

轉換光の観測による
Hidden Photon質量及び
Mixing Termの測定

小高 駿平
佐野 高嶺
Junewoo Park

背景と実験原理

Hidden Photon とは？

- 銀河の運動のずれを引き起こしている、
Cold Dark Matterの候補の一つ

- ダークマターの候補
→ 物質とは相互作用しない

- Photon とカップリングするU(1)場
→ photonとの相互作用から観測

Hidden Photon とは？

この項を介して相互作用

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

A^μ : 電磁場

X^μ : Hidden Photon場

$$X^\mu \rightarrow \tilde{X}^\mu - \chi A^\mu$$


質量状態が A^μ と \tilde{X}^μ の重ね合わせ

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{4} \tilde{X}^{\mu\nu} \tilde{X}_{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2} (\tilde{X}^\mu \tilde{X}_\mu - 2\chi A^\mu \tilde{X}_\mu + \chi^2 A^\mu A_\mu) + J^\mu A_\mu$$

A^μ : J^μ を通して通常物質と相互作用する

\tilde{X}^μ : 通常物質とは相互作用しない

平面波解

(i) $\omega = |\mathbf{k}|$: 0-mass 解 \rightarrow Photon

(ii) $\omega = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2(1 + \chi^2)}$
 $\simeq \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2}$: massive 解 \rightarrow Hidden Photon

Hidden Photon 解

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}(x) \\ \tilde{\mathbf{X}}(x) \end{pmatrix}_{\text{DM}} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}} \begin{pmatrix} -\chi \\ 1 \end{pmatrix} e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}$$

主成分はHP場だが、
わずかに電磁場の成分も持つ

転換光

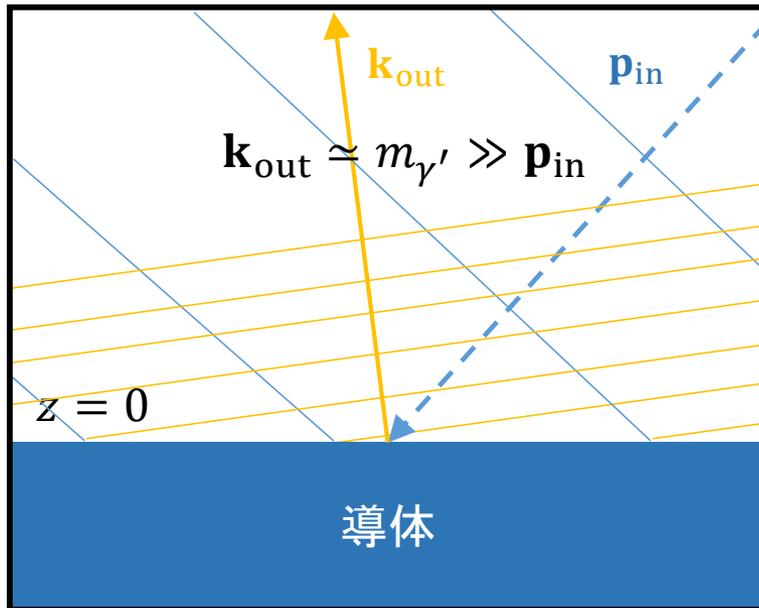
$z = 0$ に置かれた導体板にHidden Photonが入射

境界条件
 $z = 0$ で、 $\mathbf{E}_{//} = 0$



$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}(x) \\ \tilde{\mathbf{X}}(x) \end{pmatrix}_{\text{DM,in}} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}} \begin{pmatrix} -\chi \\ 1 \end{pmatrix} e^{-i(\omega_{\text{in}}t - \mathbf{p}_{\text{in}} \cdot \mathbf{x})}$$

この部分を打ち消すような
電磁波が出てくる



電磁波なのでphoton解

$$\rightarrow \omega_{\text{out}} = |\mathbf{k}_{\text{out}}| \sim m_{\gamma'}$$

$$|\mathbf{p}_{\text{in}}|^2 + m_{\gamma'}^2 = |\mathbf{k}_{\text{out}}|^2 \text{より}$$

$$\mathbf{k}_{\text{out}} \simeq m_{\gamma'} \gg \mathbf{p}_{\text{in}}$$

\rightarrow ほぼ垂直に射出

轉換光

轉換光の強度は

$$P = \frac{2}{3} \chi^2 \rho_{\text{CDM}} A_{\text{plate}}$$

χ に依存

ρ_{CDM} : Dark matter haloのエネルギー密度
~ 0.39 ± 0.03 GeV (7.7%)

A_{plate} : 導体板の面積

轉換光とは

- 導体板からほぼ垂直方向に出る
- 振動数が $\omega \sim m_{\gamma'}$
- 強度が χ に依存

転換光のスペクトル

Hidden Photonの速度が非相対論的なMaxwell分布に従って分布しているとする、

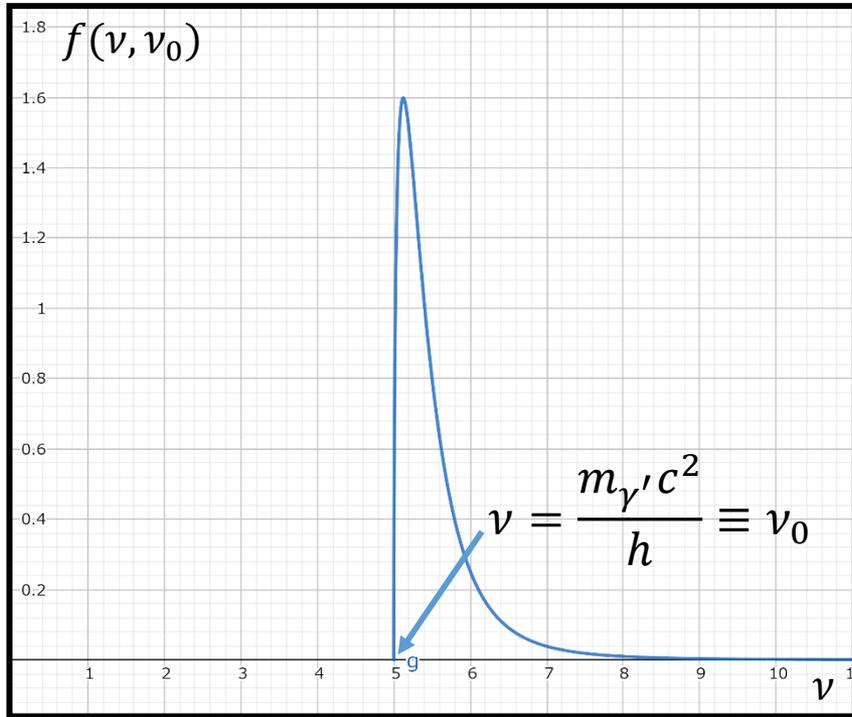
$$f(\mathbf{v}_{\text{DM}}) = \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}} v_0^3} \exp\left(-\frac{|\mathbf{v}_{\text{DM}} + \mathbf{v}_{\text{E}}|^2}{v_0^2}\right)$$

\mathbf{v}_{E} : Dark matter halo に対する地球の速度

また、エネルギー保存より

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

転換光のスペクトル



$\nu = \nu_0$ から立つ鋭いピーク



導体板から出る電磁波を測定して
このピークを探す！！

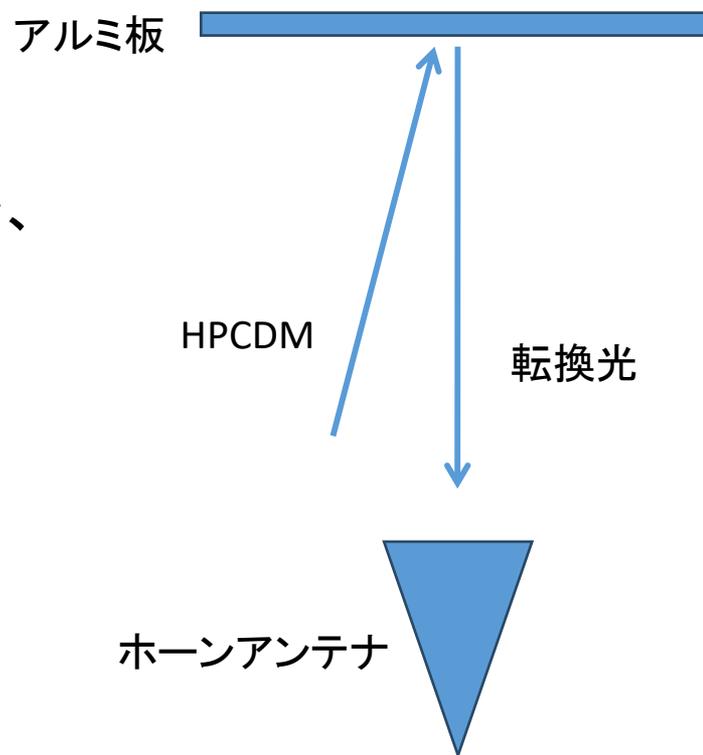
今回の実験では $\nu_0 \sim 20.00 - 20.03$ GHzを探索

$m_{\gamma'} \sim 82.71 - 82.84 \mu\text{eV}/c^2$ に対応

実験方法

実験方法

HPCDMはアルミ板で
ordinary photonに変換し
その電磁波を検出する。
電磁波の周波数からHPCDMの質量を、
強度から混合の係数 χ を決定する。



