

ニュートリノ崩壊光子検出器較正用の 光学系設計方法の検討

福井大工 若林凜, 浅胡武志, 竹下勉, 浦川雅生, 大竹祥太郎, 吉田拓生,
福井大遠赤センター 古屋岳
中部大工 岡島茂樹, 中山和也

2020年度 TCHoU workshop 素粒子構造研究部門パラレルセッション

日時: 2021 年3月23 日(火) 14:00~15:35

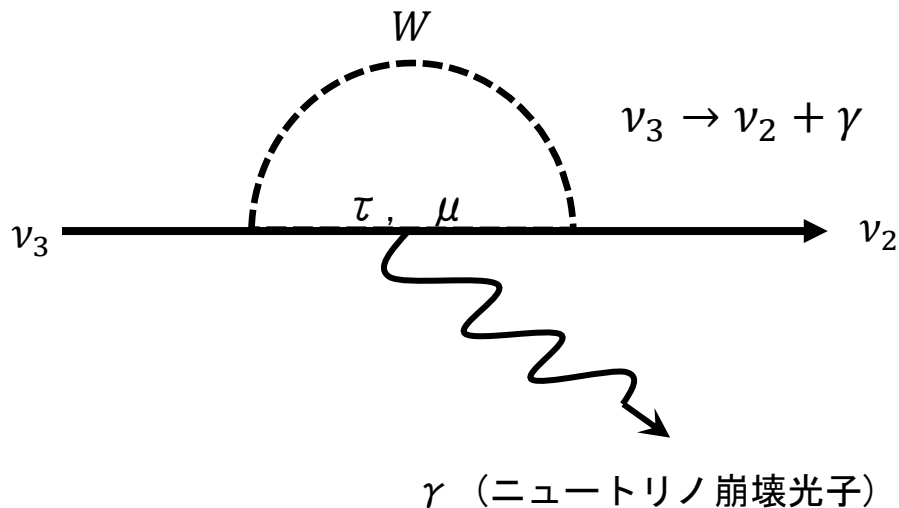
場所: zoom オンライン (筑波大学宇宙史研究センター主催)



ニュートリノ崩壊現象



ニュートリノの「質量」によって、質量固有状態(m_1, m_2, m_3) を持つ(ν_1, ν_2, ν_3)に分類可能



ニュートリノ崩壊とは、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

- ・ **ニュートリノ崩壊光子**の予想エネルギー E_γ

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

- ・ ニュートリノ質量二乗差

$$\Delta m_{32}^2 = (2.55 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- ・ 宇宙の密度ゆらぎの観測結果などから95%の信頼度で

$$m_1 + m_2 + m_3 < 0.23 \text{ eV}$$

を満たす。

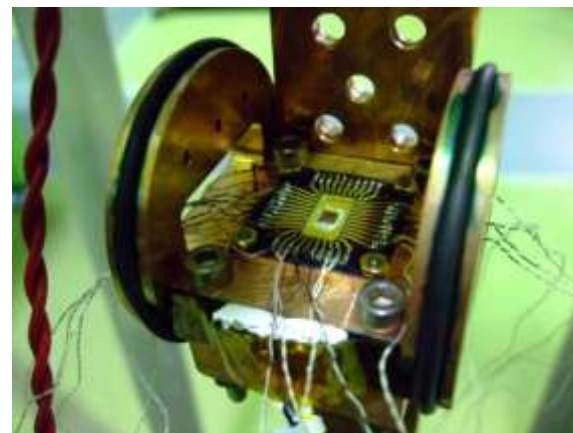
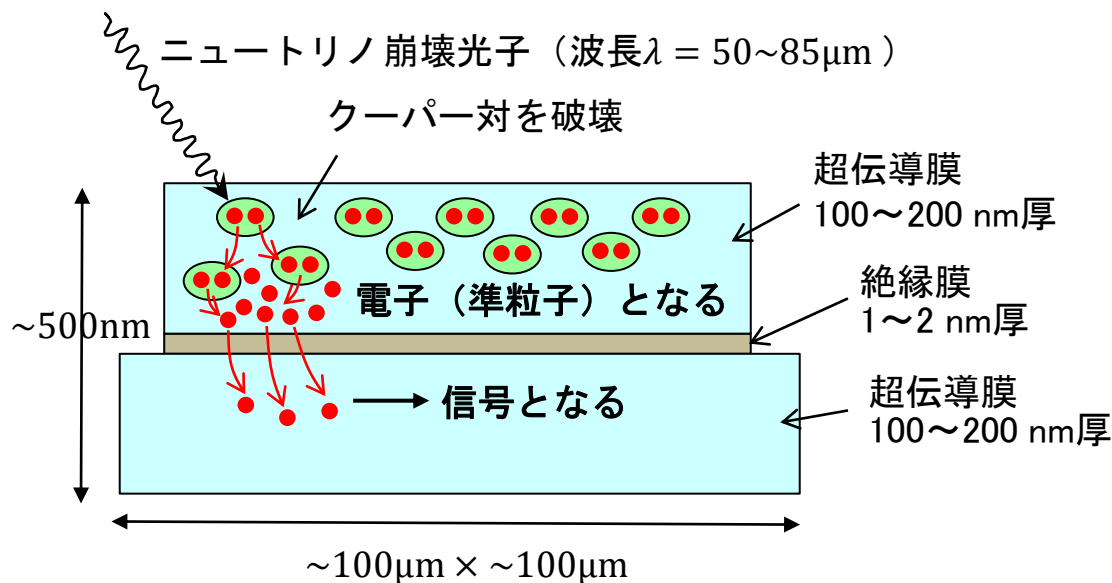
m_1 [meV]	m_2 [meV]	m_3 [meV]	E_γ [meV]	波長 λ [μm]
0	8.7	51	25	50
50	51	72	18	70
70	71	87	14	84

ニュートリノ崩壊光子の波長は
 $\lambda = 50\mu\text{m} \sim 85\mu\text{m}$
 の遠赤外領域に存在する。

STJ 検出器



ニュートリノ崩壊光子のような超低エネルギーの光子を精度良く検出し、そのエネルギーを高い精度で測定できる検出器として
超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction : STJ) 検出器に着目した。



Nb-Al STJ

しかし、開発中のため性能評価が必要

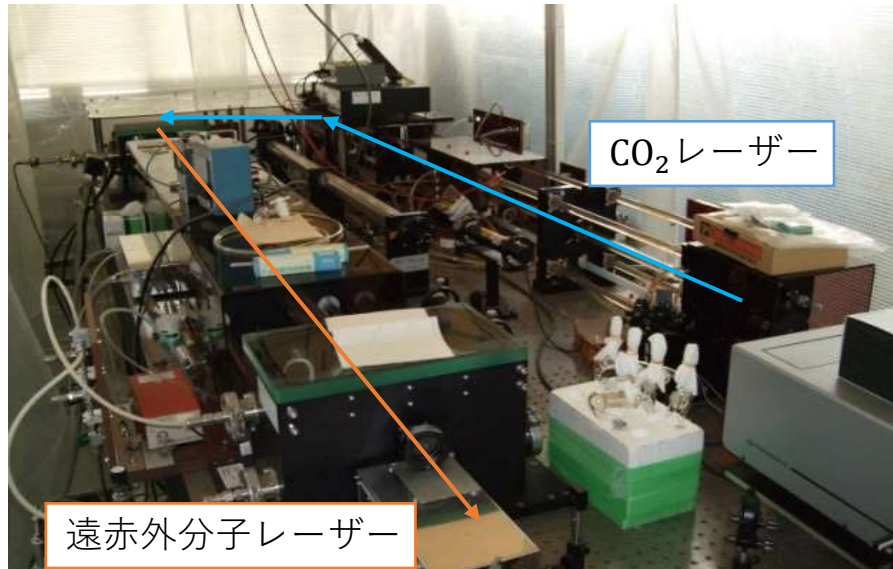


ニュートリノ崩壊光子と同じエネルギー領域、波長領域の光源で実験



遠赤外分子レーザー装置

STJ検出器の性能評価に用いる光源として
遠赤外領域開発センターのCO₂レーザー励起の遠赤外分子レーザー装置を用いた。



発振確認済み波長の遠赤外レーザー

試料ガス	波長 [μm]	エネルギー [meV]	出力 [mW]
CD ₃ OH	41.4	30.0	11
	43.7	28.4	9.4
CD ₃ OH	52.9	23.5	9.2
CH ₃ OD	57.2	21.7	72
CH ₃ OH	70.5	17.6	23
CH ₃ OH	77.3	16.1	2.8
	86.2	14.4	—
CD ₃ OH	86.4	14.4	6.8

CO₂レーザーを1次光源として、様々な種類の気体分子 (CH₃OH, CD₃OH, ...) を励起させ、レーザー発振させる。

発振波長 : 40 μm ~ 500 μmの間 (E_{γ} 2.5 meV ~ 31 meV) の約70本の単色発振線から任意の一つを選択できる。

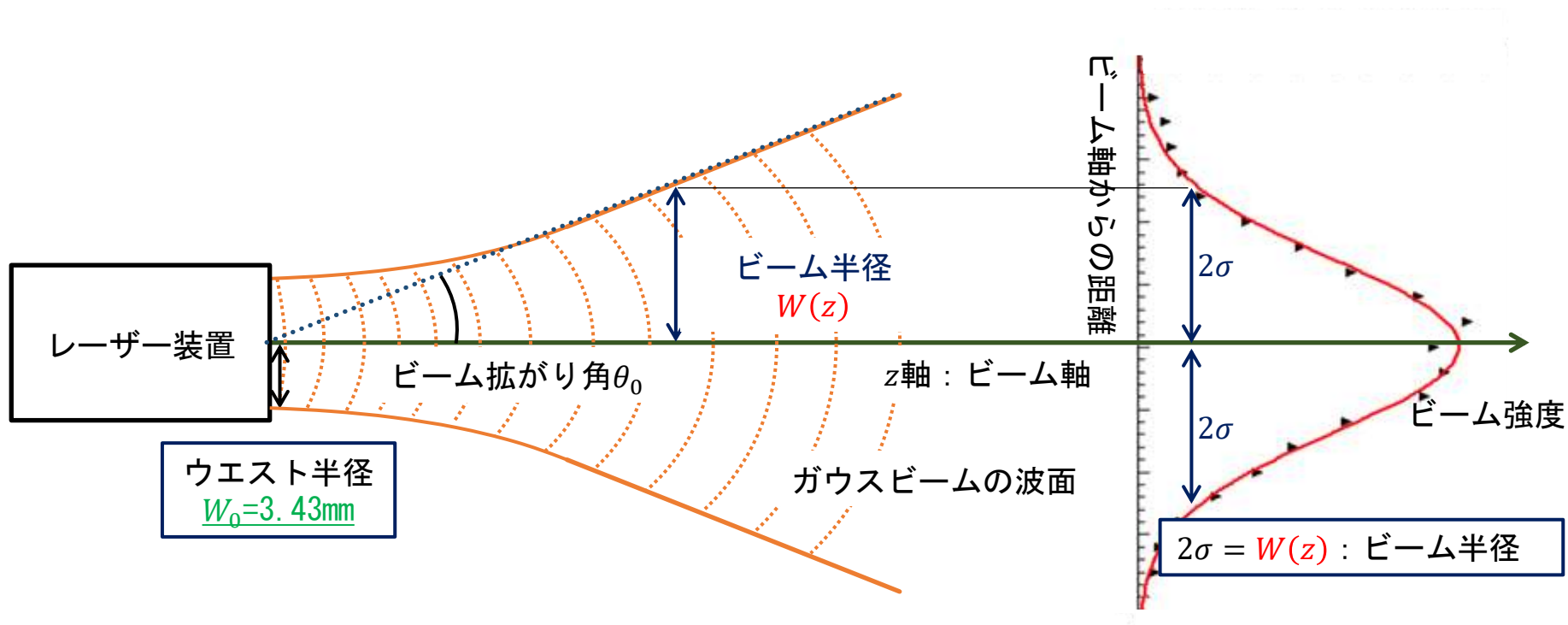
連続波発振 (出力: 発振波長によって 数mW ~ 百mW)

予想されるニュートリノ崩壊光子の波長**50μm ~ 85μm**をカバーしている。

ガウスビーム



レーザー光は、光の伝播方向にエネルギーが集中する指向性の強いビーム状の電磁波である。そのようなレーザーの中でも、光軸に対して垂直な面での強度分布がガウス分布に近いビームをガウスビームと呼ぶ。



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

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

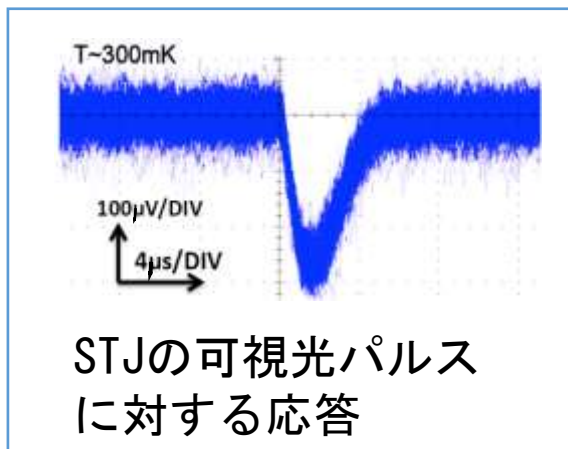
$$\text{ビーム拡がり角 } \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0}$$

