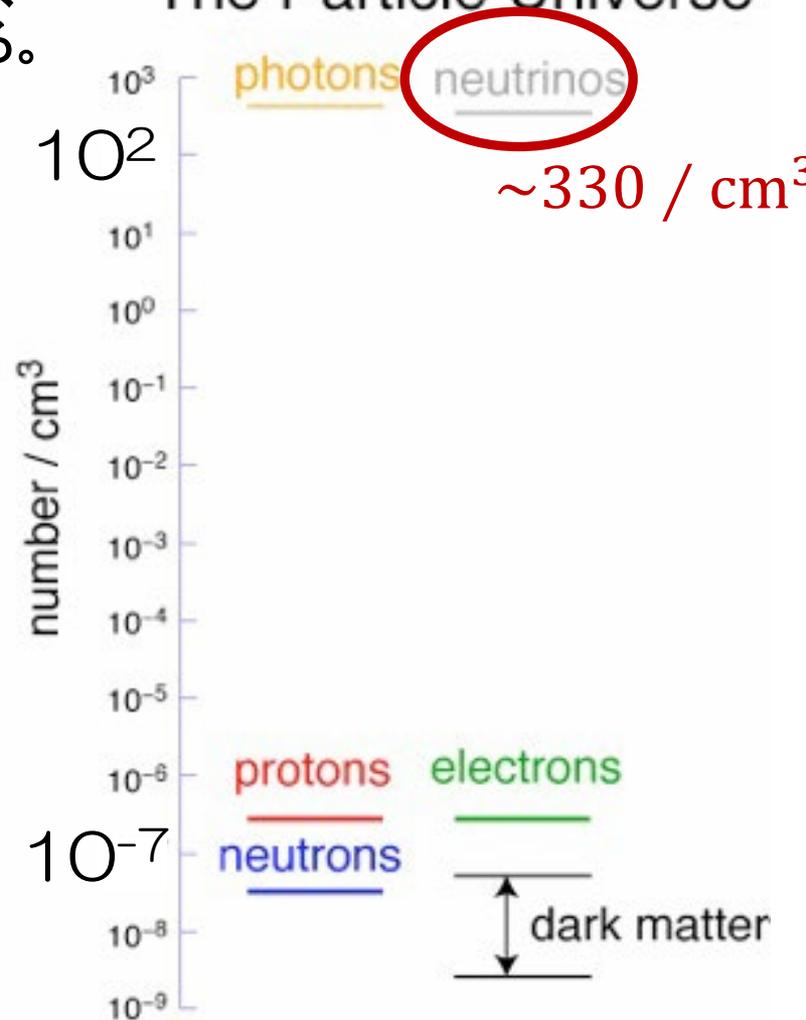
我々の推しである、LR対称模型と矛盾しない！ただし、アクシオンなど他諸説あり。

# Neutrino decay of CvB

ビッグバンから約1秒後、宇宙が $T < 1\text{MeV}$ に冷えると、ニュートリノは熱平衡から切り離され自由に飛び回る。



## The Particle Universe



- 現在のニュートリノ温度  $T_\nu = 1.95\text{ K}$
- 宇宙には光子に次ぐ大量のニュートリノが存在している！しかし、未発見！！
- **ニュートリノ崩壊光探索に最適。**

# COBANDの目的 まとめ

## *CO*smic *BA*ckground *N*eutrino *D*ecay search

1. 宇宙背景ニュートリノの発見
2. ニュートリノ質量絶対値の決定
3. 標準理論を超えた物理への突破口

どれ一つ取ってもノーベル賞級の発見！



# 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

※ 現在の感度の100倍

## ■ 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 202X.



光学系担当



COBAND  
宇宙背景ニュートリノ崩壊探索  
Cosmic Background Neutrino Decay search



筑波大学  
University of Tsukuba



Fermilab



OKAYAMA  
UNIVERSITY



国立大学法人  
静岡大学



SEOUL  
NATIONAL  
UNIVERSITY



近畿大学  
KINKI UNIVERSITY

# ニュートリノ崩壊光のE分布

## ◎CνB崩壊光のスペクトル

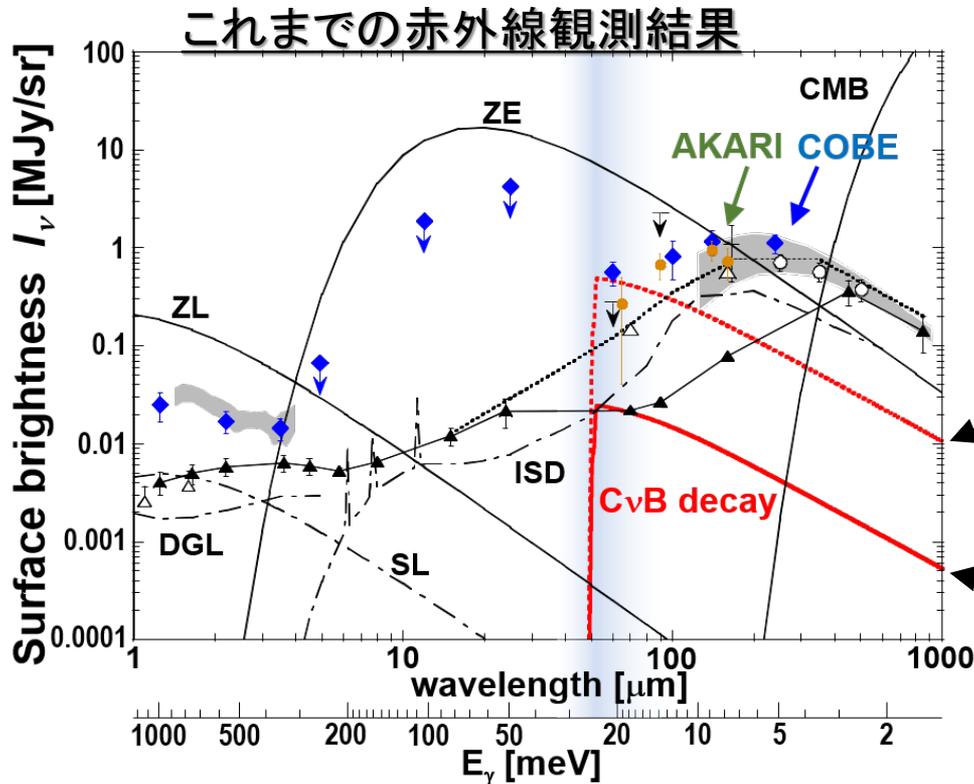
$$E_\gamma = \frac{\Delta m_{23}^2}{2m_3}$$

✓ ニュートリノ質量で決まる位置で鋭いカットオフ！

$m_1 \ll m_2 < m_3$ ,  $m_3 = 50 \text{ meV}$ ,  $m_2 = 10 \text{ meV}$  と仮定すると、

$E_\gamma (\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma) = 24 \text{ meV} \rightarrow \lambda = 51 \mu\text{m}$  の遠赤外線！

