

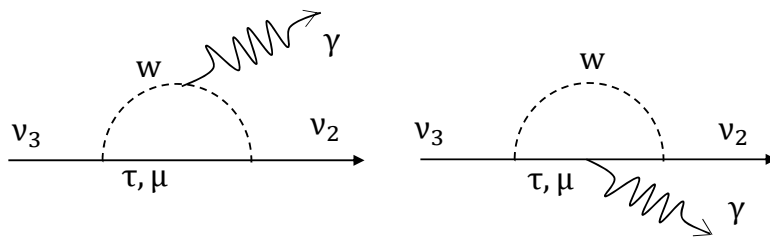
# STJ較正用遠赤外光源開発

福井大工 浅野千紗、廣瀬龍太、加藤圭騎、中村昂弘、吉田拓生、  
福井大遠赤セ 小川勇、中部大工 岡島茂樹、中山和也

2016年度 数理物質融合科学センター 第2回 CIRFSEワークショップ 素粒子構造部門  
2016年 1月19日(火)

## ニュートリノ崩壊現象

Feynman diagrams for the neutrino radiative decay



$m_1$ (meV)	$m_2$ (meV)	$m_3$ (meV)	$E_\gamma$ (meV)	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
0	8.7	50	24	52
50	51	71	17	73
194	194	200	6.1	204