回転ミラー

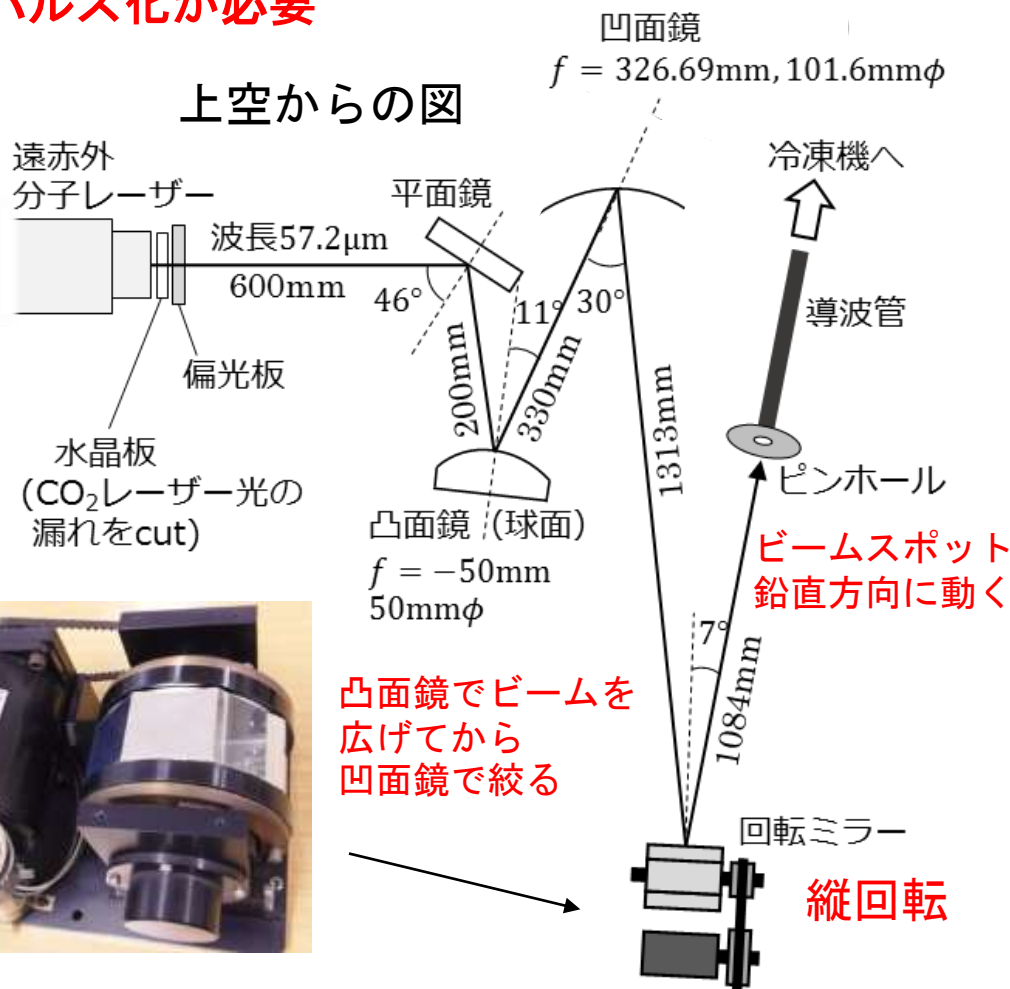


STJ検出器の性能評価を行うためには光信号に対する応答を調べる必要がある
→連続波の遠赤外分子レーザーのパルス化が必要

STJ検出器の応答速度に合わせて
数 μ sにする必要がある。
本実験では、回転ミラーを用いた
連続波のレーザーのパルス化を検討。



回転ミラー
3371rpm (353rad/s)



光軸上で回転ミラーを縦方向に回転させることにより、レーザーの反射波がピンホールに不連続に照射され、パルス化できる。

本研究の目的



回転ミラーを用いてのパルス時間幅は、下の式で求められる。

$$\text{パルス時間幅}\Delta t \text{ (FWHM)} = \frac{2.35}{4} \times \frac{\text{(ピンホールの位置でのビーム直径+スリット幅 0.1mm)}}{\text{回転ミラーからピンホールまでの距離} \times (\text{回転ミラーの角速度} \times 2)}$$

鉛直方向

例として、先ほどの光学系での値を代入すると

$$\frac{2.35}{4} \times \frac{2.47\text{mm}+0.1\text{mm}}{1084\text{mm} \times 2 \times 353\text{rad/s}} = 2.0 \mu\text{s (FWHM)}$$

となり、STJ検出器の応答速度を満たす。

パルス幅を小さくするには

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

パルス時間幅を $1\mu\text{s}$ 以下に出来るよう、光学系のシミュレーションを2つのソフトを用いて行っていく。



ABCD行列を用いたビーム伝搬シミュレーション概要

ABCDシミュレーションとは

- 光源を原点とし、ガウスビームが伝搬した位置に応じてABCD行列を用いてガウスビームのビーム直径を算出することができる。
- 集光位置がすぐにわかる。簡単！
- 軸外しの設計は行えない。
(反射して軸の向きが変わる光学系)

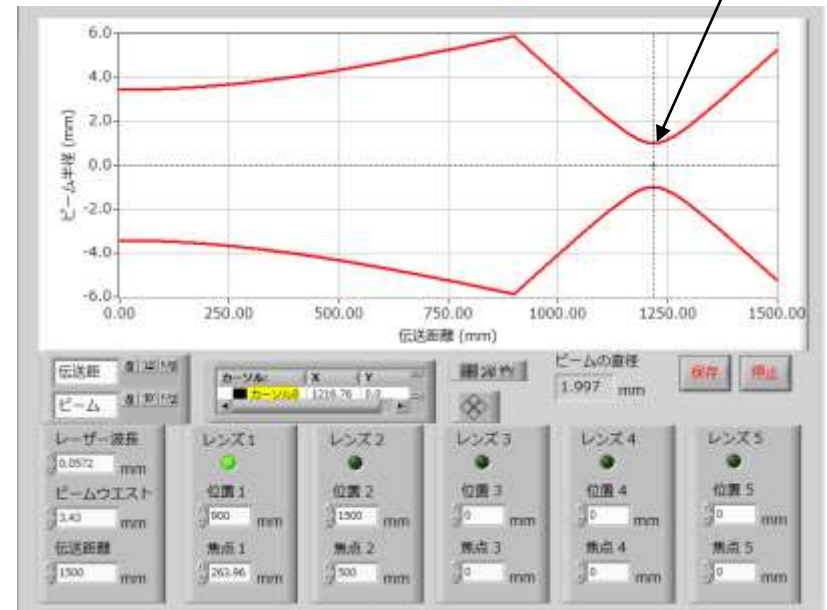
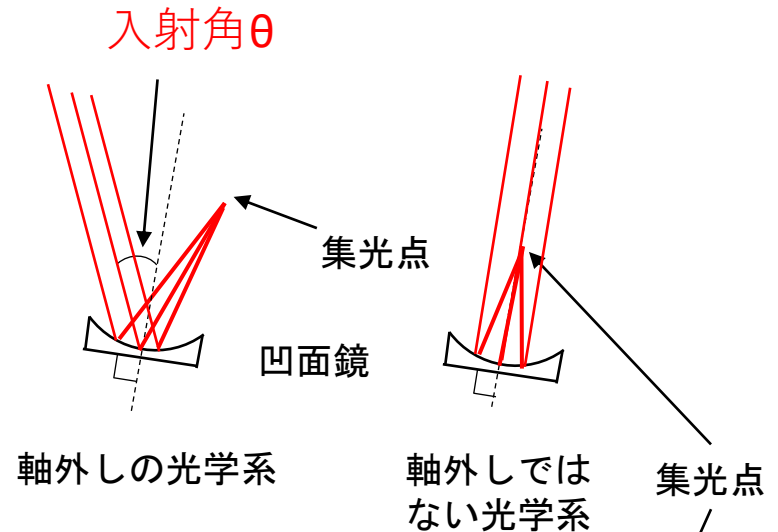
ABCD行列

$$\begin{pmatrix} h_2 \\ m_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ m_1 \end{pmatrix}$$

h : 光線のz軸からの高さ

m : 光線の勾配

薄肉レンズの場合 : $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$
 f : 焦点距離



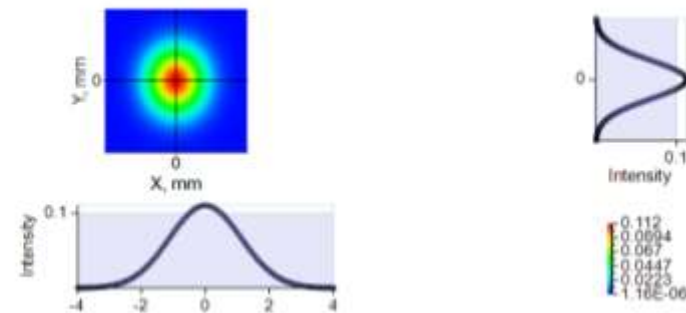
CODE Vを用いたビーム伝搬シミュレーション概要



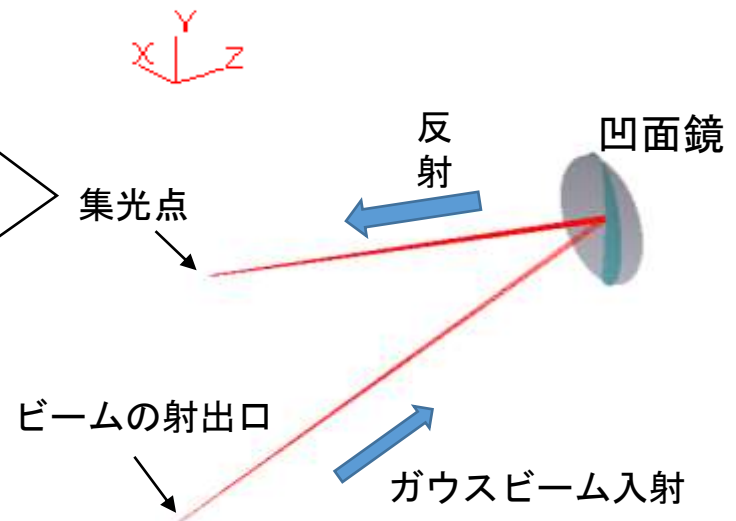
CODE Vとは

- Synopsys社製の光学系の設計や評価を行えるプログラムである。
- 波動光学的に厳密に電磁波の伝搬の追跡が可能。
- 軸外しの光学系を設計可能。
- 集光位置を見つけるのに時間と手間がかかる！

Beam Synthesis Propagation -- Intensity
32840 SPHERICAL MIRROR



CODE V でシミュレートした
集光点でのビームプロファイル



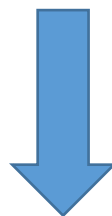
CODE V で描画した光学系



CODE Vでの詳細な解析を行わなくても、軸外しの光学系をABCD行列方式でシミュレーション出来ないか考えた。



光学系を凹面鏡、凸面鏡、などのパーツごとに分け、各シミュレーションソフトで解析、比較する。



ABCD行列方式に入力する凹面鏡、凸面鏡の焦点距離を補正(実際の値とは少し違うものを入力)することで、軸外しのシミュレーションを行えるのではないかと考えた。

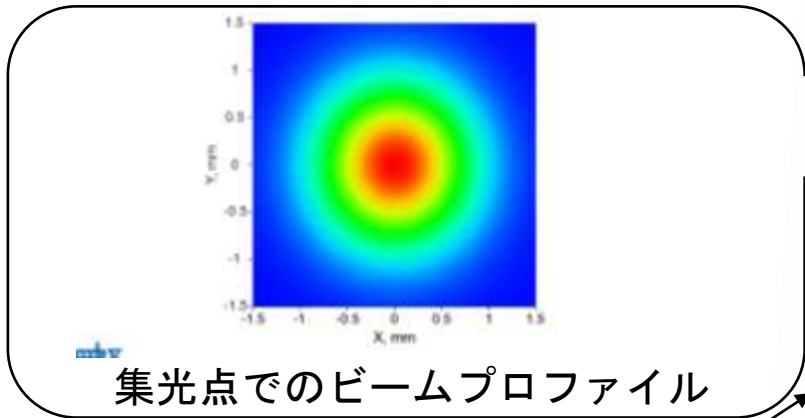


凹面鏡を用いた光学系シミュレーション

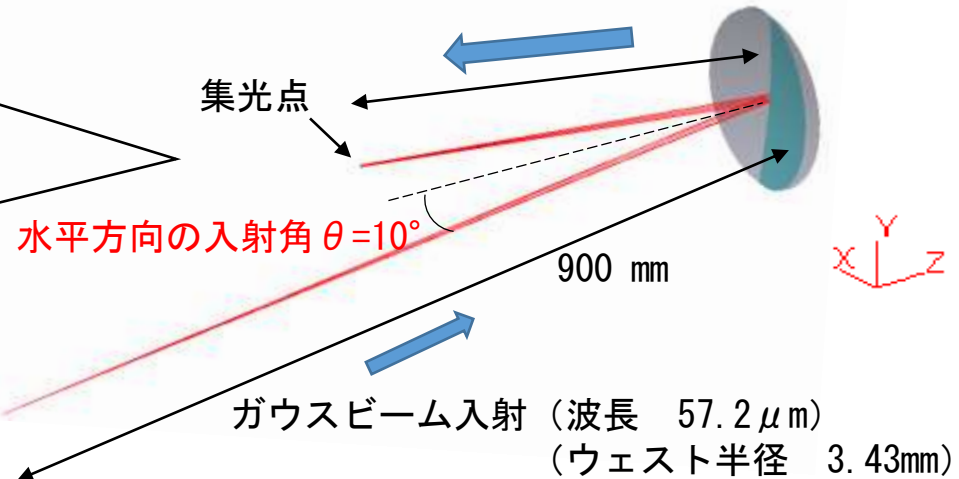
凹面鏡

CODE V でシミュレーションを行い、ビームの集光点の距離 z を調べた。

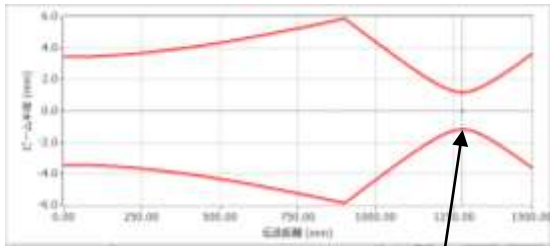
凹面鏡の直径 152.4mm
凹面鏡の焦点距離 $f=304.8\text{mm}$



ビームの射出口 $z=0\text{mm}$



ビーム半径の**水平方向**が最も小さくなる距離 (水平方向の集光点) $z = 1270.6\text{mm}$
 ビーム半径の**鉛直方向**が最も小さくなる距離 (鉛直方向の集光点) $z = 1286.6\text{mm}$



