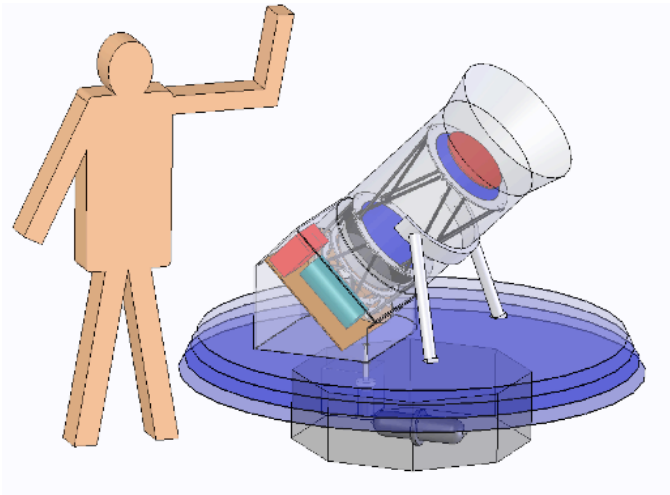
宇宙マイクロ波背景放射（CMB）
偏光観測衛星
LiteBIRD

実験概要について

松村知岳, カリフォルニア工科大学

LiteBIRD collaborations



LiteBIRD Collaboration

- 佐藤洋一，杉田寛之（ARD/JAXA）
- 松村知岳（Caltech）
- 福家英之， 松原英雄，満田和久，吉田哲也（ISAS/JAXA）
- 片山伸彦，佐藤伸明，鈴木敏一，住澤一高，田島治，都丸隆行，羽澄昌史，長谷川雅也，樋口岳雄，吉田光弘（高エネ研）
- 大田泉（近畿大）
- 鵜澤佳徳，関本裕太郎，野口卓（国立天文台）
- Julian Borrill（LBNL）
- 石野宏和，樹林敦子，美馬覚，三沢尚典（岡山大理）
- 柳沼えり（総研大）
- 茅根裕司，服部誠（東北大理）
- William L. Holzapfel, Bradley R. Johnson, Adrian T. Lee, Paul L. Richards, Huan T. Tran（UC Berkeley）
- 小松英一郎（UT Austin）

- コンサルタント：
  小玉英雄（KEK）、中川貴雄（JAXA）、川邊良平（NAOJ）

所属機関名のアルファベット順

LiteBIRD Collaboration

- 佐藤洋一，杉田寛之（ARD/JAXA）
- 松村知岳（Caltech）⇒ **Planck, BICEP, EBEX**
- 福家英之， 松原英雄，満田和久，吉田哲也（ISAS/JAXA）
- 片山伸彦，佐藤伸明，鈴木敏一，住澤一高，田島治，都丸隆行，羽澄昌史，長谷川雅也，樋口岳雄，吉田光弘（高エネ研）⇒ **QUIET, PolarBear**
- 大田泉（近畿大）
- 鵜澤佳徳，関本裕太郎，野口卓（国立天文台）
- Julian Borrill（LBNL）⇒ **Planck**
- 石野宏和，樹林敦子，美馬覚，三沢尚典（岡山大理）
- 柳沼えり（総研大）
- 茅根裕司，服部誠（東北大理）⇒ **QUIET**
- William L. Holzapfel, Bradley R. Johnson, Adrian T. Lee, Paul L. Richards, Huan T. Tran（UC Berkeley）⇒ **PolarBear, EPIC, BICEP, SPT**
- 小松英一郎（UT Austin） ⇒ **WMAP**

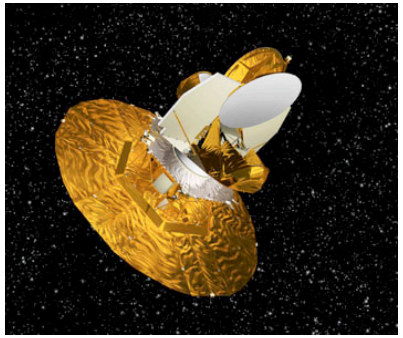
- コンサルタント：
  小玉英雄（KEK）、中川貴雄（JAXA）、川邊良平（NAOJ）

所属機関名のアルファベット順

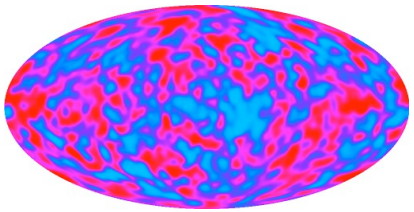
目次

- CMB分野における衛星計画
- LiteBIRDの目的
- LiteBIRDの実験概要
- まとめ

CMB分野での衛星計画

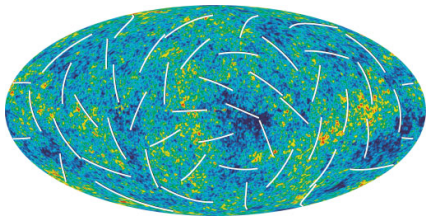


次世代
CMB衛星計画



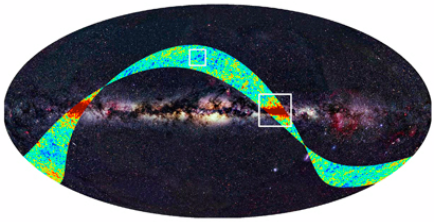
COBE (1989)

CMBスペクトル
温度揺らぎ



WMAP (2001)

温度揺らぎの詳細観測
密度揺らぎによる偏光の観測



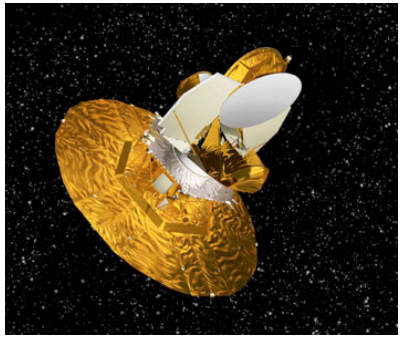
Planck (2009)

温度揺らぎの詳細観測
偏光の詳細観測

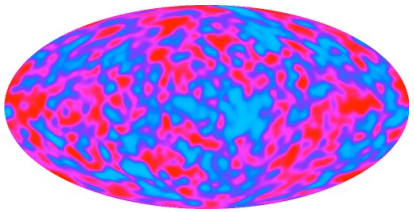
次世代に期待されるCMB観測を用いた科学的目的

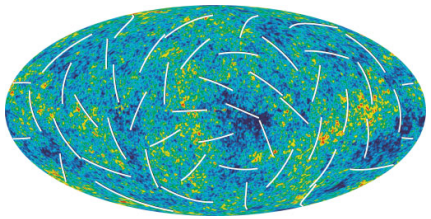
インフレーションの実験的検証
原始重力波による偏光揺らぎ（primordial B-mode）の詳細観測

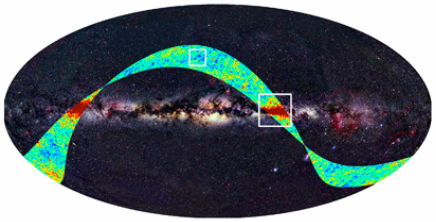
CMB分野での衛星計画



次世代
CMB衛星計画



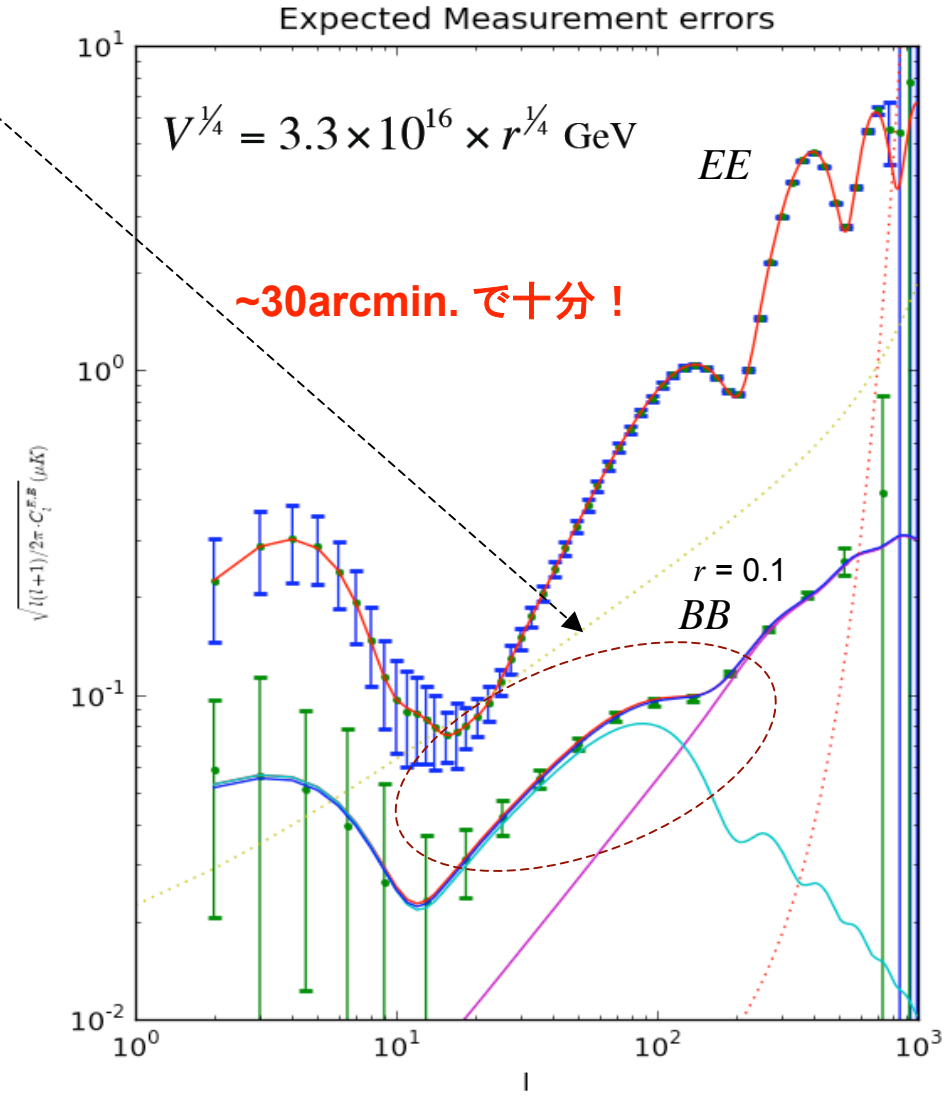




	COBE (1989)	WMAP (2001)	Planck (2009)
周波数帯	32−90GHz	23−94GHz	30−857GHz（353GHz）
検出器/感度	6 radiometers	20 radiometers	11 radiometers + 52 bolometers
角度分解能	~7°	~0.22°	~0．1°
軌道	地球周回軌道	L2	L2

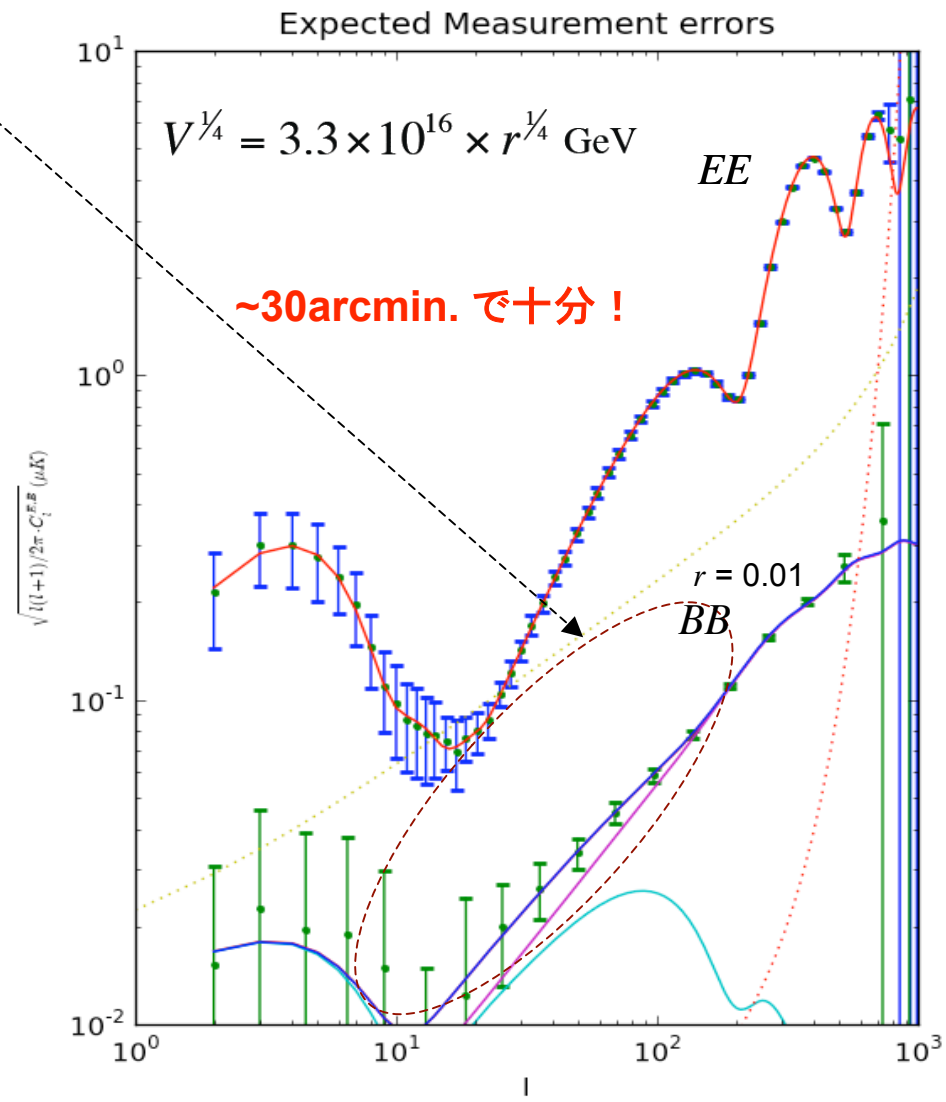
Science goals

- インフレーションによるB-modeスペクトル（ $l < 200$ ）を詳細に観測。
- LensingによるB-modeスペクトル（ $l > 200$ ）も観測でき、インフレーションによるB-modeスペクトルとの混乱を分離。
- 全天観測により宇宙再電離の時期を判定。
- 60−250GHzをカバーし前景放射（シンクロトロン放射、ダスト放射）を同一実験で観測する。



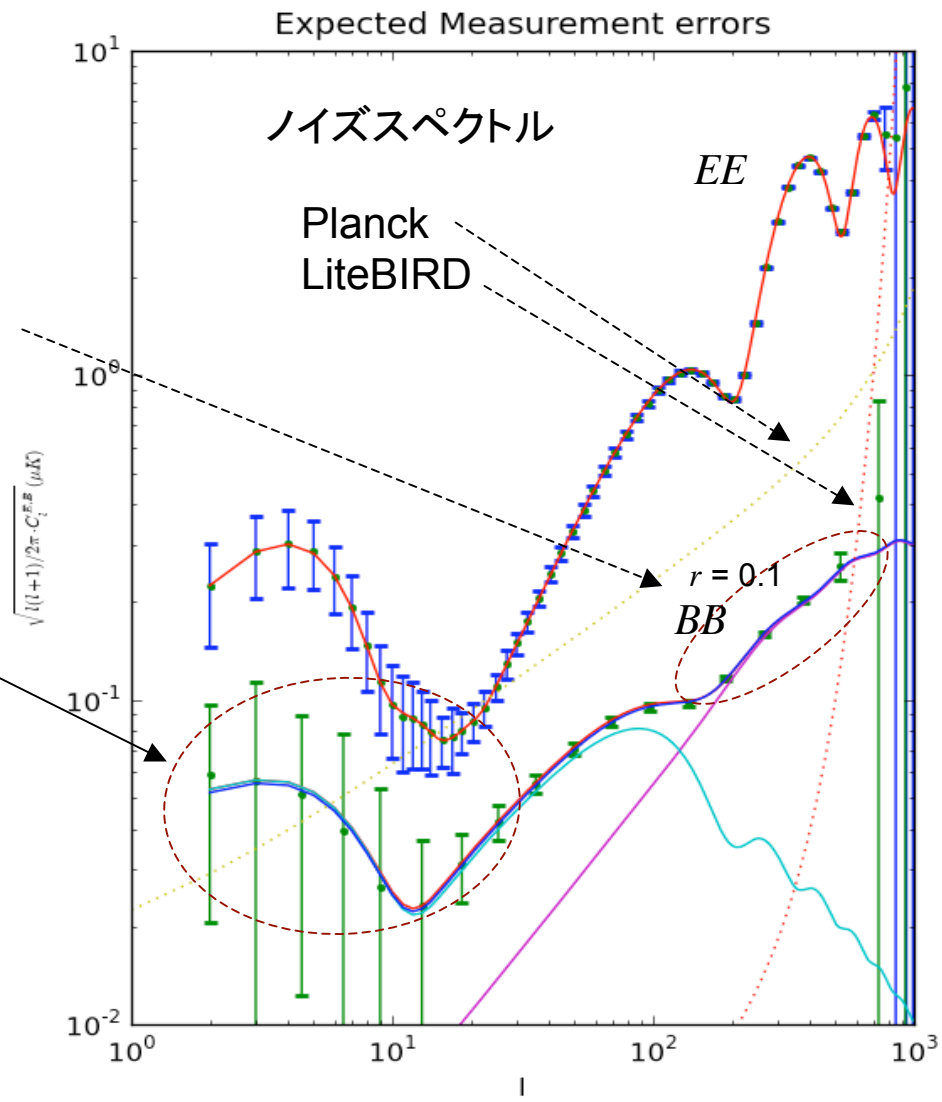
Science goals

- インフレーションによるB-modeスペクトル（ $l < 200$ ）を詳細に観測。
- LensingによるB-modeスペクトル（ $l > 200$ ）も観測でき、インフレーションによるB-modeスペクトルとの混乱を分離。
- 全天観測により宇宙再電離の時期を判定。
- 60−250GHzをカバーし前景放射（シンクロトロン放射、ダスト放射）を同一実験で観測する。

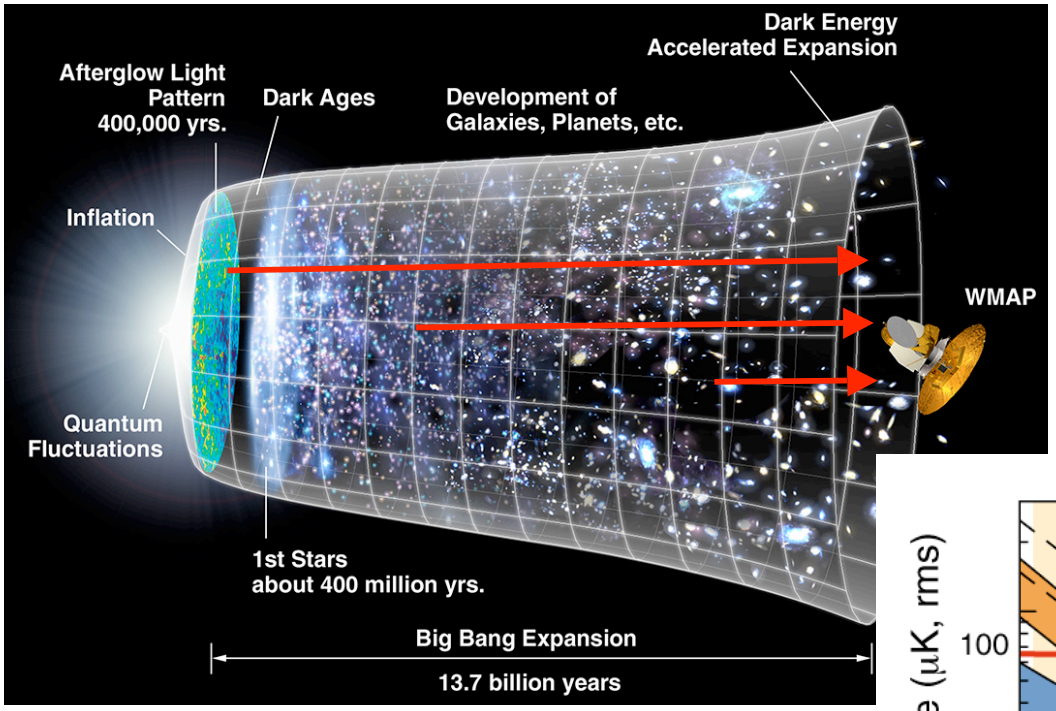


Science goals

- インフレーションによるB-modeスペクトル（ $l < 200$ ）を詳細に観測。
- LensingによるB-modeスペクトル（ $l > 200$ ）も観測でき、インフレーションによるB-modeスペクトルとの混乱を分離。
- 全天観測により宇宙再電離の時期を判定。
- 60−250GHz をカバーし前景放射（シンクロトロン放射、ダスト放射）を同一実験で観測する。



