

第7回 高エネルギー物理 春の学校

ニュートリノ崩壊光探索実験における STJ検出器較正用光源の開発

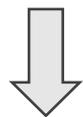
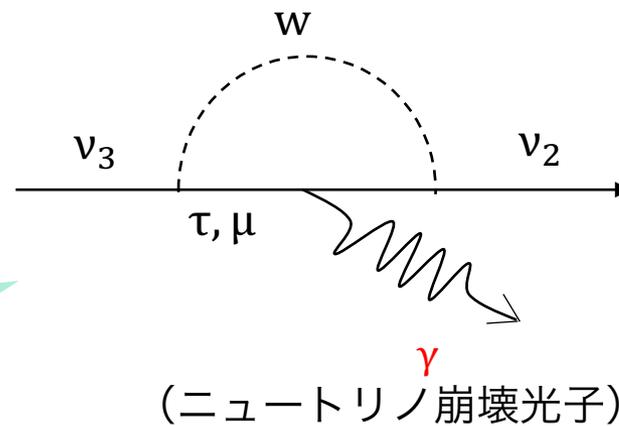
筑波大学 D1 浅野千紗

ニュートリノ崩壊現象

崩壊光子のエネルギー：

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

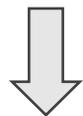
(2体崩壊なので、重心系で E_γ 一定)



質量二乗差からニュートリノ質量を仮定し、 E_γ の値を計算すると

$$E_\gamma = 6 \sim 24 \text{ meV}、\lambda = 50 \sim 200 \mu\text{m}$$

(遠赤外領域)



- ニュートリノ寿命は 10^{43} 年 (SM) \rightarrow 10^{17} 年 (LR対称模型)
- 赤外線は大気中の水分で吸収される

➡ 宇宙背景ニュートリノ (CνB)

ニュートリノ振動実験で測定されたニュートリノの質量の二乗差：

$$\begin{aligned} m_3^2 - m_2^2 &= 2.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ m_2^2 - m_1^2 &= 7.59 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \end{aligned} \quad \left[\begin{array}{l} \text{K. Nakamura et al.,} \\ \text{J.Phys.G37(2010) 075021} \end{array} \right]$$

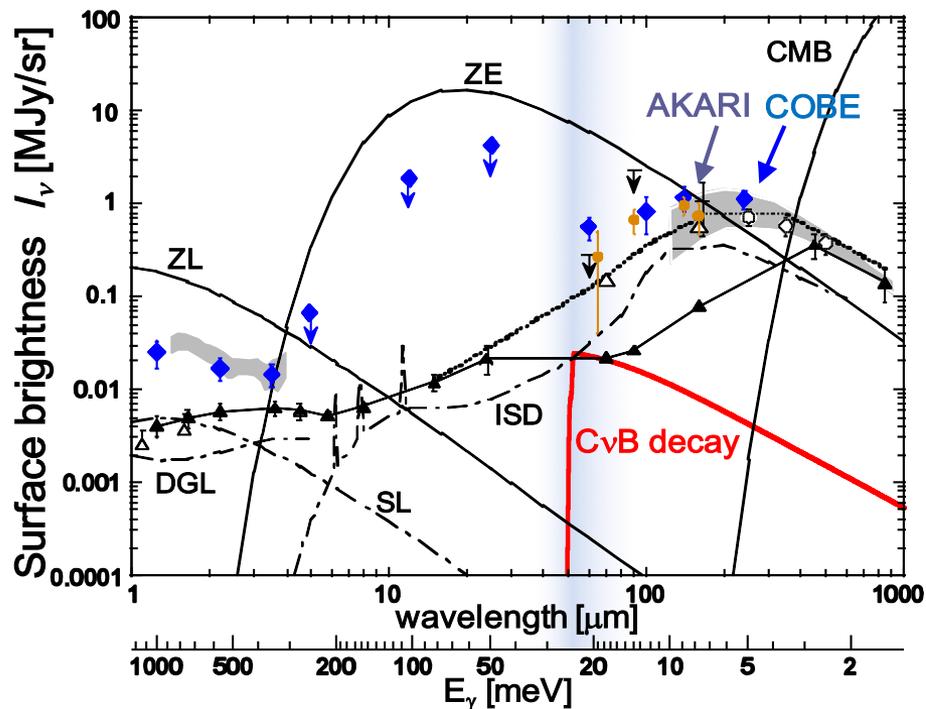
宇宙の質量分布の観測から

$$\Sigma m_\nu < 0.59 \text{ eV} \quad \left[\begin{array}{l} \text{Neutrino frontier 2015} \\ \text{Kavli IPMU 高田さん} \end{array} \right]$$

宇宙背景ニュートリノ (CνB)

- ビッグバンから約1秒後に自由になり、現在まで存在し続けているニュートリノ
 - • • 宇宙背景輻射 (CMB) の30万年後より古い
- 存在量は数100個/cm³で、全宇宙で光子について多い

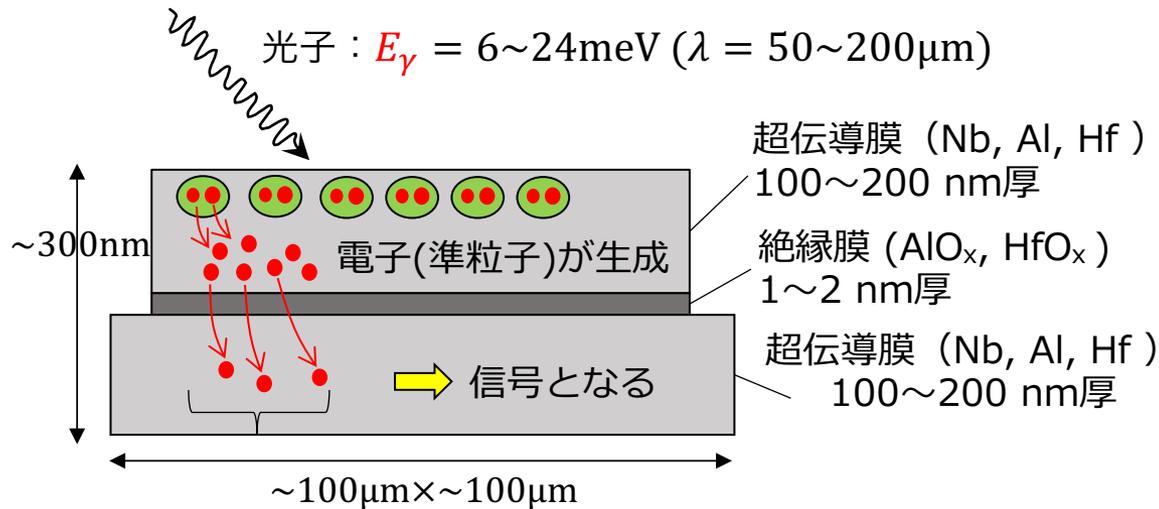
➡ 極初期宇宙を探る鍵?



- 質量50meV、寿命10¹⁴年のニュートリノ崩壊光のエネルギー分布は、24meVにカットオフがある
- 赤方偏移の影響で低エネルギー側にテールを持つ特徴的な分布
- COBE、AKARIの観測によるニュートリノ寿命の下限値は10¹²年

宇宙背景ニュートリノ崩壊光のスペクトル

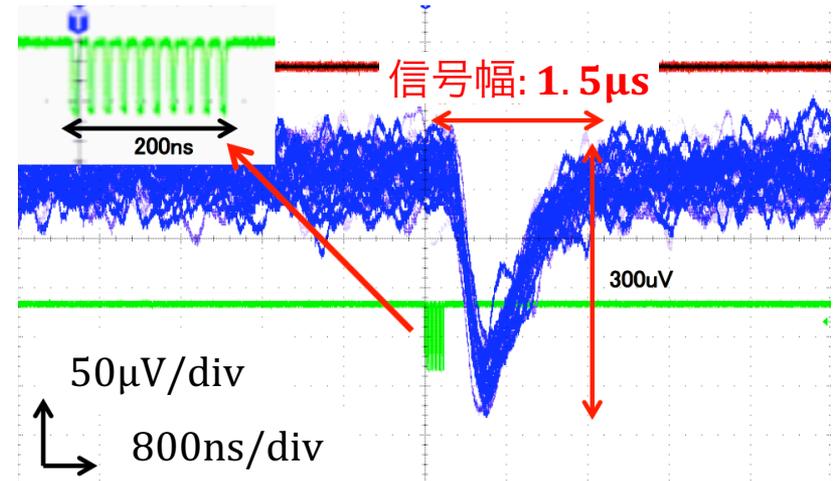
STJ (Superconducting Tunnel Junction) 検出器



$$N = G_{Al} \frac{E_\gamma}{1.7\Delta} \propto \text{入射光子のエネルギー } E_\gamma$$

- ✓ 半導体検出器に比べ高分解能
- ✓ 極低温~0.3Kで動作

STJのパルス信号

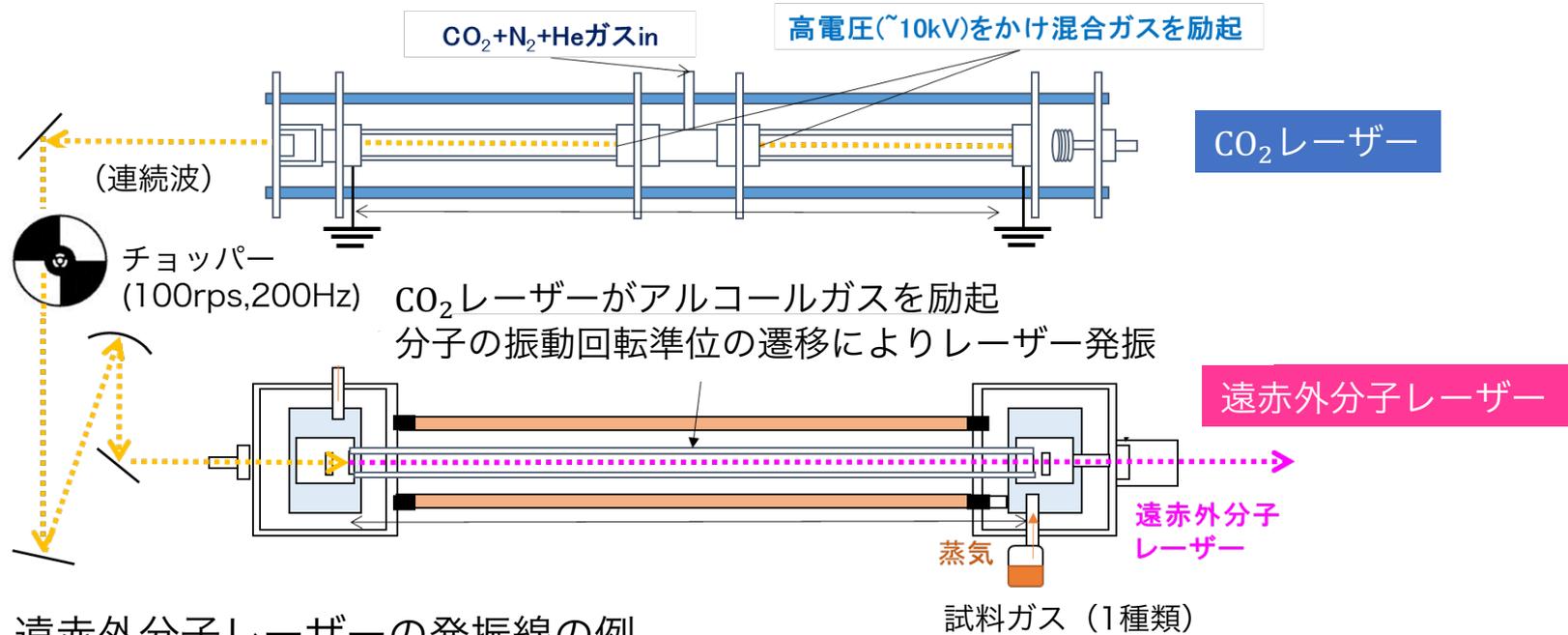


STJ検出器校正用光源への要求

- 波長 $\lambda = 50\sim 200\mu\text{m}$
- パルス時間幅~1 μs 程度

100 μm^2 のSTJに $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ のレーザーを500ps照射

