

超伝導検出器を用いた ミリ波領域におけるパラフォトン探索

並木飛鳥^A, 難波俊雄^B, 成田佳奈香^A, 浅井祥仁^A
坂井南美^C, 渡邊祥正^D, 山本智^A

^A東大理, ^B東大素セ, ^C理研, ^D芝浦工大

日本物理学会 2021年春季大会
2021/3/14 (online開催)

目次

実験概要

- パラフォトンとは
- 探索手法
- 探索の現状
- 実験セットアップ

光学系デザイン

- 光学設計の条件と指針
- 設計した光学系と製作予定のレンズ
- 到達予想感度

パラフォトンとは

- 標準模型を超えた理論で予言される、“visible sector” と弱くしか結合しない “hidden sector”
- “hidden sector” の $U(1)$ 対称性に対応するゲージボソン
→ パラフォトン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - J^\mu A_\mu$$

標準理論

$$+\frac{m_{\gamma'}^2}{2} (X_\mu X^\mu - \underbrace{2\chi A_\mu X^\mu}_{\text{Kinetic mixing}} + \chi^2 A_\mu A^\mu)$$

パラフォトン場 (X^μ)

拡張項

パラフォトン質量

通常電磁場と混ざり合う
 χ : mixing parameter

misalignment 機構と類似のシナリオによって
Cold Dark Matter になり得る!!

探索手法

銀河にDMとして存在するパラフォトンが金属表面に入射した際、放射される転換光を検出する。

- 我々の銀河に存在する暗黒物質が全てパラフォトンであると**仮定**

ρ_{DM} :暗黒物質の密度

⇔パラフォトン密度

- パラフォトンはkinetic mixingにより微小な通常の電場を含むため、入射した際金属中の自由電子を揺らす。
- 導体表面での境界条件より、転換光はほぼ垂直方向に放射する。