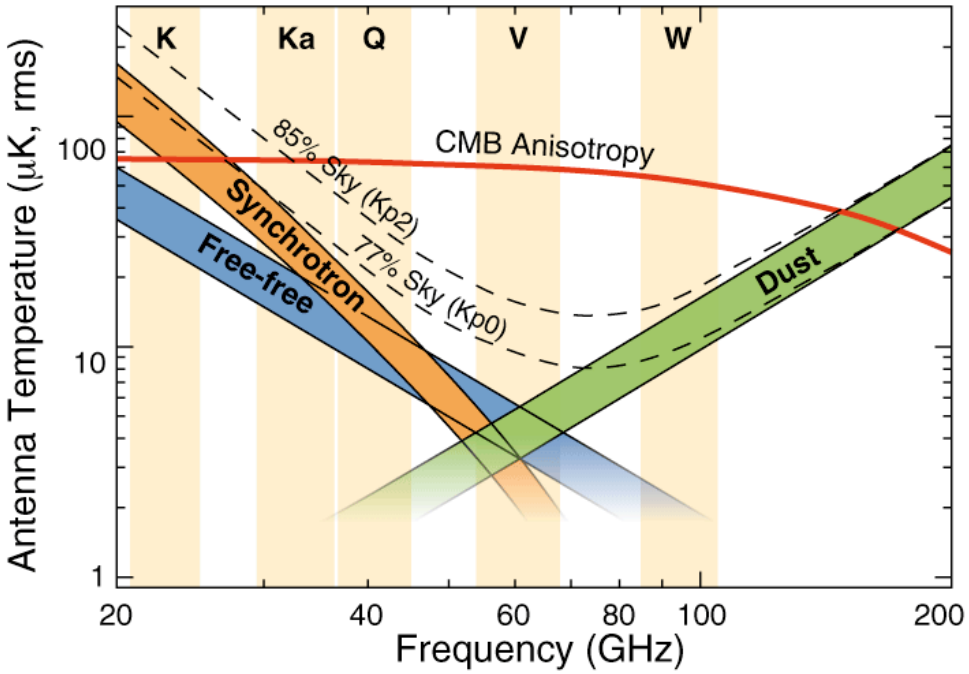
前景放射



空の一点を観測した場合、見たシグナルは
CMBからのシグナルのみである保証はない。

ミリ波でのシグナルの寄与

- CMB
- ダスト放射
- シンクロトロン放射
- 制動放射（free-free）
- など



視線方向からのシグナルからCMB以外の
寄与を取り除きたい。

↓

解析では銀河面を避ける。

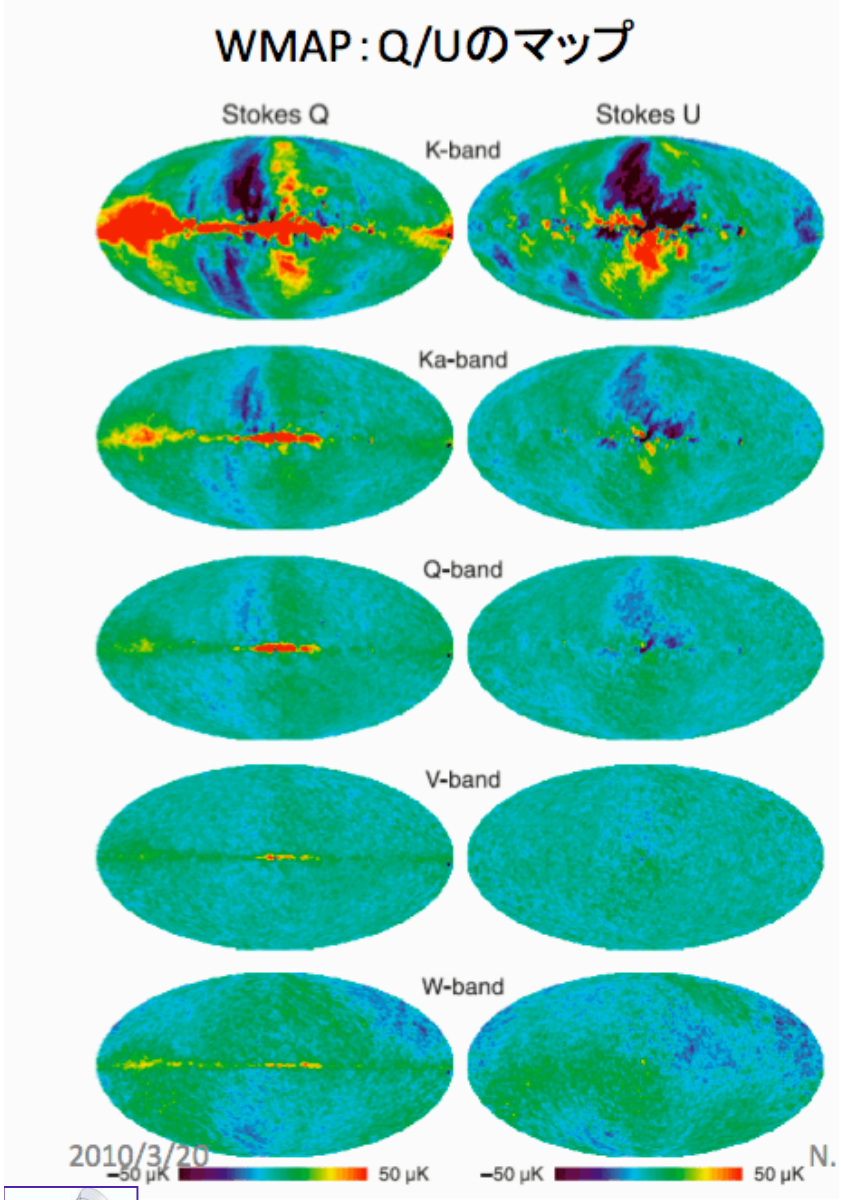
↓

各シグナルの周波数依存性の違いを
利用する。

↓

一つの実験にてマルチバンドをカバー。

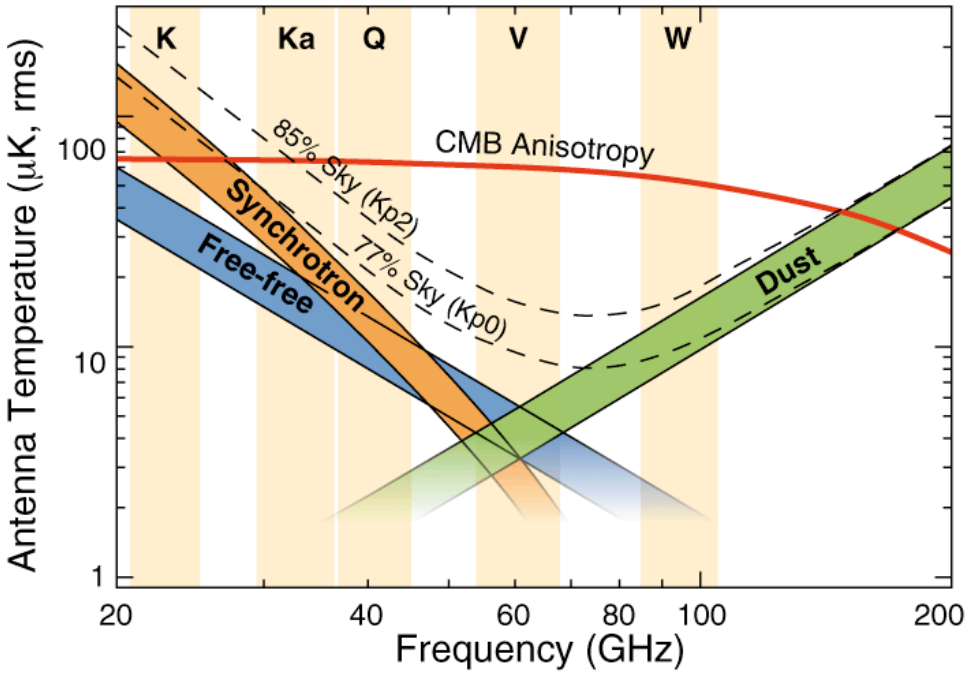
前景放射（WMAPの例）



空の一点を観測した場合、見たシグナルは
CMBからのシグナルのみである保証はない。

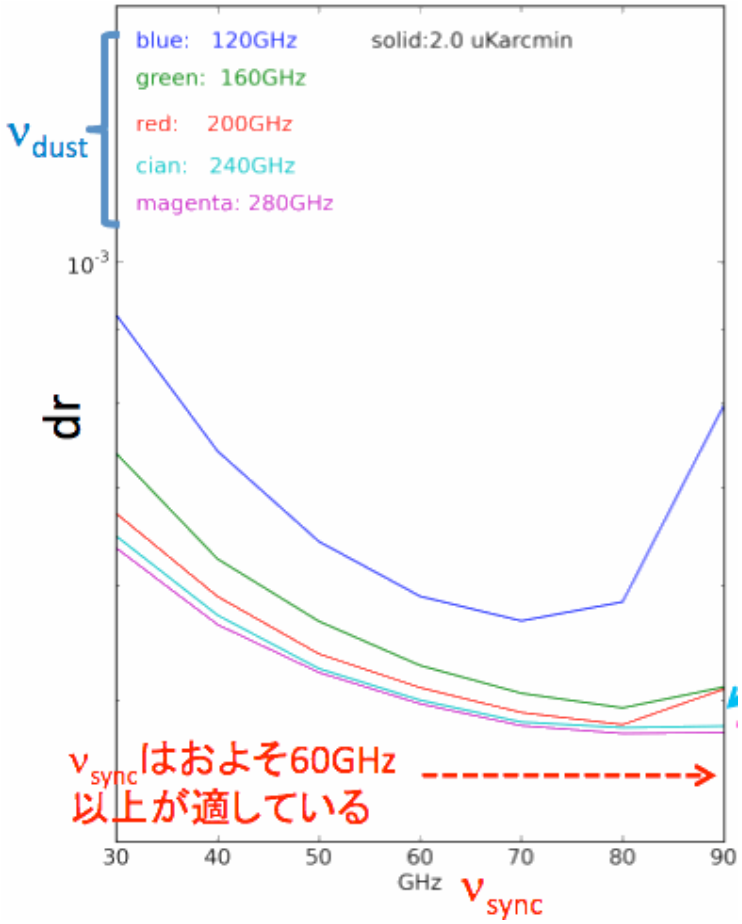
ミリ波でのシグナルの寄与

- CMB
- ダスト放射
- シンクロトロン放射
- 制動放射（free-free）
- など



観測周波数の選択

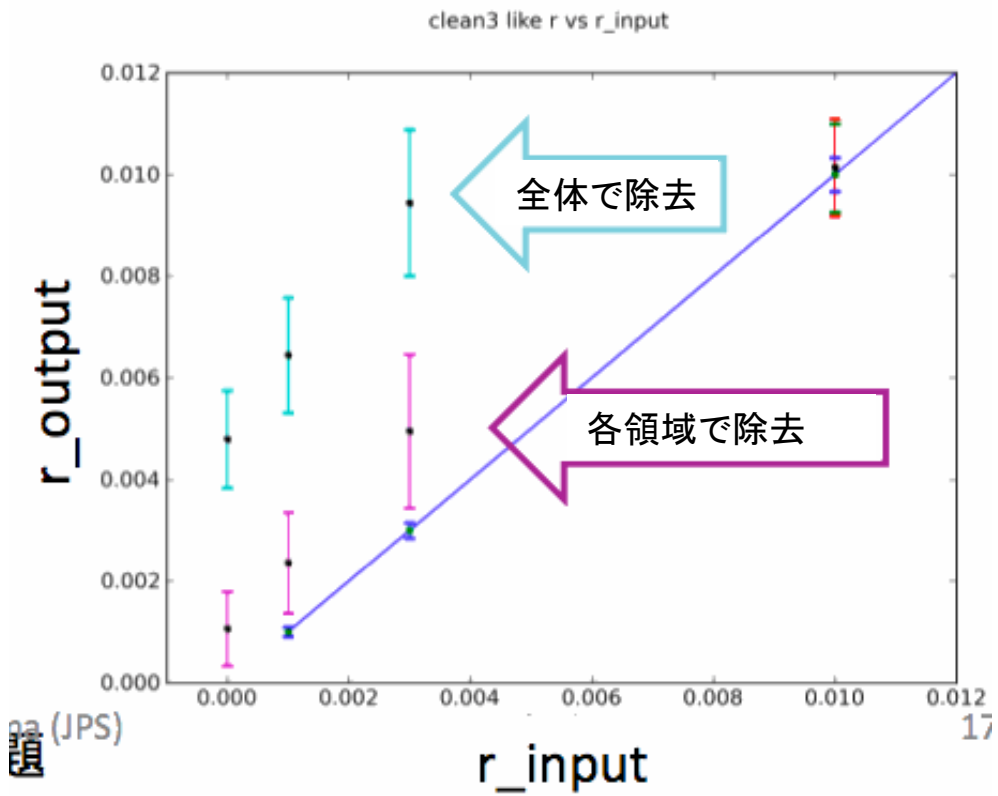
テンサースカラー比(r)への感度の
観測周波数依存性（例）



空の各点で前景放射のモデルが
変化しない場合。

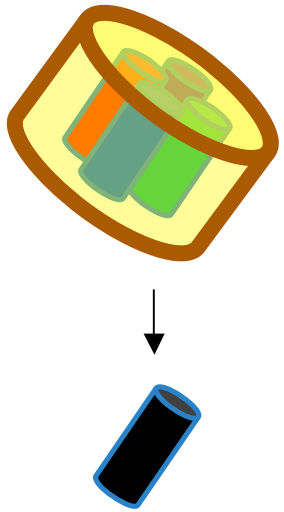
60, 100, 240 GHz の3つの帯域を用い、
60GHz帯のシンクロトロン放射、240GHz帯のダスト放射を
用いて100GHz帯の前景放射を取り除く。

モデルの空間依存性を考慮するため、
全天を48分割し、かく領域にて前景放射を取り除くアルゴリズムを
適応。



Design Concept

- アメリカには多くの地上／気球実験が現在観測中
- アメリカ（EPIC）／ヨーロッパ（B-pol）でもCMB偏光衛星実験を提唱
  ⇒大型衛星実験



LiteBIRDでは

- 小型衛星に搭載するために軽量化及びコンパクト化
  質量 ＜400kg，全長 ＜1m

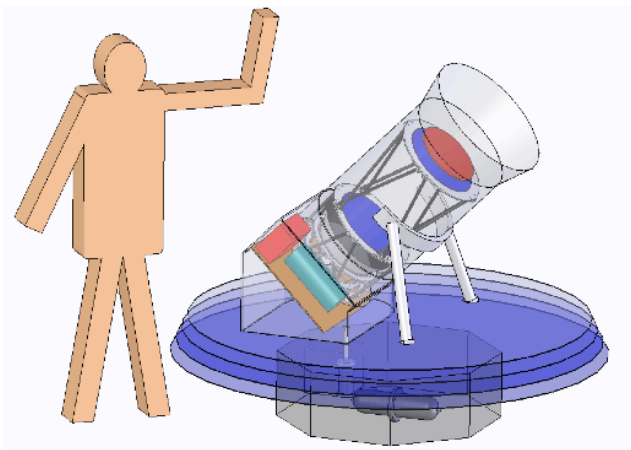
- 前景放射を差し引くための広い帯域をカバーした光学系及び焦点面
  帯域 60〜250GHz （5〜1.2mm）

全てのバンドを1テレスコープで
（多色焦点面）

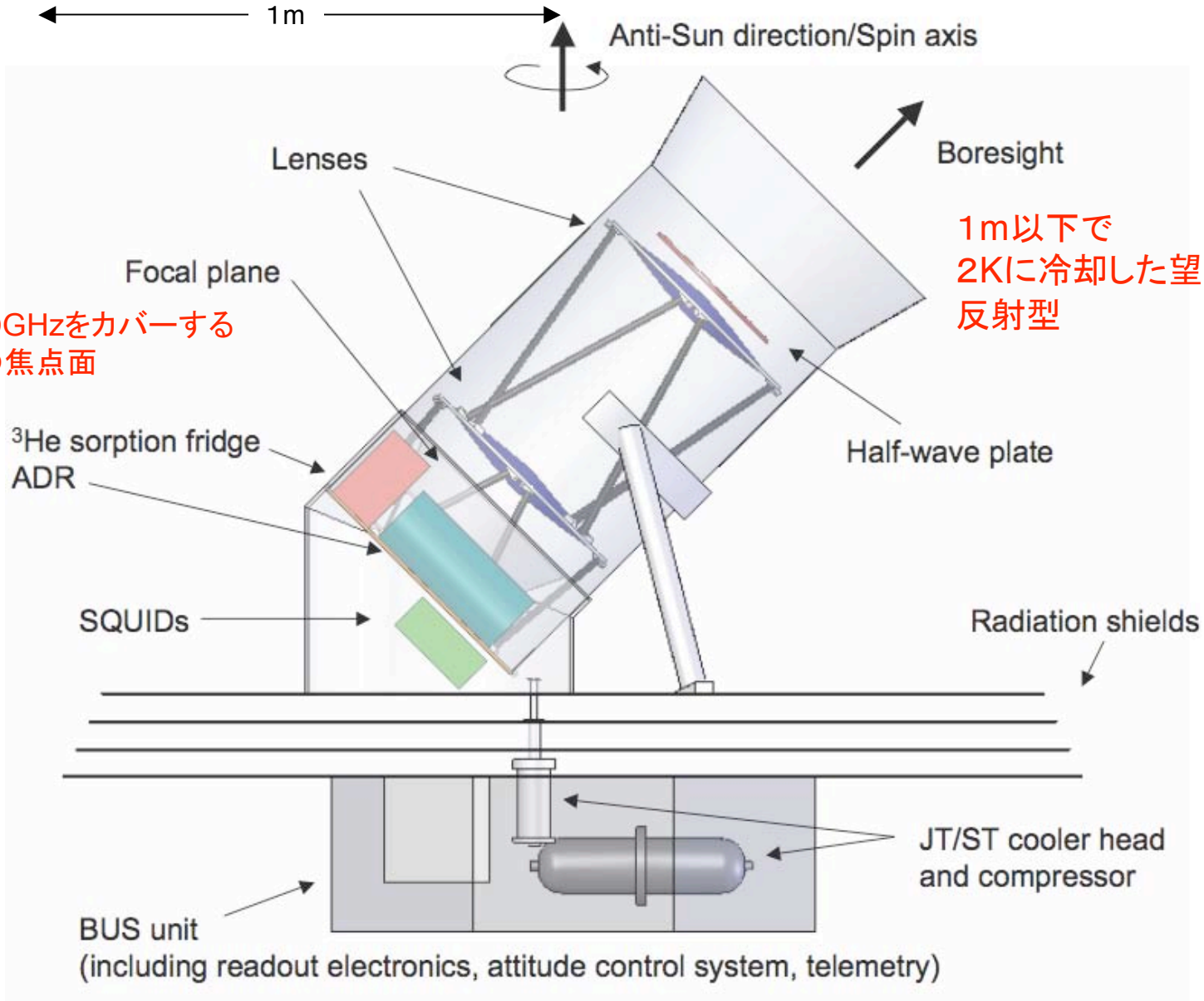
- 検出器の数を増やし統計誤差を下げるための広い焦点面
  ビームサイズ→〜0．5°、検出器数 >1000

