

ミリ波大強度光源を用いた弱結合未知粒子の探索

ミリ波：波長 $\sim 1\text{mm}$ 、周波数 $\sim 200\text{GHz}$ 、エネルギー $\sim 0.8\text{meV}$

大和田健太、山崎高幸^A、末原大幹^A、宮崎彬、難波俊雄^A、
浅井祥仁、小林富雄^A、酒井剛^B、立松芳典^C、出原敏孝^C

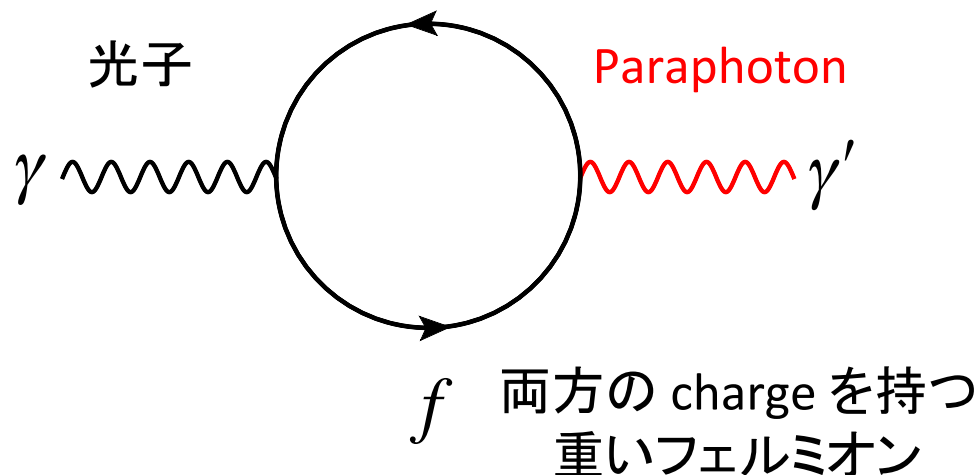
東大理、東大素セ^A、電通大^B、福井大遠赤セ^C

日本物理学会 2013年秋季大会

高知大学

光子と弱く結合する未知粒子 Paraphoton

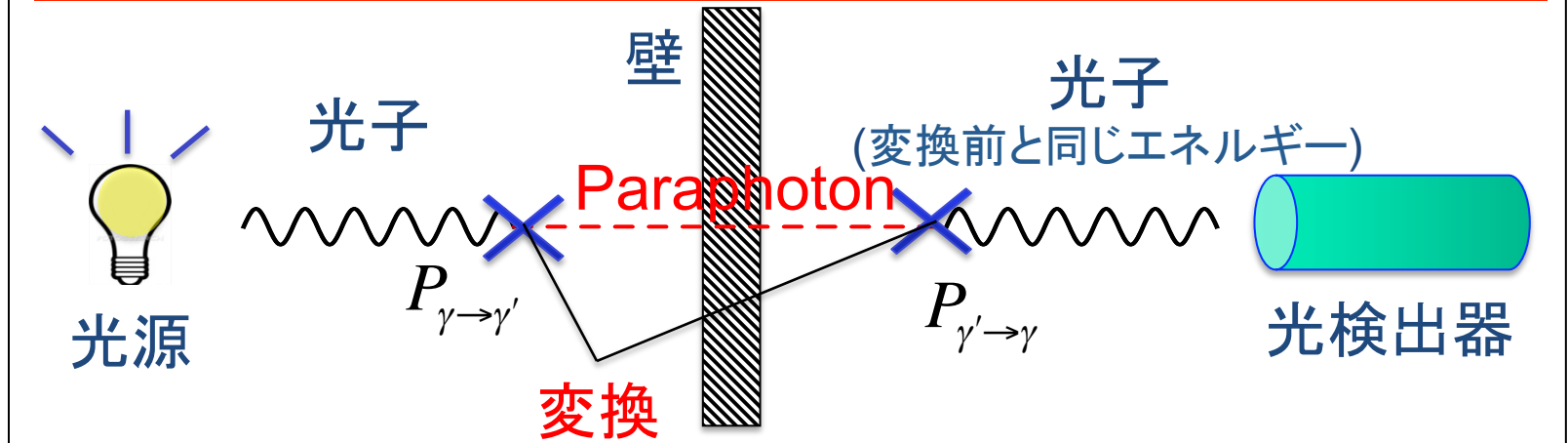
- 標準理論を超える多くの理論から自然と予言される
Extra U(1) Gauge Boson
- 光子と paraphoton の両方と結合するフェルミオンが存在すると、光子とparaphoton のmixingが起こる



探索方法：LSW実験

LSW = Light Shining through a Wall

Paraphotonに変換した場合だけ壁を通り抜ける



- 光源の強さ、検出器の感度 → 探索感度を決める
- 光子のエネルギー → 探索領域を決める

変換確率

$$P_{\gamma \rightarrow \gamma'} = 4\chi^2 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2 L}{4E_{\gamma}} \right)$$