✓ 赤方偏移によって低E側にテール



主要BG：黄道輻射  
(Zodiacal Emission)

$I_\nu \sim 8 \text{ MJy/sr}$

$\tau = 5 \times 10^{12} \text{ yrs}$

$I_\nu \sim 0.5 \text{ MJy/sr}$

今の下限值 (S.H.Kim 2012)

$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$

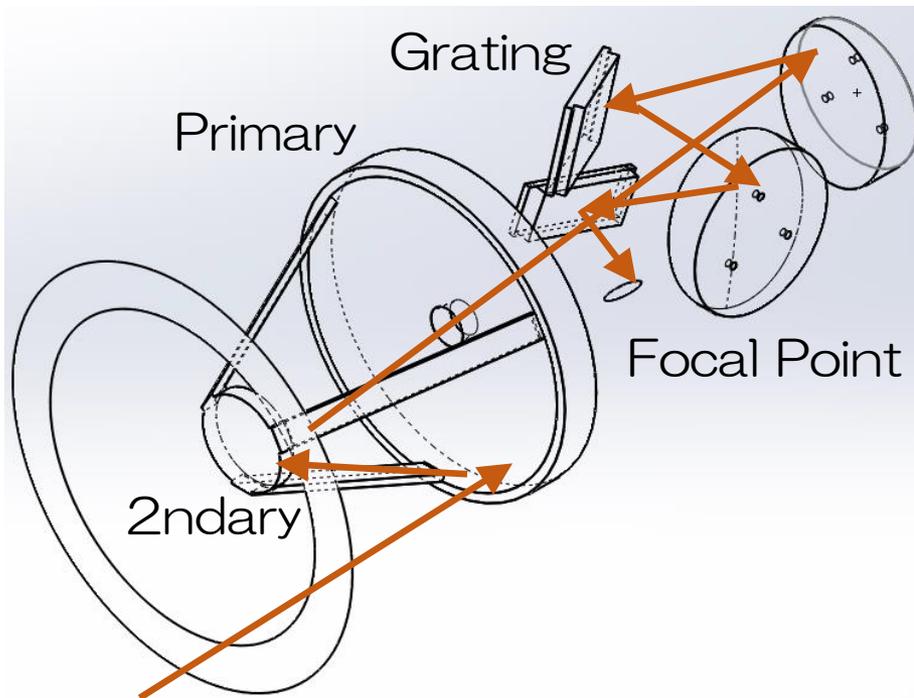
$I_\nu \sim 25 \text{ kJy/sr}$

次の目標！

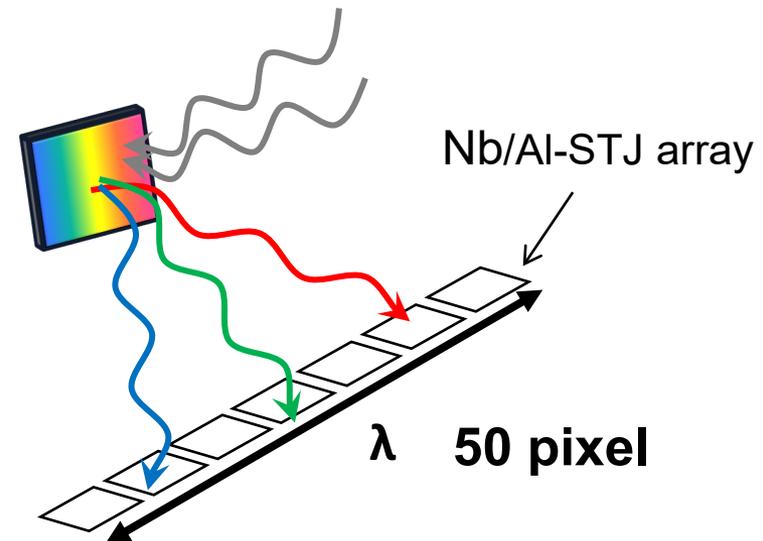
# COBAND実験概要

## ◎検出原理

1. 宇宙からの光を望遠鏡で集光
2. 後段の光学系（回折格子）で波長ごとに分光
3. Nb/Al-STJを用いて遠赤外一光子をカウント



## ◎回折格子+Pixel検出器



## ◎光学系への要求

$\lambda = 40-80 \mu\text{m}$  の遠赤外光を2%の波長分解能で測定！

※宇宙観測のプロからのアドバイス大歓迎です！！

# COBAND光学系の開発

感度  $\tau_v \sim 10^{14}$  year を達成するための光学系への要求

主鏡直径	200	[mm $\Phi$ ]	}	ロケットの空間的制限
奥行	500	[mm]		
焦点のスポットサイズ	400	[ $\mu\text{m}$ ]	}	回折限界 / STJのサイズ
視野角	0.29	[deg]		
焦点距離	54.6	[cm]		
回折の分散角 (40~80 [ $\mu\text{m}$ ])	8~16	[deg]	→	光学系の収差

## ◎今日のお話

1. 独自の回折格子開発と、分光性能の評価
2. 光学系全体の設計と、集光性能の評価

# 回折格子

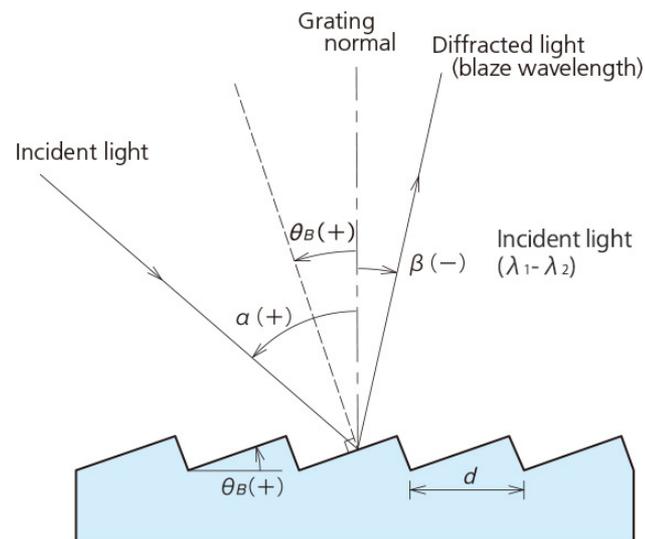


- 遠赤外 (40-80 $\mu\text{m}$ ) の回折格子は激レア。
- 堀場製作所は既製品あり (~ ¥20万)

## ◎回折格子方程式

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

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



- ✓ 光学系からの要請: 40-80 $\mu\text{m}$ の光を、分散角8~16度で回折。  
堀場の既製品では分散角が数10度と広いため、収差が悪くなる。

