

ミリ波帯域における Hidden Photon CDM探索

田島治 (KEK)

2017.01.28 ダークマターの懇談会
神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ



クモデス装置開発 長崎岳人(研究員)

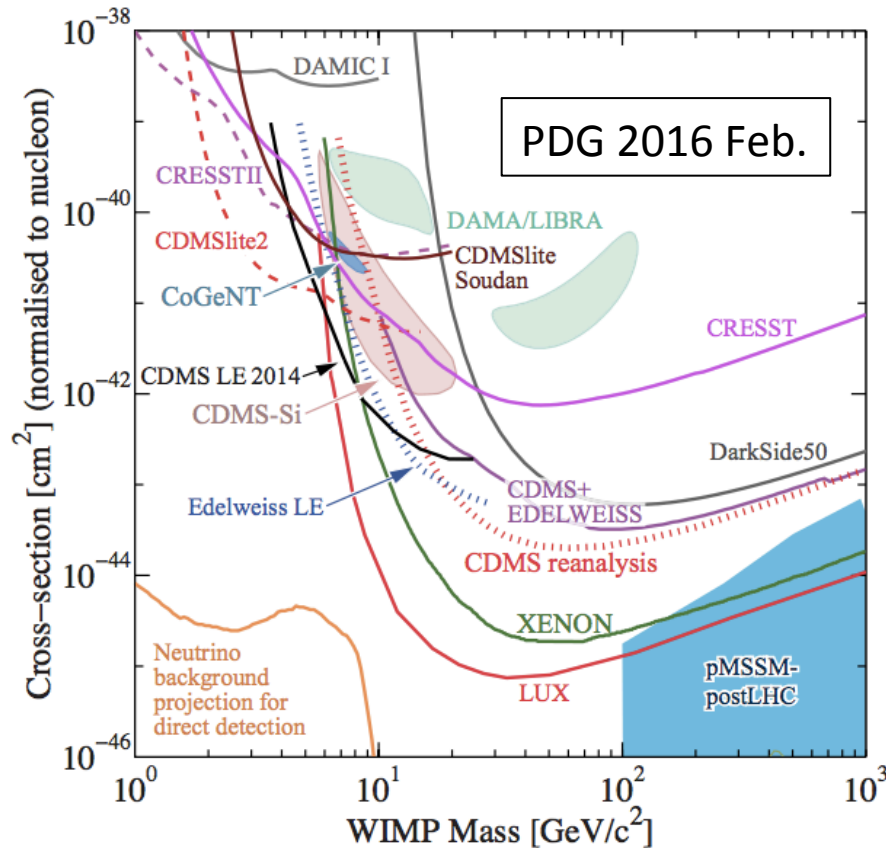


HP-CDM応用開拓 富田望(D3)



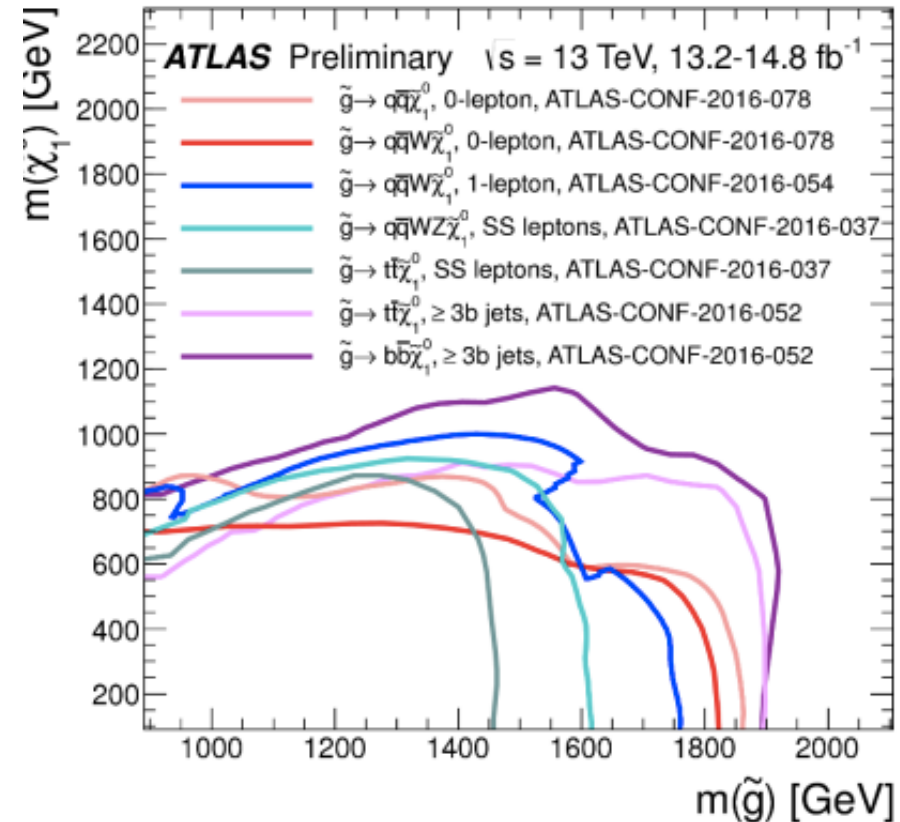
DM探索の現状

銀河内を網ですくう実験



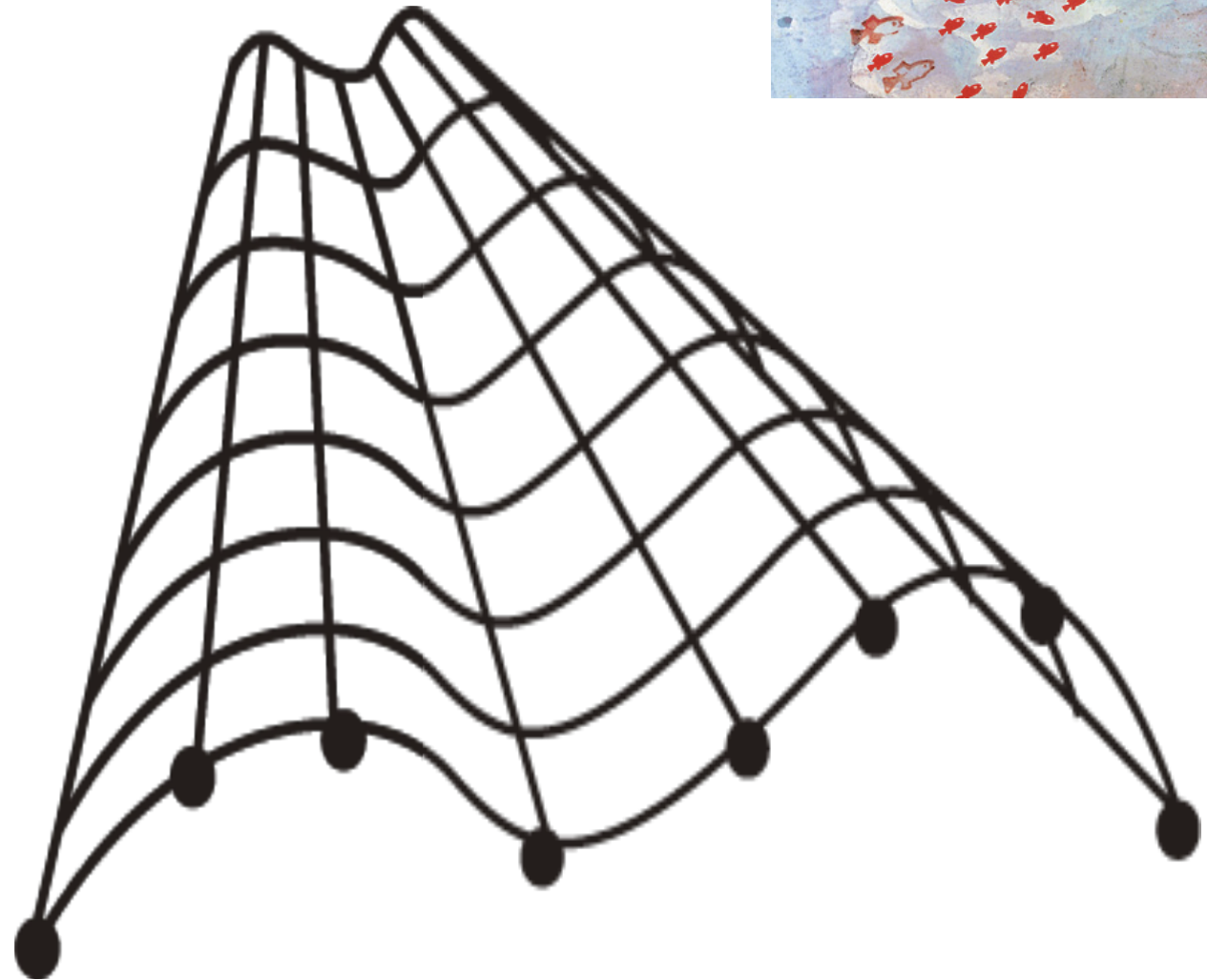
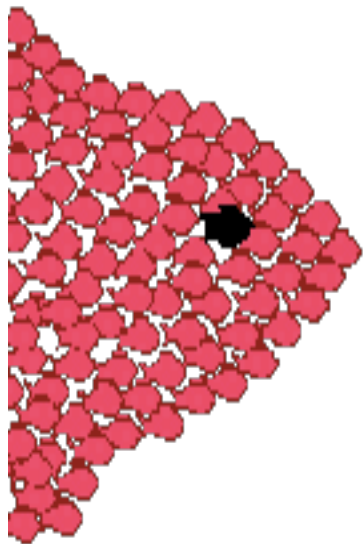
加速器で作る実験

例えばグルイーノ (新学術研究会スライドを拝借)



絶対ある！でも「検出」出来ない (確実にならない)。。。
 → ならば、あらゆる可能性をあたってみよう！

あらゆる
可能性??