混合parameter

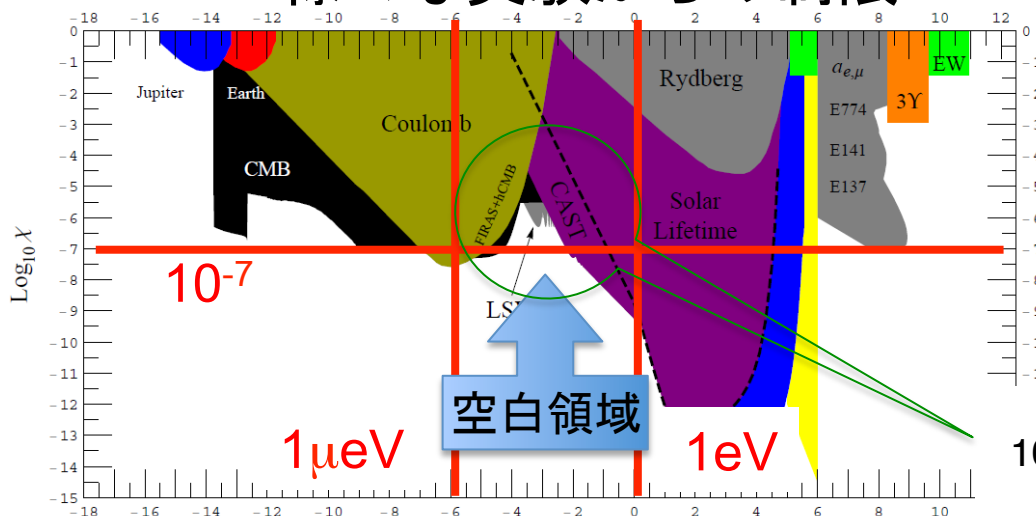
Paraphotonの質量

変換領域の長さ

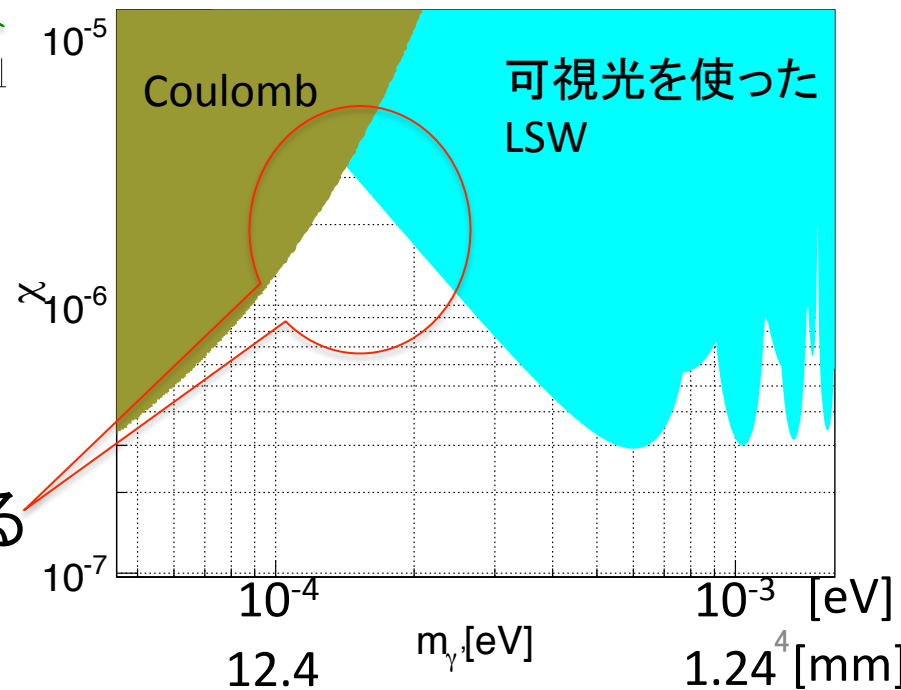
光子のエネルギー

ミリ波を用いた場合の領域

様々な実験からの制限



1meV付近の拡大図 (地上実験による制限)



Paraphotonは様々な実験で探されているが、未探索領域が残っている



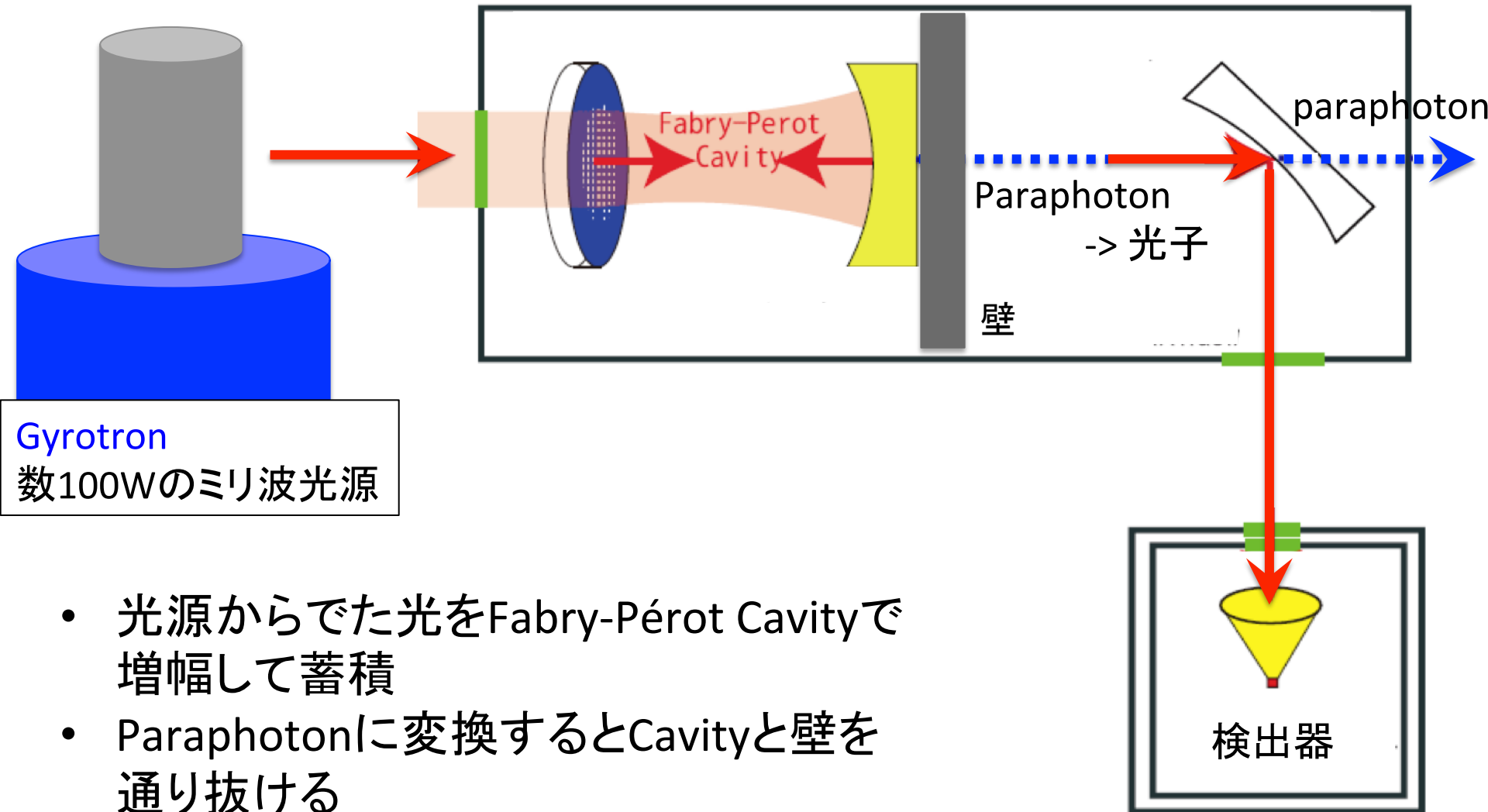
ミリ波を用いることによって探索できる

ミリ波を使う利点

ミリ波を用いる2つの利点

1. ミリ波は素粒子実験ではまだ使われていない波長域
 - 未だに探されていない領域の探索が可能
2. 単位エネルギーあたりの光子数が多いので高感度の探索が出来る
 - 単位エネルギーあたりの光子数 10^{22} [コ/W]
(可視光の約1000倍)

