

# 宇宙マイクロ波 背景放射観測の 現状

金子大輔

カブリ数物宇宙研究機構

# 自己紹介

名前： 金子大輔  
かねこだいすけ

所属：  の、ポスドク  
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構  
KAVLI INSTITUTE FOR THE PHYSICS AND MATHEMATICS OF THE UNIVERSE

仕事： 観測的宇宙論  
宇宙マイクロ波背景放射観測実験  
POLARBEAR-2のコミッショニング  
Simons Observatoryの機器開発



2018年12月、チリにて



フォロー申請大歓迎

# 経歴

年度

07

M1

08

M2

09

10

11

D1

12

D2

13

D3

14

D4

15

D5

16

post-doctoral researcher

17

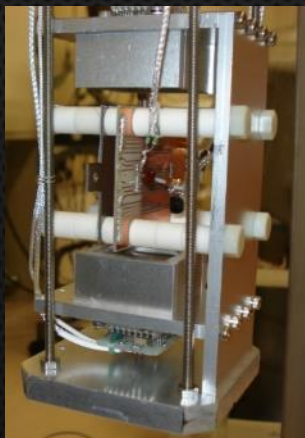
18

19



## MEG 実験

建設段階



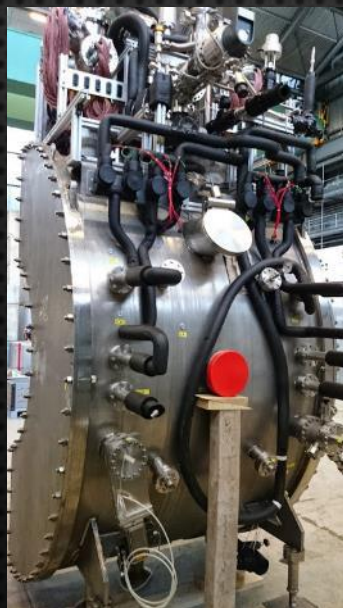
液体Xe TPC  
研究開発

## 大型発電機

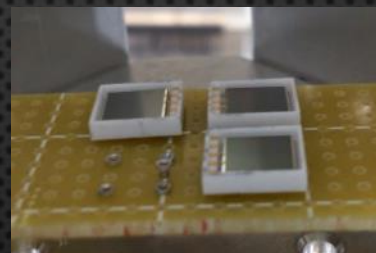
の予防保全



## MEG 実験



液体キセノン検出器  
較正とか

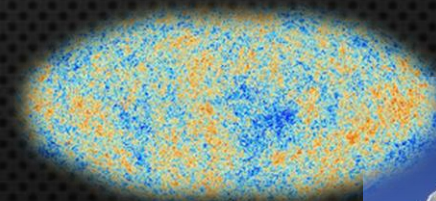


真空紫外線有感  
MPPCの開発

MEG-I final result  
 $B < 4.2 \times 10^{-13}$   
(90%CL)

## CMB 実験

POLARBEAR/Simons Array  
Simons Observatory も

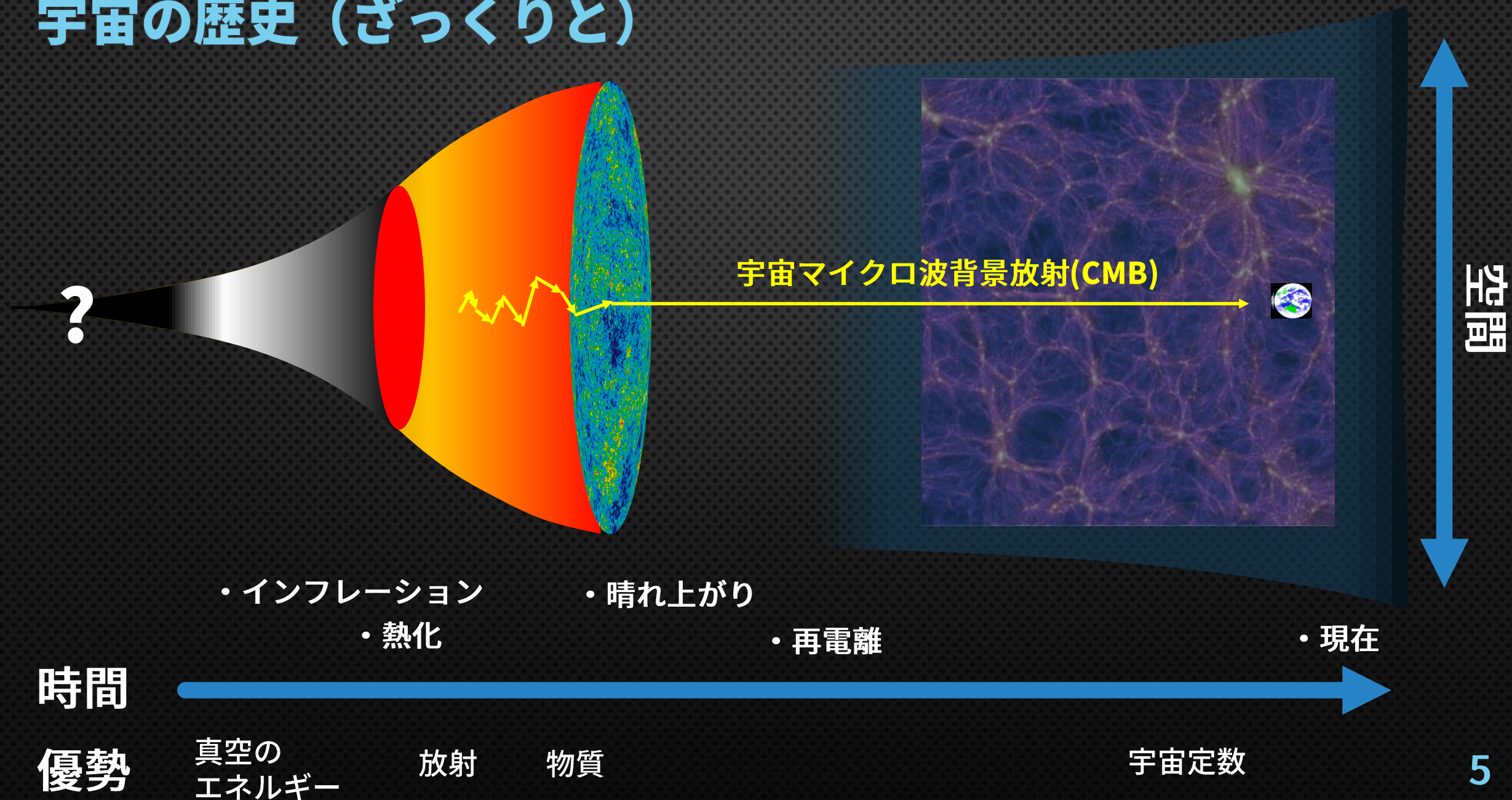


Telescope at  
Chile Atacama



# CMBの歴史

# 宇宙の歴史 (ざっくりと)



# 宇宙マイクロ波背景放射発見史

参考 : arXiv:1506.01907, 星ナビ 2018年1月号



Джордж Гамов  
ジョージガモフ  
1904 - 1968

宇宙が高温の火の玉から始まったならば、高温の黒体放射が宇宙を満たしていた。宇宙は膨張しスペクトルの温度は下がったが、現在でも放射は宇宙のあらゆる場所で、あらゆる方向からやってくる。

1940年代

宇宙を満たす放射は遠方の銀河の放射が星間の塵で散乱されたもの。

1940年代

高性能マイクロ波アンテナの研究中に原因不明の電波を見つけた。空のあらゆる方向から一様に飛来し、温度は3.5K。

ちなみにハトのフンを全部掃除しても消えない。

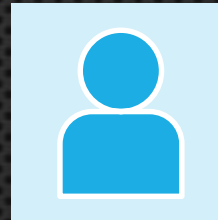
1964年

先を越されたよ。

1964年

観測結果はビッグバン理論の方に合っている。

1970-80年代



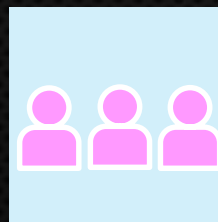
定常宇宙論者



ベル研究所  
Arno A. Penzias  
Robert W. Wilson



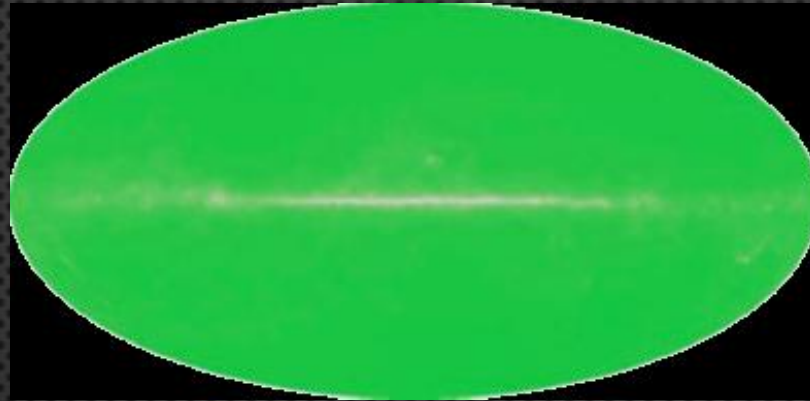
プリンストン大  
Robert H. Dicke



多くの実験者

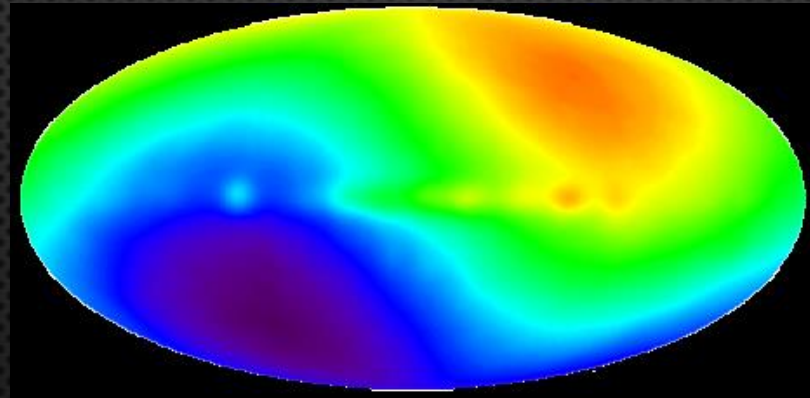
# CMBの空間変化

大まかにいえば



2.725 Kの一様な放射

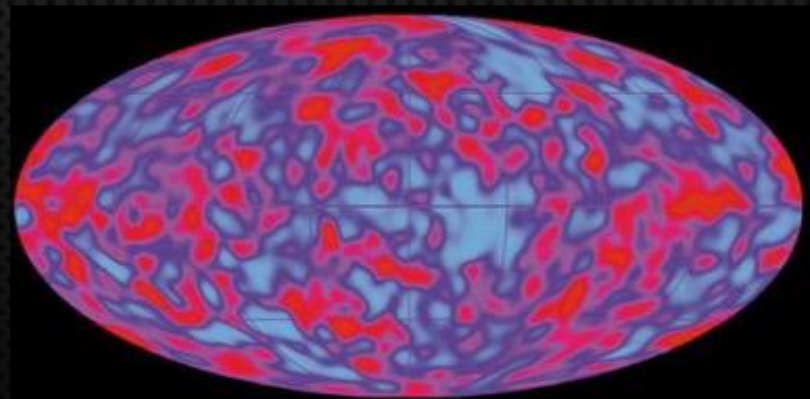
1000分の1  
すこしよく見ると



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

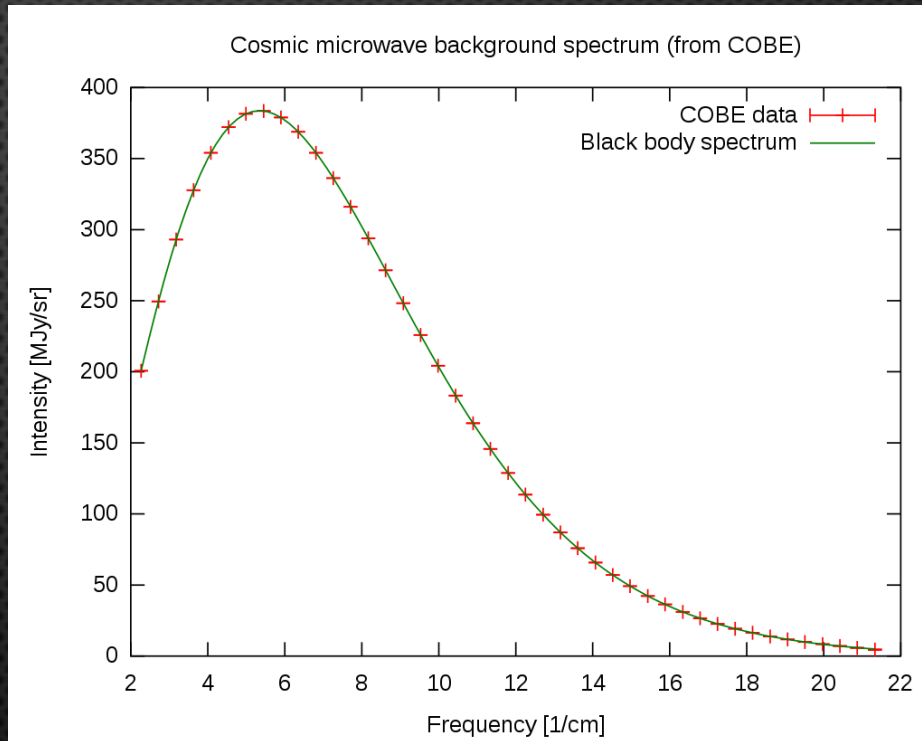


約30  $\mu$ Kのゆらぎがある

# COBE衛星 (COSMIC BACKGROUND EXPLORER)

NASAが1989年に打ち上げ  
3つの観測器

差分マイクロ波ラジオメータ (DMR)  
遠赤外絶対分光測光計 (FIRAS)  
拡散赤外背景放射実験装置 (DIRBE)



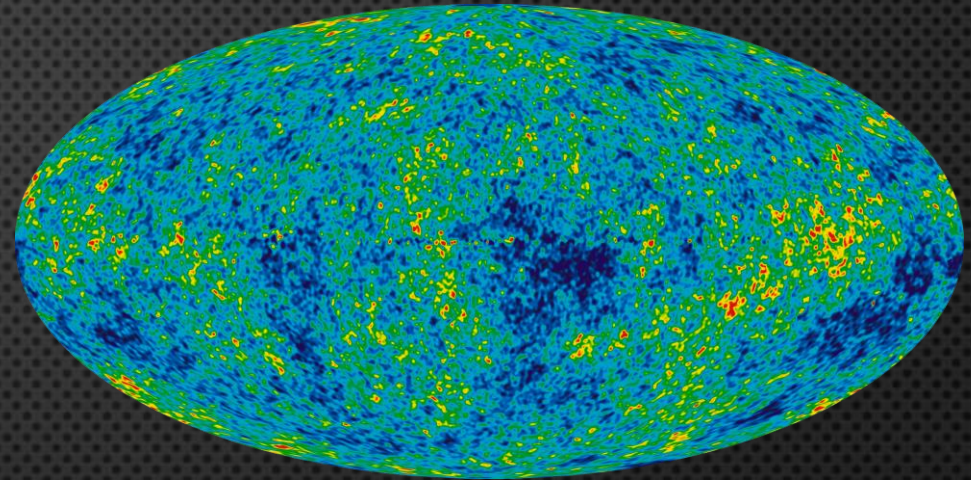
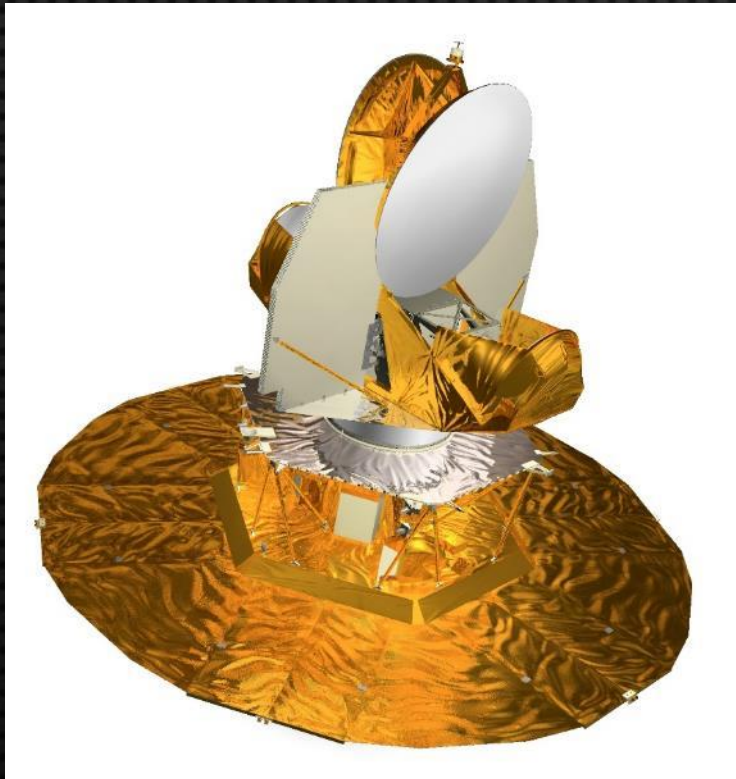
FIRASの結果、CMBのスペクトルは2.725 K  
黒体放射と非常に良い一致を示す。