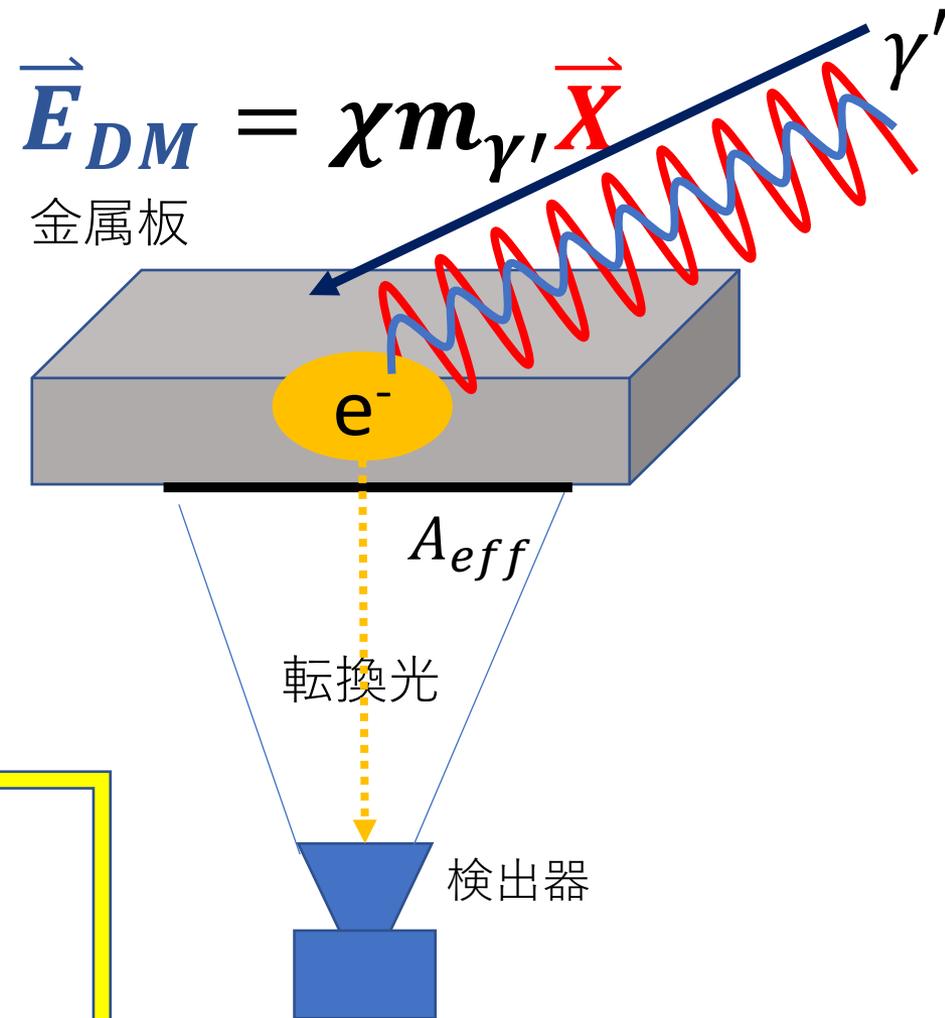
転換光

パワー

$$P_0 = \frac{2}{3} \chi^2 A_{eff} \rho_{DM}$$

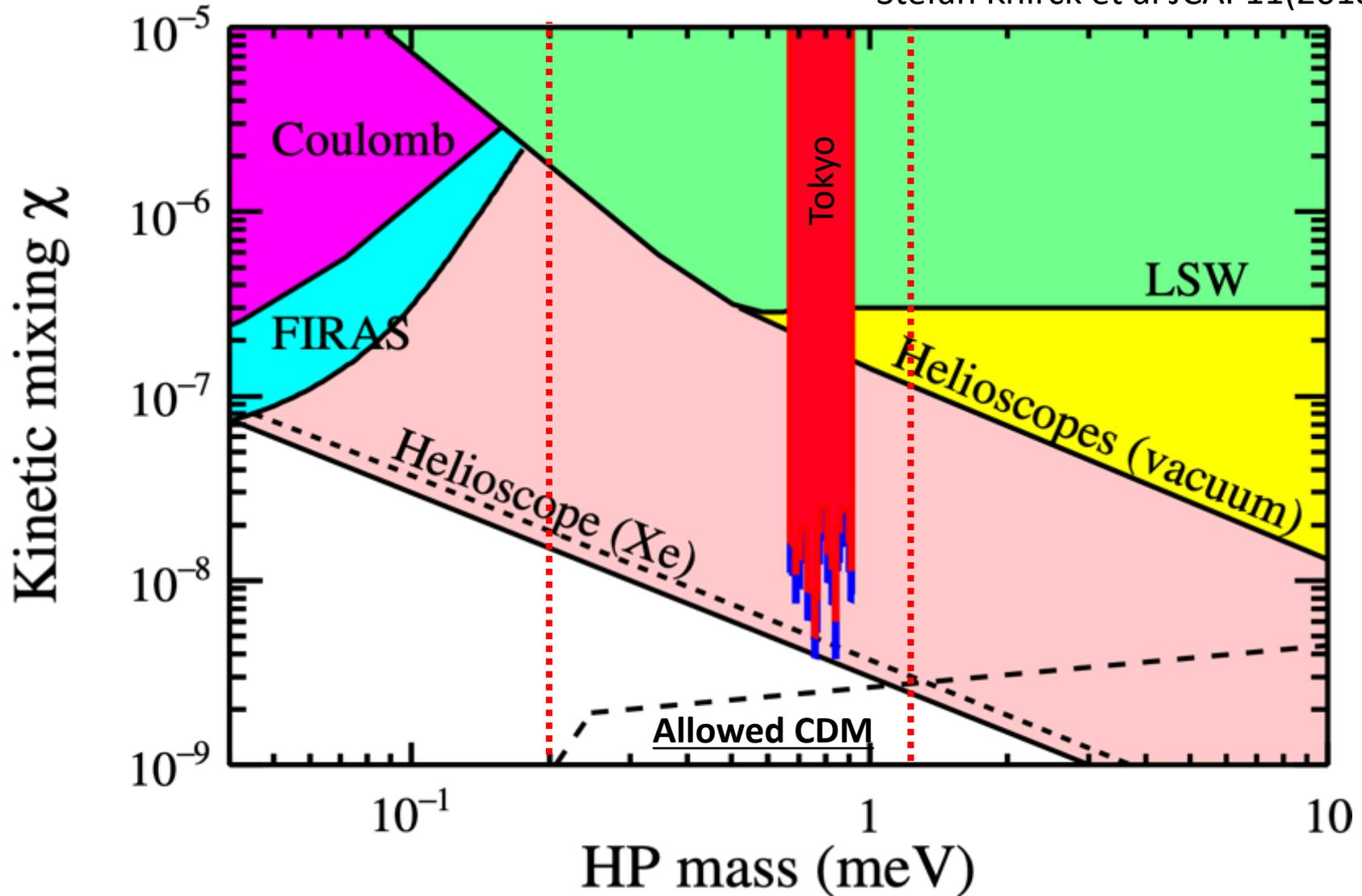
周波数

