

電波で挑む

受信機

超軽量ダークマター探索

安達俊介 (岡山大学)

2026.3.6 @ 神戸大学, 第11回「極低放射能技術」研究会

超軽量ダークマター (DM)

“超軽量” DM



WIMP
||
“粒子的” DM



1 μeV

1 meV

1 eV

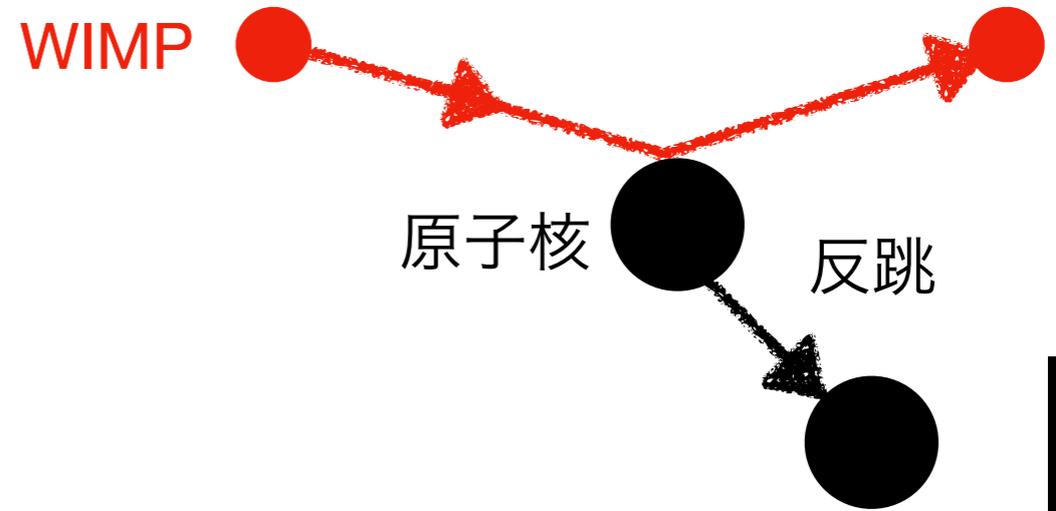
1 keV

1 MeV

1 GeV

ダークマター質量 m_{DM}

長年探索されてきた最有力候補



超軽量ダークマター (DM)

“超軽量” DM

||

“波動的” DM

ドブロイ波長

$$\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{m_{\text{DM}} v_{\text{DM}}}$$

WIMP

||

“粒子的” DM

* $v_{\text{DM}} \sim 220 \text{ km/s}$



1 μeV

1 meV

1 eV

1 keV

1 MeV

1 GeV

ダークマター質量 m_{DM}

超軽量ダークマター (DM)

“超軽量” DM

||

“波動的” DM

ドブロイ波長

$$\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{m_{\text{DM}} v_{\text{DM}}}$$

WIMP

||

“粒子的” DM

* $v_{\text{DM}} \sim 220 \text{ km/s}$



1 μeV

1 meV

1 eV

1 keV

1 MeV

1 GeV

ダークマター質量 m_{DM}

超軽量ダークマター (DM)

“超軽量” DM

||

“波動的” DM

ドブロイ波長

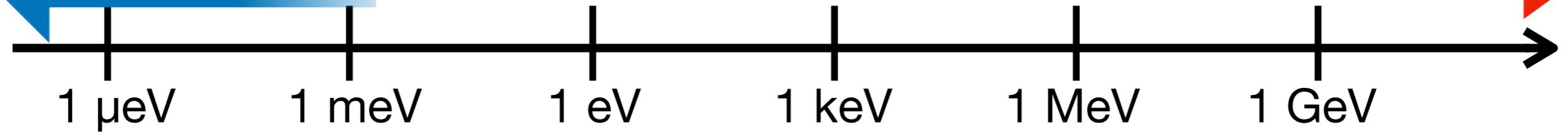
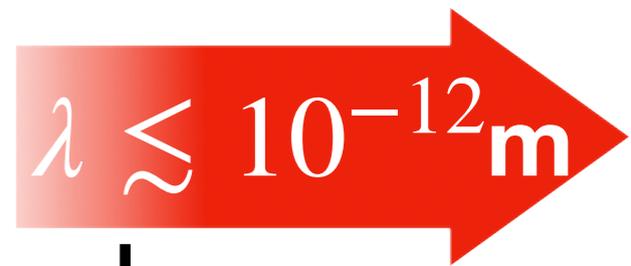
$$\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{m_{\text{DM}} v_{\text{DM}}}$$

* $v_{\text{DM}} \sim 220 \text{ km/s}$

WIMP

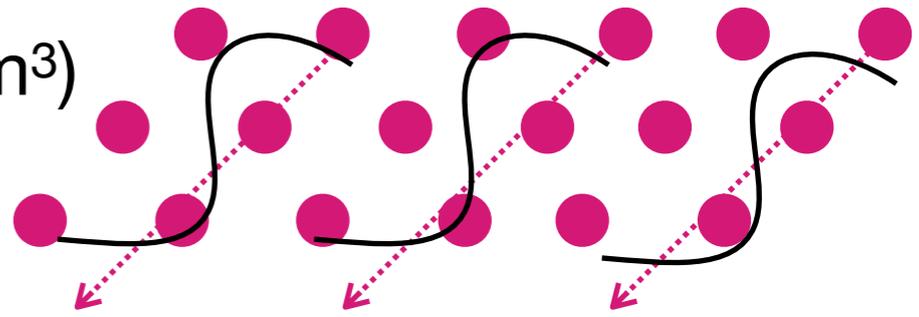
||

“粒子的” DM



ダークマター質量 m_{DM}

- 身の回りに多数存在して満ちている (0.4 GeV/cm^3)
- 長いコヒーレンスを持って
集団的に振る舞う (波としての特徴)



超軽量ダークマター候補

| | <u>ダークフォトン</u> | <u>アクシオン or Axion-like particle (ALP)</u> |
|---------|---|--|
| モチベーション | High-scale inflation モデルや超弦理論のモデル PRD 93 103520 (2016), JCAP 1206, 013 (2012) | <ul style="list-style-type: none"> アクシオン: 強いCP問題を解決 ALP: 超弦理論のモデル PRD 81 123530 (2010) |
| 光との相互作用 | $\frac{\chi}{2} F_{\mu\nu} \tilde{X}^{\mu\nu}$ $\tilde{X}_{\mu\nu}$: ダークフォトン場 $F_{\mu\nu}$: SMの電磁場 | $g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$ 3点結合 a : アクシオン場 \vec{E}, \vec{B} : SMの電場, 磁場 |
| 未知パラメータ | $\left\{ \begin{array}{l} m_\chi: \text{質量} \\ \chi: \text{相互作用の大きさ} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} m_a: \text{質量} \\ g_{a\gamma\gamma} [\text{GeV}^{-1}]: \text{相互作用の大きさ}^* \end{array} \right.$ <p>*アクシオンの場合は $g_{a\gamma\gamma} = \left(0.2 \frac{E}{N} - 0.4 \right) \frac{m_a}{\text{GeV}^2}$</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <ul style="list-style-type: none"> • DFSZモデル $E/N = 3/8$ • KSVZモデル $E/N = 0$ </div> |

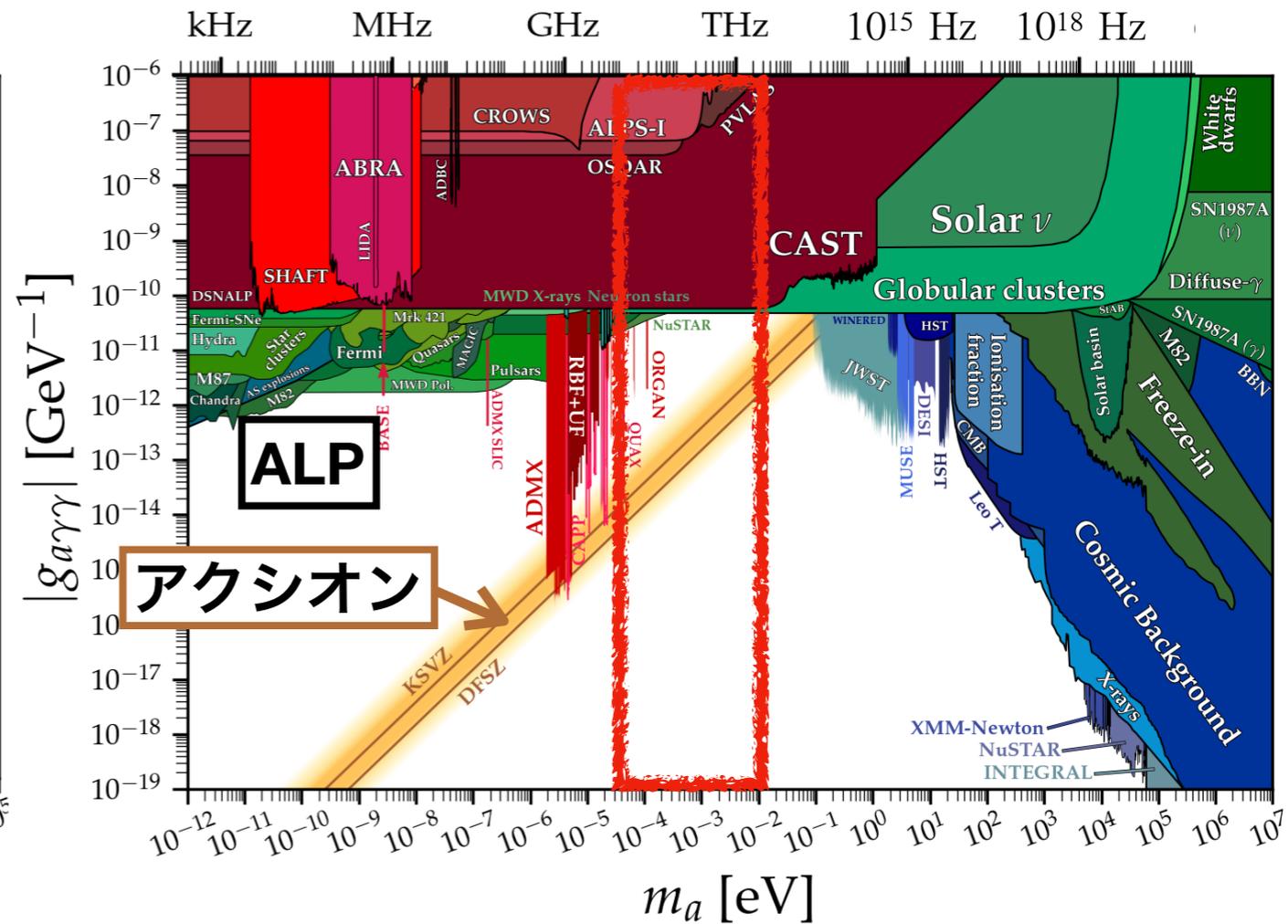
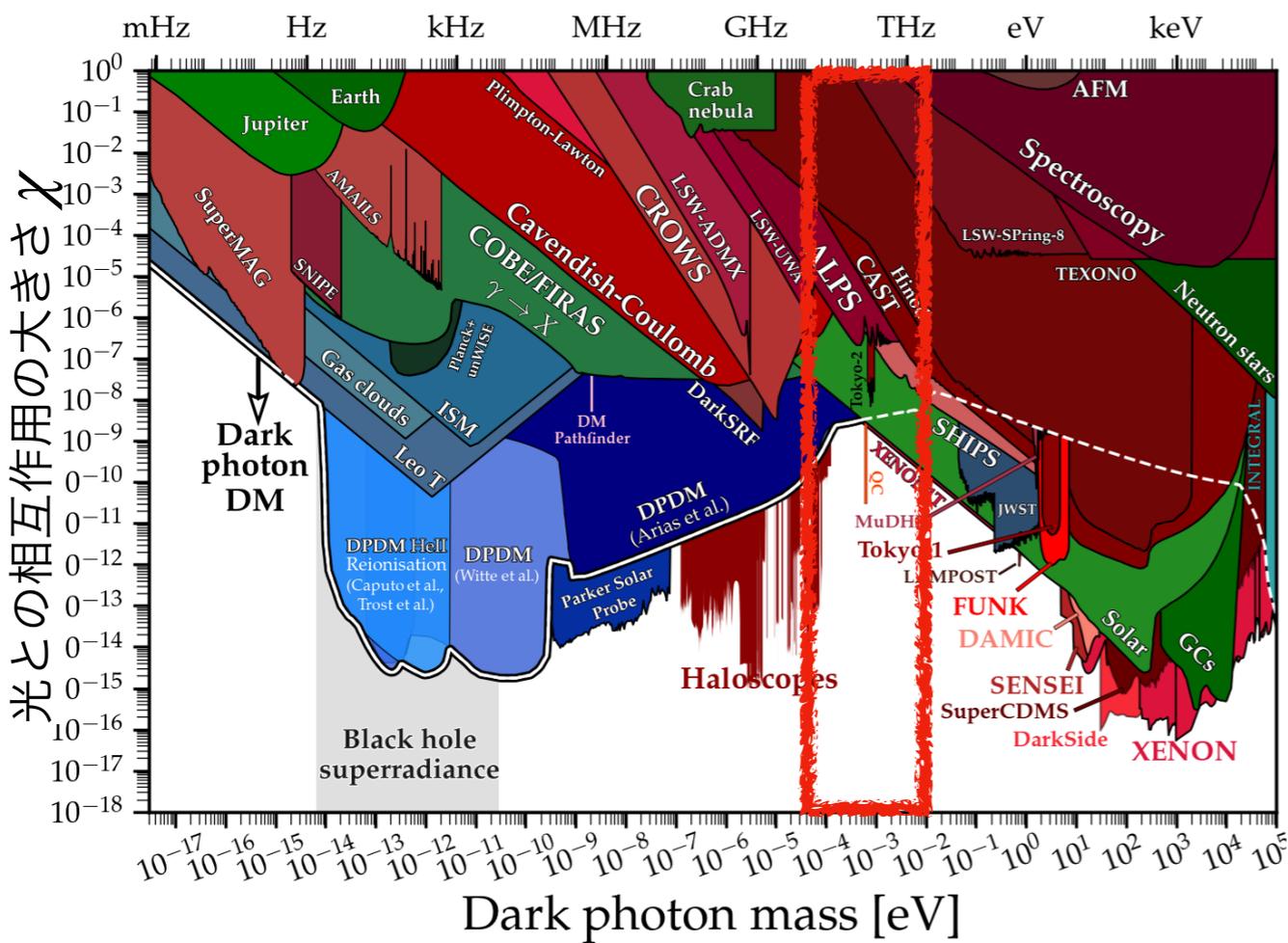
ダークフォトン・アクシオン探索の現状



