

STJ検出器の較正に用いる遠赤外線源の開発

福井大工，中部大工^A，筑波大数理^B，福井大遠赤セ^C

○小村祥太，折笠桂輔，廣瀬龍太，吉田拓生，
岡島茂樹^A，中山和也^A，金信弘^B，武内勇司^B，小川勇^C

ニュートリノフロンティア研究会
クロスウェーブ府中 2013年12月7日

ニュートリノ崩壊とは

ニュートリノの質量二乗差の値

$$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2 = 2.43 \times 10^{-3} eV^2$$

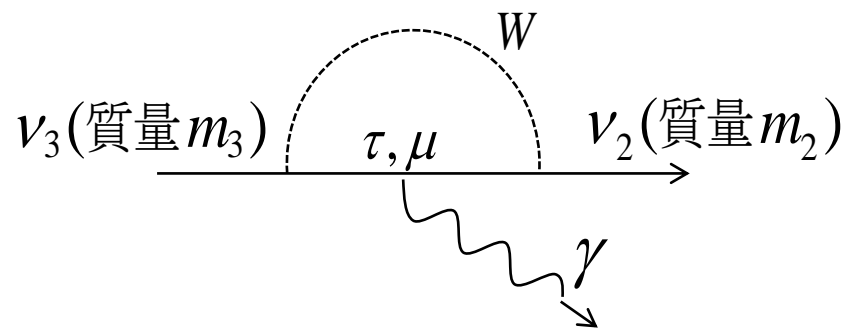
$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.59 \times 10^{-5} eV^2$$

Ref. Ahn, M. H. et al. (K2K),
Phys. Rev. D74 (2006) 072003

m_3 (meV)	m_2 (meV)	m_1 (meV)	E_γ (meV)	波長 λ (μm)
50	8.7	0	24	52
61	36	24	20	62
87	51	25	14	89

ニュートリノ崩壊ファインマン図(静止系)

$$\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$$



ニュートリノの寿命 τ $10^{17} \sim 10^{18}$ years
(LR Symmetric Model, m_3 と m_2 にもよる)

← **遠赤外領域の電磁波**

ニュートリノ崩壊光子のエネルギー E_γ

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

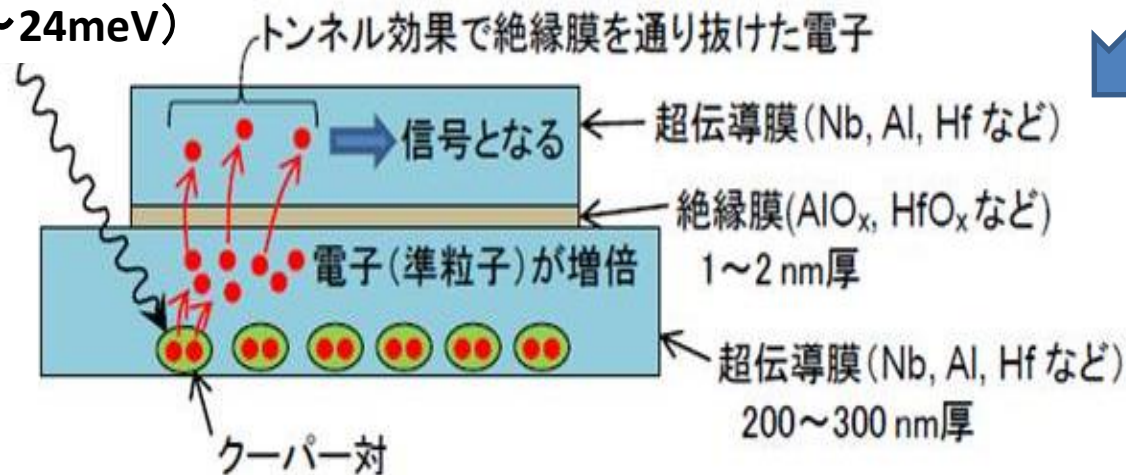
光子のエネルギー E_γ が分かれば、ニュートリノの質量が決まる

検出器について

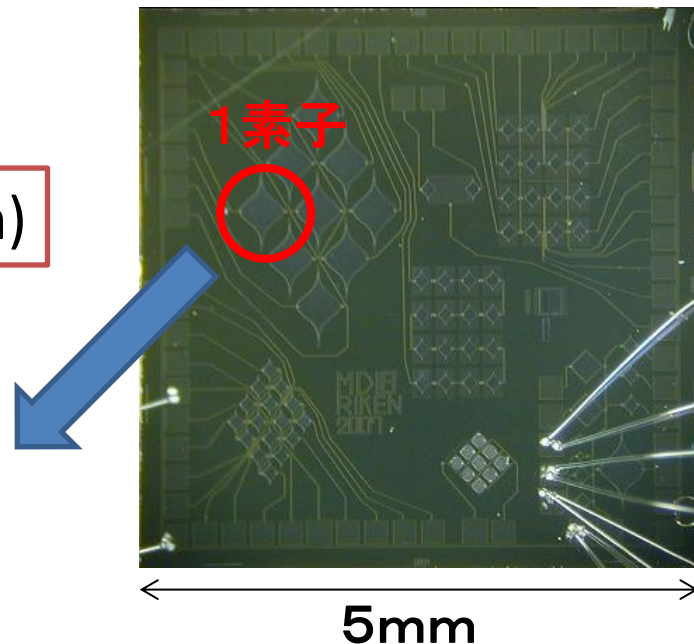
STJ検出器(Superconducting Tunnel Junction)

光子

(14~24meV)



縦 : 100 μ m, 横 : 100 μ m, 高さ : 300nm



- ・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のために有望
Hf-STJ検出器のエネルギー分解能(理論値) ~ 1.7% @ 24meV

本研究で視野に入れている光子のエネルギー($E_\gamma=14\sim24$ meV、波長 $\lambda=89\sim52$ μ m) 領域で実際に性能評価をする必要がある

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、今でも大量に宇宙の中を飛び交っていると考えられているが、未発見。

崩壊する確率は極めて低いため、観測する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

粒子が飛び交う宇宙

光子: $400\text{個}/\text{cm}^3$ (約3K)

ニュートリノ: $100\text{個}/\text{cm}^3$ (理論による予測, 約1.9K)

ニュートリノの寿命 τ $10^{17} \sim 10^{18}\text{years}$

STJ検出器性能評価

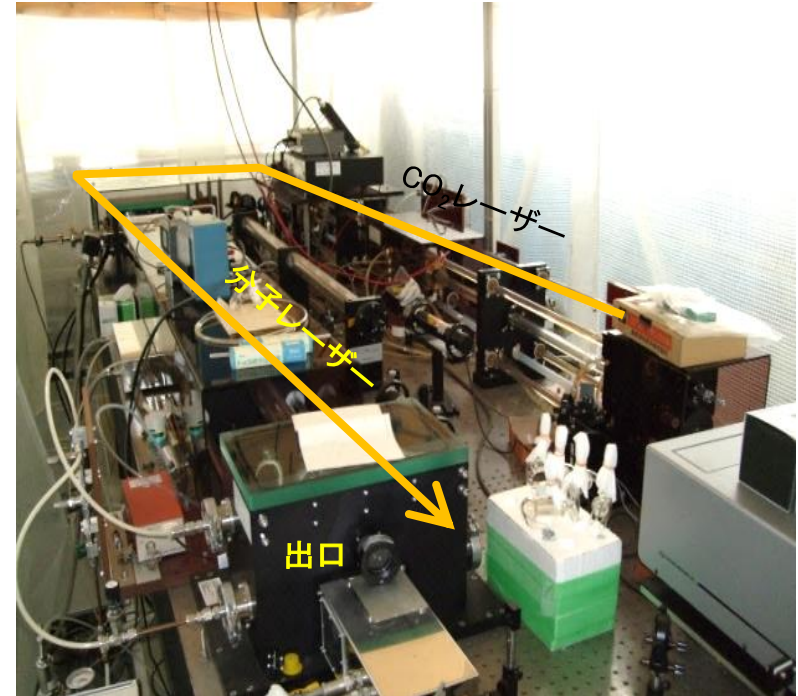
性能評価には
光子のエネルギー $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$
(波長 : $89 \sim 52 \text{ } \mu\text{m}$ 周波数 : $1.2 \sim 6.1 \text{ THz}$)
の光源が必要

遠赤外分子レーザーの特徴(設計仕様)

