

宇宙マイクロ波背景放射 と最近の観測の状況

KEK 素核研 金子大輔

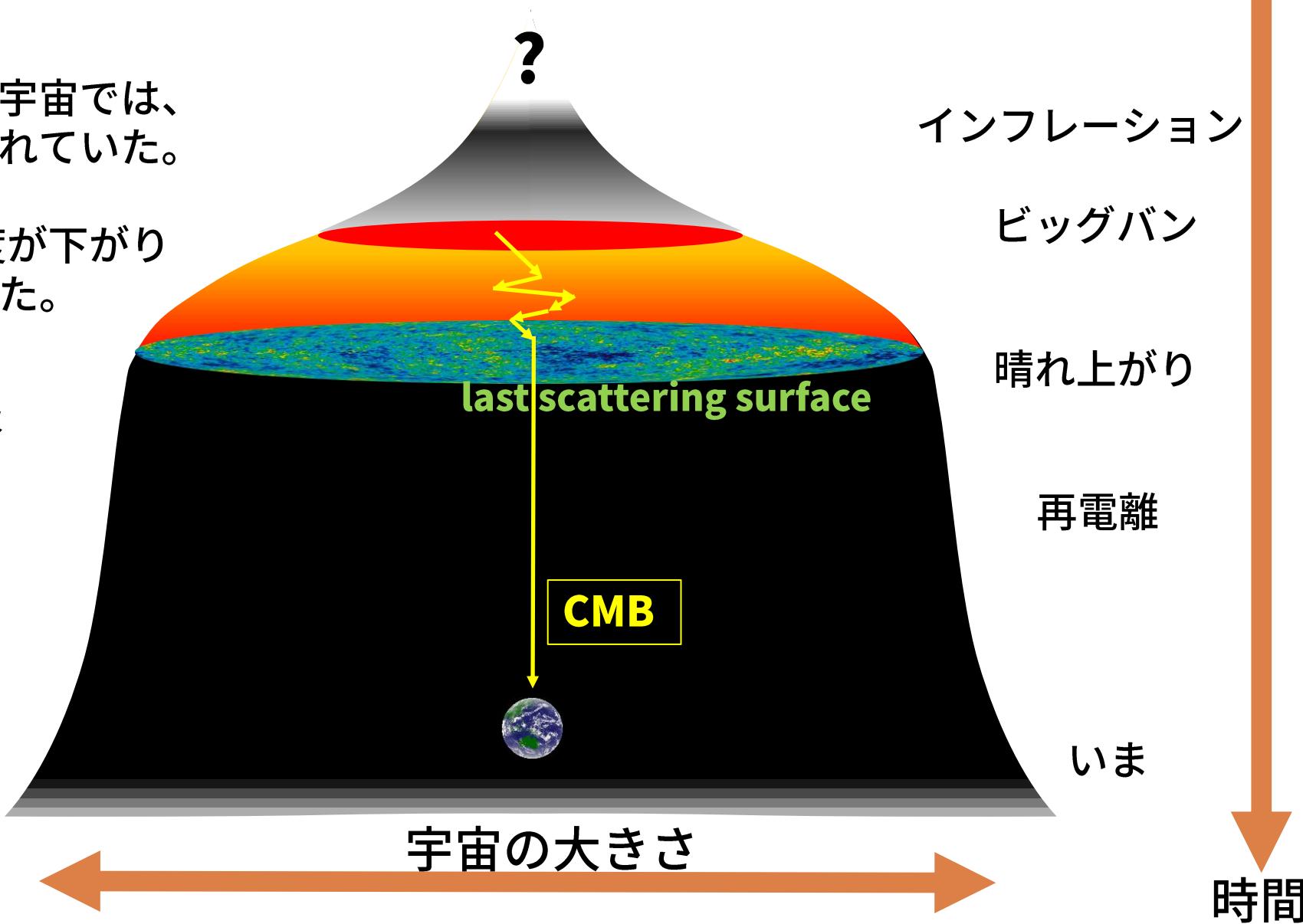


CMBとは？

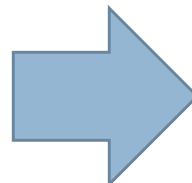
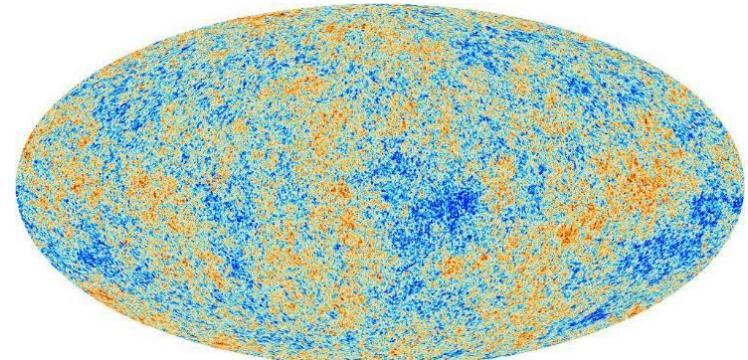
ビッグバンで高温高圧の宇宙では、電磁放射は物質に散乱されていた。

38万年後の宇宙では温度が下がり光が直進するようになった。

CMBには初期宇宙の情報が保存されている。宇宙で最も遠くにある光源として途中にある物体の観測にも利用できる。



CMBを見る流儀



測定した2次元球面上の温度分布($T(\theta, \phi)$)を、球面調和関数に展開する。

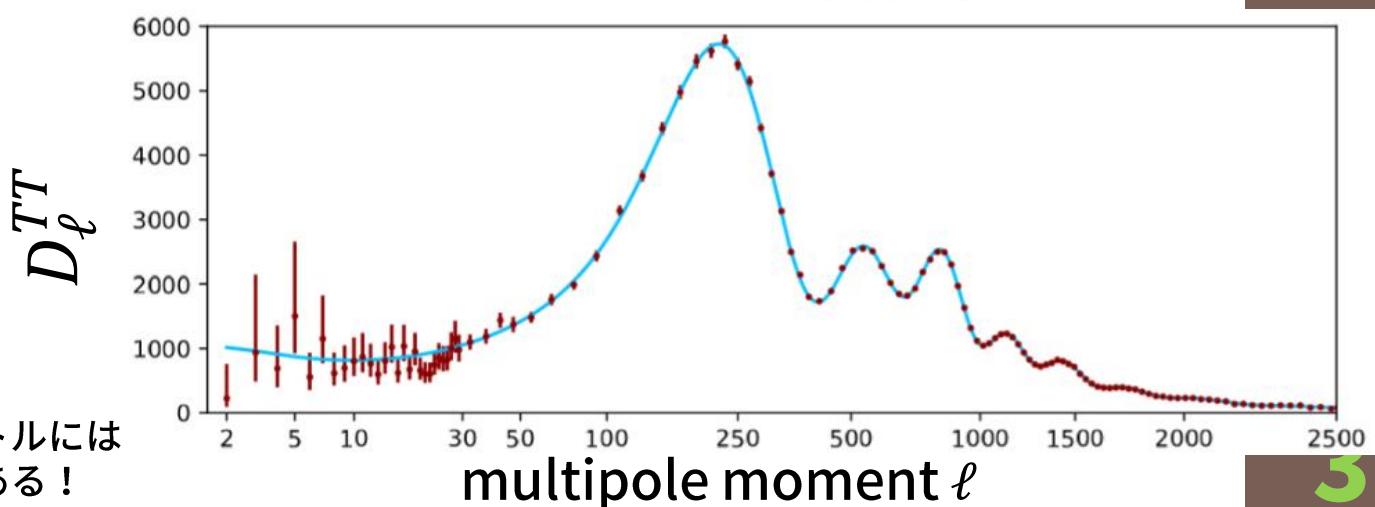
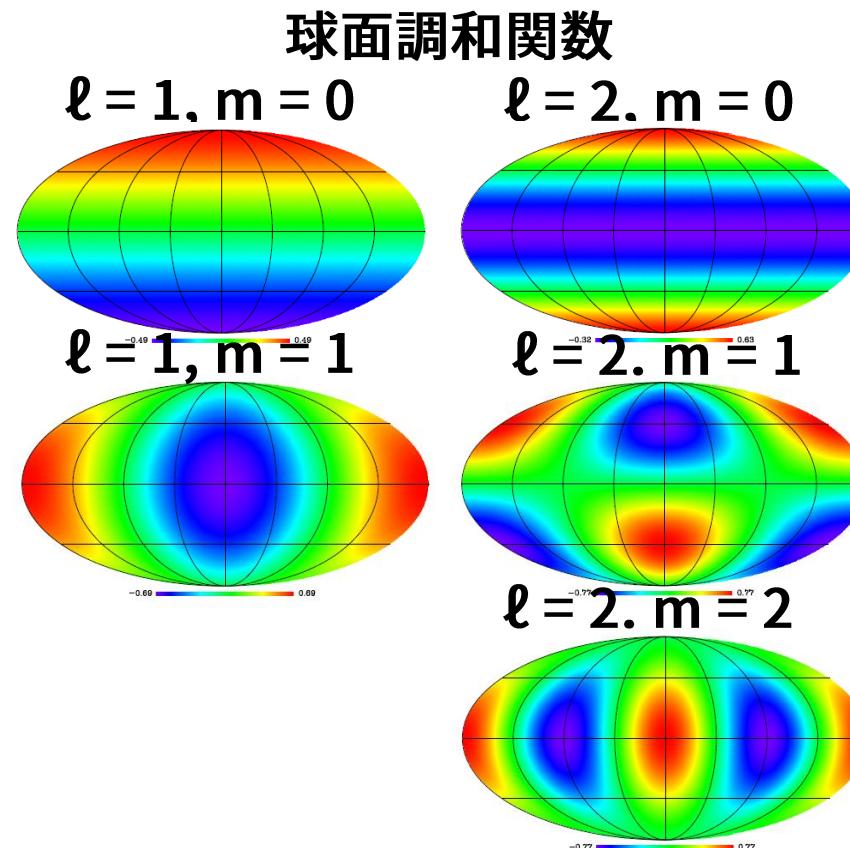
$$T(\theta, \phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell}^m(\theta, \phi)$$