$h\nu = mc^2$ で光のエネルギーとしてかくと

光の周波数

光の周波数



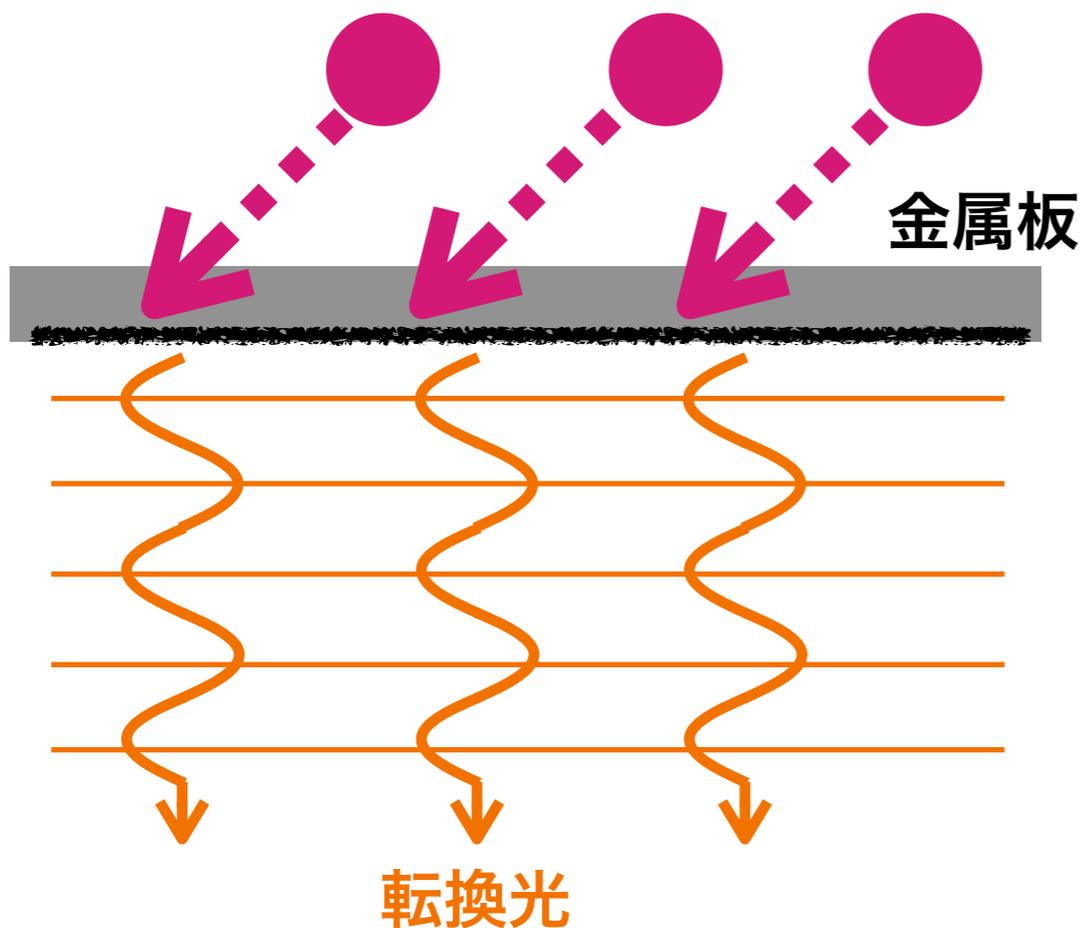
GHzとTHzの間 (質量 \approx meV) は狙い目!

ダークフォトンの光への転換

電磁氣的境界(金属表面)で転換光を垂直に放出!

ダークマターとして漂う
ダークフォトン: 質量 m_{DP}

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{\chi}{2} F_{\mu\nu} \tilde{X}^{\mu\nu}$$



ダークマターのコヒーレンスを引き継ぎ、異なる位置からも同じ位相のコヒーレントな光が生じる

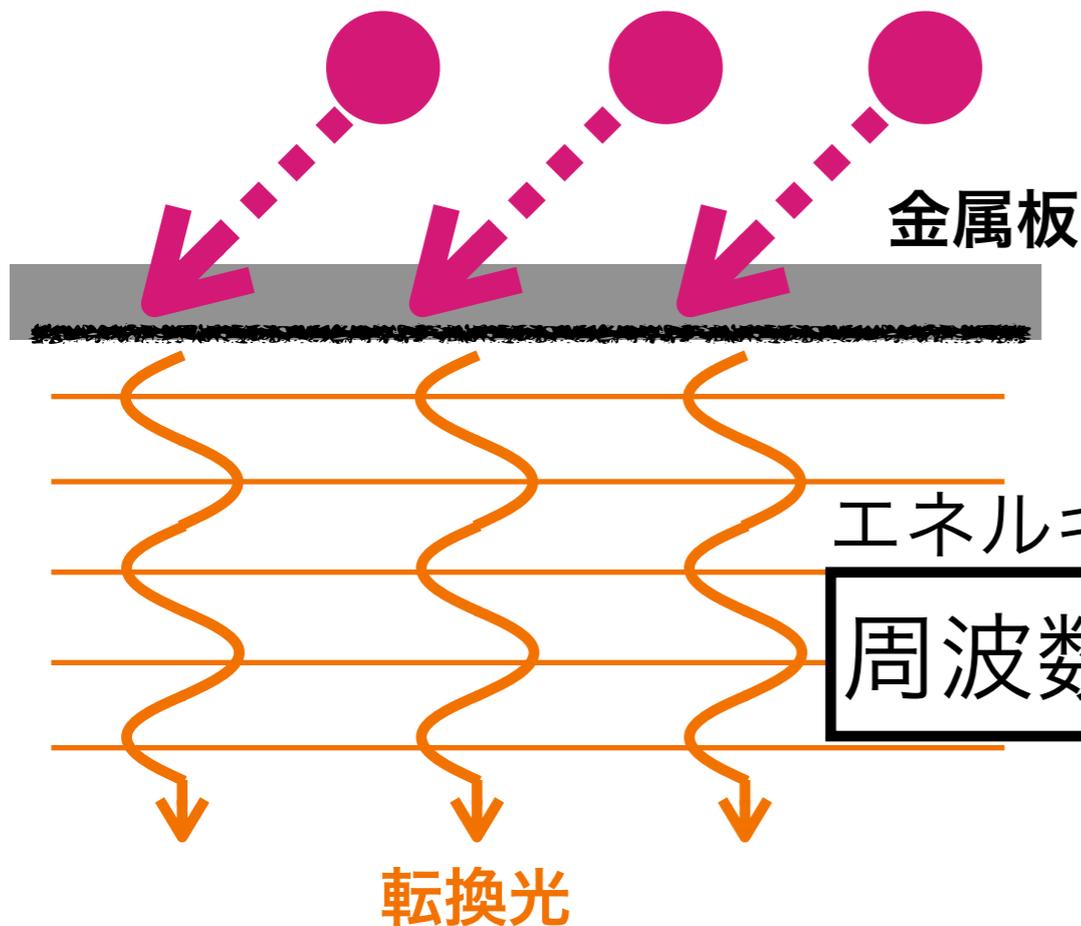
ほぼ垂直に放射! ($\theta < 0.06^\circ$)

ダークフォトンの光への転換

電磁氣的境界(金属表面)で転換光を垂直に放出!

ダークマターとして漂う
ダークフォトン: 質量 m_{DP}

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{\chi}{2} F_{\mu\nu} \tilde{X}^{\mu\nu}$$



エネルギー保存則 $*v_{\text{DM}}$ が小さいとして運動量は ~ 0

周波数 $h\nu_0 \sim$ ダークフォトン質量 $m_{\text{DP}}c^2$

ex) $100 \mu\text{eV} = 24 \text{ GHz}$
 $1 \text{ meV} = 240 \text{ GHz}$

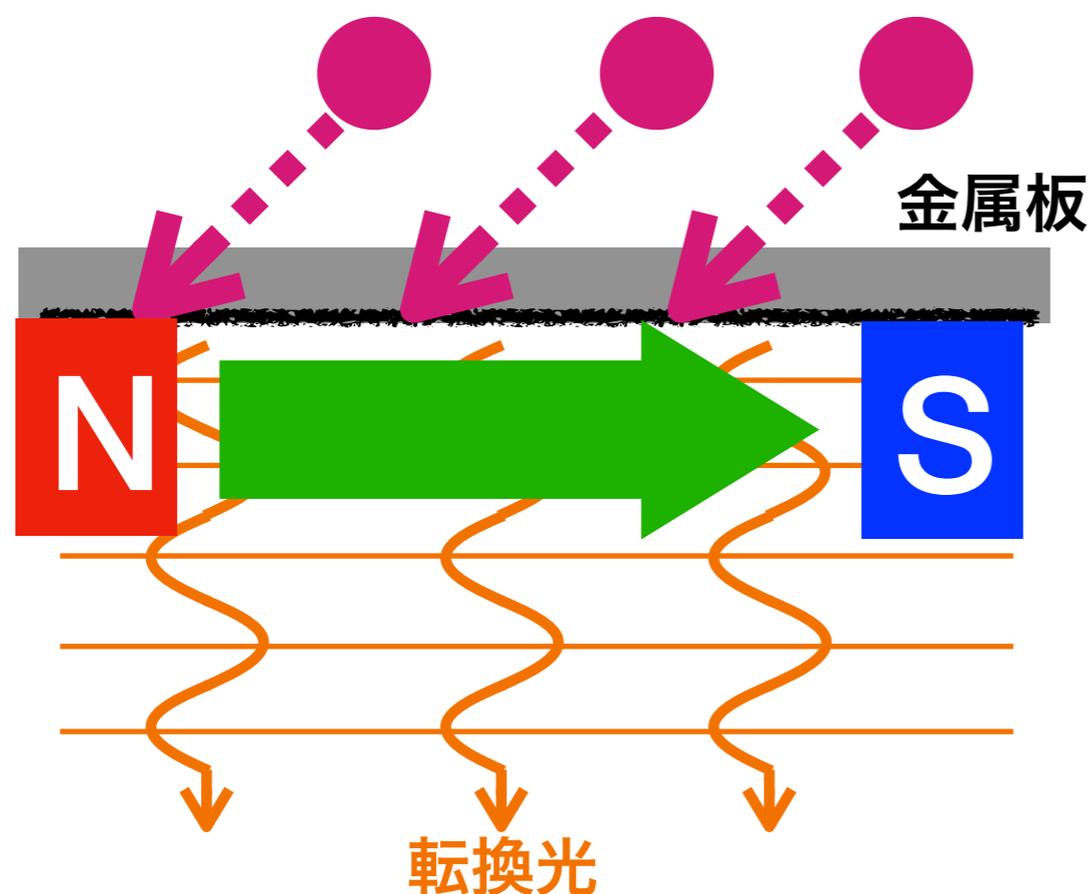
電波を生じる!