実験装置

真空槽内の環境

気圧 ~ 0.4 Pa

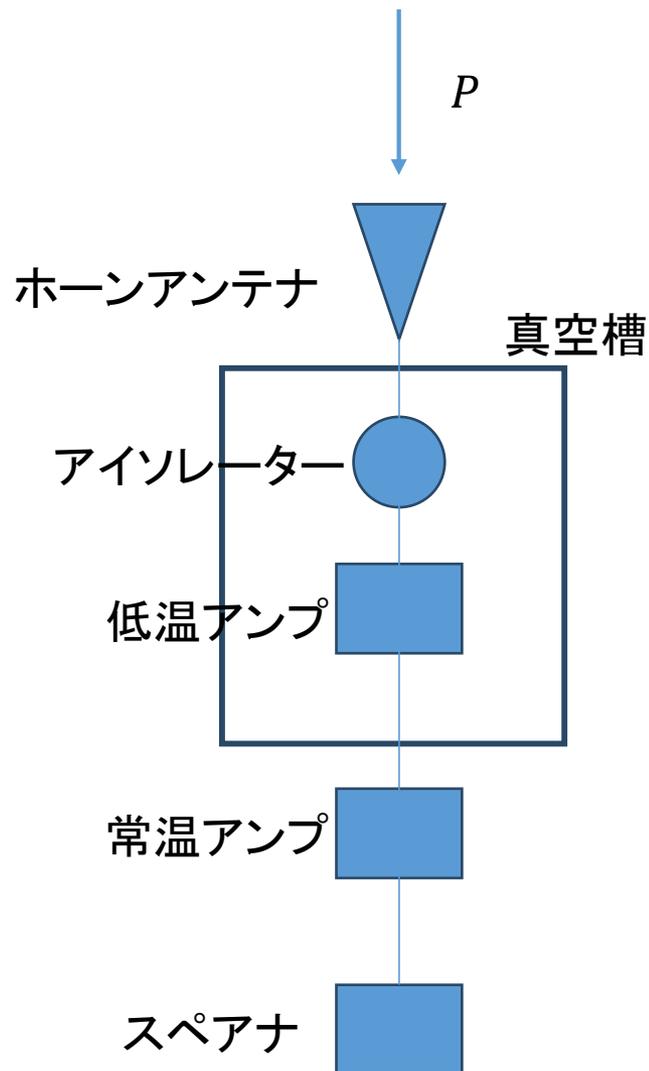
気温 ~ 10 K

低温アンプは ~ 10 Kのヘッドに取り付けられている。

転換光の反射を抑え

外環境からの影響を減らすため

ホーンアンテナからアルミ板の間の空間は壁面を常温黒体で覆った。



実験装置

真空槽内の環境

気圧 ~ 0.4 Pa

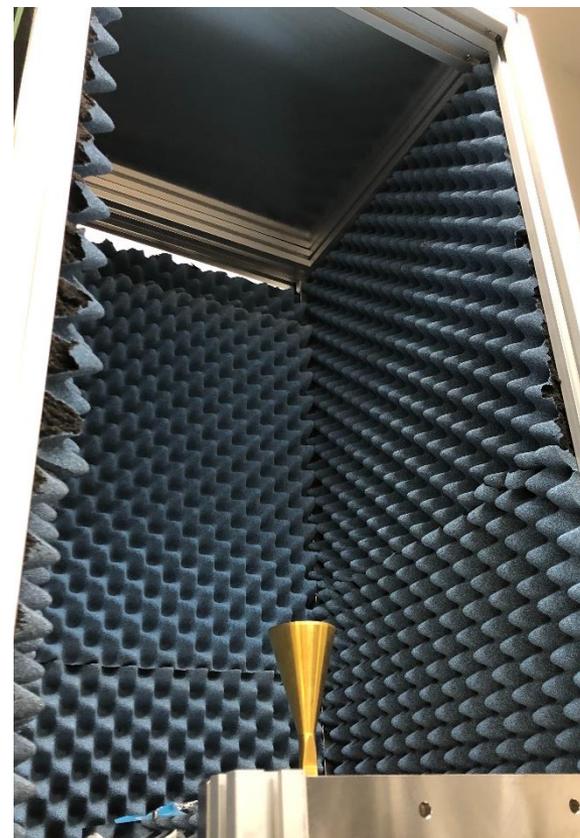
気温 ~ 10 K

低温アンプは ~ 10 Kのヘッドに取り付けられている。

転換光の反射を抑え

外環境からの影響を減らすため

ホーンアンテナからアルミ板の間の空間は壁面を常温黒体で覆った。



測定される電力

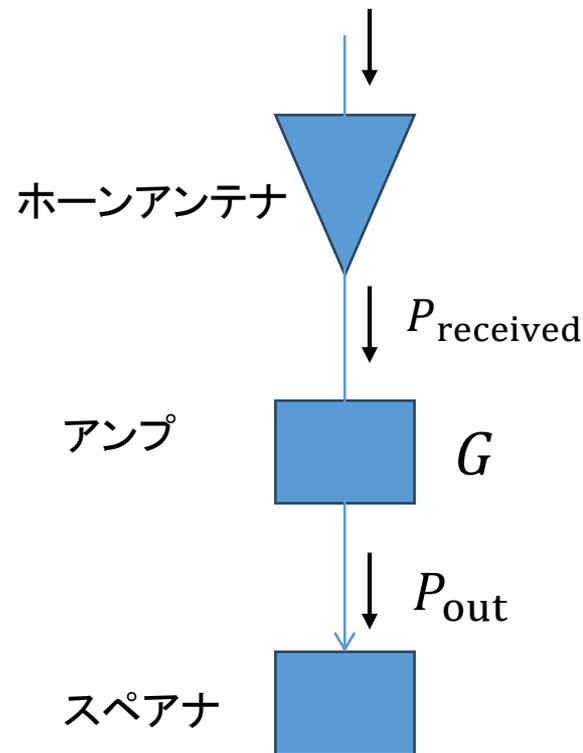
$$P_{\text{out}} = G P_{\text{received}} + P_{\text{noise}}$$

