



COBAND実験のための遠赤外光源開発

(A far-infrared light source for COBAND experiment)

福井大学 吉田拓生, 古屋 岳, 鈴木健吾, 浅胡武志, 竹下勉, 若林 凜

中部大学 岡島茂樹, 中山和也

筑波大学 金 信弘, 武内勇司, 飯田 崇史, 浅野千紗, 高橋光太郎, 前川 群, 山根 綾太

近畿大学 加藤幸弘

他、COBAND実験メンバー

筑波大学 令和2年度 第1回宇宙史センター構成員会議

2020年6月15日

素粒子標準模型とニュートリノ

		第1世代 フレーバー 質量:小	第2世代 フレーバー 質量:中	第3世代 フレーバー 質量:大
クォーク (e :電気素量)	電荷 $\frac{2}{3}e$	u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)
	電荷 $-\frac{1}{3}e$	d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)
レプトン (軽粒子)	電荷 0	ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)
	電荷 $-e$	e^- (電子)	μ^- (ミュー)	τ^- (タウ)
相互作用を媒介する粒子 (ゲージ粒子)		光子 γ (電磁相互作用)	グルーオン g (強い相互作用)	W^+ W^- Z^0 (弱い相互作用)
いろんな素粒子の 質量の源となる粒子		ヒッグス粒子 H^0		

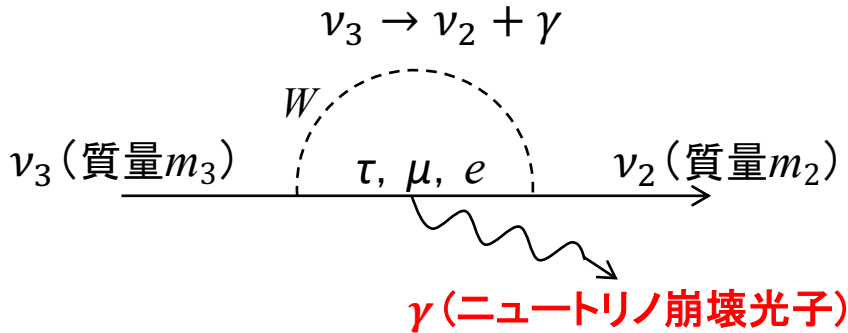
〈ニュートリノの質量について、分かっていること (from Kamioka etc.)〉

- ・3つの質量固有状態がある: ν_1, ν_2, ν_3
- ・質量2乗差は測定されているが、個々の質量は不明

$$m_2^2 - m_1^2 = 7.37 \times 10^{-5} \text{eV}^2, \quad m_3^2 - m_2^2 = 2.46 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$
- ・宇宙の密度揺らぎの観測から $m_1 + m_2 + m_3 < 230 \text{meV}$

ニュートリノに質量があると…

質量の大きいニュートリノが光子(γ)を放出して崩壊し、
質量の小さいニュートリノになる…と理論で予言(未だ観測はされていない。)



ニュートリノ崩壊光子のエネルギー E_γ

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

(2体崩壊なので、重心系で E_γ は一定)



ニュートリノ崩壊光子を検出し、
そのエネルギー E_γ を測定することで、
ニュートリノの質量が決定できる。

一方、Kamiokaのニュートリノ振動の観測から:

$$m_3^2 - m_2^2 = 2.46 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$m_2^2 - m_1^2 = 7.37 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



< E_γ を推定しよう>

ニュートリノ質量の

下限: $m_1 \geq 0$

上限: $m_1 + m_2 + m_3 < 230 \text{ meV}$



m_1 (meV)	m_2 (meV)	m_3 (meV)	E_γ (meV)	波長 λ (μm)
0	9	50	24	50
71	72	87	14	90

遠赤外!

しかし、ニュートリノの寿命 τ はとても長く、崩壊確率は極めて低い。

(観測で $\tau > 3 \times 10^{12}$ 年、理論ではモデルによって 10^{13} 年 (VL lepton) $\sim 10^{17}$ 年 (L-R symm.) $\sim 10^{43}$ 年 (SM))

⇒ 観測するには大量のニュートリノが必要

宇宙背景ニュートリノ崩壊光子(CνB)を使おう



COBAND実験共同研究

筑波大、JAXA、関学大、KEK、福井大、産総研、理研、近畿大、米国フェルミ研、ソウル大、韓国IBS、他

宇宙背景ニュートリノ:

- ビッグバンによって宇宙が生まれたとき、光子や電子やクォークなどと共に大量に生成されたはず。
- 今でも大量に宇宙を飛び交っている(約300個/cm³)と考えられているが、未発見。

色々な粒子が飛び交う宇宙

光子(3K放射): 約 400個/cm³ : ビッグバンの38万年後に晴れわたる。

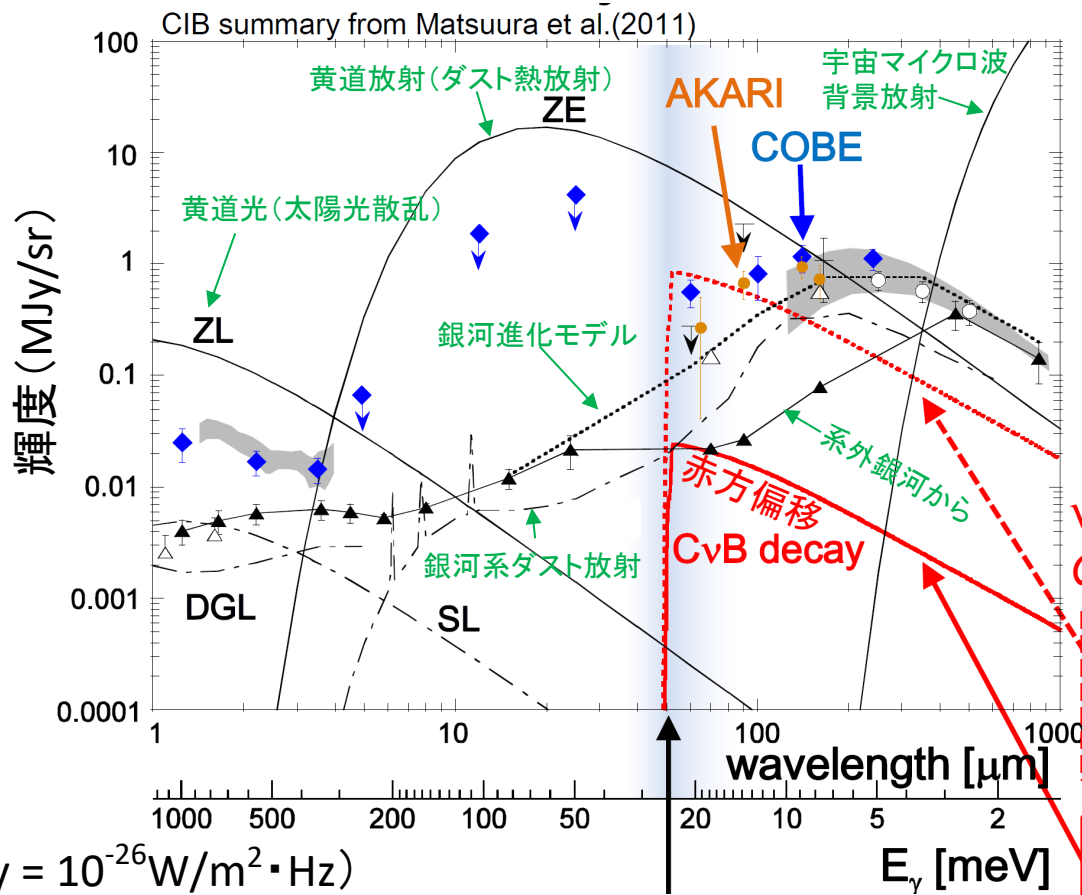
ニュートリノ: 約300個/cm³ (理論の予測): ビッグバンの~1秒後に晴れわたる。

検出器を宇宙へ

(地上では空気中の水分がν崩壊光子を吸収してしまうため。)



宇宙背景ニュートリノ(CνB)崩壊光子のスペクトルとバックグラウンド



宇宙背景ニュートリノ(CνB)は、
1.9 Kの熱運動(～0.6meV)をしている
だけなので、周りの空間に対して、
ほぼ静止しているとみなせる。

ν_3 静止系で波長 $\lambda = 50\mu\text{m}$ の場合
のスペクトル

ν_3 の寿命 $\tau = 3 \times 10^{12}$ 年と仮定
(既にS.M. Kim et al によって棄却
されているが)

ν_3 の寿命 $\tau = 1 \times 10^{14}$ 年と仮定

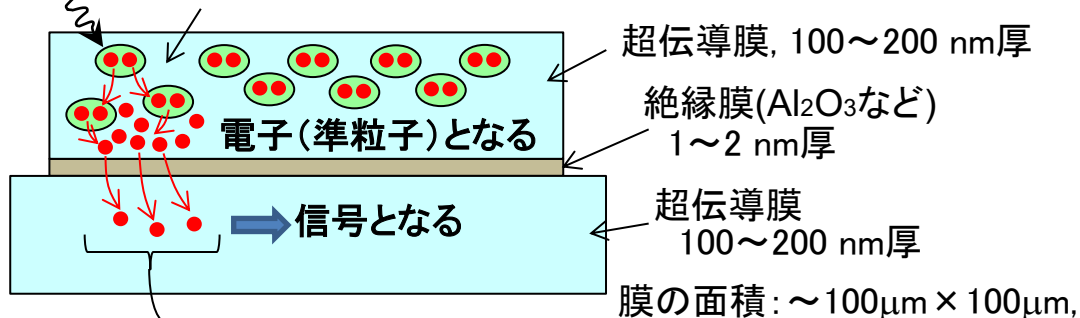
段差@波長50μm+赤方偏移

COBAND実験では、このような段差(波長50～90μm付近にできるであろう)を探索する。
どのような検出器を使うのか。

超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器、開発中

(Superconducting Tunnel Junction 検出器、STJ 検出器)

γ ニュートリノ崩壊光子 $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$ ($\lambda = 50 \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$, $3 \sim 6 \text{ THz}$)
 コーパ対を破壊、電子を生成 (エネルギー 1.7Δ あたり電子を1個生成)



トンネル効果で絶縁膜を通り抜けた電子
 その数 \propto 光子のエネルギー

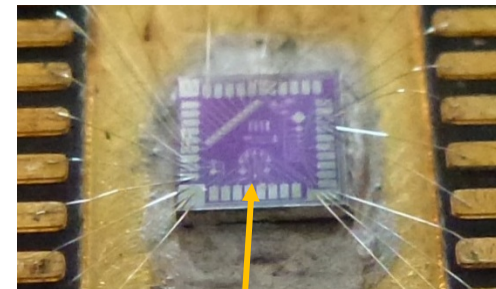
超伝導体材料	エネルギーギャップ Δ (meV)	超伝導転移温度 (K)	STJ 検出器のエネルギー分解能 (%) ($E_\gamma = 24 \text{ meV}$, $\lambda = 50 \mu\text{m}$ のとき)
Nb	1.55	9.2	14.8%
Al	0.172	1.19	4.9%
Hf	0.021	0.165	1.7%