ほぼ垂直に放射! ($\theta < 0.06^\circ$)

アクシオンの場合



ダークマターとして漂う
アクシオン: 質量 m_a



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

磁場が必要

ダークフォトン
の時と同じ

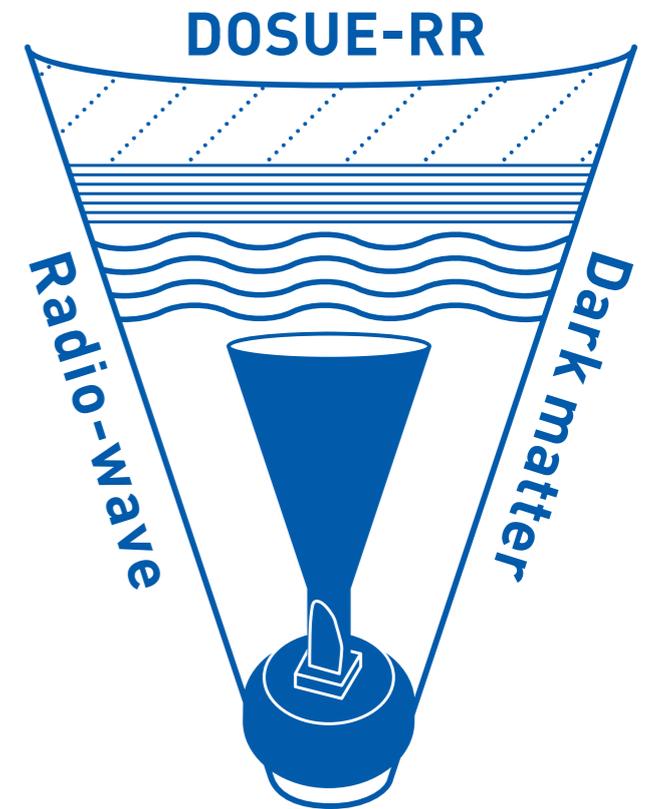
周波数 $h\nu_0 \sim$ アクシオン質量 $m_a c^2$

ほぼ垂直に放射! ($\theta < 0.06^\circ$)

ど す え - ダブルアール

DOSUE-RR

Dark-photon dark-matter **O**bserving **S**ystem
for **U**n-**E**xplored **R**adio-**R**ange