振幅の絶対値を各 ℓ で異なる m について和を取り
方向によらない値、パワースペクトルを得る。

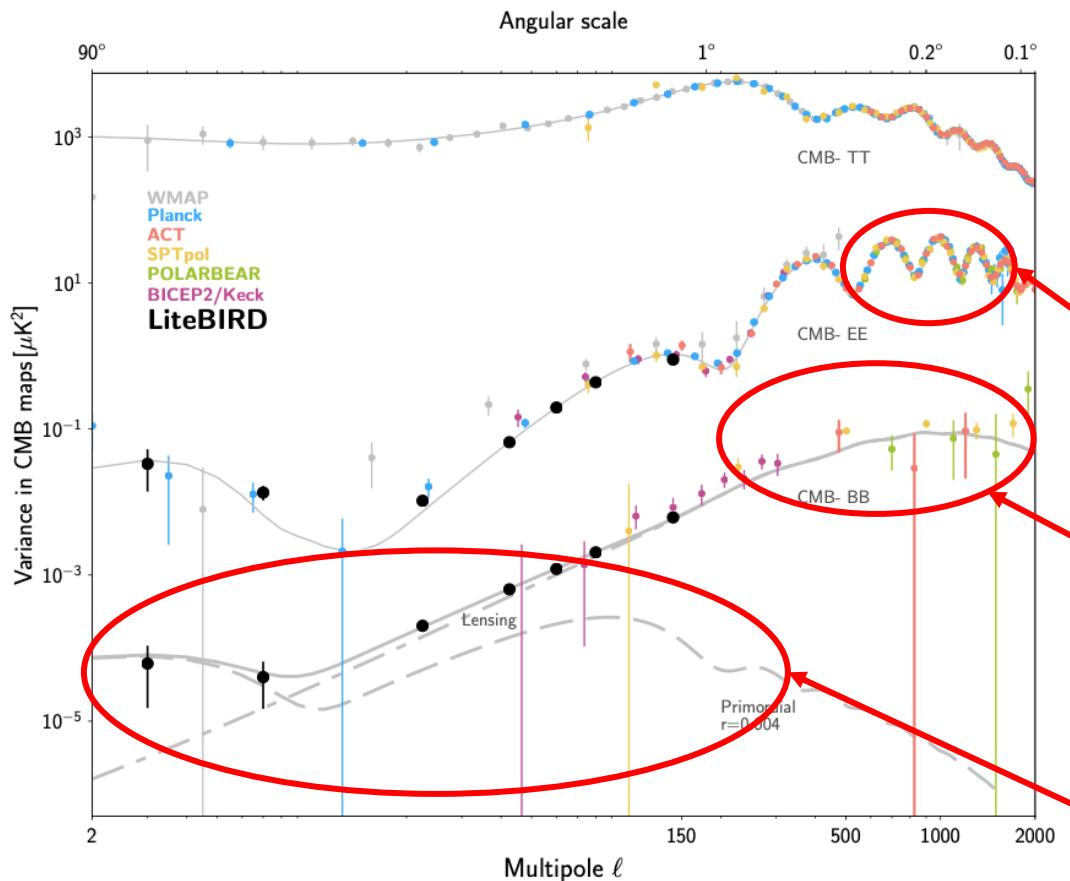
$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} a_{\ell m}^*$$

$D_{\ell} = \ell(\ell + 1)C_{\ell}$ もよく使う

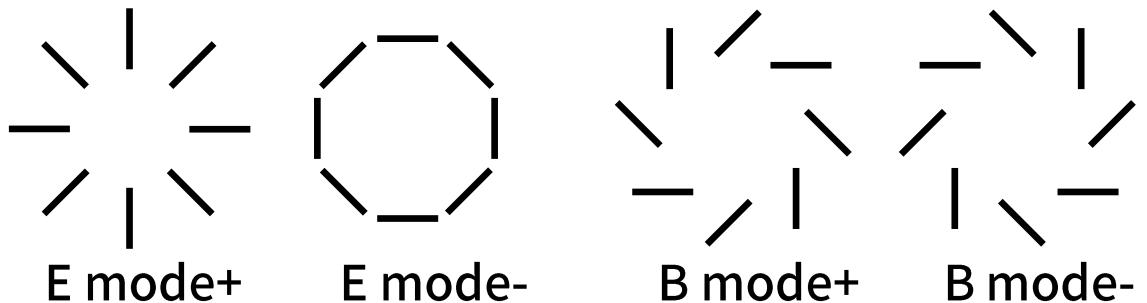
※パワースペクトルには現れない情報もある！



素粒子物理に役に立つCMB観測



Hazumi et al. (2020)



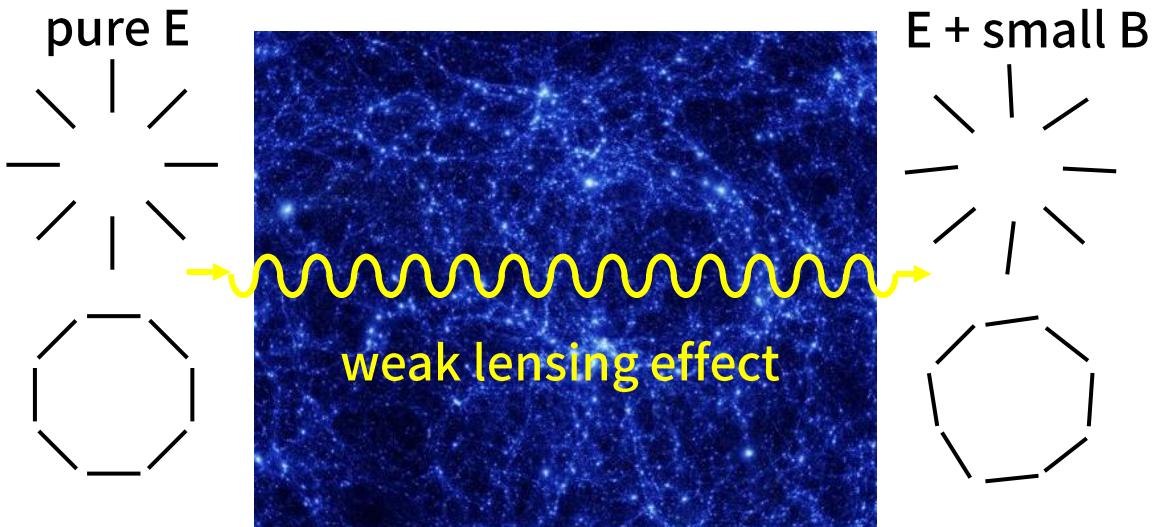
high- ℓ E mode,
ニュートリノの実効種類数 “ N_{eff} ”

high- ℓ B mode,
ニュートリノ質量の和 “ $\sum m_\nu$ ”

low- ℓ B mode,
テンソルスカラー比
“ r ”