- 偏光の系統誤差を減らすためのシンプルな光学系
  1/2波長板変調機はサファイアを用いる。直径 ＜30cm

- データ転送量を押さえる



衛星の全体像: 屈折望遠鏡



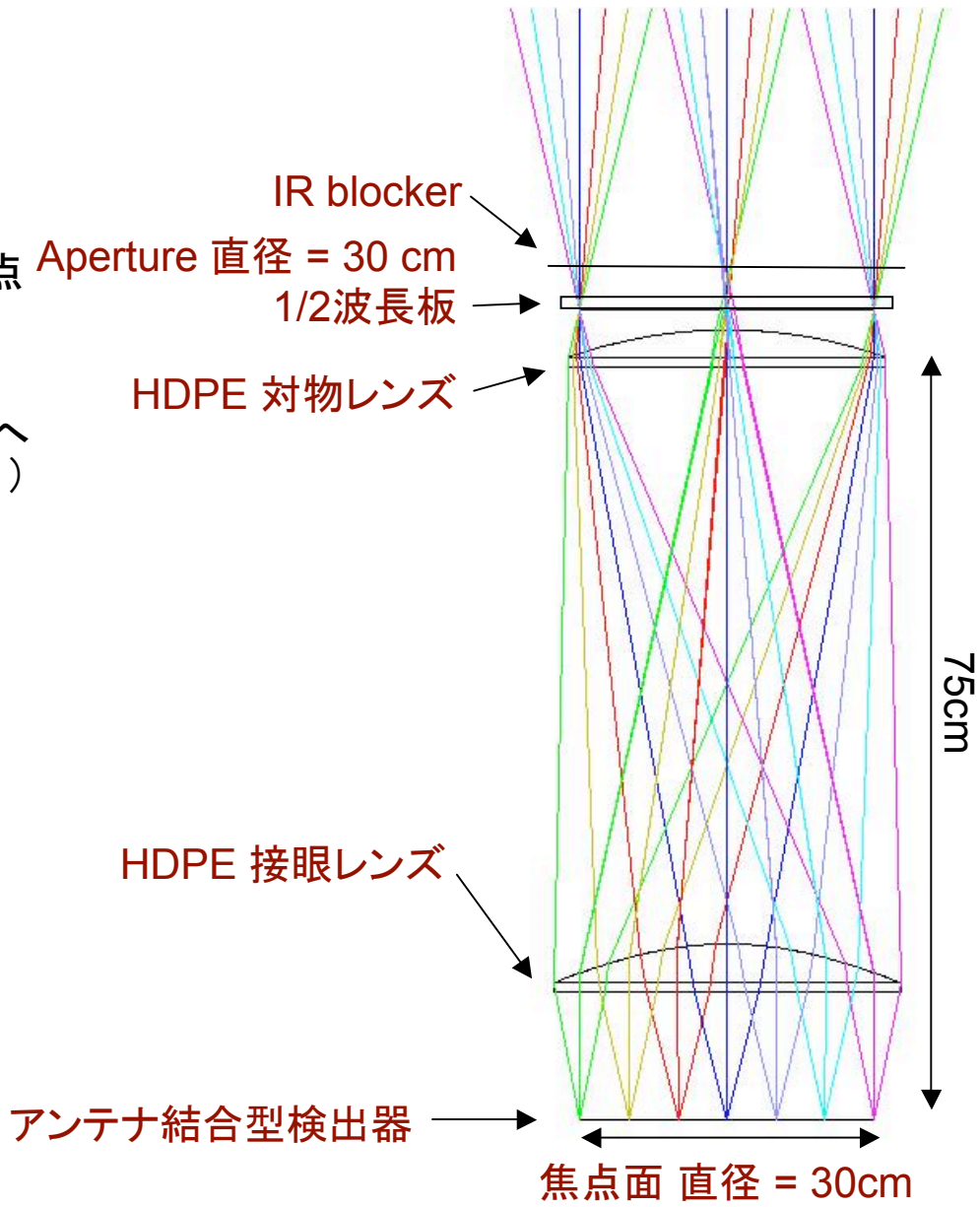
1m以下で
2Kに冷却した望遠鏡
反射型

60−250GHzをカバーする
100mKの焦点面

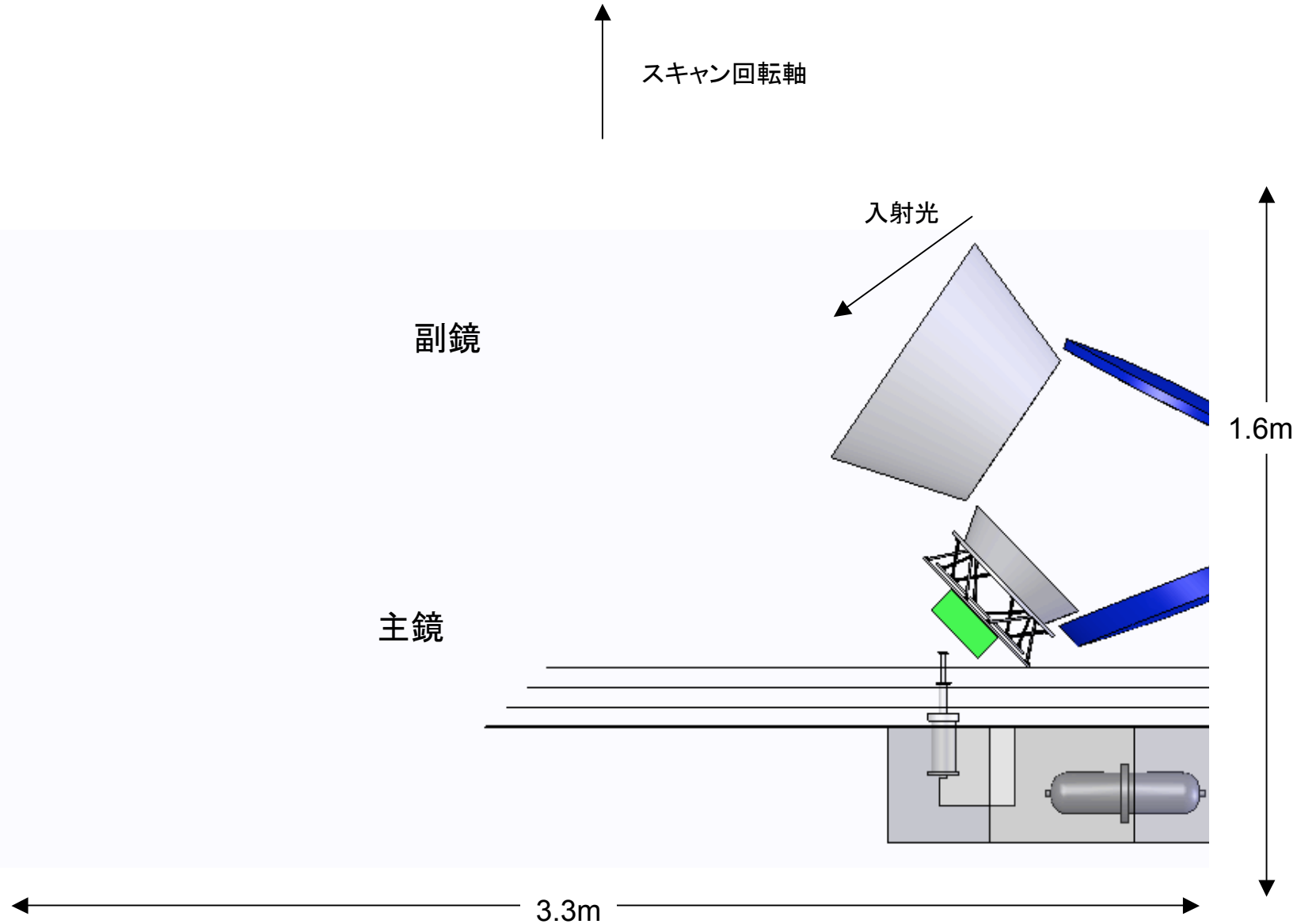
光学系: 屈折望遠鏡

Zemaxを使った光学デザイン。

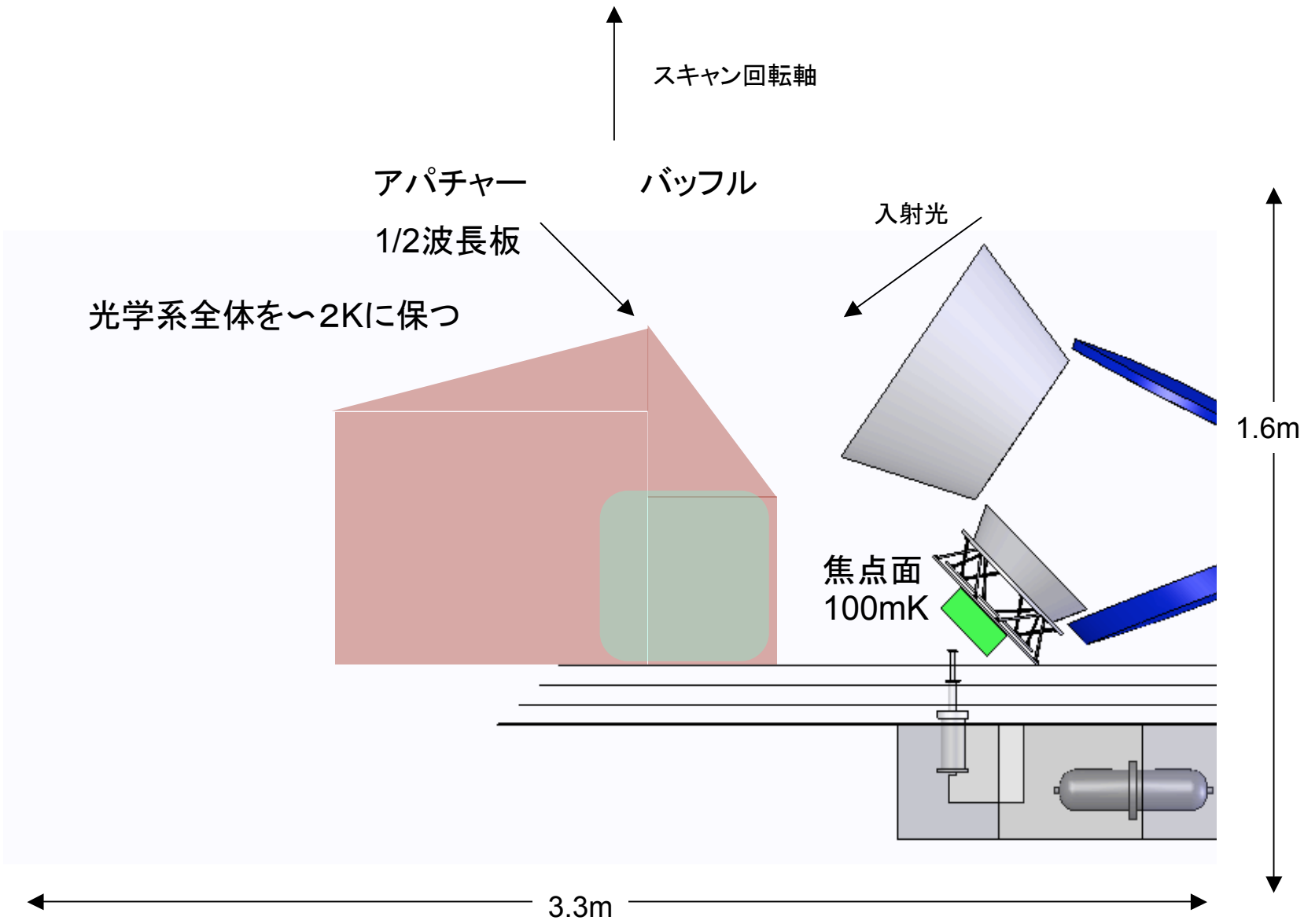
- 光軸対称の屈折望遠鏡
- 視野: 30°×30°
- Strehl ratio > 0.8（回折限界）を平面焦点面全域 @ 300GHzで実現。
- レンズ: 高密度ポリエチレン
  （高密度ポリエチレンの放射耐性、酸化への影響によってはSiレンズを用いる。）
- 光学系の温度は2Kに保つ
- 1/2波長板を用いた偏光変調
  - 偏光角度を回転
- メインビームの系統誤差
- サイドローブをコントロールする



衛星の全体像: 反射望遠鏡



衛星の全体像: 反射望遠鏡



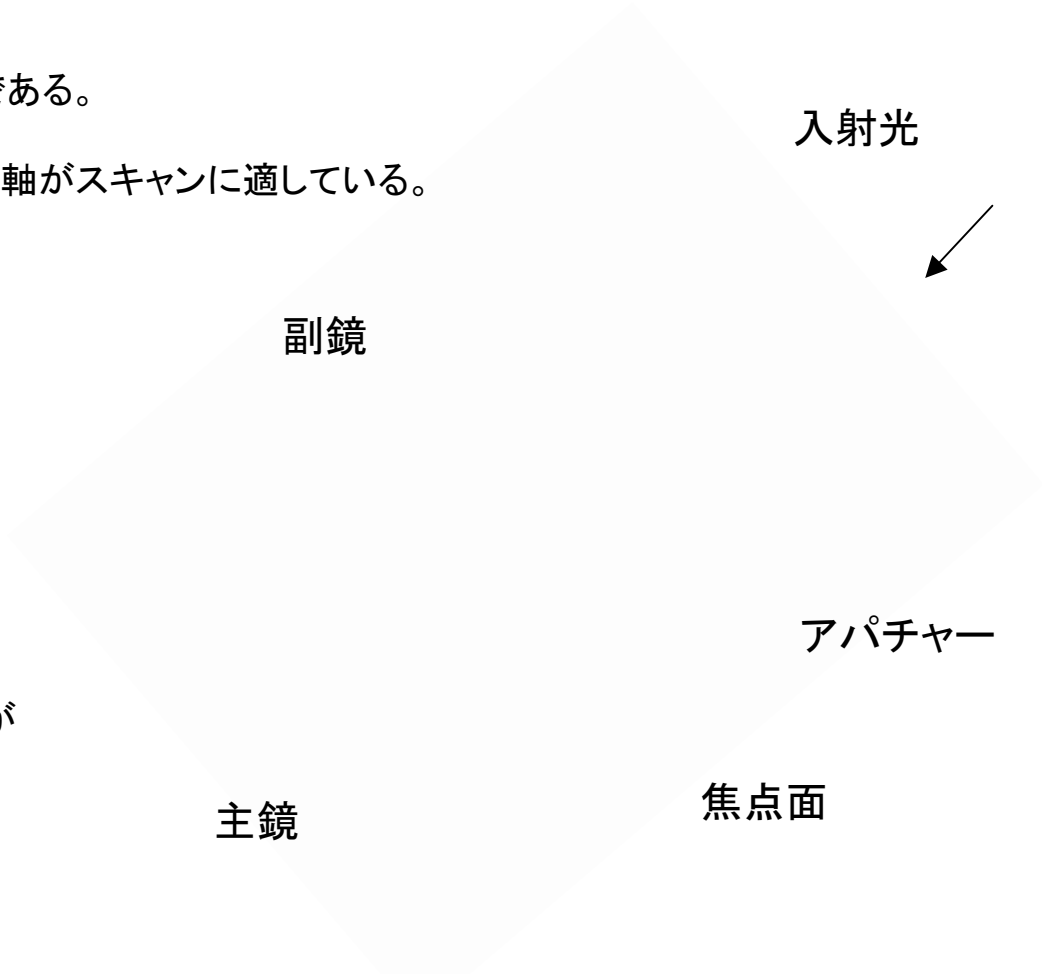
衛星の全体像: 反射望遠鏡

反射光学系の利点

レンズが必要ないために、広帯域反射防止膜の開発負担を軽減
（焦点面ピクセルの反射防止膜は必要）

off-axisの光学系によりサイズがコンパクトである。

off-axisの視野方向とスキャンのための回転軸がスキャンに適している。



今後の検討事項

off-axisによるサイドローブの影響の評価。

焦点面ビームのアパチャーイルミネーションが

望遠鏡のビームにどう影響するか。

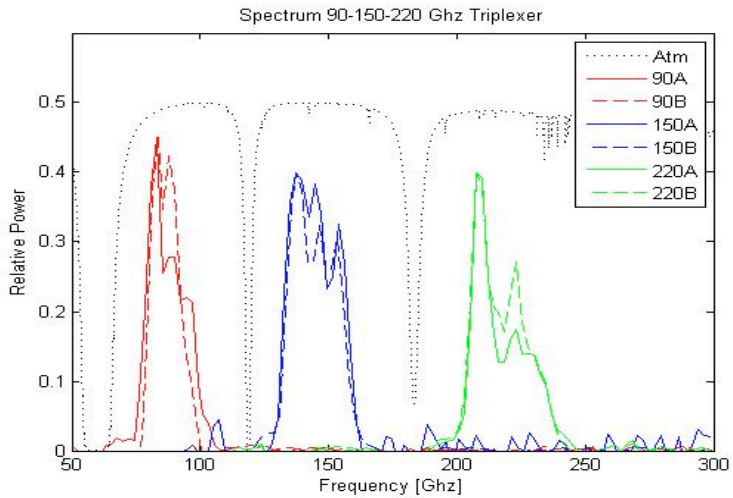
焦点面デザイン及び検出器

焦点面

焦点面内を有効利用し60−250GHzをカバー

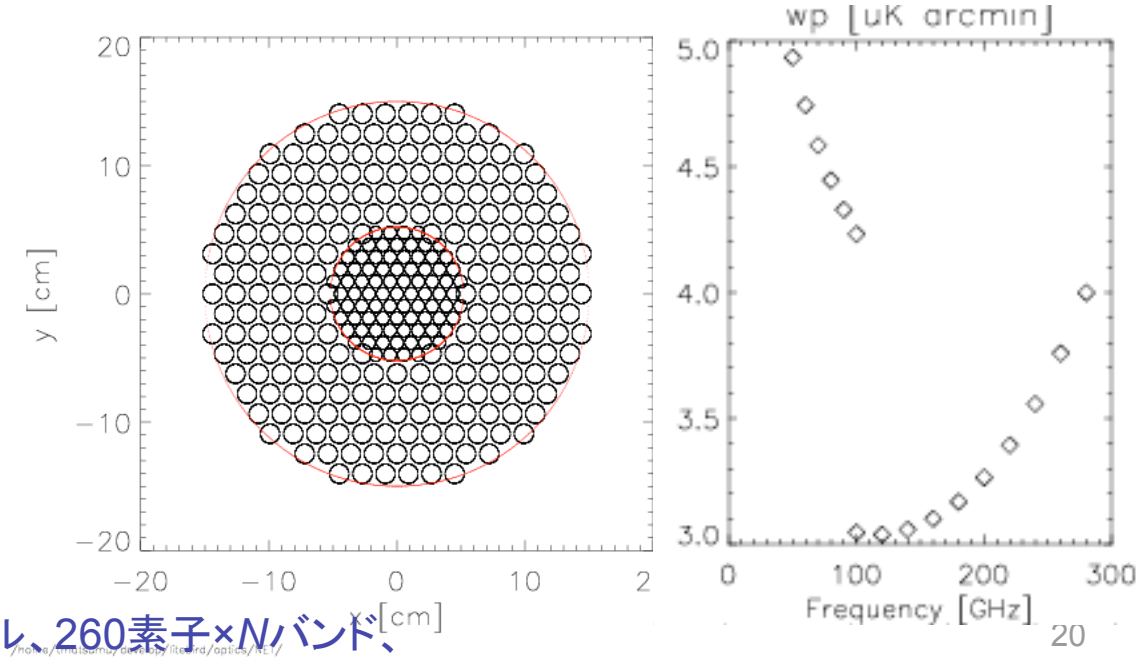
今までの解
1ピクセル→1バンド

LiteBIRDでは
1ピクセル→Nバンド



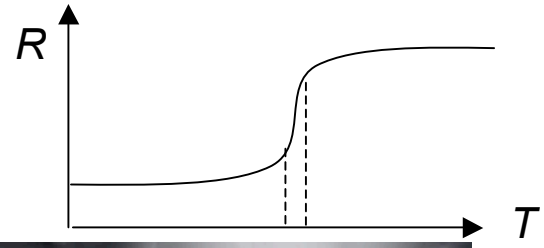
最適化のためのパラメータ
- ピクセルのサイズ
- ピクセルの数
- 面積の振り分け

何を最適化するか
- バンド当たりのノイズ（μK·arcmin）



外側:　60-100GHz、130ピクセル、260素子×Nバンド、
内側: 100-250GHz、210ピクセル、420素子×Nバンド、

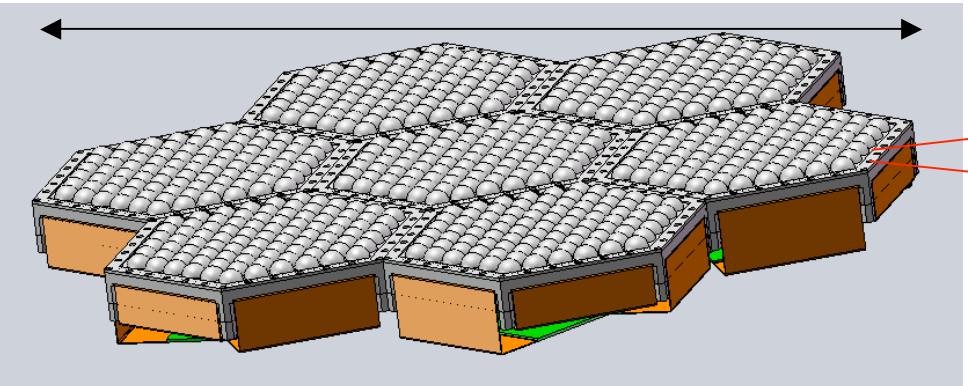
ボロメータ

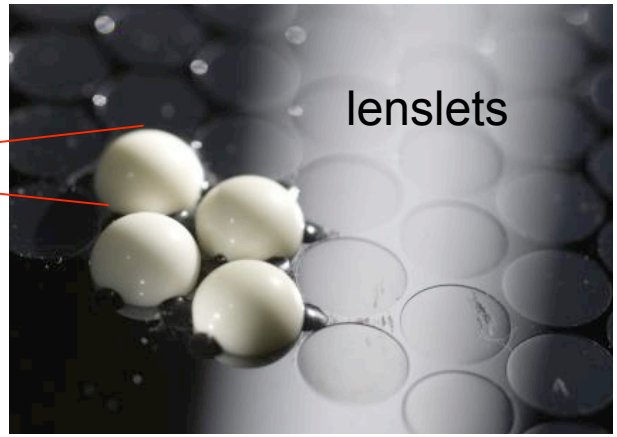


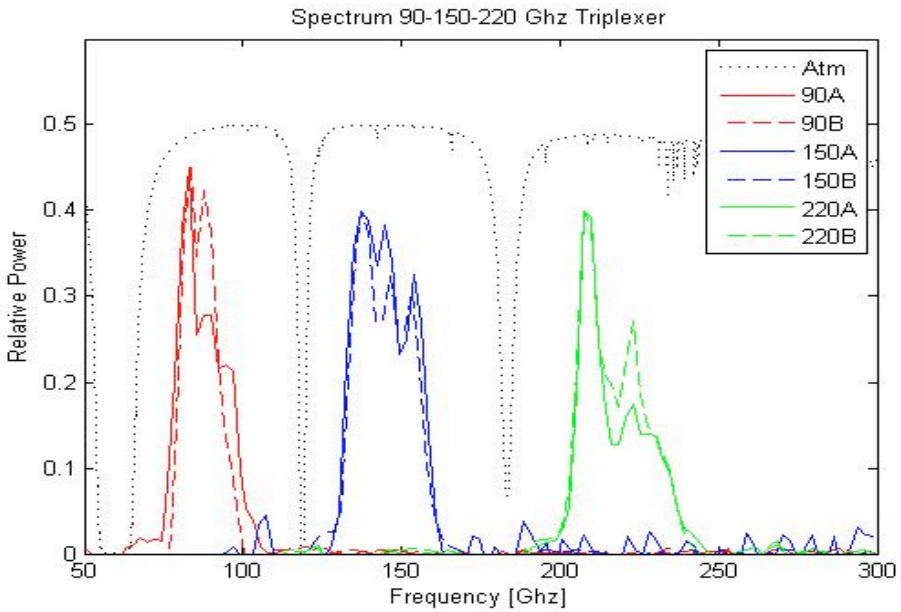
O ＞1000個のアンテナ結合型TESボロメター

Development at UC Berkeley
A. Lee, R. O'Brient, A. Suzuki

~30cm



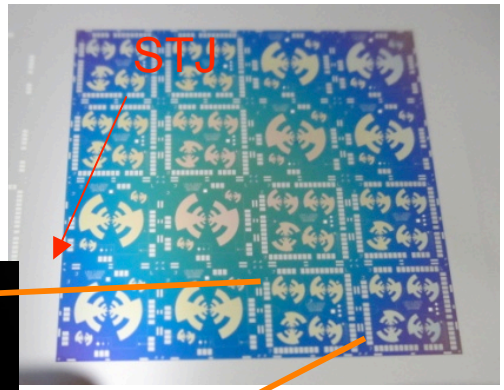


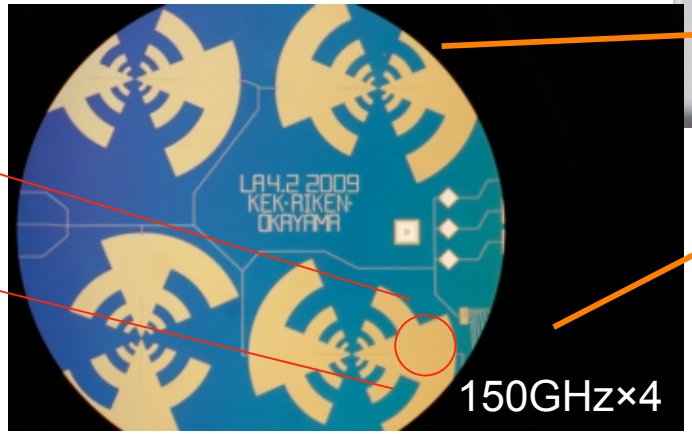


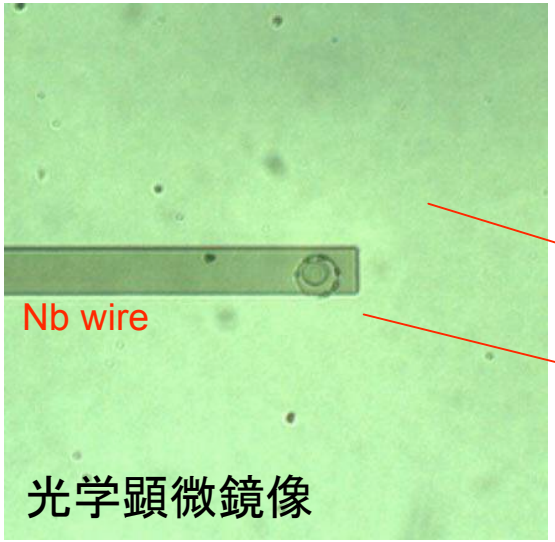
PolarBearで使用される検出器と同じ技術

STJ (Superconducting Tunnel Junction)