宇宙はかつて熱平衡状態だった！



# WMAP衛星 (WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE)

NASAが2001年に打ち上げ  
5つの周波数帯、それぞれCOBEの10倍の感度  
13分角の角度分解能 (COBEの33倍)



以前よりはるかに精細なマップ。

## 宇宙パラメータの導出

$t_0$  (宇宙の年齢)  $13.74 \pm 0.11 \times 10^9$  year

$H_0$  (ハッブル定数)  $70.0 \pm 2.2 \times \text{km/s/Mpc}$

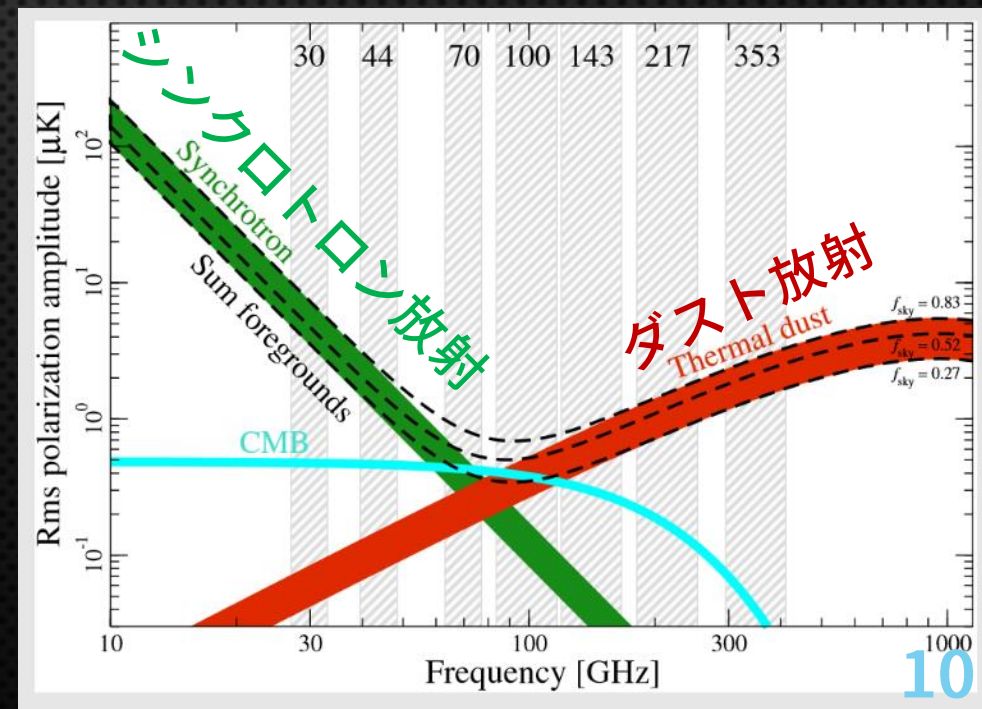
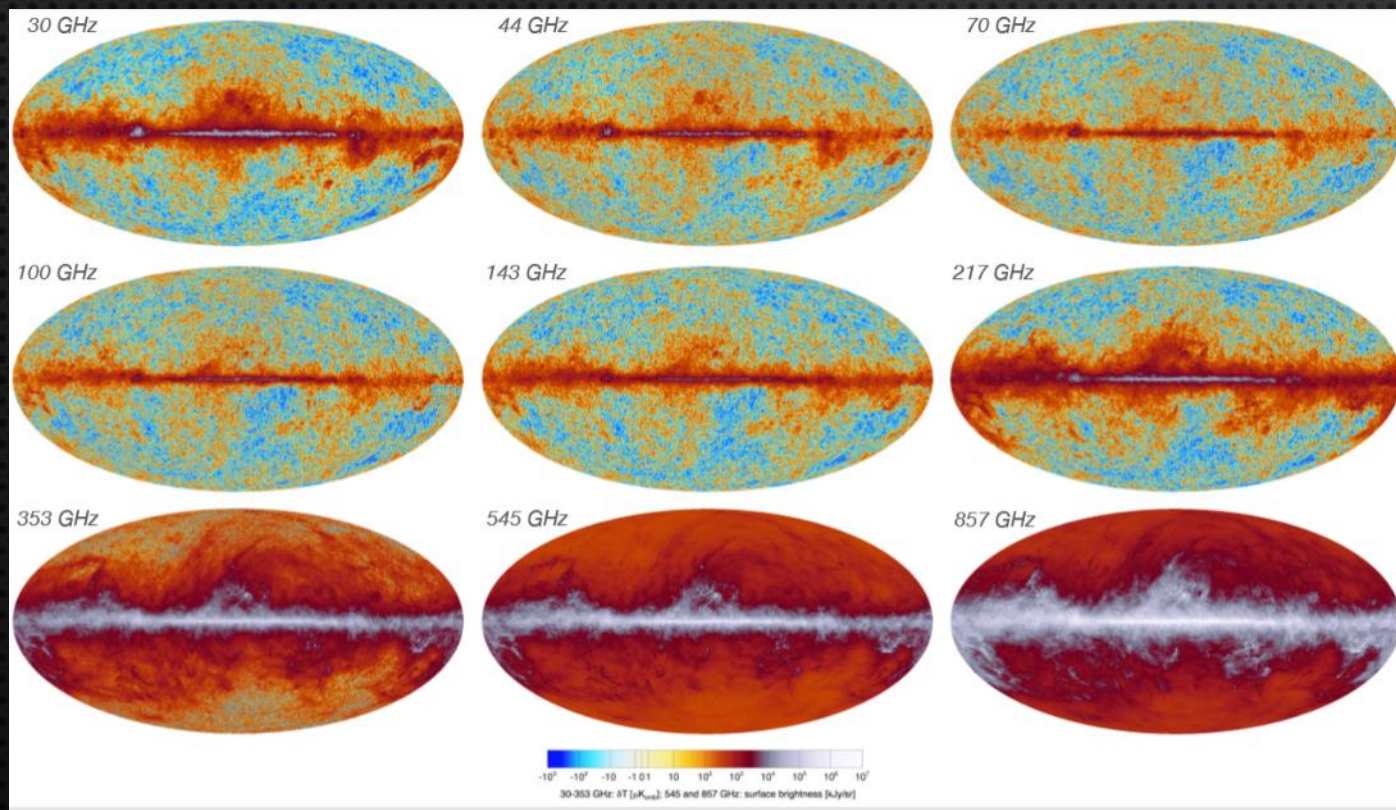
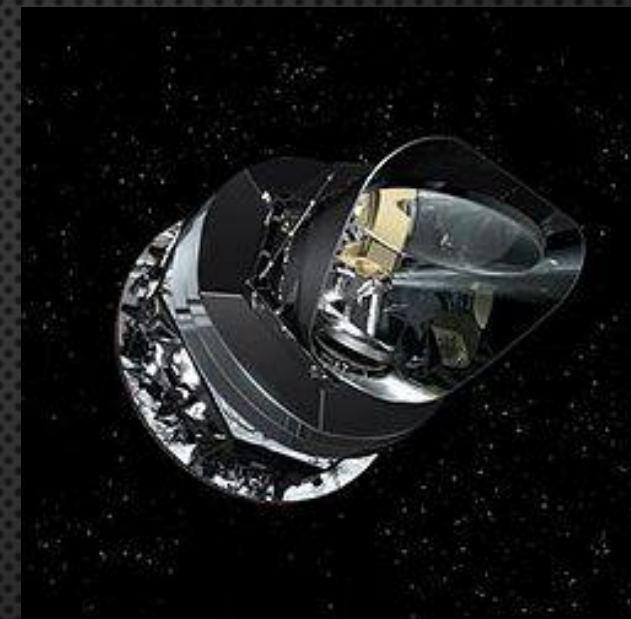
$\Omega_b$  (バリオン密度)  $0.0463 \pm 0.0024$

etc.

宇宙論は精密科学の時代に！

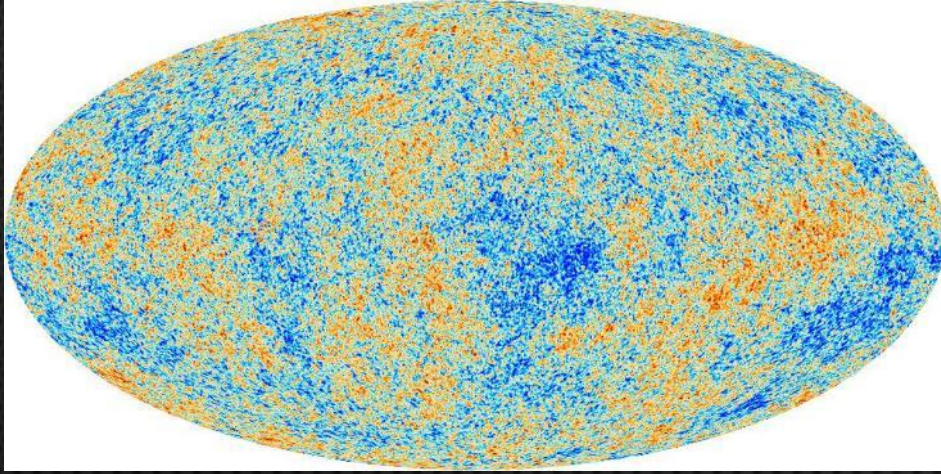
# PLANCK 衛星

ESAにより2009年打ち上げ  
偏光にも高い感度、偏光観測時代の先駆け  
30 – 857 GHz の幅広い周波数  
各種前景放射の除去



# CMBと物理

# 観測データから結果を得るには



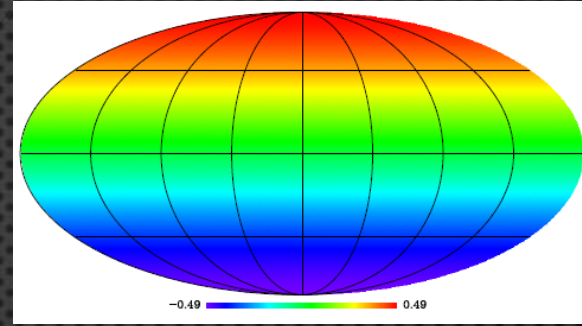
2次元球面上の温度分布(ゆらぎ)

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

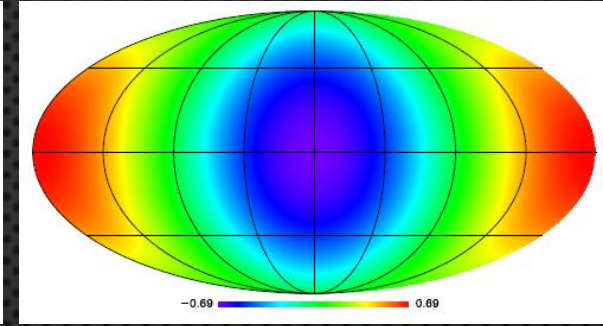
↓ 球面調和関数

$$Y_{\ell}^m(\theta, \phi) = (-1)^m \sqrt{\frac{(2\ell+1)(\ell-m)!}{4\pi(\ell+m)!}} P_{\ell}^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

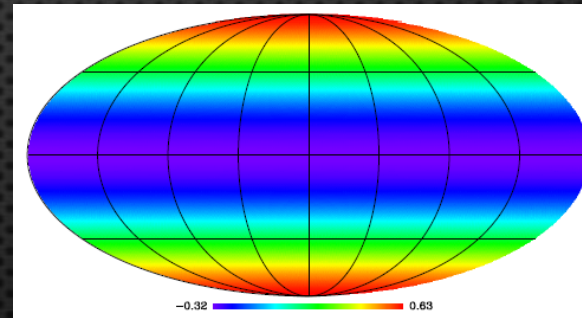
↓ ルジャンドル陪多項式



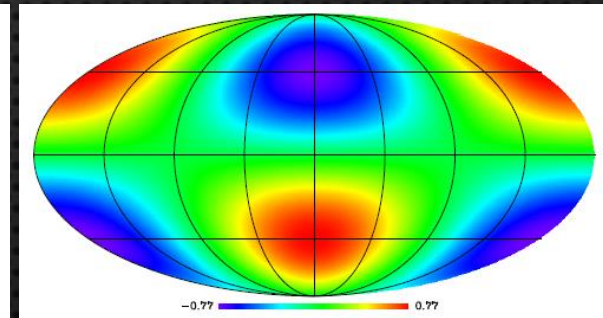
$\ell = 1, m = 0$



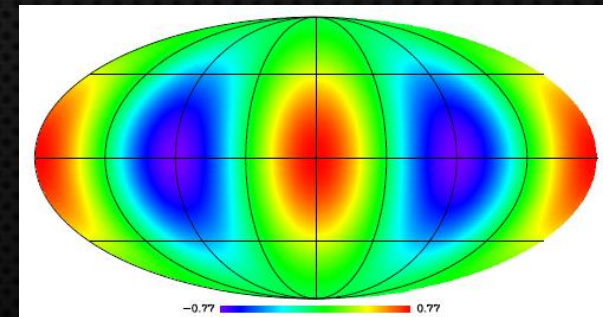
$\ell = 1, m = 1$



$\ell = 2, m = 0$



$\ell = 2, m = 1$



$\ell = 2, m = 2$  12

# パワースペクトル

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

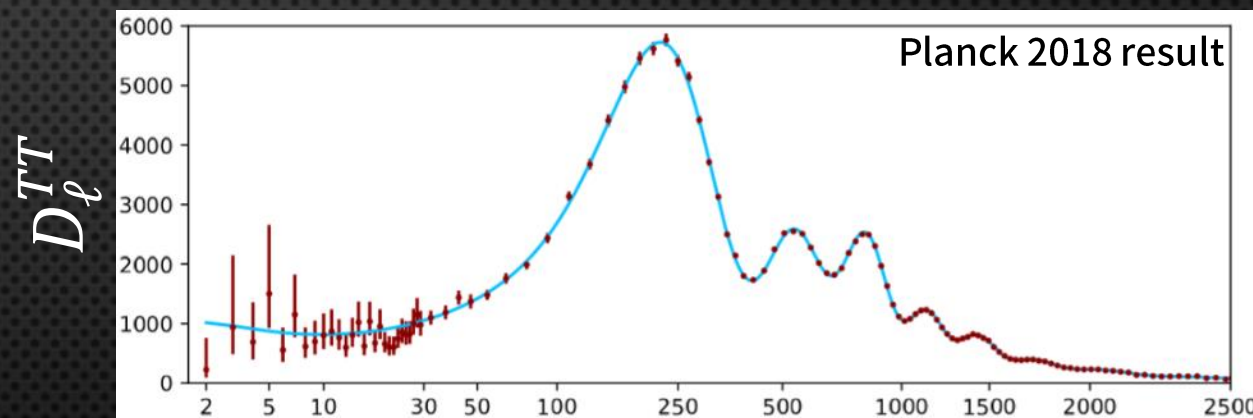
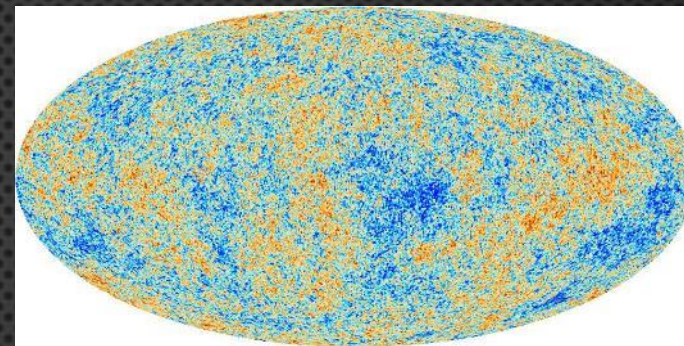
$$\iint d\theta d\phi Y_{\ell}^m Y_{\ell'}^{m'} = \delta_{mm'} \delta_{\ell\ell'} \quad Y \text{は正規直交基底}$$

$$a_{\ell m} = \iint d\theta d\phi \Delta T(\theta, \phi) Y_{\ell}^m(\theta, \phi)$$