**COBAND実験用遠赤外回折格子の開発を行った。**

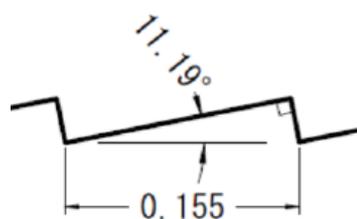
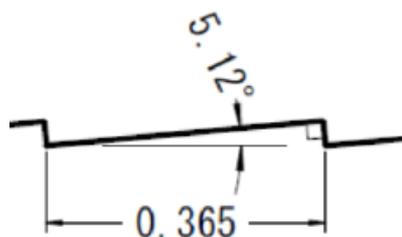
# 回折格子設計

高橋光太郎(2019年卒業)

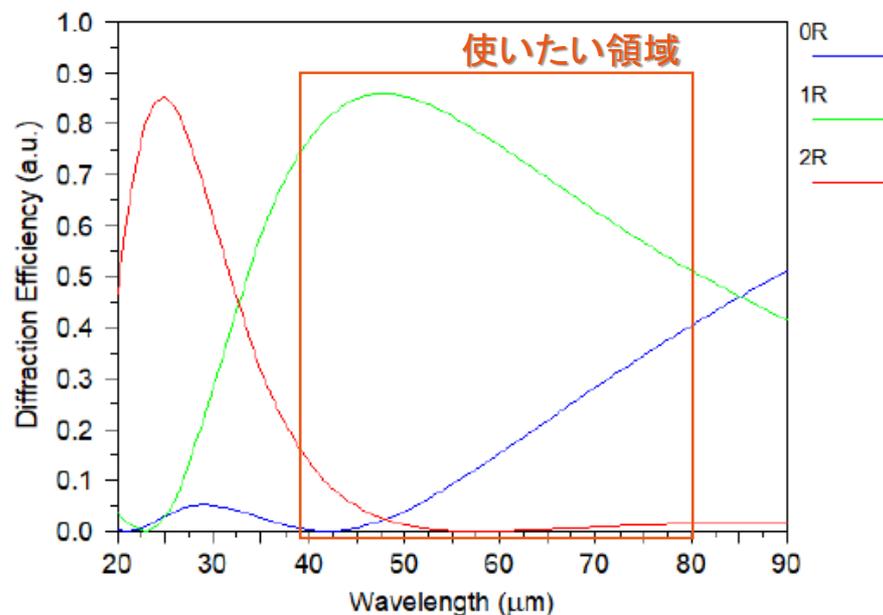
- 回折格子シミュレータ(DiffractMOD)で、ブレード回折格子をデザイン。
- 40~80 $\mu\text{m}$ の波長に対して:
  - 1次回折光の効率が50%以上
  - 8度または16度の分散角。
- 以上を満たすように、溝幅とブレード角をシミュレーションで決定。
- 材質は遠赤外光に対して反射率の高いアルミを用いる。

## デザインした回折格子2種のパラメータ

回折角の幅 (40-80 $\mu\text{m}$ )	[deg]	8	16
溝幅	[ $\mu\text{m}$ ]	365	155
ブレード角	[deg]	5.12	11.19



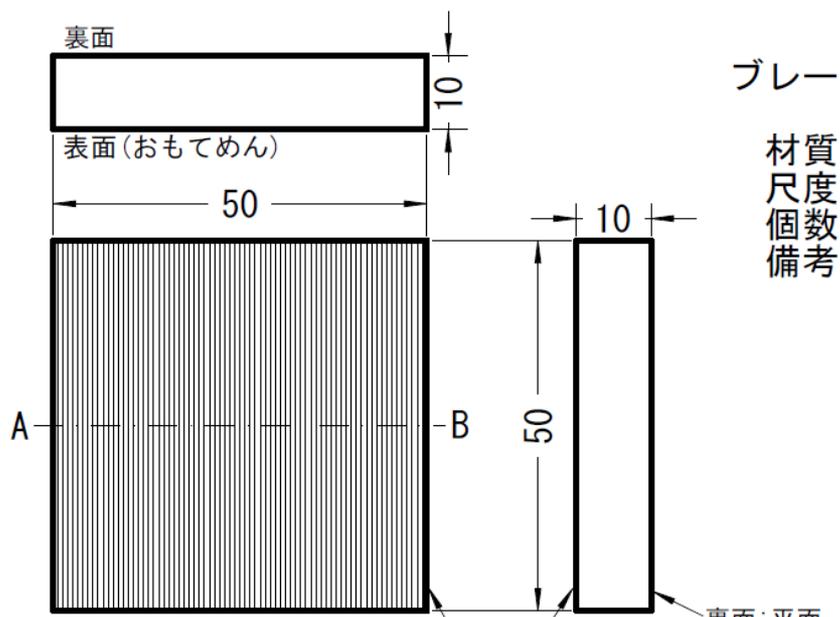
## 365 $\mu\text{m}$ 幅のシミュレーション結果





# 自前で作成を決意

設計図を作って機械加工の業者に作成を委託することに。

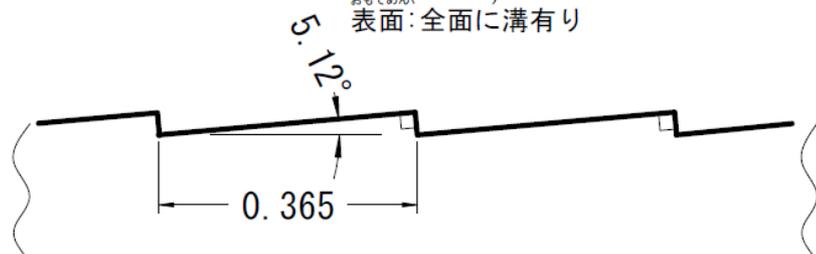


ブレード回折格子 (0.365mmピッチ)

材質 アルミ  
尺度 1:1  
個数 1  
備考 使用波長領域40 $\mu$ m~80 $\mu$ m

おもてめん  
表面: 全面に溝有り

おもてめん  
表面: 全面に溝有り



断面AB拡大  
(おもてめんの表面の溝の形状拡大図)

裏面: 平面

# 回折格子の作り方

## ◎機械加工

- 静岡にある機械加工の会社。
- 4社に断られ、5社目でやっと引き受けてもらった。
- **アルミ板を通常のフライス盤で加工。**

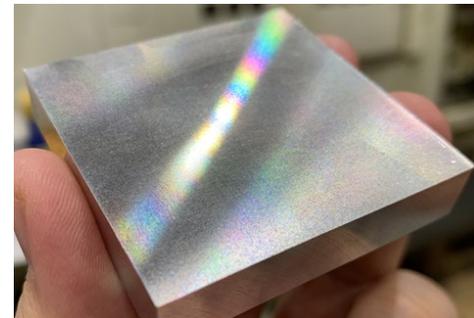
※単結晶ダイヤモンドの特注工具を用いれば表面精度が上がるといわれたが、時間がかかるようなので普通の工具で加工し、鏡面は別途真空蒸着で対応することにした。