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

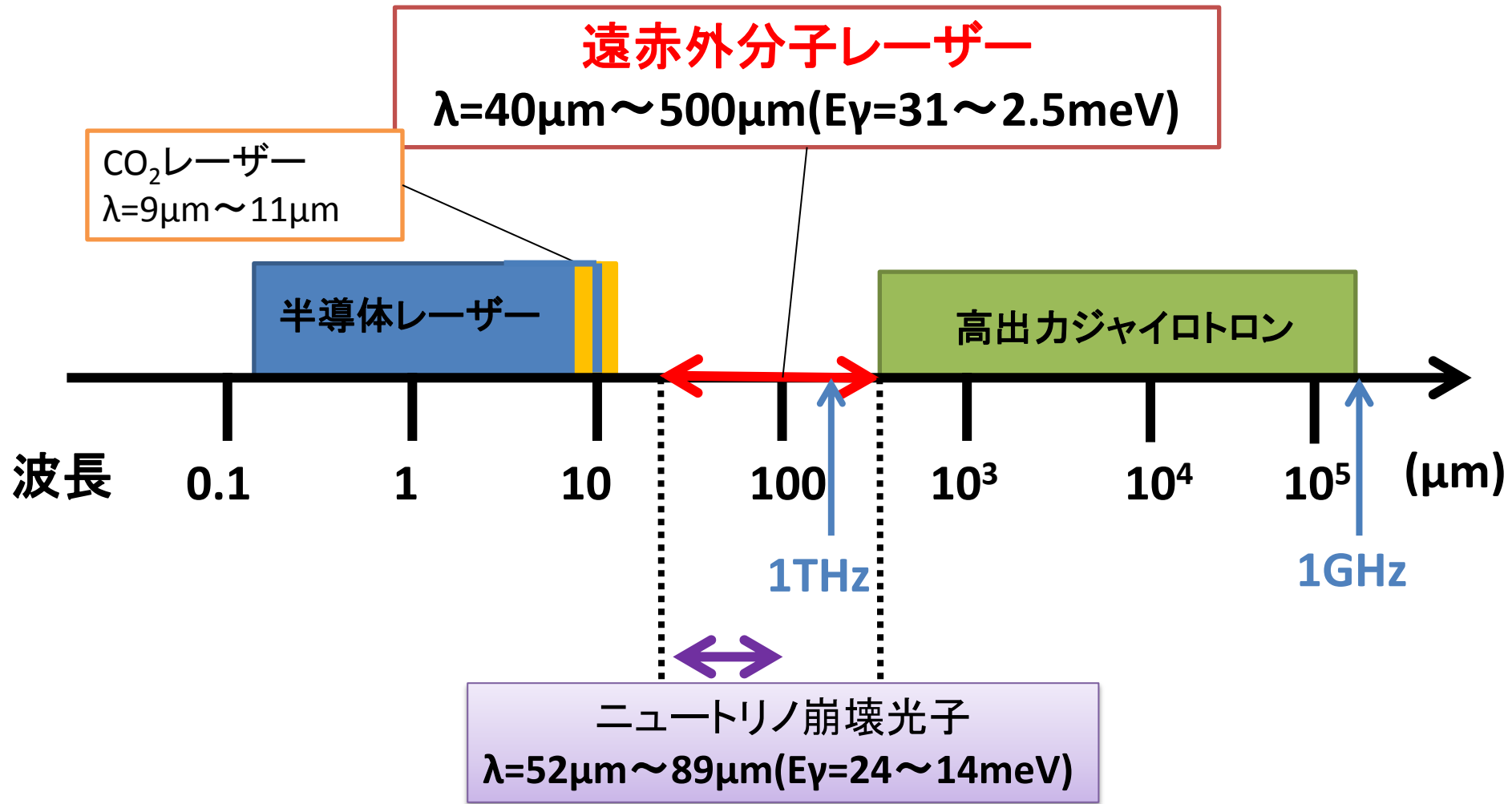


分子レーザーをSTJ検出器性能評価
に用いることができる



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

他のレーザーとの比較



※ジャイロトロン: 磁場に巻き付いた電子の回転運動をエネルギー源として、高周波を発振させる大型の電子管

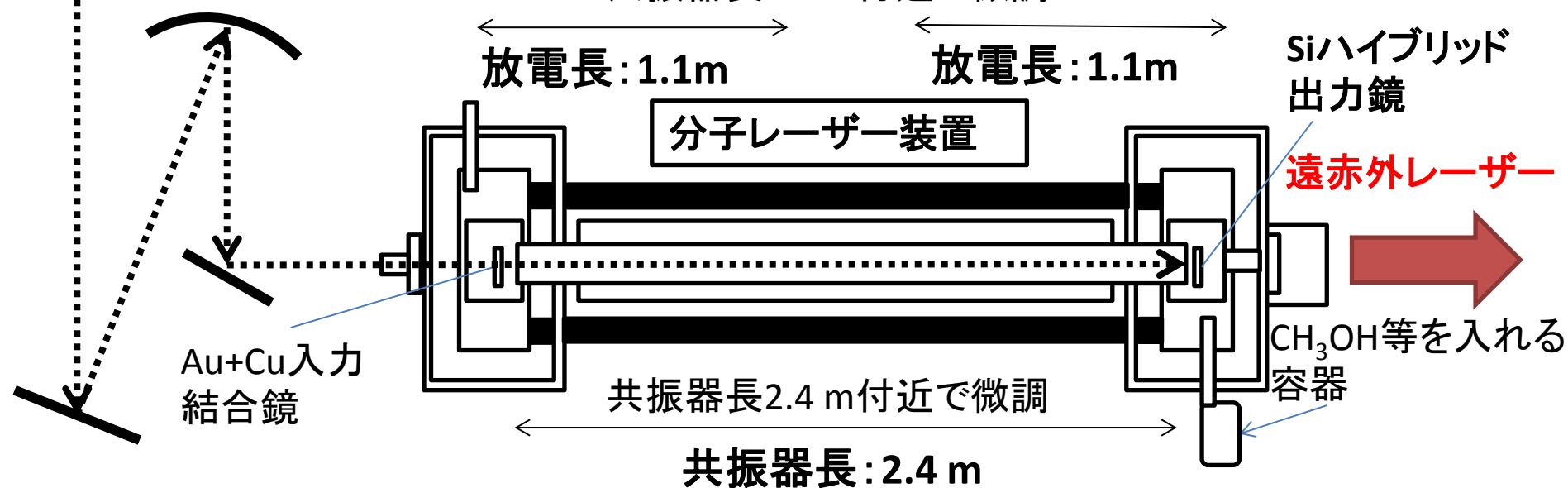
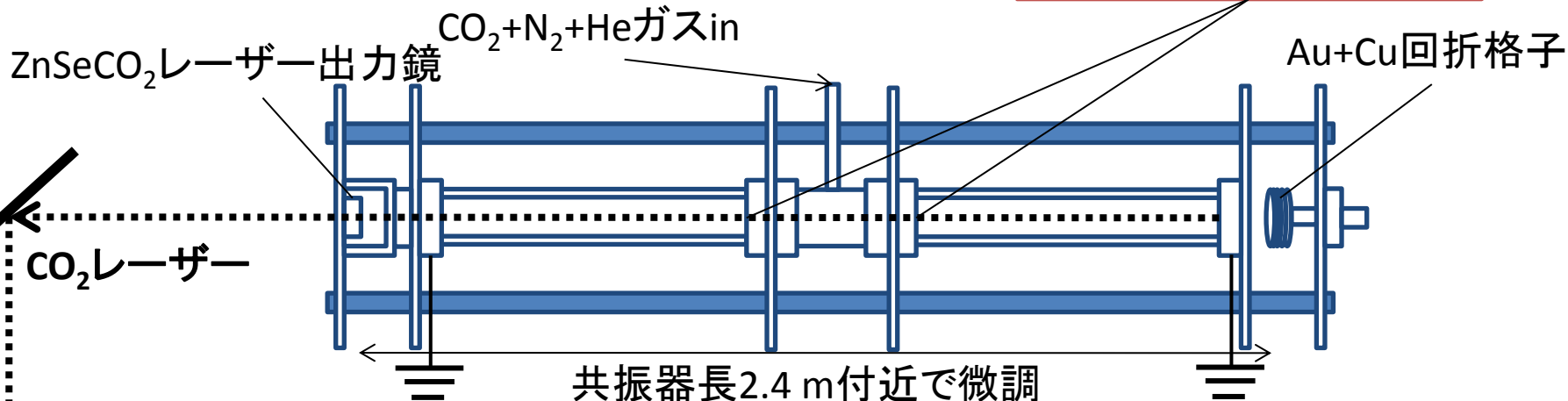
CO₂レーザー励起の遠赤外分子レーザーシステム模式図

CO₂レーザーを分子レーザーに入射させ、分子レーザー共振器内に満たされたガスを励起

遠赤外レーザーを発振

CO₂レーザー装置

高電圧(~10kV)をかけてガスを励起



励起用CO₂レーザー装置

ZnSeCO₂レーザー出力鏡

圧電素子による
共振器長の微調整

CO₂+N₂+Heガスin

高電圧(~10kV)を
かけてガスを励起

Au+Cu回折格子

角度調節による
発振線の選択

CO₂レーザー

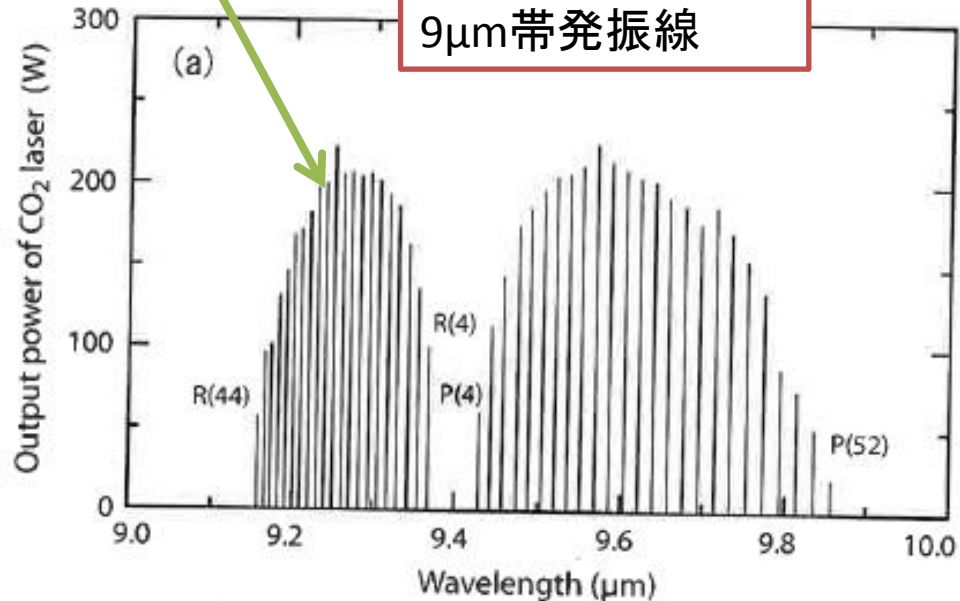
共振器長

レーザー管(パイ
レックスガラス製)

共振器長2.4m付近で微調(半波長の整数倍で共振)

9R(34)

9μm帯発振線



9μm~11μmに多くの発振線を持つ
(CO₂分子の振動・回転状態によって
様々なエネルギー準位を持つから)

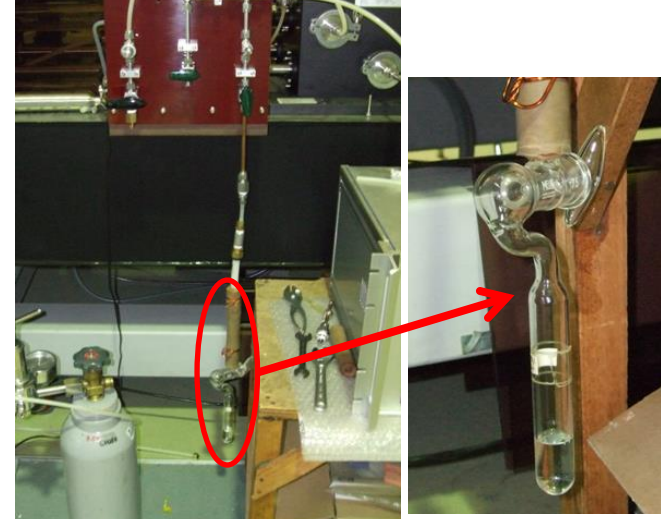
例: 発振線9R(34)

9μm帯の波長でCO₂分子の角運動量が
35から34に遷移

遠赤外分子レーザー装置

遠赤外分子レーザーの発振線を選択方法

- ・分子レーザー共振器内に入れるガスを1つ選び
- ・CO₂レーザーの発振線を選択し
- ・分子レーザーの共振器長を微調整する



真空中に引くことで共振管内を
アルコールの蒸気で満たす

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

ガスアウト

レーザー管
(パイレックスガラス製)