開発順調、ただし回折格子で精度を高める必要あり

回折格子不要だが開発に時間必要

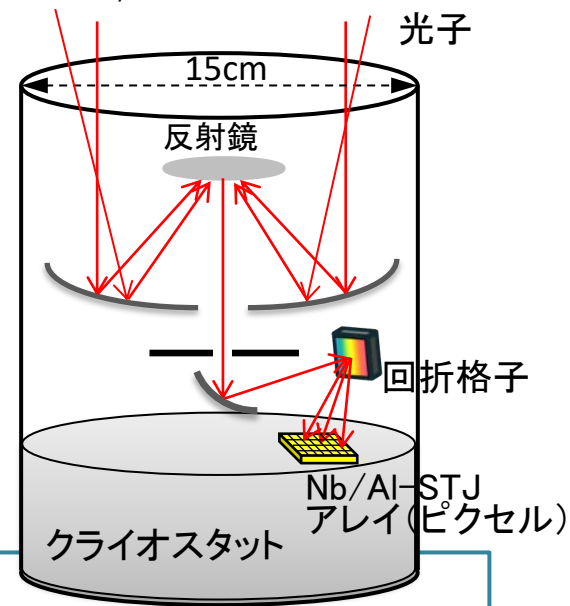
$\Delta \ll \nu$ 崩壊光子のエネルギー E_γ ($14 \sim \text{meV}$)
 Δ が小さいほど、電子の数が増え、統計精度 (エネルギー分解能) が良くなる。

錐形STJ検出器



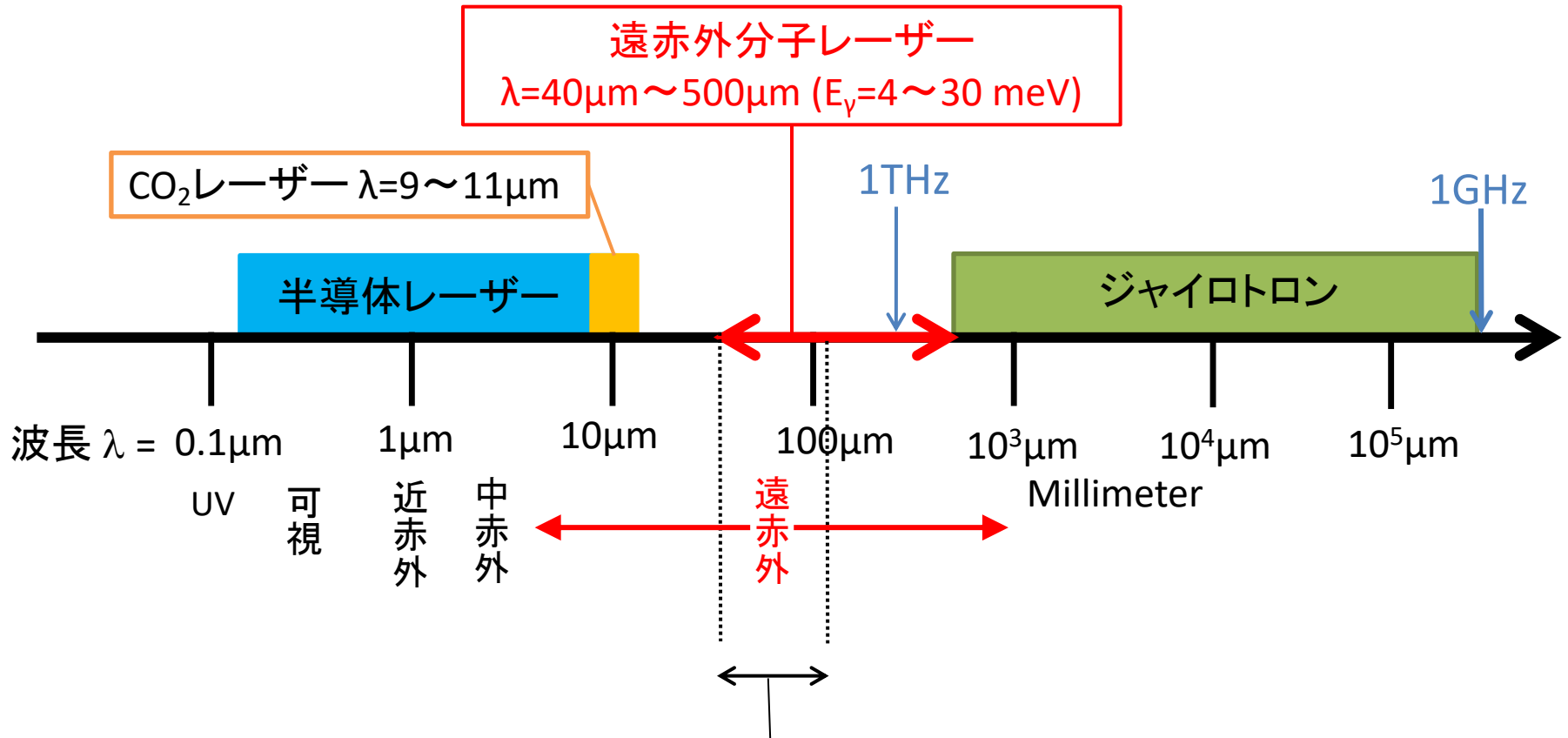
5mm角のチップの中に、
 いろんなサイズのSTJ

ニュートリノ崩壊光子検出器 (望遠鏡)
 主鏡 $15\text{cm}\phi$, 視野角 $0.006^\circ \times 0.05^\circ$
 光子



開発中の検出器のテストをしたい \Rightarrow 波長 $50 \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$ ($\nu: 3 \sim 6 \text{ THz}$) の遠赤外光源が必要。
 どのような光源を使うか。(この領域は「未開拓周波数帯」と言われているが...)

光源の選択肢は？

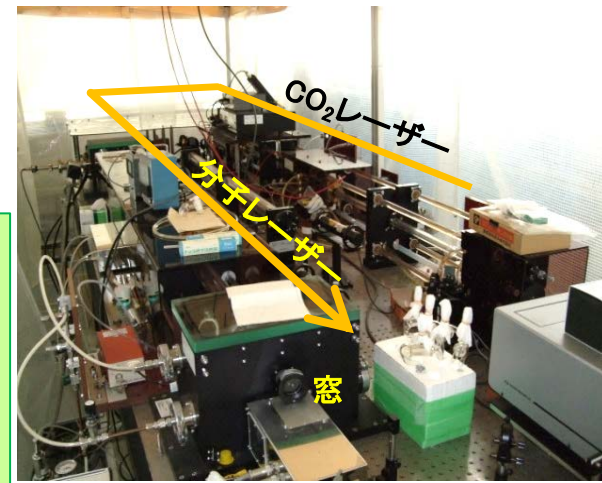


予測されるニュートリノ崩壊光子の波長 $50 \sim 90 \mu\text{m}$ ($\nu=3 \sim 6 \text{ THz}$ 、 $E_\gamma=14 \sim 24 \text{ meV}$) に対して、少し余裕を見て、波長 $40 \sim 120 \mu\text{m}$ の範囲の光源を用意することにした。

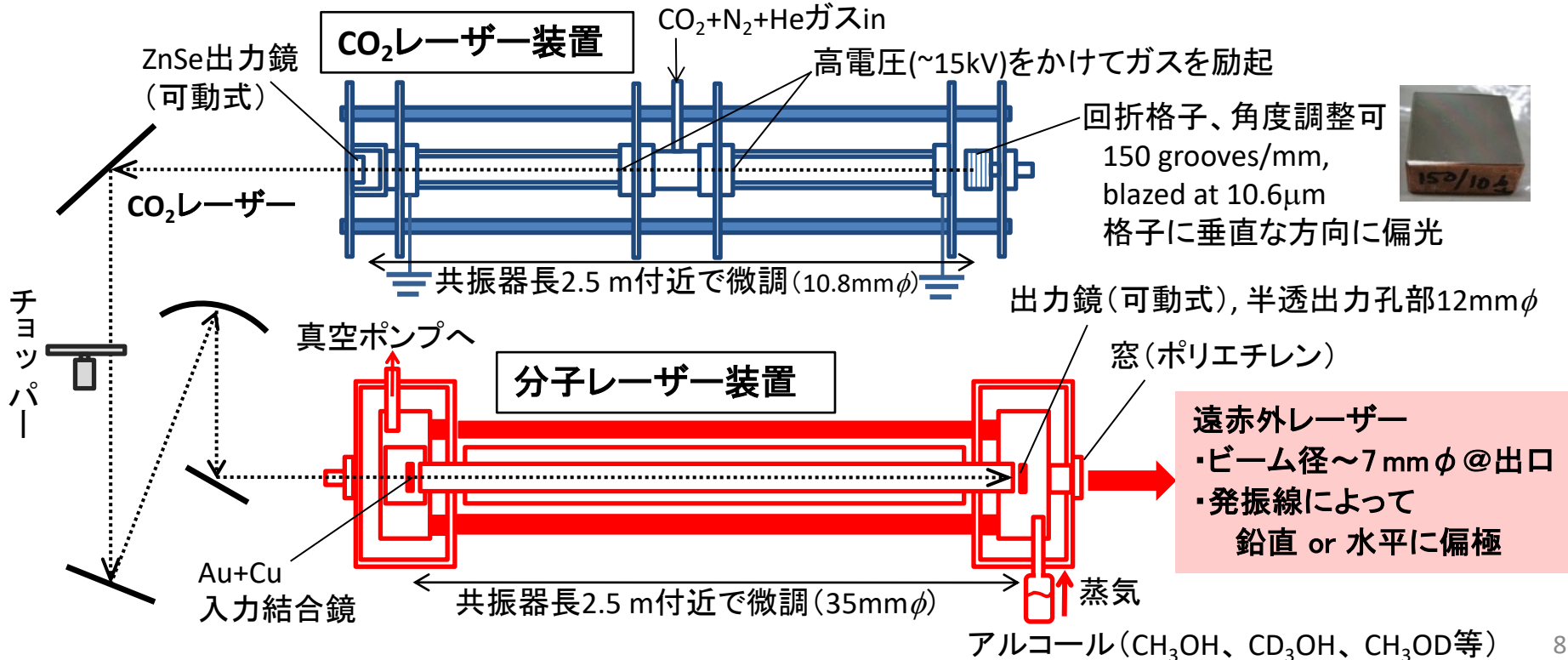
ニュートリノ崩壊光子検出器テスト用遠赤外光源

遠赤外分子レーザー装置(福井大学遠赤センター)を利用。

- CO₂レーザーを1次光源として、種々の気体分子(CH₃OH, CD₃OH, CH₃OD, ...)を励起(分子振動・回転)させ、レーザー発振させる。
- 発振波長 : 40μm~500μmの間 (E_{γ} 2.5meV~31meV) の約70本の単色発振線から任意の一つを選択できる。
- 連続波発振(出力: 発振波長によって数mW~百mW)



元々、中部大学の岡島・中山研究室で開発された手作りのレーザー



波長40~120 μm の範囲で、これまでに利用した発振線

(中部大学の岡島・中山研究室で確認されている27本中、14本)

CO ₂ レーザー(1次光源)			遠赤外分子レーザー				
発振線	波長 λ (μm) (9~11 μm 帯)	出力 (W)	媒体分子 (D: deuteron)	波長 λ (μm)	E_V (meV)	偏光 (対CO ₂)	出力 (mW)
10R(18)	10.260	77	CD ₃ OH	41.4	30.0	⊥	11
9R(28)	9.230	71	CD ₃ OH	42.6	29.2	∥	2.0
10R(18)	10.260	79	CD ₃ OH	43.7	28.4	∥	9.4
9P(30)	9.639	66	CH ₂ DOH	44.0	28.2	∥	2.8
9R(8)	9.342	67	CH ₃ OD	47.6	26.1	∥	37
9R(34)	9.201	67	CD ₃ OH	52.9	23.5	⊥	9.2
9R(8)	9.342	73	CH ₃ OD	57.2	21.7	⊥	72
9P(34)	9.676	69	CH ₃ OH	70.5	17.6	⊥	23
9R(8)	9.342	71	CH ₃ OH	77.3	16.1	∥	2.8
9R(8)	9.342	71	CH ₃ OH	86.2	14.4	∥	-
10R(16)	10.274	77	CD ₃ OH	86.4	14.4	∥	6.8
9R(10)	9.329	41	CH ₃ OH	96.5	12.9	∥	33
9P(30)	9.639	65	CH ₃ OD	103.1	12.0	⊥	22
9P(36)	9.695	59	CH ₃ OH	118.8	10.5	⊥	75