集光点

ABCD行列方式でもシミュレーションを行い、ビームの集光点の距離 z を調べた。

水平方向の集光点 $z = 1276.6\text{mm}$
鉛直方向の集光点 $z = 1276.6\text{mm}$

ABCD行列方式では軸外しのシミュレーションができないため差が生じた。

ABCD行列での水平(軸外しの)方向の集光点のシミュレーション



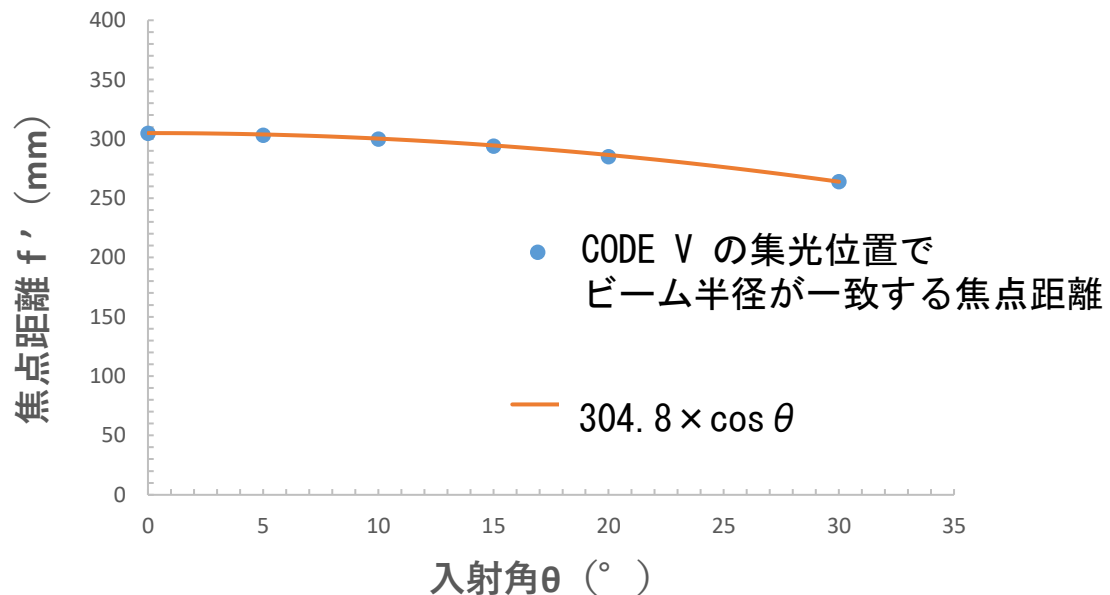
凹面鏡

CODE Vで導き出した集光点と一致させるために、**焦点距離 $f (=304.8\text{mm})$** の値をABCD行列方式上で補正をした。

ビーム半径の**水平方向**が最も小さくなる位置、つまりは水平方向の集光点では右の表のようになった。

入射角 $\theta (^{\circ})$	ABCD行列方式での 焦点距離 f' (mm)	CODE V での 集光位置		ABCD行列方式での 集光位置	
		距離 z (mm)	ビーム 半径 (mm)	距離 z (mm)	ビーム 半径 (mm)
0	304.8	1276.6	1.19	1276.6	1.19
5	303	1274.9	1.18	1274.9	1.18
10	300	1270.6	1.17	1270.6	1.17
15	294	1260.6	1.14	1260.6	1.14
20	285	1248.7	1.10	1248.7	1.10
30	264	1216.8	0.999	1216.8	0.999

ABCD行列方式で変化させた焦点距離 f' をグラフにプロットした。これにフィットする関数を調べたところ、
 焦点距離 $f \times \cos \theta$
 であることがわかった。



ABCD行列での鉛直(軸外しでない)方向の集光点のシミュレーション



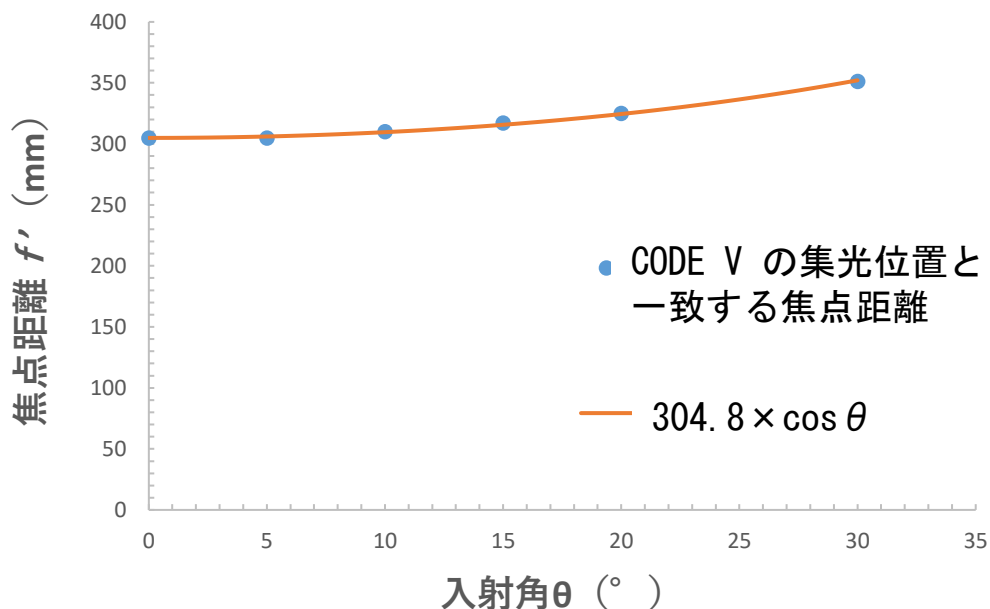
凹面鏡

CODE Vで導き出した集光点と一致させるために、**焦点距離 $f (=304.8\text{mm})$** の値をABCD行列方式上で補正をした。

ビーム半径の**鉛直方向**が最も小さくなる位置、つまりは鉛直方向の集光点では右の表のようになった。

ABCD行列方式で変化させた焦点距離 f' をグラフにプロットした。これにフィットする関数を調べたところ、
焦点距離 $f \div \cos \theta$
であることがわかった。

入射角 θ (°)	ABCD行列方式での 焦点距離 f' (mm)	CODE V での 集光位置		ABCD行列方式での 集光位置	
		距離 z (mm)	ビーム 半径 (mm)	距離 z (mm)	ビーム 半径 (mm)
0	304.8	1276.6	1.19	1276.6	1.19
5	304.8	1276.6	1.19	1276.6	1.19
10	310	1286.6	1.21	1286.6	1.21
15	317	1296.6	1.24	1296.6	1.24
20	325	1306.6	1.29	1306.6	1.29
30	351	1346.6	1.42	1346.6	1.42

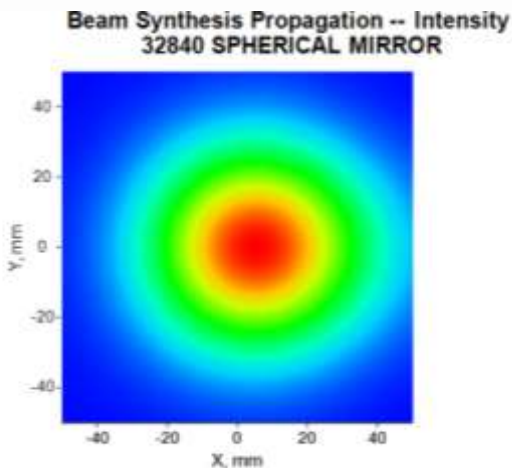
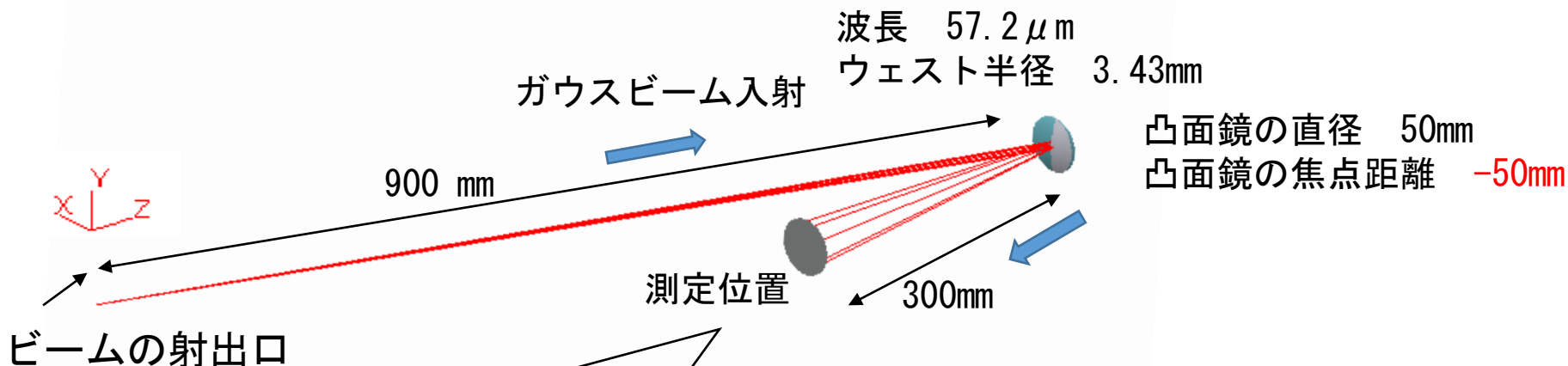


CODE Vでの凸面鏡のシミュレーション



凸面鏡

凸面鏡の入射角 $\theta = 10^\circ$ のときのCODE Vによるシミュレーション



凸面鏡は集光せず拡散するため
距離 $z=1200\text{mm}$ の位置でのビーム半径を
入射角を変化させ測定した。

← ビームの射出口から距離 $z=1200\text{mm}$ の
位置 (測定位置) のビームプロファイル

水平(軸外しの)方向のシミュレーション

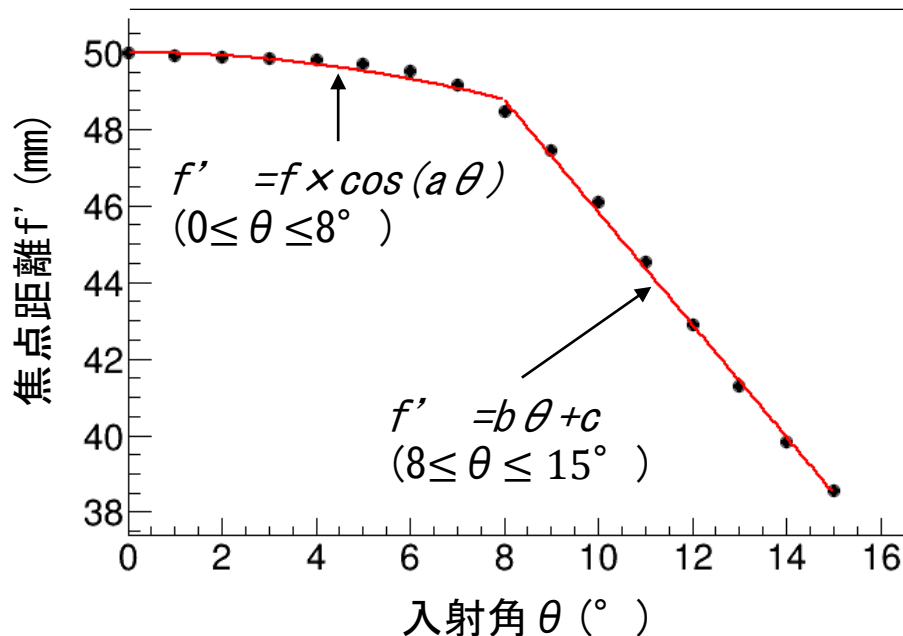


凸面鏡

CODE Vを用いてシミュレーションを行い、 $z = 1200\text{mm}$ の位置での**水平方向**のビーム半径の角度変化を表にした。

入射角 θ (°)	CODE Vの ビーム半径 (mm)
0	41.3
5	41.4
10	44.1
15	51.4

次に、CODE Vを用いて求めたビーム半径と一致するように、ABCD行列方式を用いて焦点距離 f の値を補正して表とグラフにした。



入射角 θ (°)	焦点距離 f' (mm)	ABCD行列の ビーム半径 (mm)
0	-50	41.3
5	-49.7	41.4
10	-46.1	44.1
15	-38.6	51.4

横軸 $0 \leq \theta \leq 8^\circ$ の部分は $f' = f \times \cos(a\theta)$ の関数で、 $a = 0.0277 \pm 0.00125$ でフィッティングが出来た。

横軸 $8 \leq \theta \leq 15^\circ$ の部分は $f' = b\theta + c$ の関数で $b = -1.47 \pm 0.0307$
 $c = 605 \pm 0.360$ でフィッティングが出来た。

鉛直 (軸外しでない) 方向のシミュレーション

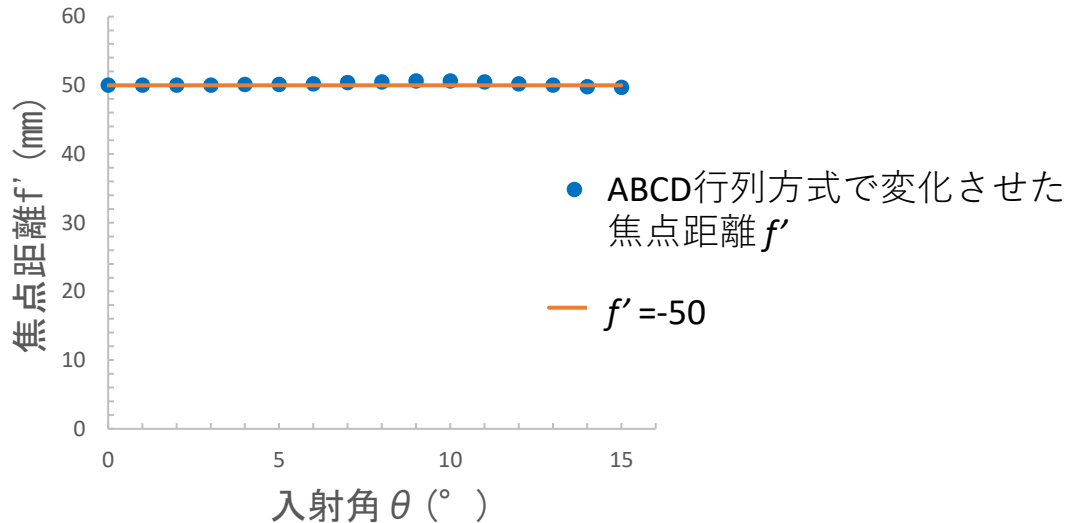


凸面鏡

CODE Vを用いてシミュレーションを行い、 $z = 1200\text{mm}$ の位置での鉛直方向のビーム半径の角度変化を表にした。

入射角 θ (°)	CODE Vの ビーム半径 (mm)
0	41.3
5	41.1
10	40.9
15	41.5

次に、CODE Vを用いて求めたビーム半径と一致するように、ABCD行列方式を用いて焦点距離 f の値を補正して表とグラフにした。



入射角 θ (°)	焦点距離 f' (mm)	ABCD行列の ビーム半径 (mm)
0	-50	41.3
5	-50.1	41.1
10	-50.5	40.9
15	-49.7	41.5