CO₂レーザー光

遠赤外レーザー

スポット: 10mmφ

Siハイブリッド出力鏡

- ・CO₂レーザー光は反射
- ・ステッピングモーターで
共振器長の微調整

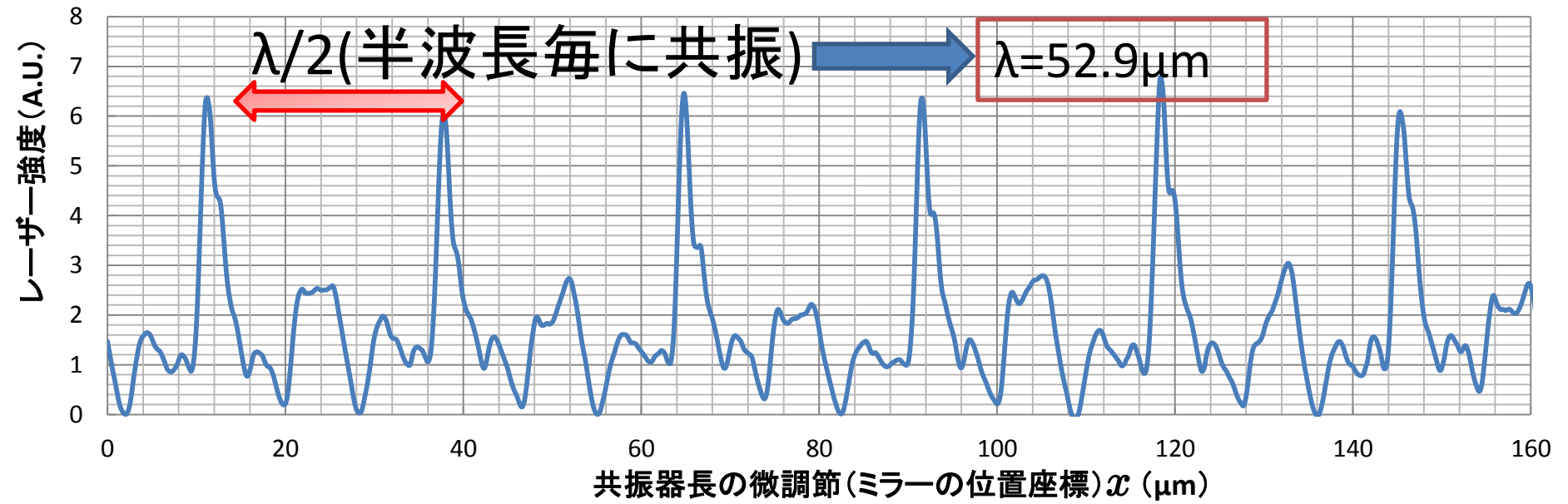
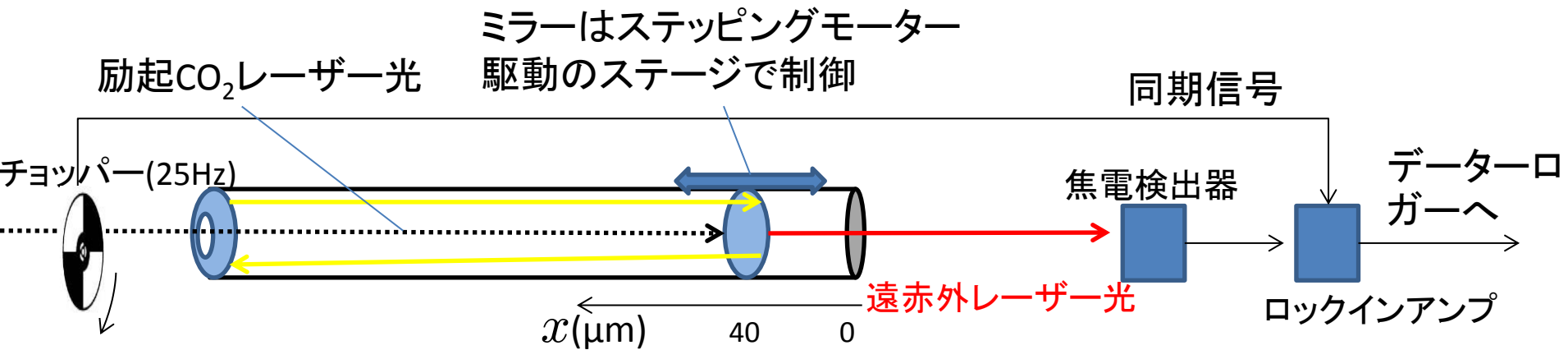
Au+Cu入力鏡

・中心から9mm
離れた所に
3mmφの穴が空
いている

共振器長: 2.4m

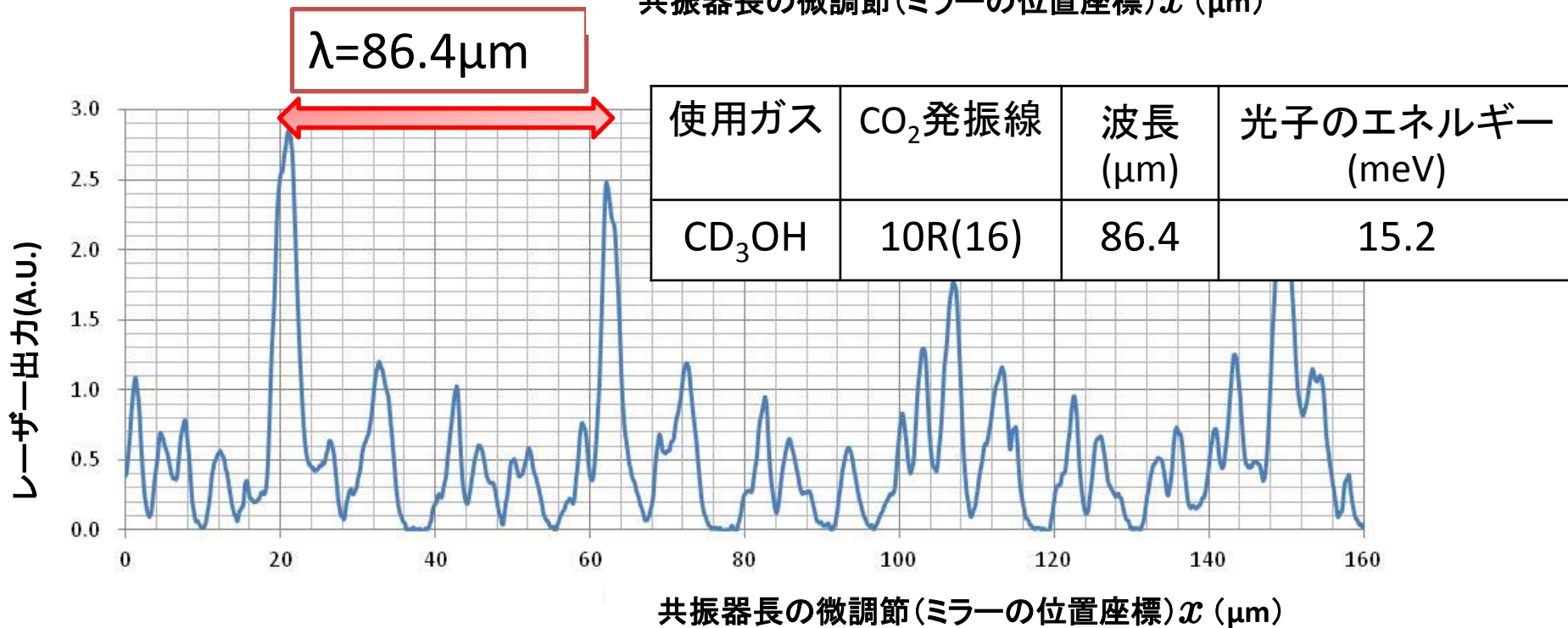
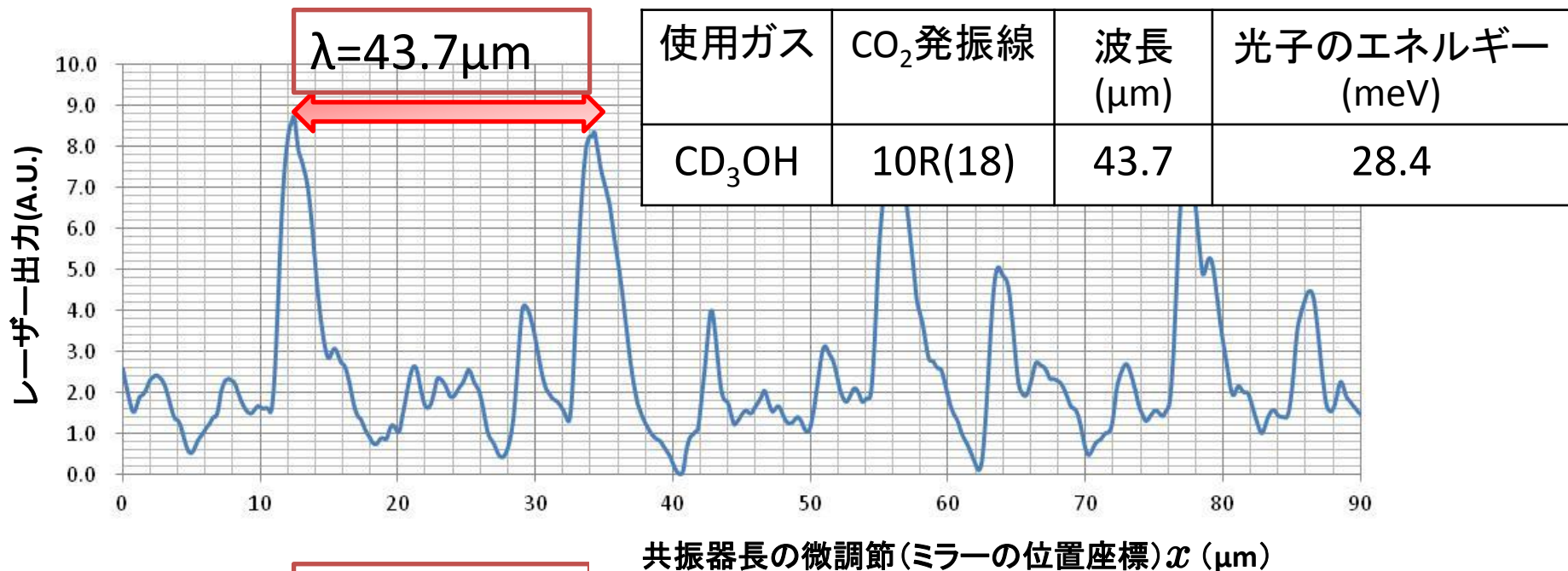
共振器長2.4m付近で微調(半波長の整数倍で共振)

分子レーザーの稼働テスト



使用ガス	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	9R(34)	57	52.9	23.5	4.2

出力は
パワーメーター
で別途測定



遠赤外レーザー発振線(70本の設計値の一部抜粋)

	使用ガス	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	52.9	23.5	4.2
	CH ₃ OH	10R(16)	(123)	63.0	19.7	(54)
→	CD ₃ OH	10R(16)	(99)	86.4	14.4	(25)
	CH ₃ OH	9R(10)	(83)	96.5	12.9	(68)
	CH ₂ DOH	10P(26)	(110)	150.6	8.2	(24)
	CH ₂ DOH	9P(14)	(85)	206.7	6.0	(19)