P_{received} を求めるにはこの2つの
キャリブレーションが必要

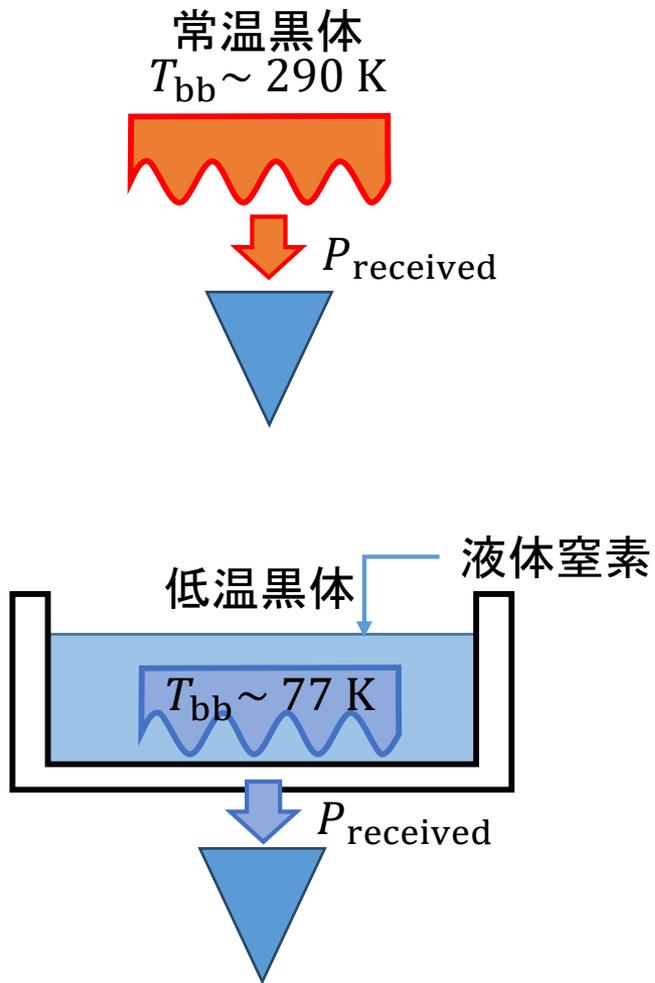


既知の強度 P_{received} の信号を観測し
 P_{out} を比較

実験では黒体を信号源として利用



ノイズ・ゲインのキャリブレーション

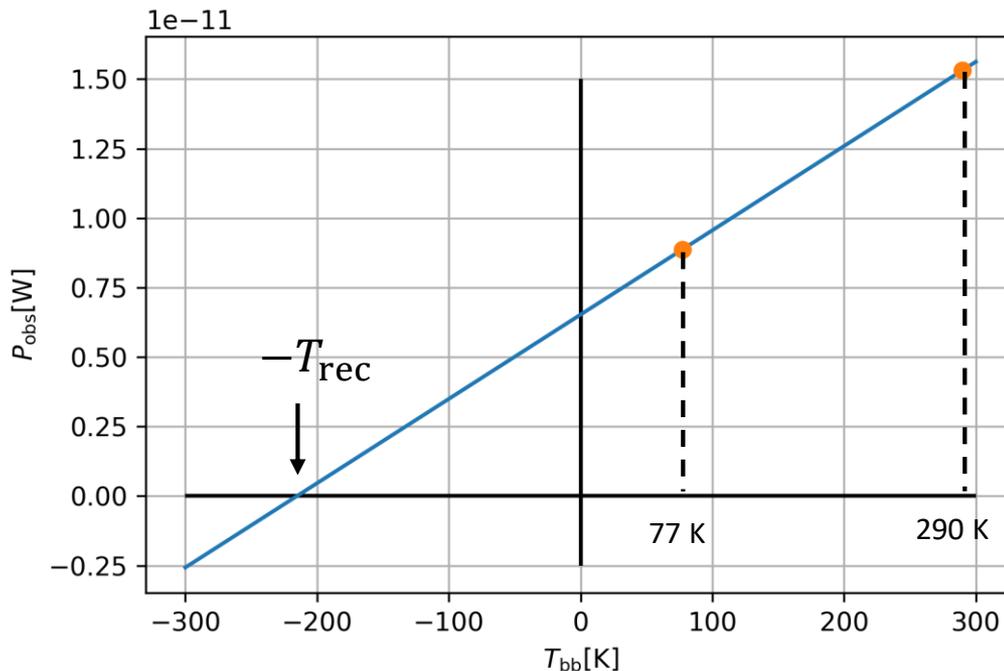


低温黒体による
キャリブレーションの実際の様子

ノイズ・ゲインのキャリブレーション

黒体輻射は、 $\nu = 20 - 30$ GHzでは
レイリー・ジーンズの法則に従う

$$\rightarrow P_{\text{received}} \propto T_{\text{bb}}$$



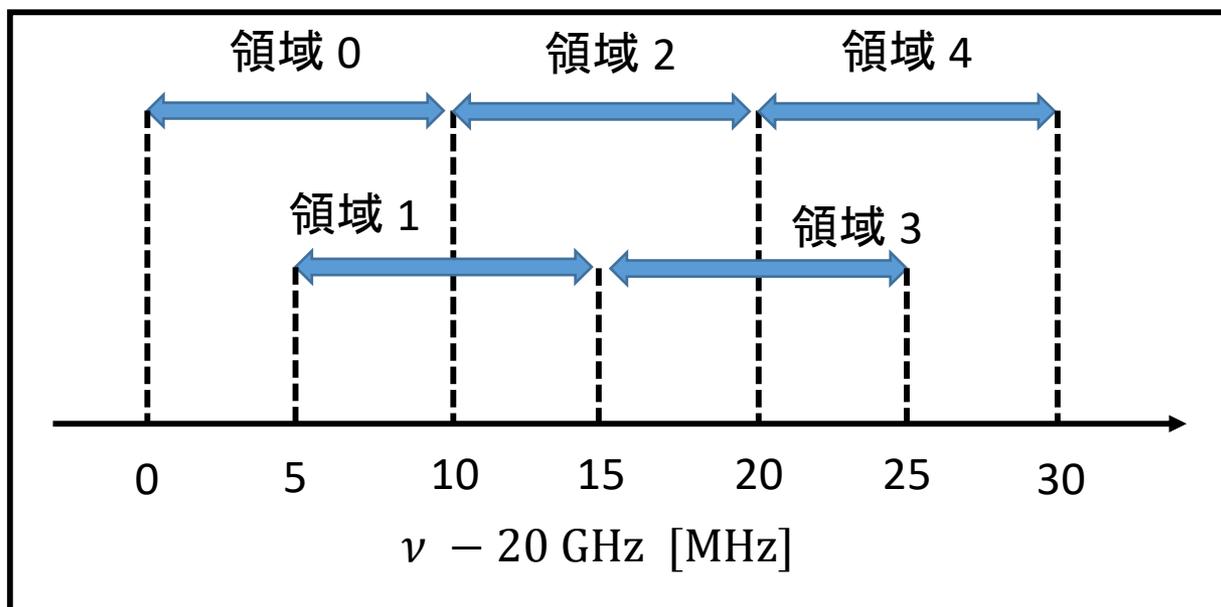
$$P_{\text{out}} = G P_{\text{received}} + P_{\text{noise}} \\ = G' \times k_{\text{B}}(T_{\text{bb}} + T_{\text{rec}})\Delta\nu$$

傾きが、アンプゲインを表す

スペクトルの測定

今回は、 $\nu = 20.00 - 20.03$ GHzの領域を探索
以下の5領域の信号を2回ずつ測定し、結果を平均

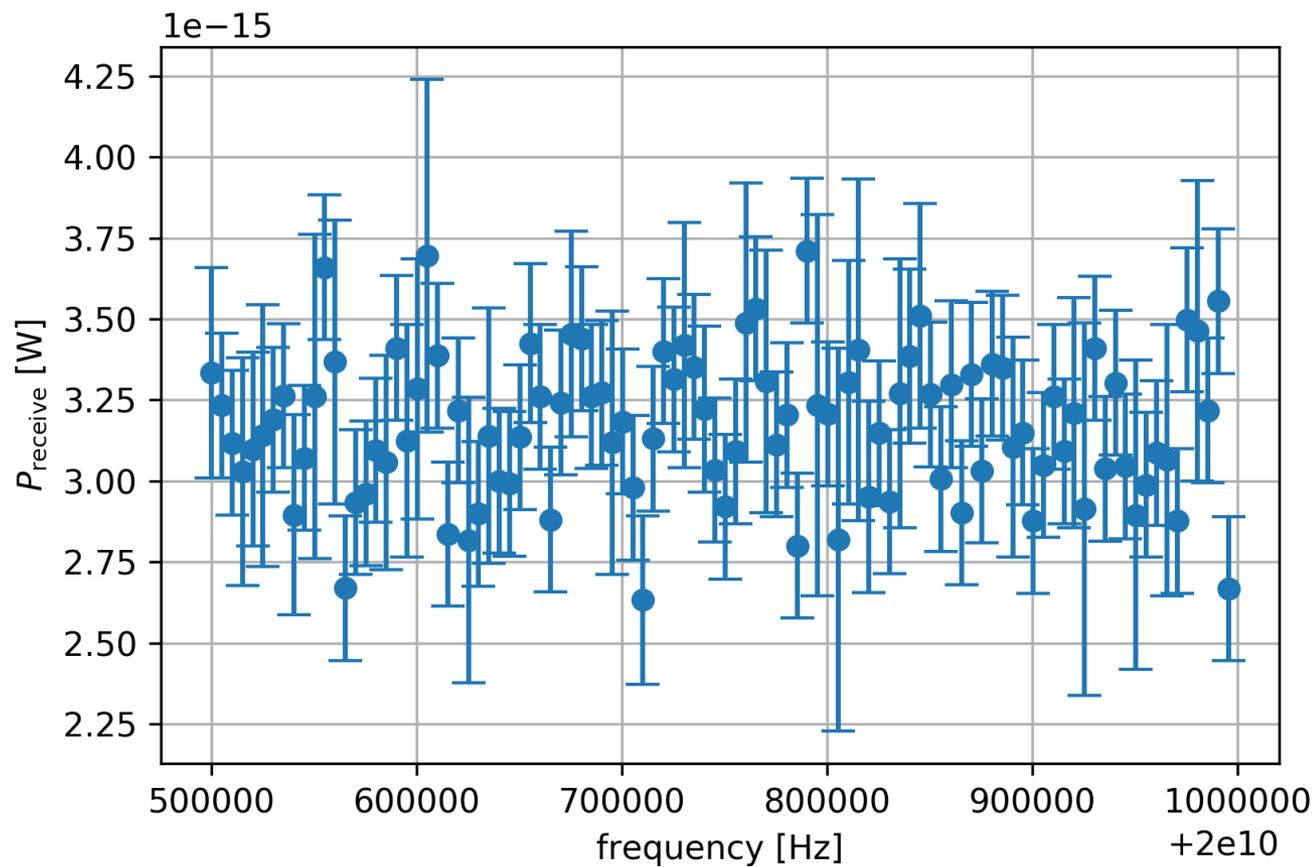
各測定の前後にそれぞれノイズ・ゲインのキャリブレーションを行い
前後でのずれが7.7%以内に収まるものを測定として採用