- STJの利点
  - 大きなダイナミックレンジ
  - 期待されるNEP〜1aW/√Hz
  - 時定数〜μsec

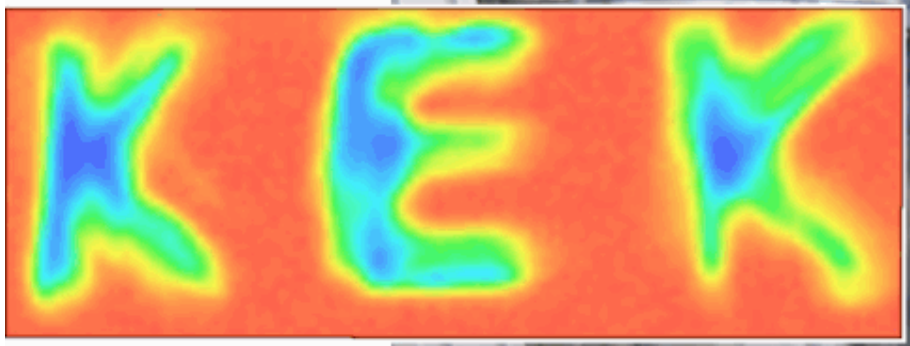


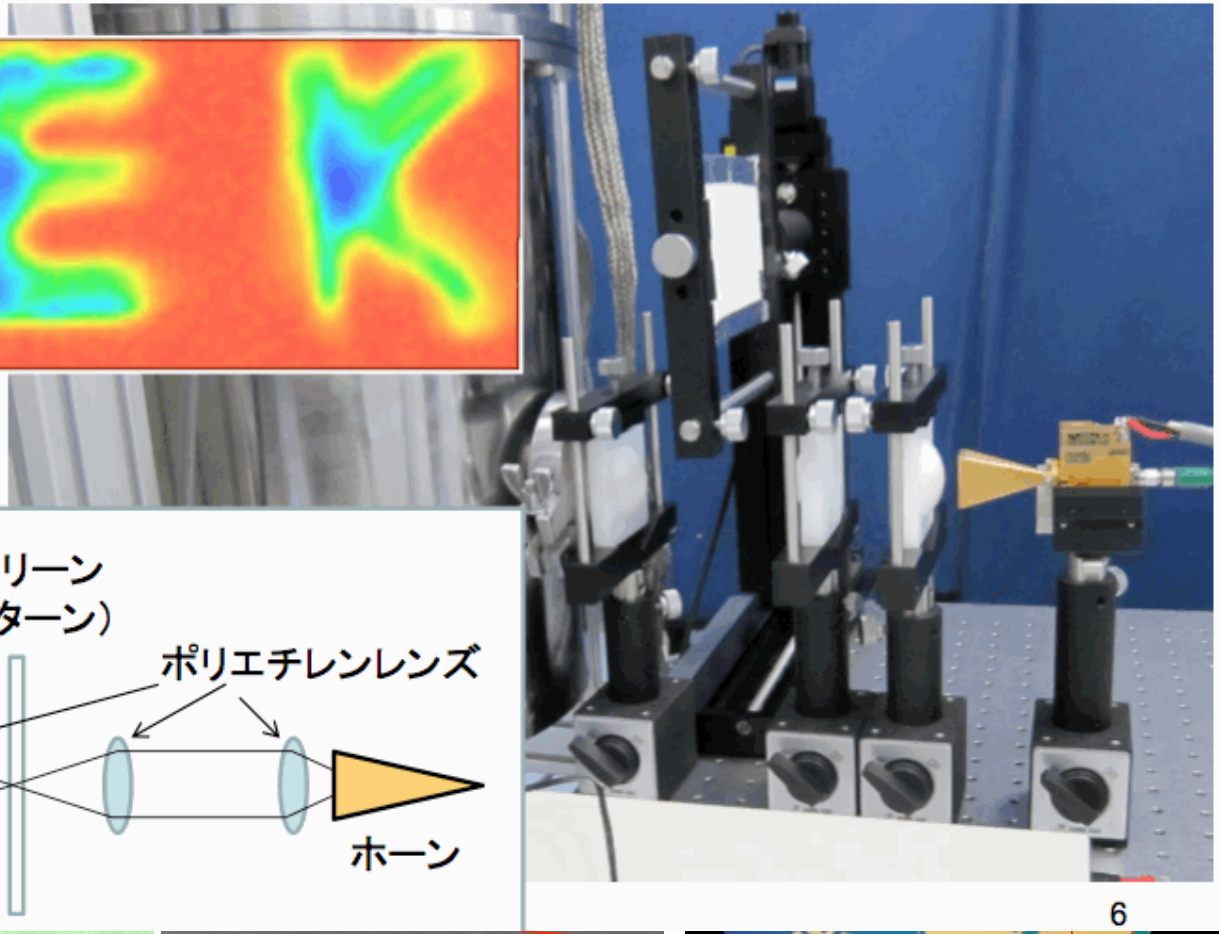


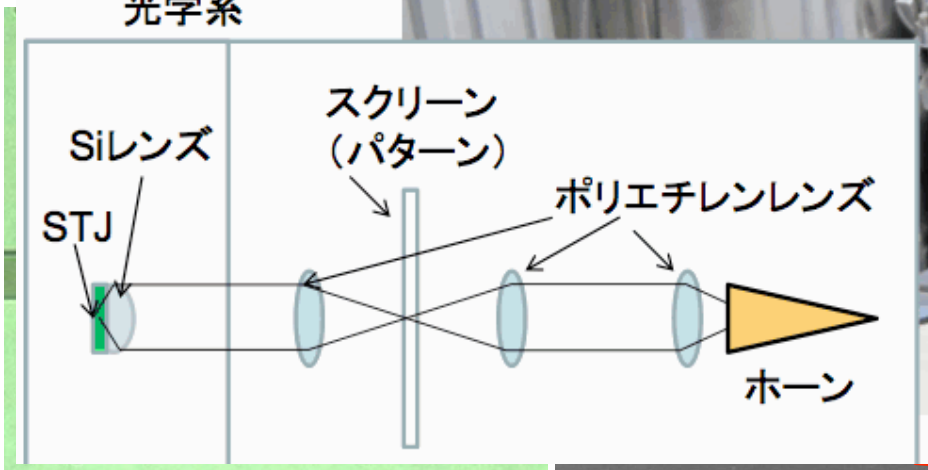


STJ (Superconducting Tunnel Junction)

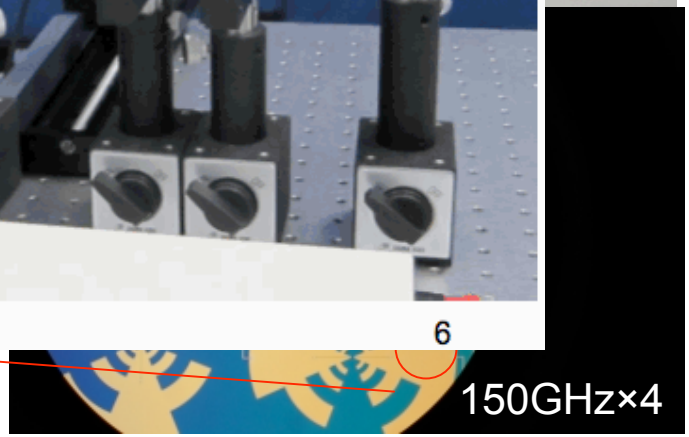
- STJ読み出しのミリ波イメージング







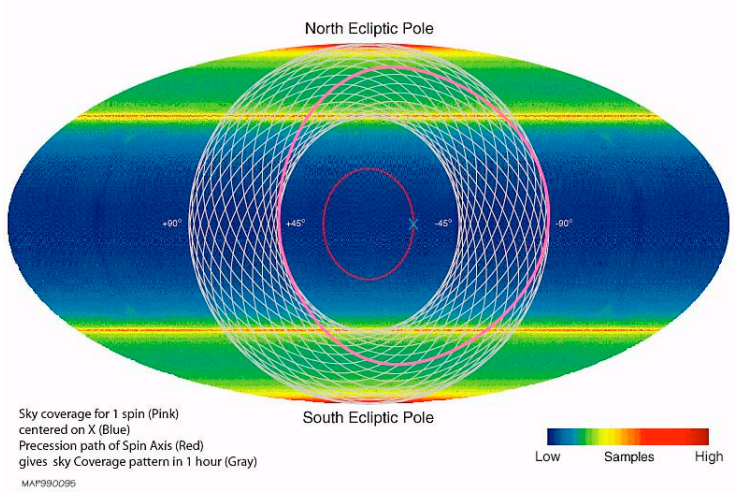
光学顕微鏡像



衛星のスキャン及び軌道

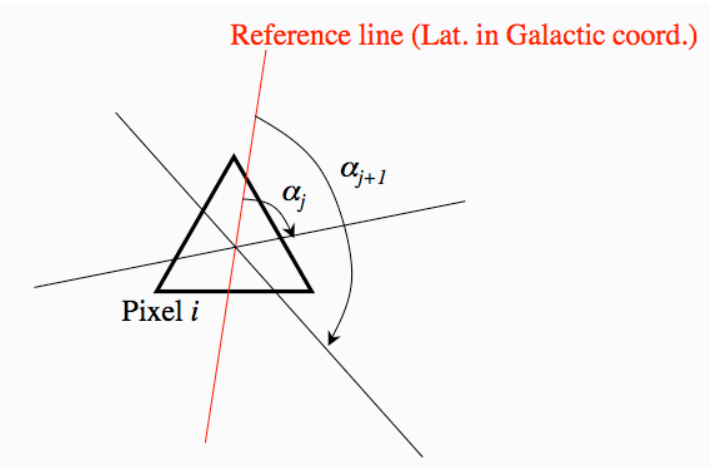
衛星のスキャン及び軌道

地球周回軌道、およびL2点での観測を検討中

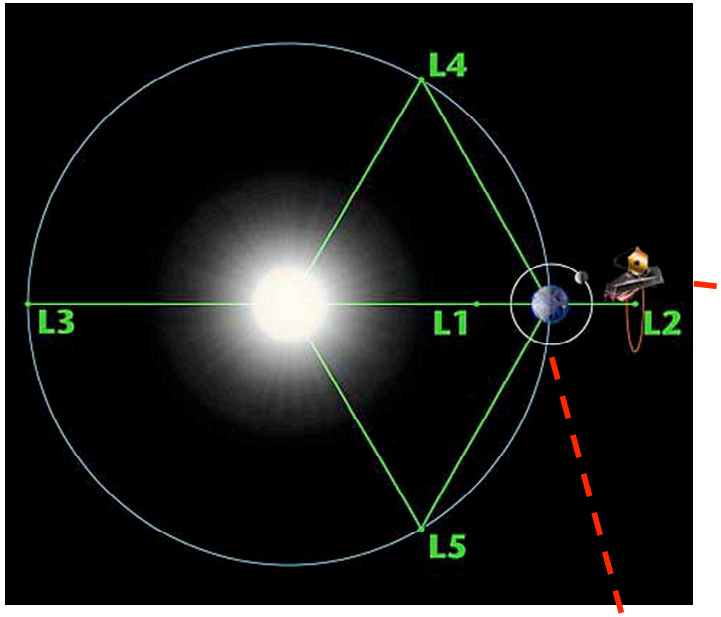


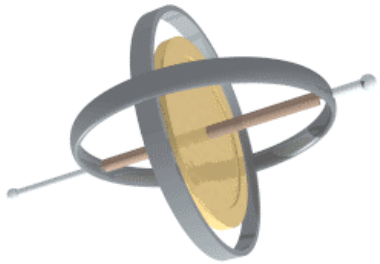
必要とされるスキャン

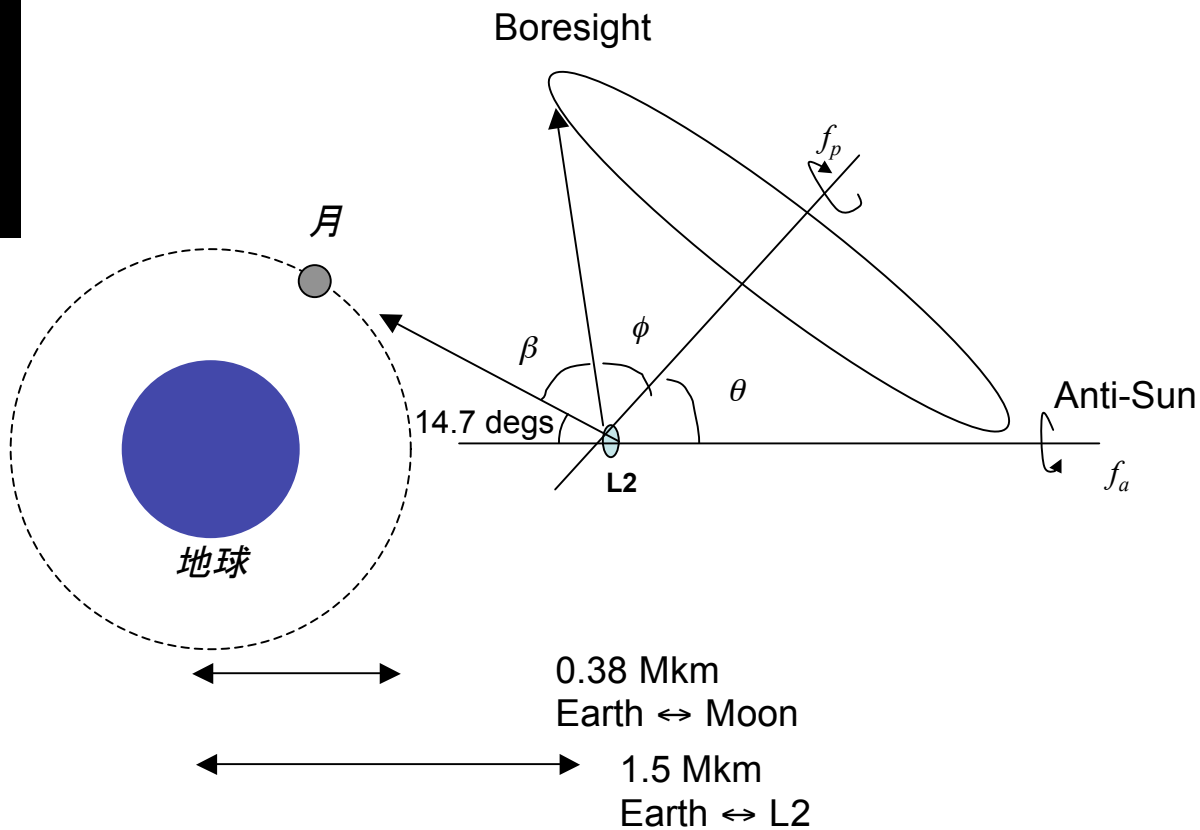
- スキャン法への要請全天をまんべんなく測定
  → N_{obs}の一様性
- 天球上の「画素」を様々な角度から観測（クロスリンク）
  → $c = \langle \sin 2\alpha \rangle^2 + \langle \cos 2\alpha \rangle^2 \ll 1$
- 短時間で巡回
- 1/fノイズを抑える
- データサイズを抑える
- 太陽、地球、月からの放射を避ける
- 熱的安定なスキャン
- 放射環境による影響