→は確認済みの発振線。

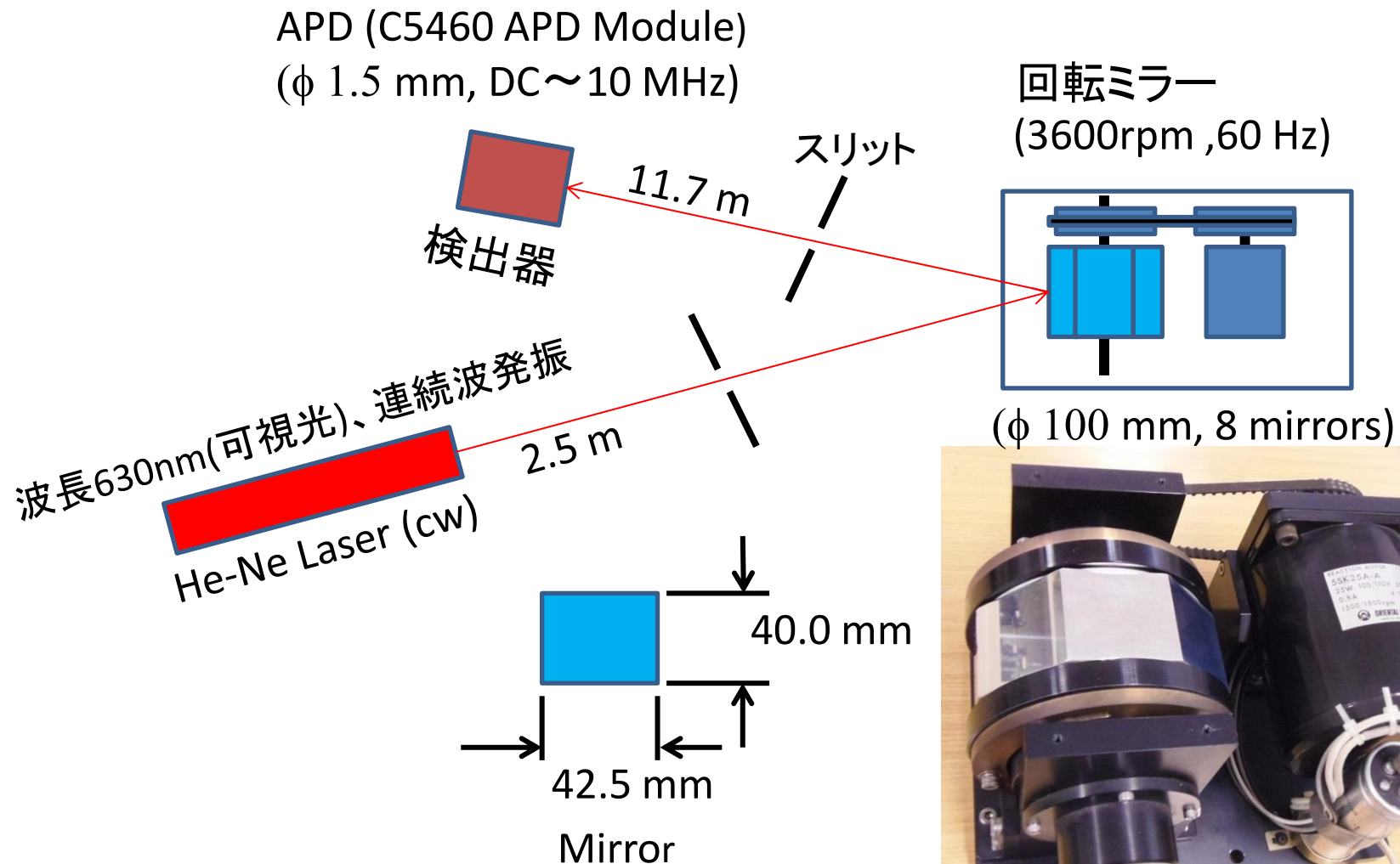
()内は設計値

本研究で視野にいれているニュートリノ崩壊光子のエネルギー領域 ($E_{\gamma} = 14 \sim 24$ meV、波長 $\lambda = 89 \sim 52$ μm) がカバーされている

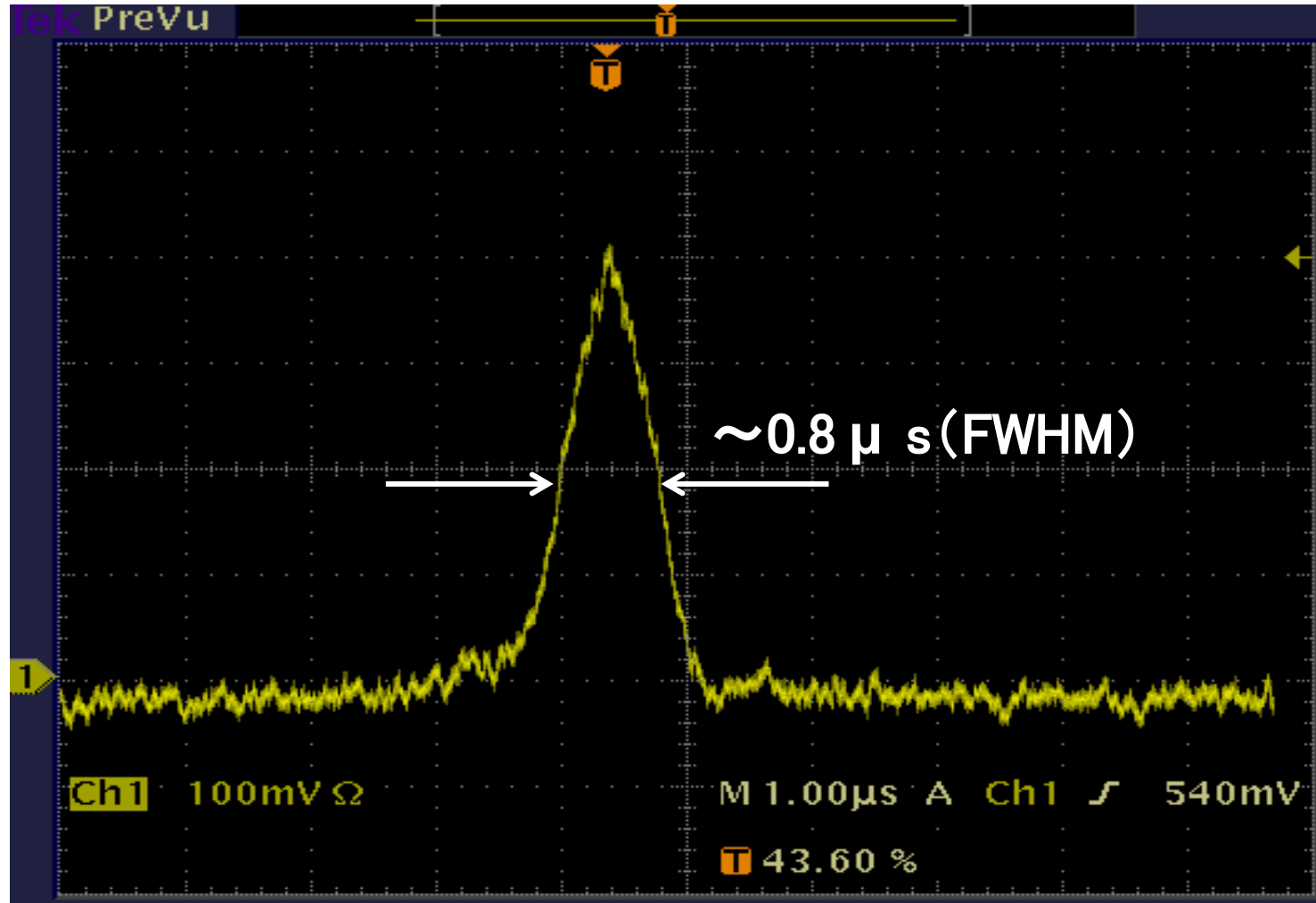
※出力4.2mWで
照射される光子は
 10^{12} 個/μs
(10mmφのスポットあたり)

連続発振線のパルス化(回転ミラー方式)

光信号に対する検出器の応答を調べたいのでパルス化する必要がある。
→STJ検出器用のアンプの時定数に合わせて $1\mu\text{s}$ 以下を目標



回転ミラー方式でのパルス時間幅



結論

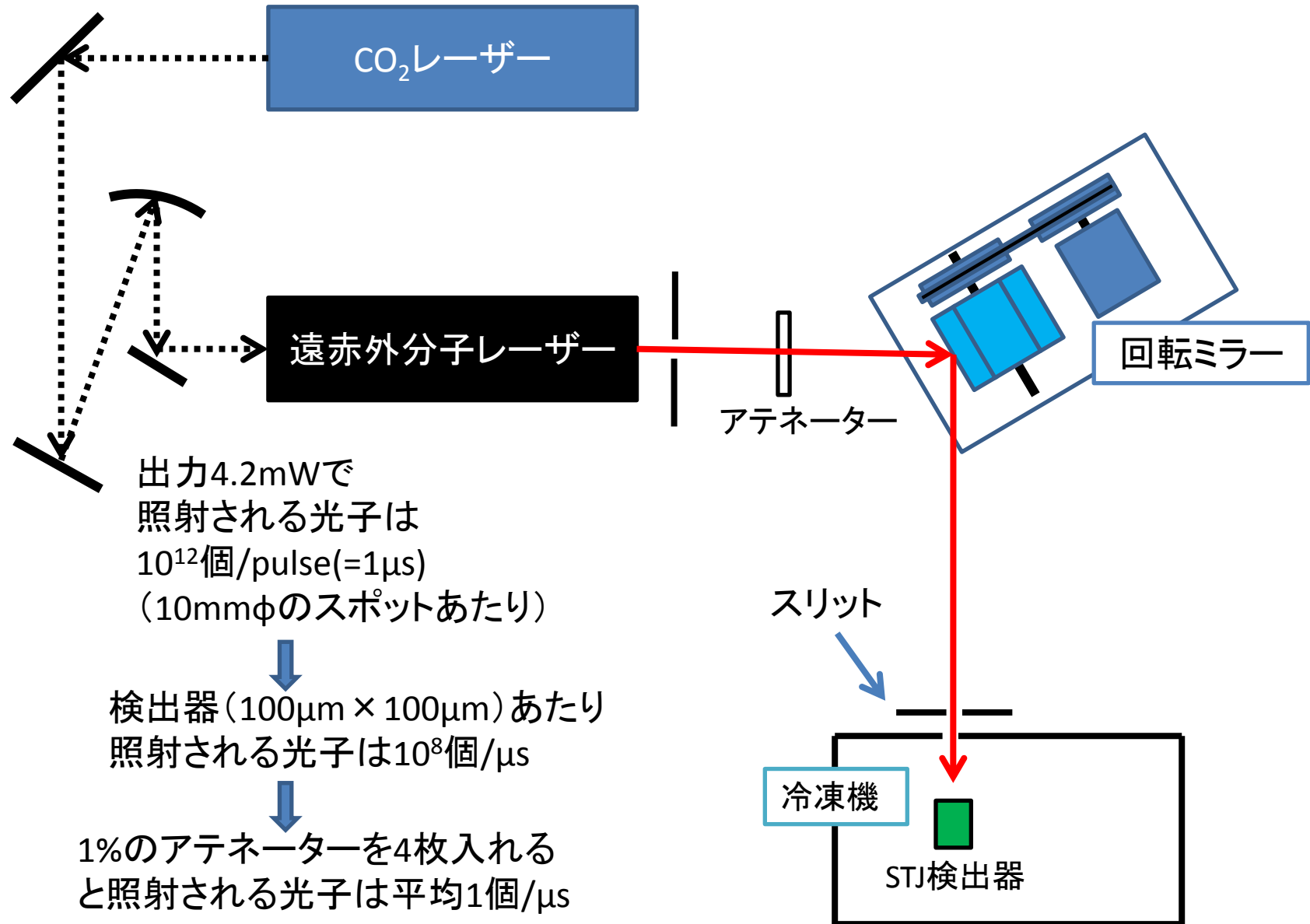
- 遠赤外分子レーザーの稼働テストを行い、本研究で視野にいれているニュートリノ崩壊光子のエネルギー領域 ($E_\gamma=14\sim24$ meV、波長 $\lambda=89\sim52$ μm)に対応した発振線を確認し、出力を測定した
- 連続波発振であるレーザーをパルス化→回転ミラー: $0.8\mu\text{s}$