遠赤外分子レーザーシステム



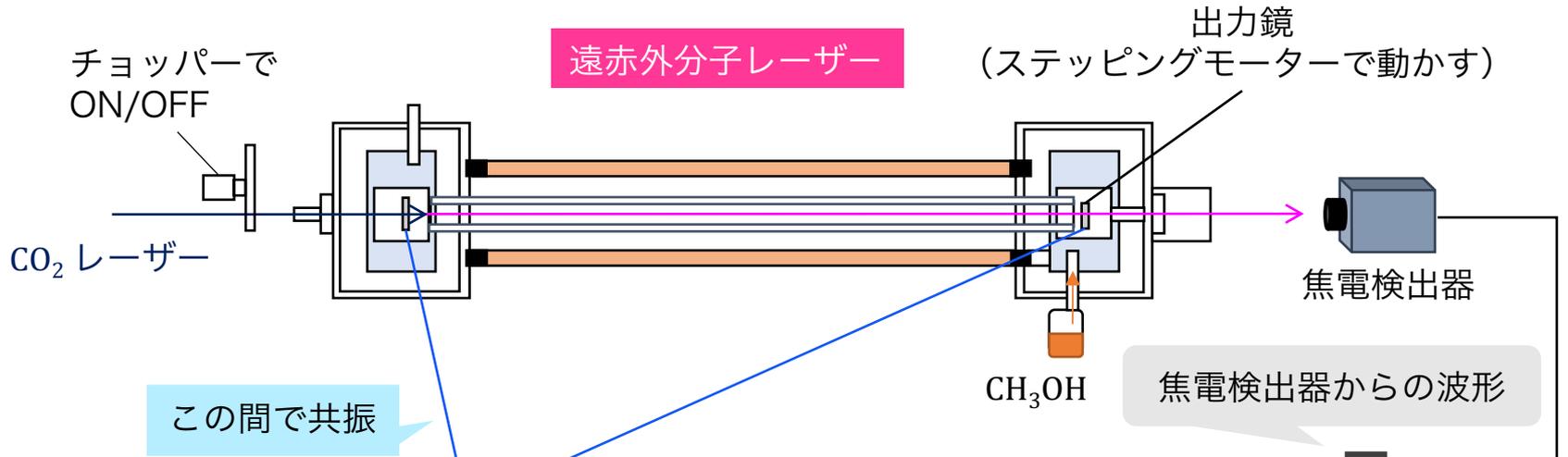
遠赤外分子レーザーの発振線の例

試料ガス	波長(μm)	エネルギー(meV)	出力(mW)
CD ₃ OH	43.7	28.4	(6)
CH ₃ OD	57.2	21.7	32
CH ₃ OH	118.8	10.4	55
CH ₃ F ₂	184.3	6.7	(298)
CD ₃ OH	253.7	4.9	(28)
CH ₃ I	447.2	2.8	13
CH ₃ CN	453.4	2.7	(0.4)
CH ₃ Br	545.2	2.3	1
CH ₃ Br	715.4	1.7	1

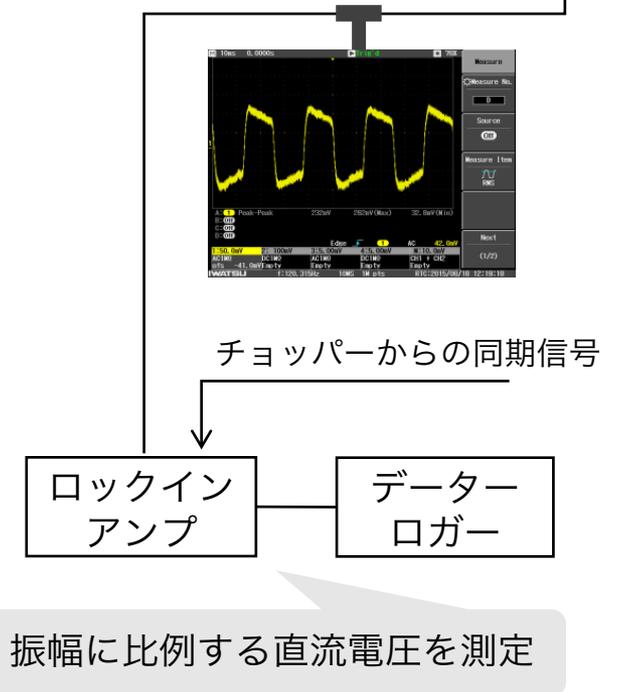
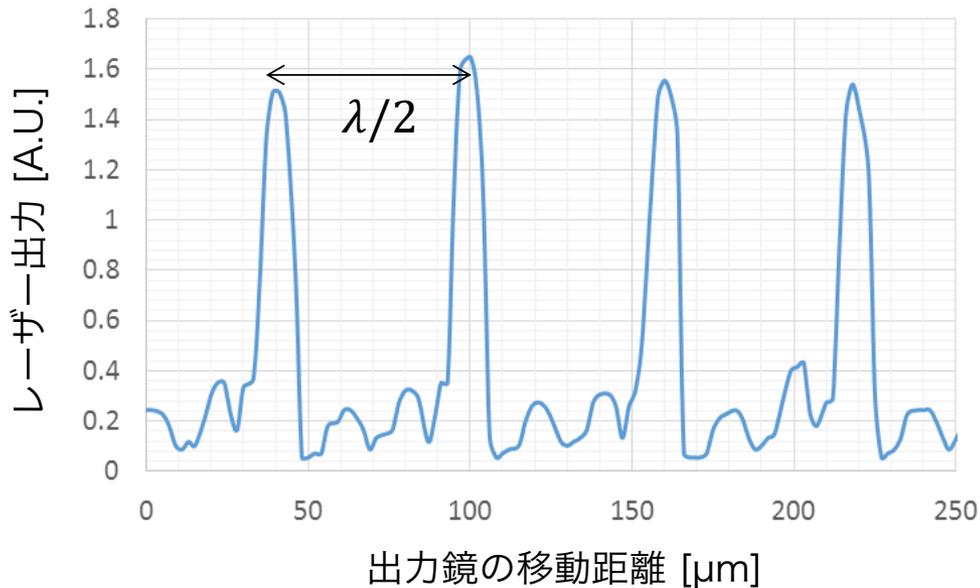
- CO₂レーザーがアルコールガスを励起し分子の振動回転準位の遷移によりレーザー発振
- 発振波長 $\lambda = 40 \sim 700 \mu\text{m}$
- 発振線は約70本。任意の1本を選択可能

崩壊光子のエネルギーをカバー
($\lambda = 50 \sim 200 \mu\text{m}$, $E_{\gamma} = 5 \sim 25 \text{ meV}$)

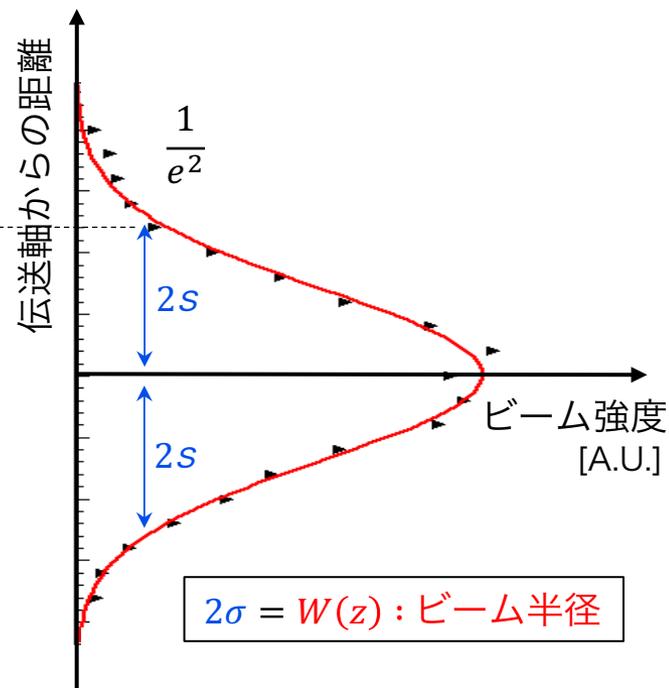
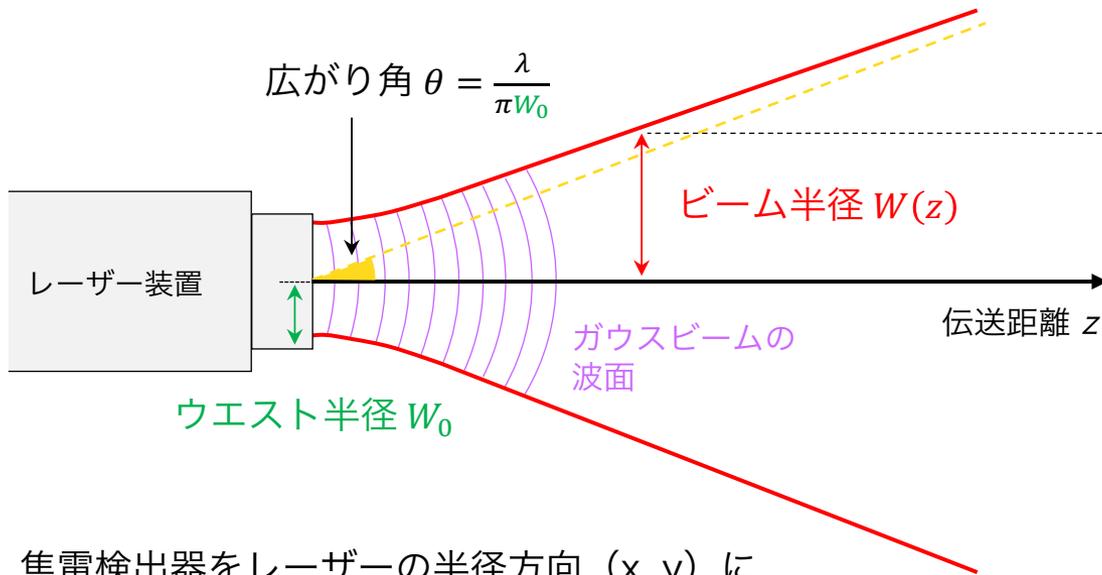
発振波長の測定



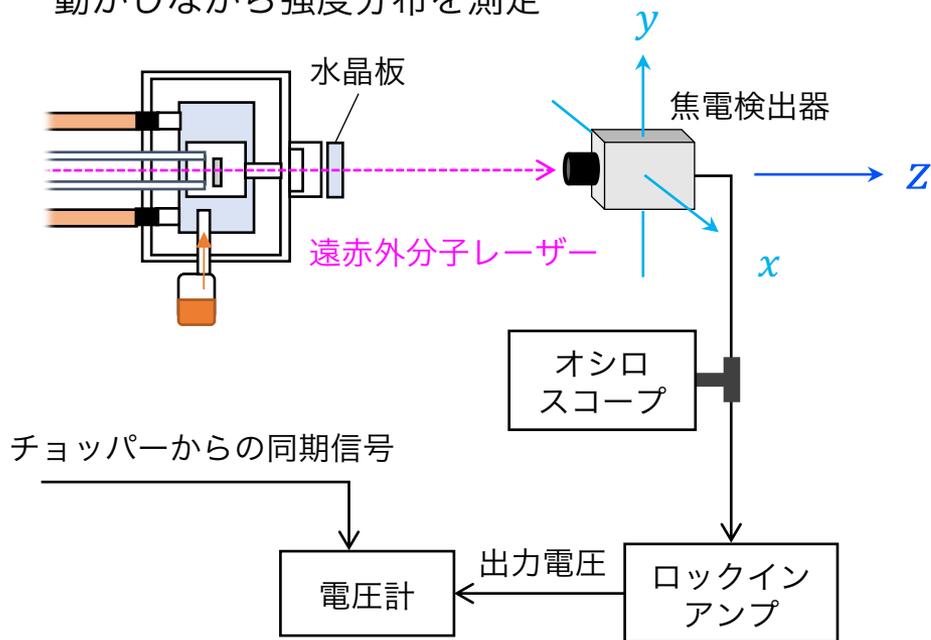
共振器長に対する同調曲線 ($\lambda = 118.8\mu\text{m}$)