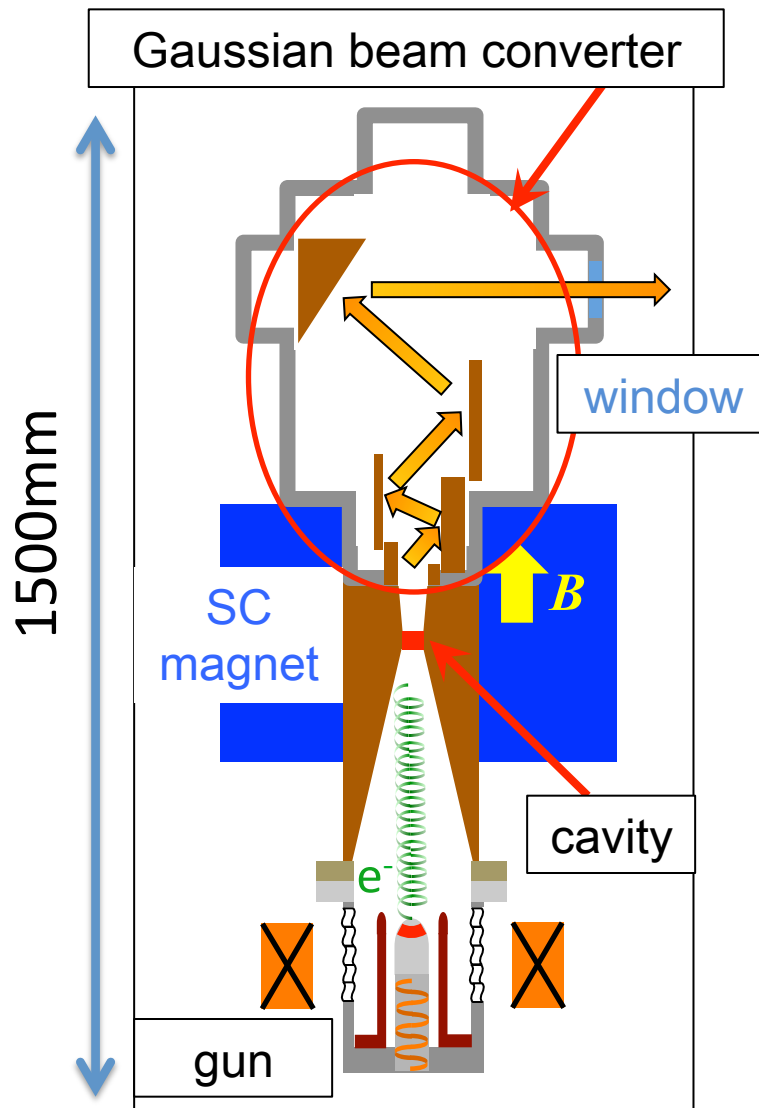
実験セットアップ



- 光源からでた光をFabry-Pérot Cavityで増幅して蓄積
- Paraphotonに変換するとCavityと壁を通り抜ける
- 通り抜けて再び光子に再変換した物をミラーで反射して検出器で検出する

ミリ波光源:Gyrottron FU CW G1

@ 福井大学



- Peak power ~ 300 W
(5Hz、duty 30%)
- 203 GHz (波長 1.48mm)
- 線幅 約1MHz
(10MHz幅でドリフト)
- ガウスビームが出力される

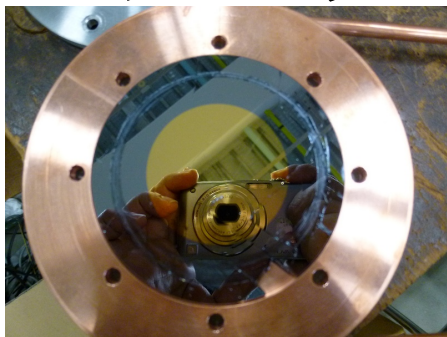
Fabry-Pérot cavity

一次元のとじこめ(光学技術)

高いパワー密度 (光学的収束)

