

COBAND 実験における 較正用遠赤外光源開発

福井大工、中部大工^A、筑波大数理^B、福井大遠赤セ^C、近大理工^D

坂井誠、浅野千紗、中村昂弘、西村航、吉田拓生、岡島茂樹^A、中山和也^A、
金信弘^B、武内勇司^B、若狭玲那^B、小川勇^C、加藤幸弘^D

2017/1/24

ニュートリノ2体崩壊

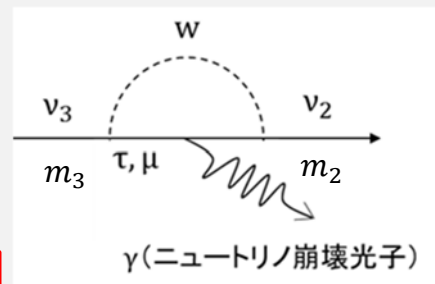
- ニュートリノが重い質量状態から軽い質量状態と光子に崩壊する現象

ニュートリノの質量値は次の式を使って求める

$$\text{ニュートリノ崩壊光子のエネルギー: } E_\gamma = \frac{\Delta m_{32}^2}{2m_3}$$

$$\begin{aligned} \text{ニュートリノの質量二乗差} \quad \Delta m_{32}^2 &= m_3^2 - m_2^2 \\ &= (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \end{aligned}$$

- ニュートリノの質量二乗差が分かっているのでニュートリノ崩壊光子のエネルギーが分かればニュートリノの質量を求めることができる



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

予想では崩壊光子のエネルギーは6~24meV程度

波長にすると52~204 μm の遠赤外領域の光子と予測される

COBAND実験

(Cosmic Background Neutrino Decay)

ニュートリノの崩壊の寿命は
標準理論だと 10^{43} 年
LR対称理論だと 10^{17} 年
と長く、崩壊確率がとても低いと
推測される



観測には大量のニュートリノが必要

そこで、宇宙背景ニュートリノに着目

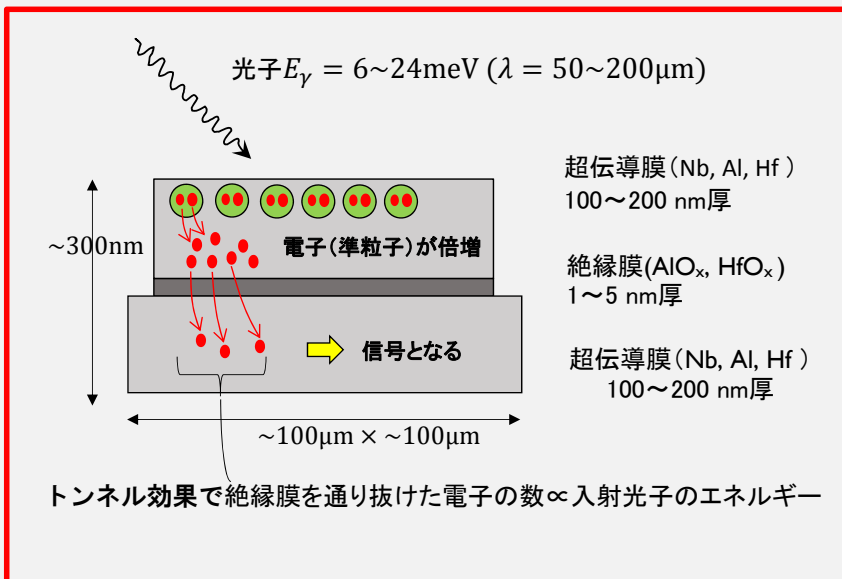
検出器を宇宙へ飛ばして宇宙背景ニュートリノ崩壊光子を測定

宇宙背景ニュートリノとは

宇宙が生まれる際に光子や電子などとともに生まれたニュートリノのこと。
いまだ、宇宙を飛び回っており、大量に存在していると考えられている。
その密度は 1 cm^3 あたりに約100個と予想される。

STJ検出器

測定対象となる超低エネルギーの光子を精度よく検出できる検出器が必要
そこでSTJ(Superconducting Tunnel Junction)検出器に着目



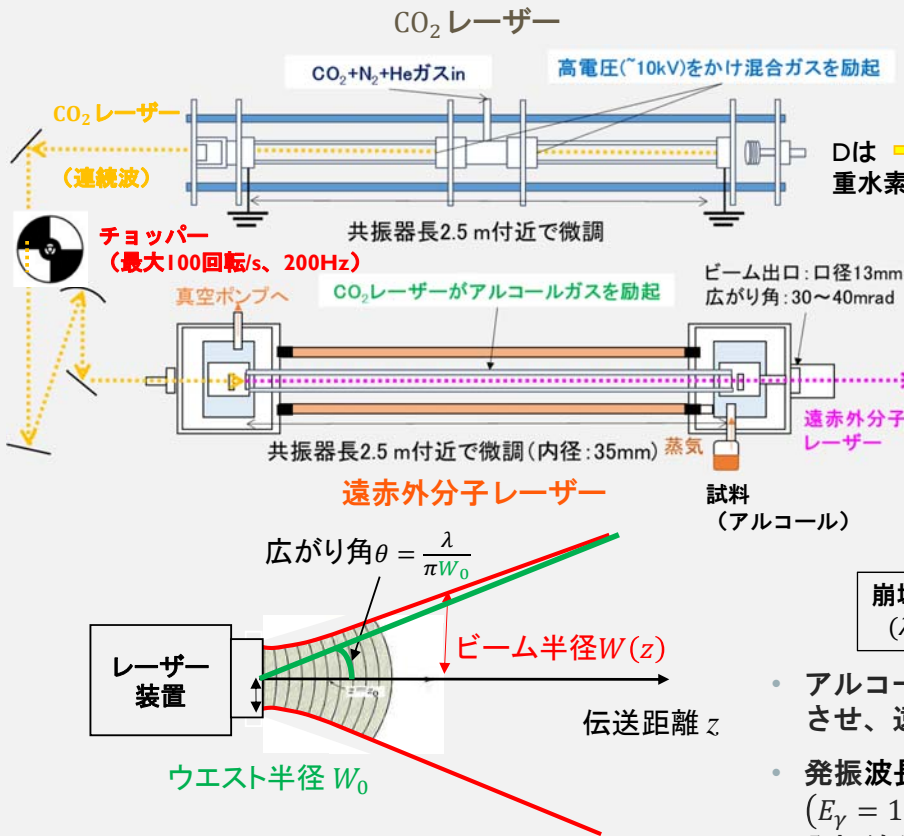
Nb-Al STJ

まだ開発中のため、このSTJ検出器の性能評価が必要

ニュートリノ崩壊光子の波長領域と同じ波長をもつ光源で測定をする

STJ 検出器の較正に用いる光源

遠赤外分子レーザーの発振線



試料ガス	波長 (μm)	エネルギー (meV)	出力 (mW)
CD ₃ OH	43.7	28.4	(6)
CD ₃ OH	52.9	23.5	4.2
CH ₃ OD	57.2	21.7	32
CD ₃ OH	86.4	14.4	(25)
CH ₃ OH	118.8	10.4	55
CH ₃ F ₂	184.3	6.7	(298)
CH ₃ Br	245.0	5.1	-
CD ₃ OH	253.7	4.9	(28)
CH ₃ Br	264.4	4.7	2
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

() 内は設計値

崩壊光子のエネルギーをカバー
($\lambda = 52 \sim 204 \mu\text{m}$, $E_\gamma = 6 \sim 24 \text{ meV}$)

- アルコールガスをCO₂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 $\lambda = 40 \sim 700 \mu\text{m}$ ($E_\gamma = 1.7 \sim 31 \text{ meV}$)の間の約70本の単色発振線から任意の1本を選択可能

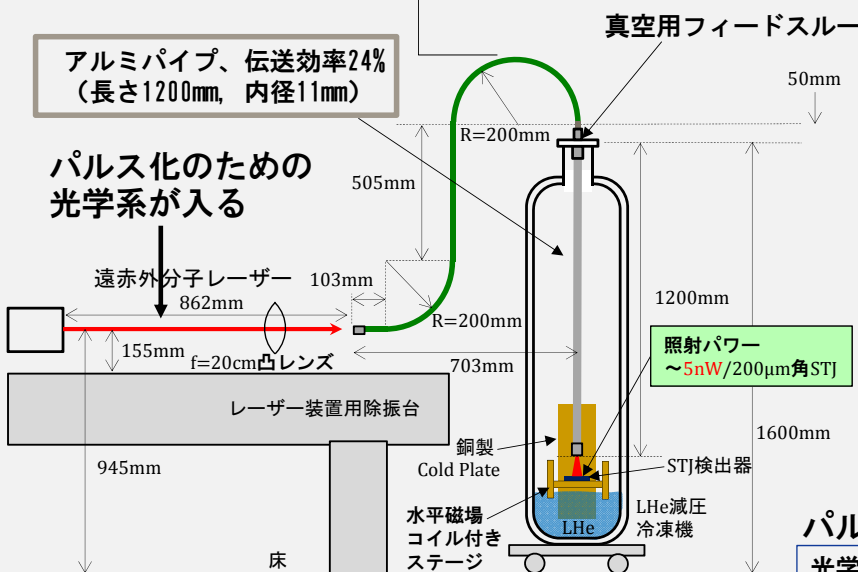
遠赤外分子レーザーによるSTJ検出器の応答試験

2016年3月9日~16日

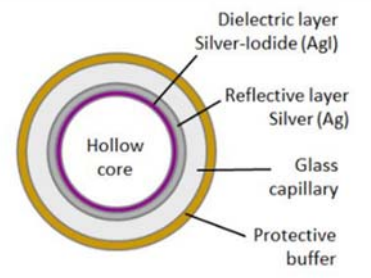
中空THzファイバー
(長さ1600mm, 内径0.75mm, 最小曲げ半径200mm)
入射効率9% × 伝送効率1.6% = 0.14%

