

Far-Infrared source R&D

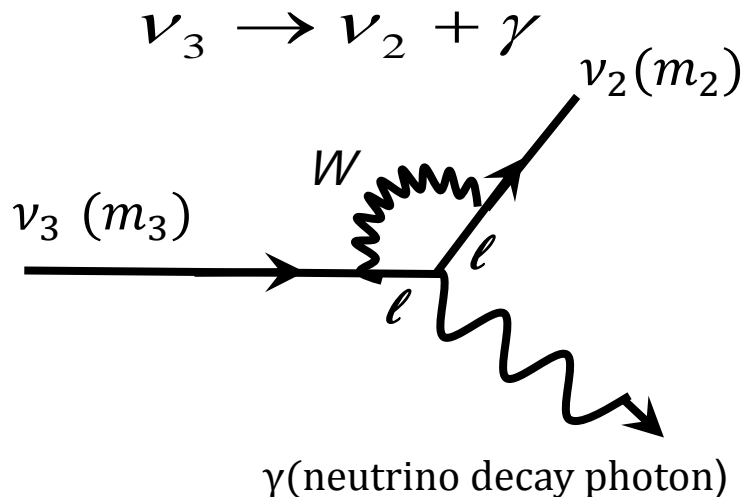
福井大工, 中部大工^A, 筑波大数理^B, 福井大遠赤セ^C,
○廣瀬龍太, 吉田拓生, 加藤圭騎, 岡島茂樹^A, 中山和也^A, 金信弘^B, 武内勇司^B,
笠原宏太^B, 市村龍哉^B, 奥平琢也^B, 森内航也^B, 先崎 蓮^B, 小川勇^C,

ニュートリノフロンティア

2014年 12月23日

ニュートリノ崩壊現象

ニュートリノ崩壊のファインマン図



- ・ニュートリノ振動実験等により質量二乗差が測定。しかしニュートリノの質量の値は未知
⇒ニュートリノ振動実験に着目
- ・ニュートリノ崩壊光子のエネルギー E_γ

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

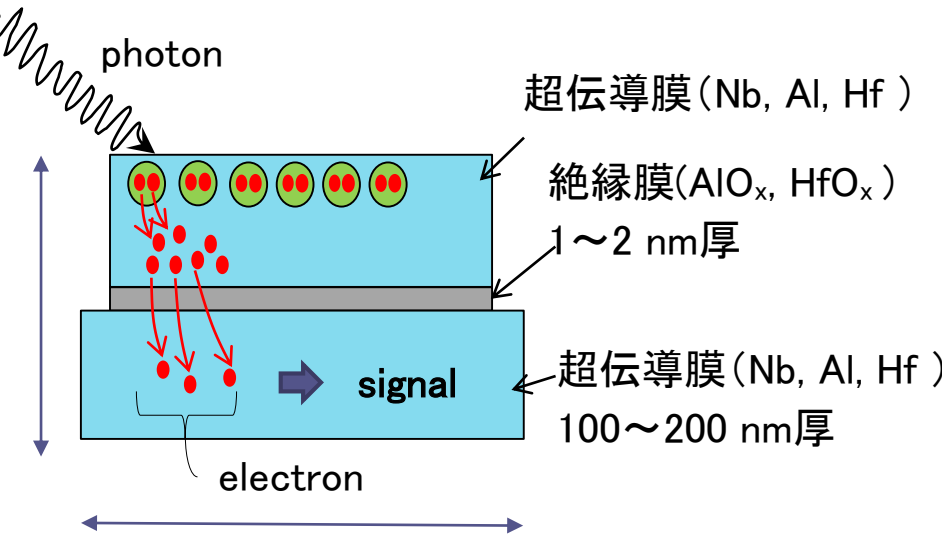
(二体崩壊なので E_γ はmonochromatic)

- ・ $m_1 = 0 \text{ meV}$, $m_2 = 8.7 \text{ meV}$, $m_3 = 50 \text{ meV}$ と仮定すると
 $E_\gamma = 24 \text{ meV}$ ($51 \mu\text{m}$)

⇒本研究では $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$ ($\lambda = 51 \sim 89 \mu\text{m}$)
付近の光(遠赤外領域)と予測し探索を行う

m_1 (meV)	m_2 (meV)	m_3 (meV)	E_γ (meV)	波長 λ (μm)
0	8.7	50	24	51
24	36	61	20	62
70	71	87	14	89

STJ検出器(Superconducting Tunnel Junction)



STJ検出器

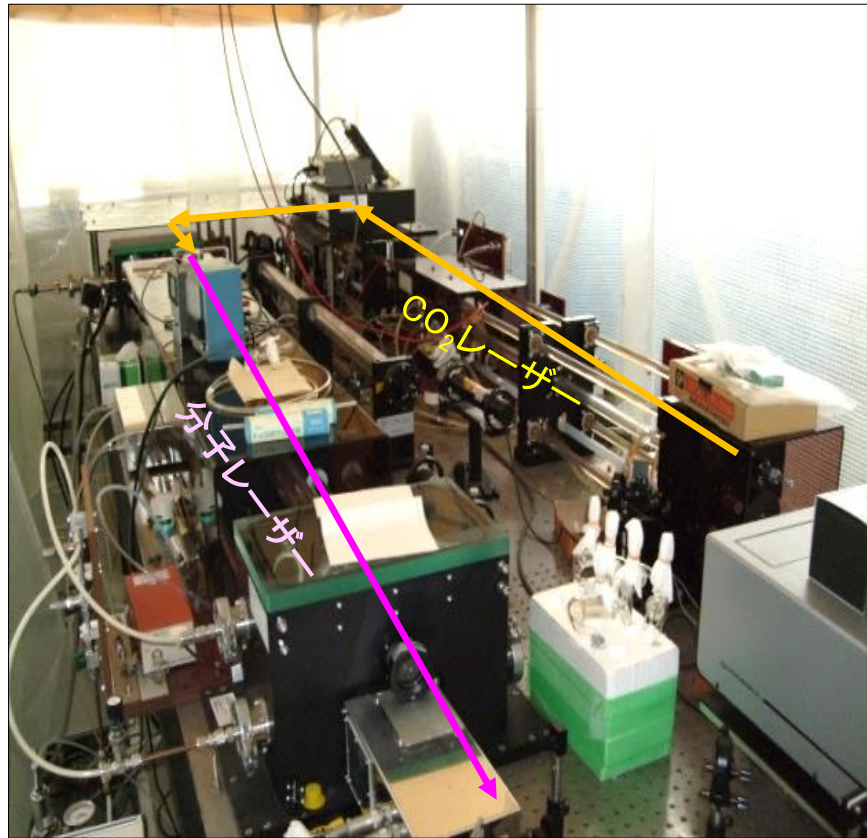
- ・遠赤外領域の光子のエネルギー測定に有望
- ・崩壊光子を検出しニュートリノ質量を精度良く測定することが可能
- ・STJ検出器のエネルギー分解能

超伝導体材質	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	0.172meV	4.9%
Hf	0.021meV	1.7%

Δ: クーパー対を壊すのに必要なエネルギー
小さいほど電子が多く出て統計精度が良くなる

現在開発中のSTJ検出器の性能評価実験が必要
⇒ 本研究の目的: **性能評価実験に用いる光源の開発**

性能評価実験に用いる光源



STJ検出器性能評価実験

ニュートリノ崩壊光子のエネルギー
 $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$ ($\lambda = 51 \sim 89 \text{ } \mu\text{m}$)を
カバーする光源が必要



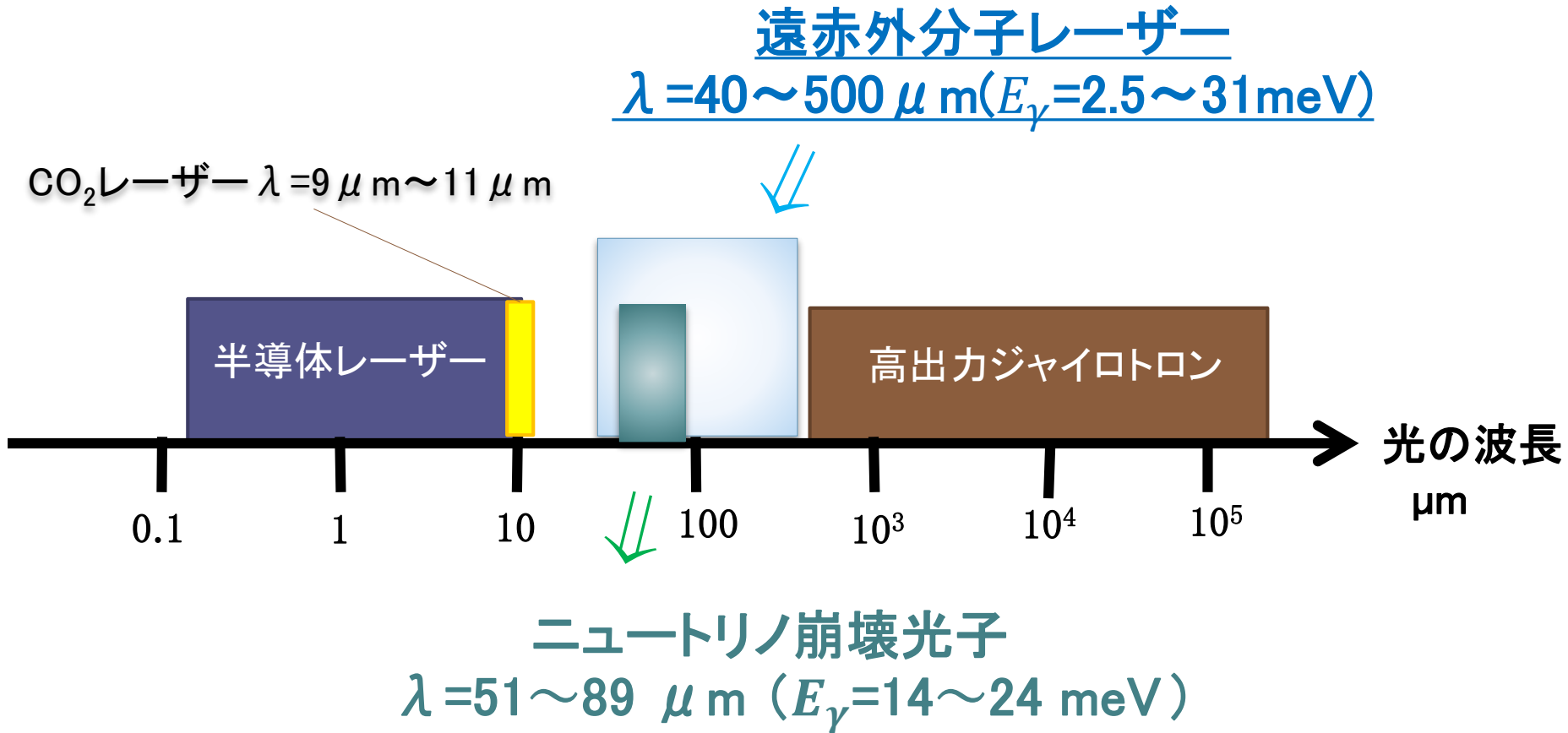
福井大学遠赤外線領域開発センター 遠赤外分子レーザーシステム

- アルコールガス(CH_3OH など)を CO_2 レーザーで励起させ、遠赤外分子レーザーを発振
- 遠赤外分子レーザーは連続波
- 発振波長: $40 \sim 500 \mu\text{m}$ ($E_\gamma: 2.5 \sim 31 \text{ meV}$,

周波数: $7.2 \sim 0.6 \text{ THz}$)の間 の約70本の単色
発振線から任意の一つを選択可

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 岡島研で開発

レーザーシステムがカバーする波長領域



遠赤外分子レーザーシステム模式図

CO₂レーザー装置

CO₂+N₂+Heガスin

高電圧(~10kV)をかけ混合ガスを励起

共振器長2.5 m付近で微調

CO₂レーザーがアルコールガスを励起

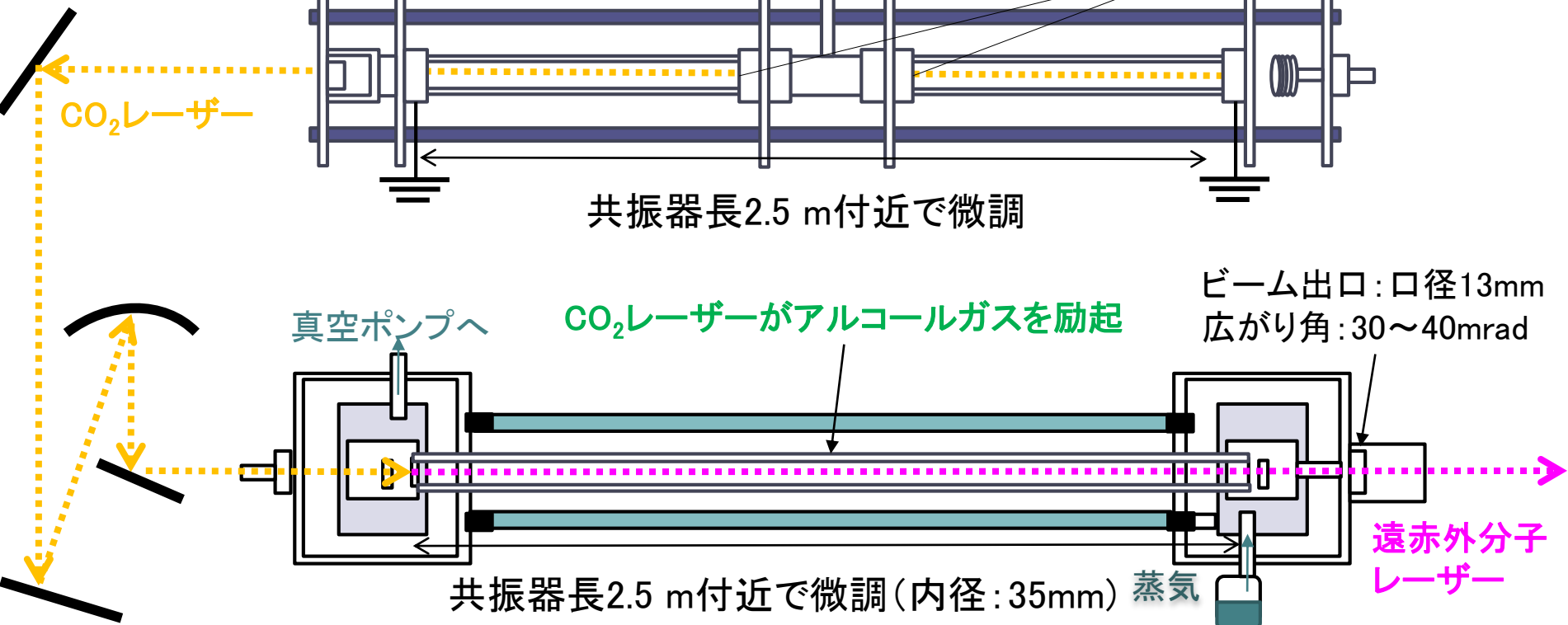
ビーム出口:口径13mm
広がり角:30~40mrad

共振器長2.5 m付近で微調(内径:35mm)

