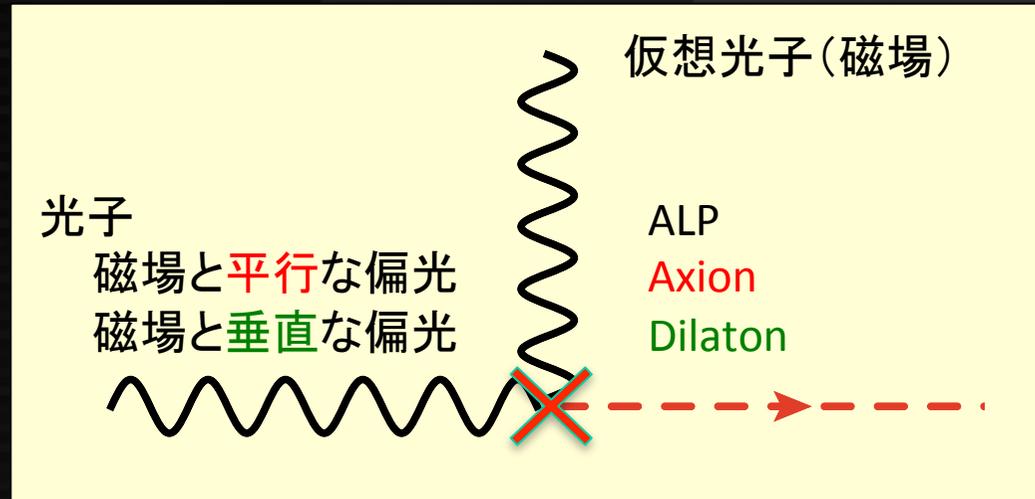


ミリ波大強度光源を用いた 弱結合未知粒子の探索

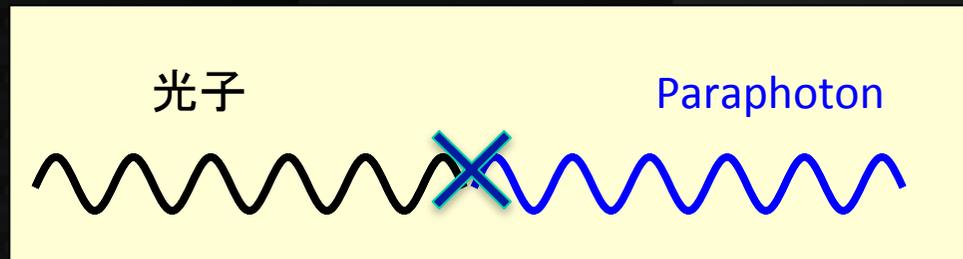
末原 大幹, 大和田 健太, 浅井 祥仁
(東大ICEPP, 東大理)

おさらい: 弱結合未知粒子

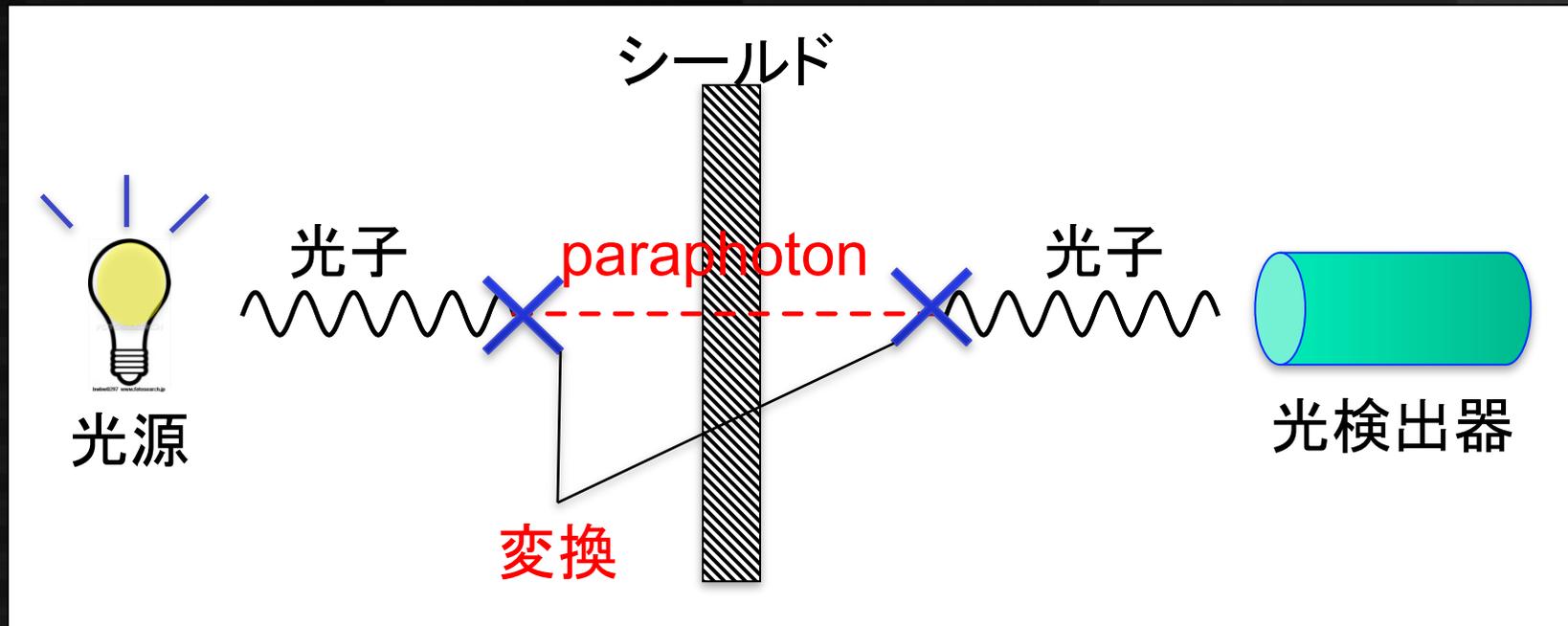
1. ALP (Axion-like particle)
 - Axion (擬スカラー)
QCDにおけるCP問題
 - Dilaton (スカラー)