波長 9~10 μm 帯の約90本の発振線から
共振器の一端の回折格子で1本だけ選択
(格子: 水平方向、偏光: 鉛直方向)

目標の波長領域
40~120 μm をカバー

遠赤外分子レーザー、運転の手順

1. 1次光源 CO₂ レーザー

- ・波長 9~10 μm帯の94本の発振線から1本を選択
(共振器の一端の回折格子を用いて)
- ・共振器長を微調整(半波長 $\lambda_{\text{CO}_2}/2$ の整数倍に)

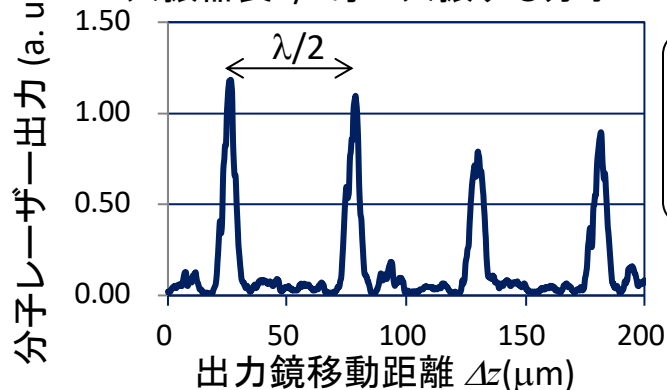
CO₂レーザーの発振線: CO₂分子の振動・回転準位間の遷移による。

発振線名の意味: 例えば、9R(34)の場合、
「9 μm帯で、CO₂分子の角運動量が 35→34に転移」

2. 分子レーザー

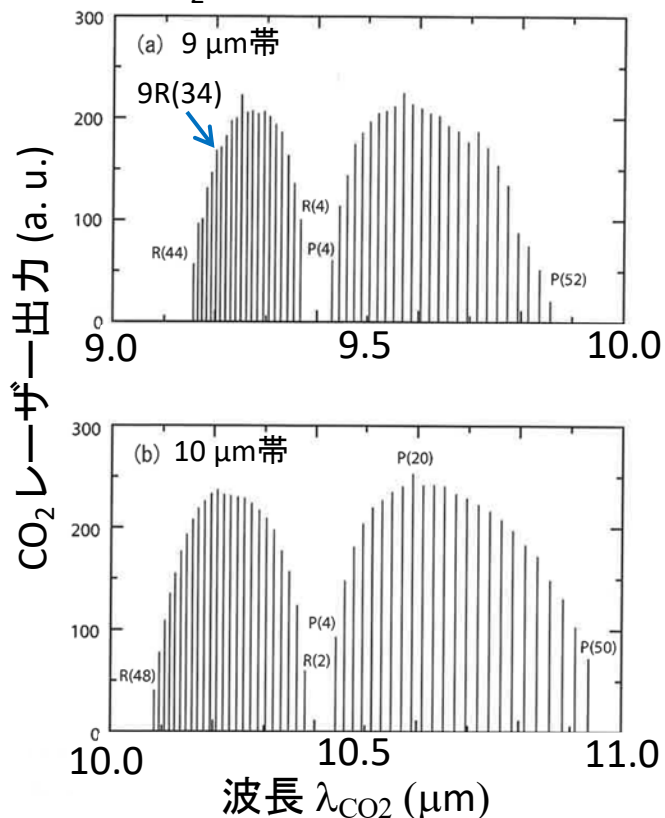
- ・分子の種類(CH₃OH, CH₃OD, CD₃OH, ...)を1つ選択
- ・共振器長を微調整(半波長 $\lambda/2$ の整数倍に)

共振器長 $\lambda/2$ 毎に共振する分子レーザー



Example:
CO₂: 9P(30)
分子: CH₃OD
 $\lambda=103.1 \mu\text{m} (\perp)$

CO₂レーザーの発振線



分子の蒸気
(真空引きした共振器内へ)

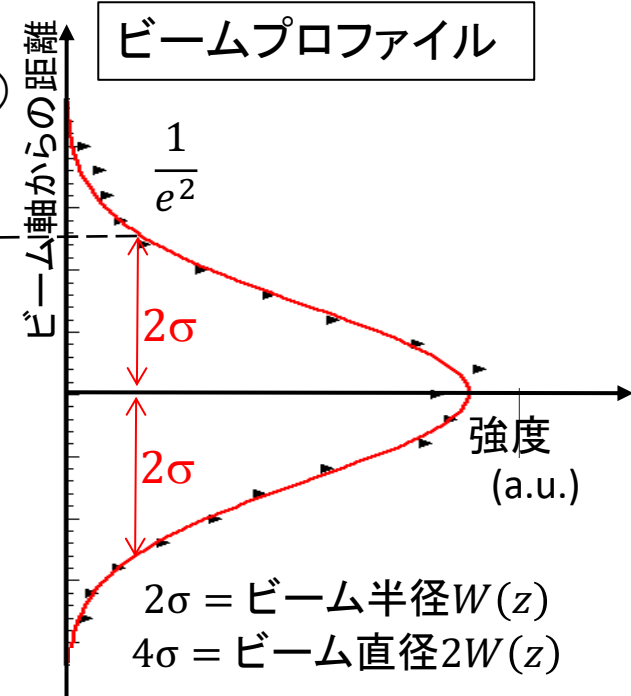
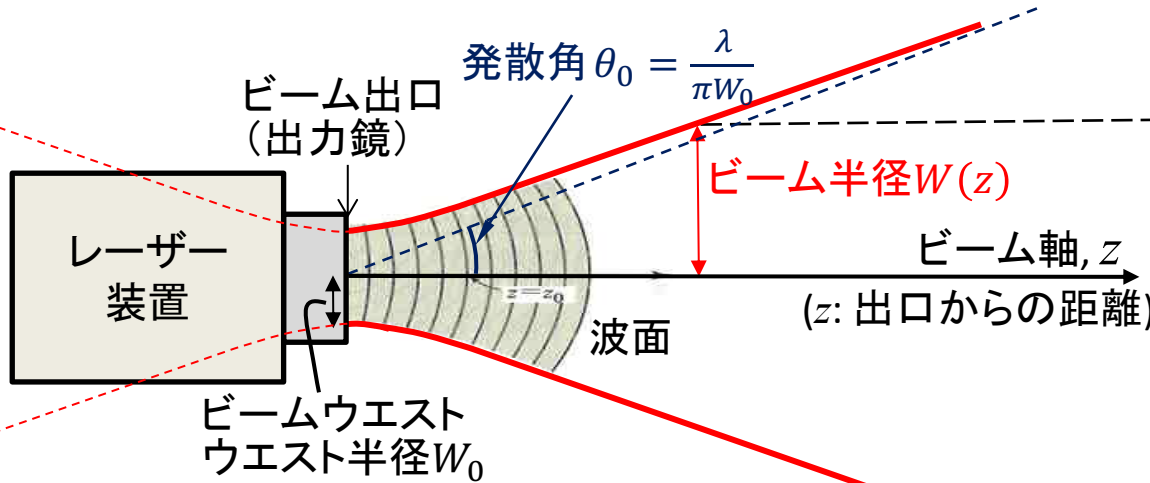


分子
(メチルアルコール系)

レーザービーム (= ガウスビーム) の一般論

マクスウェル方程式の近軸近似解

(1つの軸付近に強度が集中している電磁波の解: レーザービーム)



ガウスビーム理論より:

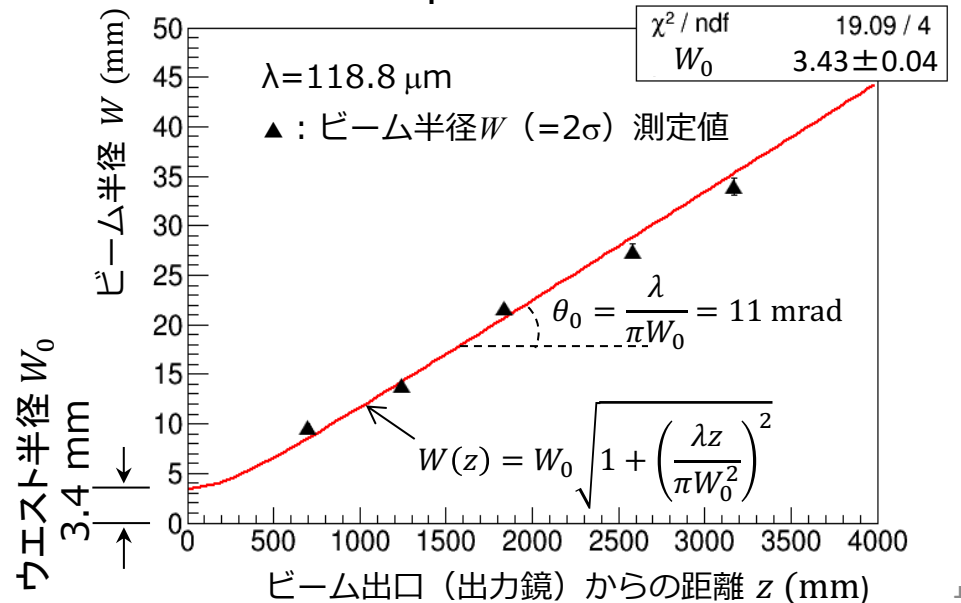
$$\text{ビーム半径 } W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2}$$

$$\text{発散角 } \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (\lambda: \text{波長})$$

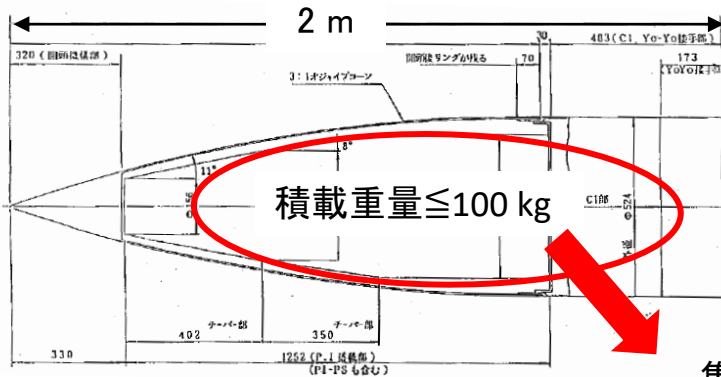
遠赤外分子レーザーでプロファイル測定

[CO_2 : 9P(36), 分子: CH_3OH]
[$\lambda = 118.8 \mu\text{m}$ (\perp)]