実は、とてもとても軽い! ?

とても軽くてOK？

- よくあるシナリオ (熱平衡→脱結合、残存) ではダメ
 - 大きな運動量を持つので、宇宙の構造形成に寄与できない

別のシナリオ: P. Arias et al. JCAP 1206, 013 (2012).

- **例えば、Misalignment Mechanism**
 - ビッグバン (reheating) 以前の宇宙初期には脱結合していて、宇宙膨張とともに希釈されていく
 - 現在は、非相対論的 (i.e., COLD) に、銀河ハロー内に局在
 - Axion dark matter と同様なシナリオ
- 軽いと宇宙に長く安定に存在できるから (理由付けが楽だから) いいんじゃない？ というメリットもあり

Hidden Photon Dark Matter (HP-CDM)

P. Ariaset al. JCAP 1206, 013 (2012).

「隠れた」U(1)対称性が合ってもいいんじゃない？

→ 標準理論のminimalな拡張

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

標準理論

電磁場(A_μ)

拡張項

$$+ \frac{m_{\gamma'}^2}{2} (\tilde{X}_\mu \tilde{X}^\mu - 2\chi A_\mu \tilde{X}^\mu + \chi^2 A_\mu A^\mu)$$

HP質量

Kinetic mixing parameter

実世界と「隠」世界の往来(確率)を定義

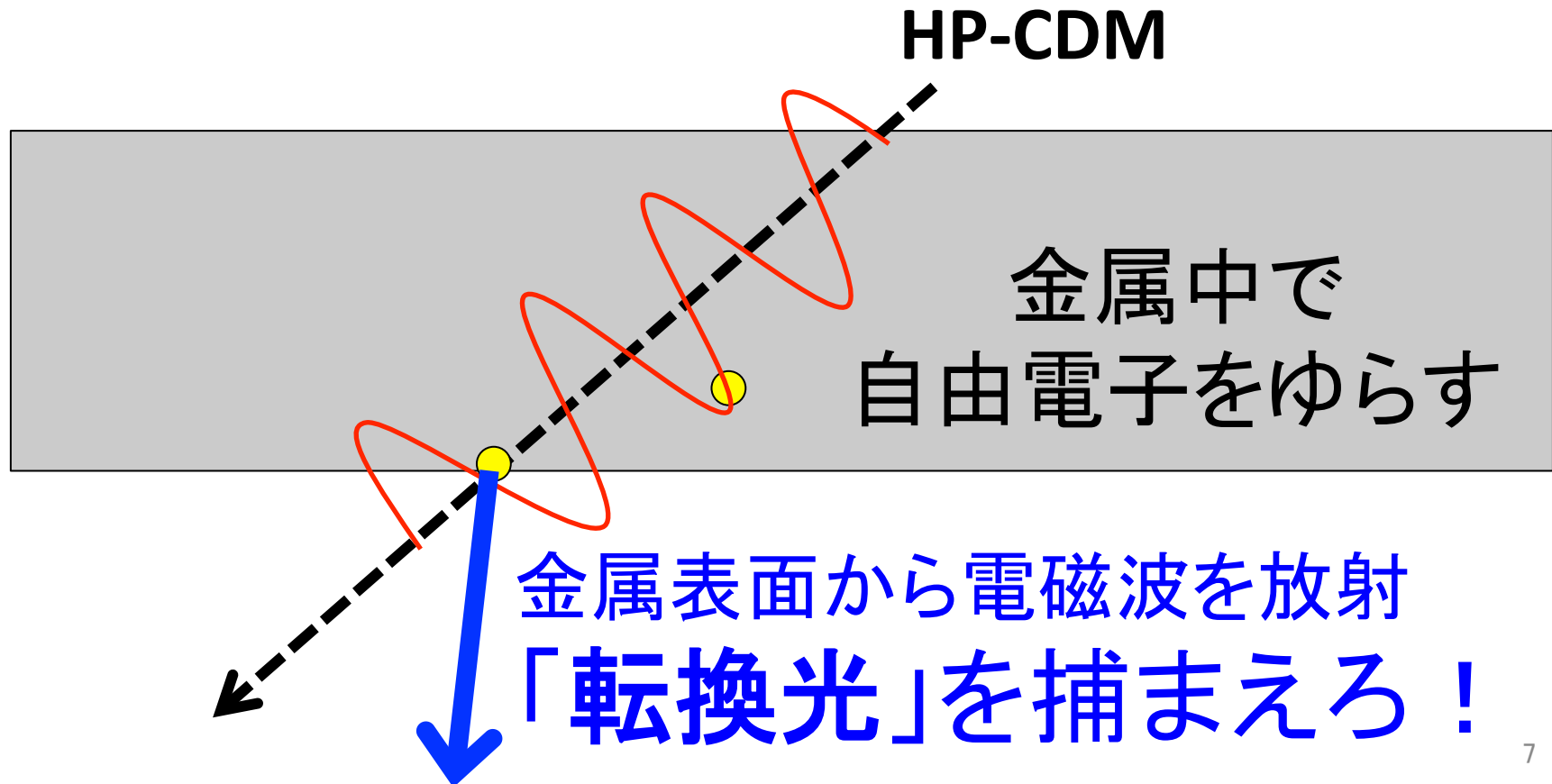
じゃあ、実世界に現れたときはどう見える？

HP-CDMの観測手法？

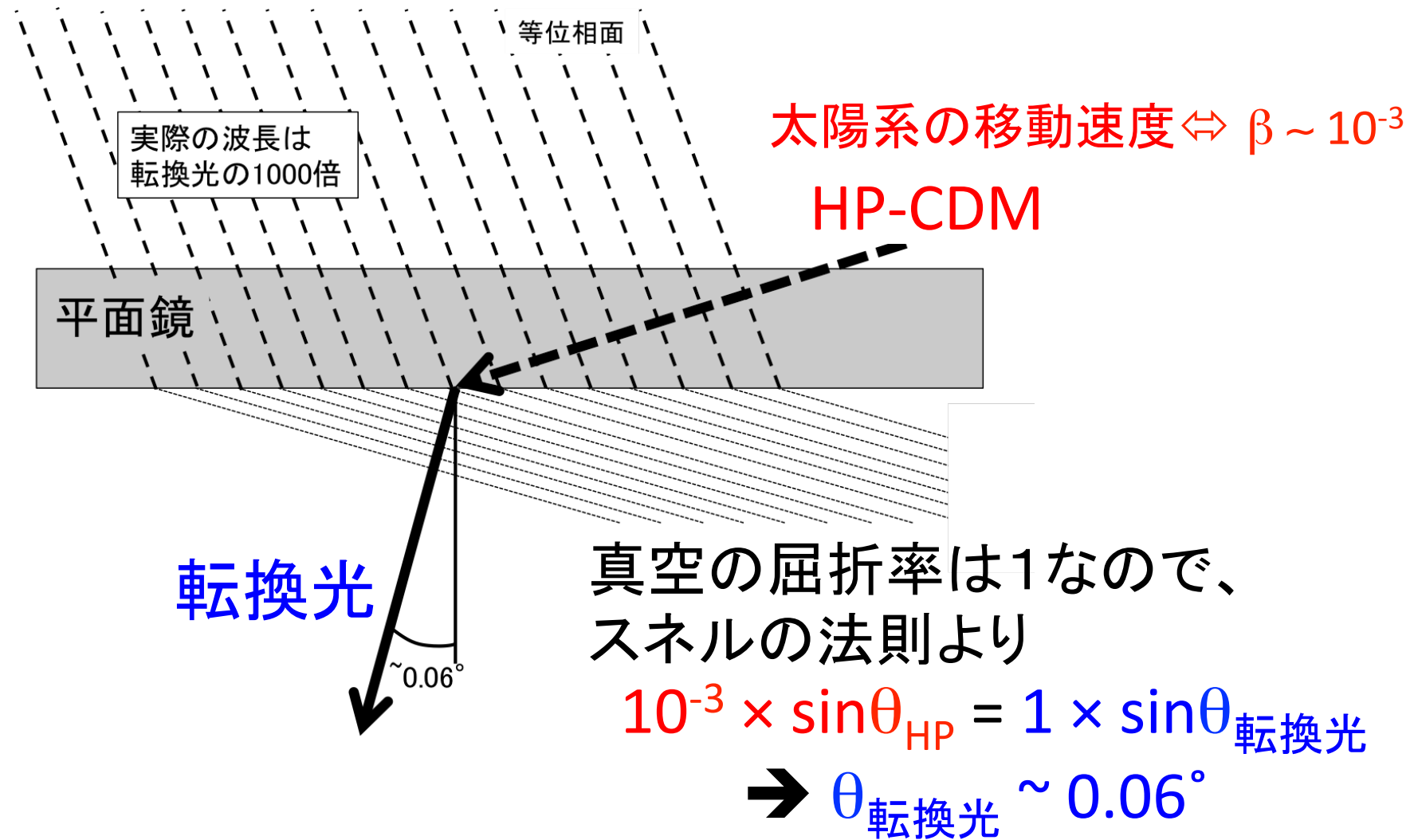
HP-CDM由来の電場が実世界に顔を出す