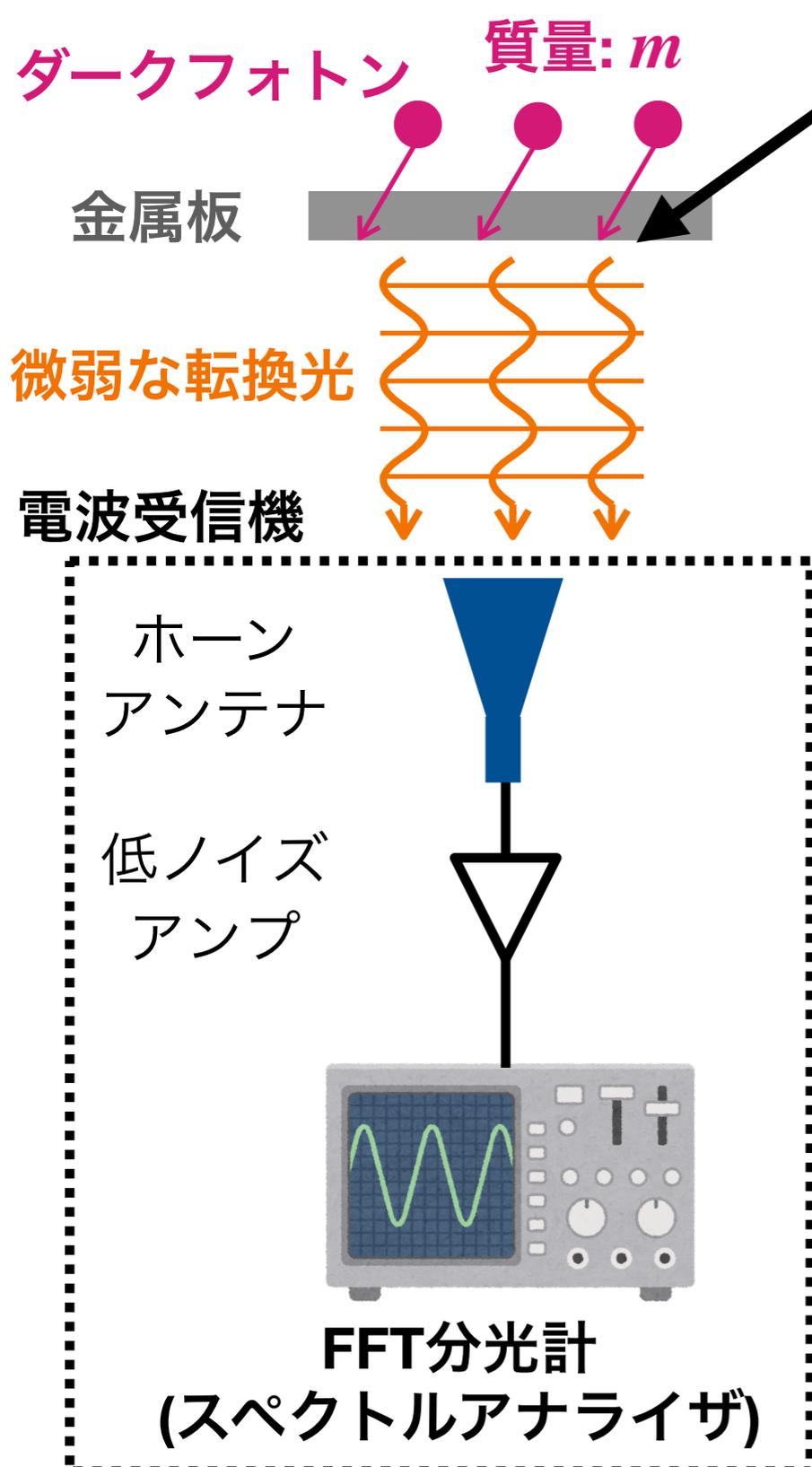
電波受信機を用いたダークマター探索実験

今の所、ダークフォトンメイン

研究機関：岡山大、京都大、大阪公立大、諏訪理科大、筑波大、
KEK、情報通信研究機構

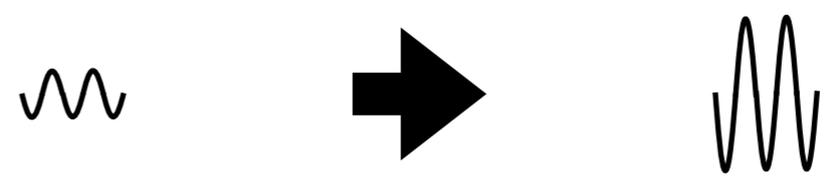
メンバー：15人

転換光の検出原理

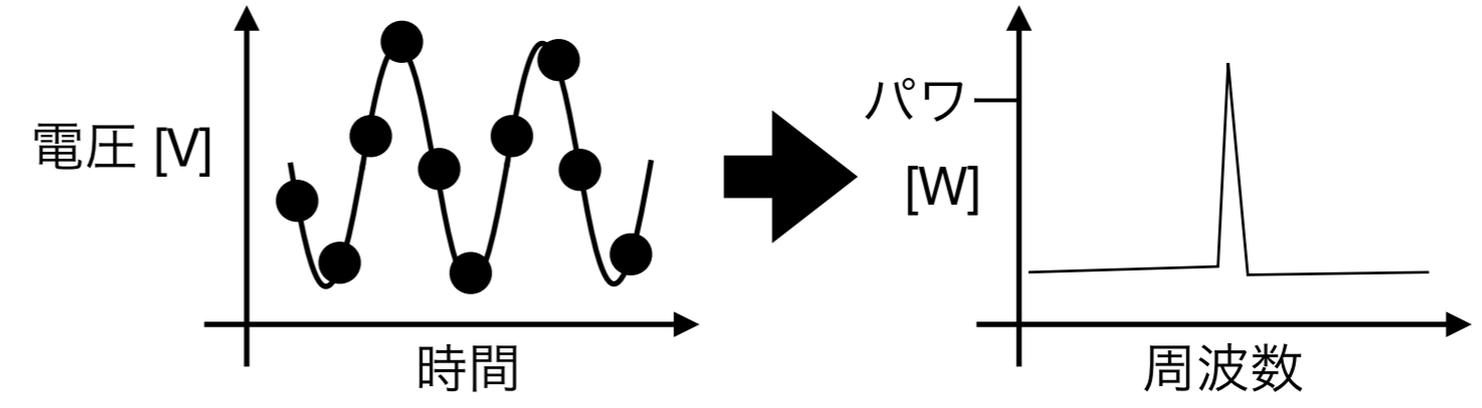


- 相互作用 χ^2 に比例した効率で転換
- 微弱な信号として常に光が出ているはず
- 超軽量なダークフォトン多数存在

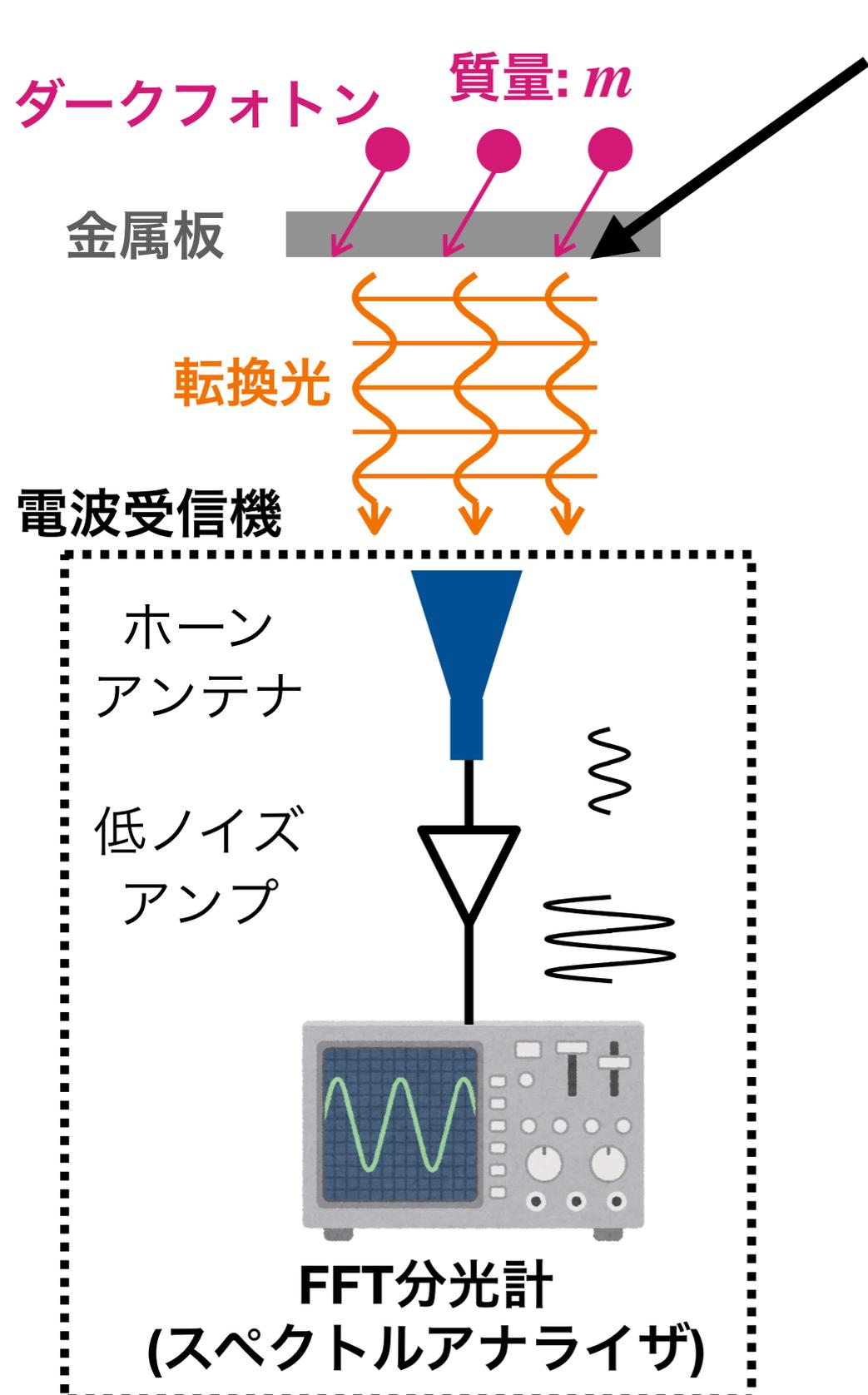
- 微弱な電気信号を増幅して測定



- フーリエ変換を用いて周波数スペクトルを測定

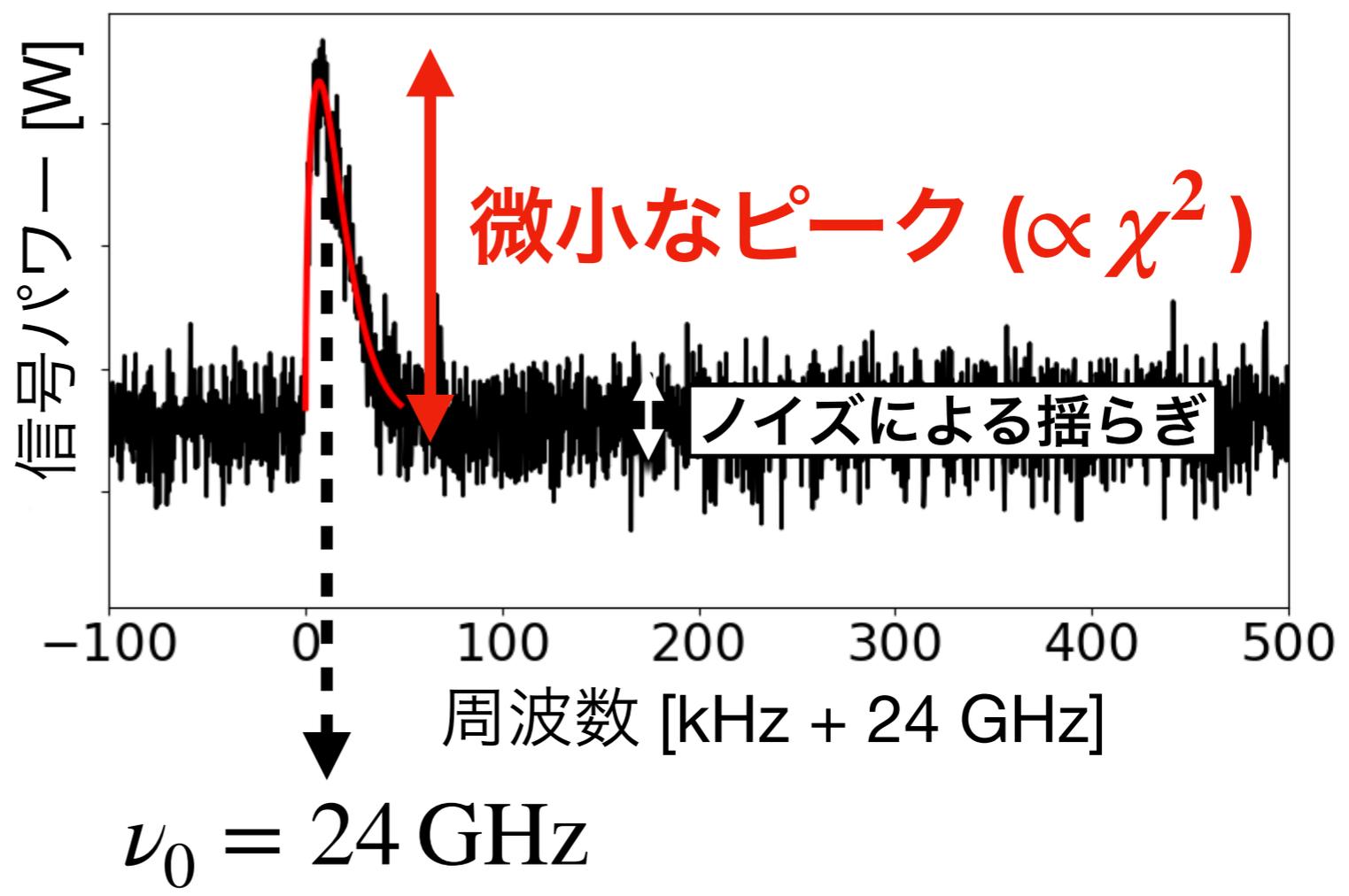


転換光の検出原理



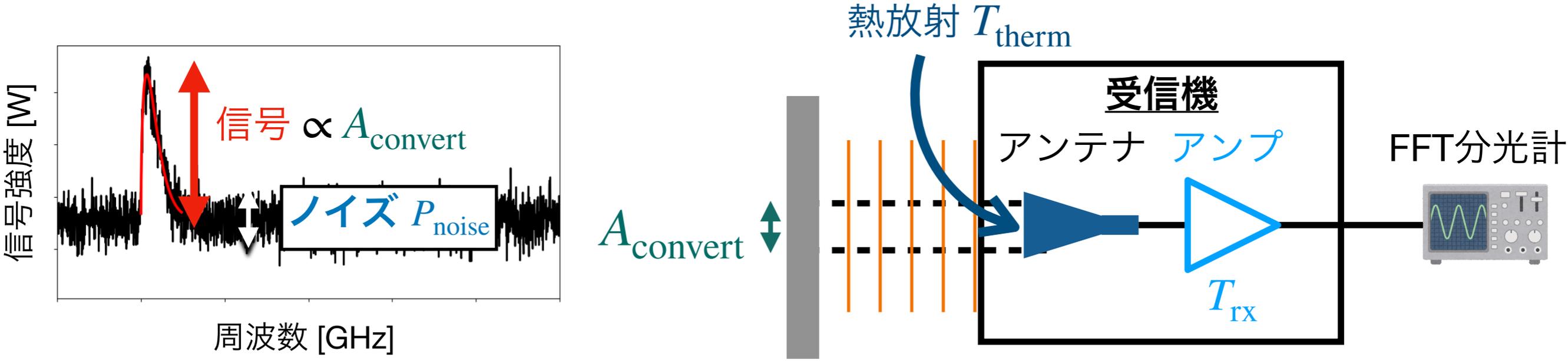
- 相互作用 χ^2 に比例した効率で転換
- 微弱な信号として常に光が出ているはず

信号の周波数スペクトル @ $m = 100 \mu\text{eV}$



ノイズの中から微小なピークを探す!

受信機による実験の感度



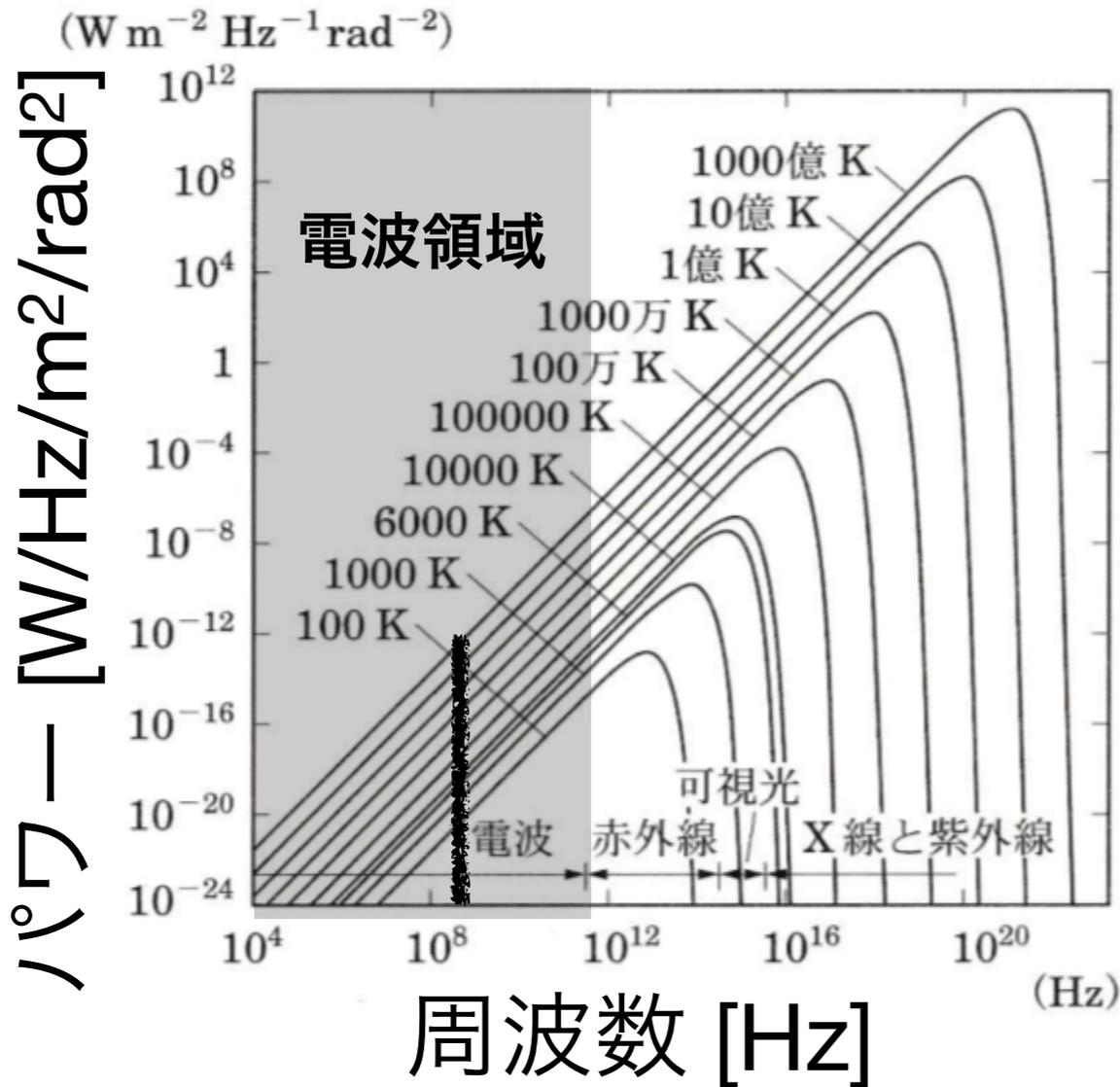
| 必要なもの | 依存するもの |
|--|--|
| 大きい転換する面積 | アンテナが集光する面積 $A_{\text{convert}} [\text{m}^2]$ |
| 小さいノイズ $P_{\text{noise}} [\text{W}] \left(\propto T_{\text{sys}} / \sqrt{t} \right)$ | $T_{\text{sys}} = \begin{cases} \text{アンプのノイズ } (T_{\text{rx}} [\text{K}] \approx 10 \text{ K} \ll 300 \text{ K}) \\ \text{アンテナに入る熱放射 } (T_{\text{therm}} [\text{K}]) \end{cases}$ |
| | 測定時間 $t [\text{sec}]$ |

$$\chi \text{ の感度 } \propto \left(\frac{P_{\text{noise}} [\text{W}]}{A_{\text{convert}} [\text{m}^2]} \right)^{\frac{1}{2}} \propto \left(\frac{T_{\text{sys}} [\text{K}] / \sqrt{t [\text{sec}]} }{A_{\text{convert}} [\text{m}^2]} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ノイズ温度

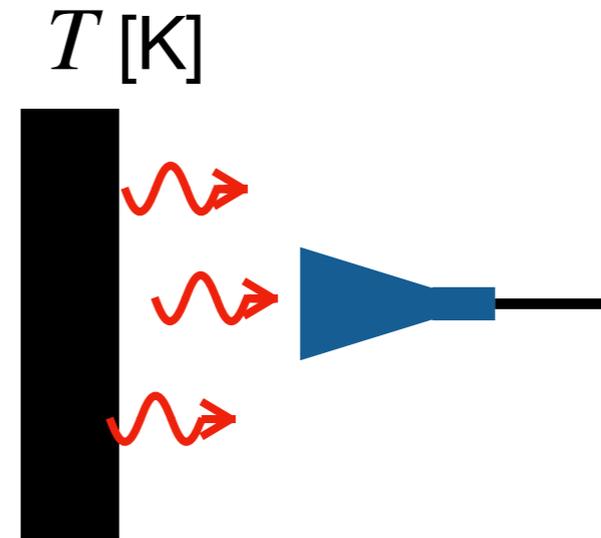
プランクの公式 (黒体放射)

温度で分布が決まる



アンテナを T [K] で完全に覆えば...