← 原始重力波 ← インフレーション

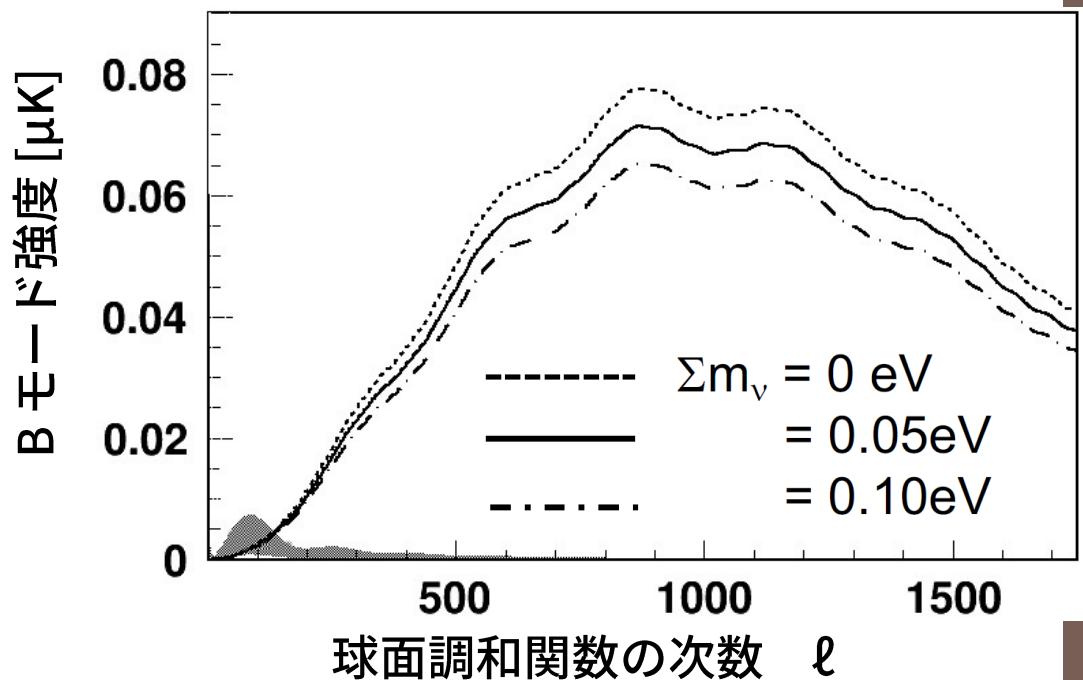
CMBとニュートリノ質量



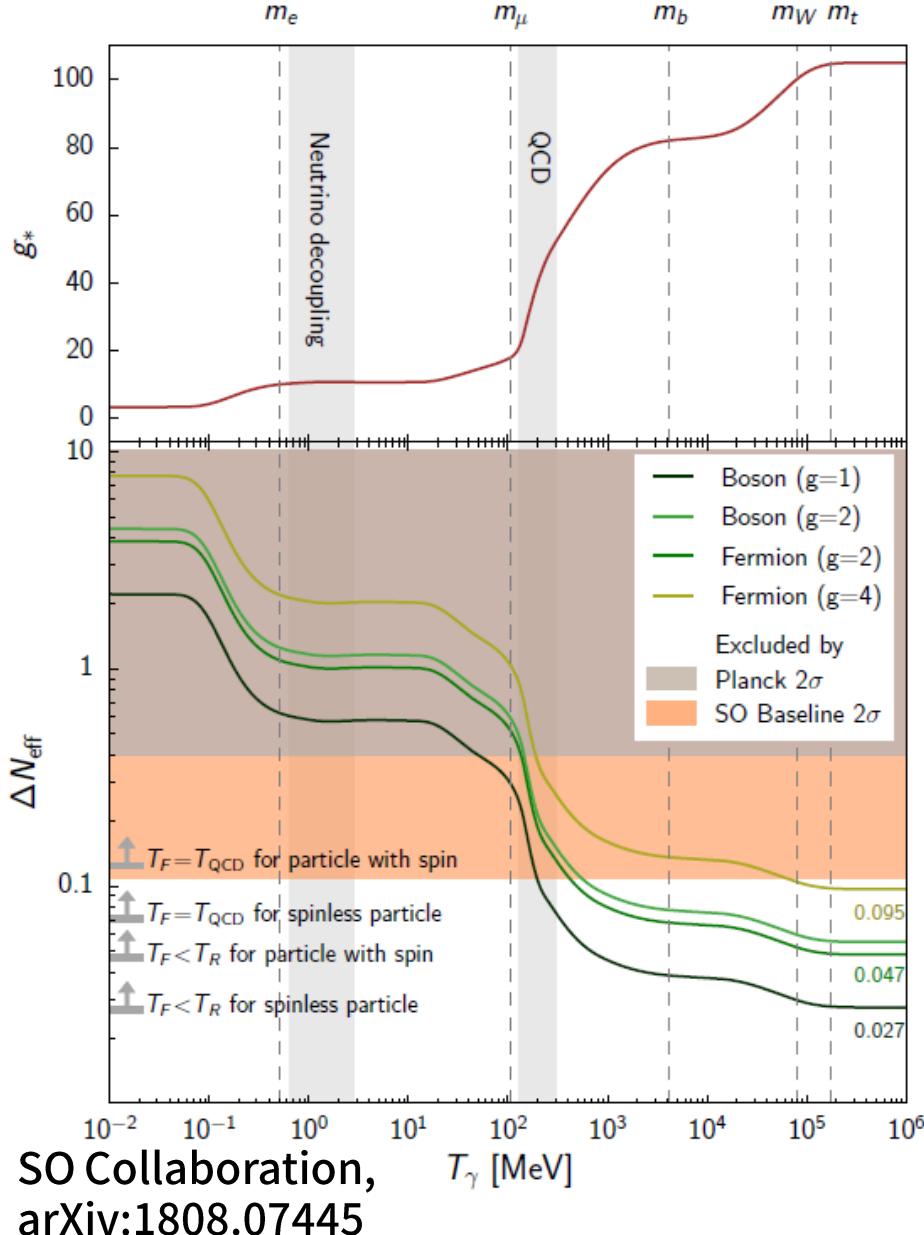
ニュートリノは物質だが相互作用が小さく軽いため、細かいスケールに凝縮することがない。

ニュートリノ質量の和をBモードピークの高さで測定することが可能である。

$\Omega_m h^2$ との縮退があり、別の測定(銀河サーベイ, BAO)と組み合わせて解く必要。

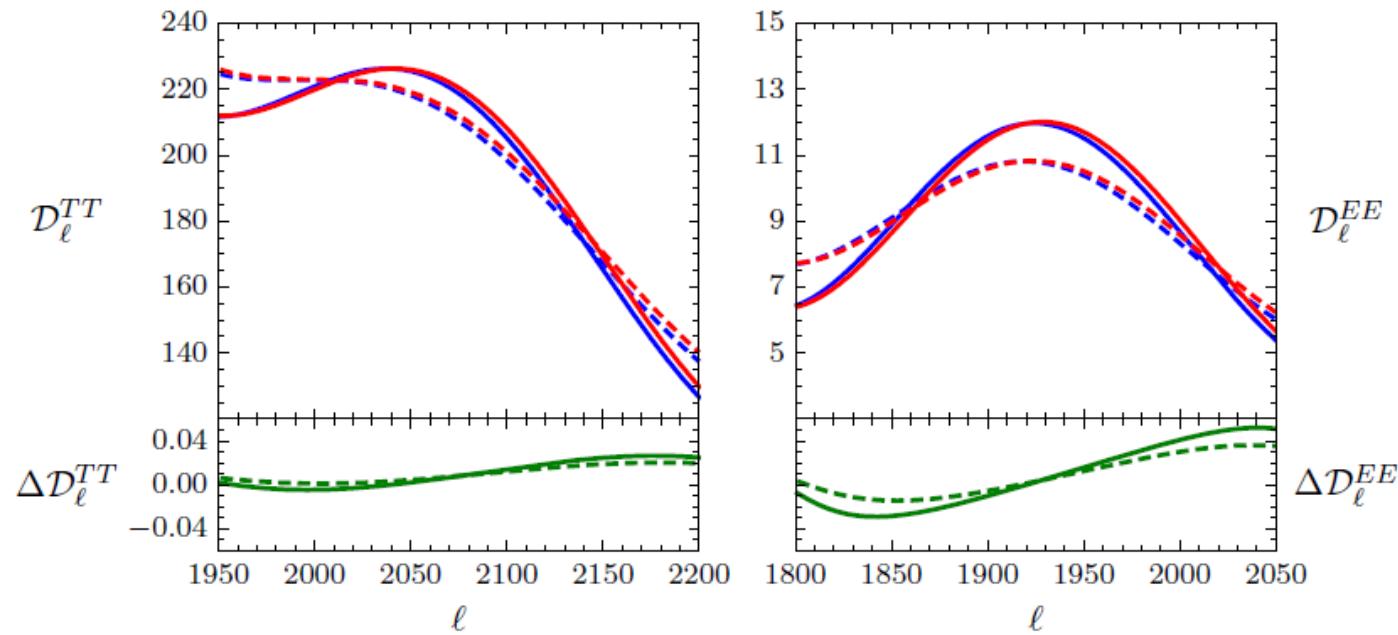


CMBとニュートリノ世代数



高温の宇宙ではニュートリノも相対論的エネルギーを持ち、輻射として振る舞う。どの時点で他の物質から脱結合したかに依存して分担するエネルギーが異なる。

パラメータ N_{eff} は実効的なニュートリノの種類数を表し、標準理論では3.046である。 N_{eff} はT,Eモードのパワースペクトルのある領域から求めることが可能である。



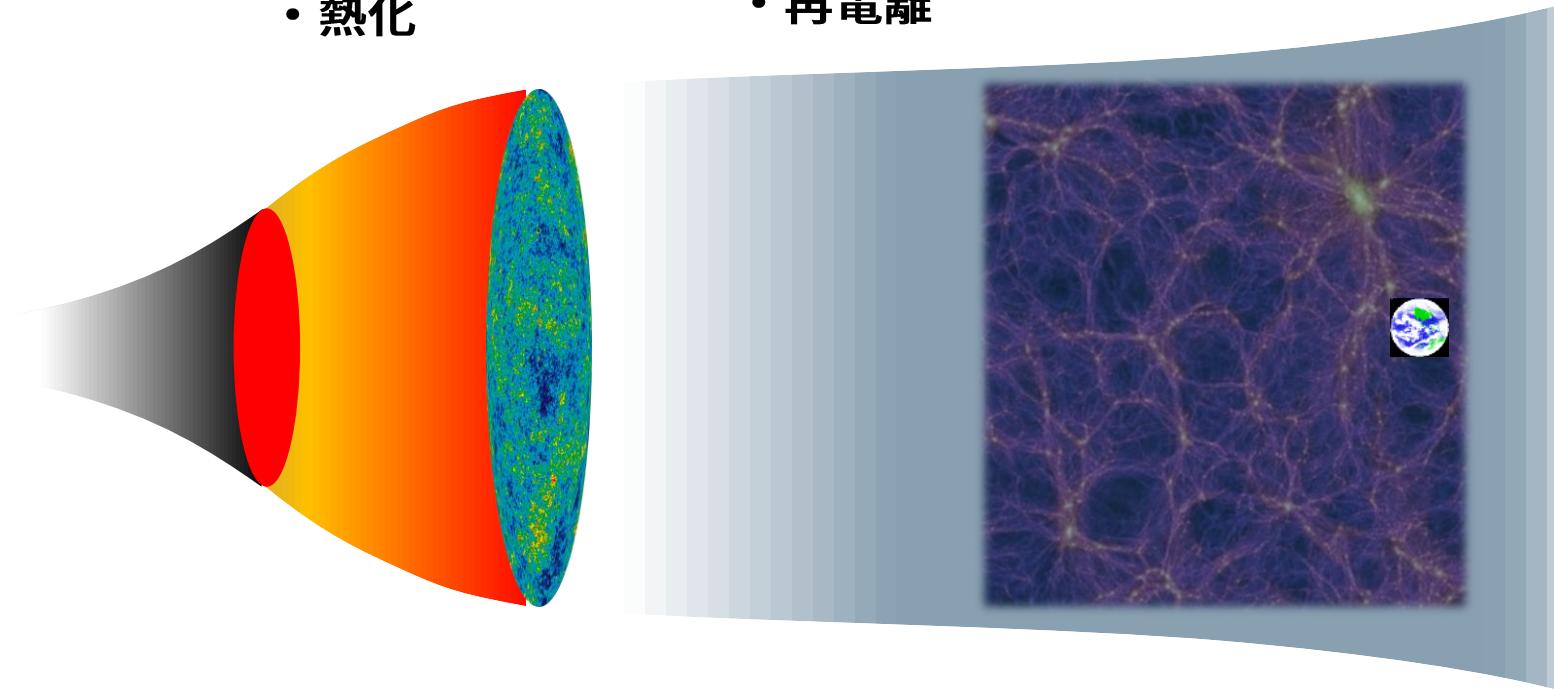
$N_{\text{eff}} = 3.046$ (青)と 2.046 (赤)の場合の比較
D. Baumann et al., JCAP 01 (2016) 007