異なる $m$ について和を取り、  
方向によらない値にする

$$\text{パワースペクトル} \quad C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} a_{\ell m}^*$$

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



multipole moment  $\ell$

これと理論モデルを比較してパラメータを得る。

※パワースペクトルには現れない2Dマップ上の統計情報も存在する。

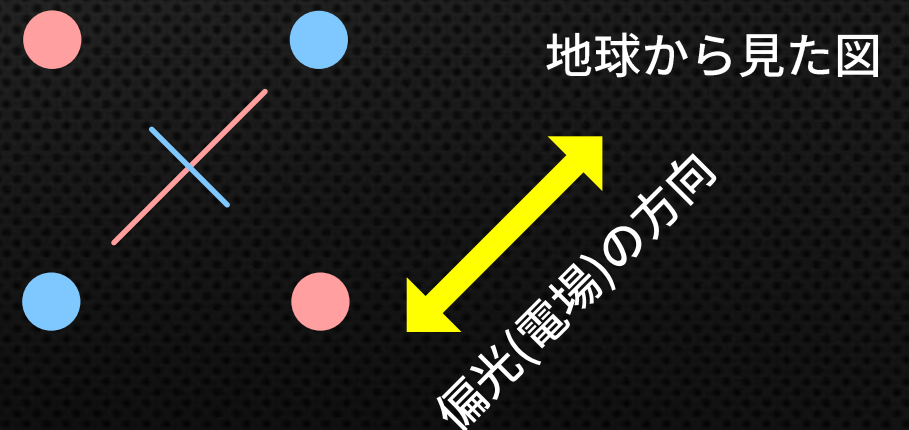
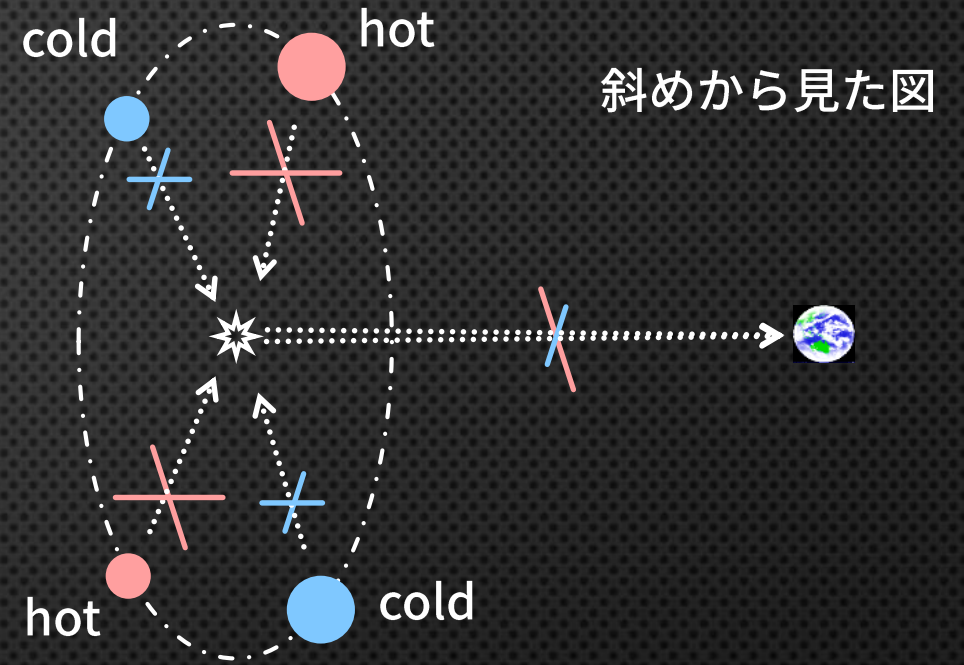
# CMBの中の偏光

ここまではCMBの全体強度(温度)の話。  
が、光には偏光がある。

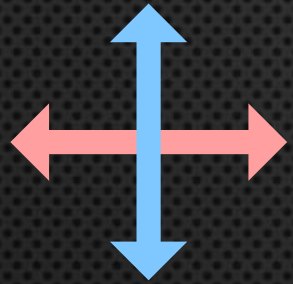
$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

強度  
直線偏光 (2成分)  
円偏光 (CMBでは通常考えない)

CMBもトムソン散乱により偏光する



# 偏光の分類



ストークスQ

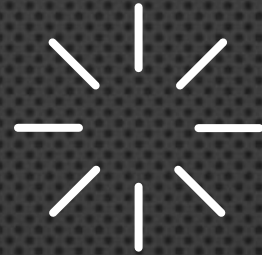


ストークスU

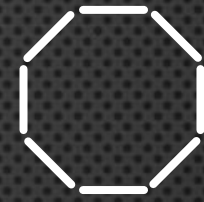
分かりやすいけど  
回転でQ-Uが入れ替わって、不便。

QとUを「混ぜ」て  
回転変換不変なパラメータEとBを作る。

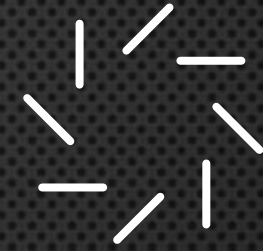
※正しい混ぜ方は宇宙論の教科書  
を読んでください



Eモード+



Eモード-



Bモード+



Bモード-

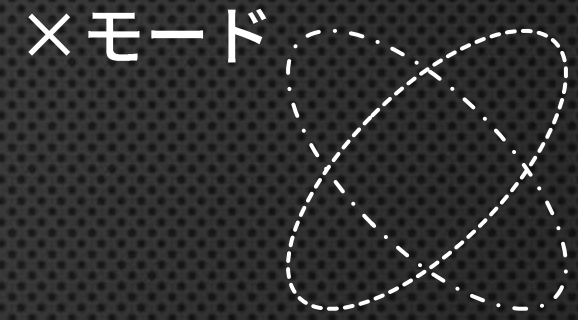
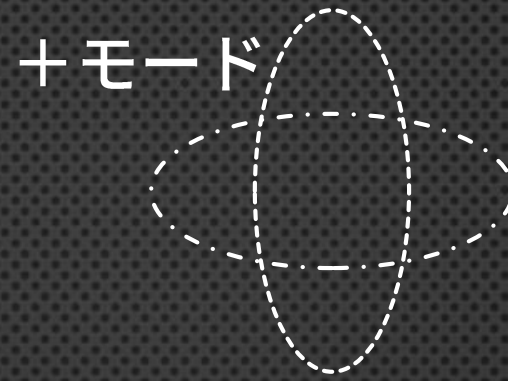
温度場  $T$  について

パワースペクトル  $C_\ell^{TT}$  を定義したように

偏光場  $E$  と  $B$  についても  $C_\ell^{EE}$ 、 $C_\ell^{BB}$  が  
定義できる。

ちなみに、 $C_\ell^{TE}$  は値をもつが、標準的なモデル  
では  $C_\ell^{TB}$  と  $C_\ell^{EB}$  は0。

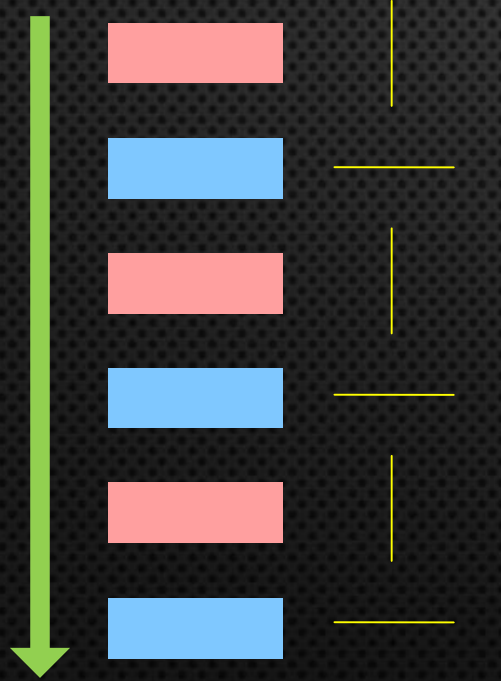
# 偏光の生まれるところ



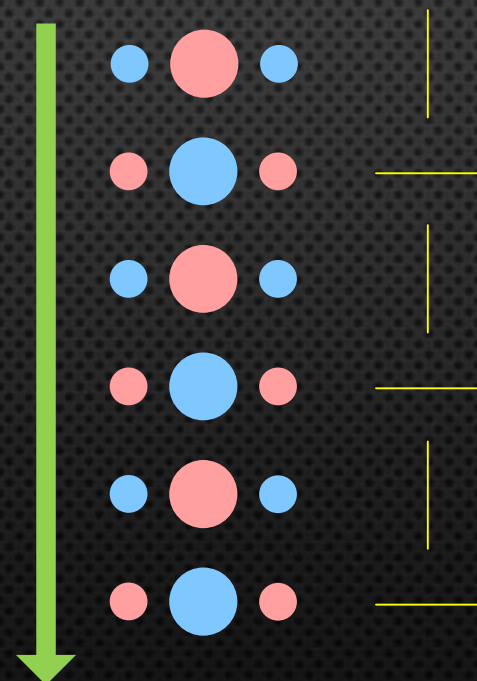
密度ゆらぎ (音波)

重力波

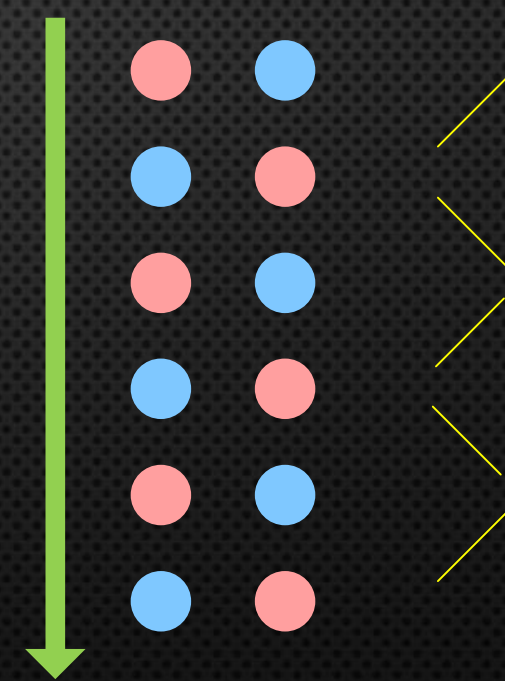
波の進行方向



Eモード



Eモード



Bモード

最終散乱面でBモードを作るのは(原始)重力波だけ



# インフレーションとBモード

未知の物理



宇宙初期の  
インフレーション

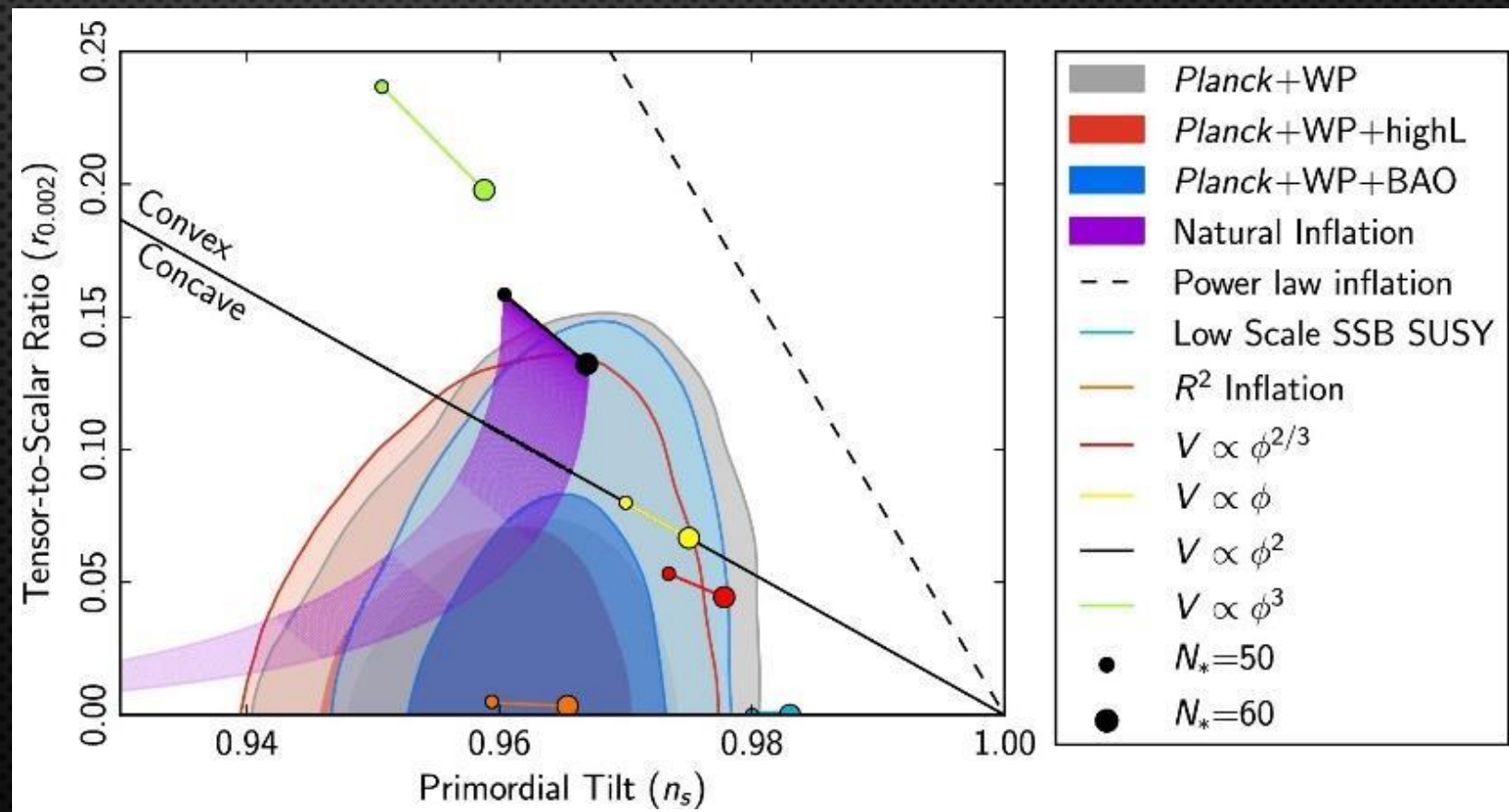


原始重力波  
(テンソル-スカラー比)