水平方向の結果に比べると変化がかなり小さく、実際の焦点距離を用いてABCD行列方式のシミュレーションを行えるのではないかと考えられる。

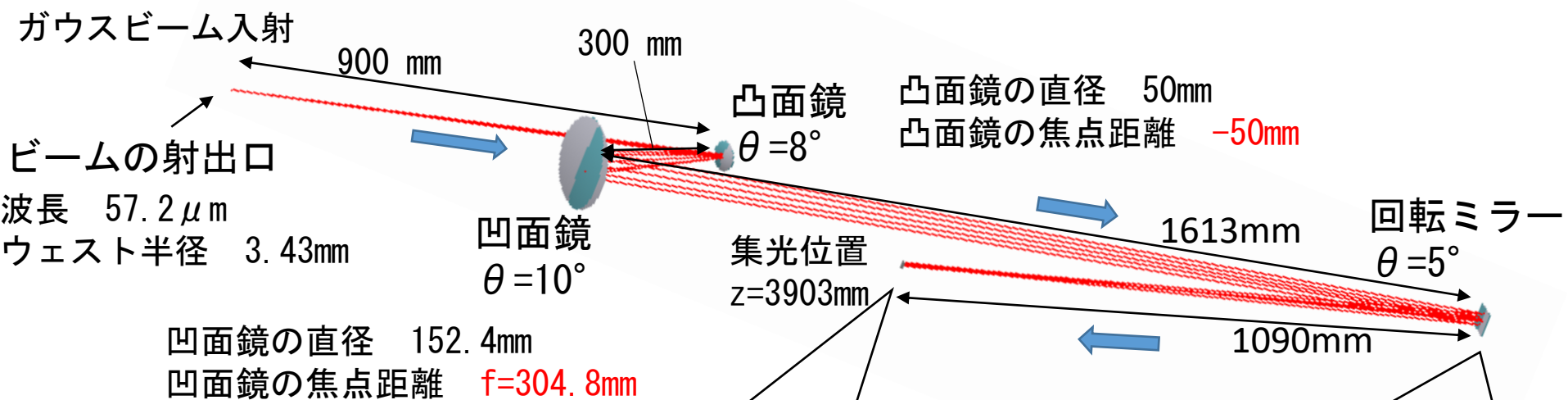
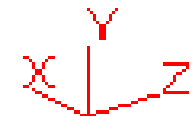
CODE Vでの凸面鏡と凹面鏡の複合シミュレーション



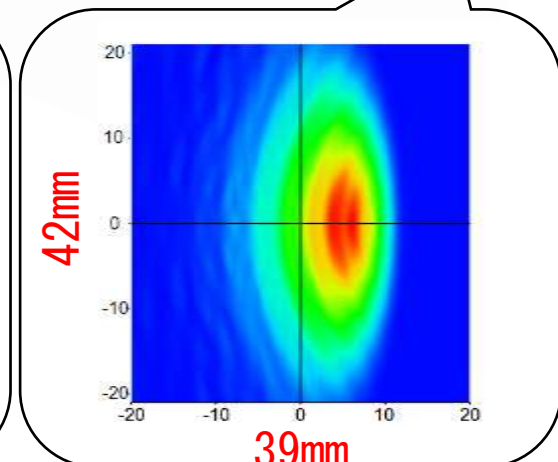
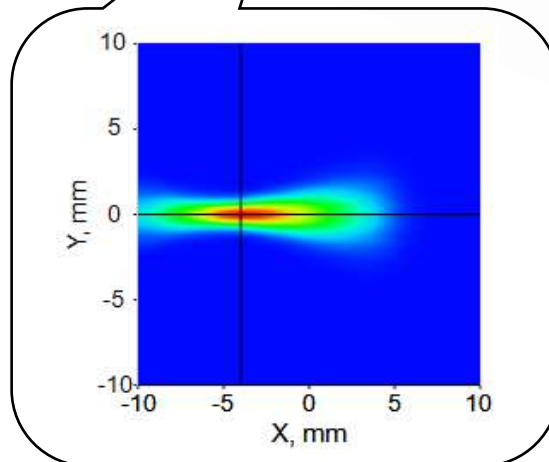
凹面鏡

凸面鏡

凹面鏡の水平方向の入射角 $\theta = 10^\circ$
凸面鏡の水平方向の入射角 $\theta = 8^\circ$
のときのCODE Vによるシミュレーション



集光位置 (測定位置)
のビームプロファイル



CODE Vでの凸面鏡と凹面鏡の複合シミュレーションの結果

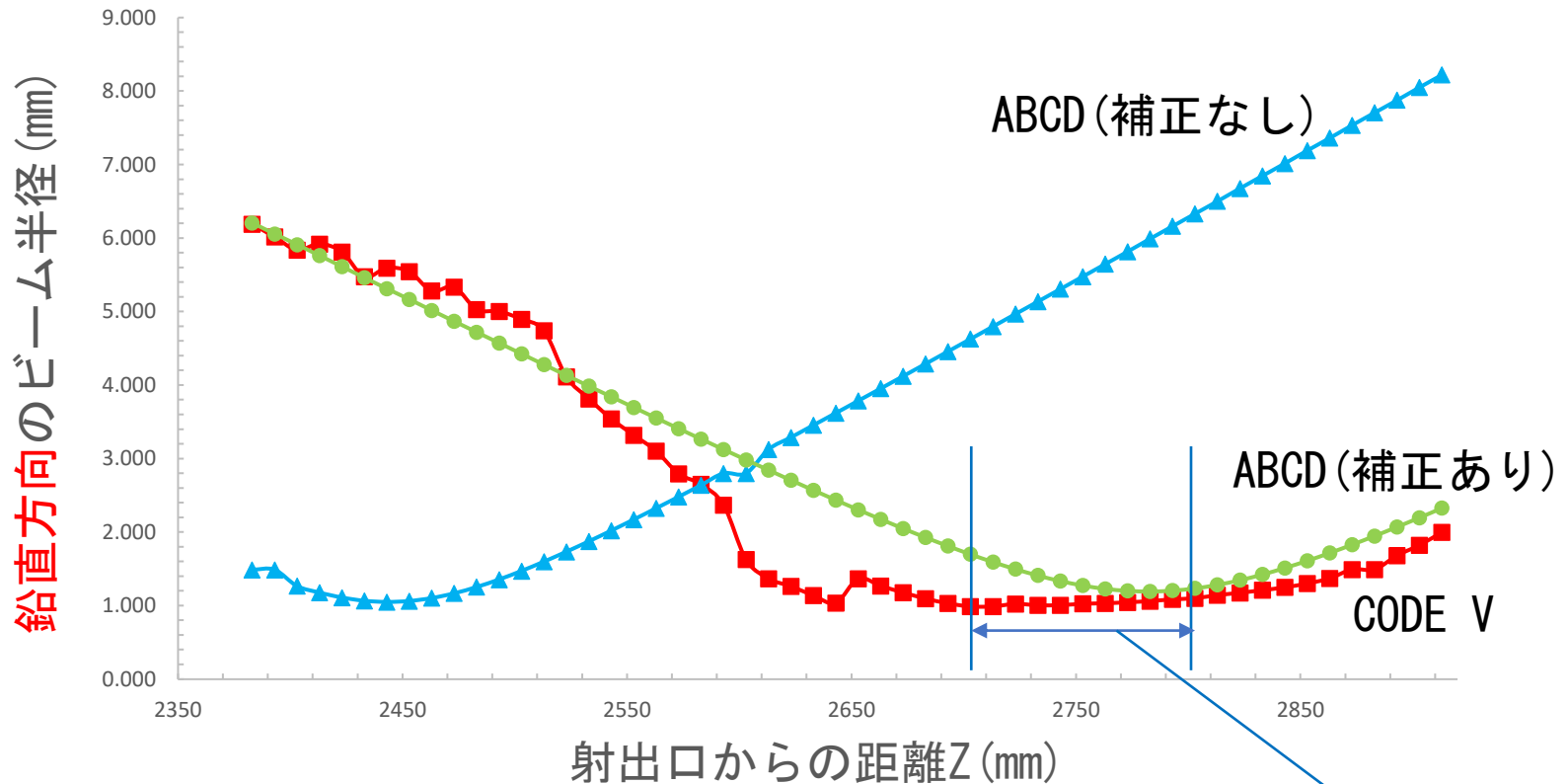


凹面鏡

凸面鏡

CODE V、補正を加えたABCD行列方式、補正を加えていないABCD行列方式のシミュレーションを行い、集光位置での鉛直方向のビーム半径の変化を縦軸に、凹面鏡からの距離を横軸にグラフを作成した。

CODE VとABCD行列方式(補正ありと補正なし)



CODE Vと補正を加えたABCD行列方式では、収束位置としては約80mmズれているが、ビーム半径はほぼ同じであった。→パルス時間幅もほぼ同じ

CODE Vでの凸面鏡と凹面鏡の複合シミュレーションの結果

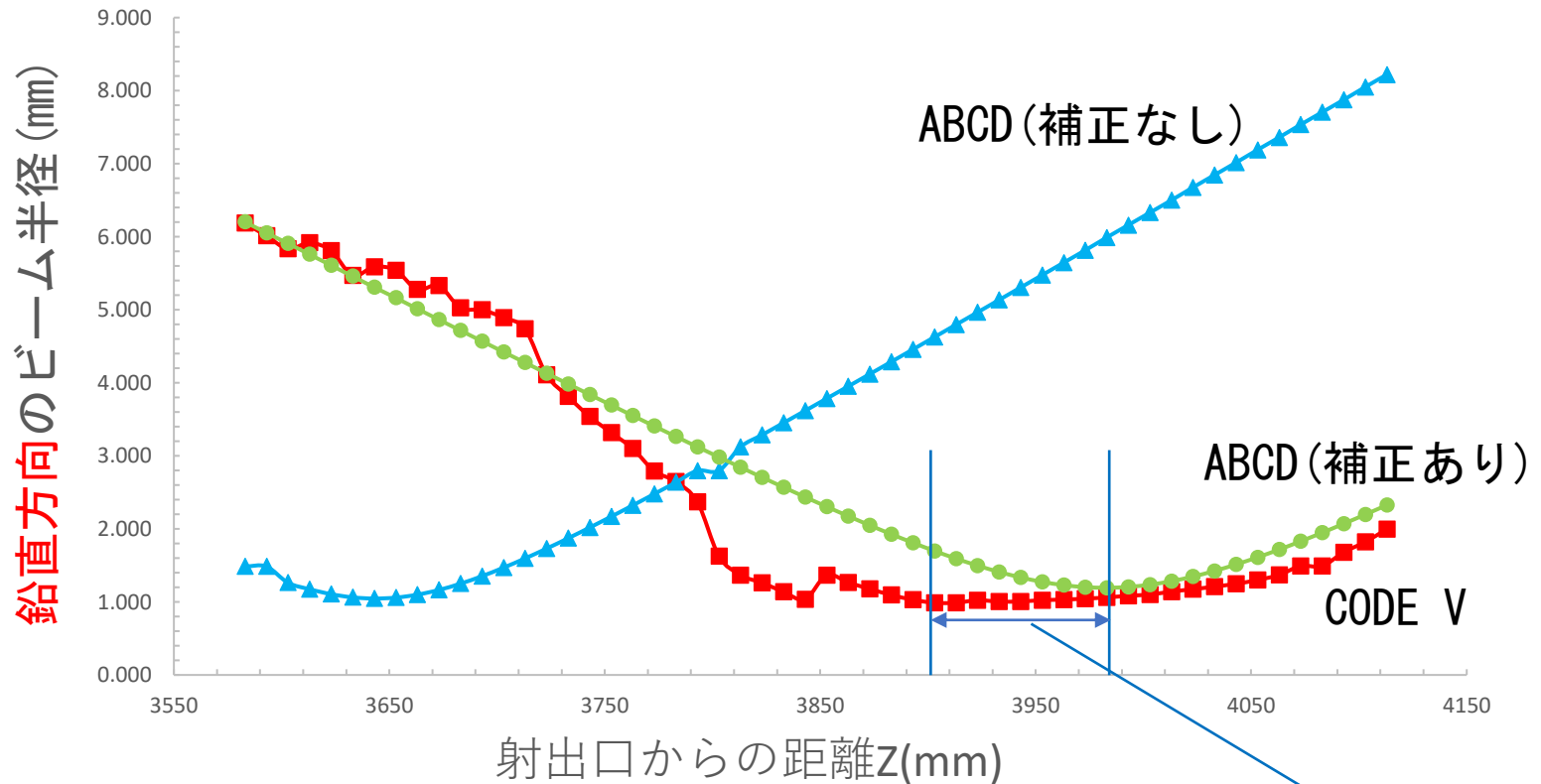


凹面鏡

凸面鏡

CODE V、補正を加えたABCD行列方式、補正を加えていないABCD行列方式のシミュレーションを行い、集光位置での鉛直方向のビーム半径の変化を縦軸に、凹面鏡からの距離を横軸にグラフを作成した。

CODE VとABCD行列方式(補正ありと補正なし)