結果: ウェスト半径 $W_0 = 3.4 \text{ mm}$
発散角 $\theta_0 = 11 \text{ mrad}$

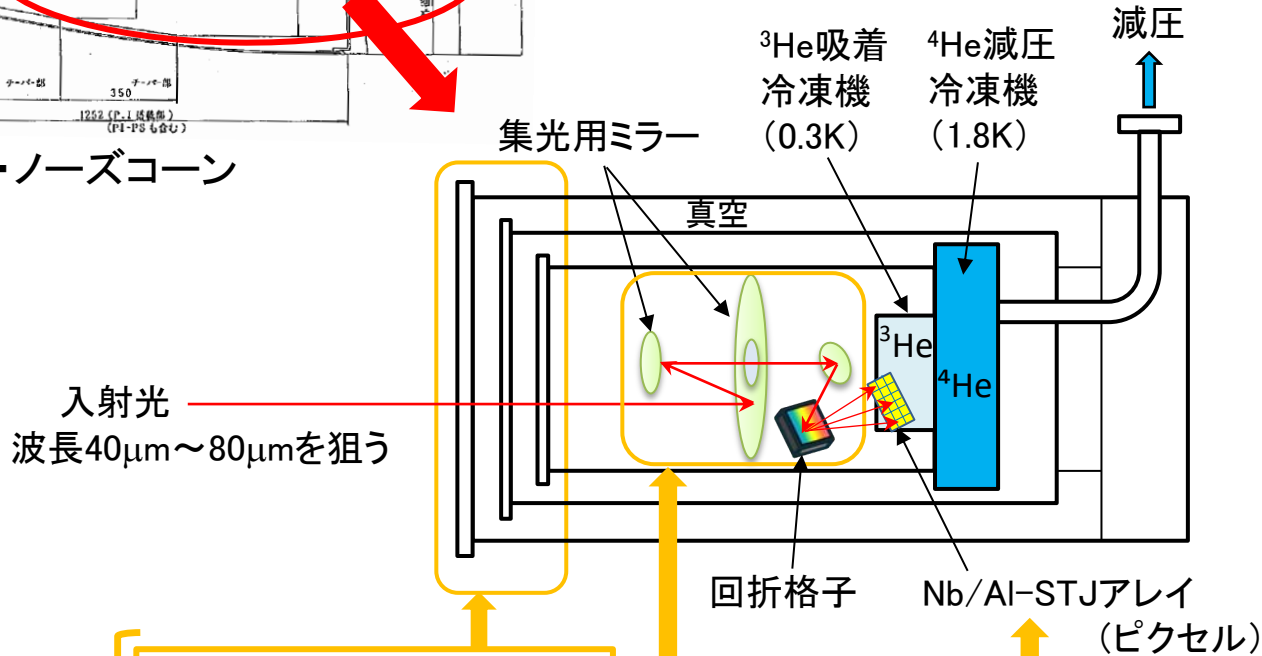


ロケットによる観測に向けて、この遠赤外光源で取り組んでいる課題



ロケット・ノーズコーン

ロケット搭載型
ニュートリノ崩壊光子検出器 (望遠鏡)

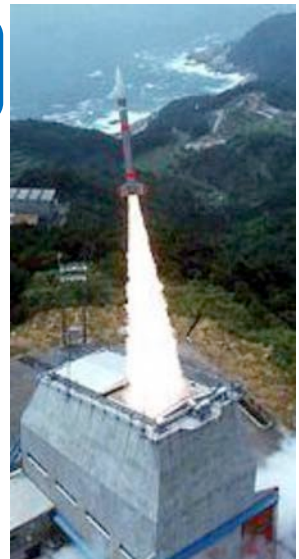


課題

光の入射窓材の選択

集光・分光用光学系のテスト

STJ検出器の改良・テスト



JAXA観測用ロケットS-520



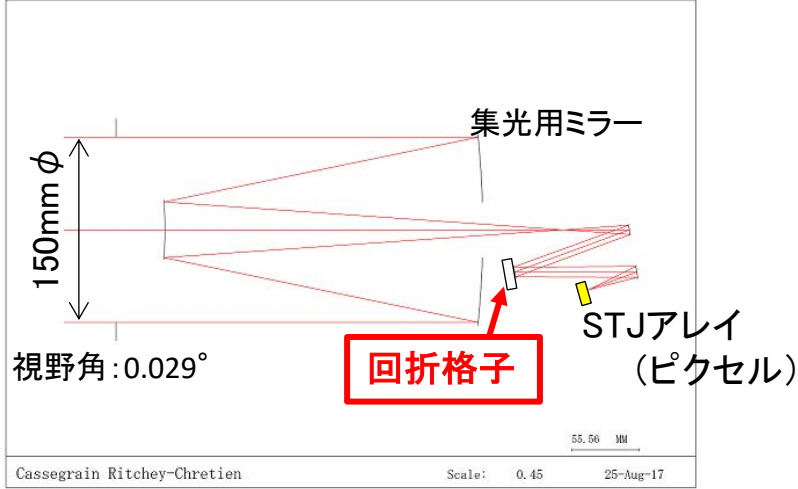
縦、横、斜めに設置可。

目標：課題を解決して、検出器打ち上げへ

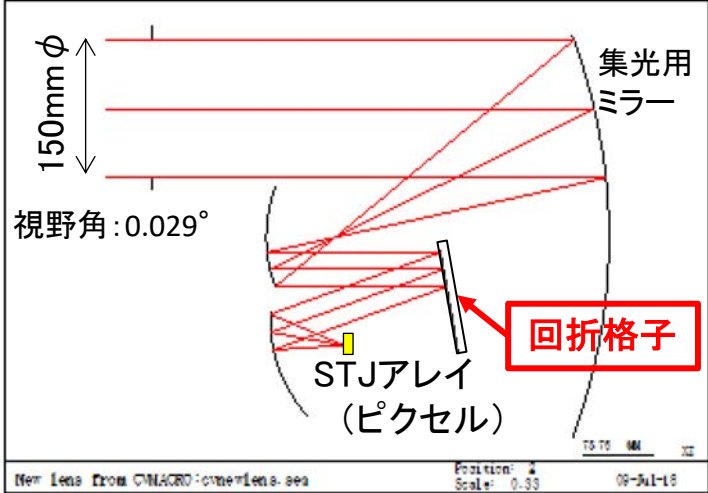
ニュートリノ崩壊光子検出器(望遠鏡)中の集光・分光用光学系(案)

光学設計・評価用プログラムCODE Vによるシミュレーション
by 筑波大 飯田、関学大 松浦研

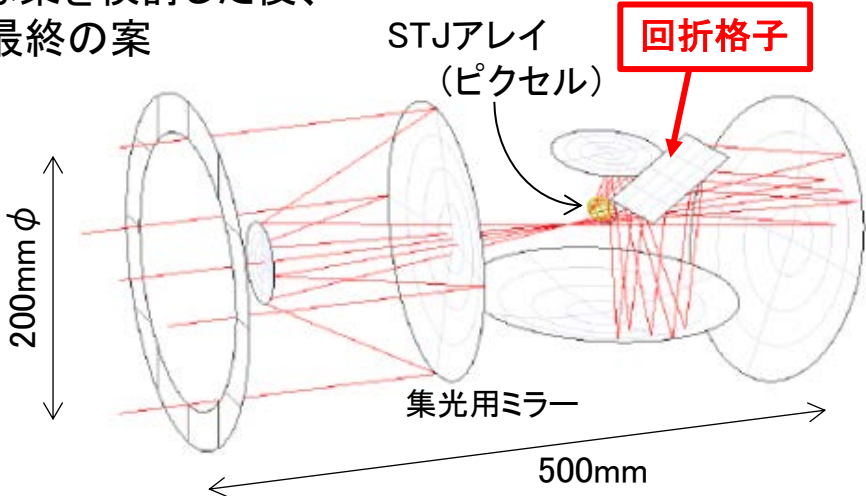
Cassegrain Ritchy Chretien型望遠鏡案



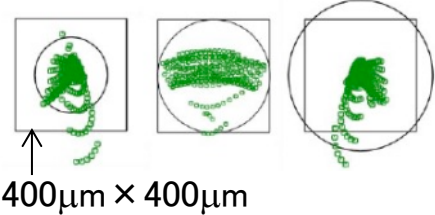
Offset型望遠鏡案



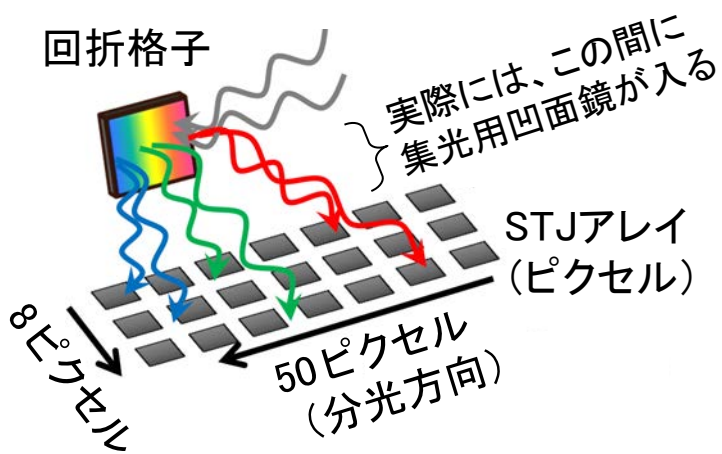
色々な案を検討した後、
ほぼ最終の案



STJのピクセル上での集光の様子
波長 $\lambda = 40\mu\text{m}$ $60\mu\text{m}$ $80\mu\text{m}$

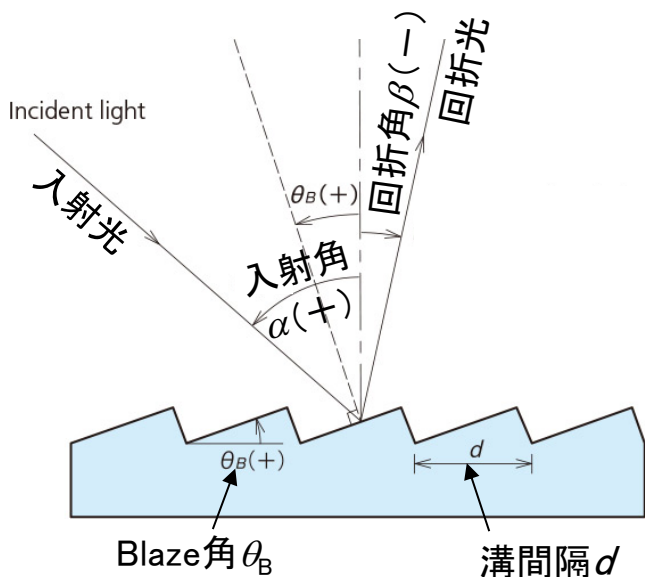


この光学系に要求されるスペック



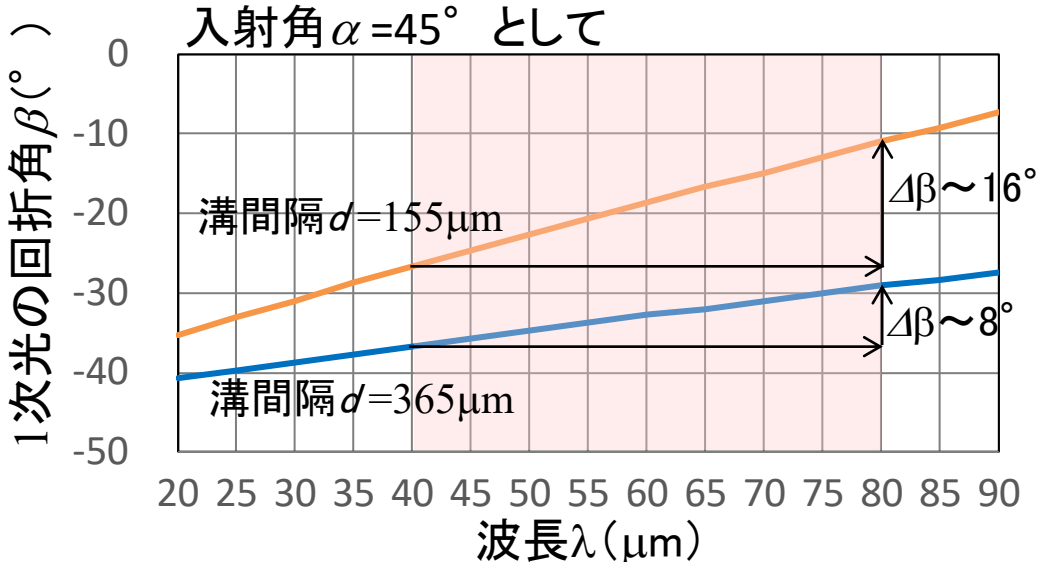
- 波長範囲: 40 μm ~ 80 μmを50ピクセルで分光 (波長分解能 0.8μm、2%以下)
- 1ピクセルのサイズ: 400 μm以下
- 回折角βの範囲Δβ: 8° 程度 (16° は超えない)