L2でのスキャン

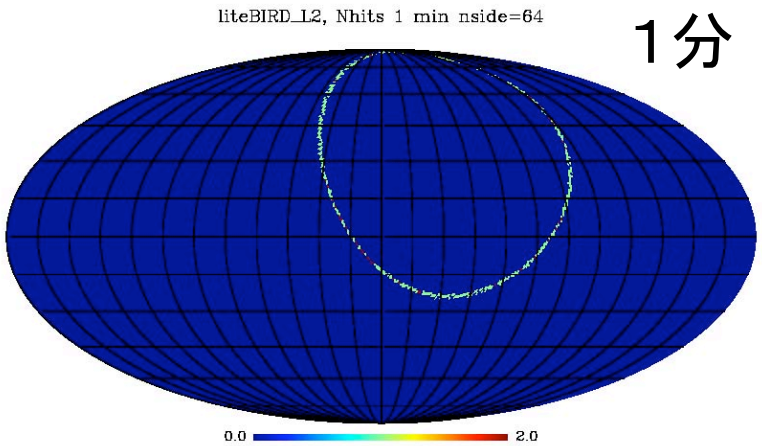




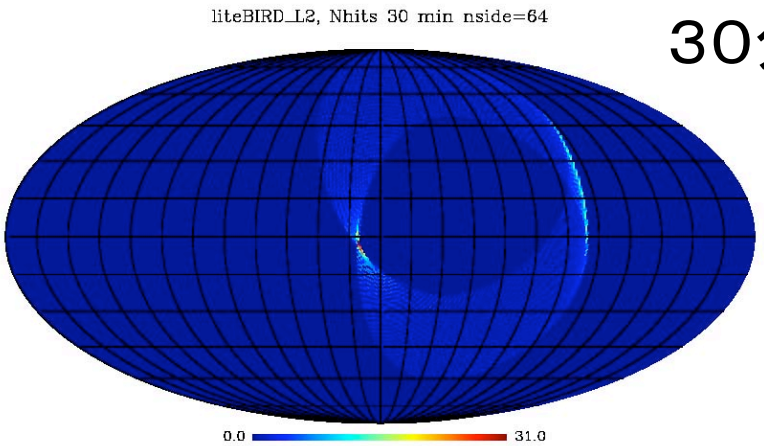


熱的、放射環境は安定
太陽、地球、月は視野から
離れている。

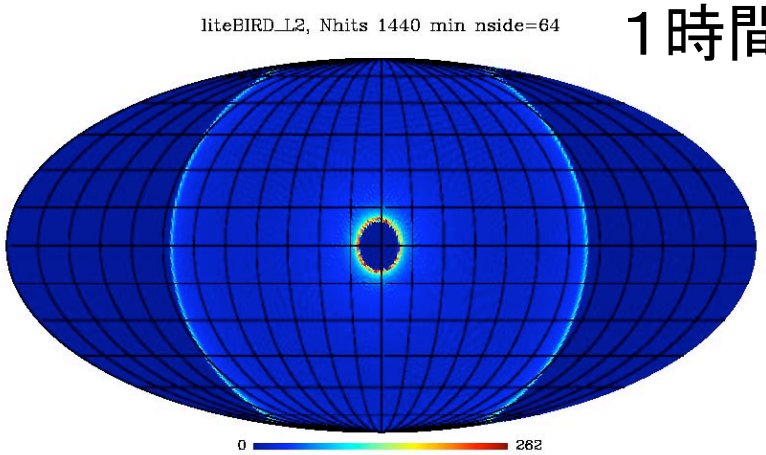
L2でのスキャン



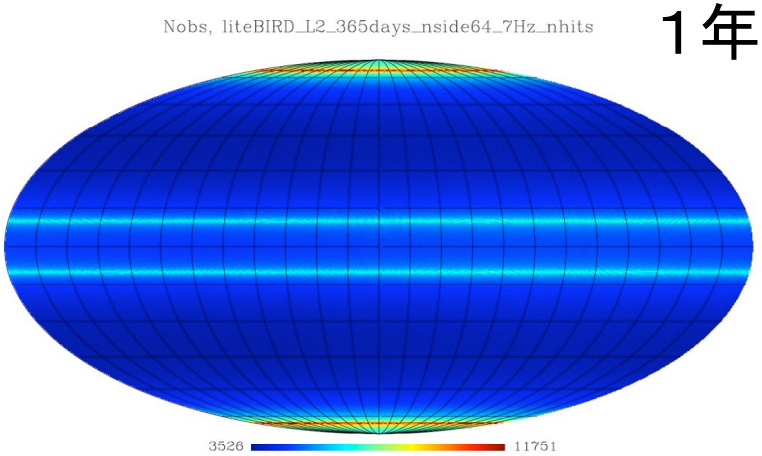
1分



30分



1時間

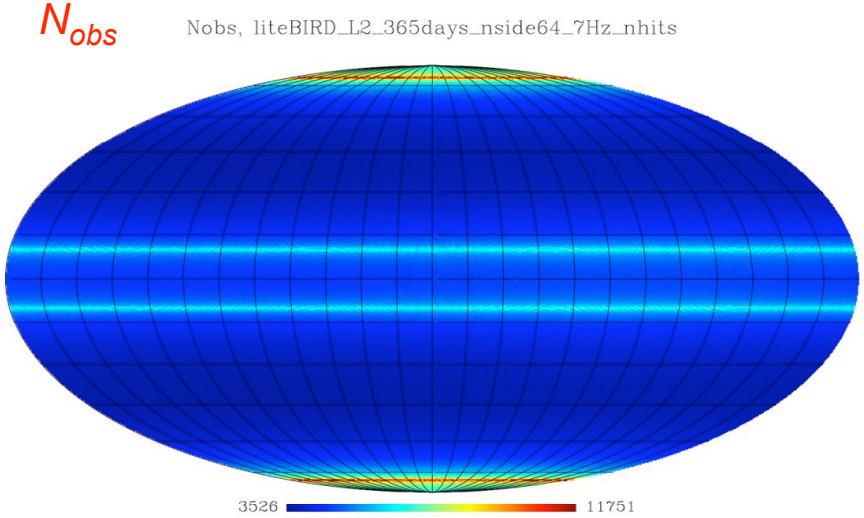


1年間

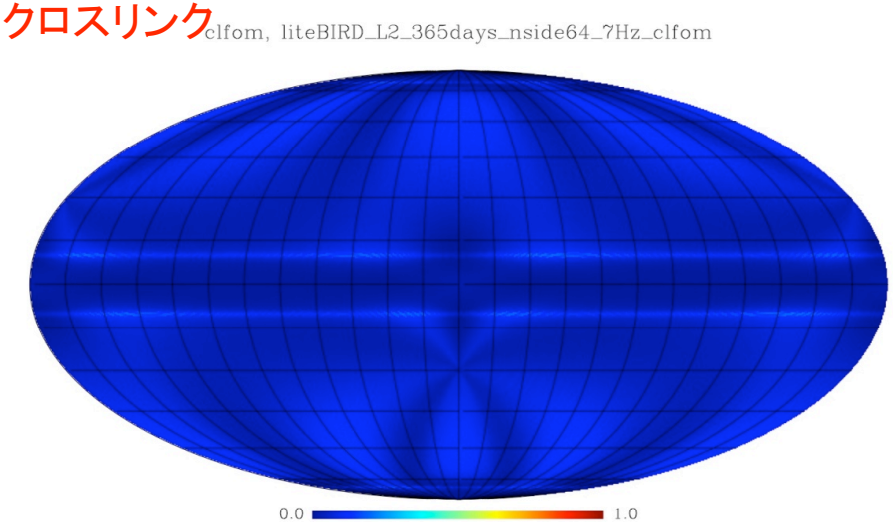
黄道座標系

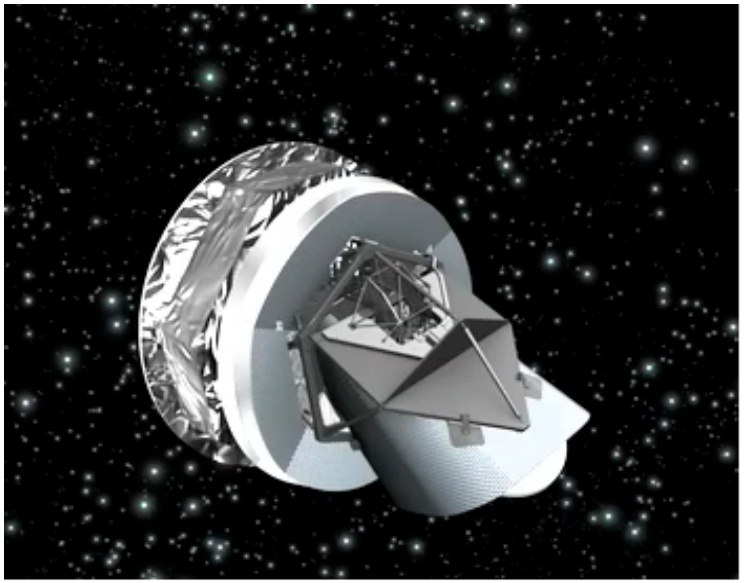
L2でのスキャン

N_{obs}

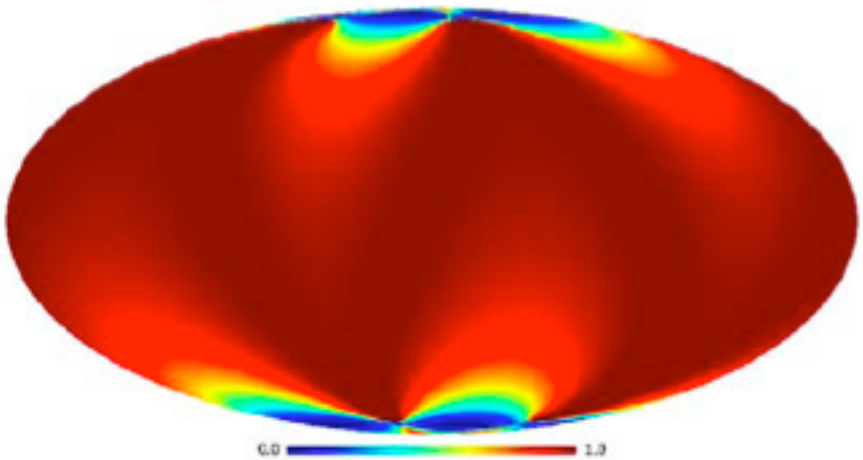


クロスリンク



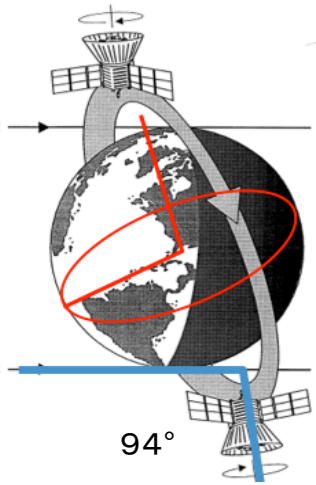


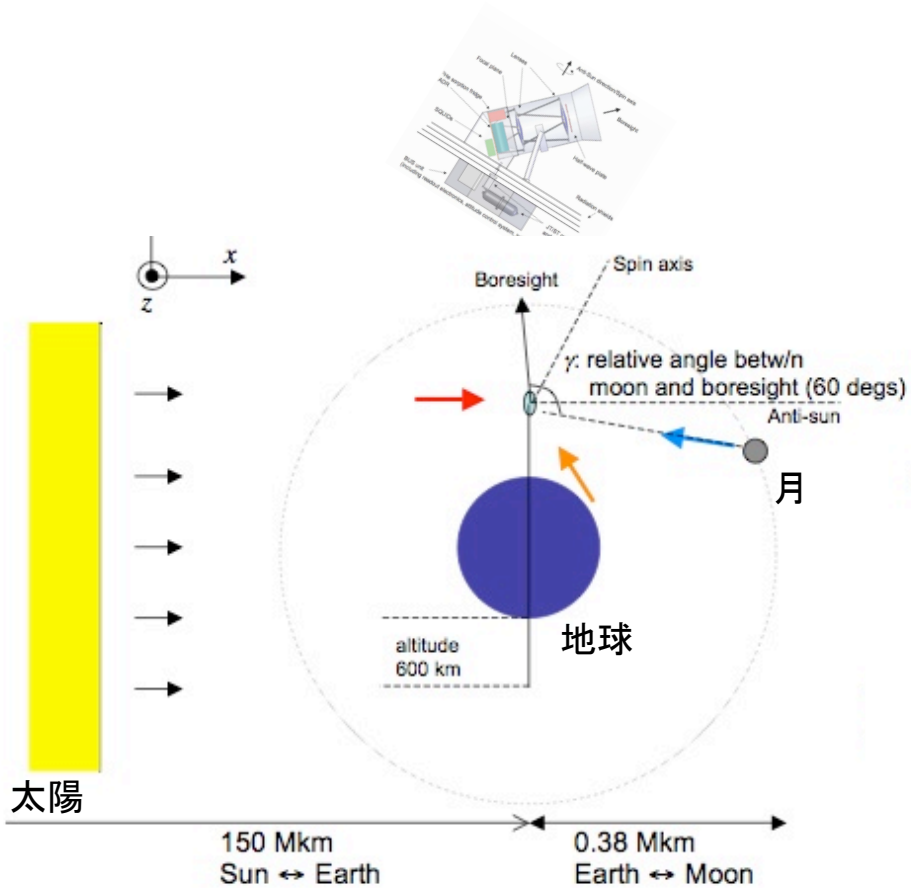
Planckのクロスリンク

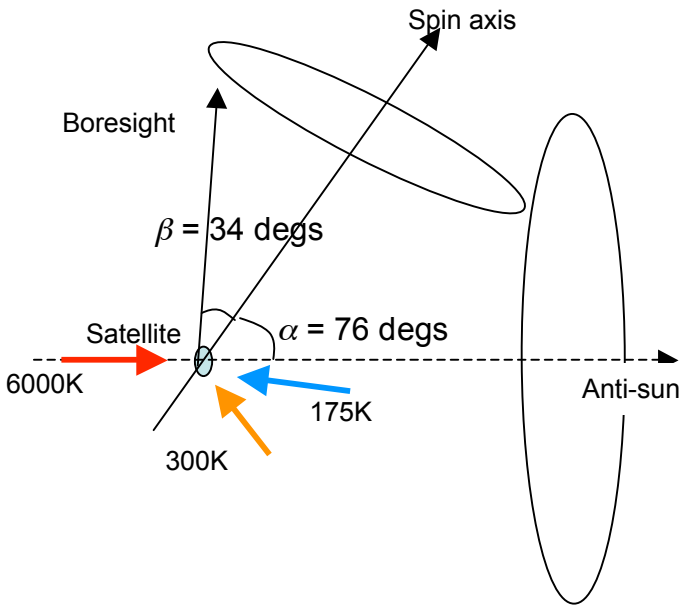


地球周回軌道

COBE衛星のような軌道にて偏光のためのスキャンを考えてみる





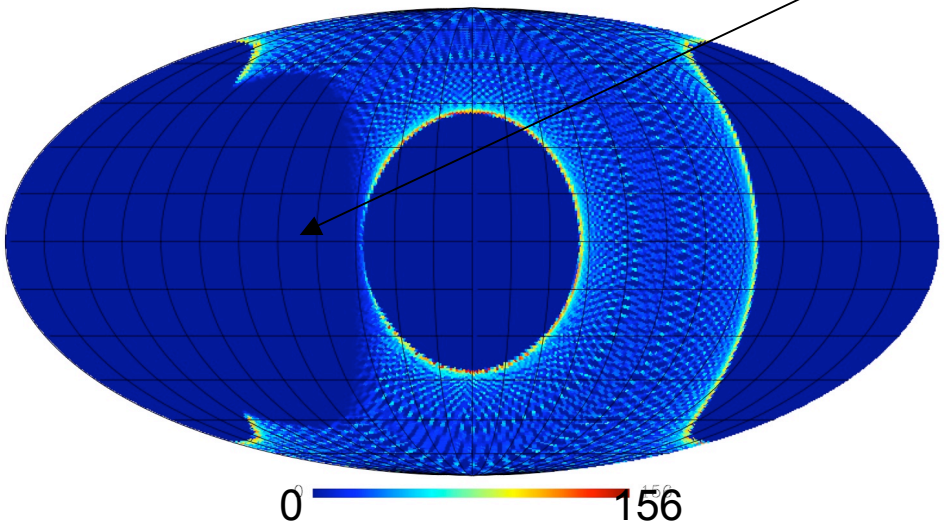


地球周回軌道

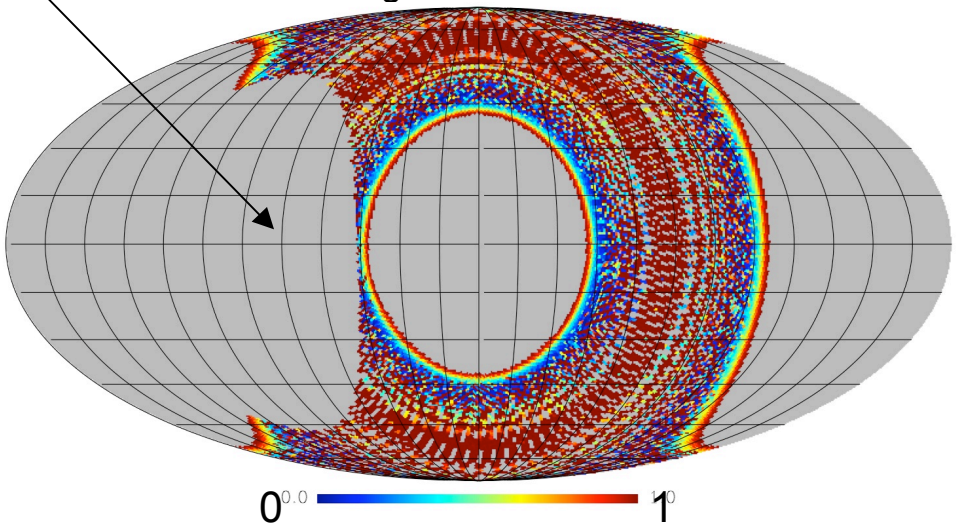
LEO scan ver1: 1 day

月が視野＜60°によるデータの削除

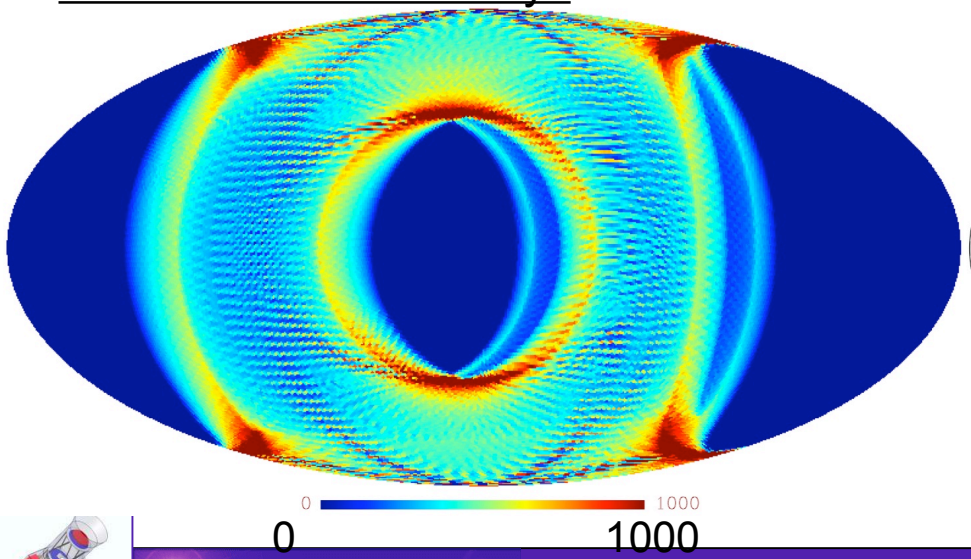
Nhits

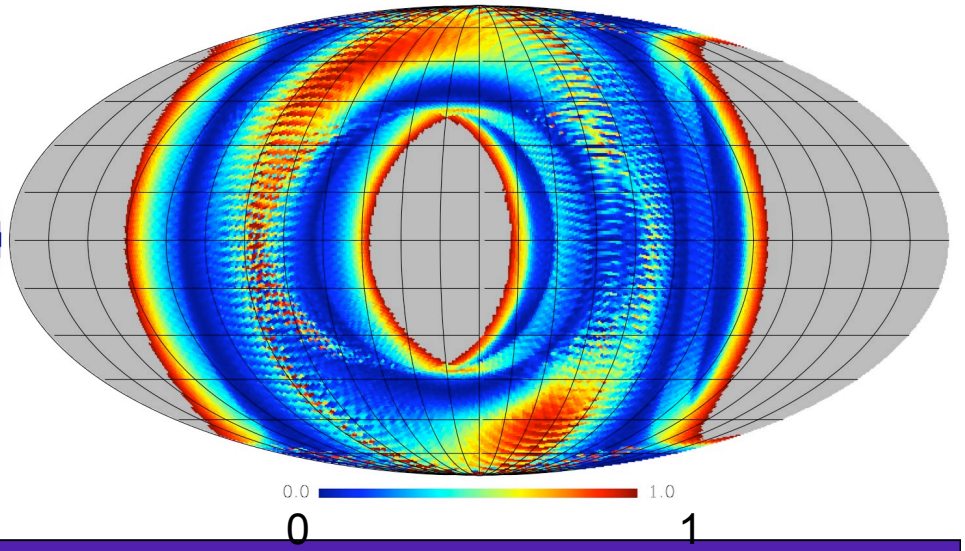


Angular Cross link



LEO scan ver1: 30 days



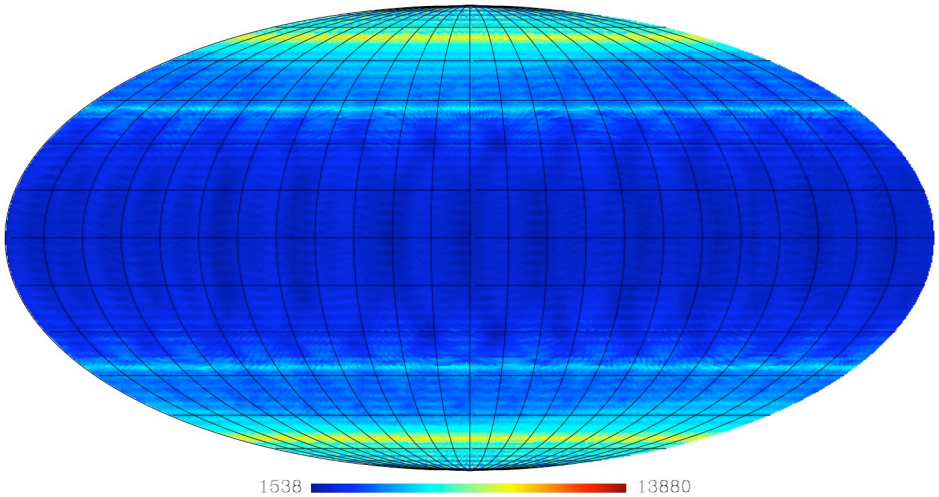


地球周回軌道

LEO scan ver1: 1 year

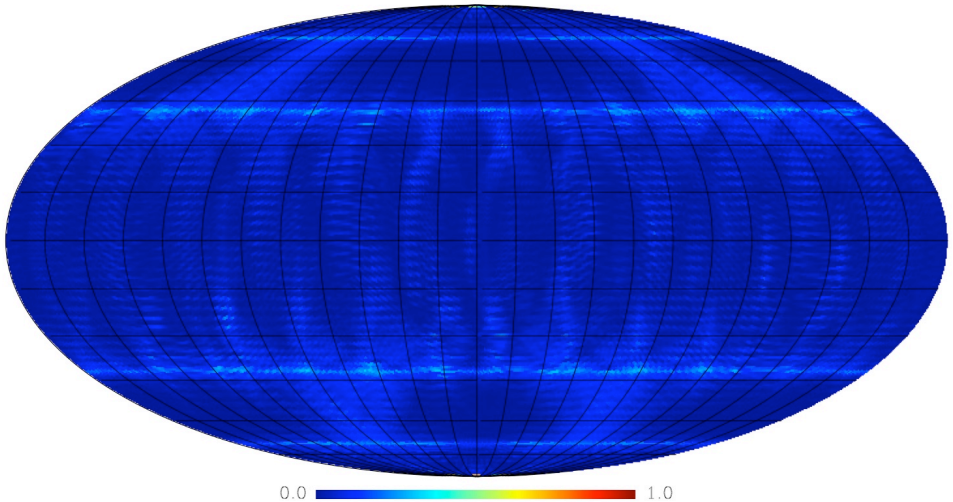
Ecliptic coordinate

Nhits



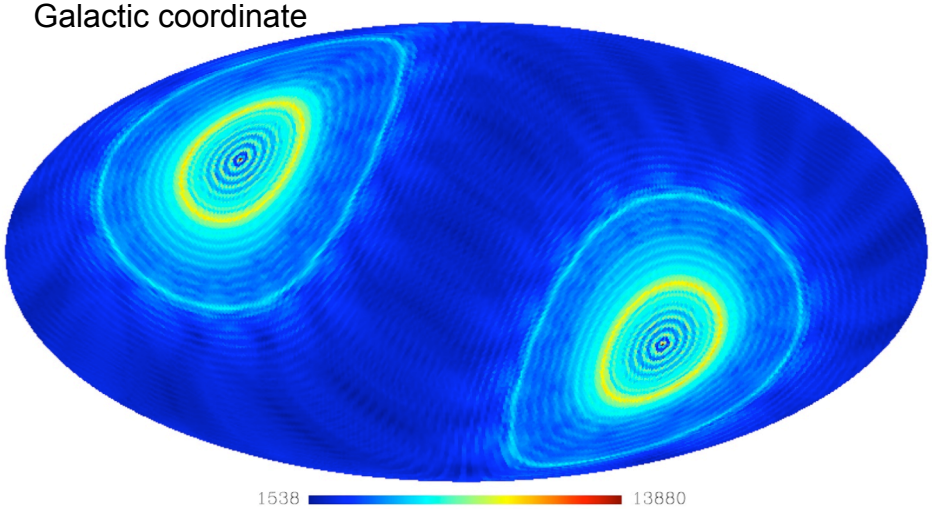
1538 13880

Angular Cross link

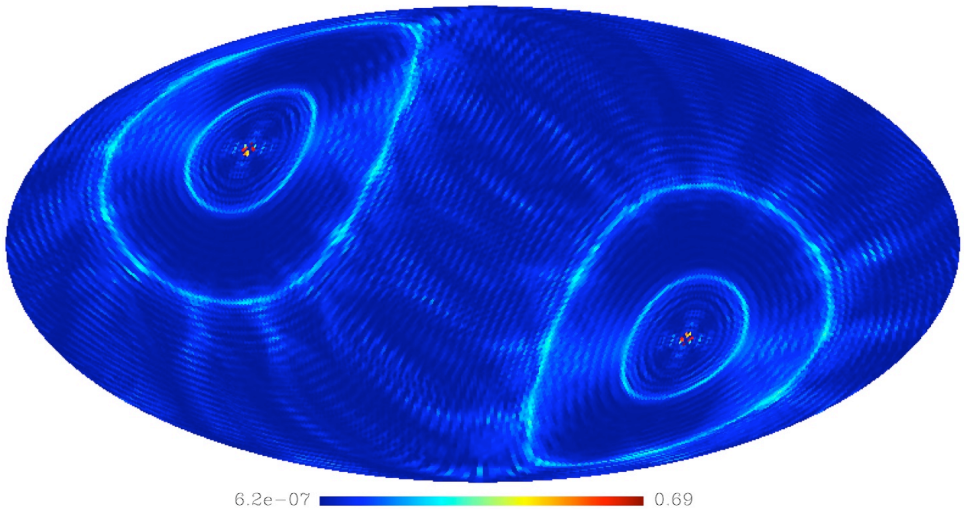


0 1

Galactic coordinate

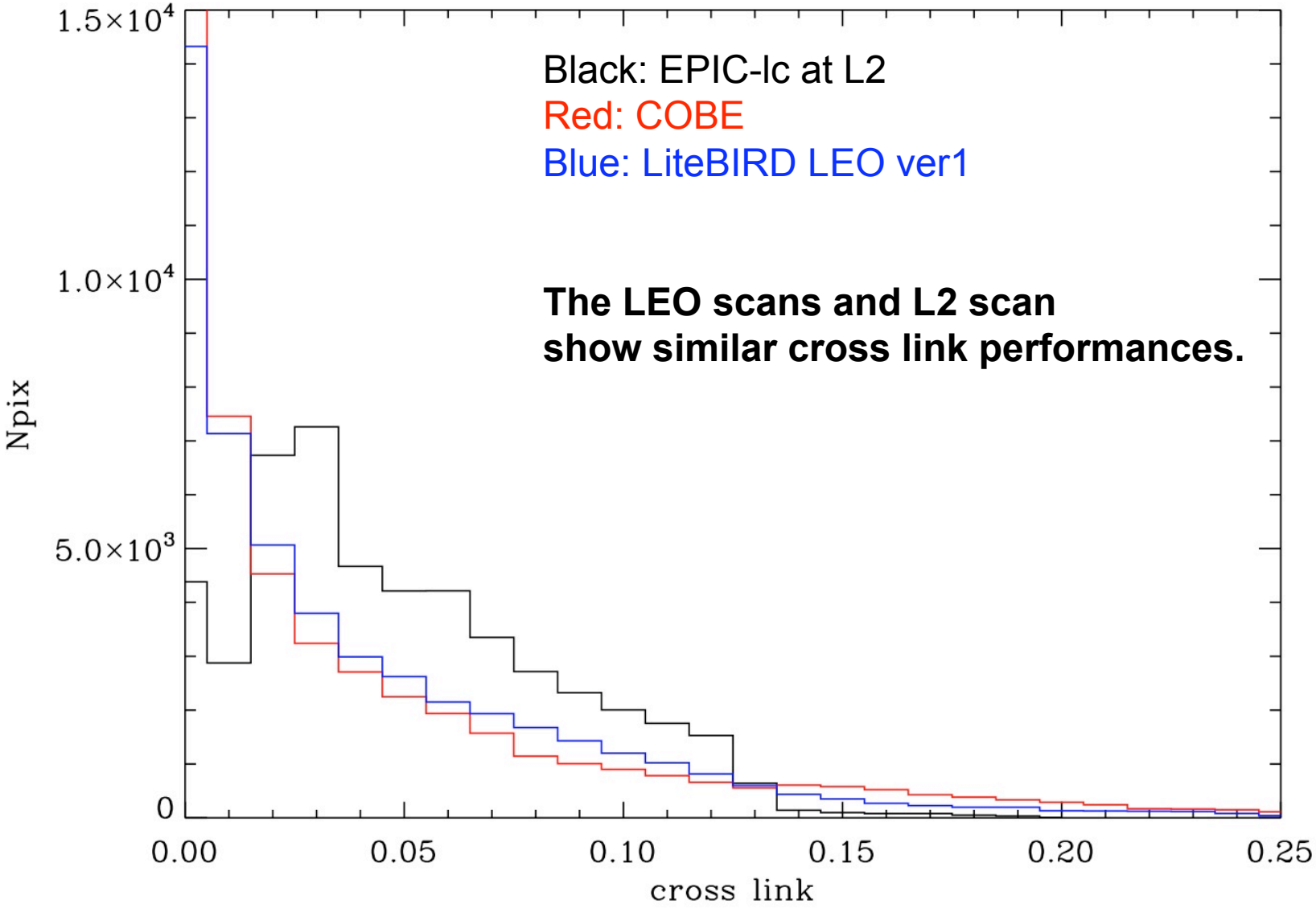


1538 13880



6e-7 .69

クロスリ

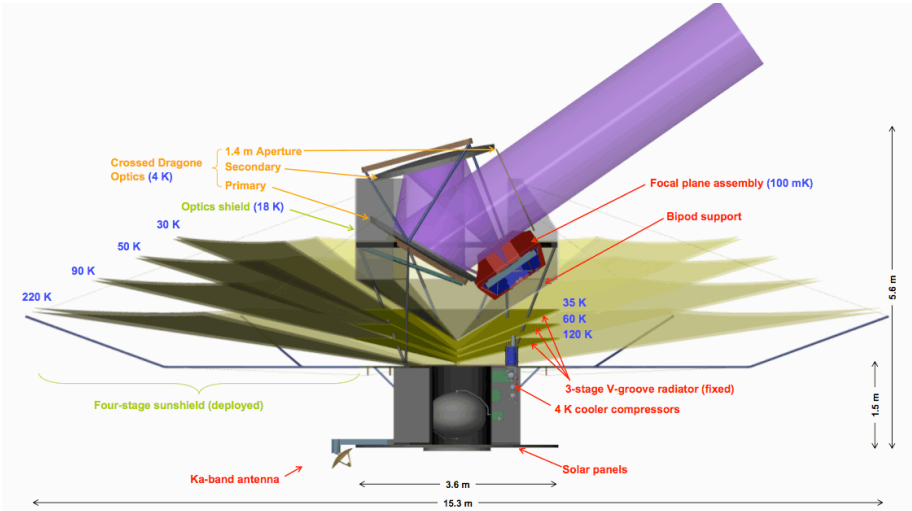

Black: EPIC-Ic at L2
Red: COBE
Blue: LiteBIRD LEO ver1
The LEO scans and L2 scan
show similar cross link performances.
1.5×10^4
1.0×10^4
5.0×10^3
0
Npix
0.00
0.05
0.10
0.15
0.20
0.25
cross link