今後の展望

- ◆ STJ検出器の性能評価のため、本研究で視野に入れているエネルギー領域($E_\gamma=14\sim24$ meV、波長 $\lambda=89\sim52$ μm)に対応した分子レーザーの発振線を更に確認していく
- ◆ 分子レーザーでパルス化のテスト
- ◆ 出力が強いので減光するテスト(アテネーター、Defocus)

この遠赤外分子レーザーを実際にSTJ検出器に照射し、STJ検出器の性能評価を行う

STJ検出器性能評価実験



ご静聴ありがとうございました

予備スライド

ニュートリノとは？

第一世代

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

第二世代

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

第三世代

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

特徴

- ・3種類ある
- ・質量の二乗差だけ分かっている
- ・透過性が非常に高い
- ・寿命が非常に長い

カミオカの振動実験
によって発見された

検出が困難

$$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2$$

ニュートリノの二乗差

ν_τ ν_μ

STJ検出器のエネルギー分解能

光子のエネルギー測定精度

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

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: $F = 0.2$

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

エネルギー分解能

$$\frac{\sigma_E}{E_\gamma}$$

Material	Δ (meV)	エネルギー分解能(%)
Nb	1.55	14.8
Al	0.172	4.9
Hf	0.021	1.7

ニュートリノの寿命

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

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

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

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： $M_W = 80.4 \text{ GeV}$

標準模型だと寿命が非常に長い

ニュートリノの崩壊幅が大きくなる
右巻きWeakBosonが存在する
L-R対称模型で計算する。

ニュートリノの寿命

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

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： $m_3 = 50 \text{ meV}$, $m_2 = 8.7 \text{ meV}$

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： $M_{W1} = 80.4 \text{ GeV}$ 、 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： $\sin \zeta = 0.013$

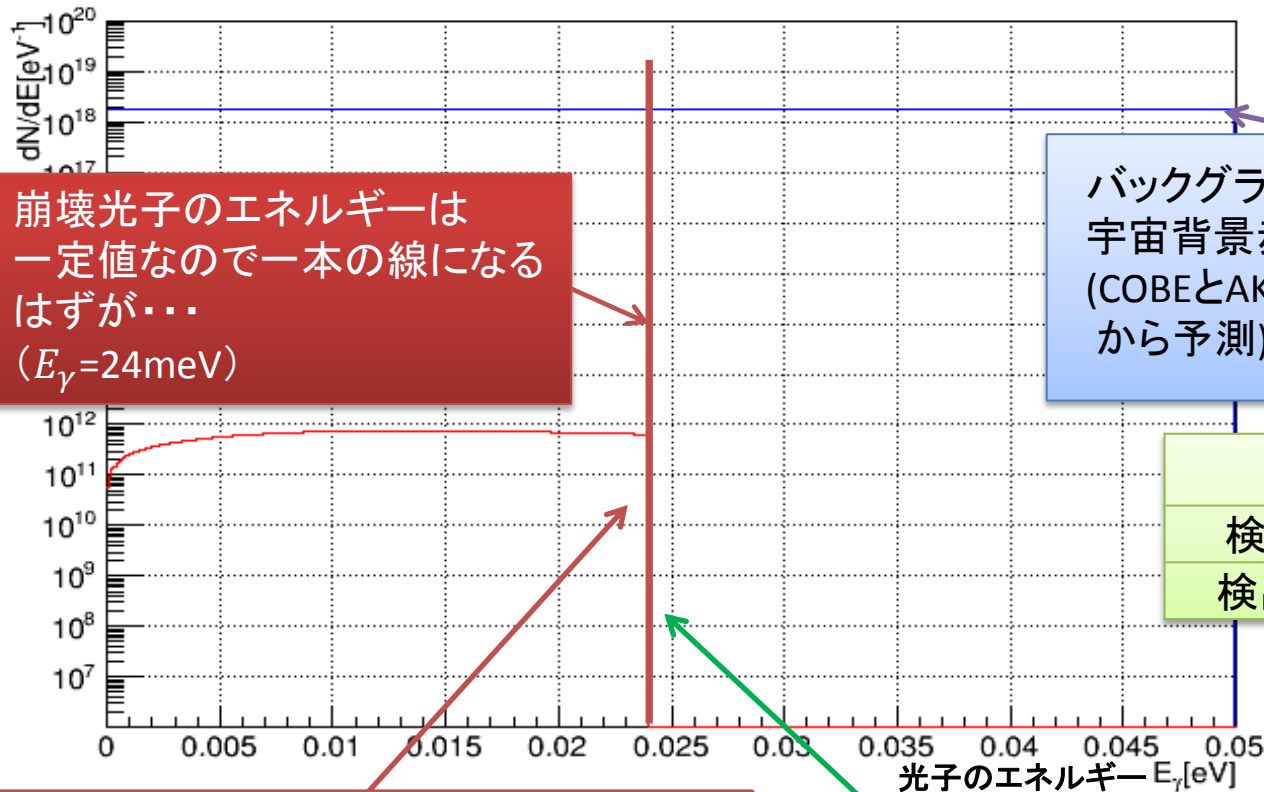
$$\tau = 1.10 \times 10^{18} \text{ years}$$

寿命がとても長いため、ニュートリノの崩壊を観測するためには
数多くのニュートリノが必要となる。



宇宙に膨大に存在していると言われる
宇宙背景ニュートリノを観測対象とする

崩壊光子と宇宙背景赤外輻射(CIB)のエネルギー分布



崩壊光子のエネルギーは一定値なので一本の線になるはずが...
($E_\gamma = 24\text{meV}$)

バックグラウンド
宇宙背景赤外輻射(CIB)など
(COBEとAKARIの観測結果から予測)

観測時間	112日
検出器の大きさ	直径20cm
検出器の視野角	3°

ニュートリノ崩壊光子

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

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

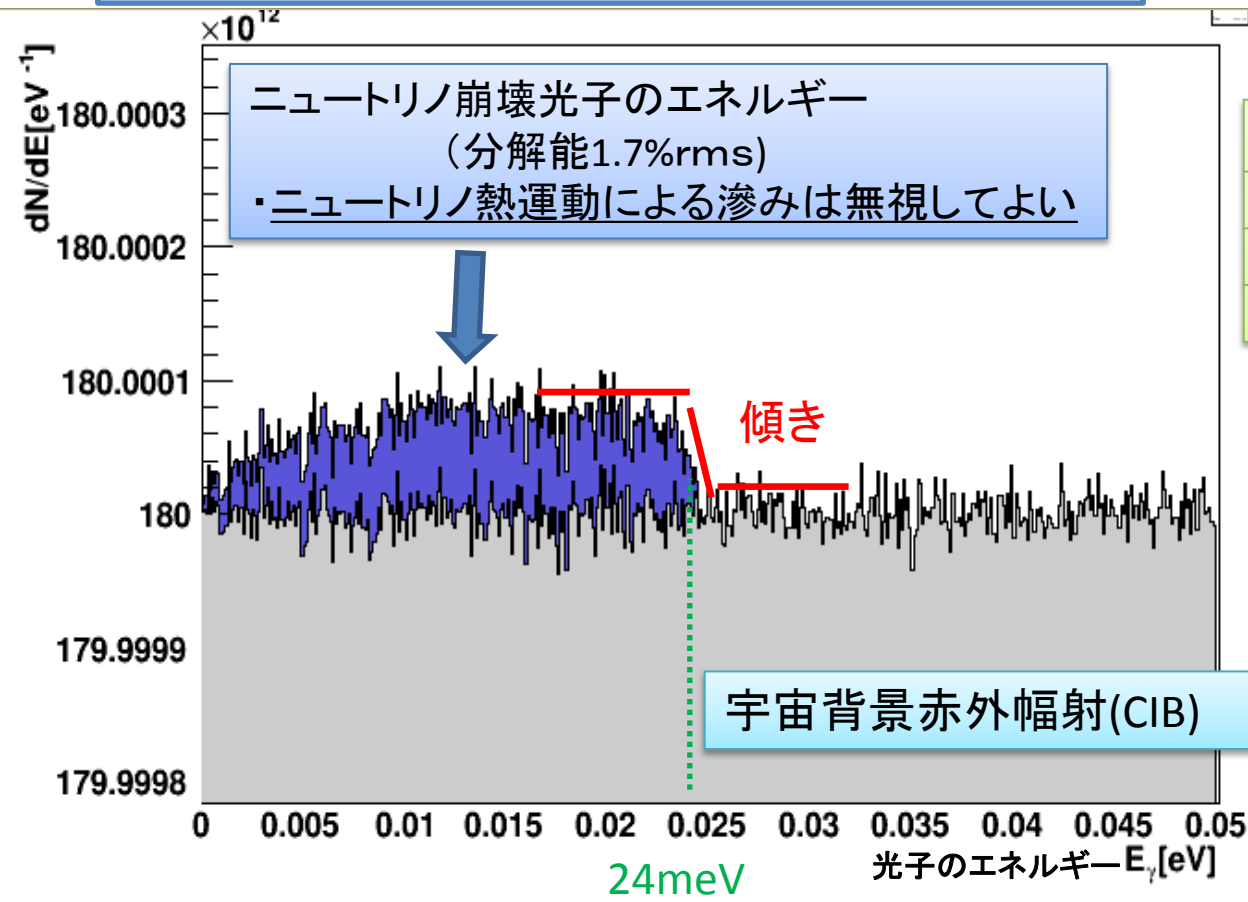
(式に沿ってシミュレーション)

sharp edge

- ・検出器の分解能0%, ニュートリノ重心系での崩壊光子のエネルギー($E_\gamma = 24\text{meV}$)で鋭く切り立った形を成す。
- ・実際の観測では、検出器の分解能とニュートリノの熱運動によって僅かに滲む。