## ◎真空蒸着

- 福井にある真空蒸着の会社。
- 回折格子表面を、純度99%の**アルミまたは金でコーティング**。膜厚は100nm程度。
- さらに酸化防止のため $\text{SiO}_2$ 保護膜を塗布。



# 回折格子完成！

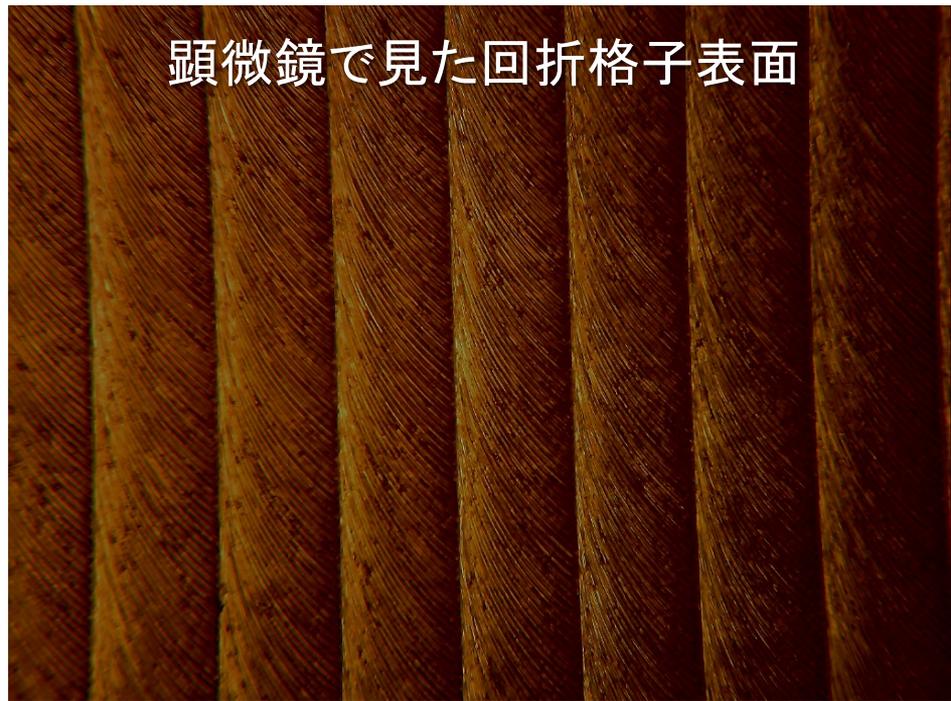


結果として1000万コースといわれた回折格子が、20万以内で作成できた！！  
良いものが出来たかは、この時点では不明。

作った回折格子にレーザーを照射



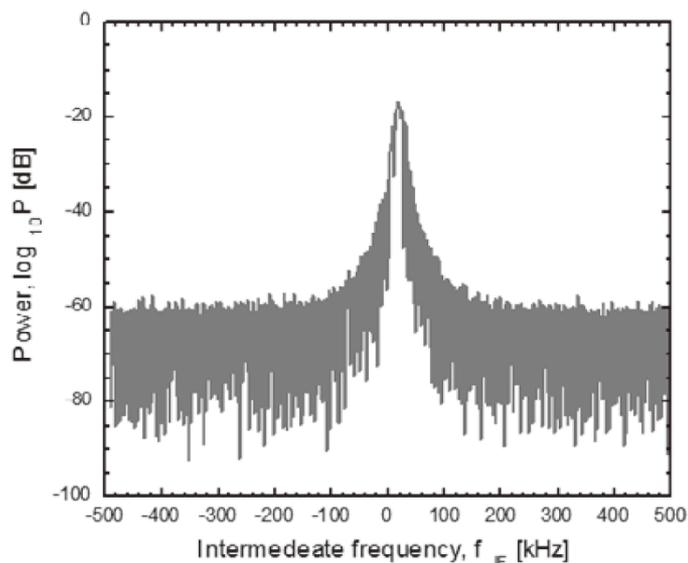
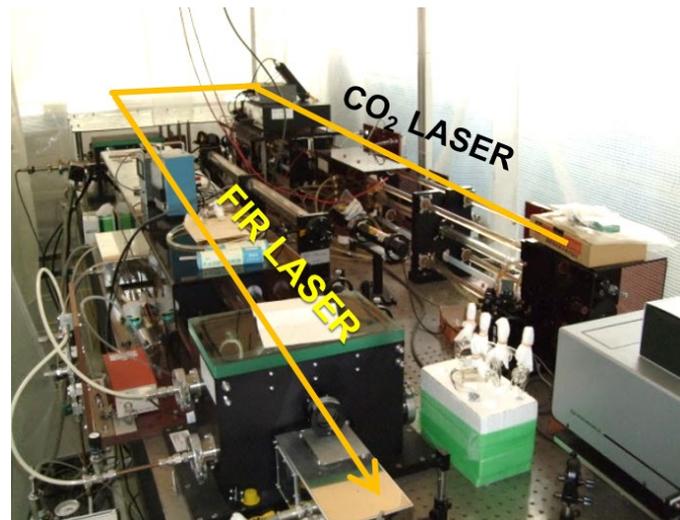
顕微鏡で見た回折格子表面