黒体放射源



$$\text{ノイズパワー} = k_B T \text{ [W/Hz]}$$

ボルツマン定数 $W=J/sec$
 $1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$

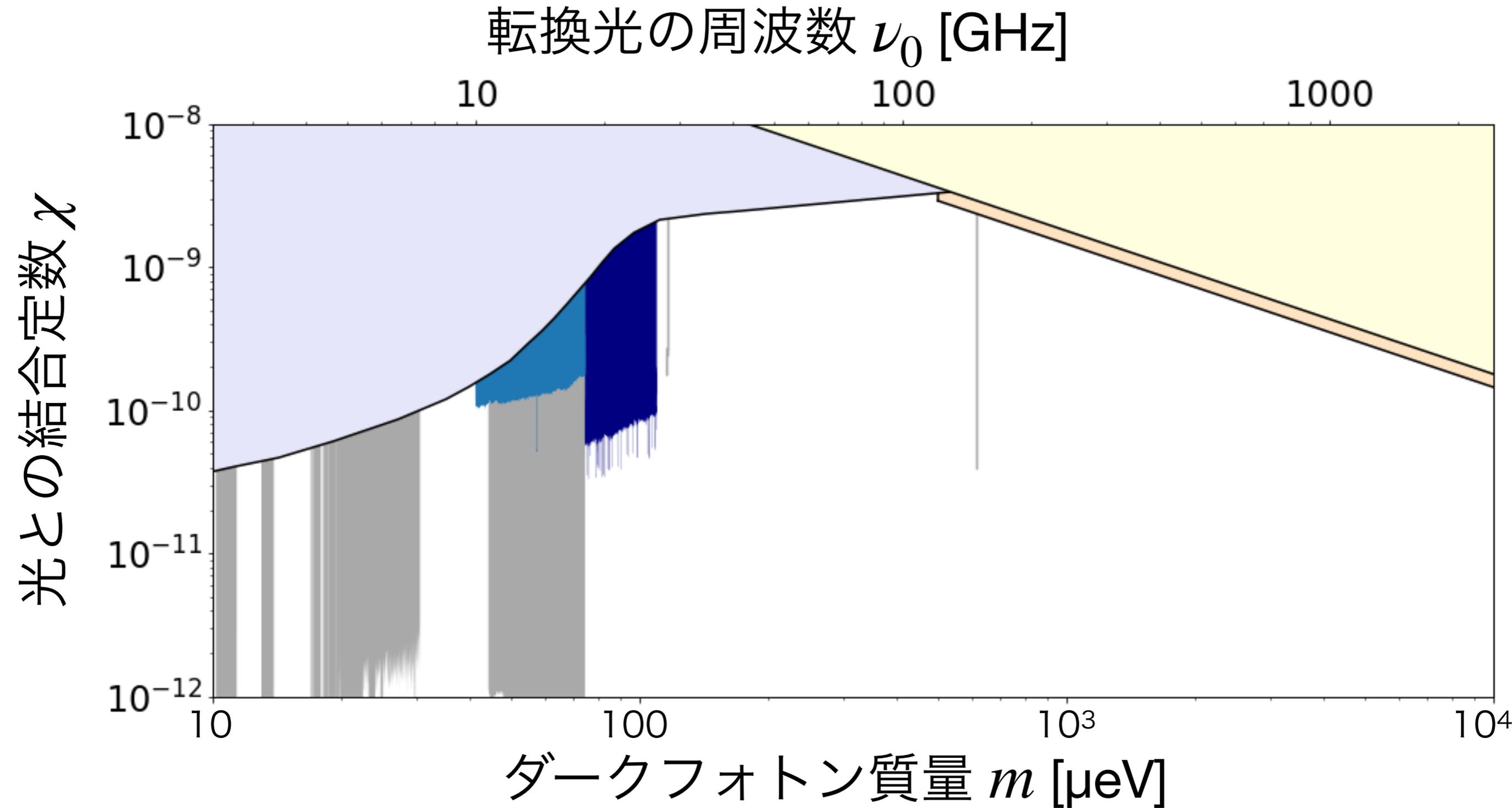
温度[K]に比例したノイズ[W/Hz]を受け取る

温度が良いノイズ指標になる

電波領域では

$$\text{パワー [W]} \propto \text{温度 } T[\text{K}]$$

DOSUEのこれまでの結果



DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

1000

光との結合定数 χ

10^{-8}
 10^{-9}
 10^{-10}
 10^{-11}
 10^{-12}

10

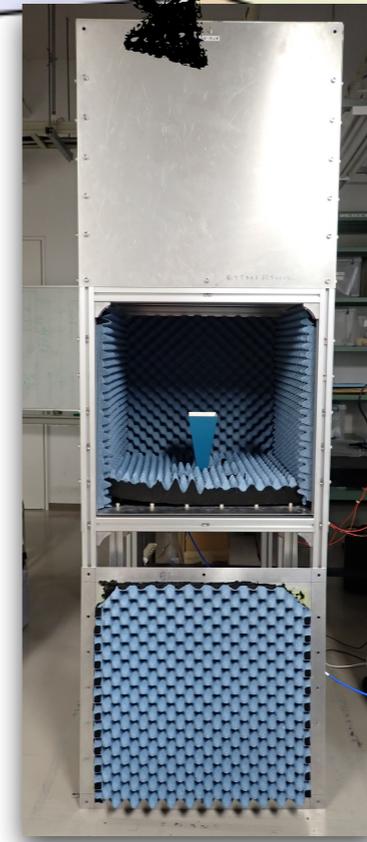
100

10^3

10^4

ダークフォトン質量 m [μeV]

10-18 GHz
PRD 109, 012008



DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

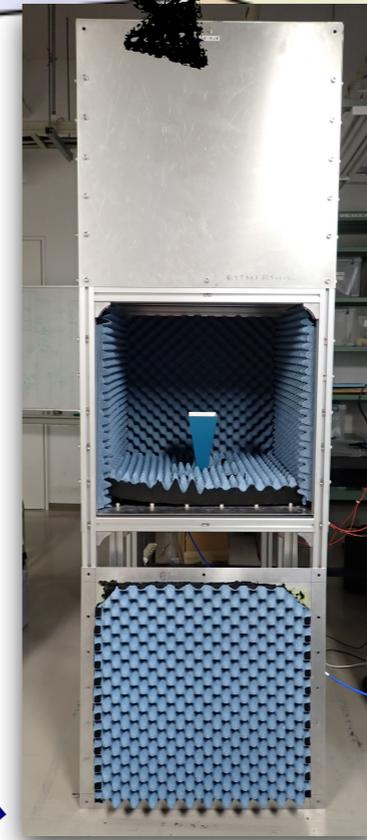
1000

光との結合定数 χ

10^{-8}
 10^{-9}
 10^{-10}
 10^{-11}
 10^{-12}

10-18 GHz
PRD 109.012008

18-26.5 GHz
PRL 130.071805



ダークフォトン質量 m [μeV]

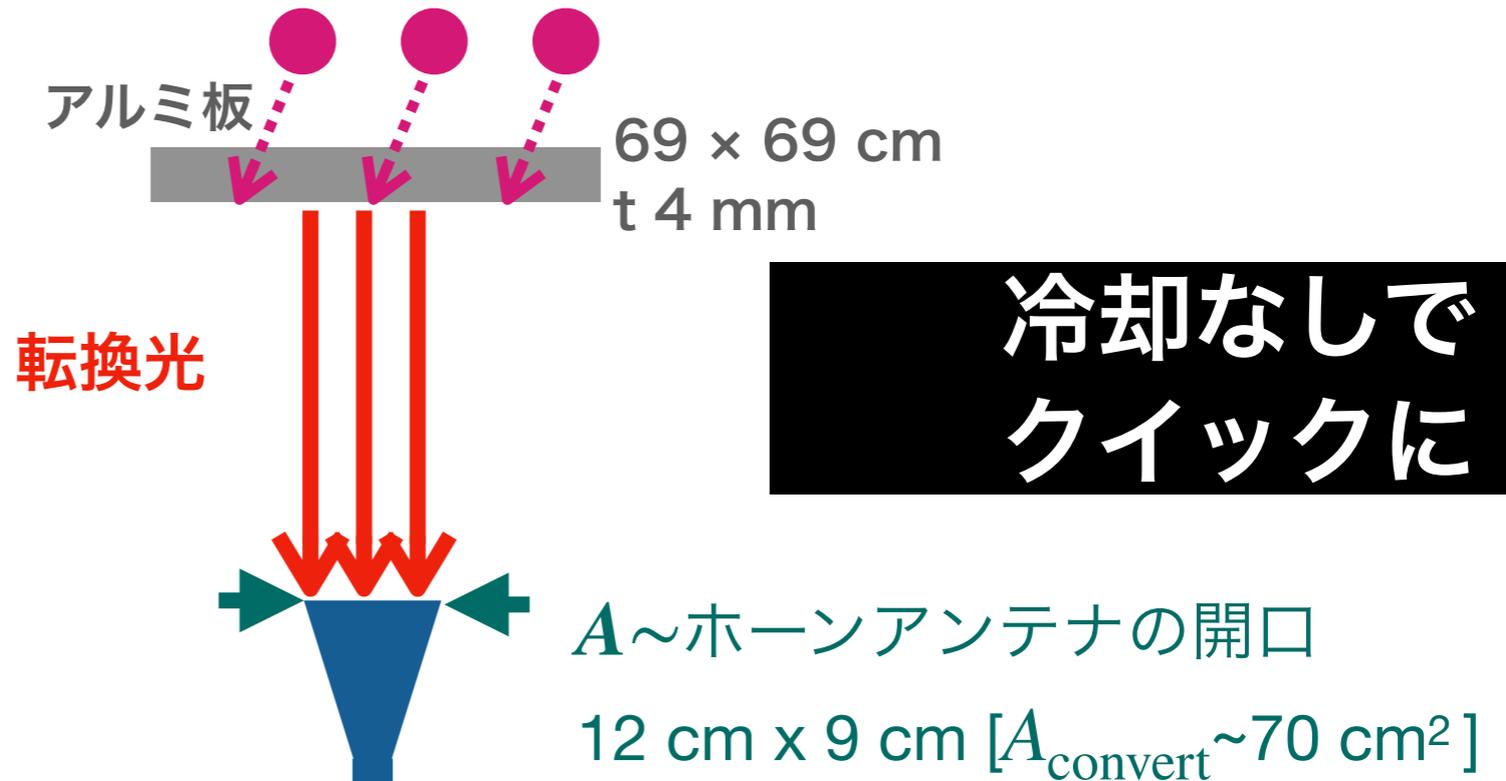
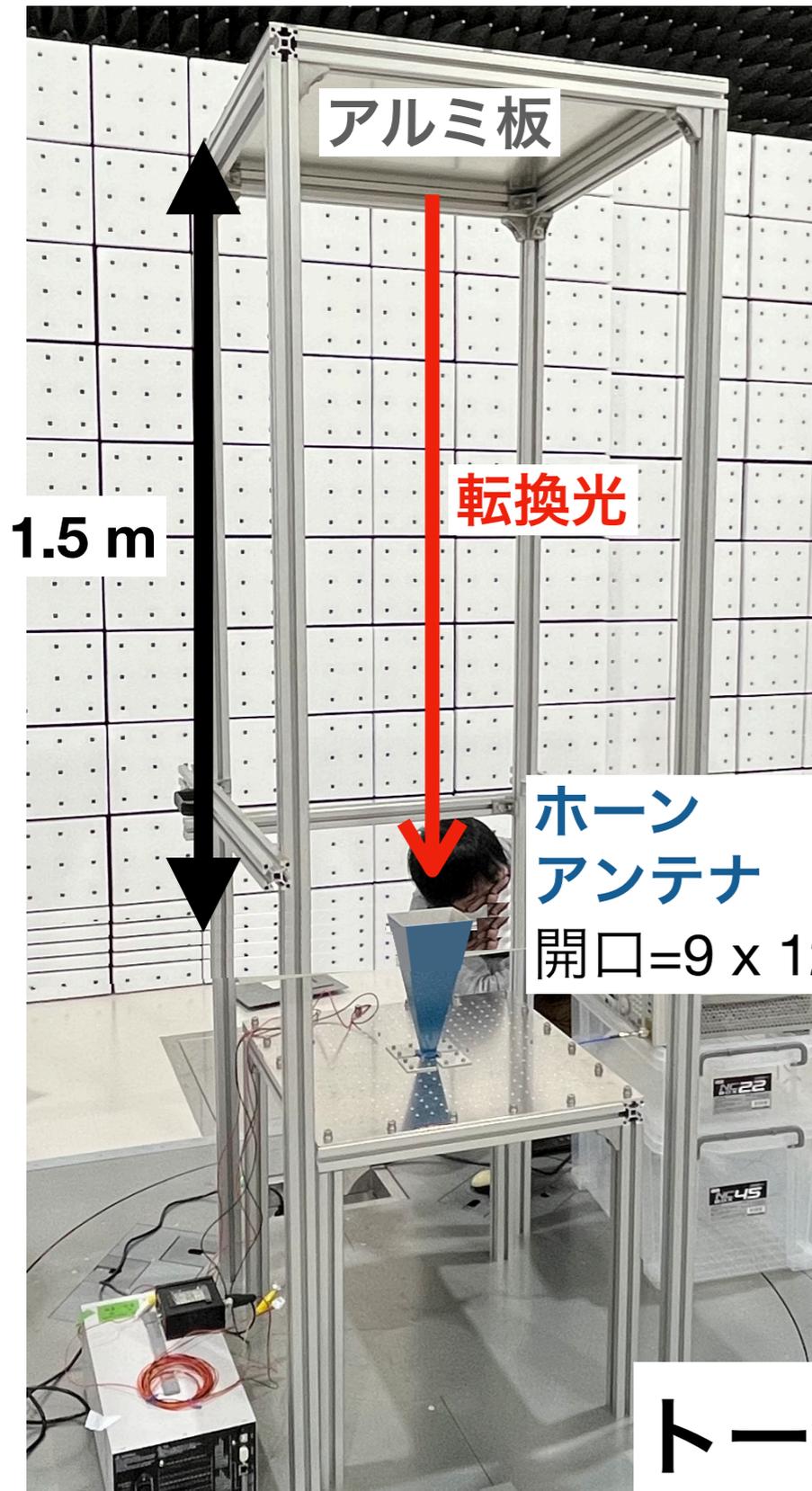
10