ブレード回折格子

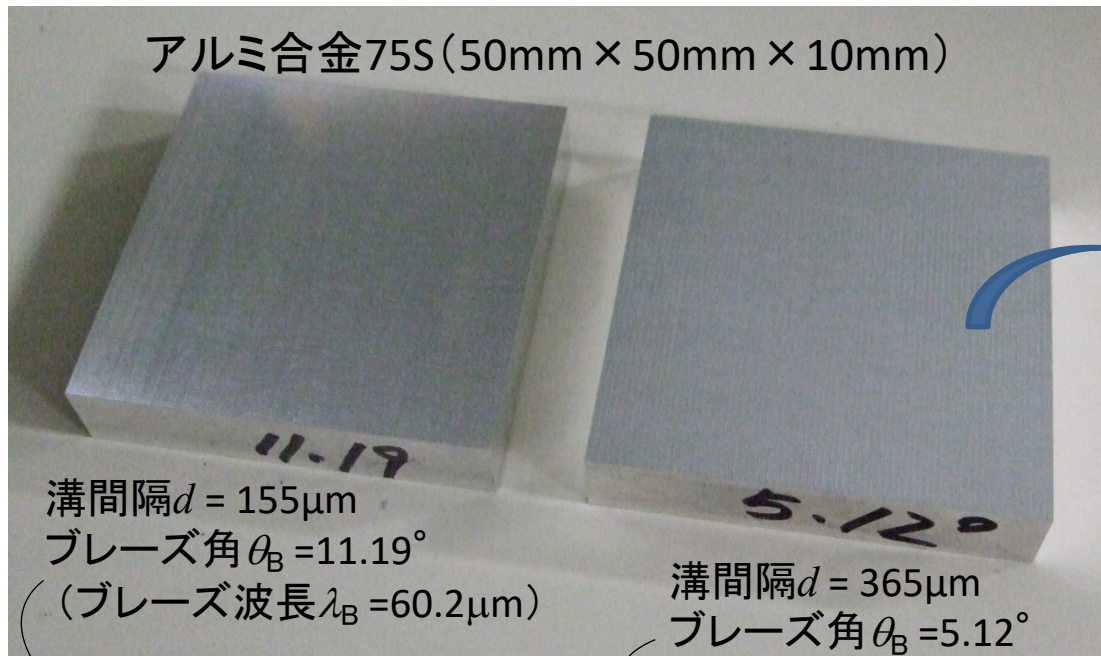


$$n\text{次の回折角}\beta = \arcsin\left(\frac{n\lambda - d \sin \alpha}{d}\right)$$

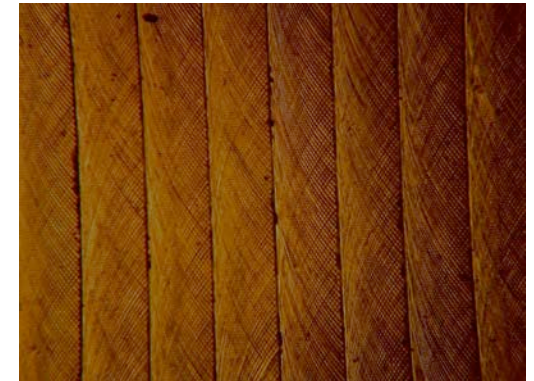
(波長λ、入射角α)



COBAND実験用ブレード回折格子 (Designed by 筑波大学 飯田、高橋)

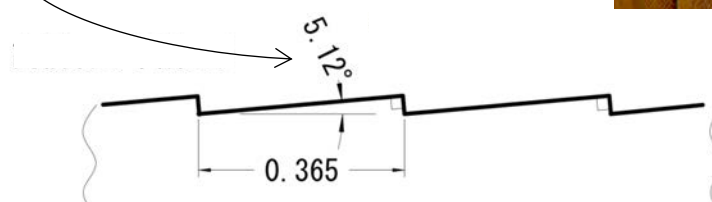
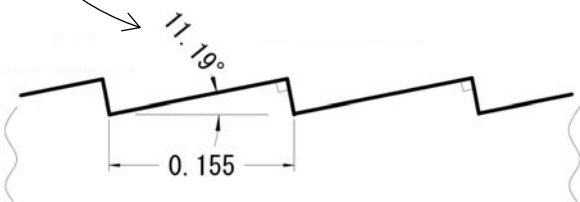


顕微鏡写真



溝間隔 $d = 155\mu\text{m}$
ブレード角 $\theta_B = 11.19^\circ$
(ブレード波長 $\lambda_B = 60.2\mu\text{m}$)

溝間隔 $d = 365\mu\text{m}$
ブレード角 $\theta_B = 5.12^\circ$
(ブレード波長 $\lambda_B = 65.1\mu\text{m}$)



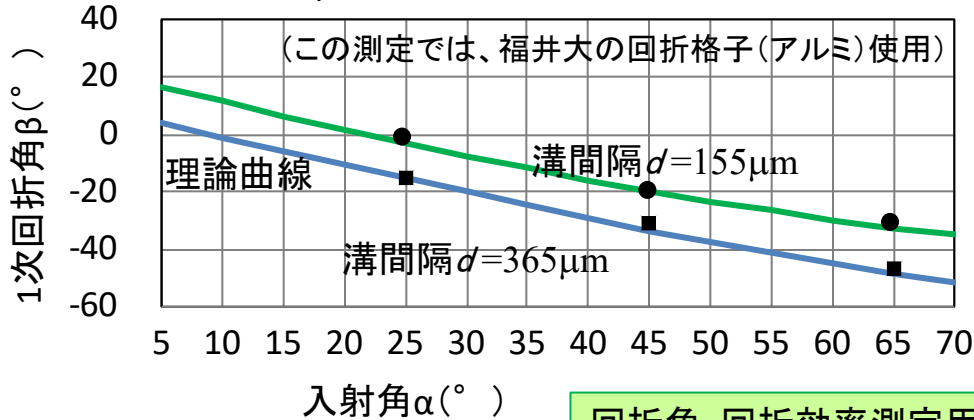
ブレード角 θ_B は、回折角 β には直接関係しないが、回折効率に関係してくる。

波長 $40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ の範囲で、1次回折光が強く、他の回折光 (0次、2次...) が弱くなるよう設計
(回折格子設計・解析用シミュレーター Diffract MOD 使用)

写真は福井大学の先端科学技術育成センター(工場)での試作品。
性能評価実験では、筑波大の飯田さんが専門業者に依頼して、作製してもらった同型の回折格子を使用。

回折格子の回折角、回折効率の測定

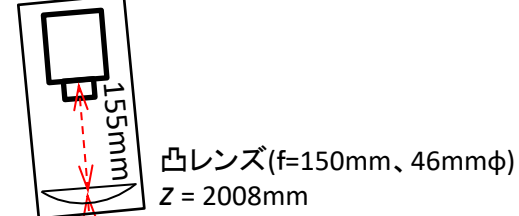
波長 λ : 57.2 μm (偏光: 回折格子の溝に対して \perp , TM)



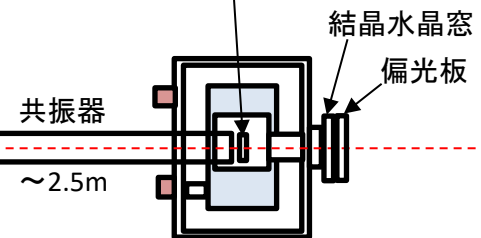
- ・回折光の強度
 - ・入射角 α
 - ・回折角 β
- を測定

回折角・回折効率測定用光学系
回折格子に平行ビームを照射したい。
(できればビーム径も小さくしたいが...)