CMBの他の期待される成果

時間

- ・インフレーション
- ・熱化
- ・晴れ上がり
- ・再電離

・現在



● 再電離した電子の散乱
宇宙の光学的厚さ(τ)

● CMB光子の飛行中の
偏光面の回転

● ゆらぎのガウシアンから
のズレの探索

● 銀河団内のガスによるSZ効果
ダークエネルギーの状態方程式

CMB観測の種類

プラットフォームによる分類

衛星

- 大気の影響がない
- × 宇宙で運用は難しい
Planckが観測を終了
→ LiteBIRD 準備が本格始動

気球

- 大気の影響を安価に削減
- × 観測期間を長くできない
近年ではSPIDER実験

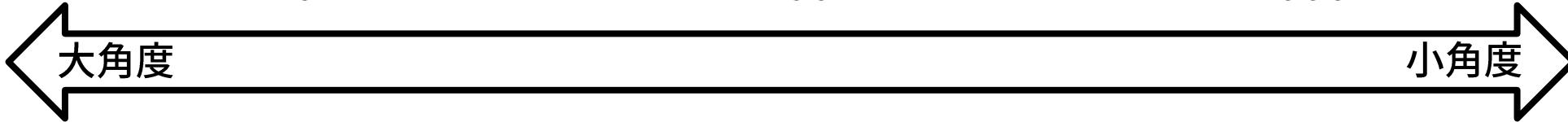
地上

- 大きい装置が運用できる
- × 大気の影響が大きい
南米、南極を中心に多くの実験

角度スケール 10

100

1000

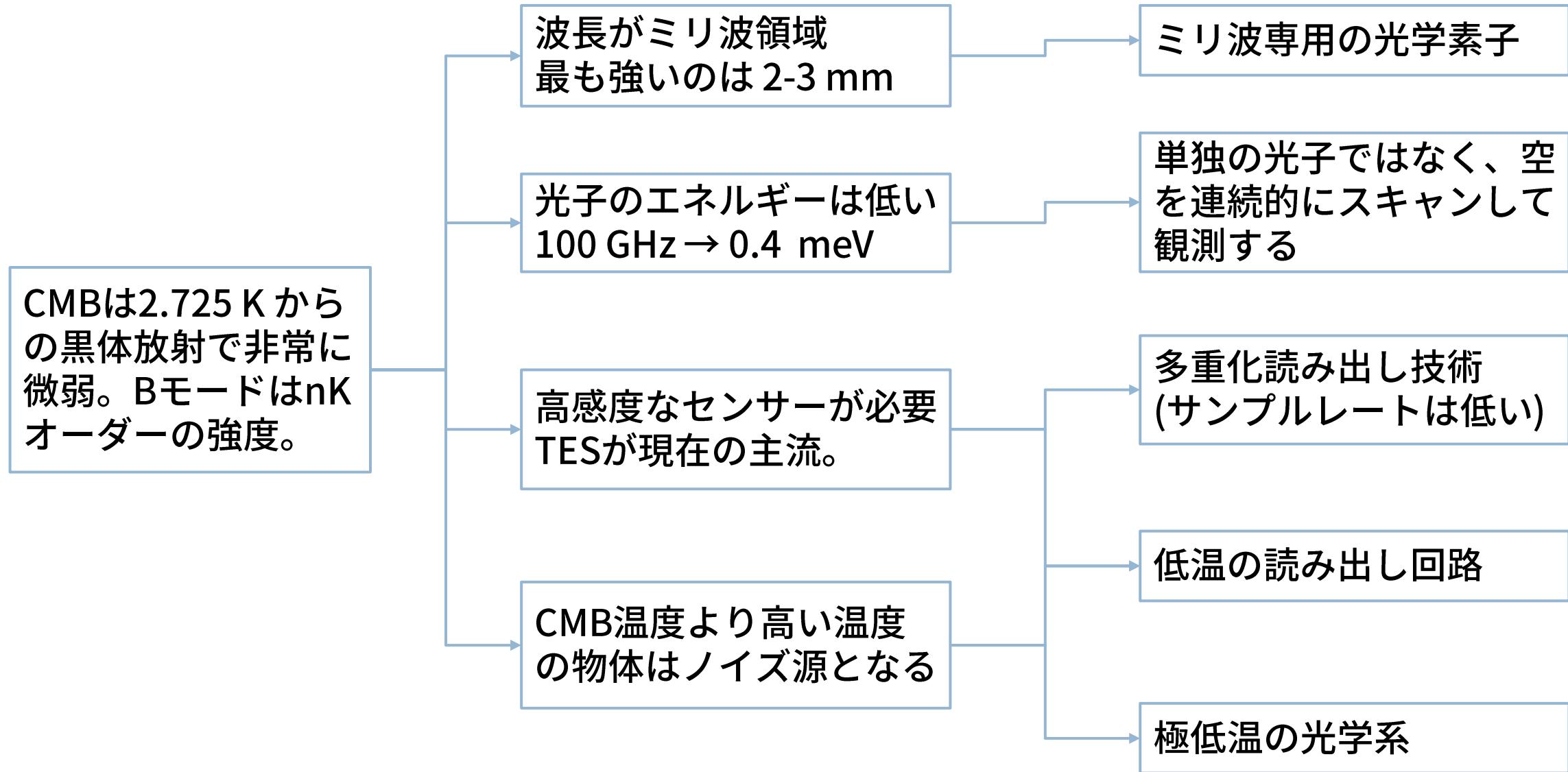


大気や装置の温度ゆらぎから制限
信号の変調などの工夫が必要

観測領域の大きさによる制限
10未満は地上だと難しい

望遠鏡の角度分解能の制限
大きい主鏡口径が必要
例、 $\ell=2000$ は約5分角
 $\lambda=90\text{GHz}$ だと2.5m以上

CMB信号の観測に関する工夫



Simons Array 実験

- チリのアタカマ高地
標高5200mの砂漠地帯
- 3基の望遠鏡に
POLARBEAR-2型受信機
- 1台目の受信器は日本
チームを中心開発
既に観測を開始
- 2台目は受信器を現地で
組み立てているところ