実際に用いたい遠赤外の光を照射して性能評価へ

# 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。



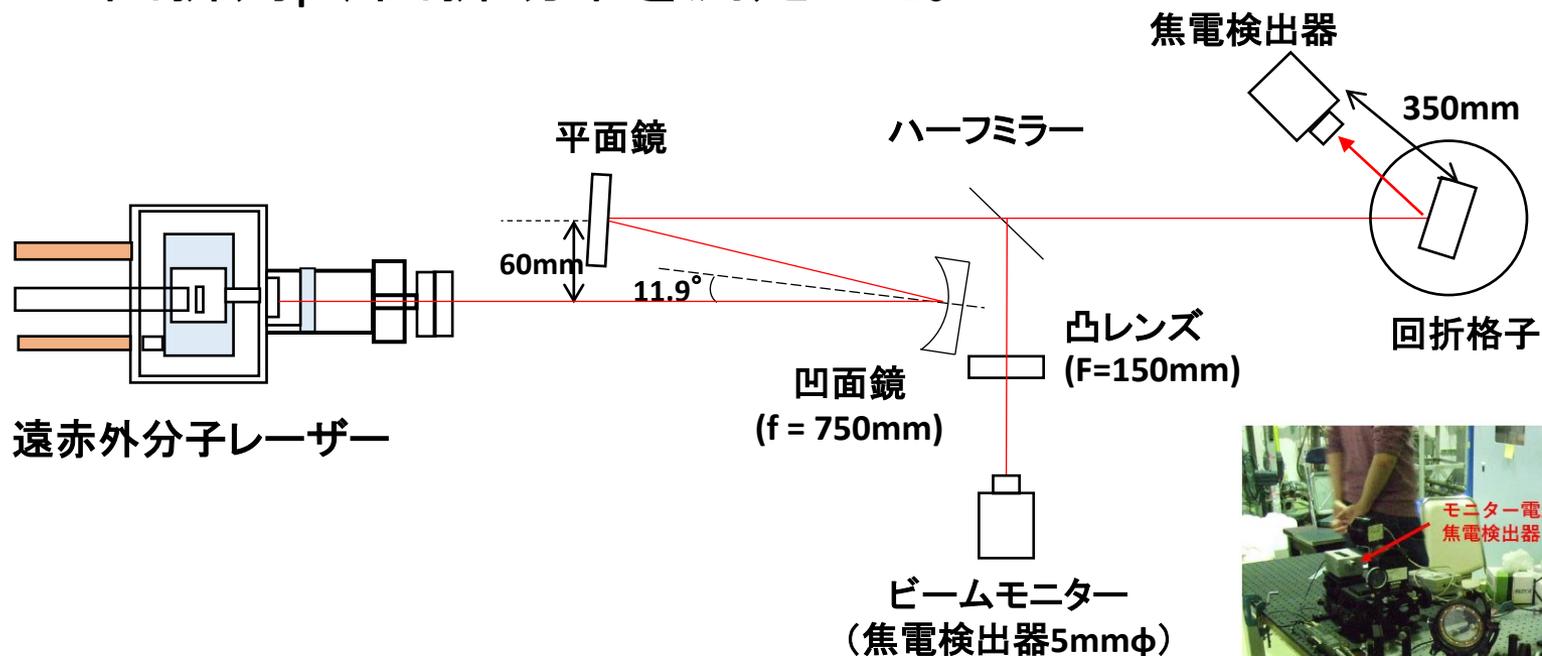
254- $\mu\text{m}$  CD<sub>3</sub>OH レーザーとジャイロトロンFU-IV とのヘテロダインビート信号。

発振波長 [ $\mu\text{m}$ ]	試料ガス	偏光方向	FIR出力 [mW]
42.6	CD <sub>3</sub> OH		2.0
47.6	CH <sub>3</sub> OD		36.6
57.2	CH <sub>3</sub> OD	⊥	28
70.5	CH <sub>3</sub> OH	⊥	30
86.4	CD <sub>3</sub> OH		-

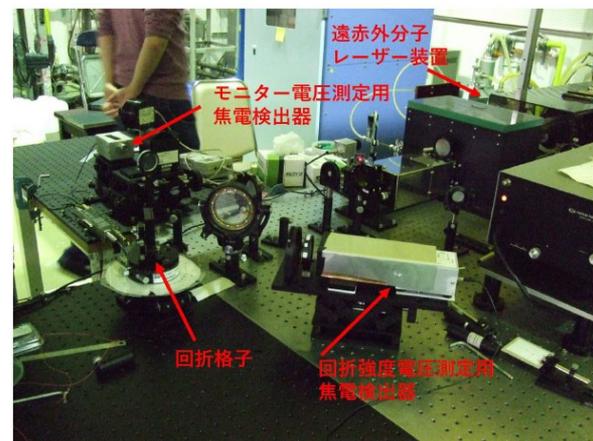
強度や偏光方向を考慮し、今回は5種類の波長を測定した。

# 実験セットアップ

- 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。

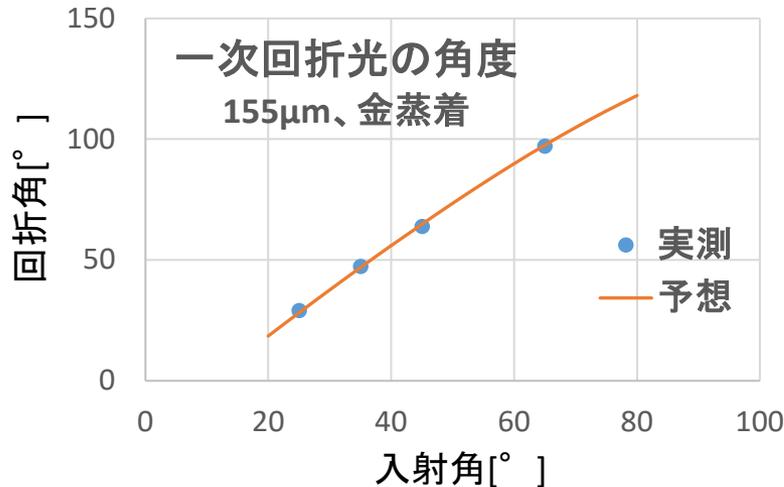


$$\text{回折効率} = \frac{\text{電圧比(1次)}}{\text{合計電圧比(0-2次)}}$$



# 回折格子の実験結果①

前川群(2021年卒業)

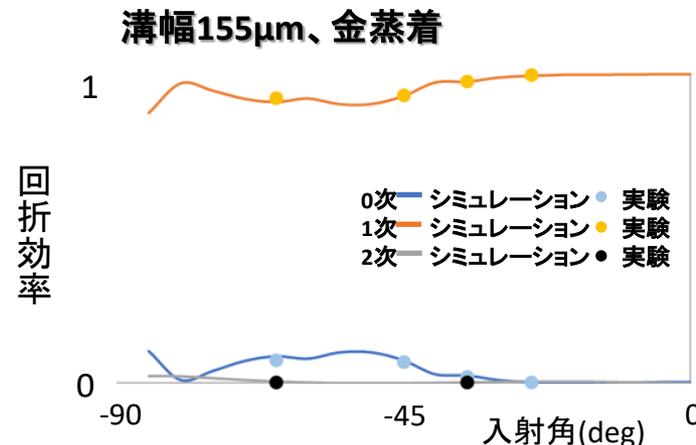
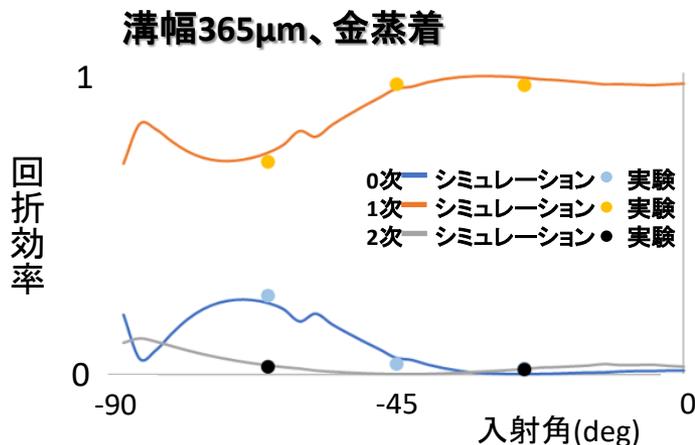


