

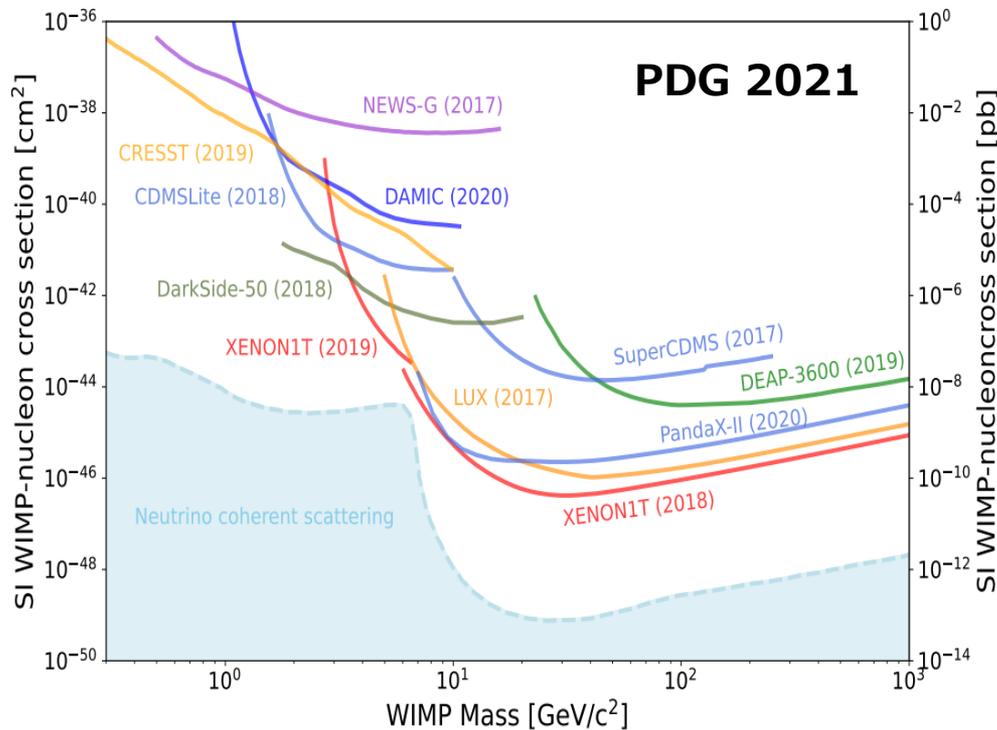
A person is lying on their back on a dark, grassy hill under a clear night sky filled with stars. The person is wearing dark clothing and has their head resting on the ground. The background shows a silhouette of a mountain range in the distance.

CMB観測技術を応用した ダークフォトンCDMの探索実験

田島治 (京大理)

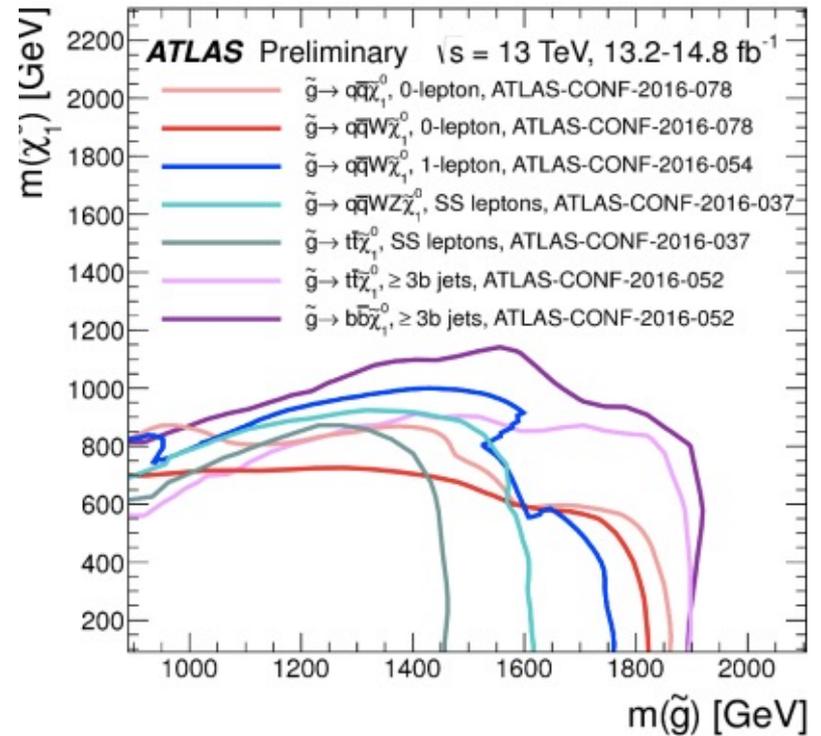
ダークマターは存在する！ にも関わらず、まだ未検出…

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)



超軽量ダークマター (WISP)

例えば、Dark photon



Credit: Higgstan

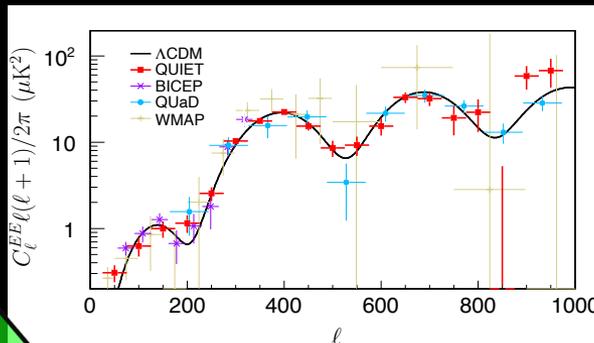
わずか〜に電磁場と相互作用する粒子

A person is lying on their back on a dark, grassy hill under a starry night sky. The person is wearing dark clothing and has their head resting on the ground. The sky is filled with numerous stars, and a faint mountain range is visible in the distance. The overall scene is dark and atmospheric.

CMB観測技術を応用した ダークフォトンCDMの探索実験

田島治 (京大理)

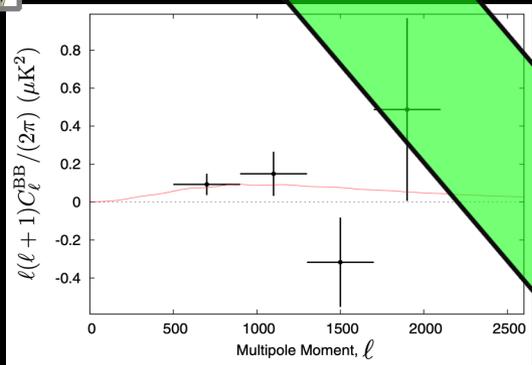
CMB実験でやってきたこと



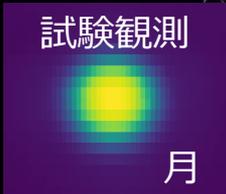
QUIET実験
Eモードの世界最精密
測定 (2013)

POLARBEAR実験
較正

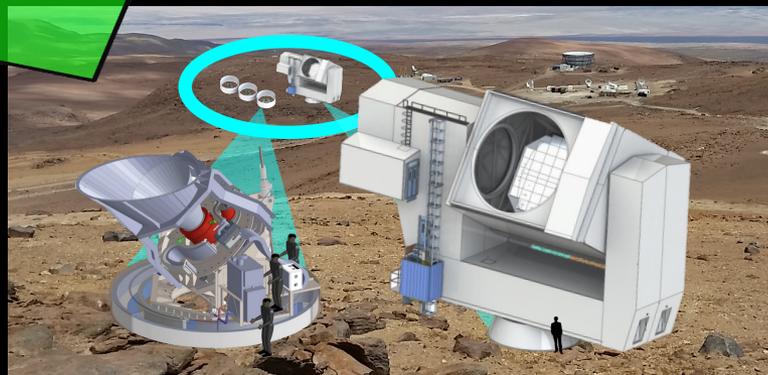
重レンズ
Bモード観測
(2017)



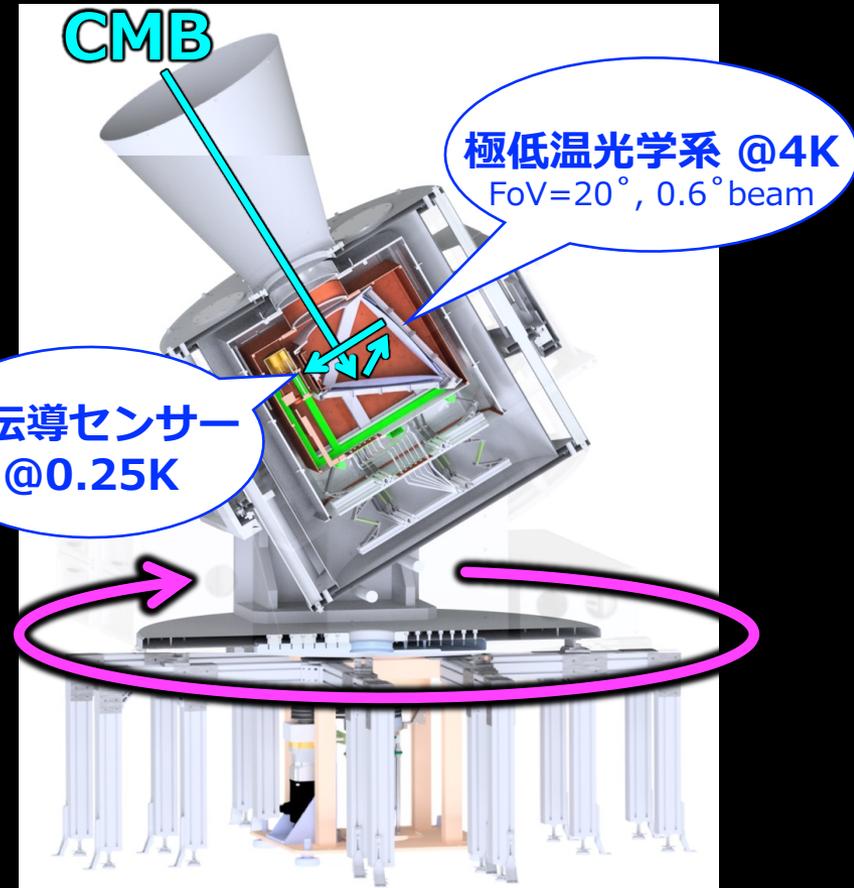
国産CMB実験
GroundBIRD
の観測開始
(2019)



Simons Observatory



GroundBIRD望遠鏡



世界最速のスキャン変調！
(従来の100倍速)

Simons Observatory

Small Aperture Telescope

SATの開発

CMB

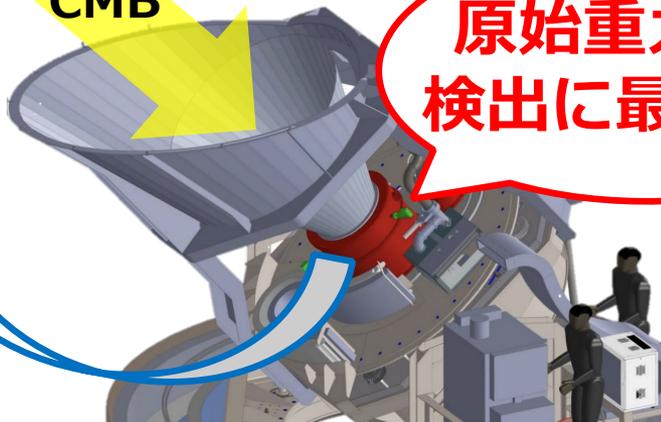
米国担当
受信機



CMB

原始重力波の
検出に最適化!

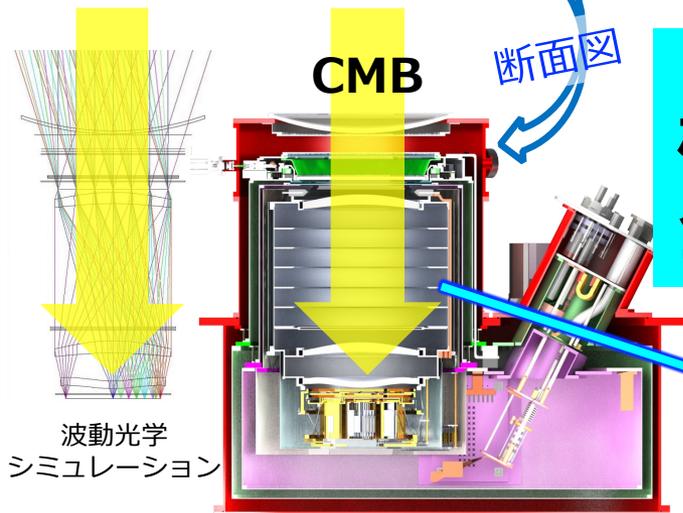
欧米担当 構造体



CMB

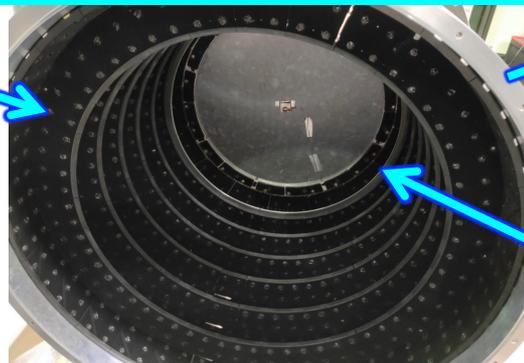
断面図

SATの“心臓部”
極低温光学筒 (OT)
全3台を日本が担当

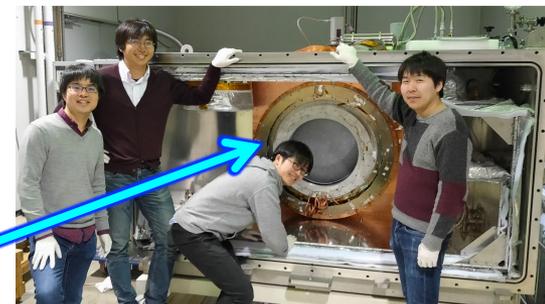


波動光学
シミュレーション

光学設計の主導 作製



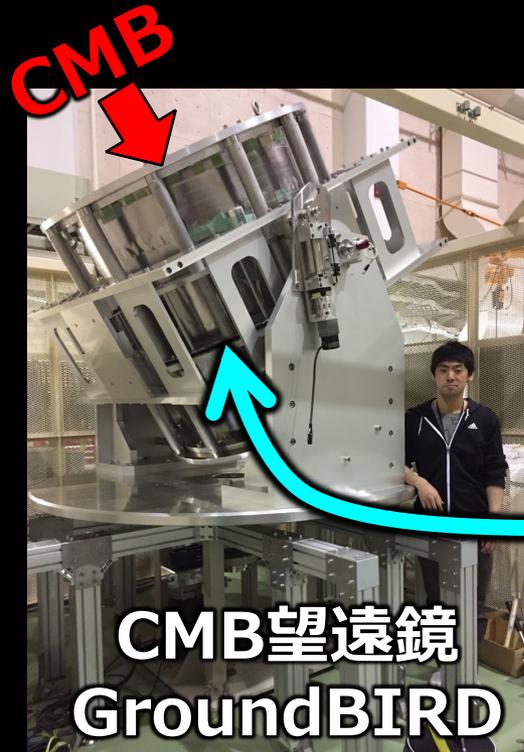
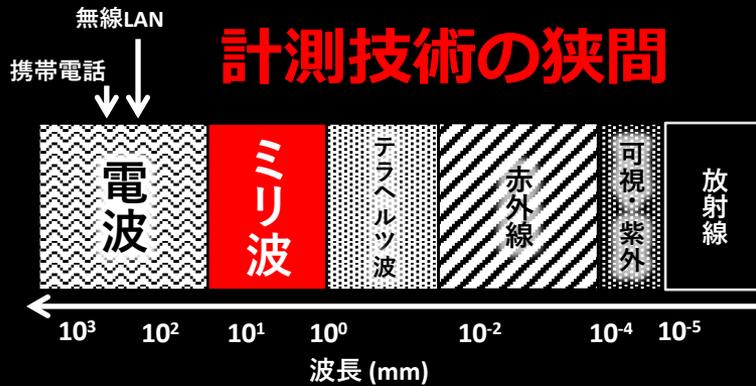
3Dプリンタ型黒体
(独自の新技术も創出)



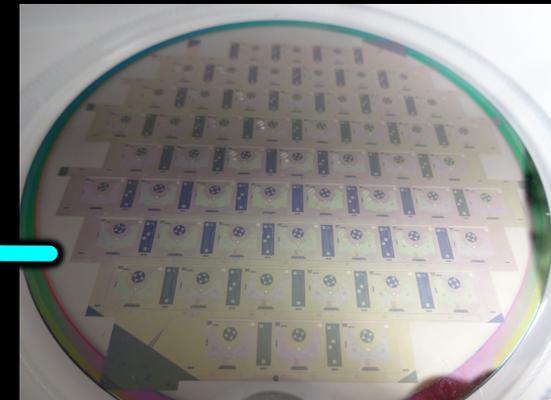
冷却試験

CMB望遠鏡の技術特色

ミリ波の計測



超伝導 デバイス



魔法の断熱フィルター

“RT-MLI”

特許: JP6029079

RSI, 84, 114502 (2013).



連続回転できる
極低温システム

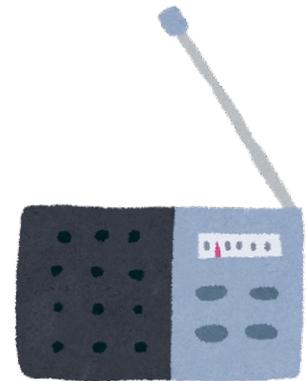
特許: US 9,316,418-B2

RSI, 84, 055116 (2013).