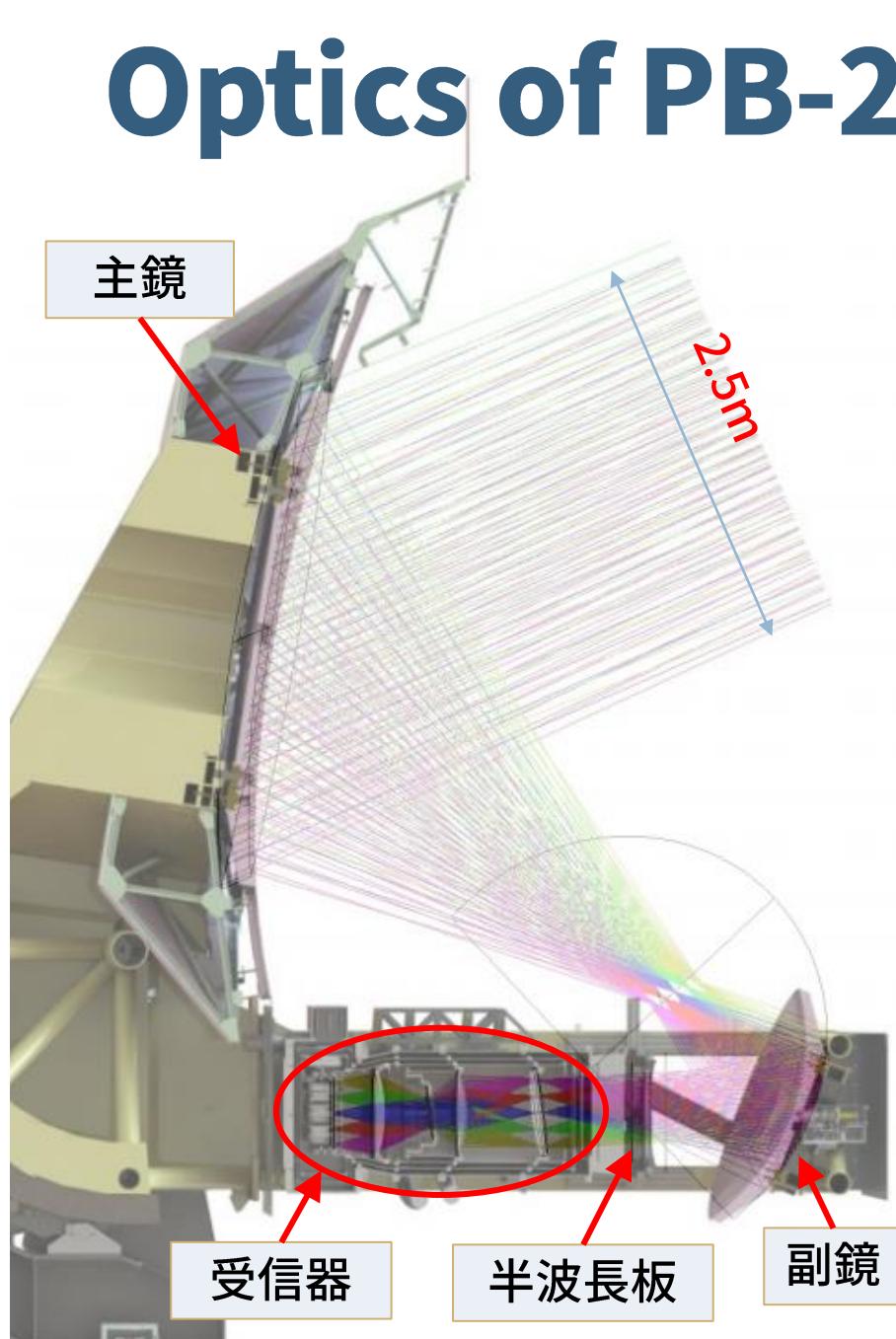


目標感度

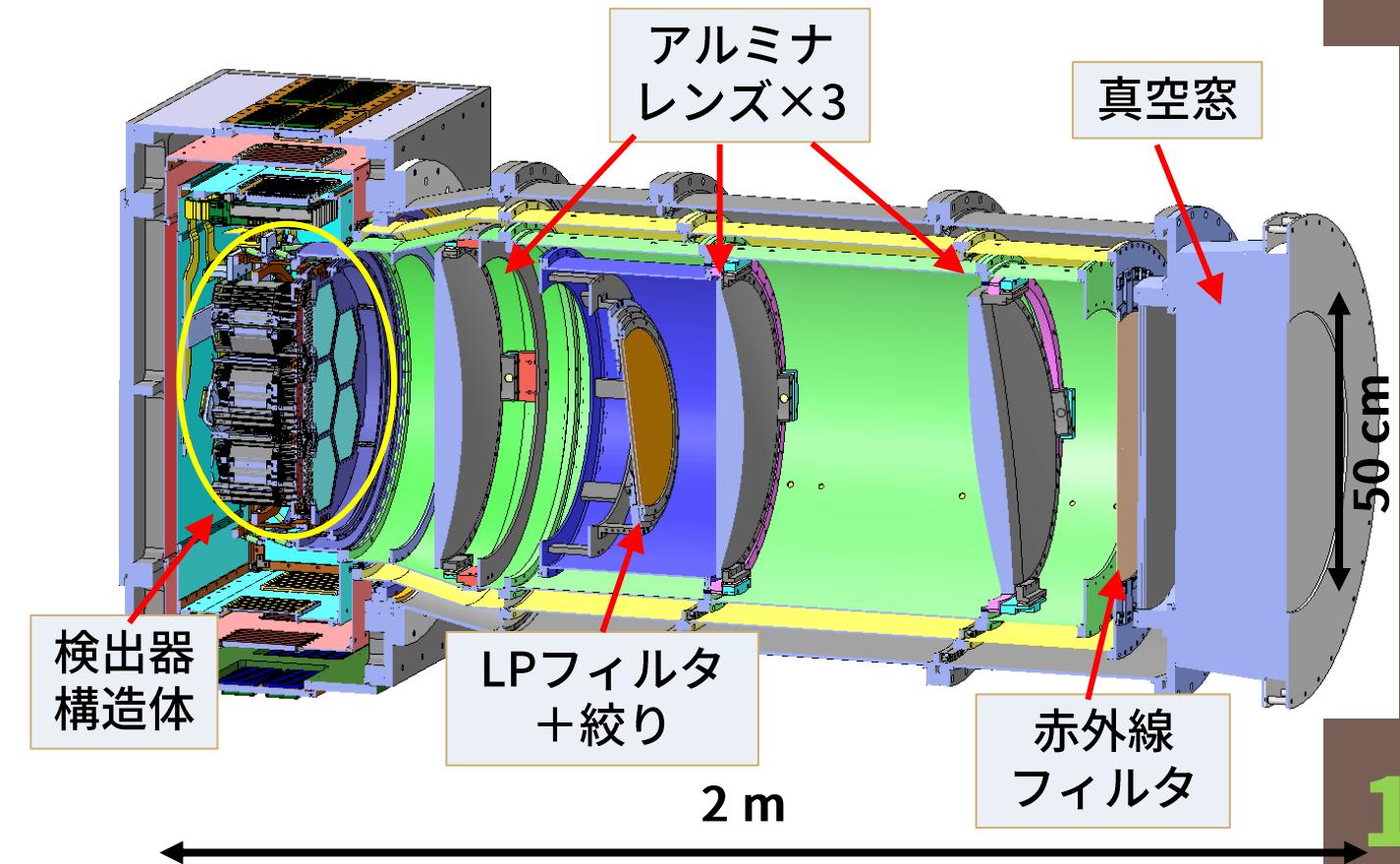
- テンソルスカラー比
 $\sigma(r) = 0.006$ ($r = 0.1$ での値)
- ニュートリノ質量和
 $\sigma(\Sigma m v) = 40 \text{ meV}$
(DESI実験データとコンバイン)



Optics of PB-2



- 主鏡2.5 mの off-axis Dragone 望遠鏡
反射で生じる偏光を抑制する設計
- 受信器の直径は50 cm, 3枚の4Kに冷却した
アルミナレンズによる屈折光学系
- 回転半波長板で入射する信号の偏光方向を回転させ
温度ゆらぎによる不定性を削減する

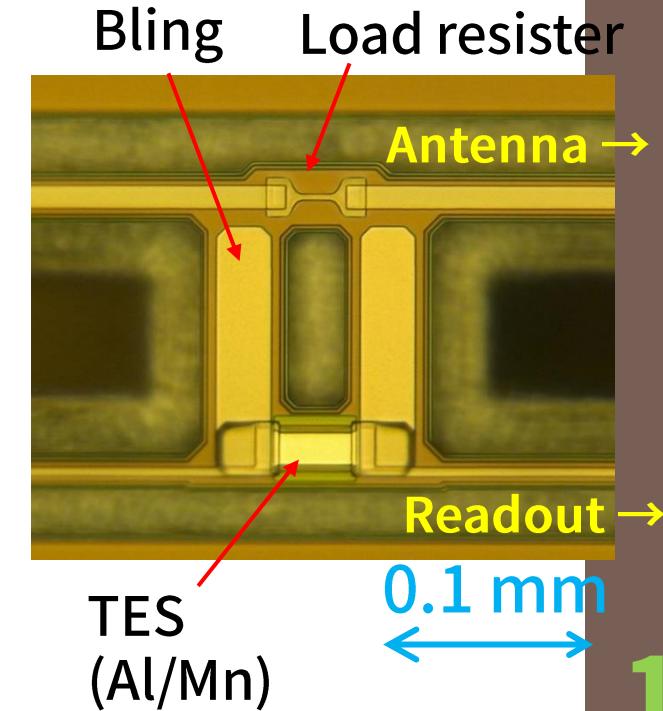
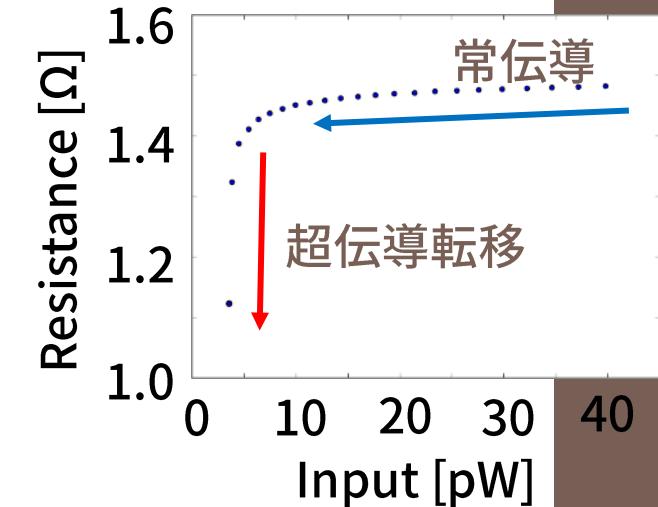
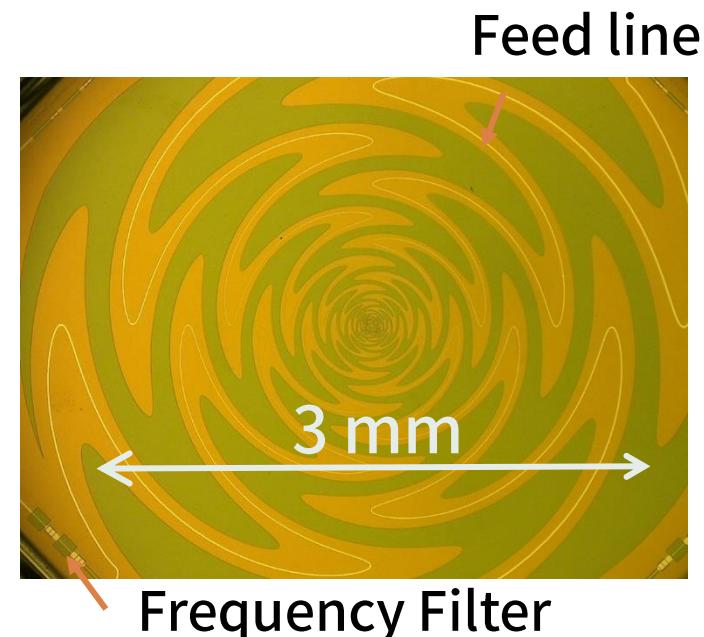


Sensor of SA



PB-2a 検出器構造体 (改)