2. Paraphoton (hidden photon):
Extra U(1) Gauge Boson
光子 \leftrightarrow paraphoton 振動



おさらい: LSW実験

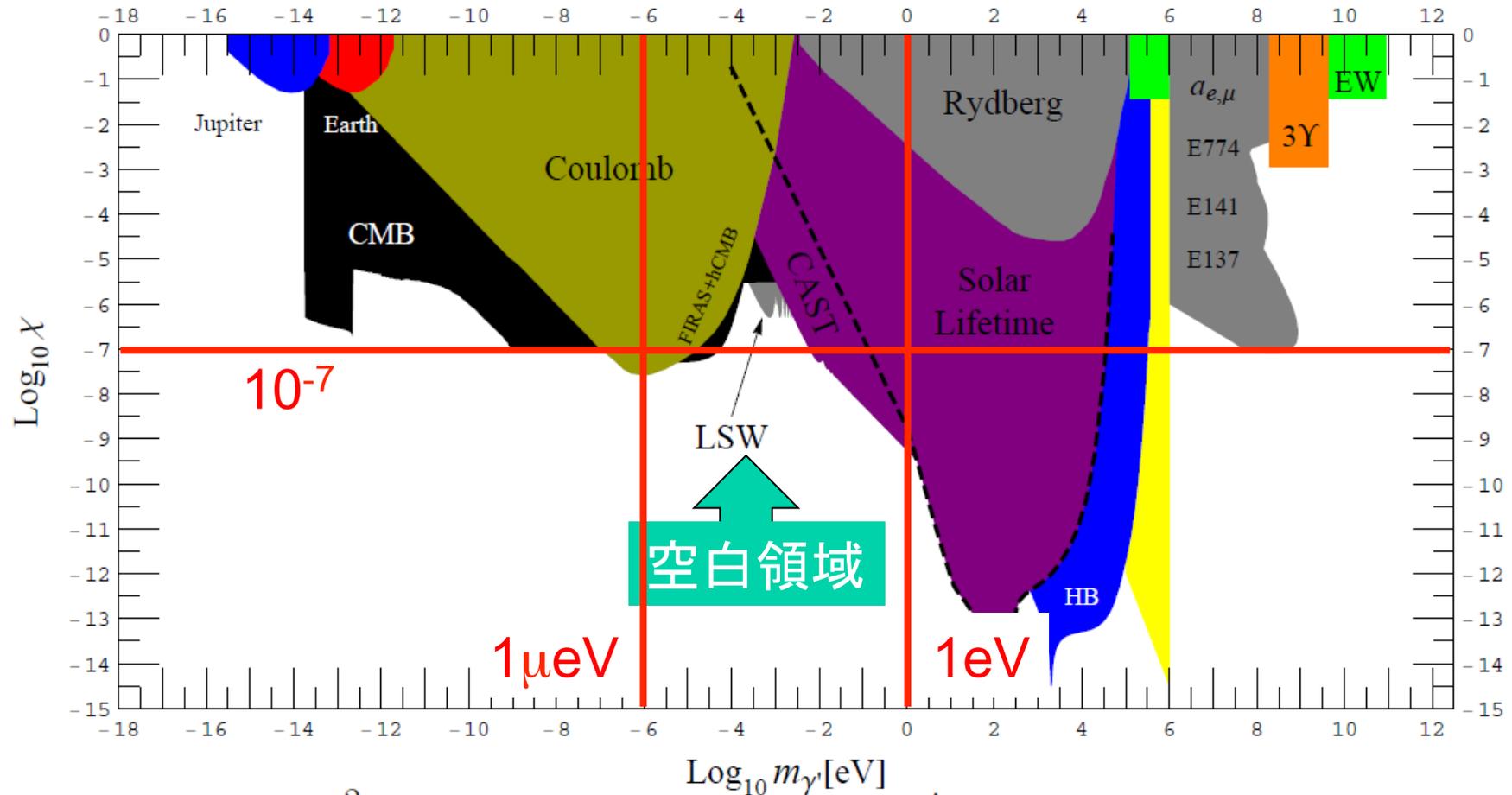


- 強力な光源と高感度な検出器 → 弱い結合に感度
- 光源のphoton energyで見るparaphoton massが変わる

$$P_{\gamma\gamma'} = 16\chi^2 \left(\sin \frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)^2 \quad (\omega \gg m_{\gamma'})$$

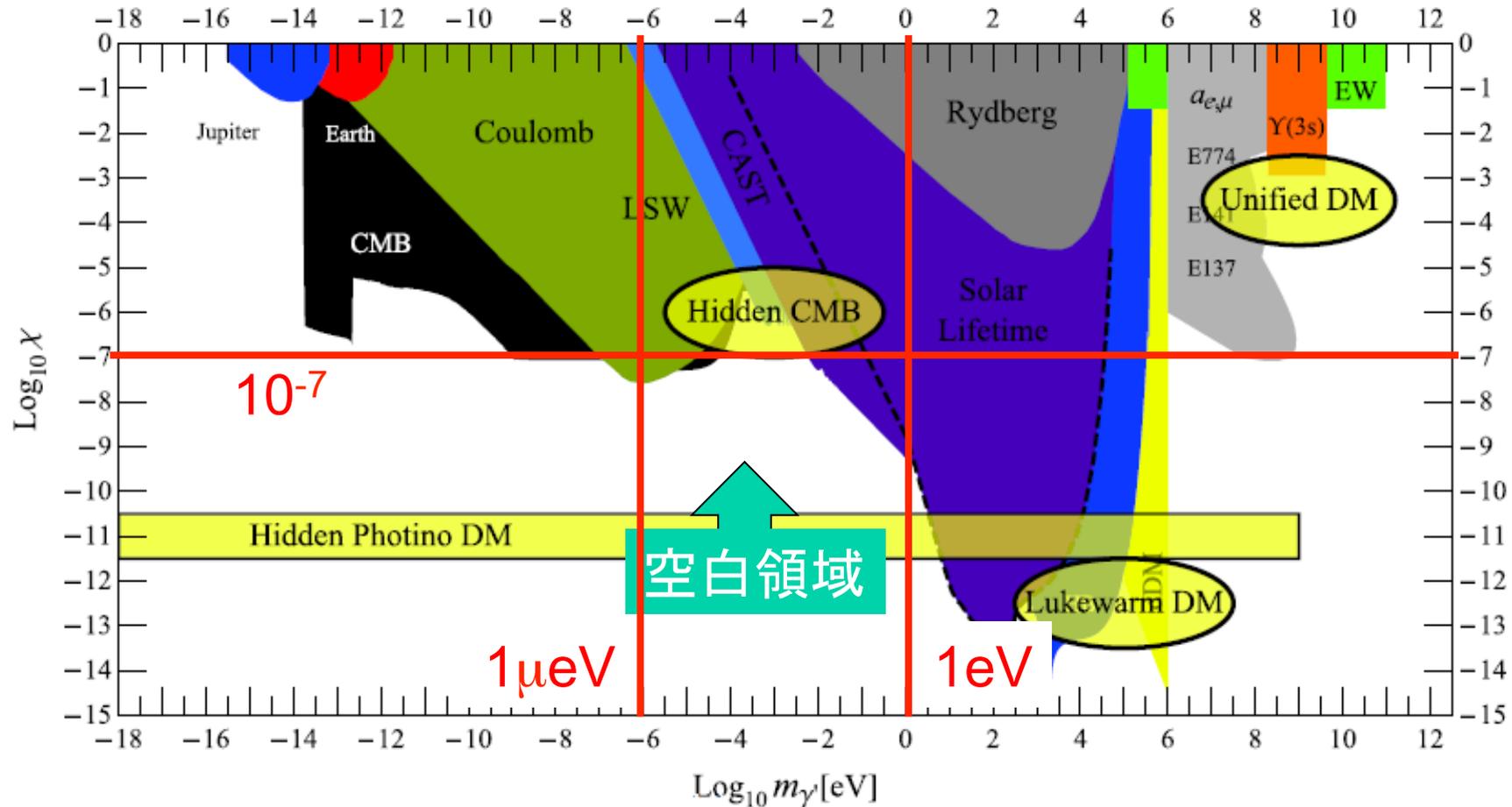
current limit for paraphoton

[Bartlett,..'88; Kumar,..'06; Ahlers,..'07; Jaeckel,..'07; Redondo,..'08; Postma,Redondo '08; Bjorken,Essig,Schuster,Toro'09;...]