アルミパイプ、伝送効率24%
(長さ1200mm, 内径11mm)

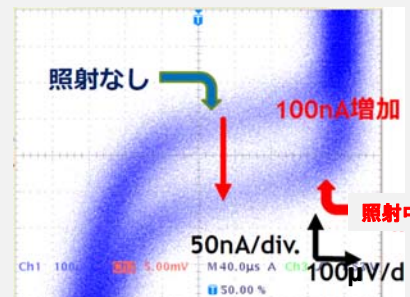
パルス化のための
光学系が入る



STJ検出器の性能評価実験の配置図



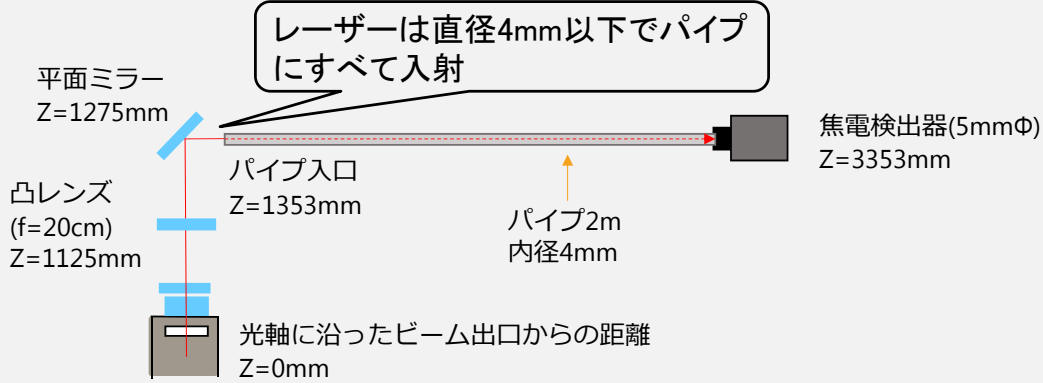
図：中空ファイバー断面



パルス光照射時のV-I 特性の変化

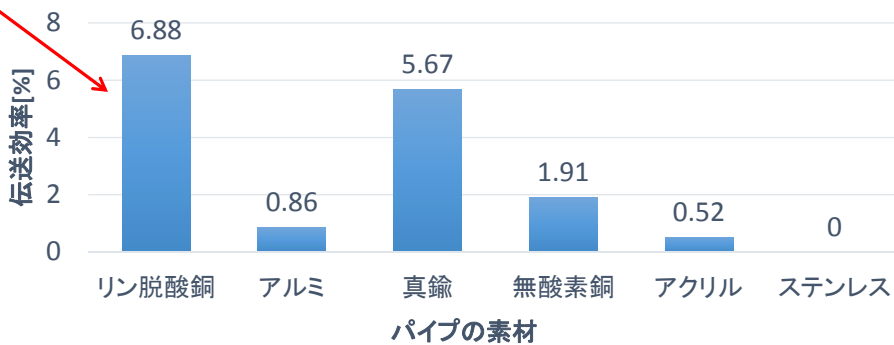
光学系がこのときよりも1~2m長くなる可能性があるため、空気中での減衰を考慮して、レーザーの照射パワーを上げる必要がある。

各素材のパイプの伝送効率測定



伝送効率が一番良い

FIRレーザー伝送効率(空気中の水分による吸収含む)



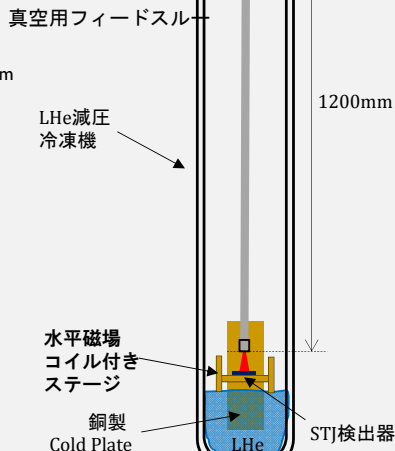
伝送路の検討

パイプを使った伝送予想図

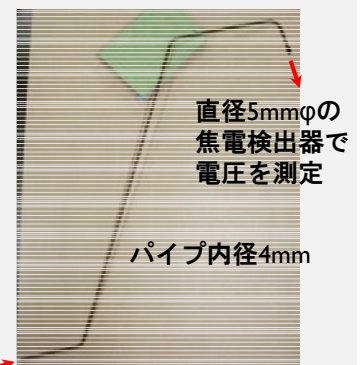
フィードスルーの透過率78%

銅パイプ (リン脱酸銅)
長さ1.2m、内径4mm

遠赤外分子レーザー
($\lambda = 57.2\mu\text{m}$)



リン脱酸銅パイプ



前の測定と同じ光学系で伝送効率を測定

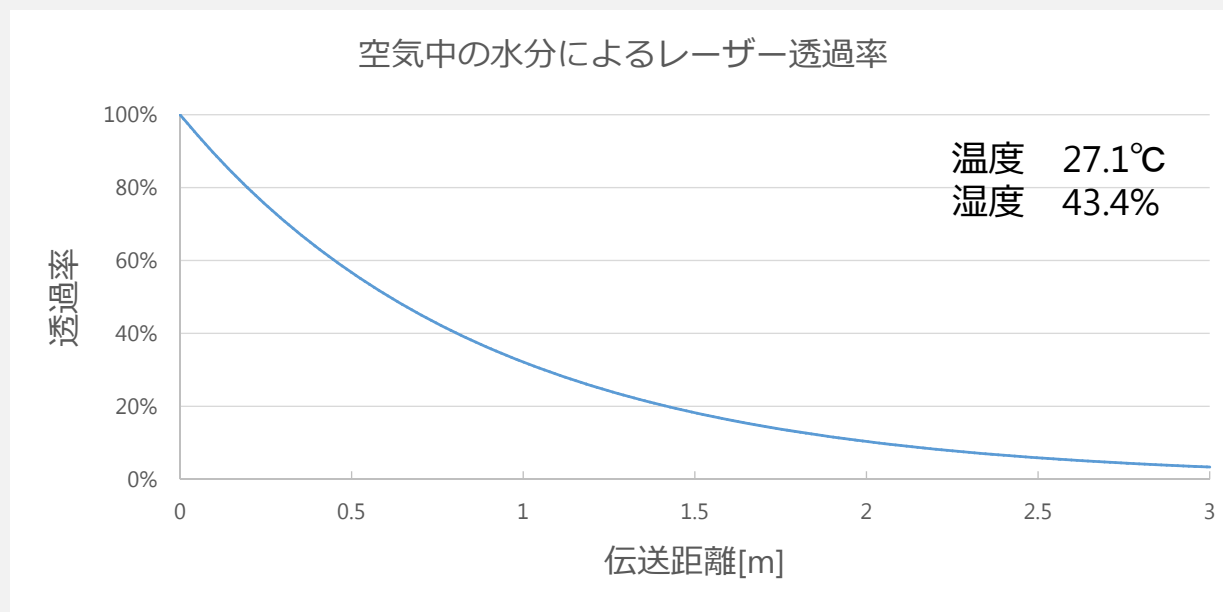
中空ファイバーの時の伝送効率0.14%に比べて約40倍

いくつかのパイプの測定で一番伝送効率の良かったリン脱酸銅パイプを測定で想定される形に曲げて測定

床

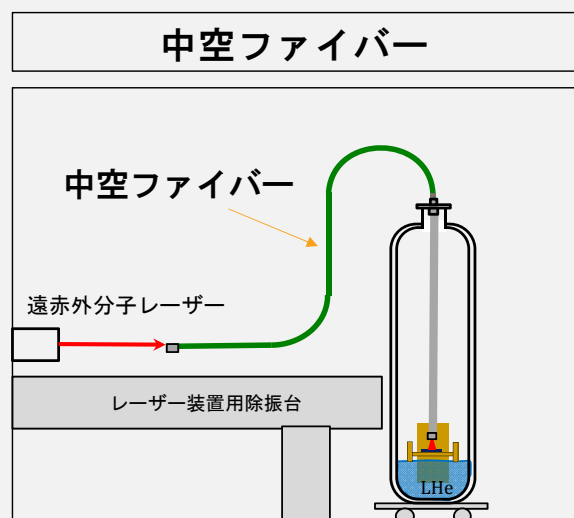
	パイプ入口 (mV)	パイプ出口 (mV)	伝送効率
まっすぐ	3764	563	15.0%
曲げた後	3224	178	5.5%

