



Taking the Universe's Baby Picture

宇宙誕生時の写真を撮る

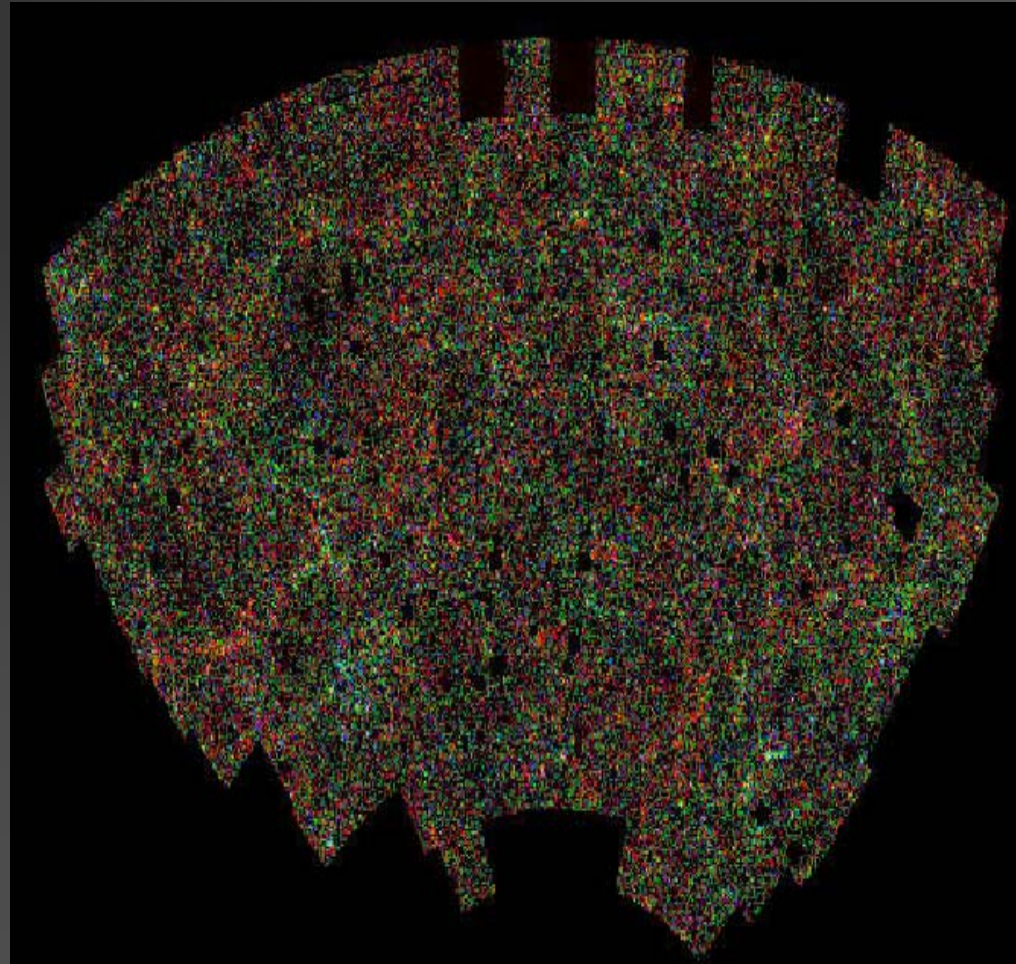
David Spergel
デイビッド スパーゲル
Princeton University
プリンストン大学

The Big Bang Model

ビッグバンモデル

約20億光年以内にある
100万個の銀河の天球分布

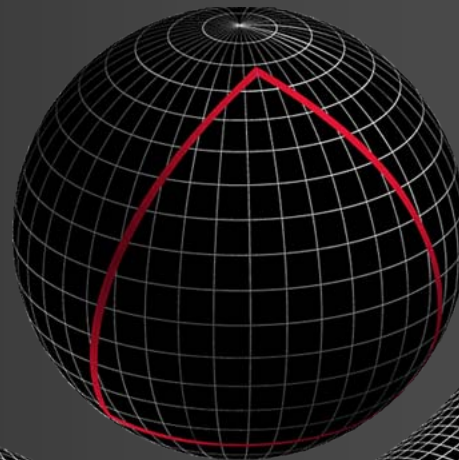
- 2つの理論的基礎
- 一般相対論
 - 物質が空間の幾何学を決める
 - 空間の曲率が物質がどう運動すべきかを教える
 - 空間は絶対的なものではなく、2点間の相対的な距離によって定義される
- 宇宙の一様等方性



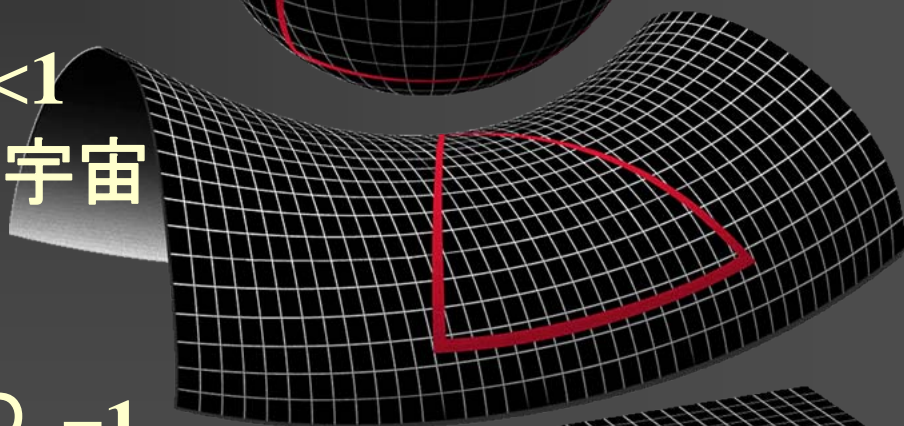
Mass Density/Geometry of the Universe

宇宙の平均質量密度と曲率の関係

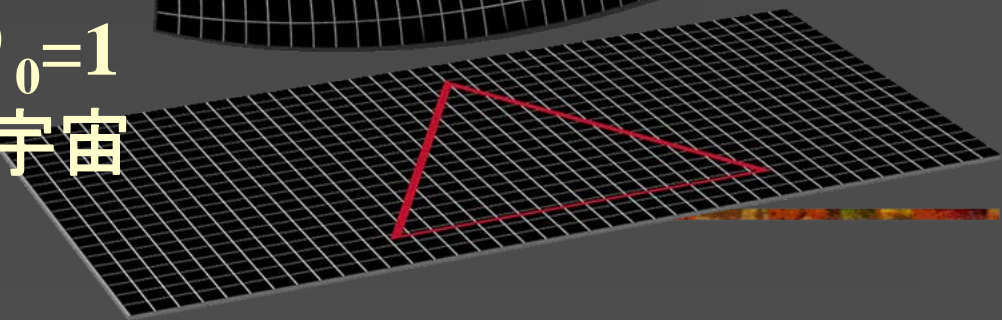
高密度 $\Omega_0 > 1$
 \Leftrightarrow 閉じた宇宙



低密度 $\Omega_0 < 1$
 \Leftrightarrow 開いた宇宙



臨界密度 $\Omega_0 = 1$
 \Leftrightarrow 平坦な宇宙



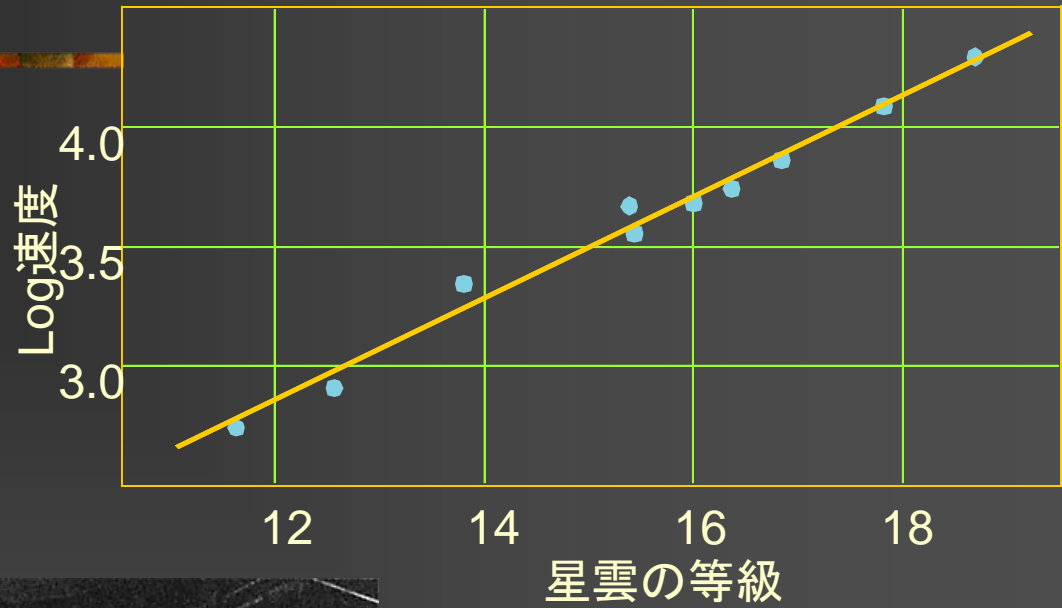
Ω_0 (オメガゼロ)
は現在の宇宙の密度と臨界密度との比(宇宙の重力エネルギーと運動エネルギーとの比といっても良い)

