

P2 Hidden Photon 実験のアップグレード実験

Dark-photon Observing System for Unexplored Radio Range (DOSUE-RR) (仮)

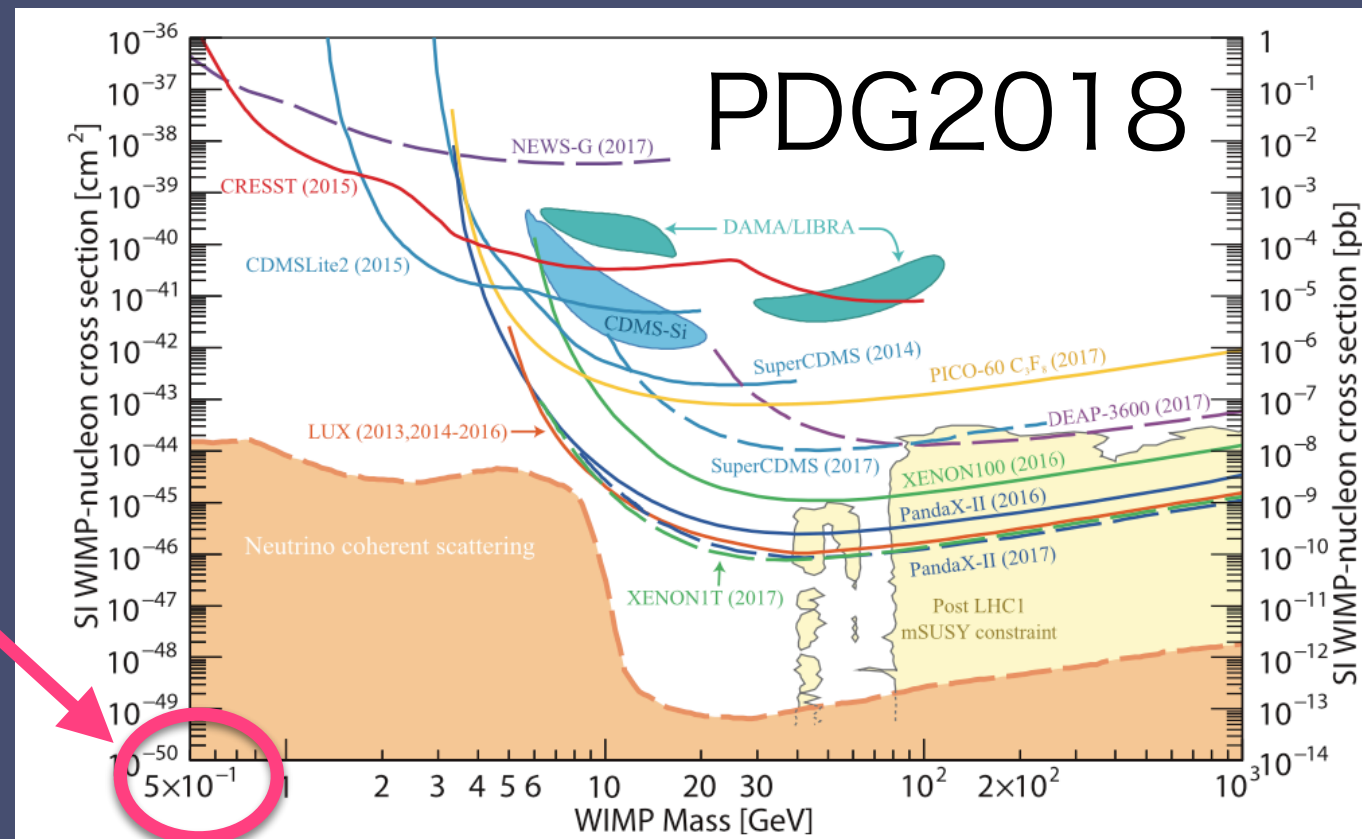
実験名の決定権は選んだM1に!

安達 俊介(CMBポスドク)

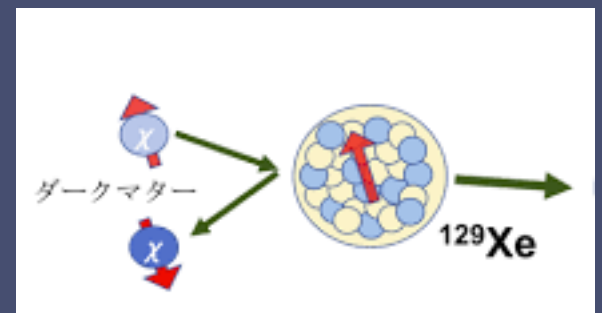
Dark Matter 探索

- 従来の王道DM (WIMPs) では全然見つかる気配がない...
 - DM はほとんど標準理論(SM)粒子と反応しない
 - 宇宙初期の熱い時期にDM が標準理論(SM)粒子との熱平衡状態から切り離されて現在に至ると仮定

質量が
GeV~TeV



DMの原子核との
散乱事象を探索



現状のDMの割合($\Omega_{DM} \sim 0.24$)を説明するには大きい質量が必要!

⇒ 今まで考えてない "王道ではない" モデルが正しい?

Dark Photon (Hidden Photon, 暗黒光子)

- とりあえずSMを超えた新しい粒子を考えないといけない
- ラグランジアンを拡張することから導入
- 簡単な例として新しいU(1)対称性を標準理論に導入
 - $\Rightarrow X$ (DP)という新しい粒子が導入される

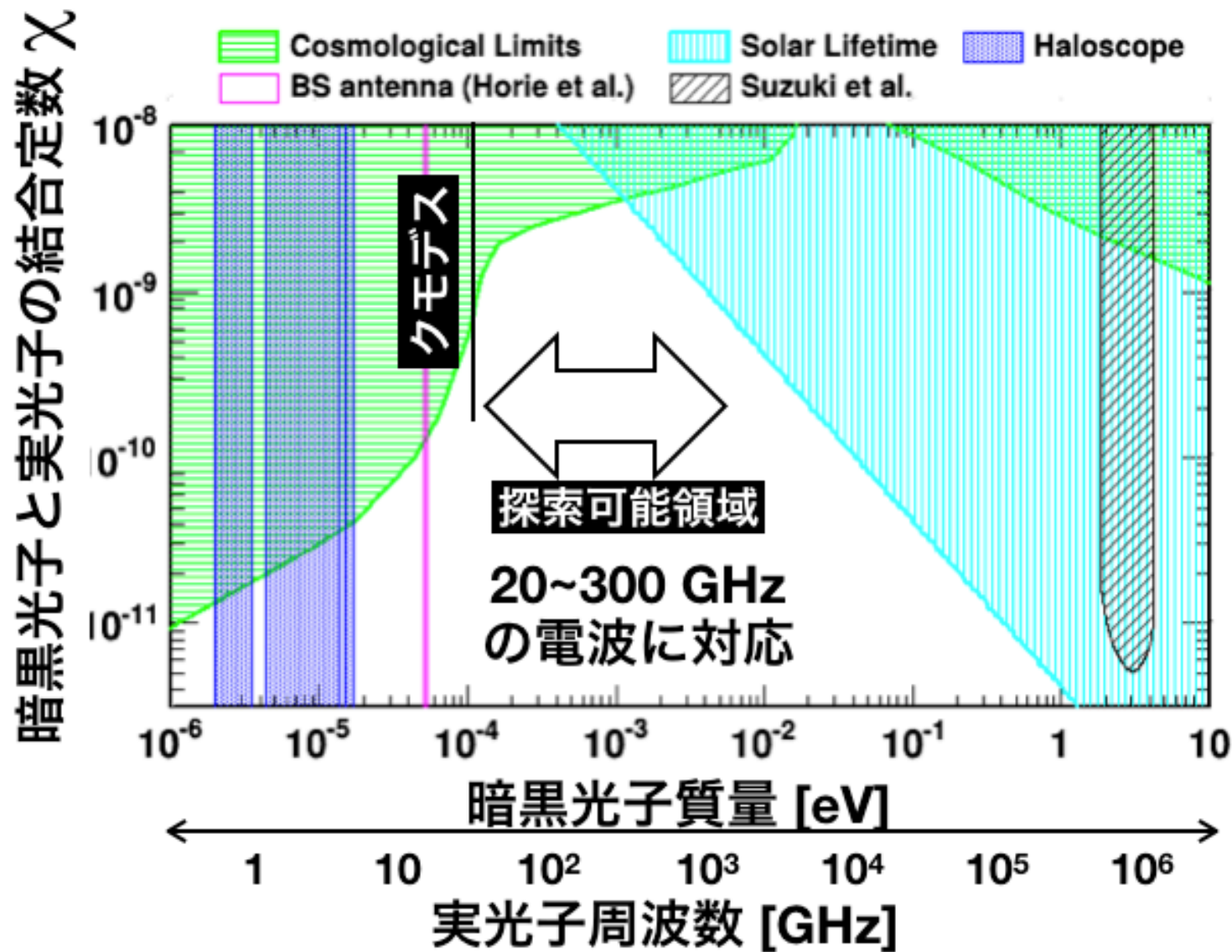
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}X_\mu X^\mu - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + J^\mu A_\mu,$$