$$\mathbf{E}_{\text{HP-CDM}} = \chi m_\gamma \mathbf{X}_{\text{HP-CDM}}$$

D. Horns et al., JCAP 1304, 016 (2013)

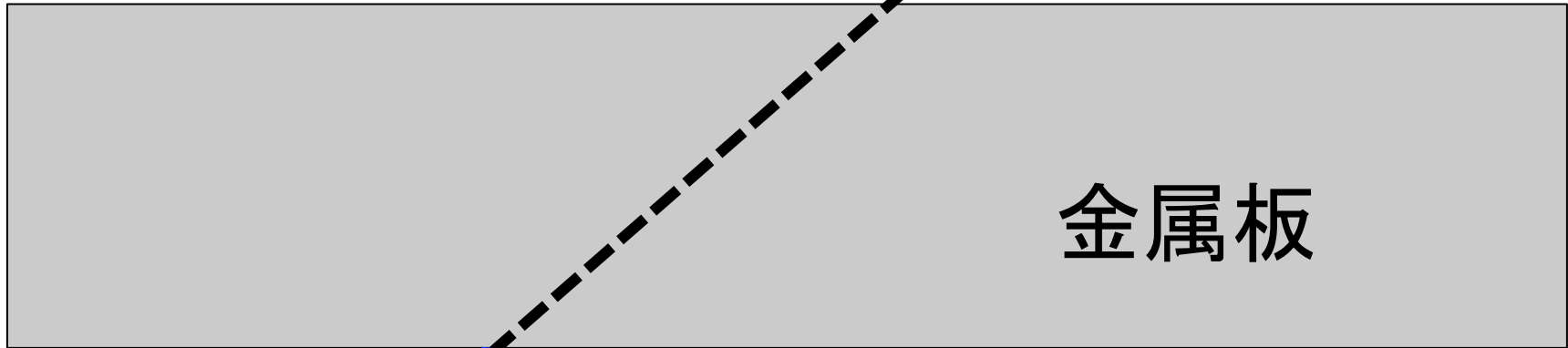


金属表面の境界条件 → 転換光の特徴



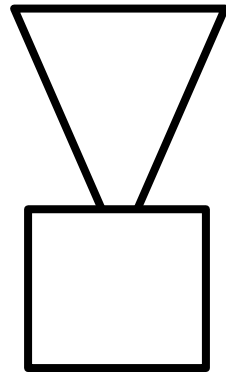
(ほぼ)垂直に出てくる転換光を捕えろ！

HP-CDM



金属板

金属表面から電磁波を放射
「**轉換光**」を捕まえる！

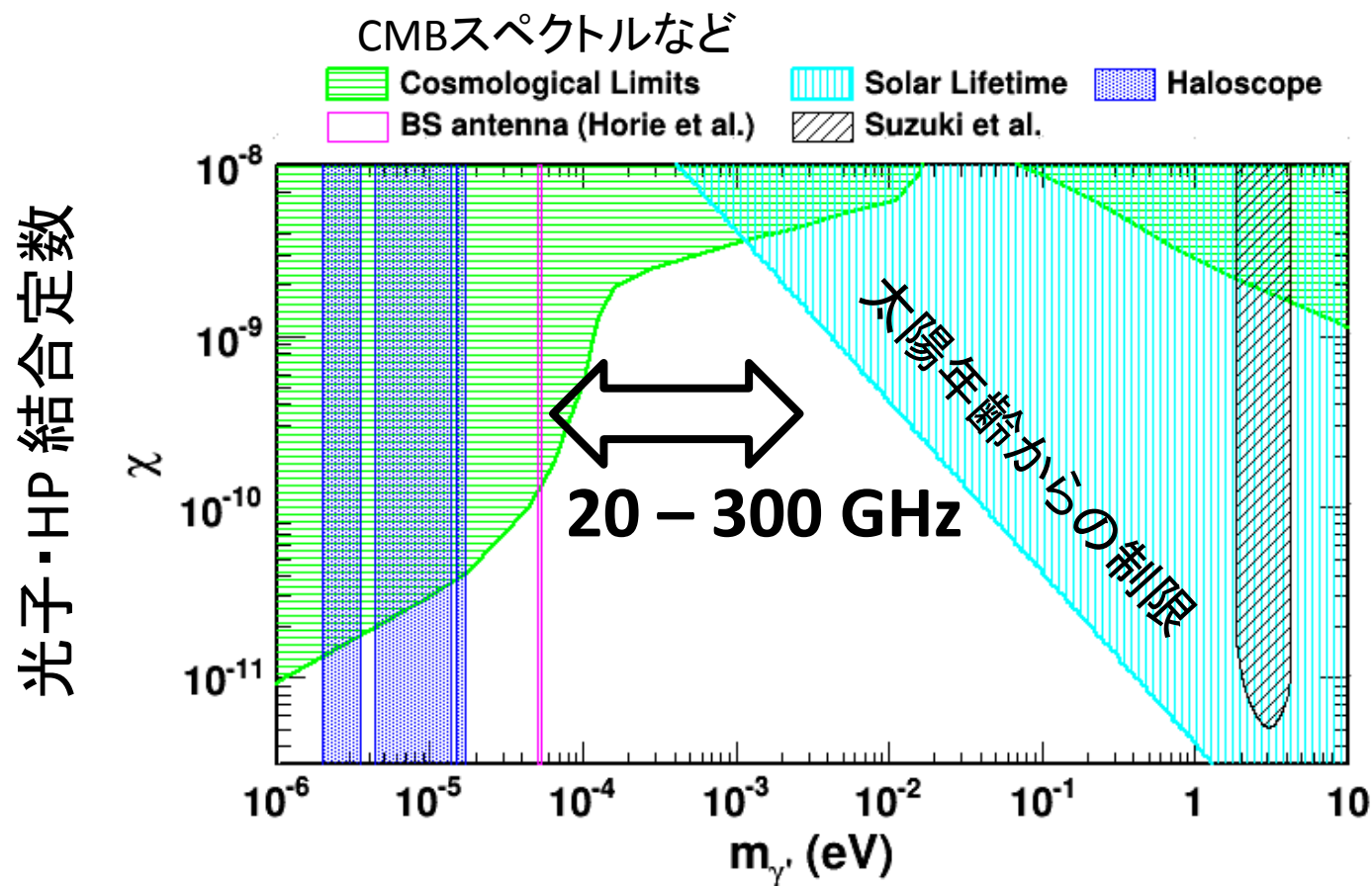


$m_{\gamma'} = h\nu$ 光強度 \Leftrightarrow χ 轉換確率

(電磁波測定器)

光検出器で捕まえる！

HP-CDM探索の現状



観測する転換光子の帯域

ミリ波帯は未開の地！チャンス！



$\approx 10^{-4}$ eVの動機

- **String theory, Stuckelberg mechanism**

$$m\gamma' > 10^{-4} \text{ eV}$$

JCAP 1304, 016 (2013).

- **High-scale inflation**

$$m\gamma' \approx 10^{-5} \text{ eV} \times (10^{14} \text{ GeV}/H_I)^4$$

H_I : Hubble scale at inflation era

$$\rightarrow 10^{-5} - 10^{-1} \text{ eV}$$

Phys. Rev. D 93, 103520 (2016).

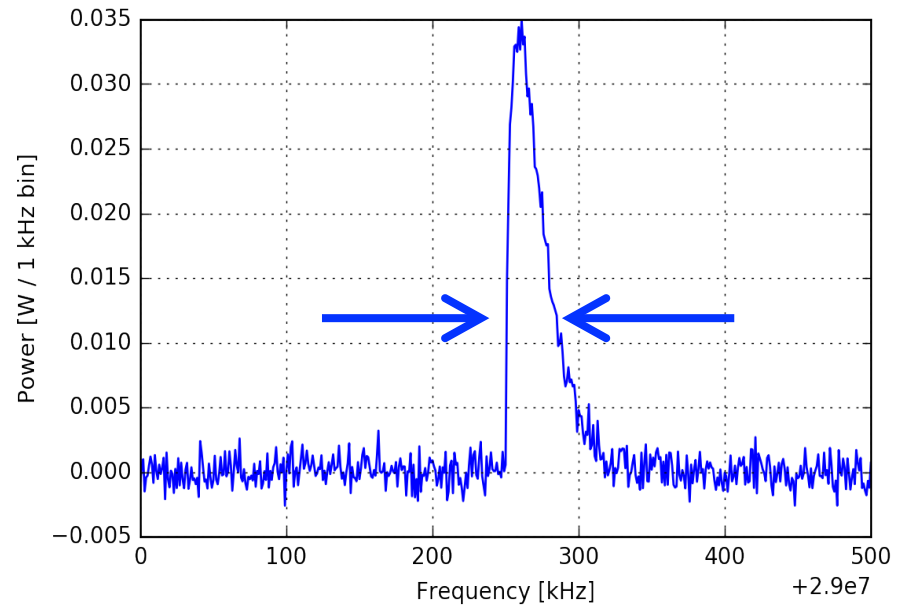
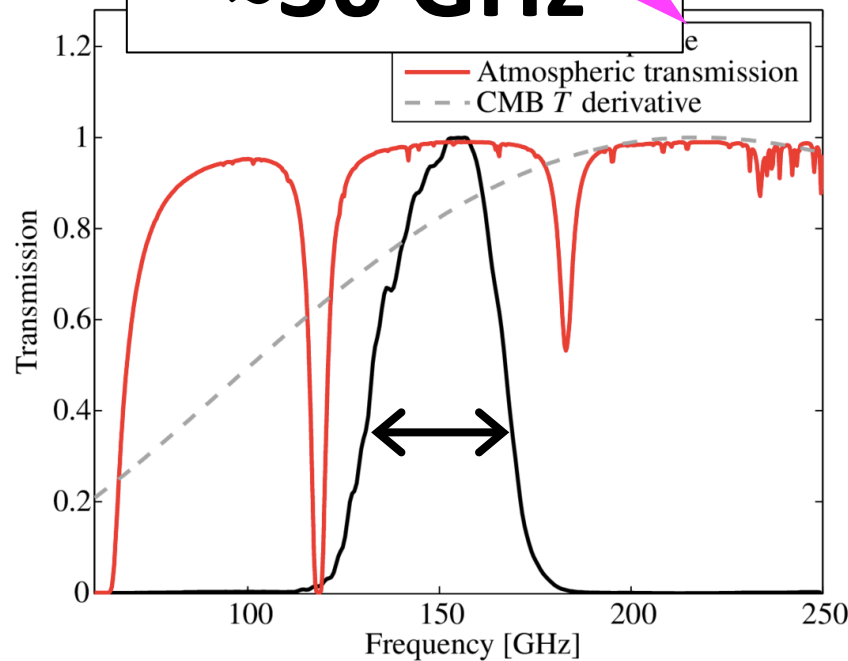
(実はparametric ampの人達の自作自演?)