Discovery of the Expanding Universe

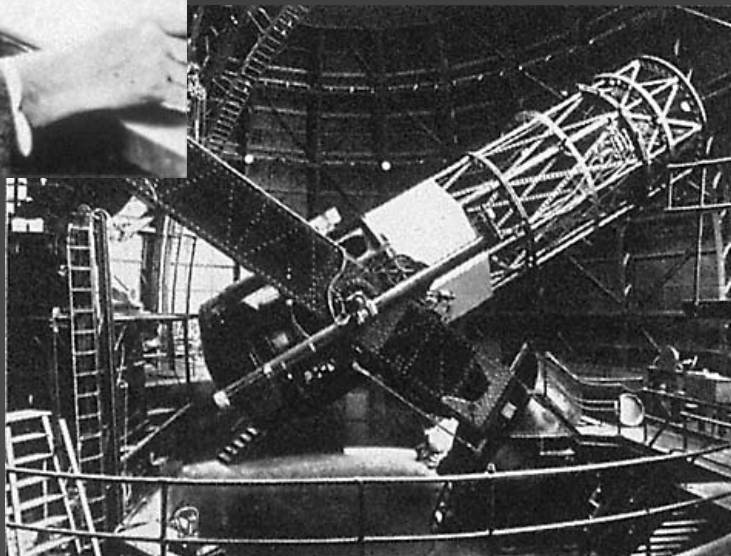
宇宙膨張の発見



エドウィン
ハッブル



$$V = H_0 D$$

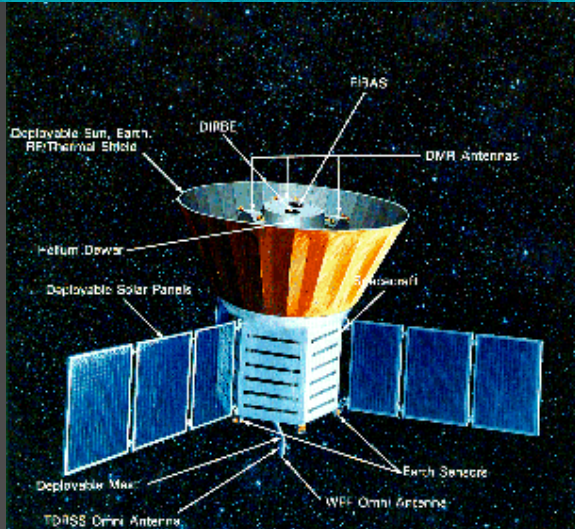
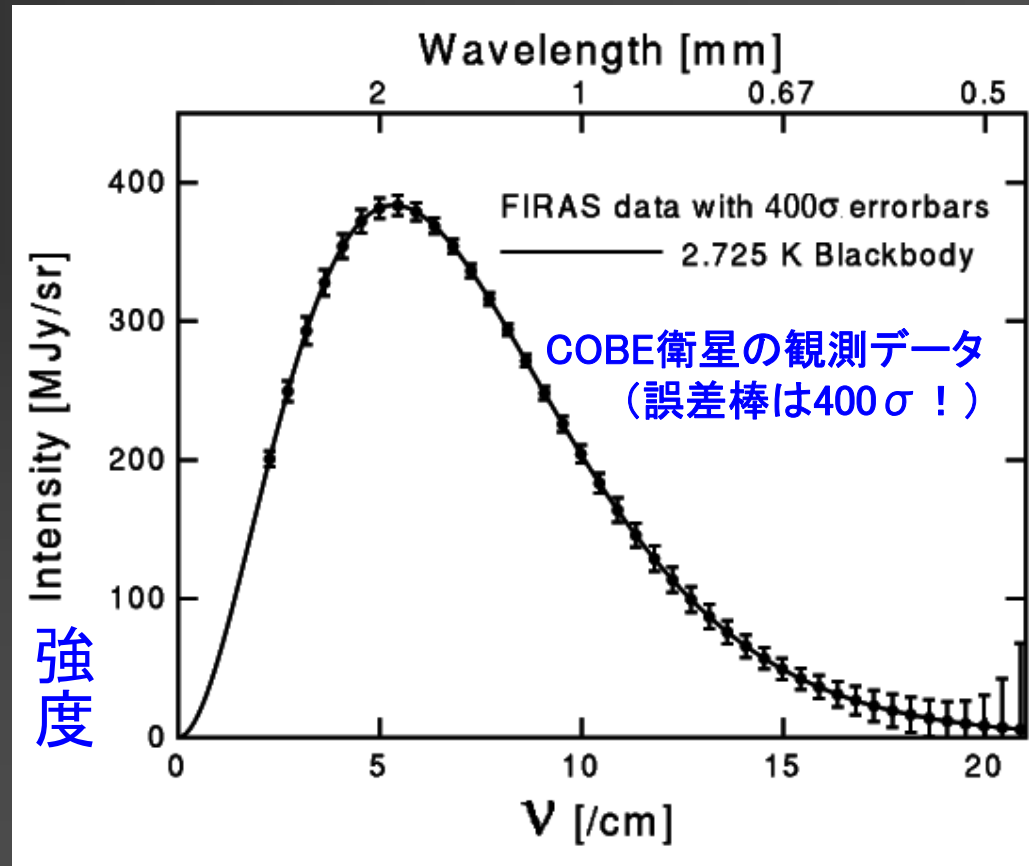
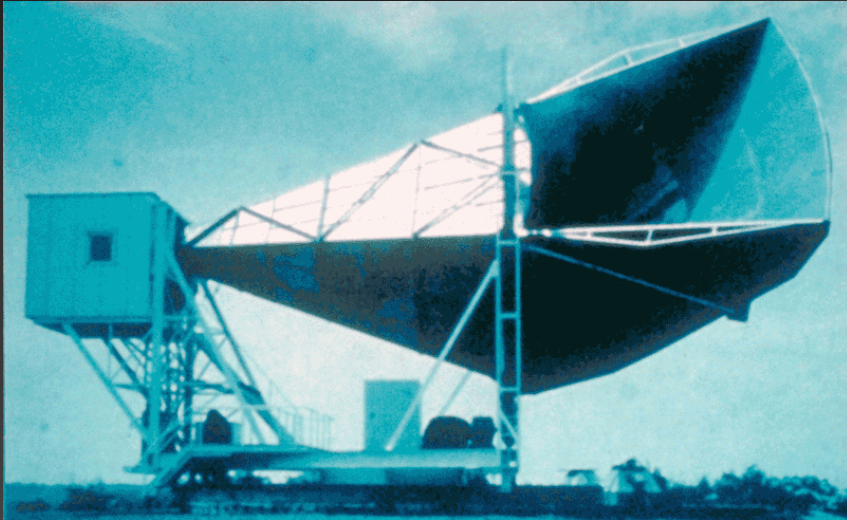