焦点検出器(受光面9mm ϕ)
Z = 2163mm
ビーム直径: 1~2mm程度のはず

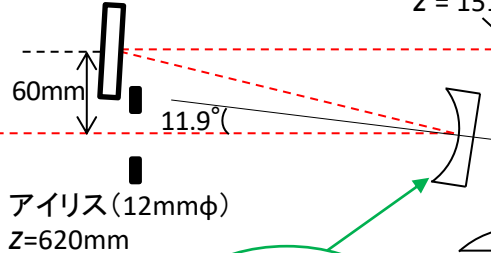


出力ミラー(=ビーム出口)
Z = 0mm
ビーム直径 6.8mm



平面鏡(金コーティング)
Z = 1135mm

ハーフミラー
(40 μm 厚、マイラー)
Z = 1515mm

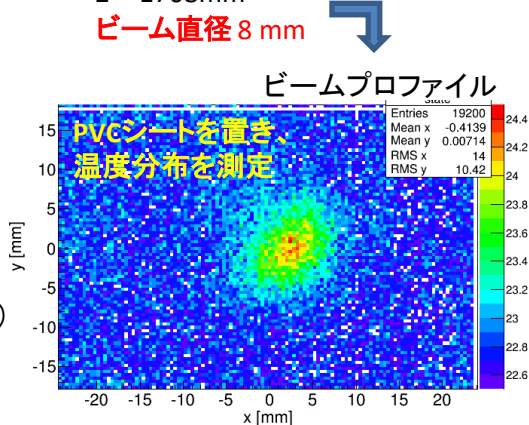


凹面鏡
(f = 750mm)
Z = 845mm
ビーム直径 11 mm

入射角 α
300mm
回折格子
(溝: 鉛直(y)方向)
Z = 1708mm
ビーム直径 8 mm

凸レンズ
(f=150mm、46mm ϕ)
Z = 1890mm
ビーム直径 8 mm

ビーム強度モニター
焦点検出器(受光面9mm ϕ)
Z = 2041mm
ビーム直径 1.4 mm



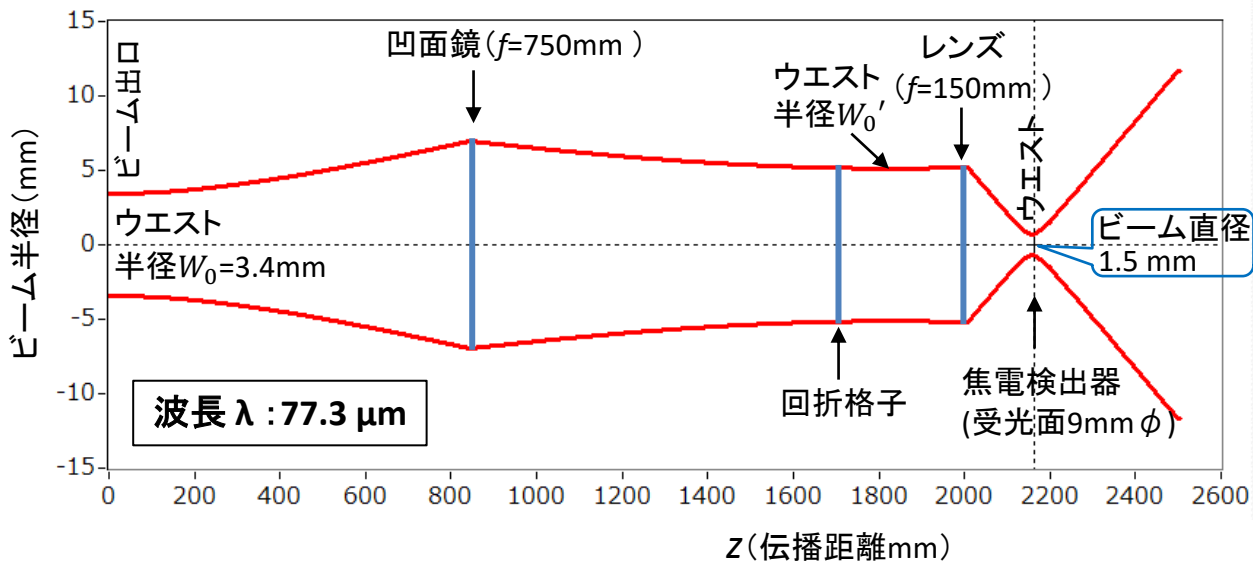
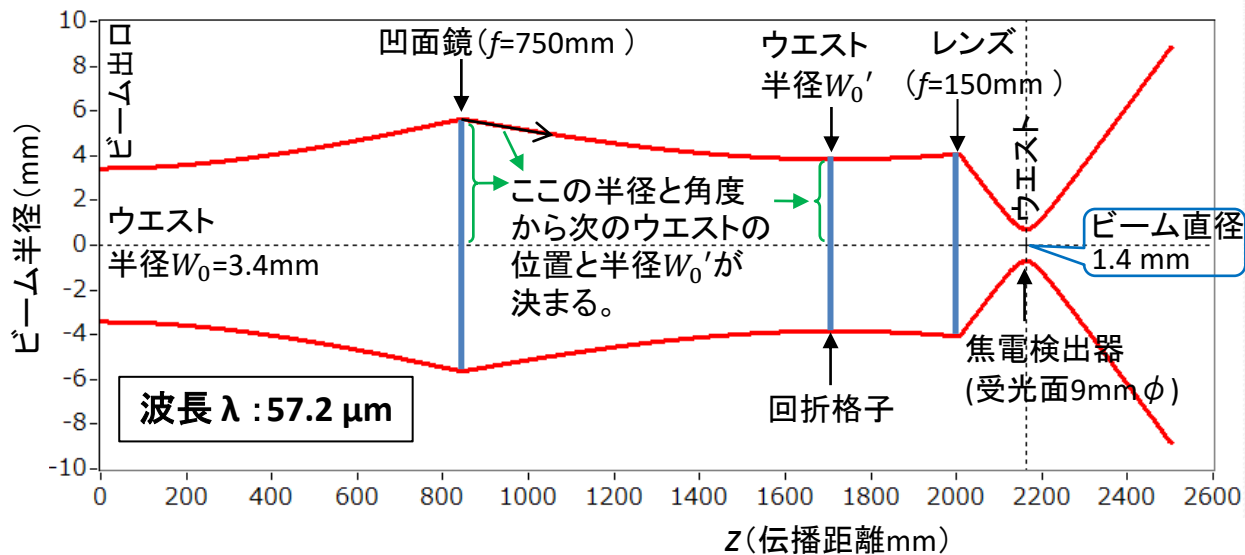
x(水平)
y(鉛直)
z(水平、ビーム方向)

Z: ビーム出口から光軸に沿った距離
赤字で記したビーム径は波長57.2 μm でのシミュレーションの結果

回折格子の回折角、回折効率の測定用光学系の設計

凹面鏡を用いて回折格子付近でほぼ平行ビームを実現 (ガウスビームは完全な平行ビームにはできない。)

光線行列 (ABCD行列) を用いたシミュレーション



$$\begin{pmatrix} h_2 \\ m_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ m_1 \end{pmatrix}$$

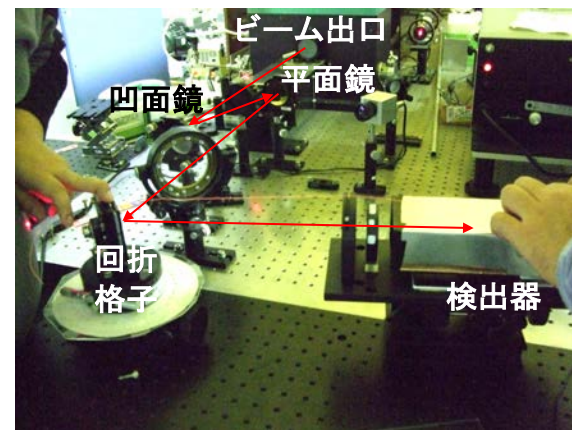
h : ビーム軸からの変位
 m : 傾き

例:
 自由空間中の直線ビーム (距離 d)

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

焦点距離 f のレンズや球面鏡

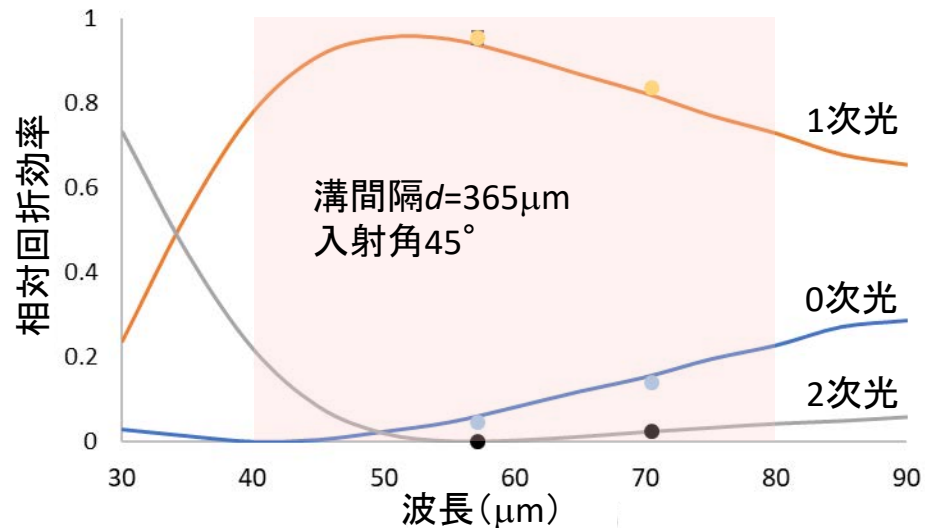
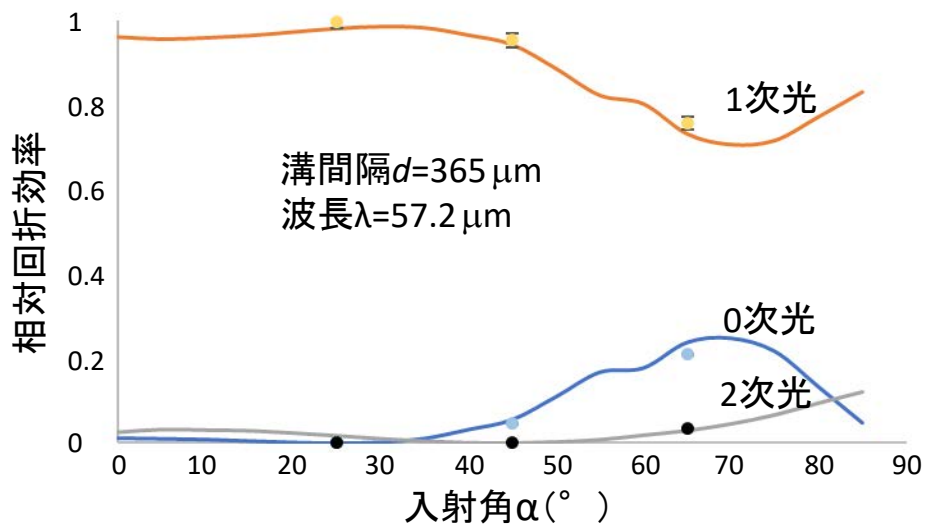
$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$$



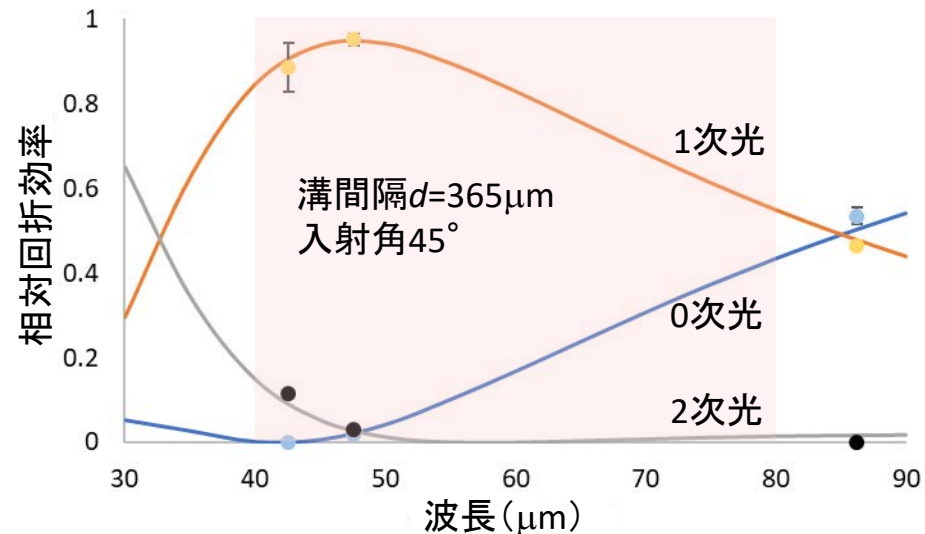
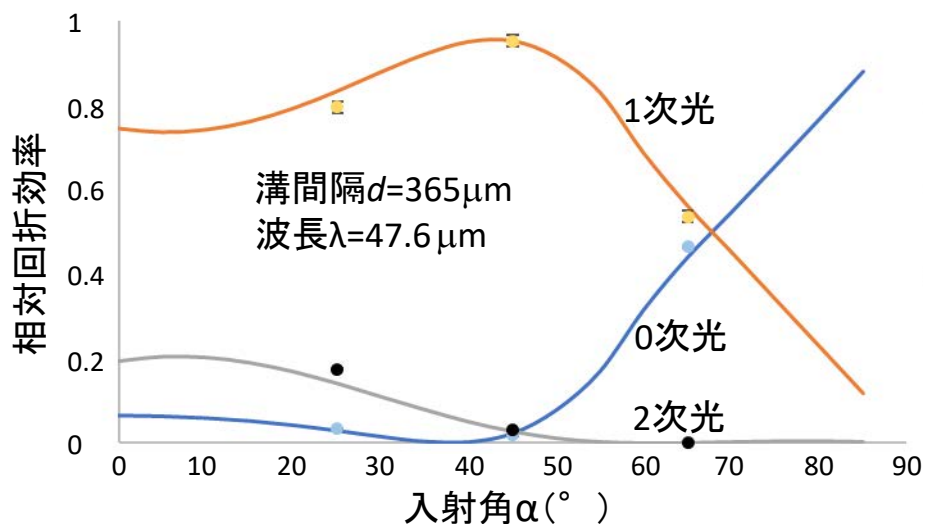
回折効率の測定

筑波大の回折格子(アルミ)で、0次光、1次光、2次光の強度の内訳(相対回折効率)を測定、Diffract MODによるシミュレーション(曲線)と比較(筑波大・前川)