$$\omega = \frac{m_{\gamma'}}{\sqrt{1 - v^2}}$$



パラフォトン探索の現状

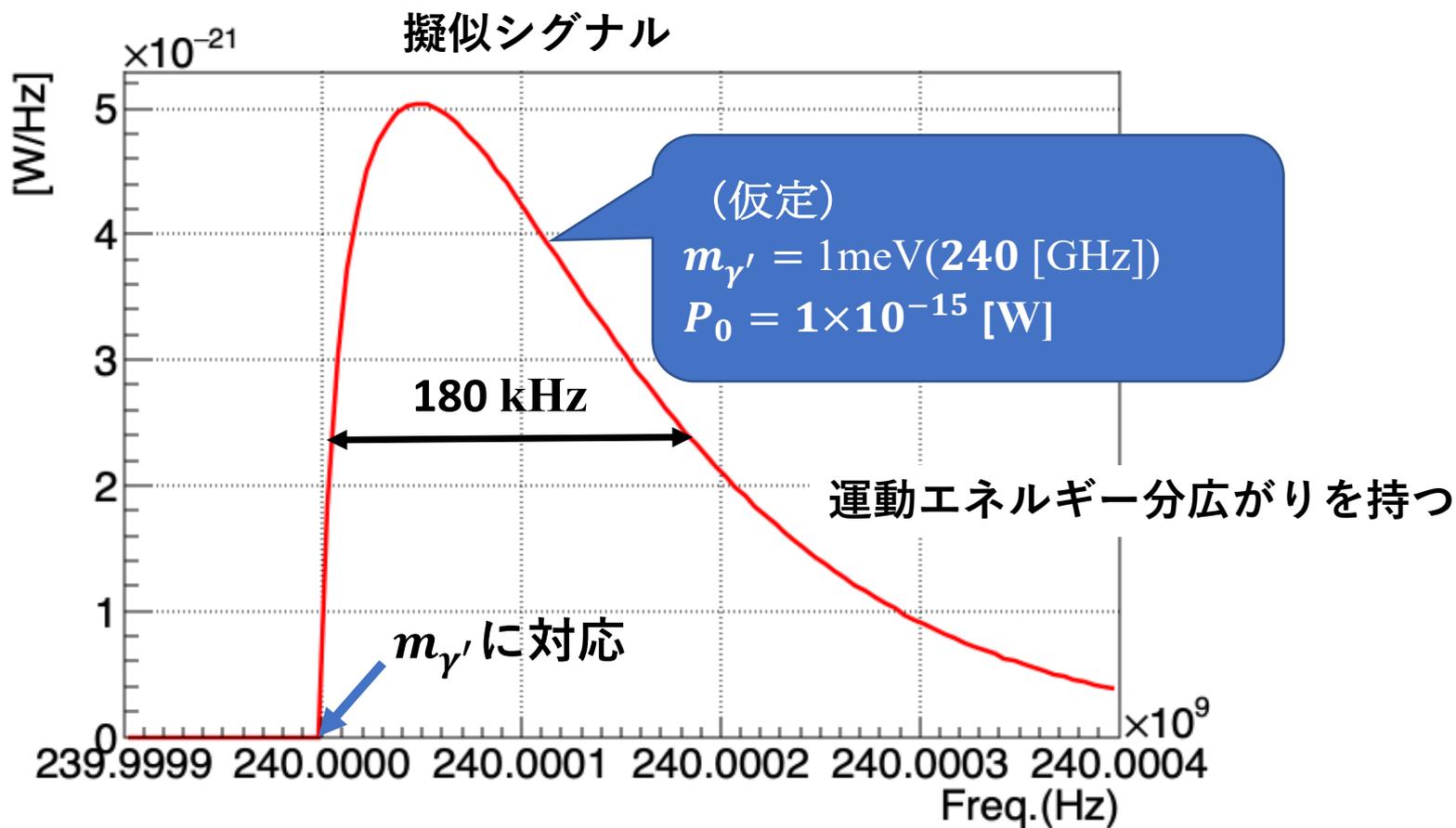
Stefan Knirck et al JCAP11(2018)031



0.1~1meV(24 ~240 GHz)領域を探索をしたい!!