ガウスビーム



焦電検出器をレーザーの半径方向 (x, y) に動かしながら強度分布を測定



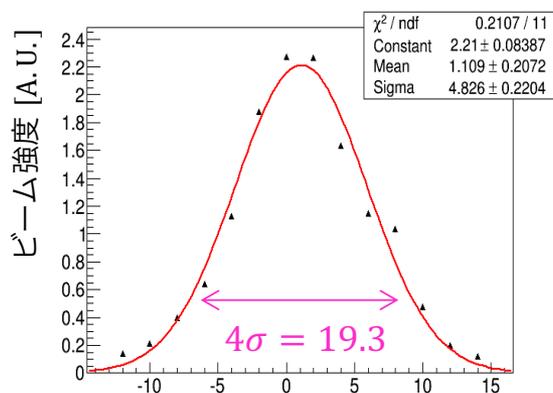
ガウスビームの伝播式；

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

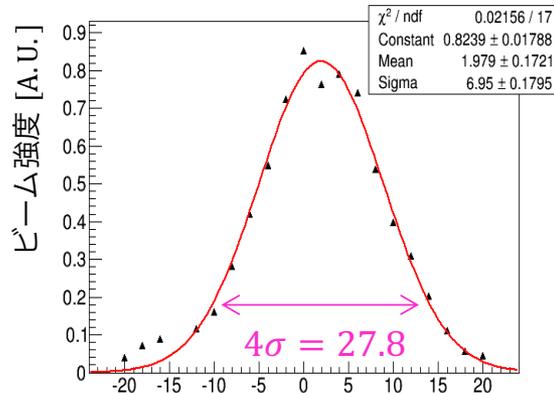


ウェスト半径 W_0 の測定が必要！

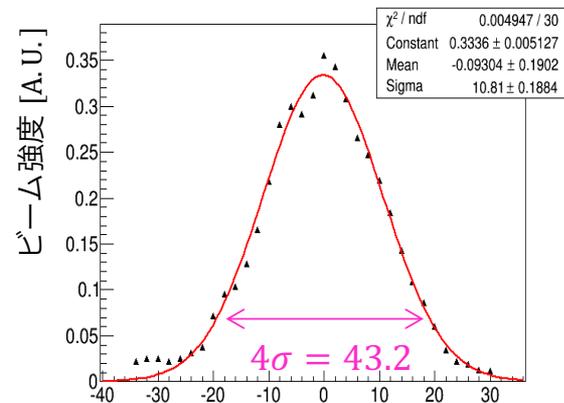
強度分布のガウシアンフィッティング



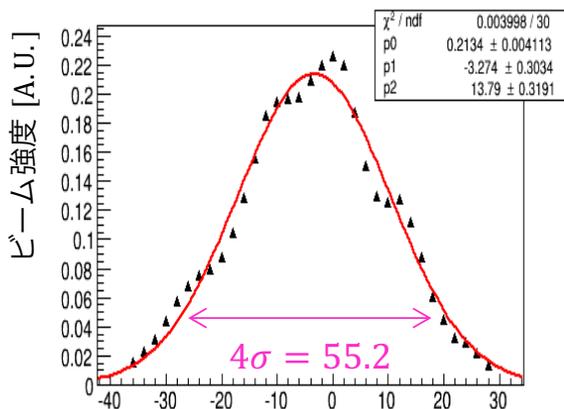
焦電検出器の移動距離 [mm]
z=738mm



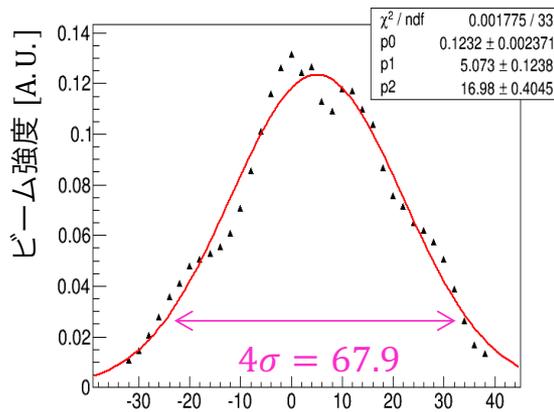
焦電検出器の移動距離 [mm]
z=1239mm



焦電検出器の移動距離 [mm]
z=1844mm



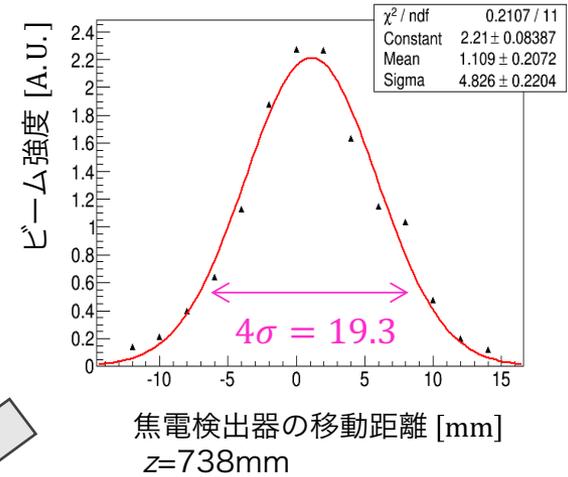
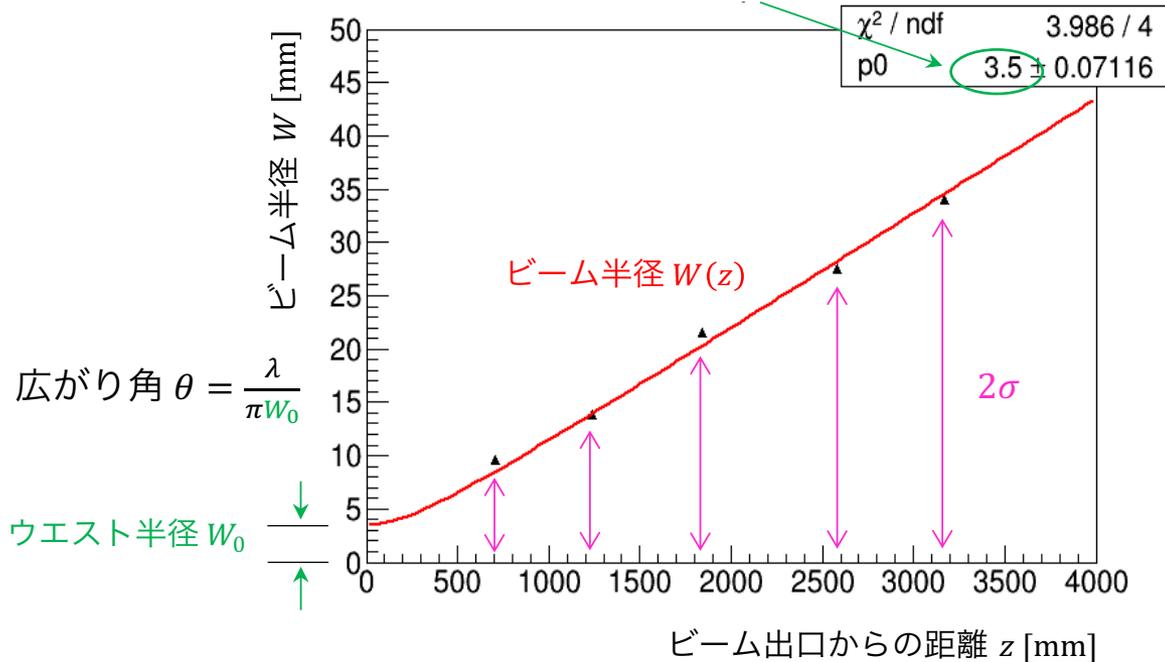
焦電検出器の移動距離 [mm]
z=2584mm



焦電検出器の移動距離 [mm]
z=3174mm

ビームプロファイルのフィッティング

ウエスト半径 $W_0 = 3.5\text{mm}$



合計5点で強度分布を測定し、
 ガウシアンでフィッティング、
 σ を決定

ガウスビームの伝播式；

$$\text{ビーム半径 } W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2} \quad \text{でフィッティング}$$

→ ウエスト半径：3.5mm、広がり角：5.2mrad（使用分子 CH_3OD 、波長 $\lambda = 57.2\mu\text{m}$ ）

分子レーザーの連続波のパルス化（回転ミラー）

STJ検出器用の応答速度 $1\ \mu\text{s}$ 程度のパルス光にする必要がある

(ただしコスト削減のため現有または市販のデバイスを用いる)

回転ミラー (377rad/s)



分子レーザー

$\lambda = 118.8\ \text{nm}$
分子: CH_3OH

連続波(CW)

(a) 86cm

34cm

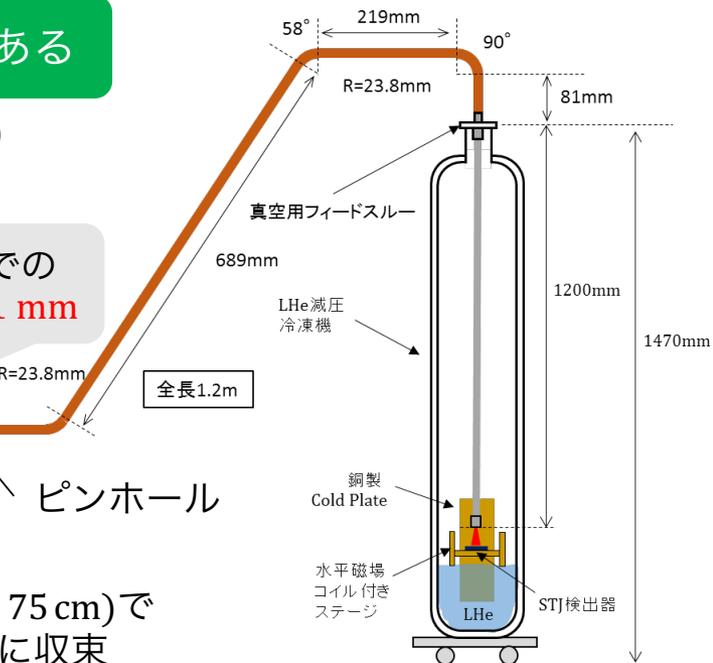
200cm

パルス化

ピンホール位置での
ビーム直径(b) 4.1 mm

ピンホール

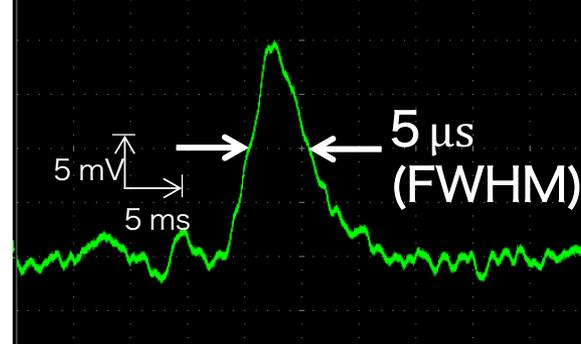
凹面鏡($f = 75\ \text{cm}$)で
ピンホールに収束



パルス幅を短くするために：

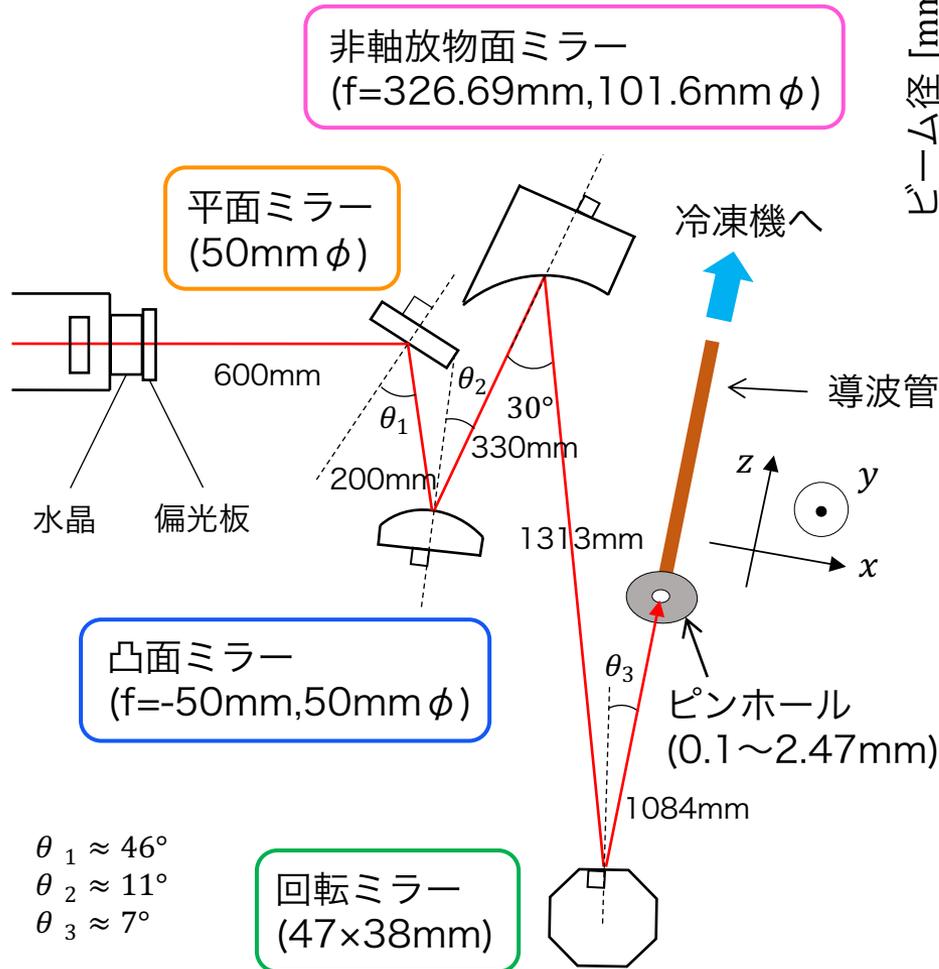
- ・ 回転ミラーからピンホールまでの距離(a)を長く
- ・ ピンホール位置でのビーム直径(b)を小さく