新しい項

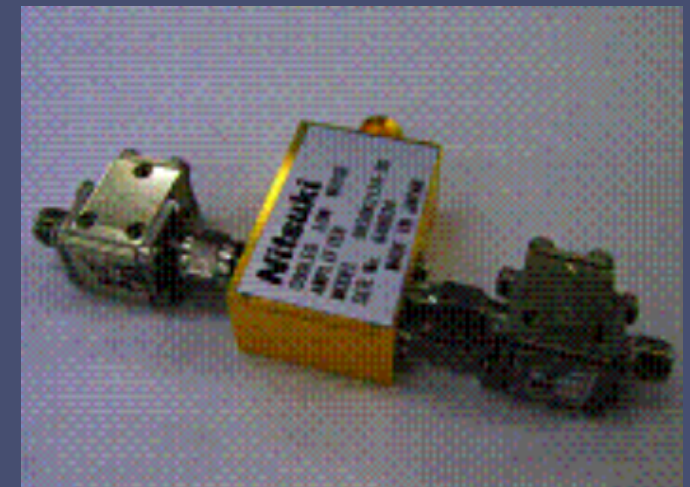
X の質量 反応確率 SMとの相互作用

- $(m_{\gamma'}, \chi)$ の2つが未知のパラメータ (γ' が DP)
- χ^2 の確率でDPが金属板で実光子に転換!
- 新しい領域を探索するために WIMPs の質量予想を忘れよう
 \Rightarrow 特に低質量領域のほうが実験的制限を受けにくい!

Dark Photon の探索—先行実験



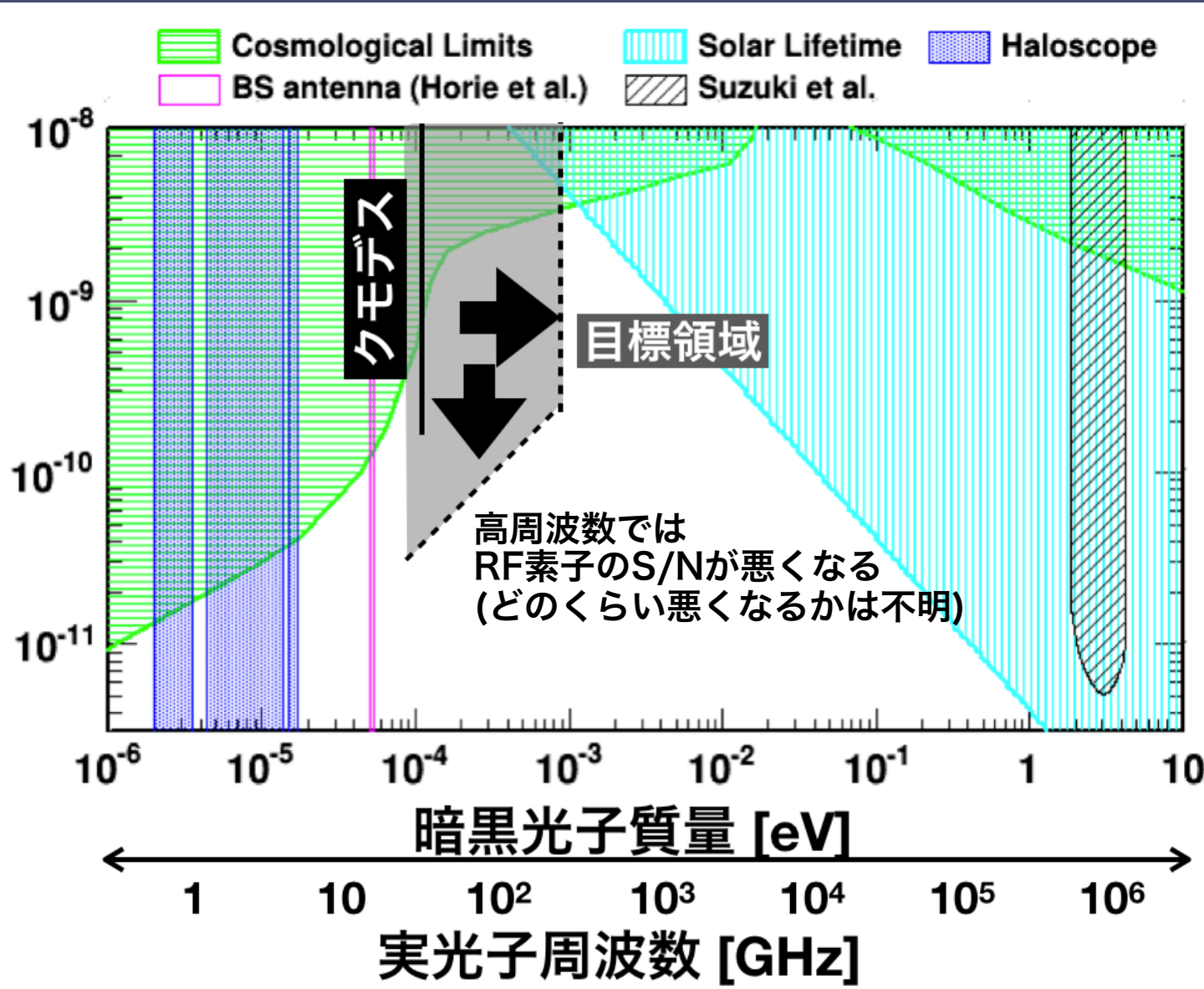
- Radio Frequency 領域が大きく未探索
- RF素子は軍事に用いられるから？
高価で手が出しにくい
ex) 低温アンプ 160万



- ミリ波領域は未開のエネルギー領域 (Unexplored)!!
- クモデスで様々なミリ波素子を持っている!!

探索された領域とDOSUEの目標

暗黒光子と実光子の結合定数 χ



このくらいの領域を探索できるとimpressive!