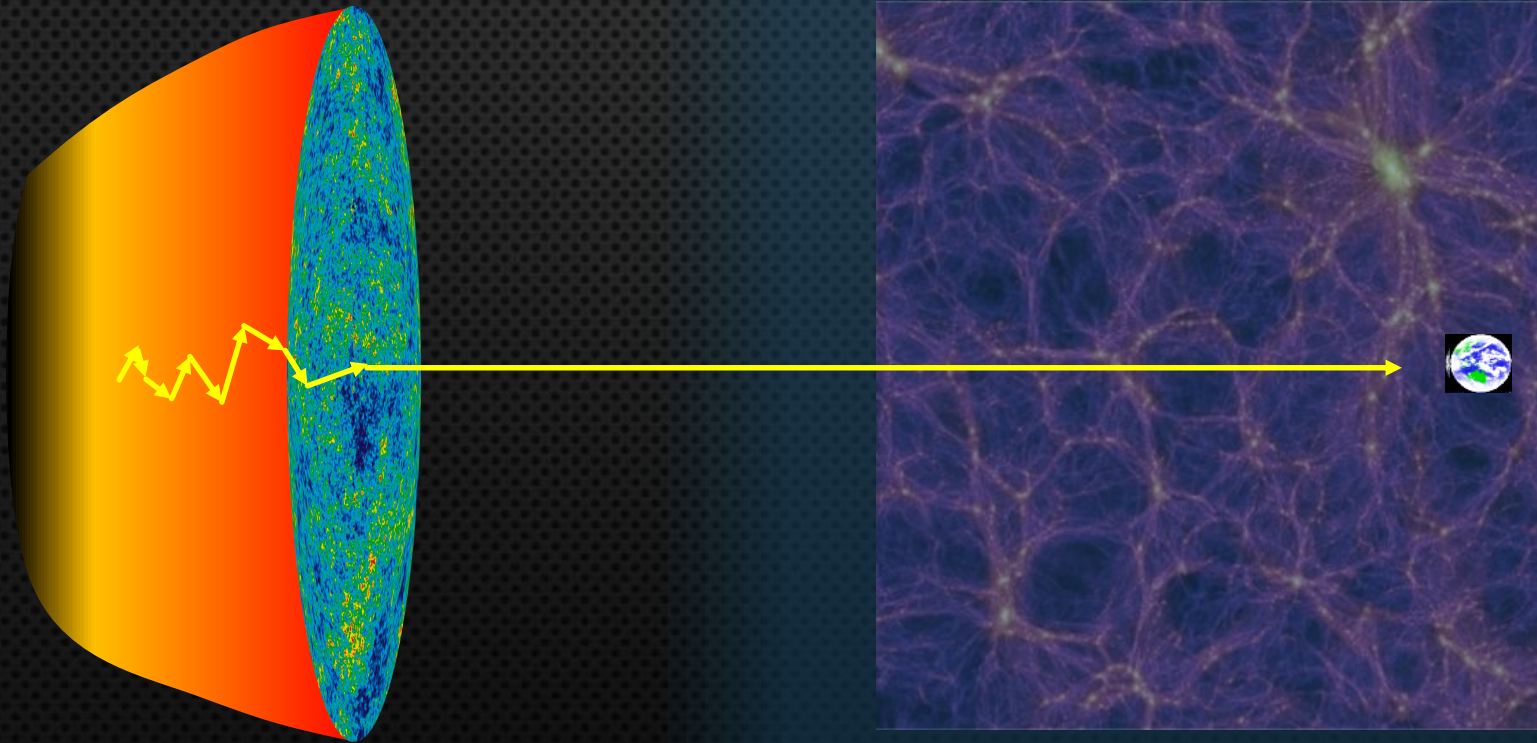
Bモード偏光

測定された $r$ の値からインフレーションの条件に制限を与えることができる！



# CMB、宇宙を駆ける

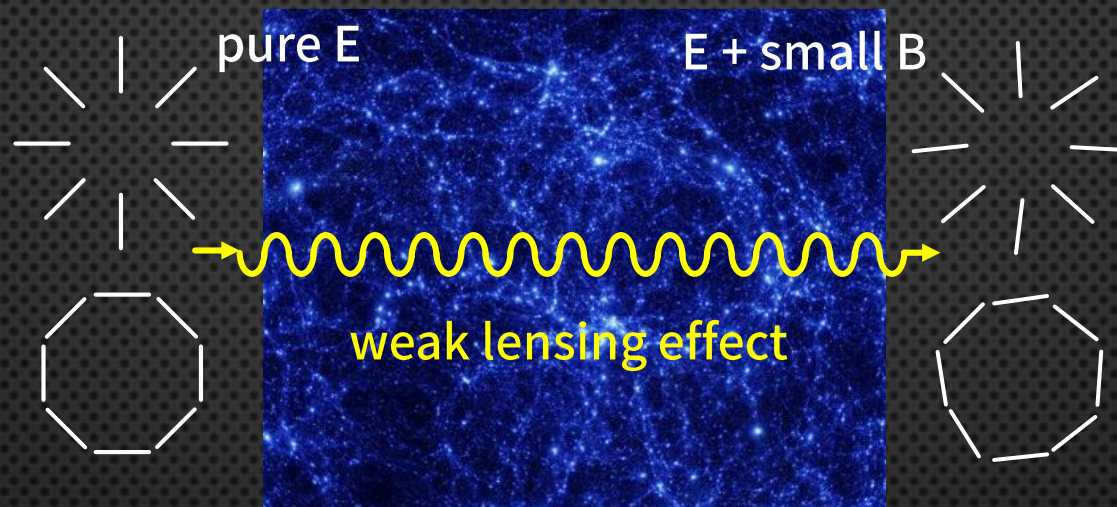
光子は最終散乱面を離れた後も途中の実体に影響を受ける。  
そこから別の種類の情報もひきだすことができる。



- 再電離した電子の散乱  
宇宙の光学的厚さ( $\tau$ )
- 大規模構造の重力レンズ効果  
ニュートリノ質量
- 銀河団内のガスによるSZ効果  
ダークエネルギー

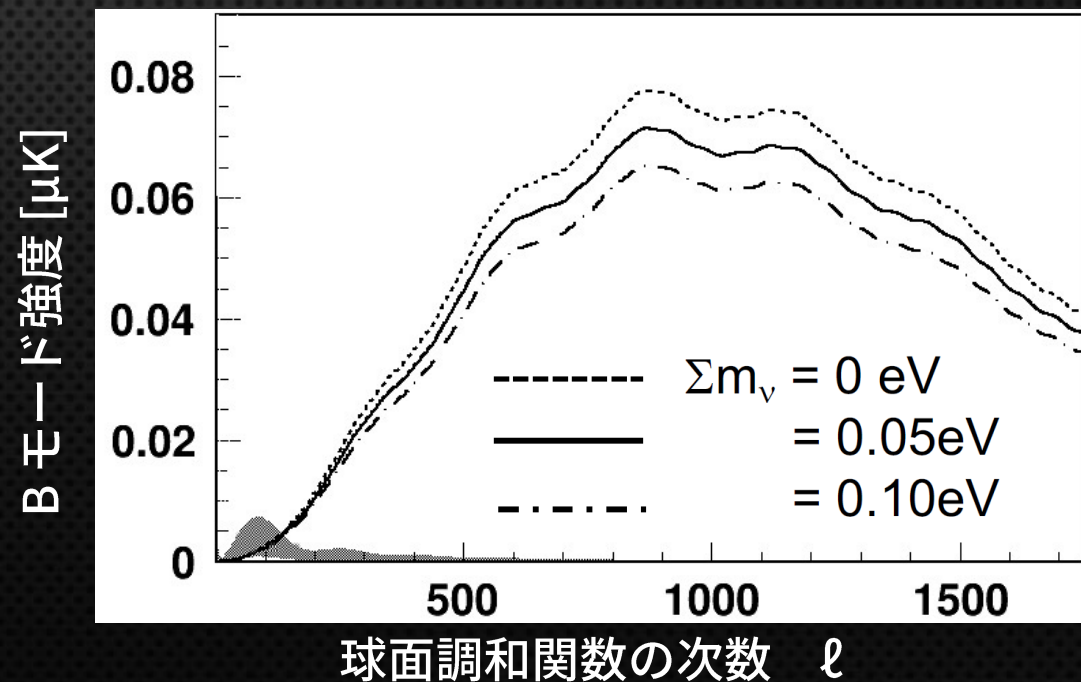
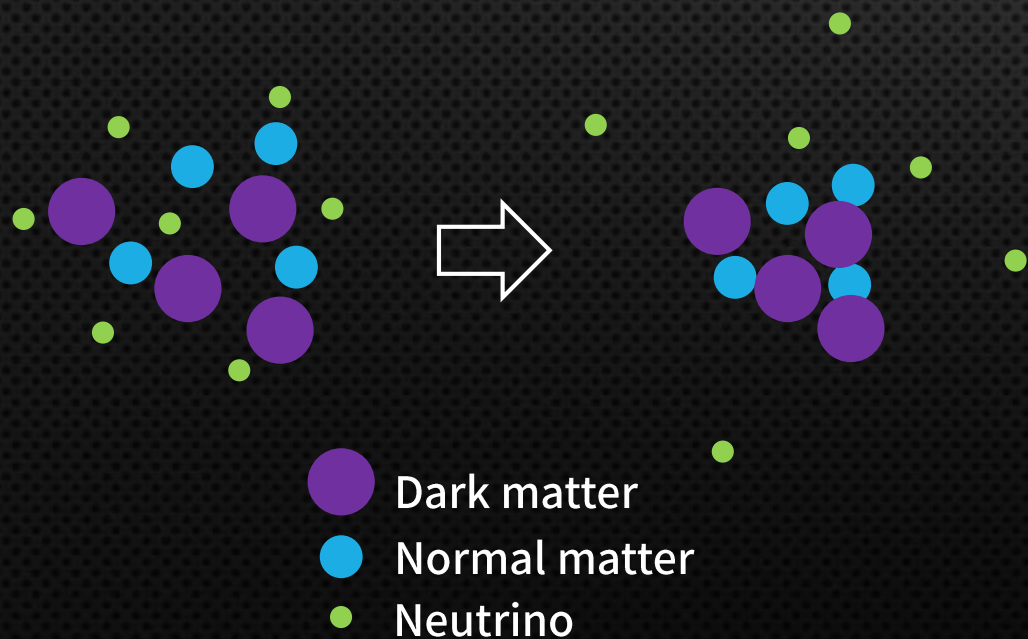
# CMBとニュートリノ質量

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。

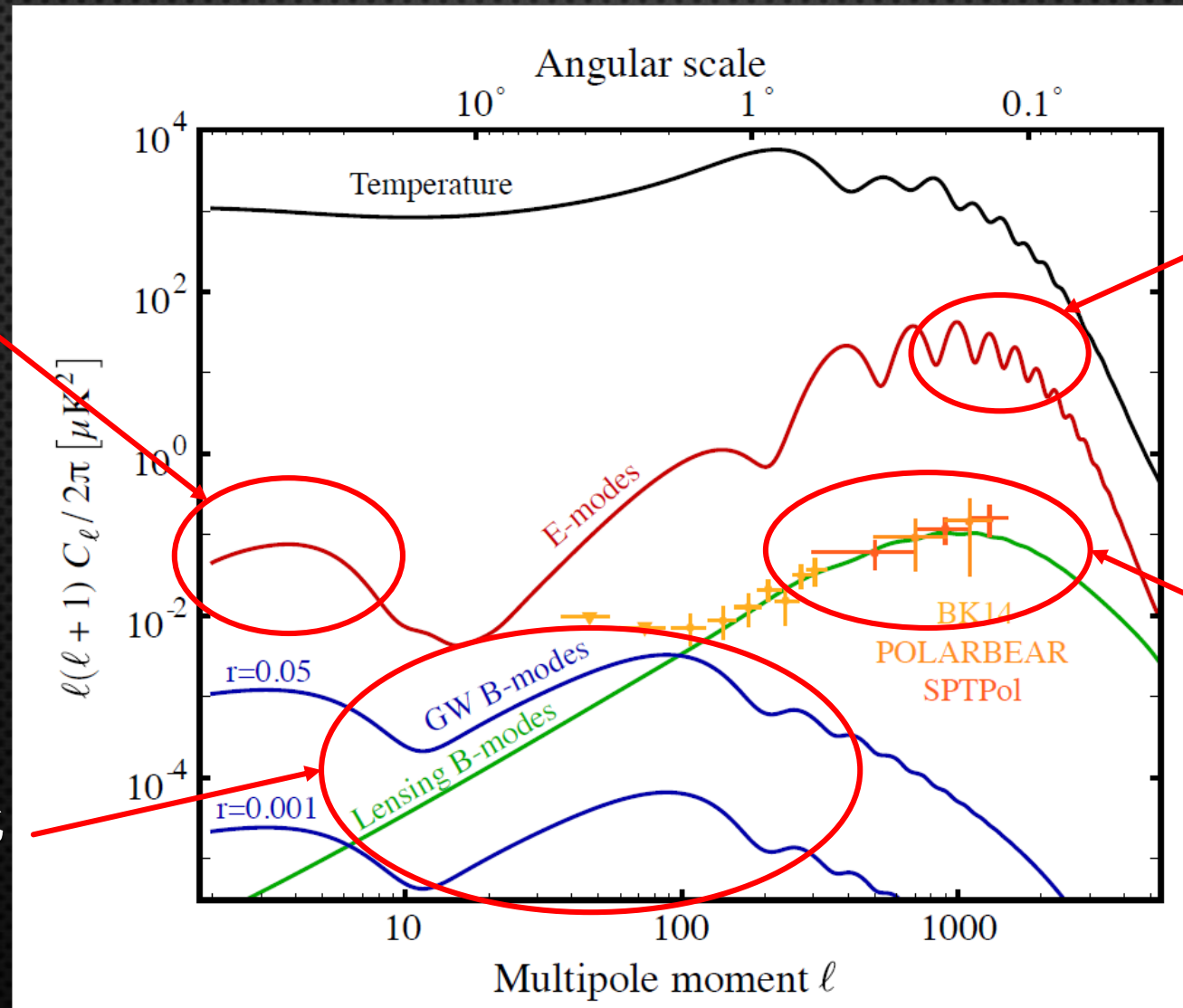
$\Omega_m h^2$  との縮退があり、別の測定(銀河サーベイ, BAO)と組み合わせて解く必要。



# CMB 偏光観測で近年期待される新結果

very low- $\ell$  Eモード  
光学的厚さ“ $\tau$ ”

low- $\ell$  Bモード  
テンソル-スカラー比  
“ $r$ ”



high- $\ell$  Eモード  
軽いレリク粒子  
の世代数“ $N_{\text{eff}}$ ”

high- $\ell$  Bモード  
ニュートリノ質量3  
世代の和“ $\Sigma m_\nu$ ”

# CMB観測ギョーカイの近況

# CMB観測の種類

## 衛星

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

## 気球

- 大気の影響を除くには安価
- × 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

地上実験は大気(水蒸気)の影響を抑えるため  
高地・乾燥した場所

## 南極点

BICEP/Keck, SPT

## 南米 チリ

ACT, POLARBEAR, CLASS(準備中)

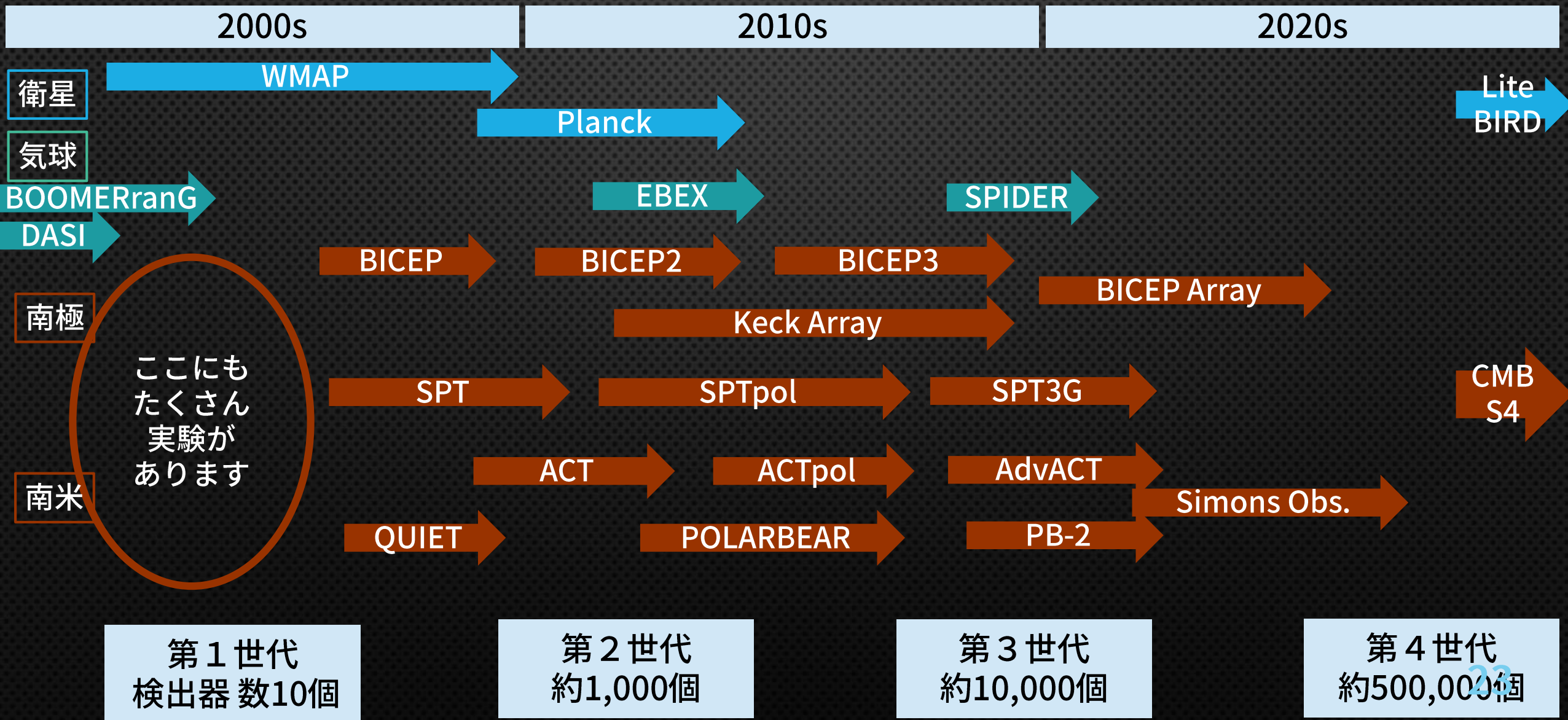
## カナリア諸島

QUIJOTE, GroundBIRD (準備中)