100

10^3

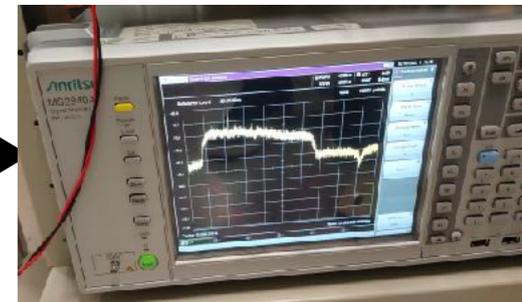
10^4

10-18 GHz 帯 (J-band) のセットアップ

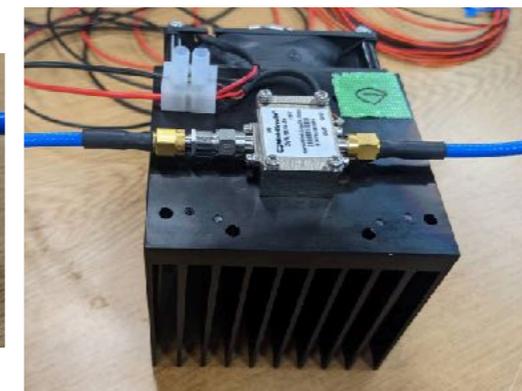


低ノイズアンプ
+34dB

アンプ
+38 dB

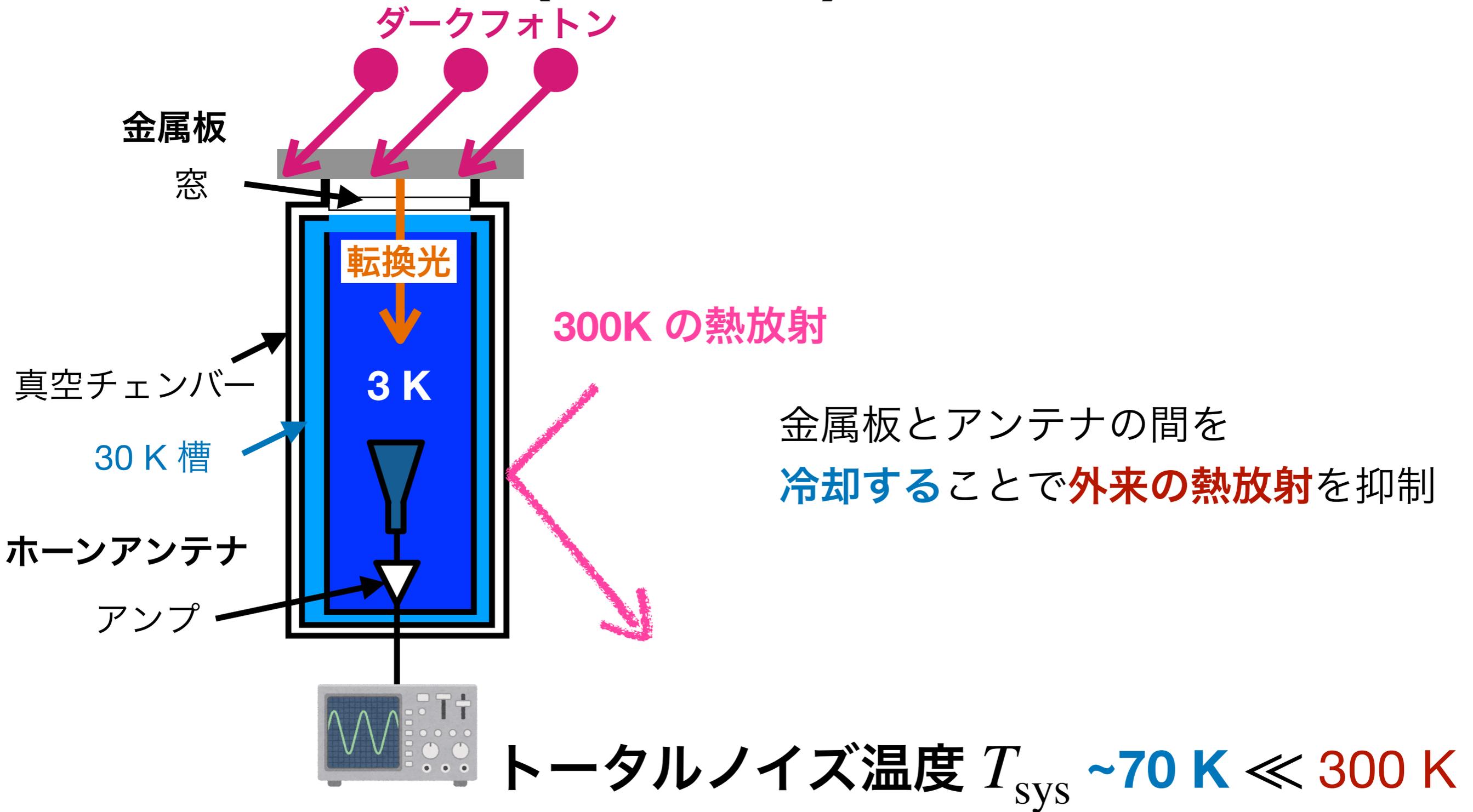


スペクトル
アナライザ
アンリツ MS2840A

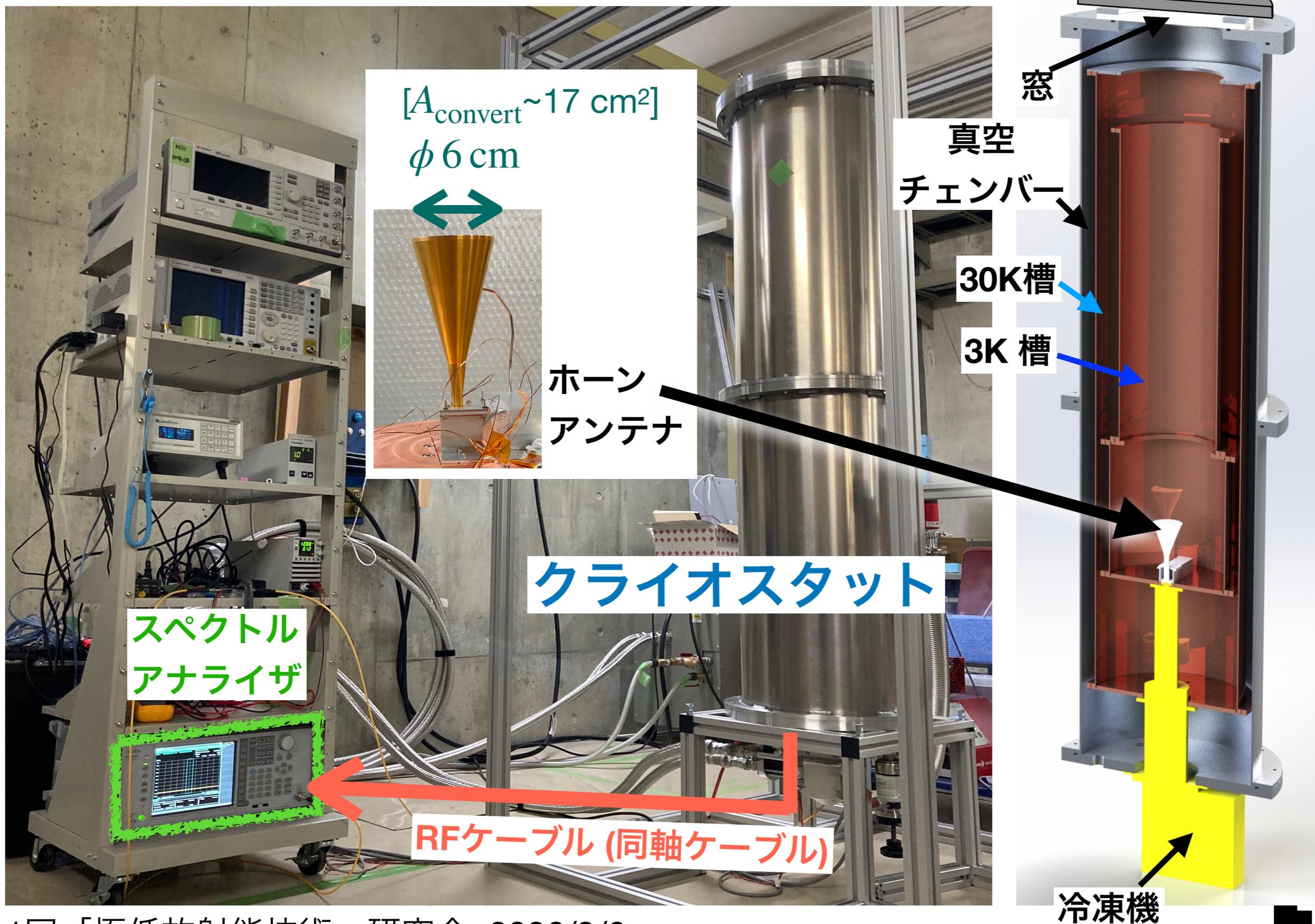


トータルノイズ温度 $T_{\text{sys}} \sim T_{\text{therm}} \sim 300 \text{ K}$

18—26.5 GHz (K-band) のセットアップ



冷却系 セットアップ



DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

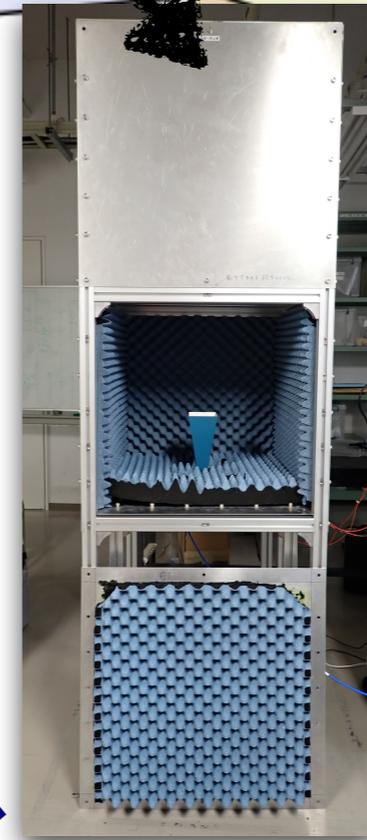
1000

光との結合定数 χ

10^{-8}
 10^{-9}
 10^{-10}
 10^{-11}
 10^{-12}

10-18 GHz
PRD 109.012008

18-26.5 GHz
PRL 130.071805



ダークフォトン質量 m [μeV]