解析方法

解析方法

測定されたスペクトルの例



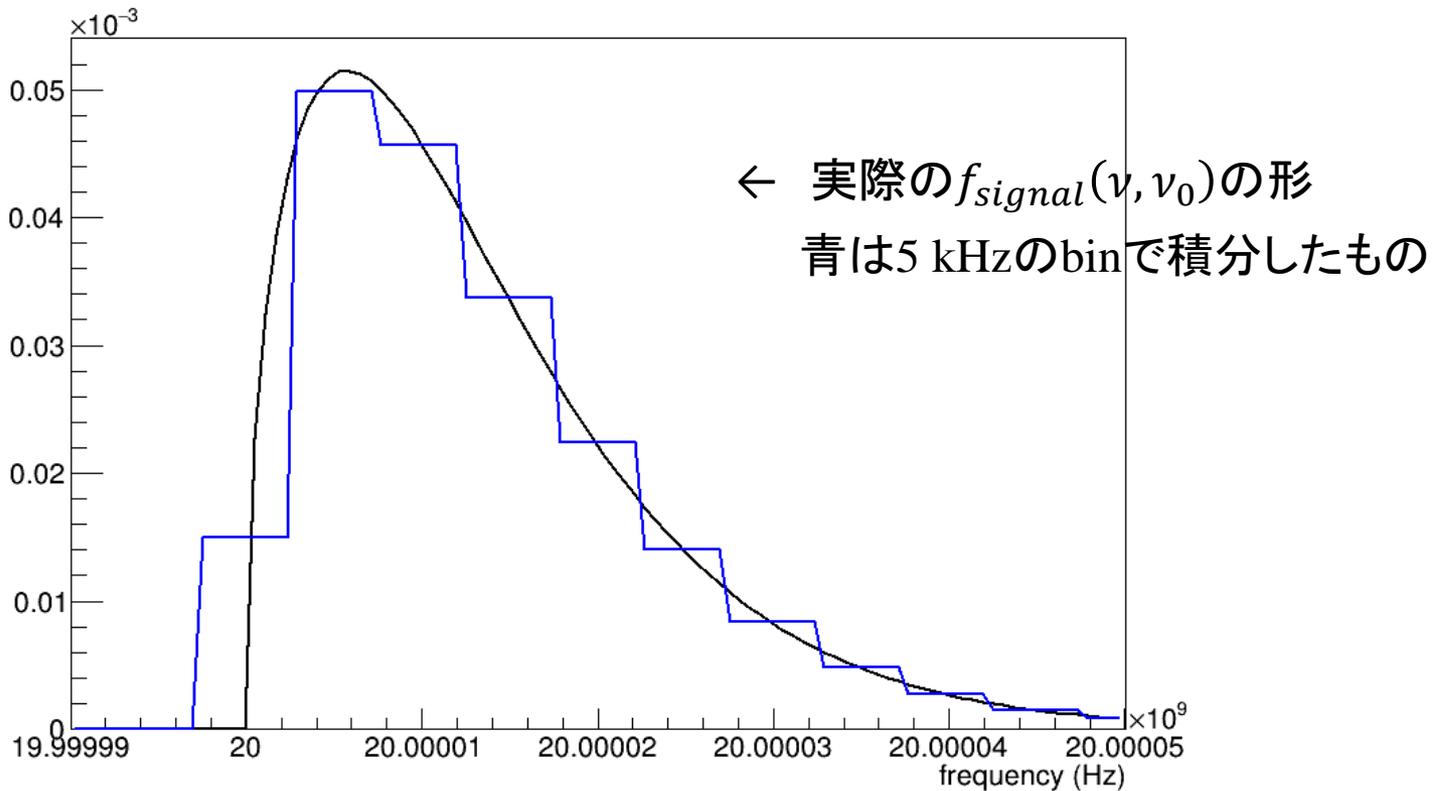
解析方法

ピークの探索

- ① ピークの分布関数で観測したスペクトルをfitting
- ② Fittingパラメータとその誤差の分布を確認
- ③ ピークが含まれないデータ(Null Sample)を用意し
②の分布と比較して分布から大きく逸した点を
ピーク候補として記録
- ④ ピーク候補を一つずつ確認しピークかノイズか判断