両者を融合する特許技術

光(電磁波)の波動性と粒子性

20世紀初頭に発見された理論「量子力学」
の最大成果でありきっかけ



波動性

ある波長で振動している

→ 共振、干渉、回折

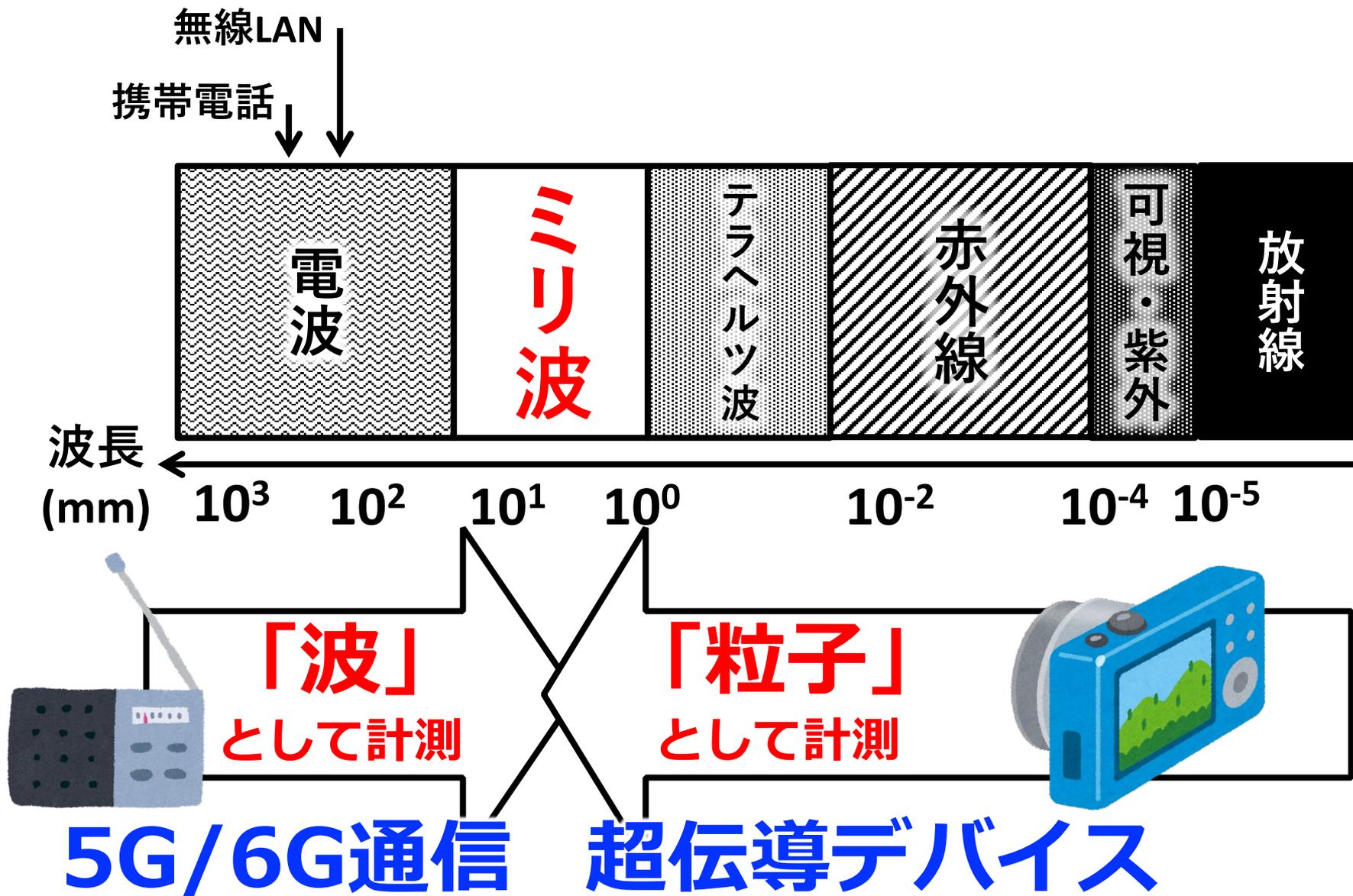
粒子性

1個、2個、…と勘定できる

→ 電子やクーパー対の
「数」として勘定できる



ミリ波は計測技術の狭間！



もっと良く見える！今まで見えなかったものが見える！

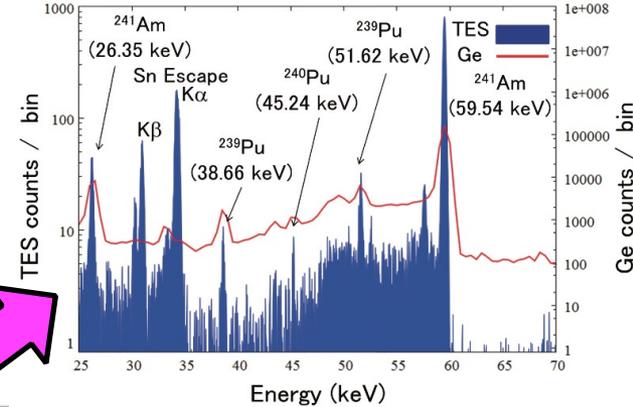
「測る」産業革命！

超高感度な
宇宙観測

半導体
計測

超伝導

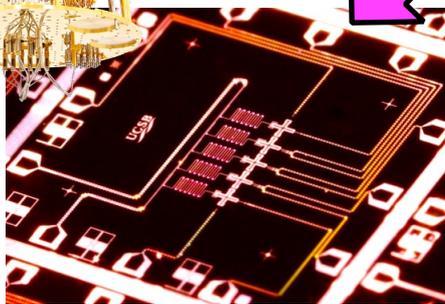
半導体



放射線計測

超伝導
量子計測

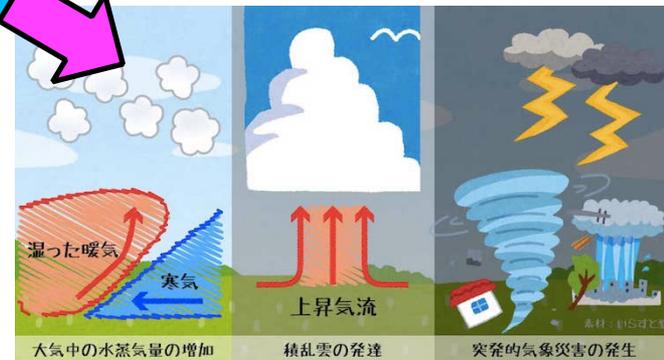
千倍も高感度！



量子コンピューター



自動車の自動運転等



竜巻・ゲリラ豪雨予測

**実はダークマターに先立って
応用した例があります**

超高感度な大気水蒸気量の観測器

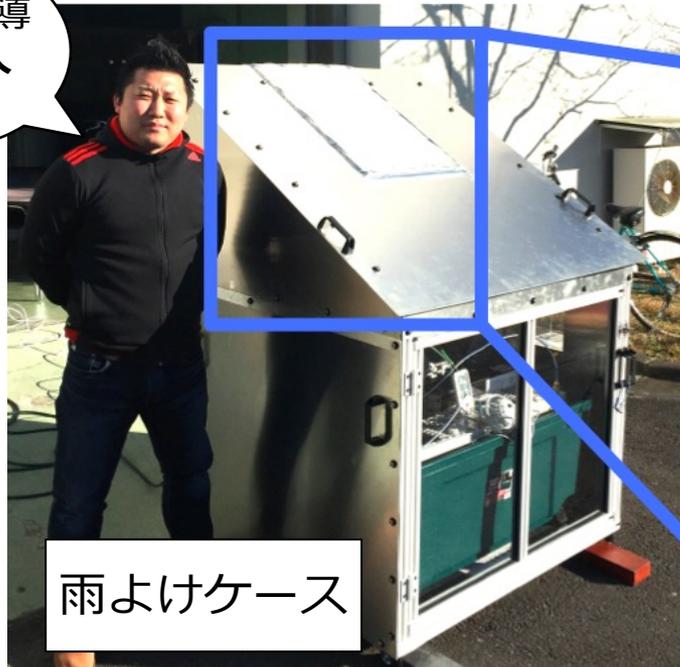
KUMODeS

雲、クモデス

KEK Universal Moisture & Oxygen Detection System

目指せ
アメダス
の地位

開発を主導
長崎岳人
研究員

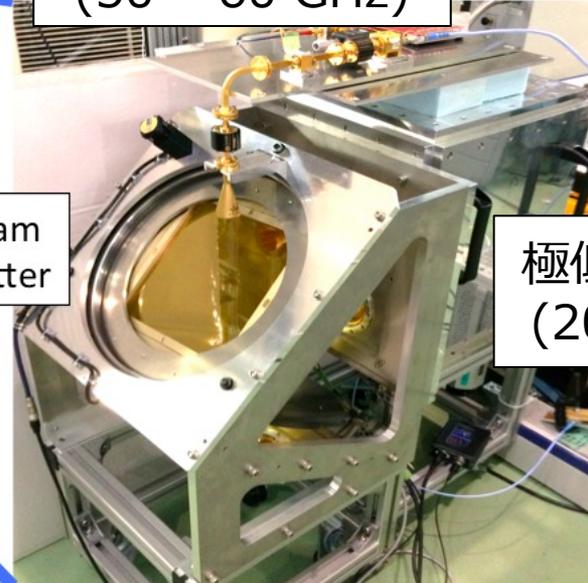


雨よけケース

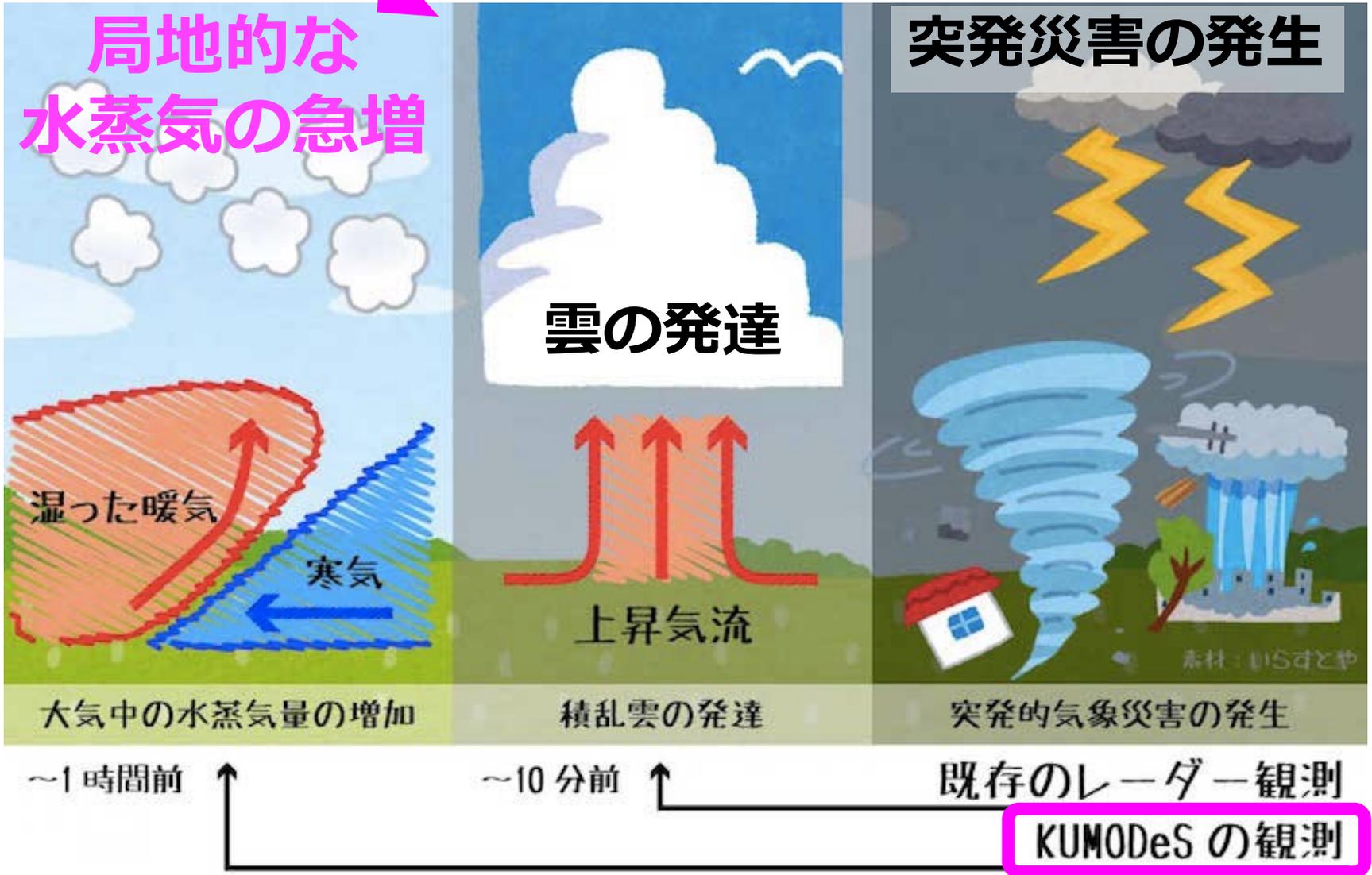
常温の受信器
(50 - 60 GHz)

Beam
splitter

極低温の受信器
(20 - 30 GHz)

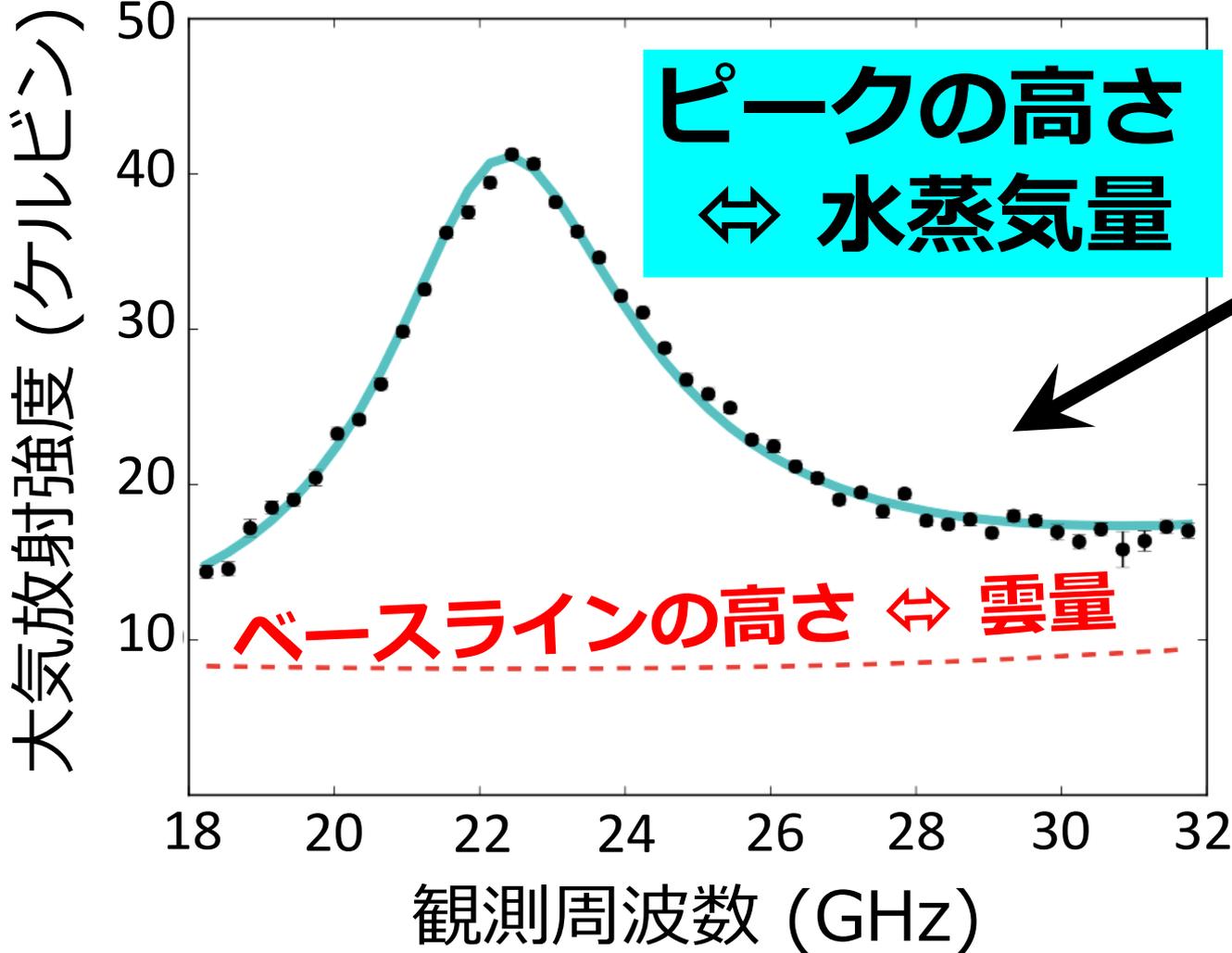


突発災害の“予兆の予兆”を捉える！



空の水蒸気量と雲量が測れる

初観測データ (2015年5月)



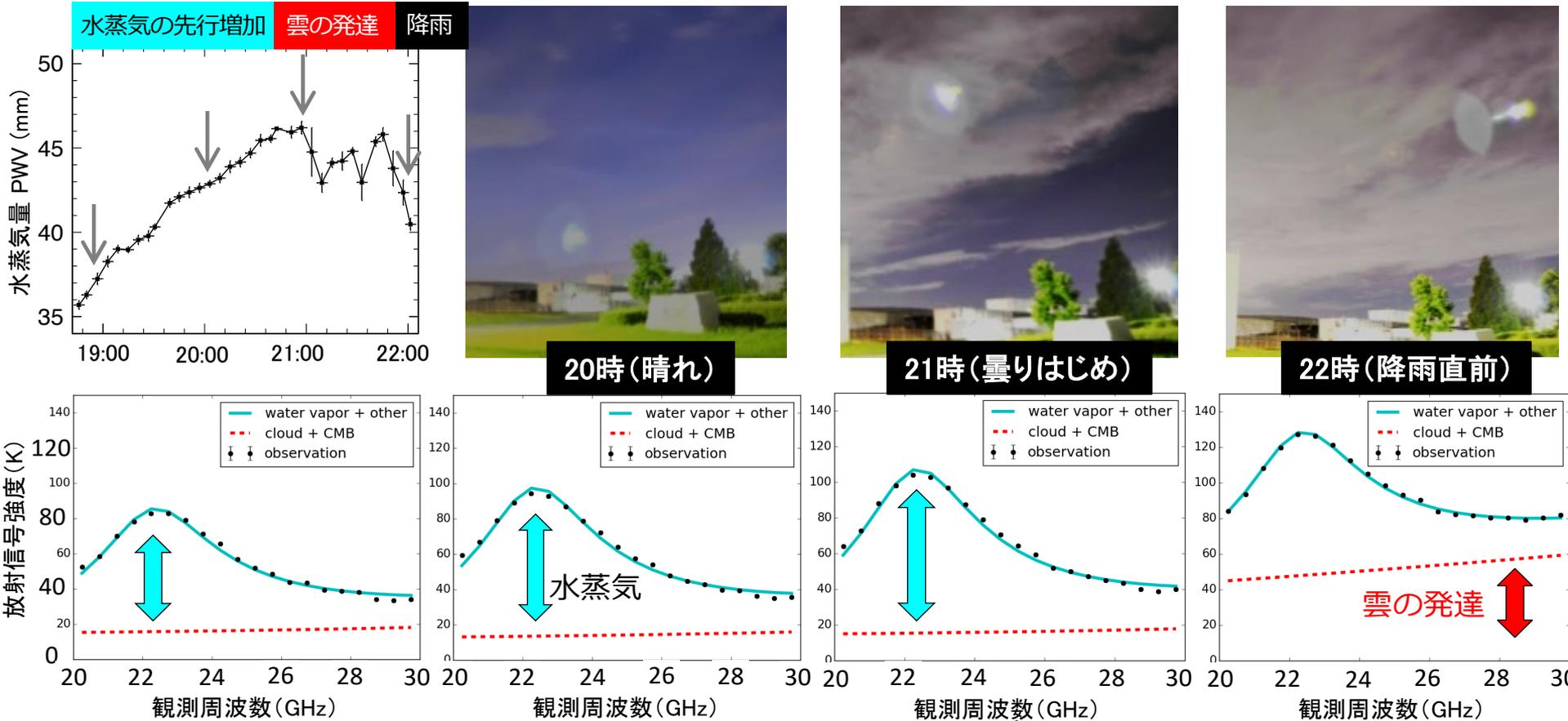
快晴日の
生データ



クモデス

雨雲発生に先立つ水蒸気増加を検知!

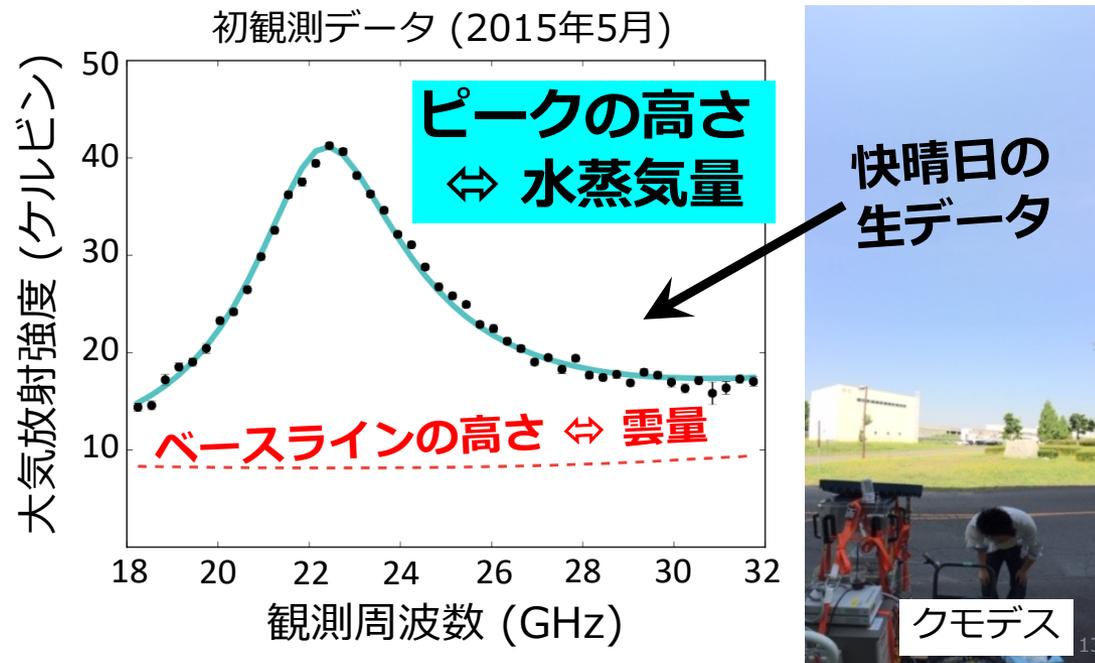
つくば市での観測例 (7/15, 2015)



大気水蒸気量が先行して増加

雲の発達

空の水蒸気量と雲量が測れる



高感度・低ノイズ ← CMB

ミリ波の分光 ← クモデス

コレ、ダークマター検出に

使えるんじゃないかね？

A person is lying on their back on a dark, grassy hill under a starry night sky. The person is wearing dark clothing and has their head resting on the ground. The background is a dark blue sky filled with numerous small, bright stars. The overall scene is peaceful and contemplative.

とクモデスの

CMB観測技術を応用した ダークフォトンCDMの探索実験

田島治 (京大理)

First Results of DOSUE-RR

**Search for dark photon CDM in
the mass range $74 - 110 \mu\text{eV}/c^2$**

Osamu TAJIMA (Kyoto U.)

On behalf of the DOSUE-RR collaboration

<https://arxiv.org/abs/2205.03679>

What's DP-CDM?

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

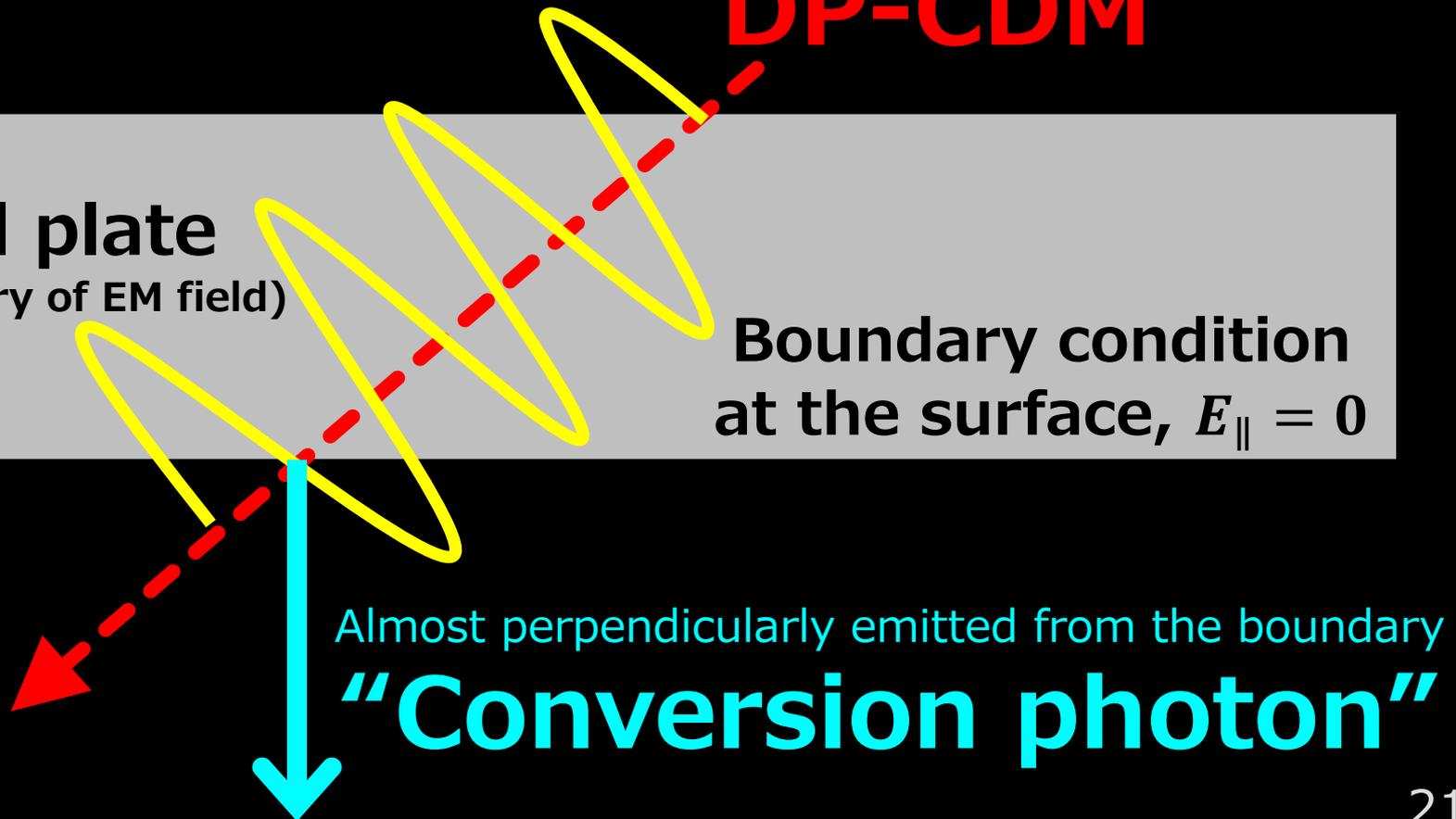
EM-fields of DP-CDM appear via Kinetic mixing

$$E_{\text{DP}} = \chi m_{\text{DP}} X_{\text{DP}}$$

DP-CDM

Metal plate
(Boundary of EM field)

Boundary condition
at the surface, $E_{\parallel} = 0$



What's DP-CDM?