ウィルソン山
2.5メートル望遠鏡

The Cosmic Microwave Background

宇宙マイクロ波背景輻射

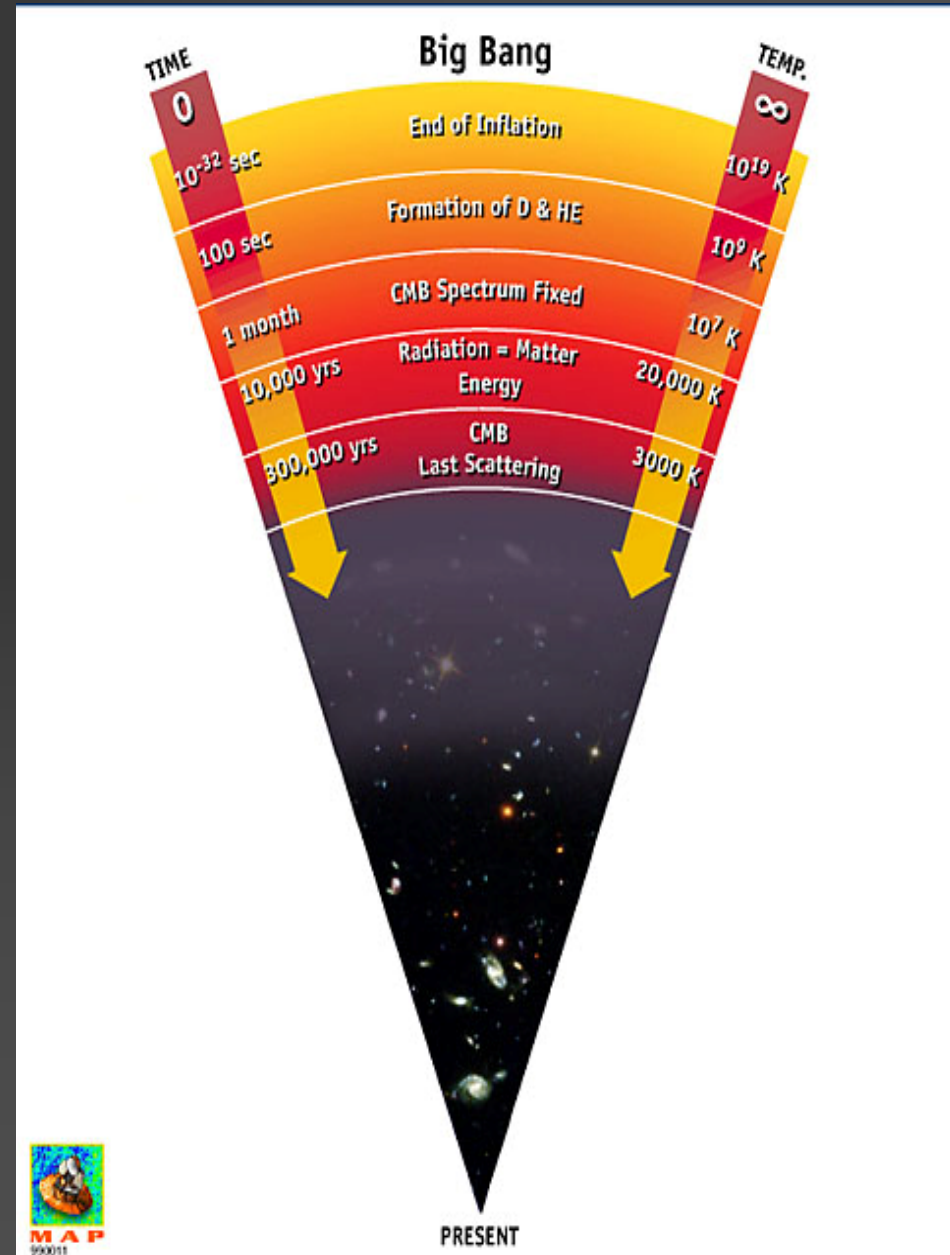
波長



Quick History of the Universe

早分かり宇宙史

- 宇宙は熱く高密度で、光に満ち溢れた状態で生まれた
- 膨張とともに温度低下
 - 数分後へリウム合成
 - 30万年後に中性水素原子が生まれる
 - 一億年後に最初の星が生まれる
 - 10億年後に最初の銀河とクエーサーが生まれる



Open Questions (when I graduated in 1982)

私が大学を卒業した1982年頃の未解決問題

- 宇宙はなぜこれほど大きく、かつ年老いている（約150億年）のか？
- 宇宙の全エネルギー（重力エネルギー＋運動エネルギー）はなぜほとんどゼロなのか？
- 宇宙の将来の運命は？ 永遠に膨張？それともやがては収縮？
- 銀河はどのようにして誕生したのか？
- 宇宙は何からできているのか？

1980s: Inflationary Model

1980年代：インフレーションモデルの登場

- 1980年代に、グース、佐藤勝彦、リンデ、スタインハート、アルブレヒトらによって提唱された
- 宇宙は「インフレーション」と呼ばれる急激な膨張期を経験したことを仮定する
- この膨張は「真空のエネルギー」が引き起こしたものであると考える
- このモデルが予言すること
 - 宇宙は平坦（全エネルギーがゼロ）
 - 宇宙は非常に大きい
 - 最初は小さな空間的凸凹が成長してやがて銀河が誕生した

Early 1990s: Astronomers see a Low Density Universe

1990年代初め：天文学者は宇宙の質量密度が低いことに気づく

- 通常物質(原子からなる)は、臨界密度の5パーセント程度しかない: $\Omega_{\text{原子}}=0.05$
- 臨界密度の約3割程度存在する**ダークマター**に対する観測的証拠が確立: $\Omega_{\text{ダークマター}}=0.3$
- それらを足し合わせても臨界密度には達しない($\Omega < 1$)。宇宙は低密度、つまり開いているらしい
 - インフレーションモデルは間違っている??

Vacuum Energy: Last Refuge of the Desperate Theorist

真空のエネルギー：絶望した理論家の最後の手段

- 何もないはずの真空ですら、エネルギーをもち空間を曲げる可能性はある
- うさんくさい過去
 - 観測と理論に矛盾があると思われる度に引っぱり出される
 - 実は天文学者、素粒子物理学者の双方から良くは思われていない
- 利点
 - インフレーションモデルを救う
 - 明確な予言をする
 - 宇宙年齢
 - 遠方天体の明るさ
 - 宇宙の幾何学

Supernova Ia: standard candles

Ia型超新星：宇宙の標準ろうそく

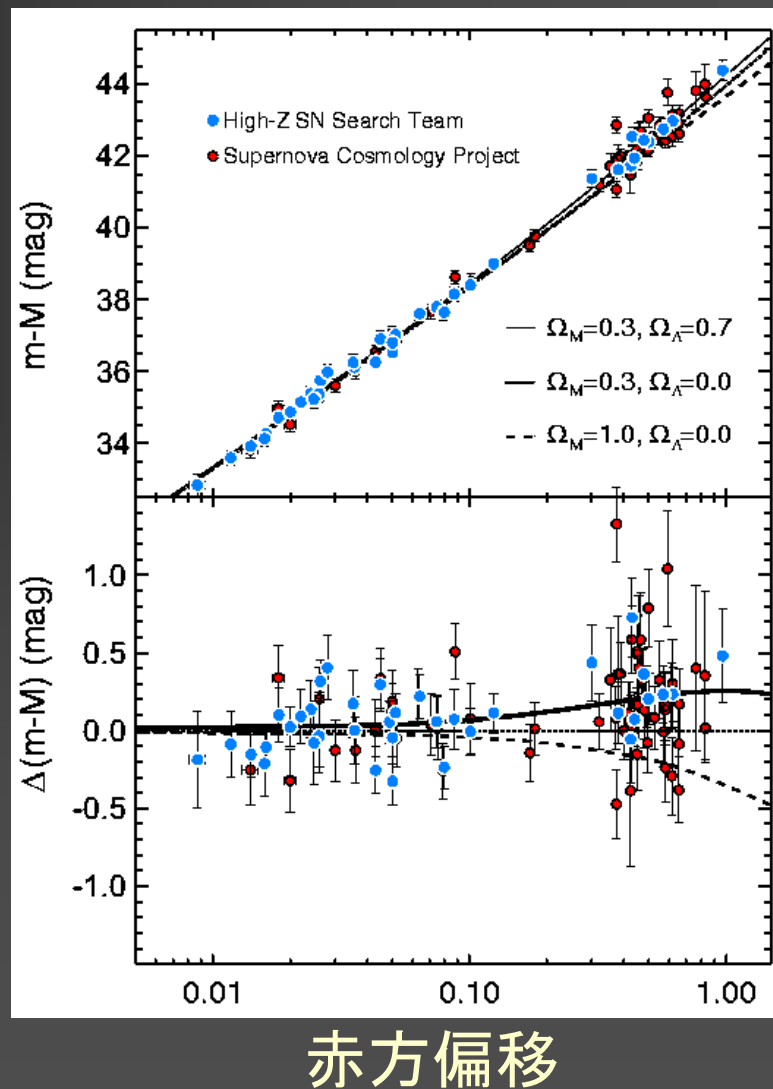
我々が観測する明るさ

$$F = L / (4\pi d^2)$$

本来の明るさ

我々までの距離

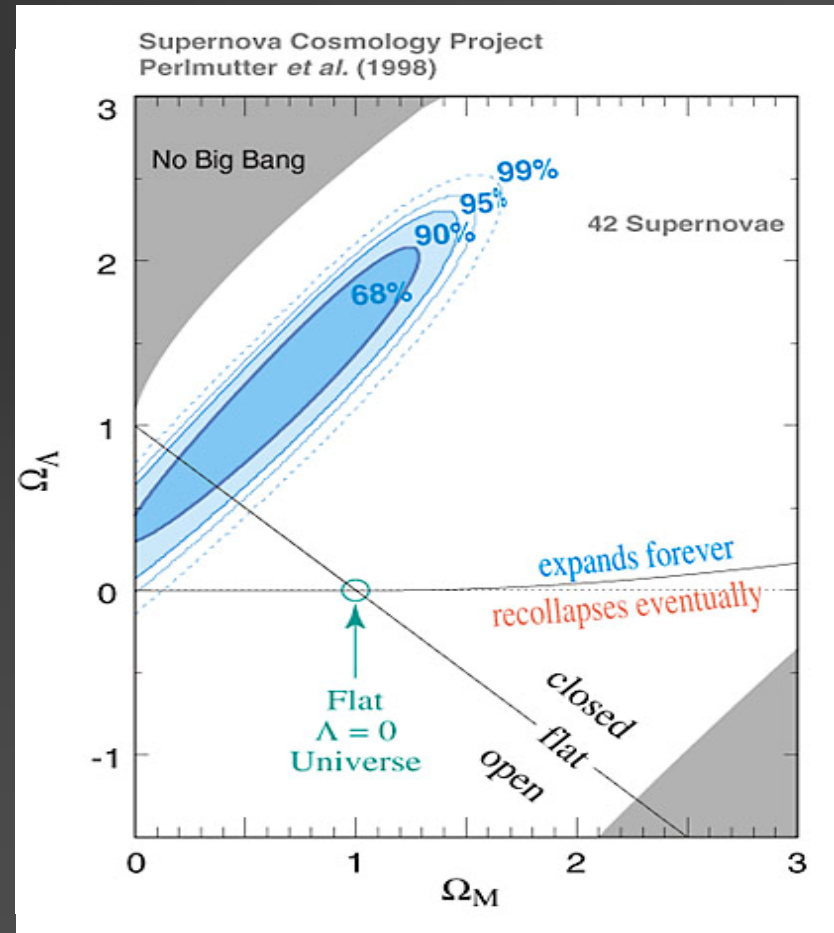
超新星の暗さ(等級)