空気中の水分によるレーザーの減衰



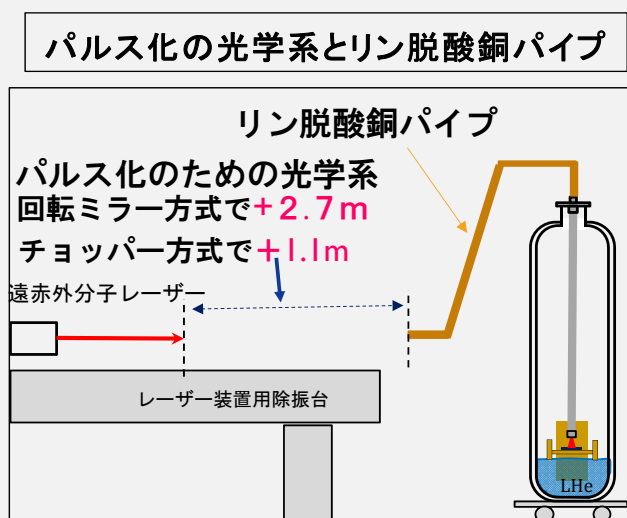
空気中の水分によるレーザーの透過率は2.7mで4.7%

伝送効率比較



中空ファイバーの伝送効率

0.14%



伝送効率

回転ミラー方式 $4.7\% \times 5.5\% = 0.26\%$
 チョッパー方式 $28.7\% \times 5.5\% = 1.58\%$

STJ検出器までの伝送効率が向上

中空ファイバーをリン脱酸銅パイプに変えると
光学系が伸びても十分な照射パワーが得られる

冷凍機内伝送路検討

冷凍機入り口からSTJ検出器までのレーザー伝送路についても考えたい

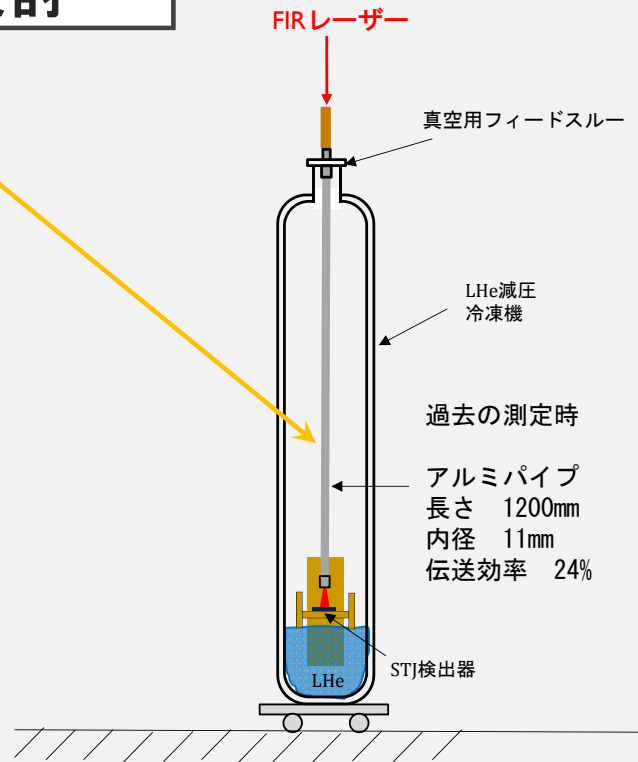
冷凍機内の伝送路の条件

- ・ 伝送効率が高い
- ・ 熱伝導率が低い

その条件で考えている候補

- ・ ステンレスパイプ
- ・ キュプロニッケルパイプ
- ・ 真鍮パイプ

ただし、表面状態の悪い長さ2m、内径4mmのステンレスパイプでは**伝送効率0%**だった。そのため表面状態の良いステンレスパイプで伝送効率の測定を行う予定。



冷凍機内伝送路検討

各素材の熱伝導率(4K)を考えると・・・

アルミニウム
熱伝導率(4K) $54.11\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

STJ検出器テストの時のパイプの素材

ステンレス

- ・ SUS304
 - 最も代表的なステンレスで鉄を主成分としてクロムを含む合金
 - 熱伝導率(4K) $0.27\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - 電気抵抗率(4K) $48 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$
- ・ SUS316L
 - SUS304にMoを添加したSUS316で炭素の割合の低いステンレス
 - 熱伝導率(4K) $0.27\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - 電気抵抗率(4K) $53 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$

キュプロニッケル

- ・ C7150
 - 銅が約7割、ニッケルが約3割の合金
 - 熱伝導率(4K) $0.35\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - 電気抵抗率(0K~) $30 \times 10^{-8}\Omega\text{m}$

真鍮

- ・ C2600
 - 銅が約7割、亜鉛が約3割の合金
 - 熱伝導率(4K) $1.97\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 - 電気抵抗率(293K) $61.6 \times 10^{-9}\Omega\text{m}$

ステンレスパイプやキュプロニッケルパイプ、真鍮パイプを伝送路として利用できればアルミニウムパイプより熱伝導率を抑えることができる

今後、FIRレーザーの伝送効率を測定

レーザーのパルス化

光信号に対する検出器の応答を調べたいので連続波である遠赤外レーザーをパルス化する必要がある。

目標

STJ検出器用のアンプの出力パルス幅に合わせてパルス幅を数 μs

パルス化の方法

- ・ 回転ミラー
- ・ チョッパー

連続波の分子レーザーのパルス化（回転ミラー）

（ただし、現有または市販のデバイスを用いる）

回転ミラー（353rad/s）



分子レーザー

連続波 (CW)

$\lambda = 118.8 \mu\text{m}$ (10 meV)
分子: CH_3OH
 CO_2 発振線: 9P (36)

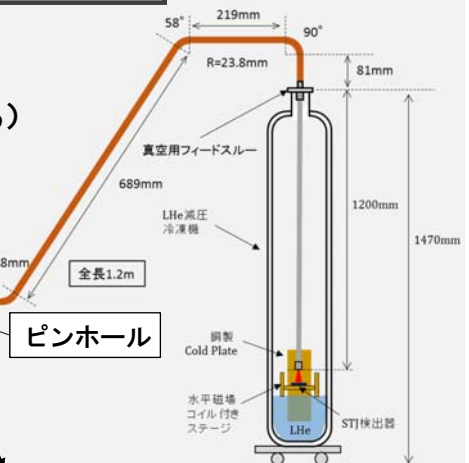
検出器を横切る
ビーム直径: 4.1 mm ($1/e^2$)

86 cm

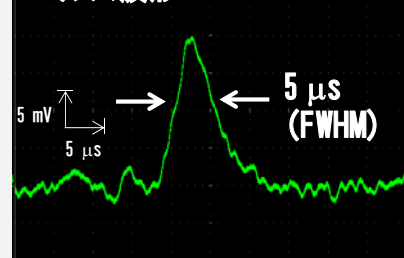
パルス化

$f = 75 \text{ cm}$

凹面鏡で
検出器受光面に
収束させる。



パルス波形

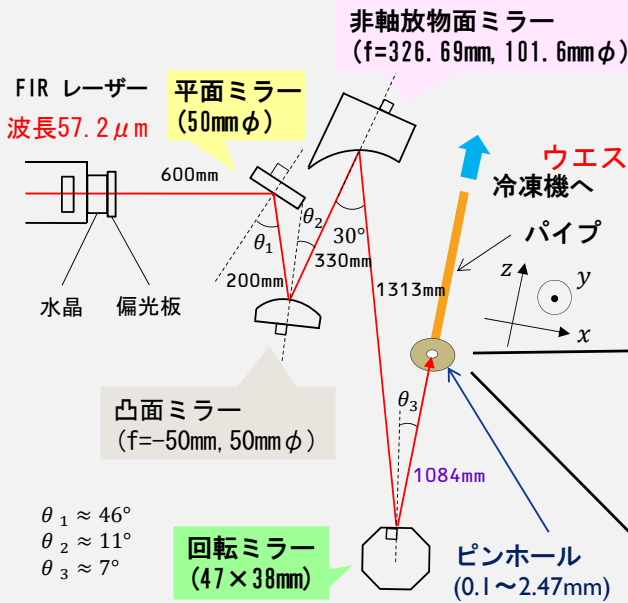


よりパルス幅を短くするために

- ・ ビームスポットをより小さく
- ・ ピンホールをより小さく
- ・ 回転ミラーからピンホールまでの距離をより長く

GaAsショットキーバリアダイオード検出器で測定

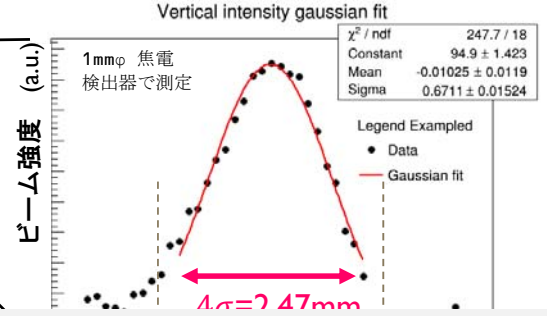
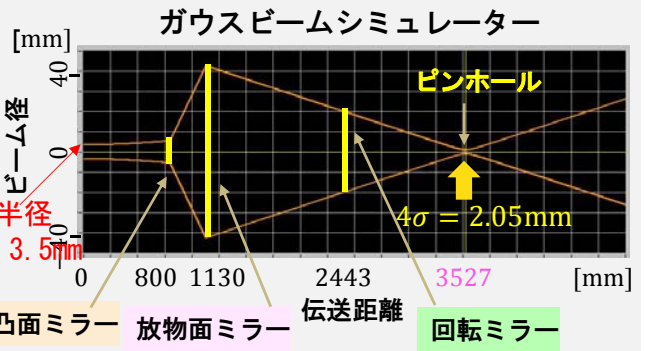
回転ミラー方式でのパルス幅