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

EM-fields of DP-CDM appear via Kinetic mixing

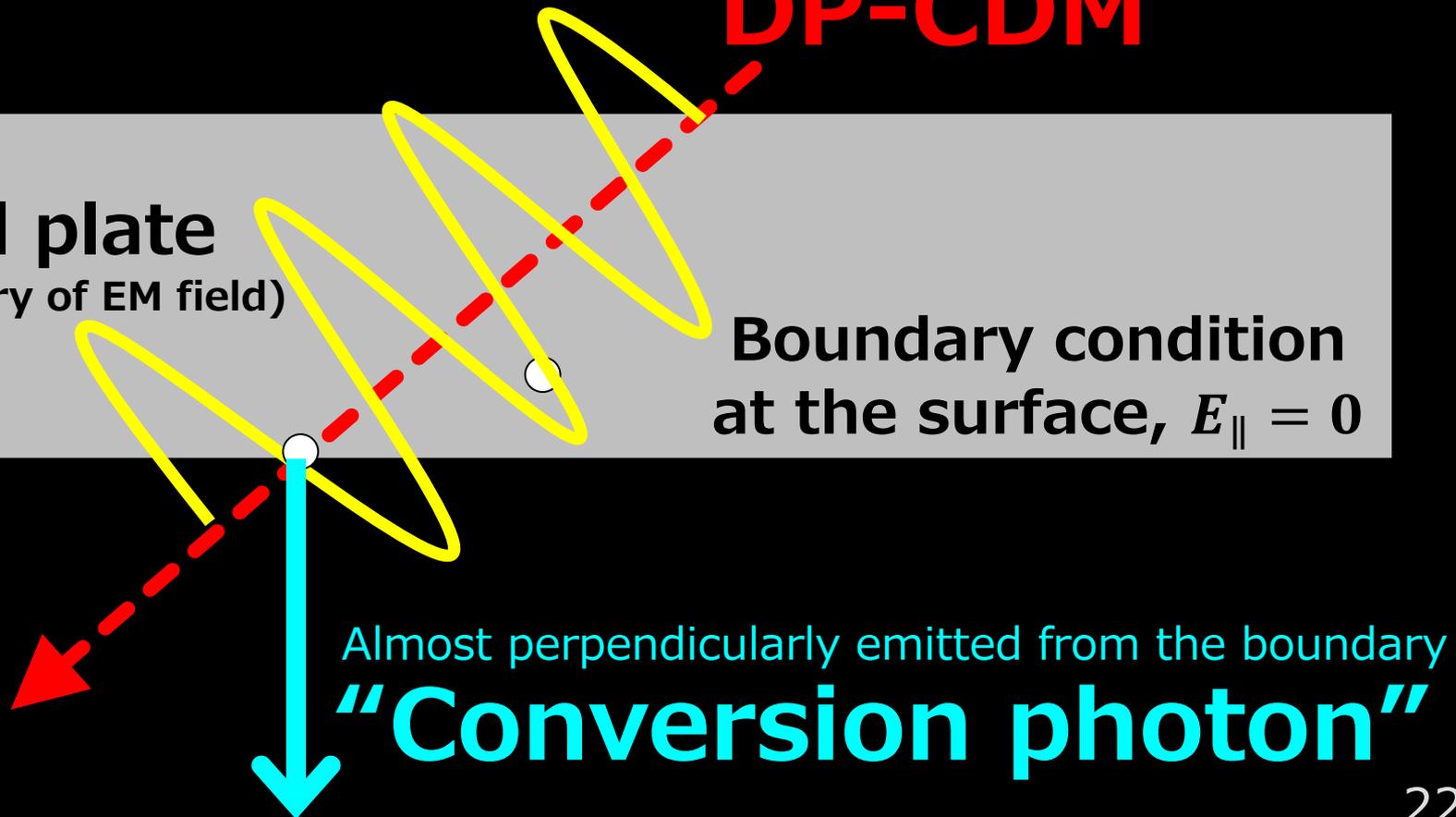
$$E_{\text{DP}} = \chi m_{\text{DP}} X_{\text{DP}}$$

DP-CDM

Metal plate

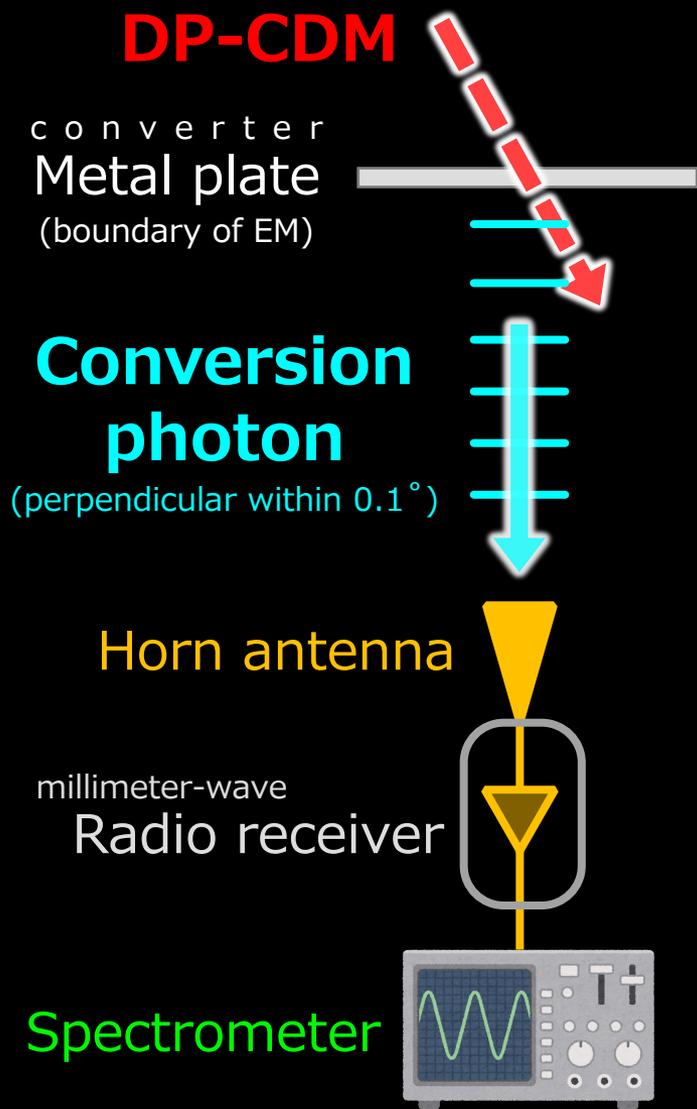
(Boundary of EM field)

Boundary condition
at the surface, $E_{\parallel} = 0$

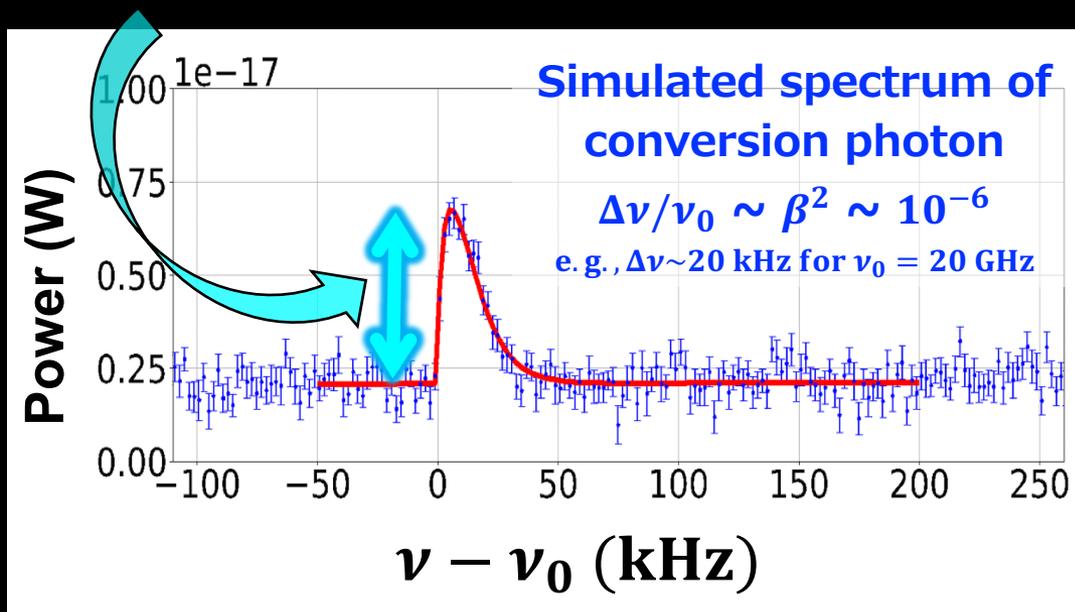


Detection principle of DP-CDM

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



Peak height $\propto \chi^2$

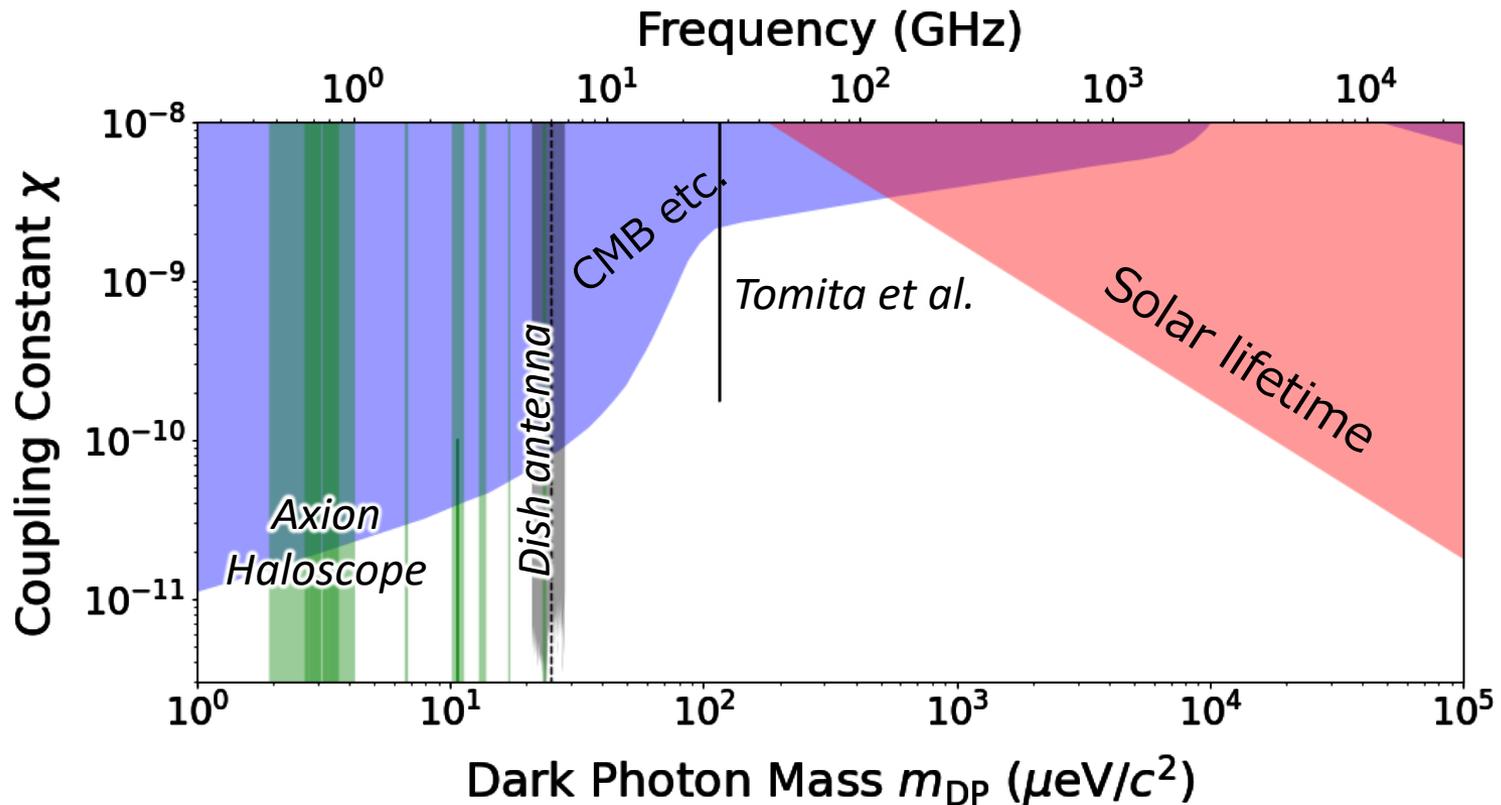


Peak freq. \Leftrightarrow mass

$$h\nu_0 \simeq m_{\text{DP}}c^2$$

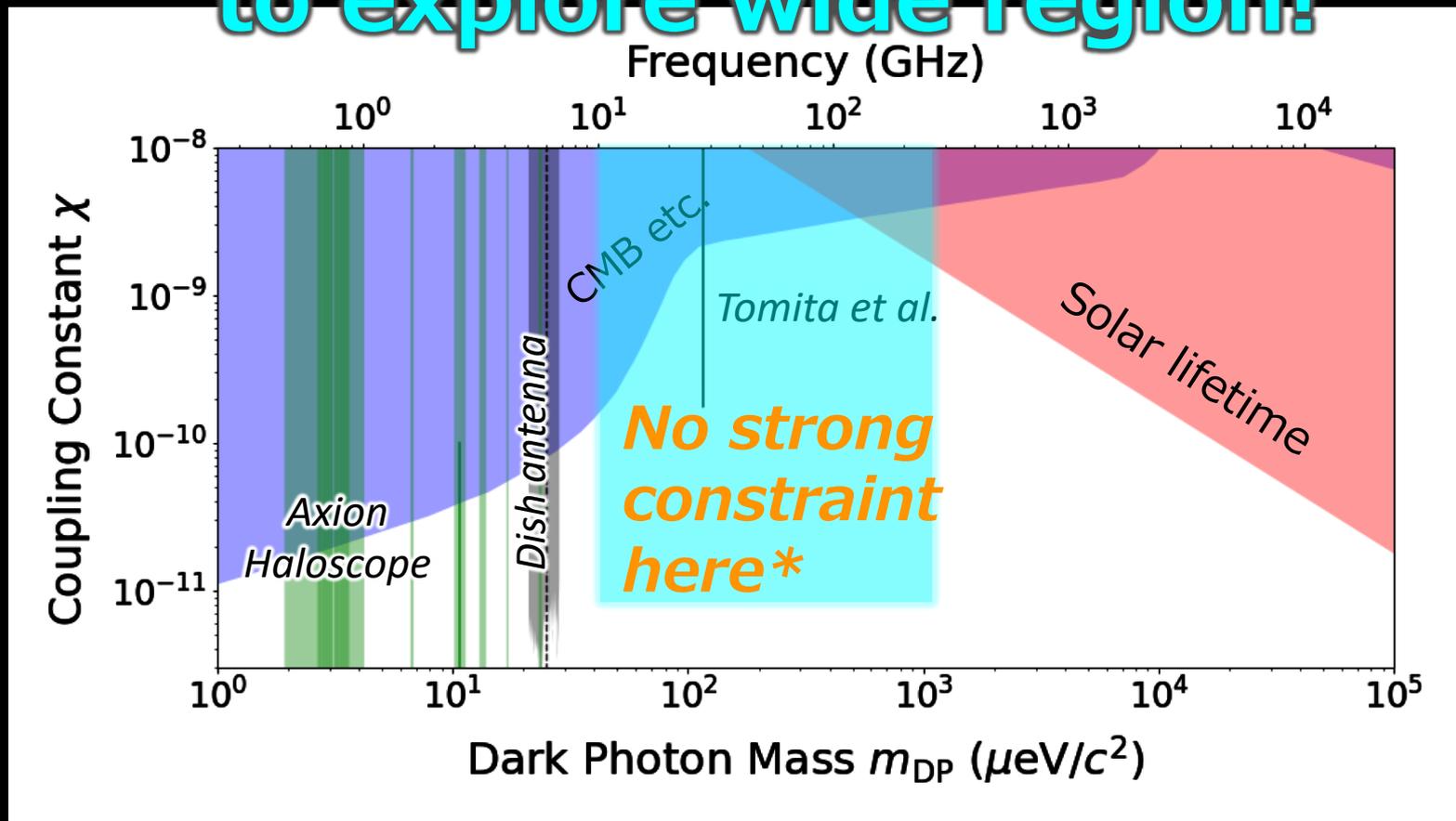
e.g., 24 GHz \Leftrightarrow $100 \mu\text{eV}/c^2$

Constraints to date



Constraints to date

DOSUE-RR is series of experiments to explore wide region!



* Motivations from string theories and inflation models, e.g., JCAP 1304, 016 (2013), Phys. Rev. D 93, 103520 (2016).

The **DOSUE-RR** Collaboration

Dark-photon/dark-matter Observing System for Un-Explored Radio-Range

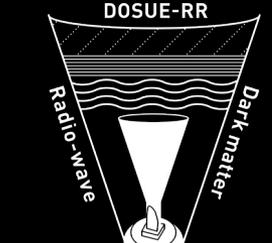
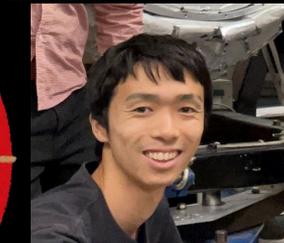
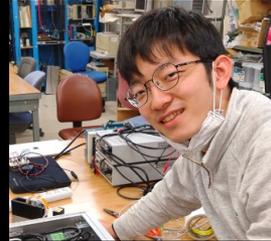
Kyoto University

- Shunsuke Adachi
- Ryo Fujinaka
- Shumpei Kotaka
- Hironobu Nakata
- Yudai Seino
- Yoshinori Sueno
- Toshi Sumida
- Junya Suzuki
- Osamu Tajima
- Soichiro Takeichi

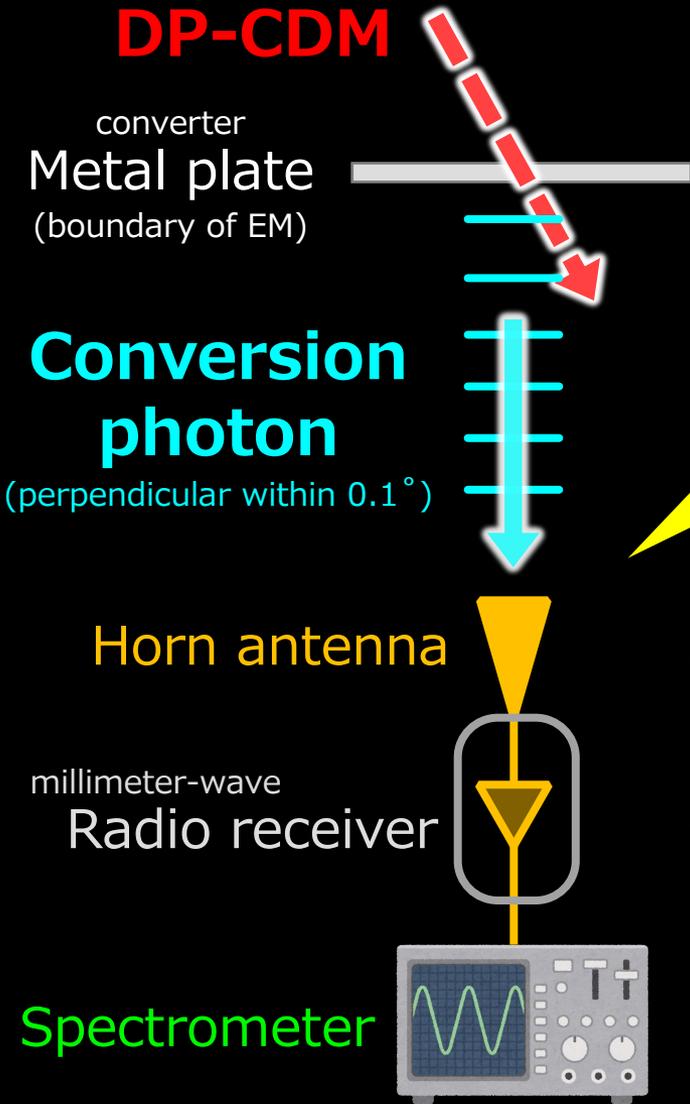
University of Tsukuba

- Shunsuke Honda

Recently moved from Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)



Major Noise?