蒸気

アルコール容器

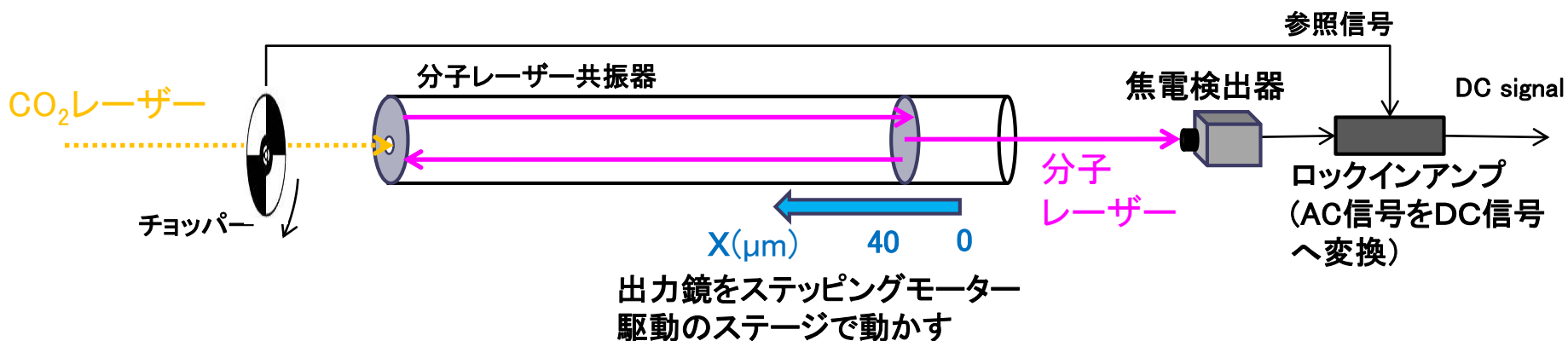
分子レーザー装置



遠赤外分子レーザーの稼働テスト

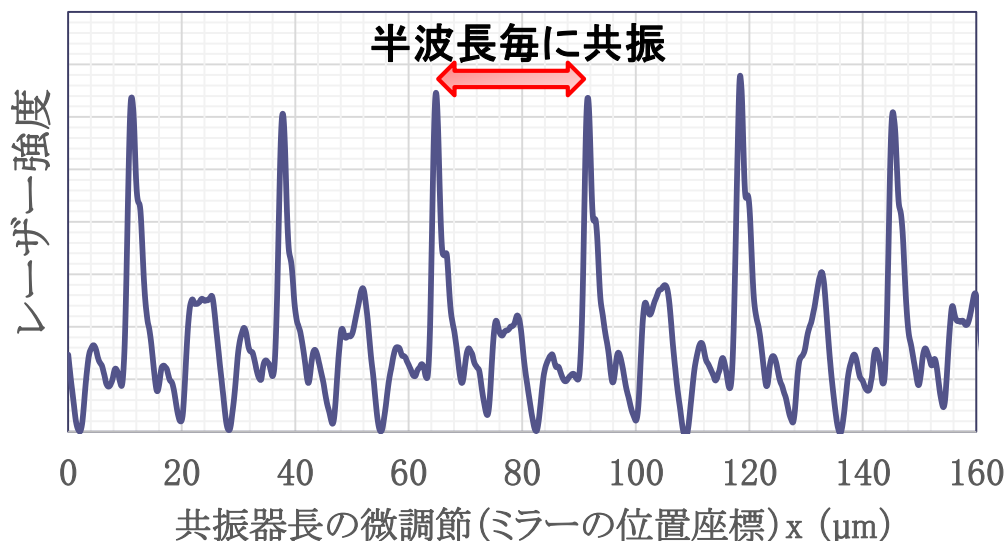
Set up

- ・テストで発振させる分子レーザー
[分子: CD_3OH 波長: $52.9\ \mu\text{m}$ (設計値)]



稼働テスト結果

- ・共振器長がレーザーの半波長の整数倍毎に共振
- ・ピーク間の距離を2倍して λ を計算 $\lambda = 52.9\ \mu\text{m}$
⇒設計値通りの波長が発振



遠赤外レーザー発振線の例（74本の設計値の一部）

	使用する分子	CO ₂ 発振線	CO ₂ 出力 (W)	波長 (μm)	光子のエネルギー (meV)	出力 (mW)
➔	CD ₃ OH	10R(18)	(89)	43.7	28.4	(6)
➔	CD ₃ OH	9R(34)	57 (63)	52.9	23.5	4.2 ※
➔	CH ₃ OD	9R(8)	(138)	57.2	21.7	(1.6W)
➔	CD ₃ OH	10R(16)	(99)	86.4	14.4	(25)
	CH ₃ OH	9R(10)	(83)	96.5	12.9	(68)
➔	CH ₃ OH	9P(36)	(148)	118.8	10.4	38
	CH ₂ DOH	10P(26)	(110)	150.6	8.2	(24)
➔	CH ₃ CN	9R(16)	(107)	453.4	2.7	(0.4)

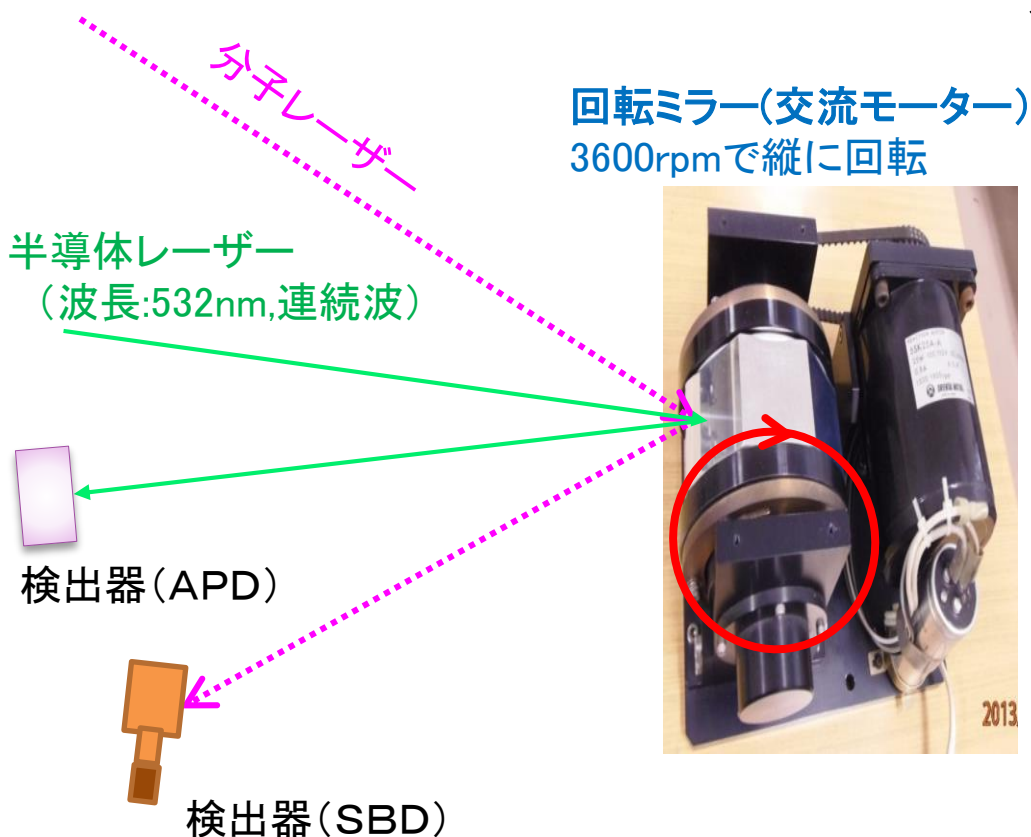
➔は稼働テスト済みの発振線

()内は設計値

遠赤外分子レーザーはニュートリノ崩壊光子のエネルギー
 $E_{\gamma}=14\sim 24\text{ meV}$ ($\lambda=51\sim 89\ \mu\text{m}$)を充分カバー

⇒性能評価実験に用いることができる

回転ミラーによる連続波分子レーザーのパルス波への変換



分子レーザーパルス化実験

- ・光信号に対する検出器の応答を評価
遠赤外レーザーのパルス化が必要
⇒回転ミラーでパルス化(目標時間幅1 μ s)
- ・反射したレーザー光が検出器を通過した際パルス信号として検出
- ・パルス時間幅はミラーから検出器までの距離+ビームスポットサイズで決まる(回転ミラーの角速度は3600rpmで一定)
- ・分子レーザーと別の角度から半導体レーザーを照射(分子レーザーのパルス信号と同期させるトリガー信号とする)

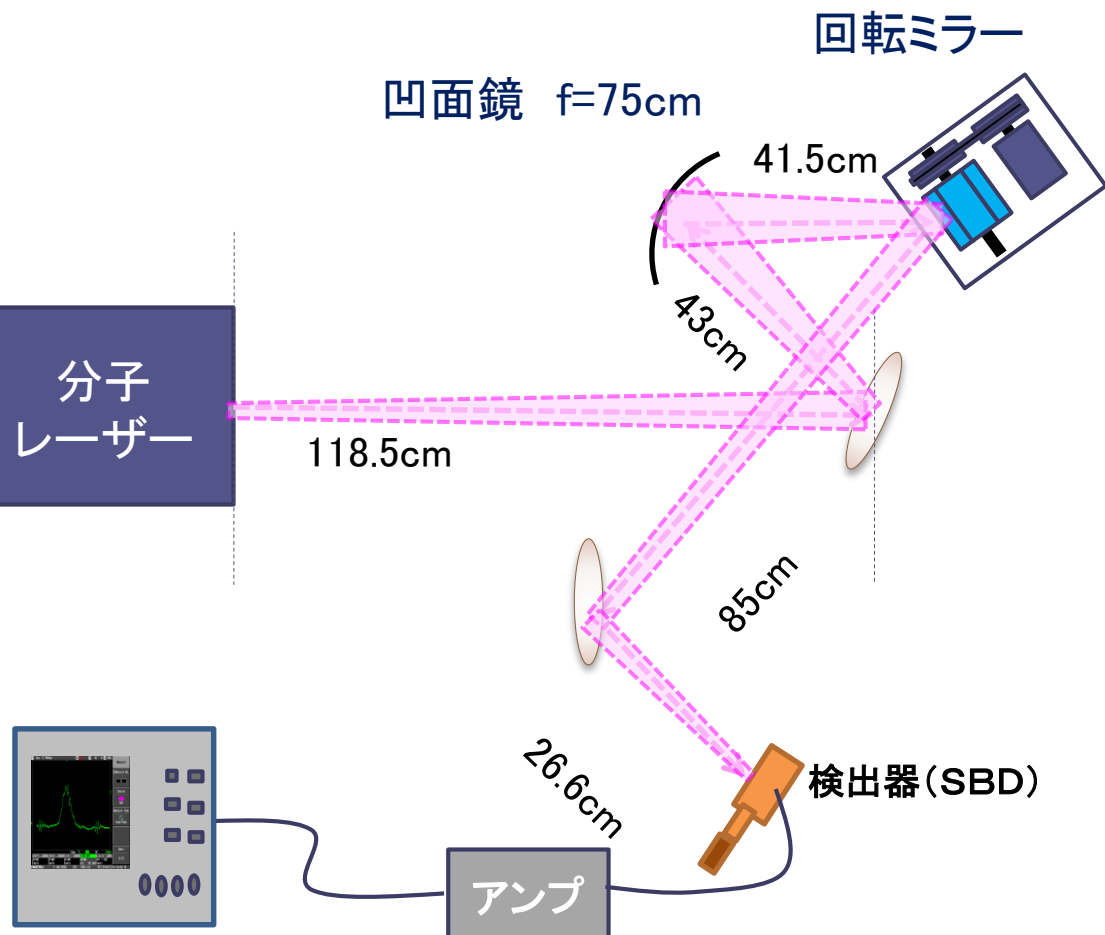
使用する検出器

半導体レーザー: APD(1mm ϕ)で検出

分子レーザー: 1.3mm長Whiskerアンテナで拾いGaAsショットキーバリアダイオード(SBD)で検波

分子レーザーのパルス化実験

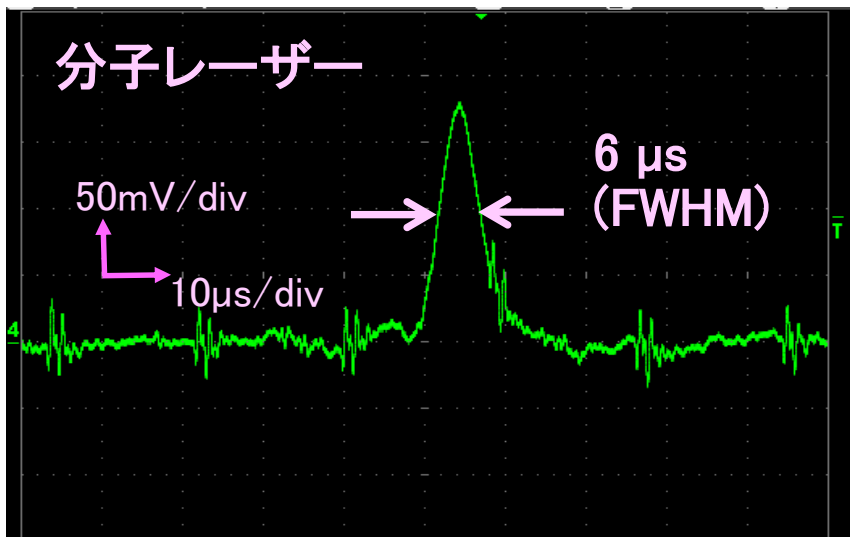
Set up



パルス化実験

- ・発振させる分子レーザー
波長 $118.8\ \mu\text{m}$
- ・凹面鏡 $f=75\text{cm}$ を光学系に挿入
⇒ 分子レーザーのビーム径を絞る
- ・波長 $118.8\ \mu\text{m}$ の分子レーザーの
ビームプロファイル及び
凹面鏡の公式 $(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f})$ から
光学系を設計
- ・回転ミラーからSBDまでの距離
 $85+26.6=111.6\text{cm}$