$$\Sigma m_\nu < 0.59\text{eV}$$

$$m_3^2 - m_2^2 = 2.43 \times 10^{-3}\text{eV}^2$$

$$m_2^2 - m_1^2 = 7.59 \times 10^{-5}\text{eV}^2$$

- ニュートリノが質量を持つ  
→ 軽いニュートリノに崩壊できる

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

- 崩壊光子のエネルギー

$$E_\gamma = 6.1 \sim 24\text{meV} (\lambda = 52 \sim 204\mu\text{m})$$

→ 遠赤外領域の光

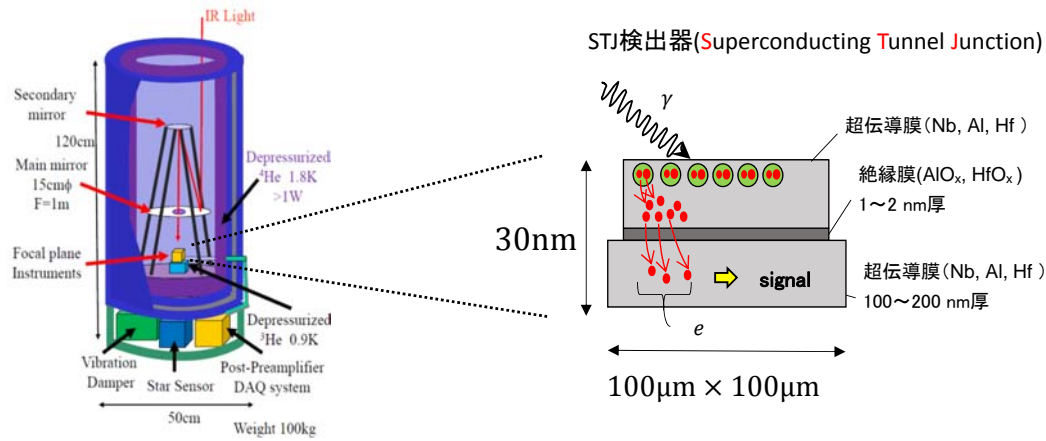
- ニュートリノの寿命

$$T_{SM} \approx 10^{43}\text{year} \quad T_{LRSM} \approx 10^{17}\text{year}$$

→ 宇宙背景ニュートリノ(CνB)が適当

※ニュートリノフロンティア2016で田中さん(Kavli IPMU)のスライドより

# STJ 検出器

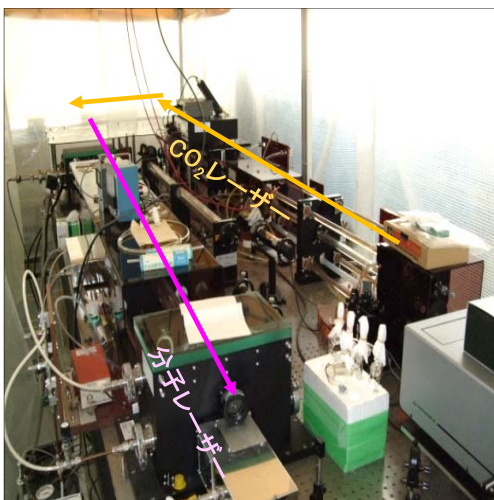