スペクトル計測が必須

CMB検出器の
周波数分解能
 ≈ 30 GHz

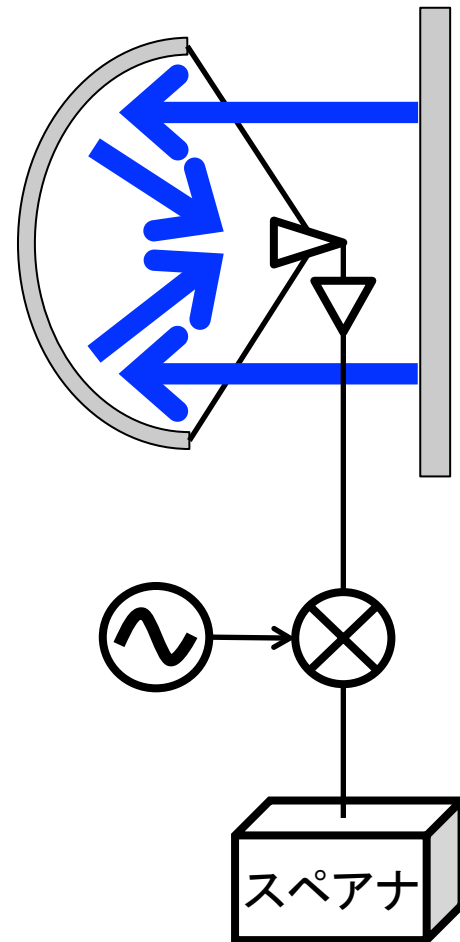
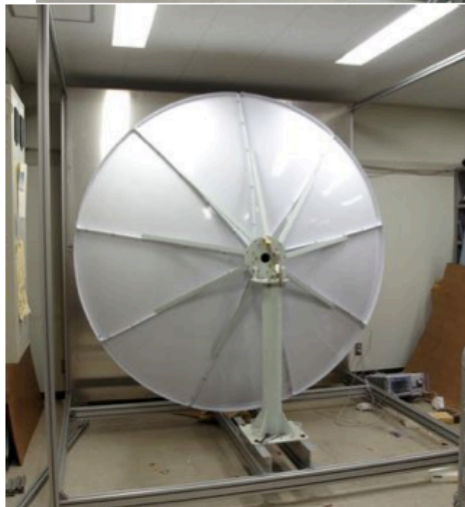
HP-DM転換光の
シグナル幅
 ≈ 30 kHz

6桁足りない

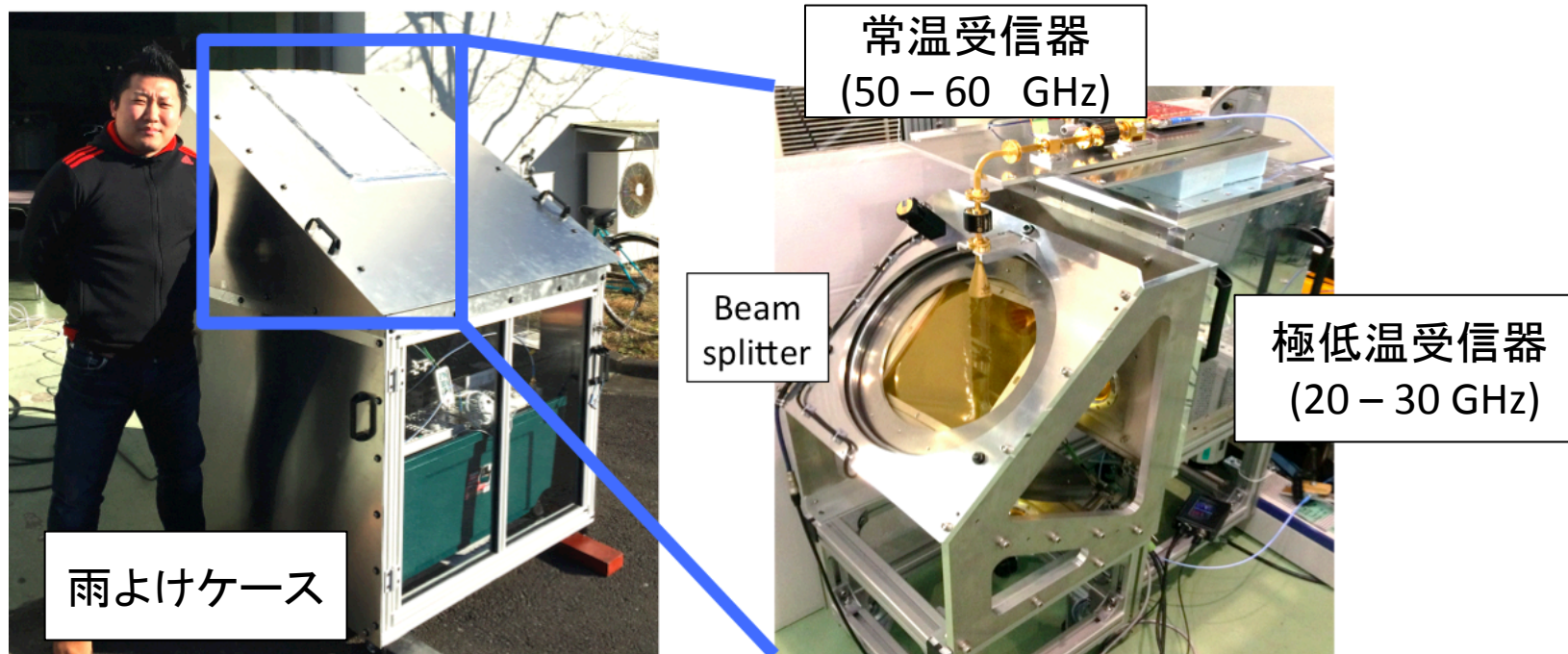


CMB検出器の単なる転用ではダメ

$m_{\gamma'} \sim 10^{-5} \text{ eV}$ (12 GHz)の探索 BSアンテナ実験 by 蓑輪研



ミリ波スペクトロメーター KUMODES (クモデス)