Supernova: Probes of the Distant Universe

超新星：遠方宇宙を探る観測手段

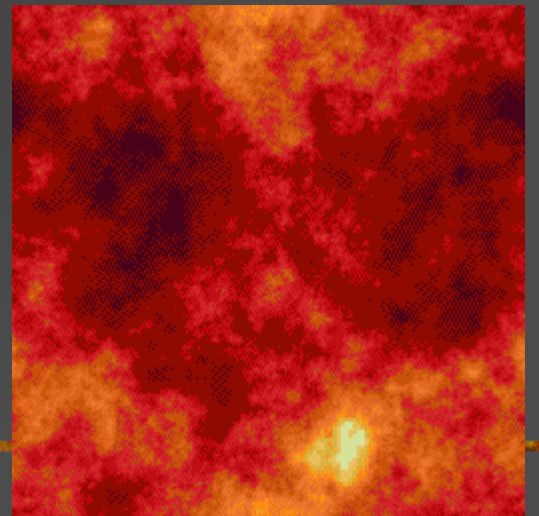
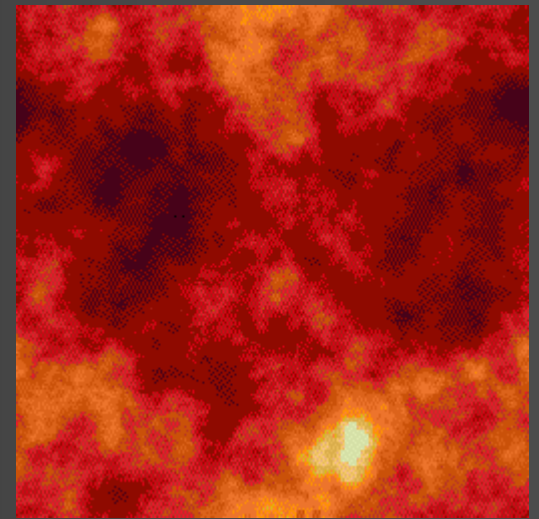
- 超新星は理想的な標準ろうそく
 - 明るい(遠くまで見える)
 - 一様(明るさの違いが少ない)
 - 数が多い
- 広視野撮像カメラの普及にともなって赤方偏移サーベイが可能となった



Cosmic Microwave Background: Snapshot of the Early Universe

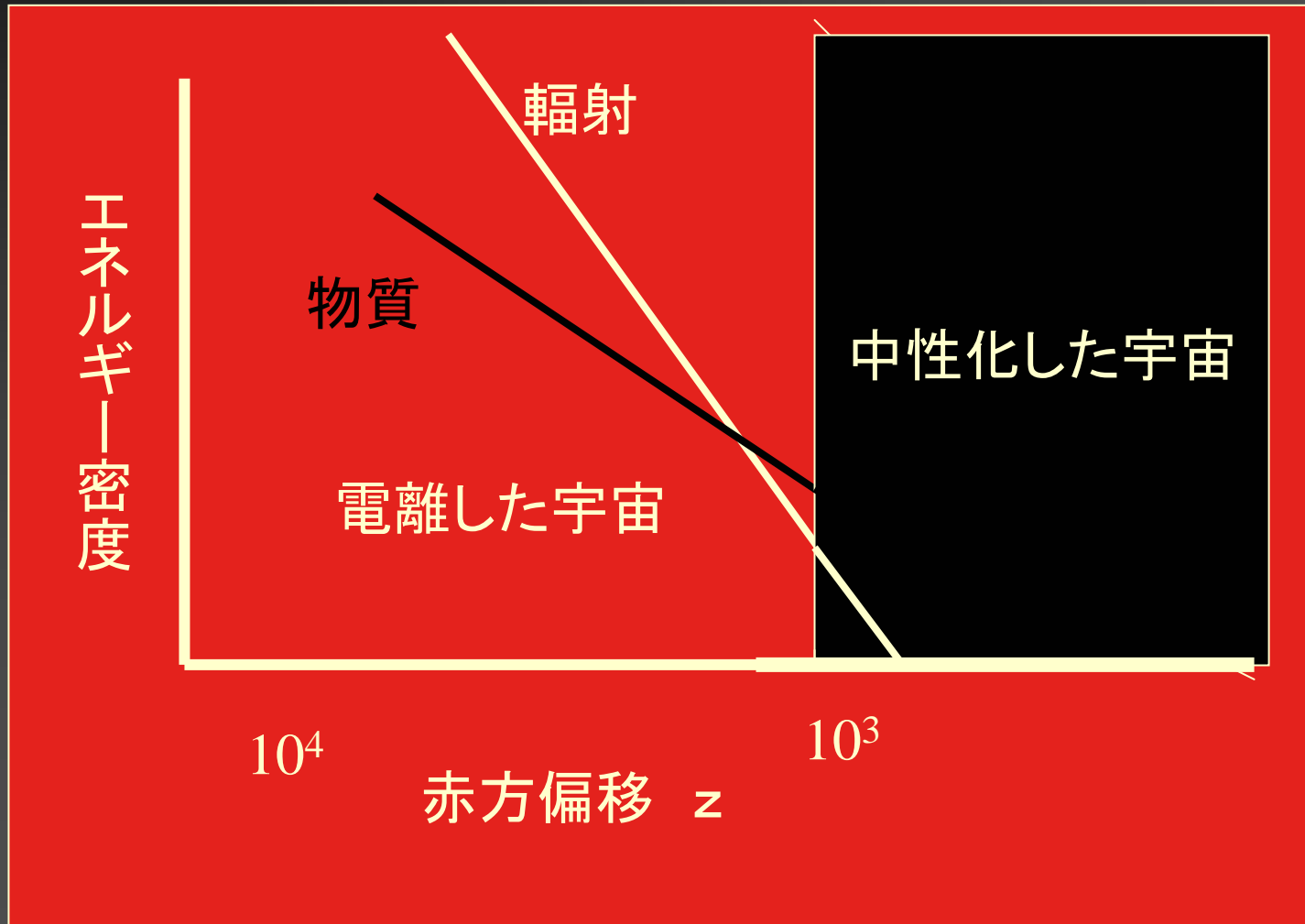
宇宙マイクロ波背景放射：初期宇宙のスナップショット

- ビッグバンの30万年後、中性水素原子が誕生し、宇宙が透明となった
- 当時の宇宙の密度の凸凹がマイクロ波背景放射の温度ゆらぎとして痕跡をとどめている
 - 特徴的な長さが存在する (光が30万年かかって進むことのできる距離)
- インフレーションモデルはこの温度ゆらぎの分布に対して検証可能な予言をする