パルス化実験の結果

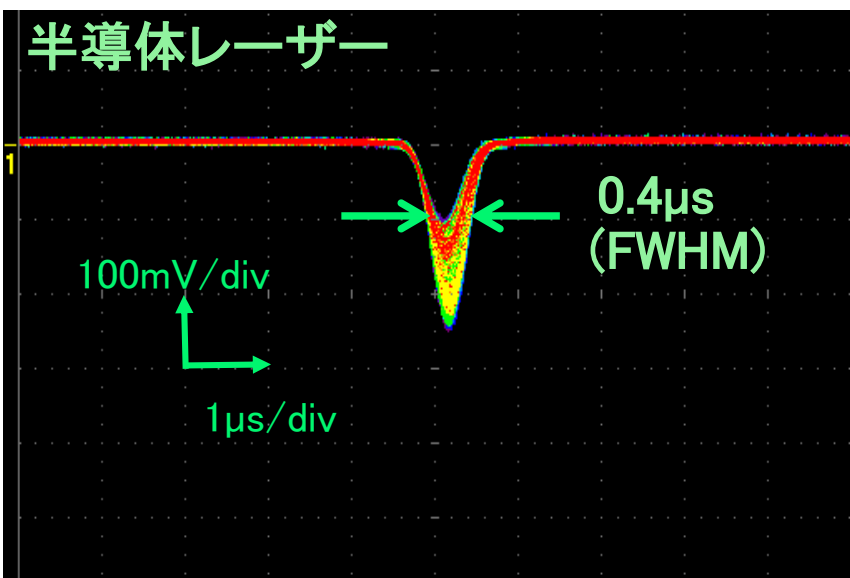


分子レーザー $\lambda = 118.8 \mu\text{m}$

- ・パルス時間幅: 6 μ s
- ・ビーム径@検出器: 14mm (凹面鏡で集光)
(凹面鏡を使用しないと...ビーム径: 42mm)
- ・パルス時間幅の理論計算値 8.8 μ s に概ね一致
(回転角速度、ビーム径、ミラー・検出器間距離
などを用いて概算)

⇒ 今後は光学系を改良して

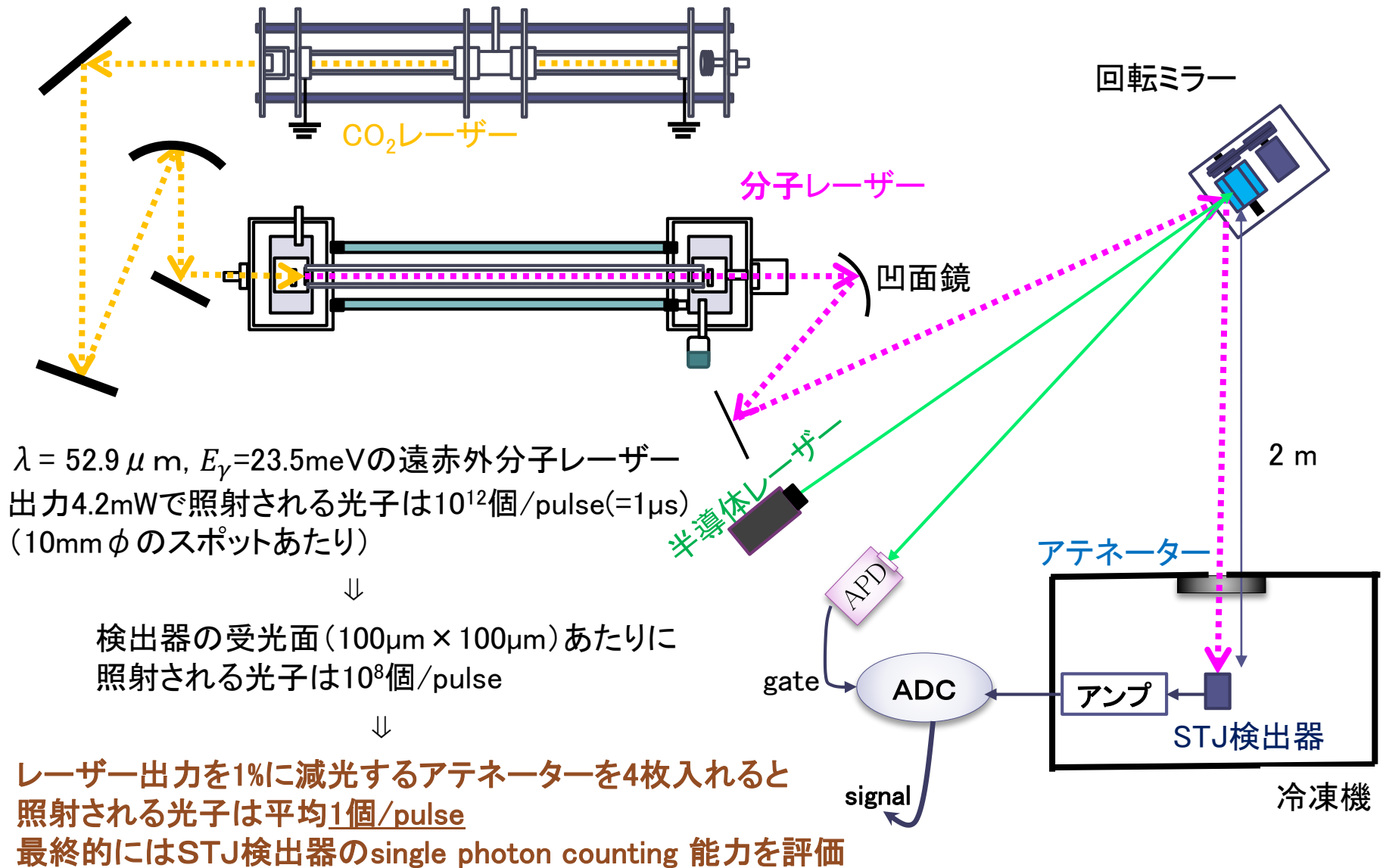
ビーム径: 14mm \rightarrow 1mm,
回転ミラーからの距離: 116cm \rightarrow 200cm,
パルス時間幅 1 μ s を目指す



半導体レーザー $\lambda = 532\text{nm}$

- (ビーム出口でビーム径 1mm、広がり角 0.5mrad)
- ・パルス時間幅: 0.4 μ s
 - ・ビーム径@検出器: 1mm
(凹面鏡の代わりにレンズ使用)
 - ・回転ミラーから検出器までの距離: 325cm

STJ検出器性能評価実験の構想



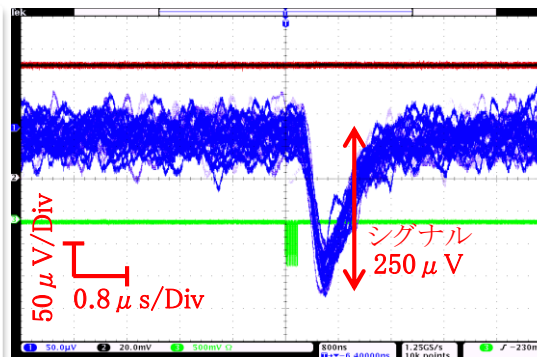
まとめ

現状

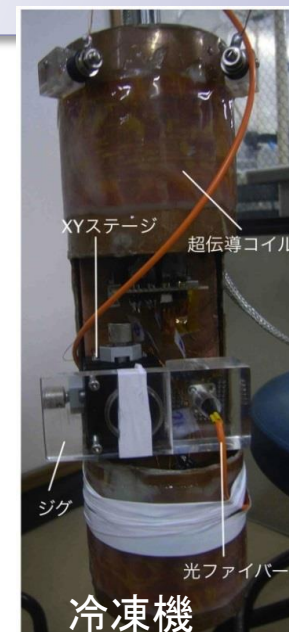
- ・STJ検出器の性能評価に用いる遠赤外分子レーザーの稼働テストを実施
ニュートリノ崩壊光子のエネルギー $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$ ($\lambda = 51 \sim 89 \text{ }\mu\text{m}$)を
カバーする複数の発振線を確認
- ・光信号に対する検出器の応答を評価する為に、連続波発振する分子レーザーの
パルス化が必要⇒現在、時間幅6 μs のパルス化に成功

今後

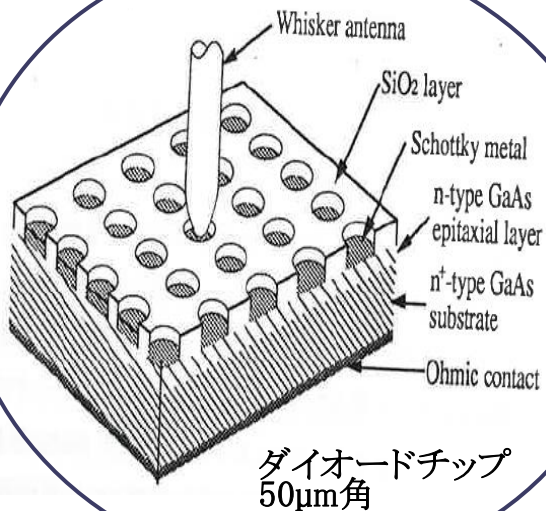
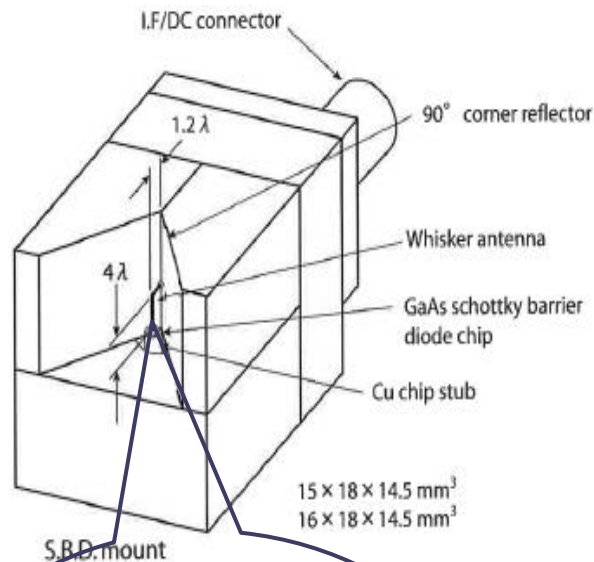
- ・パルス時間幅 目標1 μs
回転ミラーから検出器までの距離を伸ばし
凹面鏡等でビーム径を絞る
- ・STJ検出器に遠赤外分子レーザーを照射し
STJ検出器の性能評価を行う



Nb/Al-STJ(100 × 100 mm², 1.8K)に
パルス光を照射 1光電子分の信号
光源は近赤外($\lambda = 1.32 \text{ mm}$)や
青色(0.456 mm)のレーザーを代用



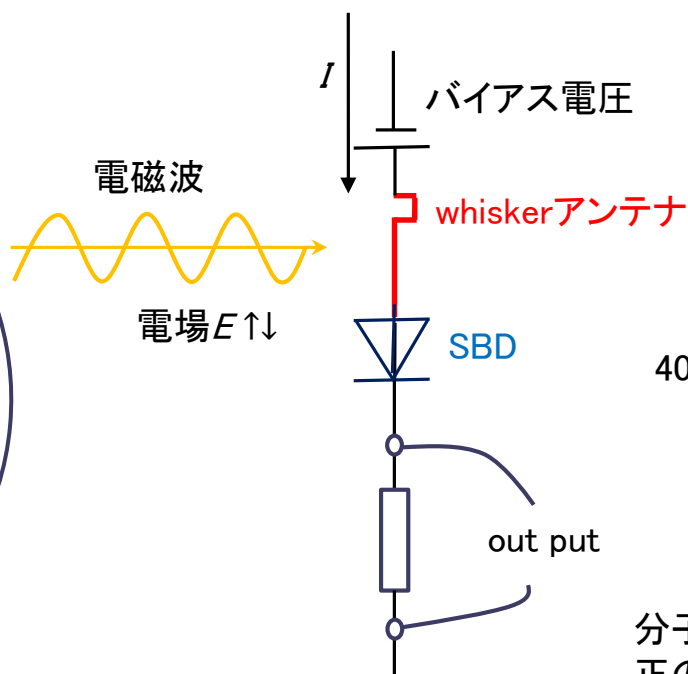
GaAsショットキーバリアダイオード(SBD)検出器



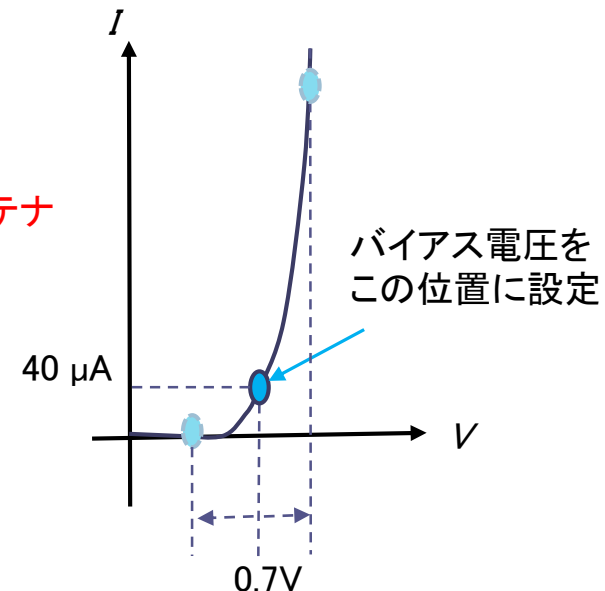
SBD)検出器

- 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

回路図

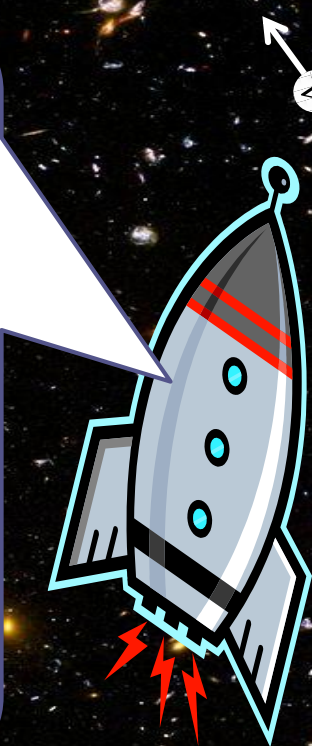
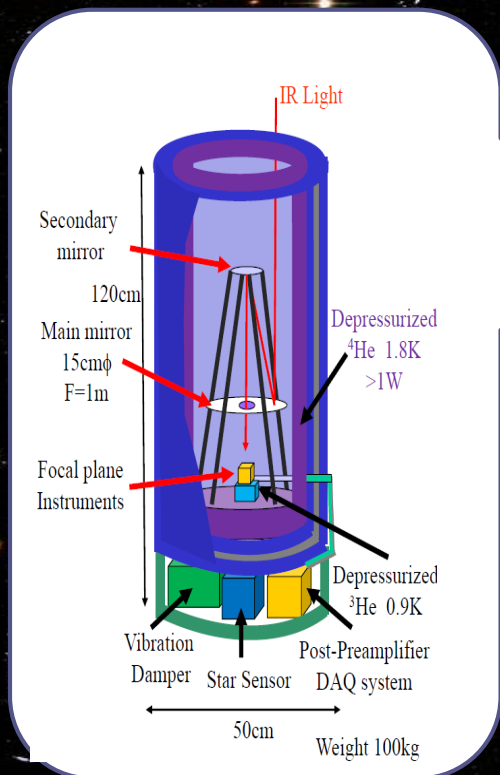


SBDの順方向I-V特性



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

宇宙背景ニュートリノ崩壊光子探索実験



・ニュートリノの寿命 τ : 10^{17} year (理論値)
観測には大量のニュートリノが必要



宇宙に大量に存在するであろう
宇宙背景ニュートリノを観測対象とする

・宇宙背景ニュートリノ
(Cosmic Neutrino Background)
ビッグバンによって宇宙が生まれたとき
光子やクォークなどと共に大量に生成
今でも大量に宇宙を飛び交っていると
考えられているが未発見