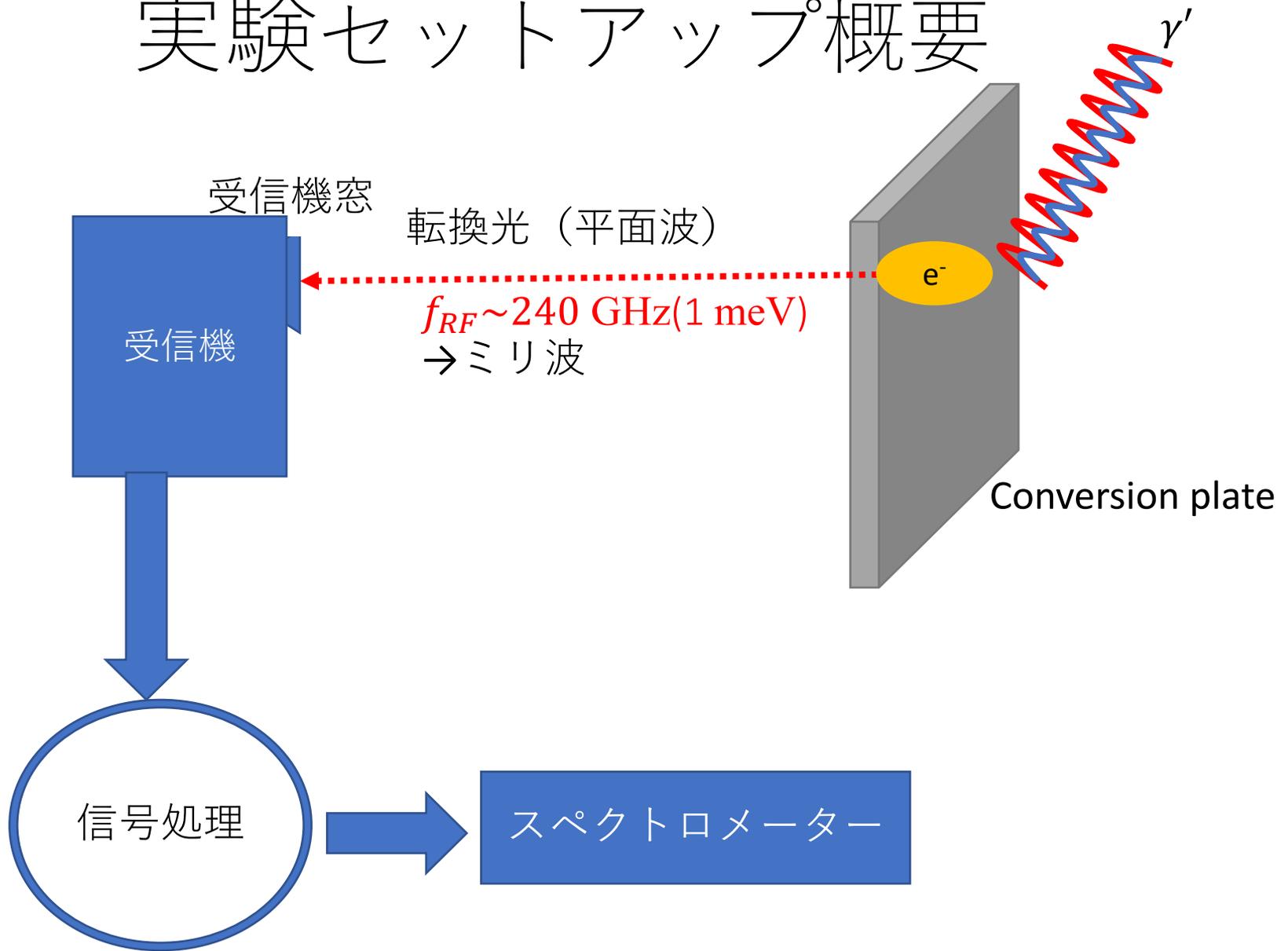
想定シグナル

パラフォトンのシグナルエネルギー分布はその速度分布を反映したことになる。



240[GHz]付近の周波数帯で約180kHzの幅を持つシグナルの高感度探索

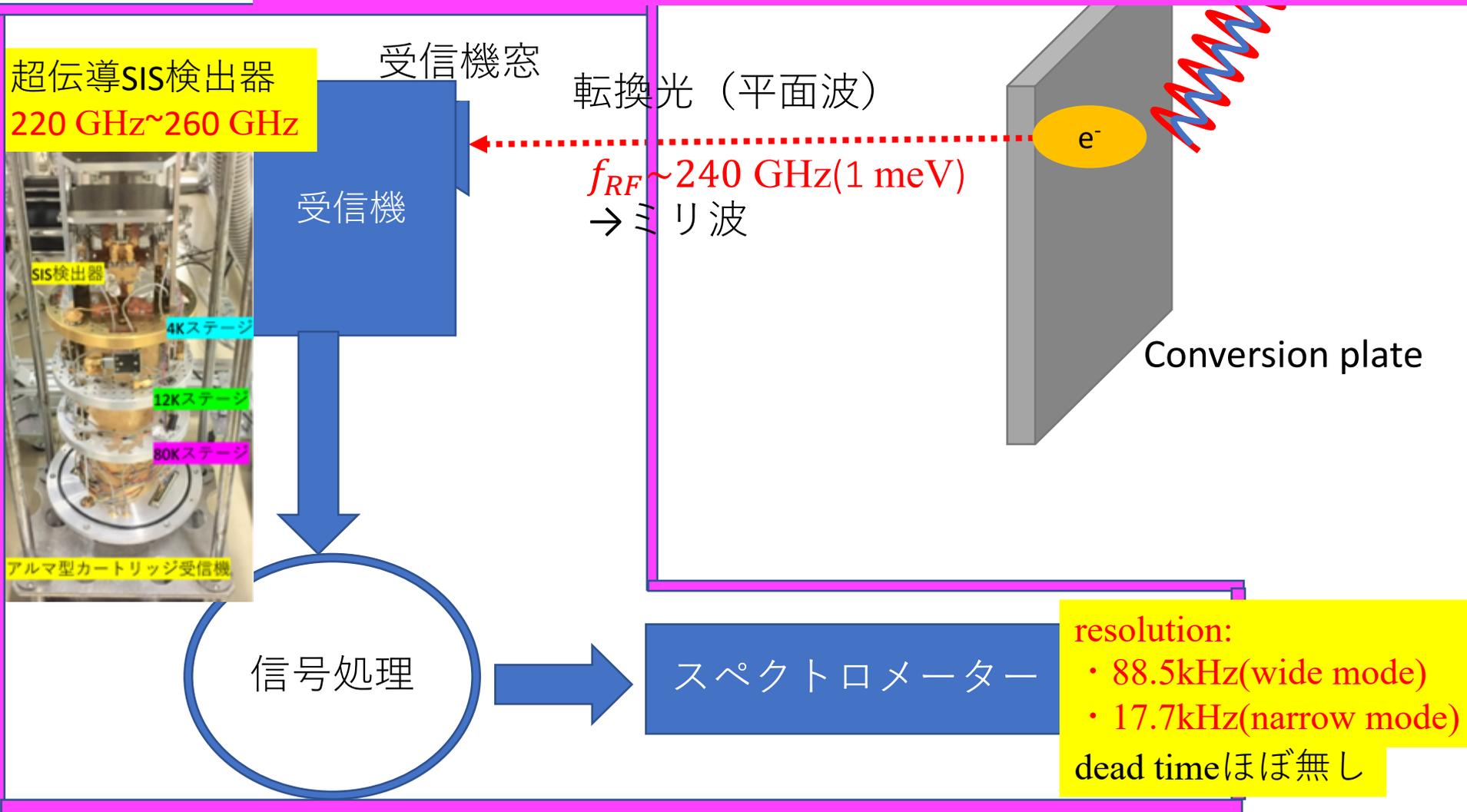
実験セットアップ概要



転換光(ミリ波)を受信機に入れてパワースペクトルを得る