パルス幅の計算

$$\frac{2.35}{4} \times \frac{2.47[\text{mm}] + (0.1 \sim 2.47)[\text{mm}]}{1084[\text{mm}] \cos \theta} \times \omega$$

(ビーム輸送系の入り口のサイズ)



$2W$: ピンホールの位置でのビーム直径
 l : ピンホールのサイズ
 R : (光軸に沿った) 回転ミラーから検出器までの距離
 θ : 回転ミラーによる反射角
 ω : 回転ミラーの回転角速度

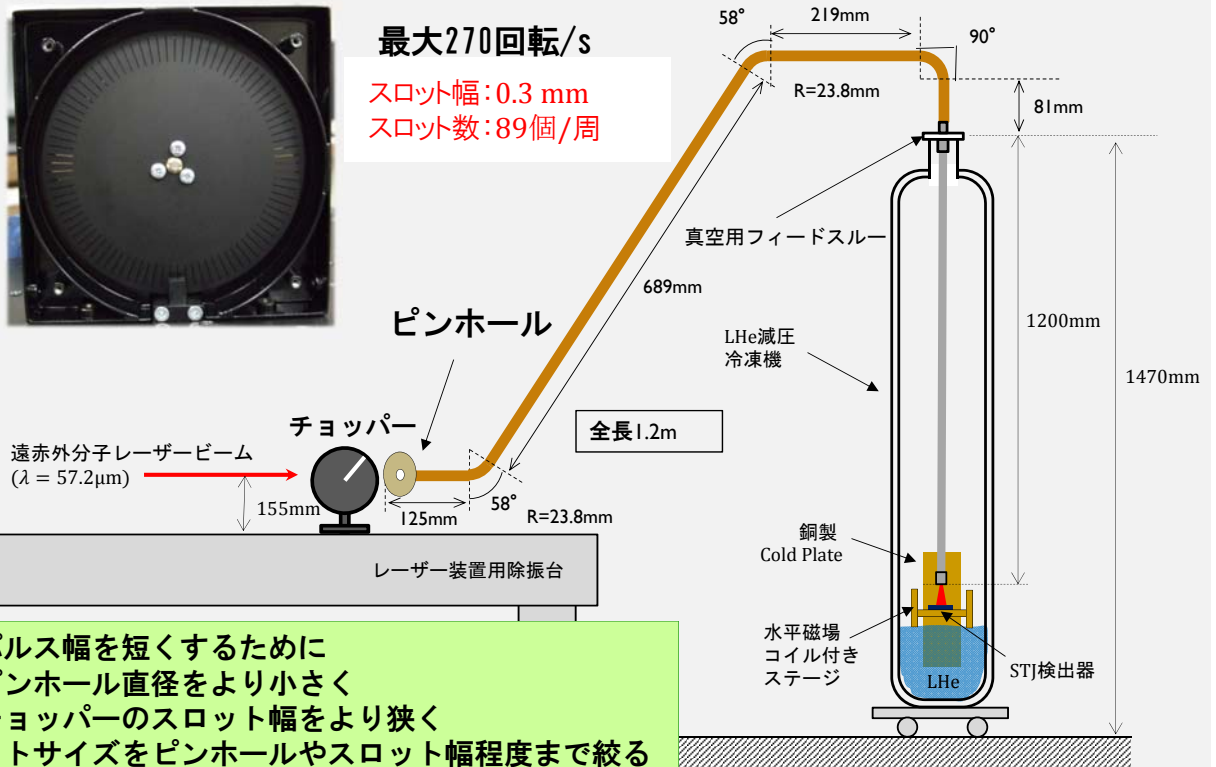
連続波の分子レーザーのパルス化 (チョッパー)

高速チョッパー



最大270回転/s

スロット幅: 0.3 mm
 スロット数: 89個/周

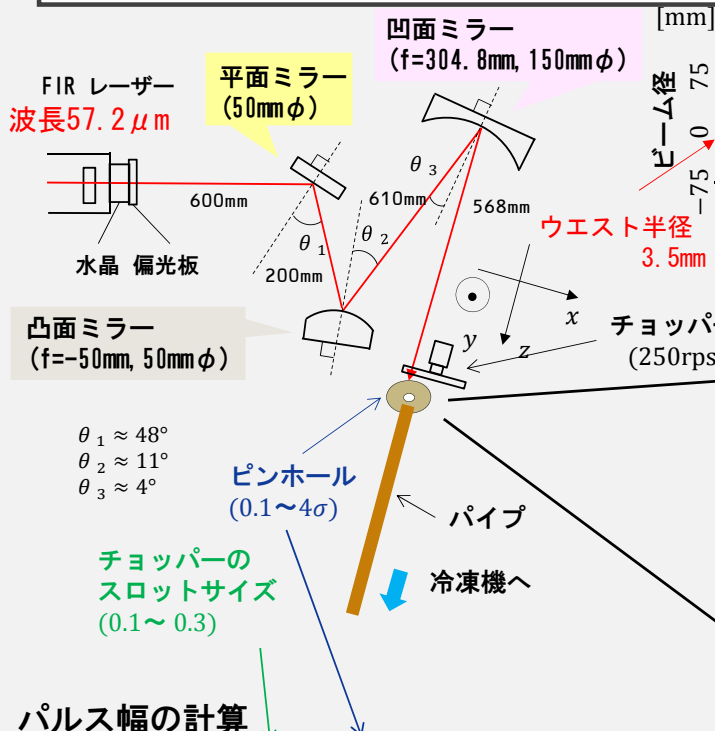


よりパルス幅を短くするために

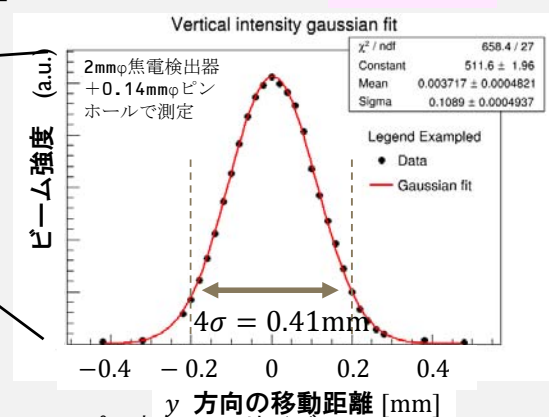
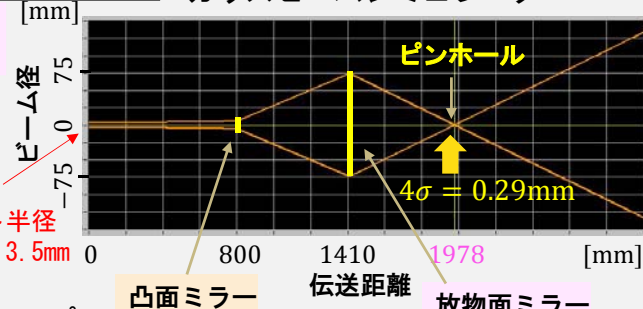
- ・ピンホール直径をより小さく
- ・チョッパーのスロット幅をより狭く

スポットサイズをピンホールやスロット幅程度まで絞る必要あり

チョッパー方式でのパルス幅



ガウスビームシミュレーター



パルス幅の計算

$$\frac{2.35}{4} \times \frac{(0.1 \sim 0.3) [\text{mm}] \pm (0.1 \sim 0.41) [\text{mm}]}{50 [\text{mm}] \times 2 \times \pi \times 270 [\text{rps}]} = 1.4 \sim 4.9 \text{ ns}$$