解析方法

①信号のfitting



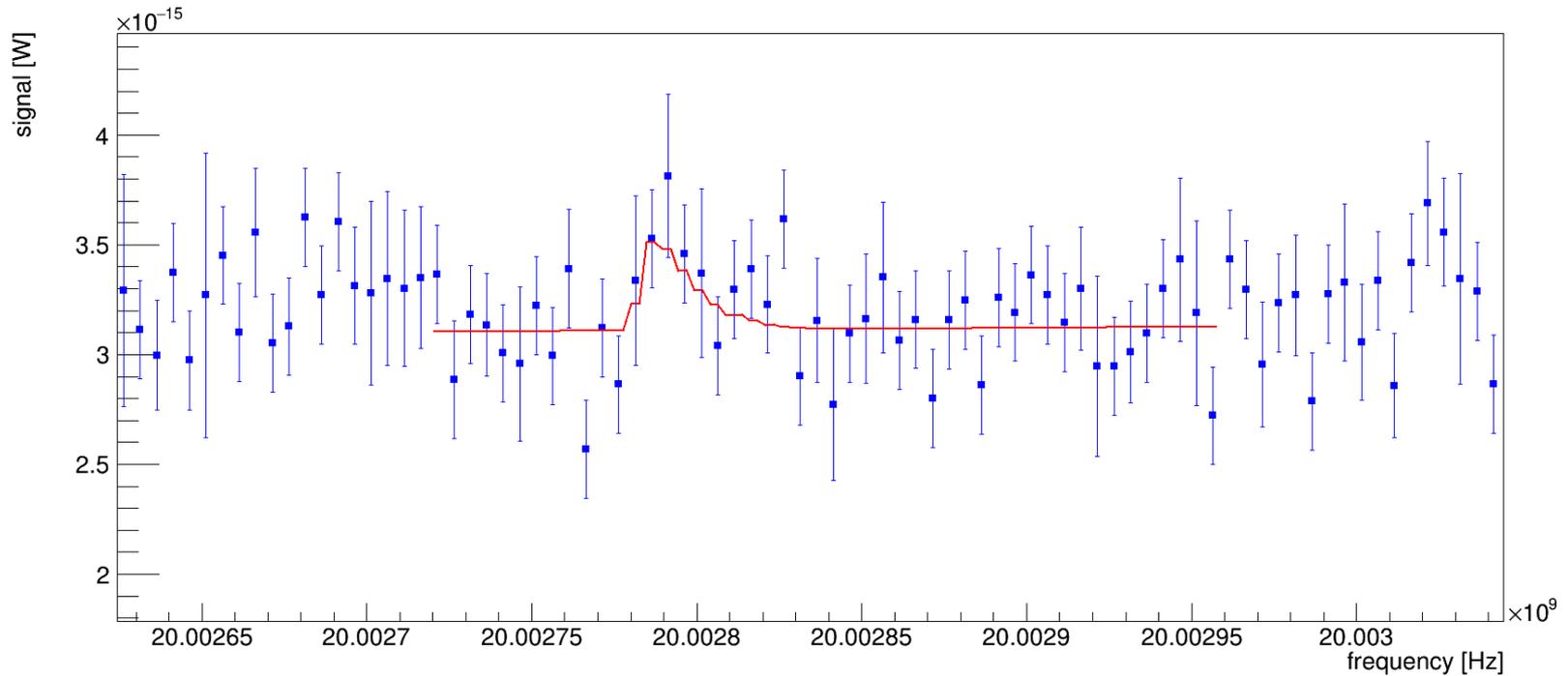
解析方法

①信号のfitting

Fitting関数

$$P f_{\text{binned}}(\nu, \nu_0) + a\nu + b$$

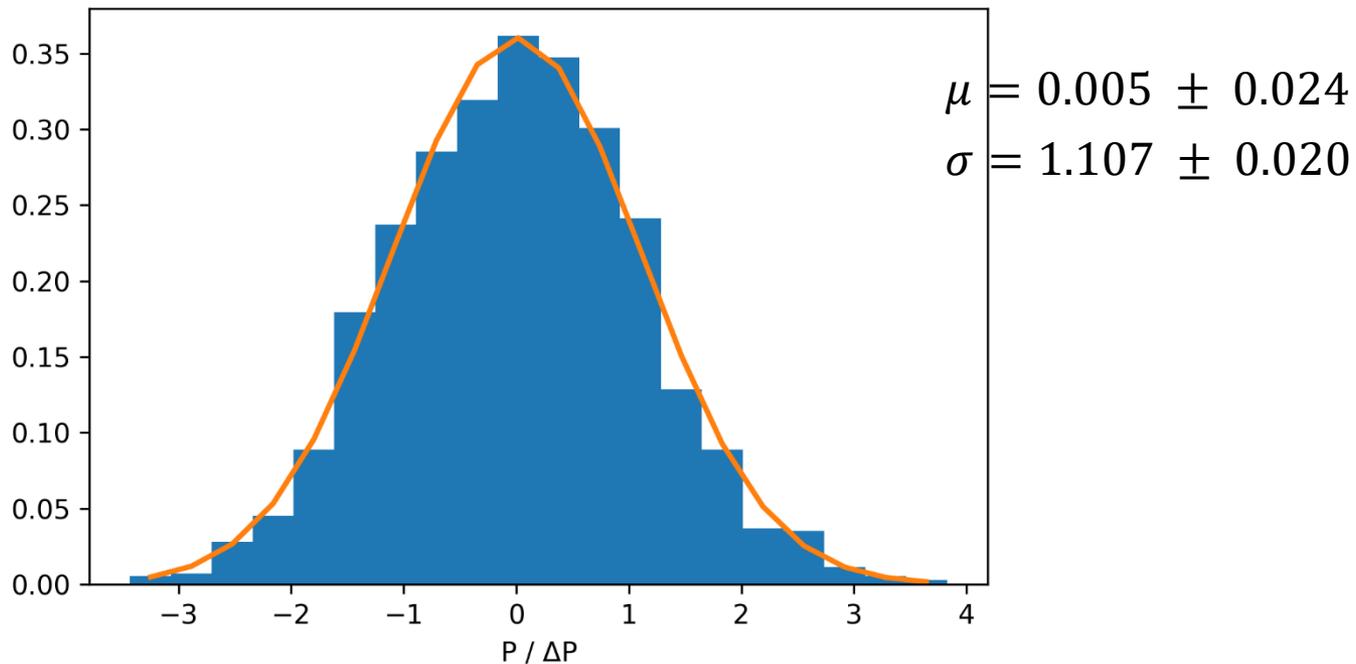
ν_0 それぞれについて、
 P, a, b を測定



解析方法

②fittingパラメータと誤差の分布

$P/\Delta P$ の例

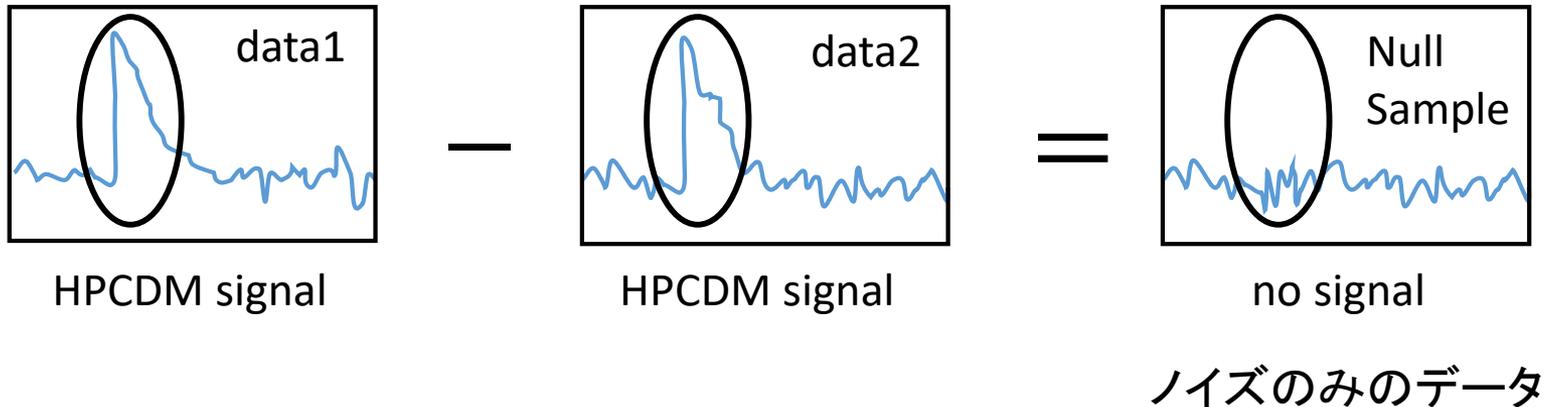


図は領域0における分布

解析方法

③信号を含まないスペクトルとの比較

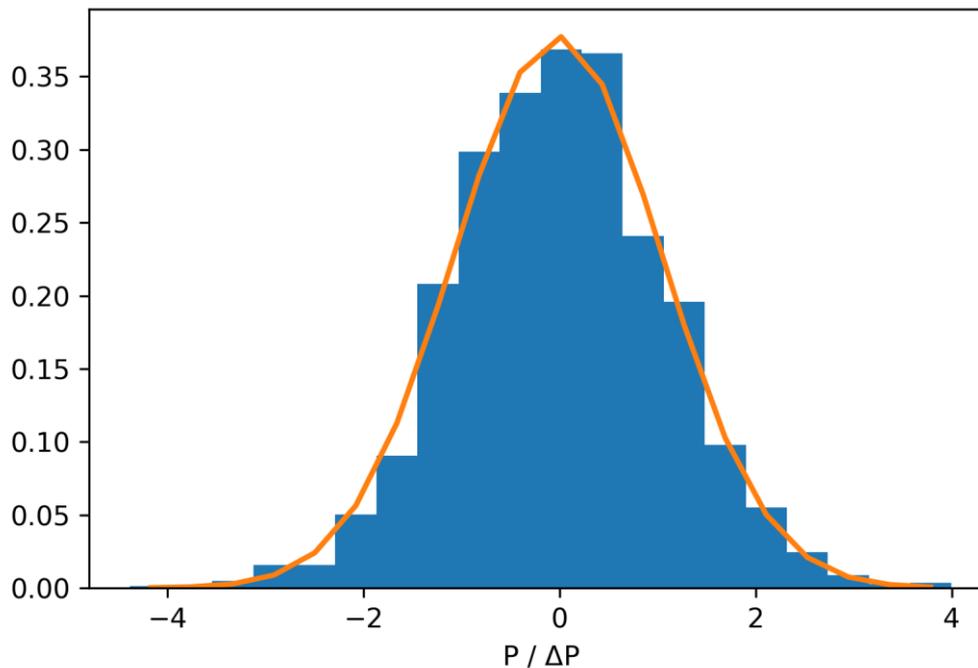
- Null Sampleの準備



解析方法

③信号を含まないスペクトルとの比較

Null Sample の $P/\Delta P$ 分布例



$$\mu = -0.02 \pm 0.02$$

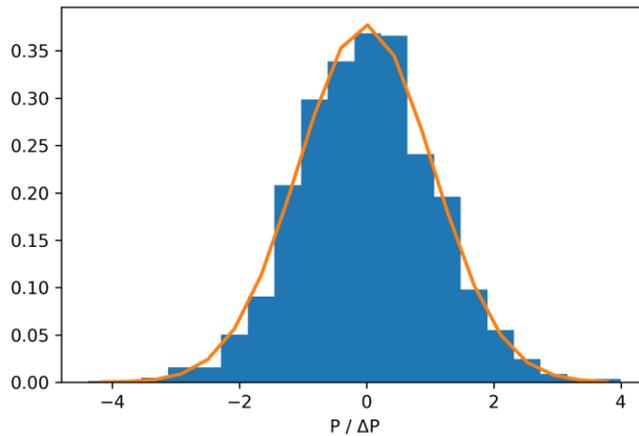
$$\sigma = 1.06 \pm 0.02$$

図は領域0をもとにしたNull Sample

解析方法

③信号を含まないスペクトルとの比較

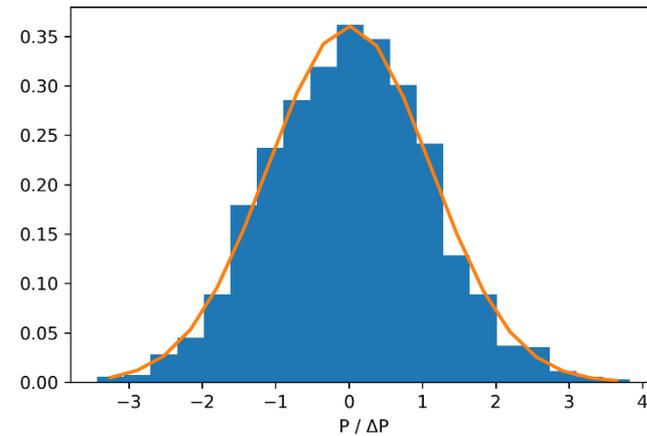
Null Sample



$$\mu = -0.02 \pm 0.02$$

$$\sigma = 1.06 \pm 0.02$$

測定したスペクトル



$$\mu = 0.01 \pm 0.02$$

$$\sigma = 1.11 \pm 0.02$$

解析方法

③信号を含まないスペクトルとの比較

- 同一の正規分布に従っている
 - 測定したスペクトルのうち、大部分はノイズ
 - 逆に分布から大きく外れた $P/\Delta P$ を持つfittingはピークである可能性が高い



今回の解析では、 $P/\Delta P > 3\sigma$ となるデータをピーク候補として特に抜き出した

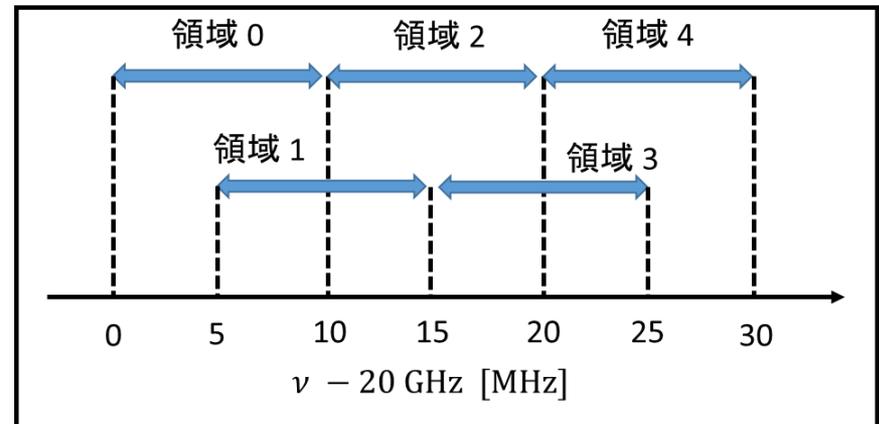
解析方法

④ピーク候補の検討

ピーク候補それぞれについて以下を確認した

- 2つの領域に含まれる点 → どちらの領域でもピークが見られるか
- 1つの領域にしか含まれない、
20.00~20.005 GHz、20.025~20.03 GHz
→ 平均前の2測定でピークがどちらにも見えるか

→ 当てはまらない場合
十分にピークとは言えないと判断



解析結果

解析結果

領域0

領域1

領域2

領域3

領域4

(20GHz~20.01GHz) (20.005GHz~20.015GHz) (20.01GHz~20.02GHz) (20.015GHz~20.025GHz) (20.02GHz~20.03GHz)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
2781.39 (3.01 σ)
3156.58 (3.45 σ)
3691.85 (3.00 σ)
4332.17 (3.37 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
5715.36 (3.30 σ)
5720.36 (3.38 σ)
5725.36 (3.89 σ)
8431.72 (3.37 σ)
11558.28 (3.22 σ)
13099.05 (3.40 σ)
13384.19 (3.02 σ)
13389.19 (3.17 σ)
14259.63 (3.52 σ)
14261.63 (5.22 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
11180.59 (3.28 σ)
11290.65 (3.04 σ)
12516.26 (3.01 σ)
24057.03 (3.44 σ)
14062.03 (3.75 σ)
18624.31 (3.30 σ)
19094.55 (3.17 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
21613.31 (3.06 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
21310.66 (3.05 σ)
22086.04 (3.19 σ)
26038.02 (3.17 σ)

→ $P/\Delta P$ が3 σ を超えたデータ

解析結果

領域0

領域1

領域2

領域3

領域4

(20GHz~20.01GHz) (20.005GHz~20.015GHz) (20.01GHz~20.02GHz) (20.015GHz~20.025GHz) (20.02GHz~20.03GHz)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
2781.39 (3.01 σ)
3156.58 (3.45 σ)
3691.85 (3.00 σ)
4332.17 (3.37 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
5715.36 (3.30 σ)
5720.36 (3.38 σ)
5725.36 (3.89 σ)
8431.72 (3.37 σ)
11558.28 (3.22 σ)
13099.05 (3.40 σ)
13384.19 (3.02 σ)
13389.19 (3.17 σ)
14259.63 (3.52 σ)
14261.63 (5.22 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
11180.59 (3.28 σ)
11290.65 (3.04 σ)
12516.26 (3.01 σ)
24057.03 (3.44 σ)
14062.03 (3.75 σ)
18624.31 (3.30 σ)
19094.55 (3.17 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
21613.31 (3.06 σ)

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$
21310.66 (3.05 σ)
22086.04 (3.19 σ)
26038.02 (3.17 σ)