Thermal radiation from ambient is major noise

$$k_B T_{300\text{K}} \Delta\nu \approx 10^{-17} \text{ W}$$

for spectrum bin width of 2 kHz

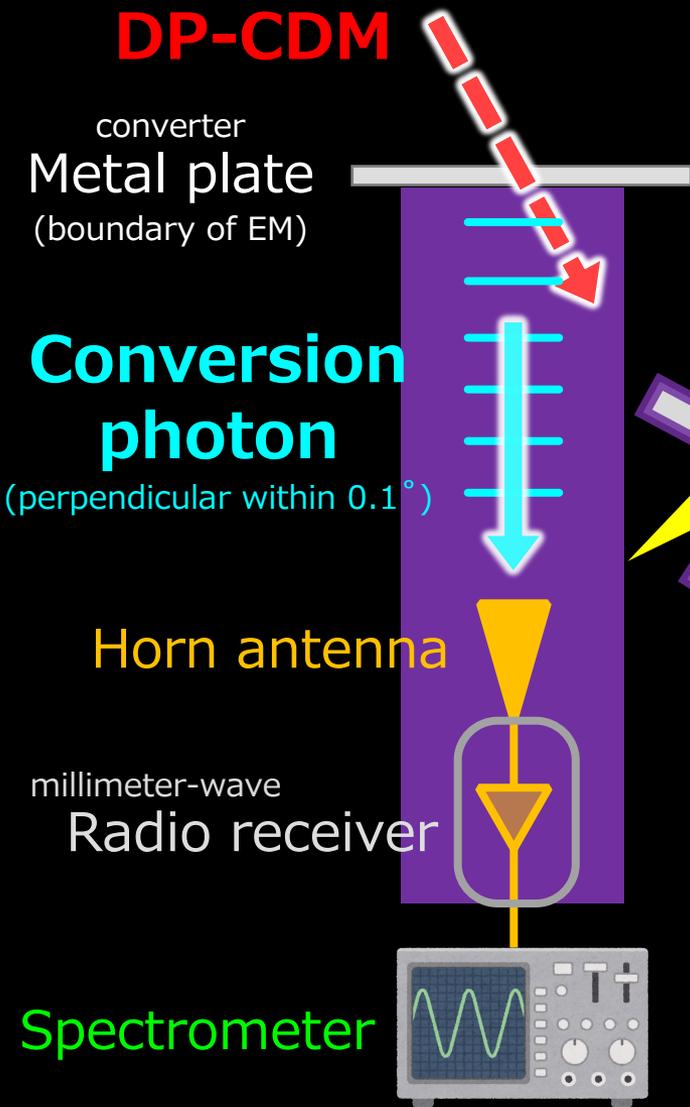
Conversion photon is faint!

$$P_{\text{DP}} \approx 10^{-19} \text{ W} \left(\frac{\chi}{10^{-10}} \right)^2 \left(\frac{A_{\text{eff}}}{17.4 \text{ cm}^2} \right)$$

Under standard assumption

- random pol. orientation
- $\rho_{\text{CDM}} = 0.39 \text{ GeV/cm}^3$

Instrumental concepts



Thermal radiation from ambient is major noise

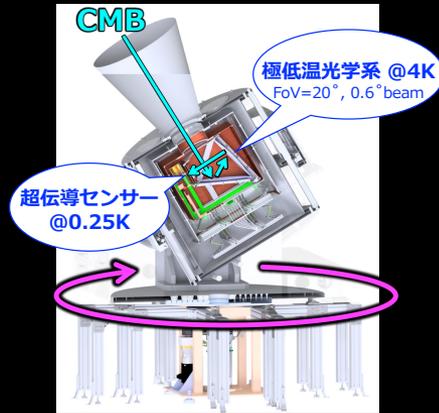
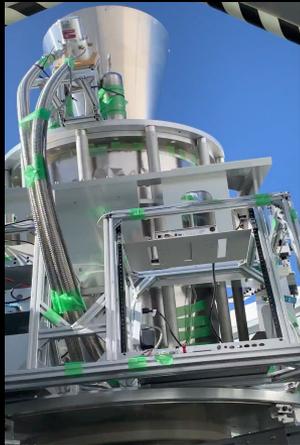
Suppression of thermal noise
(same strategy as recent CMB experiments)

Maintainance the system and optical path in the cryogenic shield at ~ 3 K

CMB望遠鏡のノウハウ

みたくない方向は冷やして低ノイズに！

GroundBIRD望遠鏡



世界最速のスキャン変調！
(従来の100倍速)

5

Simons Observatory

Small Aperture Telescope

SATの開発

CMB

米国担当 受信機

原始重力波の検出に最適化！

欧米担当 構造体

SATの“心臓部”
極低温光学筒 (OT)
全3台を日本が担当

冷却試験

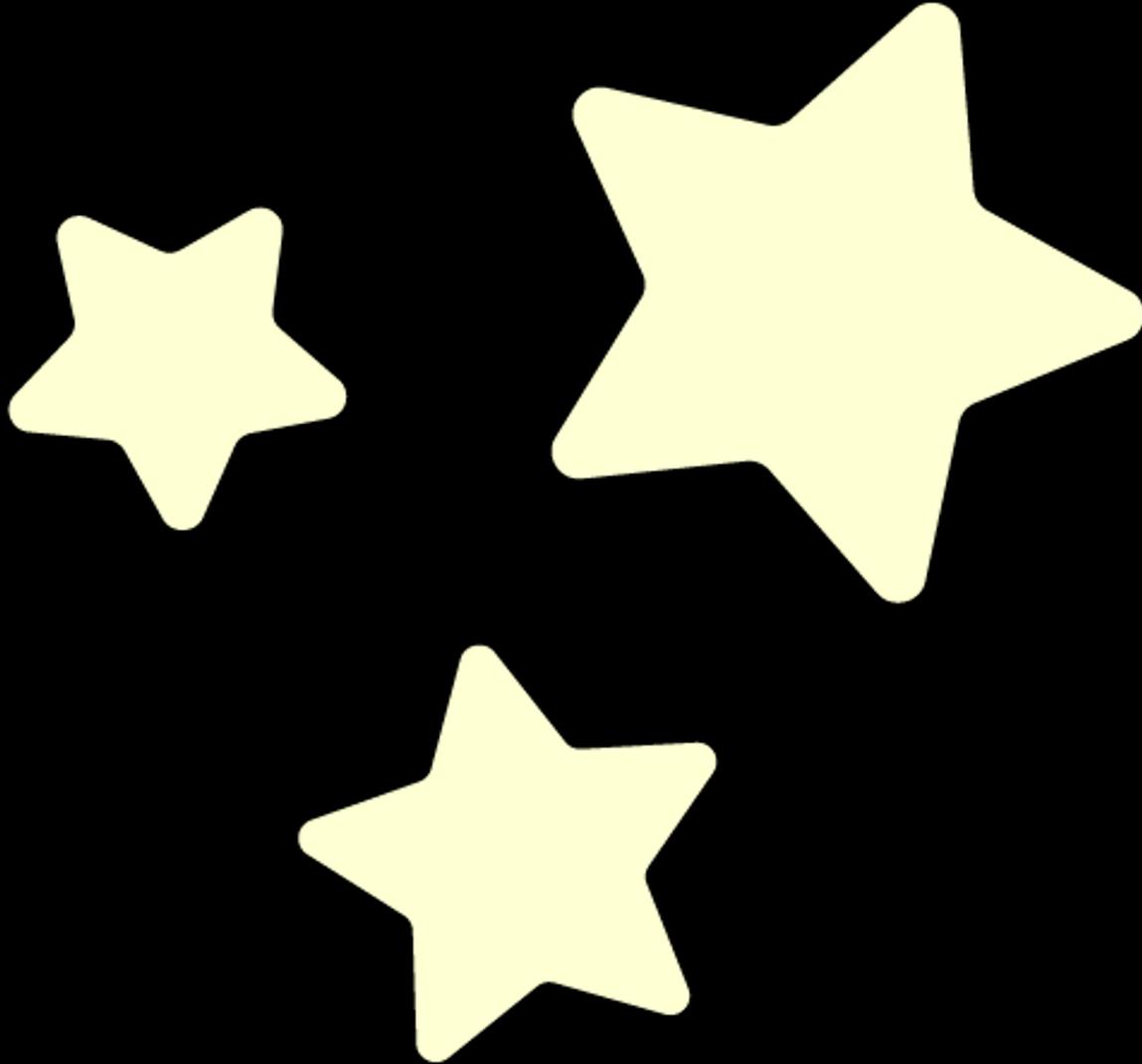
3Dプリンタ型黒体
(独自の新技术も創出)

波動光学シミュレーション

光学設計の主導 作製

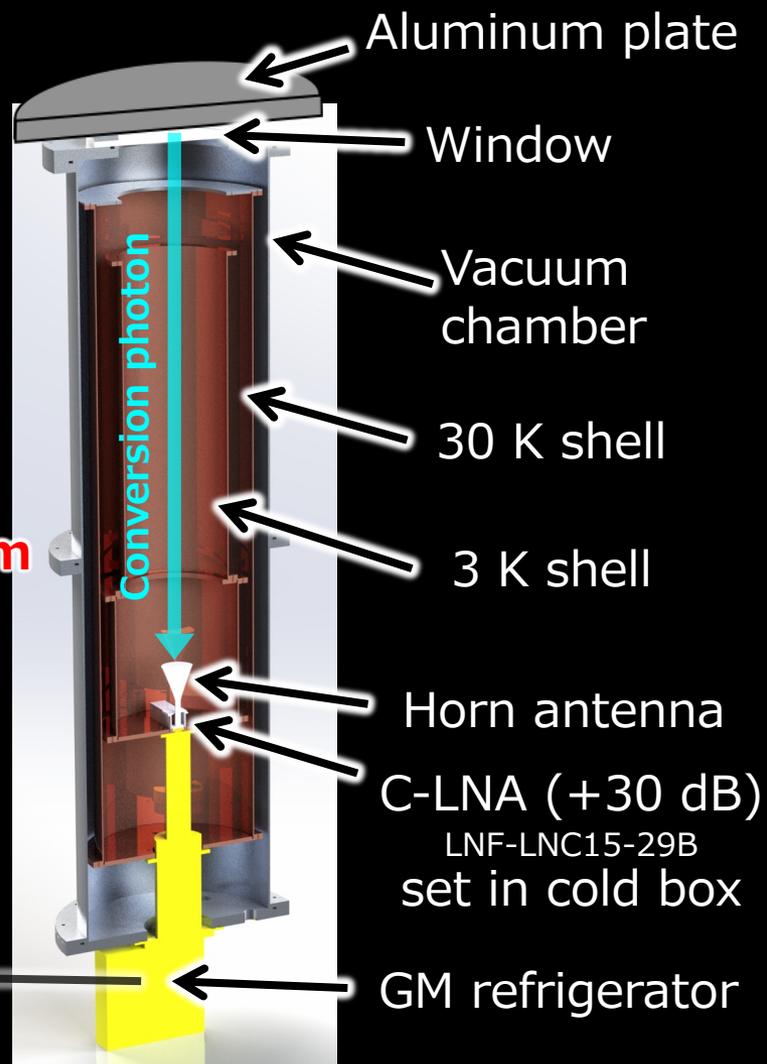
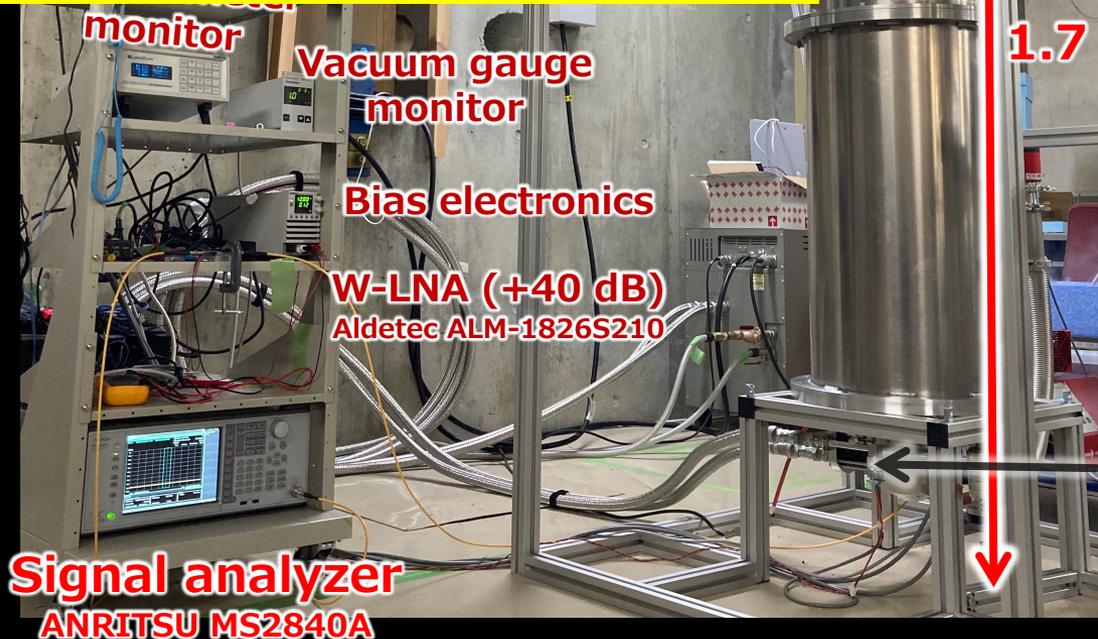
断面図

6

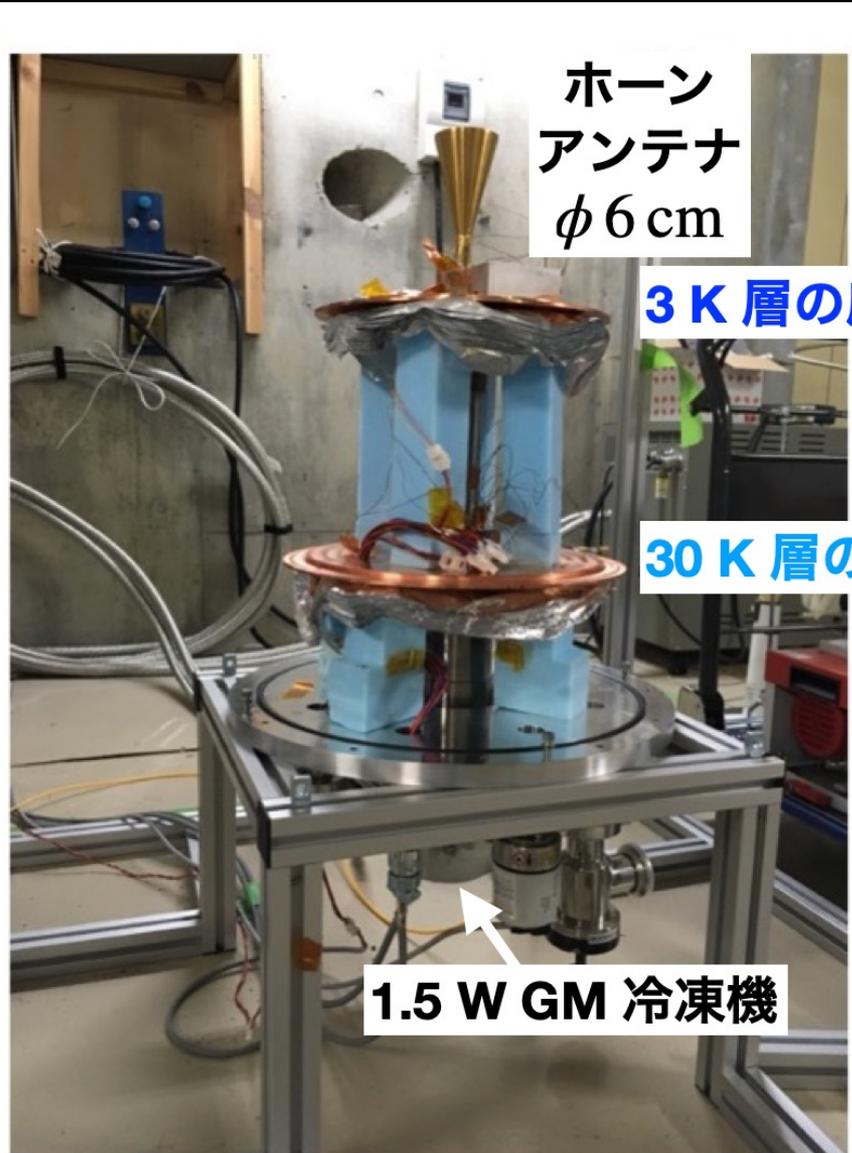


Instruments

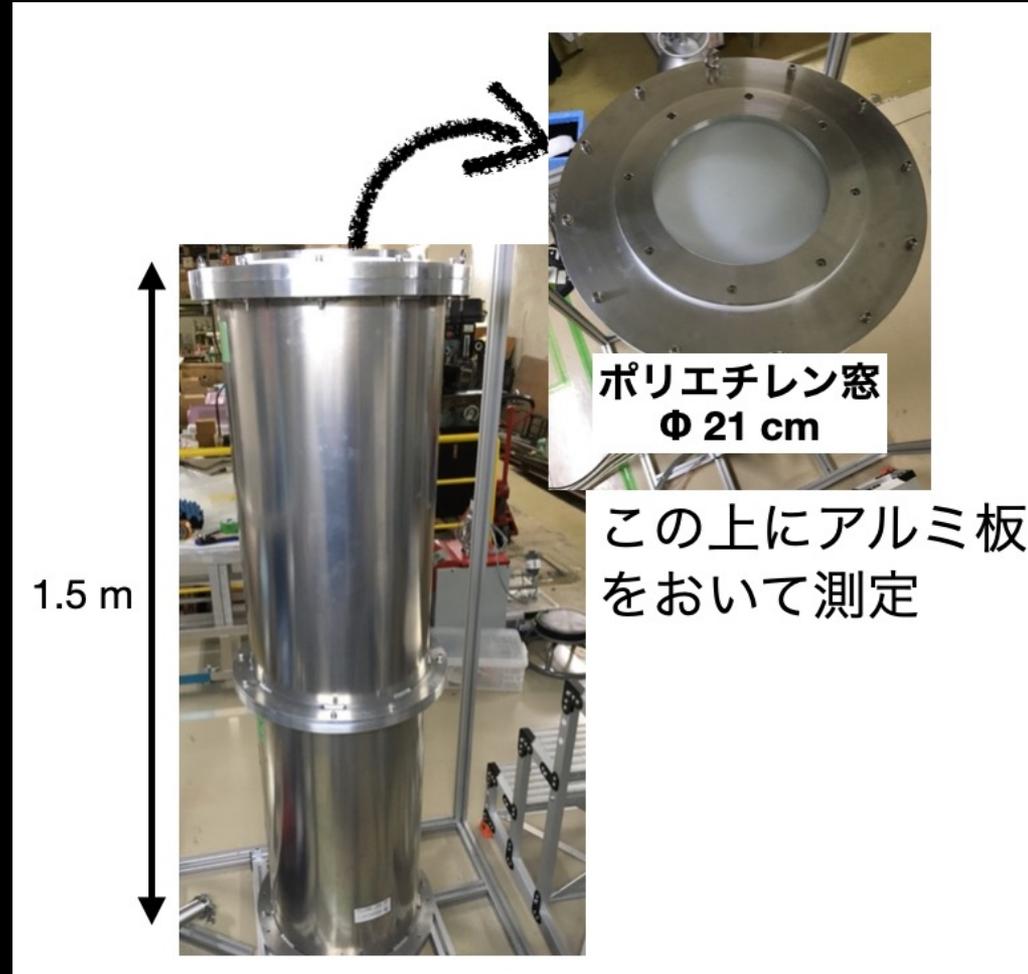
Success to achieve low system noise $\approx 10^{-18}$ W ($\approx 1/10$ of ambient)



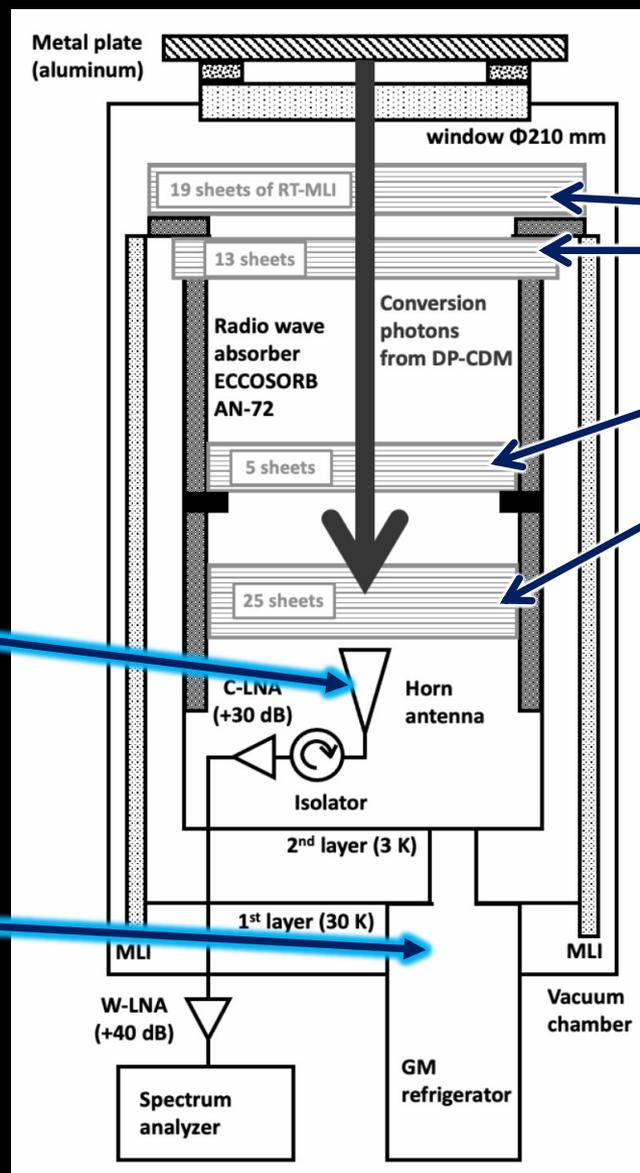
DOSUE-RR/K-bandの中身



DOSUE-RR/K-bandの中身

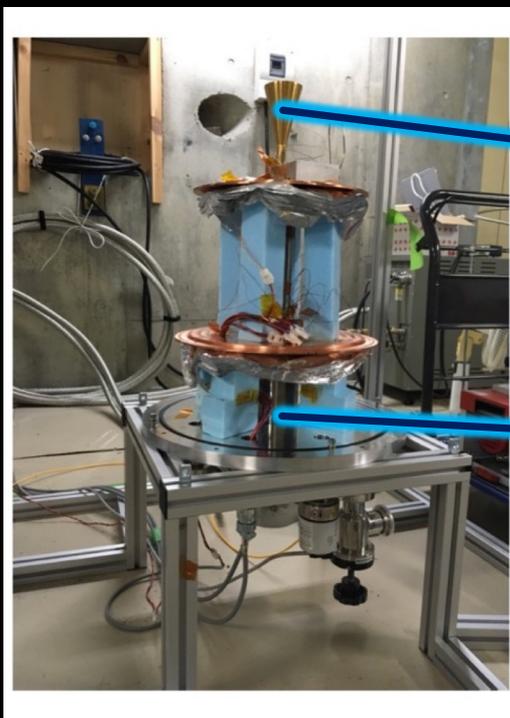


DOSUE-RR/K-bandの模式図



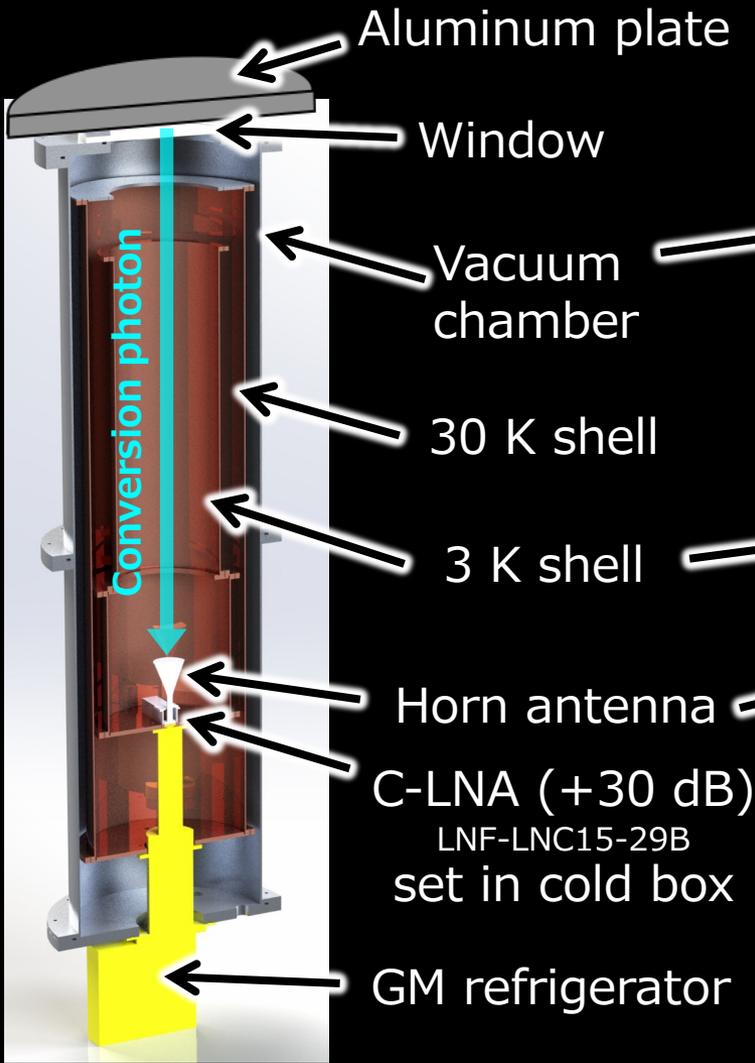
魔法の断熱フィルター
"RT-MLI"

特許: JP6029079
RSI, 84, 114502 (2013).