# 各実験の進行状況

全部は把握できていませんがご了承ください。



# 望遠鏡サイズと観測周波数

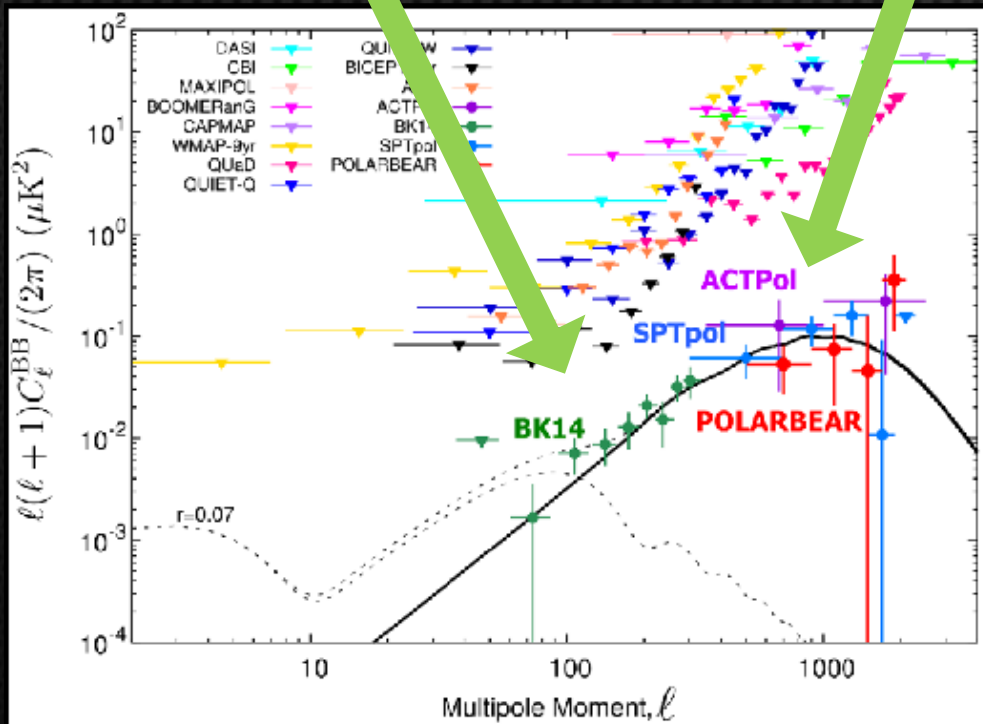


大きい望遠鏡は解像度は良いが、視野が狭く広い範囲を観測すると環境や機器自身のゆらぎの影響が大きい。

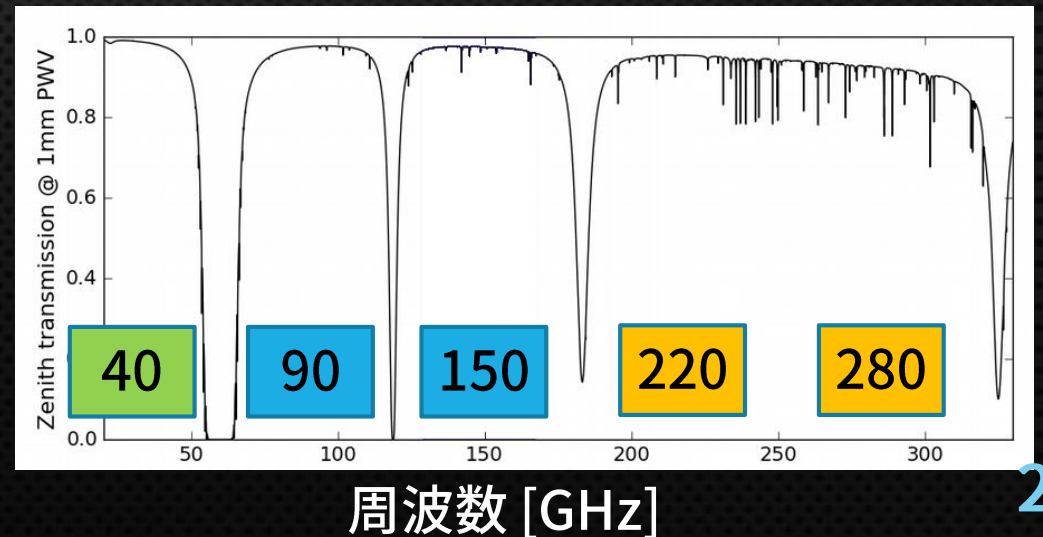
小さい望遠鏡は広い範囲でゆらぎの影響が小さいが、解像度が悪いので細かい構造は見えない。

CMB信号が強い周波数はだいたい 70~200 GHzの範囲  
 以下ではシンクロトン放射  
 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、観測可能な帯域が限られる。



アタカマの例  
透過率





# 冷たくなければならない

CMBの偏光は微弱

装置からの熱放射を下げる

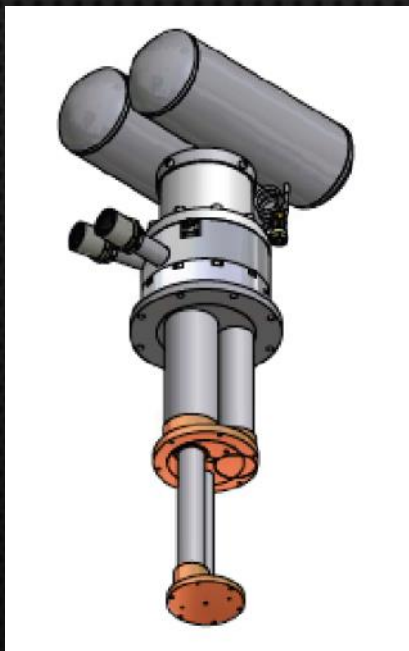
高感度な超電導センサー

低ノイズな読み出し

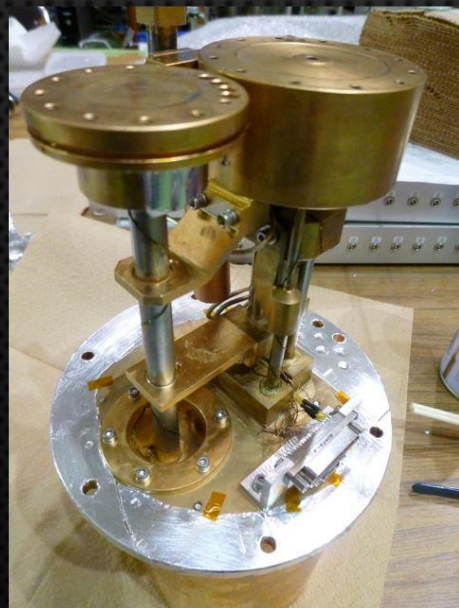
装置を冷却する必要がある！

近頃の地上実験は

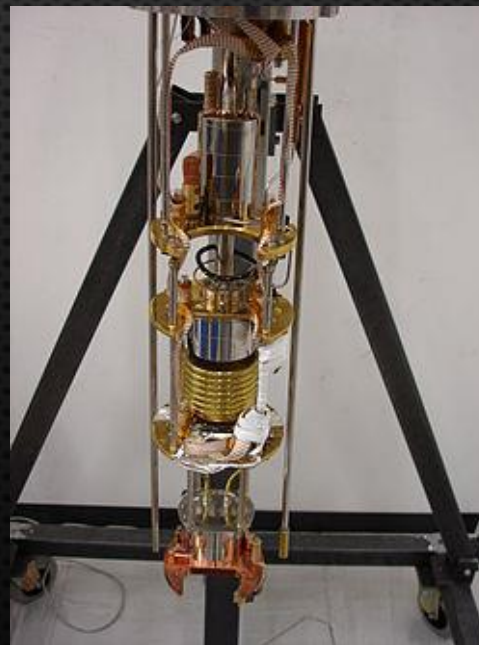
受信機内壁・レンズ  
パルス管冷凍機で 4 K



センサー部分は  
ヘリウム吸着冷凍機で  
0.3K



次世代実験ではヘリウム希釈  
冷凍機で 0.1K、内壁も1K

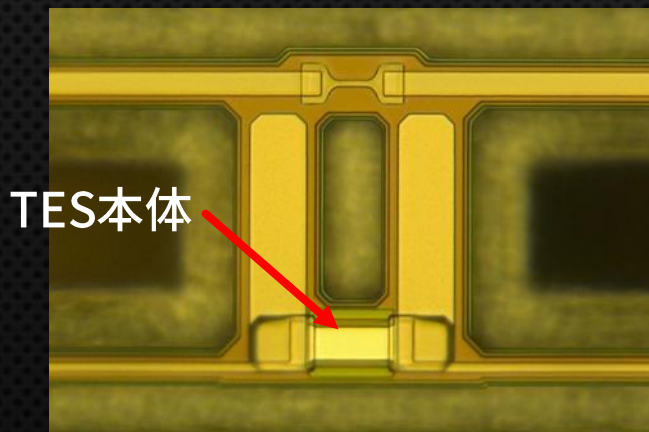
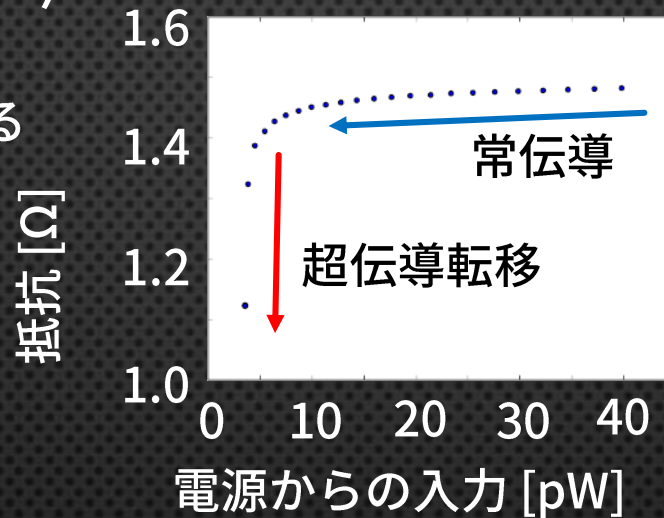
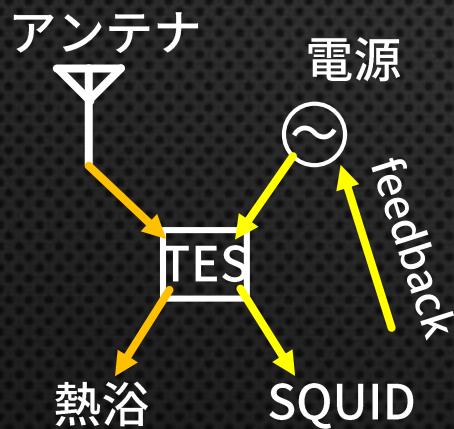


しかし、  
低温では色々  
困難がつきまとう

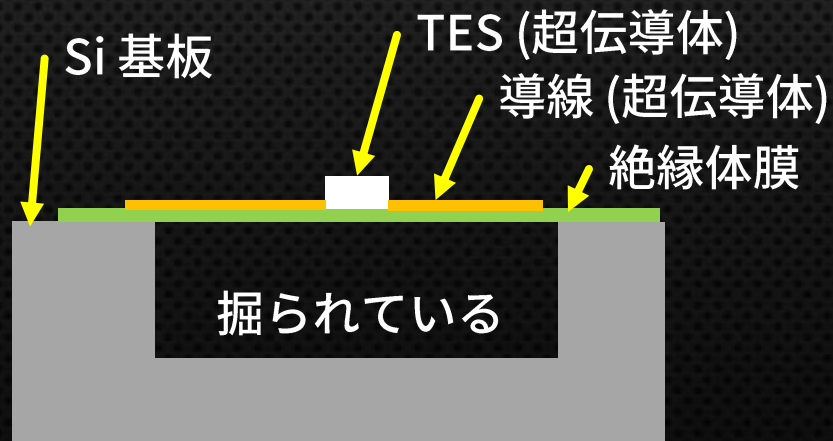
# CMB実験技術の例 1 検出素子

## Transition Edge Sensor (TES)

2000年代以降主流の検出器  
超伝導転移の急激な抵抗変化を利用する



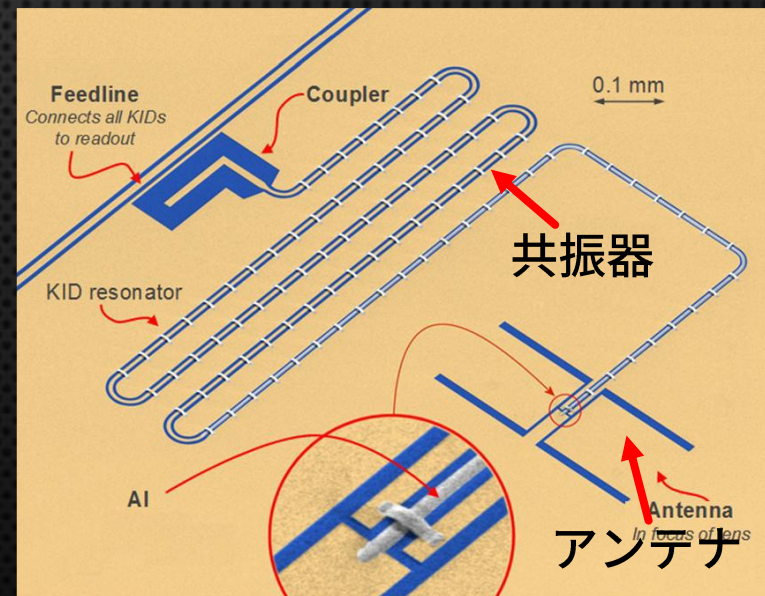
TES 顕微鏡写真



断面イメージ図

## Kinetic Inductance Detector (KID)

次世代実験に向け開発が盛ん  
入射エネルギーでクーパー対が壊れ、Lが変化するのを利用



超伝導体

KID image by SRON

## CMB実験技術の例 2 変調

高精度な測定の敵はノイズ



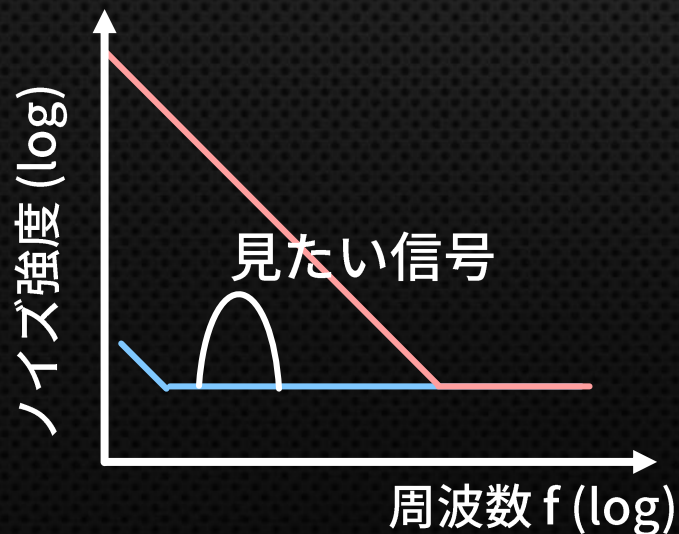
特に原始重力波Bモードは大きいパターン (時間的变化が緩い)