CODE Vと補正を加えたABCD行列方式では、収束位置としては約80mmズれているが、ビーム半径はほぼ同じであった。→パルス時間幅もほぼ同じ

回転ミラーを用いてのパルス時間幅は、以前述べたように下の式で求められる。

$$\text{パルス時間幅 } \Delta t \text{ (FWHM)} = \frac{2.35}{4} \times \frac{\text{鉛直方向のピンホールの位置でのビーム直径} + \text{スリット幅 } 0.1\text{mm}}{\text{回転ミラーからピンホールまでの距離} \times (\text{回転ミラーの角速度} \times 2)}$$

シミュレーションを行った複合型の光学系での値を代入すると

$$\frac{2.35}{4} \times \frac{1.972\text{mm} + 0.1\text{mm}}{1090\text{mm} \times 2 \times 353\text{rad/s}} = 1.6 \mu\text{s (FWHM)}$$

となり、STJ検出器の応答速度を満たす。

まとめと今後の課題



まとめ

- ・凹面鏡においては、水平方向では実際の焦点距離に $\cos \theta$ をかけることで、鉛直方向では、焦点距離を $\cos \theta$ でわることで、ABCD行列方式でも軸外しのシミュレーションを行えることがわかった。
- ・凸面鏡では、鉛直方向は、実際の焦点距離を用いてABCD行列方式のシミュレーションを行えると考えられる。
- ・凹面鏡と凸面鏡を組み合わせた複合型の軸外し光学系でも、補正を行えばA B C D行列方式のシミュレーションが使える。

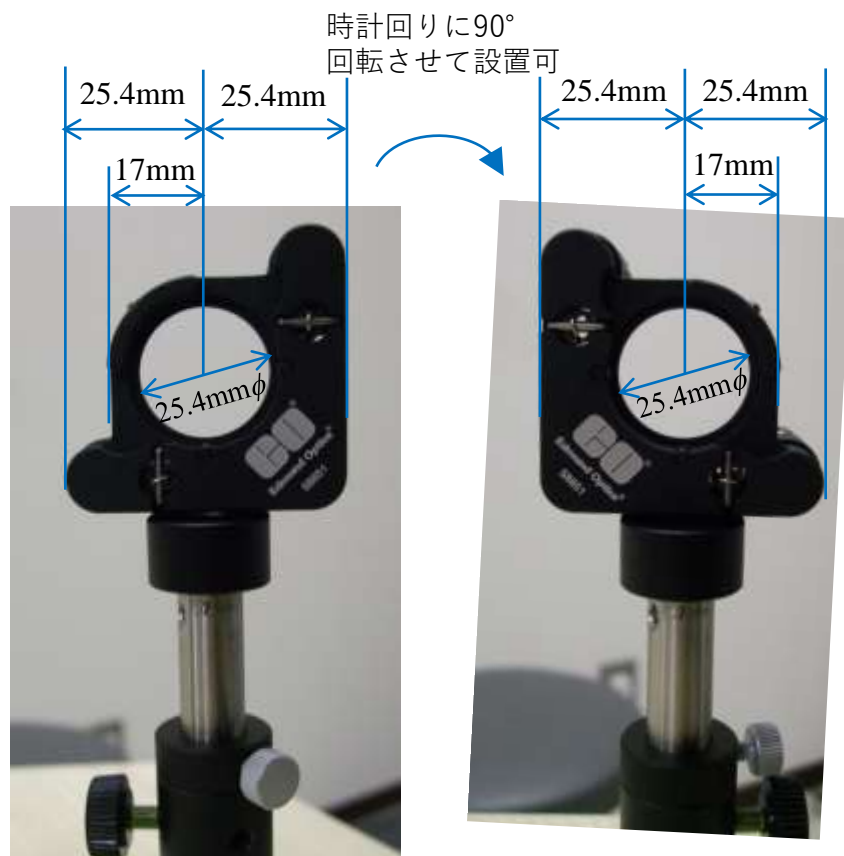
今後の課題

- ・実際に実験を行い、集光位置やビーム半径を比較する。
- ・実際の実験で使用するホルダーの枠がビームと干渉しないことを確認した上で入射角を再検討する。
(CODE Vの中にホルダーの枠を定義する)

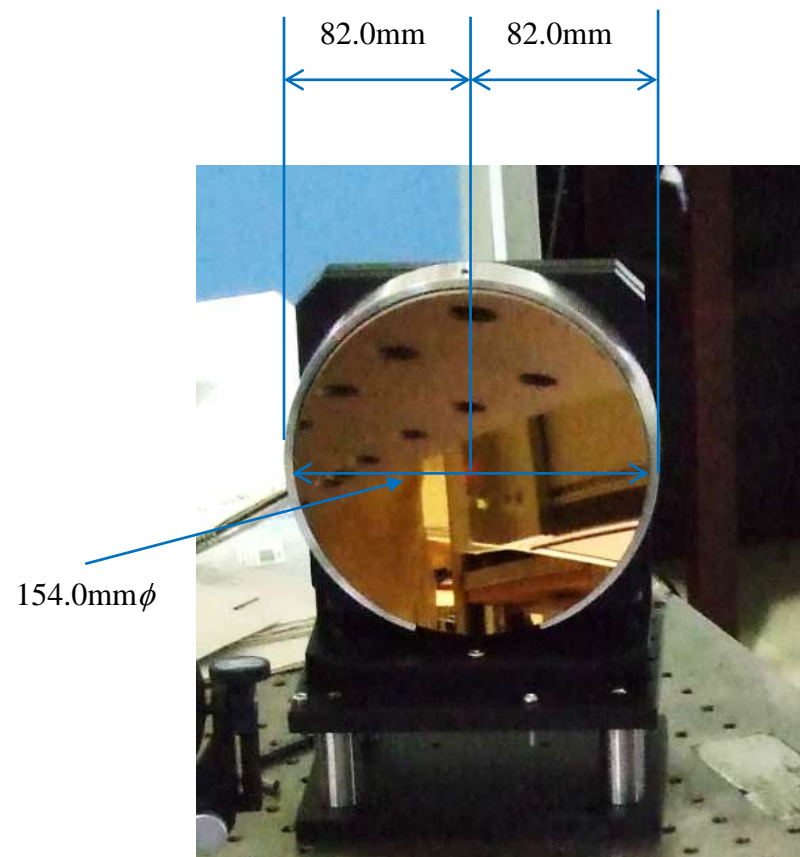
実験用凹凸面鏡ホルダー



25mm ϕ ($f = -50\text{mm}$)
凸面鏡 専用ホルダー



152mm ϕ ($f = 304.8\text{mm}$)
凹面鏡 専用ホルダー



エドモンドオプティクス
キネマティックマウント 58-851 (25mm ϕ と25.4mm ϕ の両サイズに
対応)
角度微調整可



以下予備スライド

COBAND(Cosmic Background Neutrino Decay Search)実験



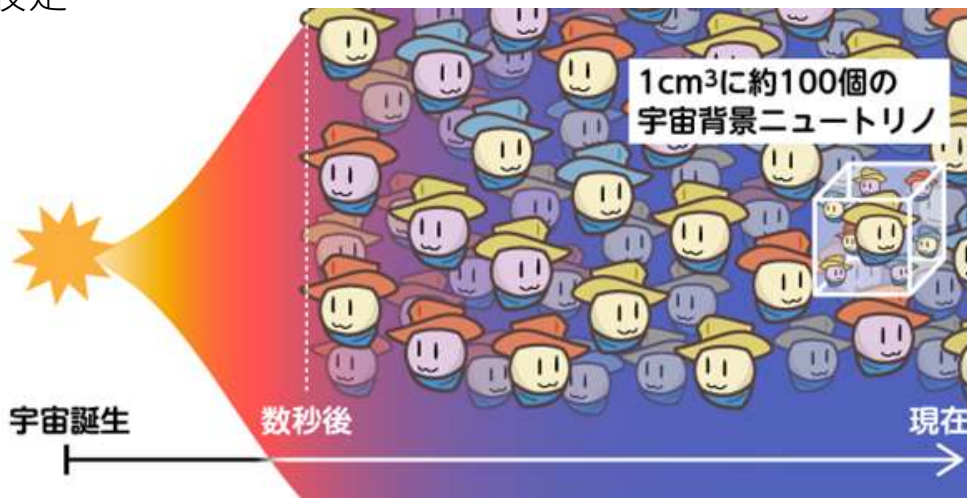
ニュートリノの寿命を見積もり、崩壊の確率を検討

- 標準理論によると・・・ 6.3×10^{43} 年
- LR対称理論によると・・・ 2.6×10^{20} 年

→非常に長い寿命は、崩壊確率が極めて低いことを意味する

→崩壊確率の低さを補う為、観測対象を宇宙背景ニュートリノに設定

ニュートリノの寿命とは・・・
最初N個存在するニュートリノが、
崩壊現象によりN/e個に減少するまでの時間



遠赤外領域の波長を持つニュートリノ崩壊光子は、水分に吸収されてしまう為、大気中の観測は困難

→検出器を宇宙に運び、宇宙空間で観測を行う必要がある

COBAND実験の今後の展望

1. 2020年：ロケット実験：高度200kmで200秒程度のデータ収集を検討中
2. 2021年以降：衛星実験：検出器を衛星に搭載し、100日程度のデータ収集を検討中



COBAND実験

COBAND実験(Cosmic Background Neutrino Decay Search)とは、未だ値の判明していないニュートリノの質量を決定することをを目的として、宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に一様に存在すると予言されている「宇宙背景ニュートリノ」の崩壊探索を行う計画である。

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ u	チャーム c	トップ t
	ダウン d	ストレンジ s	ボトム b
レプトン	電子 ニュートリノ ν_e	ミュー ニュートリノ ν_μ	タウ ニュートリノ ν_τ
	電子 e^-	ミューオン μ^-	タウ τ^-

- ニュートリノ
- ・フェルミ統計に従う素粒子
 - ・他の物質と相互作用をしないため検出が難しい
 - ・三種類のフレーバーが存在する(電子、ミュー、タウ)

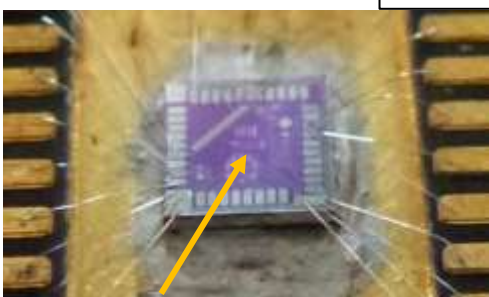
宇宙背景ニュートリノ

ビッグバンの1秒後に自由になり、現在の宇宙空間に1.9Kの温度で一様に1cm³あたり110個存在する。

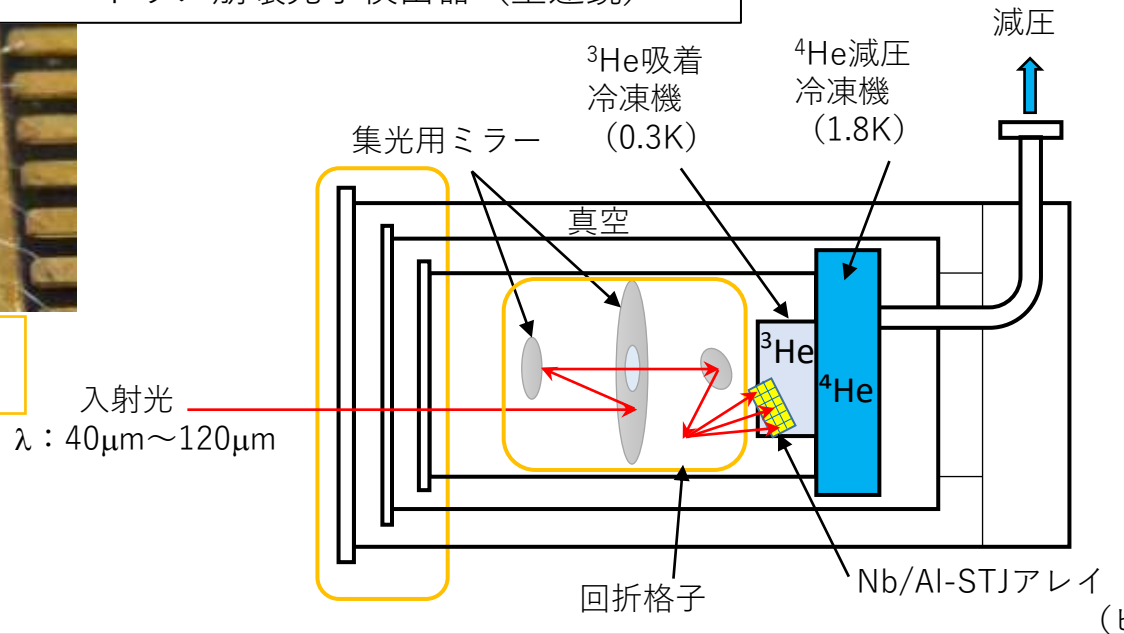
宇宙背景ニュートリノ：

- ▶ 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たはず。
- ▶ 今でも大量に宇宙を飛び交っている（約100個/cm³）と考えられているが、未発見。

錐形STJ検出器
ロケット搭載型
ニュートリノ崩壊光子検出器（望遠鏡）



5mm角のチップの中に、
いろんなサイズのSTJ



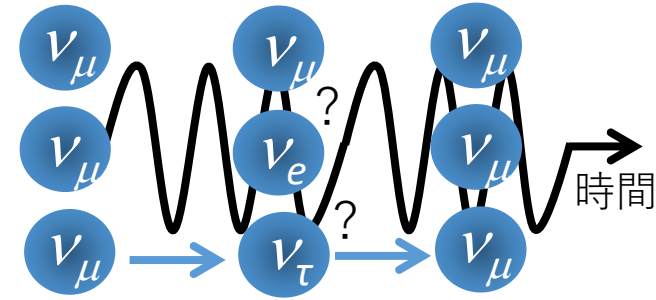
検出器を宇宙へ

（地上では空気中の水分がν崩壊光子を吸収してしまうため。）
超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction : STJ) 検出器

ニュートリノ振動



ニュートリノの種類（フレーバー）が、時間とともに
移り変わる現象 ($\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$)