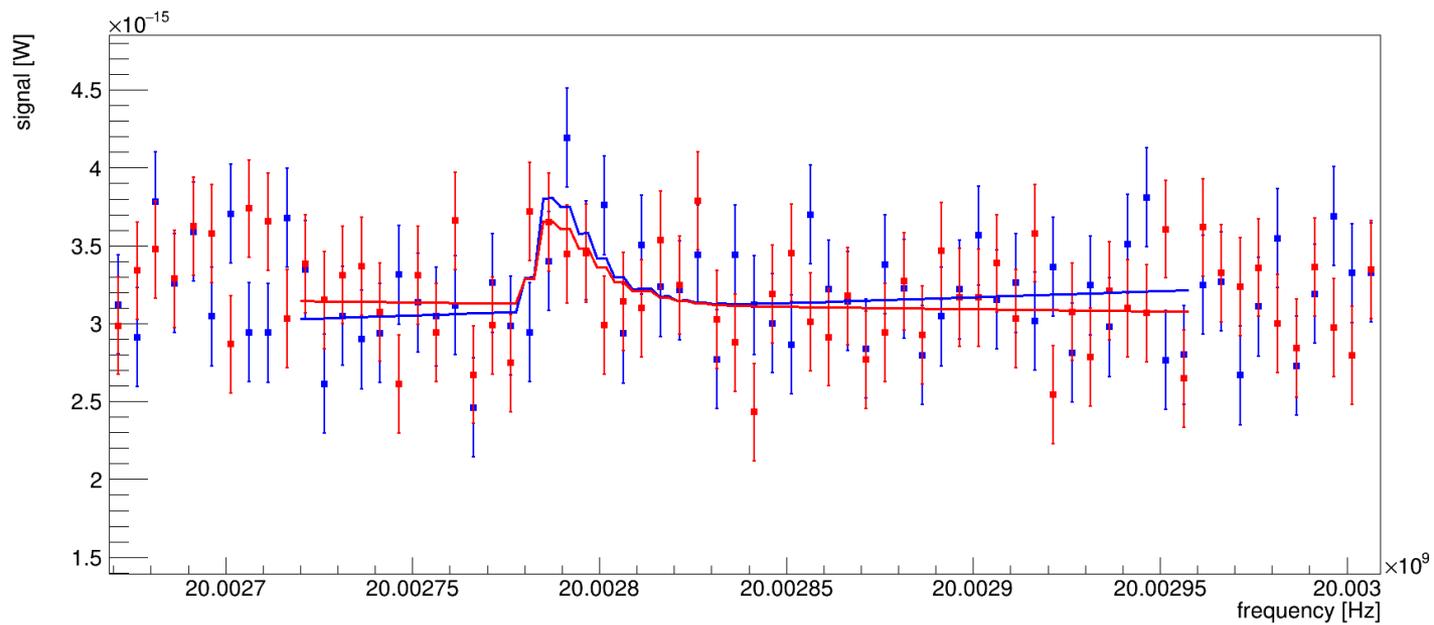
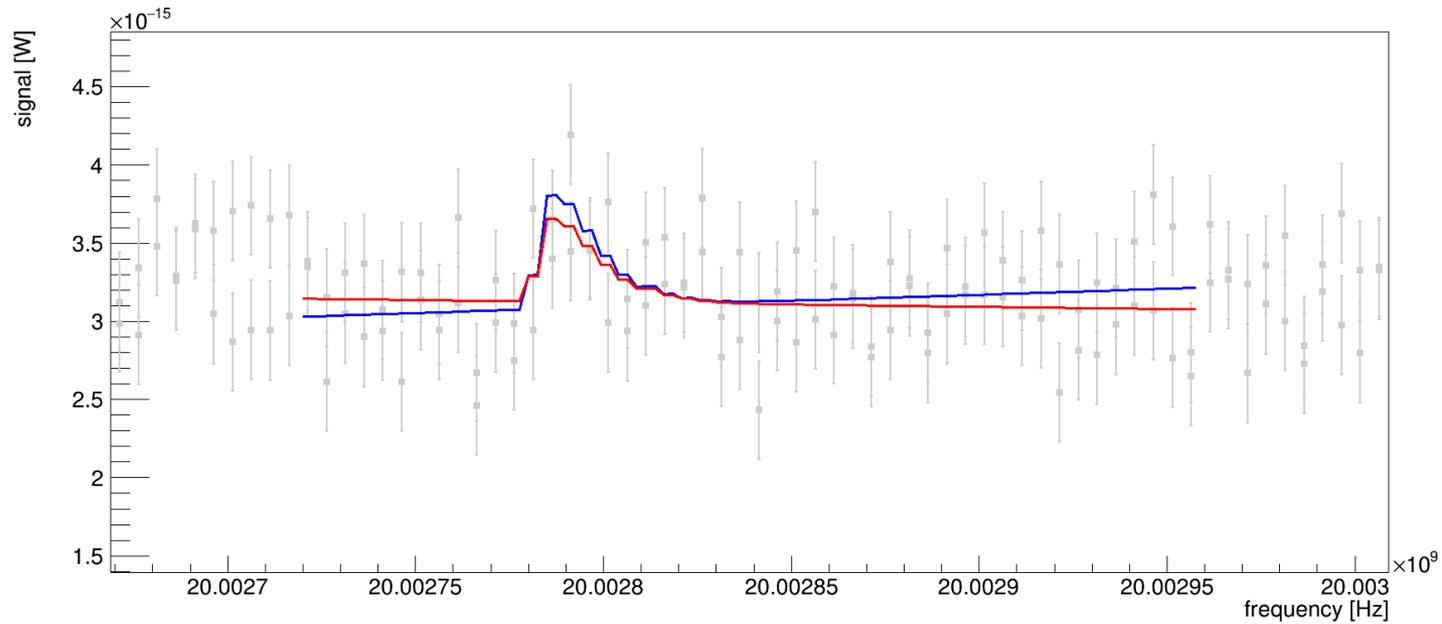
→ 隣の領域にもpeakがない場合を除く！

解析結果

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$	一回目の $P/\Delta P$	二回目の $P/\Delta P$
2781.39	3.27	2.33
3156.58	1.70	4.12
3691.85	0.76	2.81
4332.17	1.55	2.09

振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7$	一回目の $P/\Delta P$	二回目の $P/\Delta P$
26038.02	0.71	2.60

→ 二回の測定すべて 3σ を超えたデータはない！HP信号あるとは言えない！



例) 振動数 (kHz) $-2 \cdot 10^7 = 2781.39$

P_{limit} の算出

今回の測定ではHPシグナルは発見できなかった

→ その事実を踏まえ、この周波数帯での χ の上限値を算出

$$\chi = \sqrt{P} \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{CDM}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_{\text{eff}}}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

上式より P の上限値が χ の上限を定める

→ まず P_{limit} を求め、それをもとに χ_{limit} を定める

得たfittingパラメータ P は、真の値の周りに ΔP の幅の正規分布で存在していると考え、 P の95% confidence upper limitを以下のようにおいた