- l : ピンホールのサイズ
- d : チョッパーのディスク幅
- r : チョッパーのディスク半径
- Ω : チョッパーの回転角速度

可視光によるパルス化

遠赤外レーザーのパルス幅の予想精度を確認したい

目標

各方式でパルス幅の計算値の正確さを確認

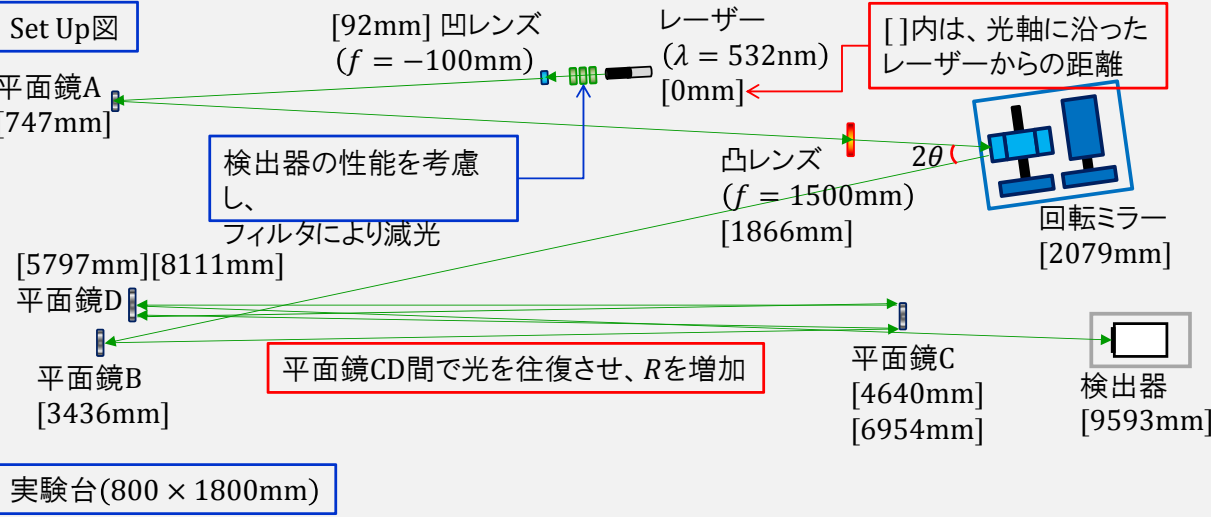
方法

遠赤外レーザーの代わりに可視光レーザーのパルス化でパルス幅を測定

計算値と測定値を比較

回転ミラーによる可視光レーザーのパルス化

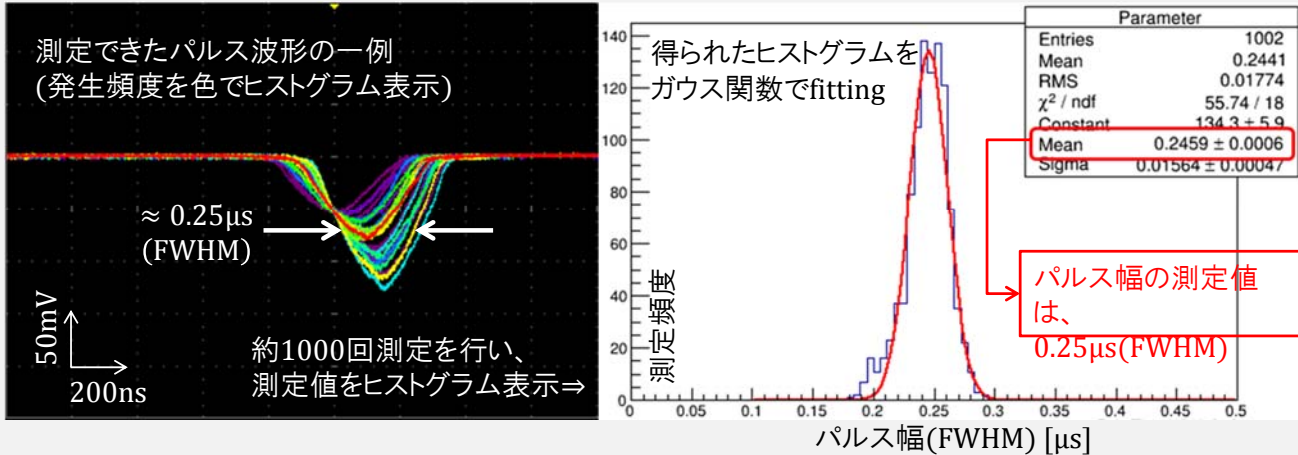
- 回転ミラーにより得られる。
 - のビーム直径
 - 面の直径
 - から検出器までの距離
 - る反射角
 - 転角速度
- 可視光レーザーの脈ス信号を測定し、脈ス幅の見積もり精度を確認する。



- このSet Upで期待される脈ス幅を見積もる。
- ガウスビームのシミュレーションにより、
- 実際に検出器を置いた位置では、 $2W = 1.225 \text{ mm}$

$$\Delta t (\text{FWHM}) = \frac{2.35}{4} \times (1.225 \text{ mm} + 1 \text{ mm}) \div (7514 \text{ mm} \times \cos 7.5^\circ \times 2 \times 353 \text{ rad/s}) = 0.25 \mu\text{s}$$

測定結果



0.25 μs の見積もりに対して、測定値は0.25 μs
⇒ ほぼ見積もり通りの測定結果が得られた。

高速チョッパーによる可視光レーザーのパルス化(予定)

- チョッパーにより得られるパルス幅は、以下の式で見積もることができる。
- $$\Delta t \text{ (FWHM)} = \frac{2.35}{4} \times \frac{(2W + d)}{r \times \Omega}$$
- }

$2W$: チョッパーの位置でのビーム直径

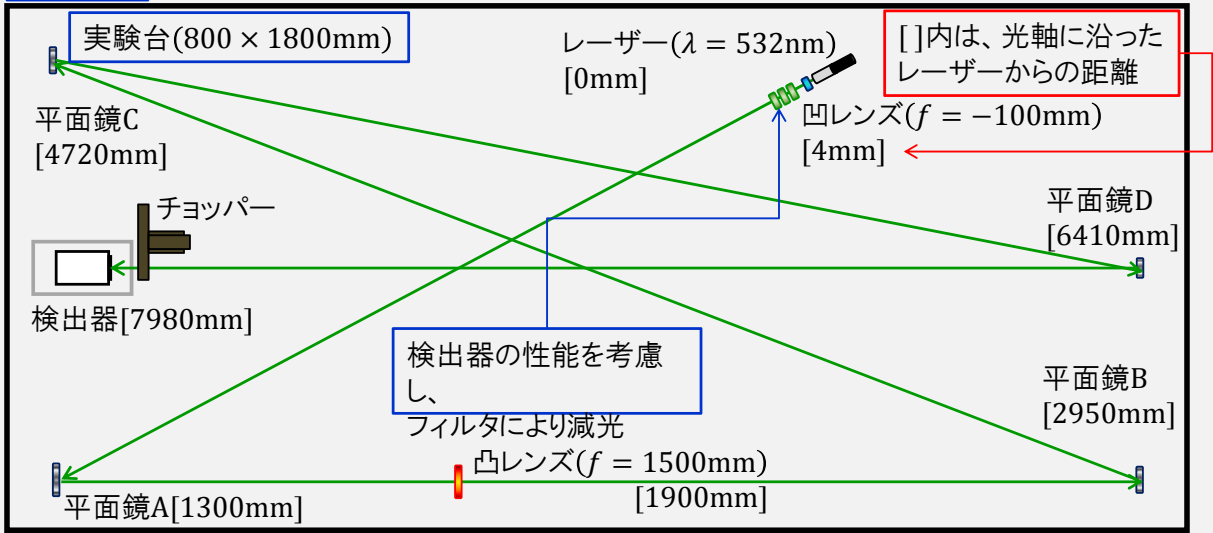
d : チョッピングディスクの-slot幅

r : ディスク半径

Ω : チョッパーの回転角速度

- 可視光レーザーのパルス信号を測定し、パルス幅の見積もり精度を確認する。

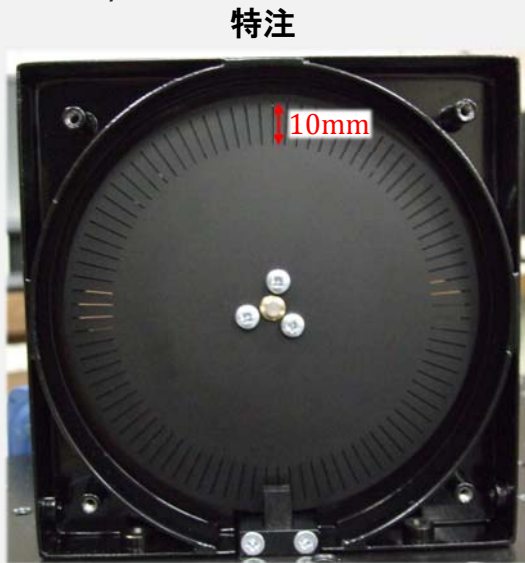
Set Up図



- このSet Upで期待されるパルス幅を見積もる。
- ガウスビームのシミュレーションにより、
 - 理論的に集光する位置でのビーム直径 $2W$ は、 $2W = 0.2067 \text{ mm}$

$$\Delta t \text{ (FWHM)} = \frac{2.35}{4} \times \frac{(0.2067 \text{ mm} + 0.34 \text{ mm})}{50 \text{ mm} \times 1700 \text{ rad/s}} = 3.5 \mu\text{s}$$