検出器をロケットに乗せて宇宙へ
(地上では空気中の水分が崩壊光子
を吸収してしまう)

色んな粒子が飛び交う宇宙
光子(3K放射): 約 400 個/ cm^3
ニュートリノ: 約 100 個/ cm^3 (理論の予測)



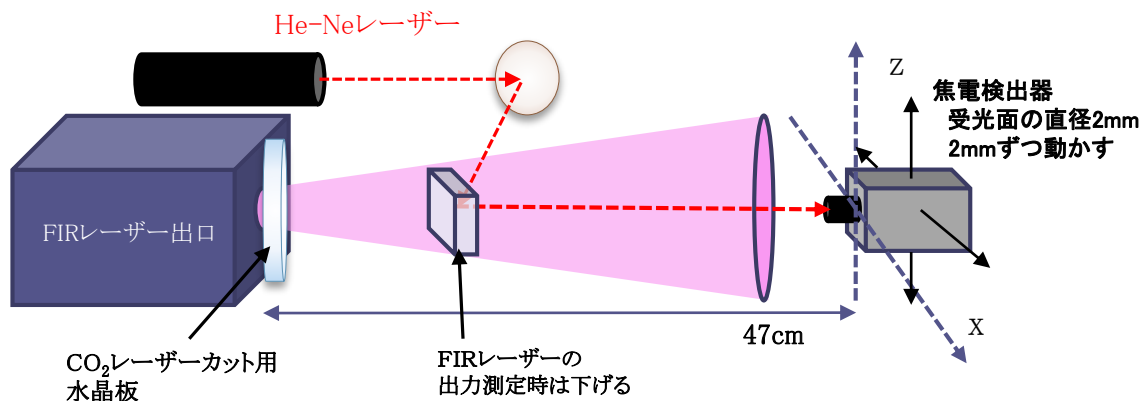
アッテネーター



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)

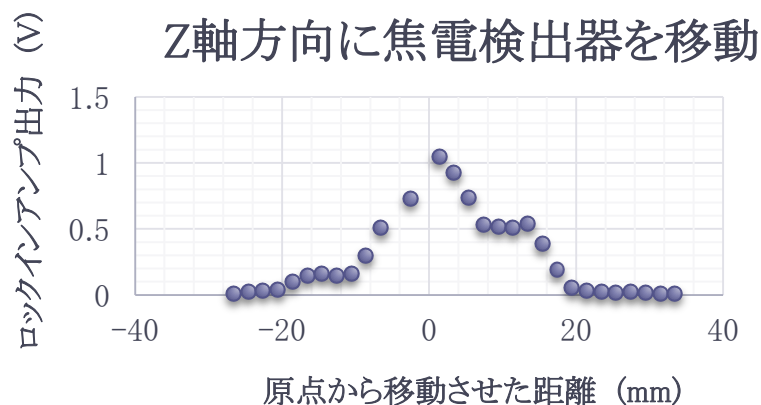
レーザー光を何桁も減光させることは今後の課題

FIRレーザーのビーム径測定



測定方法

- ・レーザー出口から47cm離れた位置に焦電検出器を設置
- ・He-Neレーザーが焦電検出器の受光面の中心に当たる位置をz,x座標の原点とする
- ・z,x軸方向に焦電検出器を2mm程度ずつ動かしレーザーの出力を測定(レーザーの出力はロックインアンプから出力される値を読む)

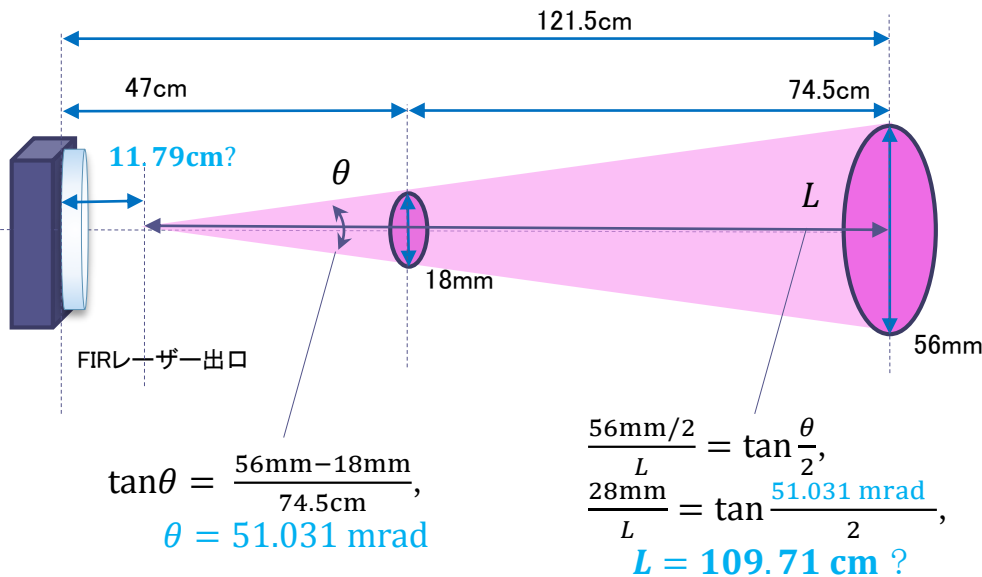


✓この日は、CO₂、N₂混合ガスボンベの残りが少なくなっていた為Z軸方向のみ動かして測定を行った。結果は左図のグラフ

✓実験終了時のFIRレーザー出力は15mW(チョツパーあり), CO₂レーザーの出力はガスが少なかった為か29Wまで減少

✓左図の様なグラフをz,x軸方向について作成
→出力最大値の $1/e^2$ となる位置までがビーム径と考える

ビームプロファイル計算



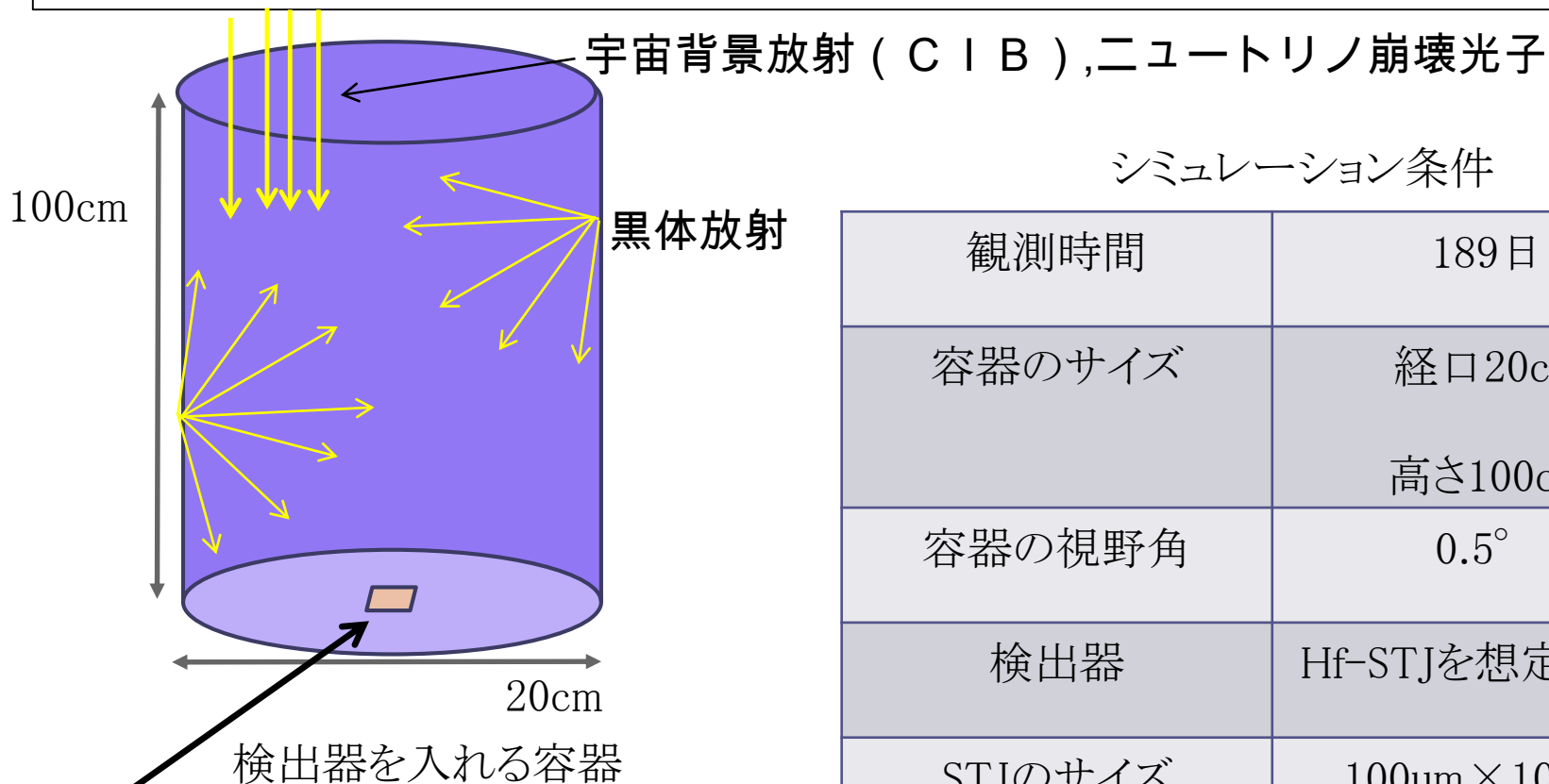
ビームプロファイル計算

- ・よりビーム径を小さくする為に11/26に得たデータからおおよそのビームの広がり角 θ を計算
- ・FIRレーザーの出口から47cm離れた位置のビーム径はz軸方向 18mm, 121.5cm離れた位置のビーム径はz軸方向 56mm
- ・FIRレーザーパルス化実験において重要なのはz軸方向のビーム径と広がり角のみ(回転ミラーはz軸方向に回転)今回はz軸方向のみを考慮する
- ・計算結果から適切なSet upを考える

⇒ ビーム広がり角 θ は51.031 mrad, ビーム径が0になる位置はFIRレーザー出口より11.79 cm?

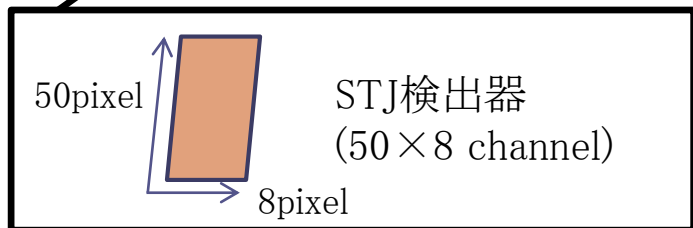
計算が正しいかは定かでないが、取りあえずこの結果を頼りにSet upを考える

- ・ 容器から放出される光子 (黒体放射) の影響はどの程度であるか？
- ・ 宇宙背景放射と黒体放射のバックグラウンドに埋もれずにニュートリノ崩壊光子を検出することができるのか？ ⇒シミュレーションで検討

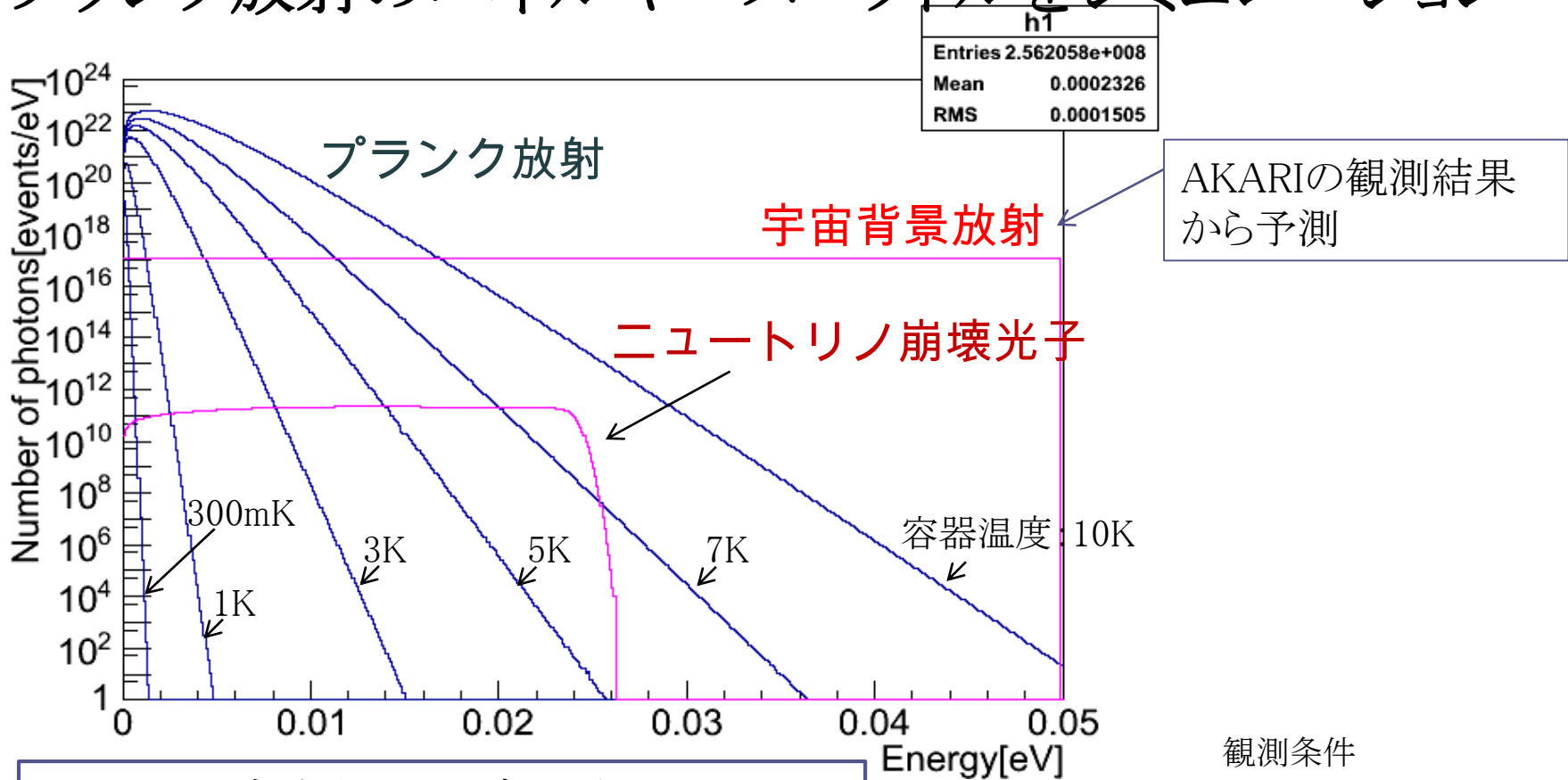


シミュレーション条件

観測時間	189日
容器のサイズ	経口20cm 高さ100cm
容器の視野角	0.5°
検出器	Hf-STJを想定(1.7%)
STJのサイズ	100 μ m \times 100 μ m (400pixel)
ニュートリノ崩壊光子のエネルギー	24meV