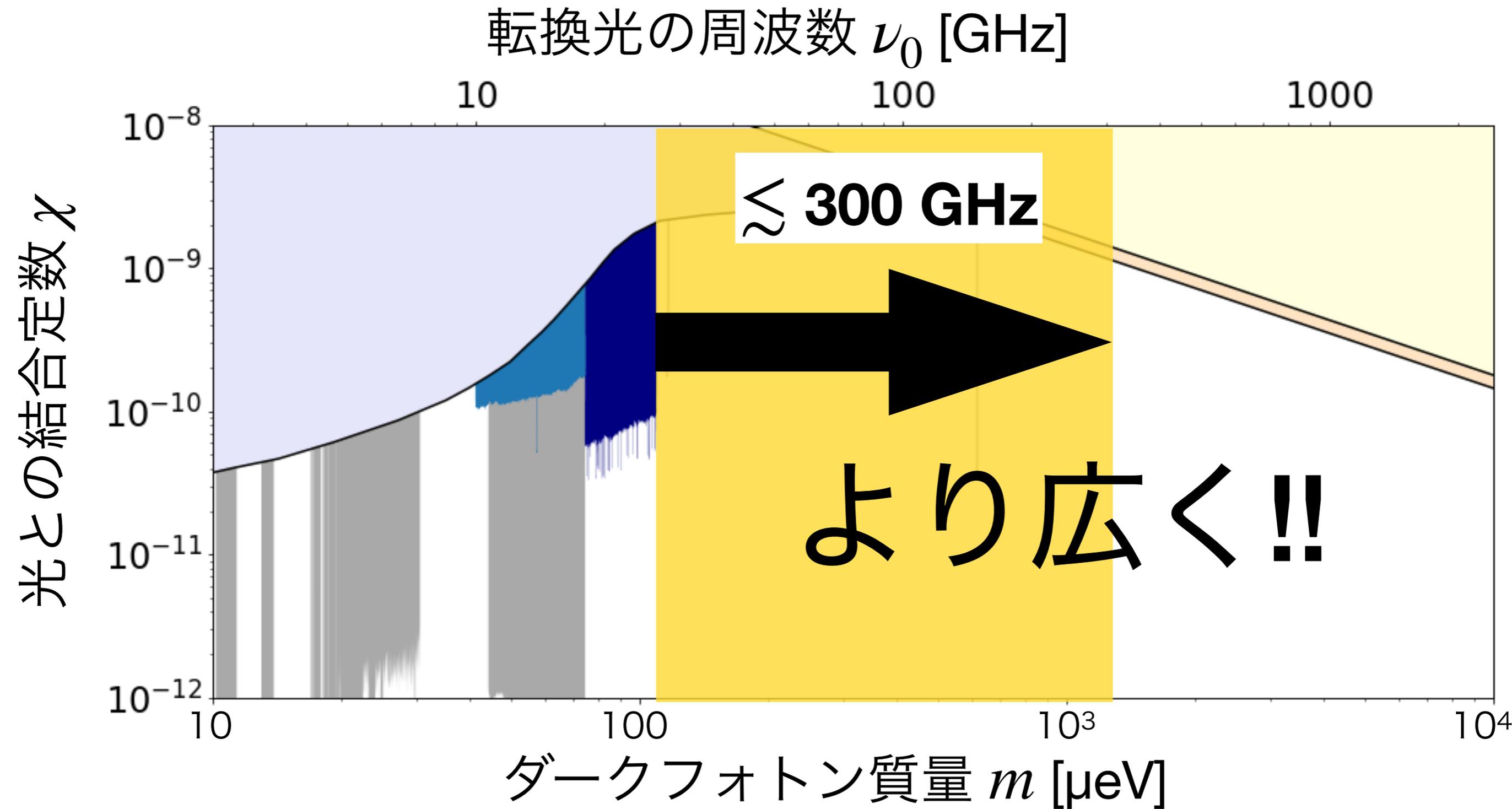
10

100

10^3

10^4

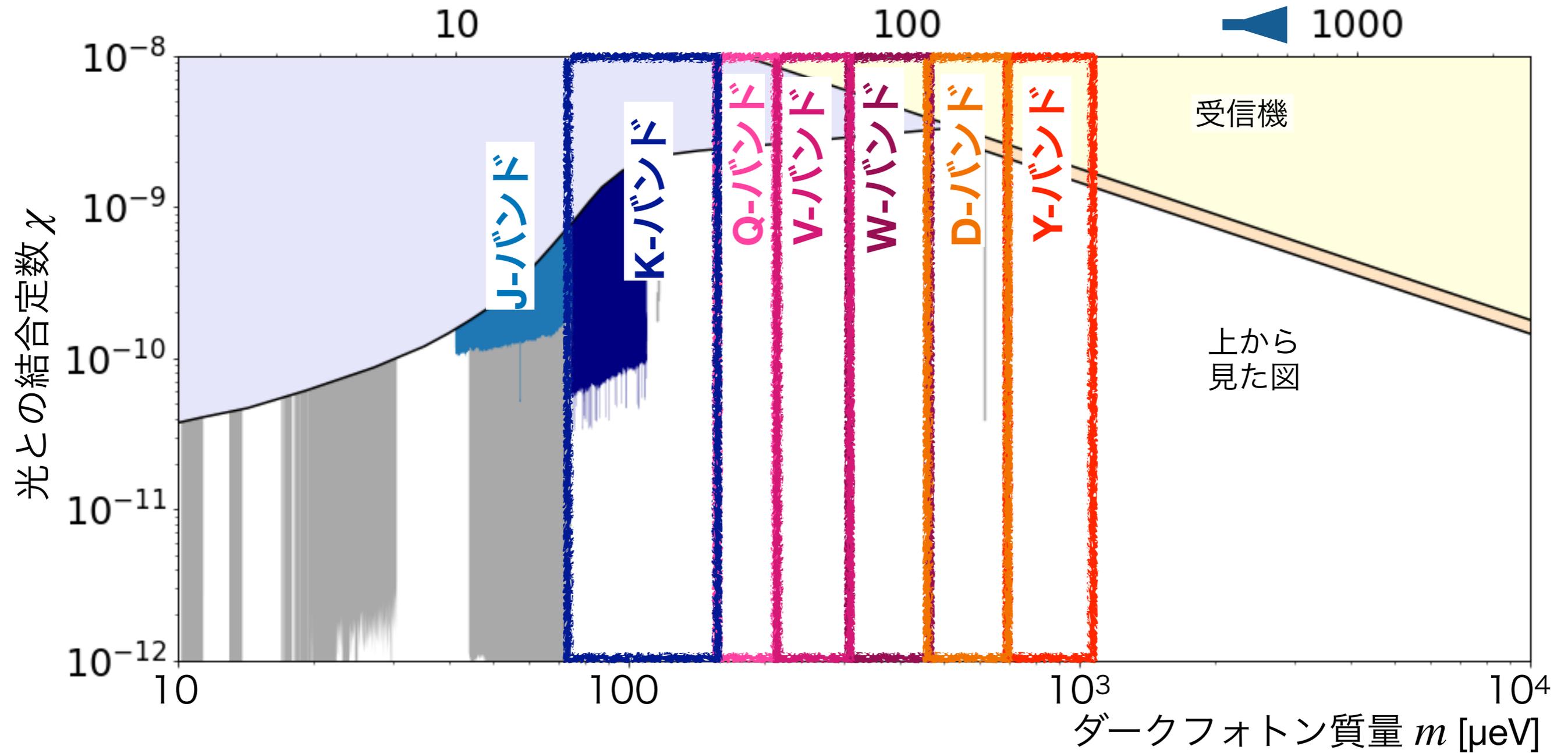
DOSUEの現在



周波数帯を拡大中!

放物面ミラー

転換光の周波数 ν_0 [GHz]



周波数帯を拡大中!

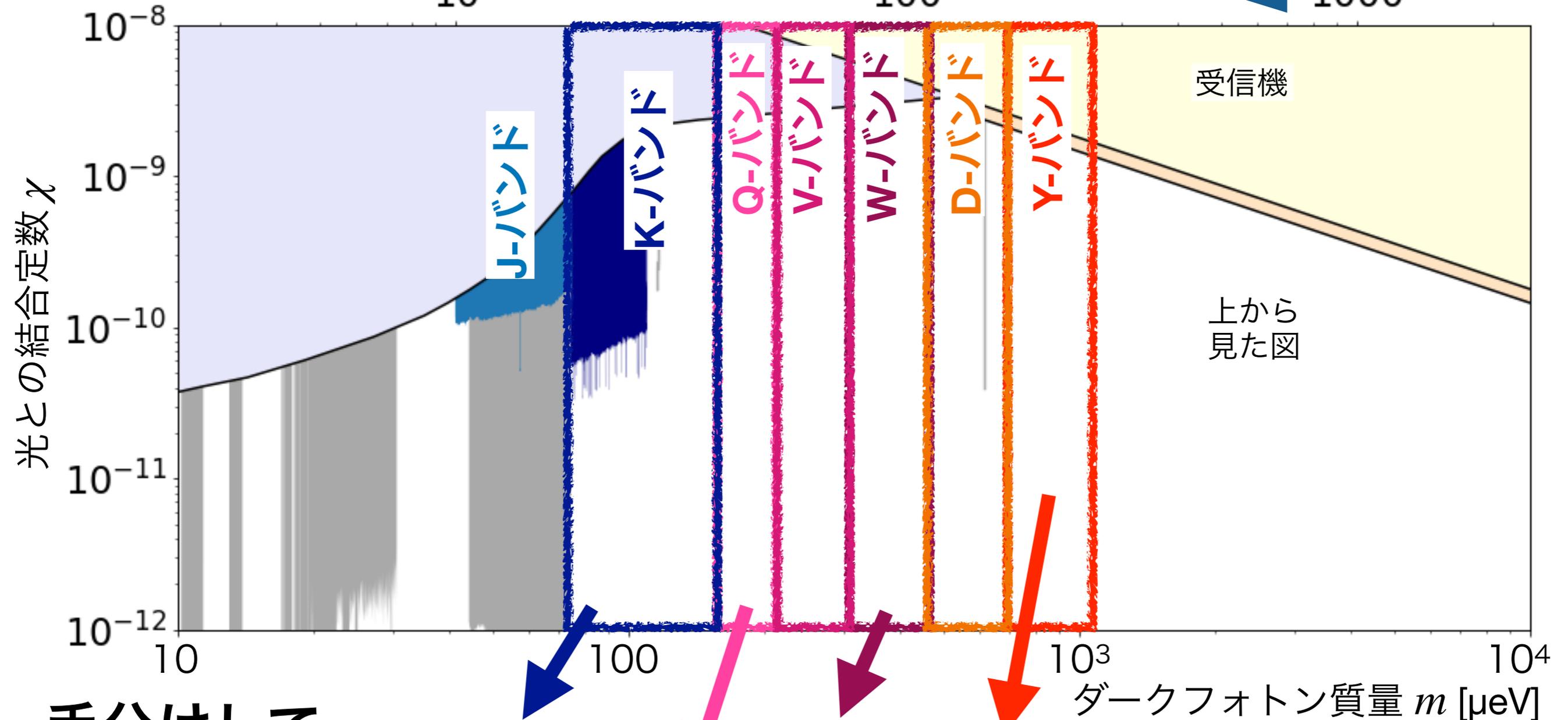
放物面ミラー

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

1000



手分けして
進行中!

京大, 筑波大

諏訪理科大

KEK

岡山大, 京大
+NICT, 大阪公立, 諏訪理科

周波数帯を拡大中!

放物面ミラー

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

1000

光との結合定数 χ

10^{-8}

10^{-9}

10^{-10}

10^{-11}

10^{-12}

10

100

10^3

10^4

受信機

上から見た図

既存セットアップを改造

手分けして
進行中!

京大, 筑波大

諏訪理科大

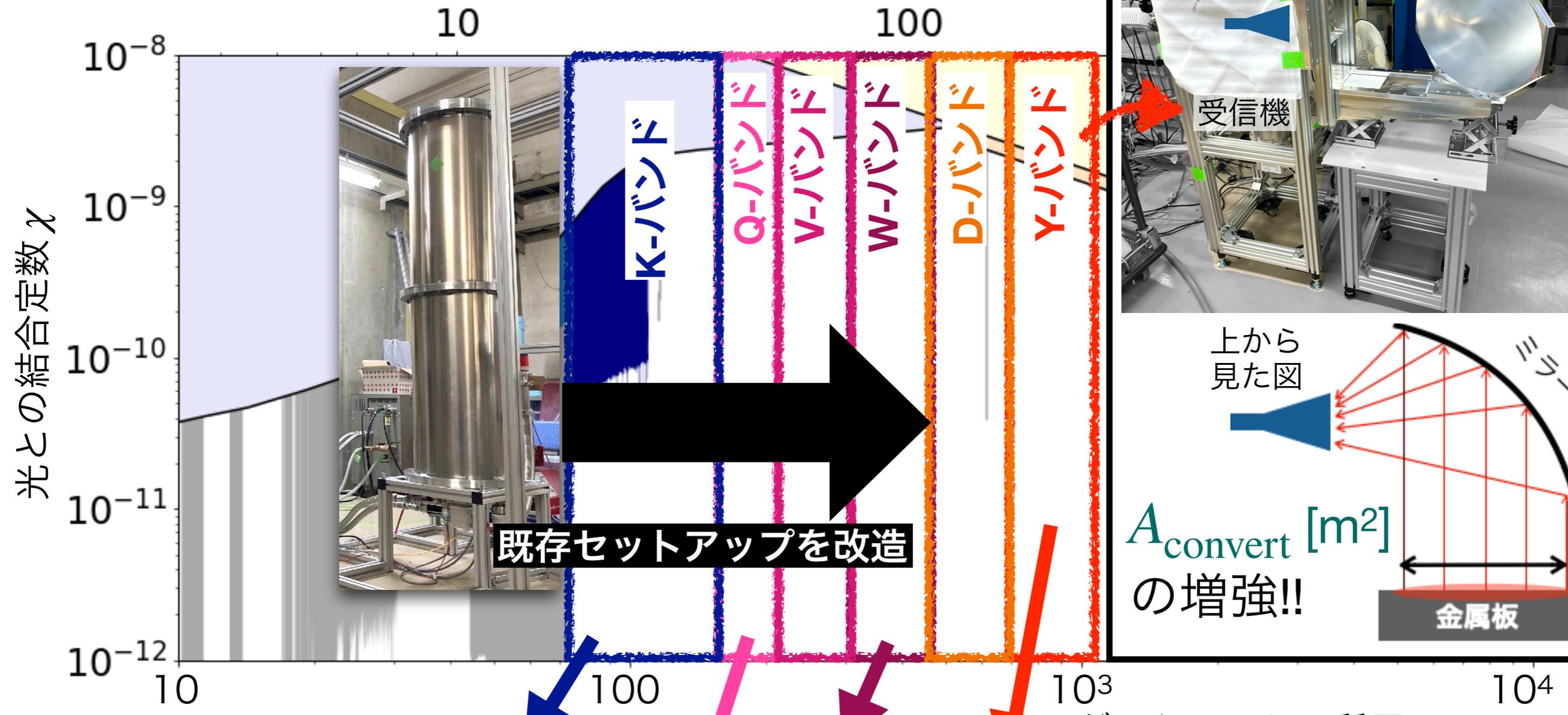
KEK

岡山大, 京大
+NICT, 大阪公立, 諏訪理科

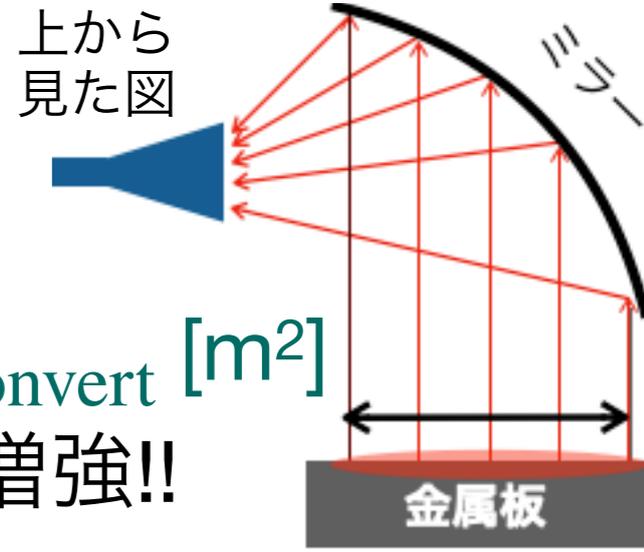
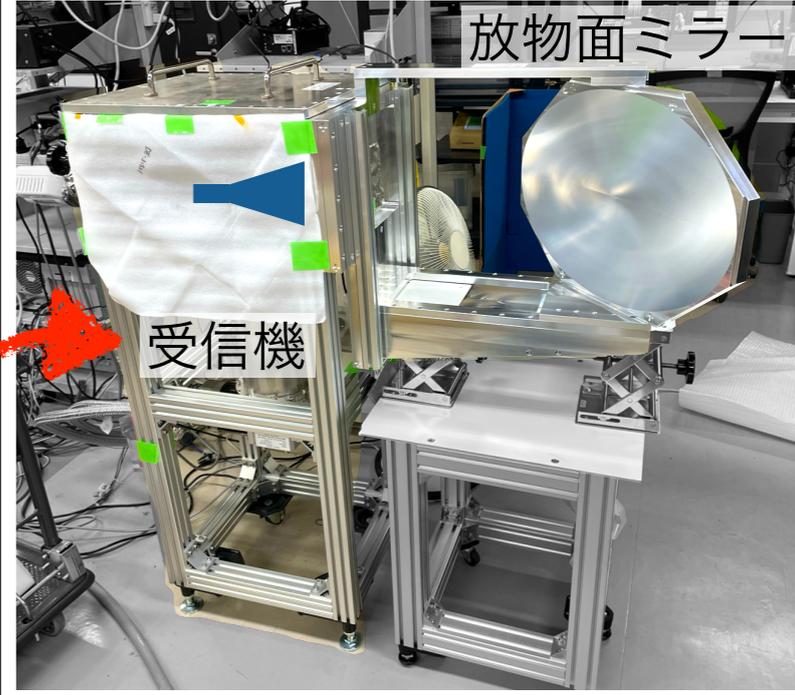
ダークフォトン質量 m [μeV]

周波数帯を拡大中!