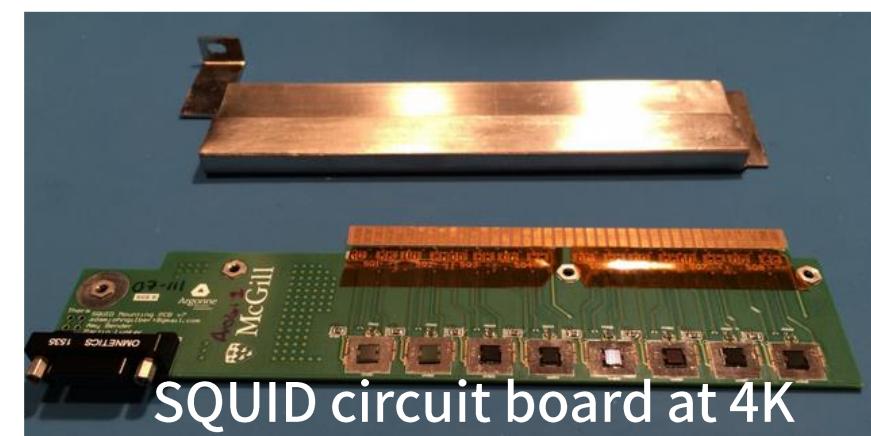
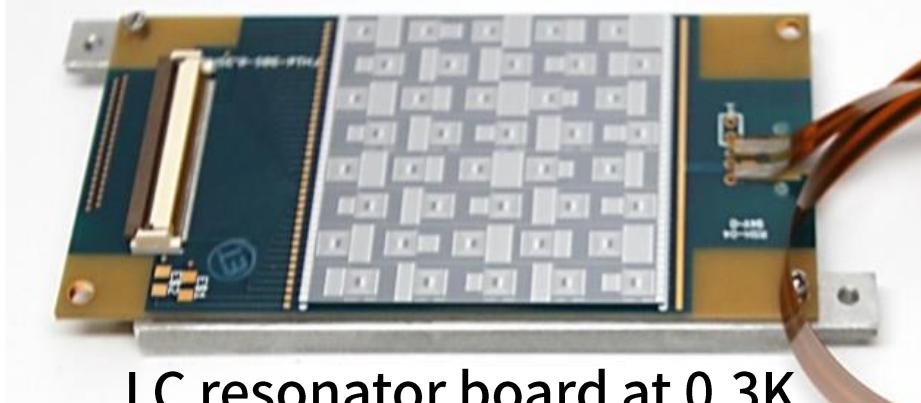
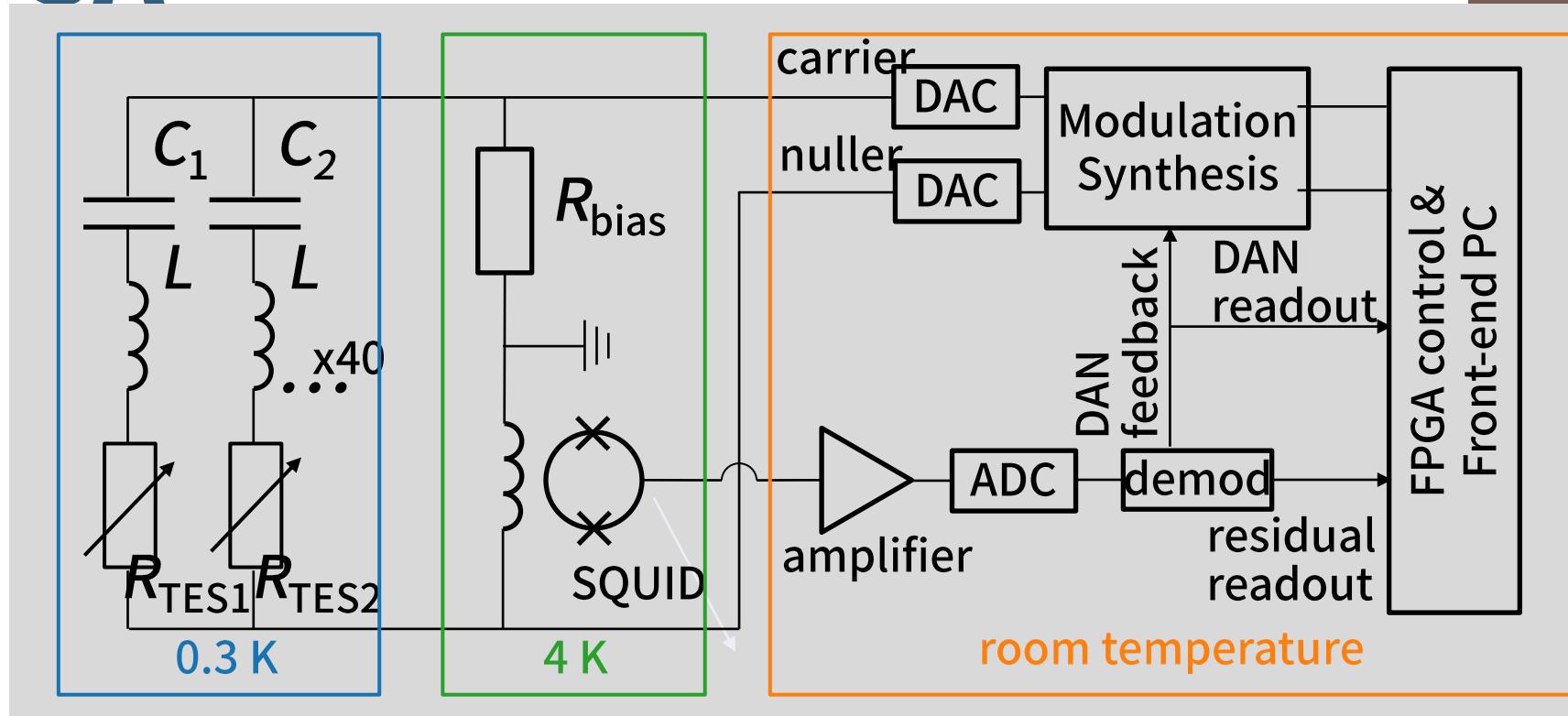
- Transition Edge Sensor (TES) bolometer の採用
- 広帯域なシニアスアンテナで受信、2波長の同時観測をおこなう。



Readout of SA

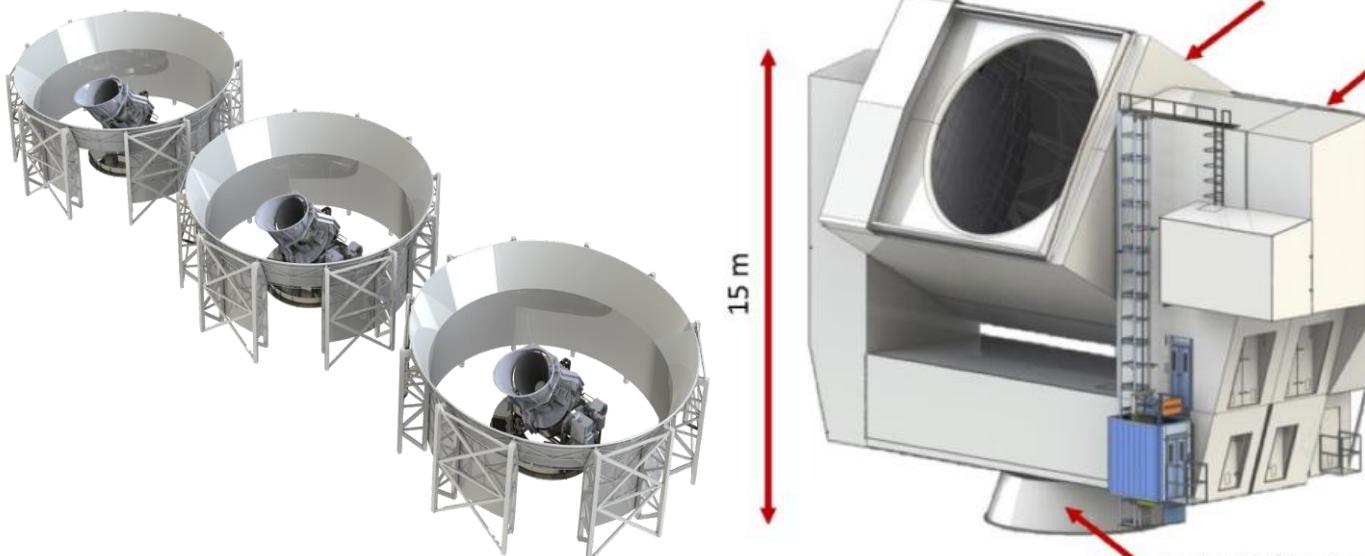
極低温ステージへの熱の侵入を減らすため、周波数多重化読み出(dfmux)を採用。40個のTESを一本の線からSQUIDで読み出す。

TESそれぞれに共振周波数の異なるLC回路が付けられ、1-4MHzの交流を重ね合わせてTESの抵抗の変化を読んでいる。



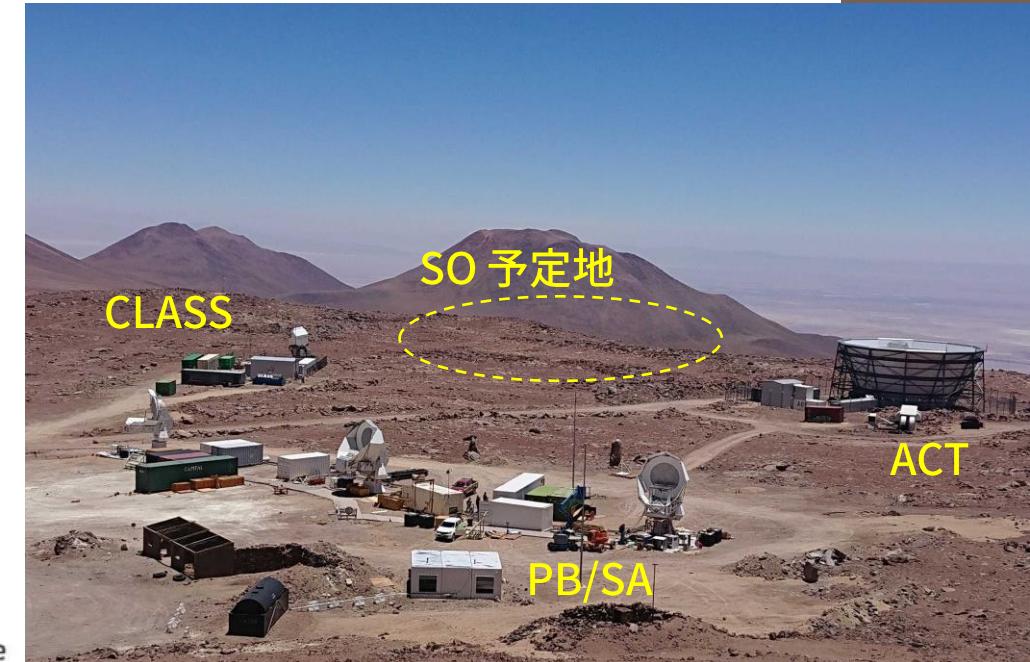
SO experiment

- Simons Observatory (SO) はSAと同じチリのアタカマ高原で観測をおこなう
- 3台のSATと1台のLAT, 合計検出器数は 約60000
- 27 から 280 GHz までの6つの観測周波数帯