ニュートリノ崩壊光子、宇宙背景放射(CIB)、 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

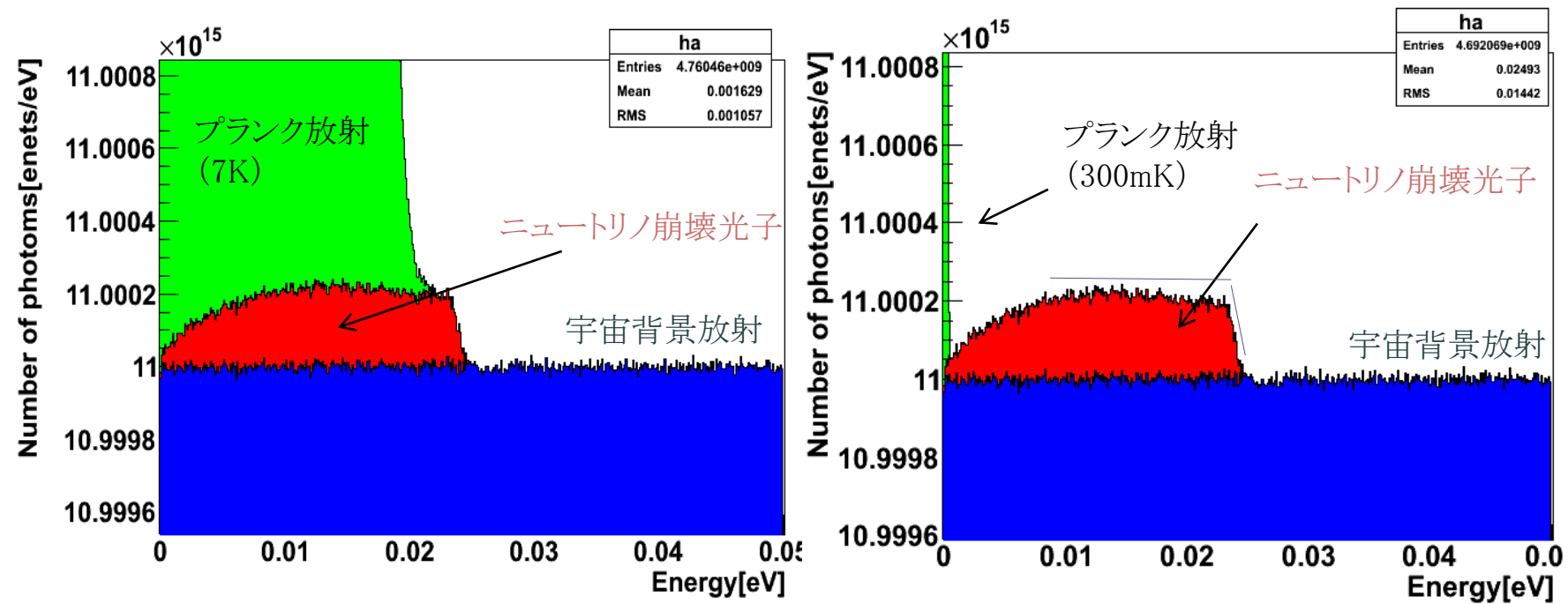


ニュートリノ崩壊光子のエネルギースペクトル

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

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

ニュートリノ崩壊光子、宇宙背景放射 (C I B)、
プランク放射を足し合わせたヒストグラム



• 300mKに容器を冷やせばプランク放射の影響は非常に小さい (sharp edgeが見える)

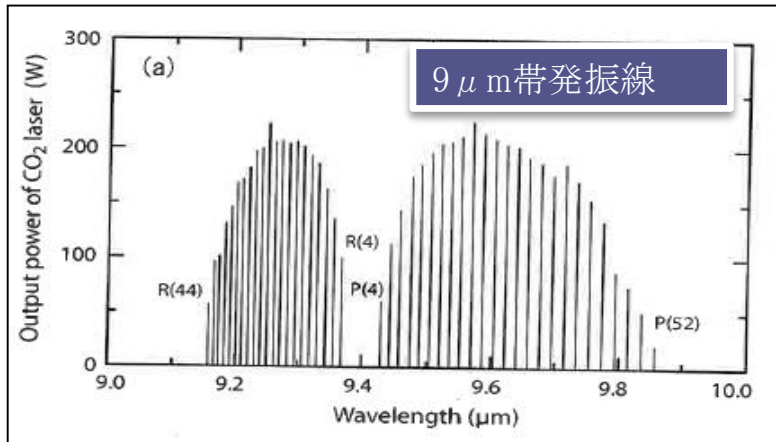
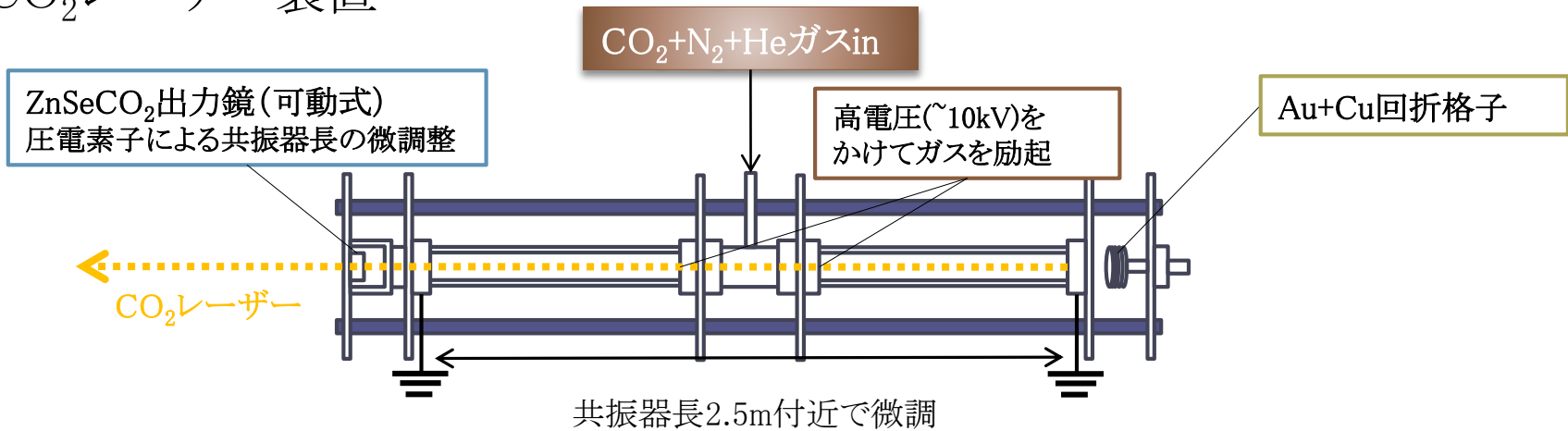
↓

**黒体放射を考慮しても
ニュートリノ崩壊現象は観測可能**

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

CO₂レーザー装置

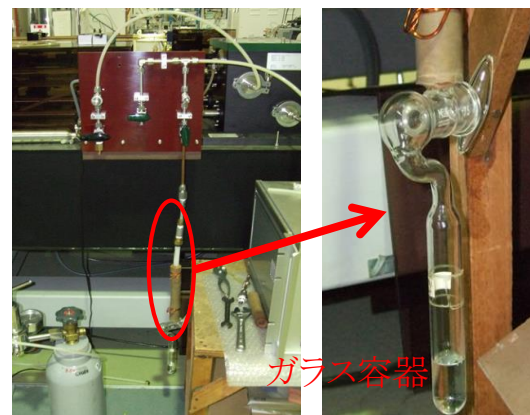


- 9μm~11μmに多くの発振線を持つ(CO₂分子の振動と回転状態によって様々なエネルギー準位を持つ為)
- 出力鏡を圧電素子によって動かし共振器の長さを調節 λ/2の整数倍にして共振させる
- 回折格子を用いて余計な発振線の共振を防ぐ

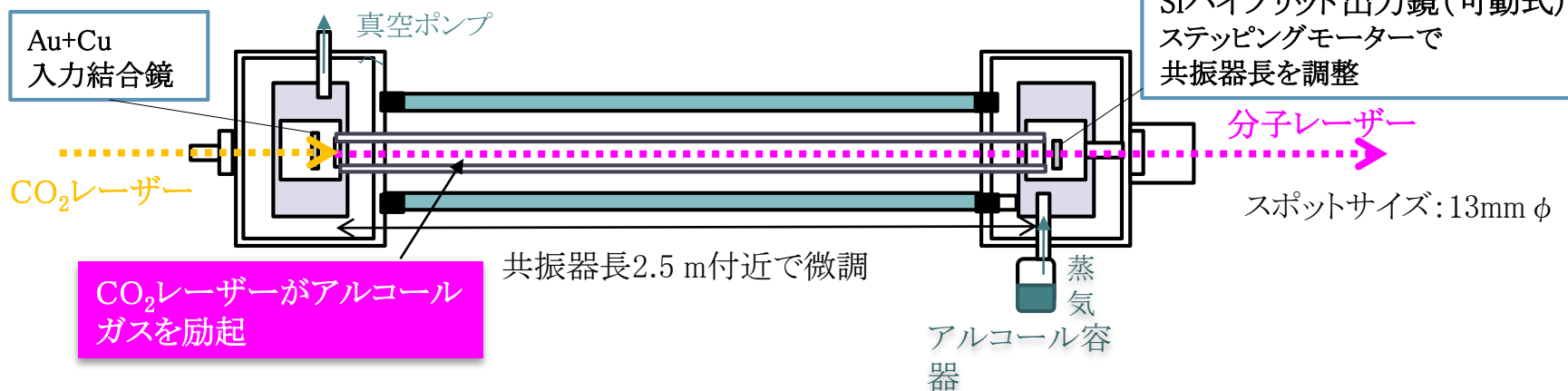
分子レーザー装置

遠赤外分子レーザーの発振線の発振方法

- ・レーザー媒質 (分子レーザーの共振器に入れる分子) を選択
- ・CO₂レーザーを共振器へ入射させアルコールガスを励起させる
- ・出力鏡をステップモーターで動かし共振器長を微調整。 $\lambda/2$ の整数倍にして共振させる



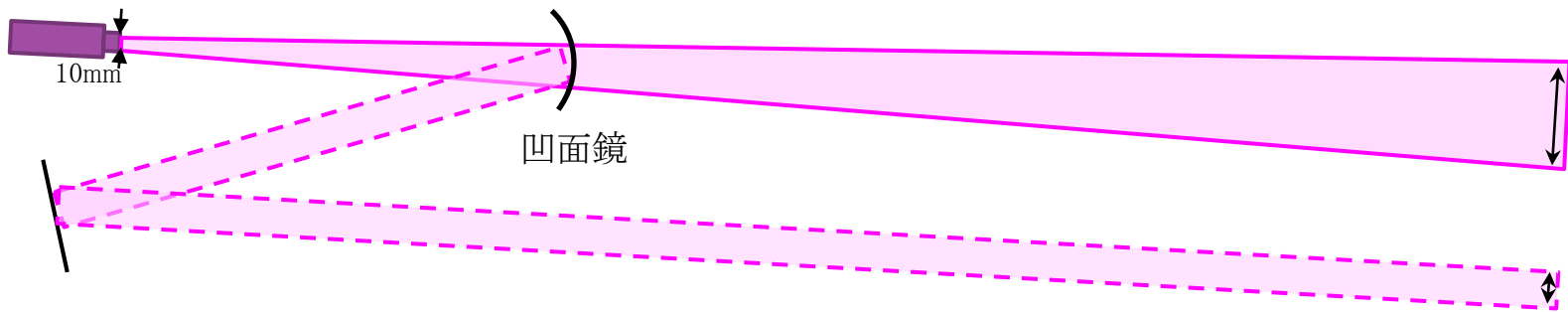
分子レーザー共振器内に入れるガス
ガラス容器: CH₃OH, CD₃OH, CH₂DOH,
CHD₂OH, CH₃I (D=重水素)
ガスボンベ: CH₂F₂



レーザーはビームスポットサイズをひろげながら空間を伝播する。
導波路中に凹面鏡や凹レンズを置くことで、スポットサイズの広がりを抑える



スポットサイズを小さくし、レーザーが検出器を横切る時間を短くすることで、パルス時間幅を小さくする



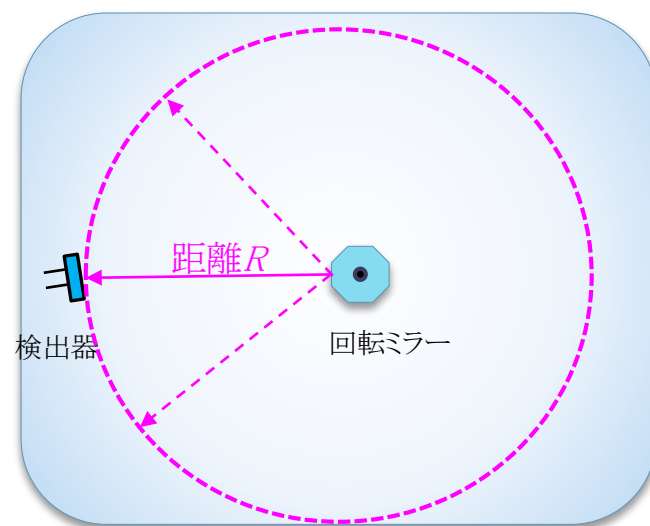
パルス幅は、検出器の受光面上をレーザーのスポットが横切る時間で決まる。
パルスの半値幅は、レーザーのスポットが半径 R cm (ミラーから検出器までの距離) の円周上を、距離にして

$$\frac{\text{SBDのアンテナ長}(1.36\text{mm}) + \text{検出器の位置でのレーザーのスポットサイズ}}{2} = x \text{ cm}$$

だけ移動する時間。(2で割るのは半値幅を求める為)

これをレーザースポットの回転角速度の2倍になることに留意して計算すると
パルス半値幅は

$$\frac{x \text{ cm}}{\text{円周半径 } R \text{ cm} \times 2 \times \text{ミラーの回転速度 } 377 \text{ rad/s}}$$