轉換光の周波数 ν_0 [GHz]



集光ミラーを導入した
新受信機の開発



手分けして
進行中!

京大, 筑波大

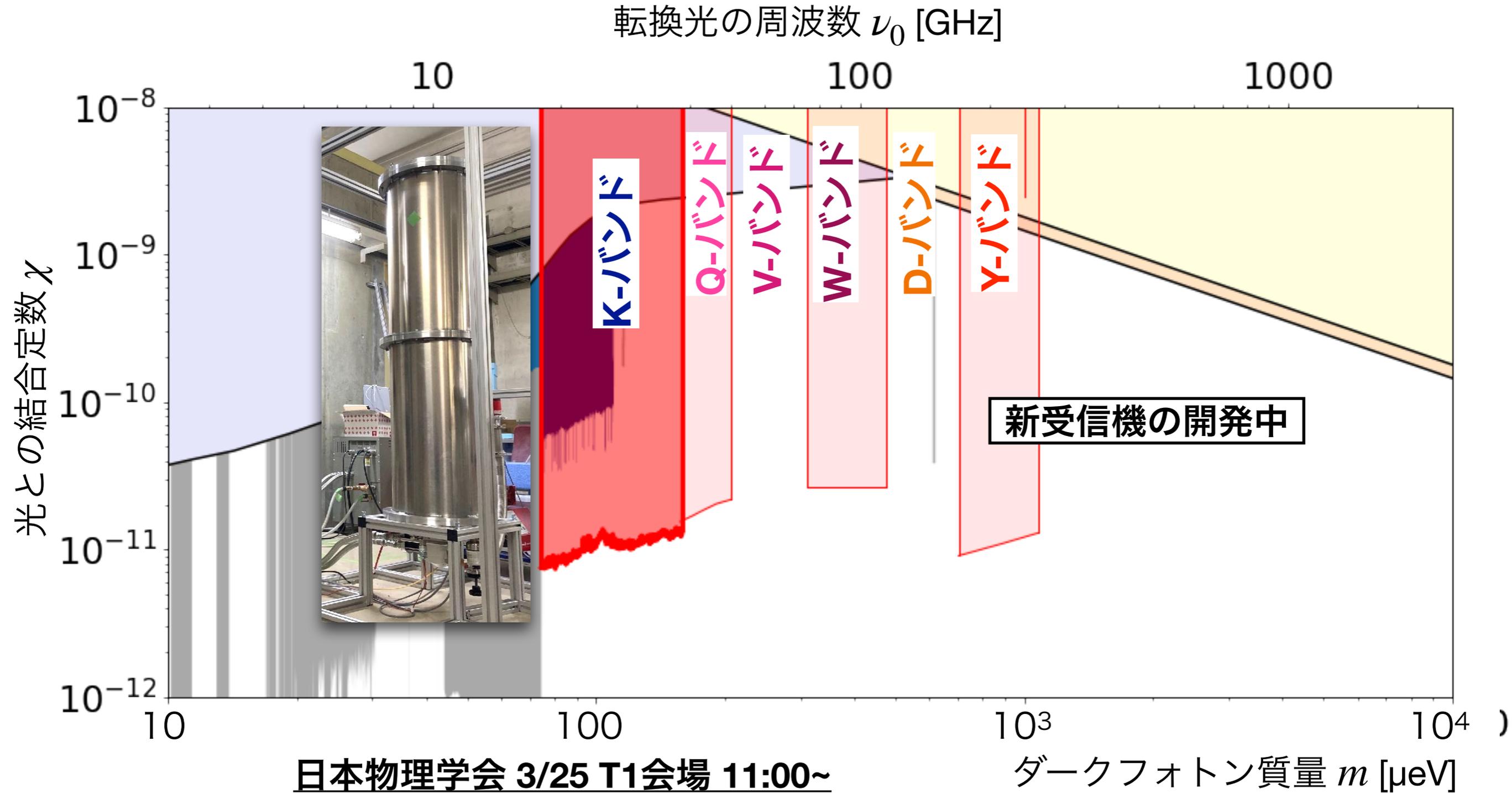
諏訪理科大

KEK

岡山大, 京大
+NICT, 大阪公立, 諏訪理科

ダークフォトン質量 m [μeV]

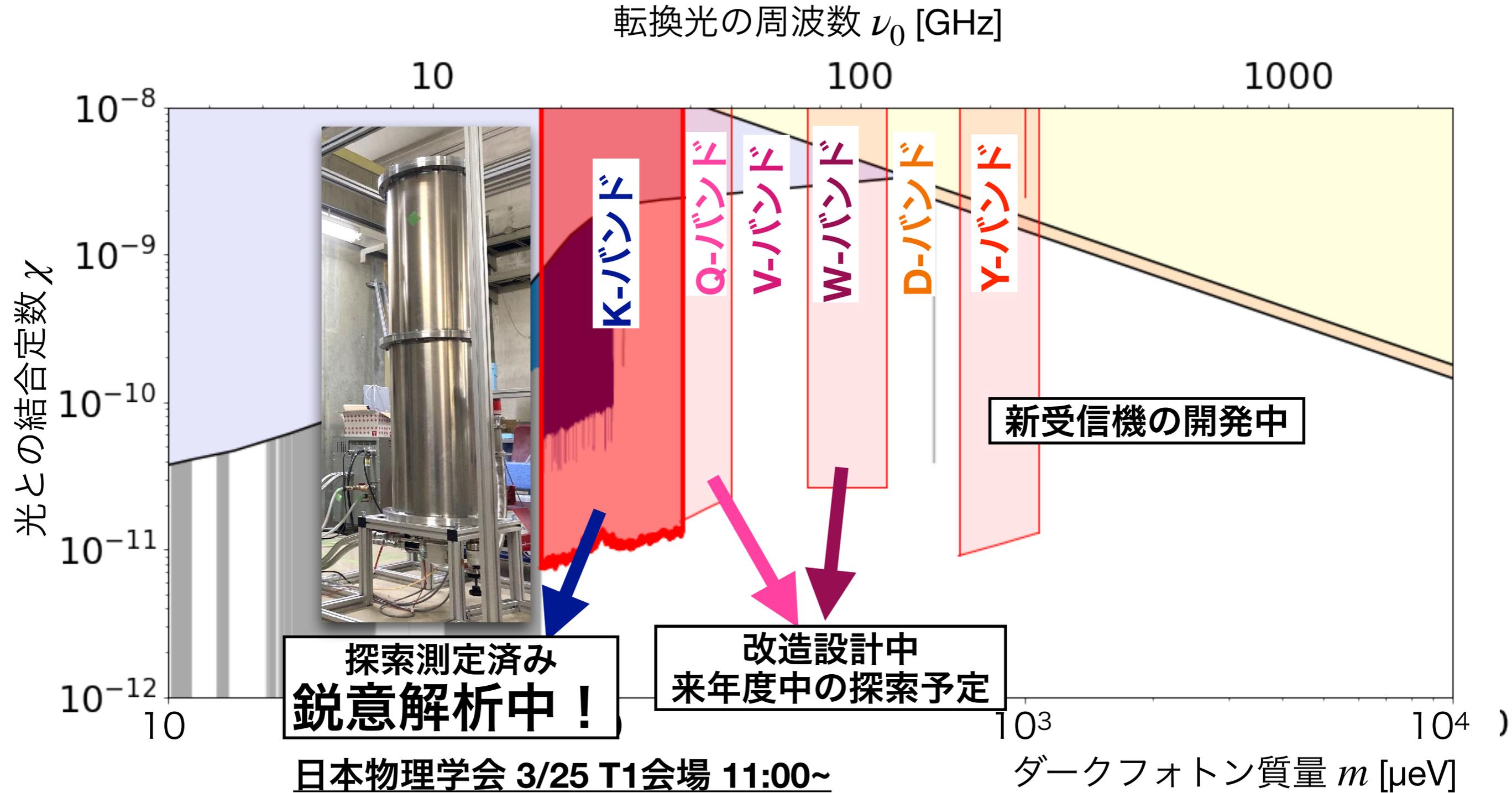
周波数帯を拡大中! (現状の予想感度)



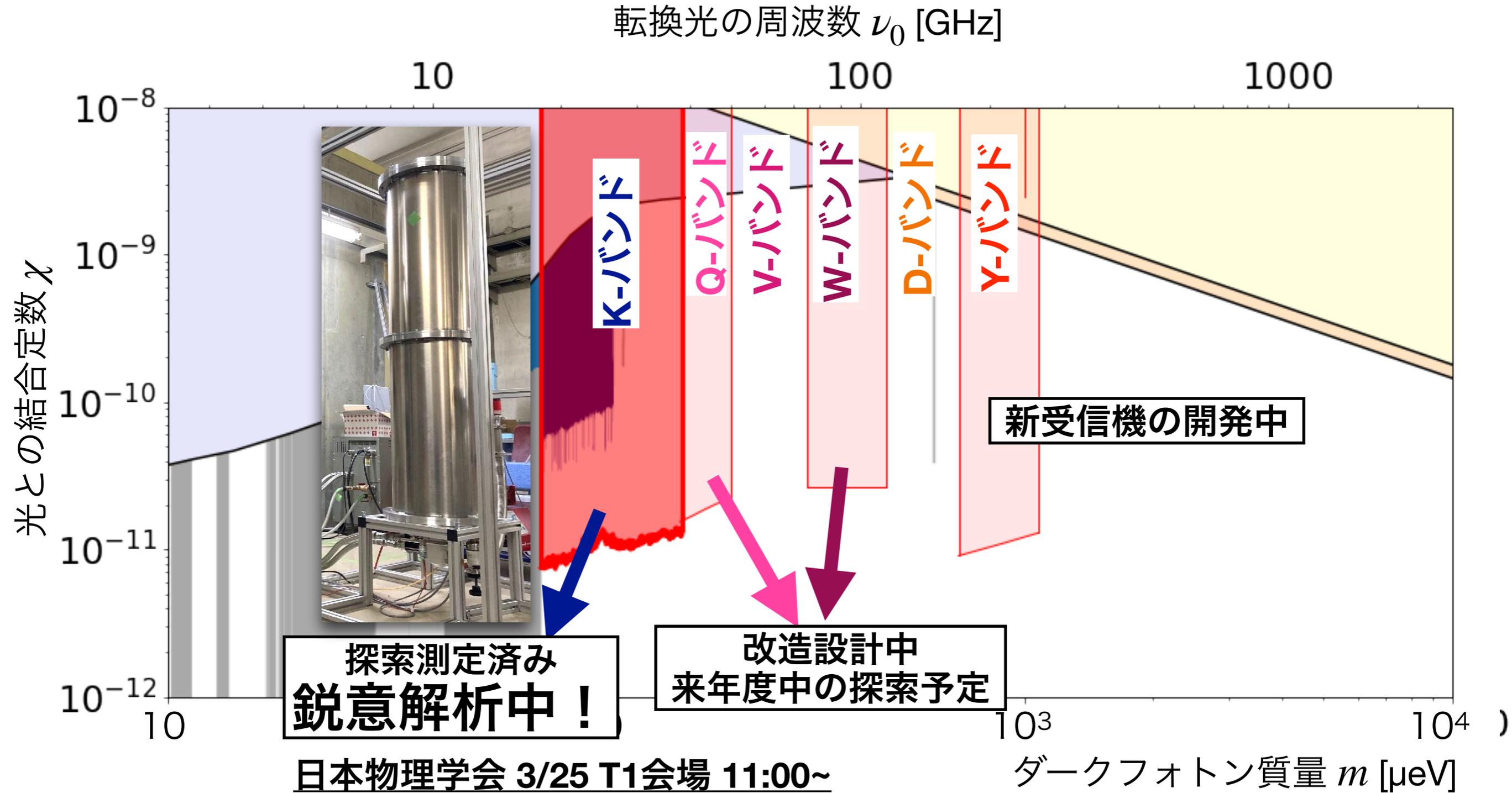
日本物理学会 3/25 T1会場 11:00~

ダークフォトン質量 m [μeV]

周波数帯を拡大中! (現状の予想感度)



周波数帯を拡大中! (現状の予想感度)



来年度に広く拡大できる予定!

まとめ

- 電波受信機を用いた超軽量ダークマター探索は
広い質量範囲を一度に測定できる
& 高い周波数 (>10 GHz) も探索しやすい方法
- DOSUE-RR では極低温を利用して
ダークフォトンでの10—300 GHz ($40—1200$ μeV)
への拡大を進行中！
詳細: 日本物理学会 3/25 T1会場 11:00~
- 来年度には複数結果が出るかと思うので乞うご期待！

Backup