$$P_{\text{limit}} = \max(0, P) + 1.65 \Delta P$$

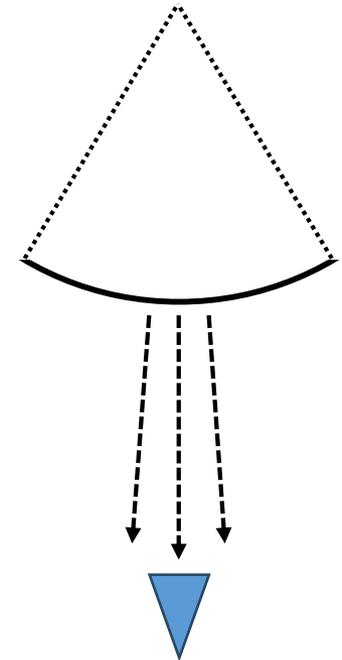
誤差の考察

測定の補正

・ aluminum板が最初からちょっと曲がっていた。

板の中央が4mmくらい曲がってとして、球の模様に曲がったと仮定すると、球の半径は22.5mである。

→ aluminum板からhornまで届くのに $\left(\frac{22.5}{23.32}\right)^2 = 0.931$ 倍になる。

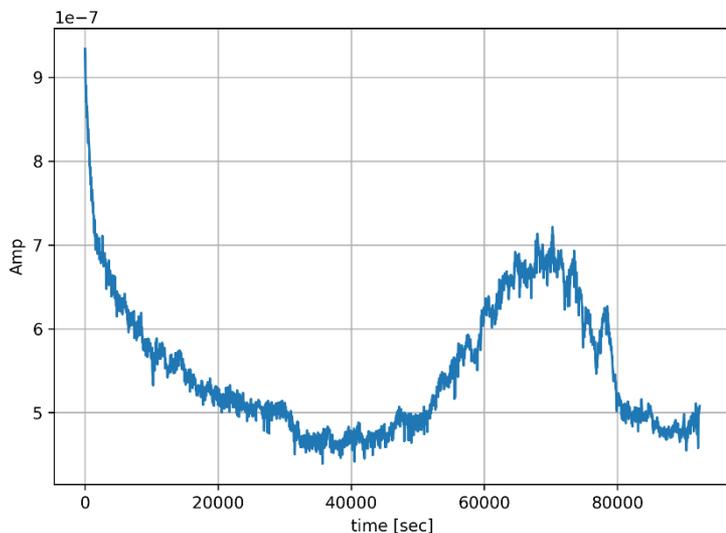


測定の系統誤差

- ・測定の時、温度が変化したりして、gain値が変わる可能性がある。

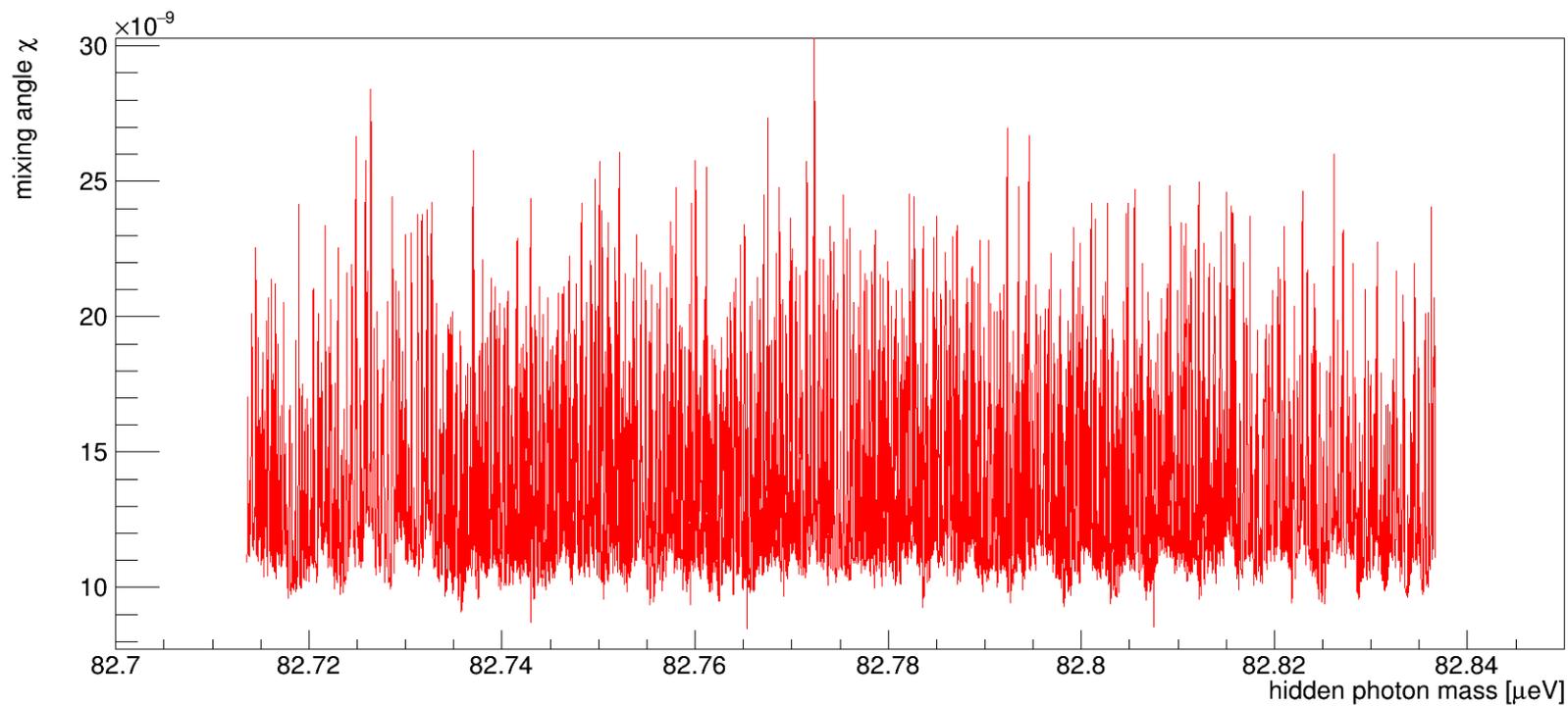
この影響を下げるためにcalibrationのgainの差が7.7%以内になるようにデータを取った。
(7.7%~0.32dB)

一日ずっと測定した結果によると、温度とgainが関連ある。
測定の結果を見ると短期間での温度による変化は線形。
測定の時gainの誤差が7.7%収められているとおもわれる。



結果

以上を踏まえ算出した χ_{limit}



結論

$$m_{\gamma'} = 82.71 \sim 82.84 \mu\text{eV}/c^2 \text{では}$$

$$\chi < 0.85 \sim 3.1 \times 10^{-8}$$

改善点

χ_{lim} をより小さくしたい

→ ホワイトノイズのノイズ幅を小さくする

① 測定にかける時間を伸ばす

② スペアナの解像度を上げ測定点を増やす

→ 温度の時間変化の少ない環境下で測定する

謝辞

田島さん、中家さん、隅田さん

TAの辻川さん、森さん

大変お世話になりました。ありがとうございました。

ご清聴ありがとうございました

補足、質問来たとき用

平面波解

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}(x) \\ \tilde{\mathbf{X}}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \tilde{\mathbf{X}} \end{pmatrix} e^{-ikx}$$

$$\left[(\omega^2 - \mathbf{k}^2) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - m_{\gamma'}^2 \begin{pmatrix} \chi^2 & -\chi \\ -\chi & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \tilde{\mathbf{X}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Hidden Photon : Non-relativistic $\Rightarrow (|\mathbf{k}| \ll \omega)$

Lorenz Gauge $\Rightarrow A^0 = \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{A}}{\omega} \sim 0, X^0 = \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{X}}{\omega} \sim 0$

(i) $\omega = |\mathbf{k}|$: 0-mass 解 \rightarrow Photon

(ii) $\omega = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2 (1 + \chi^2)}$
 $\simeq \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2}$: massive 解 \rightarrow Hidden Photon

Hidden Photon解

$$\omega = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2}$$
$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}(x) \\ \tilde{\mathbf{X}}(x) \end{pmatrix}_{\text{DM}} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}} \begin{pmatrix} -\chi \\ 1 \end{pmatrix} e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}$$

$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}}$ は全空間で同じ大きさ、ランダムな方向と仮定

このとき質量由来のエネルギー密度は

$$\rho_{\text{HP}} = \frac{m_{\gamma'}^2}{2} \langle |\tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}}|^2 \rangle$$

観測されているDark Matterの質量の大部分がHP由来と考えると

$$\rho_{\text{HP}} = \rho_{\text{CDM}} = (0.39 \pm 0.03) \text{GeV}/\text{cm}^3$$

Hidden Photon解

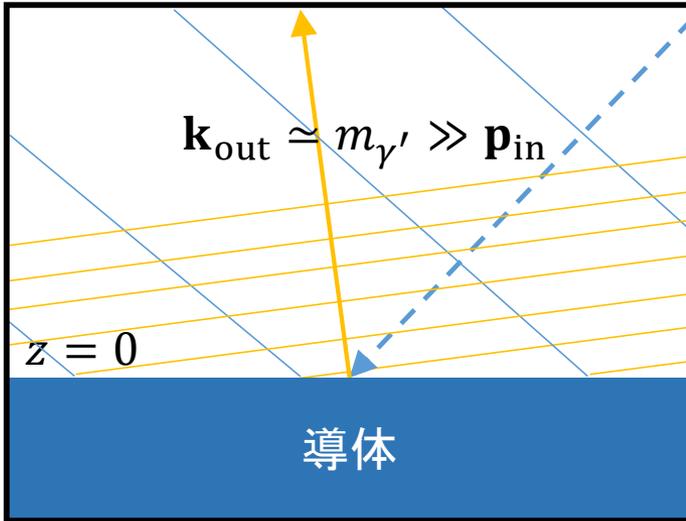
$$\omega = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_{\gamma'}^2}$$
$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}(x) \\ \tilde{\mathbf{X}}(x) \end{pmatrix}_{\text{DM}} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}} \begin{pmatrix} -\chi \\ 1 \end{pmatrix} e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}$$

主成分はHP場だが、
わずかに電磁場の成分も持つ

$$\mathbf{E}_{\text{DM}}(x) = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$
$$= -i\omega\chi\tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}} e^{-ikx}$$

$$|\mathbf{E}_{\text{DM}}|^2 \simeq \chi^2 m_{\gamma'}^2 |\tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}}|^2$$

轉換光



$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{E}_{\text{hid}} \end{pmatrix}_{\text{in}} = \mathbf{E}_{\text{DM}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1/\chi \end{pmatrix} e^{-i(\omega_{\text{in}}t - \mathbf{p}_{\text{in}} \cdot \mathbf{x})}$$

境界条件

$$z = 0 \text{ で、} \mathbf{E}_{//} = 0$$

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{\text{DMin},//} + \mathbf{E}_{\text{DMout},//} = 0 \\ \omega_{\text{in}} = \omega_{\text{out}} \\ \mathbf{p}_{\text{in},//} = \mathbf{k}_{\text{out},//} \end{cases} \text{ を満たす photon 解}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{E}_{\text{hid}} \end{pmatrix}_{\text{out},//} = \mathbf{E}_{\text{DM},//} \begin{pmatrix} 1 \\ \chi \end{pmatrix} e^{-i(\omega_{\text{out}}t - \mathbf{k}_{\text{out}} \cdot \mathbf{x})}$$

$$\omega_{\text{out}} = |\mathbf{k}_{\text{out}}|$$

また、 $\omega_{\text{in}}^2 = \omega_{\text{out}}^2 \Leftrightarrow |\mathbf{p}_{\text{in}}|^2 + m_{\gamma'}^2 = |\mathbf{k}_{\text{out}}|^2$ より $\mathbf{k}_{\text{out}} = \mathbf{p}_{\text{in},//} + \mathbf{n}_{\perp} \sqrt{m_{\gamma'}^2 + |\mathbf{p}_{\text{in}\perp}|^2}$

轉換光

轉換光の強度は

$$\begin{aligned} P &\simeq \langle |\mathbf{E}_{\text{DM},//}|^2 \rangle A_{\text{plate}} \\ &= \langle |\mathbf{E}_{\text{DM}}|^2 \rangle \langle \cos^2 \theta \rangle A_{\text{plate}} \\ &\simeq \chi^2 m_{\gamma'}^2 \langle |\tilde{\mathbf{X}}_{\text{DM}}|^2 \rangle \frac{1}{3} A_{\text{plate}} \\ &= \frac{2}{3} \chi^2 \rho_{\text{CDM}} A_{\text{plate}} \end{aligned}$$