運動量 p が一定の ν_μ ビーム：質量 m_1, m_2, m_3 が異なれば、
 $\Rightarrow \nu_\mu$ を構成する ν_1, ν_2, ν_3 のエネルギー E_1, E_2, E_3 が異なる。

$\Rightarrow \nu_1, \nu_2, \nu_3$ の波動関数が、異なる振動数で時間発展 ($\propto e^{-iE_it}$) をする。

$\Rightarrow \nu_\mu$ の波に「うなり」が生じ、

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ や ν_τ 間の振動が発生

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

\Rightarrow 理論では、ニュートリノ振動は質量の二乗差 $m_i^2 - m_j^2$ の関数。

Kamiokaなどの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：

(2019/1/10)

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.53 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2 = 2.51 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

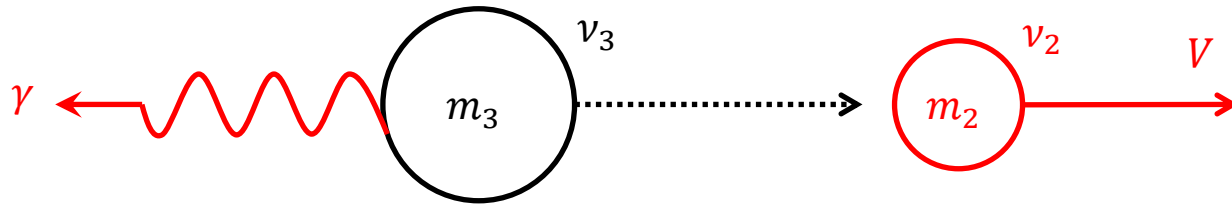
少なくとも2種類のニュートリノは質量を持つ。しかし、その値は、まだ分からない！

また、宇宙の質量分布の平坦さの観測から

$$m_1 + m_2 + m_3 < 0.23 \text{ eV}$$

(宇宙のニュートリノ密度分布は比較的平坦なので、
ニュートリノの質量の大小が宇宙の質量分布の平坦さに関係する。)

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

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

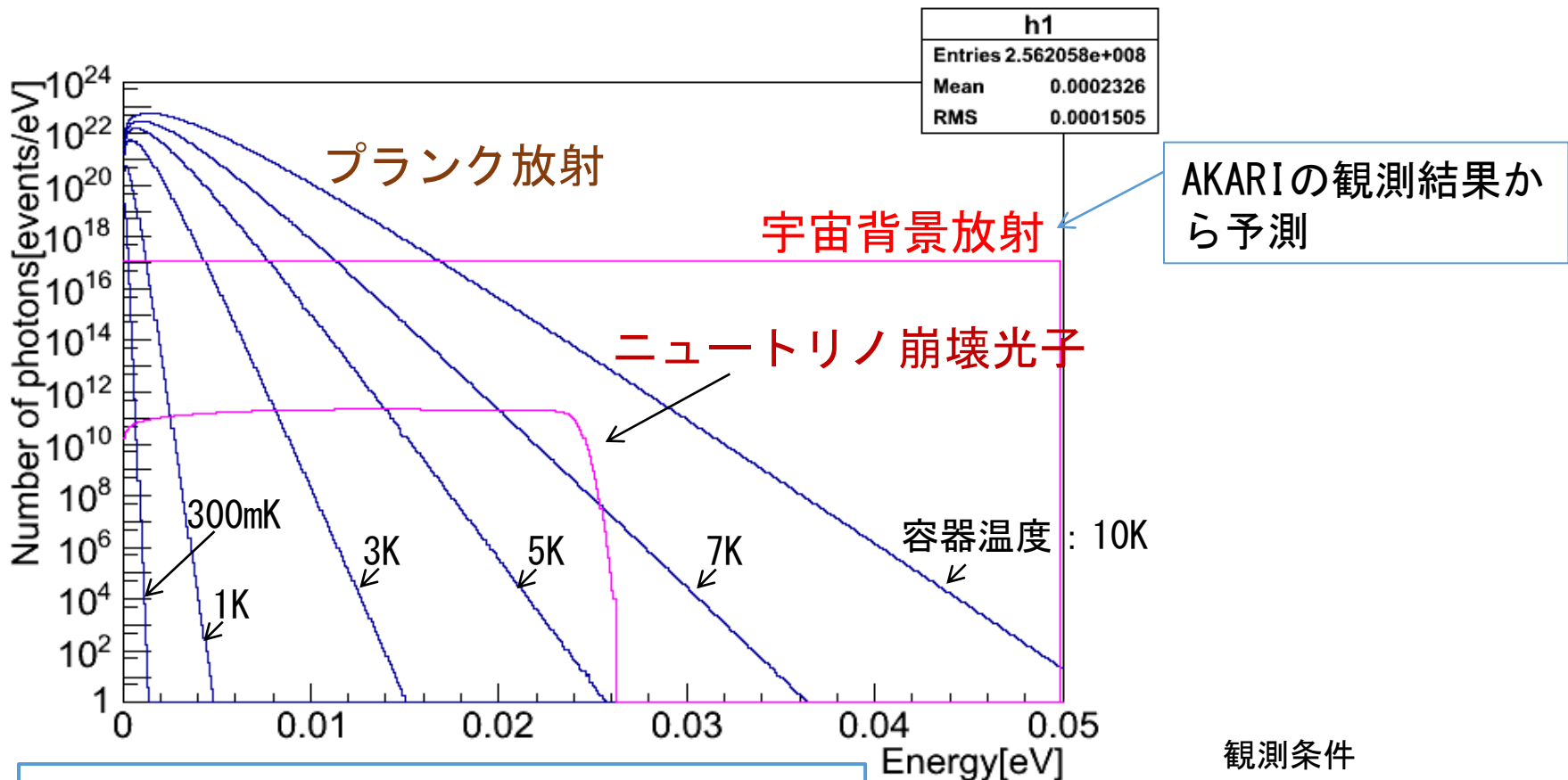
- 各式を整理して、 E_γ を導出

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

- ($c = 1, \hbar = 1$)とする自然単位系を導入

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

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

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



(現在、 ν_3 の寿命 τ の下限値: 3×10^{12} 年)

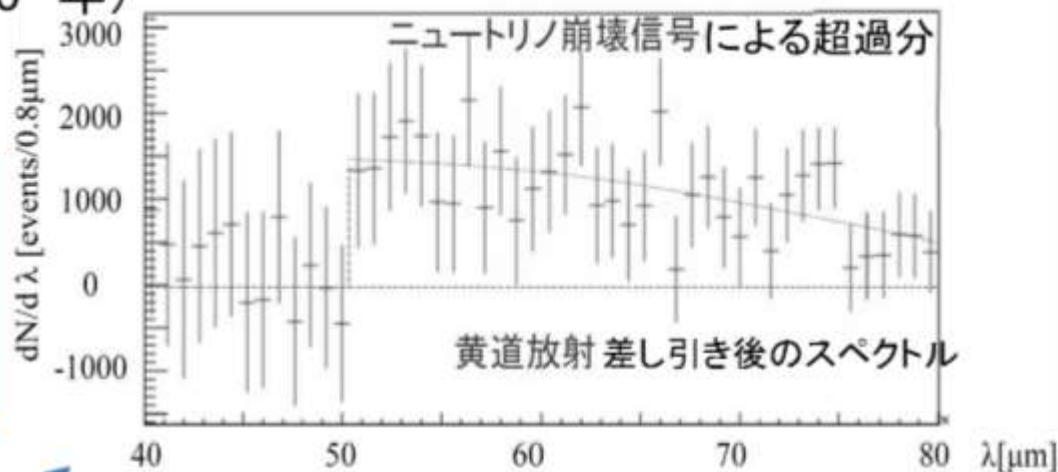
ν_3 の質量 $m_3 = 50$ meVとして、

ν_3 の寿命 $\tau = 1 \times 10^{14}$ 年と仮定、
Nb/Al-STJアレイと回折格子併用
観測時間: **3分**
(小型ロケットで十分可)

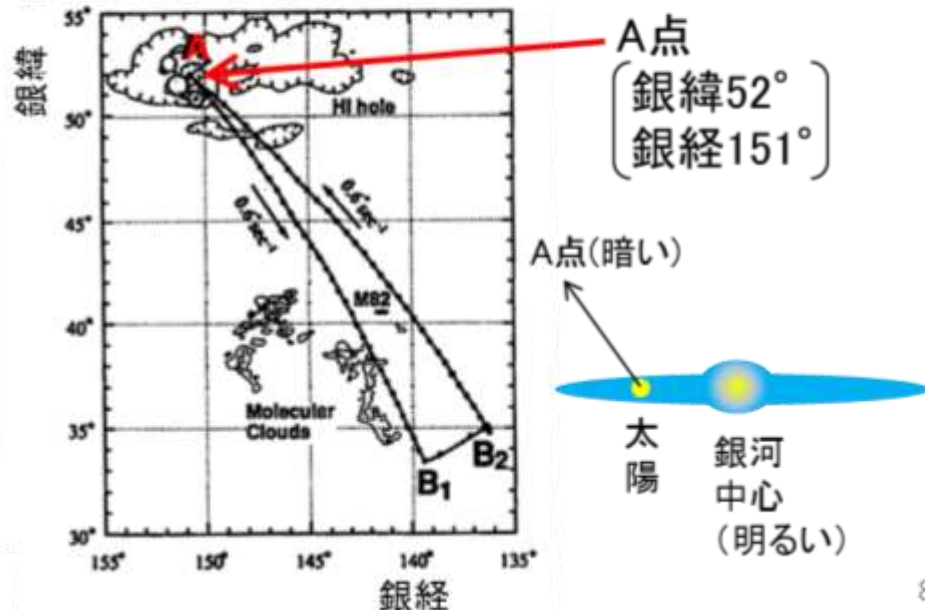
CνB崩壊光子のスペクトル
($\lambda = 50 \mu\text{m} + \text{赤方偏移}$)
が黄道放射の上に 5σ 以上の
有意度で観測可(右上図)

ν_3 の寿命 $\tau = 1 \times 10^{17}$ 年の場合、
同程度の統計精度を得るには、
100日程度の観測が必要
(Hf-STJ, 回折格子なし→視野角70倍に)

人工衛星を用いる必要あり。



バックグラウンドの少ない(暗い)方角: A点

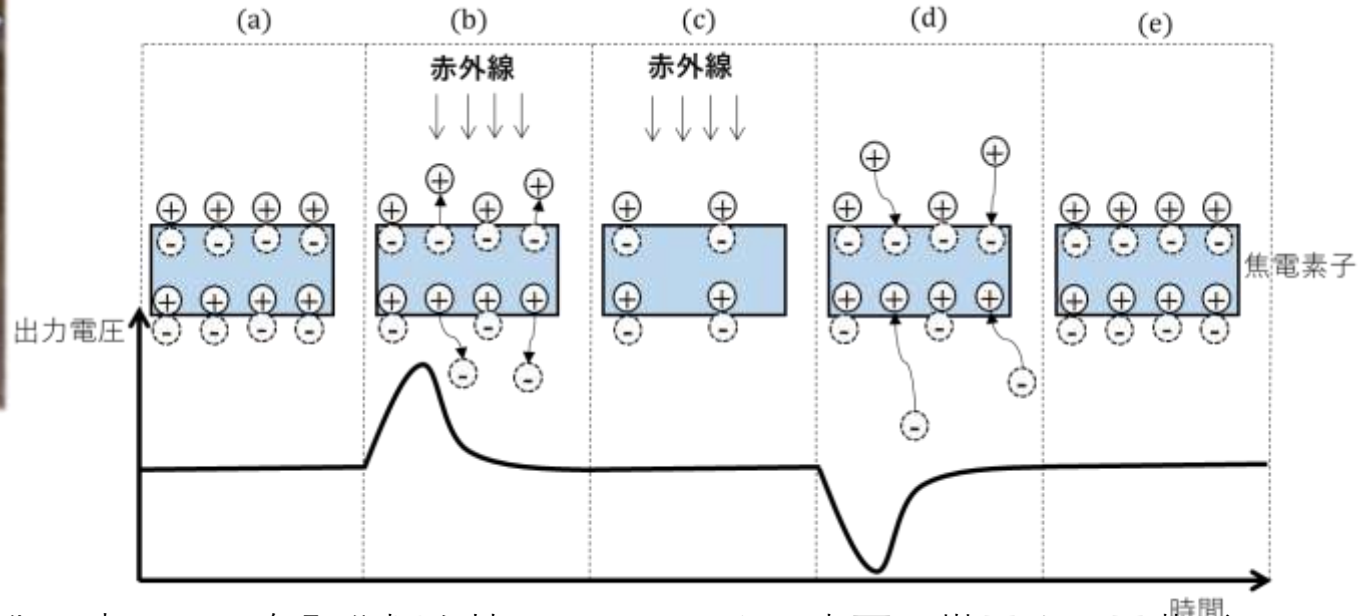


焦電検出器概要



本研究で用いた焦電検出器N

- ・主に人の動作の感知用のセキュリティ関係に用いられる。
近年では家電に用いられる。



- ・ 焦電素子は、温度の変化に応じて、自発分極を持つセラミックの表面に帯電する電荷が増減する為、赤外線に晒されると、温度変化率に正比例する出力電流を生成
 - ・ (a)：自発分極と呼ばれる電氣的偏りが、大気中のイオンにより中和され、オフセット電圧
 - ・ (b)：温度変化が起こり、自発分極状態が変化する為、蓄えられている電荷量に変化し、出力電圧も変動
 - ・ (c)：(b)から温度変化が無い為、オフセット電圧に戻る
 - ・ (d)：温度と自発分極状態が(a)の状態に戻ろうとする為、(b)と逆方向の電位を出力
 - ・ (e)：(d)から温度変化が無い為、オフセット電圧に戻る
- 焦電検出器は、赤外線が照射された瞬間と遮断された瞬間にのみ信号を出力