クモデスは竜巻・ゲリラ豪雨 の予兆の予兆を検知する

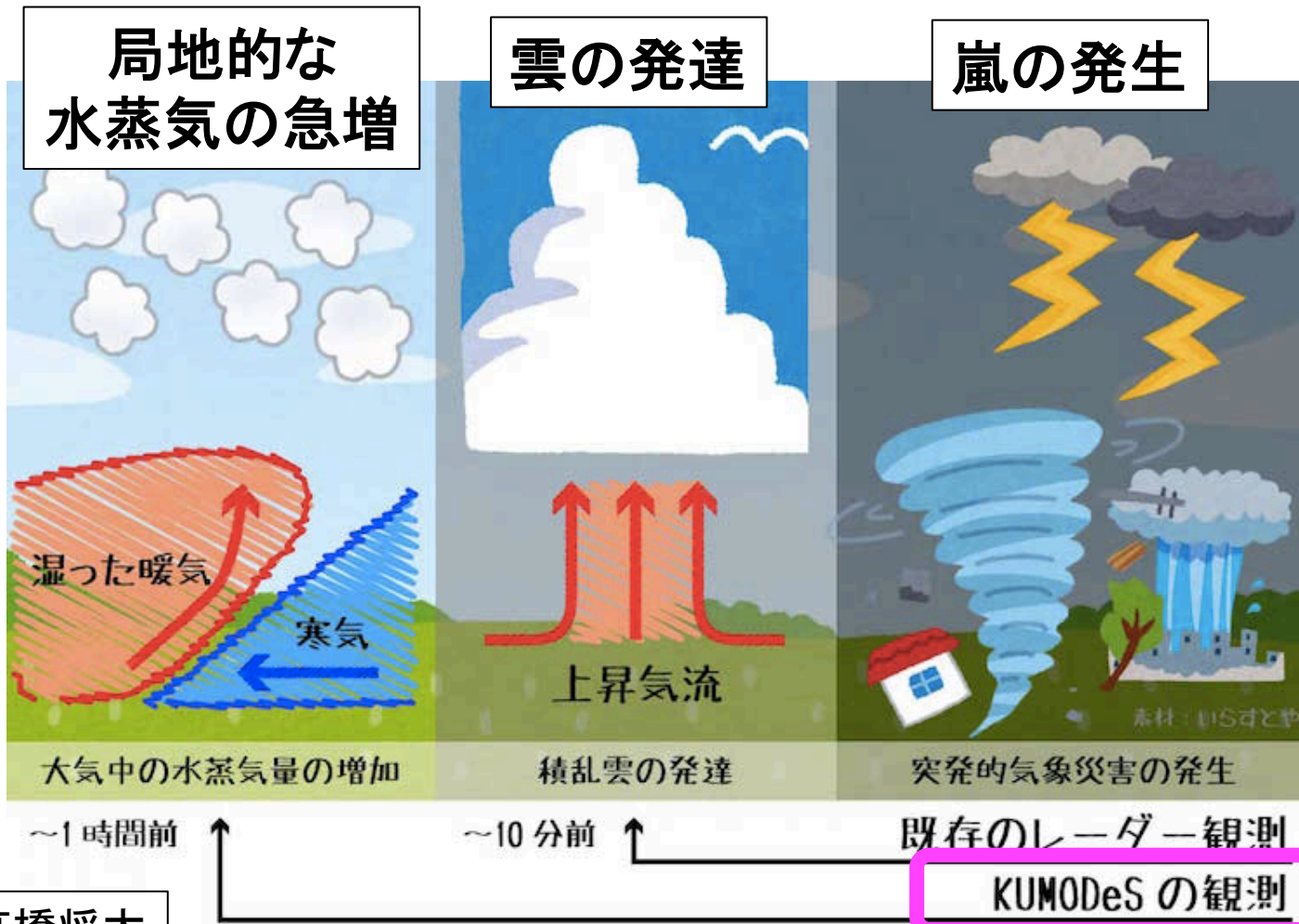
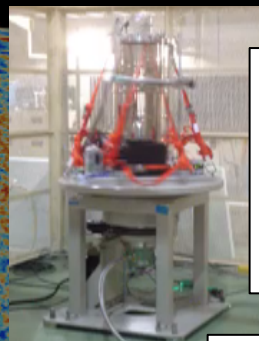