- 共振器長が自由に変えられる

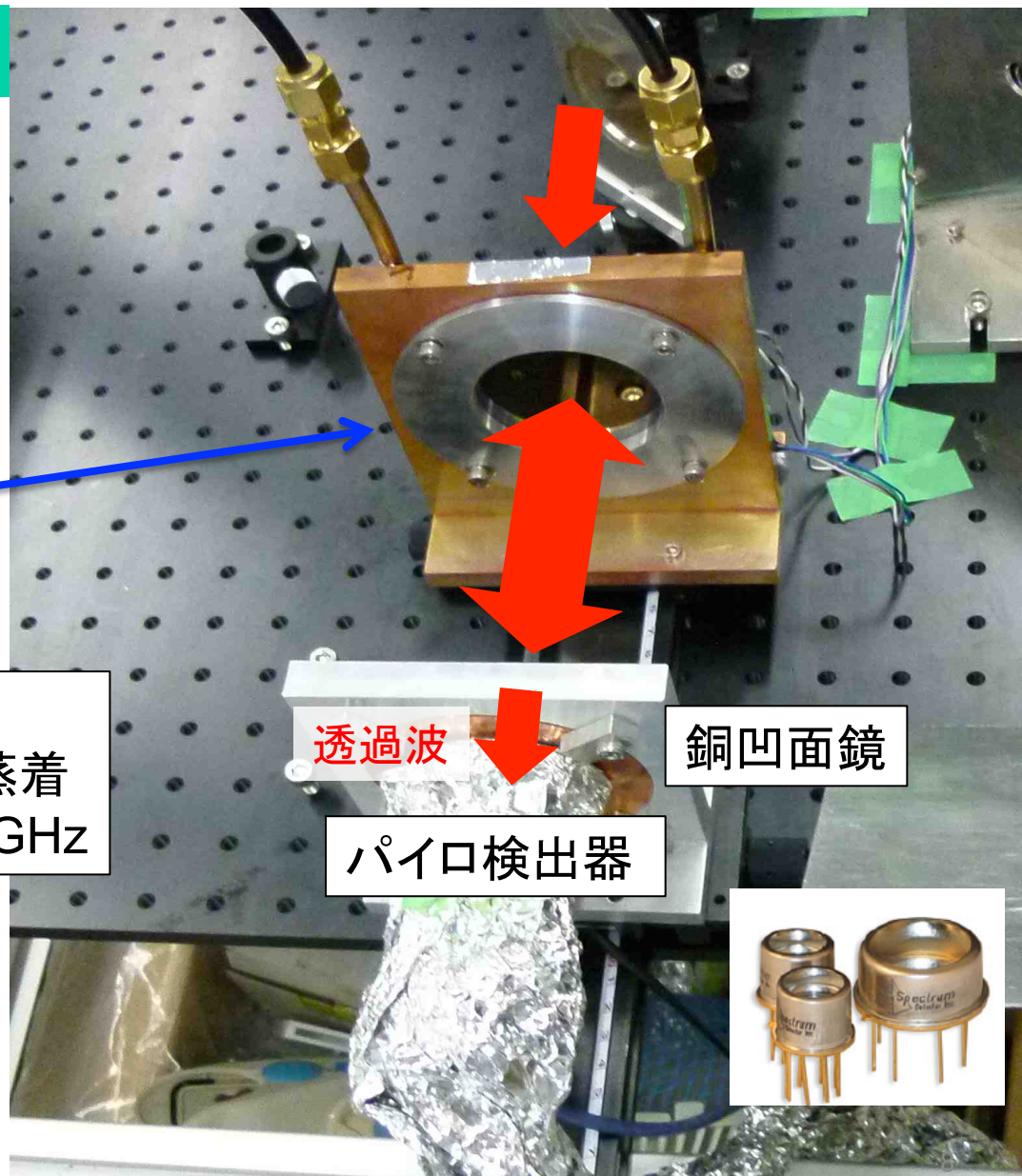
金メッシュミラー



シリコン基板上に幅200um,
周期360umの金薄膜(1um厚)を蒸着
→99% 反射, ~0.7% 透過 @ 203 GHz

Cavityのgain ~200倍

56kWの蓄積



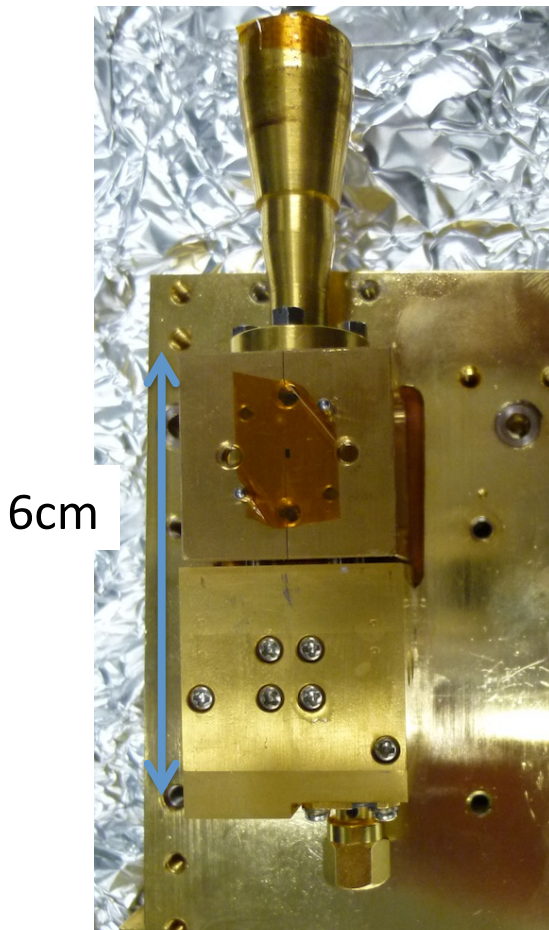
SISヘテロダイン検出器

SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ヘテロダイン検出器

ジョセフソン接合による、電流・電圧特性の高い非線形性を利用した高感度なヘテロダイン検出器

(線幅を狭めてバックグラウンドを減らすことができる)

- Nb超伝導
動作温度 4K
- ノイズパワー $\sim 30\text{K}$
 $(6 \times 10^{-14} [\text{W}/\sqrt{\text{MHz}}])$



SIS検出器

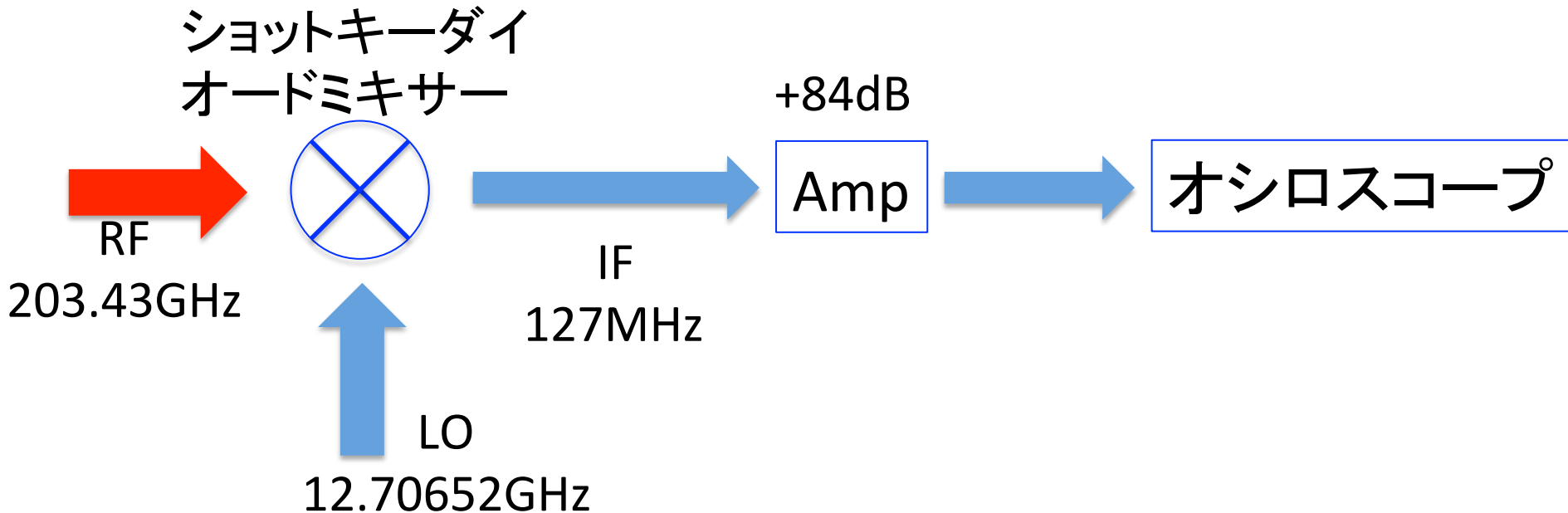
(国立天文台で使用されていたもの)

予備実験

SIS検出器はまだ性能評価の最中なので、一通りのセットアップで最終感度をだすために予備実験を行った

- 検出器にはショットキーダイオードを使用
- Beam On と バックグラウンドをそれぞれ約30分の測定
- Fabry-Pérot cavityに56kW蓄積
- 各測定 livetime 約0.6ms
- Gyrotronのビームに同期してトリガー