大気や装置自身のゆらぎからくる  $1/f$  ノイズを抑える必要がある



信号を変調しノイズから救い出す



### 回転半波長板

半波長板は直線偏光をある軸に対し反転する働き。半波長板自体を回転させ入射する偏光を回転させる。



### 高速スキャン

空間的に変化が緩くても速度が早ければ時間的変動は鋭くなる。GroundBIRDは望遠鏡自体が高速(20rpm)でグルグル回転する。



# CMB実験技術の例 3 反射防止

レンズ・半波長板など透過型の光学素子は表面での反射が問題になる。

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

- 対策
- 中間の屈折率の物質を境界に挿入する
  - 反射波が弱め合う条件に調節する

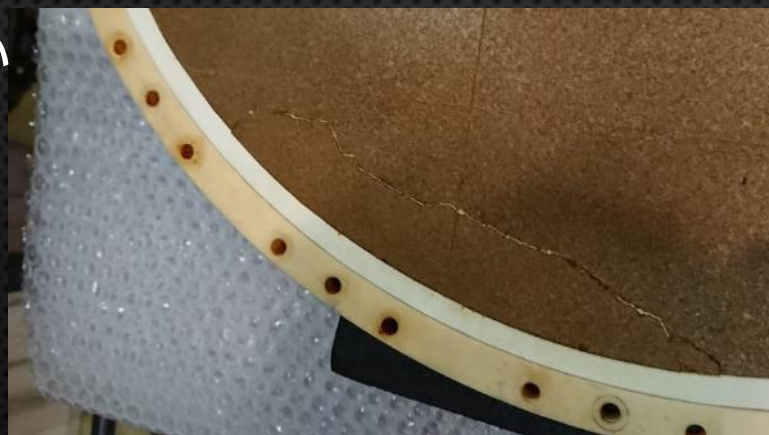
## 反射防止膜を貼り付ける

### 条件

ミリ波の透過率が良い  
極低温で使用可能

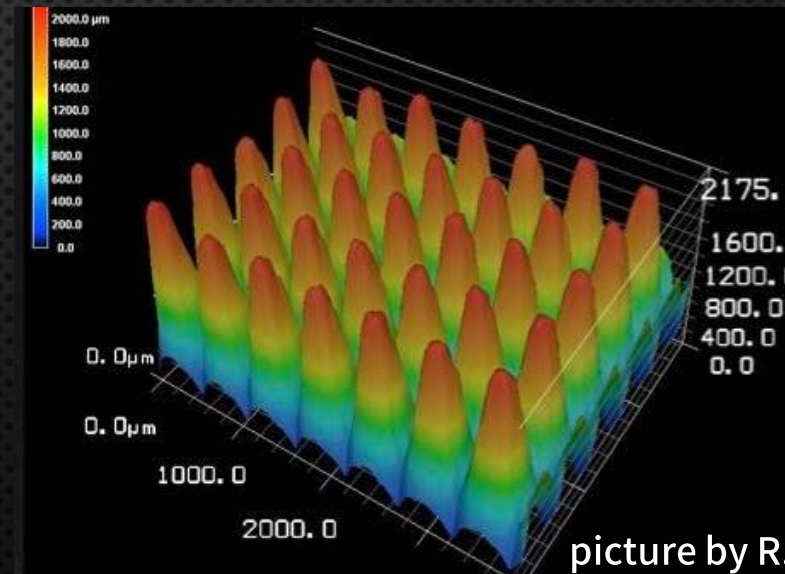
### 材料

スタイキャスト  
ポリイミド  
テフロン  
など



母材との熱膨張係数の差により壊れるので、切れ目を入れ応力を軽減する。

## 反射防止効果のある層を加工で作る



picture by R. Takaku

LiteBIRDではレーザー加工でトゲ状の反射防止構造を開発している。

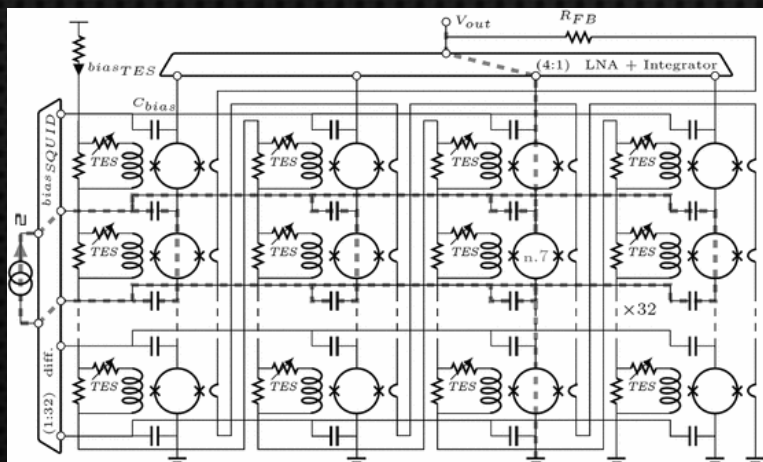
# CMB実験技術の例 4 読み出し多重化

極低温の検出器を冷却する冷凍機は冷却パワーは小さい ( $\mu\text{W}$ オーダー)