イラスト 高橋将太

クモデスを実現したCMB観測技術

早い

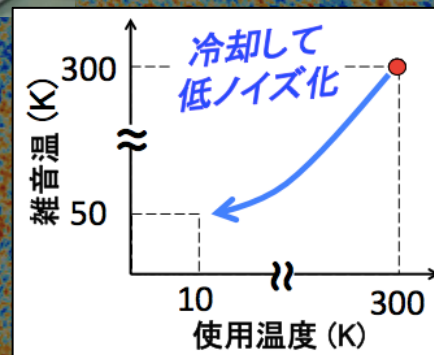
① 回る



高速回転望遠鏡
「GroundBIRD」
特開2014-156952

旨い

② 冷やす



安い

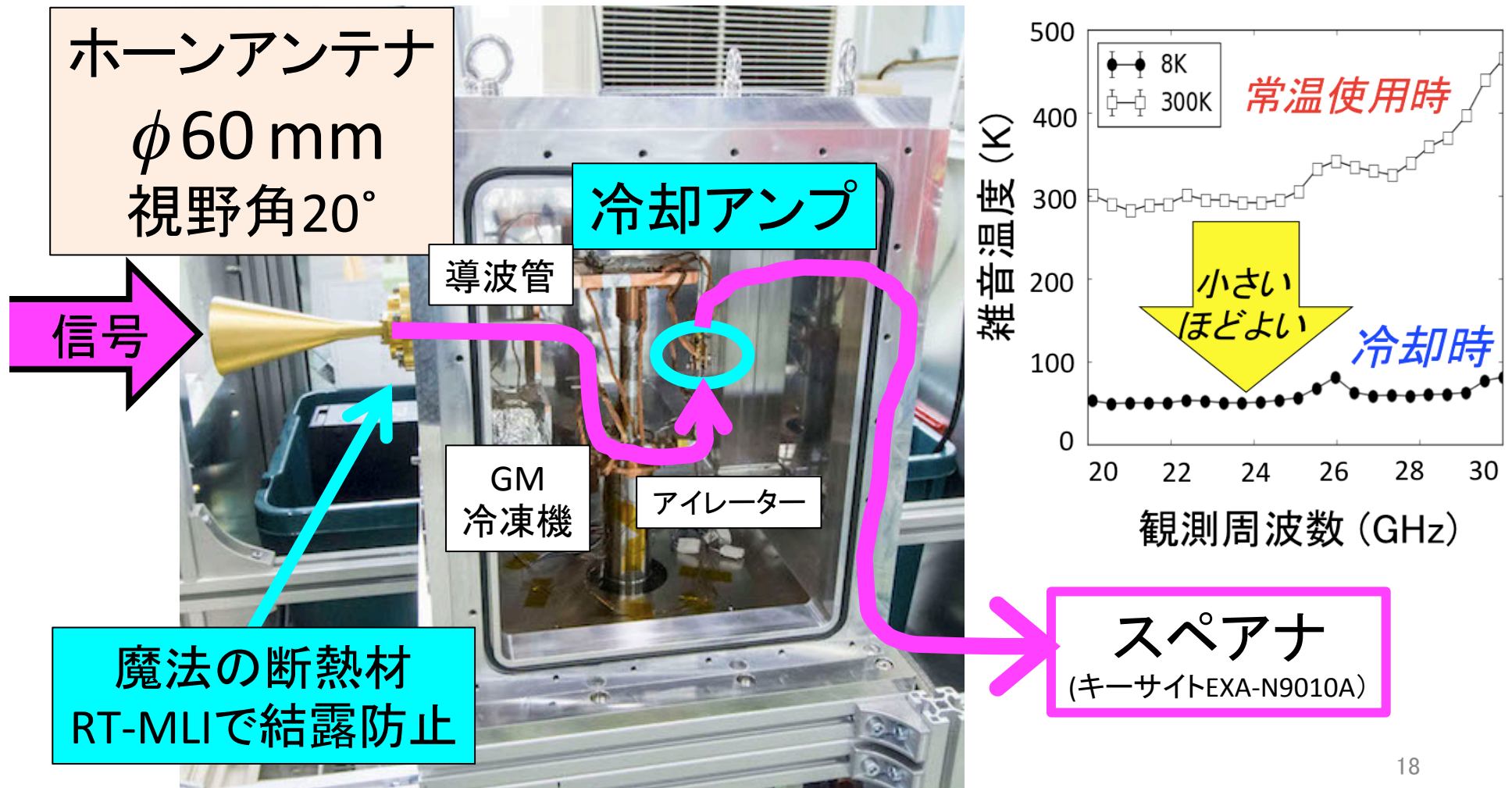
③ 断熱



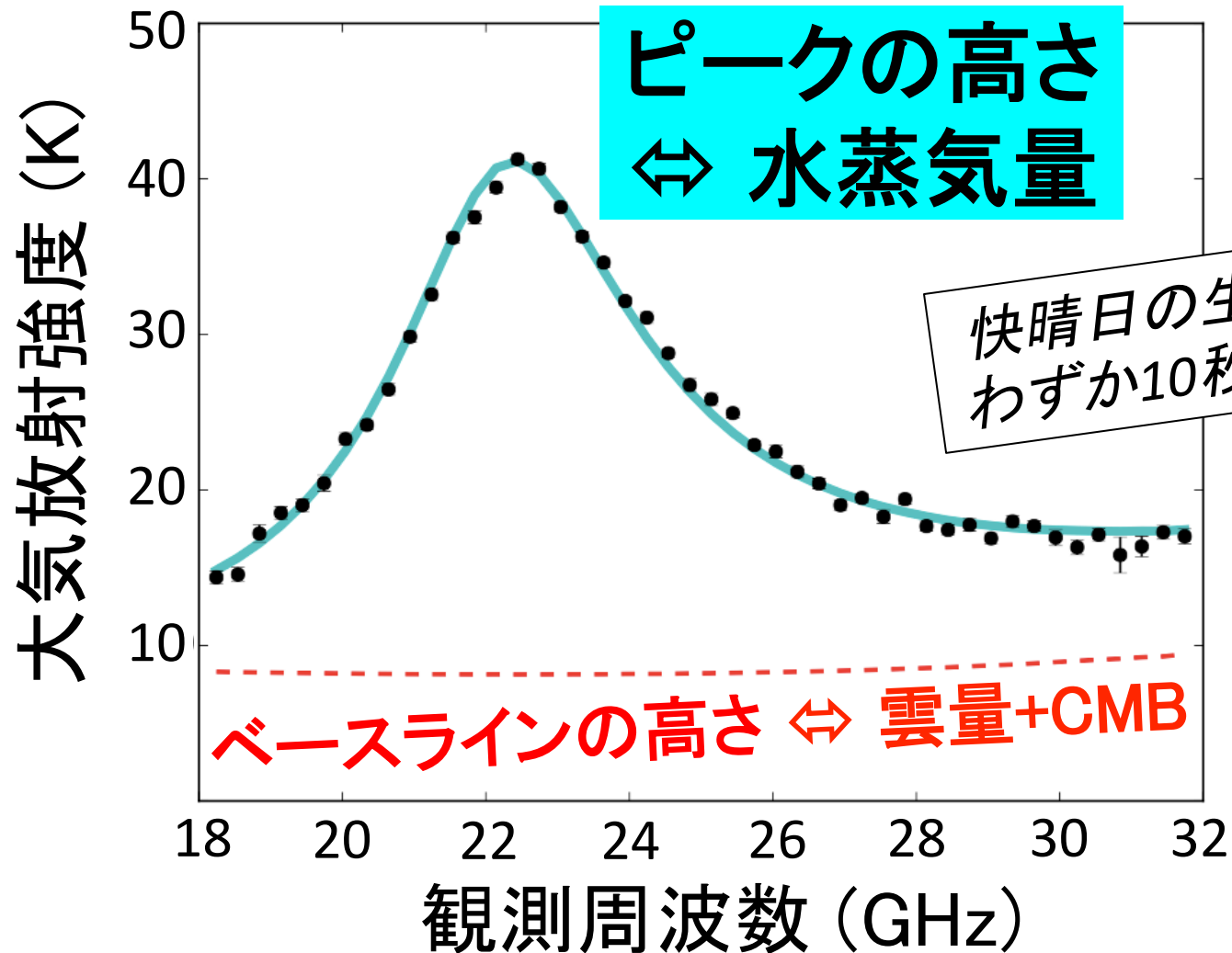
「魔法」の断熱材
特許第6029079号

クモデス冷却受信器

帯域20 – 30 GHz \leftrightarrow $m_{\gamma} = 10^{-4}$ eV前後



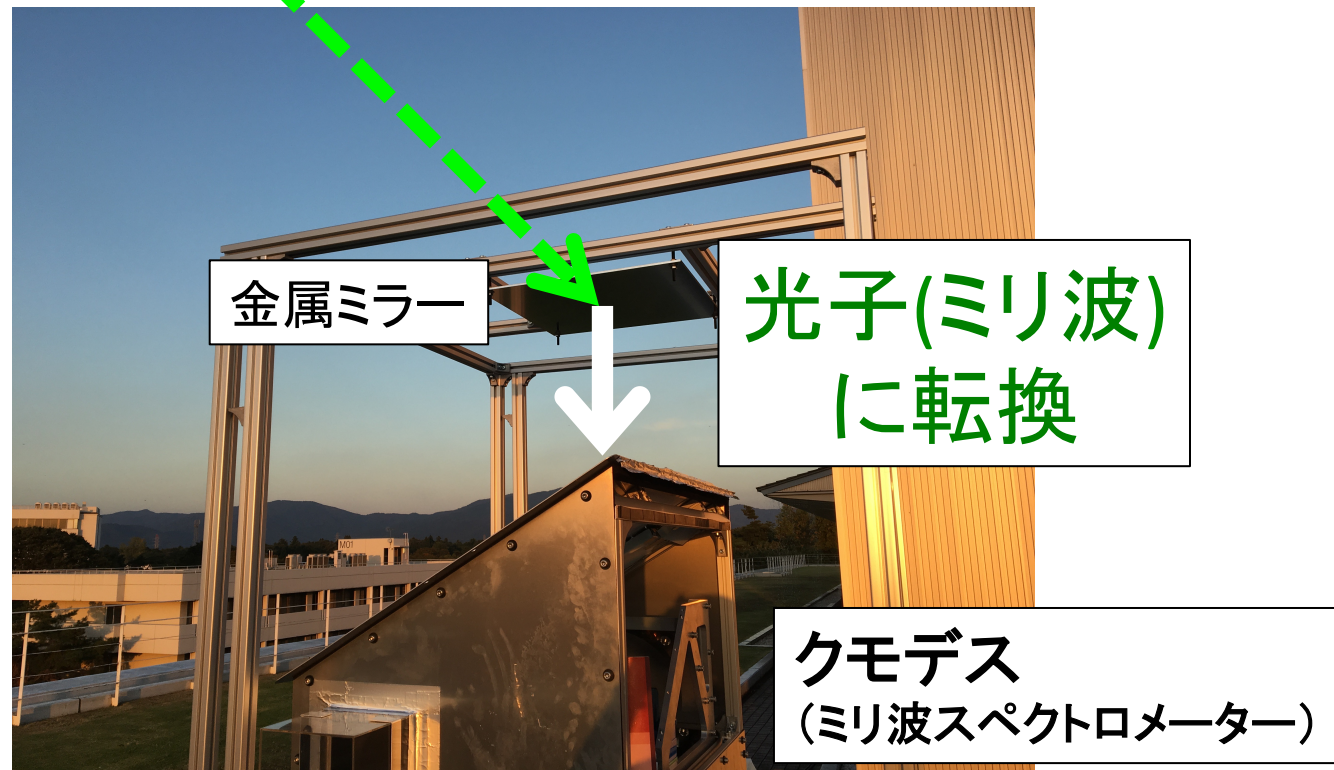
クモデスは大気水蒸気の放射スペクトルが測れる



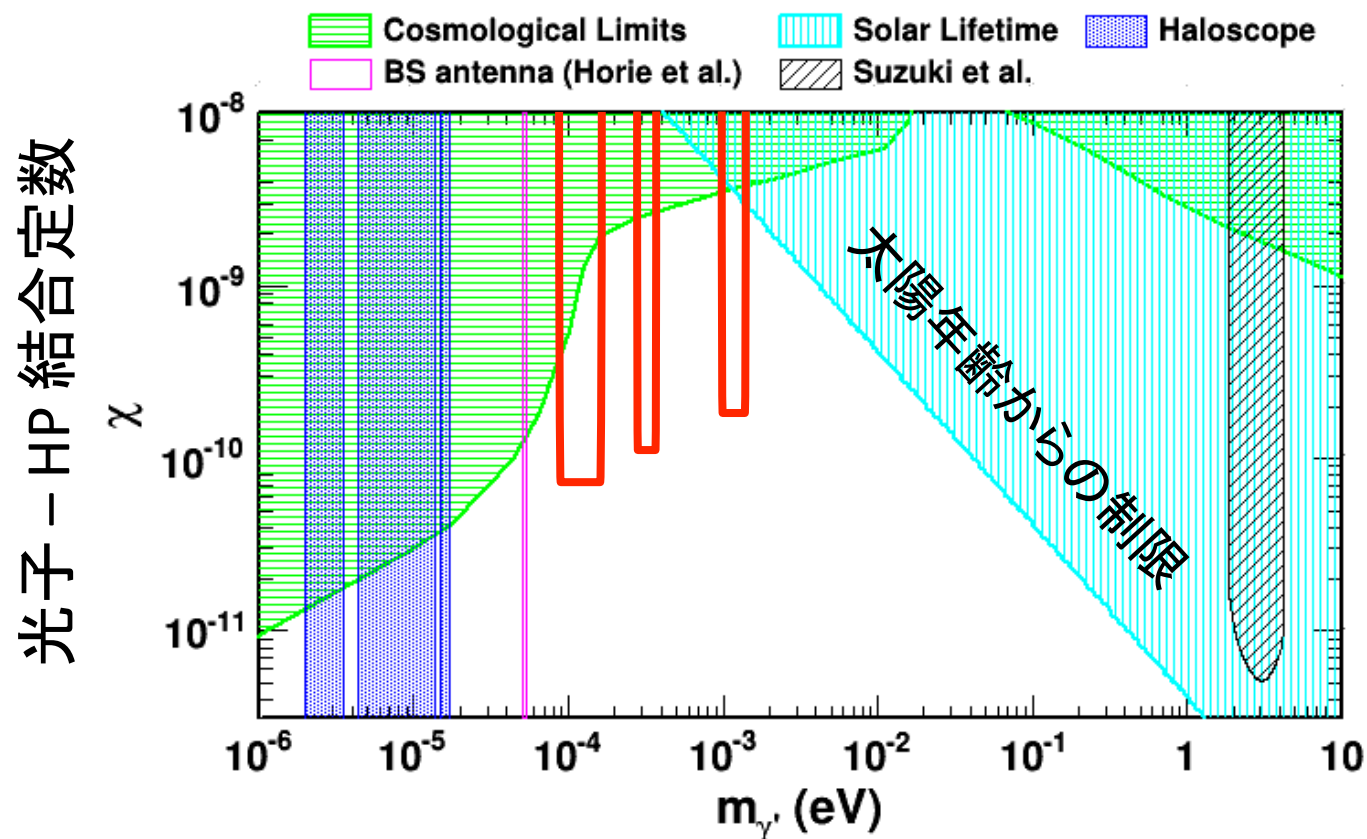
クモデスを応用したHP-CDM探索

Hidden Photon Dark Matter

暗黒光子

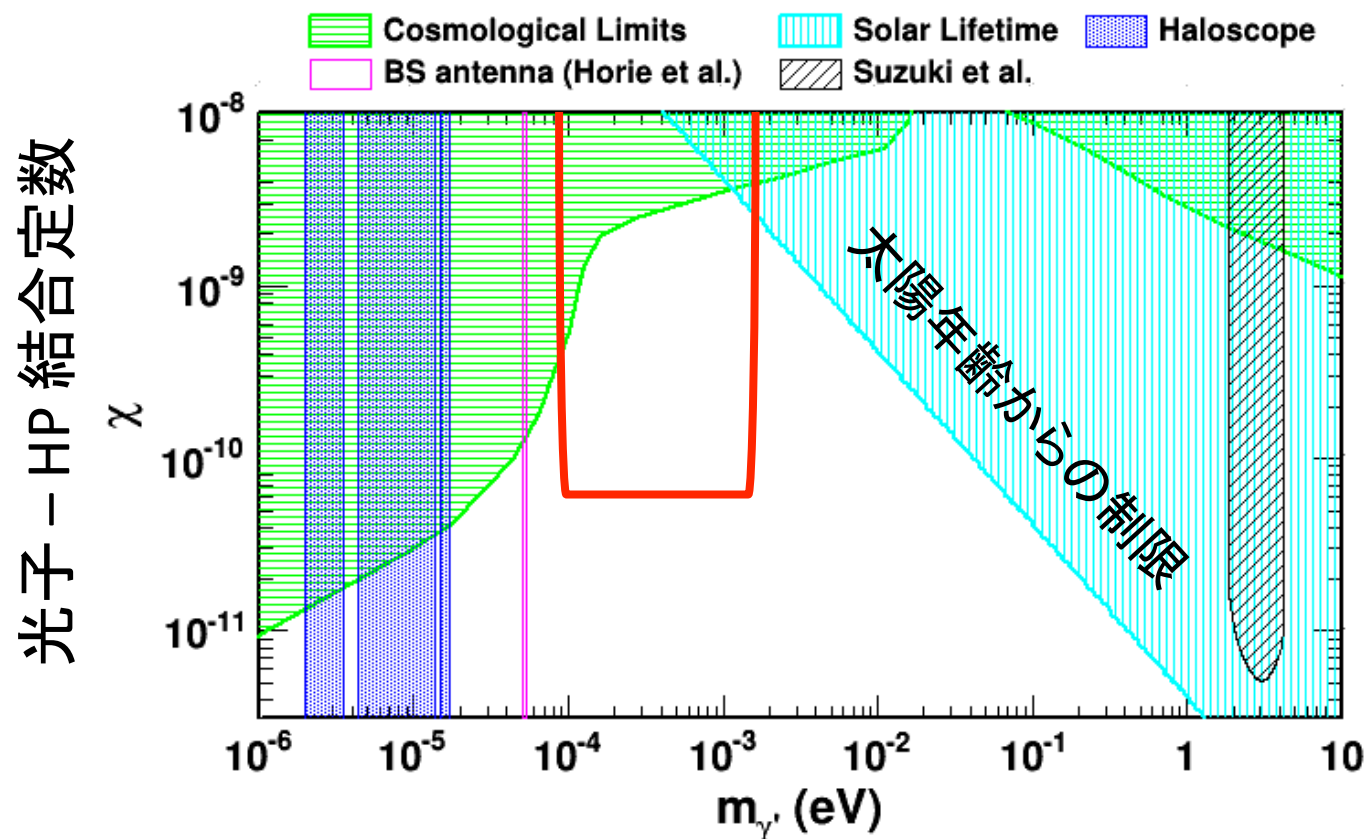


クモデスを応用したHP-CDM探索



手持ちの機器で、質量領域は広げられる
 20-30 GHz, 50-60 GHz, 170-190 GHz (~1yr ?)

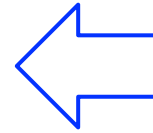
クモデスを応用したHP-CDM探索



金さえかければ質量領域はさらに広げられる