検出器と読み出し

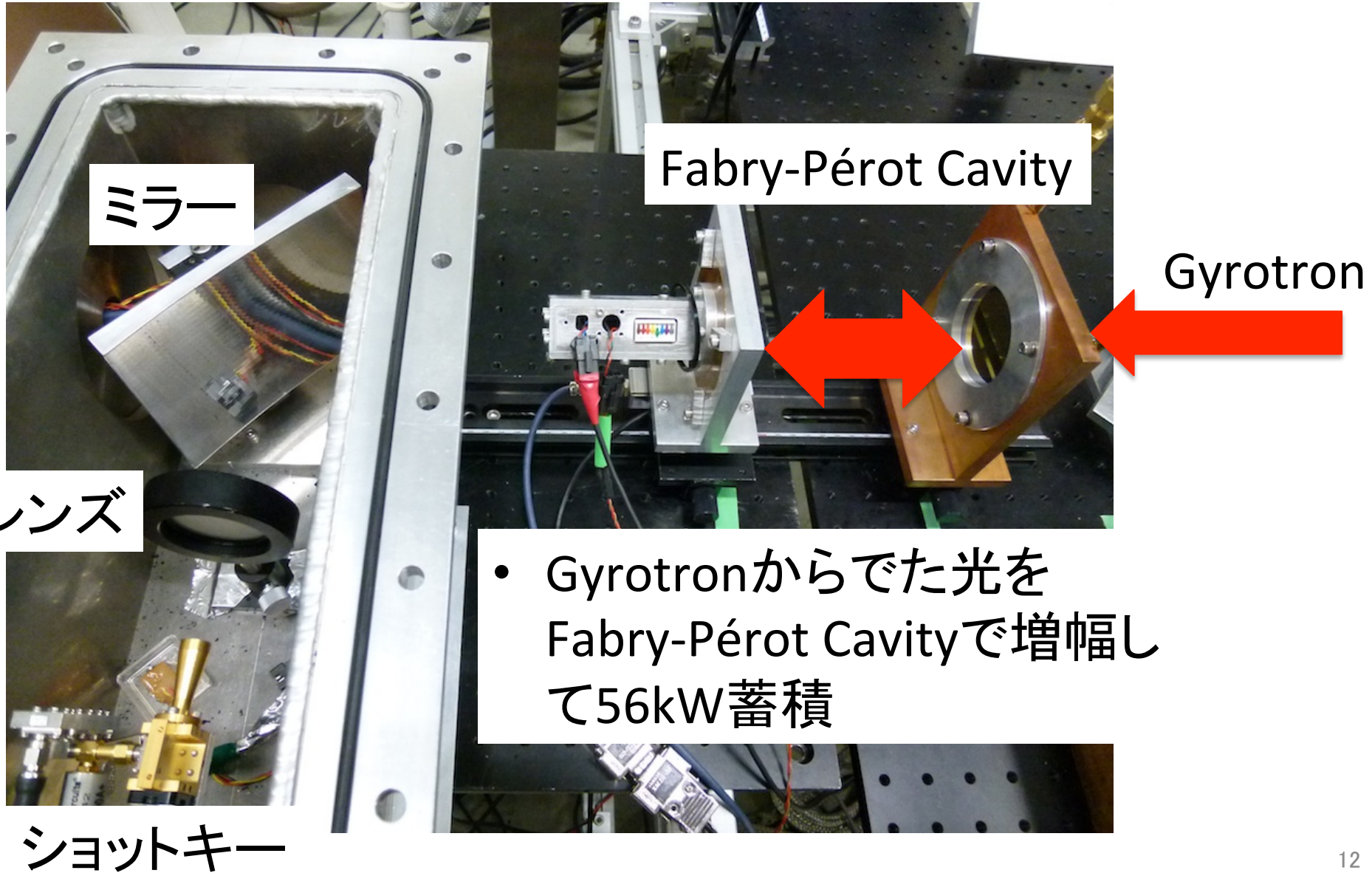


検出器：ショットキーダイオードミキサー

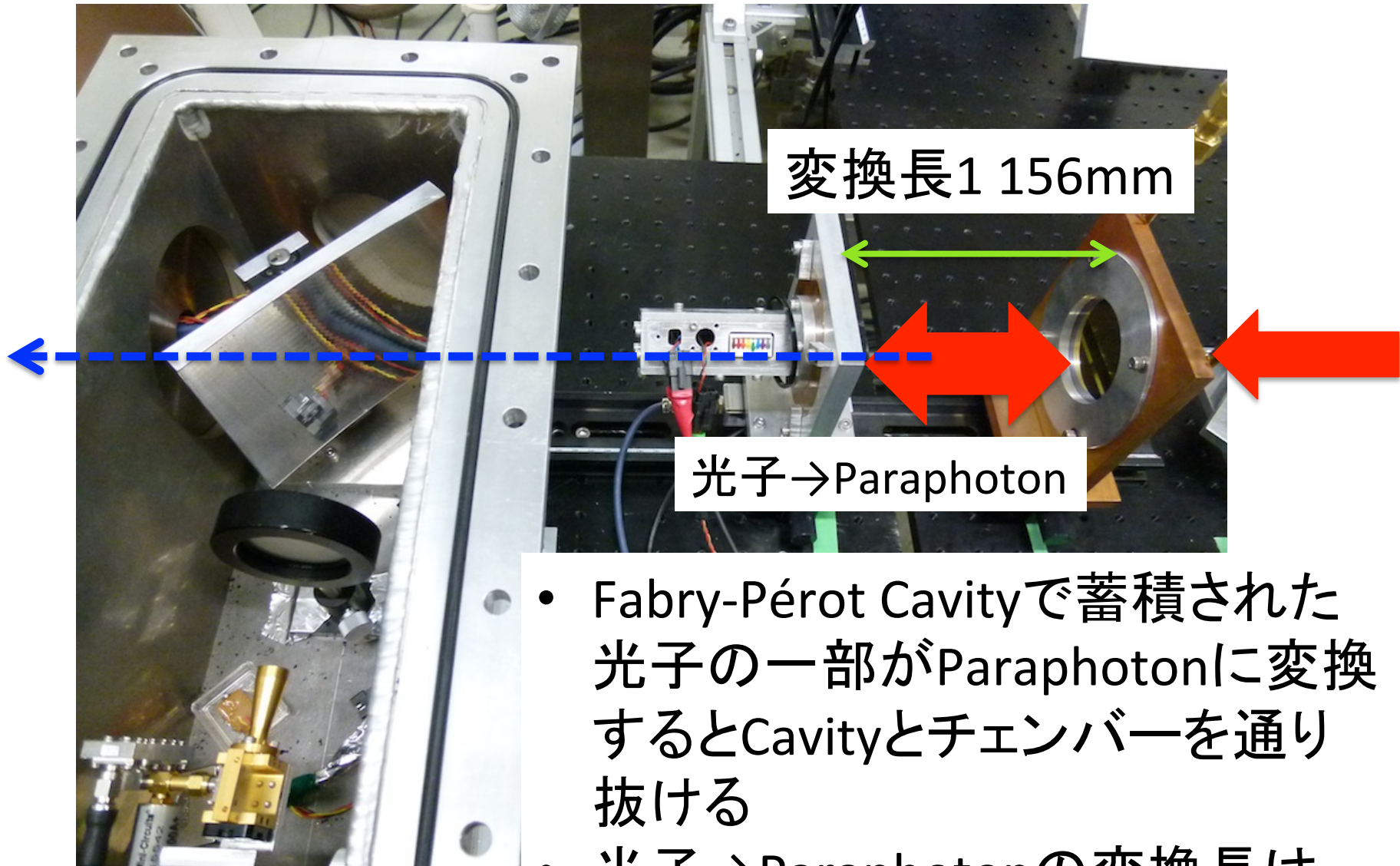
- RF(203.43GHz)とLO(12.70652GHzの16逡倍)を混ぜて差分の周波数(127MHz)に変換して取り出す → SISと同じ
- SISより感度は4桁悪い