材質	エネルギーギャップΔ	エネルギー分解能@24meV
Nb	1.55meV	14.8%
Al	172μeV	4.9%
Hf	21μeV	1.7%

- 超電導体2枚で絶縁膜を挟んだサンドイッチ構造
- 遠赤外領域の光子のエネルギー測定に有望

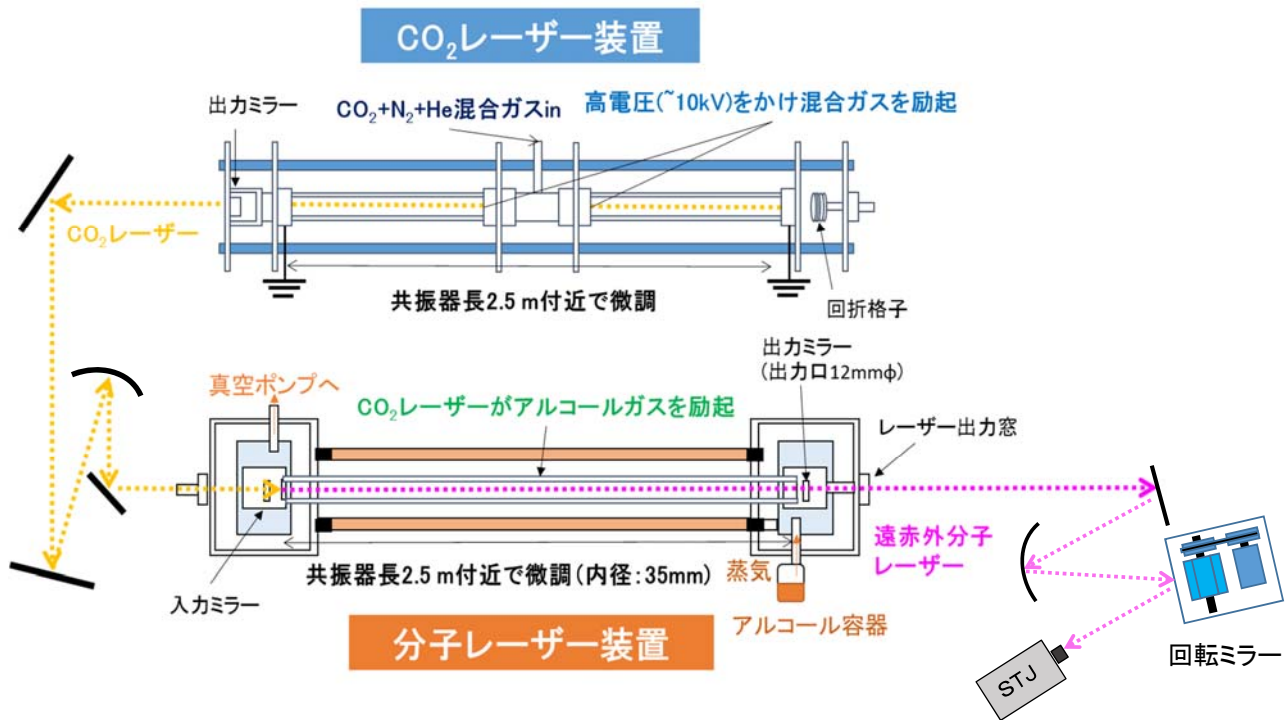
## STJ検出器の性能評価に使用する光源

福井大学 遠赤外線領域開発センター  
遠赤外分子レーザーシステム  
中部大学 岡島研開発

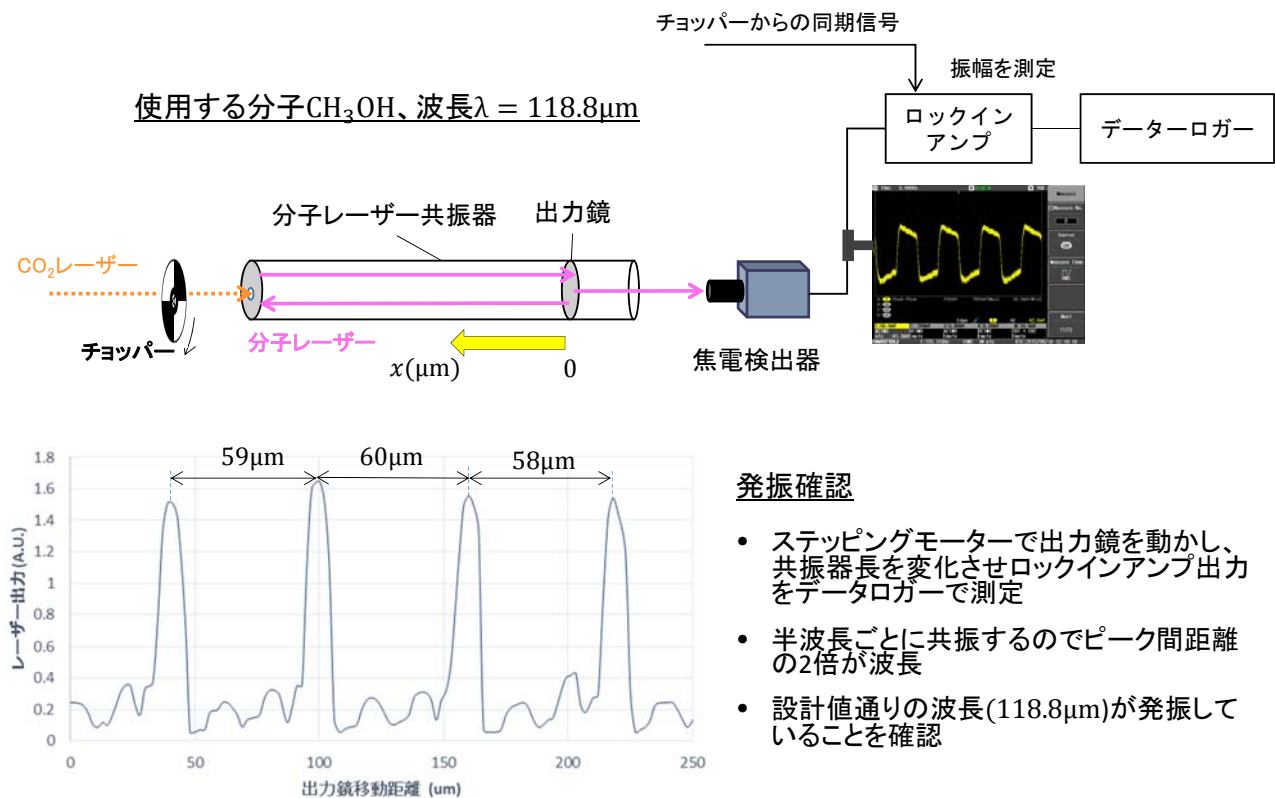


- STJ検出器の性能評価には、ニュートリノ崩壊光子と同程度の波長( $\lambda = 52 \sim 204 \mu\text{m}$ ,  $E_\gamma = 6.1 \sim 24 \text{ meV}$ )の光源が必要
- アルコールガスをCO<sub>2</sub>レーザーで励起させ、遠赤外領域の連続波を発振
- 発振波長  $\lambda = 40 \sim 500 \mu\text{m}$  ( $E_\gamma = 2.5 \sim 31 \text{ meV}$ )の間の約70本の単色発振線から任意の1本を選択できる