先行研究のパルス波形

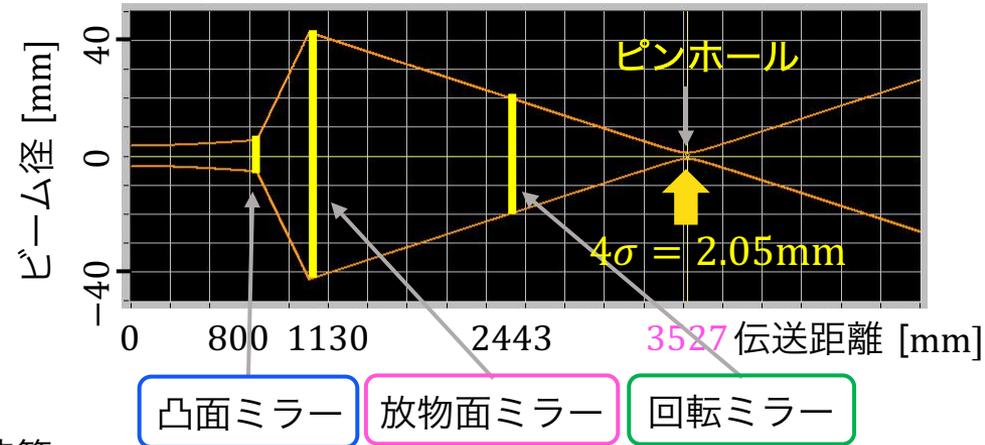


GaAsショットキーバリアダイオード検出器で測定

回転ミラー方式の光学系



ガウスビームシミュレーター

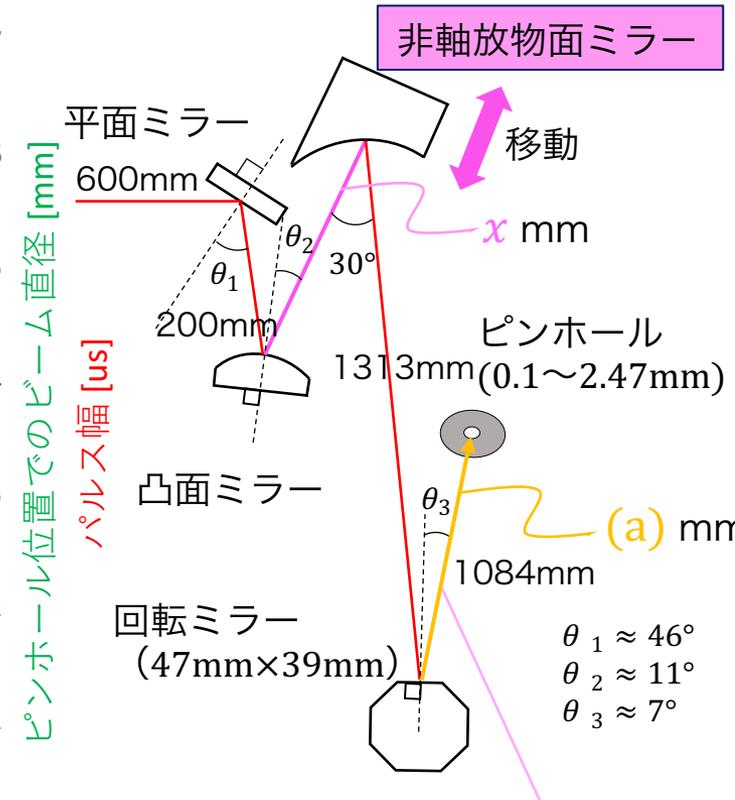
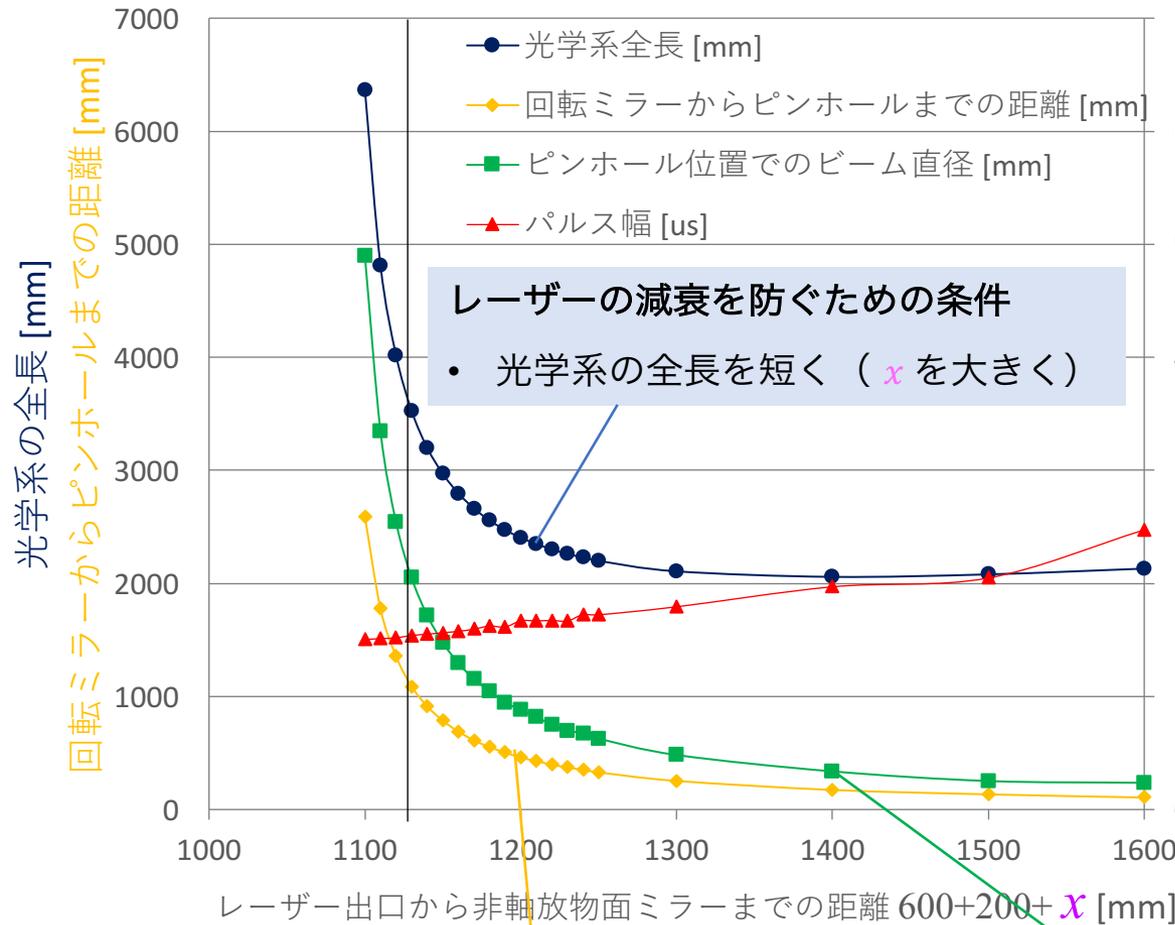


- 凸面ミラーで一旦広げてから凹面鏡で収束させることで、光学系を長距離化させずに、回転ミラーからピンホールまでの距離を長くし、スポットサイズを小さくすることに成功
- ミラー面での反射によるガウスビームの崩れを防ぐため、反射角はできるだけ小さく

回転ミラーを用いた光学系の設計

$$\text{パルス幅} = \frac{2.35}{4} \times \frac{\text{ピンホール径} (b) + 0.1}{2(a) \times \cos\theta_3 \times 377 \text{rad/s}}$$

実験での位置 (1130mm)



パルス幅を短くするための条件③

- θ_3 を小さく

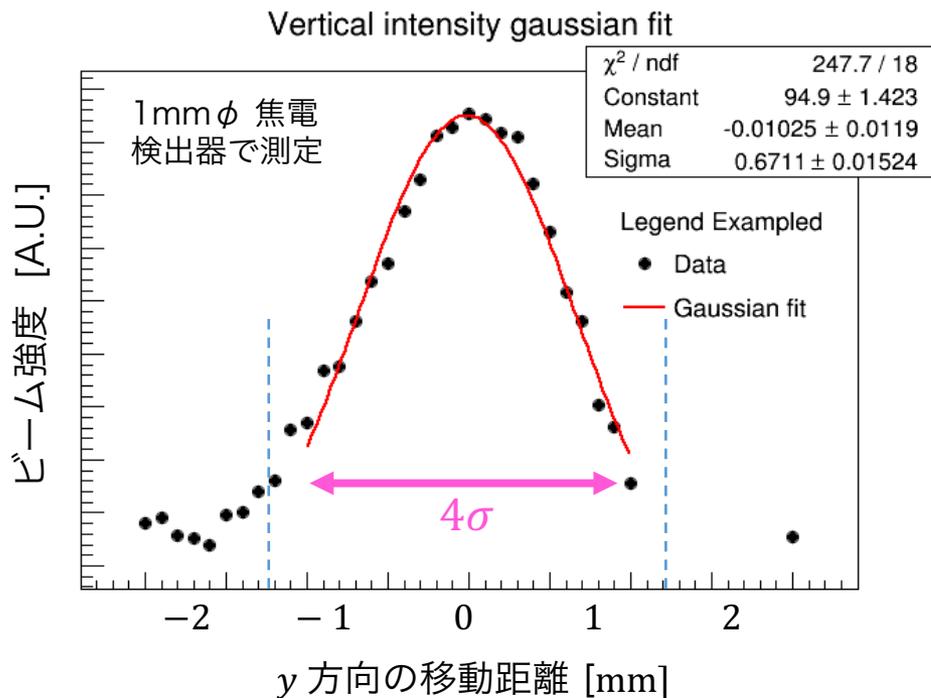
パルス幅を短くするための条件①

- 回転ミラーからピンホールまでの距離(a)を長く (x を小さく)

パルス幅を短くするための条件②

- ピンホール位置でのスポットサイズ(b)を小さく (x を大きく)

回転ミラー方式でのスポットサイズ測定



- ビーム強度分布のガウシアンフィットから σ を測定し、 $4\sigma = 2.47\text{mm}$ をビーム直径とする。
- 半値幅は、 $2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.35\sigma$
- ピンホールサイズの下限はレーザーの波長 $57.2\mu\text{m}$ から、回折の影響を考慮し 0.1mm 以上。
- ピンホールサイズの上限はレーザーがロスなく入射するよう、スポットサイズと等しく。

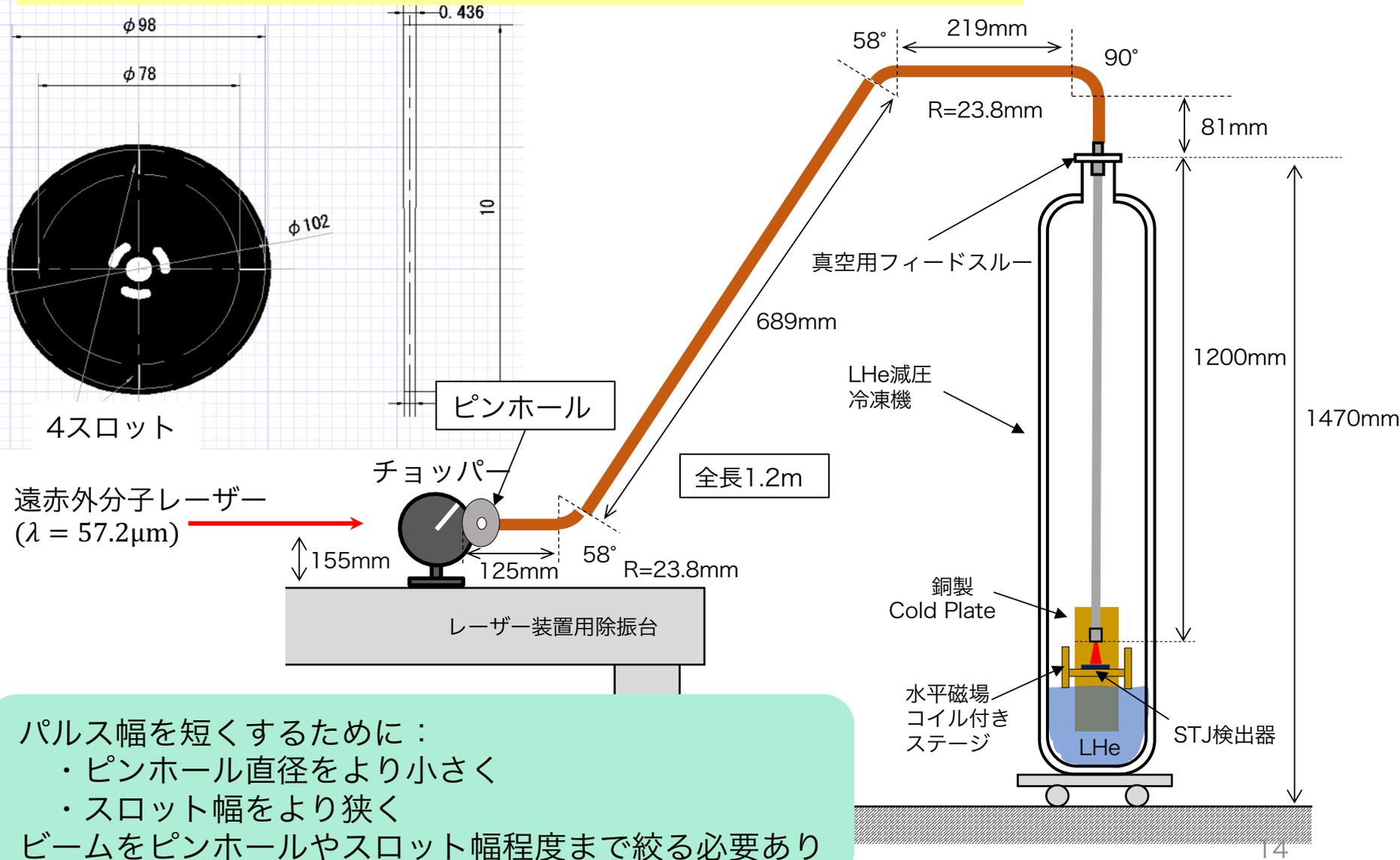
シミュレーション値：2.9 μs
($4\sigma = 2.05\text{mm}$ 、ピンホール径 2.05mm)