3 x
Small aperture telescopes

Large aperture telescope



目標感度

tensor-to-scalar ratio

$$\delta(r) = 0.002$$

neutrino mass sum

$$\delta(\sum m_\nu) = 20 \text{ meV}$$

of neutrino species

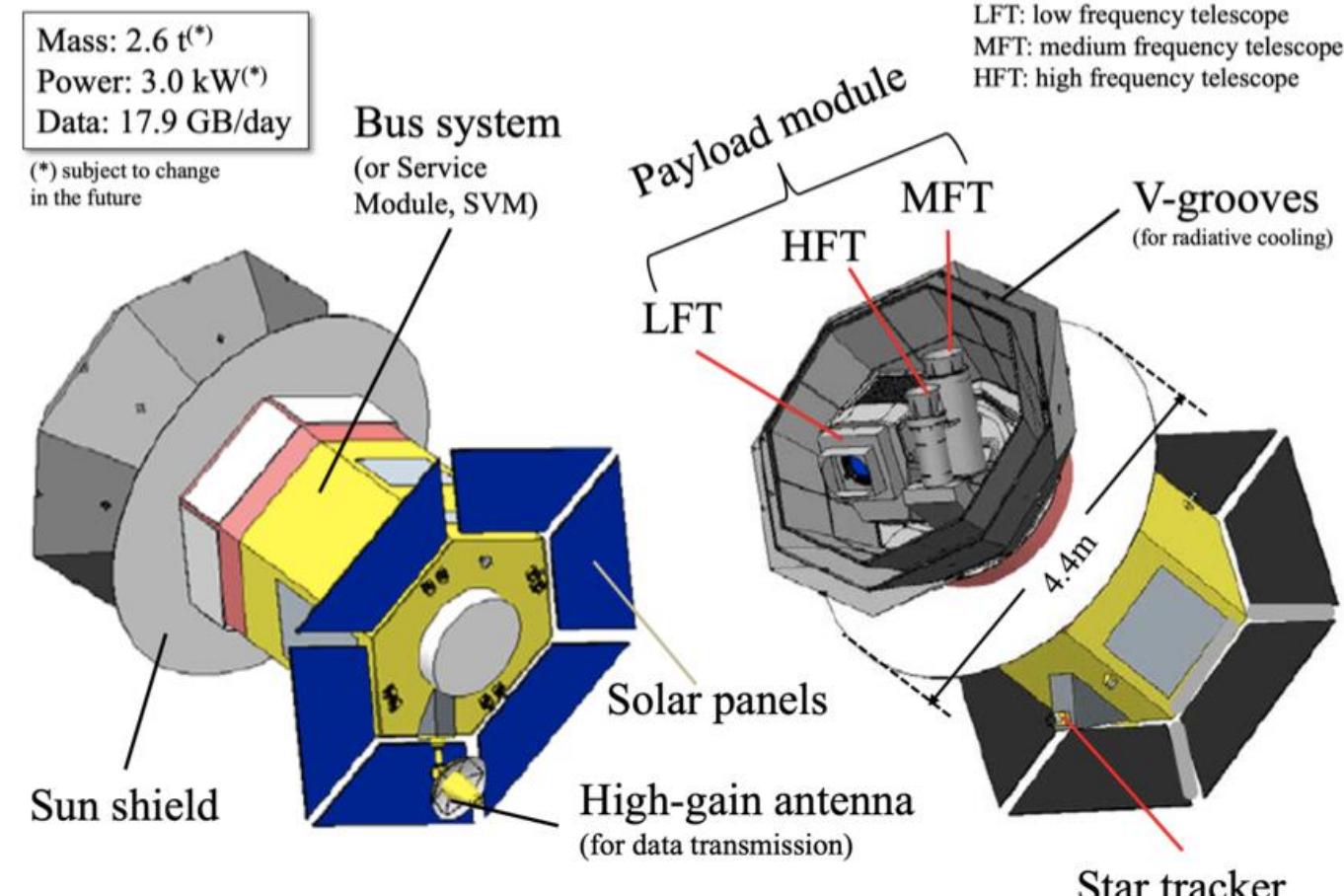
$$\delta(N_{\text{eff}}) = 0.05$$

などなど

2022年の運転開始に向け、準備が急ピッチで進む。

LiteBIRD project

- LiteBIRDは日・米・欧の共同で開発が進められているCMB衛星実験
- JAXAの戦略的中型2号機衛星に採択
- 2020年代終盤にJAXAのH3ロケットでの打ち上げを目指す
- 太陽-地球系のL2点で3年間観測
- 周波数を分担した3台の望遠鏡を搭載
34から448GHzまで15個のバンド
- テンソルスカラー比の分解能目標
 $\delta(r) < 1 \times 10^{-3}$

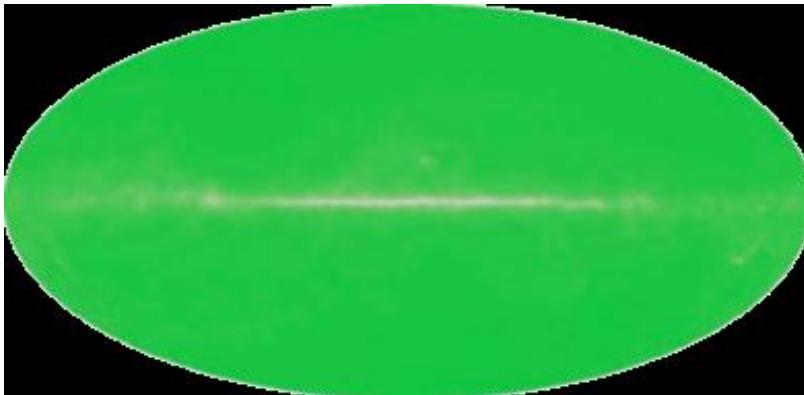


まとめ

- CMB観測は素粒子物理分野にも大きなインパクトが期待
- 観測のためには高度な技術が必要、研究開発は各方面で活発
- 日本グループは過去現在将来の色々なCMB実験に重要な貢献
 - 特に、高エネルギー分野から転身している研究者も多数新規参入される方をお待ちしています！