## ◎回折角度の測定

- 波長57.2 $\mu\text{m}$ のレーザーを使って、入射角度 vs 回折角度の分布を測定(左)。
- 実測と予想はどんぴしゃ一致し、**回折格子として機能している**ことが分かる。

## ◎溝幅の回折効率比較

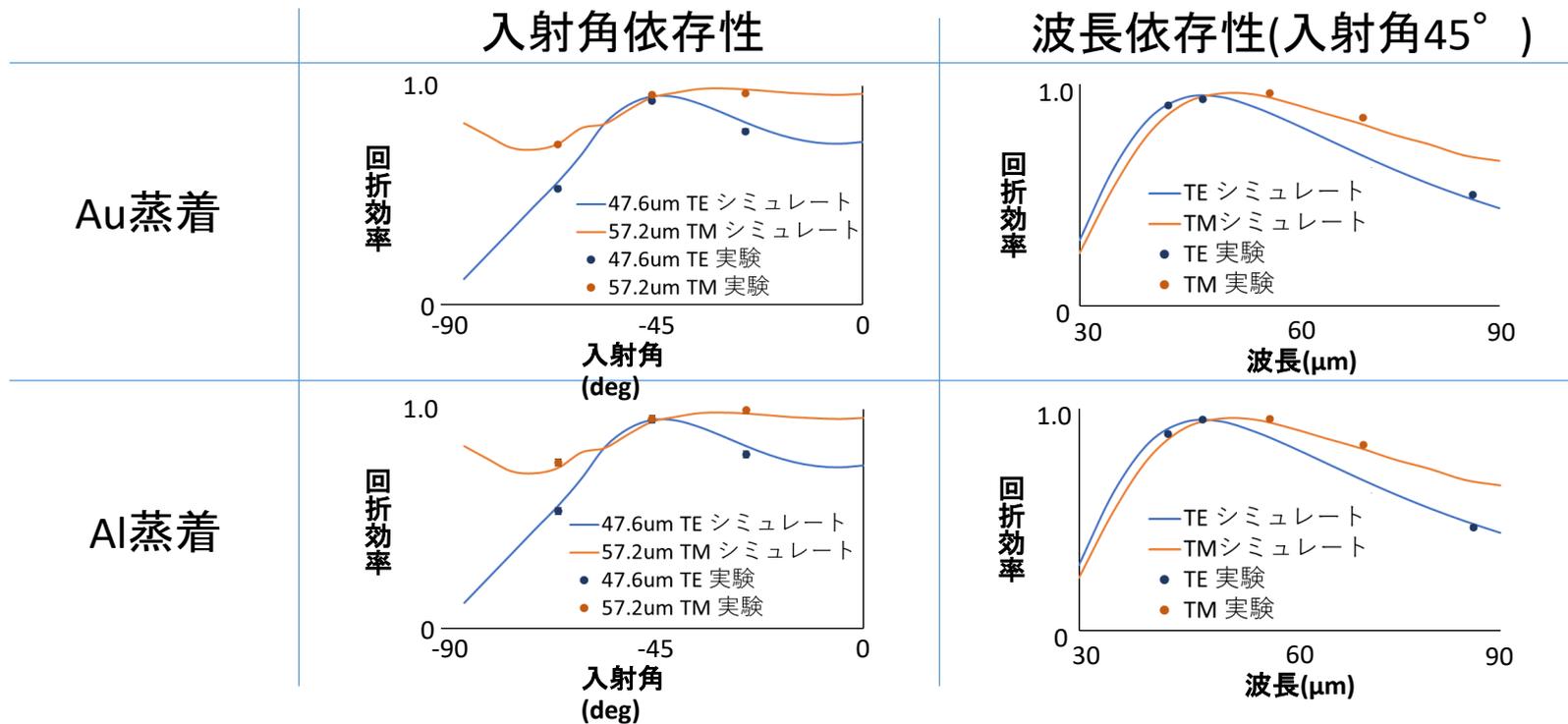
- (下図)溝幅による回折効率の入射角依存性。
- こちらも**実測とシミュレーションは良く一致した**。
- 45度での回折効率はどちらもほぼ1。



分散角が狭いほうが収差を抑えやすいので、**365 $\mu\text{m}$ を使用することに決定**

# 回折格子の実験結果② [材質比較]

金蒸着、アルミ蒸着の2種の回折格子(溝幅 $365\mu\text{m}$ )に対し、入射角依存性、波長依存性を確認した。



シミュレーションと良く一致しており、また、材質による違いも特に見られない。



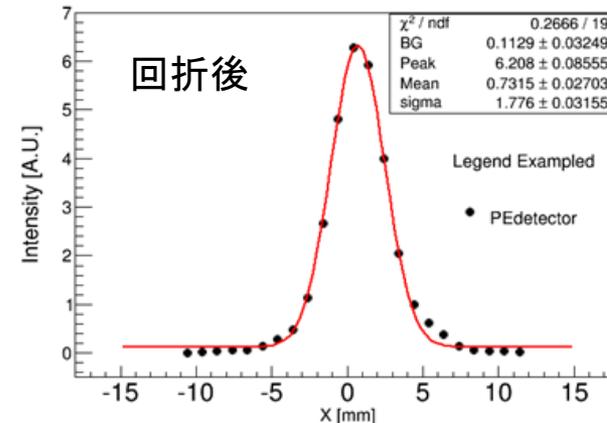
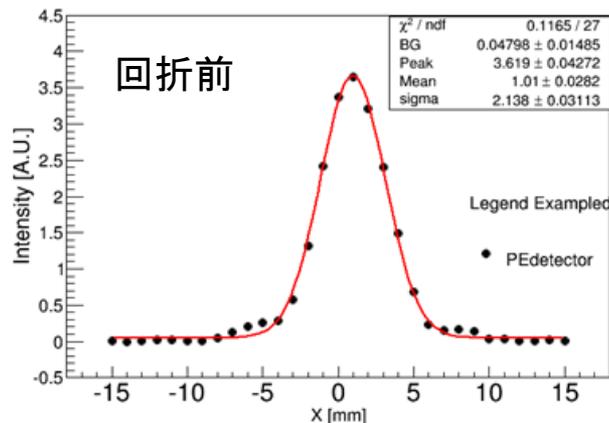
価格が安く、異種金属接触(ガルバニック)腐食が起こりづらいアルミ蒸着のものを採用することに決定した。

# 回折格子の実験結果③ [回折光の広がり]

- 回折格子表面の機械切削による跡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ずつ動かして測定を行った。影響があれば回折後のビームは広がるはず。