- $\chi > 2 \times 10^{-9}$ \rightarrow 2×10^{-10}
- $115.79 < m_{DP} < 115.84 \mu\text{eV}$

$$82.7 < m_{DP} < 910.1 \mu\text{eV}$$

$$20\text{GHz} < f_{\text{実光子}} < 220\text{GHz}$$

測定帯域

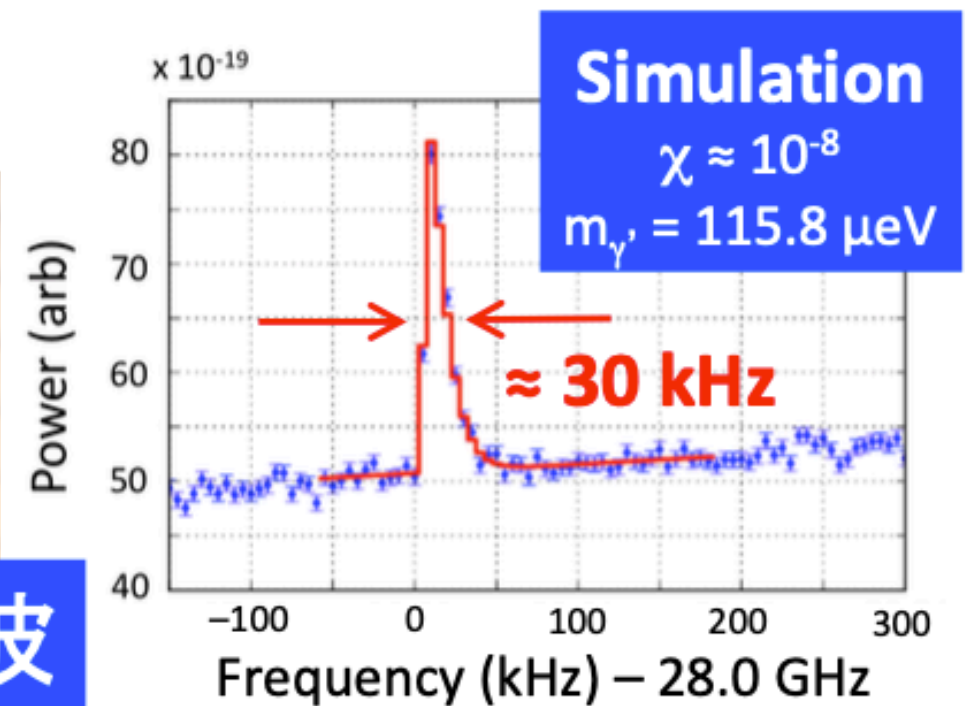
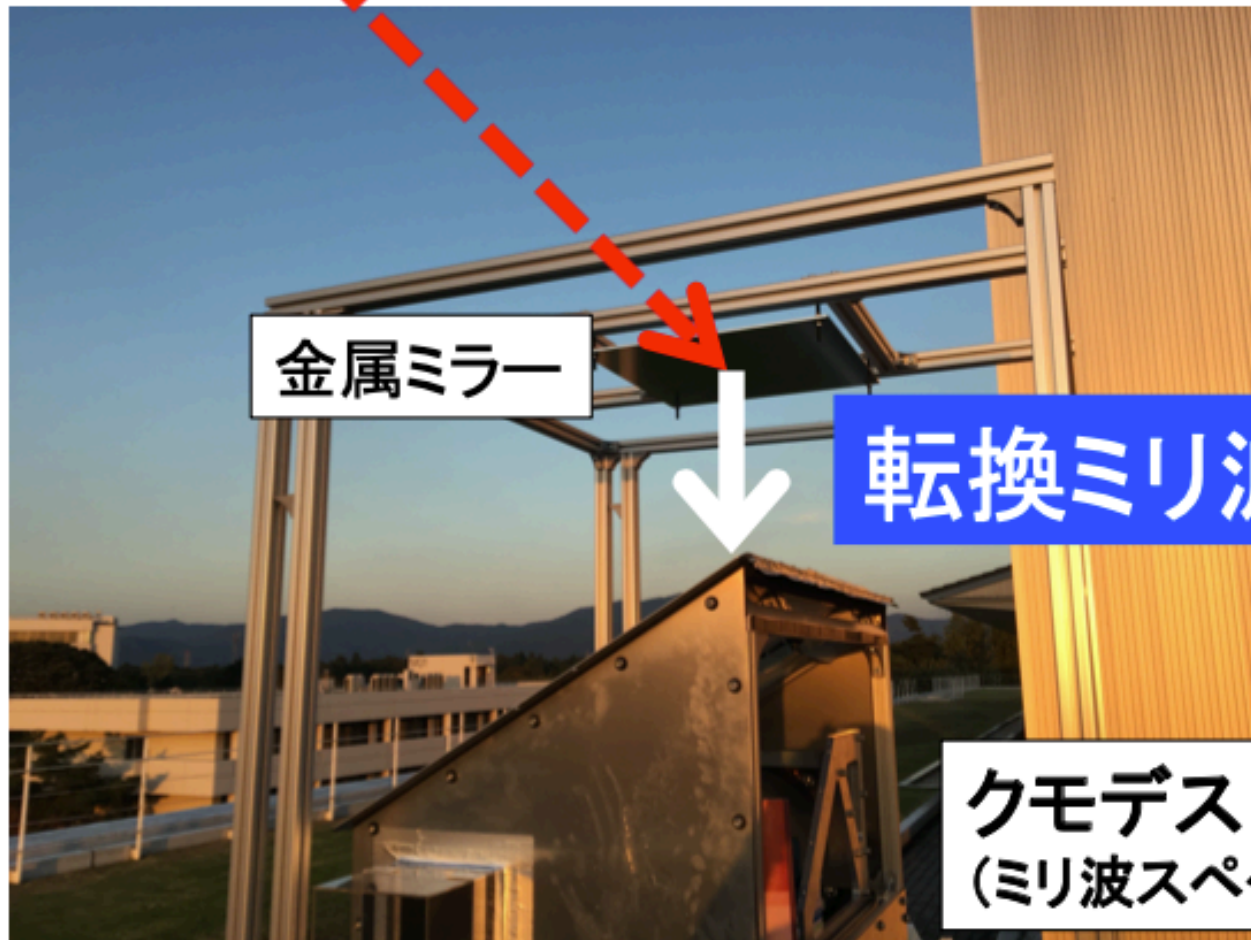
- **20~30 GHz**
(クモデスではこの一部だけ測定)
- **50~60 GHz**
 - アンテナと低温アンプが無い
 - 低温アンプは無くてもよい
- **140~220 GHz**
 - すべてある

複数の帯域で測れれば◎だが
まずは20~30 GHzで
~10倍の感度を達成する!

Dark Photon の信号

DP

どこにでもいる



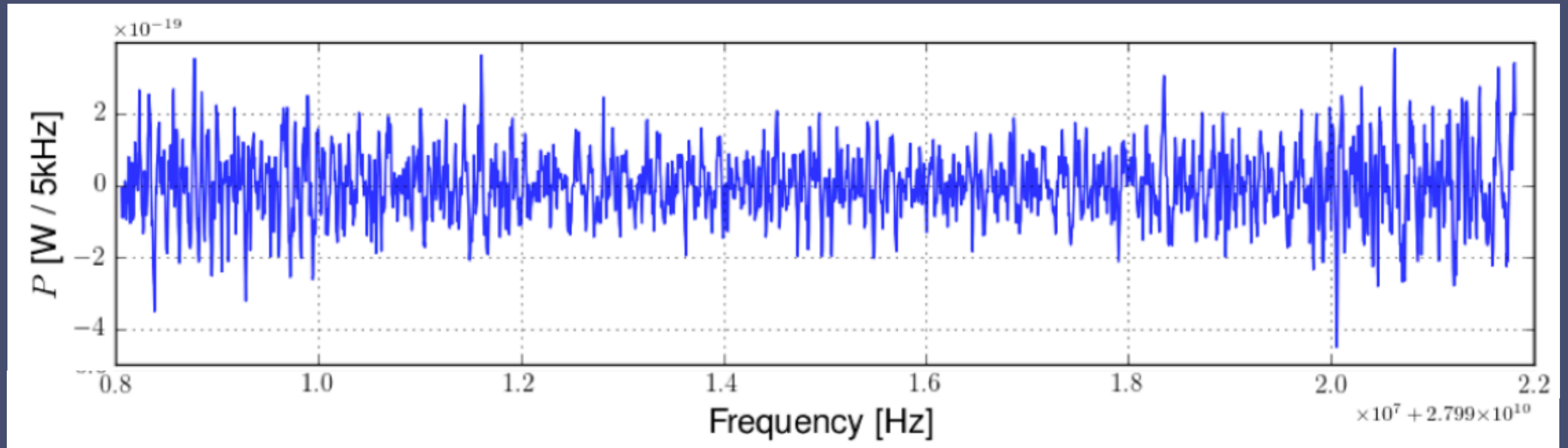
解析はピーク信号をフィットする

22

DPの質量 \Leftrightarrow 実光子の周波数 に対応するので、
周波数スペクトルでピーク探索をする

測定するデータと感度

クモデスで測定した周波数パワースペクトル



- ・ このスペクトルからピークを探す
- ・ 系統誤差は予想される信号ピークの高さに寄与し、その高さの~10% (あまり効かない)

感度を上げるには

低ノイズ & 大統計 が必要 ⇒ 実はどちらも可能!