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



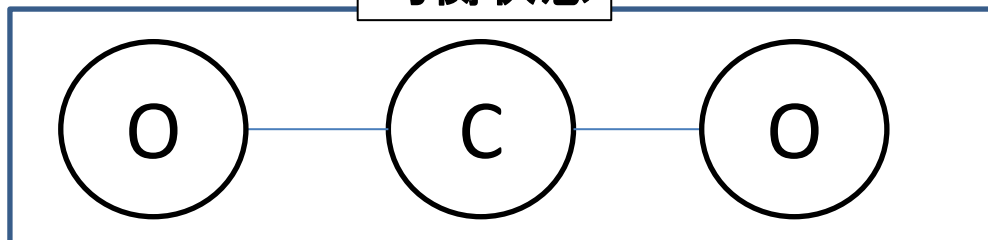
シミュレーション条件

観測時間	112日
検出器の大きさ	直径20cm
検出器の視野角	3°
検出器の分解能	1.7%rms

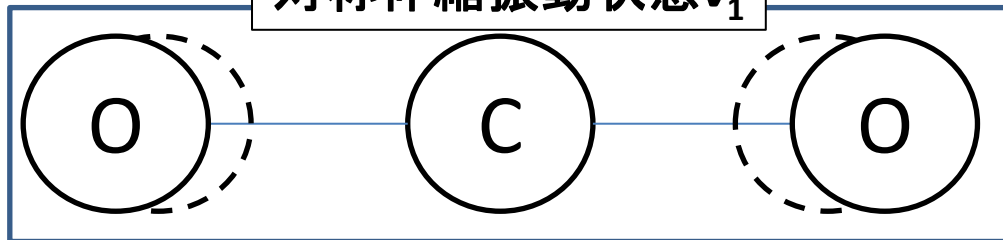
- ・エネルギーで微分することで、**傾き**を求める。
- ・**エッジの部分** (E_γ) で傾きが急に大きくなる。
- ・崩壊現象の有無を確認。

CO₂レーザー原理①

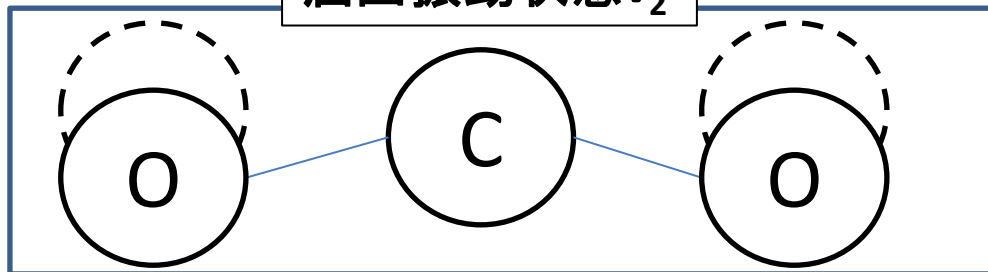
均衡状態



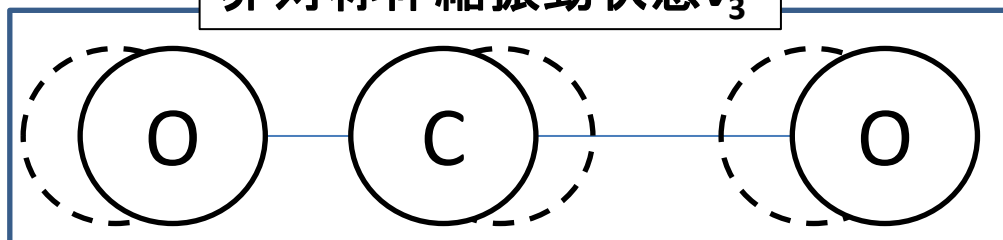
対称伸縮振動状態 ν_1



屈曲振動状態 ν_2



非対称伸縮振動状態 ν_3

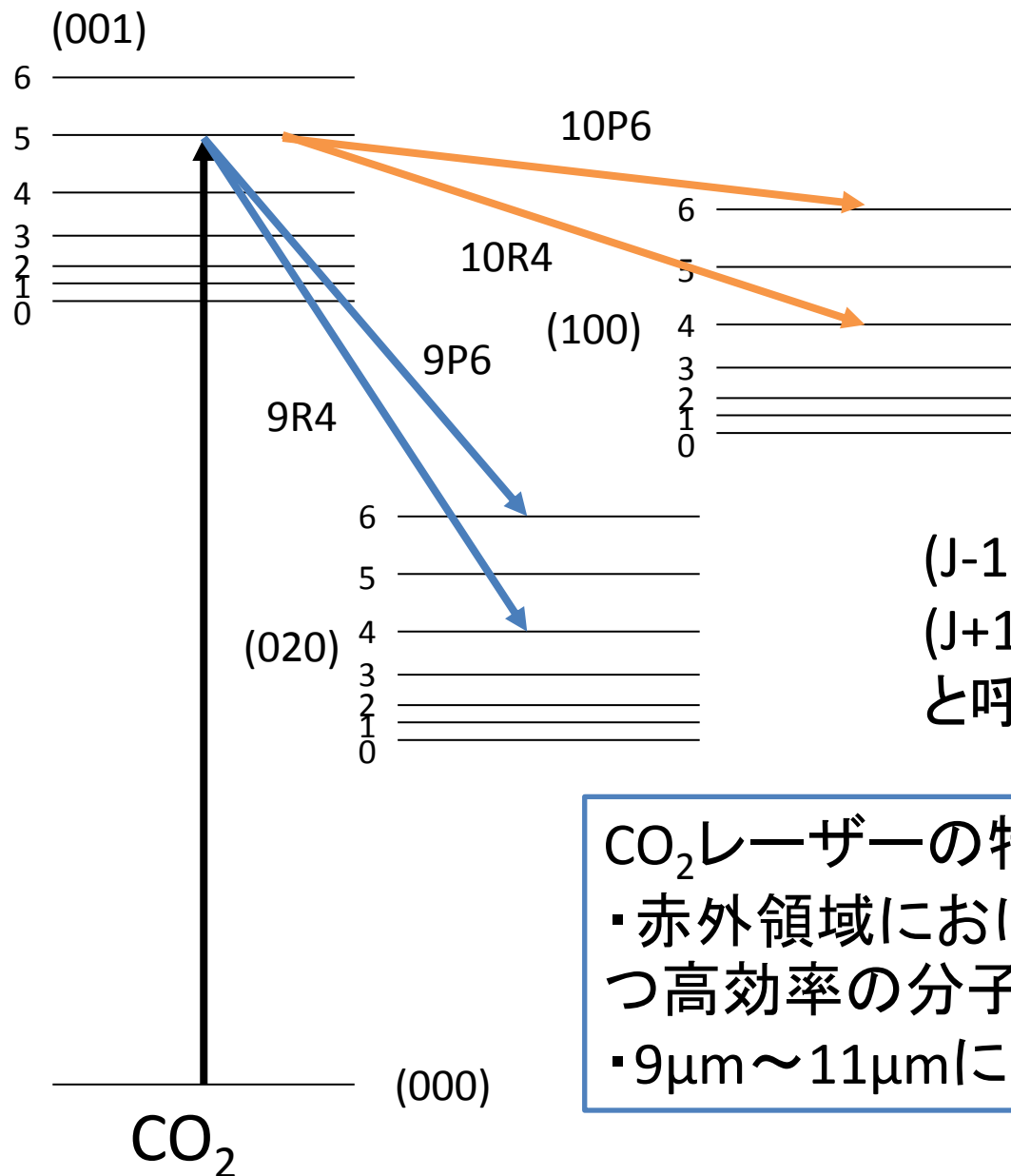


CO₂分子の振動状態は、 (ν_1, ν_2, ν_3) の3つの量子数の組み合わせで表される。

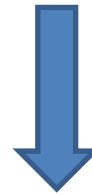


振動状態によって決まる振動エネルギー準位は、さらに回転量子数によるいくつかのエネルギー準位からなる

CO₂レーザー原理②



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

CO₂レーザーの特徴

- ・赤外領域における高出力かつ高効率の分子レーザー
- ・9μm～11μmに多くの発振線

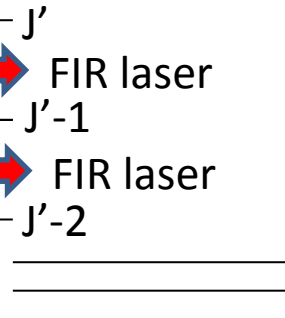
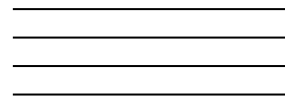
CO₂レーザー励起の遠赤外分子レーザー原理

9μm～11μmの波長帯域に吸収帯をもつ分子は非常に多い

- ①CO₂レーザー線を強く吸収
- ②大きな永久双極子モーメントを持ち、回転遷移の遷移確率が多い
- ③エネルギー準位あたりの分子の分布数が多い
- ④約6原子以下の分子