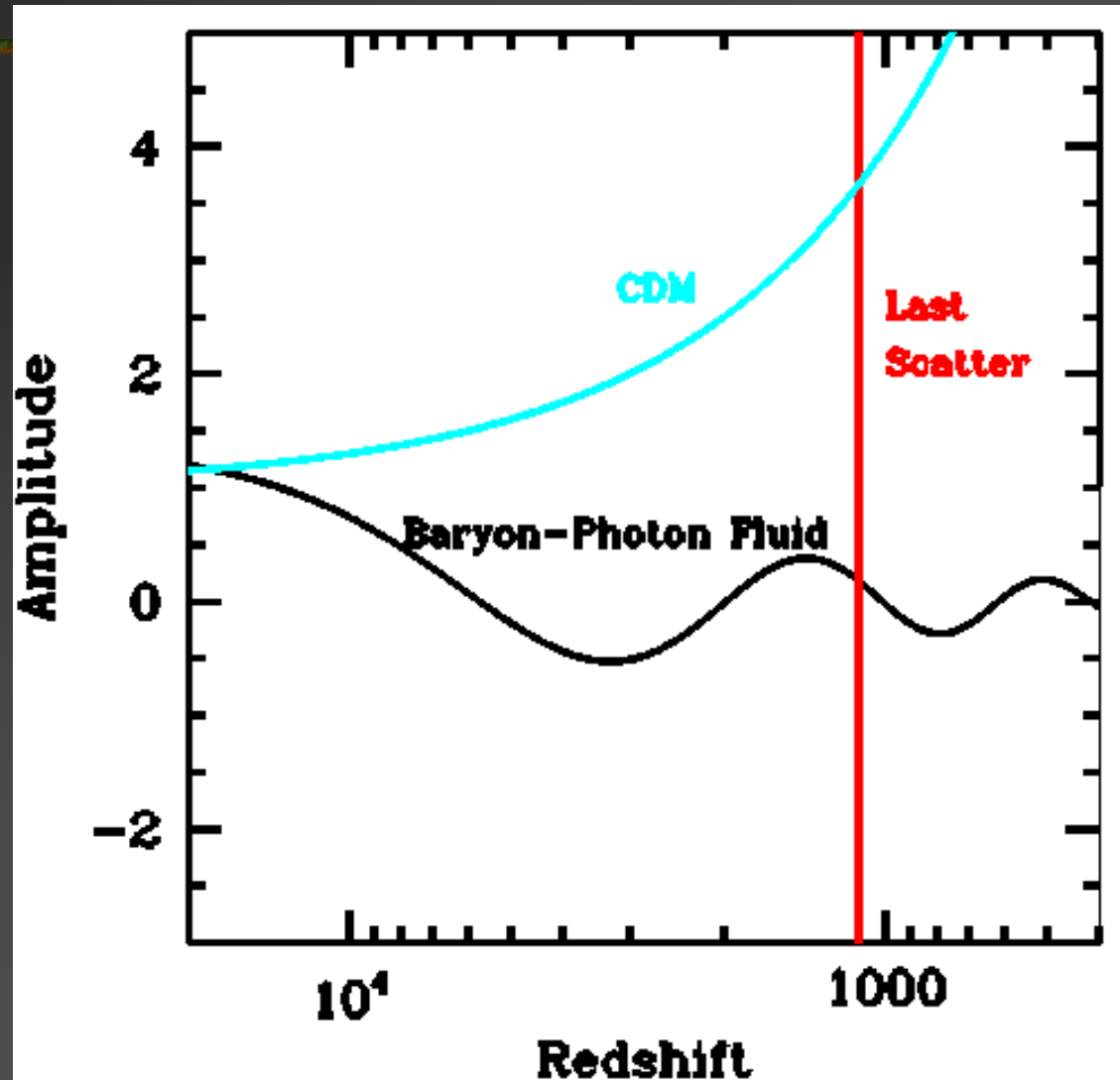
Thermal History of Universe

宇宙の熱史



Growth of Fluctuations 空間的凸凹の成長

- 線形摂動理論が適用できる
- その解析的な理論の定式化はすでに30年以上前になされている(ピーブルス、スニャーエフ・ゼルドビッチ)
- 最新の数値計算は0.1パーセントレベルの精度で信頼できる(セルジャック他2003)



WMAP

A partnership between NASA/GSFC and Princeton

ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査機

Science Team:

NASA/GSFC

Chuck Bennett (PI)

Michael Greason

Bob Hill

Gary Hinshaw

Al Kogut

Michele Limon

Nils Odegard

Janet Weiland

Ed Wollack

Brown

Greg Tucker

UCLA

Ned Wright

UBC

Mark Halpern

Chicago

Stephan Meyer

Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu (小松英一郎)