→ 熱流入を減らすためチャンネルを多重化してケーブル本数を減らす

## 時間方向多重化

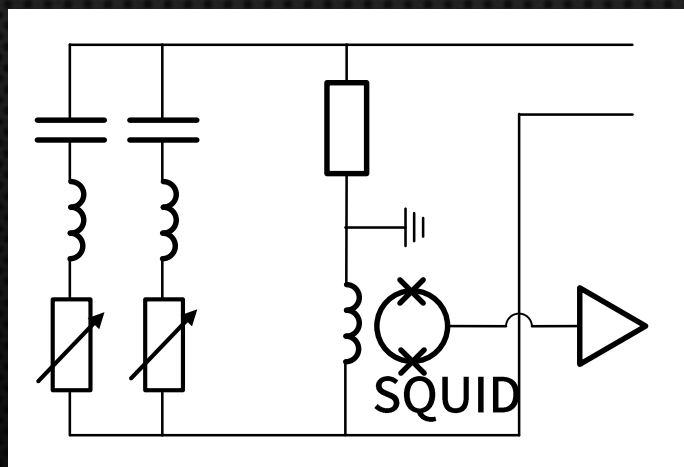
時間的に読み出しチャンネルを切り替え  
ACT, BICEPなどが採用



## 周波数多重化

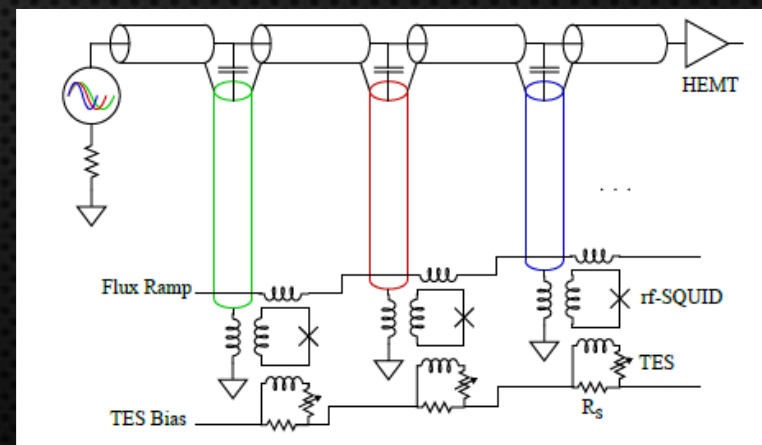
fMUX

異なるACをまとめて入力、読み出しを行う。  
EBEX, SPTなどが採用



$\mu$ MUX

マイクロ波回路 (GHzオーダー)  
従来より高い多重度が期待 開発進む



# POLARBEAR 実験の紹介

# POLARBEAR (PB) 実験

アメリカ (UCバークレー・サンディエゴ)  
日本 (KEK, IPMU) など、8カ国100人超が参加。



2019年7月に開かれたコラボレーションミーティング

観測に適したチリのアタカマ高地で観測

PB-1での観測は2012年から  
重力レンズBモードの検出に成功！

最新データではインフレーション領域  
の解析結果。乞うご期待！

より高性能なPB-2型受信器3台による  
Simons Array へのアップグレードが現地で進行中



チリ・アタカマの実験現場

# どうやって行く？

日本から飛行機  
乗り換え2回  
所要時間丸2日

最寄りの大都市からはバスで2時間  
サンペドロ・デ・アタカマに滞在  
毎日小型トラックで現地往復

トコ山頂近くの高原地帯  
(チャナトル高原の一部)  
近くには他のCMB実験





# オアシスの町サンペドロ

周囲は荒涼とした風景、まばらに植物



日干しレンガ、平屋建ての町並み



お土産屋通り  
観光客は多い



町中心の広場には活気があふれる

レストランは充実、高いけど



町じゅうに犬

# 現地での暮らし



ホテルは日干しレンガの建物  
ベッドとシャワー室の質素な部屋



ホテルには猫もいる



4WDのトラックに荷物を載せ通勤



食事は出るが自炊も可



町中には小さいお店やスーパー多数 **34**

# アタカマの生き物



←リャマ(家畜)  
野生で近縁の  
ビクーニャも

ビスカーシャ→  
ウサギに似ている  
がネズミに近い種



キツネ →  
人に慣れていて  
車に近づいてくる



← フラミンゴ  
湖ではたくさん見  
られる



# POLARBEARサイト

望遠鏡とコンテナ  
晴れていると空の色が濃い



雪がときどき降る  
こうなるとかなり厄介



トコ山頂を望む

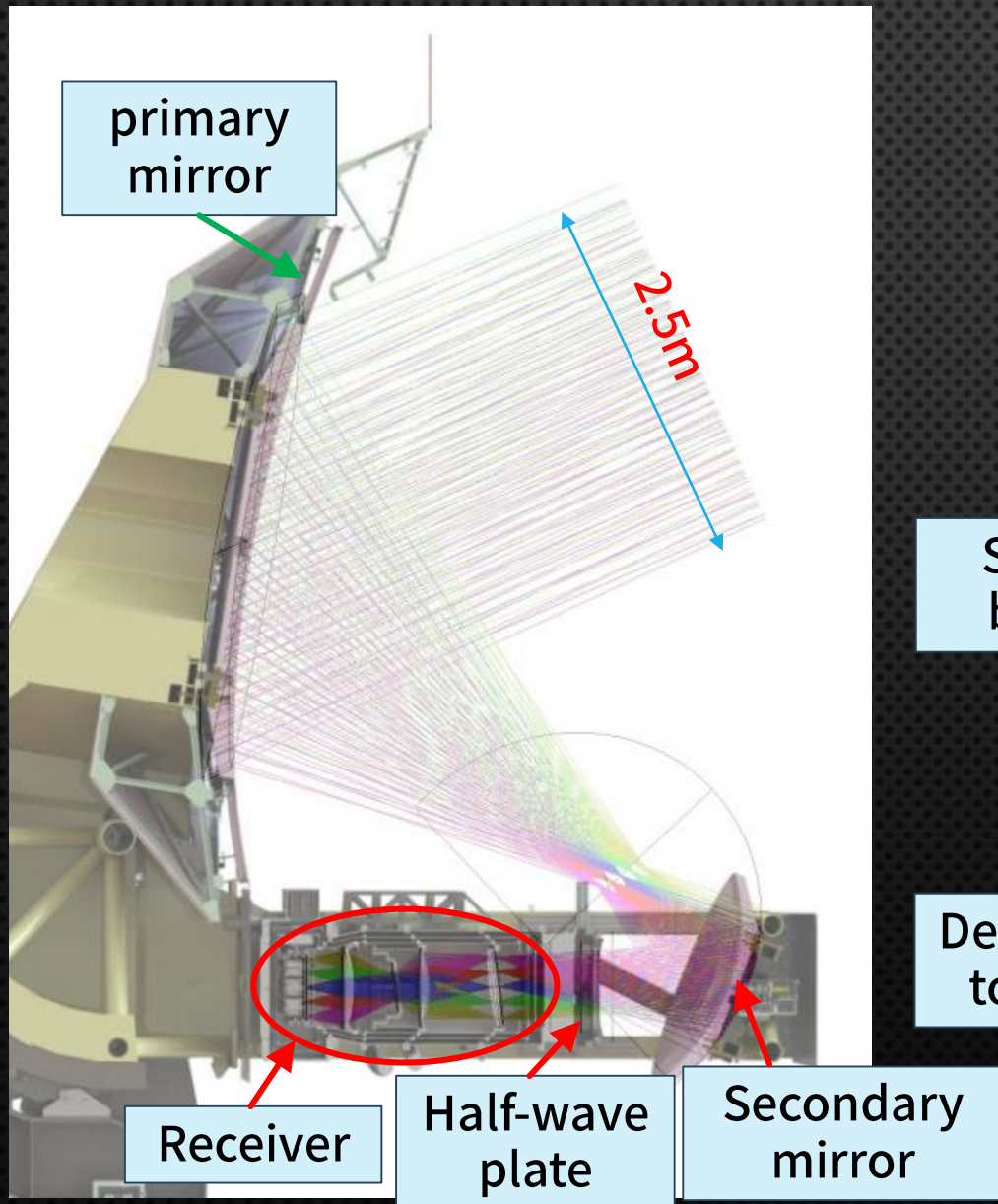


となりのACT 徒歩3分



気圧は地上の半分  
酸素ポンプが必要

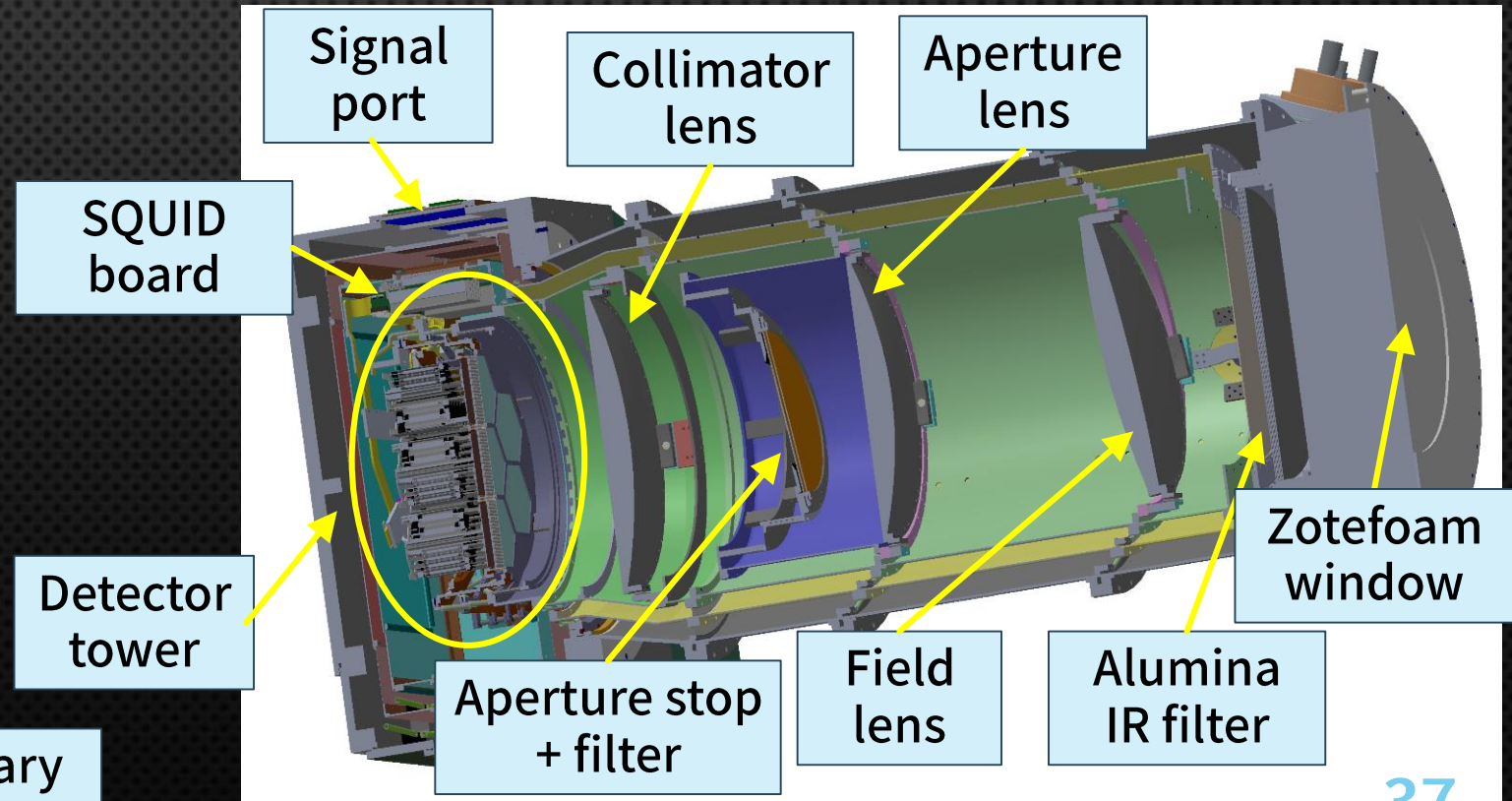
# PB-2A の光学系



○ Huan Tran Telescope  
主鏡直径 2.5m の off-axis Dragone 型 望遠鏡

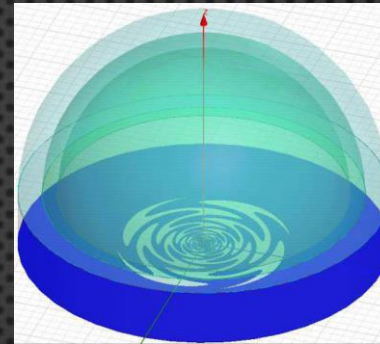
○ 受信機の窓前に回転半波長板を装備

○ 受信器の窓直径は50cm、3枚のアルミナレンズ

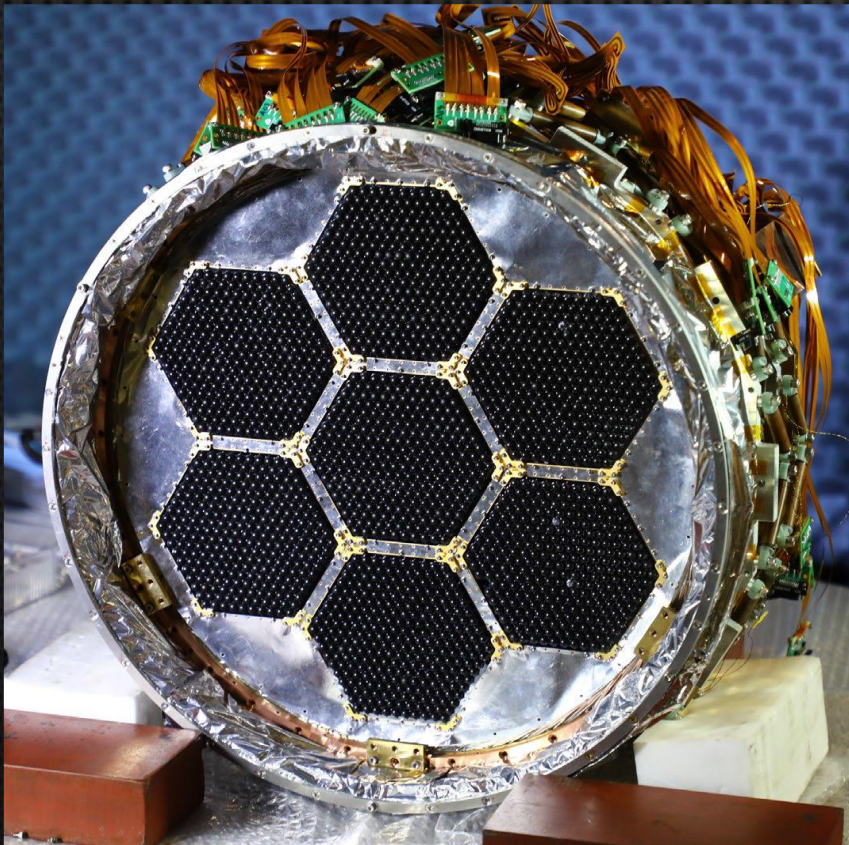


# PB-2A のセンサー

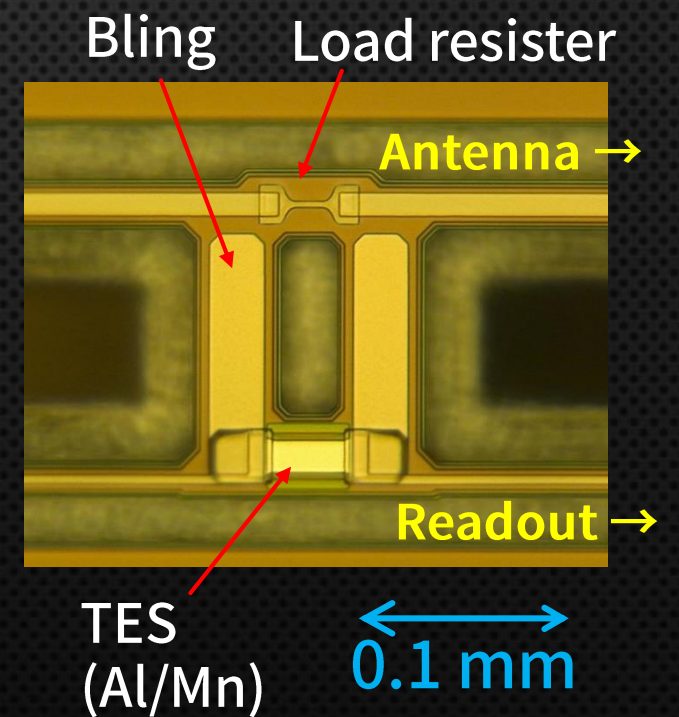
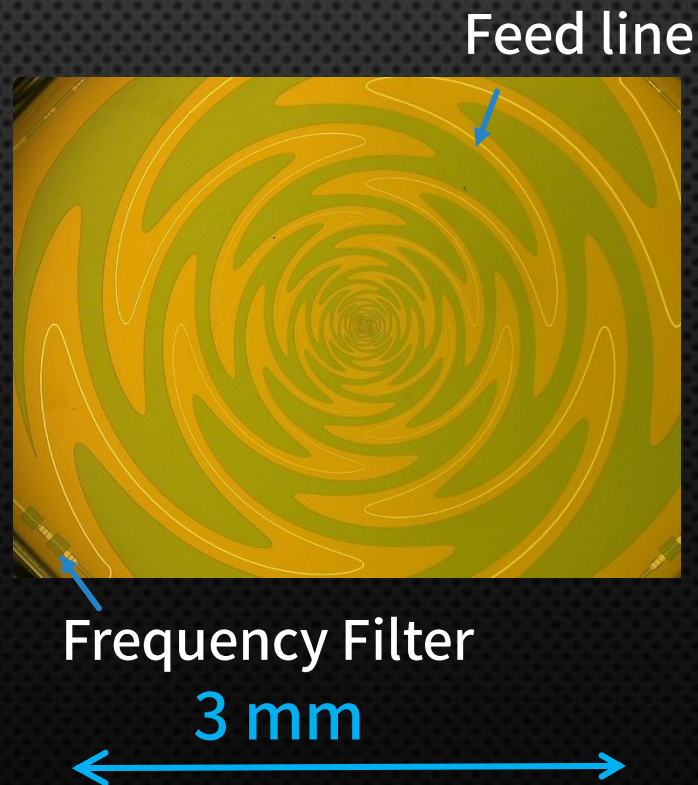
- 超伝導転移端センサー、TESを採用
- 90GHzと150GHzを計7588個のTESを搭載
- 広帯域なシニアスアンテナを採用



シリコンレンズレットで  
光学系とアンテナを結合

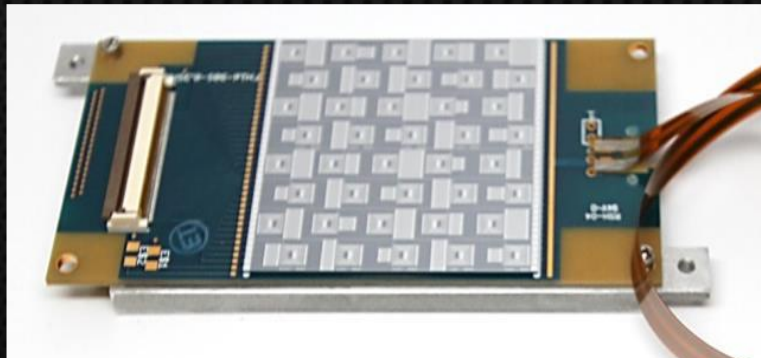
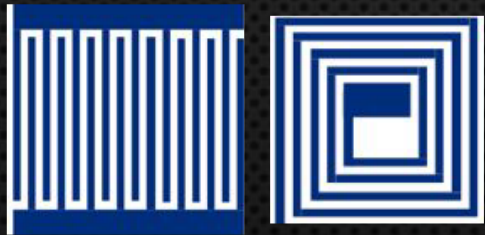


フル装備された焦点面検出器構造体

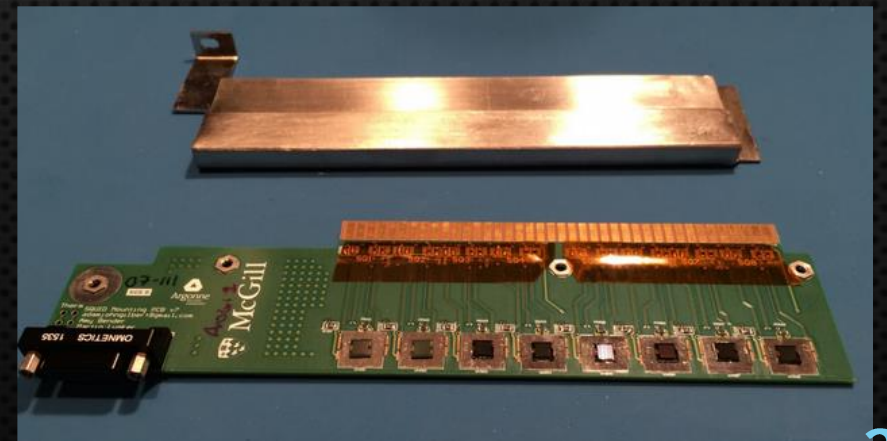
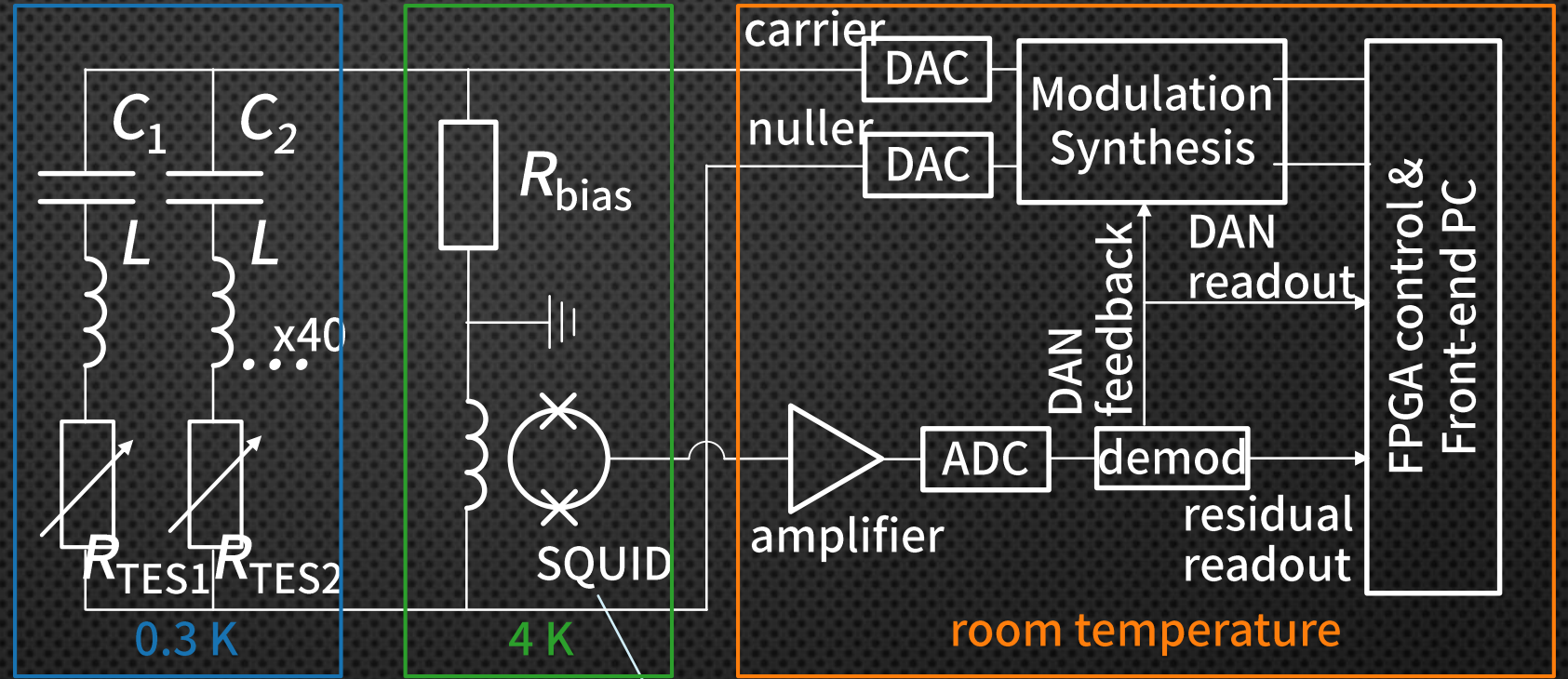


# PB-2A の読み出し

POLARBEAR-2では  
周波数多重化読み出しを  
採用、40チャンネルを  
1個のSQUID回路で読む



LC 回路  
超伝導マイクロ線路で  
LとCが実装されている  
LC周波数1~4 MHz



4K ステージに置かれる SQUID 基板

# チリまでの輸送

2018年夏、実験室  
試験は終了

受信機の光学部品は  
バラバラに分解



← 衝撃吸収バネ付きの  
特殊パレットを使用した  
(運送会社の特許)