ンクの比較

海外のCMB衛星計画動向

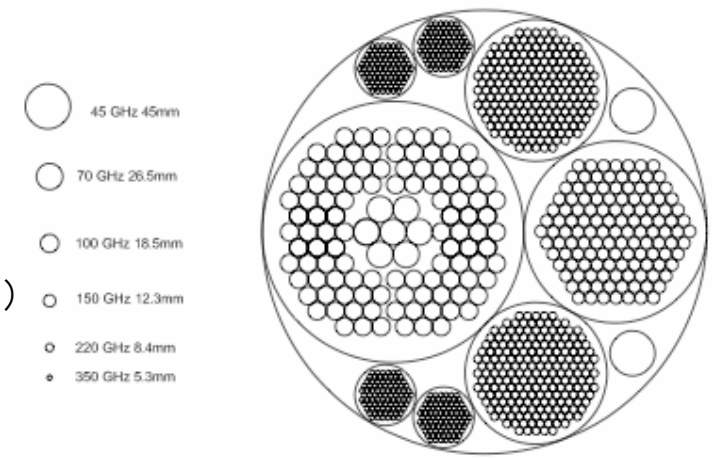
EPIC-IM

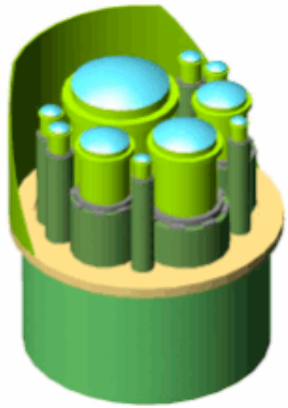
質量： ~2000 kg
帯域： 30 - 850 GHz
角度分解能： 28−1 arcmin
焦点面サイズ： 1.5 m × 1 m
場所： L2
打ち上げ時期： 2020年以降（？）



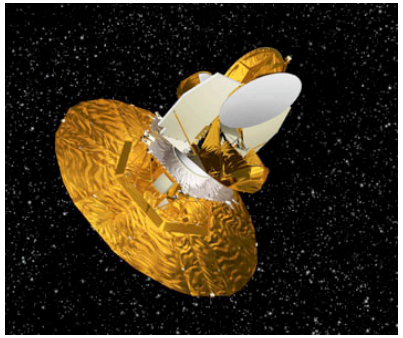
B-POL

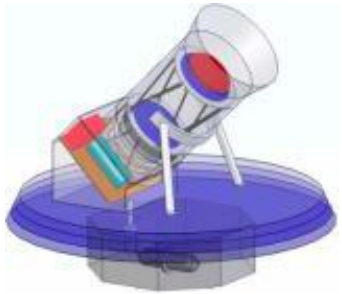
質量： 164 kg
帯域： 45 - 353 GHz
角度分解能： 15°−40 arcmin
サイズ： 2 m × 1 m
場所： L2
打ち上げ時期： プランクが
落ち着いてから（？）
2015−2025年

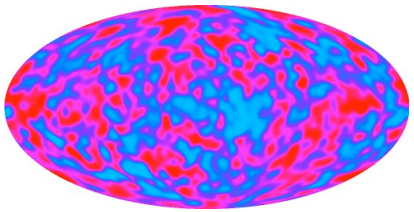
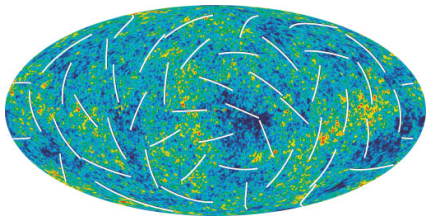
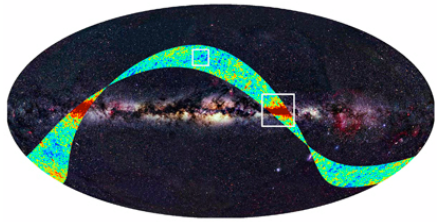




CMB分野での衛星計画

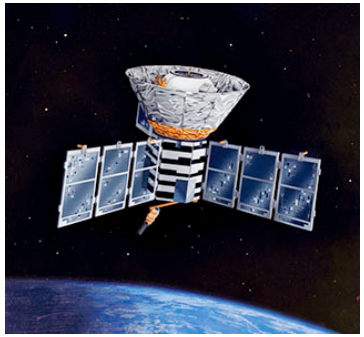



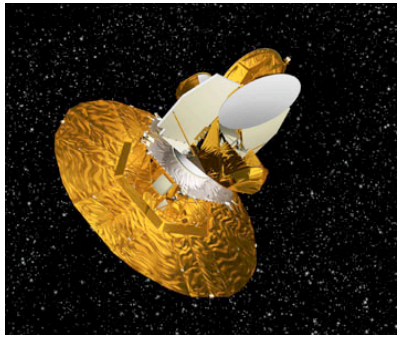


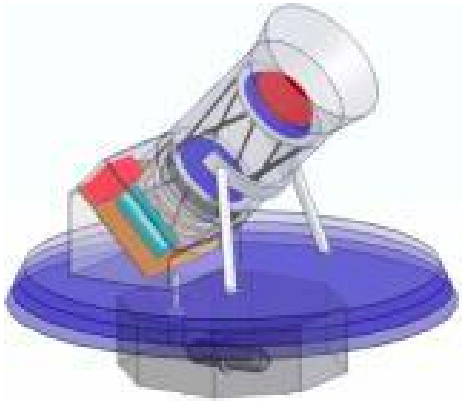




	COBE (1989)	WMAP (2001)	Planck (2009)	**LiteBIRD** (2018)
周波数帯	32−90GHz	23−94GHz	30−857GHz（353GHz）	60−250 GHz
検出器	6 radiometers	20 radiometers	11 radiometers + 52 bolometers	O ~ 2000
角度分解能	~7°	~0.22°	~0．1°	30 arcmin
軌道	地球周回軌道	L2	L2	L2 *vs 地球周回*

まとめ



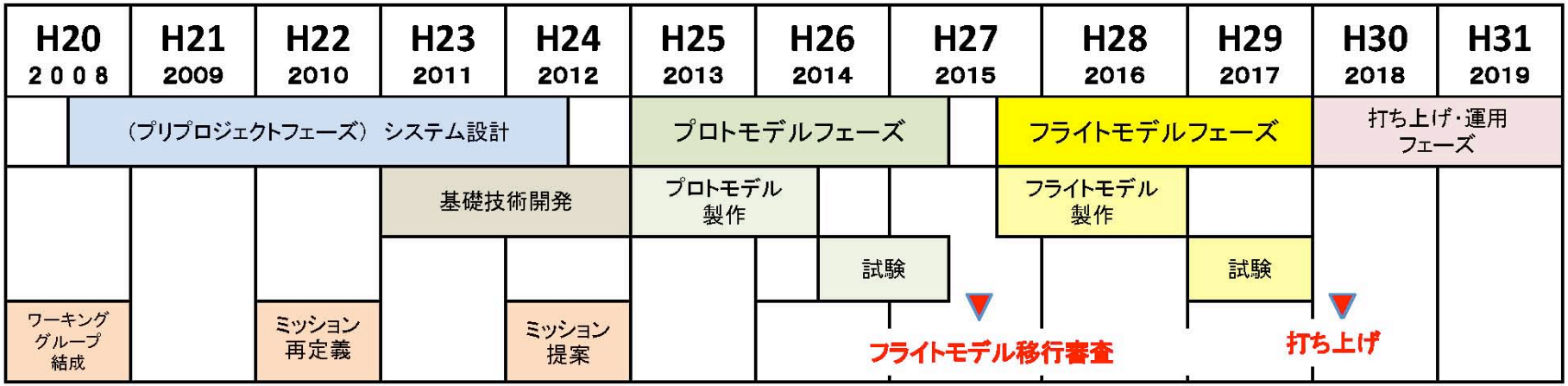




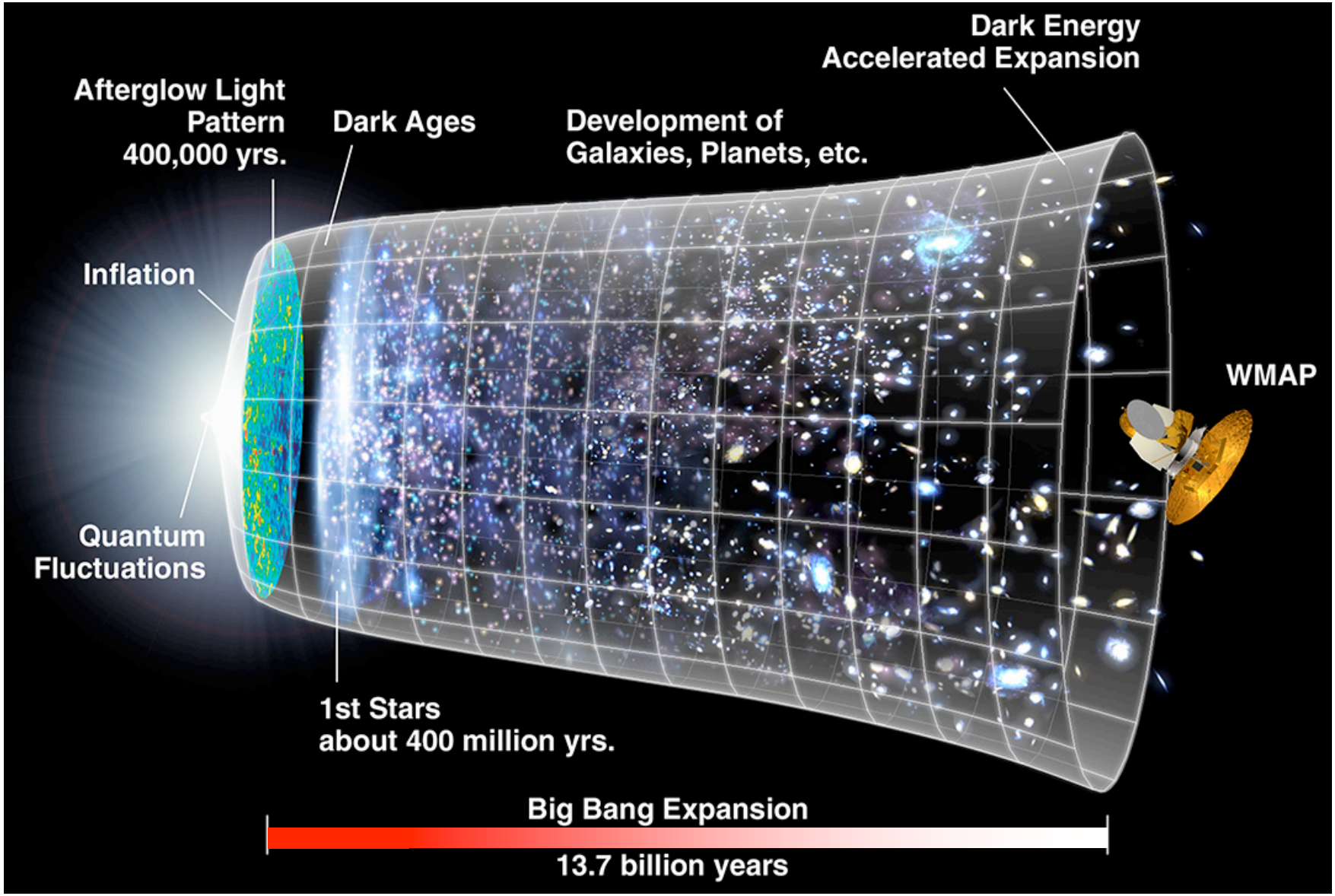
COBE (1989) → WMAP (2001) → Planck (2009) → **LiteBIRD** (2018)

- LiteBIRDはインフレーションによるB-modeスペクトルを観測する。（インフレーション、原始重力波、宇宙再電離、重力レンズ）
- コンパクトな望遠鏡を用い、小型衛星への搭載を目標。

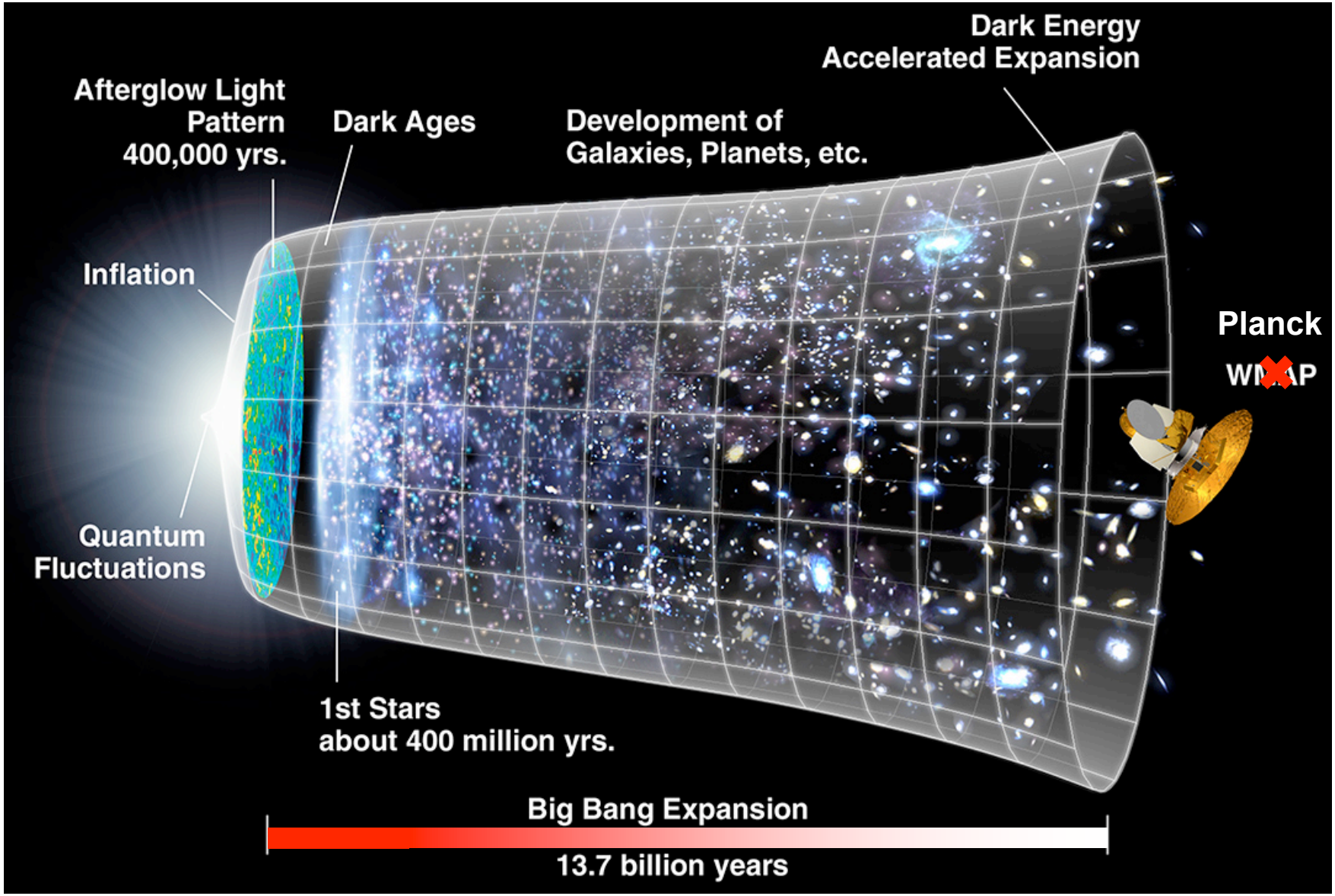
アメリカの次世代CMB衛星は2018年以降



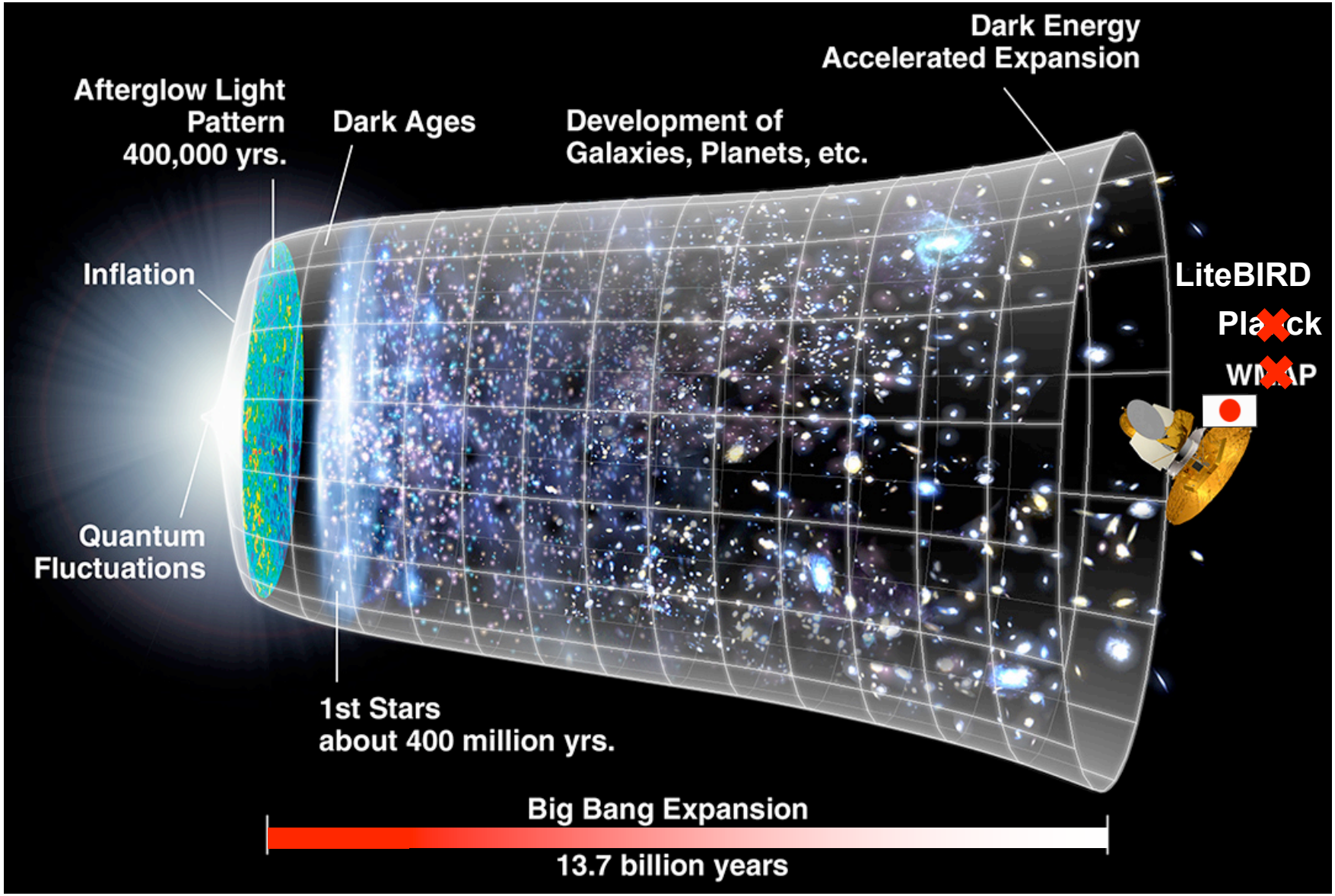
最後に


Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

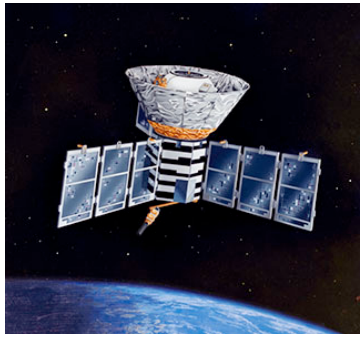
最後に

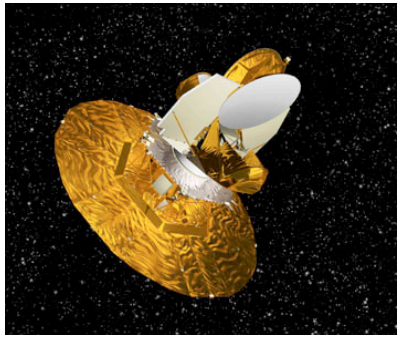

Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
Planck
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

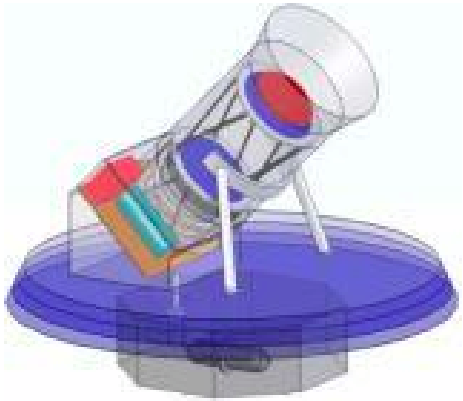
最後に


Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
LiteBIRD
Planck
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years