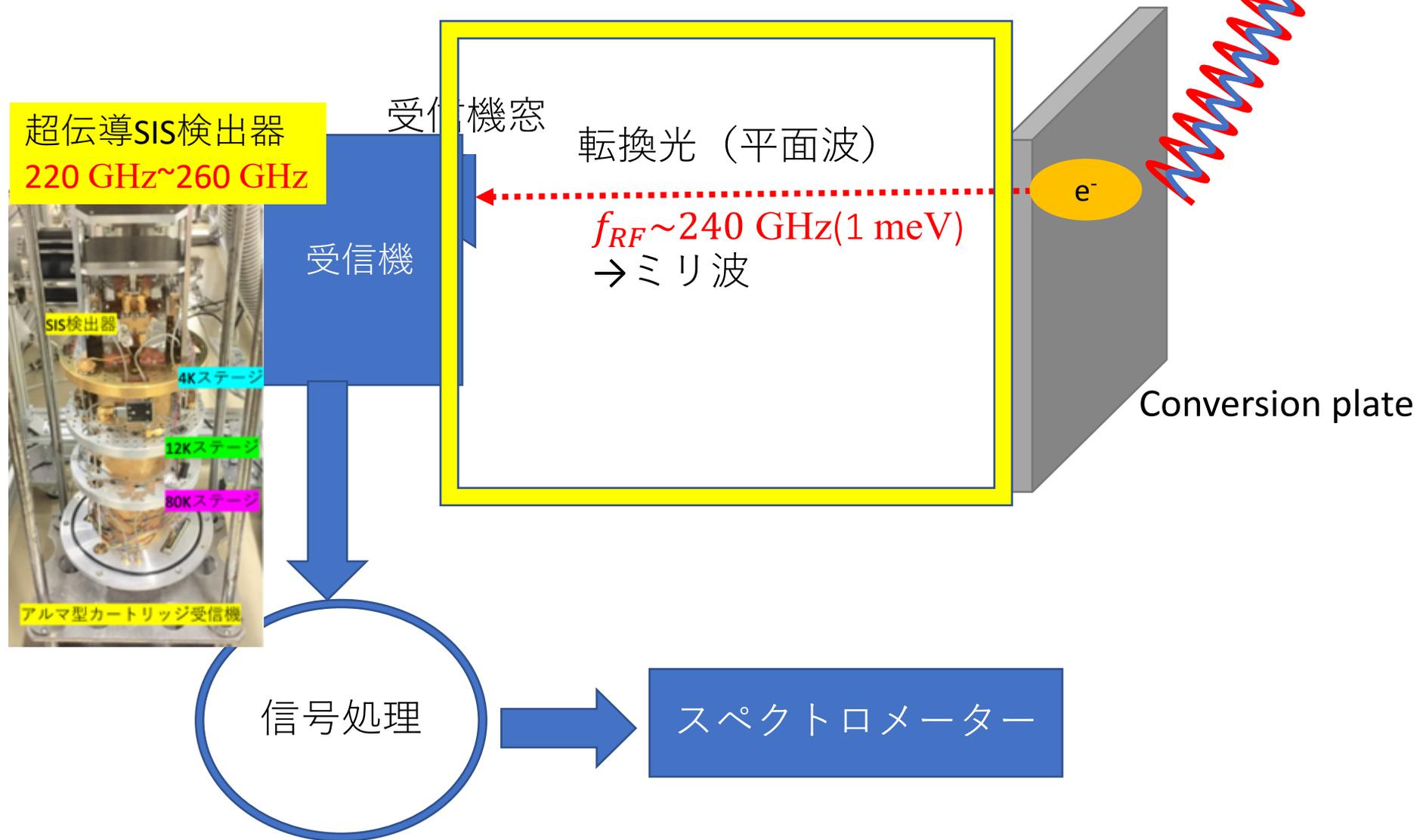
検出システム (SUMIRE@理研) γ'

Publ. Astron. Soc. Japan (2021) 00 (0), 1–22 doi: 10.1093/pasj/psab005



220 ~260 GHz(0.91~1.08meV)の帯域を、十分な分解能で測定可能
(2020年秋季学会の資料参照)