ショットキーの信号は常温アンプで+84dB増幅してオシロスコープで波形を取得

セットアップ



セットアップ

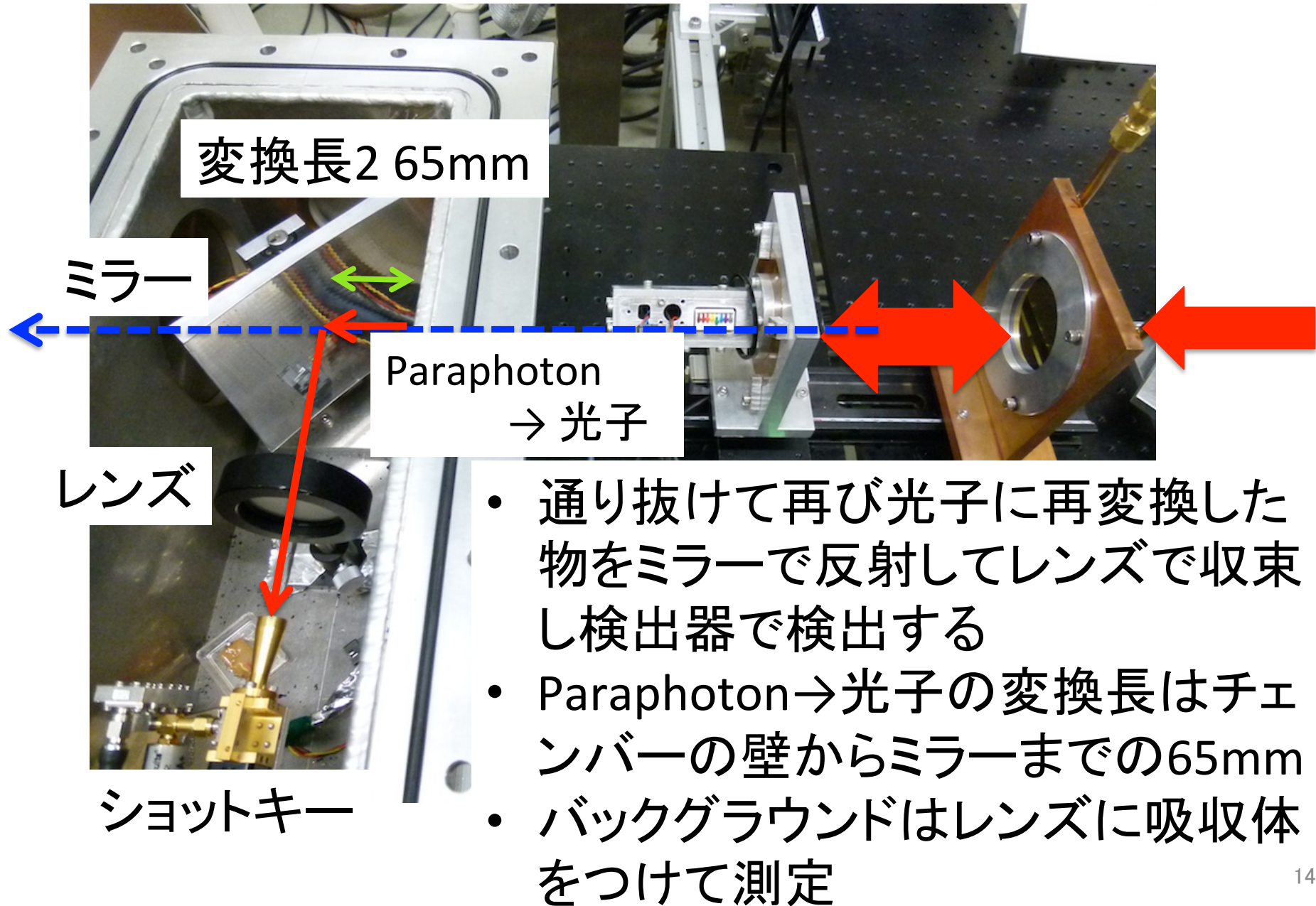


変換長1 156mm

光子→Paraphoton

- Fabry-Pérot Cavityで蓄積された光子の一部がParaphotonに変換するとCavityとチェンバーを通り抜ける
- 光子→Paraphotonの変換長はCavityの距離156mm

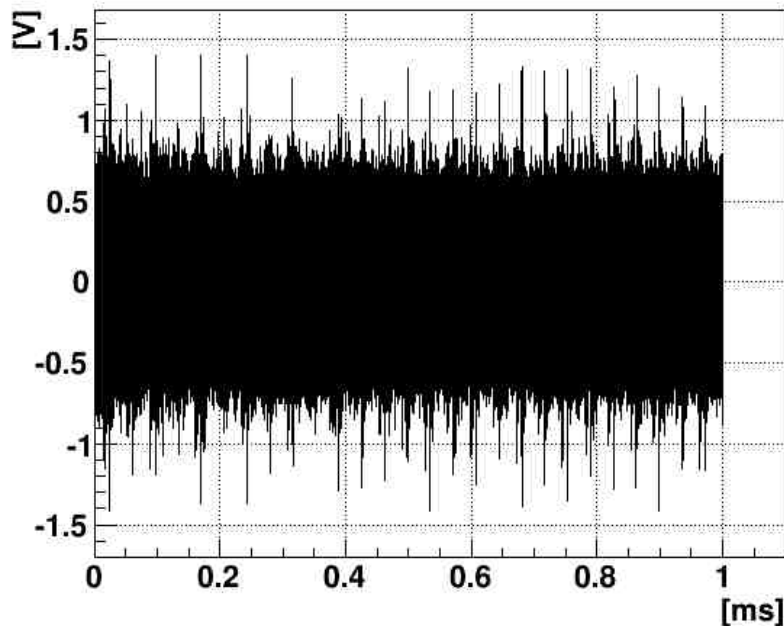
セッティングアップ



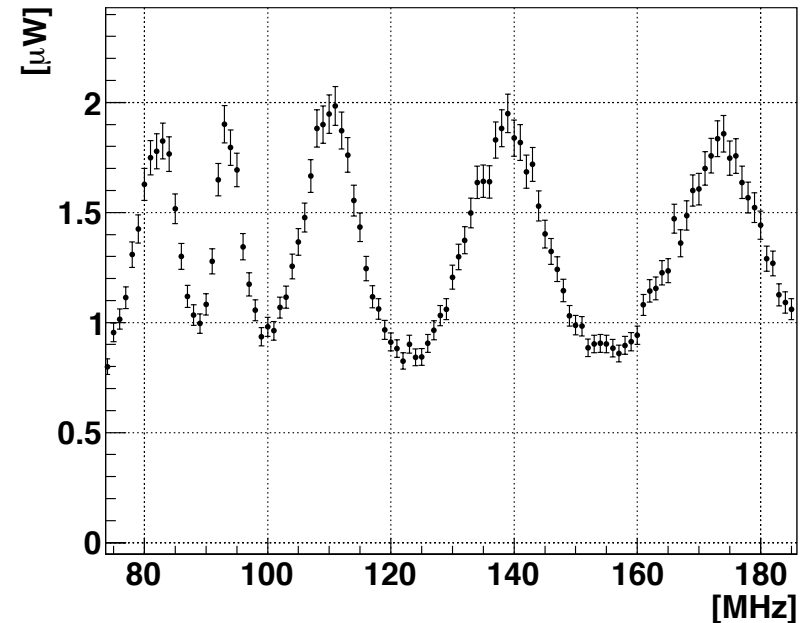
取得スペクトル(1)