実験装置の大きさ

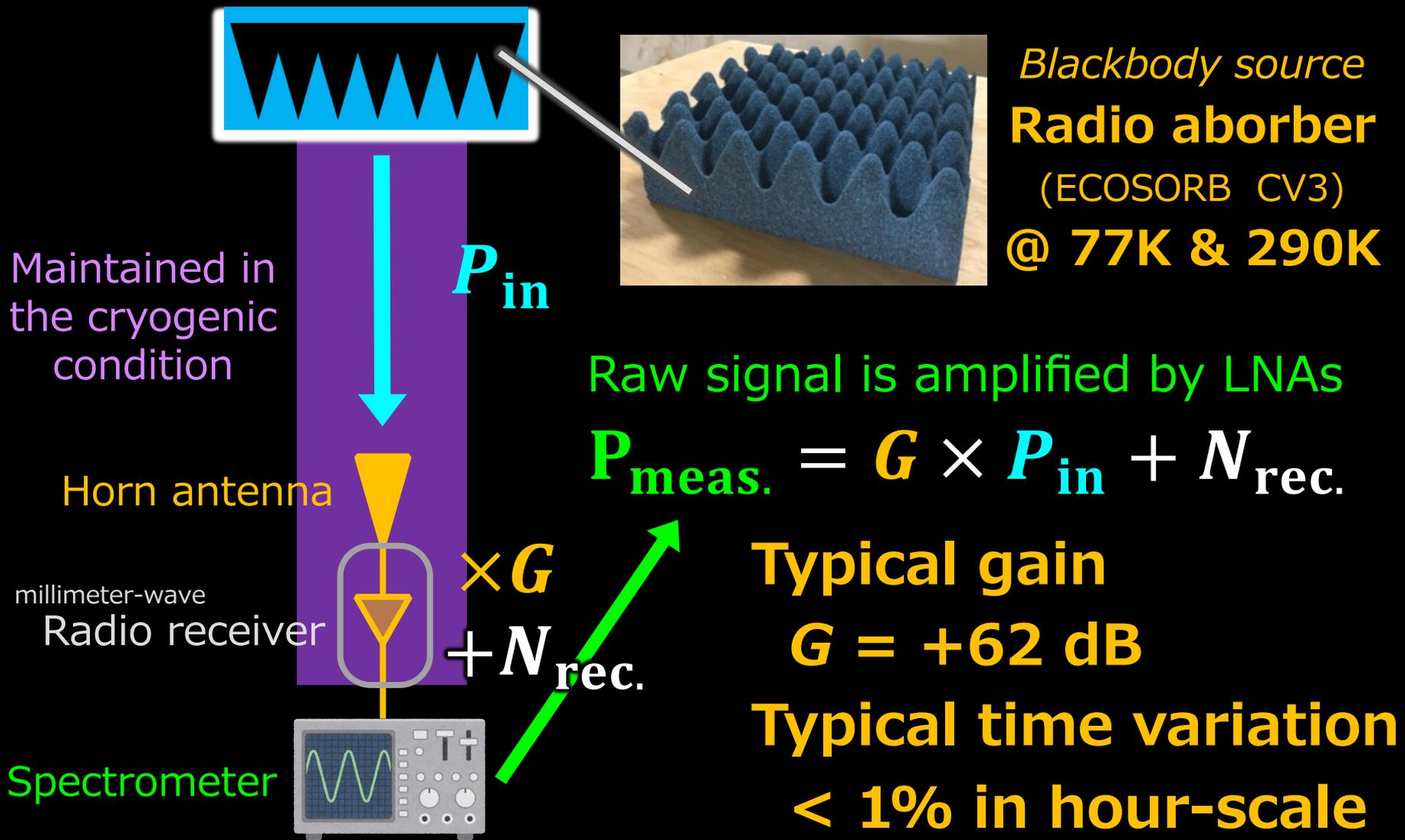
CMBの
受信器
くらい



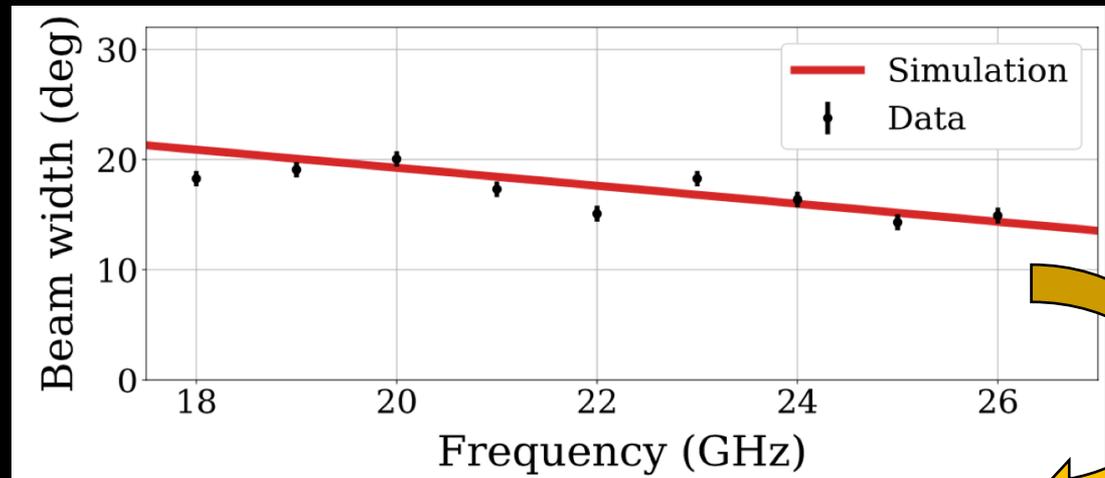
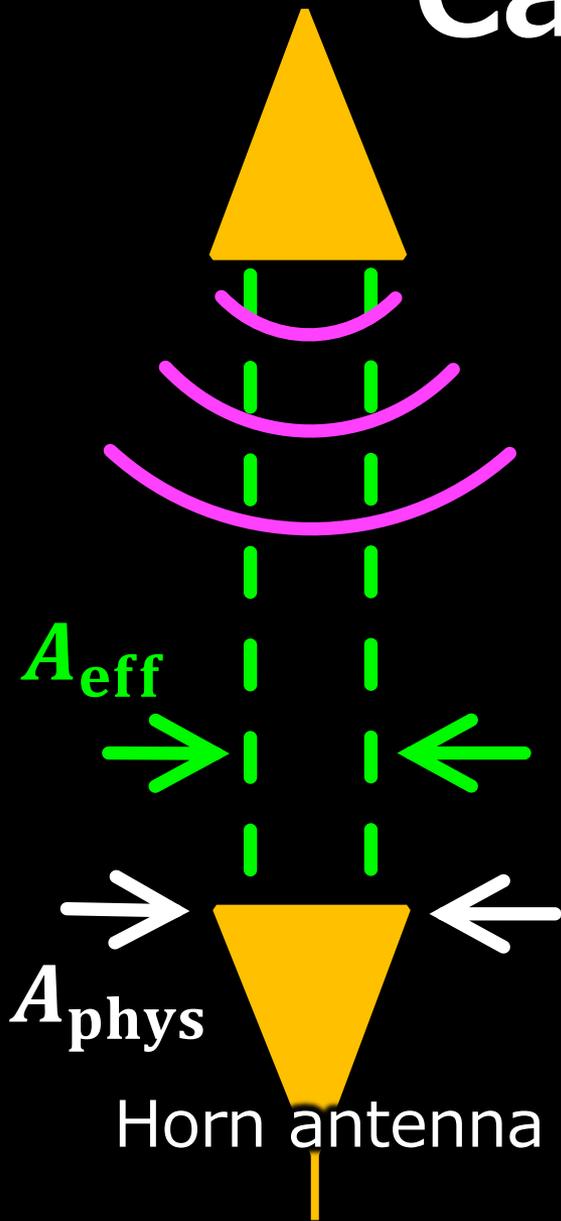
My master
thesis research!



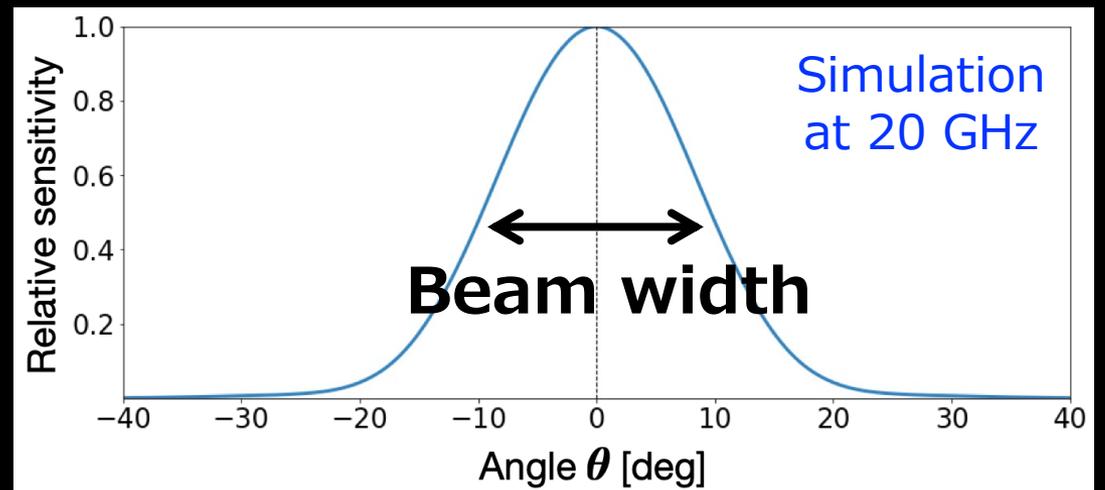
Calibration: gain



Calibration: A_{eff}



$$A_{\text{eff}} = 17.4 \pm 0.3 \text{ cm}^2$$

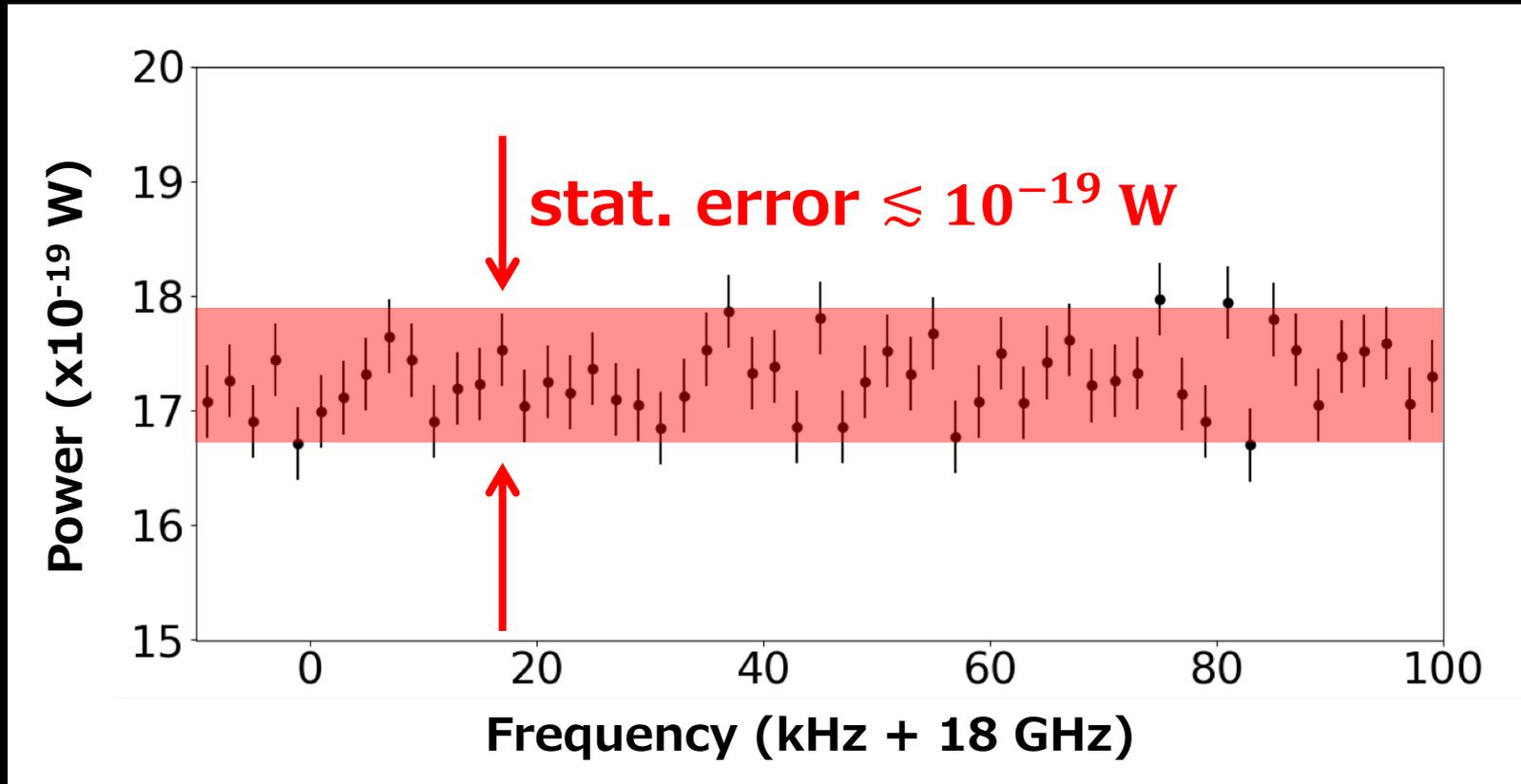


Data set for exploration

- Swept power from 18 GHz – 26.5 GHz
 - Freq. limit by waveguide cutoff, capability of SA
 - FFT at RBW of 300 Hz (analysis bin width of 2 kHz)
 - Bandwidth of single FFT scan is limited at 2.5 MHz



An example of spectrum data



Expected sensitivity we achieved: $\chi \approx 10^{-10}$

$$\Leftrightarrow P_{\text{DP}} \approx 10^{-19} \text{ W @ } \chi = 10^{-10}$$

Methodology of Signal Extraction

Extract P_{DP} for each ν_0 , i.e., sweeping fits

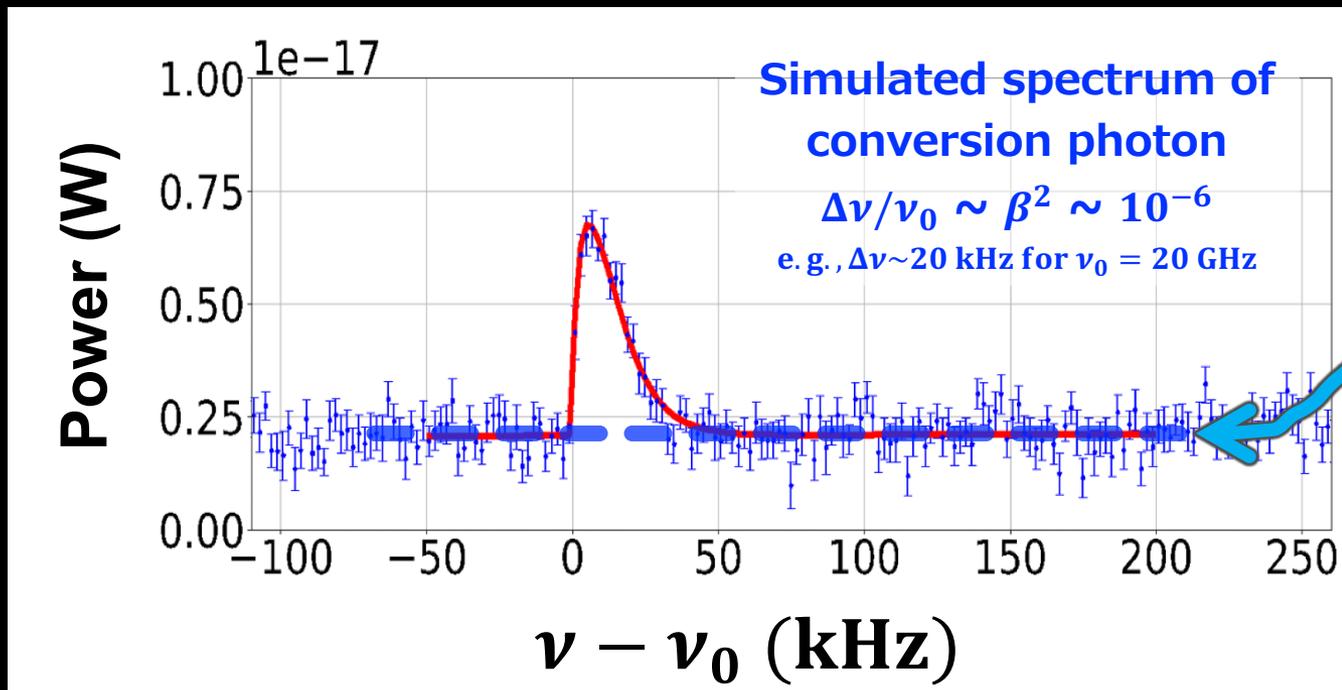
Fit function

Isothermal perturbation
The Maxwell-Boltzmann

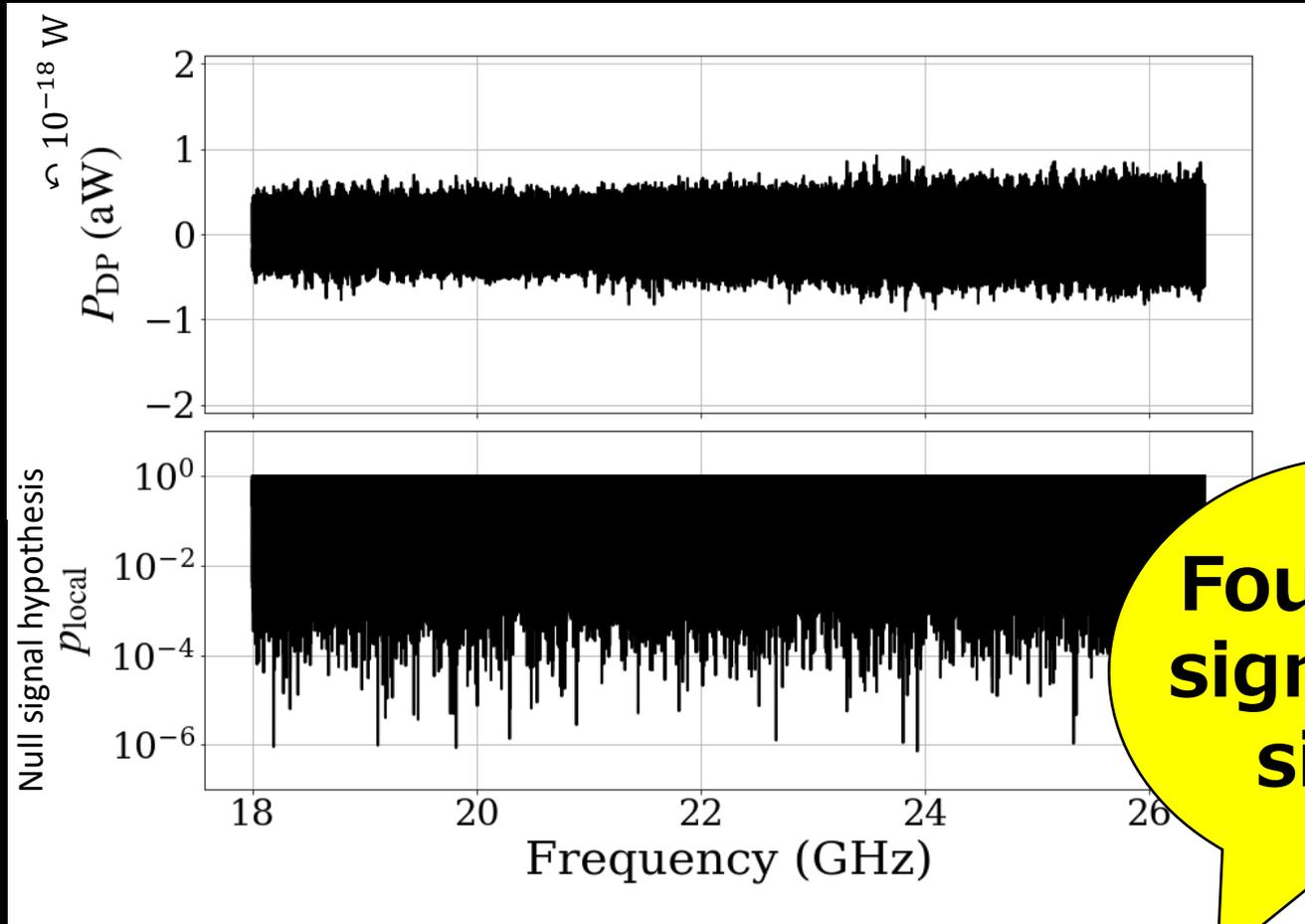
$$f(\nu) = P_{\text{DP}} \times F(\nu; \nu_0) + [a(\nu - \nu_0) + b]$$