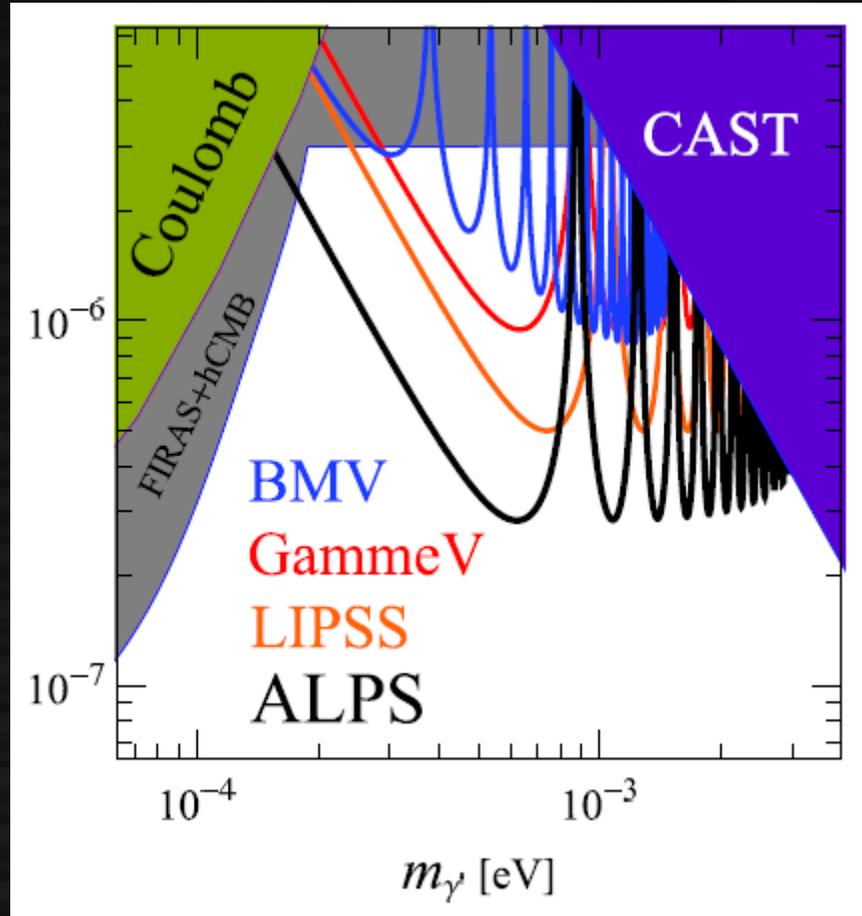


current limit for paraphoton

[Jaeckel,Redondo,AR '08;Arkani-Hamed,...'08;Ibarra,AR,Weniger '08;...]



拡大



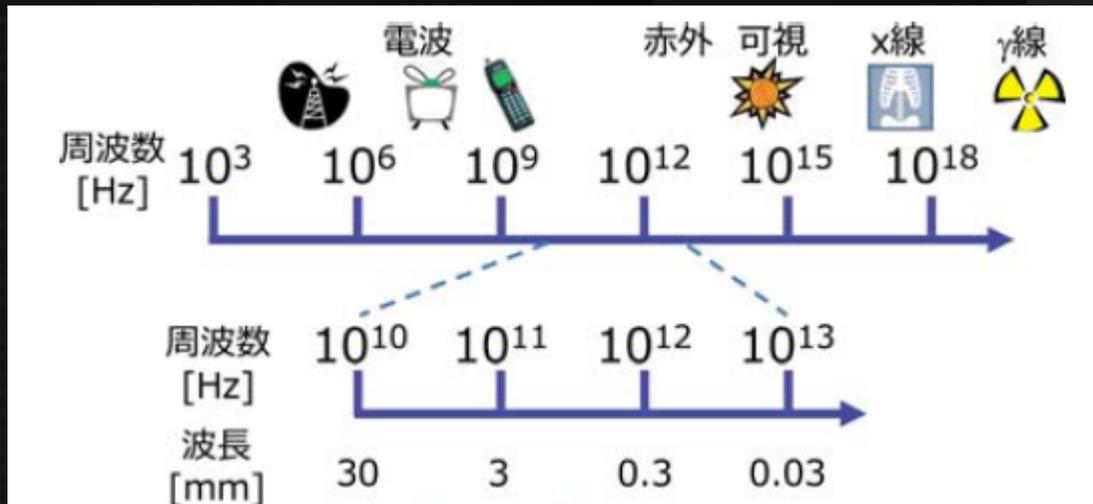
Laser (\sim eV) を使った
LSW実験では
0.1 meV領域の
探索は難しい



ミリ波(\sim meV)を使う!

$$P_{\gamma\gamma'} = 16\chi^2 \left(\sin \frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)^2$$

ミリ波(テラヘルツ波): 0.1-10 THz



THz gap: 既存技術の空白領域

電波と光の中間領域

- mm程度より大きなスケールでは粒子的
- mm程度より小さなスケールでは波動的

電波と光の両面から近年飛躍的に技術開発が進展

新たな「目」

物性: 有機物の振動・回転励起による構造決定・微小検出(THz分光)

宇宙: 星間物質の検出・同定→星の形成・進化

宇宙背景輻射の精密測定→インフレーション宇宙論の検証

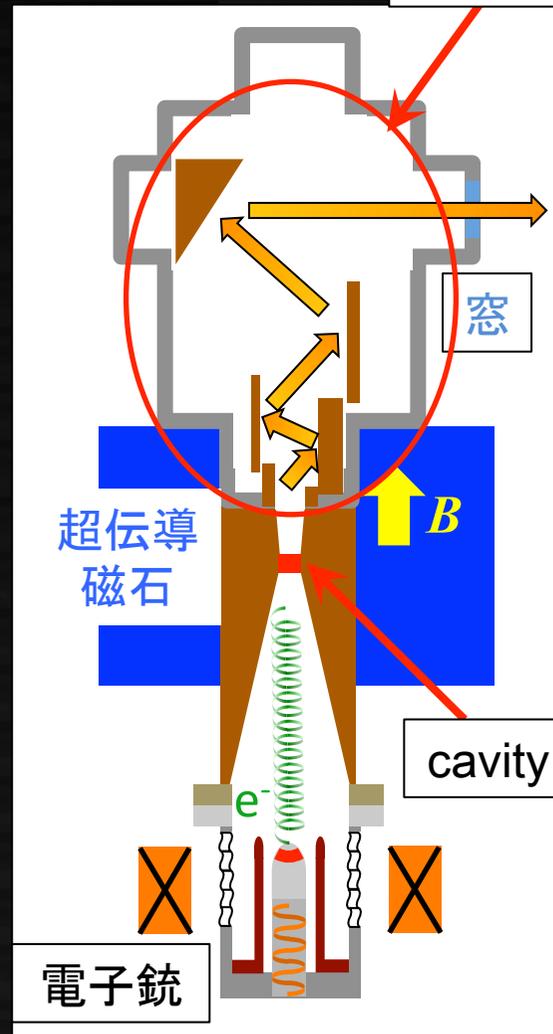
素粒子: この実験など

ミリ波LSW実験の計画

- ミリ波大強度光源
 - ジャイロトロン(核融合の点火源)
 - 周波数: 100GHz~1THz (低い方が得意)
 - パワー: MWまで可能(我々が使えるのはkW)
 - コヒーレント → キャビティに蓄積可能
 - 同じパワーでも可視光(eV)より3桁photonが多い
- 高感度検出器
 - 低エネルギー(熱光子以下) → 難しい
 - 宇宙観測(電波天文、CMB)で開発されている超伝導検出器を使う