市販のンプ、ミキサー、LOでいける

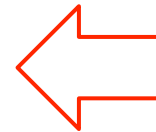
感度

$$\Delta\chi = 4.5 \times 10^{-14} \times \left(\frac{\text{ノイズ}}{10^{-23} \text{ W}} \right)^{1/2}$$



ノイズレベルは頑張っても一桁 \Leftrightarrow factor 3くらいしか稼げない
測定時間はさらにその平方根 $\frac{1}{2}$ 乗の効果なので、0(days)以上の時間をかけるメリットはない

$$\times \left(\frac{1 \text{ m}^2}{A_{\text{eff}}} \right)^{1/2}$$



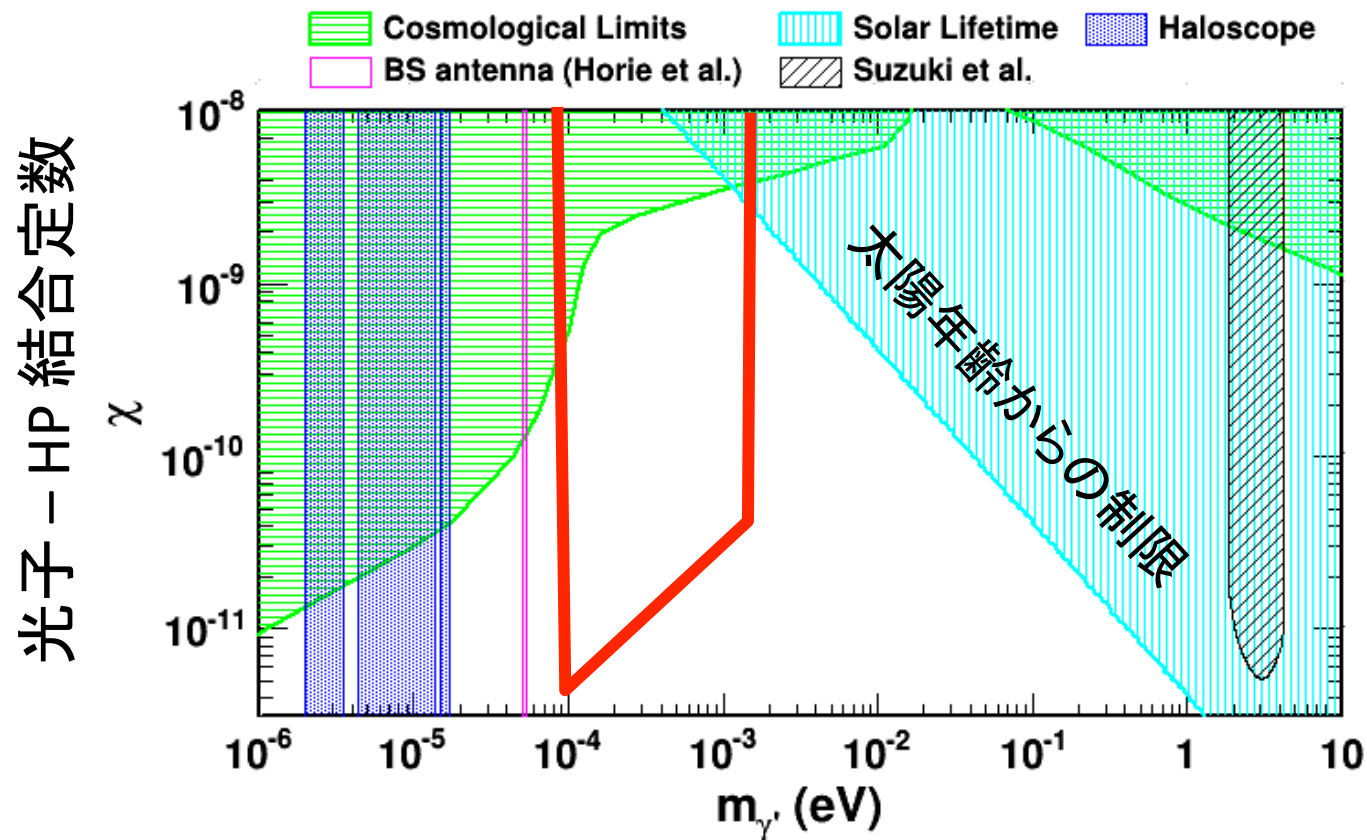
ミラーの直径(D)に比例頑張る見返り大

$$\times \left(\frac{0.3 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{\text{HP-CDM}}} \right)^{1/2} \times \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right)$$

ただし、HP-CDMのcoherent lengthより大きいミラーになると平面波でなくなる (10 m at 30 GHz, 1 m at 300 GHz)