高速チョッパーの性能及び構造



1.5 ~ 270 rpsの範囲で、回転速度を調整可能

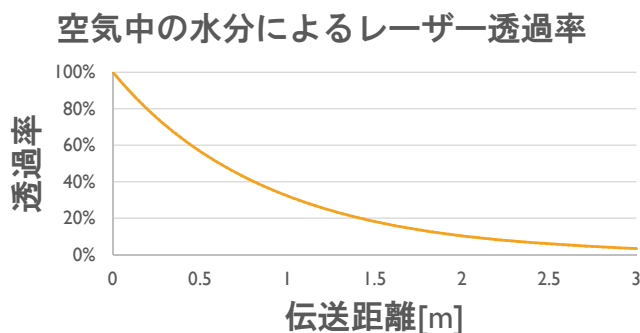
スロット幅: 0.3 mm
スロット数: 89個/周

特注

まとめと今後の課題

- 金属パイプ(リン脱酸銅)を中空ファイバーの代わりに使うことにより
伝送効率が向上し、**十分な照射パワーが得られる**
- 今後、冷凍機内の伝送路として**ステンレスパイプ**や**キュープロニッケルパイプ**、**真鍮パイプ**が利用できるか測定する
- 回転ミラー方式での可視光のパルス化では測定値がほぼ理論値と一致したため、**計算によるパルス幅の見積もりができる**ことが分かった
- チョッパーでの可視光レーザーのパルス化も行う予定
- 今後、遠赤外レーザーで回転ミラー方式とチョッパー方式で数 μ sのパルス幅を目標にパルス化を行う

空気中の透過率



- 温度27.1°C
- 湿度43.4%
- 空気中の水分によるレーザーの透過率は2mで10%

中空ファイバーの時
伝送効率 0.14%

5nW

照射パワー3.9倍

光学系を2m伸ばして
リン脱酸銅パイプを使うと仮定
伝送効率 $10\% \times 5.5\% = 0.55\%$

19.5nW

中空ファイバーをリン脱酸銅パイプに変えると
光学系が伸びても十分なパワーが得られる

冷凍機内伝送路検討

3月の実験の時の
パイプの素材

アルミニウム^o
熱伝導率(4K) 54.11W/(m・K)

ステンレス

- SUS304
 - 最も代表的なステンレスで鉄を主成分としてクロムを含む合金
 - 熱伝導率(4K) 0.27W/(m・K)
- SUS316L
 - SUS304にMoを添加したSUS316で炭素の割合の低いステンレス
 - 熱伝導率(4K) 0.27W/(m・K)

or

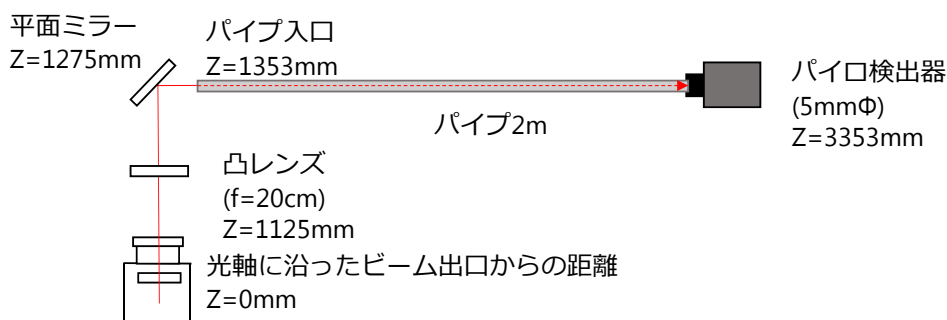
キュプロニッケル

- C7150
 - 銅が約7割、ニッケルが約3割の合金
 - 熱伝導率(4K) 0.35W/(m・K)

→ ステンレスパイプやキュプロニッケルパイプを伝送路として利用できればアルミニウムパイプより熱伝導率を抑えることができる

今後、FIRレーザーを伝送できるか測定

伝送管の材質による伝送率の変化

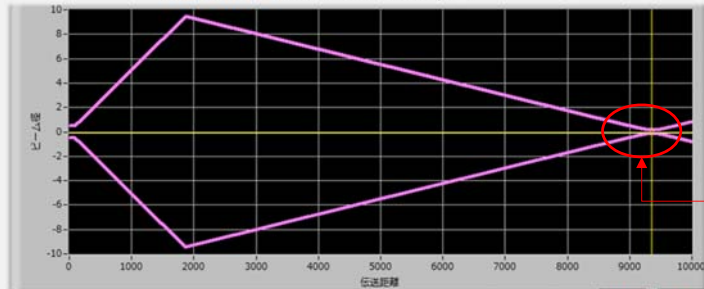


	パイプ入口 (mV)	パイプ入口 Offset(mV)	パイプ出口 (mV)	パイプ出口 Offset(mV)	伝送効率 (%)	水分による 減衰率(%)	伝送効率 (湿度0%)	温度(°C)	湿度(%)
リン脱酸銅	2660	8.75	183	7.17	6.88	15.70	43.80	28.2	36.4
アルミ	1890	33.1	23	7.1	0.86	16.70	5.15	28.1	35.9
真鍮	1540	12.8	94.4	7.75	5.67	17.80	31.85	28.0	35.4
無酸素銅	1340	12.6	32.8	7.49	1.91	17.00	11.22	27.9	36.9
アクリル	5230	41.5	34.4	7.35	0.52	16.30	3.20	28.0	37.8
ステンレス	5490	30.9	0	0	0.00	14.40	0.00	28.0	38.8

レーザーのパルス化 [シミュレーション]

- 実際に測定した距離に2枚のレンズを設定し、シミュレーションを実行する。
 - 回転ミラーを配置した位置 ($z = 2079 \text{ mm}$) では、 $2W = 36.46 \text{ mm}$
 - APDを配置した位置 ($z = 9593 \text{ mm}$) では、 $2W = 1.225 \text{ mm}$
 - 回転ミラーからAPDまでの距離 R は、 $R = 9593 - 2079 = 7514 \text{ mm}$
- 回転ミラー及びAPDを実際の位置に配置したとして、パルス幅 Δt を計算すると、

$$\Delta t = \frac{2.35}{4} \frac{(1.225 \text{ mm} + 1 \text{ mm})}{7514 \text{ mm} \times (2 \times 353 \text{ rad/s})} = 0.25 \mu\text{s (FWHM)}$$



APDの配置位置 ($z = 9593 \text{ mm}$) は、シミュレーションでの集光位置 ($z = 9362 \text{ mm}$) よりも、231mm 後ろだった。

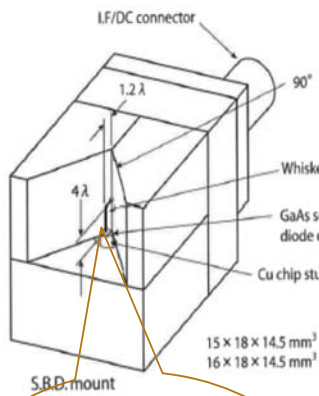
レーザー波長
532 nm = 0.000532 mm

カタログによると、
ビーム径 $1/e^2: 1 \text{ mm}$



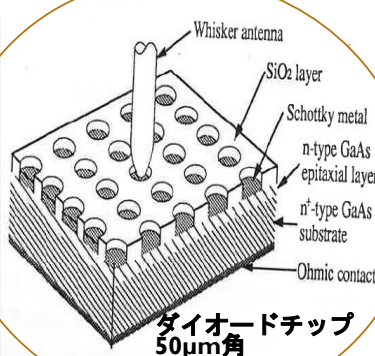
レーザーの波長 (532nm) に対応した焦点距離

GaAsショットキーバリアダイオード(SBD)検出器

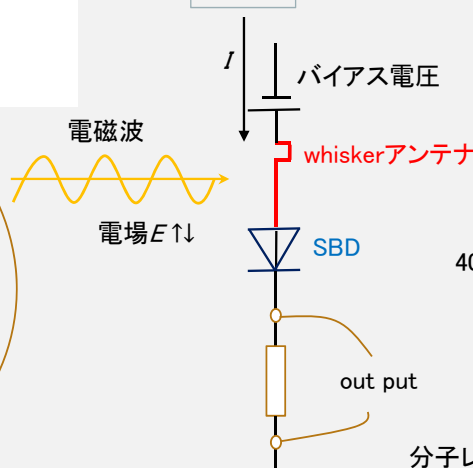


(SBD)検出器

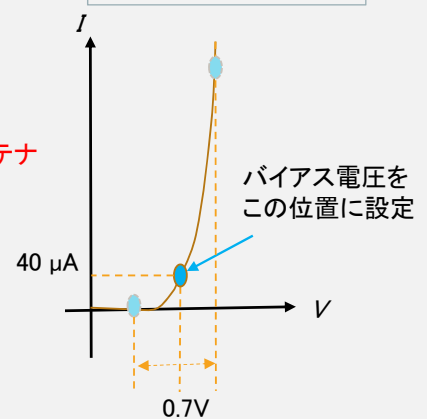
- Whiskerアンテナ (短いヒゲのようなアンテナ) で拾った遠赤外線領域の電磁波を検波
- 波長 $340 \mu\text{m}$ に最大感度を持つが、実験で用いる $50 \sim 100 \mu\text{m}$ の波長の光も検出できる