ミリ波大強度光源: ジャイロトロン

ガウシアンビーム生成



高磁場下での電子のサイクロトロン振動で空洞共振器を発振させ上部より光子を取り出すデバイス

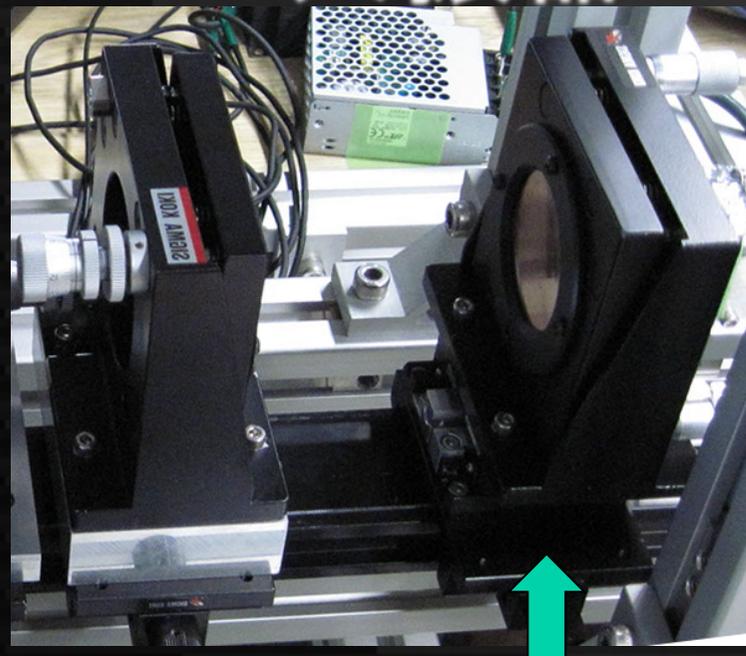
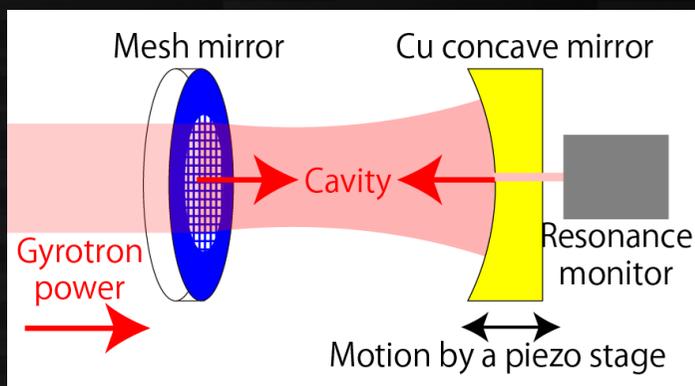
【Gyrotron FU CW GI】

- 福井大学で開発
- 201-206 GHz
- 300 W ガウスビーム
- 線幅: 約1MHz (調整による)
- ポジトロニウム実験のために製作

ミリ波ファブリーペロー共振器

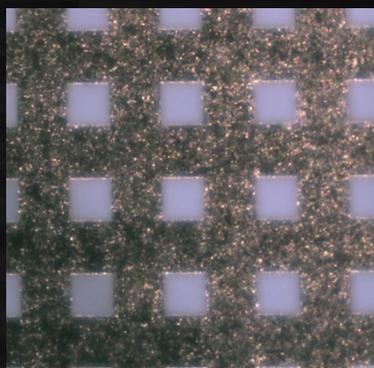
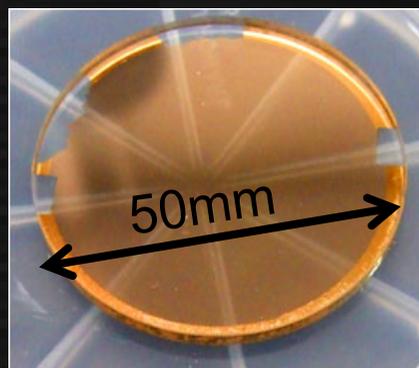
一次元のとじこめ(光学の技術)

- 高いパワー密度(光学的収束)
- 共振器長が自由にえられる



ピエゾステージで共振器長を~100nm精度で制御、共振位置に自動追従する

20~30kWの蓄積を達成
(シリコン基板メッシュ+水冷)



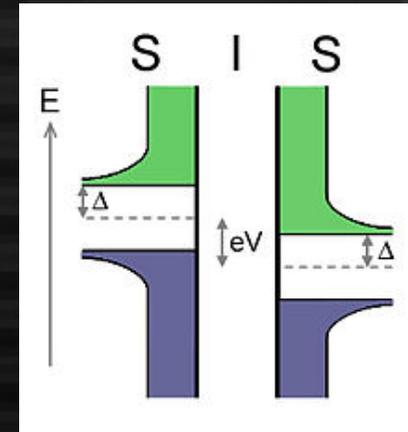
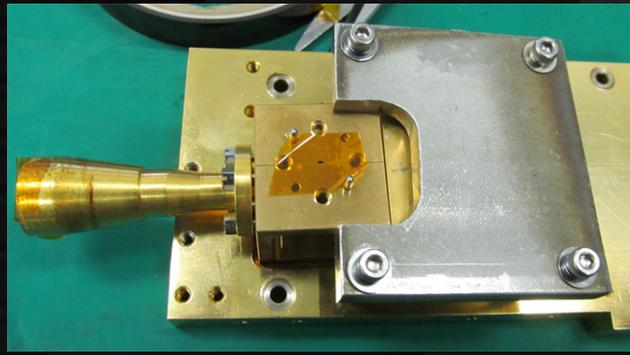
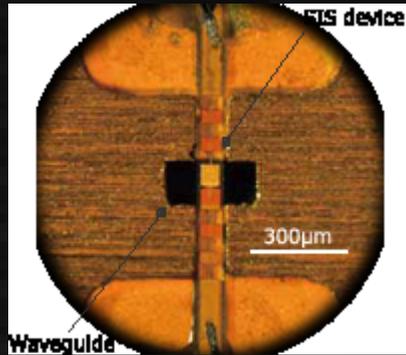
石英/シリコン基板上に幅200 μ m, 周期360 μ mの金薄膜(1 μ m厚)を蒸着
→ 99%反射, ~0.7%透過 @ 203 GHz