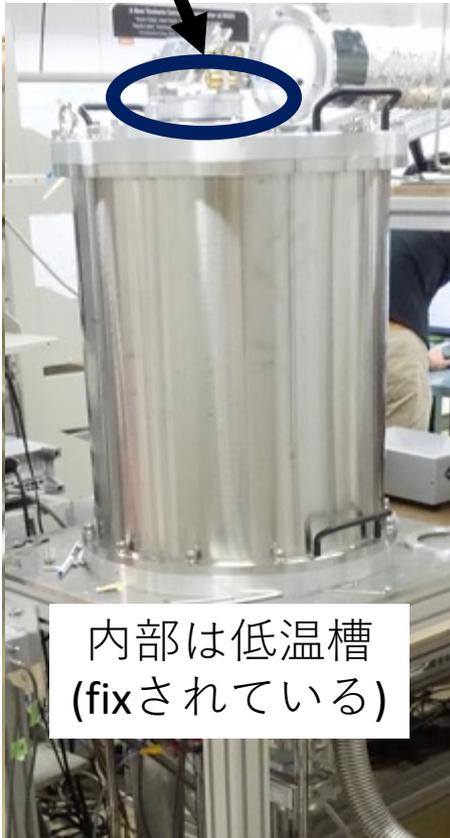
ここの光学系を設計



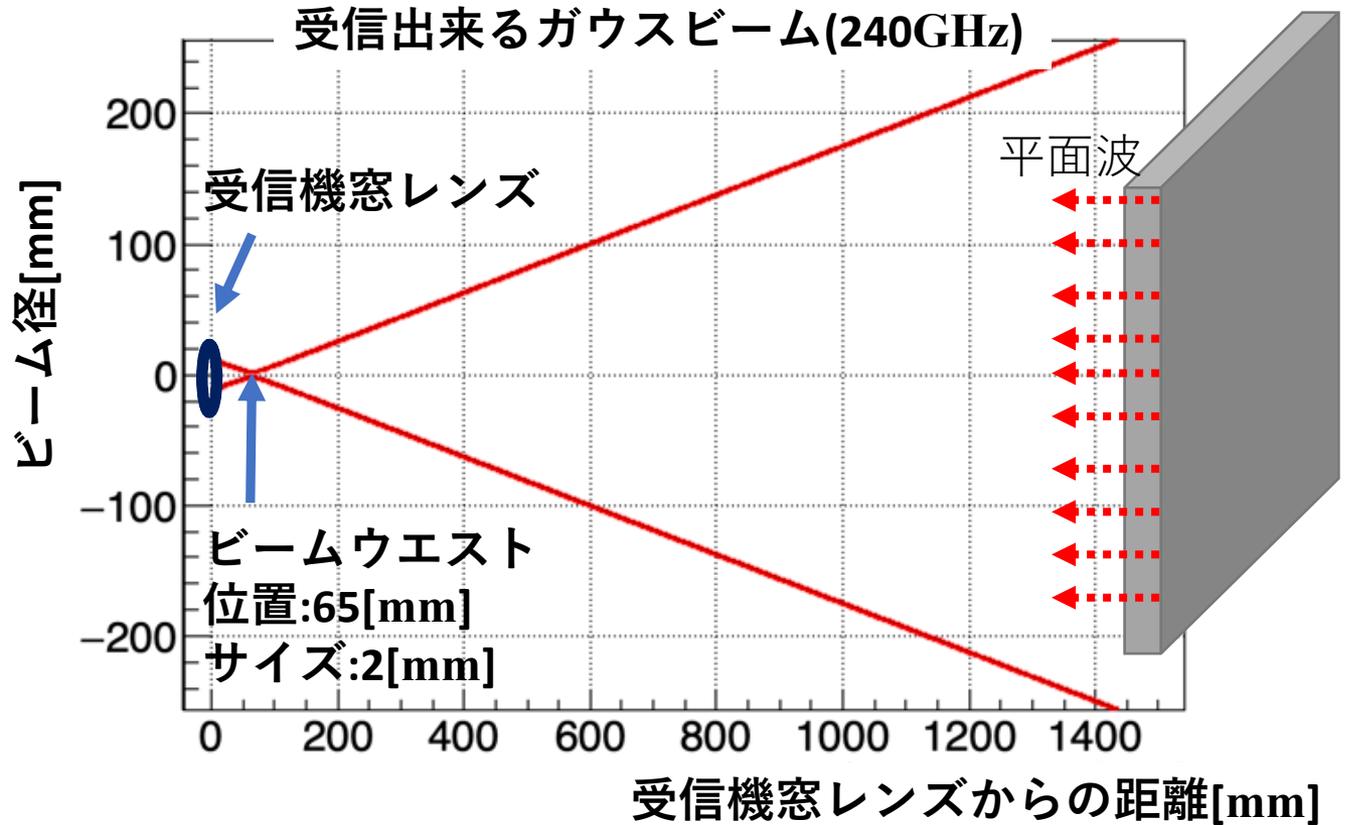
平面波をより多く受信させ有効面積を最大化

光学設計の条件と指針

受信機窓