偏光: 回折格子の溝に対して⊥、TM



偏光: 回折格子の溝に対して//、TE



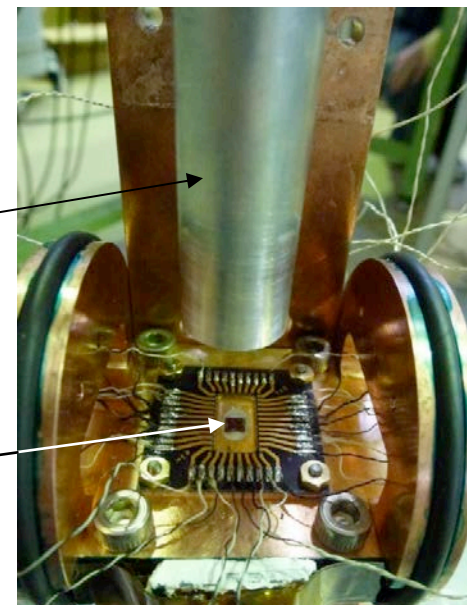
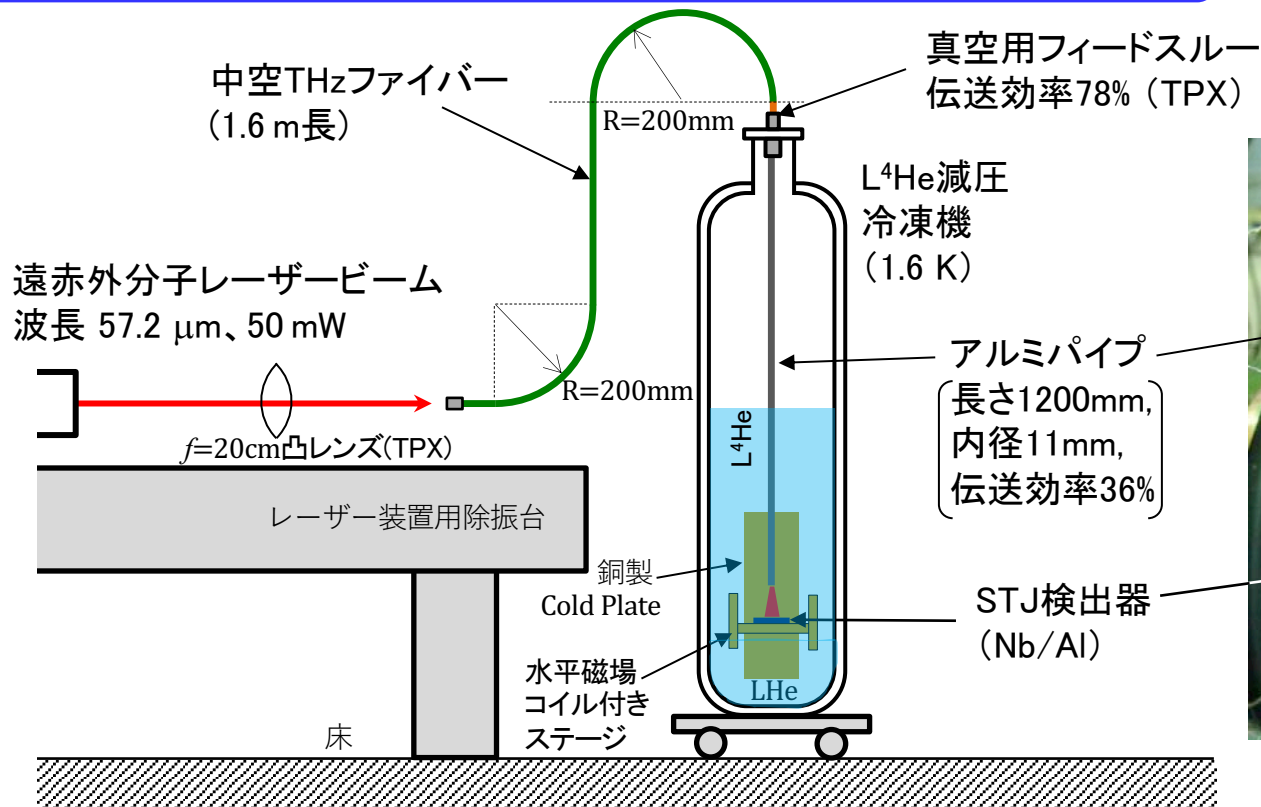
Diffract MODに頼ってよさそうだ!

今後の予定

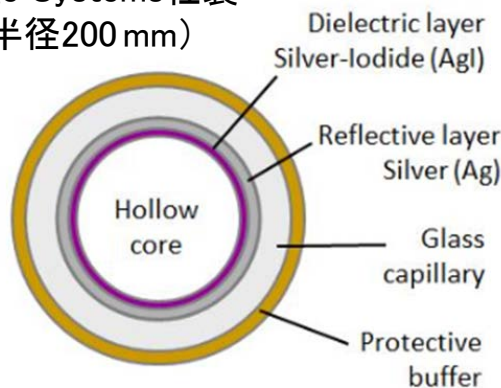
- ニュートリノ崩壊光子検出器(望遠鏡)を完成させ、ロケットで宇宙へ
 - ・まずは、開発の進んでいるNb/Al-STJアレイ&回折格子併用で、3分間観測。
 - ・ ν_3 の寿命 $\tau = 10^{13} \sim 10^{14}$ 年の領域を探る。
 - ・JAXAの規定:
 - ロケット打ち上げ申請は随時受け付け。
 - しかし、打ち上げは、検出器が完成してから2年後。
- 将来的には人工衛星に搭載して長期間連続観測
 - ・Hf-STJを完成させ、回折格子なしで視野角を広げて観測
 - ・ ν_3 の寿命 $\tau = 10^{14} \sim 10^{17}$ 年の領域を探る。

これ以下、時間の都合で省略したスライド。

遠赤外分子レーザーによるSTJ検出器の性能評価実験



中空THzファイバー、Opto Knowledge Systems社製 (長さ1.6m, 内径0.75mm, 最小曲げ半径200mm)

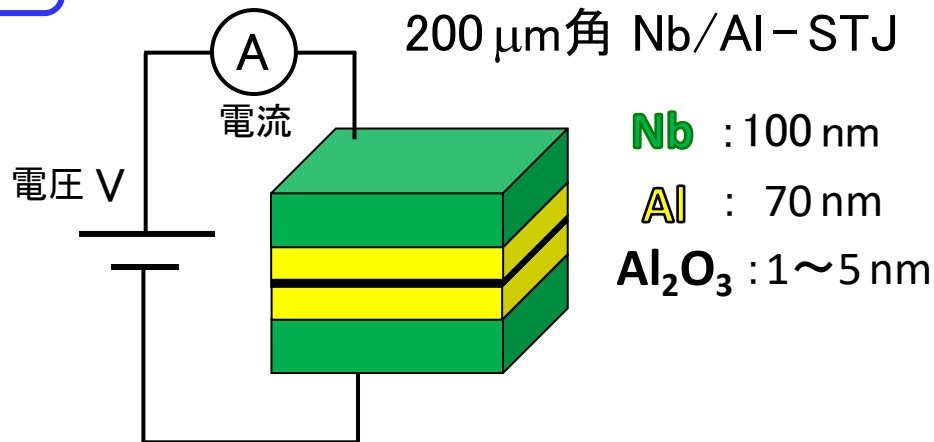
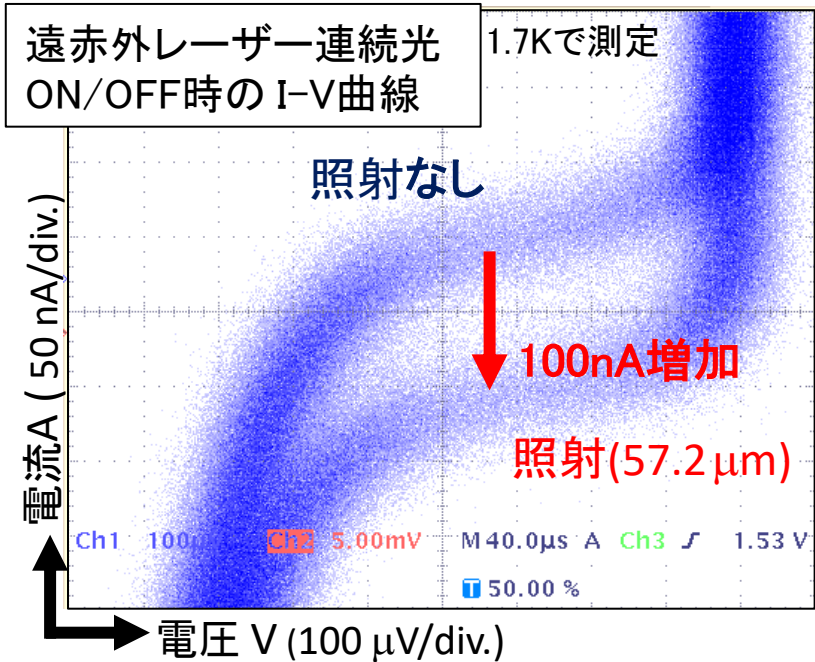


Flexibleだが、

- ①レーザービームを内径0.75mmまで絞りきれず(～2.5mmφが限度)。入射効率 $\sim(0.75/2.5)^2 = 9\%$
- ②ファイバーに入射したビームの伝送効率 $\sim 1.6\%$ (実測)

結果、入射効率×伝送効率=0.14%

Nb/Al-STJの性能評価実験結果



	Nb	Al
転移温度 T_c (K)	9.23	1.20
エネルギーギャップ Δ (meV)	1.550	0.172

- 照射パワー: $\sim 8 \text{ nW}/200 \mu\text{m角}$
(波長 $57.2 \mu\text{m}$ 、 $E_\gamma = 22 \text{ meV}$ の光子 2.4×10^{12} 個/s に相当)
 - 予想される電流変化: $\sim 30 \mu\text{A}$
(検出効率: 100%として)
 - 測定された電流変化: 100 nA
- ↓
- 検出効率: $100 \text{ nA}/30 \mu\text{m} = 0.3\%$

この光子1個がSTJ内で生成する電子数

$$\frac{E_\gamma}{1.7\Delta} = \frac{22 \text{ meV}}{1.7 \times 0.172 \text{ meV}} = 75 \text{ 個}$$

(エネルギー 1.7Δ あたり電子を1個生成)

低い！ STJ表面での反射が大きいのか？

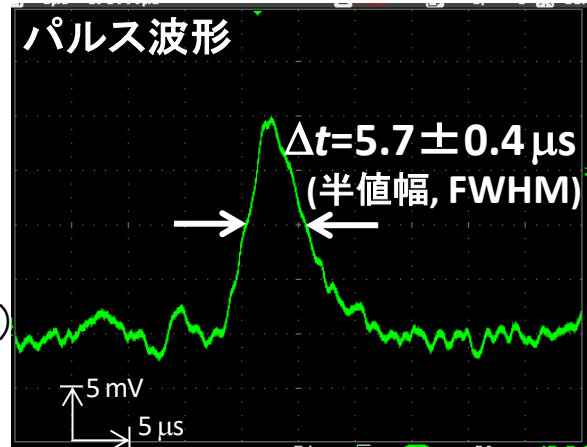
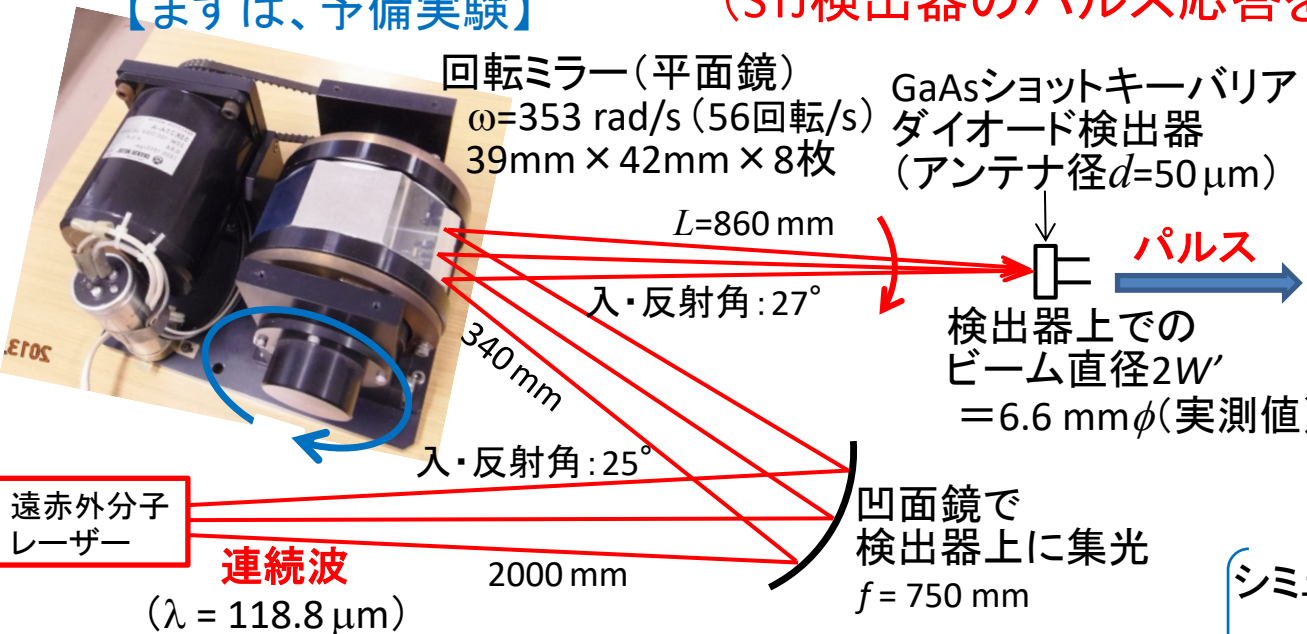
検出効率の向上を図るべし → STJの表面に反射防止膜