オシロスコープで取得した
波形の1つ

信号(~127MHz)がどれだけい
るか知りたいのでフーリエ変
換する



FFT

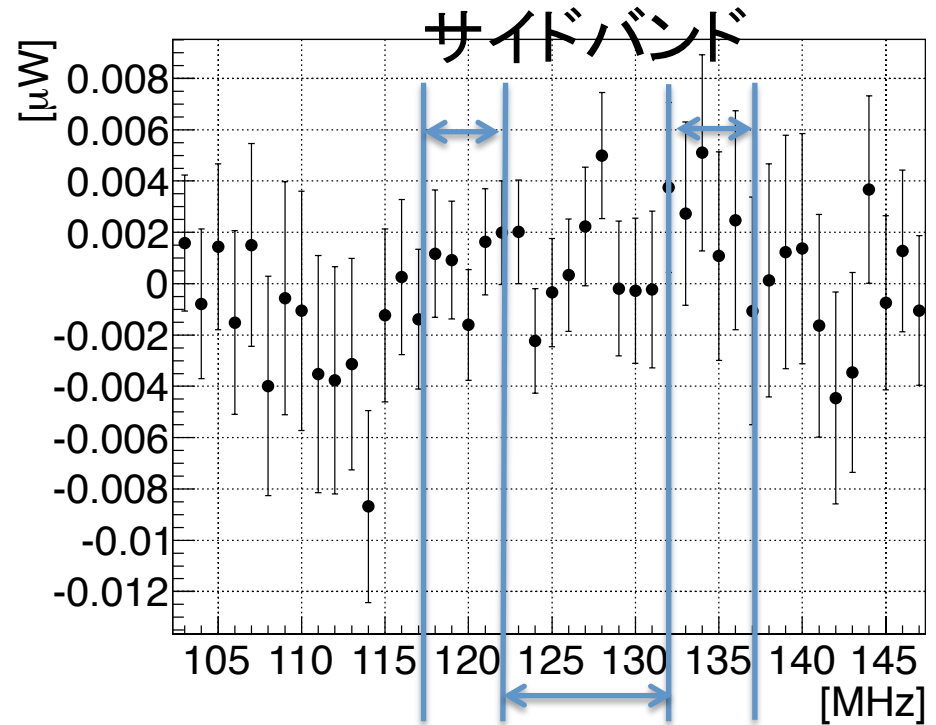
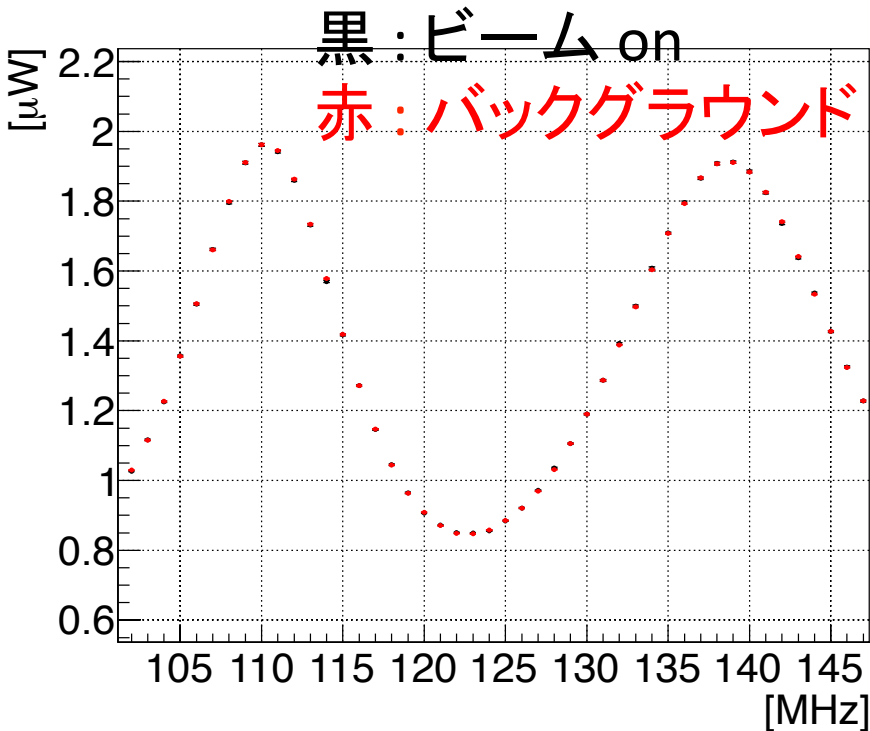


取得した波形をフーリエ変換して、ビームonとバックグ
ラウンドのスペクトルで有意な差があるか調べる

取得スペクトル(2)

約30分間測定 averages

ビームon - バックグラウンド



ビーム on - バックグラウンド

信号領域 : $0.0120 \pm 0.0083 [\mu\text{W}]$

サイドバンド : $0.011 \pm 0.011 [\mu\text{W}]$

信号領域 - サイドバンド : $0.001 \pm 0.014 [\mu\text{W}]$

信号領域
(122~132MHz)

有意な差は見つからなかった

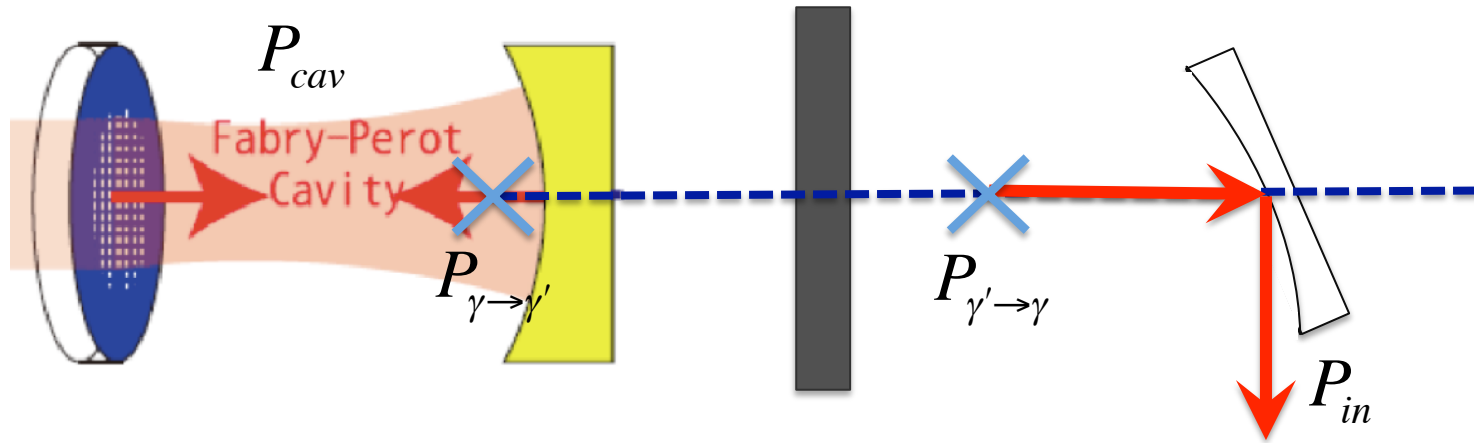
検出器に入るパワー

測定されたパワーから検出器に入ってきているパワーに直す必要がある

$$P_{in} = \frac{P_{ob}}{effi \times T_{lens} \times G_{amp}}$$

- P_{in} : 検出器に入ってくるビームのパワー $(0.6 \pm 8.2) \times 10^{-6} [\mu W]$
- P_{ob} : 測定されたパワー $0.001 \pm 0.014 [\mu W]$
- $effi$: 検出効率 10^{-5} 、測定の前と後に既知のビームをつかって実測
- T_{lens} : レンズの透過率、 $68\% \pm 5\%$
- G_{amp} : 常温アンプの増幅率、 $10^{8.4}$ 倍

リミット



$$P_{in} = P_{cav} / 2 \times P_{\gamma \rightarrow \gamma'} \times P_{\gamma' \rightarrow \gamma} = P_{cav} / 2 \times 16 \chi^4 \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2}{4E_{\gamma}} L_1 \right) \sin^2 \left(\frac{m_{\gamma'}^2}{4E_{\gamma}} L_2 \right)$$

P_{in} : 検出器に入ってくるパワー

P_{cav} : Fabry-Pérot Cavityに蓄積されているパワー

$P_{\gamma \rightarrow \gamma'} (\gamma' \rightarrow \gamma)$: 光子 $\rightarrow$ Paraphoton (Paraphoton $\rightarrow$ 光子) の変換確率