石英だと20kWでメッシュが溶解

ミリ波超伝導検出器

素子名	検出法	検出原理	材質	動作温度	感度 (NEP)	速度	ノイズ
SIS / STJ (superconductor-insulator-superconductor tunnel junction)	ヘテロダイン	超伝導破れ→IV特性変化	Nb	4K	$10^{-21} \times \delta f$ (1MHz幅で 10^{-15})	遅い (msec) フーリエ変換	量子ノイズ 熱ノイズ
	直接		Hf等	<0.3K	10^{-17}	速い (nsec)	黒体放射, リーク電流
MKID (microwave kinetic inductance detector)	直接	超伝導破れ→インダクタンス変化	Al等	<1K	10^{-17}	中間 (μ sec)	黒体放射, アンプノイズ
TES (transition edge sensor)	直接	超伝導遷移端ボロメータ	Hf等	<0.3K	10^{-17-19}	遅い (msec)	黒体放射

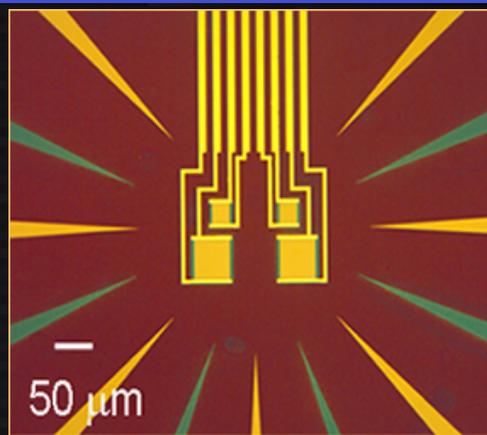
検出器案(1) SIS/STJ



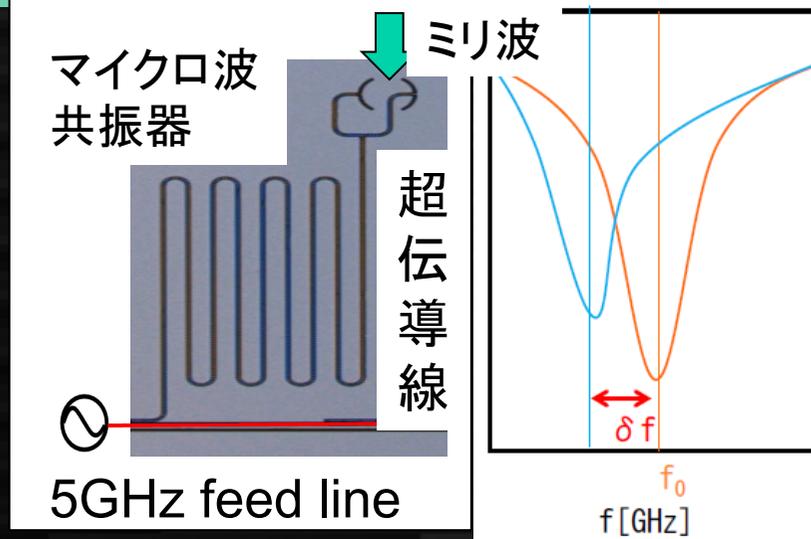
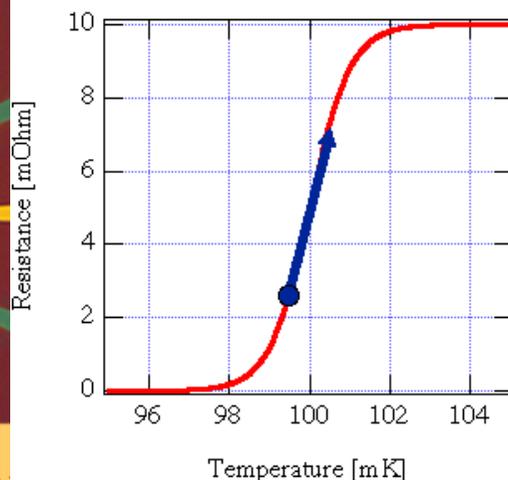
- cooper pairが破れて上準位からtunnel電流が流れる
- SISヘテロダイン(Nb)は電波天文で使われており確立した検出器
 - 知っている周波数と混合し「うなり」の低周波(~GHz)をフーリエ変換で検出
 - ジャイロトロン単色性を生かして帯域を絞れる
 - 量子雑音がノイズになり理論的限界性能がある
- 直接検出はlow Tc material (Hf等)を使って性能向上が必要
 - 低温が必要、Hfは希釈冷凍。3He冷凍機ですむmaterialを使う手も
 - 応答は速い(nsec)のでsingle有望、ただしリーク電流抑制必要で開発途上