Signal power \times *shape*

Baseline offset



Results of Signal Extraction

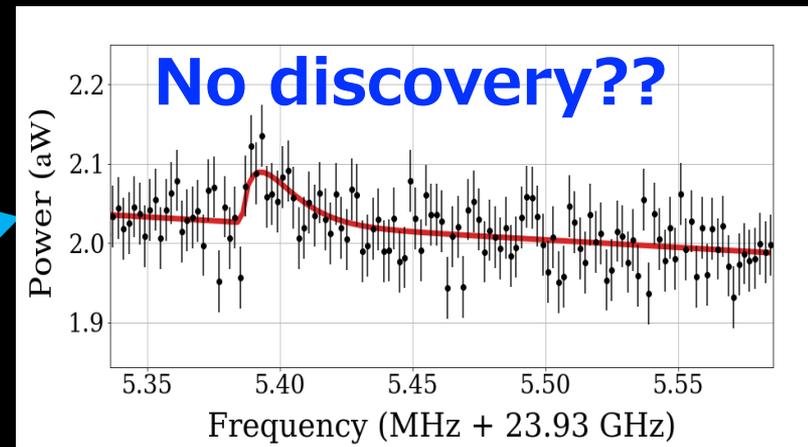
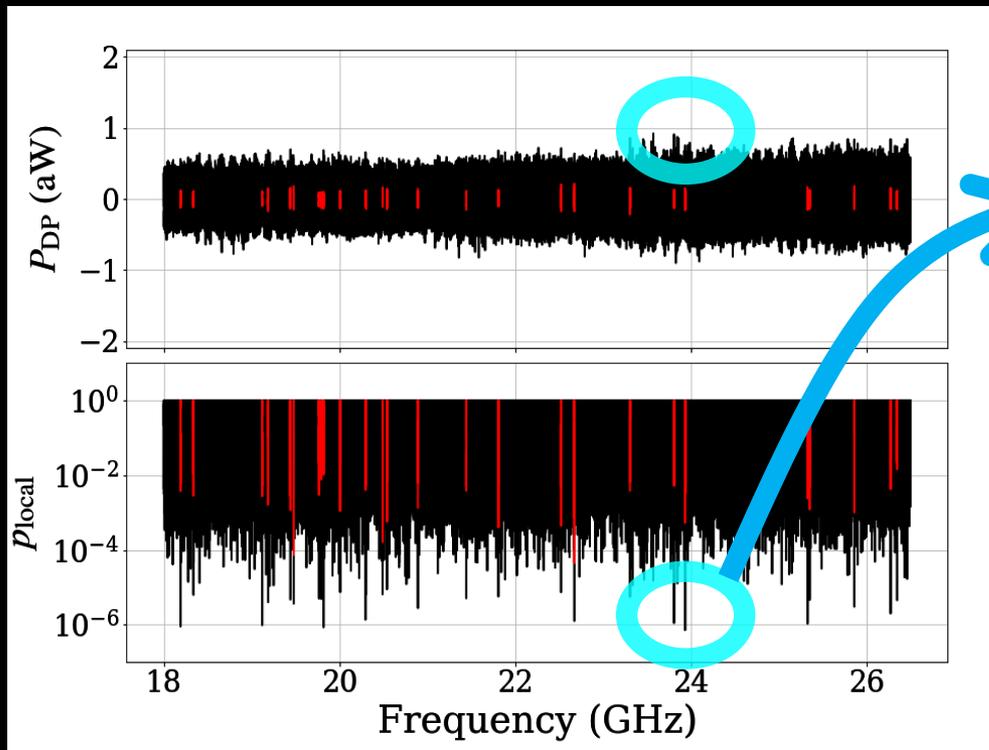


**Found NO
significant
signal**

Taking into account "look-else-where" among all 4,250,000 fit results

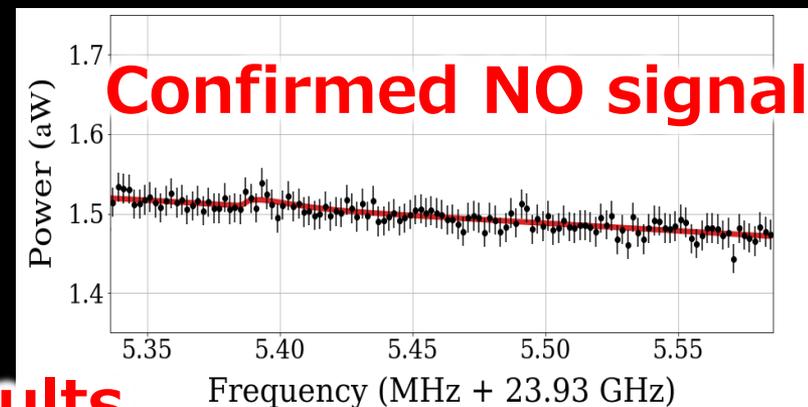
Global p -value under null hypothesis: 68%

Further investigation with more statistics



Stat. $\times 11$

Additional data in Jan. 17, 2022



Even though $p_{global} = 68\% \dots$,
we don't wanna miss discovery

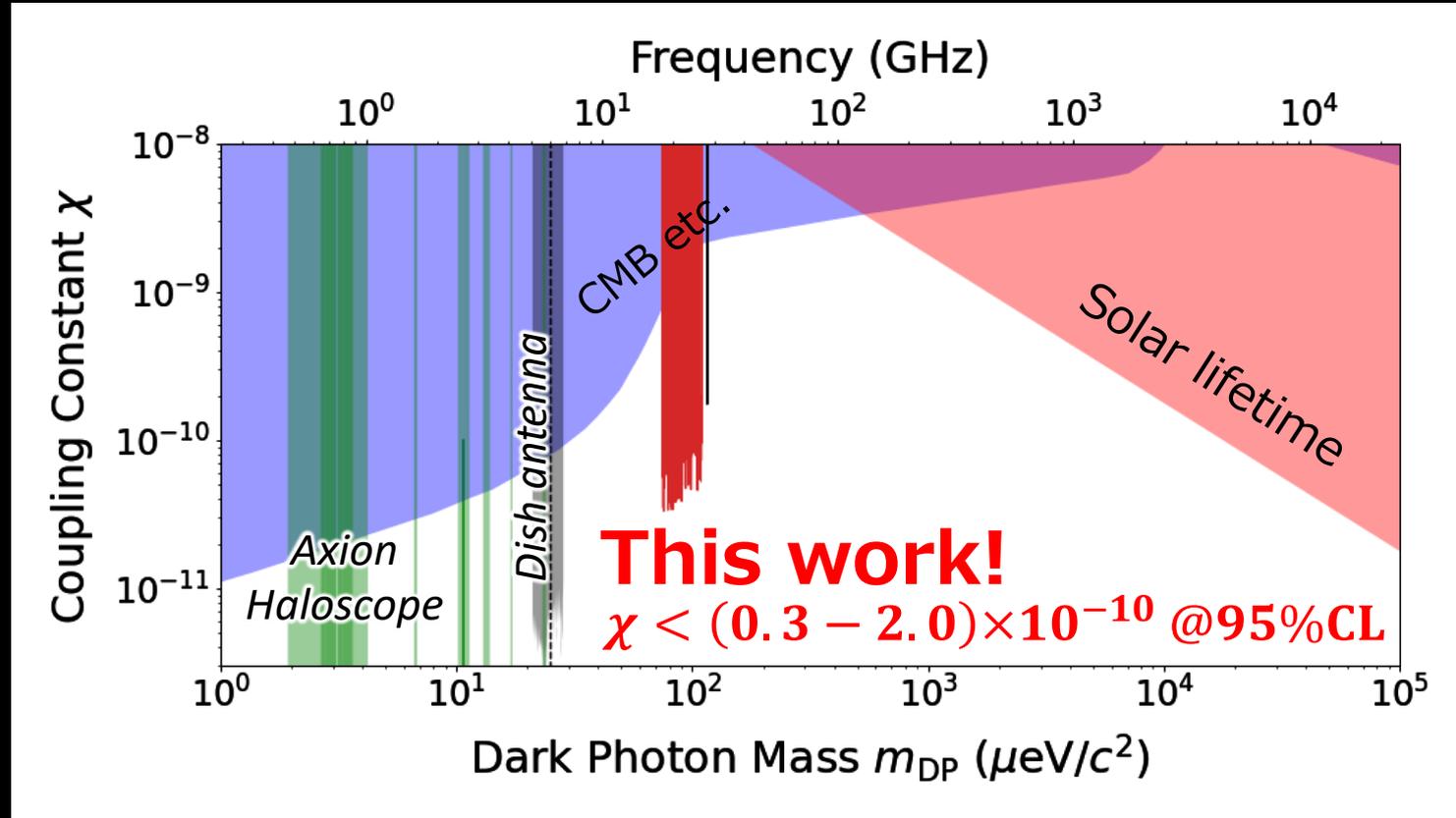
Confirmed zero-consistent results

Systematic Errors

Source		Syst. error for χ (%)
Gain	Uncertainty of calibration	4.0
A_{eff}		4.2
ρ_{CDM}	Model uncertainty	3.9
Frequency resolution		0.6
Alignment of instruments		< 0.1
Direction of conversion photon		< 0.1
Total		7.0

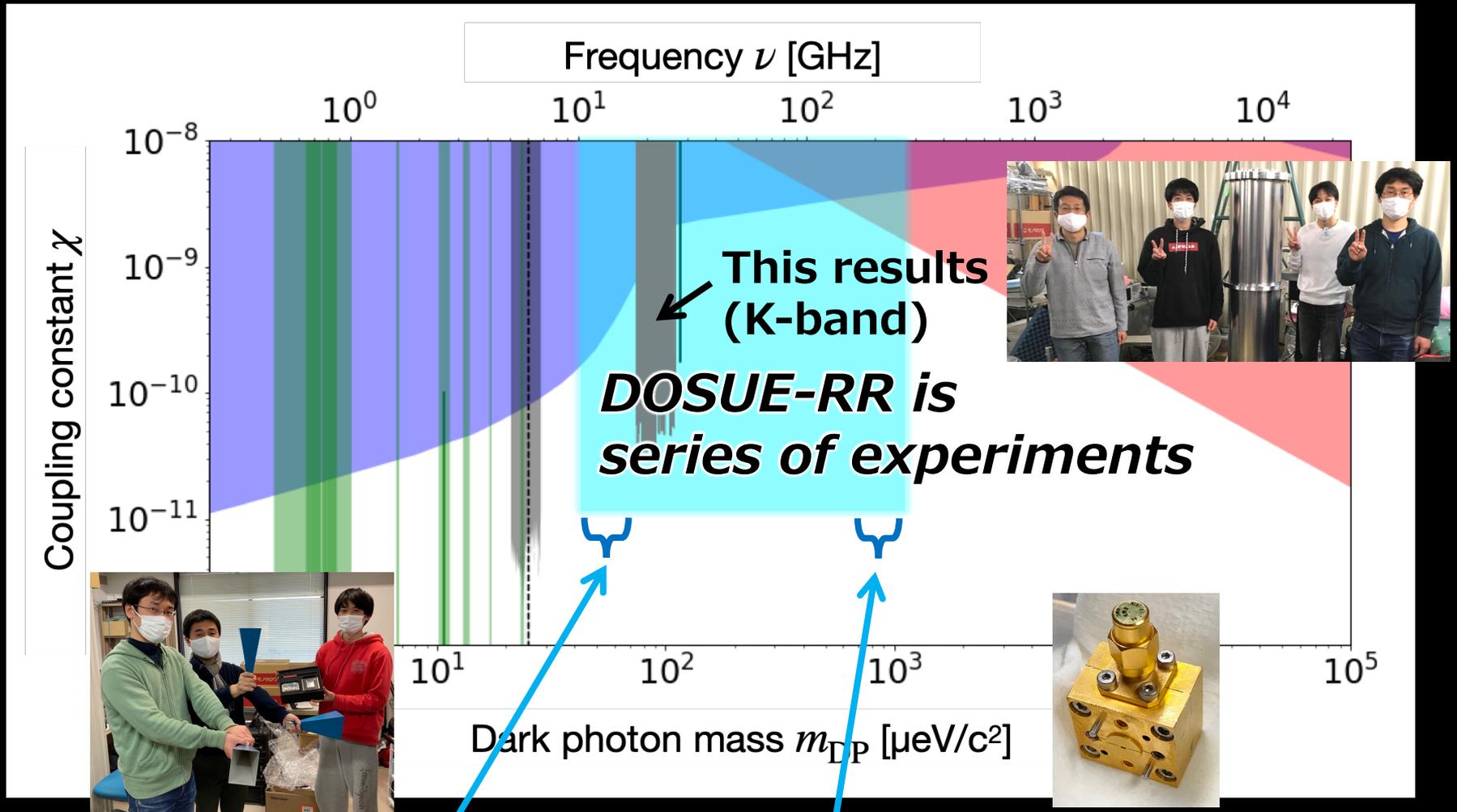
$$\chi = 1.0 \times 10^{-10} \left(\frac{P_{\text{DP}}}{10^{-19} \text{ W}} \frac{17.4 \text{ cm}^2}{A_{\text{eff}}} \frac{0.39 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{\text{CDM}}} \right)^{1/2}$$

Upper limits at 95% C.L.



The first exploration in $m_{DP} = 74 - 110 \mu\text{eV}/c^2$
The most stringent constraint to date,
and tighter than cosmological constraints

DOSUE-RRの戦略



「発見!？」 後を見据えた戦略

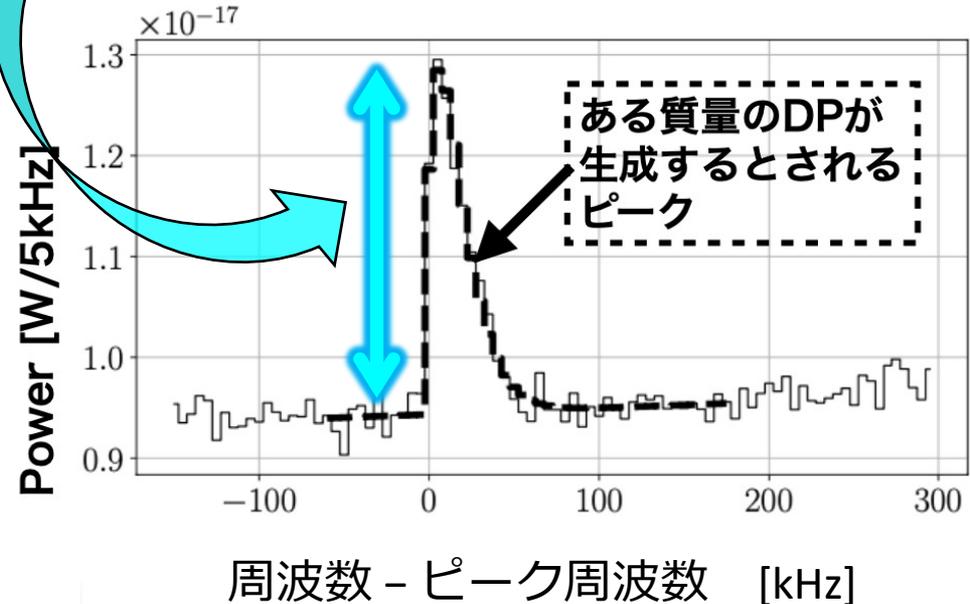
**偏極度と偏極方向
の同定**

偏極情報?!

偏極（偏極度： ϵ ）していれば、
向きで信号パワーが変化する！

$$P_{obs} \propto \chi^2 \left[\frac{1 - \epsilon^2}{3} + \epsilon^2 \cos^2 \theta \right]$$

スペアナで取得する周波数スペクトル (シミュレーション)

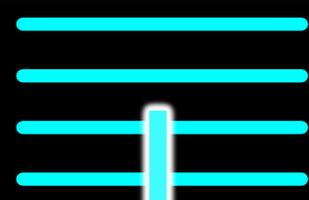


偏極方向となす角度

θ

DP-CDM

コンバーター
金属板

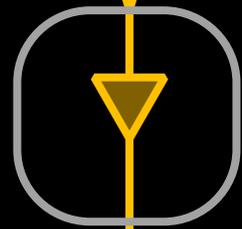


転換光
垂直に出る

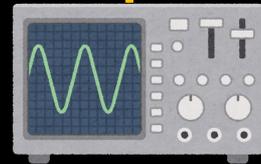
ホーン
アンテナ



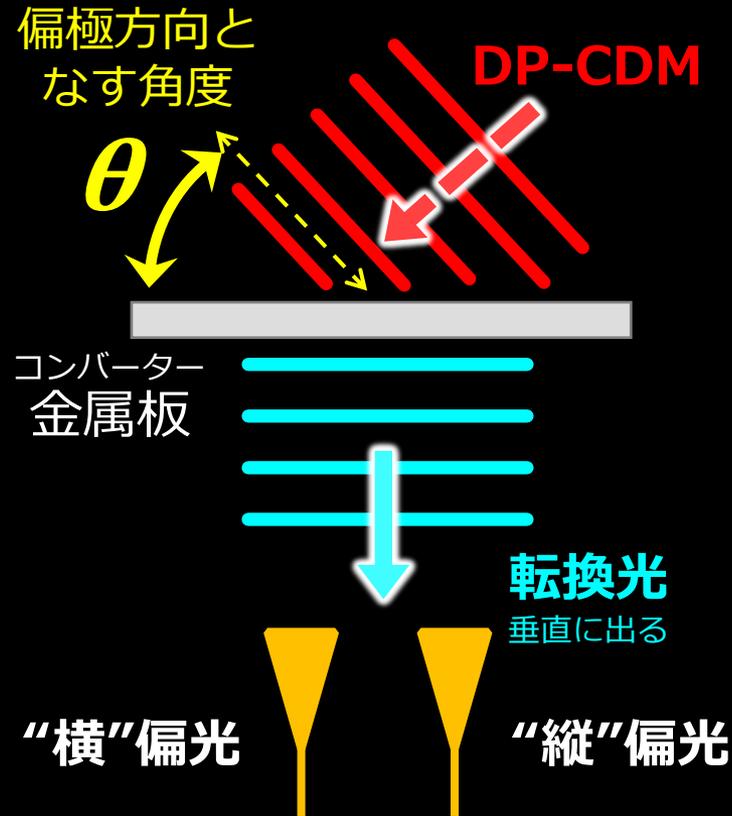
ミリ波
受信機



スペアナ
分光計



偏極情報を知る



$$P_{obs} \propto \chi^2 \left[\frac{1 - \varepsilon^2}{3} + \varepsilon^2 \cos^2 \theta \right] \text{ “縦” と “横” の強度差 } \Leftrightarrow \varepsilon \otimes \theta$$

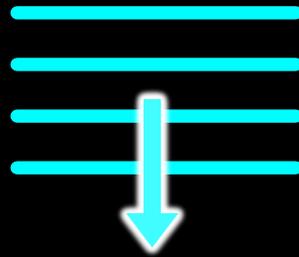
偏極情報を知る

偏極方向と
なす角度

θ

DP-CDM

コンバーター
金属板



轉換光
垂直に出る

コンバーター
金属板

DP-CDM

Y 方向

X 方向

$$P_Y \propto \chi^2 \left[\frac{1 - \epsilon^2}{3} + \epsilon^2 \cos^2 \theta \right]$$
$$P_X \propto \chi^2 \left[\frac{1 - \epsilon^2}{3} + \epsilon^2 \sin^2 \theta \right]$$

偏極情報を知る - 3次元

偏極方向と
なす角度

θ

DP-CDM

コンバーター
金属板

アッチとコッチの
和と差の測定

P_X, P_Y, P_Z
 $\Leftrightarrow \chi, \varepsilon, \theta, \phi$

Y 方向

Z 方向

X 方向

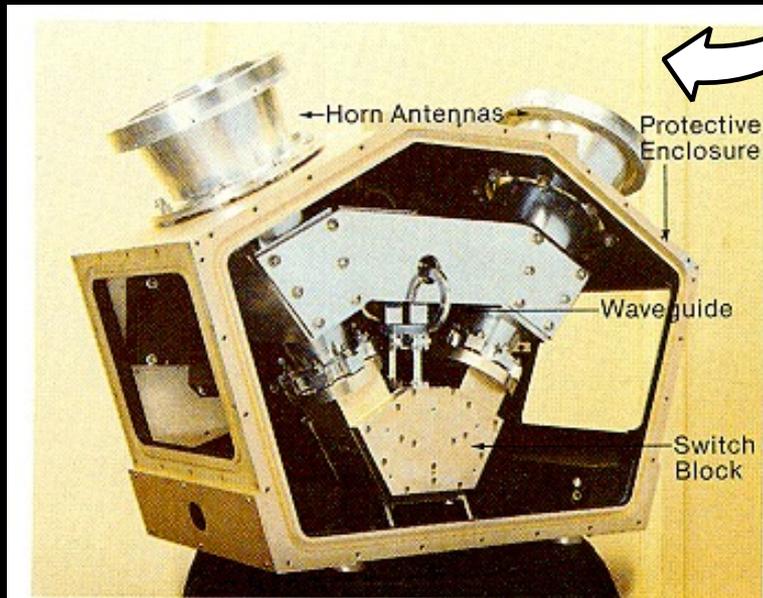
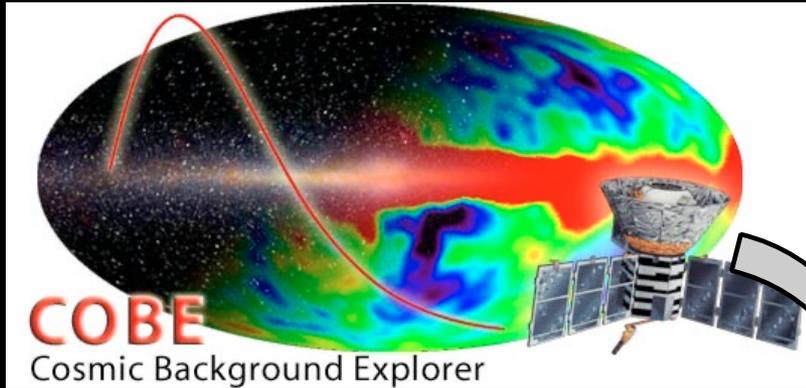
轉換光
垂直に出る