励起振動状態

$$v=v'$$

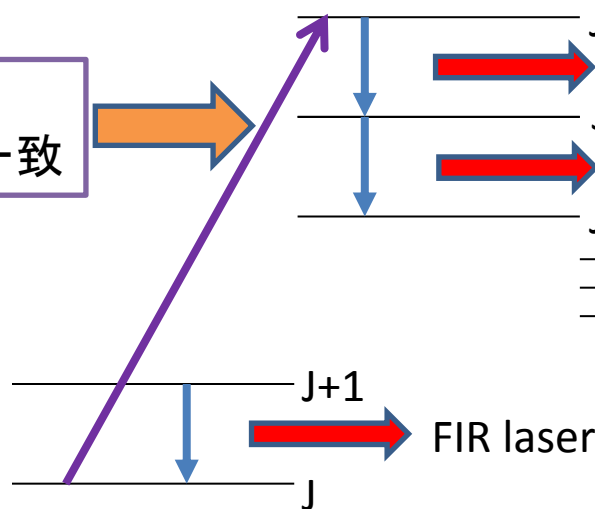


特徴

- ・放電励起とは異なり電子衝突による分子の解離問題がない
- ・遠赤外分子レーザー媒質に多原子分子が使える

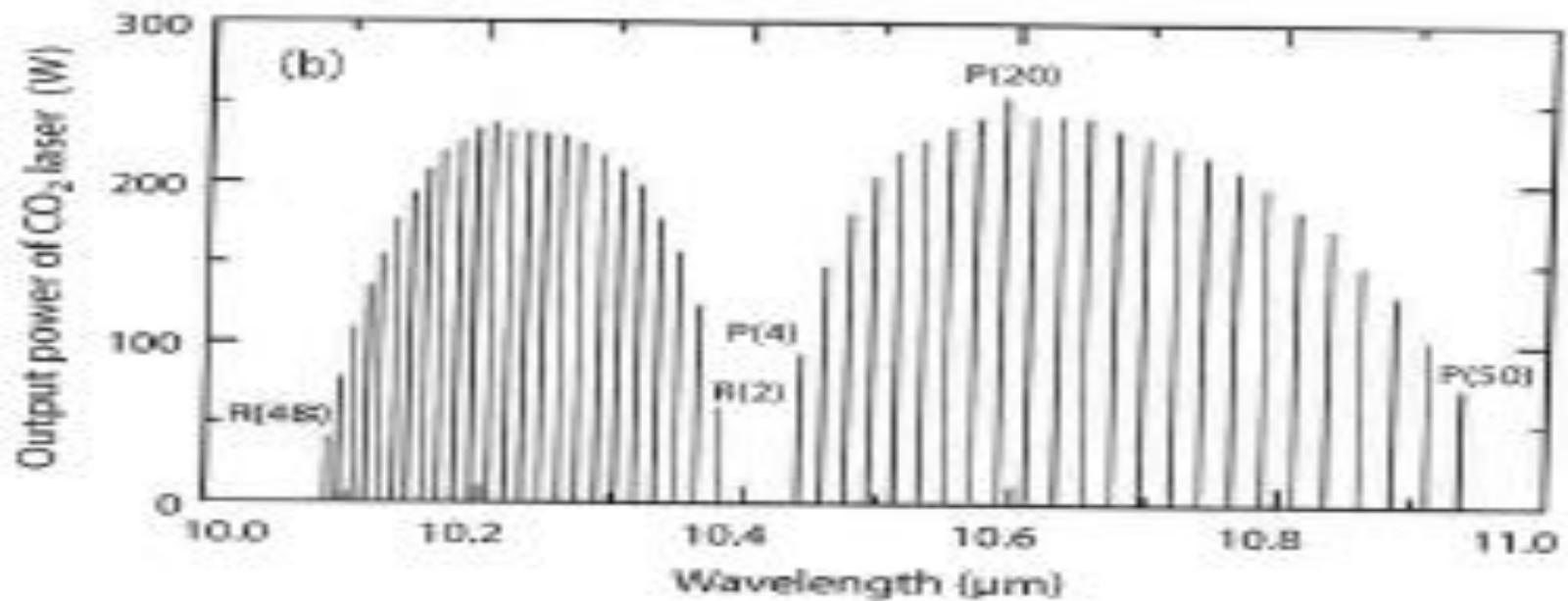
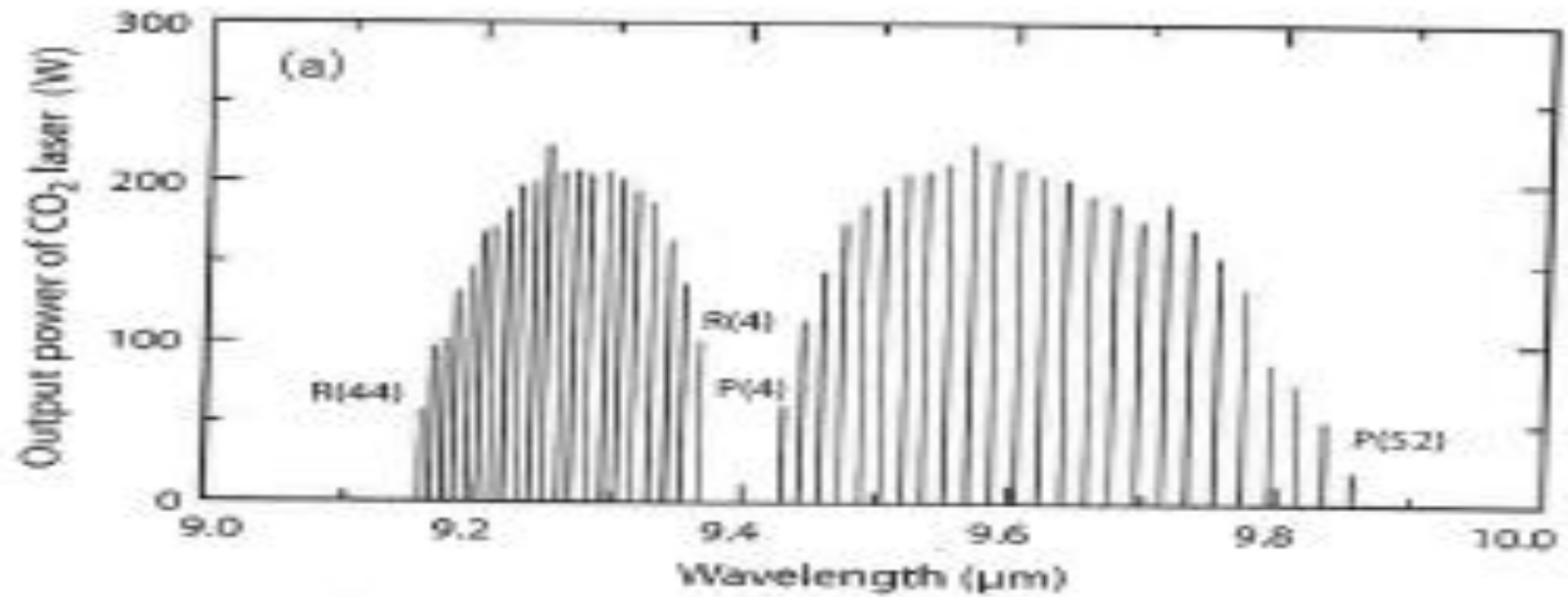
CO₂ laser
周波数が一致

$$v=0$$

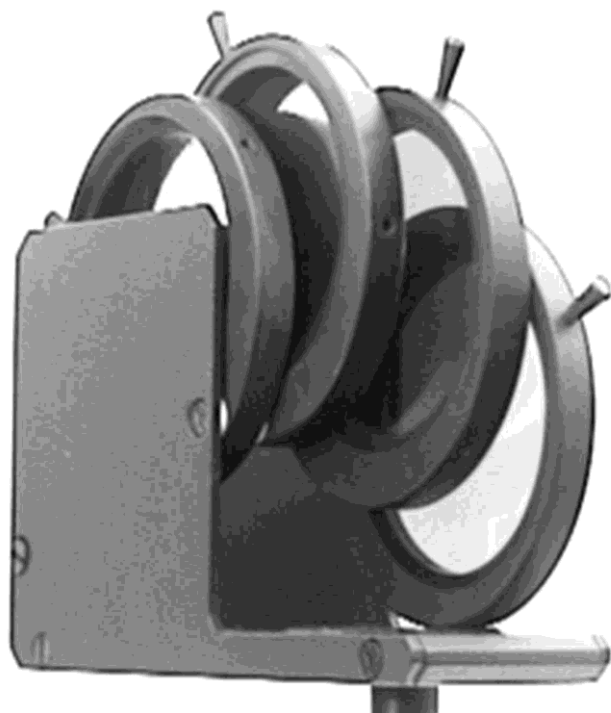


基底振動状態

CO₂レーザー発振線



アテネーター



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。

Slider label	Transmission, %
30	30.5
10	10.5
3	3.5
1	0.8

連続発振線のパルス化(チョッパ方式)