Michael Nolte

Lyman Page

Hiranya Peiris

David Spergel

Licia Verde

Olivier Dore

Jo Dunkley

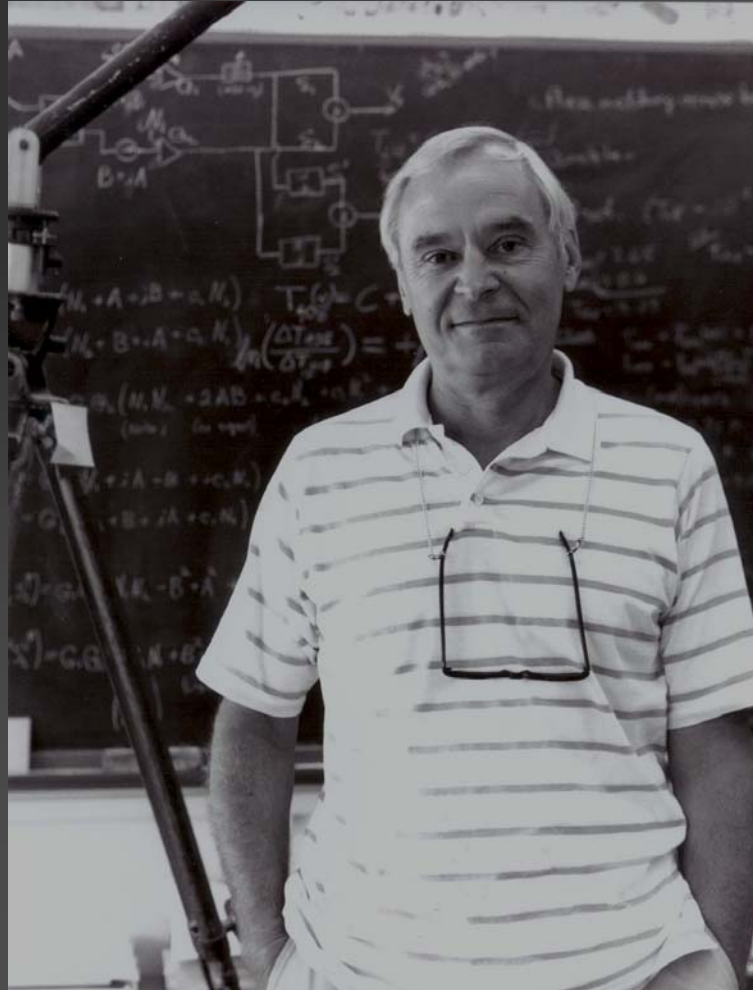
Rachel Bean



David Wilkinson 1935-2002

故デイビッド ウィルキンソンプリンストン大学教授

- CMB観測に関する数多くの先駆的業績を持つ