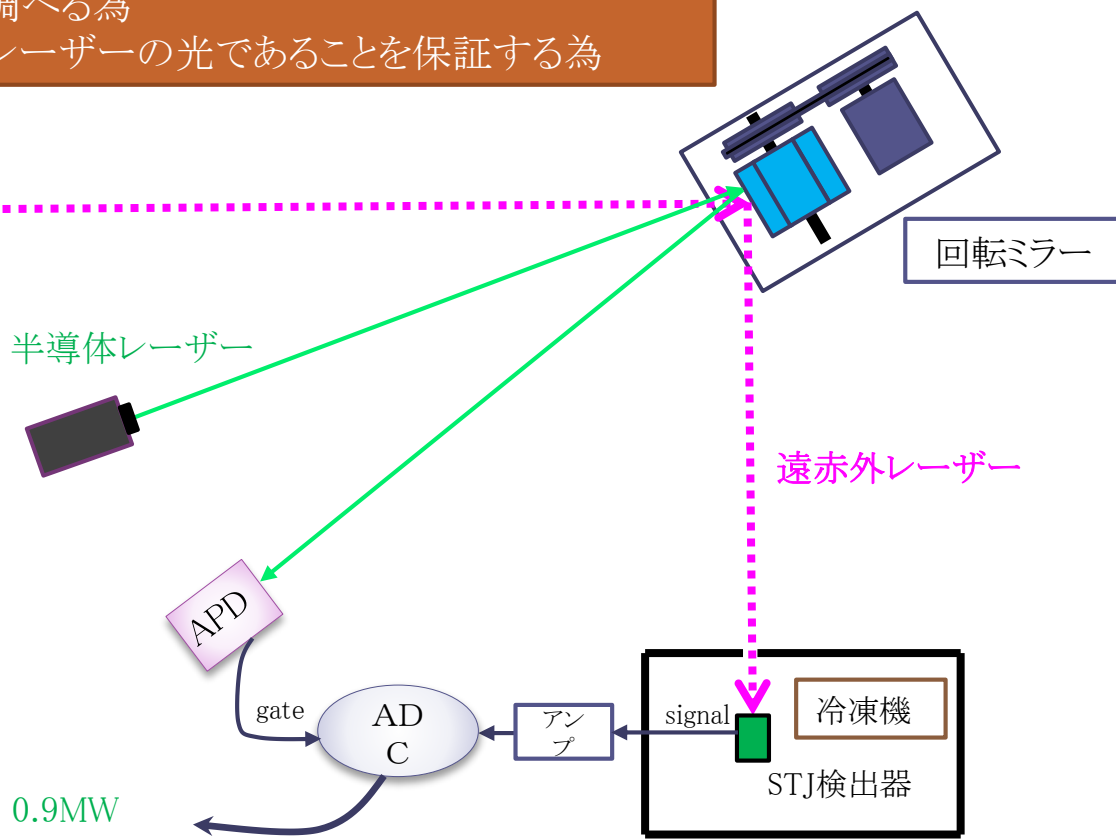


なぜ遠赤外レーザーをパルス化するか？

- ・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

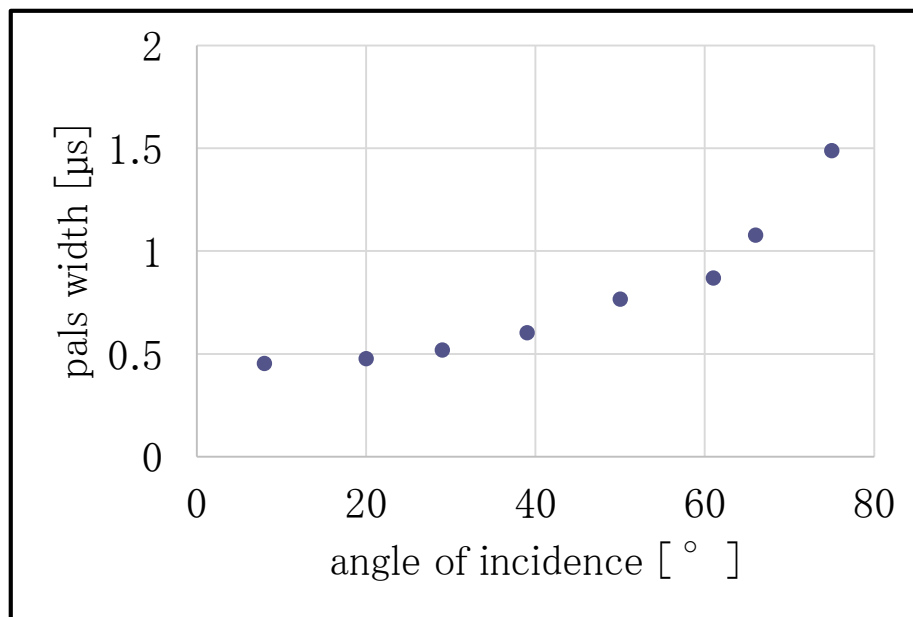
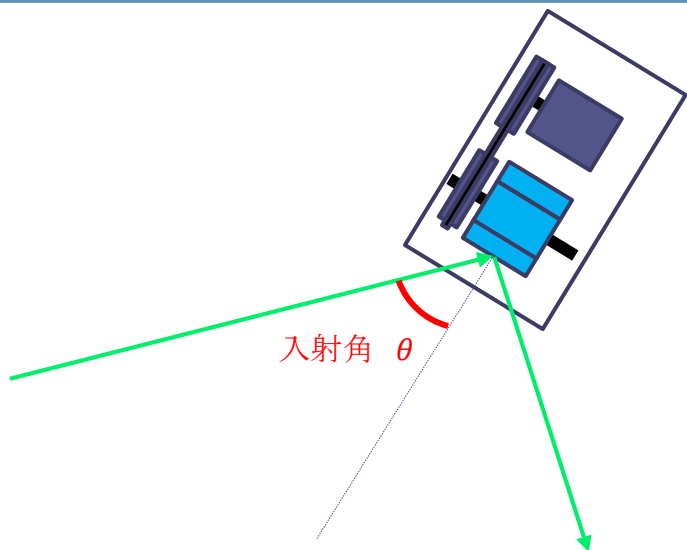


固定焦点式グリーンレーザーモジュール532NM X 0.9MW



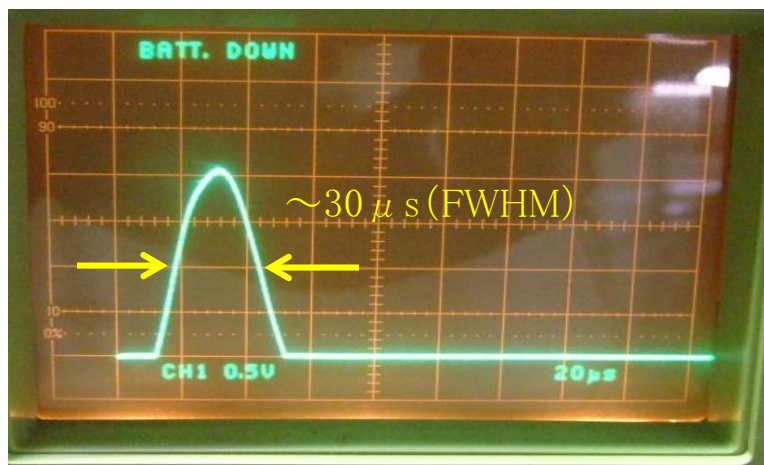
レーザー入射角とパルス時間幅

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

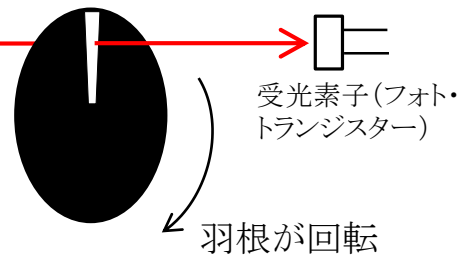


オプティカル・チョッパーのテスト

He-Neレーザー



羽根の直径100mm、隙間1mm、
100Hzで回転する汎用チョッパー



結果:パルス幅30 μ s

もっと、
回転数の高いチョッパー、
隙間の狭い羽根を用いて

目標:1 μ s

ニュートリノの寿命

L-R シンメトリックモデルで計算

W_L と W_R が両方存在していると仮定したモデル

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

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

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

$$\times |U_{32}|^2 |U_{33}|^2 \left[\frac{9}{64} (m_3^2 + m_2^2) \frac{m_\tau^4}{M_{W1}^4} \left(1 + \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 + 4m_\tau^2 \left(1 - \frac{M_{W1}^2}{M_{W2}^2} \right)^2 \sin^2 2\zeta \right]$$

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

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

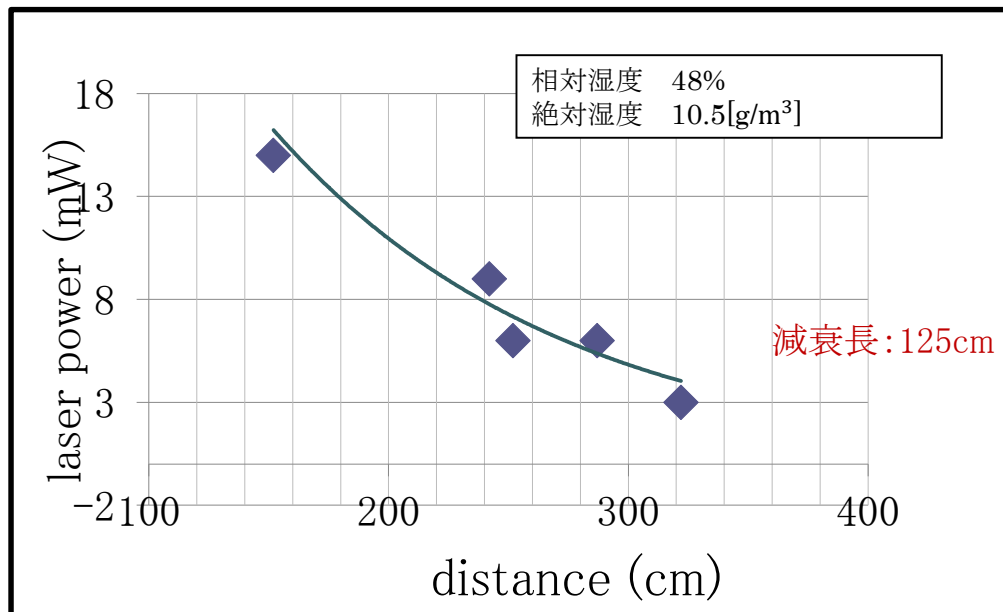
フェルミカップリング定数： $G_F = 1.17 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

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： $\sin \zeta = 0.013$

$$\tau = 1.10 \times 10^{17} \text{ years}$$

遠赤外分子レーザーの大気中の水分による減衰



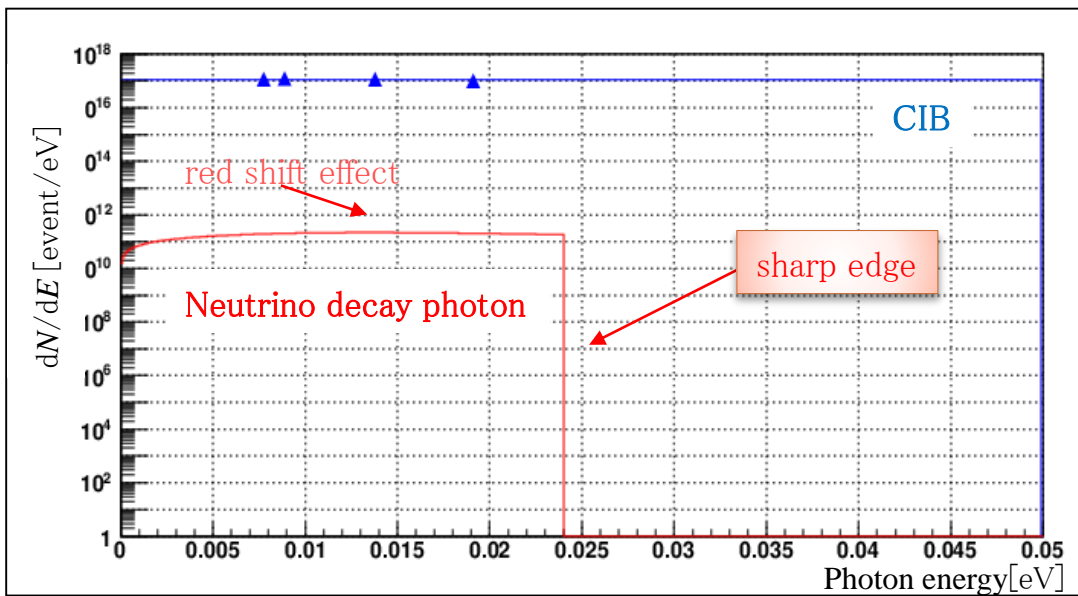
パルス計測実験において
分子レーザーの減衰を防ぐために

分子レーザー



アクリルパイプ
(出力を落とさないようにパイ
プ内部は乾燥空気を入れる)

予測される崩壊光子と宇宙背景赤外放射(CIB)のエネルギースペクトル



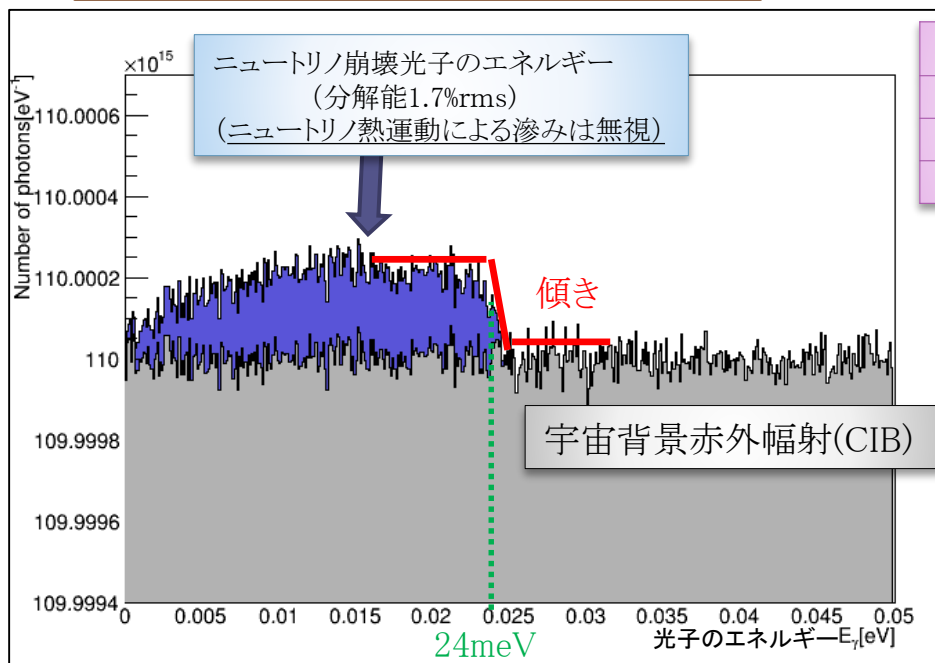
シミュレーション条件

観測時間	189日
検出器のサイズ	口径20cm
検出器の視野角	0.5°
検出器の分解能	考慮しない(0%)
E_γ	24 meV(52 μ m)