2018年10月、つくばからの  
出発を見送る





# 現地での組み立て

3週間で無事に現地まで到達。  
現地での受信機組み立ても無事に完了。



到着したばかりの木箱



組み立て作業のようす

# 望遠鏡への取り付け

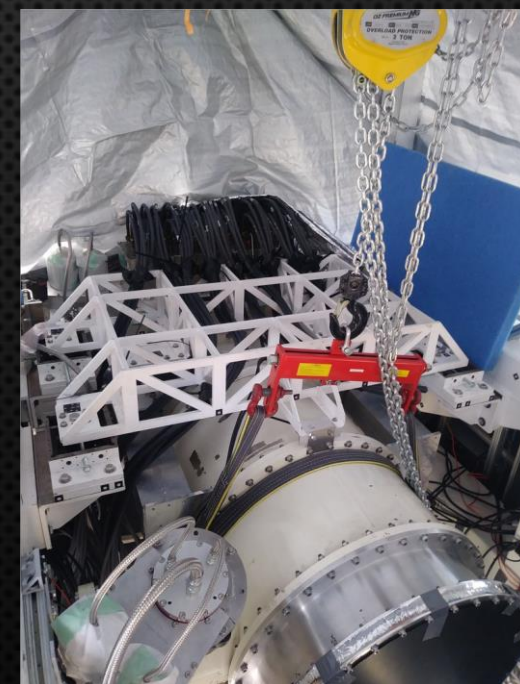
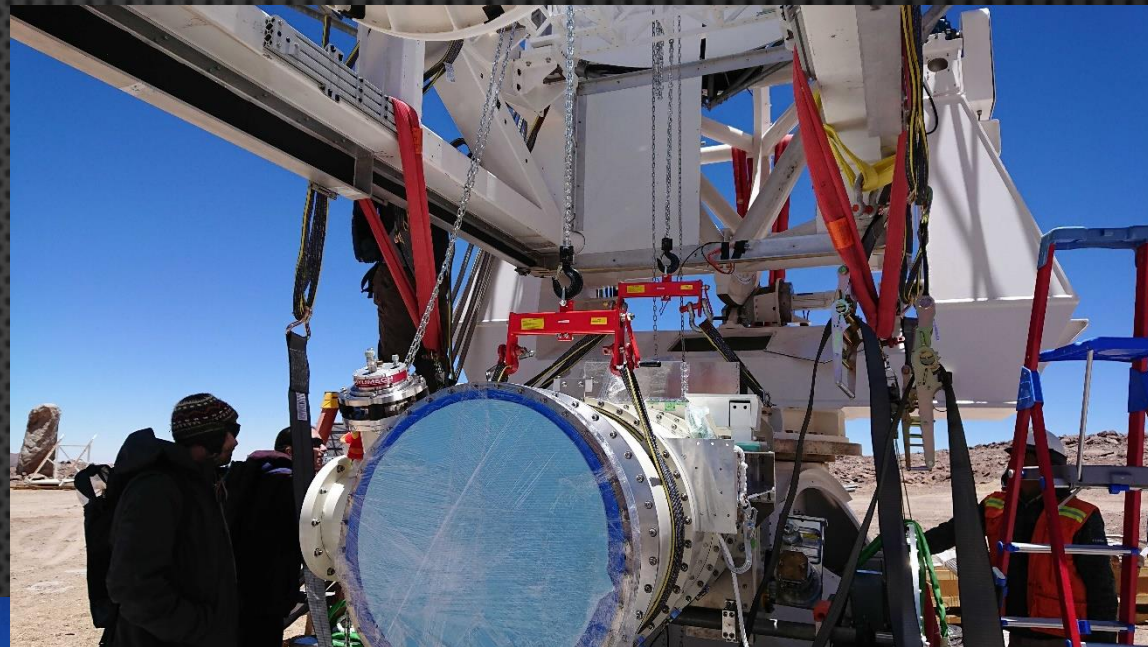
取り付け作業専用の  
構造体を取り付ける



輸送のためユニック  
をチャーターした



ホイスト作業は  
人力、数時間か  
け慎重にやる→

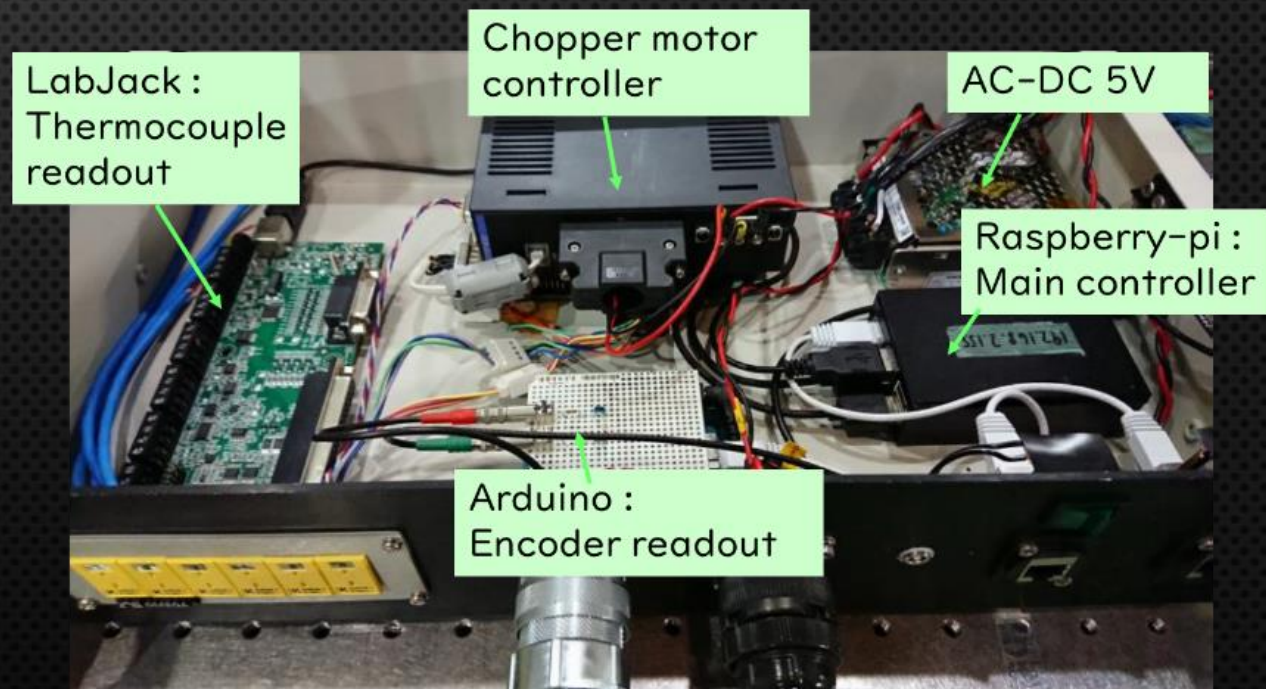
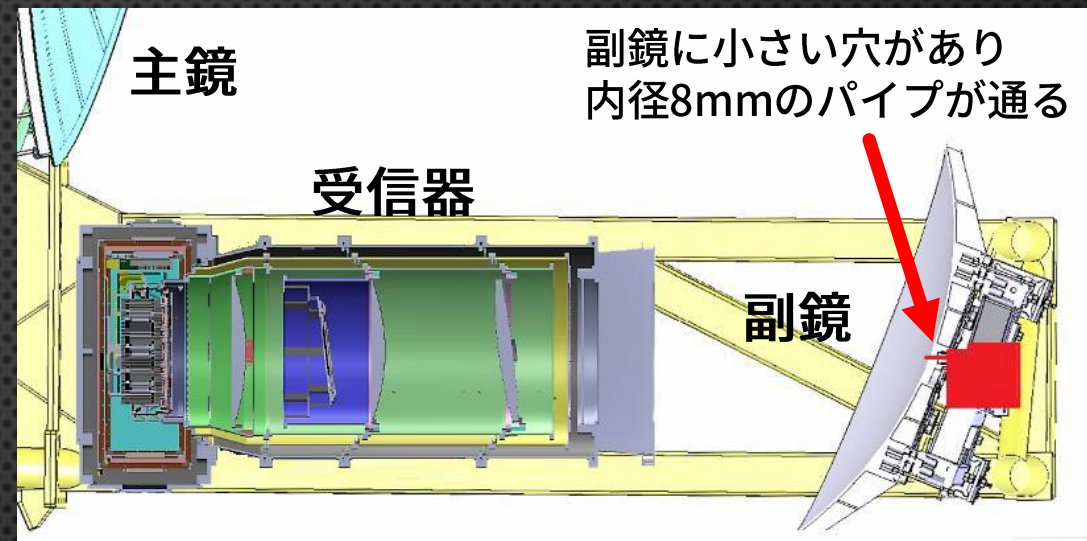


←上側  
取り付け  
部分

# 仕事のじまん：校正光源

望遠鏡に恒久的に搭載して、物理観測中に定期的に使用する校正装置、スティミュレーターの設計、製造、現地の据え付けを担当した。

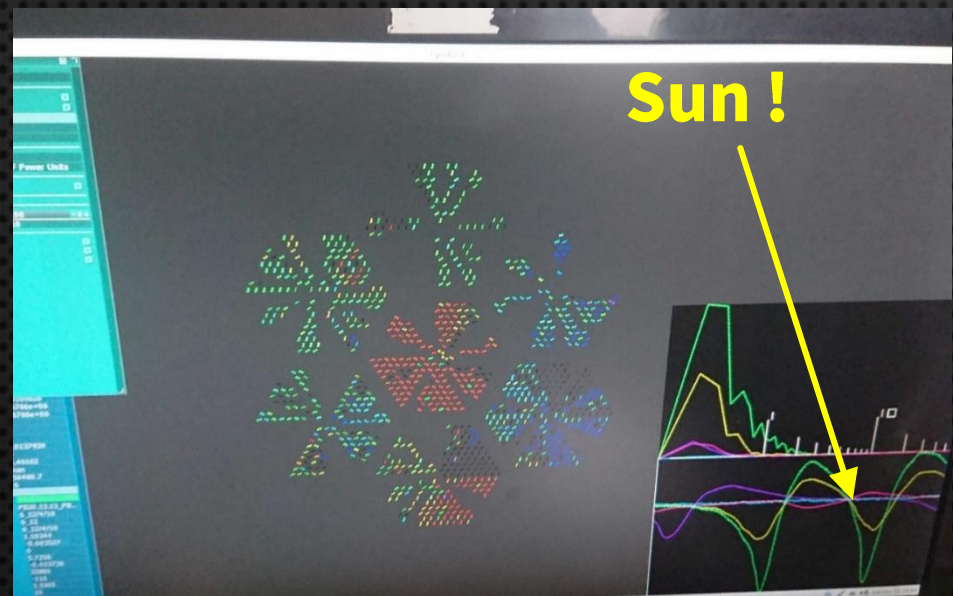
要求性能を達成していることは現地の実際のデータで確認済み。



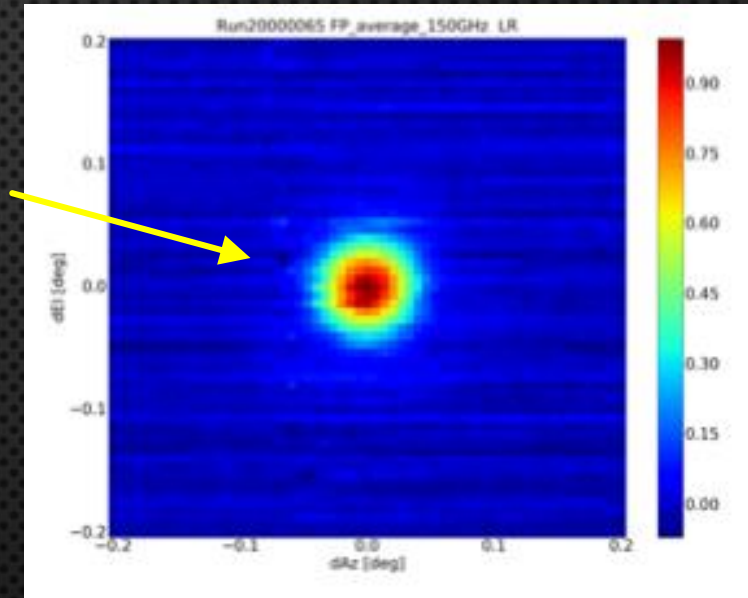
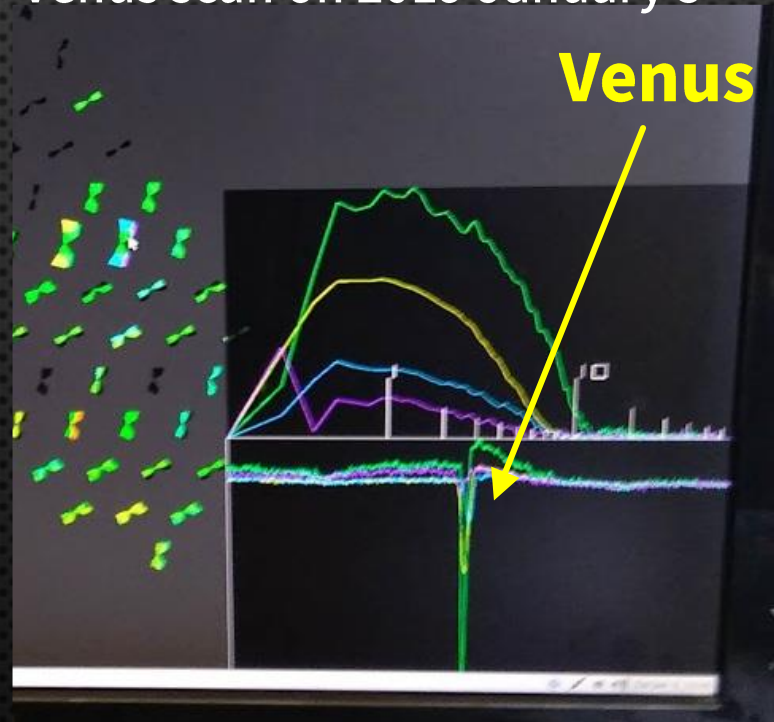
# 試験運転が開始

一通りのシステムが完成し観測ができるようになったのは2018年の年末。

Sun scan on 2018 December 30



Venus scan on 2019 January 5

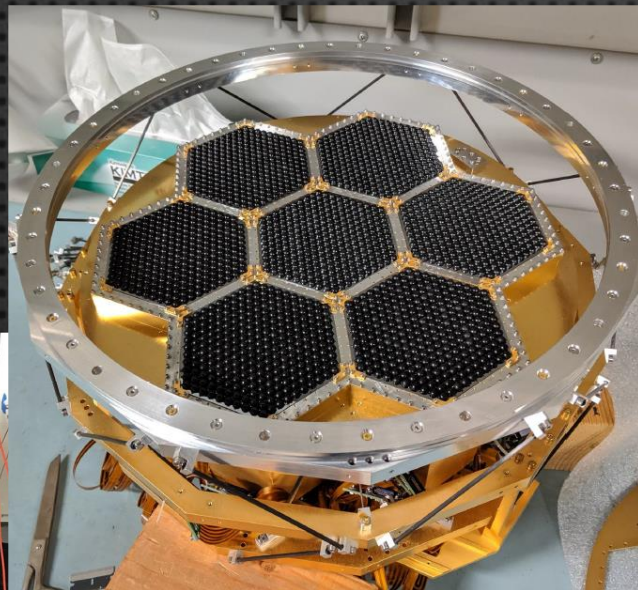


ファーストライト達成！

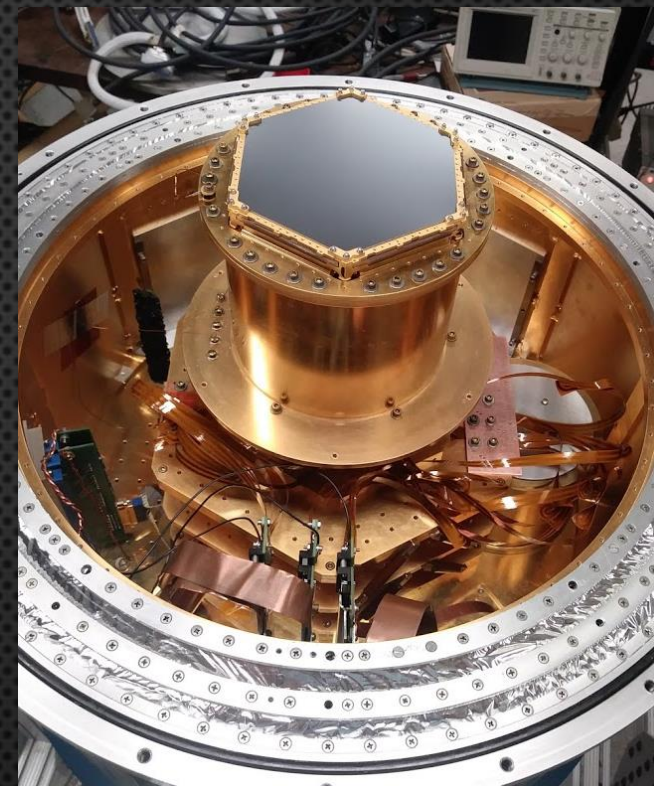
2019年7月現在、コミッショニング作業が続いている。

# PB-2B, C と予想性能

PB-2B は UCSD で  
試験中



PB-2C は周波  
数が異なる、  
検出器のテス  
トを行っている  
ところ。



3台の予想性能で3年間観測した場合  
インフレーション：  
 $\sigma(r=0.1) = 0.006$   
ニュートリノ：  
 $\sigma(\Sigma m_\nu) = 40 \text{ meV (w/ DESI)}$

# まとめ

CMBは初期宇宙探索の重要な情報源

まだまだ多くの未解明情報が引き出せると期待

Bモード偏光検出が現状の最前線、多くの実験が競い合う

最新の実験には特殊な技術が必要、技術開発が活発に行われている

POLARBEARはチリで観測する国際実験、POLARBEAR-2の観測が間もなく開始