回路図



SBDの順方向I-V特性



分子レーザーの電場によって揺さぶる
正の電場が来たときのみ電流が流れる

波長 57.2 μm 、出力 5nW中に含まれる光子数・・・ 1.4×10^6 個/ μs



商品名：Quasioptical Thin Film Attenuator TFA-4 N2512
 特徴：厚さ5 μm 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

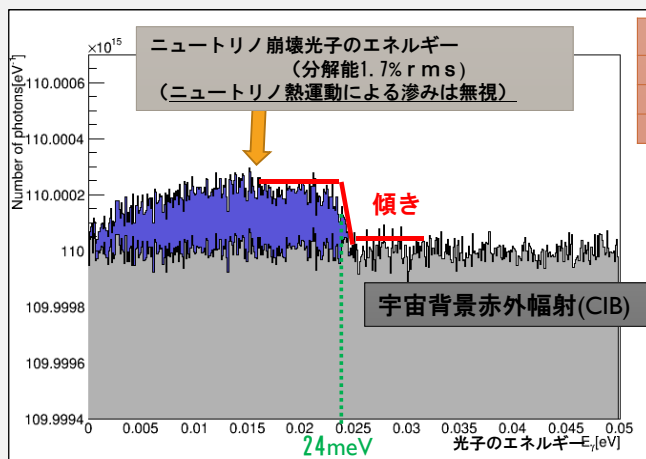


レーザー光を何桁も減光させることは今後の課題

検出原理

ニュートリノ崩壊光子のエネルギーとバックグラウンド (CIB) を足し合わせたヒストグラム

シミュレーション条件

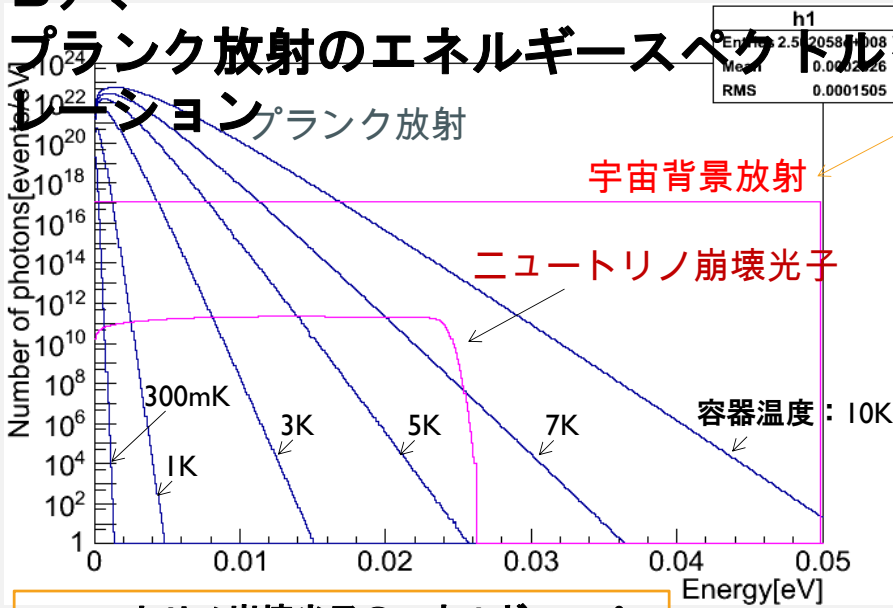


観測時間	189日
検出器の大きさ	直径 20 cm
検出器の視野角	0.5°
検出器の分解能	1.7% rms

- ・エネルギーで微分することで、傾きを求める。
- ・エッジの部分 (E_γ) で傾きが急に大きくなる。
- ・崩壊現象の有無を確認。

ニュートリノ崩壊光子、宇宙背景放射 (CMB)、

プランク放射のエネルギースペクトルをシミュレーション



AKARIの観測結果から予測

ニュートリノ崩壊光子のエネルギースペクトル

$$\frac{dN}{dE_\gamma dS d\Omega dt} = \frac{\rho c}{4\pi r H_0 E_\gamma} \left[\left(\frac{E_0}{E_\gamma} \right)^3 \Omega_M + \Omega_\Lambda \right]^{-\frac{1}{2}}$$

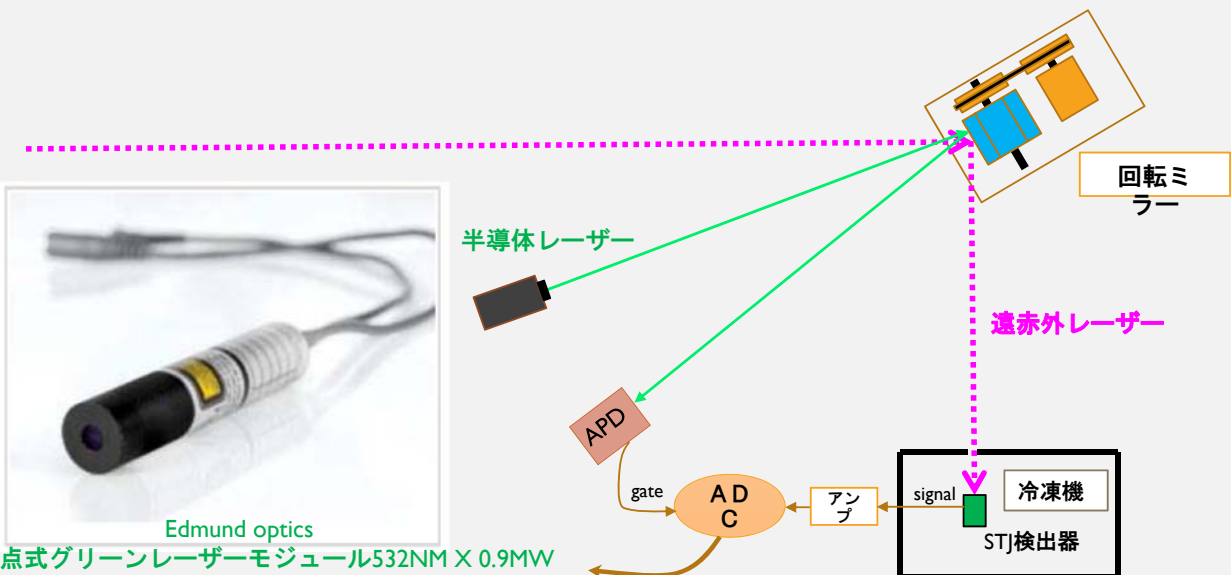
Ref. Physics Procedia, Volume 37, 2012, Pages 667-674

観測条件

観測時間	189日
検出器のサイズ	経口20cm
検出器の視野角	0.5°
検出器の分解能	Hf-STJを想定(1.7%)
STJのサイズ	100μm × 100μm

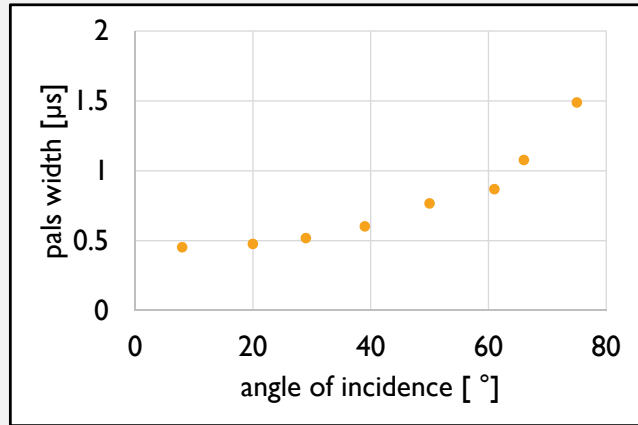
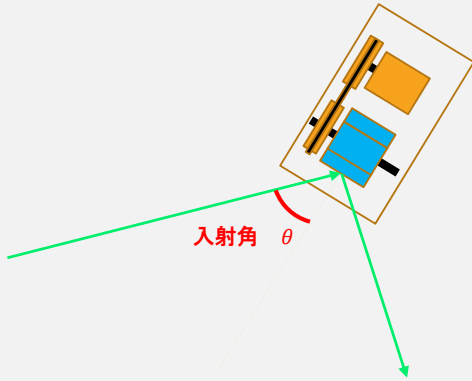
なぜ遠赤外レーザーをパルス化するのか？