検出器案(2) MKID/TES

TES = Transition Edge Sensor MKID = Microwave Kinetic Inductance Detector

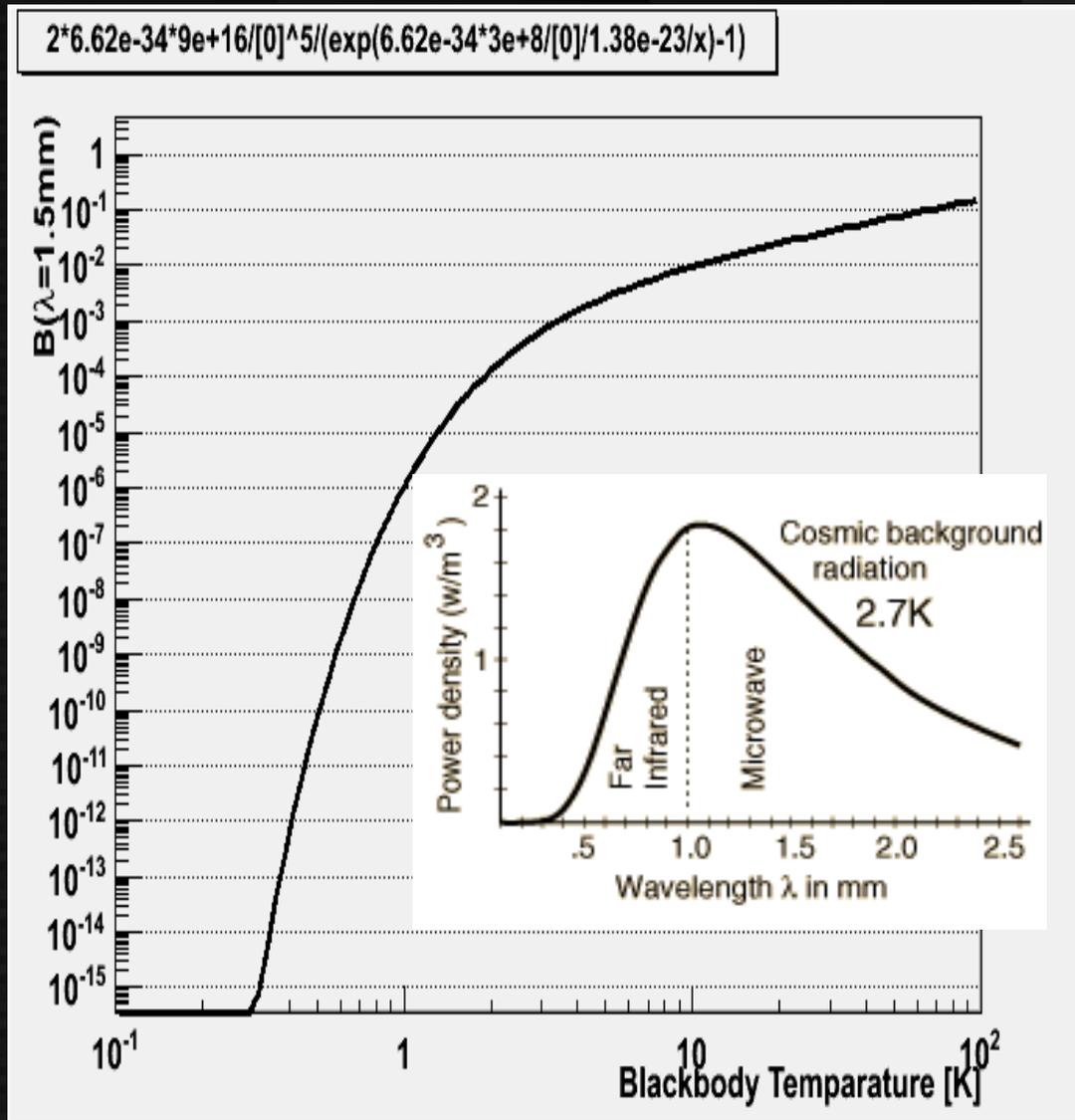


Four tungsten transition-edge sensors with aluminum wiring. The upper two are 25 μm by 25 μm . The lower two sensors are 50 μm by 50 μm .



- 超伝導遷移温度付近のセンサに光が入射するとクーパ対が壊れ抵抗が増加→検出
- 直接検出では最もmatureな検出器。ただしアンプ、温度制御難
- 遅い(msec)
- ミリ波がクーパ対を破る→共振器の周波数がずれる
- CMB測定で使われる予定で開発が進んでいる
- 1~2Kでoperation可能
- 比較的速い(μsec)

黒体放射バックグラウンド



- 最後のバックグラウンド→周りの物質からの黒体放射
- 200GHzは4K黒体放射のレンジ内
- 帯域制限で落ちる→ヘテロダイン有利
- 300mKで10桁以上落ちる

究極感度のためには ^3He 冷凍機が必要

黒体放射密度@200GHz

ミリ波超伝導検出器

素子名	検出法	検出原理	材質	動作温度	感度 (NEP)	速度	ノイズ
SIS / STJ (superconductor-insulator-superconductor tunnel junction)	ヘテロダイン	超伝導破れ→IV特性変化	Nb	4K	$10^{-21} \times \delta f$ (1MHz幅で 10^{-15})	遅い (msec) フーリエ変換	量子ノイズ 熱ノイズ
	直接		Hf等	<0.3K	10^{-17}	速い (nsec)	黒体放射, リーク電流
MKID (microwave kinetic inductance detector)	直接	超伝導破れ→インダクタンス変化	Al等	<1K	10^{-17}	中間 (μ sec)	黒体放射, アンプノイズ
TES (transition edge sensor)	直接	超伝導遷移端ボロメータ	Hf等	<0.3K	10^{-17-19}	遅い (msec)	黒体放射

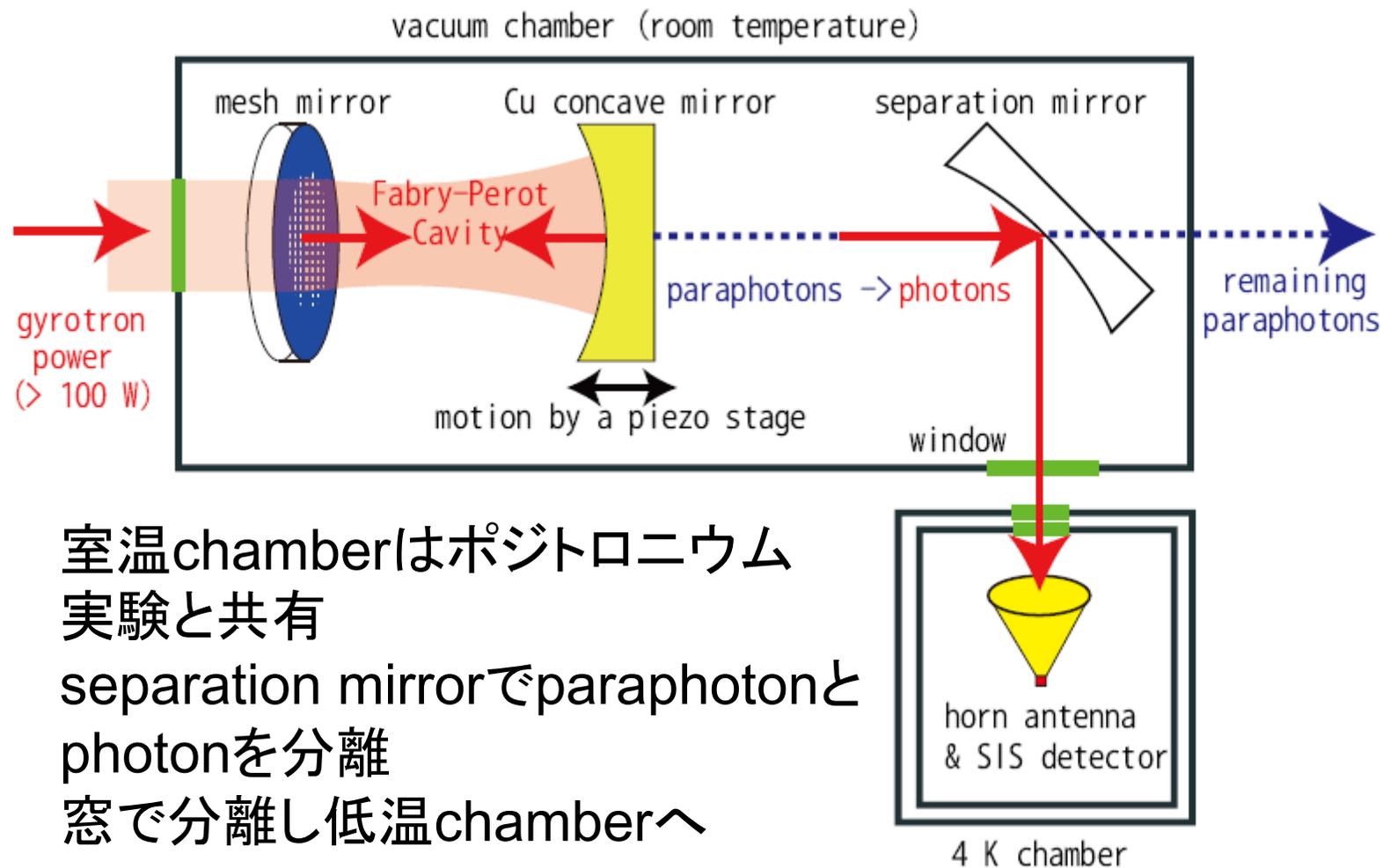
ミリ波超伝導検出器

素子名	検出法	検出原理	材質	動作温度	感度 (NEP)	速度	ノイズ
SIS / STJ (superconductor-insulator-superconductor tunnel junction)	ヘテロダイン	超伝導破れ→IV特性変化	Nb	4K	$10^{-21} \times \delta f$ (1MHz幅で 10^{-15})	遅い (msec) フーリエ変換	量子ノイズ 熱ノイズ
	直接		Hf等	<0.3K	10^{-17}	速い (nsec)	黒体放射, リーク電流
MKID (microkinetic inductor detector)							黒体放射, アンプノイズ
TES (transition edge sensor)							黒体放射