χ に依存

轉換光とは

- 導体板からほぼ垂直方向に出る
- 振動数が $\omega \sim m_{\gamma'}$
- 強度が χ に依存

転換光のスペクトル

Hidden Photonが非相対論的なMaxwell分布に従って分布しているとする、

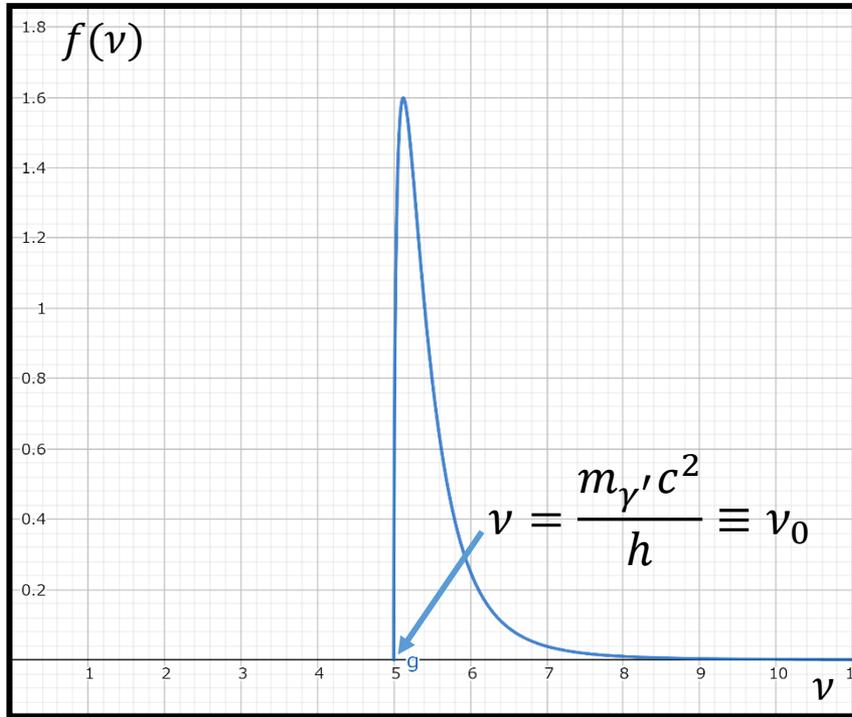
$$f(\mathbf{v}_{\text{DM}}) = \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}} v_0^3} \exp\left(-\frac{|\mathbf{v}_{\text{DM}} + \mathbf{v}_{\text{E}}|^2}{v_0^2}\right)$$

\mathbf{v}_{E} : Dark matter halo に対する地球の速度

また、エネルギー保存より

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

転換光のスペクトル



$\nu = \nu_0$ から立つ鋭いピーク



導体板から出る電磁波を測定して
このピークを探す！！

今回の実験では $\nu_0 \sim 20.00 - 20.03$ GHzを探索

$m_{\gamma'} \sim 82.71 - 82.84 \mu\text{eV}/c^2$ に対応

スペアナの表示

スペアナの画面には、受信した信号が、
横軸周波数、縦軸デシベル(dBm)で表記されている。

$$[\text{dBm}] = 10 \log[\text{mW}]$$

logは常用対数

えられた信号をx[dBm]とすると、

$$10^{(x/10)} * 10^{-3} [\text{W}]$$

ノイズ・ゲインのキャリブレーション

レイリー・ジーンズ

$$dP = \frac{2\nu^2}{c^2} dA d\Omega \times k_B T_{bb} \Delta\nu$$

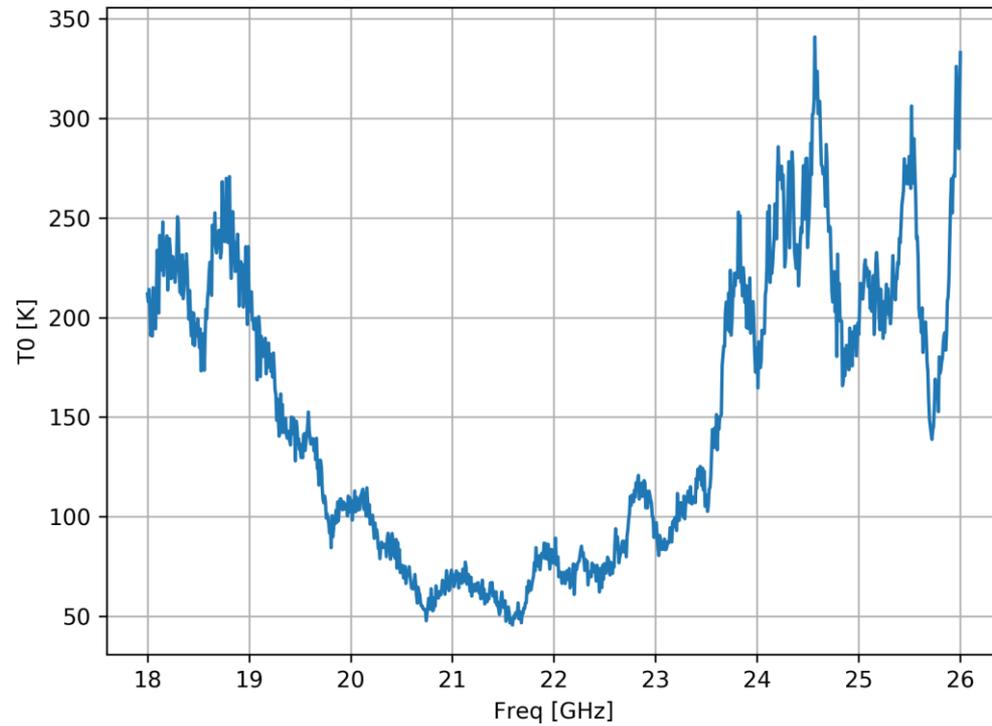
と

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= G P_{\text{received}} + P_{\text{noise}} \\ &= G' \times k_B (T_{bb} + T_{\text{rec}}) \Delta\nu \quad \text{より} \end{aligned}$$

$$G' = G \times \frac{2\nu^2}{c^2} \times \boxed{A_{\text{aperture}}} \times \boxed{2\pi}$$

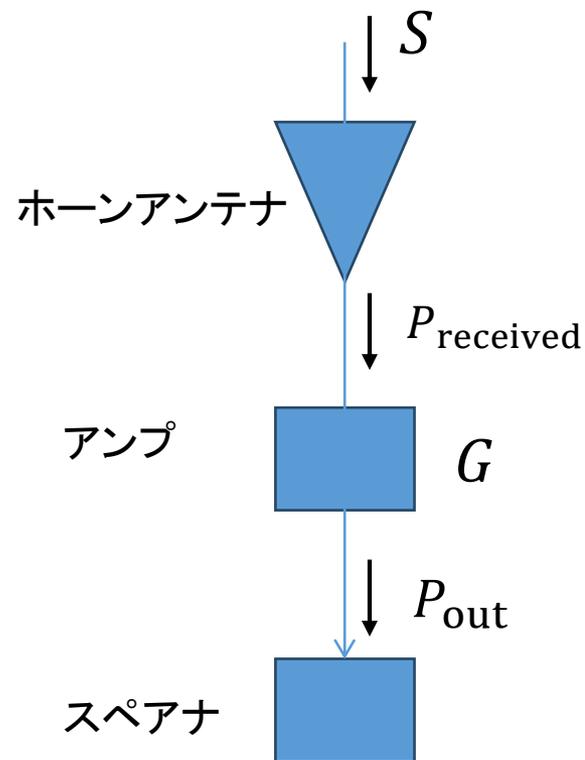
黒体からの立体角
ホーンの開口面積

系全体のノイズ



測定される電力

- 入射フラックス密度を S
- ホーンが検出する電力を P_{received}
- アンプのゲインを G
- 有効開口面積を A_{eff}
- スペアナが受け取る電力を P_{out}
- 系全体のノイズを P_{noise}

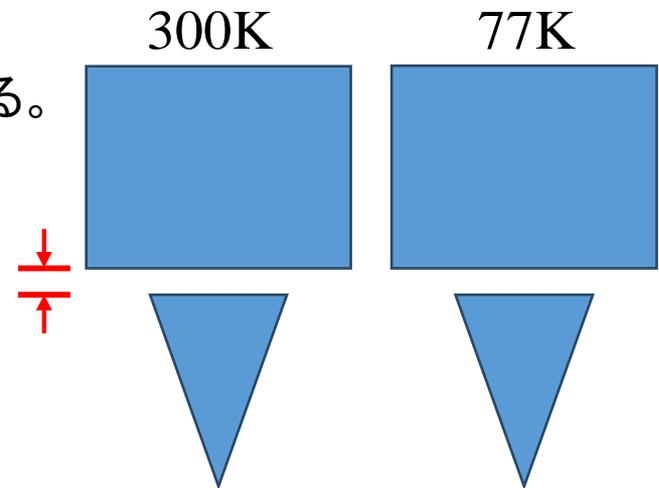


Calibrationの誤差

- ・ calibrationの時、液体窒素・黒体とhornが完全にくっついてない

$$\frac{P_{300K} - P_{77K}}{300 - 77} = \frac{2\nu^2 k_B}{c^2} \Delta A \Delta\nu \Delta\Omega$$

で、 $\Delta\Omega$ を放射する立体角だとすると、 $\Delta\Omega \neq 2\pi$ である。



Calibrationの誤差

- ・ calibrationの時、液体窒素・黒体とhornが完全にくっついてない

実際に、半径3cmのhornの2.5cm上に18cm×19cmの77.4 K 黒体を置いた場合

数値解析より、 $\Delta A \Delta \Omega = 1.33 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ となり
理想値 $2\pi \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 \pi = 1.78 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ とずれる。

しかし、この影響は300Kの黒体の時は小さい

→ 265Kに当たる信号は1.01倍しか差が出ない。
で、HPの信号は常温に近いのでほぼ影響がない