χ への感度とノイズ

- ・ 信号ノイズ

- ・ RF は黒体輻射で身の周りの物質から300Kのパワーで熱放射される
- ・ 300Kの熱放射がアンテナに入ってきてノイズ源を起こす

⇒ 入ってくる熱放射をへらせばノイズを落とせる:

$$\text{感度}(\chi) \propto (\text{ノイズ})^{-1/2} \propto T_{\text{ノイズ}}^{-1/2}$$

- ・ 統計量

- ・ 統計量 $N \propto$ 測定時間 t
- ・ ノイズ $\propto N^{-1/2}$

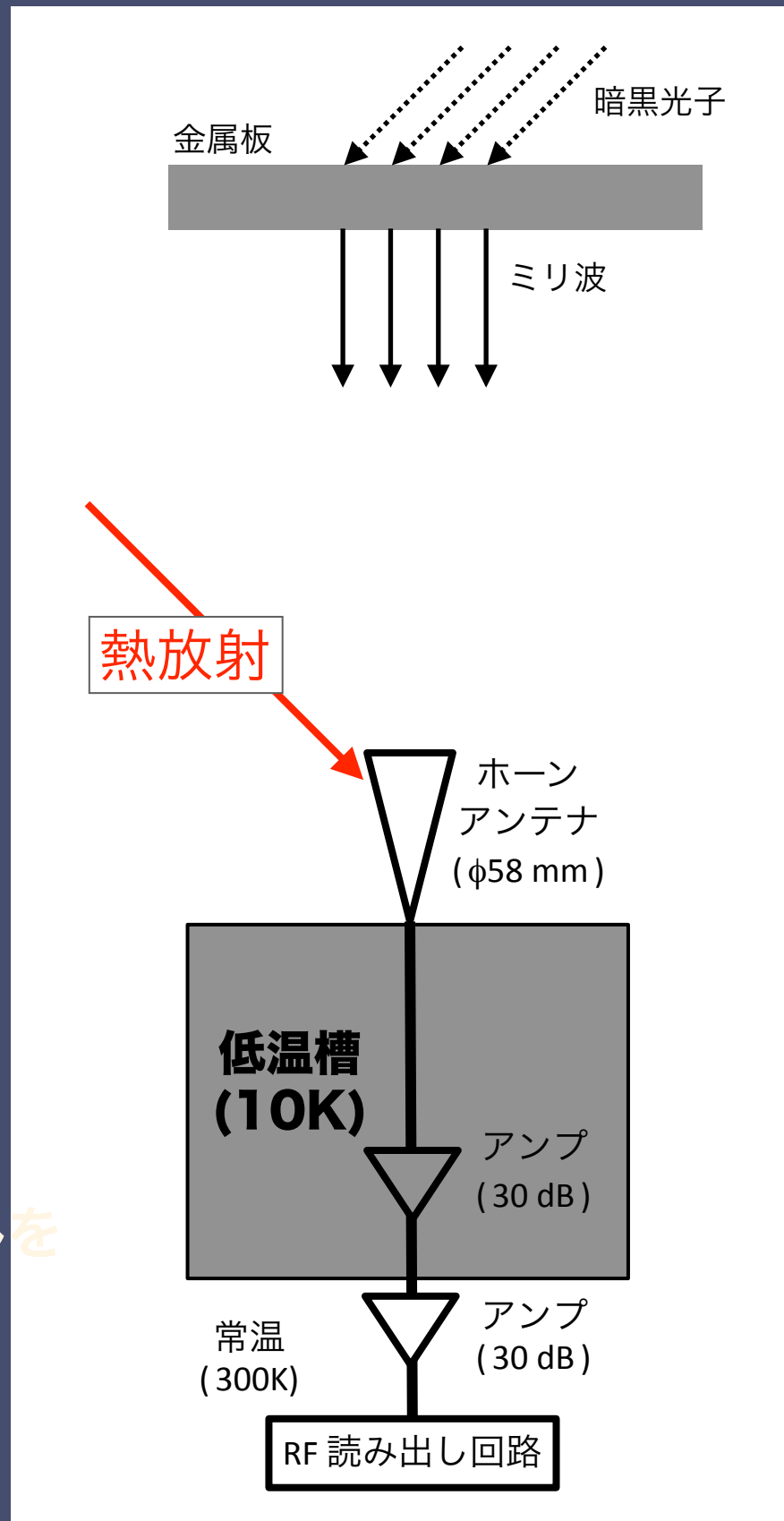
⇒ $\text{感度}(\chi) \propto (\text{ノイズ})^{-1/2} \propto N^{1/4} \propto t^{1/4}$

クモデスによる Dark Photon 探索

—測定系

*屋外で測定
空は30~40K

読み出しは
スペクトルアナライザ
で直接周波数スペクトルを
取得する



信号ノイズの寄与は

- $T_{\text{アンプ}} = 10 \text{ K}$
 - $T_{\text{アンプ}}$ は周りの $T_{\text{低温槽}} = 10 \text{ K}$ に依存
- $T_{\text{熱放射}} = 140 \text{ K}$

アンテナに入る熱放射が信号に変換されたノイズ
- $T_{\text{アンテナ}} = 30 \text{ K}$

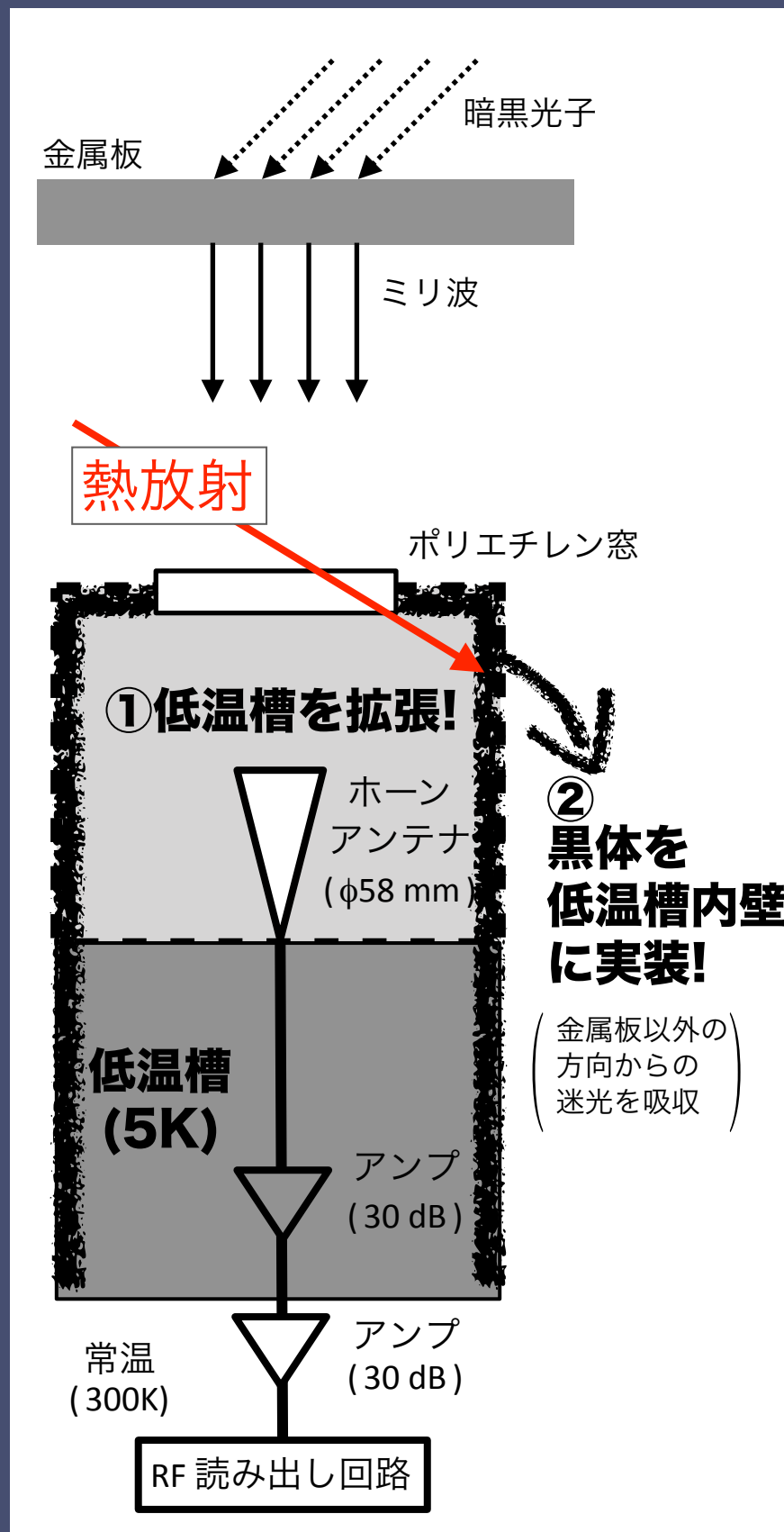
アンテナに入る熱放射が信号に変換されずにアンテナ自体を温めて熱雑音になったノイズ