sharp edgeを膨大なCIBのバックグラウンドの中から観測する必要がある
その為に、本実験では高エネルギー分解能を持つ検出器が要求される

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



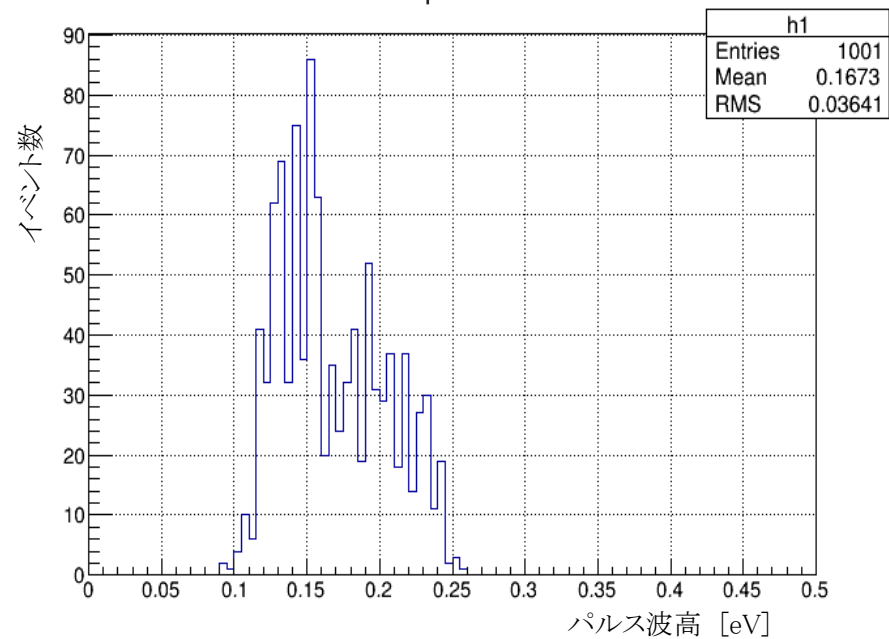
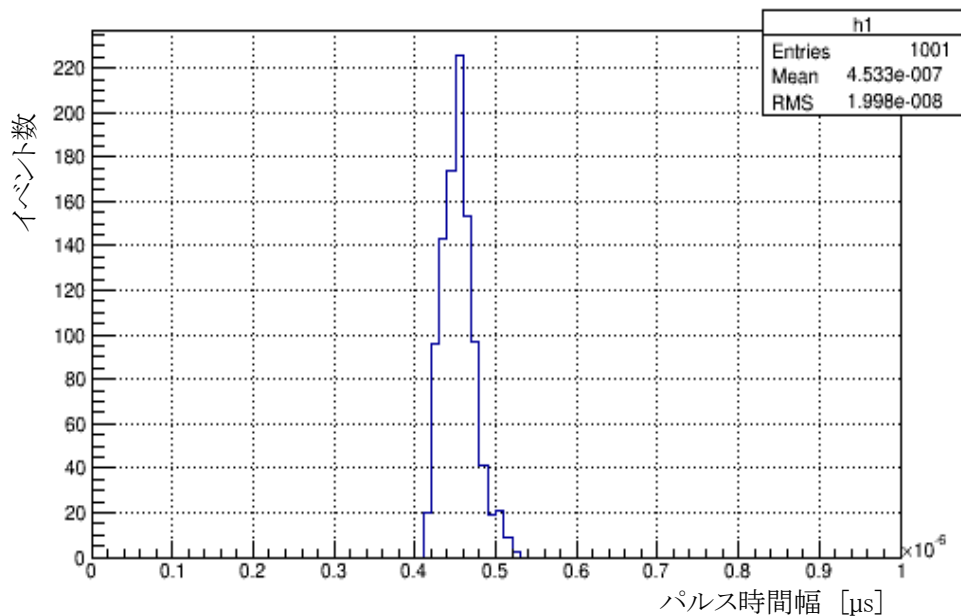
シミュレーション条件

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

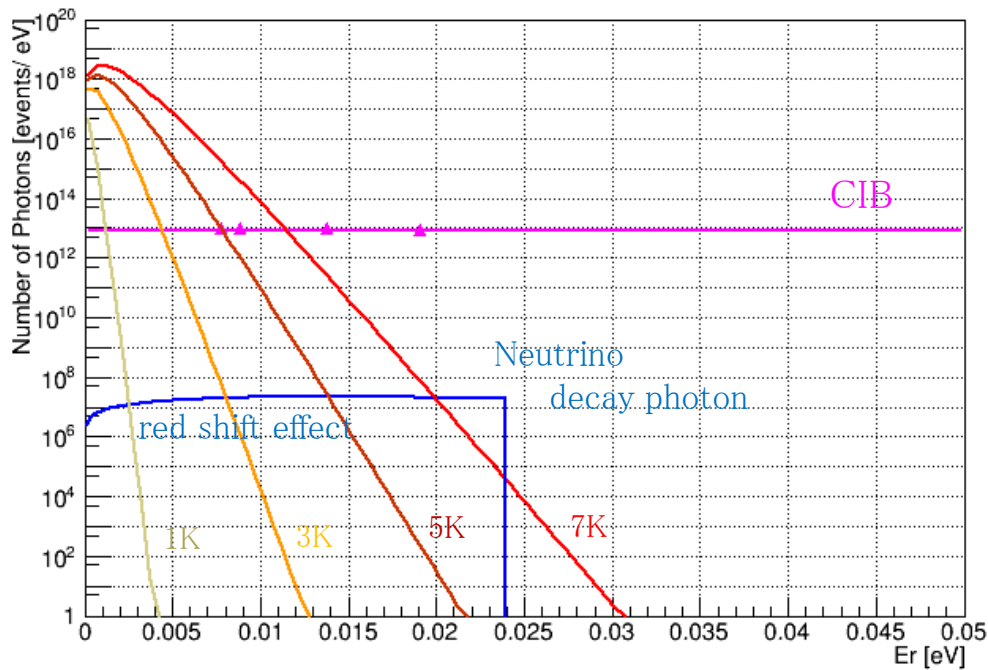
- エネルギーで微分することで、傾きを求める。
- エッジの部分 (E_γ) で傾きが急に大きくなる。
- 崩壊現象の有無を確認。

半導体レーザーのパルス

半導体レーザーのパルスを1000発取り込みパルス時間幅とパルス波高の分布を作成



Energy Spectrum for CIB, Neutrino decay photon, The photon emitted by a vacuum vessel



Conditions

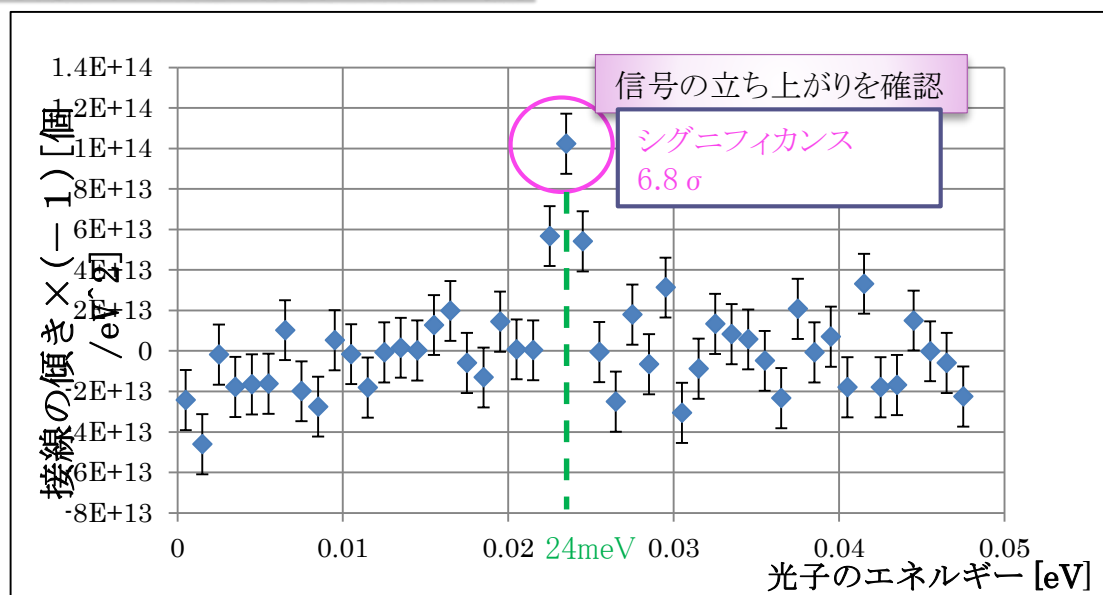
CIB and Neutrino decay photon

- 20cm-diameter telescope
- viewing angle $0.35' \times 2.7'$
- 10days data-taking

photons emitted by a vacuum vessel

- 10days data-taking
- temperature T
1K, 3K, 5K, 7K

崩壊現象観測可能性の検討



シミュレーション条件

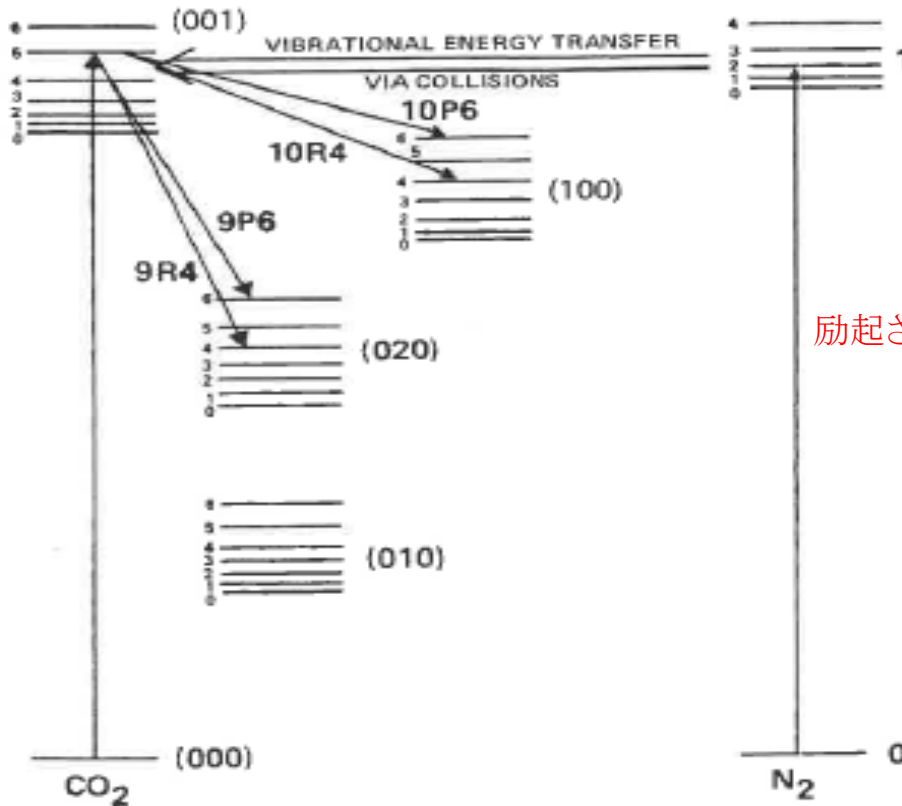
観測時間	189日
検出器の大きさ	直径20cm
検出器の視野角	0.5°
検出器の分解能	1.7%rms

エッジの部分 (E_γ) で傾きが大きくなったことを確認



シミュレーション条件において
崩壊現象の観測は可能である

CO₂レーザー原理②



励起されやすい

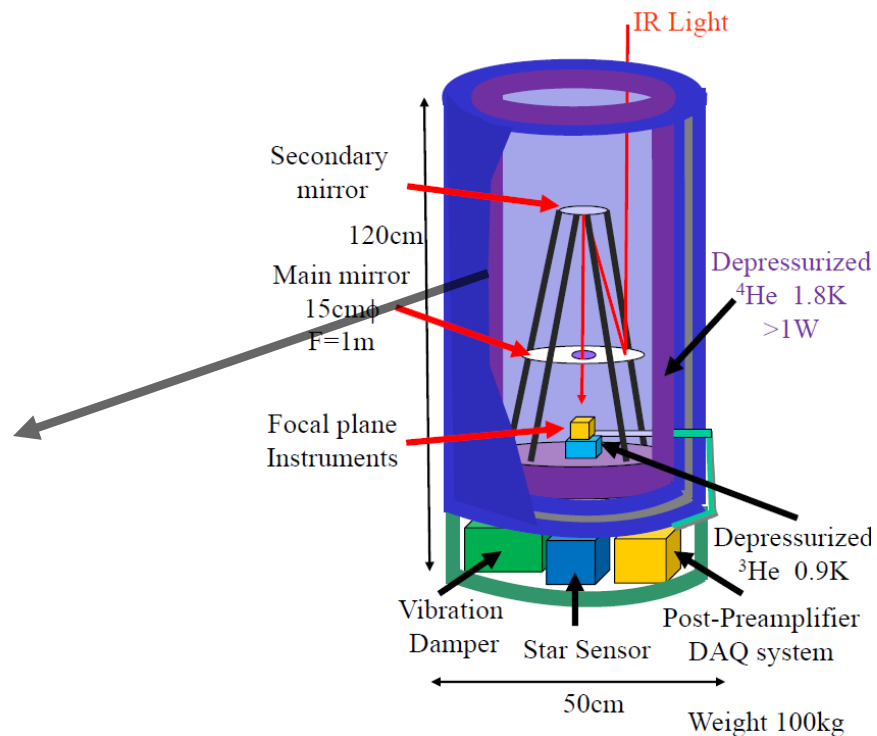
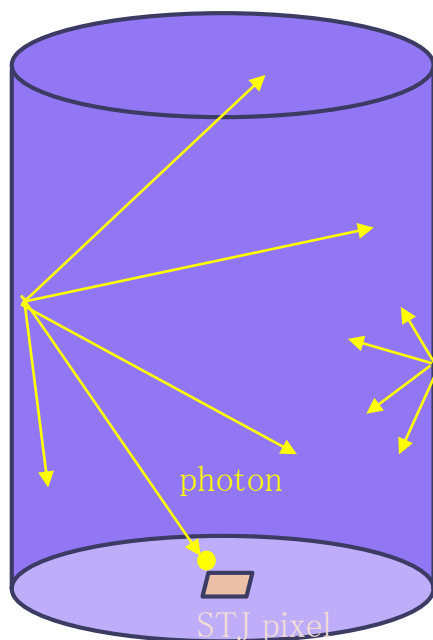


励起されたCO₂分子は
(001)を上準位(J=5)とし、
(100)または(020)を下準位
として落ちる。

(J-1)から(J)の遷移をPブランチ
(J+1)から(J)の遷移をRブランチ
と呼び、P(J)、R(J)と表記

図 3.2 CO₂ と N₂ 分子の振動回転エネルギー準位 [46]

真空容器から放出される光子



JPS Conf. Proc. , 013127 (2014)

真空容器から熱放射によって放出される光子は、ニュートリノ崩壊現象探索実験に影響しないのか？

plankの放射公式

黒体炉内の、単位体積あたり、単位周波数あたりの輻射エネルギー密度 u_ν [J/m³ Hz]を表す

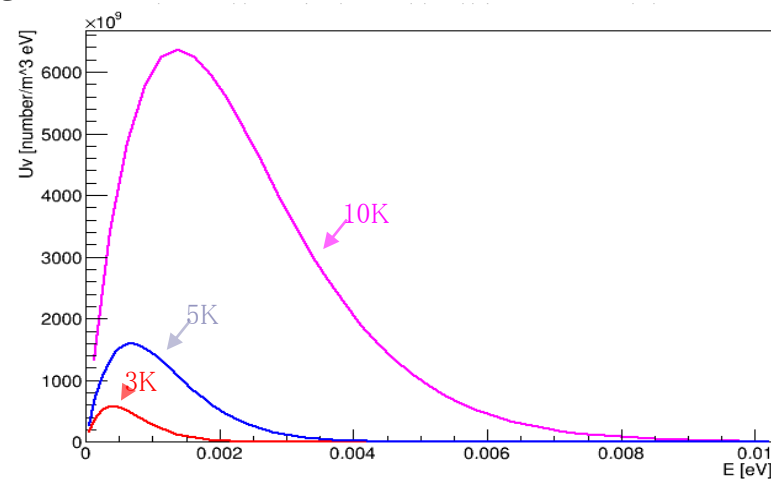
$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