# CO<sub>2</sub>レーザー励起の遠赤外分子レーザーシステム



## 遠赤外分子レーザーの発振テスト



# これまでに確認した発振線

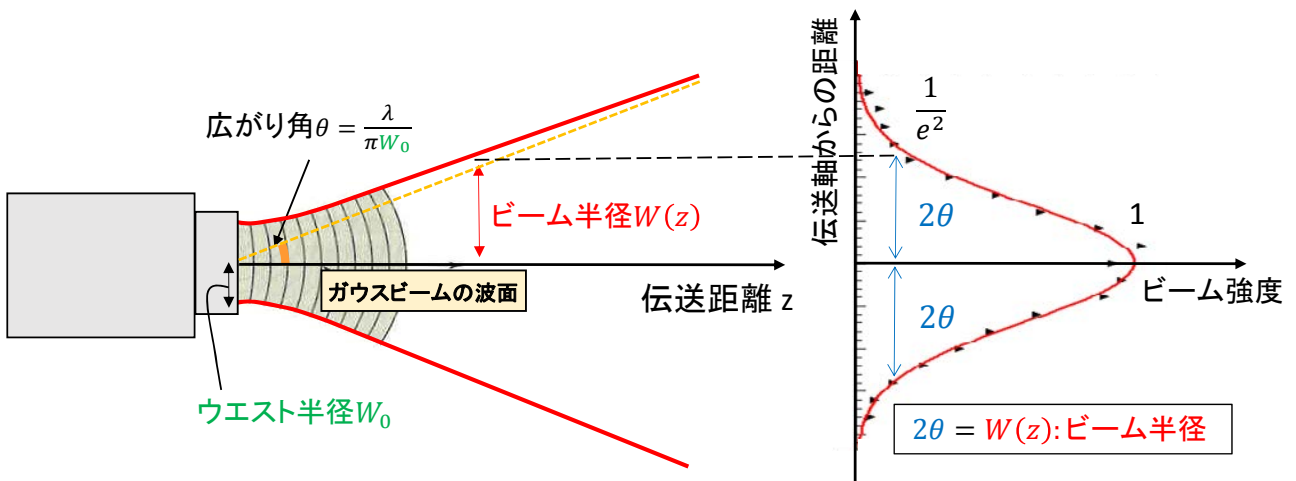
( )内は設計値

使用する分子	分子レーザー波長 (μm)	光子のエネルギー (meV)	出力 (mW)	CO <sub>2</sub> 発振波長 (μm)	CO <sub>2</sub> 出力 (W)
CD <sub>3</sub> OH	43.7	28.4	(6)	10.260	(89)
CD <sub>3</sub> OH	52.9	23.5	4.2	9.201	57 (63)
CH <sub>3</sub> OD	57.2	21.7	27	9.342	72(138)
CD <sub>3</sub> OH	86.4	14.4	(25)	10.274	(99)
CH <sub>3</sub> OH	118.8	10.4	55	9.695	76(148)
CH <sub>3</sub> F <sub>2</sub>	184.3	6.7	(298)	9.210	50(81)
CD <sub>3</sub> OH	253.7	4.9	(28)	10.147	46(85)
CH <sub>3</sub> CN	453.4	2.7	(0.4)	9.294	(107)

Dは2重水素

- ニュートリノ崩壊光子のエネルギー  $\lambda = 52 \sim 204 \mu\text{m}$ ,  $E_\gamma = 6.1 \sim 24 \text{ meV}$  を充分カバーしているため性能評価実験に用いることが出来る

## ガウスビーム



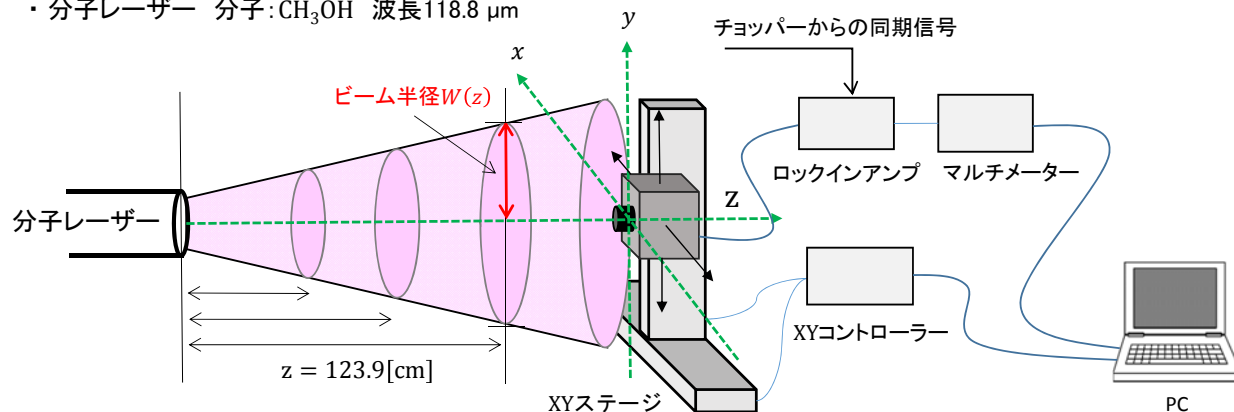
- ガウスビームはエネルギーが伝送軸付近に集中したビーム
- ガウスビームの伝播式

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

# ビームプロファイルの測定

## 測定条件

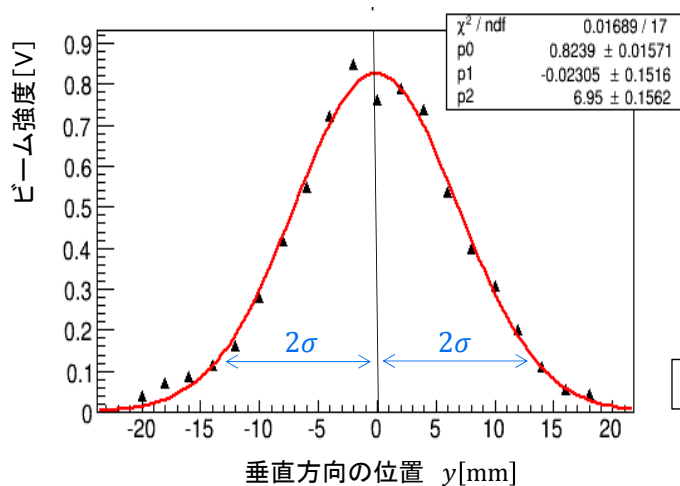
- ・ CO<sub>2</sub>レーザー 発振波長:9.695μm 出力:53.0W
- ・ 分子レーザー 分子:CH<sub>3</sub>OH 波長118.8 μm