コンバーター
金属板

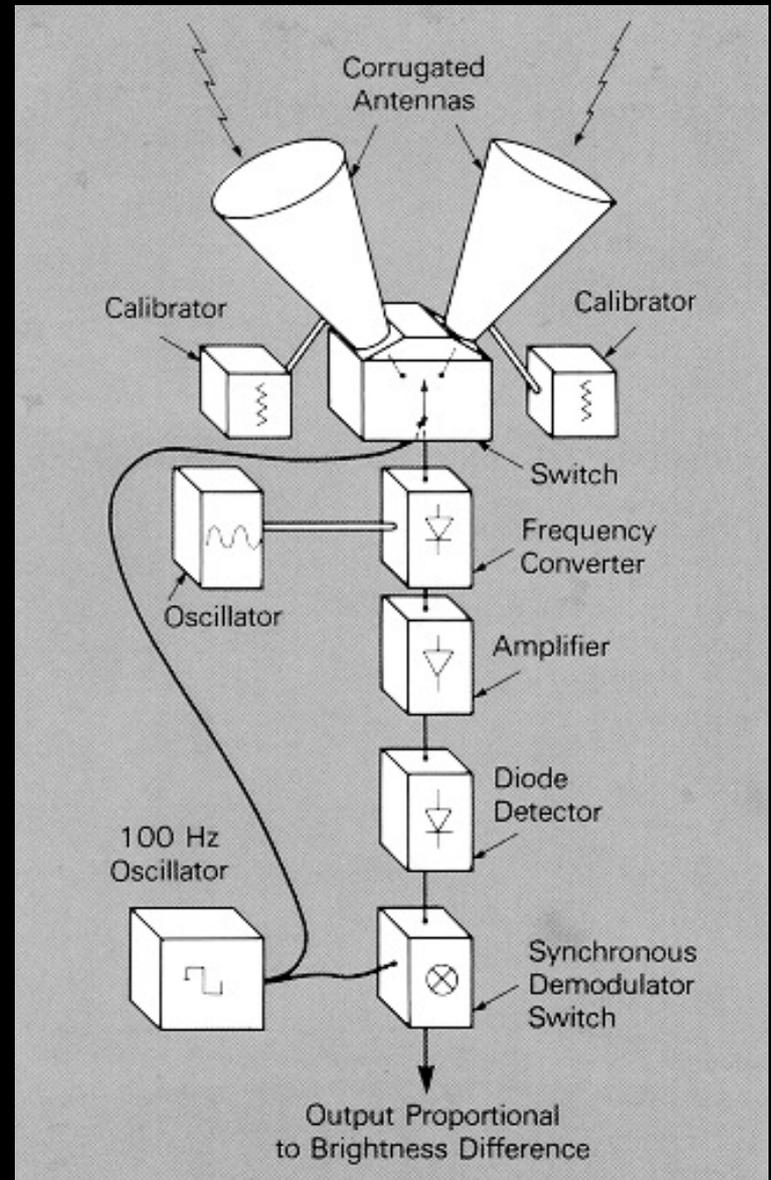
DP-CDM

**アッチとコッチの
和と差の測定といえは？**

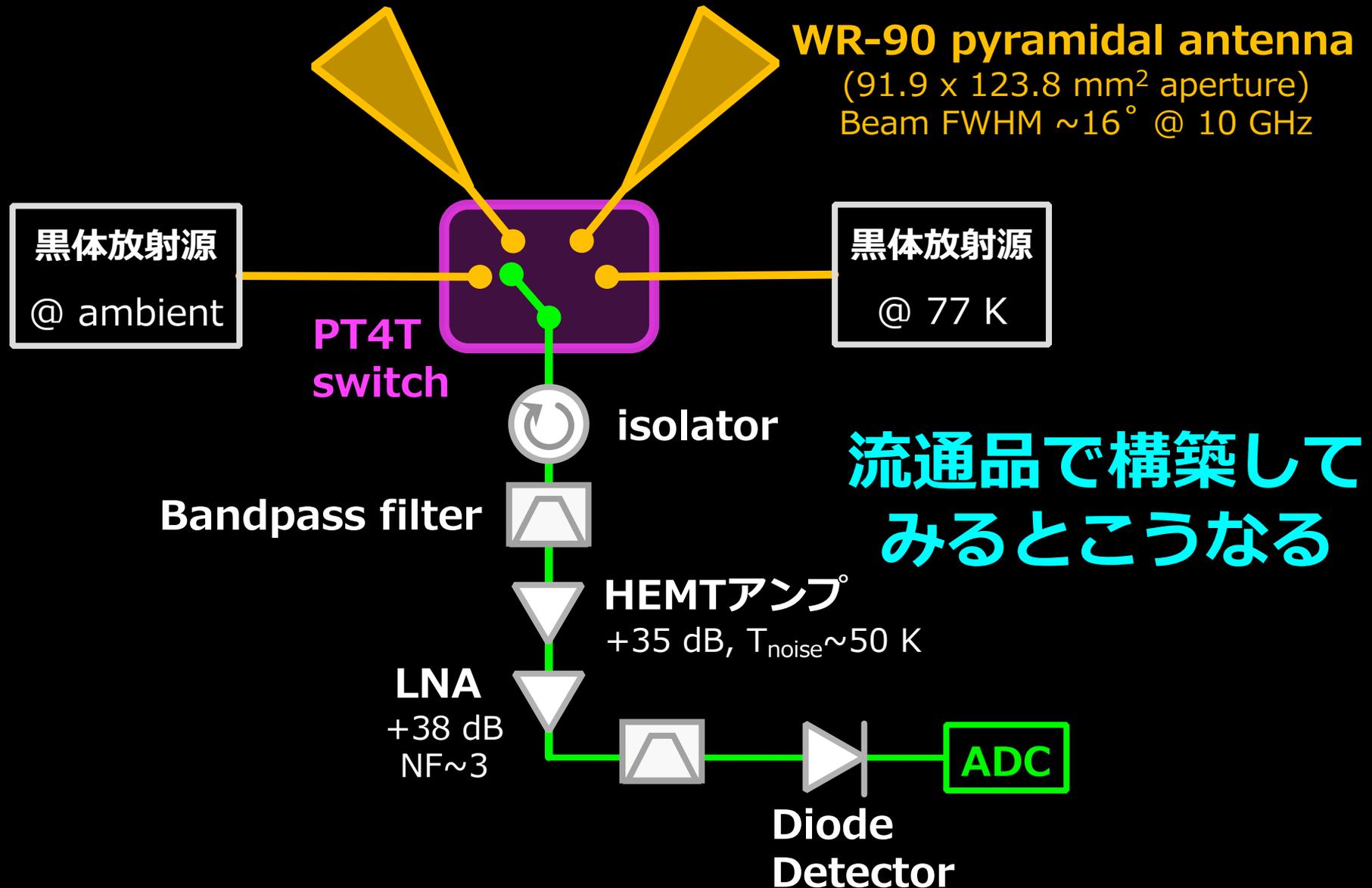
CMB温度異方性の測定



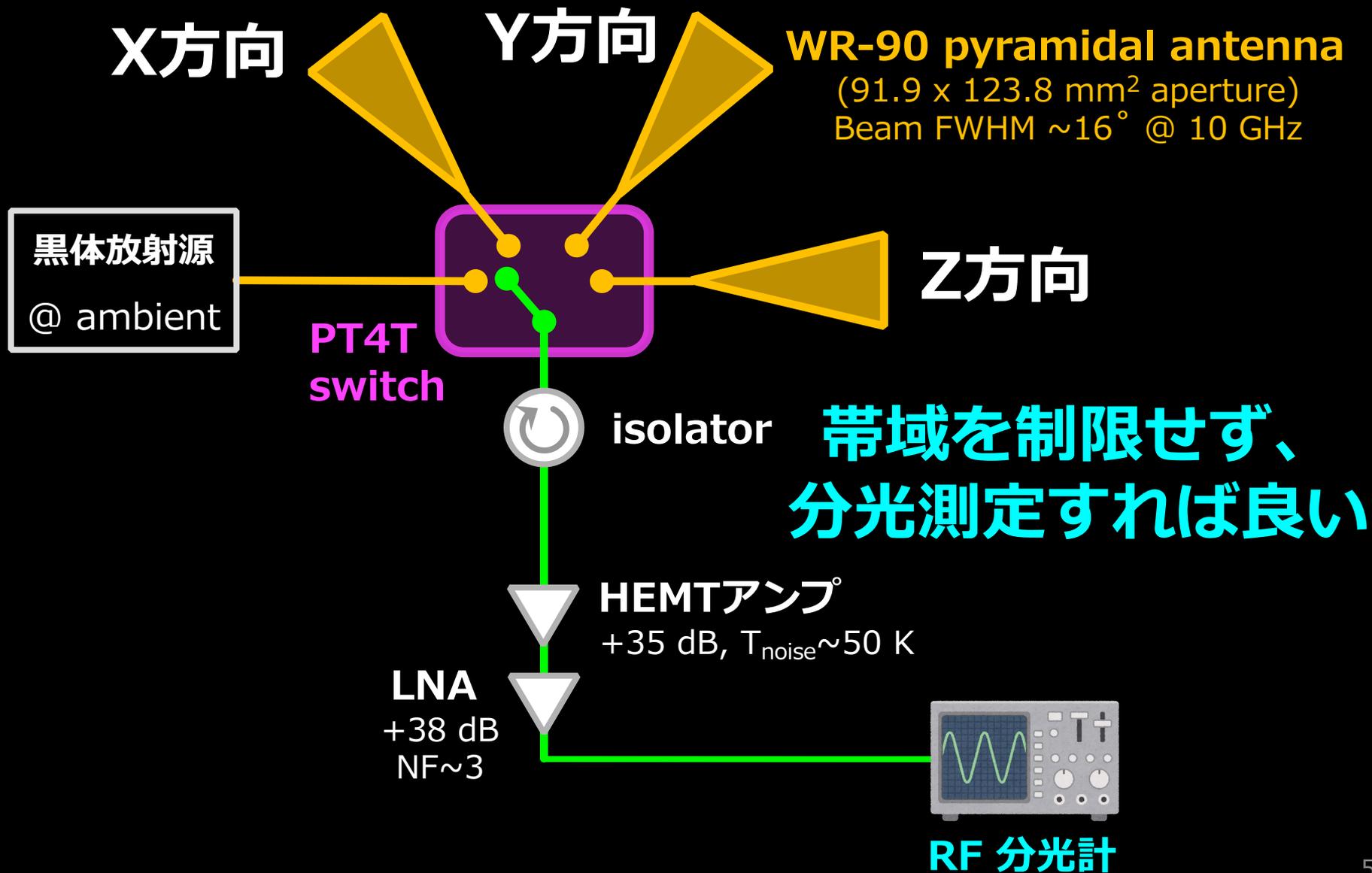
The 9.6 mm DMR receiver partially assembled.
Corrugated cones are antennas.



DMRに近いCMB異方性の観測装置

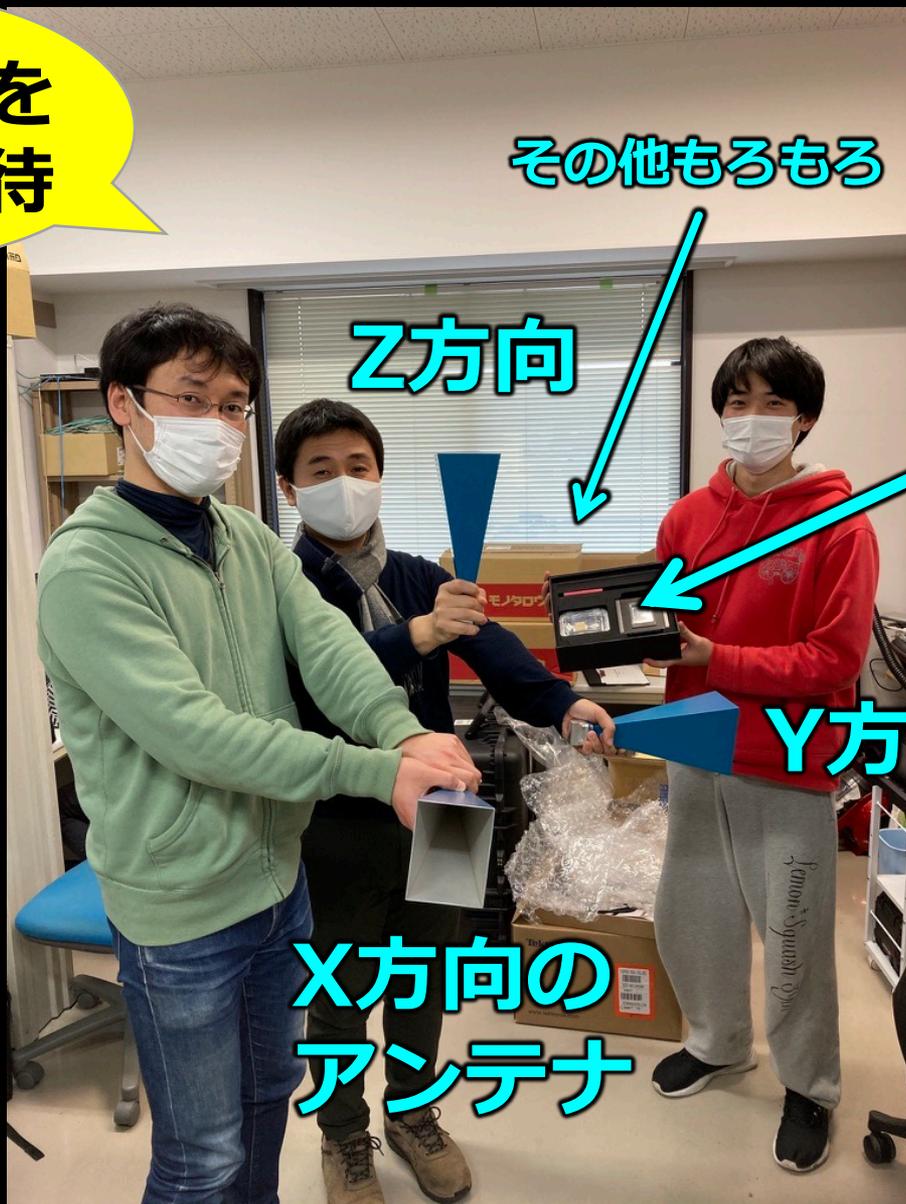


偏極を測るDP-CDM装置



色々そろえちゃいました

次の修論を
乞うご期待



その他もろもろ

Z方向

ちょっと
良いアンプ

Y方向

X方向の
アンテナ

「発見!？」 後を見据えた戦略

到来方向の同定



月を使ってDP-CDMの到来
方向を測定する方法の検討
"Shadow Moon" (仮称)

田島治

DP-CDMと転換光の向きの関係

$$v_D \simeq 230 \text{ km/s}$$

$$\rightarrow \lambda_D \simeq 16 \text{ m}$$

$$@ m_\gamma = 10^{-4} \text{ eV}/c^2$$

$$\theta_D$$

電磁場の
境界面

$$\theta_R = \pm 0.06^\circ$$

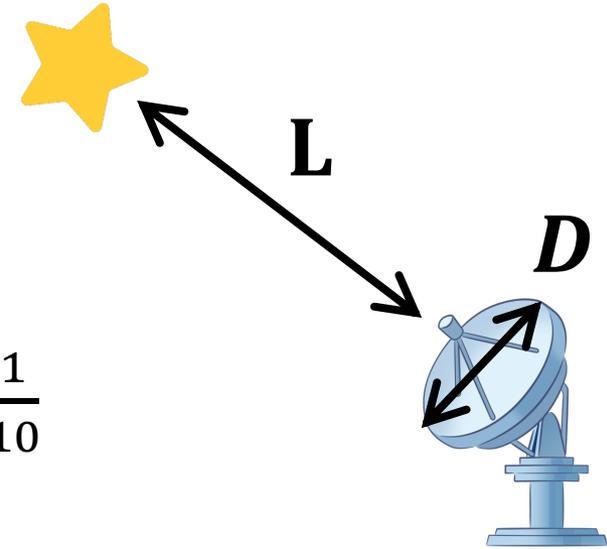
$$@ \theta_D = \pm 90^\circ$$

$$\lambda_R \simeq 1.2 \text{ cm}$$

回折限界と遠方解条件

$$\Omega \simeq \frac{\lambda}{D} \rightarrow D \simeq \frac{\lambda}{\Omega} \sim 100 \text{ m}$$

角度分解能 $\sim 0.06^\circ \times \frac{1}{10}$

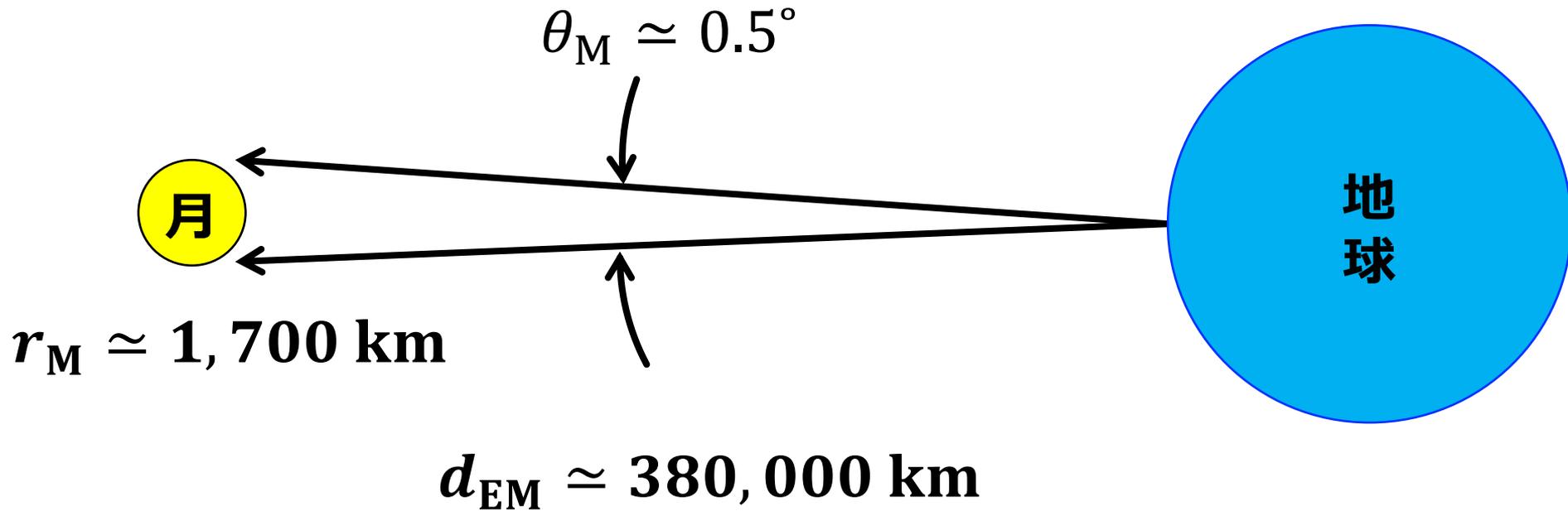


$$L = \frac{2D^2}{\lambda} \rightarrow L \simeq \frac{2 \times (100 \text{ m})^2}{1.2 \text{ cm}} \simeq 1,700 \text{ km}$$

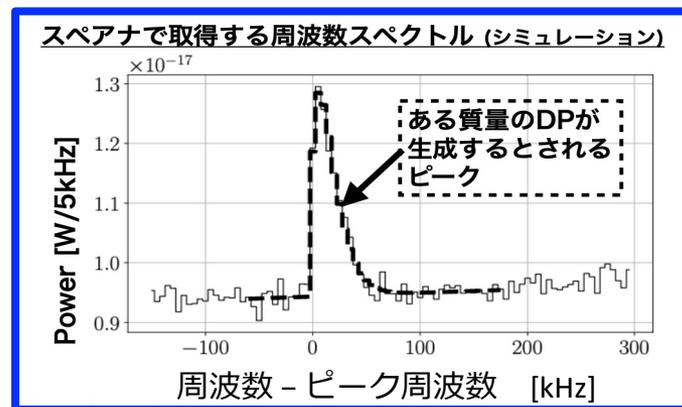
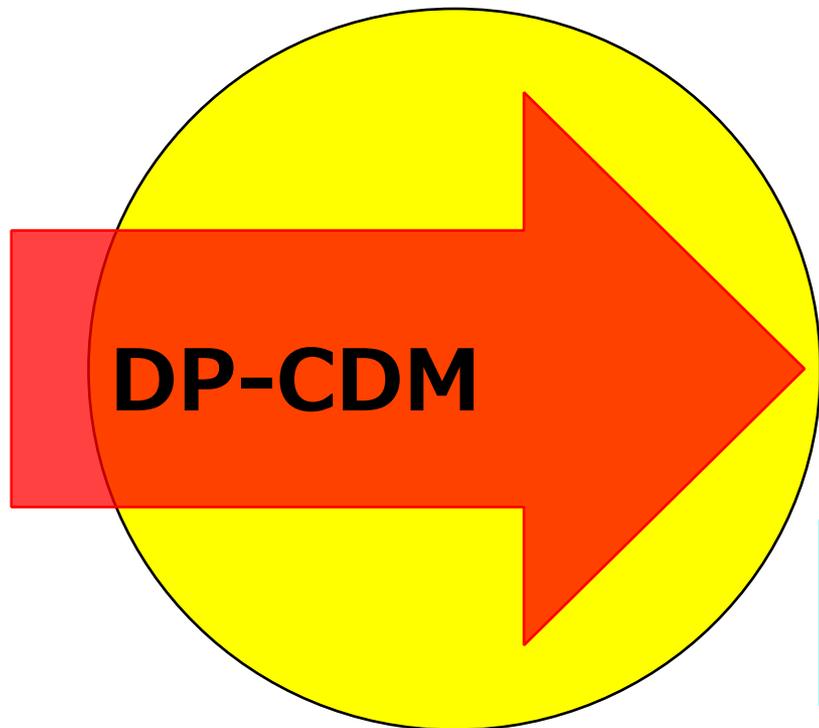
(参考) ISSの高度 : 408 km

人工的なphoton converterは難

月と地球



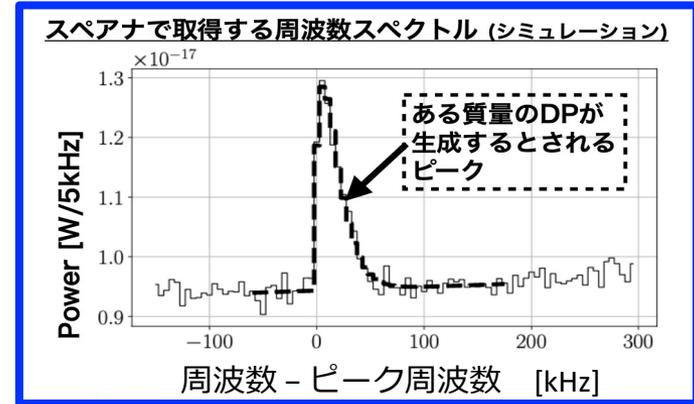
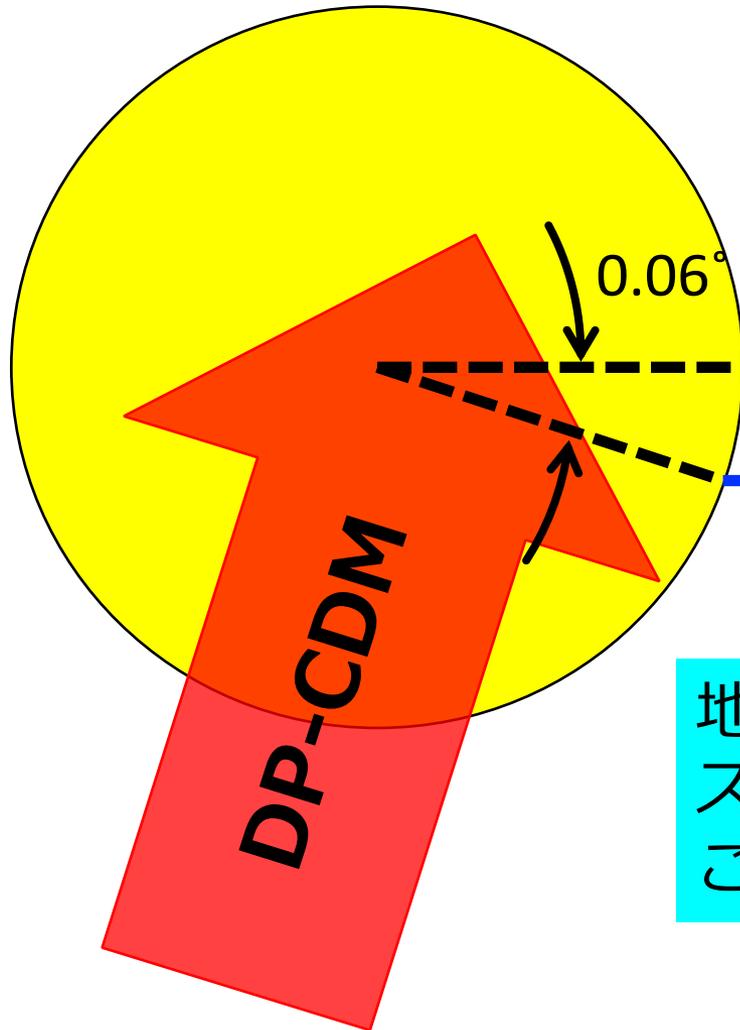
DP-CDMが地球方向に到来した時