$$\text{パルス幅} = \frac{2.35}{4} \times \frac{2.47\text{mm} + (0.1 \sim 2.47)\text{mm}}{1084\text{mm} \times \cos 7^\circ \times 2 \times 377\text{rad/s}} = 1.9 \sim 3.6 \mu\text{s} \text{ [FWHM]}$$

(ピンホール径を 0.1mm ～スポットサイズ 2.47mm として計算)

分子レーザーの連続波のパルス化（高速チョッパー）

パルス幅 = (ピンホール直径 + スロット幅) / ディスクの回転速度

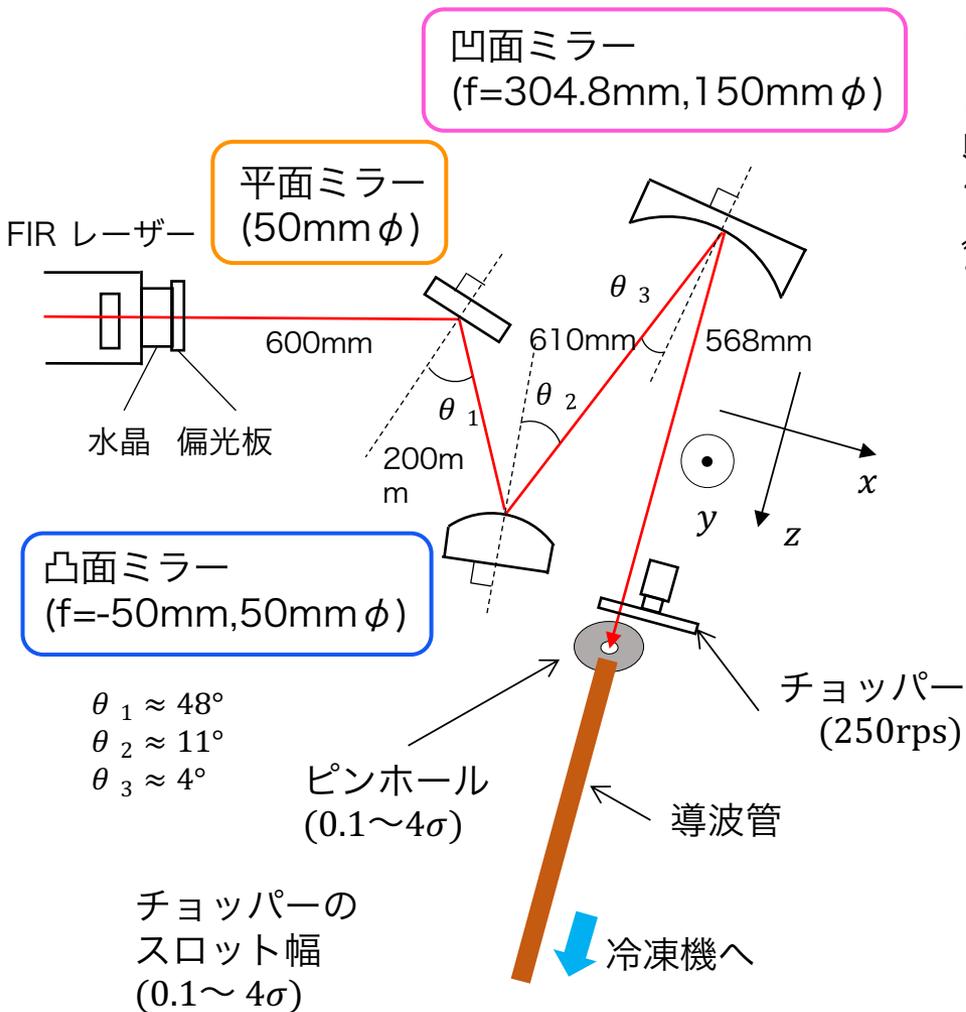


パルス幅を短くするために：

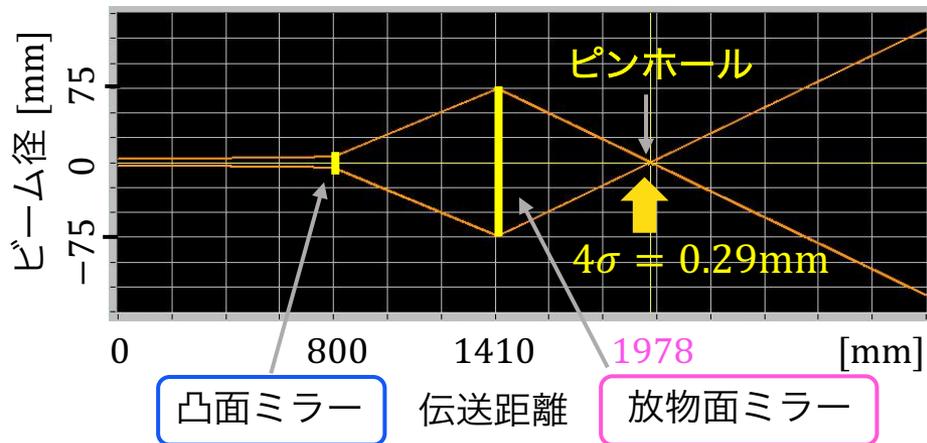
- ・ピンホール直径をより小さく
- ・スロット幅をより狭く

ビームをピンホールやスロット幅程度まで絞る必要あり

チョッパー方式の光学系



ガウスビームシミュレーター



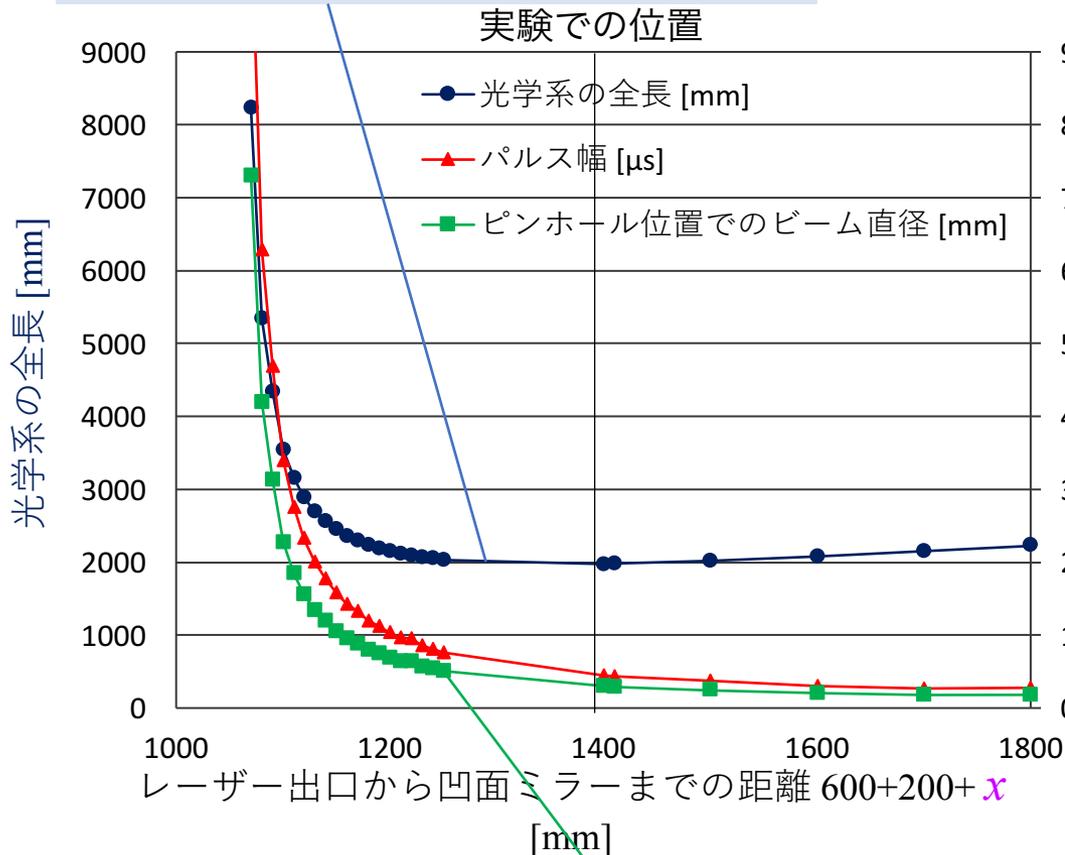
- 凸面ミラーで一旦広げてから凹面鏡で収束させることで、光学系を長距離化させずに、スポットサイズを小さくすることに成功
- ミラー面でのビームの崩れを防ぐため、反射角はできるだけ小さく

チョッパーを用いた光学系の設計

レーザーの減衰を防ぐための条件

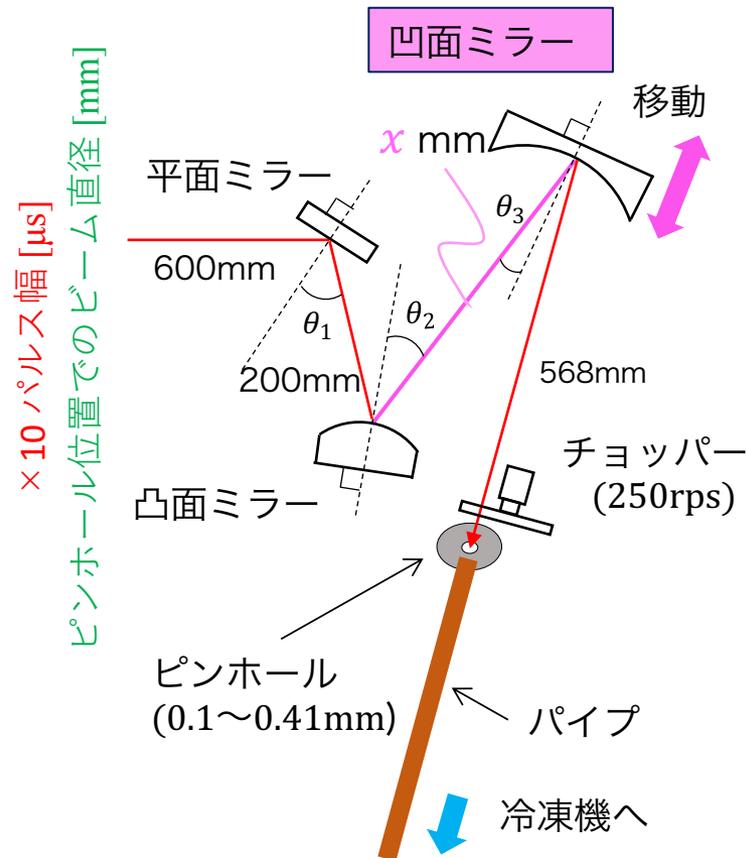
- 光学系全長を短く (x を大きく)

$$\text{パルス幅} = \frac{2.35}{4} \times \frac{\text{スポットサイズ} + \text{スロット幅}}{2 \times 50 \times \pi \times 250 \text{ rps}}$$