CO₂レーザーの原理

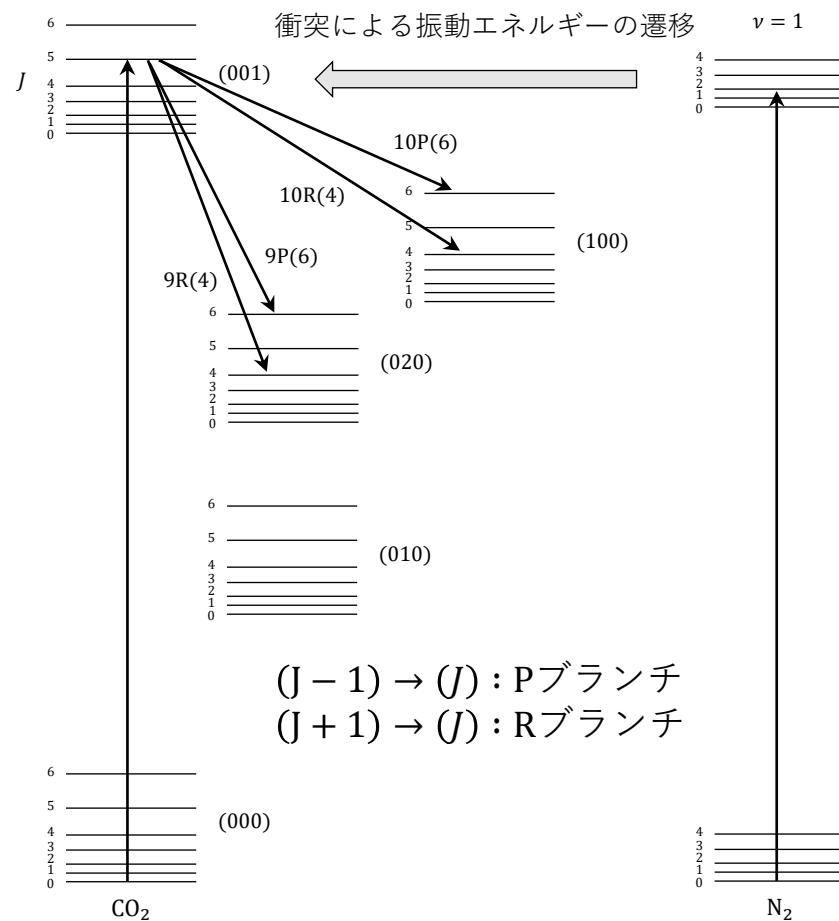
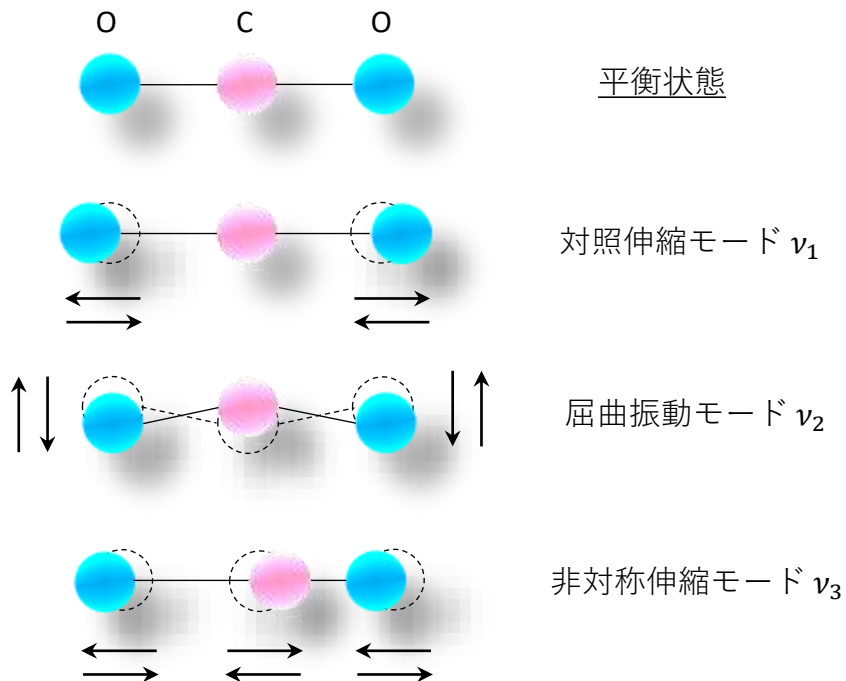


基本振動

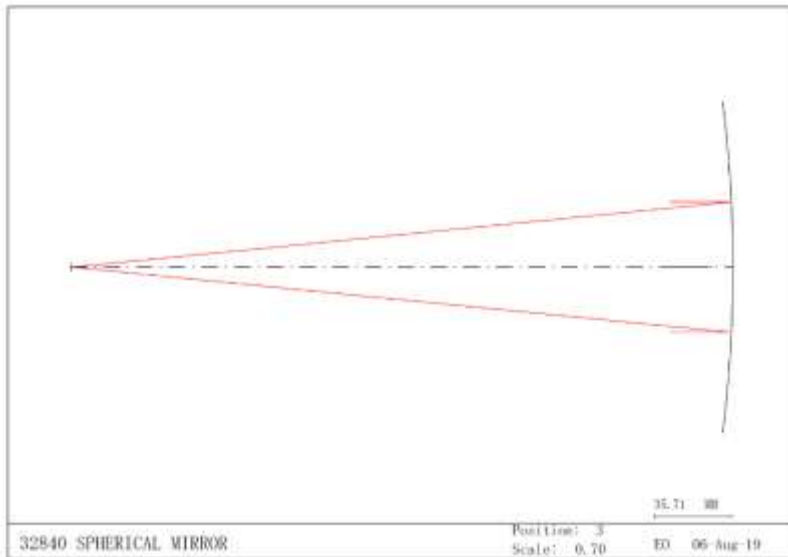
(ν_1, ν_2, ν_3)の量子数の組み合わせ

× 回転量子数 J

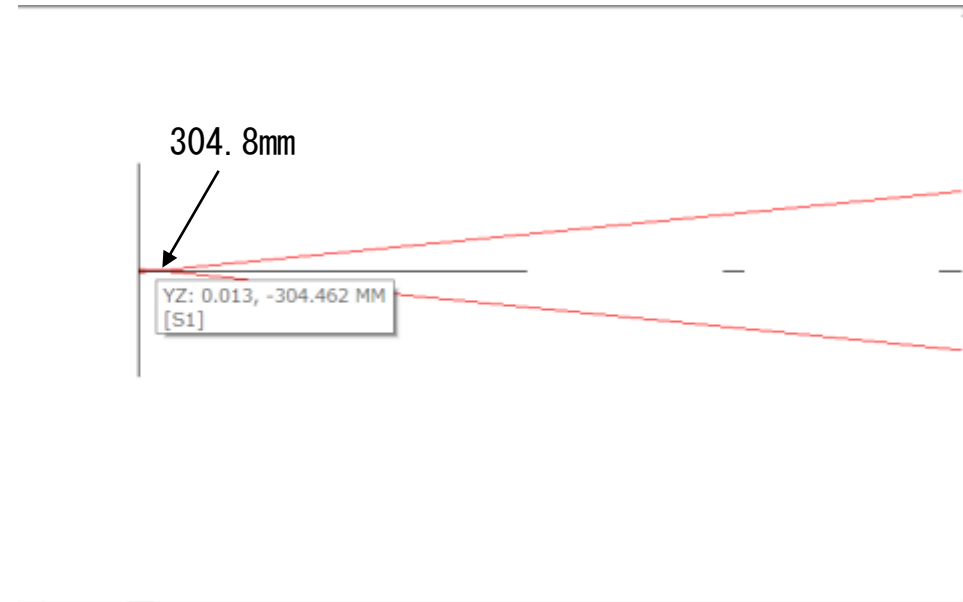
励起されたCO₂分子は上準位(001)から下準位(020)または(100)に落ちる



平行光線を当てたときのCODE Vによるシミュレーション



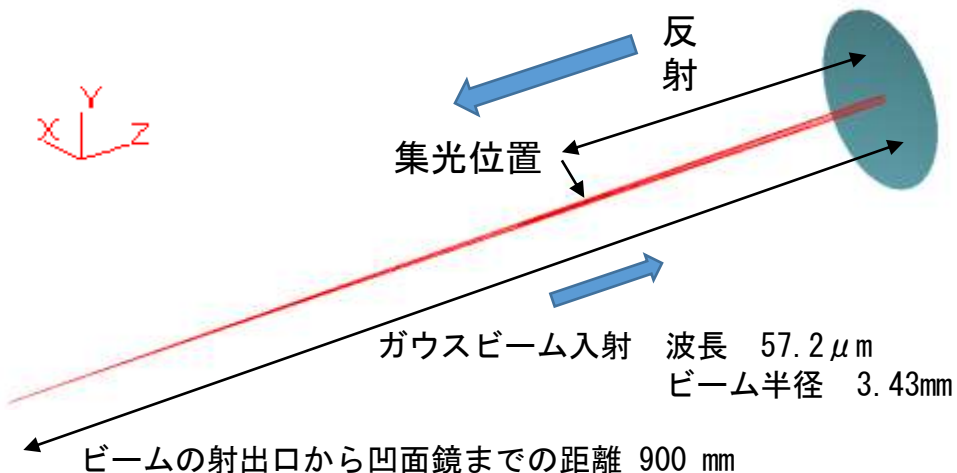
平行光線の平面図



平行光線の集光位置での平面図

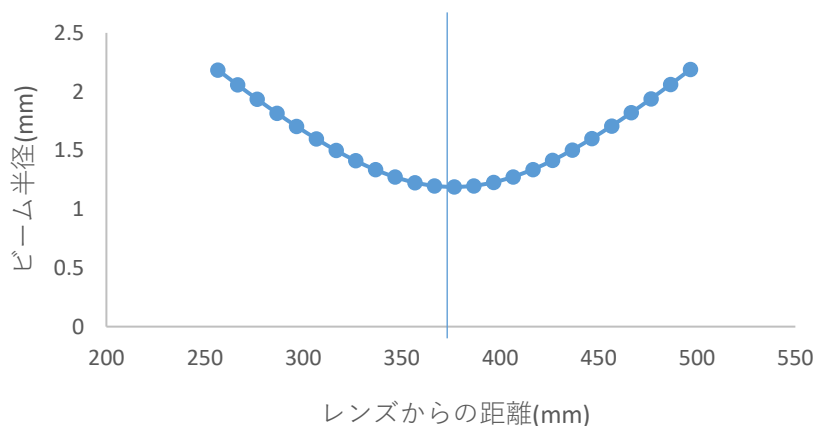
拡大表示したところ、平行光線の焦点の計算値とのズレはほぼなく、0.3~0.4mmほどであったため、シミュレーションに問題がないものとして続ける。