→ 転換光 こっち方向に地球がある

地球から見て、月中心からの転換光を観測することになる

DP-CDMが横向きに到来した時



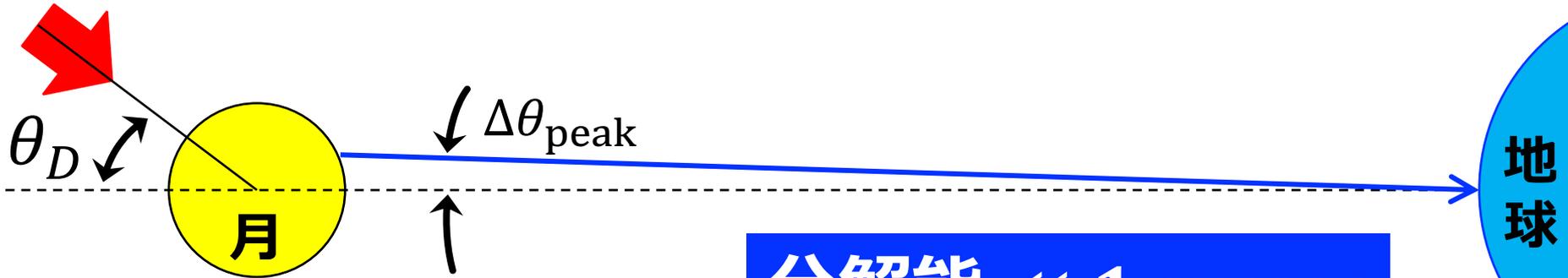
2 km

転換光

こっち方向に
地球がある

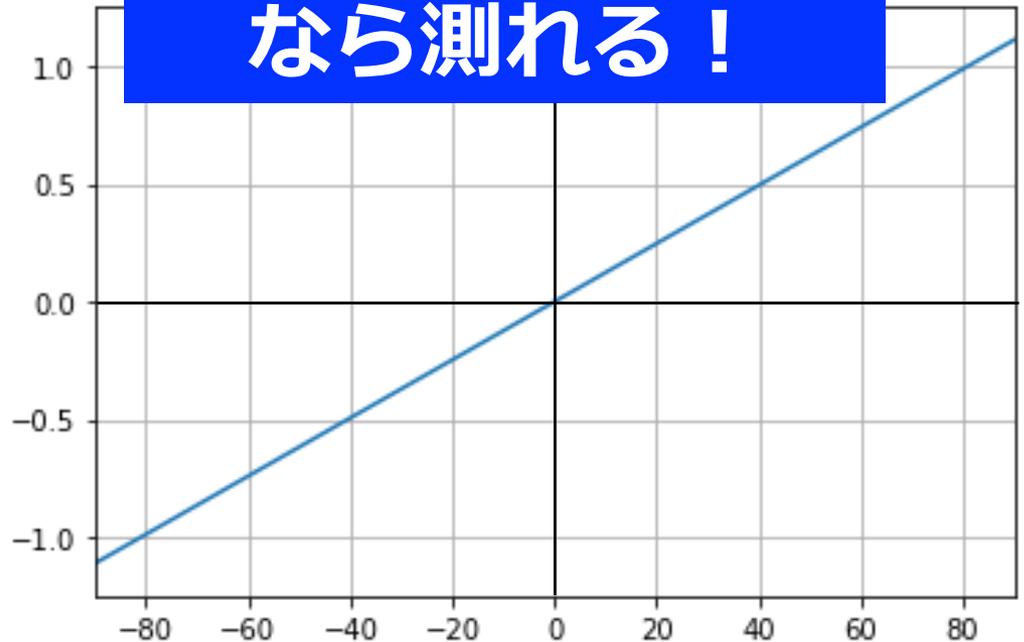
地球から見て、月中心から約1秒角ズレた位置からの転換光を観測することになる

月の公転変調による“信号”位置の変移



分解能 $\ll 1$ arcsec
なら測れる！

$\Delta\theta_{\text{peak}}$ (arcsec)



θ_D (degrees)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

h = 4.135667696*10**-15 # eV sec
c = 299792458 # m/sec
m_cdm = 10**-4 # eV/c^2
v_cdm = 230*10**3 # m/s
lambda_cdm = h/(m_cdm*v_cdm)*c**2
nu_photon = m_cdm*(1**2)/h
lambda_photon = c/nu_photon # m
r_moon = 1700*10**3 # m
r_earth = 6400*10**3 # m
d_em = 38 *10**4 *10**3 # m

theta_cdm = np.arange(-90., +90.1, 10)
theta_photon = np.degrees( np.arcsin( lambda_photon/lambda_cdm * np.radians(theta_cdm) ) )
delta_d_peak = r_moon * np.sin( np.radians(theta_photon) )
delta_theta_peak = np.degrees( np.arctan( delta_d_peak/d_em ) )
delta_arcsec_peak = delta_theta_peak*3600

plt.plot(theta_cdm, delta_arcsec_peak)
plt.xlabel(r'$\theta_{\text{CDM}}$ (degrees)')
plt.ylabel(r'$\Delta\theta_{\text{peak}}$ (arcsec)')
plt.xlim(-90, +90)
plt.ylim(-1.25, +1.25)
plt.grid()
plt.show()
```

ALMA望遠鏡



- 角度分解能：0.01 秒角, 視野角：60 秒角 @100 GHz
- 観測帯域: 35 – 950 GHz (10 bands)
- 周波数分解能: ものすごく良い ($\Delta f/f \ll 10^{-6}$)

月は意外に凸凹?!

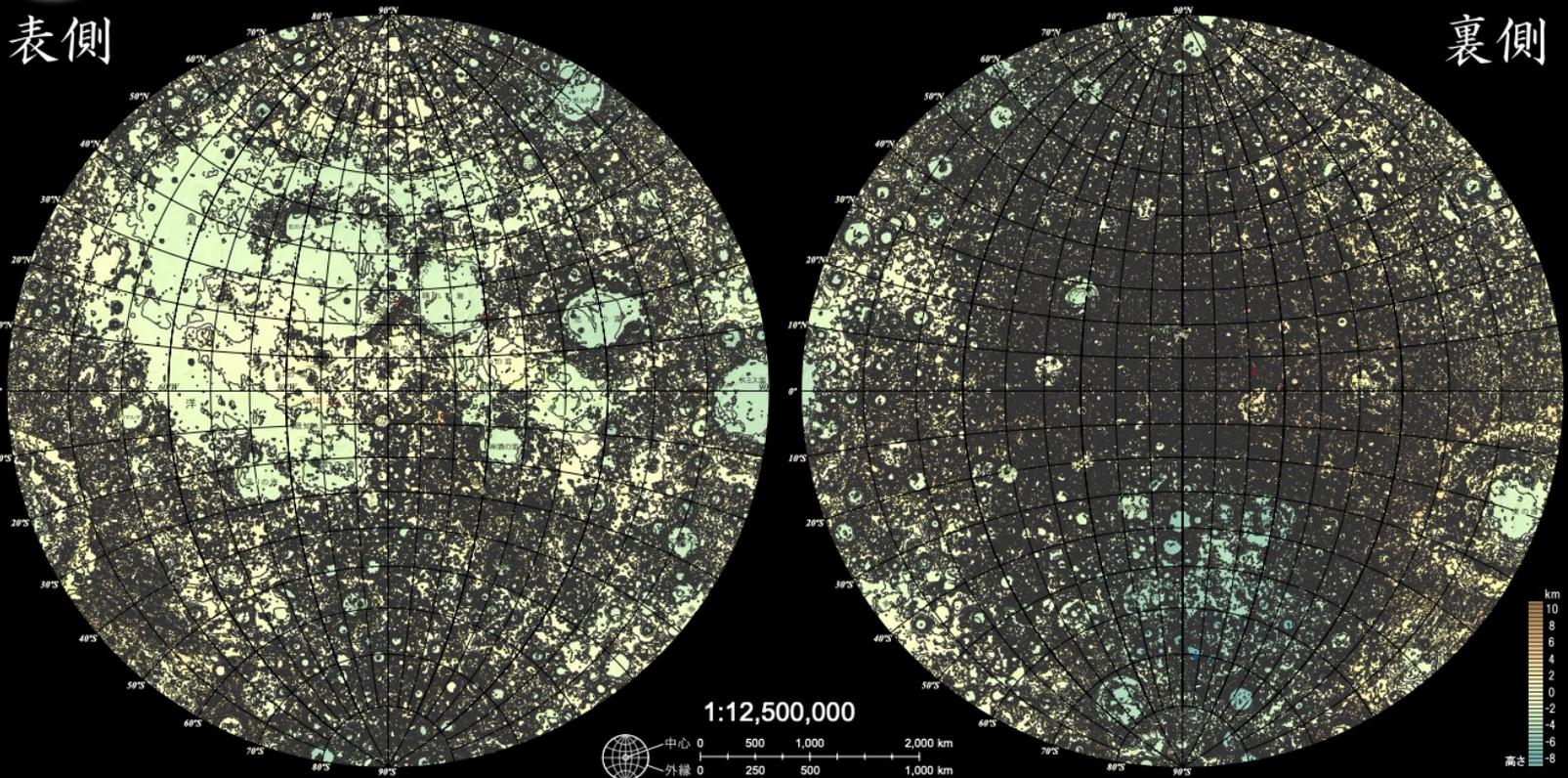


「かぐや」が見た月の地形

<https://gisstar.gsi.go.jp/selene/Maps2/StereoMap.pdf>

表側

裏側



- ★ 最高地点 159.64°W 5.44°N 10.75 km
- ★ 最低地点 172.68°W 70.38°S -9.06 km
- ★ アポロ宇宙船着陸地点 (数字はミッション番号)

この地図は、JAXAの月周回衛星「かぐや(SELENE)」に搭載したレーザ高度計(LALT)の精度4mの観測データをもとに作成した月の地形図です。等高線間隔は500m(太い等高線は2,000mごと)、高さの基準は重心を中心とする半径1,737.4kmの球です。地図投影法は平射図法、経度0°は地球から見える月中心を通る子午線です。月の表側は玄武岩で覆われた平坦で薄暗い「海」と呼ばれる地形が比較的多いに対し、裏側は大小さまざまなクレータで覆い尽くされています。「海」は円形もしくは楕円形



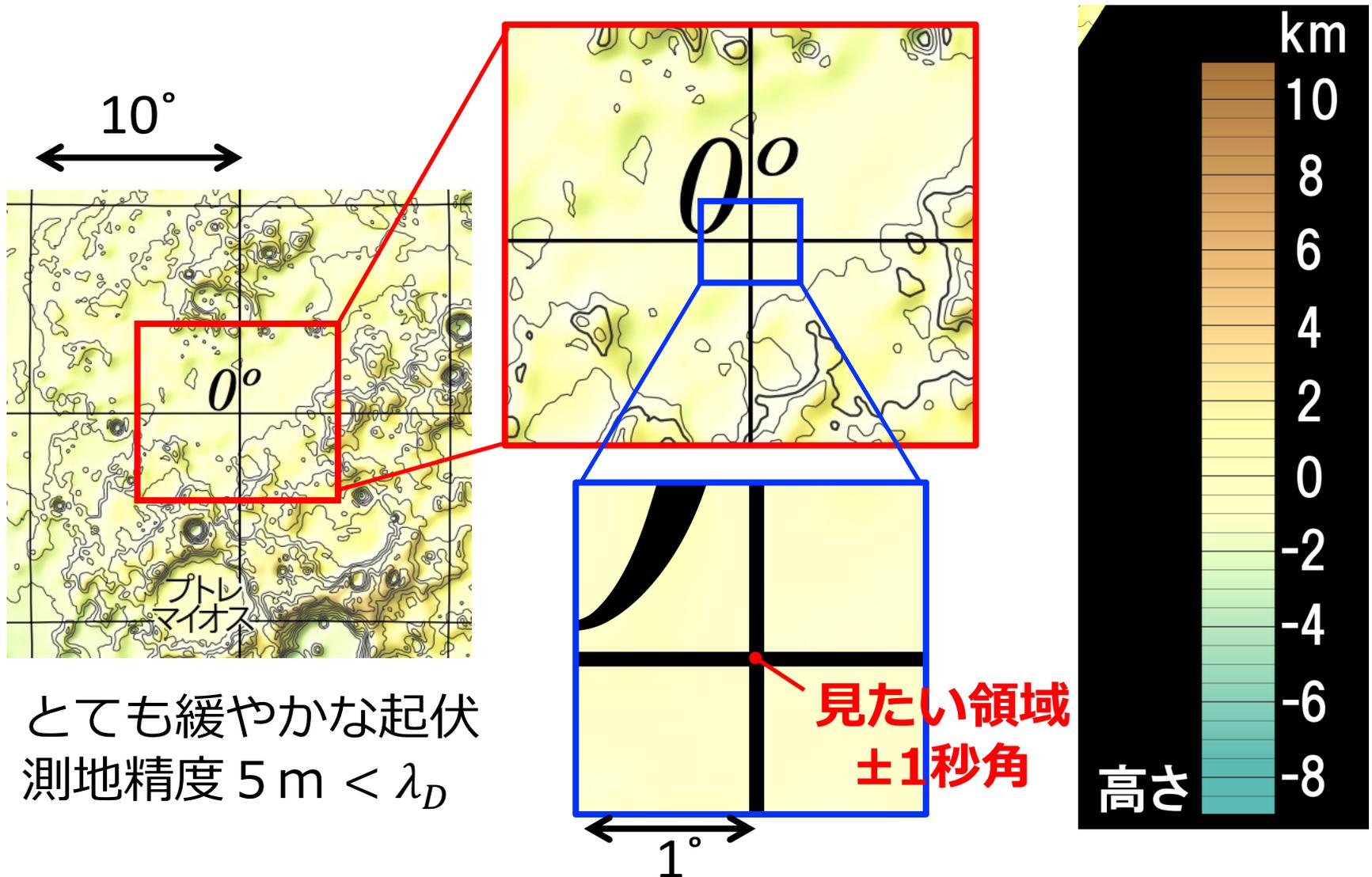
平射図法の縮尺は、地図の中心から量れるに従い大きくなります。地図の中心では、1:12,500,000ですが、外縁では2倍に拡大され、1:6,250,000となります。上のスケールバーには、中心と外縁での距離が示されています。

をしているものが多く、衝突盆地の窪みに地下から溶岩が噴出して溜まったものと考えられています。モスクワの海などの例外を除き、月の裏側には「海」はほとんど見られません。たとえば月裏側の南半球には直径約2,500kmの南極-エイトケン盆地と呼ばれる巨大な衝突盆地があり、月面で最も深く掘削された低地となっていますが、地形は平坦ではなく玄武岩も一部の領域にしか見られません。これは裏側の地殻が表側よりも厚く岩石の組成も表側と違うためではないかと考えられています。



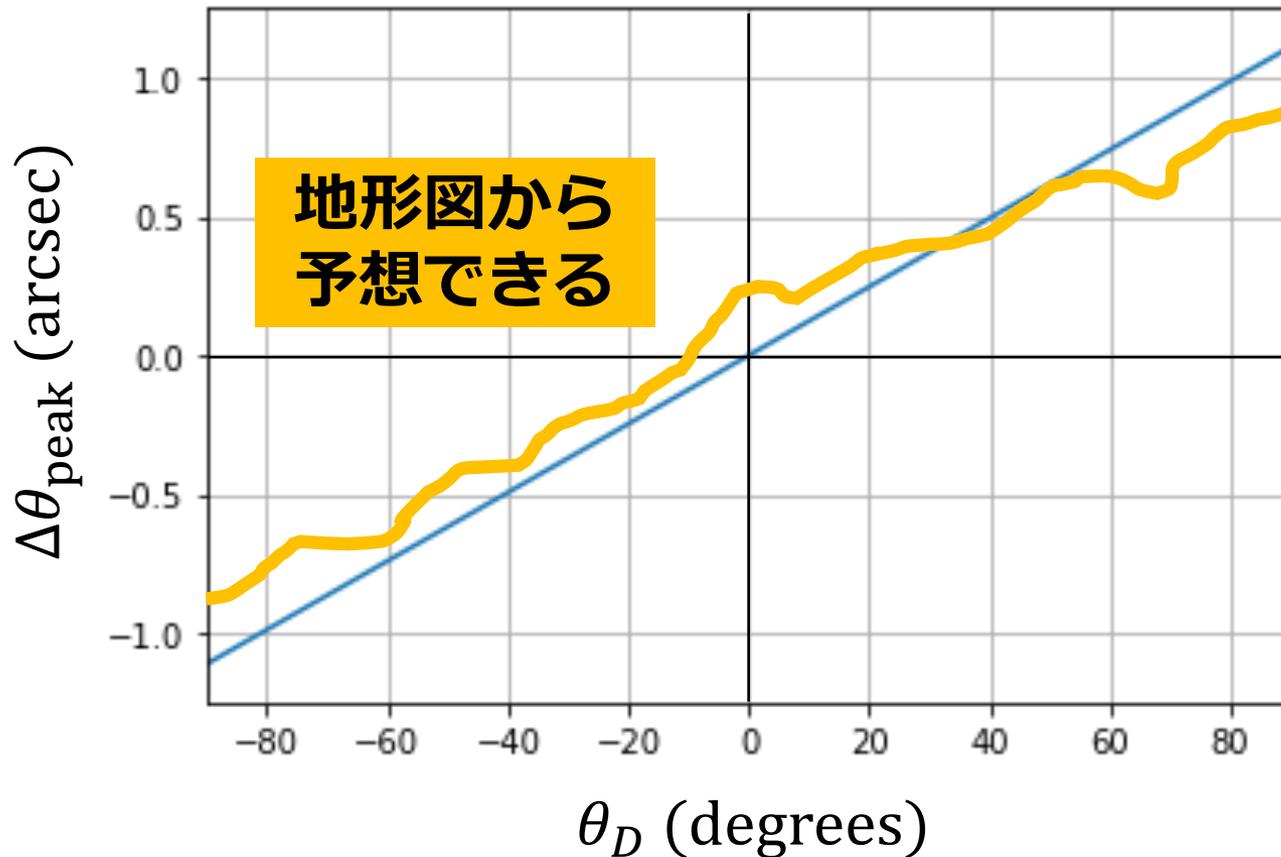
LALTのデータ処理・解析 自然科学研究機構 国立天文台
地形図の作成 国土交通省 国土地理院

月中心にクレーターはない



- とても緩やかな起伏
- 測地精度 $5\text{ m} < \lambda_D$

月表面の地形を反映すると どう変わるのだろうか？



きっとこんな感じになるのだろう（と想像）

もっと細かい表面荒さの影響

地上で既に信号検出した後なら...

• 地上実験です。

もちろん、理想は月に直径 4 km に渡って金属の板を敷き詰めること (アルテミス計画に便乗したい)

ピーク信号さえ見えれば、方向測定が可能になる

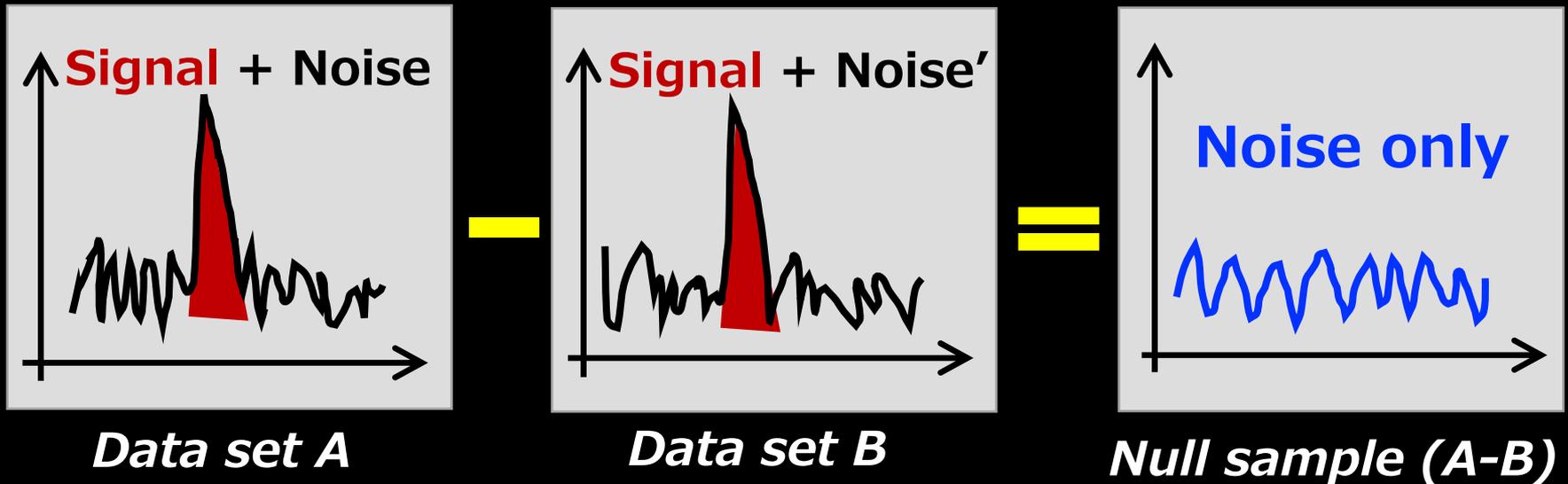
⇔ 「方向を測る」と割り切ればピーク信号の強度変化は任意で良い

まとめ

- DP-CDMはミリ波帯域での研究が甘い
 - 質量領域 $0.1 - 1 \text{ meV}/c^2$
 - 結合定数 $\chi < 10^{-9}$
- CMB観測技術の応用で独占できる
 - DOSUR-RR 1st results は2週間の実験で世界最高感度！
- 「有意な信号」の発見後を色々考えている
 - 到来方向、偏極、などなど

CMB解析テクニックの応用

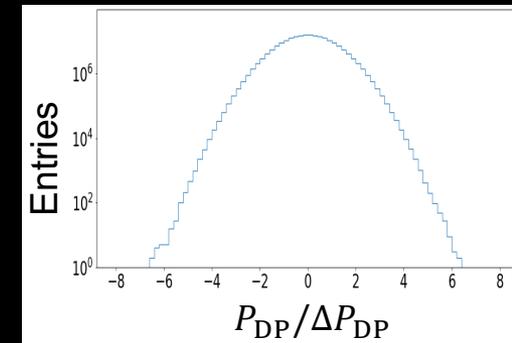
“Null Samples”



We have 12 data samples

→ 462 combinations for making null samples

- ✓ Checking potential systematics
- ✓ Optimizing analysis
- ✓ Calculation of statistical significance



超伝導センサー制御エレキの応用

“dSpec”, DAQ speed x1000

- RFSoc based spectrometer is underdevelopment
- Wideband width ~ 2 GHz
↔ DAQ speed x1000 comparing to the commercial signal analyzer