1. 分子レーザー出口から距離 $z$ 離れた位置に焦電検出器を設置
2. 焦電検出器をX,Y平面上で2mm刻みで動かし、各位置でのレーザー出力を測定しビーム強度を求める
3. レーザー出口から検出器までの距離 $z$ を変え、各 $z$ でのビーム半径を求める

## ガウスフィット

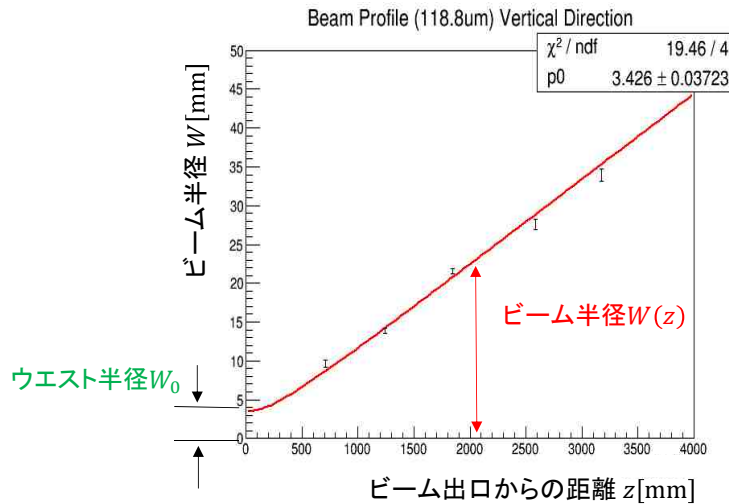
$z = 123.9[\text{cm}]$ での半径方向のビーム強度分布



$2\sigma = W(z)$ : ビーム半径

- グラフをガウスでフィッティングし、標準偏差 $\sigma$ を求める
- $2\sigma =$  ビーム半径  $W(z) = 14\text{mm}$
- $z$  を変化させてビーム半径を求める

# ビームプロファイルの測定



- 各 $z$ で得られたビーム半径の値をガウスビームの伝播公式にフィットさせ、ウエスト半径 $W_0$ を求める。

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

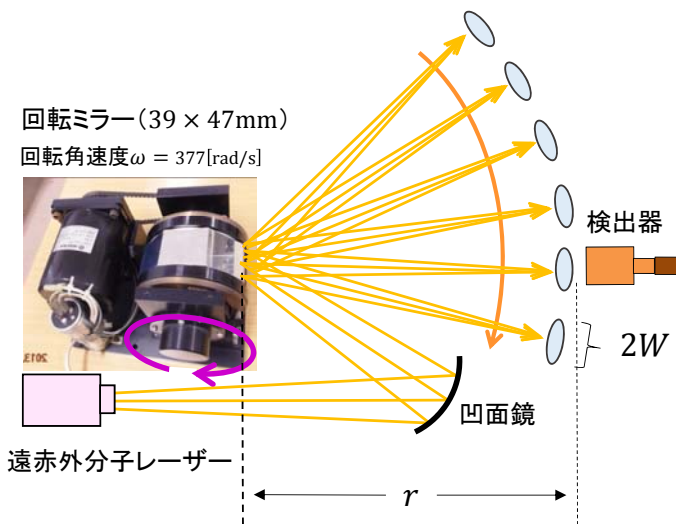
- フィッティングの結果、

$$\text{ウエスト半径 } W_0 = 3.4[\text{mm}]、\text{ 広がり角 } \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \approx 11\text{mrad}$$

# 連続波レーザーのパルス化

- 光信号に対する検出器の応答を評価する必要があるので、遠赤外分子レーザーのパルス化が必要
- 回転ミラーを用いてパルス化(目標時間幅 $1\mu\text{s}$ )

$$\text{パルス幅 } \Delta t (\text{FWHM}) = \frac{2.35}{4} \times \frac{2 \times \text{ビーム半径 } W(z)}{2 \times \text{回転ミラーから検出器の距離 } r \times \text{回転角速度 } \omega}$$