広帯域だとヘテロダインは勝負にならないが帯域制限すると直接検出の感度に近づく。動作温度の高さ、取り扱いの容易さから

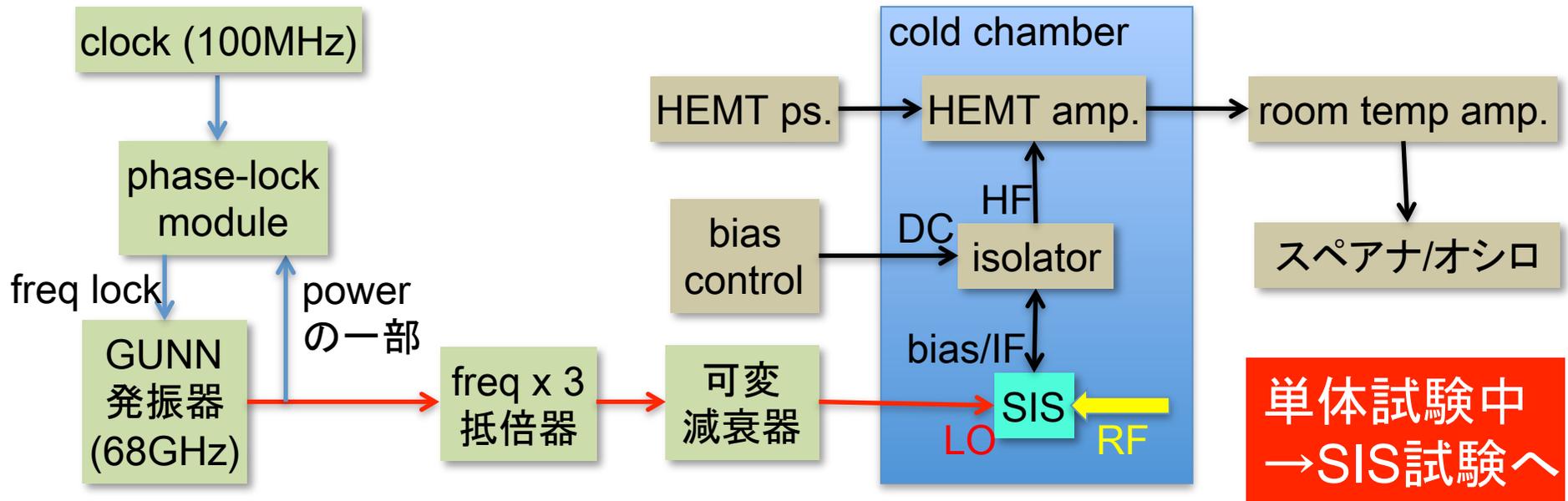
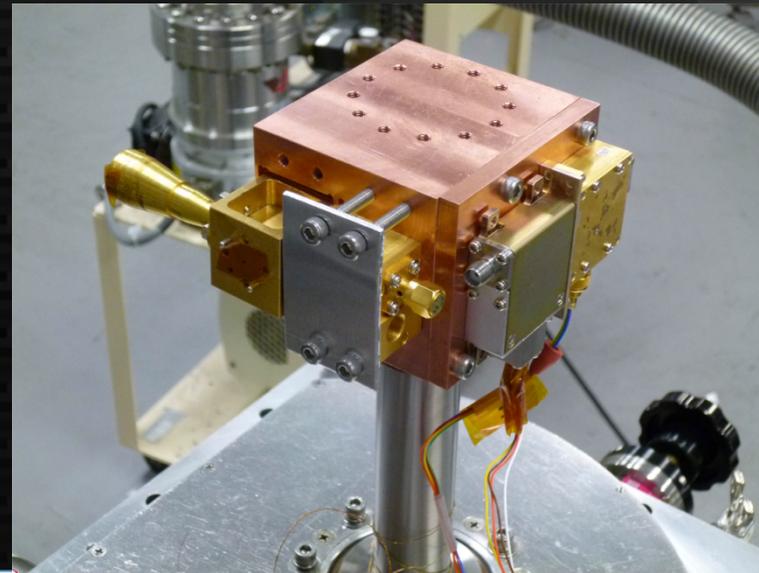
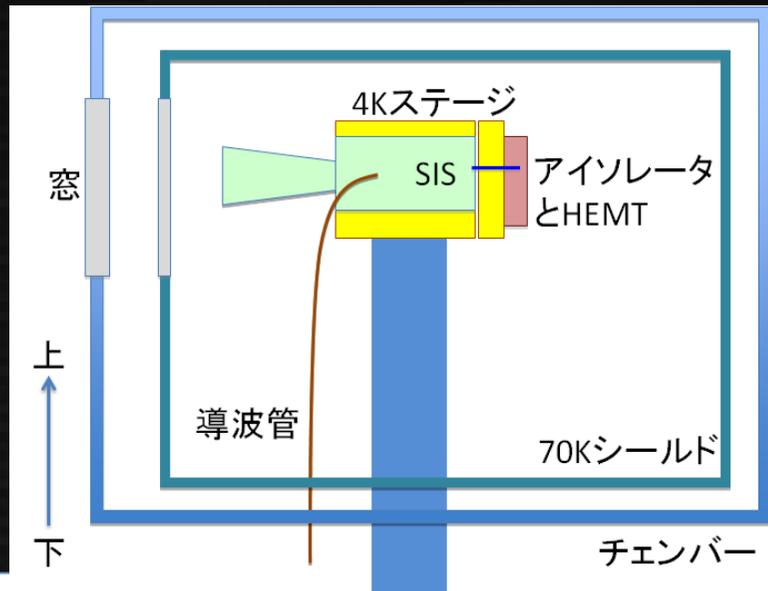
1. SISヘテロダインで検出
2. シングルフォトン検出器で直接検出の順に実験を進めることにした