χ : 混合parameter、これに制限をつける

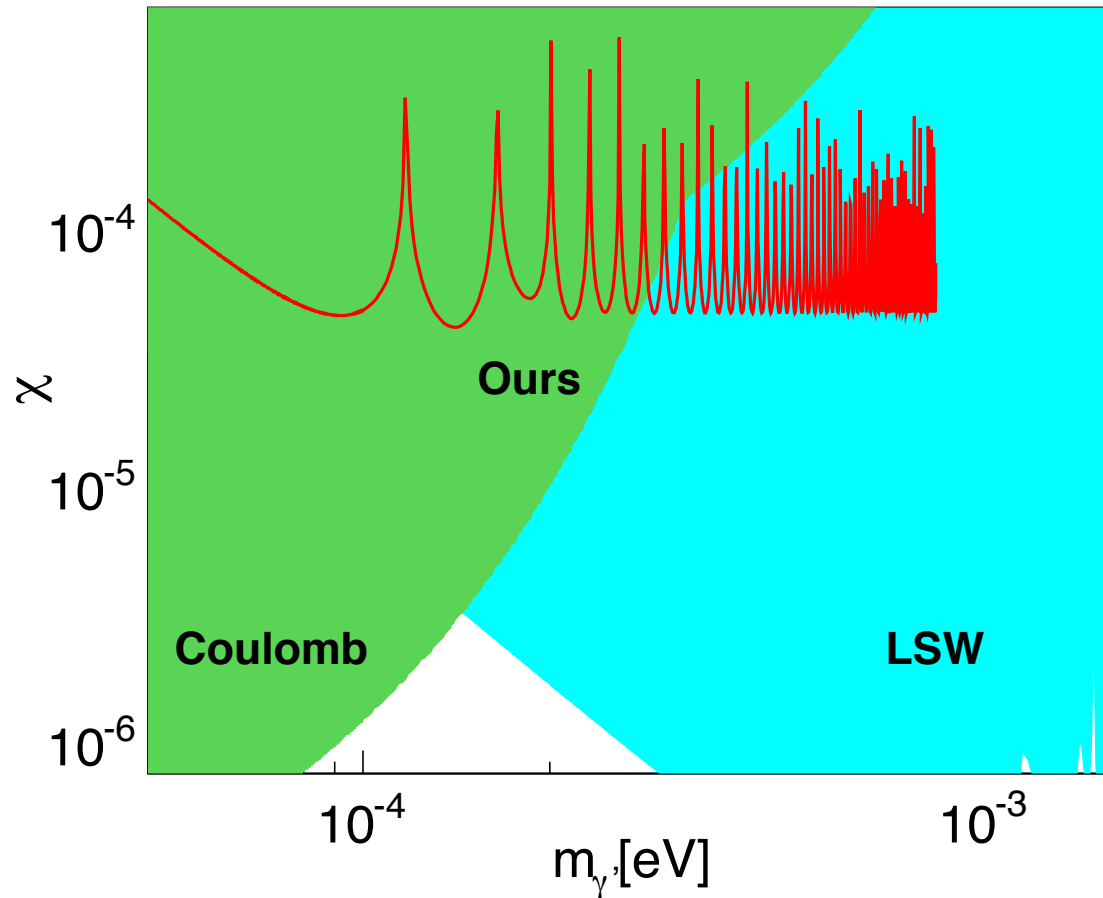
$m_{\gamma'}$: Paraphotonの質量

E_{γ} : 光子のエネルギー

$L_{1(2)}$: 変換長 156mm(65mm)

予備実験の結果

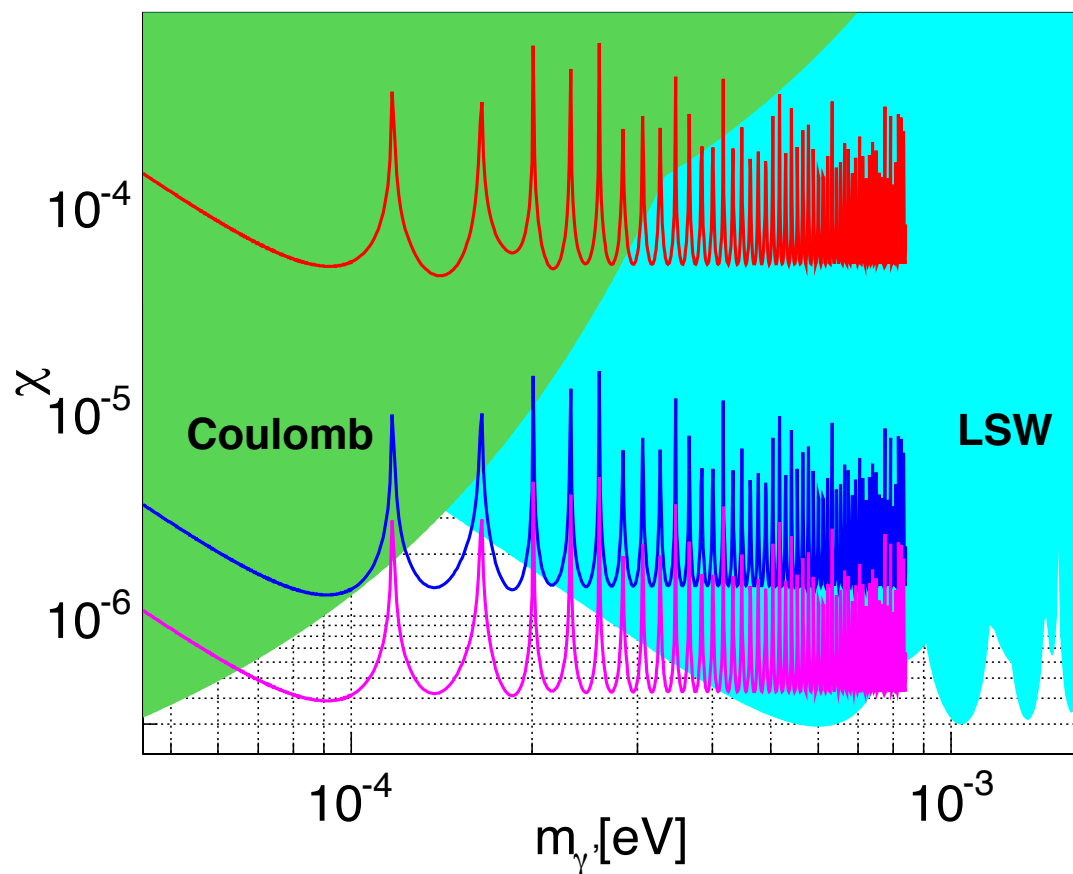
混合parameter χ に対する制限(95%CL)



$\chi < 4.5 \times 10^{-5}$ @ 1.4×10^{-4} [eV] の制限を得た
ミリ波を用いたLSW実験での初めての結果

本測定での感度とさらなる向上

混合parameter χ に対する制限



青:本測定

SISの使用 : 検出効率 10^4 倍
Livetime : 1680s



最終感度 35倍

紫:1MW級Gyrotorn
@原研



さらに3.3倍

まとめ

- 標準理論を超える多くの理論から自然と予言されるparaphotonを探索する
- ミリ波を使うことにより、質量0.2meV付近のparaphotonを最高感度で探れる
- 強力なミリ波光源Gyrotronを使用
 - 200W、203GHz、Fabry-Pérot Cavityで56kW蓄積
- ショットキーダイオードミキサーを用いて予備実験を行い $\chi < 4.5 \times 10^{-5}$ @ 1.4×10^{-4} [eV] の制限を得た(初のミリ波LSW実験)
- 本実験ではSIS検出器の使用と測定時間を延ばすことにより、35倍高い感度で探索できる