 - $T_{\text{アンテナ}}$ は入ってくる $T_{\text{熱放射}}$ に比例
 $T_{\text{アンテナ}} = 30/140 T_{\text{熱放射}}$

⇒ $T_{\text{ノイズ}} > 180 \text{ K}$

測定系の改良

***屋内**で測定
周りは300Kになっ
てしまおうが、
天候に左右されない



①低温槽を拡張することで
熱ノイズを抑制!

そのままでは窓からくる300Kの熱放射をくろう

⇒これも抑制する

②電波吸収材(黒体)で
300Kからの放射を抑制!

Simons Observatory 用に開発した黒体で99%の熱放射を吸収できる!

③ 冷凍機を既存の強力なものに変更し, $T_{\text{低温槽}} = 10\text{K} \rightarrow 5\text{K}$

⇒ $T_{\text{熱放射}} < 5\text{K}$

(外からの熱放射でなく、黒体自身の放射が上限になる)

⇒ $T_{\text{アンテナ}} < 30/140 * T_{\text{熱放射}} \sim 1\text{K}$

⇒ $T_{\text{ノイズ}} = T_{\text{熱放射}} + T_{\text{アンテナ}} + T_{\text{アンプ}}$

$< 5\text{K} + 1\text{K} + 10\text{K}$

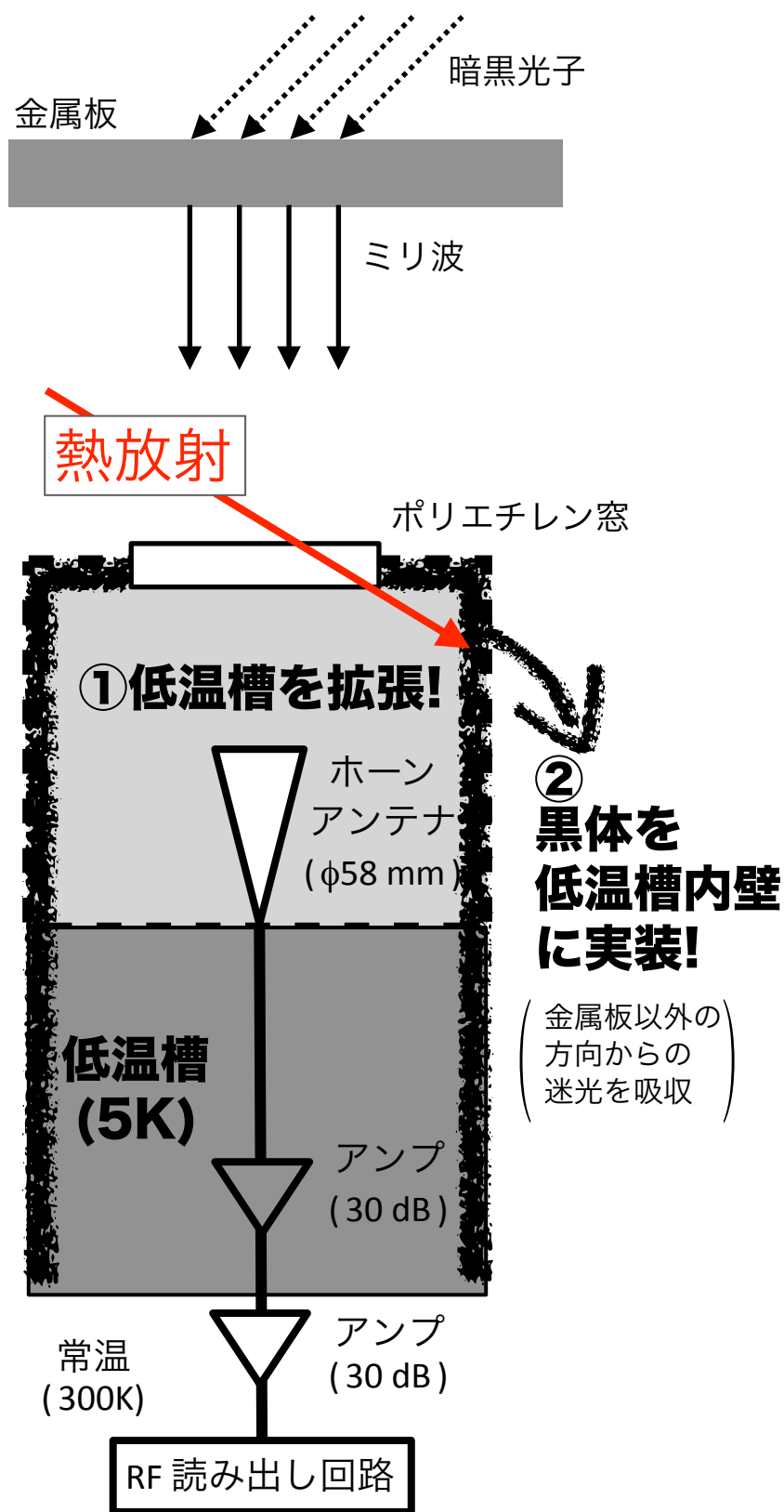
$< 16\text{K} \Rightarrow 16/180 \sim 1/10$ 倍

$T_{\text{ノイズ}}$ を1/10に抑制!

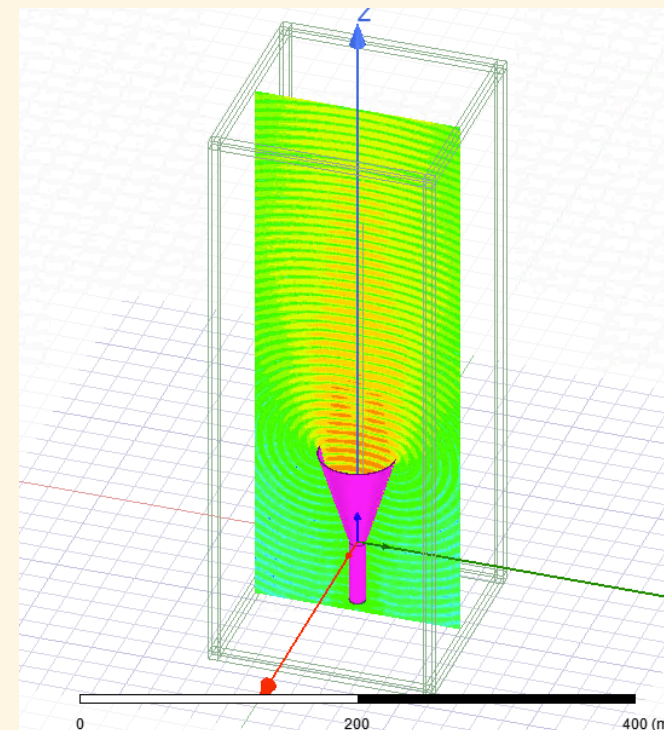
⇔ 感度で3.3倍!