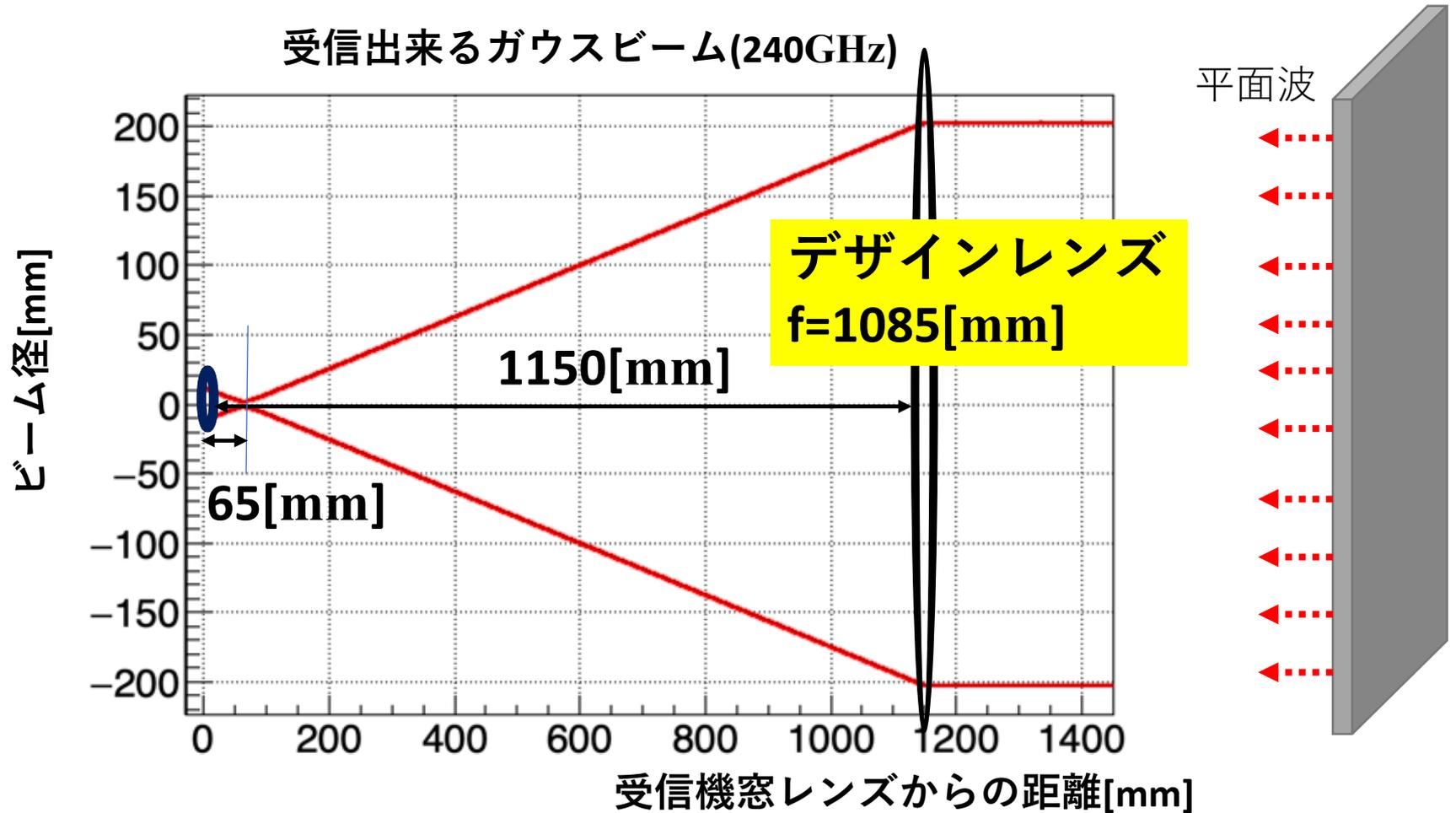
SUMIRE@理研



プレートの有効面積 A_{eff} ↔ ウェストの断面積

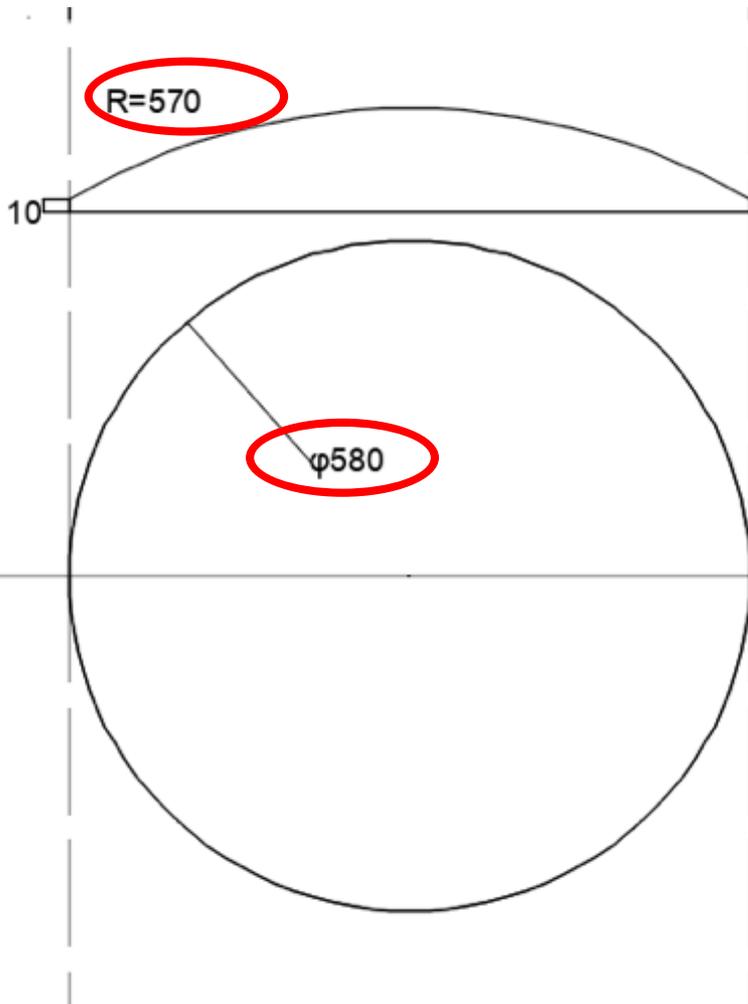
→ ウェストの大きいビームを実現したい!!