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



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。

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

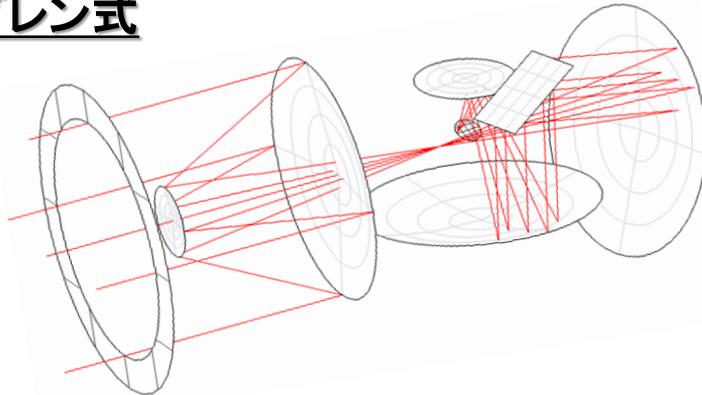
COBAND実験用遠赤外回折格子の  
作成に成功！ ¥20万以下！！

# COBAND光学設計

橋本遼(関西学院大)  
前川群(2021年卒業)

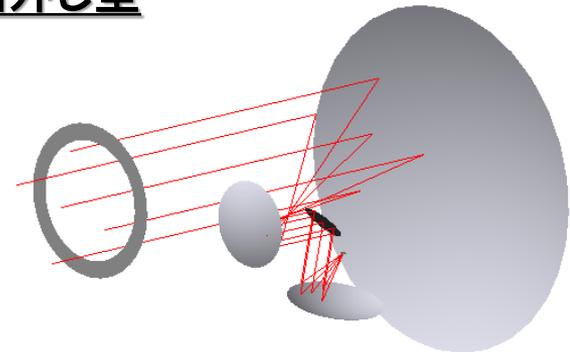
- 開発した回折格子を組み込んだ光学系全体を設計。
- 光学シミュレータCODE-Vを用いて以下の二種類の光学系を検討。

## カセグレン式



- ☺ 収差を小さくしやすい。
- ☹ 副鏡の支えなどによって迷光を作りやすい。

## 軸外し型



- ☺ 迷光を少なくできる。
- ☹ 限られた空間で配置が難しい。

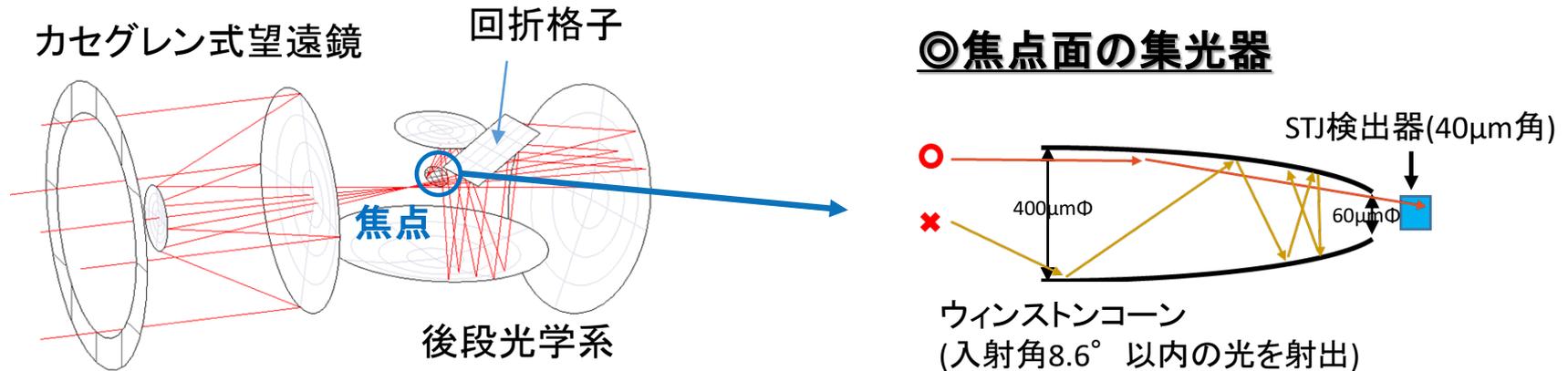
※迷光: 本来のルートを通らず検出器に入射する光。



両方の設計を検討した結果、カセグレン式を採用！

# 集光効率の算出

- CODE-Vを用いてCOBAND実験光学系をシミュレーション。
- STJ検出器手前での集光効率を求めた。



焦点では、集光器によって400 $\mu$ m内の光を60 $\mu$ mに縮小。  
ただし、入射角が8.6° 以上の光は集光できない。  
アルミ・ミラーの反射効率はほぼ100%と考えてよい。

## 集光効率

= 回折格子の一次回折効率

× 焦点で、400 $\mu$ m径に入る光の割合

× 入射角8.6° 以内でウィンストンコーンへ入る割合

# 光学系集光効率

- 光学系シミュレーションと回折格子シミュレーションから得られた各種効率と、トータルの集光効率。

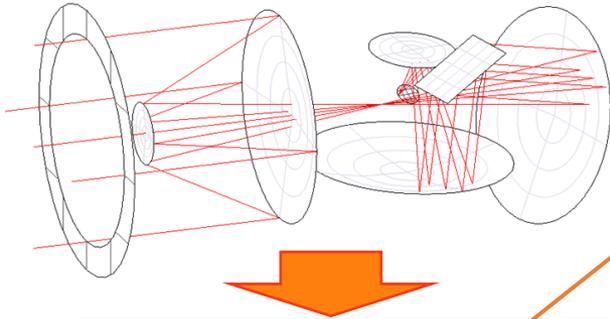
波長 (um)	焦点で400umφに入る割合 (%)	集光器の入射角 < 8.6度の割合 (%)	回折効率 (%)	集光効率 (%)
40	81.2	59.4	76.8	37.0
50	72.8	59.1	85.3	36.7
60	66.4	57.9	75.6	29.1
70	66.8	55.9	62.7	23.4
80	64.7	53.4	51.1	17.7