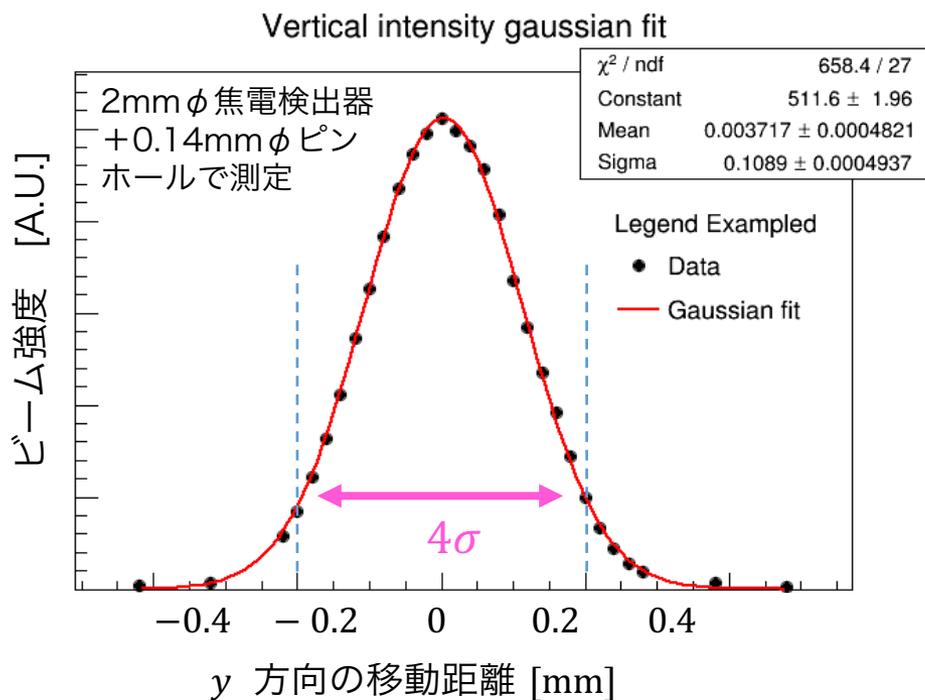


パルス幅を短くするための条件

- ピンホール位置でのスポットサイズ (b) を小さく (x を大きく)



チョッパー方式でのスポットサイズ測定



- ビーム強度分布のガウシアンフィットから σ を測定し、 $4\sigma = 0.41\text{mm}$ をビーム直径とする。
- 半値幅は、 $2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.35\sigma$
- ピンホールサイズの下限はレーザーの波長 $57.2\mu\text{m}$ から、回折の影響を考慮し 0.1mm 以上。
- ピンホールサイズの上限はレーザーがロスなく入射するよう、スポットサイズと等しく。

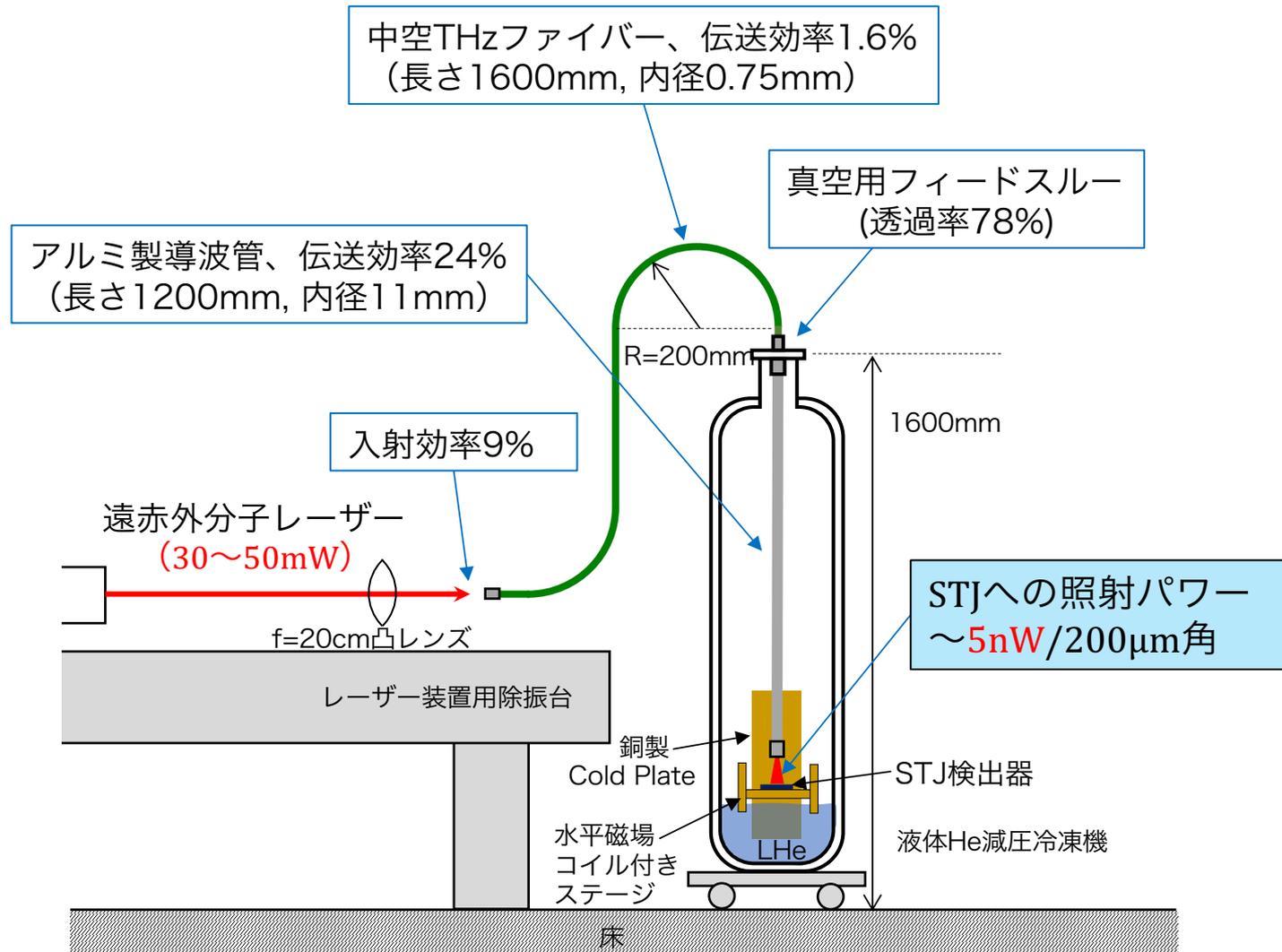
シミュレーション値：4.3 μs
($4\sigma = 0.29\text{mm}$ 、ピンホール径 0.29mm)

$$\text{パルス幅} = \frac{2.35}{4} \times \frac{(0.1 \sim 0.41)\text{mm} + (0.1 \sim 0.41)\text{mm}}{50\text{mm} \times 2 \times \pi \times 250\text{rps}} = 1.5 \sim 6.1 \mu\text{s} [\text{FWHM}]$$

(チョッパーのスロット幅・ピンホール径を 0.1mm ～ビーム直径 0.41mm として計算)

遠赤外分子レーザーによるSTJ検出器の応答試験

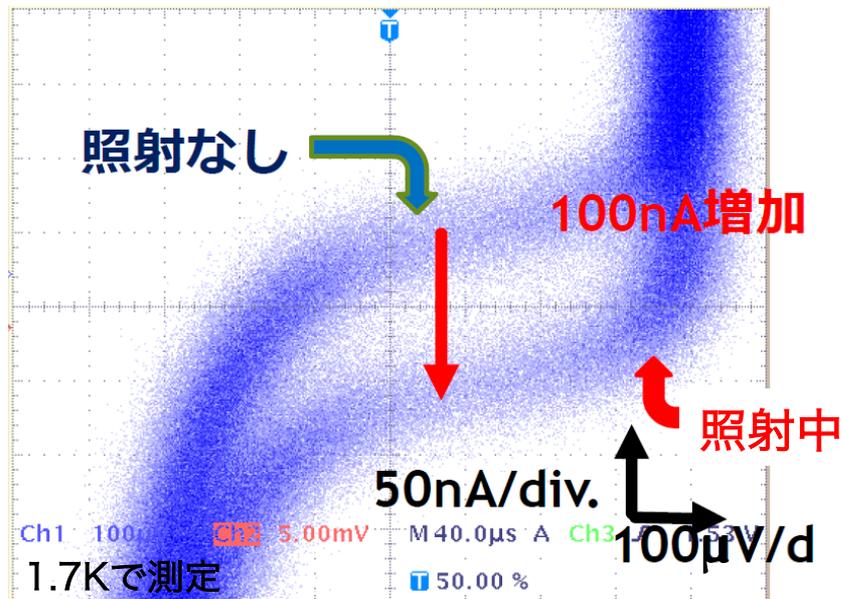
(波長 $57.2\mu\text{m}$: $E_\gamma = 21.7\text{meV}$ 、 $m_1 = 25.1\text{meV}$ 、 $m_2 = 26.6\text{meV}$ 、 $m_3 = 56\text{meV}$ に対応)



STJ検出器の性能評価実験の配置図

STJによる遠赤外レーザー検出

I-V 特性の変化



チョッパーにより40~200HzでON/OFF

$\lambda = 57.2\mu\text{m}$ の遠赤外レーザーを
200 μm 角 Nb/Al-STJに照射

- 照射パワー：4~6nW
- 測定された変化：100nA
(検出効率：0.3~0.4%)
- 予想される電流変化：2.3~3.5 μA
(検出効率：10%)

まとめ

- 遠赤外分子レーザーの発信領域はニュートリノ崩壊光の領域をカバーしている
- 波長 $\lambda = 57.2\mu\text{m}$ の発信線のウエスト半径3.5mm、広がり角5.2mrad
- 測定したスポットサイズから計算されるパルス幅は、回転ミラー方式では1.9~3.6 μs 、チョッパー方式では1.5~6.1 μs

←過去のパルス信号の直接測定実験では5~6 μs のパルス信号を測定

- STJ検出器の試作品が遠赤外分子レーザーに対して応答した

今後

- パルス時間幅の直接測定
- STJ検出器の検出効率の改善→ STJ表面での反射防止、アンテナで検波etc…

Back up

ニュートリノ質量と崩壊光子のエネルギー

崩壊光子のエネルギー :

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

(2体崩壊なので、重心系で E_γ 一定)

m_1 (meV)	m_2 (meV)	m_3 (meV)	E_γ (meV)	λ (μm)
0	8.7	50	24	52
50	51	71	17	73
194	194	200	6.1	204

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

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

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

ニュートリノの寿命 (1)

標準模型

$$\tau^{-1} = \frac{9\alpha G_F^2}{8192\pi^4} \left(\frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \right)^3 (m_3^2 + m_2^2) \left(\frac{m_\tau^2}{M_W^2} \right)^2$$

$$\tau = 2.65 \times 10^{43} \text{ years}$$

ref. P.B.Pal and L.Wolfenstein, Phys. Rev.D25, 766-773(1982)

質量二乗差: $\Delta m_{32}^2 = 2.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

ν_3 、 ν_2 の質量: $m_3 = 50 \text{ meV}$, $m_2 = 8.7 \text{ meV}$

τ 粒子の質量: $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$

微細構造定数: $\alpha = 7.30 \times 10^{-3}$

フェルミカップリング定数: $G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

Weak Bosonの質量: $M_W = 80.4 \text{ GeV}$

標準模型では寿命が長すぎ、崩壊現象の観測が不可能



右巻きニュートリノと結合するWeakBosonを仮定するL-R対称模型を導入

ニュートリノの寿命 (2)

$$\tau^{-1} = \frac{\alpha G_F^2}{32\pi^4} \left(\frac{\Delta m_{32}^2}{m_3} \right)^3$$
$$\times |U_{32}|^2 |U_{33}|^2 \left[\frac{9}{64} (m_3^2 + m_2^2) \frac{m_\tau^4}{M_{W1}^4} \left(1 + \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 + 4m_\tau^2 \left(1 - \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 \sin^2 2\zeta \right]$$
$$\tau = 1.10 \times 10^{18} \text{ years}$$

ref. R.E.Schrock, Nucl. Phys. B206 (1982) 359

ref. M.Czakon, Phys.Lett. B458(1999)355

質量二乗差： $\Delta m_{32}^2 = 2.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 ν_3 、 ν_2 の質量： $m_3 = 50 \text{ meV}$ 、 $m_2 = 8.7 \text{ meV}$

τ 粒子の質量： $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$ 、微細構造定数： $\alpha = 7.30 \times 10^{-3}$