レンズの製作により大きいビームウエストを実現



ビームウエスト 203[mm] $\rightarrow A_{eff} \sim 0.13$ [m²]

製作予定のレンズ



要求

- **直径:580[mm]**
(ガウスビーム直径の $\sqrt{2}$ 倍に設定)
- **焦点距離 $f=1085[mm]$**

- 素材:Saxinニューライト(作新工業)
(超高分子量ポリエチレン)
 - SUMIREのレンズに使われている素材
 - 柔軟性があり反射防止用の溝加工をしやすい
 - 屈折率 $n=1.53$
- 素材の屈折率より片面の曲率半径を570[mm]にする事で要求焦点距離を実現。

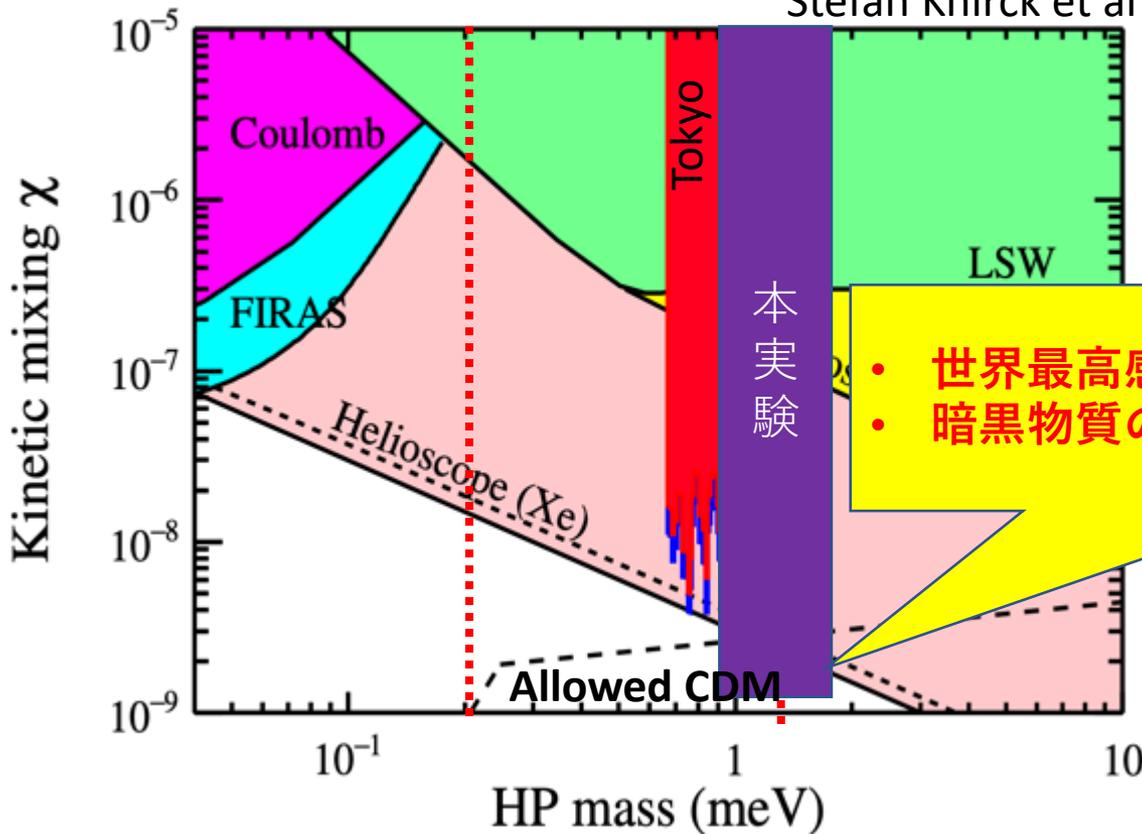
鋭意製作中!!

到達予想感度

$$\Delta\chi = 1.1 \times 10^{-9} \left(\frac{\Delta P}{10^{-15} [\text{W}]} \times \frac{1.3 \times 10^{-1} [\text{m}^2]}{A_{eff}} \times \frac{0.45 \left[\frac{\text{GeV}}{\text{cm}^3} \right]}{\rho_{DM}} \right)^{1/2}$$

世界最高感度 (約3時間の積分時間を想定) =1(仮定)

Stefan Knirck et al JCAP11(2018)031



- 世界最高感度での探索が可能
- 暗黒物質の発見が期待出来る

まとめ

- **標準理論を超えた理論で予言されるパラフォトン暗黒物質探索**
 - **レンズをデザインして光学系を設計する事で有効面積を最大化**
 - **世界最高感度での探索が可能**
- 現在レンズの製作進行中！！**

今後

半年以内に測定、解析を行う予定