- WMAPの生みの親の一人



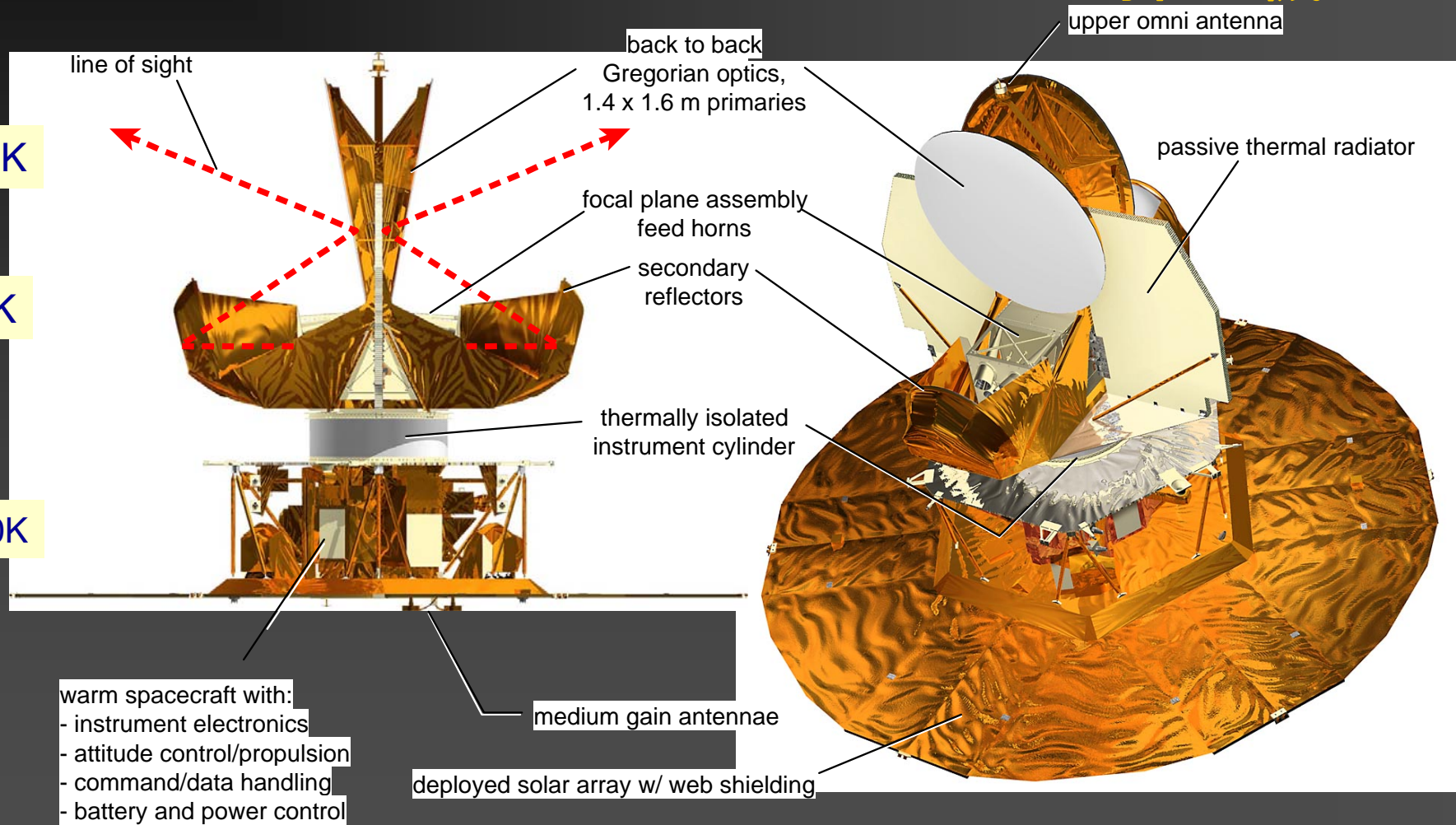
WMAP Spacecraft

WMAP 探査機

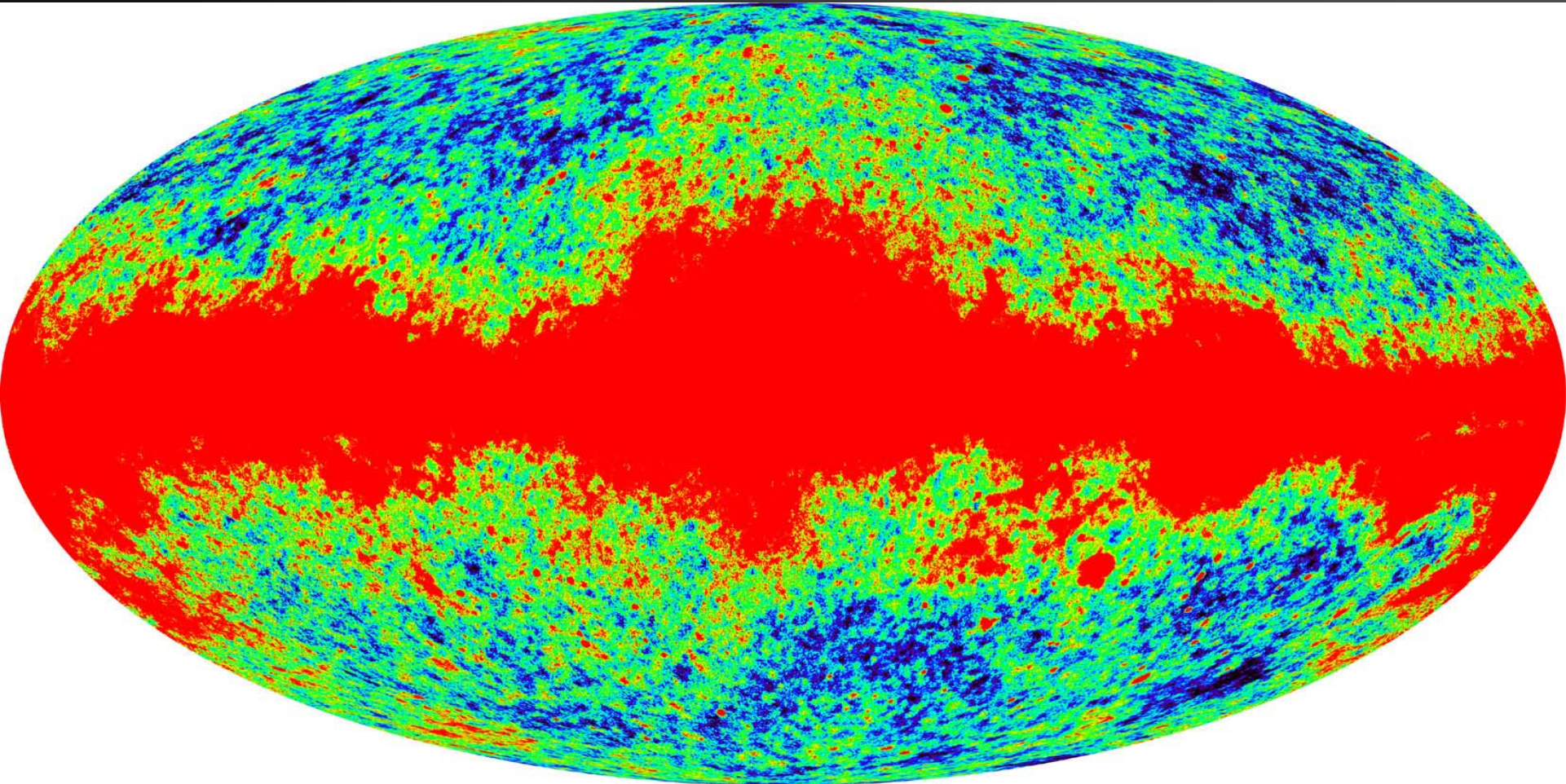
60K

90K

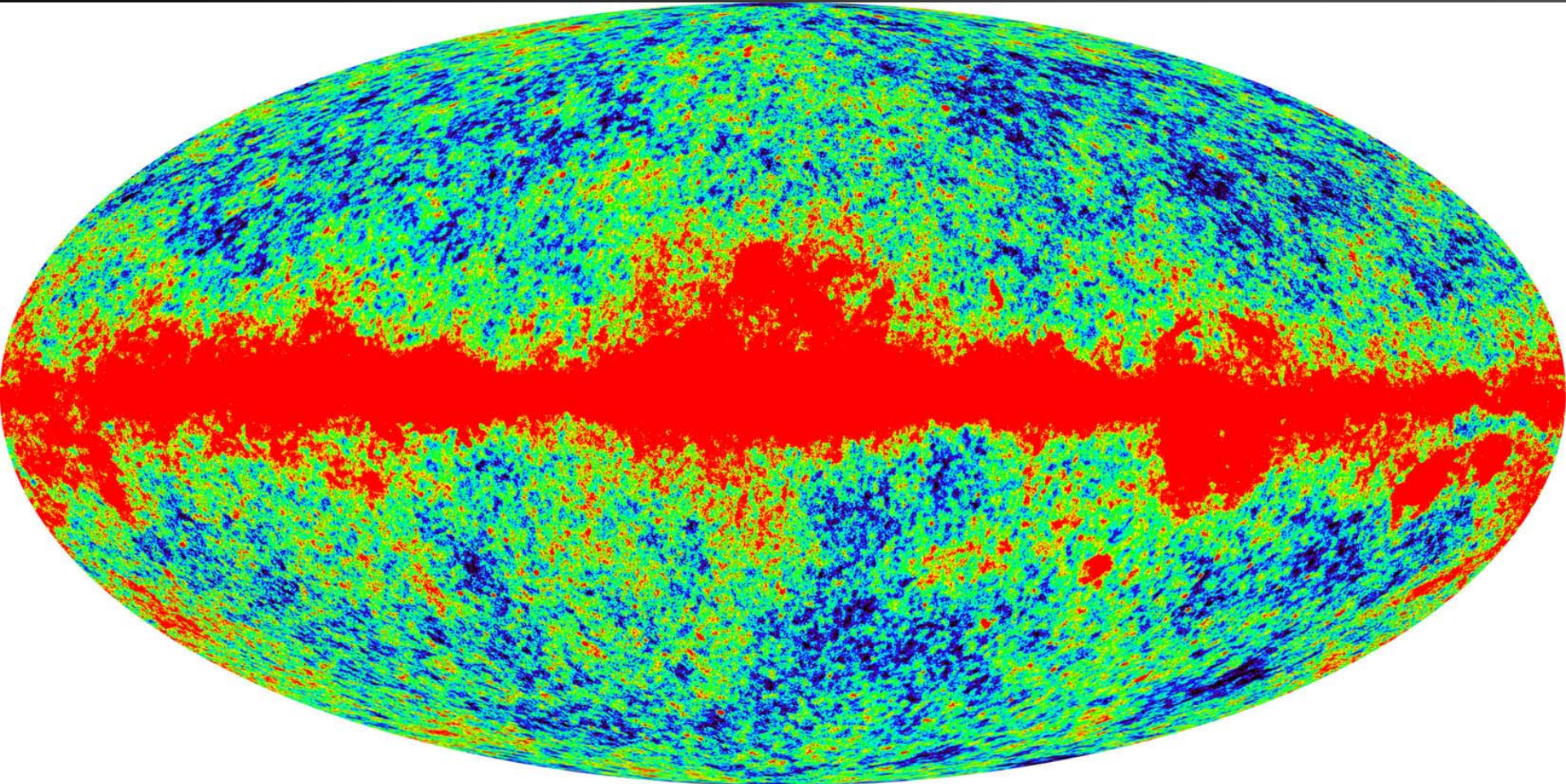
300K



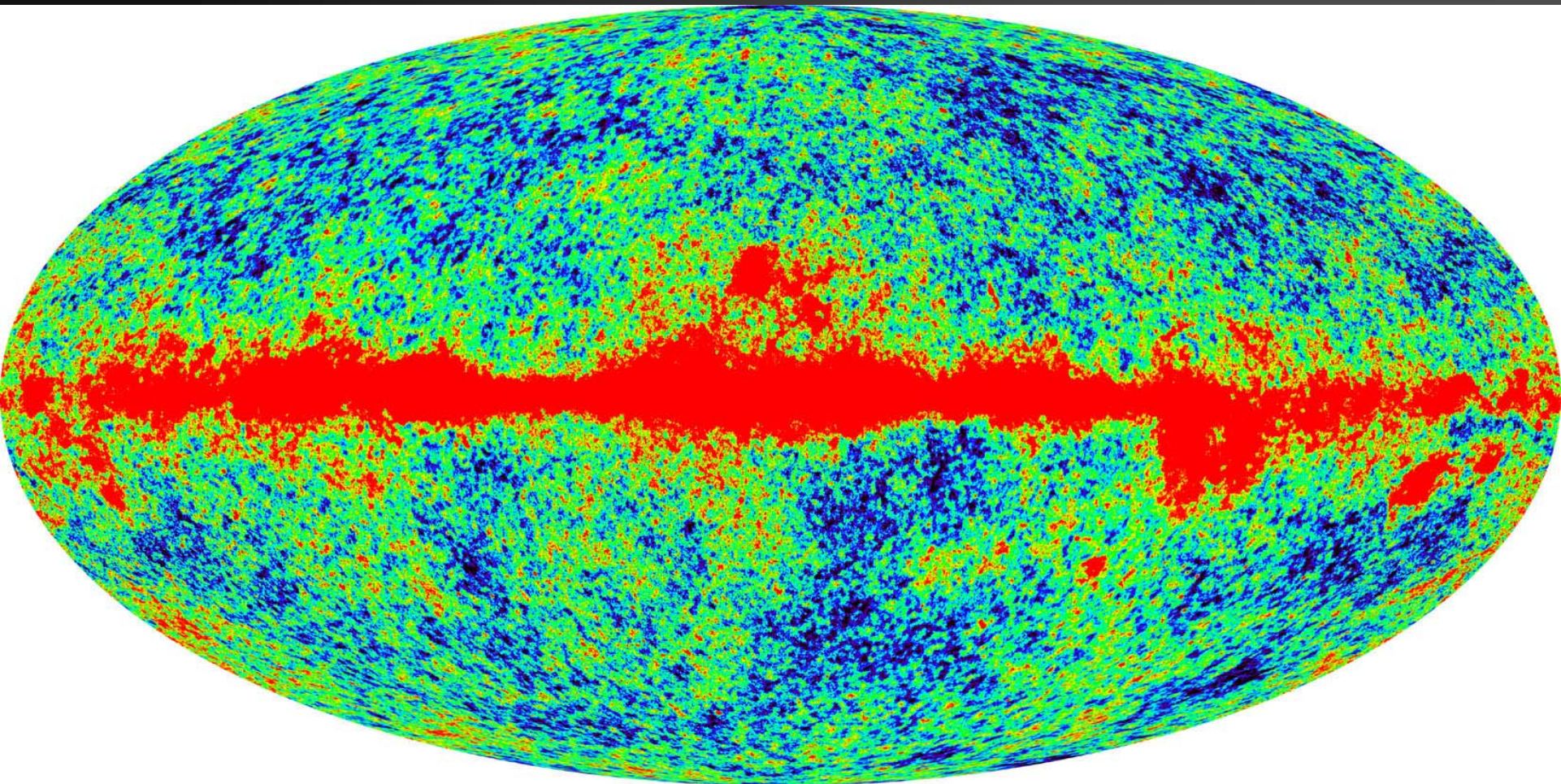