まとめ







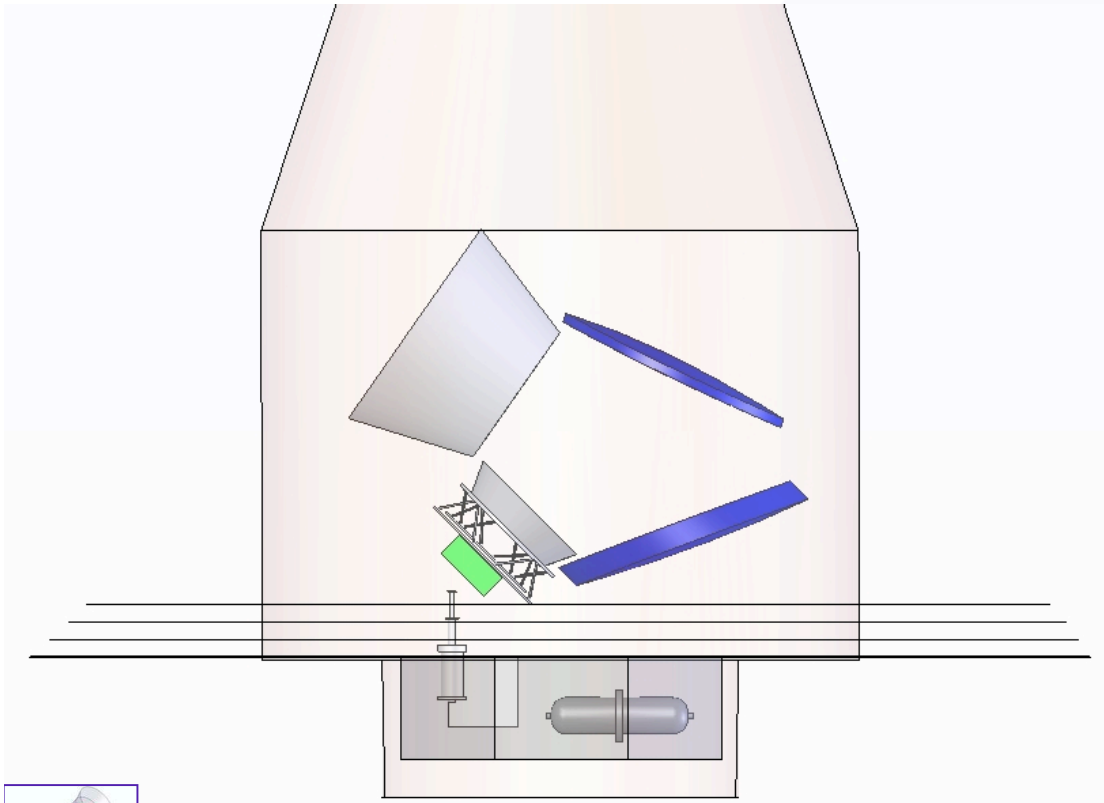
COBE (1989) → WMAP (2001) → Planck (2009) → **LiteBIRD** (2018)

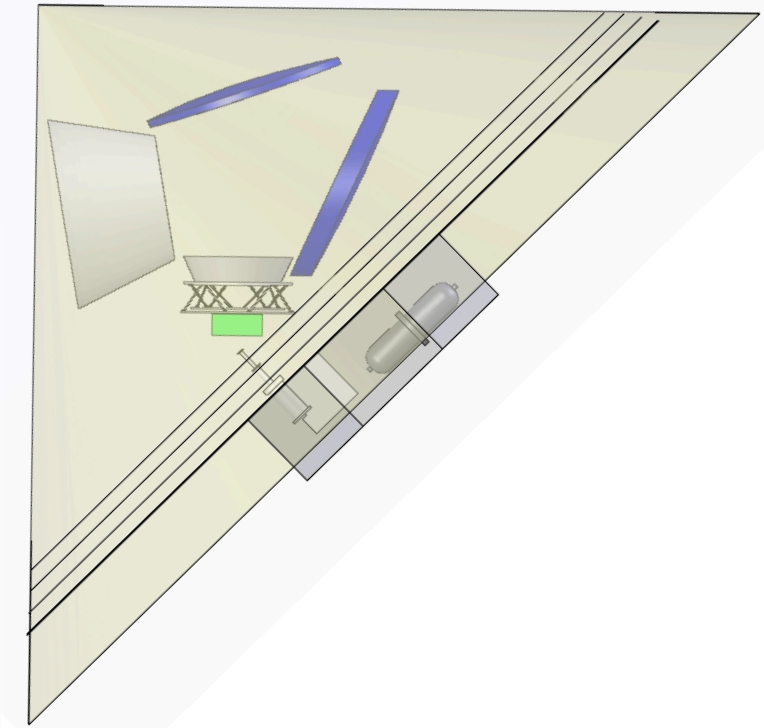
- LiteBIRDはインフレーションによるB-modeスペクトルを観測する。
  （インフレーション、原始重力波、宇宙再電離、重力レンズ）
- コンパクトな望遠鏡を用い、小型衛星への搭載を目標。

アメリカの次世代衛星は2018年以降

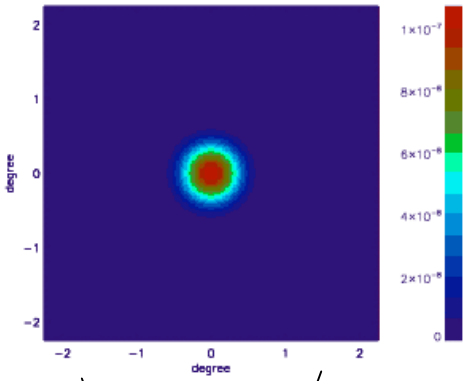
H20 2008	H21 2009	H22 2010	H23 2011	H24 2012	H25 2013	H26 2014	H27 2015	H28 2016	H29 2017	H30 2018	H31 2019
（プリプロジェクトフェーズ） システム設計					プロトモデルフェーズ			フライトモデルフェーズ		打ち上げ・運用フェーズ	
			基礎技術開発		プロトモデル製作			フライトモデル製作			
							試験		試験		
ワーキンググループ結成		ミッション再定義		ミッション提案			フライトモデル移行審査			打ち上げ	

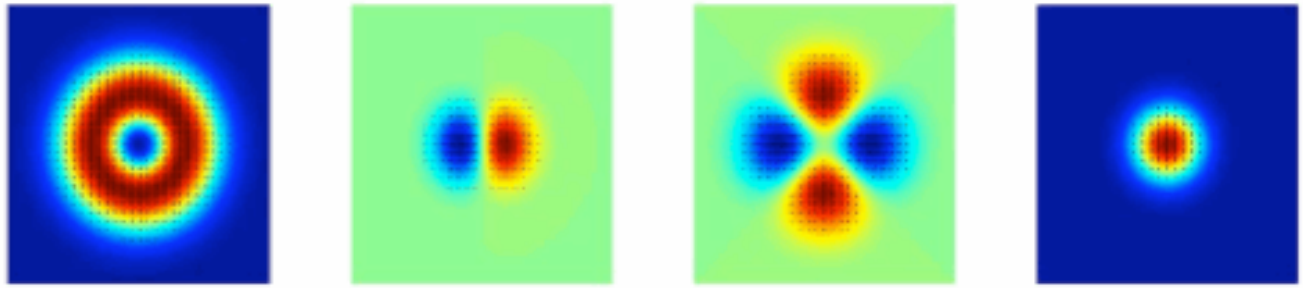
Beam characterization



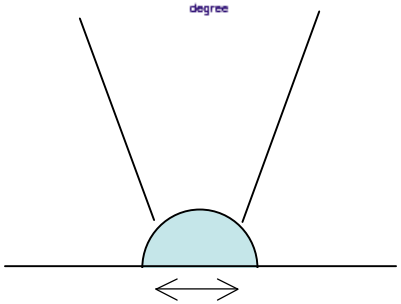


Beam characterization





From Shimon et al.



Systematic Error	Description	Azimuthal Symmetry	Potential Effect
Main Beam Effects – Instrumental Polarization			
Δ Beam Size	$FWHM_E \neq FWHM_H$	Monopole: spin 0	$T \rightarrow B$
Δ Gain	Mismatched gains, Mismatched coatings	Monopole: spin 0	$T \rightarrow B$
Δ Beam Offset	Pointing E ≠ Pointing H	Dipole: spin 1	$\nabla T \rightarrow B$
Δ Ellipticity	$e_E \neq e_H$	Quadrupole: spin 2	$\nabla^2 T \rightarrow B$
Satellite Pointing	Q and U beams offset	Complex	$\nabla T \rightarrow B, E \rightarrow B$

From EPIC report Bock et al.

必要とされている系統誤差範囲以内のビームの特性を得られるか？

光学系シミュレーション → yes

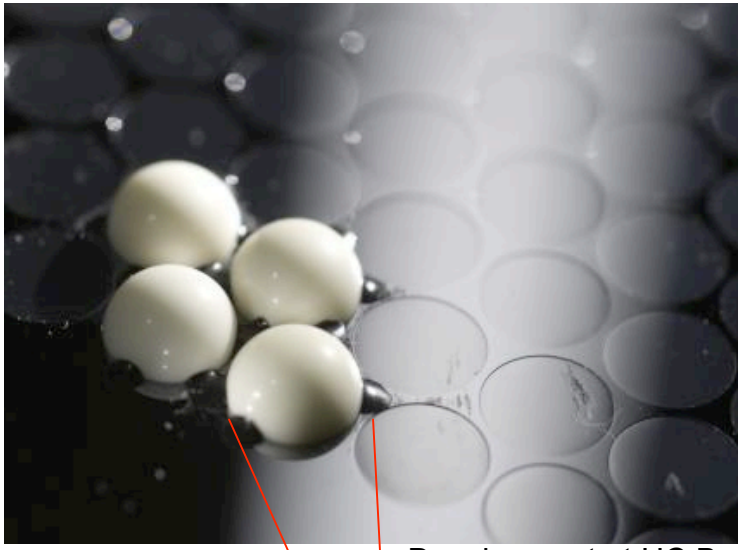
メインビーム： 現実的なレンズの品質や反射防止膜
サイドローブ：

1/2波長板を使う事によりビームの差分を減らす。

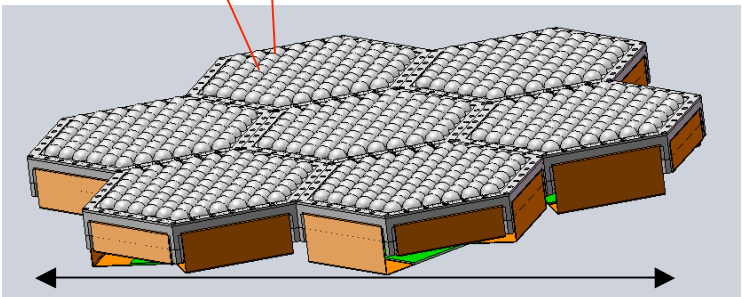
→ BICEP、QUITE、EBEX、PolarBear

Focal plane

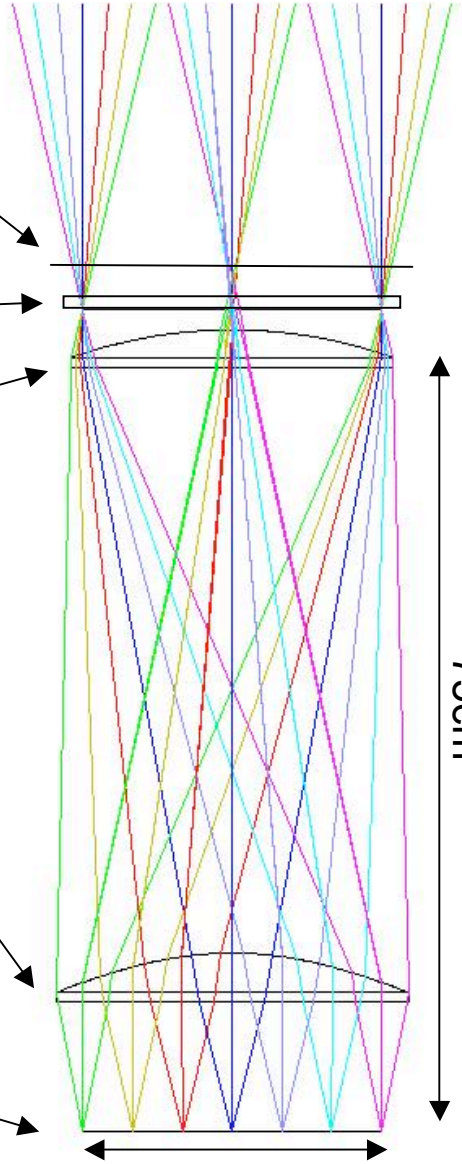
•検出器はAl STJかTESボロメターを用いたアンテナ結合型を仮定。



Development at UC Berkeley



焦点面 直径 = 30cm



Optics telescope

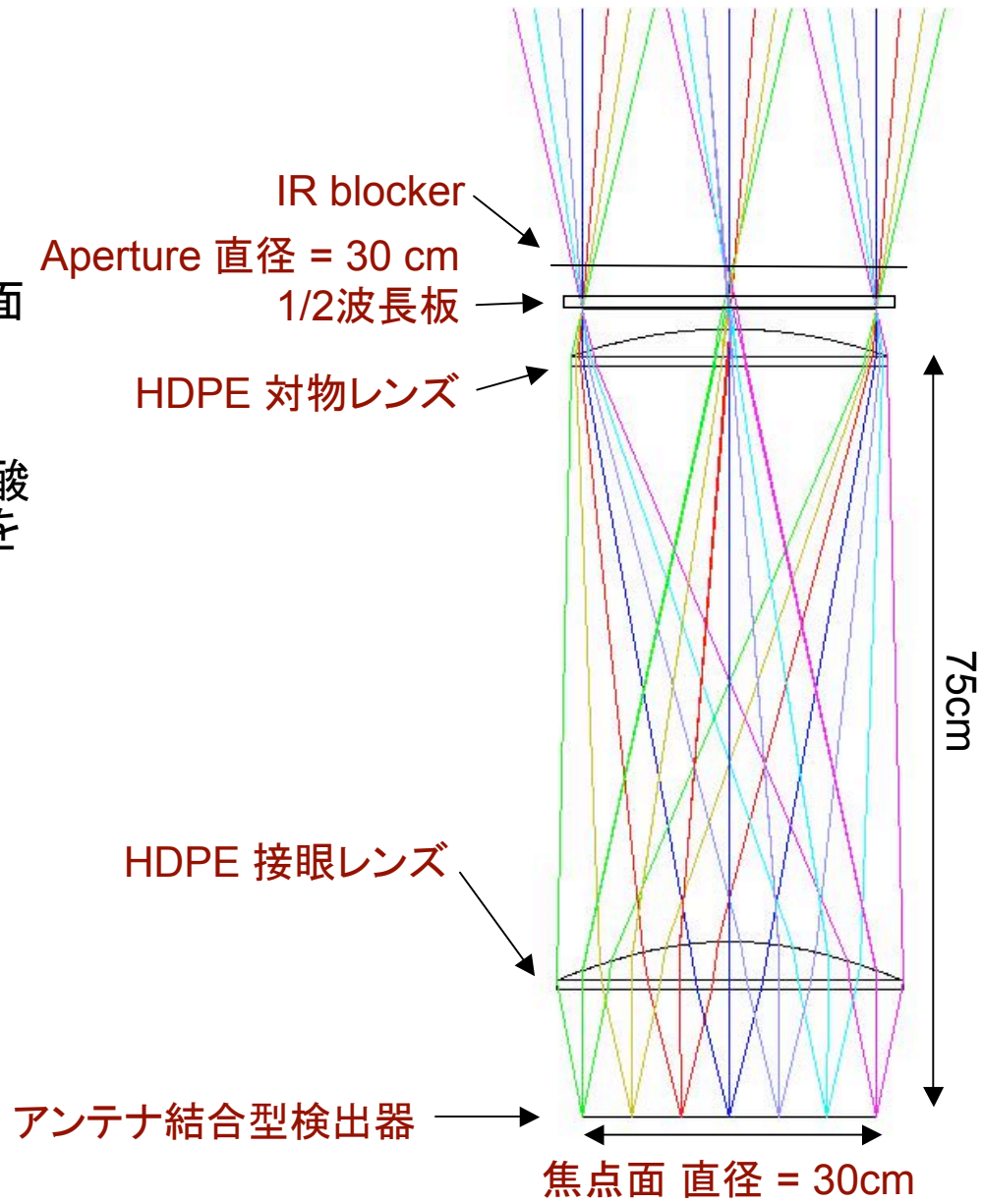
Zemaxを使った光学デザイン。

- 光軸対称の屈折望遠鏡
- 視野： 30°×30°
- Strehl ratio > 0.8（回折限界）を平面焦点面全域 @ 300GHzで実現。
- レンズ： 高密度ポリエチレン
  （高密度ポリエチレンの放射耐性、酸化への影響によってはSiレンズを用いる。）

- 光学系の温度は2Kに保つ

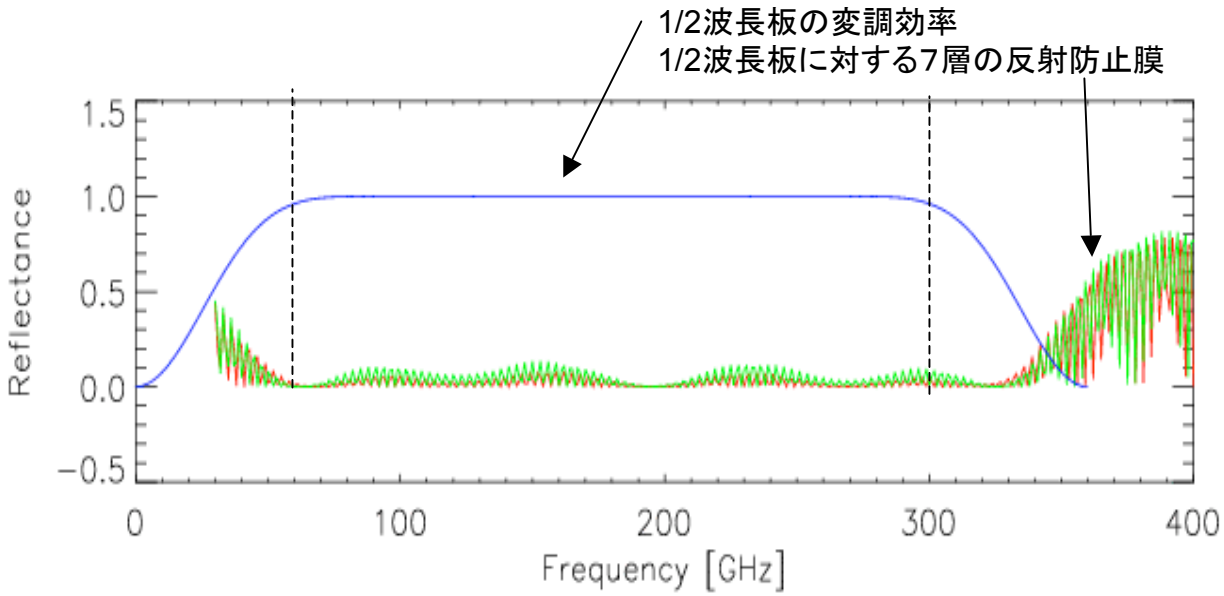
- 1/2波長板を用いた偏光変調
  - 偏光角度を回転

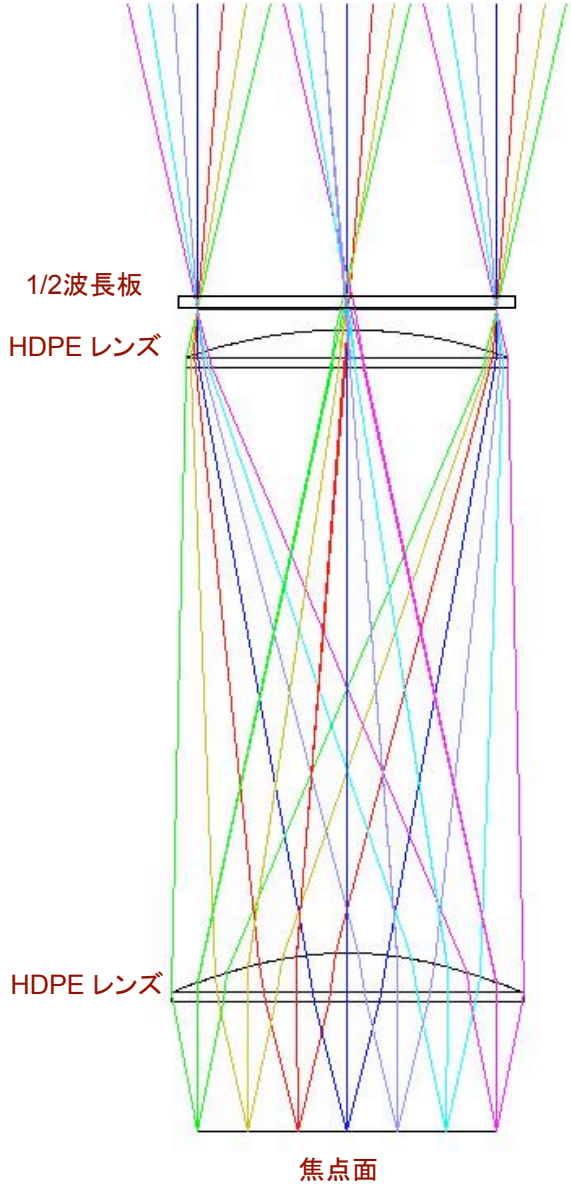
- メインビームの系統誤差
- サイドローブをコントロールする



Broadband coverage

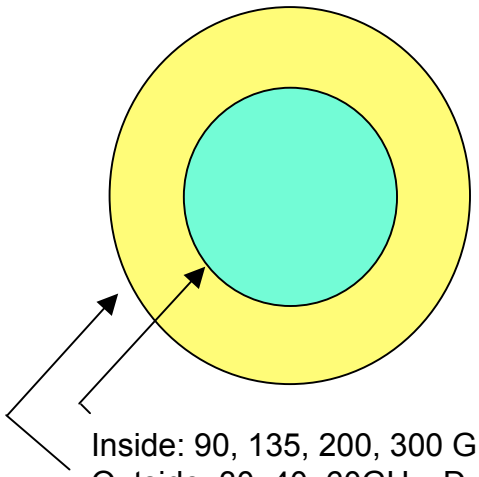
- 周波数の帯域幅
  - 1/2波長板の変調効率
  - レンズ及び1/2波長板（n〜3のサファイア）の反射防止膜の帯域