40-70 $\mu$ mは効率が目標値20%以上を達成している。

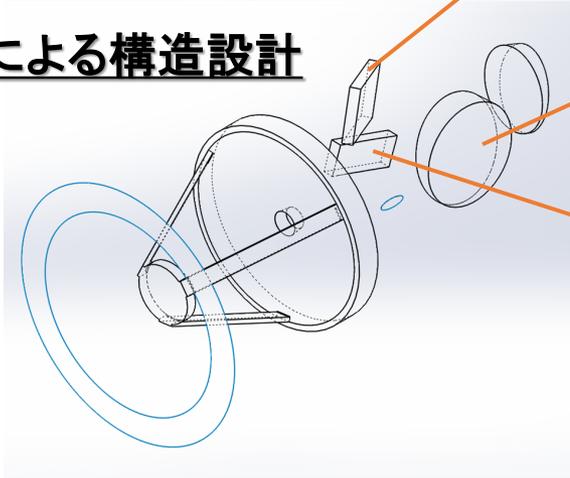
この光学系で試作を行い、実験によって性能計測を行っていく。

# ミラーの試作

## ① 光学シミュレーション

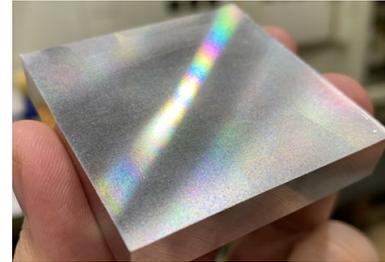


## ② CADによる構造設計

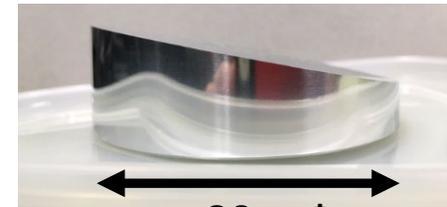


## ③ 各パーツの試作!

回折格子

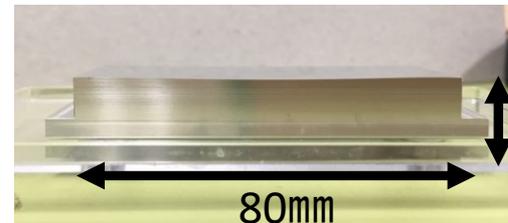


M4



80mm $\Phi$

M5



11.3mm

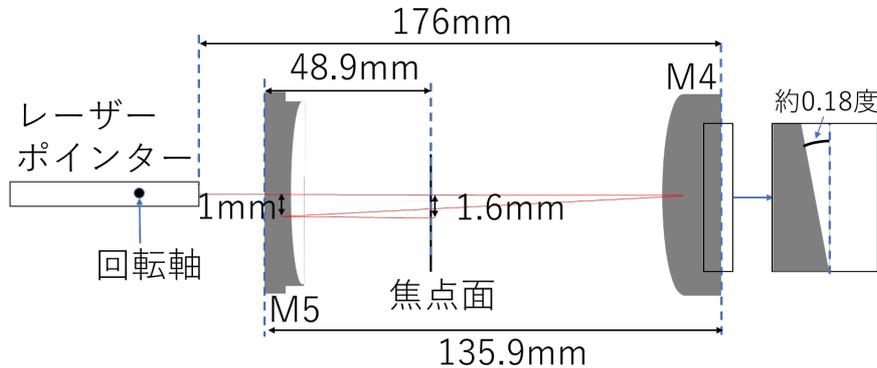
80mm

- M4, M5と呼んでいる、回折光を焦点面に集光するミラーを試作。
- クリスタル光学という会社でミラーを作成。
- ミラーの精度はミクロン程度。価格は～80万円くらい。

# 試作ミラーのテスト

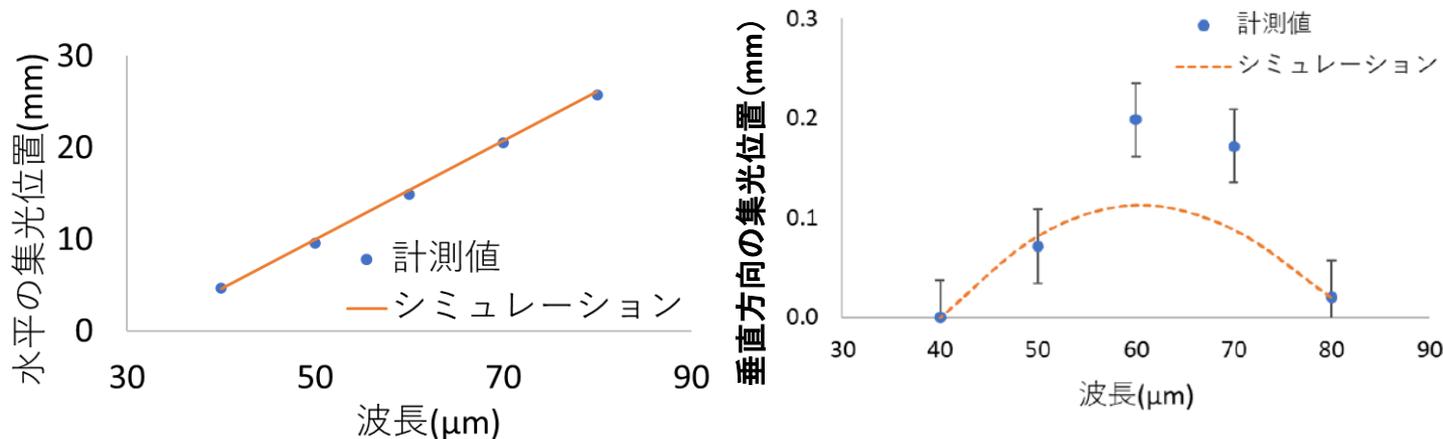
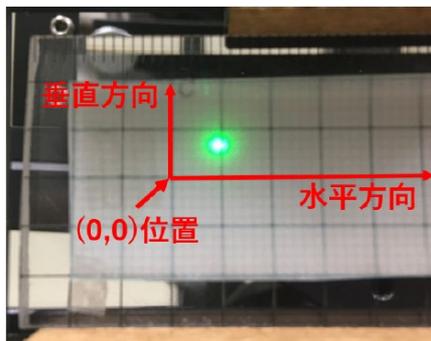
前川群(2021年卒業)

試作したM4,M5を用いて、焦点面での結像の試験を行った。



レーザーを回転させて波長による回折角の違いを再現。  
(コロナのせいで、遠赤外レーザーを使えなかったため。)

焦点面に方眼紙を置いて位置を測定



集光位置は、実測とシミュレーションで良く一致(ずれは0.4mm以下)！  
今後、アライメントや測定の精度を上げていきたい。

# その他、光学系で進んでいる項目

発表時間の関係で割愛したが、以下の項目においても研究開発が進んでいる。

1. 集光器(ウィンストンコーン)の設計・試作
2. STJ表面の反射防止膜の試作(Si薄膜)
3. 理想的な反射防止膜設計に向けたNbの複素屈折率測定

山根綾太(2021年卒業予定)

etc...

# まとめ

- COBAND実験は宇宙背景ニュートリノの崩壊光を探索する実験。
- 遠赤外 ( $\lambda=40-80\mu\text{m}$ ) の光を分光する**COBAND実験用の遠赤外回折格子を独自開発**した。
- 回折格子を組み込んだ光学系の設計・評価を行い、**集光効率18-37%をシミュレーションで達成**した。
- 現在、光学系の試作を行っているところ。

# 今後やっていくこと

- 作成した回折格子＋集光ミラーを福井大学にもって行って、遠赤外レーザーを用いた性能試験。
- 集光器・反射防止膜の試作・試験。
- 光学系全体を作成し、性能評価、振動試験、冷却試験。 etc.