- ・ 光信号に対する検出器の応答を調べる為
- ・ 検出器に入った光が遠赤外分子レーザーの光であることを保証する為



レーザー入射角とパルス時間幅

半導体レーザーを入射角 θ を変えて回転ミラーに入射
 その時々のパルス時間幅を測定。
 回転ミラーから検出器までの距離は325cmと一定



ニュートリノ崩壊現象の寿命

- τ_{32} : 最も重いニュートリノが、2番目に重いニュートリノに崩壊する際の寿命
- 標準理論 (左巻きweak bosonのみが存在)

$$\tau_{32}^{-1} = \frac{9\alpha G_F^2}{2048\pi^4} \left(\frac{\Delta m_{32}^2}{m_3}\right)^3 (m_3^2 + m_2^2) \left(\frac{m_\tau^2}{M_{WL}^2}\right)^2$$

- ($m_2 = 100$ meV, $m_3 = 112$ meV)と仮定すると、 $\tau_{32} = 8.8 \times 10^{42}$ 年

- LR対称理論 (左巻きと右巻きのweak bosonが両方存在)

$$\tau_{32}^{-1} = \frac{\alpha G_F^2}{32\pi^4} \left(\frac{\Delta m_{32}^2}{m_3}\right)^3 |U_{32}|^2 |U_{33}|^2$$

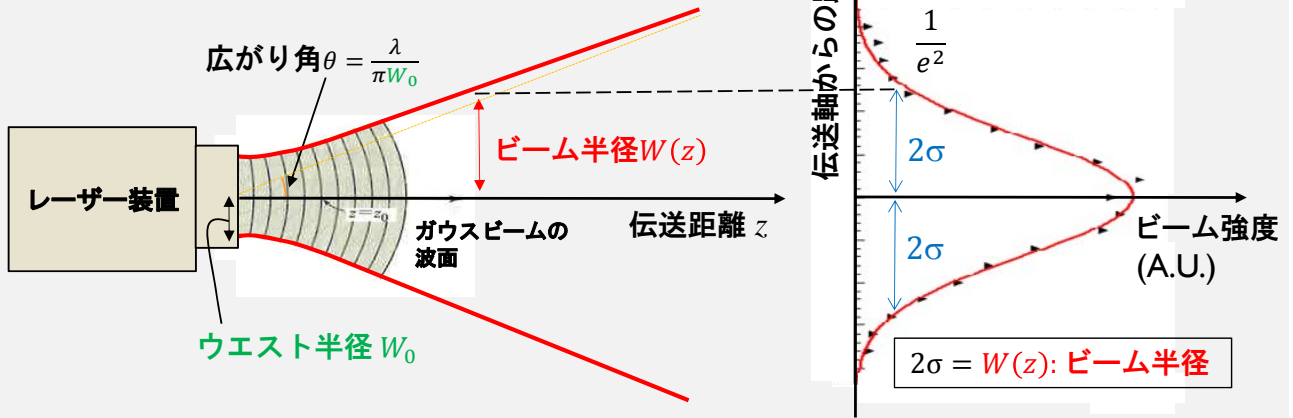
$$\left\{ \frac{9}{64} (m_3^2 + m_2^2) \left(\frac{m_\tau^2}{M_{WL}^2}\right)^2 \left(1 + \frac{M_{WL}^2}{M_{WR}^2}\right)^2 + 4m_\tau^2 \left(1 - \frac{M_{WL}^2}{M_{WR}^2}\right)^2 \sin^2 2\zeta \right\}$$

- ($m_2 = 100$ meV, $m_3 = 112$ meV)と仮定すると、 $\tau_{32} = 3.2 \times 10^{18}$ 年

$\alpha = 7.30 \times 10^{-3}$: 微細構造定数 $G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$: フェルミカップリング定数 $\Delta m_{32} \equiv m_3^2 - m_2^2 = 2.42 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$: ニュートリノの質量2乗差 $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$: タウ粒子の質量	$M_{WL} = 80.4 \text{ GeV}$: 左巻きweak bosonの質量 $M_{WR} = 0.715 \text{ TeV}$: 右巻きweak bosonの質量下限値 $\sin \zeta = 0.013$: 右巻きと左巻きの混合角上限値 $ U_{32} = U_{33} = 1/\sqrt{2}$: ニュートリノ混合行列の要素
---	---

- 2つのモデルで寿命を計算した結果、共に極めて長い値が得られ、その崩壊確率は極めて低いことが予想される

ガウスビームについて



- ・ 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

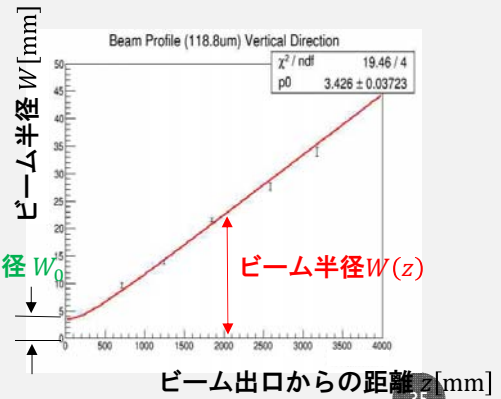
$$\text{ビーム半径 } W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2}$$

実測値：

波長 $118.8\mu\text{m}$ (CO_2 : 9P(36)、分子 CH_3OH) のとき、ウエスト半径 W_0

ウエスト半径 $W_0 = 3.4\text{ mm}$

広がり角 $\theta_0 = 11\text{ mrad}$



ビームの光子数

波長: $\lambda = 57.2\mu\text{m}$

$$\begin{aligned} \text{1光子のエネルギー: } E &= h \frac{c}{\lambda} \\ &= 3.78 \times 10^{-21} \text{ J} \end{aligned}$$

光子数

$$\begin{aligned} \frac{\text{照射パワー}}{\text{1光子のエネルギー}} &= \frac{5nW}{3.78 \times 10^{-21}} = 1.44 \times 10^{11} \text{ (I/s)} \\ &= 1.44 \times 10^5 \text{ (I/}\mu\text{s)} \end{aligned}$$

ニュートリノの質量の上限

- ニュートリノ振動実験による質量2乗差の値

$$- m_3^2 - m_2^2 = (2.42 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$- m_2^2 - m_1^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

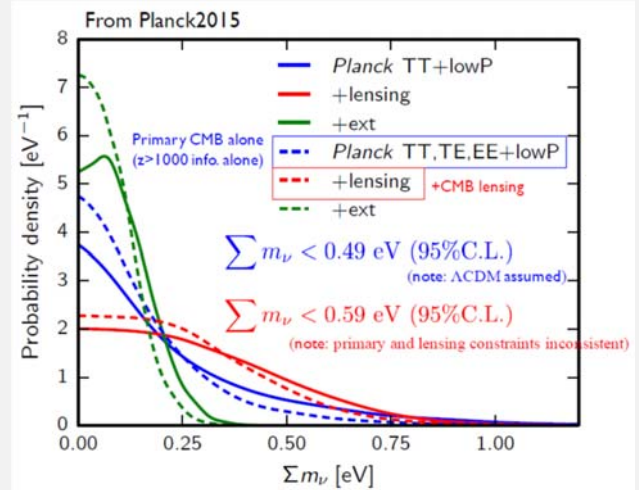
- ニュートリノ崩壊光子のエネルギー E_γ

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

→ E_γ の測定により、ニュートリノの質量が決定

- 上限値は、宇宙赤外線背景放射の一様性の観測結果に基づき推定

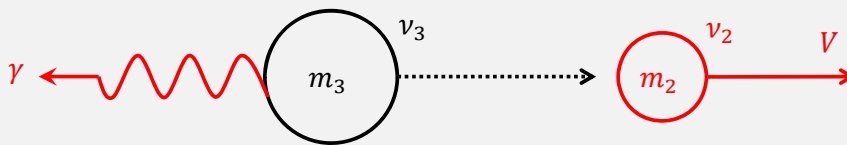
$$\sum m_\nu \equiv m_1 + m_2 + m_3 < 0.59 \text{ eV}$$



↑ニュートリノフロンティア2015での高田昌広氏の発表スライドより引用

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

ニュートリノ崩壊光子のエネルギー E_γ



静止系におけるニュートリノ崩壊モデル(2体崩壊)

- 光子のエネルギー E_γ と運動量 P_γ

$$E_\gamma = h\nu \quad P_\gamma = \frac{E_\gamma}{c} \left(= h \frac{\nu}{c} \right)$$

- 速度 V 、質量 m_2 のニュートリノのエネルギー E_ν と運動量 P_ν

$$E_\nu = \frac{m_2 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad P_\nu = \frac{m_2 V}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}$$

- 2体崩壊である為、エネルギー保存則と運動量保存則より

$$m_3 c^2 = E_\gamma + E_\nu \quad 0 = P_\gamma - P_\nu$$

- 各式を整理して、 E_γ を導出

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

- $(c = 1, h = 1)$ とする自然単位系を導入

$$E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3} \equiv \frac{\Delta m_{32}^2}{2m_3}$$