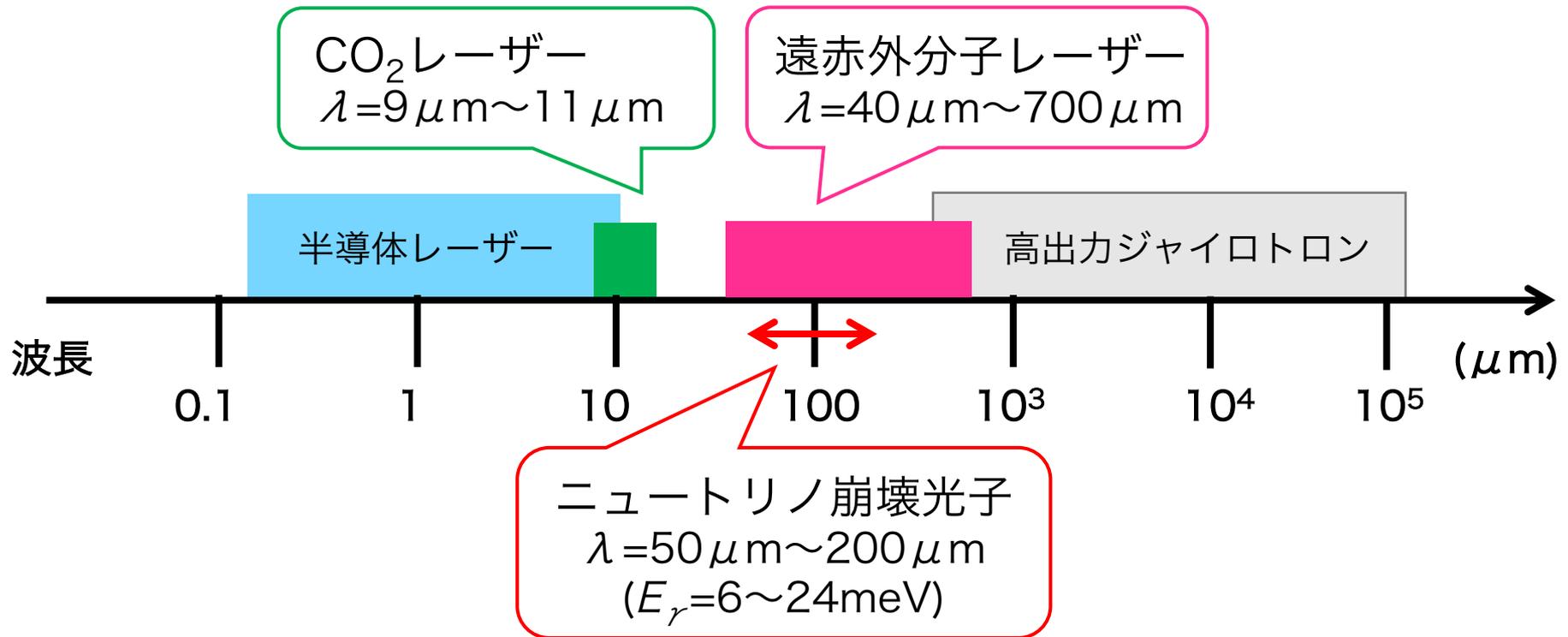
フェルミカップリング定数： $G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

W_L の質量： $M_{W1} = 80.4 \text{ Ge}$ 、 W_R の質量下限： $M_{W2} = 0.715 \text{ TeV}$

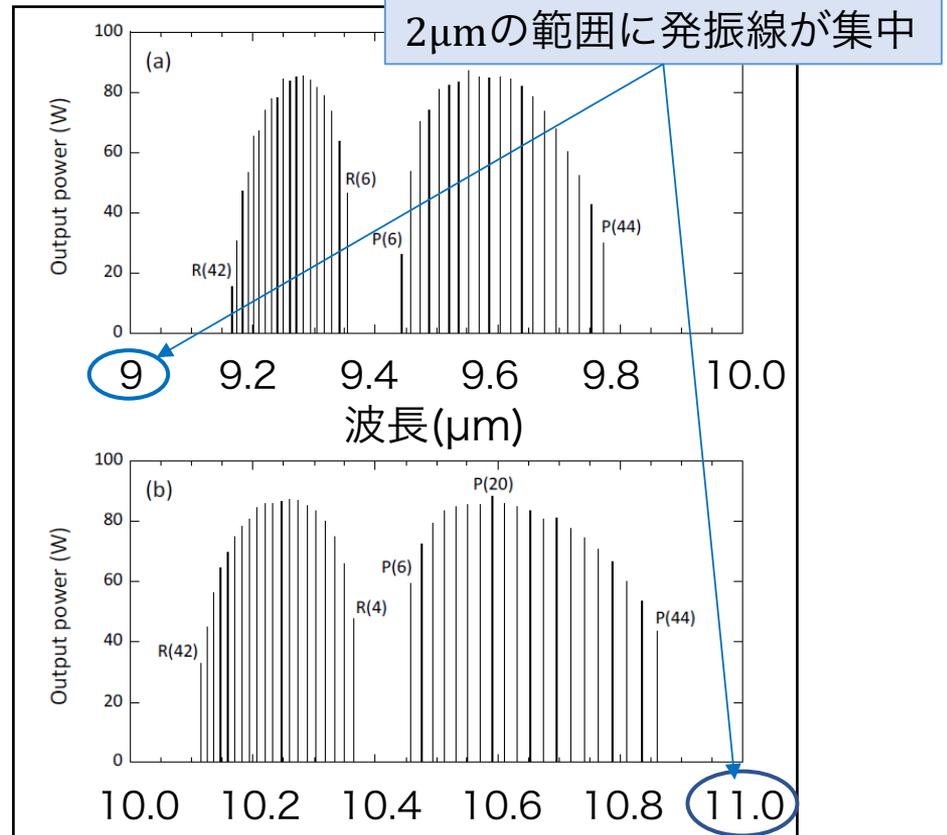
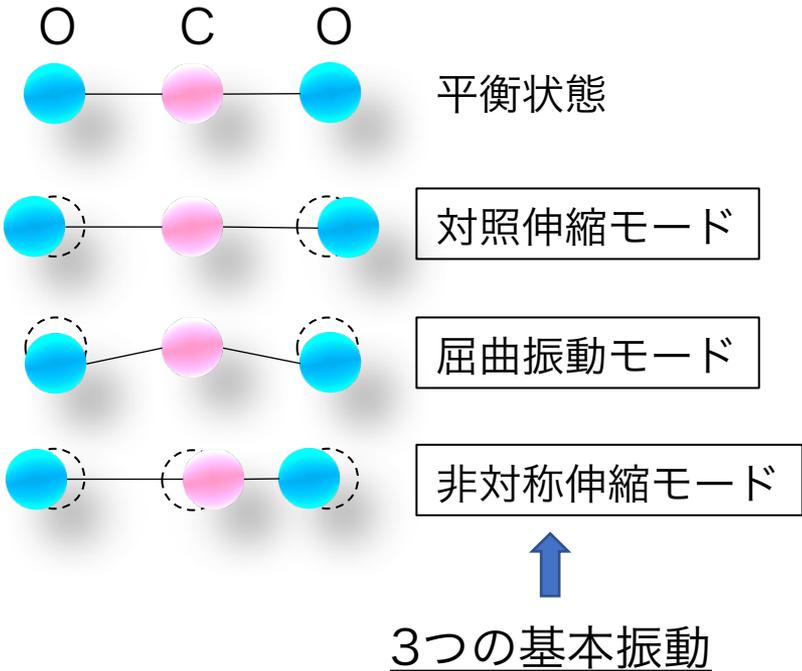
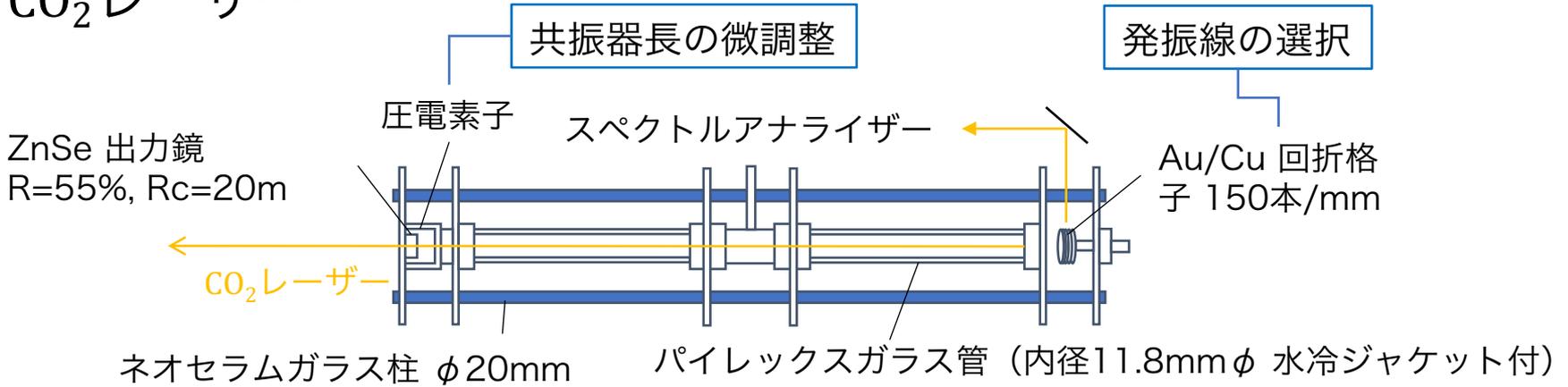
W_L と W_R の混合角の上限： $\sin \zeta = 0.013$

宇宙背景ニュートリノ (C ν B) で観測できる可能性

他のレーザーとの比較



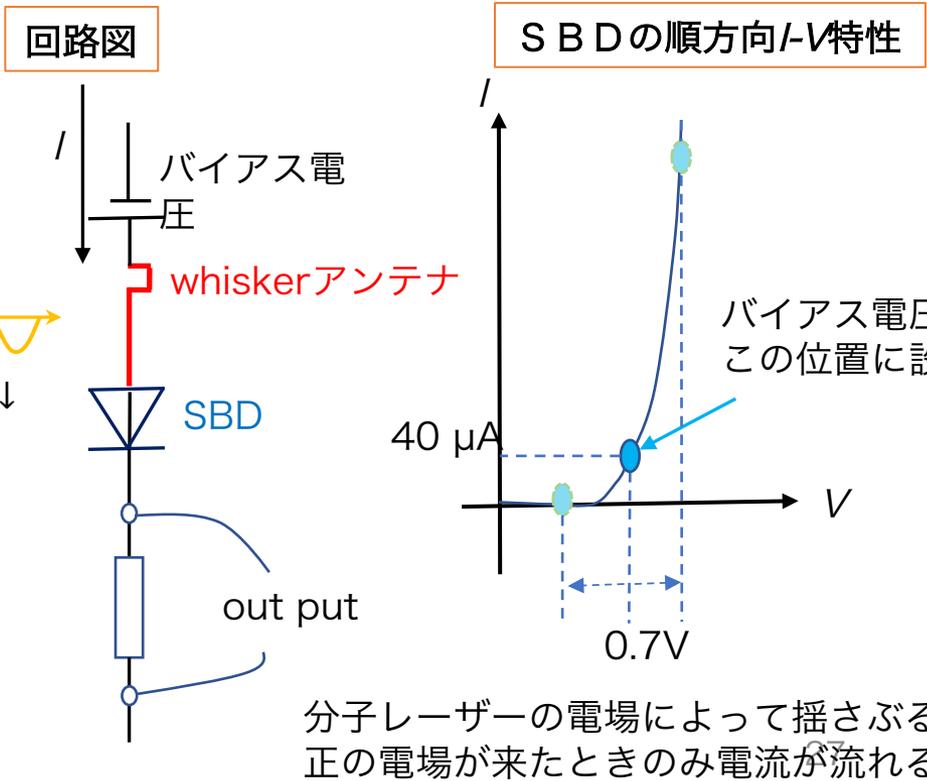
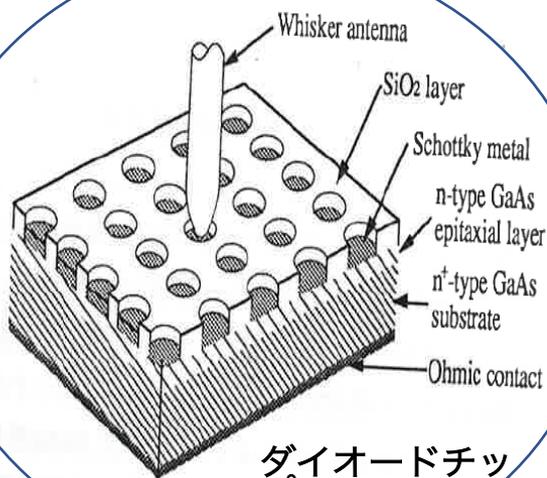
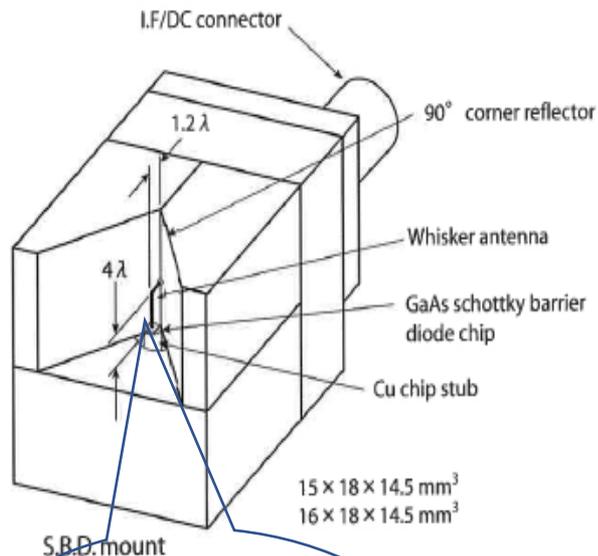
CO₂レーザー