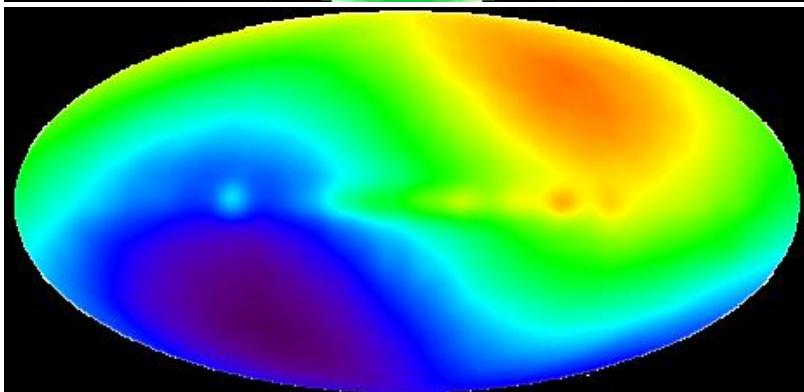
CMBの空間変化

大まかにいえば



2.725 Kの一様な放射

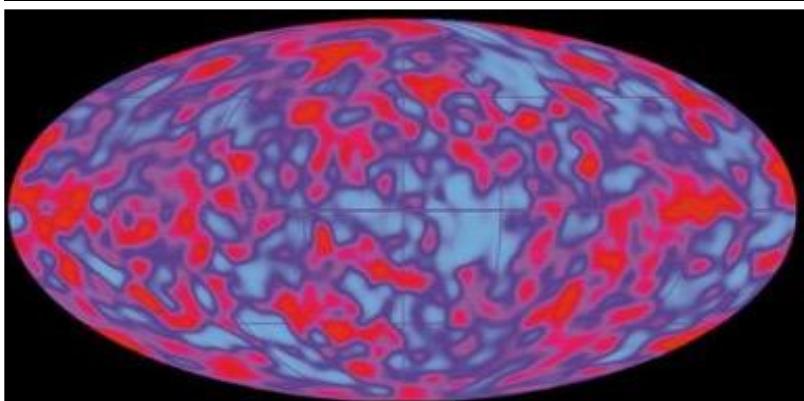
1000分の1
すこしよく見ると



3.36 mKの双極子

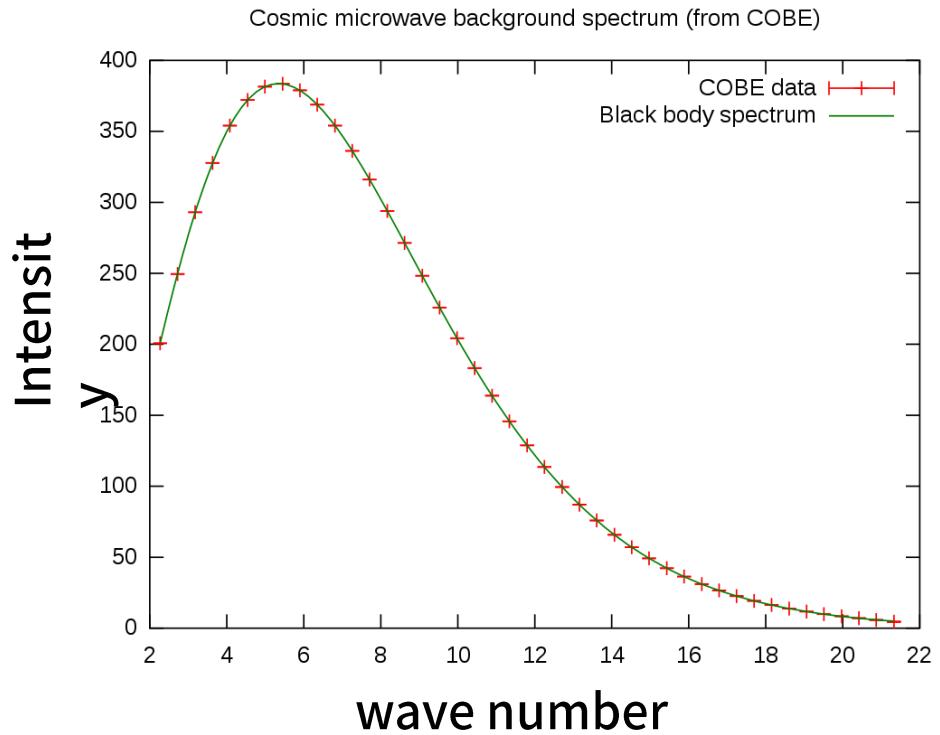
地球とCMBの相対速度
622 km/s

10万分の1
もっとよく見ると



約30 μKのゆらぎがある

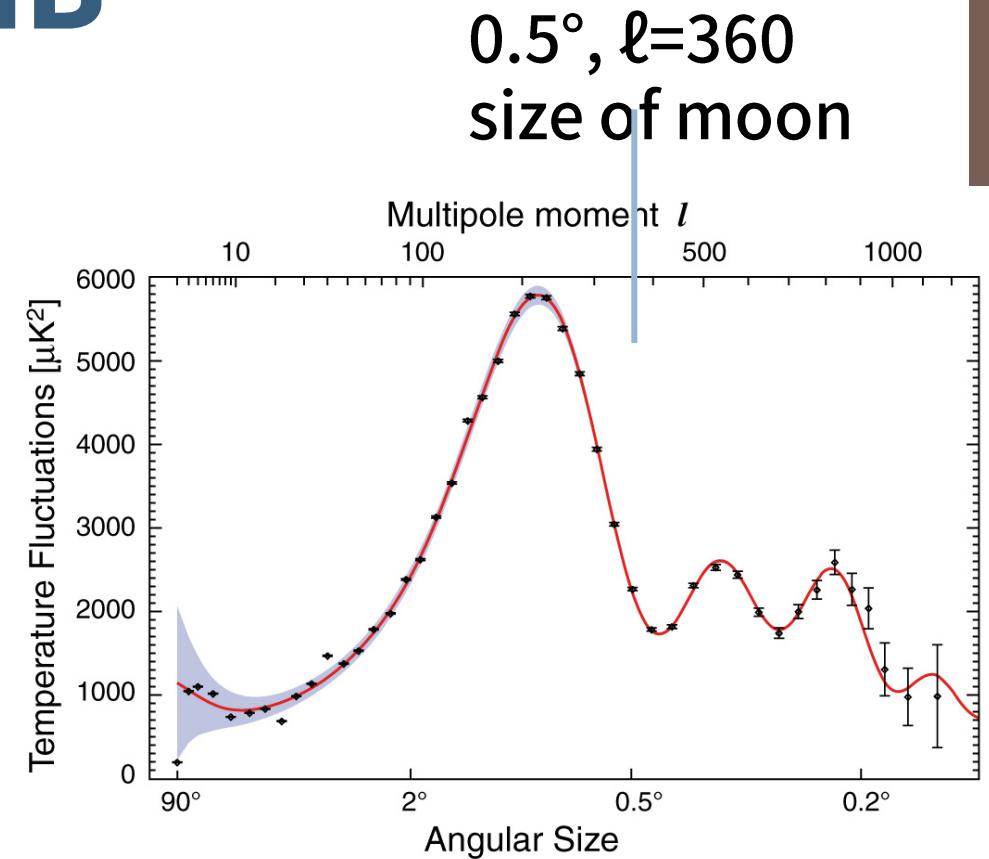
Known facts about CMB



CMB spectrum $\text{J} \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ agrees extremely well with Planck's black body radiation formula.

Temperature 2.725 K

Peak is at $\lambda \sim 2 \text{ mm}$, $\nu \sim 150 \text{ GHz}$.

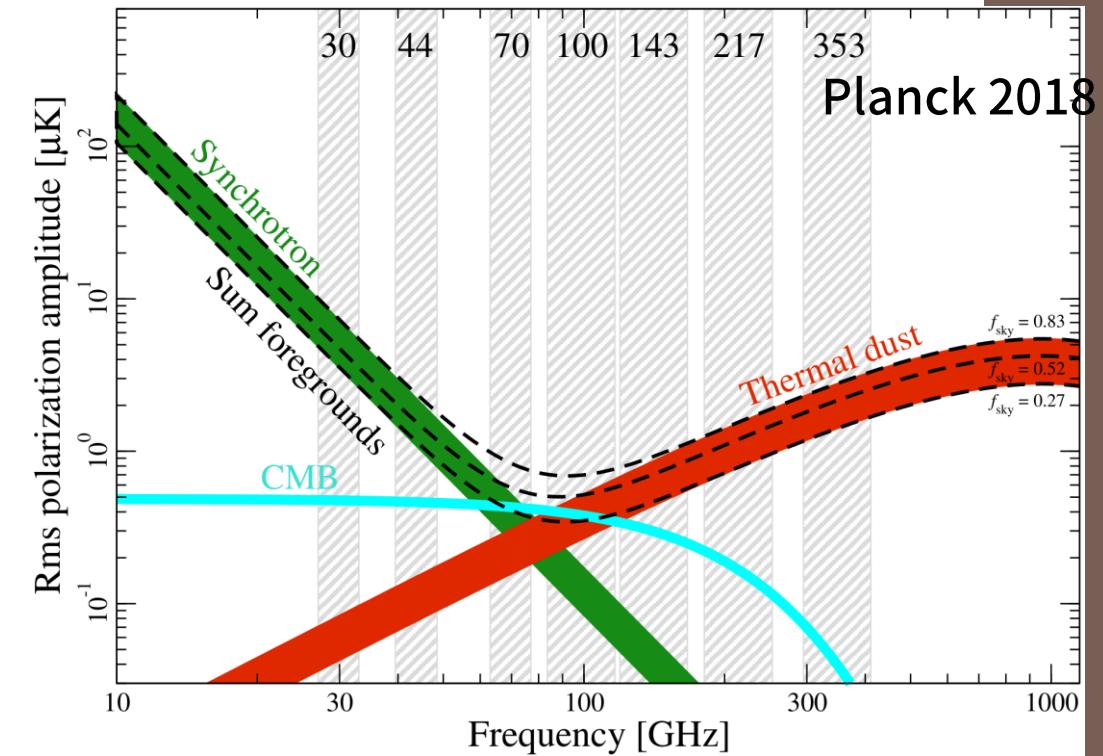
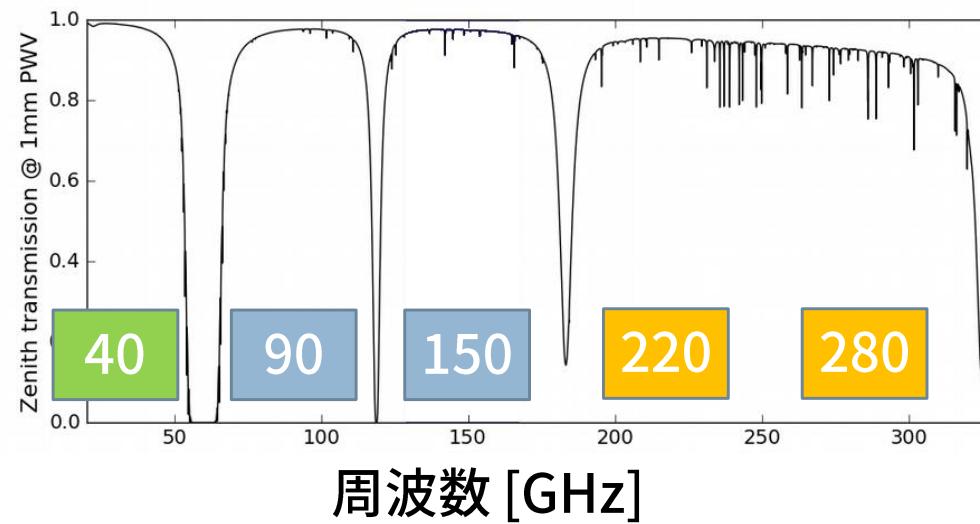


Radiation strength (temperature) has non-uniformity. It's usually indicated in power spectrum.

CMB信号が強い周波数はだいたい 70~150 GHzの範囲
 以下ではシンクロトロン放射
 以上ではダストからの放射 が優勢になる。

地上の観測ではミリ波は大気に吸収され、観測可能な帶域が限られる。

アタカマの例
透過率



How polarization generated