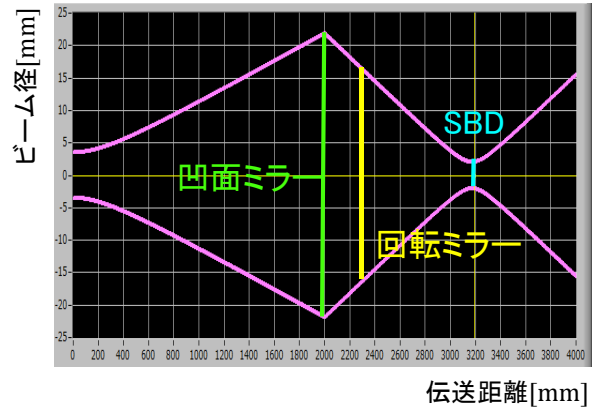
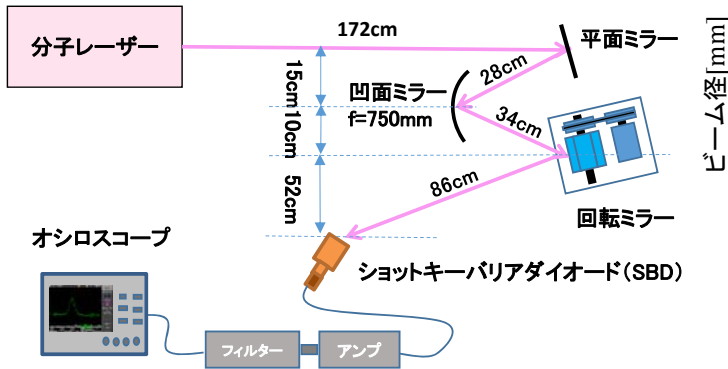


## パルス幅を短くする条件

- ビーム半径 $W(z)$ を凹面鏡で小さくする
- 回転ミラーから検出器までの距離 $r$ を長くする
- 回転ミラーの回転角速度 $\omega$ を速くする

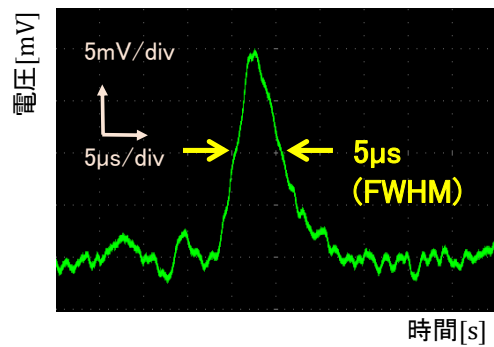
# パルス信号の検出

中部大学 中山先生開発  
 ガウスビーム伝播シミュレーションソフト  
 ガウスビームの伝播の様子 ( $\lambda = 118.8\mu\text{m}$ )



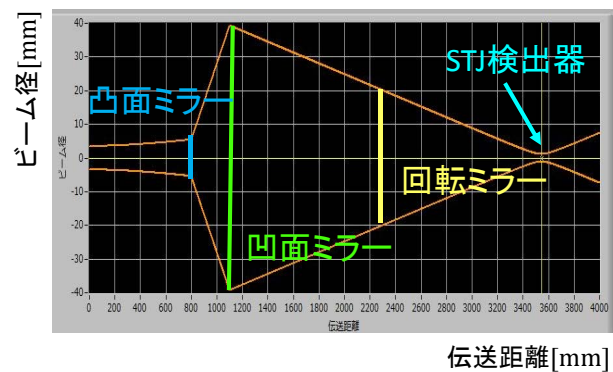
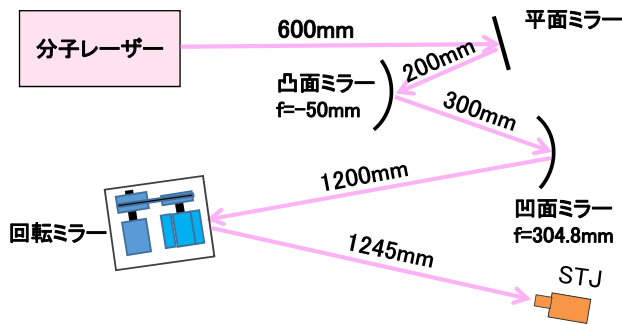
## 実験結果

- ・パルス時間幅 (FWHM)  
 測定値  $5\mu\text{s}$  (設計値  $4.2\mu\text{s}$ )
- ・検出器でのビーム直径  
 測定値  $6.9\text{mm}$  (設計値  $4.1\text{mm}$ )



# 光学系の改良シミュレーション

ガウスビームの伝播の様子 ( $\lambda = 57.2\mu\text{m}$ )



まずは市販のミラーを用いることにして

1. ビームの減衰を少なくするため、焦点距離の短い凸面ミラーをできるだけビーム出口近くに置く
2. 焦点距離が長く、かつウエスト半径が小さくなるように凹面ミラーを置く
3. 回転ミラーのサイズにビームがちょうど収まる位置に回転ミラーを置く