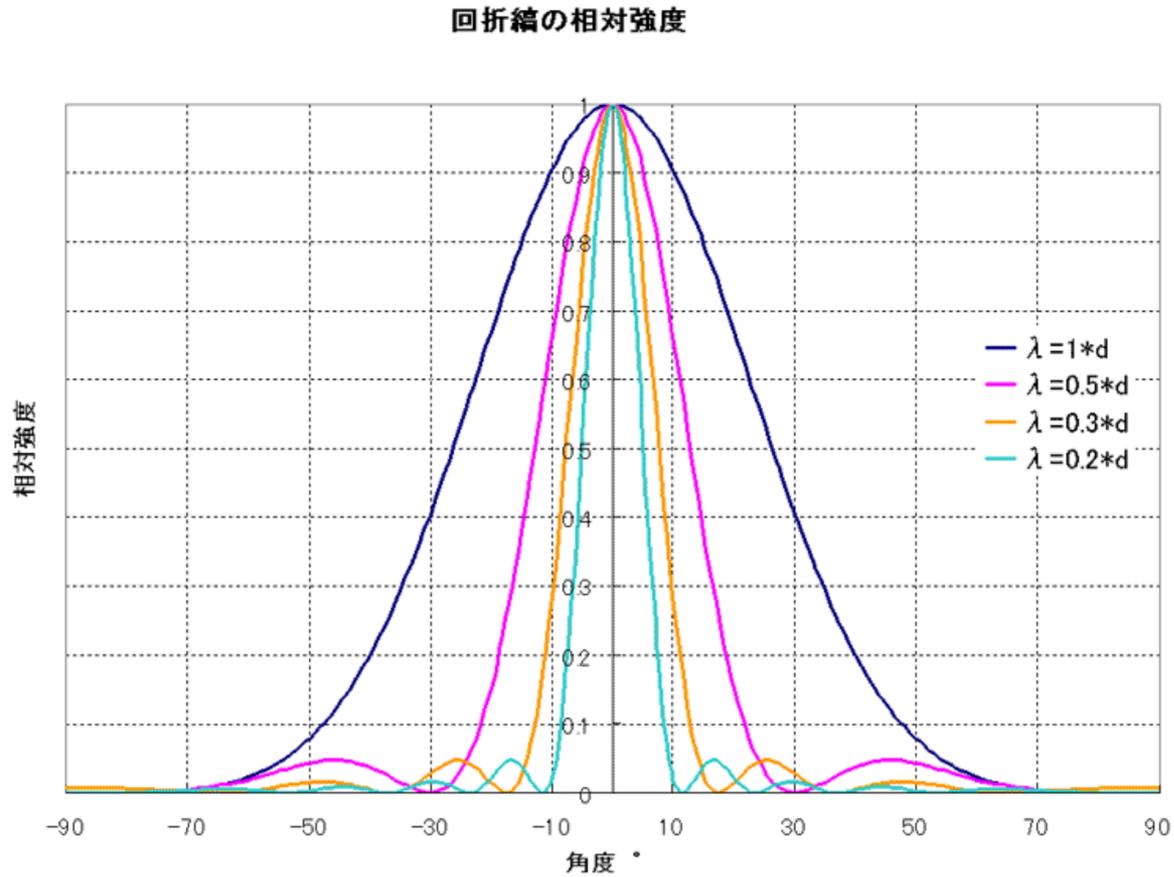
GaAsショットキーバリアダイオード(SBD)検出器

SBD)検出器

- Whiskerアンテナ（短いヒゲのようなアンテナ）で拾った遠赤外領域の電磁波を検波
- 波長 $340\mu\text{m}$ に最大感度を持つが、実験で用いる $50\sim 100\mu\text{m}$ の波長の光も検出できる



スリット幅による回折縞の強度分布



遠赤外分子レーザーによるSTJ検出器の応答試験での光子数

波長 $57.2\mu\text{m}$ 、出力 5nW 中に含まれる光子数 $\dots 1.4 \times 10^6$ 個/ μs



商品名：Quasioptical Thin Film

Attenuator TFA-4 N2512

特徴：厚さ $5\mu\text{m}$ のポリエステルフィルムに金属を蒸着したもの。
蒸着した金属の厚さによって透過率が決まる。

(光学フィルターの様なもの)

1枚当たり1%に減光

3枚で1ppm (10^{-6})に減光できる

Nb-AI STJ 検出器

Al層の効果

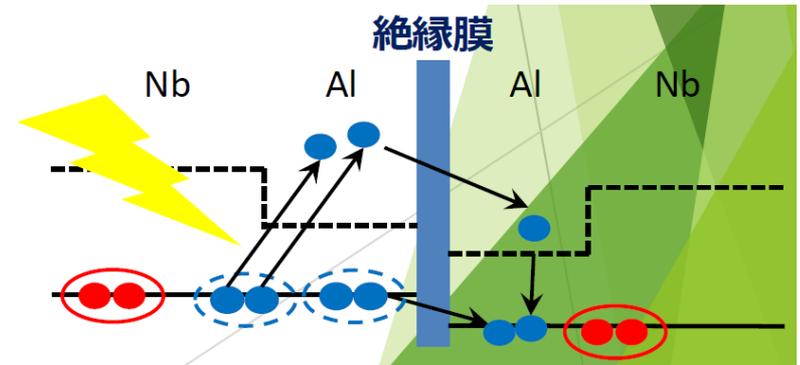
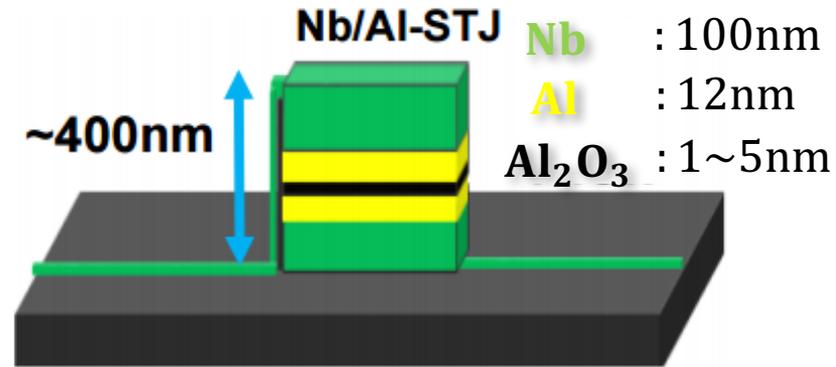
トラッピングゲイン (STJ内での増幅機構)

Al層があることにより、絶縁膜付近での準粒子の存在確率があがる。

トンネルした粒子がクーパー対に戻ろうとするとき、別のクーパー対を解離、新たに準粒子を生成することで発生準粒子を倍増させる。

転移温度

Nb単体よりも転移温度が下がり、エネルギーギャップも小さくなるため、エネルギー分解能に優れる。



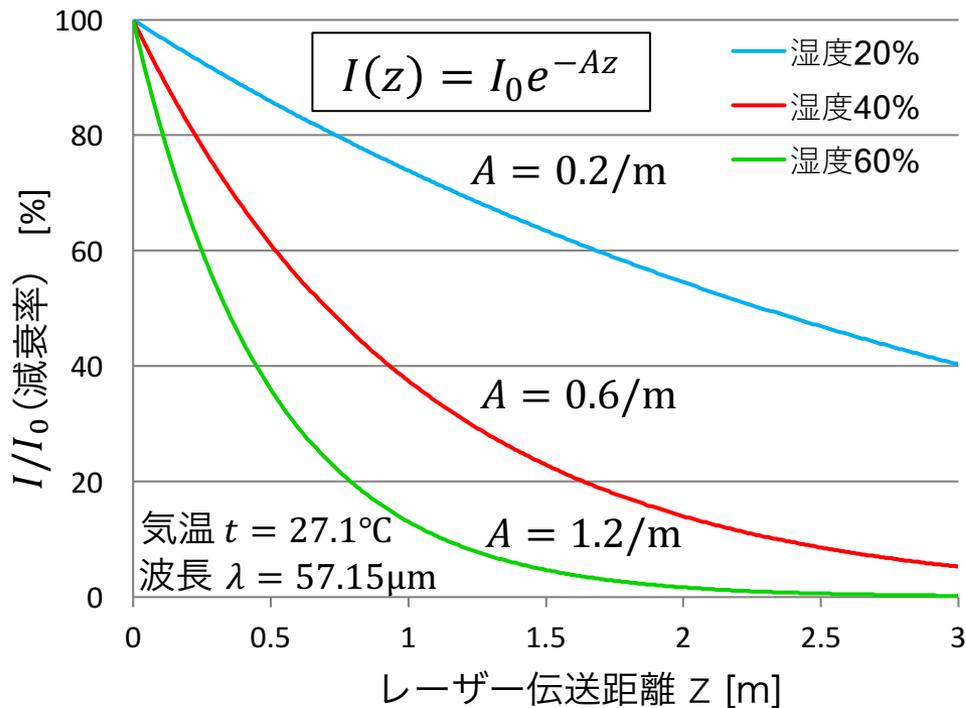
生成電荷数

$$N = G_{Al} \frac{E_{\gamma}}{1.7\Delta} \quad \left(\begin{array}{l} G_{Al} : \text{トラッピングゲイン} \\ E_{\gamma} : \text{光子のエネルギー} \end{array} \right)$$

	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

空気中の水分によるレーザー光の減衰

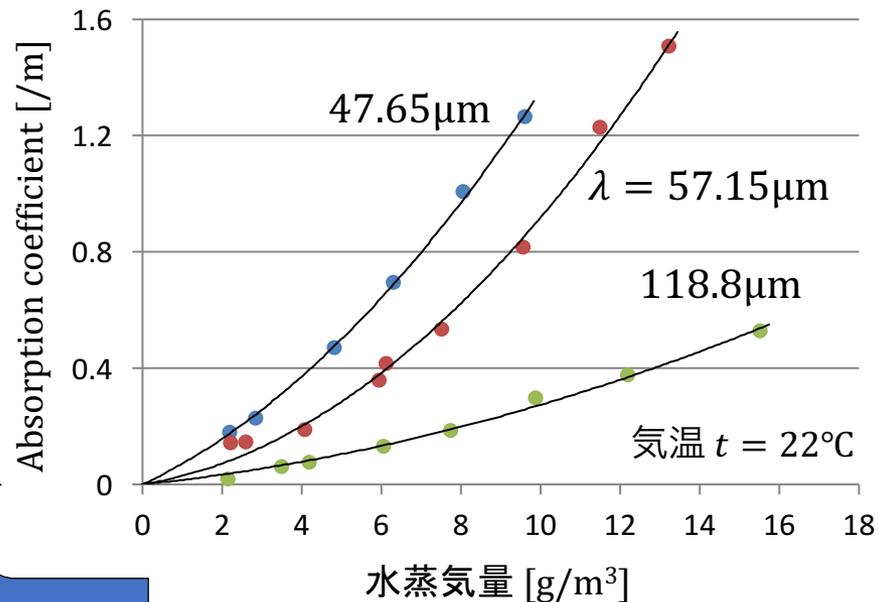
例) 27.1°C、相対湿度60%の時の吸収係数 $A = 1.2/m$ (測定値)、 $z = 1.2m$ 、波長 $\lambda = 57.15\mu m$ の時、 $I/I_0 = 10\%$ となる。



伝送距離 z における出力

$$I(z) = I_0 e^{-Az}$$

吸収係数 A (Absorption Coefficient) の測定値 (中部大学 中山さん博士論文データ参照)



気温27.1°C、各湿度における水蒸気量に対する A