セットアップ案 with SIS



室温chamberはポジトロニウム
実験と共有
separation mirrorでparaphotonと
photonを分離
窓で分離し低温chamberへ

低温チェンバの設計

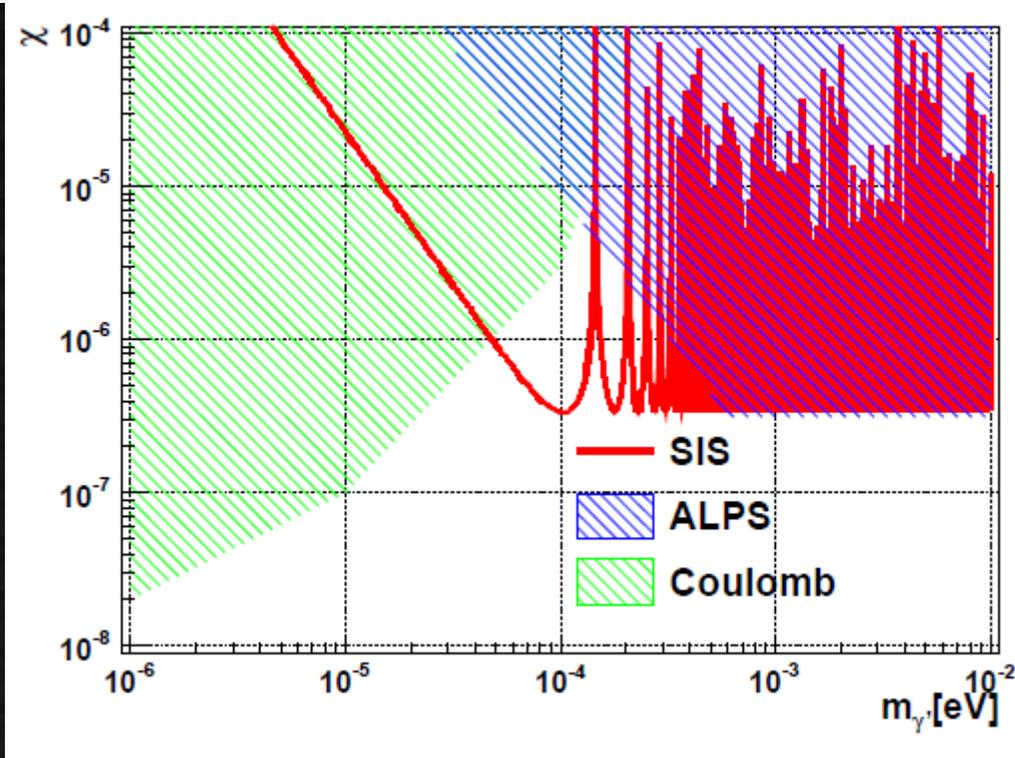


スケジュール

- 2012/9～10: SISの動作試験@東大
 - I-V特性の取得
 - ミキシング波源の設置・調整
 - 70K/300K黒体スペクトルの取得
- 2012/11～12: 単色波源を用いたテスト@福井
 - BWO (backward-wave oscillator)
 - ジャイロトロン
 - 検出効率・バックグラウンド評価
- 2013/1～: パイロット測定

到達感度予想

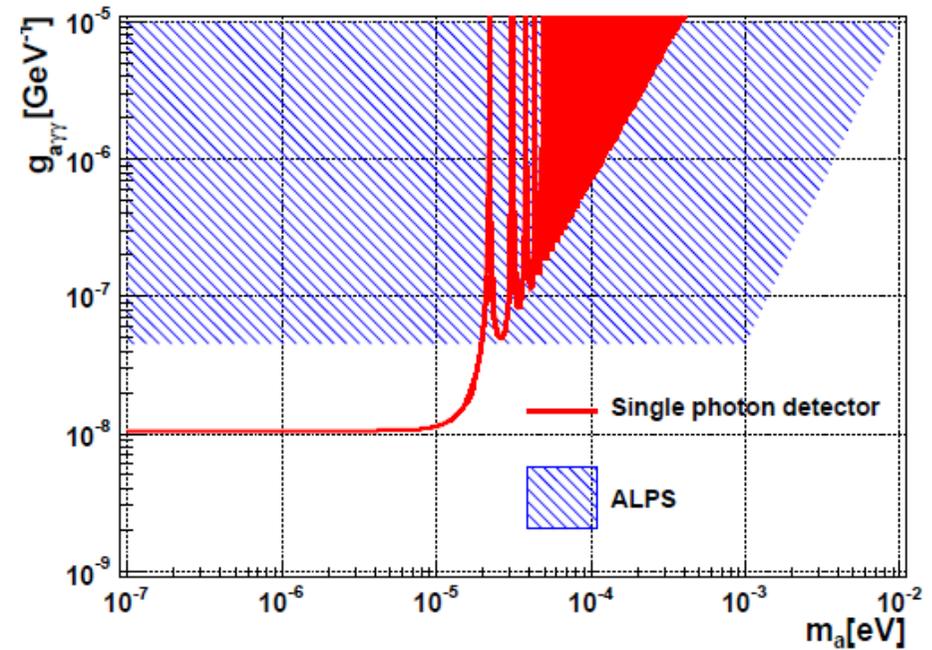
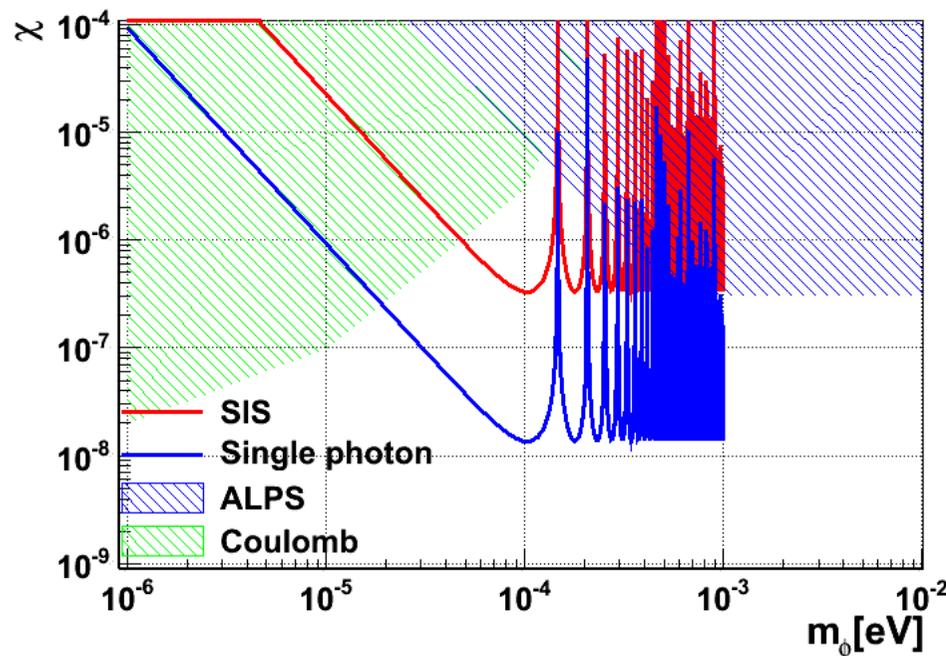
$$P_{\gamma\gamma'} = 16\chi^2 \left(\sin \frac{m_{\gamma'}^2 L}{4\omega} \right)^2 \quad (\omega \gg m_{\gamma'})$$



空白エリア
($m \sim 0.1$ meV)
を 10^{-6} 以下の
感度で
探索可能!

仮定: 5 kW 蓄積パワー, 10%検出効率, 50K相当の熱ノイズ,
 10^6 sec 測定, 光源の線幅1MHz, conversion領域10cmずつ

Single photon detectorでは...



仮定: 5 kW 蓄積パワー, 10%検出効率, 10^6 sec 測定
バックグラウンドは300mKの黒体輻射のみ
paraphoton: conversion領域は10cmずつ
ALP: conversionは4.3mずつ、磁場は5 Tesla

大きくlimitを更新できるがまずdetector開発が必要

まとめ

- ミリ波を使って弱結合未知粒子探索
 - 0.1 meV付近のparaphotonで世界最高感度
- 強力なミリ波光源ジャイロトロンを使用
 - 300 W, 200 GHz
- 第一期として、SISヘテロダイン検出器を使用
 - 将来的には、シングルフォトン検出へ
- 年内に設計製作/commissioningを完了、
来年初頭より初回実験の予定
 - ノイズ落としが鍵
 - うまくいけば1ヶ月程度で最初の結果が出せる