光子数と光子のエネルギーの関係を知りたい

- $\nu = \frac{E}{h}$ に変数変換
- 単位JをeVに変換
- 光子のエネルギー E で割る

$$u_\nu dE = \frac{8\pi E^2}{c^3 h^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1} dE$$

u_ν の単位は[number/m³ eV]



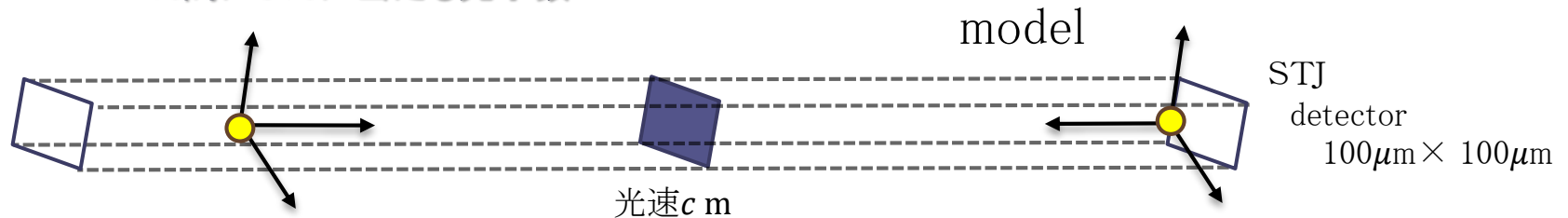
STJ検出器に当たる光子の数 N_γ

条件・真空容器内

・ $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ のSTJ

・ニュートリノ崩壊光子のエネルギー(と予測される) $15\sim 25\text{meV}$
のエネルギーを持つ光子(以降 $15\sim 25\text{meV}$ を E_ν 領域とする)

・1s間にSTJに当たる光子数



この筒の中に存在する、 E_ν 領域のエネルギーを持つ光子の数は $\int_{15\text{meV}}^{25\text{meV}} u_\nu dE \times (\text{筒の体積})$
その中で、光子は3方向に飛び、 $1/3$ の確率でSTJに当たるとすると、

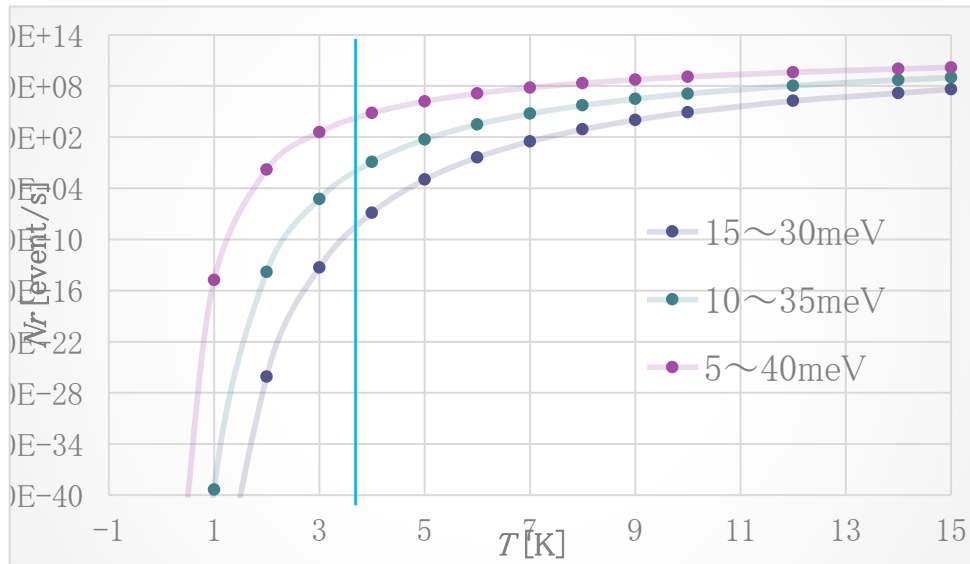
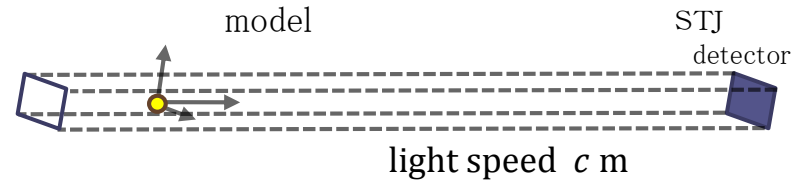
$$N_\gamma = \frac{1}{3} \int_{15\text{meV}}^{25\text{meV}} u_\nu dE \times (\text{筒の体積})$$

- ・真空容器の温度3Kが時 $N_\gamma = 4.82 \times 10^{-14}$ 個
- ・真空容器の温度、積分範囲(E_ν 領域)を広げて計算

N_γ : The photon emitted by a vacuum vessel

$$u_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

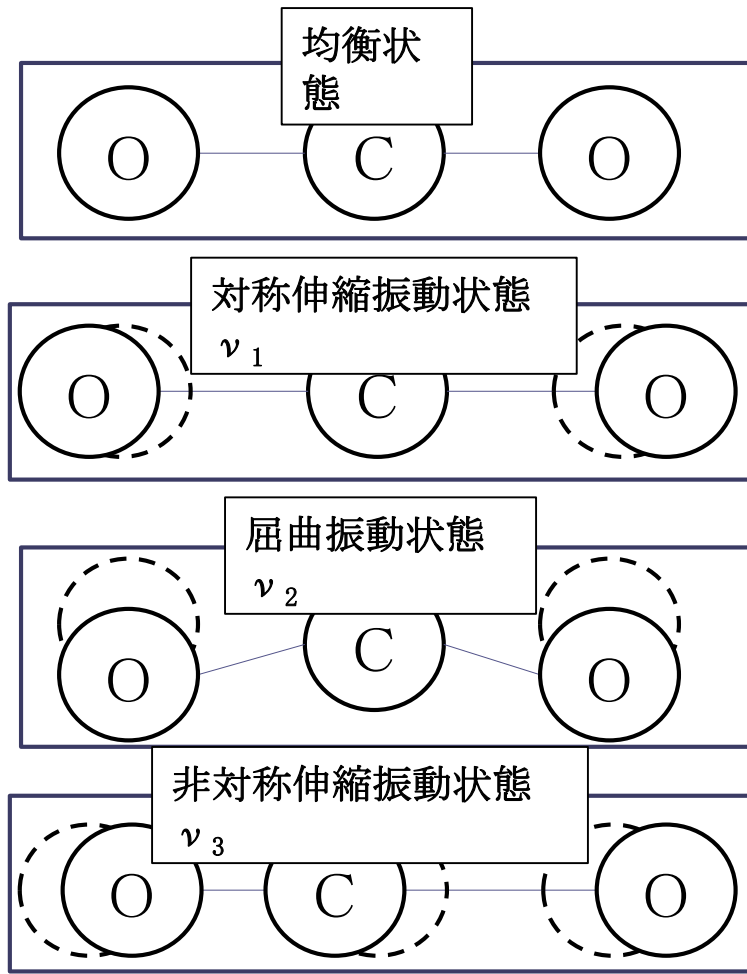
plank' law of radiation



Conditions

- 100 $\mu\text{m} \times$ 100 μm -size STJ
- considering 1 s
- temperature $T=0.1 \sim 15\text{K}$
- integral range
15~30meV , 10~35meV , 5~40meV

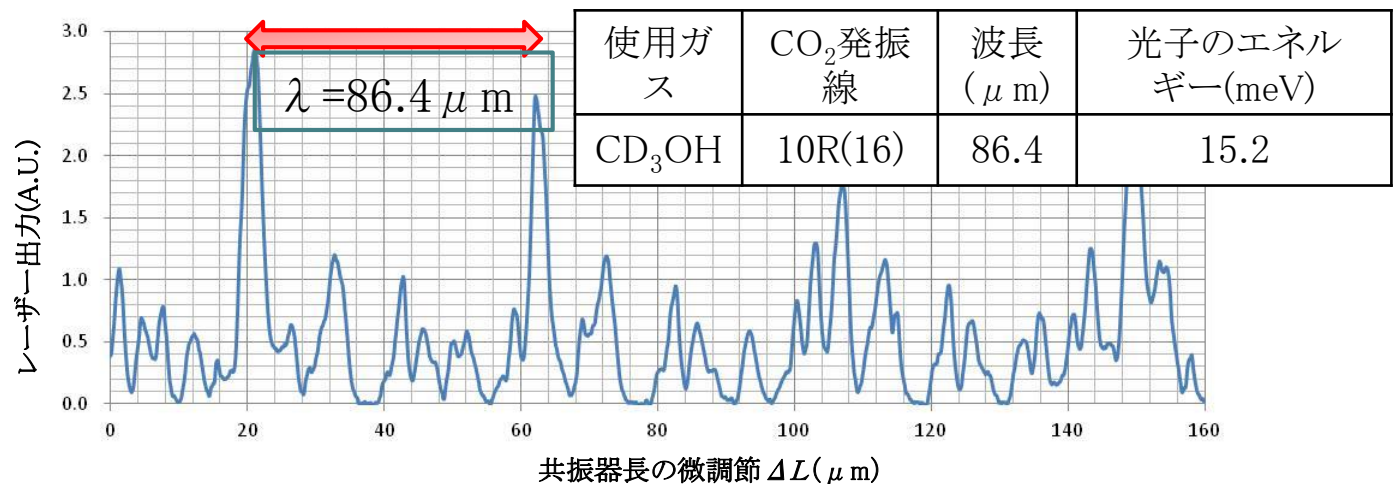
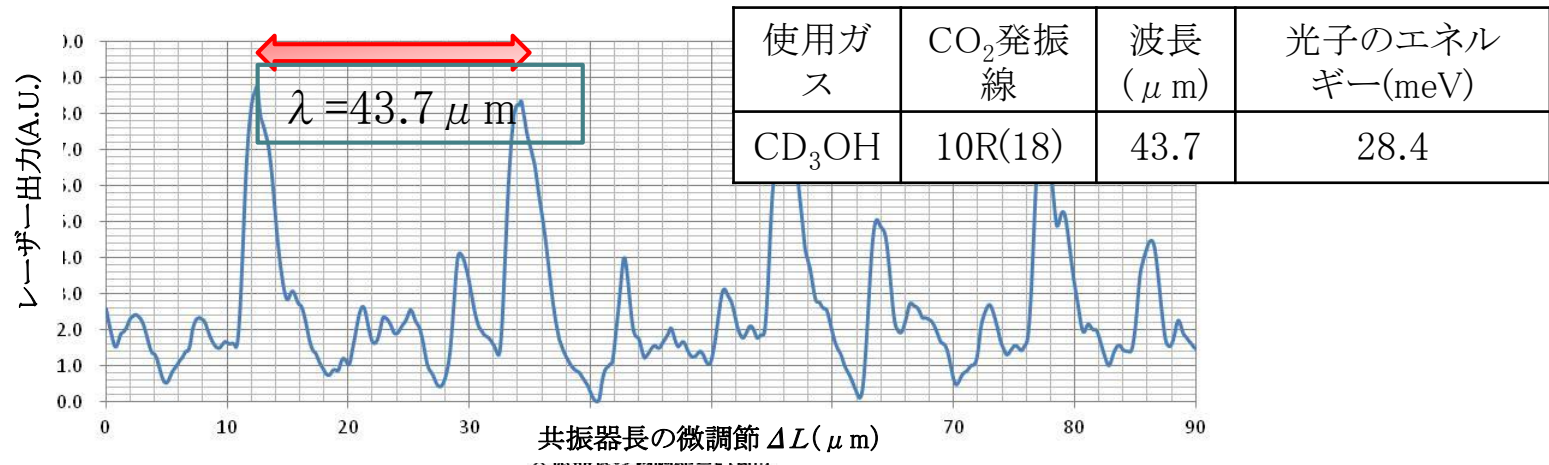
CO₂レーザー原理①



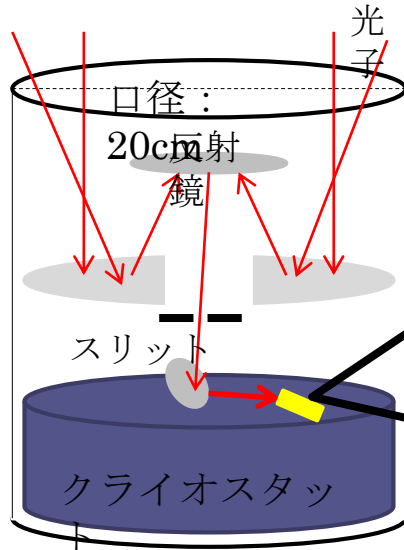
CO₂分子の振動状態は、 (ν_1, ν_2, ν_3) の3つの量子数の組み合わせで表される。



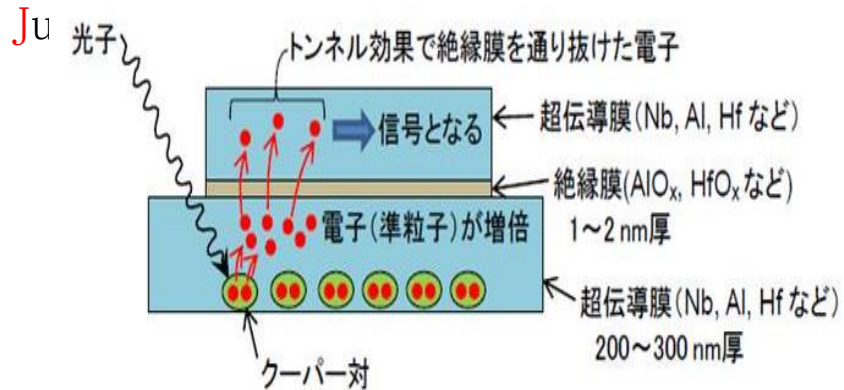
振動状態によって決まる振動エネルギー準位は、さらに回転量子数Jによるいくつかのエネルギー準位からなる



検出器について



STJ検出器(Superconducting Tunnel



- 超伝導膜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のために有望

STJ検出器のエネルギー測定精度

$$\sigma = \sqrt{1.7\Delta(FE_\gamma)}$$

光子のエネルギー: E_γ
 エネルギーギャップ: Δ
 ファノ因子: F

Material	Δ (meV)	エネルギー分解能(%) $\frac{\sigma}{E_\gamma}$
Hf	0.021	$1.7@E_\gamma=24 \text{ meV}$
Al	0.172	$4.9@E_\gamma=24 \text{ meV}$

Ref. M.Kurakado, Nucl. Instr. And Meth.196(1982)275