→ 現実的なミラー径: $D \sim 1\text{m}$ at 30GHz, $D \sim 10\text{cm}$ at 300 GHz

クモデスを応用したHP-CDM探索



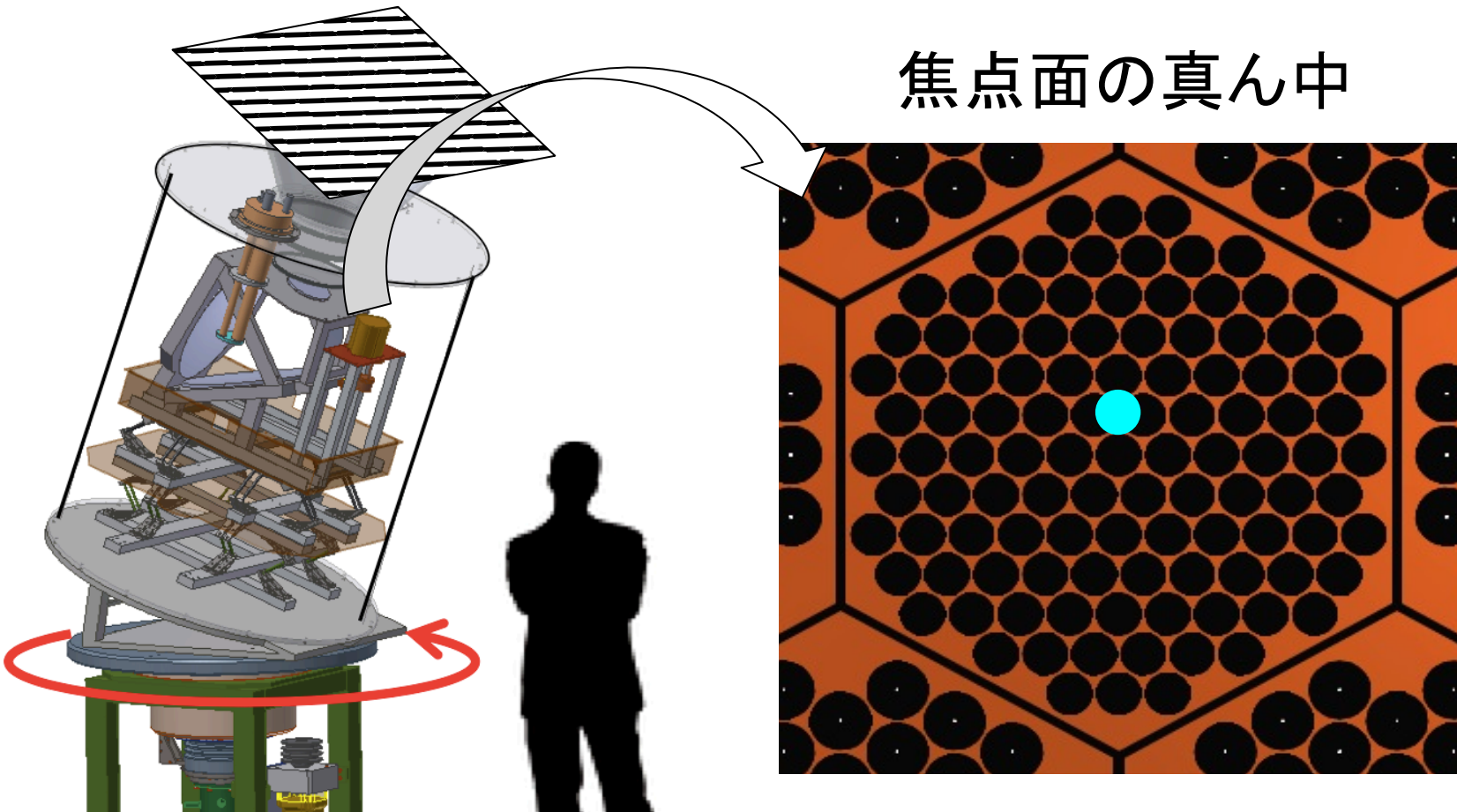
数年でお手軽に到達できるのはこのへんまでか？

乗り越えるべき実際上の課題

- Far-field condition ($L > 2D^2/\lambda$)が理想だが、、、
 - Coherent length: 10 m (30 GHz), 1 m (300 GHz)
 - $\phi 1\text{m}$ @ 30GHz $\rightarrow L > 200\text{ m}$, $\phi 10\text{cm}$ @ 300GHz $\rightarrow L > 20\text{ m}$
 - Near-fieldでの測定手法を確立することが現実的 \rightarrow calibrationが課題
 - HP-CDMのcoherent lengthとミラーの距離には注意. 大きなミラーが向かい合うと同位相での合わせ鏡となり容易に定在波
 - 十分離せば避けられる (片方パラボラならば、焦点の2倍くらい離せば十分だろう)
 - 離さなくても、波長より細かく距離変調して、定在波の影響をmitigateする手はありかも。 ← 要系統誤差study
- Calibration
 - 平面波に対するアンテナ効率 (有効面積)
 - Far-fieldに開口程度の黒体を置く測定が理想 (黒体を77Kに冷やすと楽だろう)
 - Network測定 (強度と位相の同時測定) で、同位相成分のみ抽出した近方界測定から換算可能。ただし、非常に非常に高価。。。
 - 周波数の絶対値 (massの絶対値)
 - 高い周波数帯の信号生成は、検出器よりも高価

皮算用

もし $\chi \sim 10^{-10}$ に兆候みえたら... 「風向」がわかる回轉變調分析！



焦点面の真ん中

CMB偏光望遠鏡
GroundBIRD

挑戦的萌芽H28-30 小栗秀悟

科研費
KAKENHI

>10年展望？, $\chi \ll 10^{-11}$ @ 米国

PHYSICAL REVIEW D **92**, 075012 (2015)

Radio for hidden-photon dark matter detection

Saptarshi Chaudhuri,¹ Peter W. Graham,² Kent Irwin,^{1,3} Jeremy Mardon,² Surjeet Rajendran,^{4,2} and Yue Zhao²

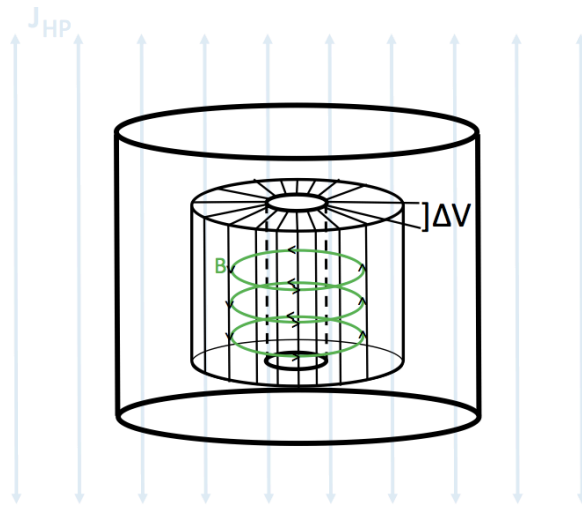
¹Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

²Stanford Institute for Theoretical Physics, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

³SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California 94025, USA

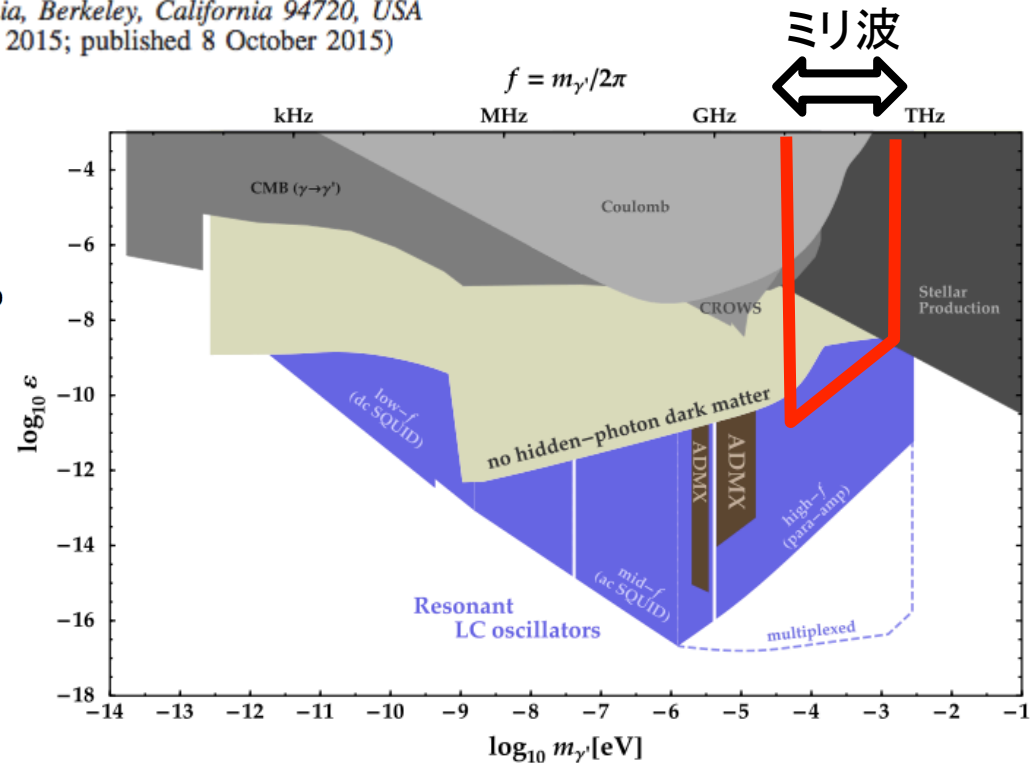
⁴Berkeley Center for Theoretical Physics, Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720, USA

(Received 15 April 2015; published 8 October 2015)



- Current J_{HP} creates circumferential quasi-dc magnetic field inside shield
- Use toroidal geometry to pick up magnetic field
- Read out voltage with amplifier, e.g. SQUID
- Inherently broadband, but would need to integrate forever!

- $f < 10$ MHz: dc SQUID
- $10 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz}$: microwave SQUID
- $f > 1 \text{ GHz}$: quantum-limited parametric amplifiers (similar to ADMX), future- bolometers or single-photon counting



(前述のhigh-scale inflation (2016)は、著者自らが $> 10^{-5}$ eVを正当化する為に作ったモデルかも)

まとめ

- Dish antennaを使った $m_\gamma = 10^{-4} \text{ eV} - 10^{-3} \text{ eV}$ の探索
- $\chi \approx 10^{-10}$ 程度は容易に到達
 - A few years ? (マンパワーが直近の課題)
 - スペアナのduty向上 or deadtime less O(10GHz) samplerがあれば、一瞬で広いmass rangeはける

やりたいひと募集
osamu.tajima@kek.jp