Foreground and focal plane real estate

- 前景放射を差し引くために必要な周波数帯域は？
  - バンド数
  - バンドの位置
  - 各バンドの感度



CMB-pol, EPIC-LCの例

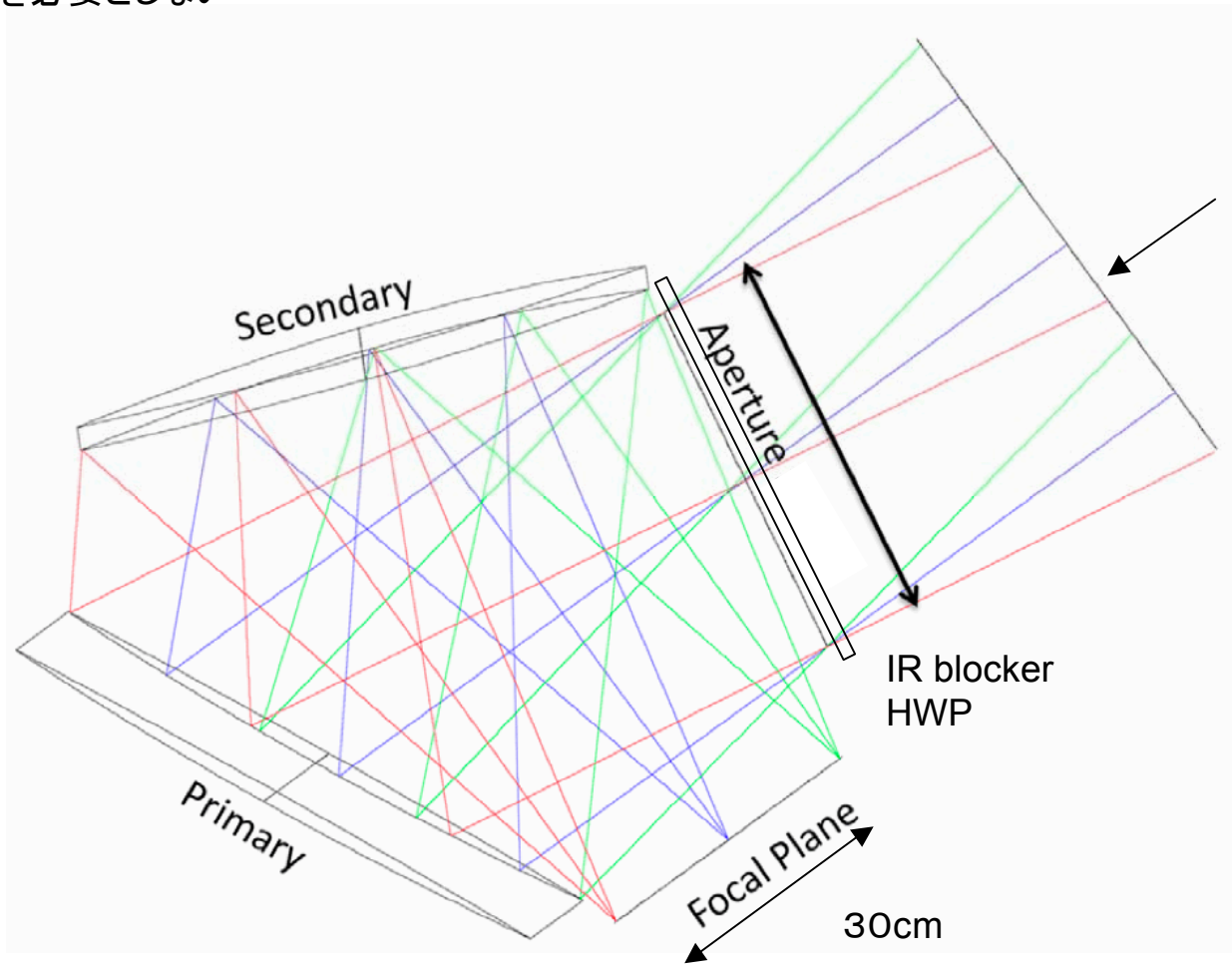
Freq (GHz)	Beam (arcmin)	N_{det}	NET (μK√s)	$w_p^{-0.5}$ (μK-arcmin)
30	155	8	80	87
40	116	54	71	29
60	77	128	60	16
90	52	512	52	7.0
135	34	512	49	6.6
200	23	576	54	6.9
300	16	576	92	12
total		2366		3.6

Reflective telescope

反射型望遠鏡

+ レンズなし ⇔ 反射防止膜を必要としない
+ コンパクト

- 光軸非対称
- アパチャーの位置とサイズ
- far sidelobe

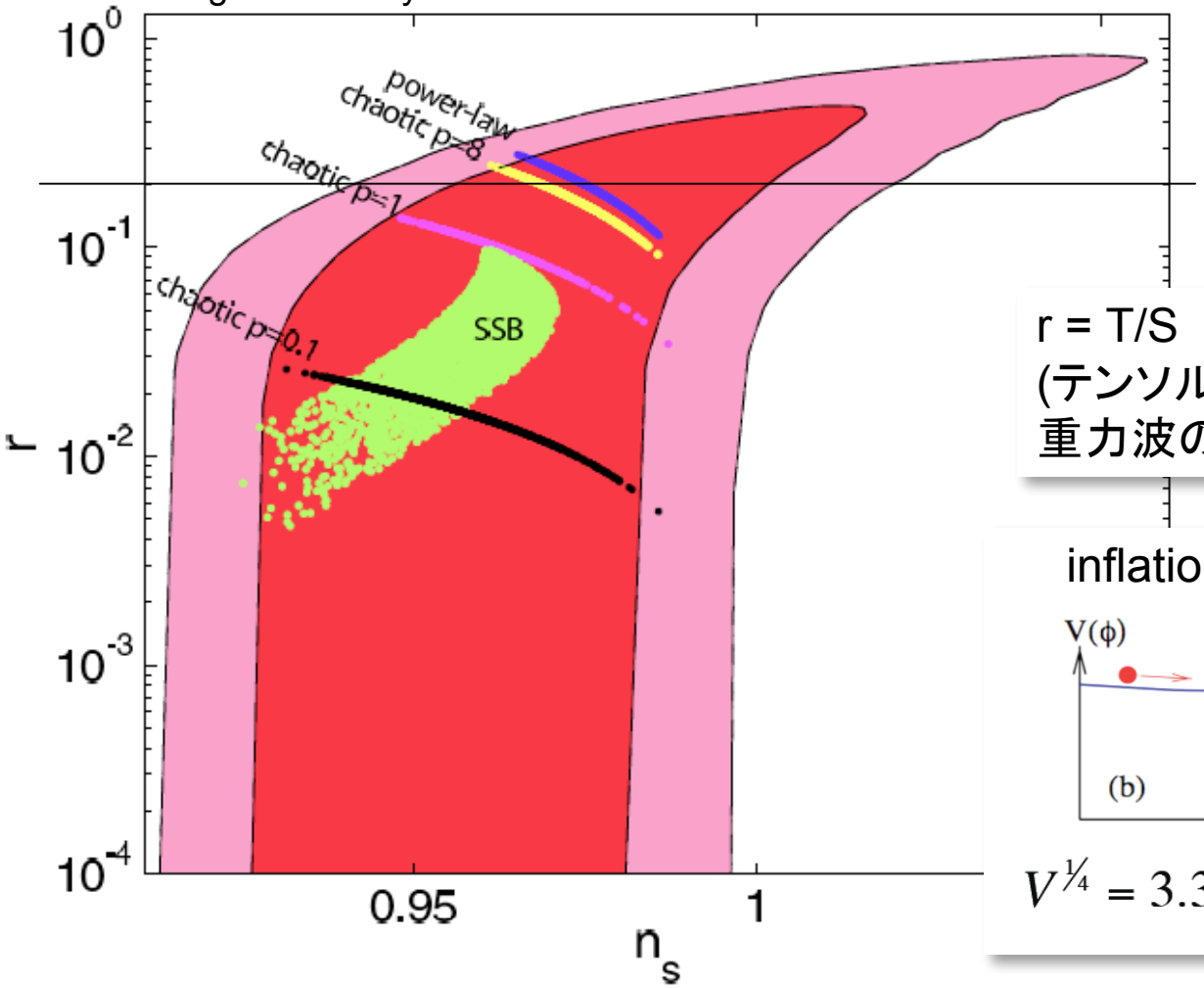


From "Study of the Experimental Probe of Inflationary Cosmology - Intermediate Mission for NASA's Einstein Inflation Probe "

Science goals

Search for r=O(0.01) is well motivated
Search for r=O(0.001) is comprehensive

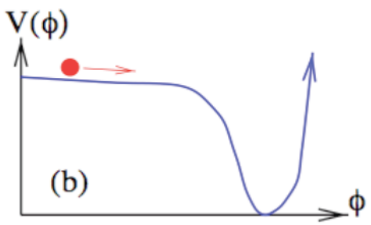
Pagano-Cooray-Melchiorri-Kamionkowski 2007



Current
upper limit

r = T/S
(テンソル・スカラー比)
重力波の相対的な大きさ)

inflation potential

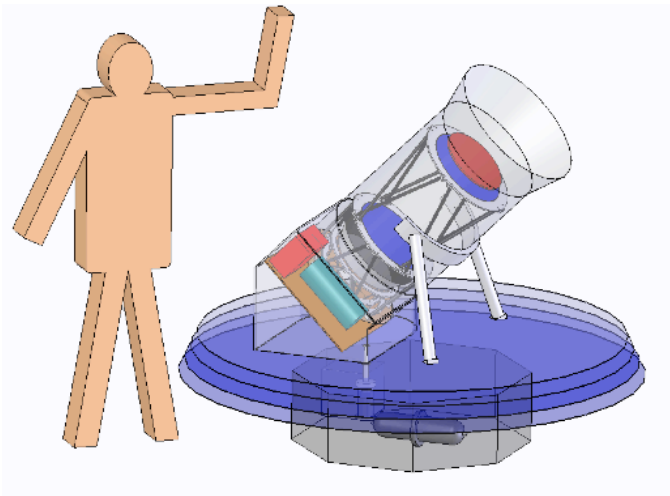


$$V^{1/4} = 3.3 \times 10^{16} \times r^{1/4}\ \mathrm{GeV}$$

LiteBIRD

Lite (light) Satellite for the studies of **B**-mode polarization and **I**nflation from cosmic background **R**adiation **D**etection

- 目的： CMBのB-modeの偏光観測
- サイエンス： インフレーションのエネルギースケール、原始重力波の観測、宇宙再電離
- プラットフォーム： 小型科学衛星
  2008年9月JAXA小型科学衛星WGとして承認



Power and weight guesstimation for near-earth orbit option

Mission part	Weight(kg)	Power (W)
Focal plane (detector,optics)	60	
Mission part electronics (for detector)	20	100
Baffle, structure	40	
Cryo-harness	5	
Sub-Kelvin refrigerator (ADR)	20	20
2K refrigerator (JT+starling)	30	160
Total for mission part	175	280
Bus part	**Weight(kg)**	**Power (W)**
Structure, thermal control, etc.	50	30
Solar panel, electronics	30	20
Data acquisition, telemetry	20	60
Attitude control (AC)	50	100
Total for bus part	150	210
Total (mission + bus)	**325**	**490**

LiteBIRD Specifications

Item	Specification
Lifetime	> 2 years (5 years for the mission part)
Orbit	S-E L2, or near-earth sun-synchronous orbit
AC	< 5 arcmin (i.e. < 1/10 x beamsize)
Telemetry	2Mbps
Weight	Mission part < 200kg, total < 400kg
Power	Mission part < 200W, total < 500W
Cooling	100mK w/ SPICA-type JT+starling (+ He3 sorption) + ADR
Focal plane	Superconducting detector (TES or STJ)
Sensitivity	Total NET < 1μK$\sqrt{s}$
Frequencies	90GHz and 150GHz with a sufficient number of pixels and angular resolution (< 1 deg), + 45GHz + 300GHz as much as possible
Modulation	Satellite rotation + more modulation methods

Foreground and focal plane real estate

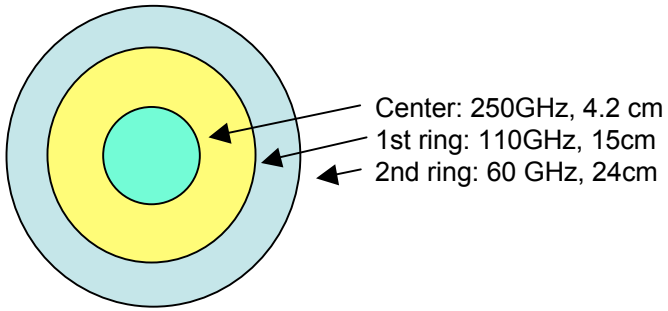
- 限られた焦点面サイズに検出器（N >1000）に置く

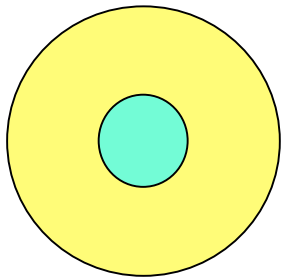
⇓

Multi-chroicアンテナを用いた検出器は一つのピクセルで複数の周波数を観測できる。

From A. Lee (UC Berkeley)

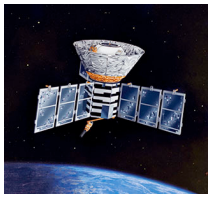
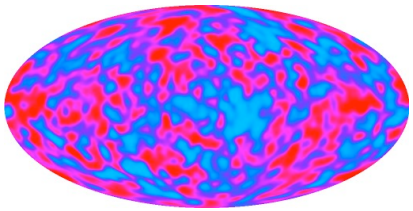
Freq（GHz）	Beam (arcmin)	N_{det}	NET (μK√s)	$w_p^{-0.5}$ (μK-arcmin)
60	60	400	38	3.5
110	36	600	34	3.2
250	18	200	110	10.1
total	-	1200	-	2.3



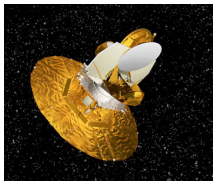
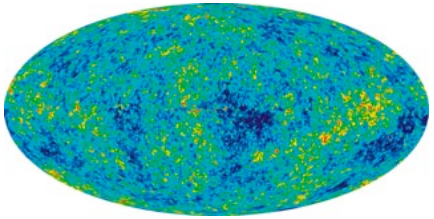


Center: 250GHz, D=4.2 cm
1st ring: 60 + 110GHz, D=20cm

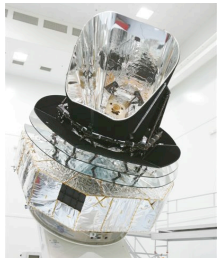
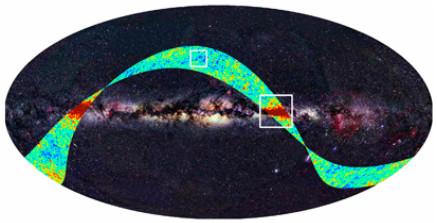
サイエンスの目的

温度揺らぎの発見
CMBスペクトルの詳細観測

温度揺らぎの詳細観測
偏光揺らぎの観測

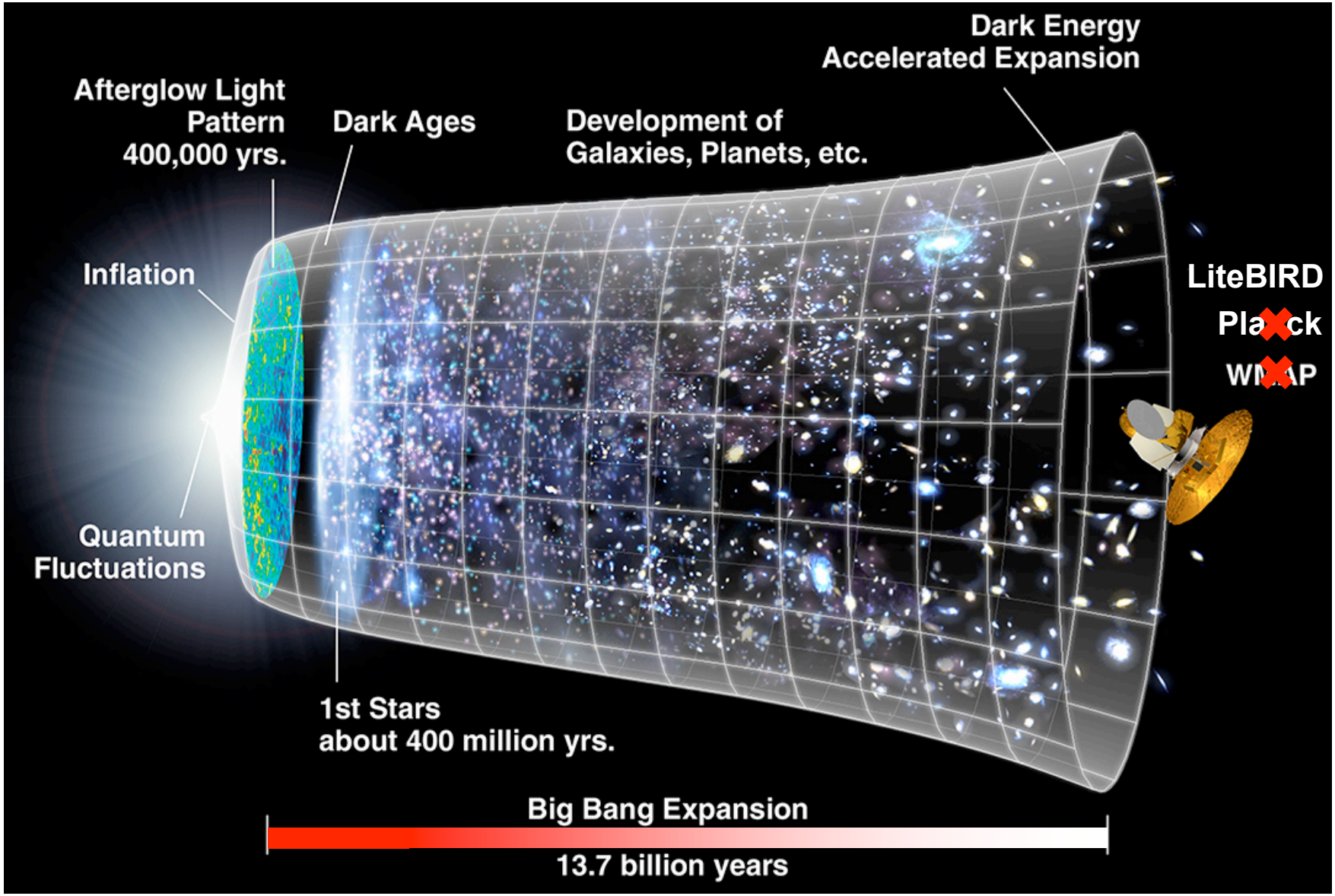



温度揺らぎをビームサイズ（10 arcmin）できれいに見る
偏光揺らぎ（E-mode）の詳細観測

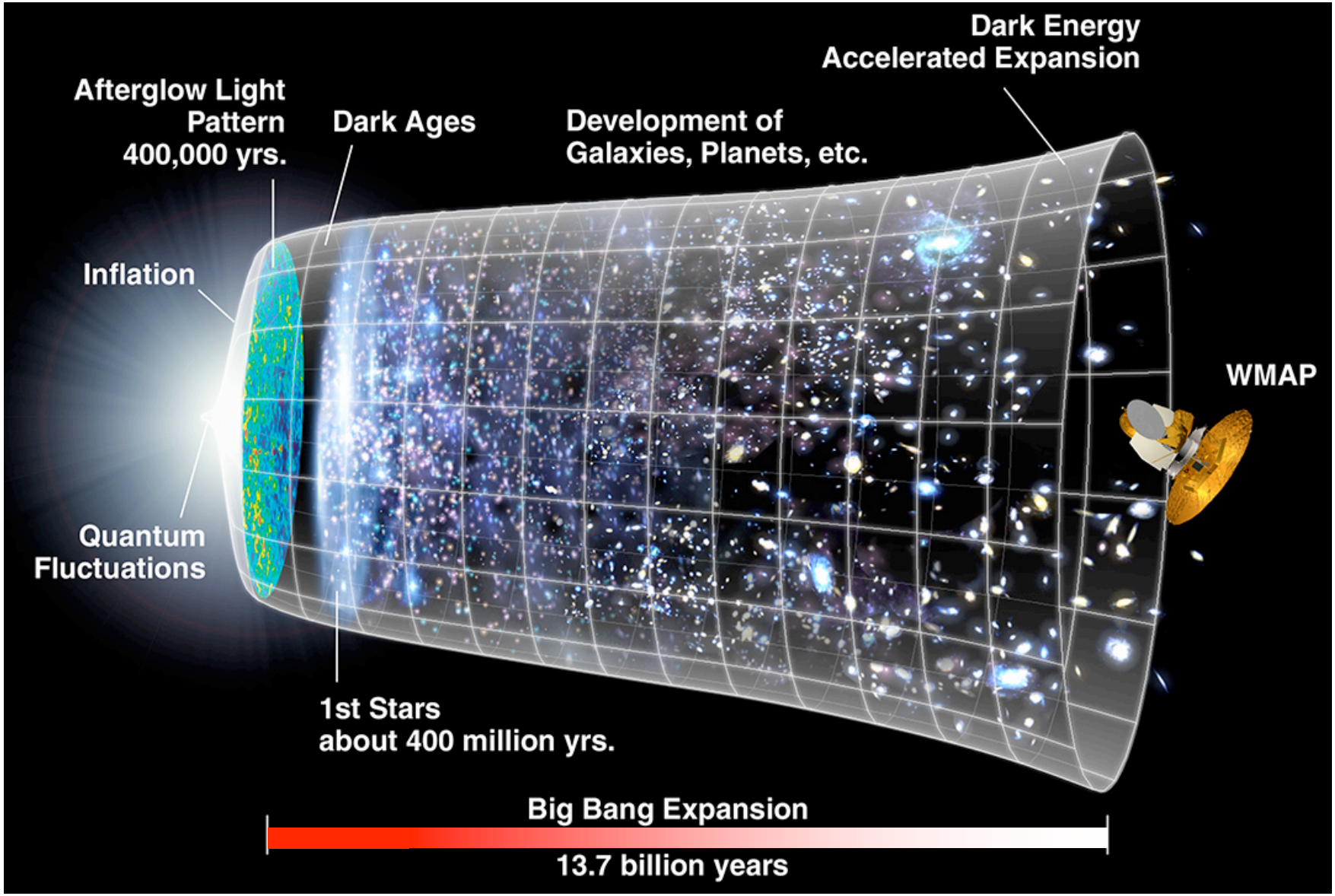
次世代CMB衛星計画

<u>インフレーションの実験的検証</u>
原始重力波による偏光揺らぎ（primordial B-mode）の
詳細観測

Introduction



Introduction



Introduction