凹面鏡の角度 $\theta = 0^\circ$ のときのシミュレーション

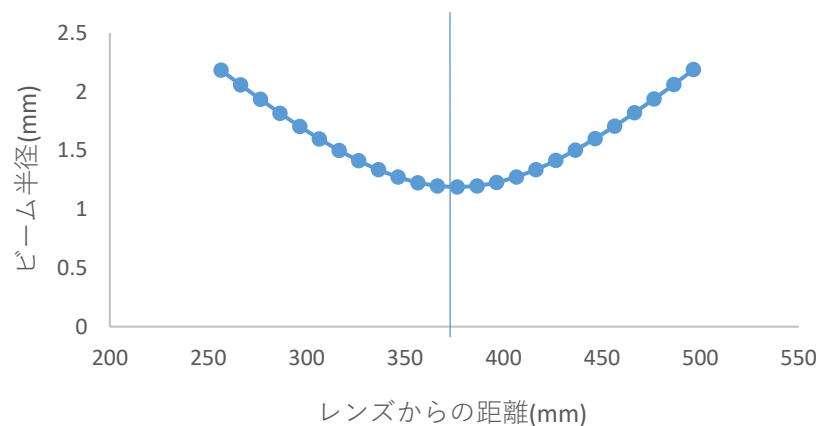


ABCD行列を用いたときの、凹面鏡に反射した
ガウスビームが最も収束したのは凹面鏡から
376.6mm離れたところで、そのビームの半径は
1.19mmであった。

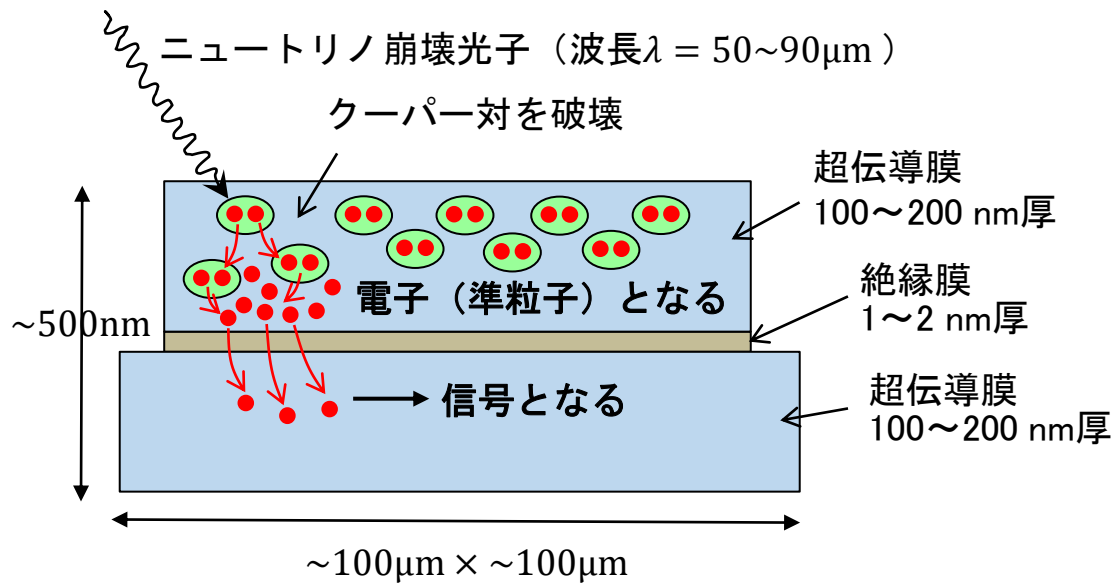
凹面鏡の角度 0° のX方向のビーム半径



凹面鏡の角度 0° のY方向のビーム半径



X、Y方向ともに、CODE VとABCD行列で求めたビーム半径が最小となる
レンズの距離にズレは生じなかった。





CODE Vでの凸面鏡と凹面鏡の複合シミュレーション

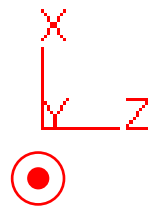
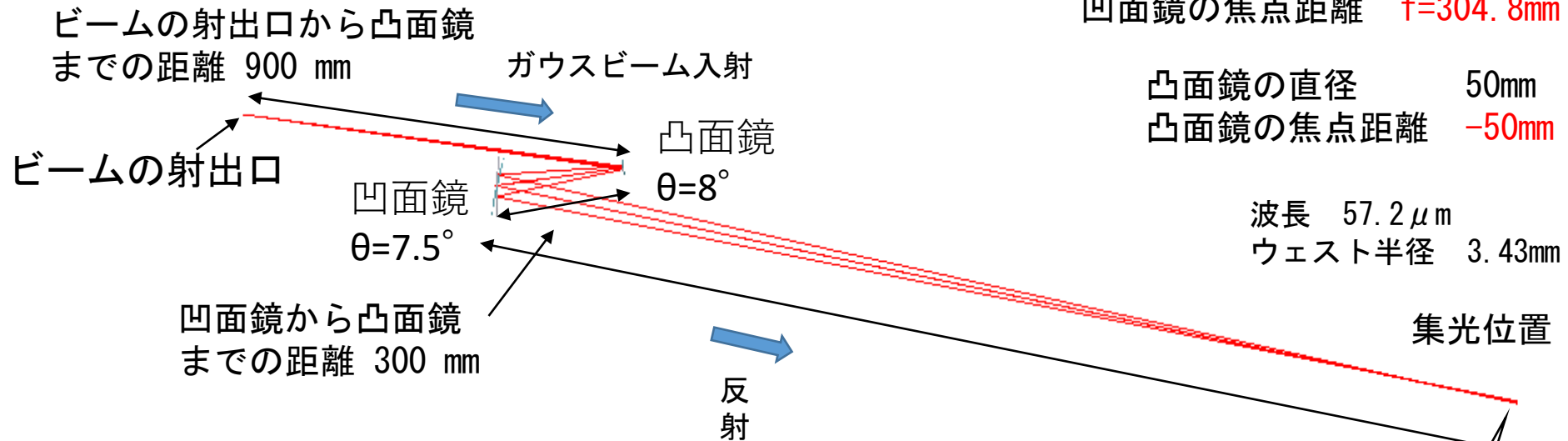
凹面鏡
凸面鏡

凹面鏡の角度 $\theta = 7.5^\circ$ 凸面鏡の角度 $\theta = 8^\circ$ のときのCODE Vによるシミュレーション

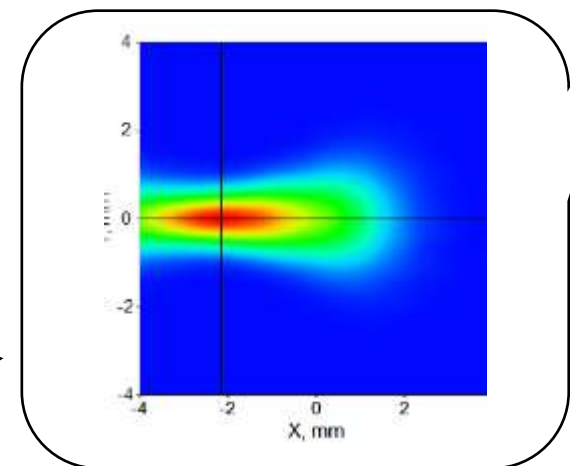
凹面鏡の直径 152.4mm
凹面鏡の焦点距離 $f=304.8\text{mm}$

凸面鏡の直径 50mm
凸面鏡の焦点距離 -50mm

波長 $57.2\mu\text{m}$
ウェスト半径 3.43mm



集光位置 (測定位置)
のビームプロファイル



水平(軸外しの)方向のシミュレーション

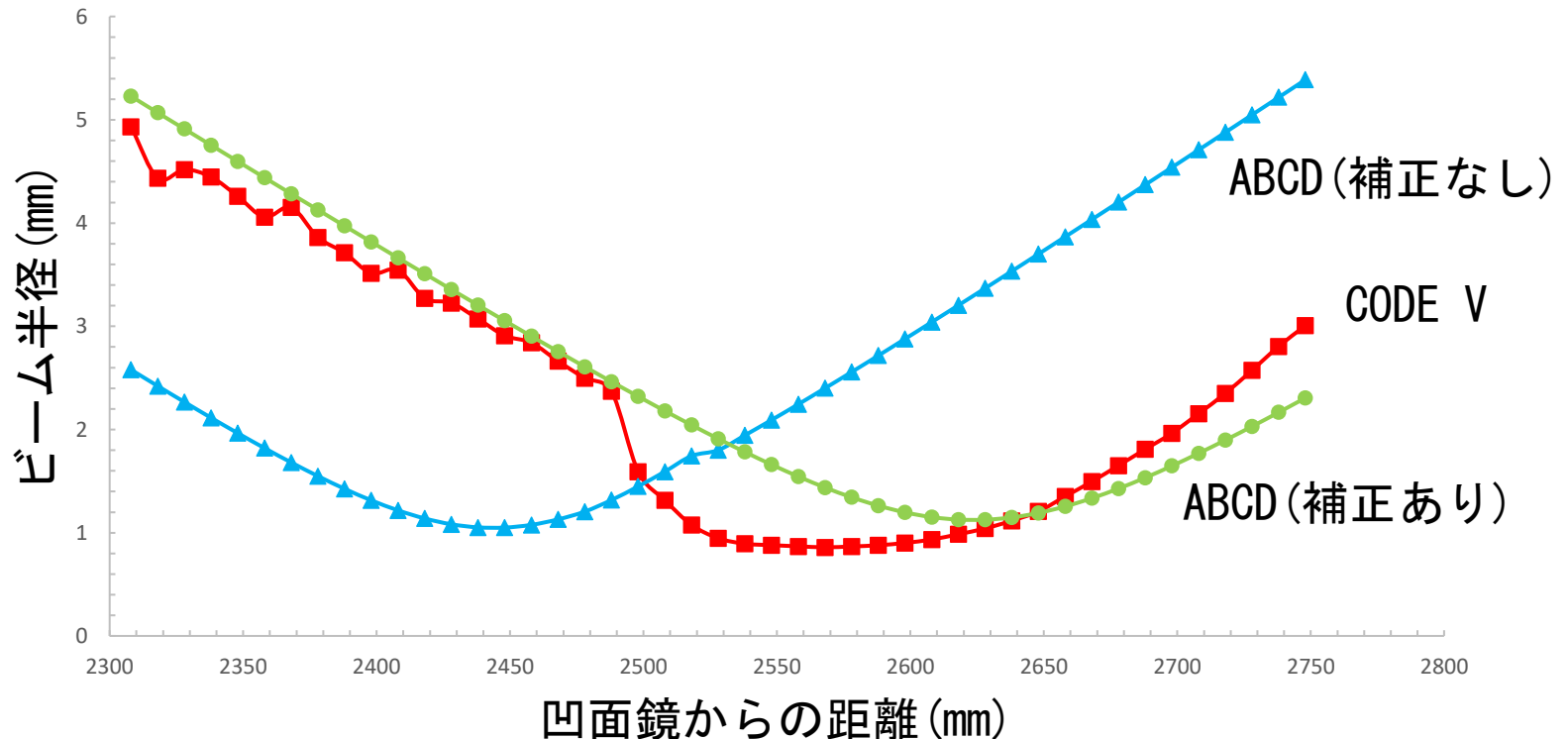


凹面鏡

凸面鏡

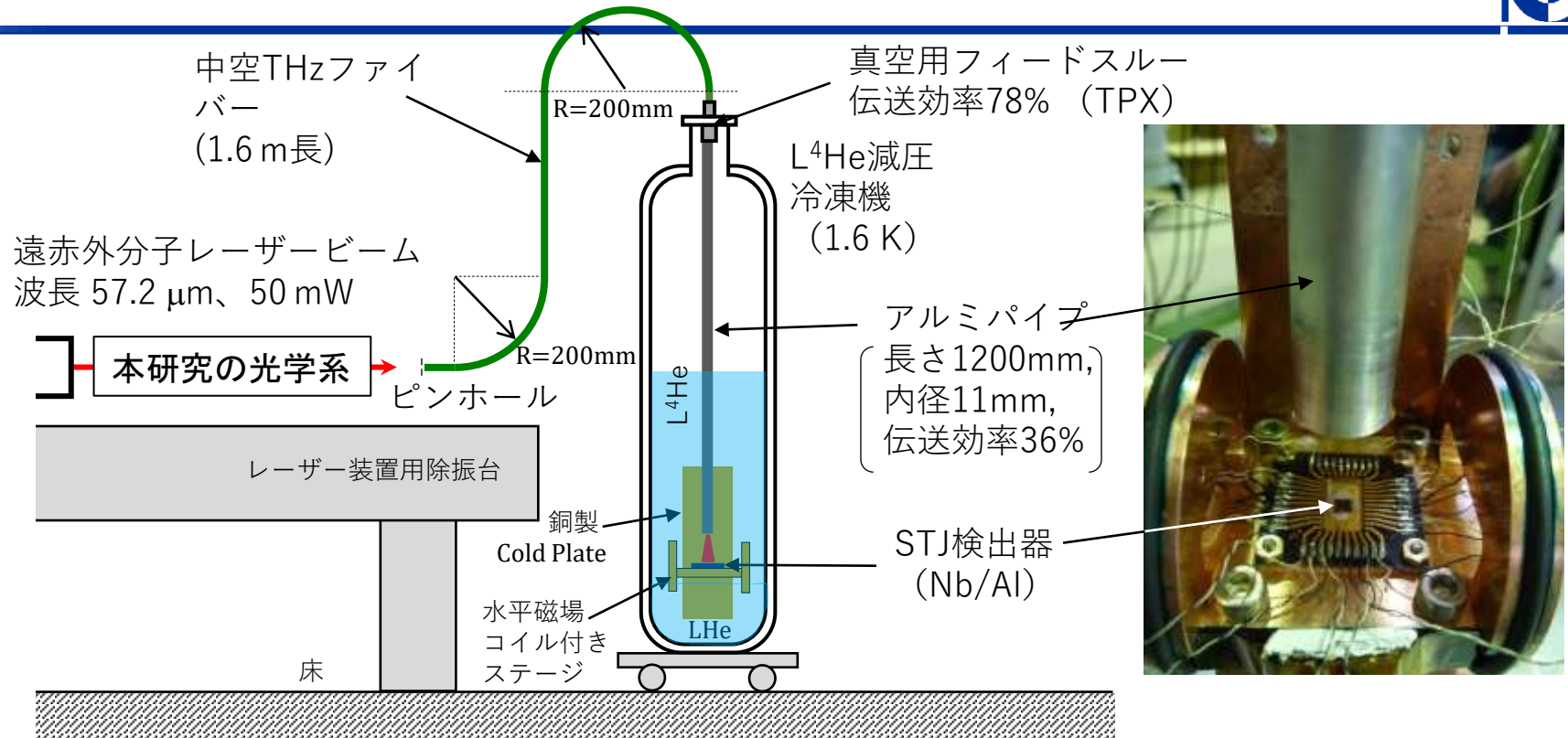
CODE V、補正を加えたABCD行列方式、補正を加えていないABCD行列方式のシミュレーションを行い、集光位置での水方向のビーム半径の変化を縦軸に、凹面鏡からの距離を横軸にグラフを作成した。

CODE VとABCD行列方式(補正ありと補正なし)

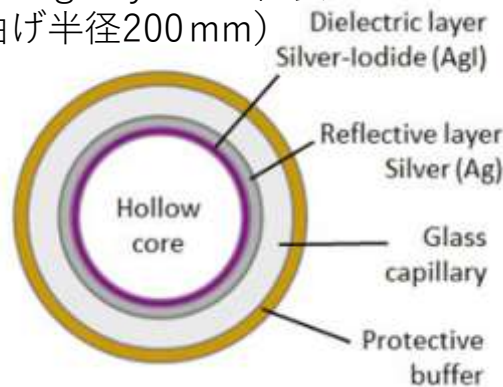


CODE Vと補正を加えたABCD行列方式では、収束位置としては約70mmのズレがあり、ビーム半径は約0.3mmのズレがあった。

遠赤外分子レーザーによるSTJ検出器の性能評価実験



中空THzファイバー、Opto Knowledge Systems社製
(長さ1.6m, 内径0.75 mm, 最小曲げ半径200 mm)



Flexibleだが、

①入射効率 = ピンホール直径 0.1mm /
ビームの水平方向の直径
4.1mm = 2.4%

②ファイバーに入射したビームの
伝送効率 ~ 1.6% (実測)

結果、入射効率 × 伝送効率 = 0.038%

光子数



本研究の光学系からピンホールに到達した際のビーム直径が4.1mm

ピンホールの直径が0.1mm

ビームの波長 57.2 μm

ビームウェスト半径 3.43mm

ビームパワー 50mW

中空テラヘルツファイバー伝送効率 1.6%

真空容器のフィードスルー 78%

真空容器中アルミパイプ伝送率 36.3%

アルミパイプ内径11mm

STJ検出器 40 μm 角

$$50\text{mW} \times 0.1/4.1 = 1.2\text{mW}$$

$$1.2\text{mW} \times 1.6/100 \times 78/100 \times 36.3/100 = 5.4 \mu\text{W}$$

$$5.4 \mu\text{W} \times \frac{(0.04)^2}{(\frac{11}{2})^2 \pi} = 9.2 \times 10^{-2} \text{nW}$$

$$\frac{9.2 \times 10^{-2}}{h \times \frac{c}{\lambda}} = 2.6 \times 10^{10} \text{個/s}$$

$$2.6 \times 10^{10} \text{個/s} \times 2 \times 10^{-6} \text{s} \times 0.1 = 5.2 \times 10^3 \text{個}$$

空気中の水分