測定系の改良

***屋内**で測定
周りは300Kになっ
てしまおうが、
天候に左右されな
い



①低温槽を拡張することで
具体的な
光学系・低温槽の設計
をシミュレーション
などを用いて行い、
自らの手で作製!



< 16K ⇒ 16/180 ~ 1/10 倍

Tノイズを1/10に抑制!
⇔ **感度で3.3倍!**

クモデスによる Dark Photon 探索

—測定時間

- ・ 測定時間 : 43 hours
 - ・ ゲインが安定している期間を選択 \Rightarrow 10 hours
- ・ 選択後の測定回数: 3104 回 \times 12sec/回
 - ・ 選択後の総測定時間 $\Rightarrow 3104 \times 12\text{sec} = 37248 \text{ sec}$
- ・ スペクトルアナライザの duty 比 = $1/312$
(実際にデータを取得している時間割合)
 - ・ 実効測定時間 $\Rightarrow 37248 \times 1/312 = 119 \text{ sec} \sim 2\text{min}$

測定時間の改良

4日間測定する **96 hours**

屋内測定でゲインを安定させる

- 測定時間: ~~43 hours~~
- ゲインが安定している期間を選択 ⇒ ~~10 hours~~ **96 hours**
- 選択後の測定回数: 3104 回 x 12 sec/回
- 選択後の総測定時間 ⇒ $3104 \times 12\text{sec} = \text{37,248 sec}$
96 hours = 345,600 sec

統計量は頑張れば
容易に稼げる

総測定時間を10倍に!
⇔感度で1.8倍

- スペクトルアナライザの duty 比 = $1/312$
(実際にデータを取得している時間割合)
- 実効測定時間 ⇒ $37248 \times 1/312 = 119 \text{ sec} \sim 2\text{min}$

できたら、RF読み出しを自作して duty 比を10倍にしたい...
⇔ 感度で 1.8倍 (上と合わせて3.3倍)

まとめ

- クモデスから感度10倍・より広帯域(20GHz~220GHz) での Dark Photon の探索を目指す
- まずはクモデスと同じ帯域での感度向上を目指す
 - アンテナの冷却と黒体の実装によって、
 - 信号ノイズを1/10に抑制 ⇔ **感度 3.3 倍**
 - 屋内測定によって実質測定時間を増やす
 - 4日間の測定で測定時間**10倍** ⇔ **感度 1.8 倍**
 - (できれば) 読み出し回路の自作で **duty 比 10倍向上**
(duty比:1/312→1/30) ⇔ **感度 1.8 倍**
- **合計感度 6 倍** (+読み出し回路の自作で**10倍!**)
の改良が自分で考えて手を動かしてできる実験!!

まとめ



- クモデスから感
- より広帯

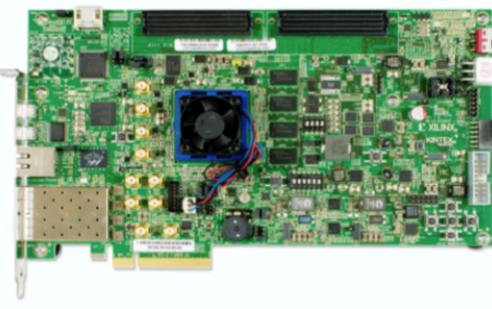
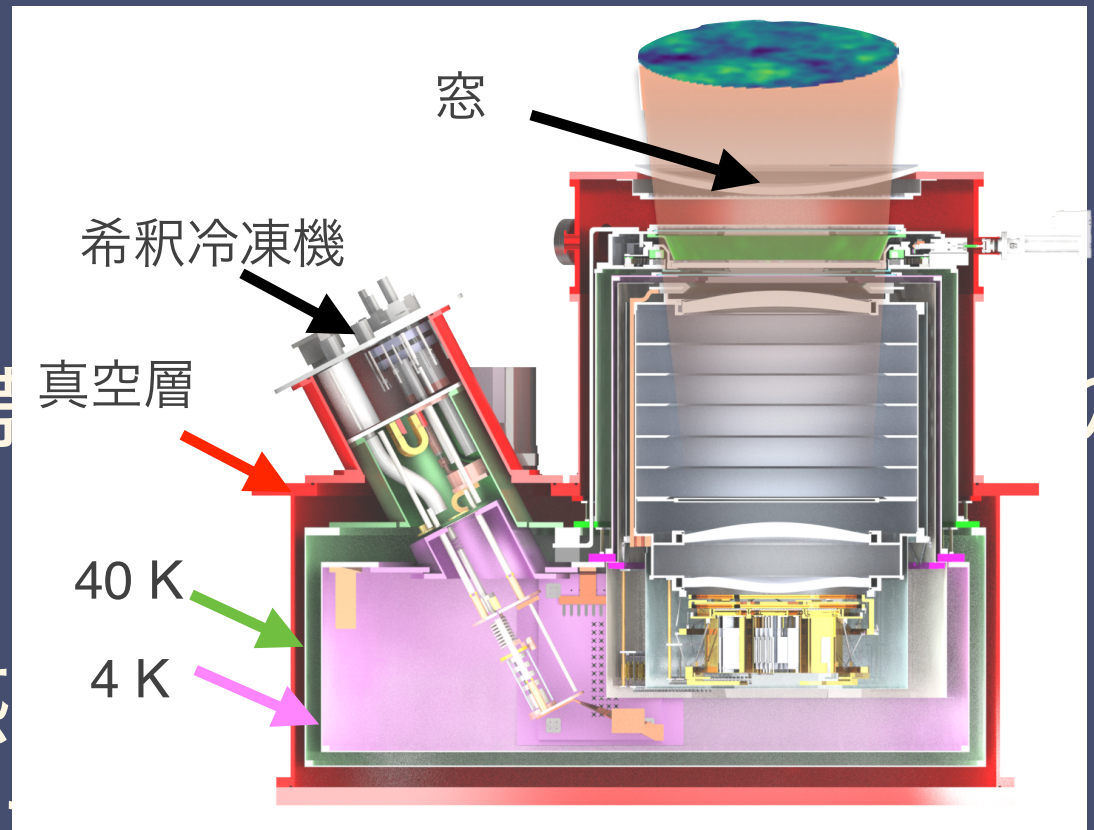
Simons Observatory のノウハウ

- アンテナの冷却と黒体の実装によって、
 - 信号ノイズを1/10に抑制 \Leftrightarrow 感度 3.3 倍
- 屋内測定によって実質測定時間を増やす
 - 4日間の測定で測定時間10倍 \Leftrightarrow 感度 1.8 倍
 - (できれば) 読み出し回路の自作で duty 比 10倍向上

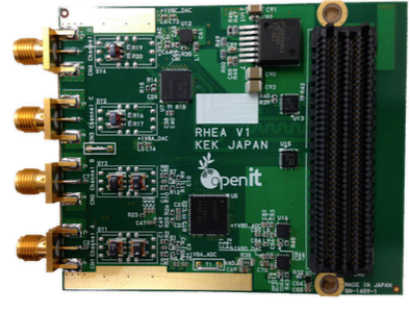
(duty比

GroundBIRD の読み出しの ノウハウ

- 合計感度 6 倍



(a) FPGA ボード KCU105[26].