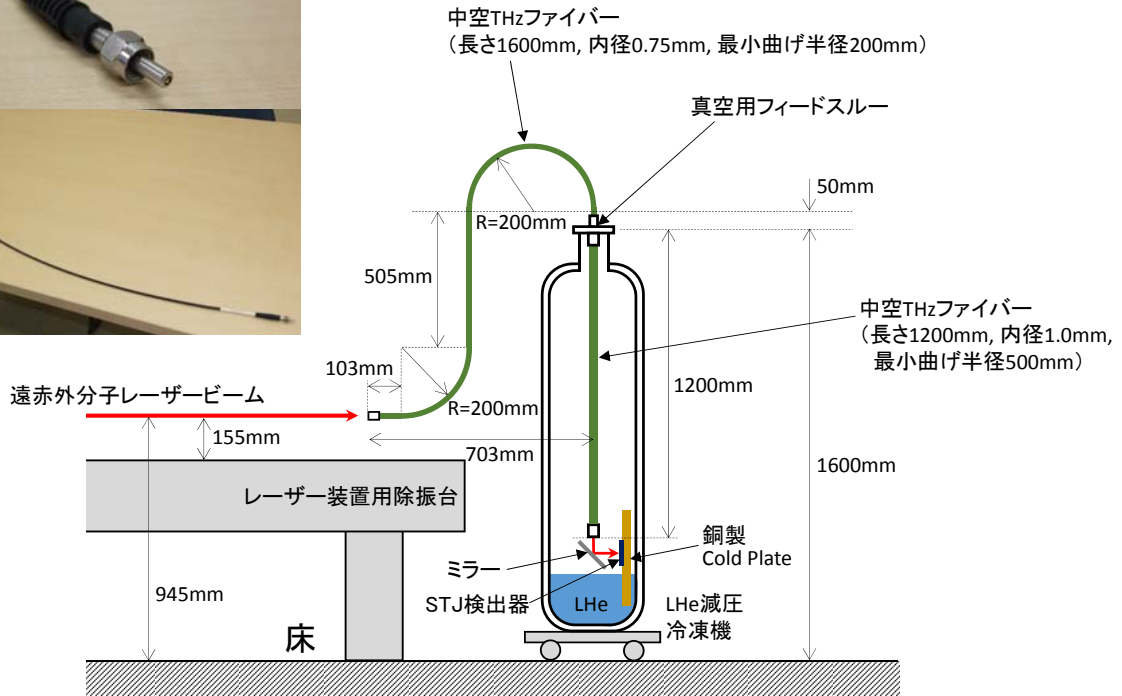
## シミュレーション結果

- ・検出器の位置でのビーム直径…… $\lambda = 118.8\mu\text{m}$ のとき  $2.7\text{mm}$   $57.2\mu\text{m}$ のとき  $2.3\text{mm}$
- ・パルス時間幅(FWHM)…… $\lambda = 118.8\mu\text{m}$ のとき  $2.7\mu\text{s}$   $57.2\mu\text{m}$ のとき  $1.4\mu\text{s}$