直径100mm、スリット幅1mm、100Hzで回転

波長630nm(可視光)、連続波発振

He-Ne レーザー

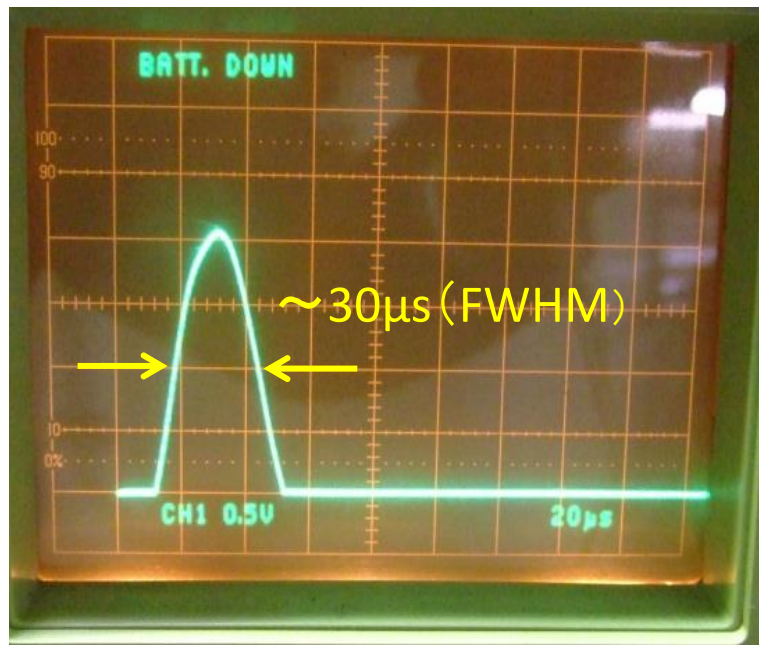
チョッパー

フォトリランジスタ

オシロスコープ

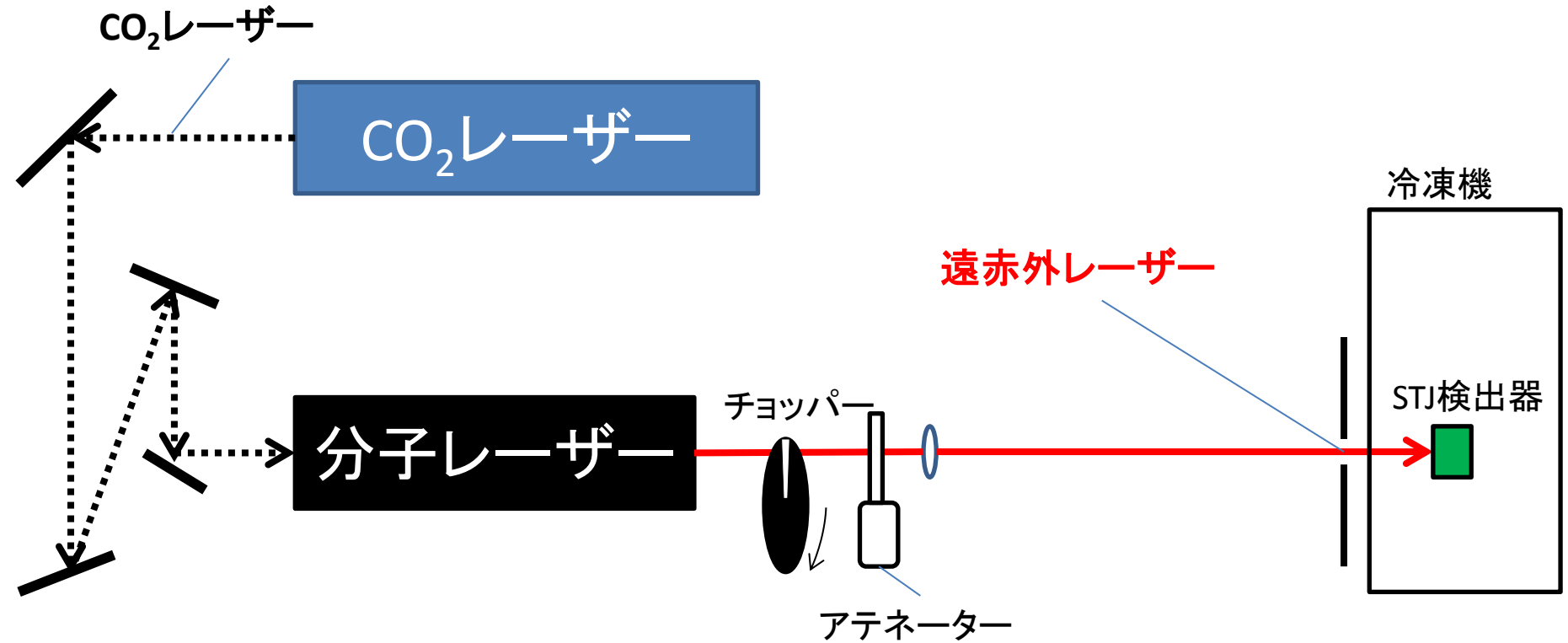
10k Ω

9
V

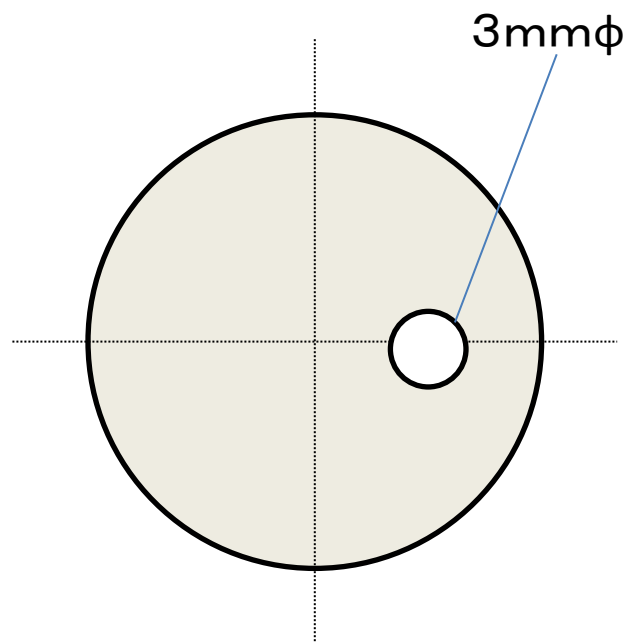


パルス時間幅30 μ s
→スリット幅:0.1mm、
回転周期:400Hzで1 μ s以下
にできると考えられる

伝送路モデル(チョツパー方式)

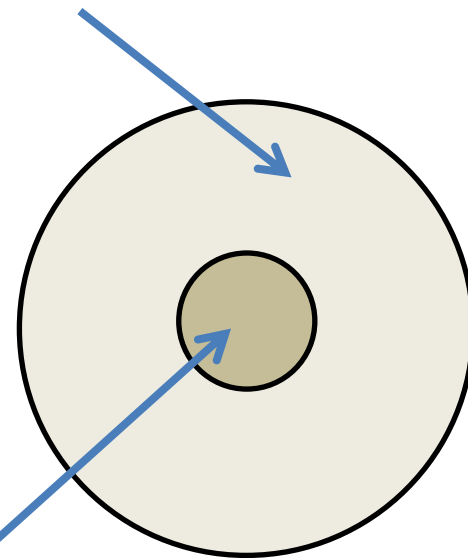


分子レーザー入力鏡



分子レーザー出力鏡

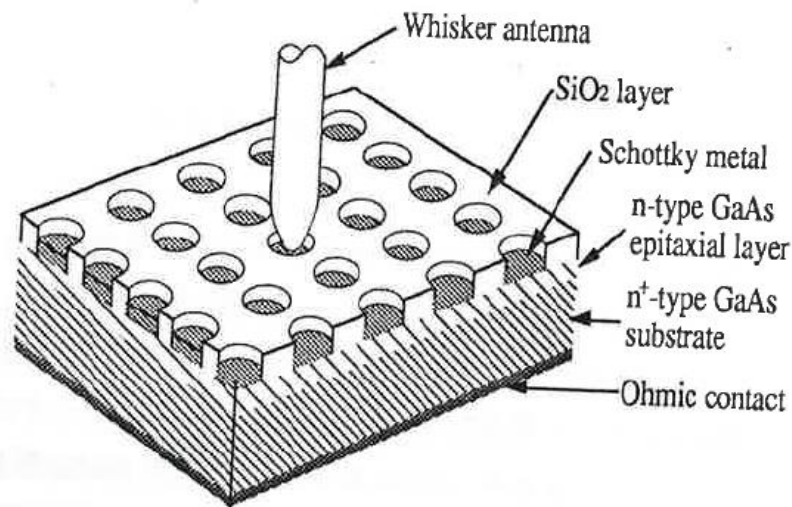
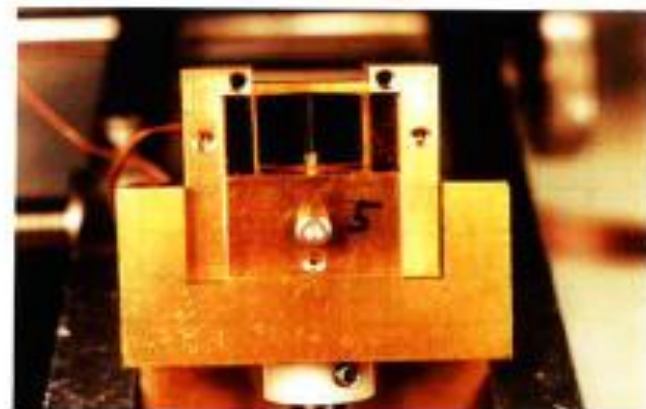
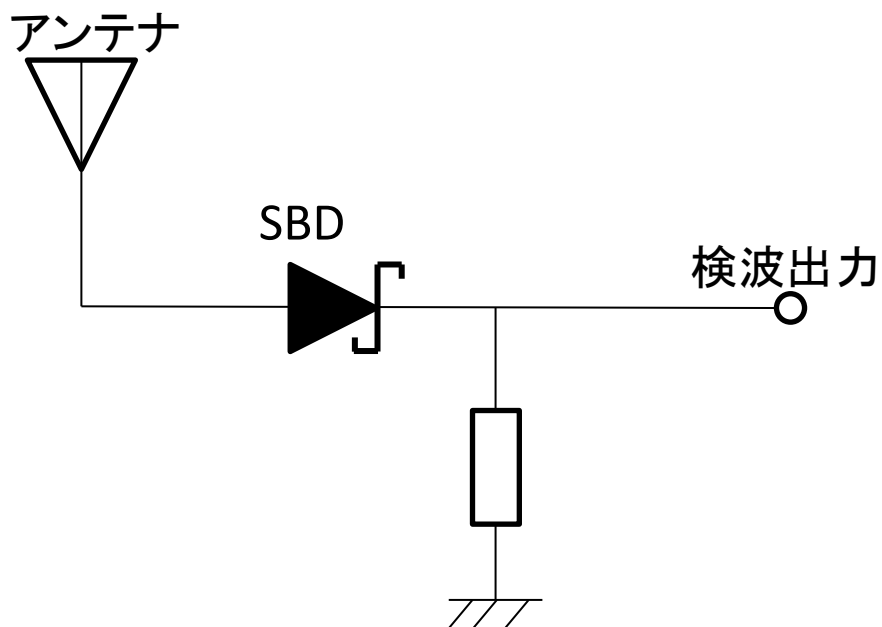
CO₂および分子レーザーを反射



CO₂は反射。分子レーザーは通す。

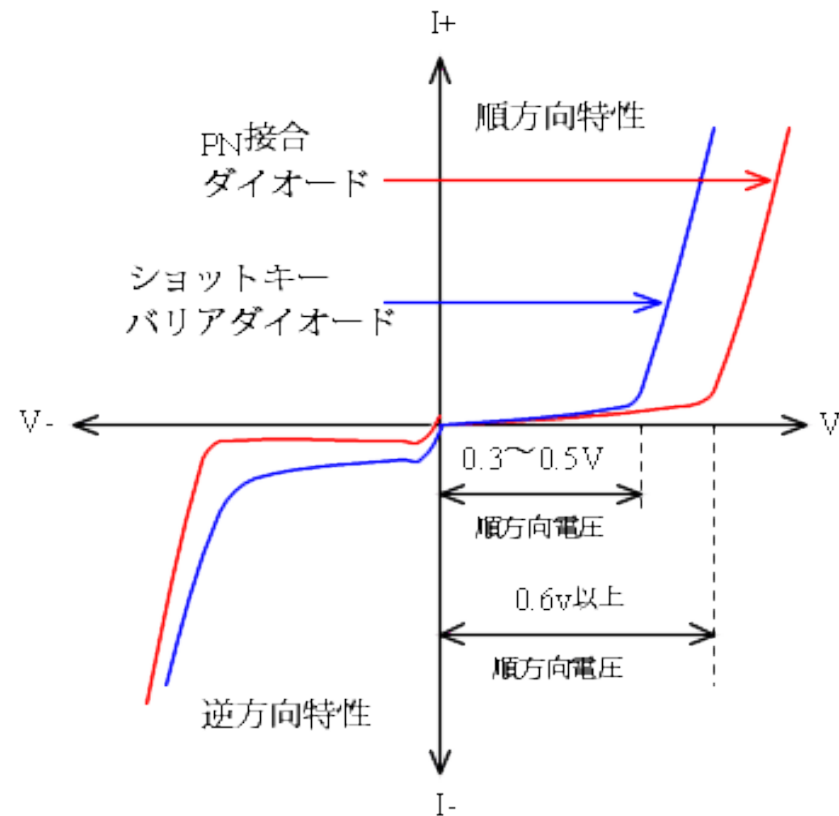
GaAsショットキーバリアダイオード(SBD)

- ・常温で利用できる
- ・金属＋半導体
- ・高感度で低ノイズ
- ・金属と半導体を接合することでできるエネルギー障壁(ショットキーバリア)を利用したダイオード



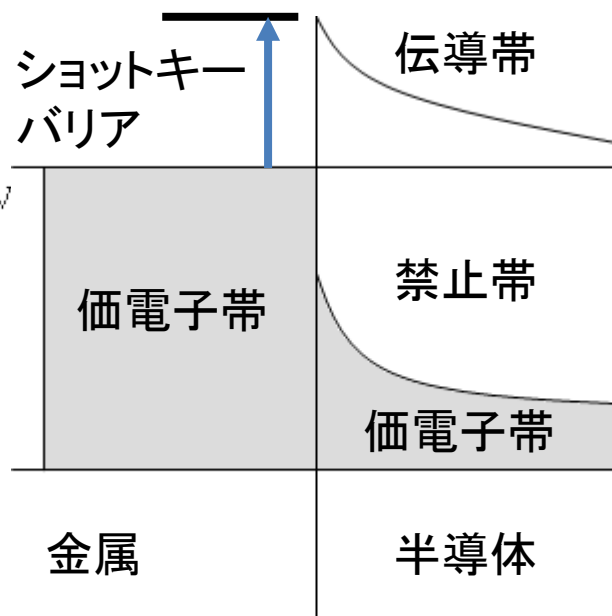
ショットキーバリアダイオード(SBD)の特性

- 耐圧が低く、漏れ電流が大きい
 - 順方向電圧が低い
- 耐圧を高くすると $V+$ も大きくなる
(耐圧は現在100V前後)



ショットキーバリアダイオードの $V-I$ 特性図

図3



- 金属側に+の電圧をかけた場合は印加電圧分だけ伝導帯が持ち上がり、電子が金属側に流れる。
- 金属側に-の電圧をかけた場合はショットキーバリアの壁があり、電子は金属側に流れない。

焦電素子(ここで焦電検出器＝焦電素子＋オペアンプ)