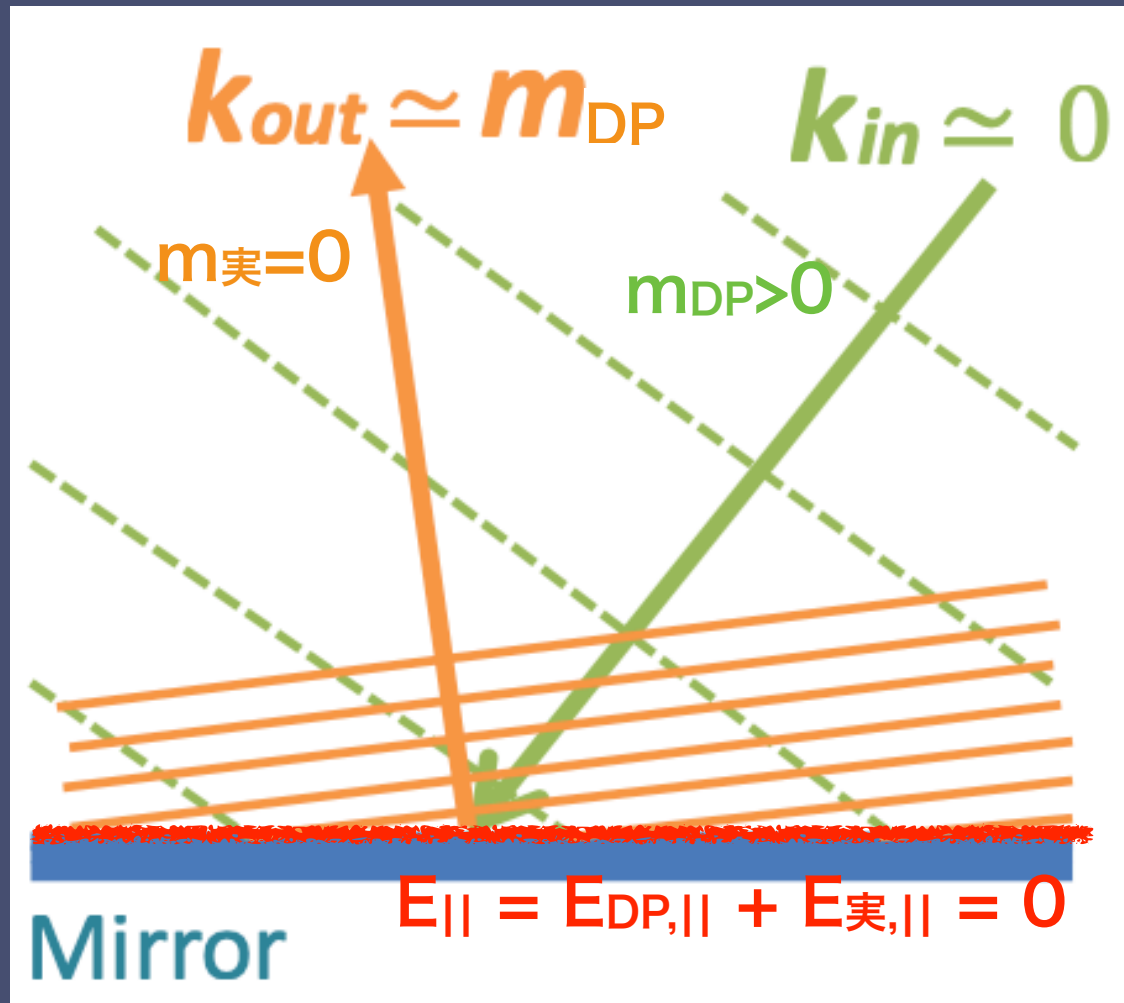
(b) RHEA ボード [15]. FPGA との通信には SPI 通信 [27, 28] を用いる。

興味があれば 安達まで連絡を!

adachi.syunsuke.52e@st.kyoto-u.ac.jp

Backup

Dark Photon の生成—導体境界条件



- 導体に入ってくるもの : DP
 $m_{DP} > 0, \omega = m, k_{in} = 0$
- 出ていくもの : 実光子
 $m_{実} = 0, \omega = k_{out} \sim m'$

* $\omega^2 = m^2 + k^2$

* ここで考えているのは質量固有状態

- DP に含まれるSMと相互作用する成分が電場を生み出す
- 導体で $E_{||} = 0$ の境界条件を満たすために実光子が生成される
 \Rightarrow 境界条件を満たすには実光子が導体とほぼ垂直に出る
 \Rightarrow エネルギー保存から $k_{out} \sim m_{DP}$ *運動量は保存しない

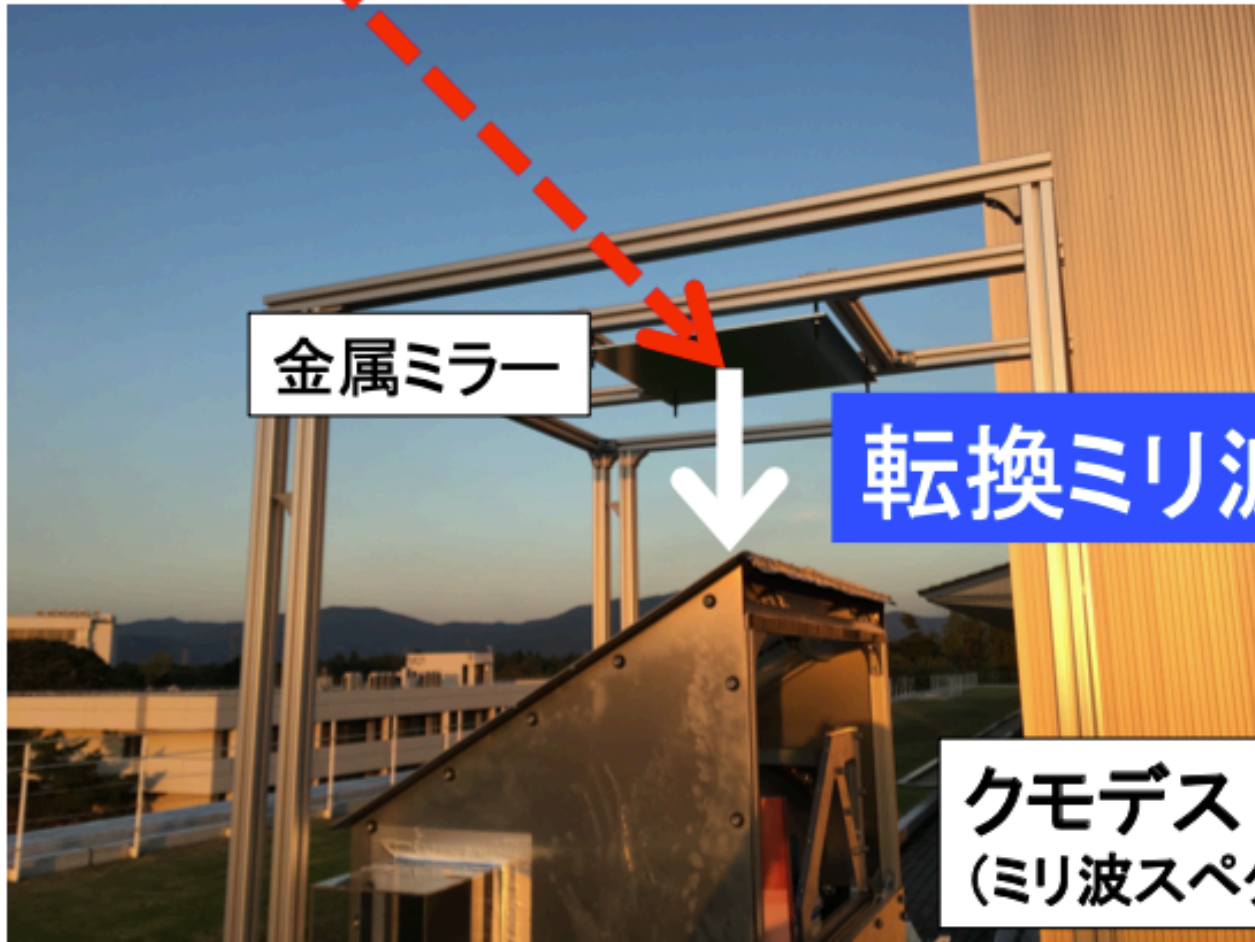
実光子周波数 [GHz] = $1/h[eV \cdot \text{sec}](\text{mass}/\sqrt{1+v/c}) \times 10^{-9} = 1/4.135 \times 10^{-15} \times \text{mass}[eV] / \sqrt{1+(2.2 \times 10^5/3 \times 10^8)^2} \times 10^{-9} = 2.417 \times 10^5 \times (\text{mass}[eV])$ [GHz]