課題: 凹凸ミラーを市販に限らなければ、パルス幅をより短くできる可能性

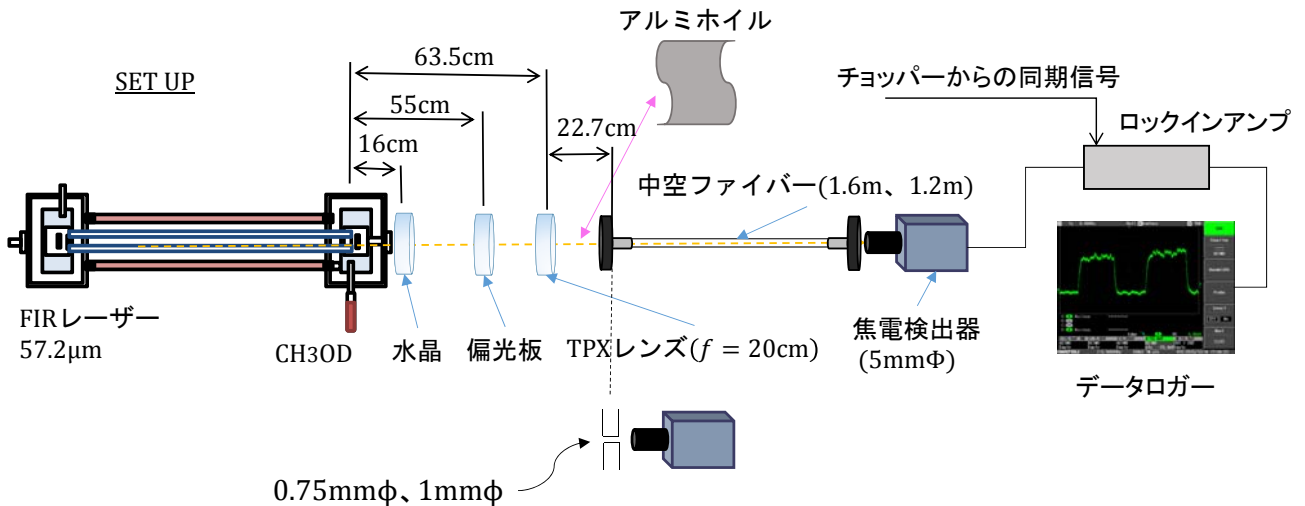


# 中空ファイバー経由STJ検出器のテスト計画



## 中空ファイバーの伝送効率測定

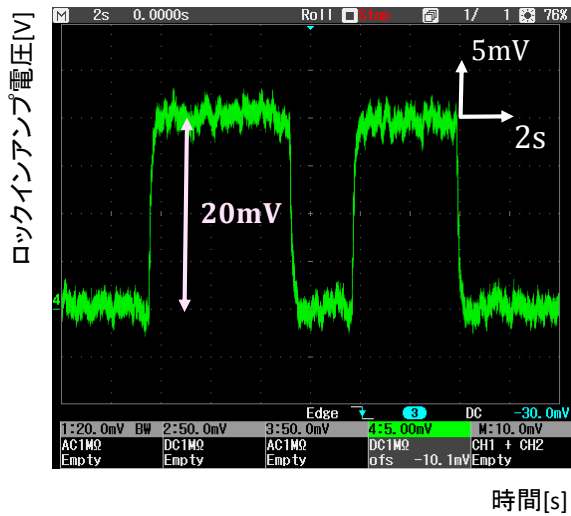
- レーザー光軸上にアルミホイルを出し入れしロックインアンプの電圧を測定
- ファイバー入口と透過後の電圧を比較し伝送効率を求める
- ファイバー入口の電圧測定時はアテネーター3%を使用





## 測定結果

### 長さ1.6m、内径0.75mmφの中空ファイバー

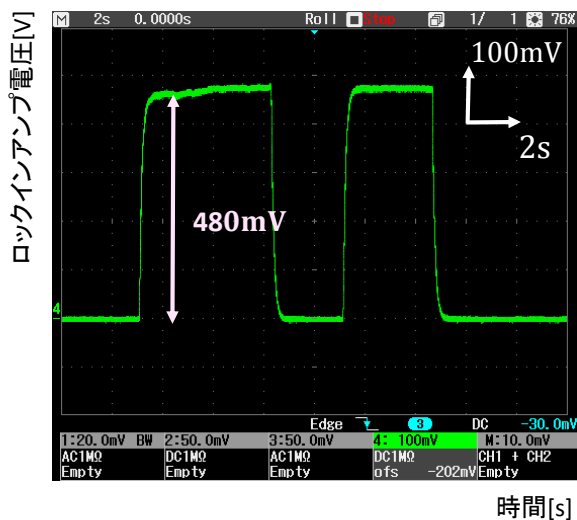


ファイバー透過後の電圧

- ・ファイバー入口での電圧 37.5mV  
(アテネータ 3%)
- ・ファイバー透過後の電圧 20mV  
⇒ ファイバーの伝送効率  
$$\frac{20\text{mV}}{\frac{37.5\text{mV}}{0.03}} \times 100 \approx 1.6\%$$
- ・ファイバー入口での出力 72mW  
⇒ ファイバー先端からの出力  
$$72\text{mW} \times 1.6\% \times \left(\frac{1}{1.7}\right)^2 \approx 399\mu\text{W}$$

## 測定結果

### 長さ1.2m、内径1mmφの中空ファイバー



ファイバー透過後の電圧

- ・ファイバー入口での電圧 62.5mV  
(アテネータ 3%)
- ・ファイバー透過後の電圧 480mV  
⇒ ファイバーの伝送効率  
$$\frac{480\text{mV}}{\frac{62.5\text{mV}}{0.03}} \times 100 \approx 23\%$$
- ・ファイバー入口の出力 72mW  
⇒ ファイバー先端からの出力  
$$72\text{mW} \times 23\% \times \left(\frac{1}{1.7}\right)^2 \approx 5.7\text{mW}$$
- ∴ ファイバー2本透過後の出力  
$$399\mu\text{W} \times 23\% \approx 92\mu\text{W}$$

## Summary

- 本学の遠赤センターのレーザー装置で、STJ検出器の性能評価に必要な遠赤外領域の発振線が得られる
- 本学のレーザーはウエスト半径3.4mm、広がり角11mrad  
( $\lambda = 118.8\mu\text{m}$ )
- 本学のレーザー装置を用いてパルス幅5 $\mu\text{s}$ のパルス波を発振できる
- 光学系を改良するとパルス幅を1.4 $\mu\text{s}$ まで短くできる可能性
- この光学系をさらに改良し、パルス時間幅1 $\mu\text{s}$ を目指す
- 中空THzファイバーの伝送効率は1.6mが1.6%、1.2mが23%

Thank you!