ノイズも低減させるべし → SOI-STJ (STJとアンプを一体化)

改良型STJのテストに向けて: 分子レーザーの連続波をパルス波に変換

【まずは、予備実験】

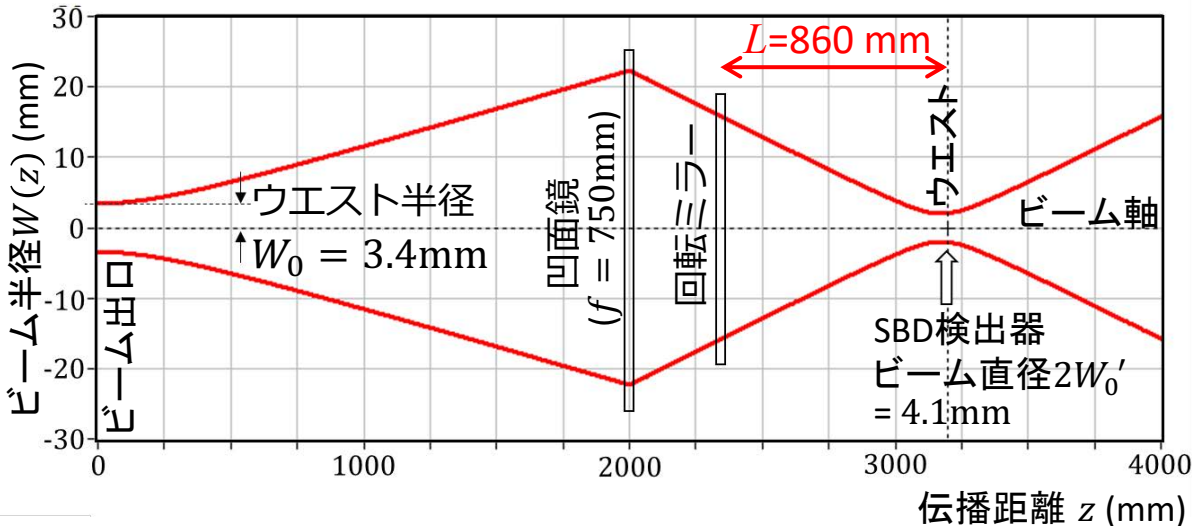
(STJ検出器のパルス応答を調べる必要があるため)



シミュレーションでは

$$\Delta t (\text{FWHM}) = \frac{2.35}{4} \times \frac{2W_0' + d}{2\omega L \cos \theta} = 4.5 \mu\text{s}$$

ガウスビームに対する光線行列によるシミュレーション



STJ検出器の応答速度 (可視光ピコ秒パルスレーザーで測定)

$T \sim 300 \text{ mK}$

3.2 μs FWHM

我々のパルス光源の時間幅を、これよりも短くしたい

パルス時間幅を短くするための光学系の設計

目標: パルス時間幅 < STJ検出器の応答速度

方針:

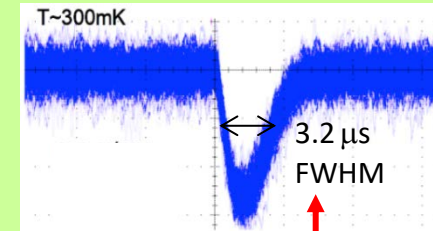
- 回転ミラーを用いる場合は、現有品を用いる。



回転ミラー(中部大 岡島先生提供)
平面鏡、39mm × 42mm × 8枚
 $\omega = 353 \text{ rad/s}$ (56回転/s)

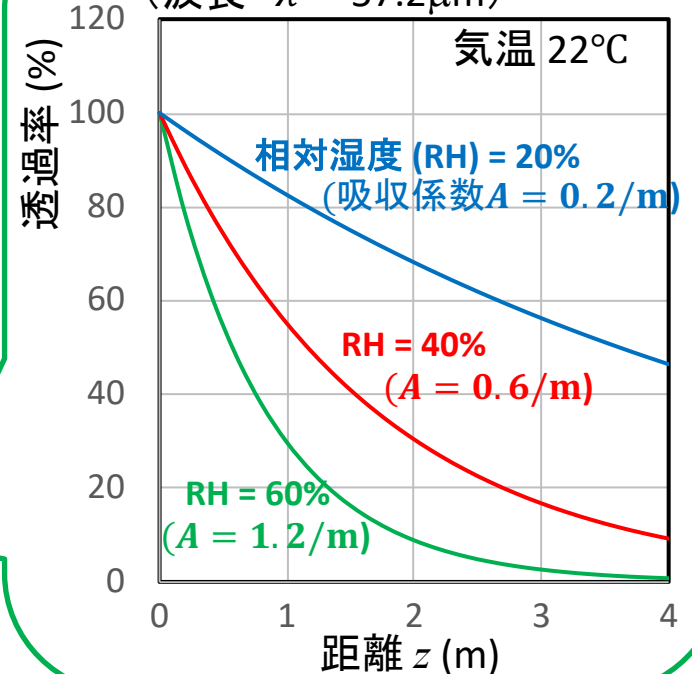
- 回転ミラー以外に、オプティカル・チョッパーなども試してみる。
- 光学部品(凹面鏡、凸面鏡etc.)は市販品から選択。
- レーザービームの空気中の伝播距離を4 m以内に抑える。
(空気中の水分による吸収の影響を抑えるため)

STJ検出器の応答速度
(可視光ピコ秒パルスレーザーで測定)



我々のパルス光源の時間幅を、
これよりも短くしたい

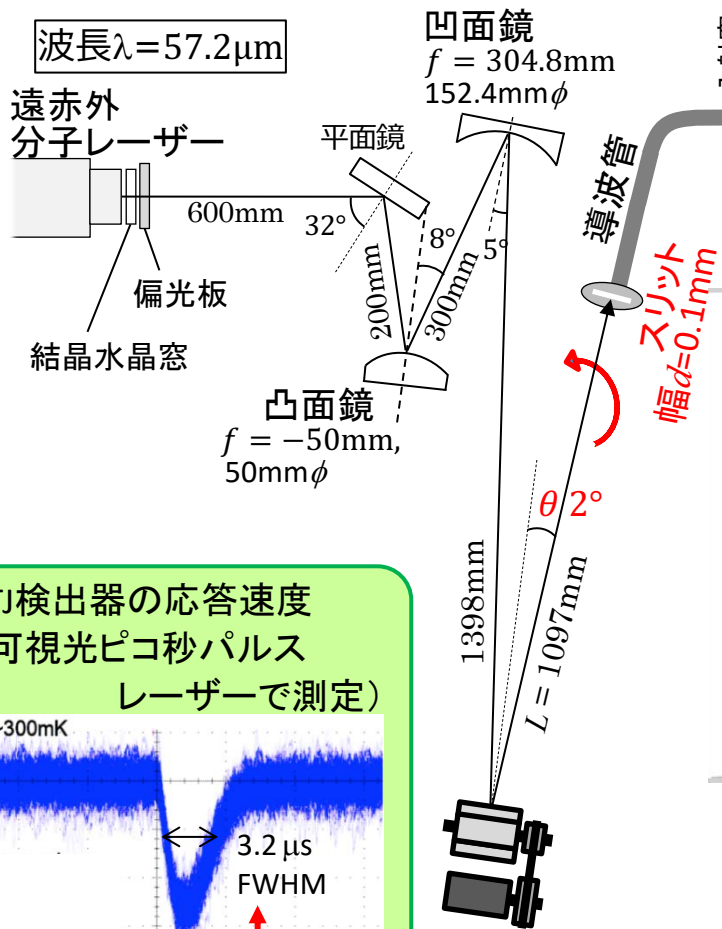
空気中の水分によるビームの減衰
(波長 $\lambda = 57.2 \mu\text{m}$)



パルス時間幅を短くするための光学系の設計・案(シミュレーション)

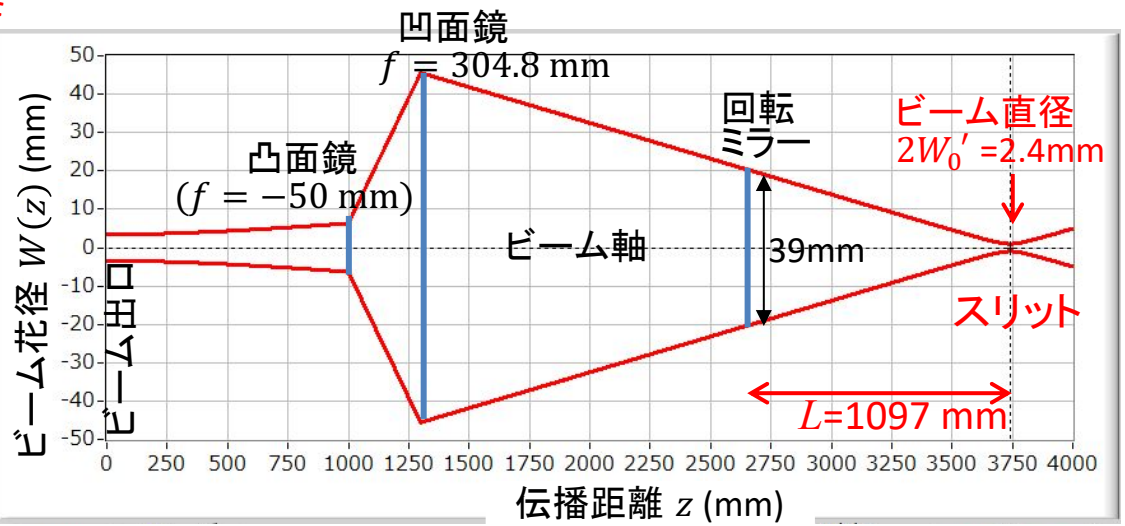
方針: 下図の光学系で、(注: STJ用冷凍機の入口にスリットを置き、そこでパルス化する)

- スリット位置でのビーム径を小さく (←ビームを一旦広げてから急激に集光)
- 回転ミラーからスリットまでの距離 L を長く



新型SOI-STJ
(STJとアンプを一体化し、ノイズ低減)

反射防止膜も試す。
他、Hf-STJなども
(高エネルギー分解能)



STJ検出器の応答速度
(可視光ピコ秒パルス
レーザーで測定)

我々のパルス光源の時間幅
を、これよりも短くしたい

パルス時間半値幅 (シミュレーション)

$$\Delta t \text{ (FWHM)} = \frac{2.35}{4} \times \frac{2W_0' + d}{2\omega L \cos \theta} = 1.9 \mu\text{s}$$

(幅 $d = 0.1\text{mm}$ のスリットを使った場合)

回転ミラー
39mm × 42mm
 $\omega = 353 \text{ rad/s}$ (56回転/s)