DP 質量 m_{DP} [eV] = $4.137 \times 10^{-6} \times (\text{周波数[GHz]})$ [eV]

Dark Photon の信号

DP

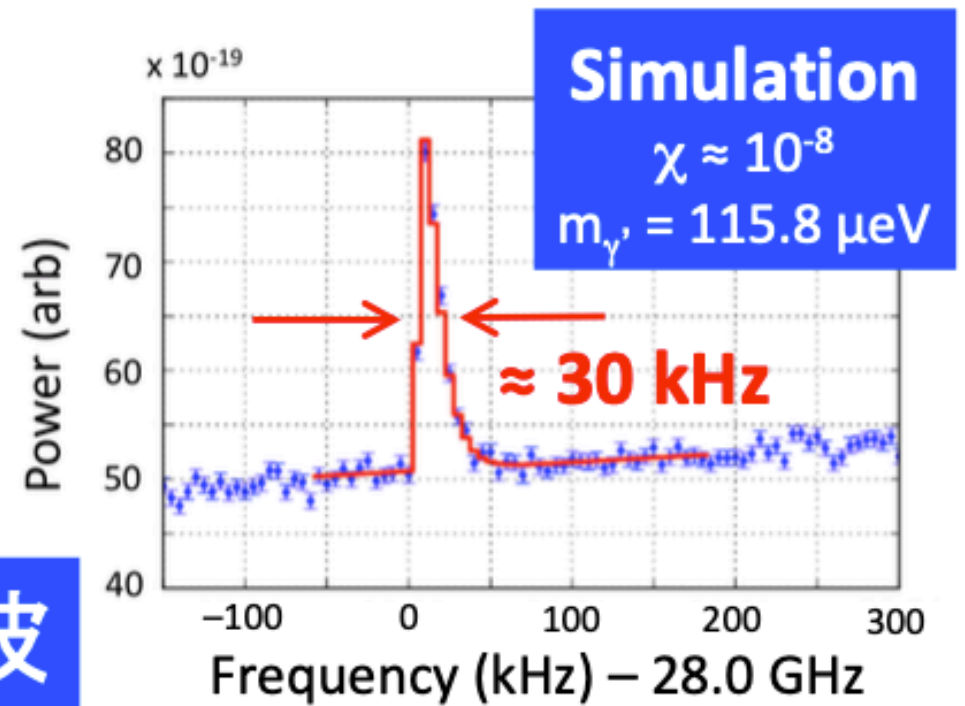
どこにでもいる



金属ミラー

転換ミリ波

クモデス
(ミリ波スペクトロメーター)



解析はピーク信号をフィットする

平均速度 $-v_E$ (地球の速度=230km/s)
幅 v_0 (=220km/sec) の Maxwell-Boltzmann 分布

22

スペクトル分布は

$$f_{\text{MB}}(\mathbf{v}) = \frac{1}{(\pi v_0)^{3/2}} e^{-|\mathbf{v} + \mathbf{v}_E|^2 / v_0^2}$$

の速度 v 分布で決まる

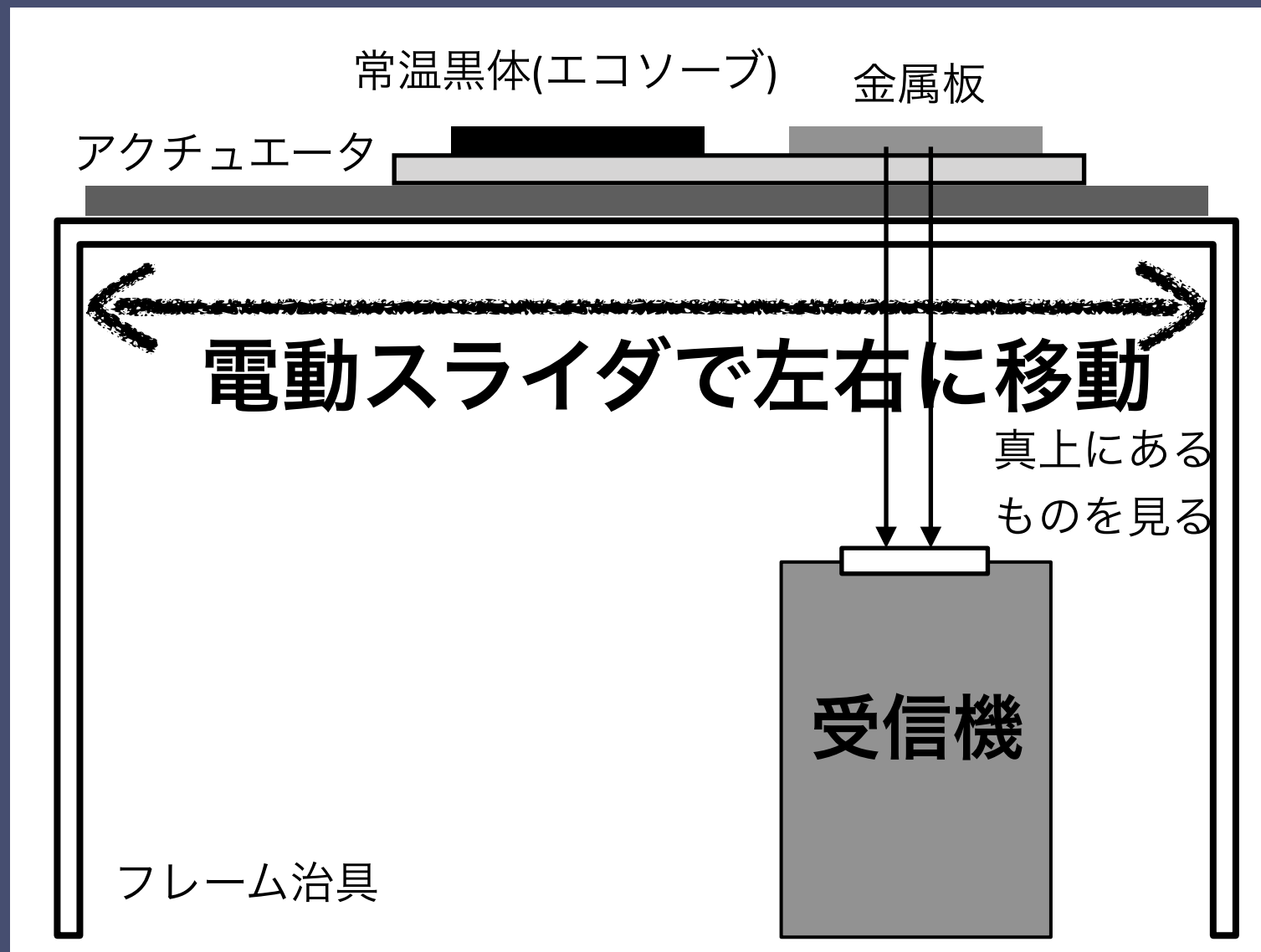
v : DM の速度 \Leftrightarrow 実光子の周波数 に対応

$$\nu(v_{\text{DM}}, m_{\gamma'}) = \frac{1}{h} \frac{m_{\gamma'}}{\sqrt{1 + (v_{\text{DM}}/c)^2}}$$

* v スペクトルの幅 $(v_0/c) \sim O(10^{-3}) \Rightarrow$ 周波数の幅 $1/h * m_{\text{DP}} (1/\sqrt{1+(v_E/c)^2} - 1/\sqrt{1+(v_E/c+10^{-3})^2}) * 10^{-9} = 3 \times 10^5 m_{\text{DP}} [\text{kHz}]$

測定時間の長期化に向けて..

- ゲイン校正に黒体を1時間に一回見せる必要がある
⇒ 電動スライダで黒体を自動で動かして自動校正する



予算(安達の科研費)

- 今年度 : 130 万
- 来年度 : 180 万
- (再来年度 : 10万)

でクモデスを改良して10倍感度を目指す!!

(そんなにお金ないが)