K - 22GHz



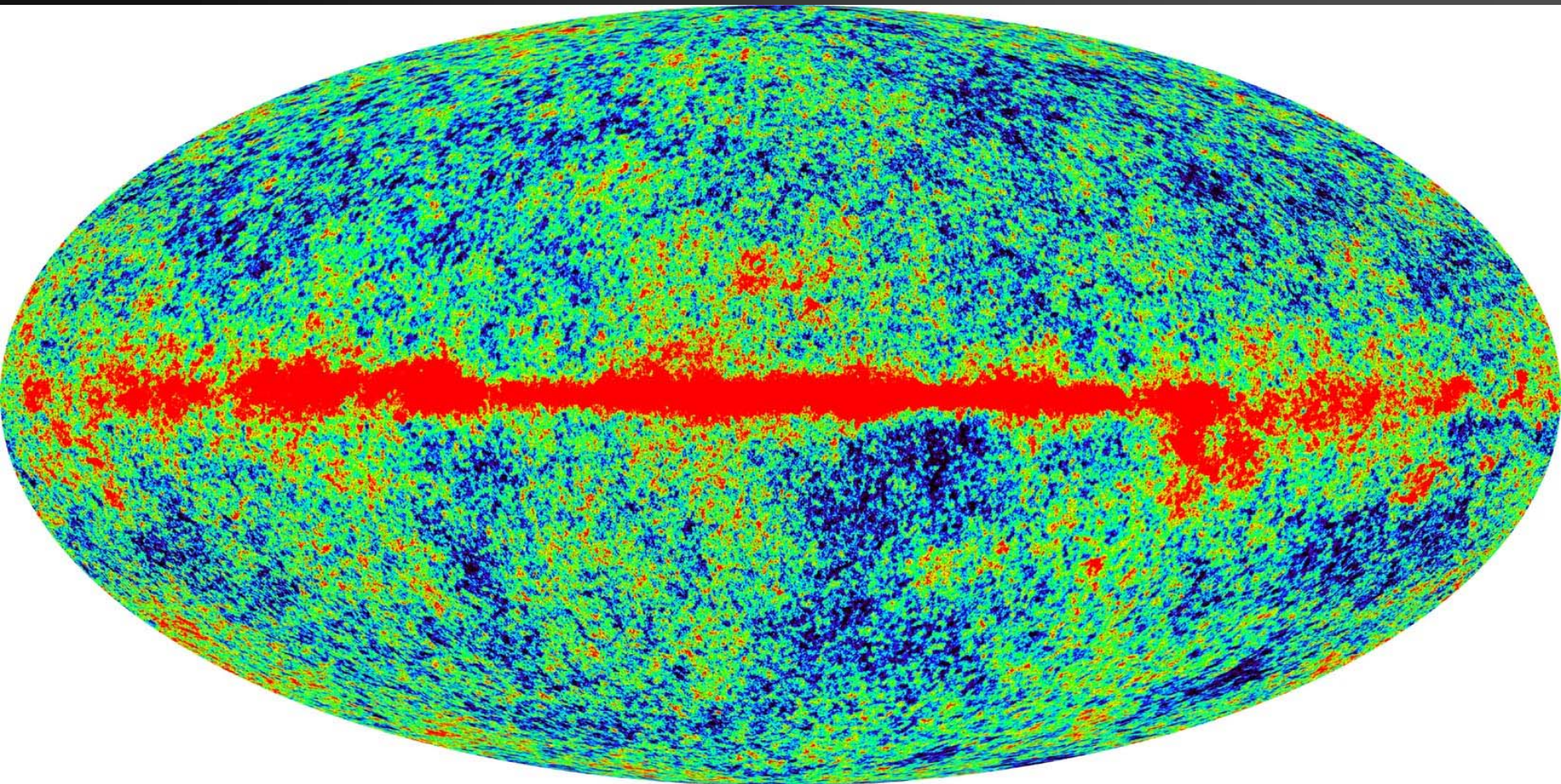
Ka - 33GHz



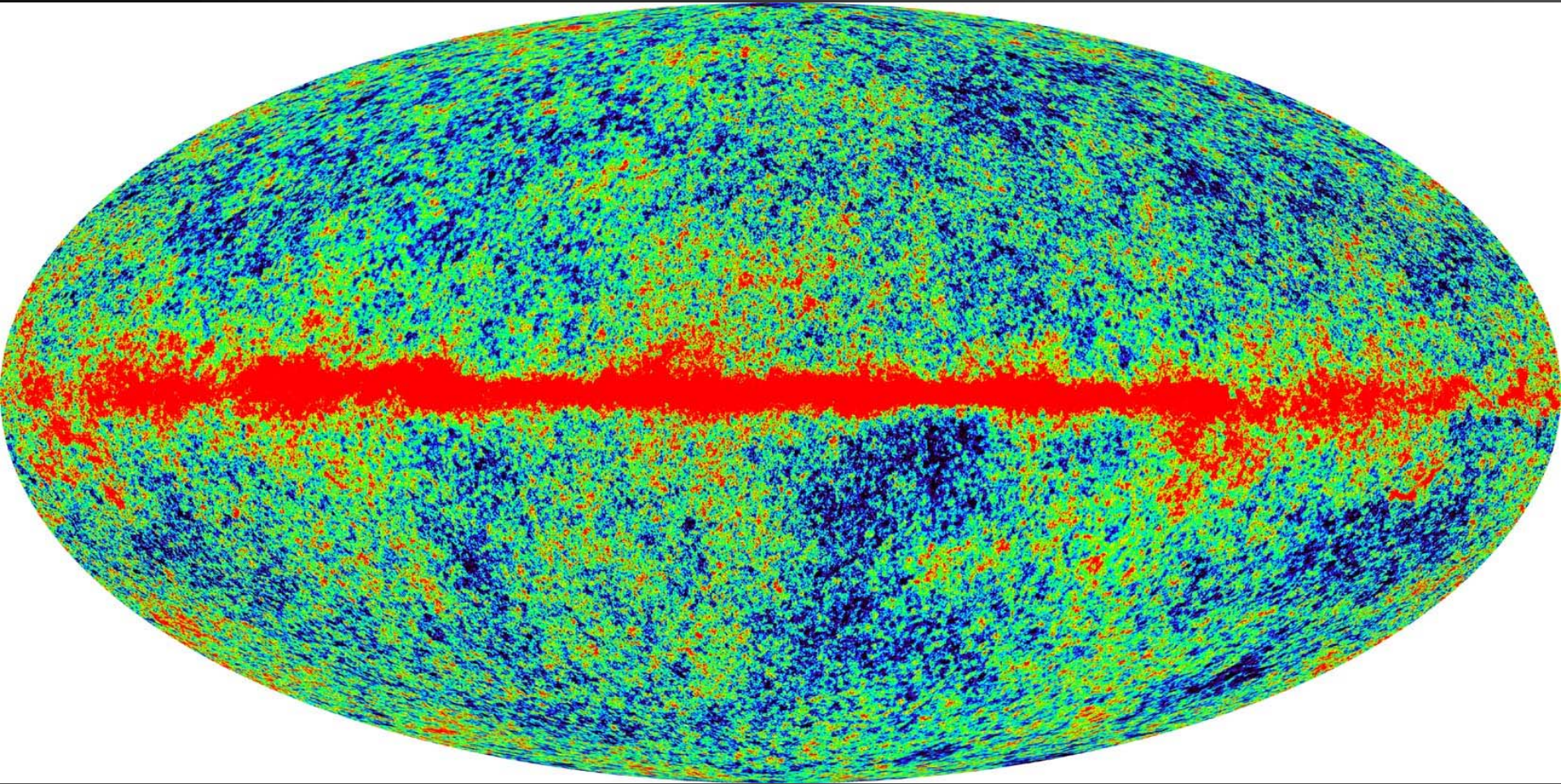
Q - 41GHz



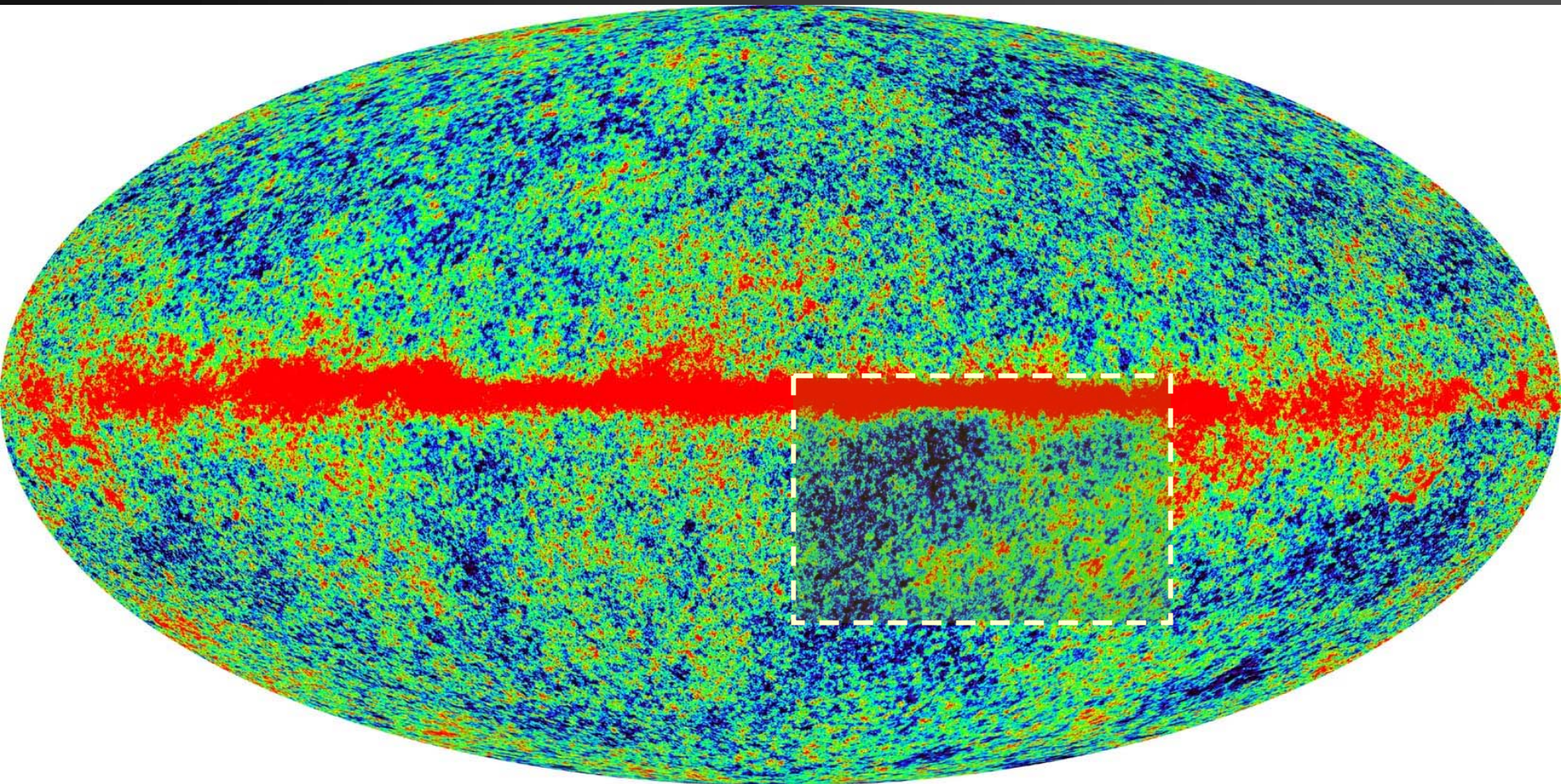
V - 61GHz

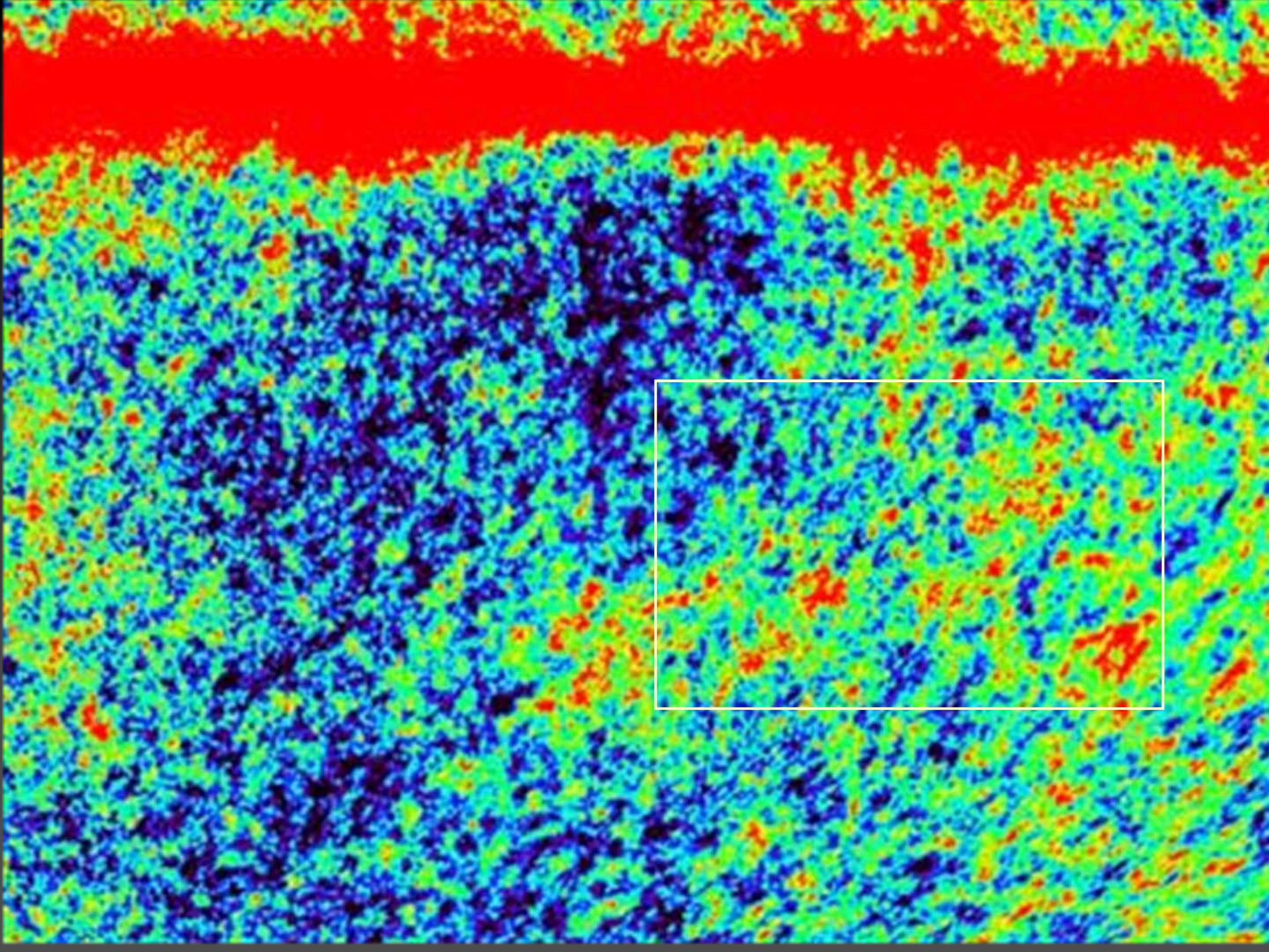


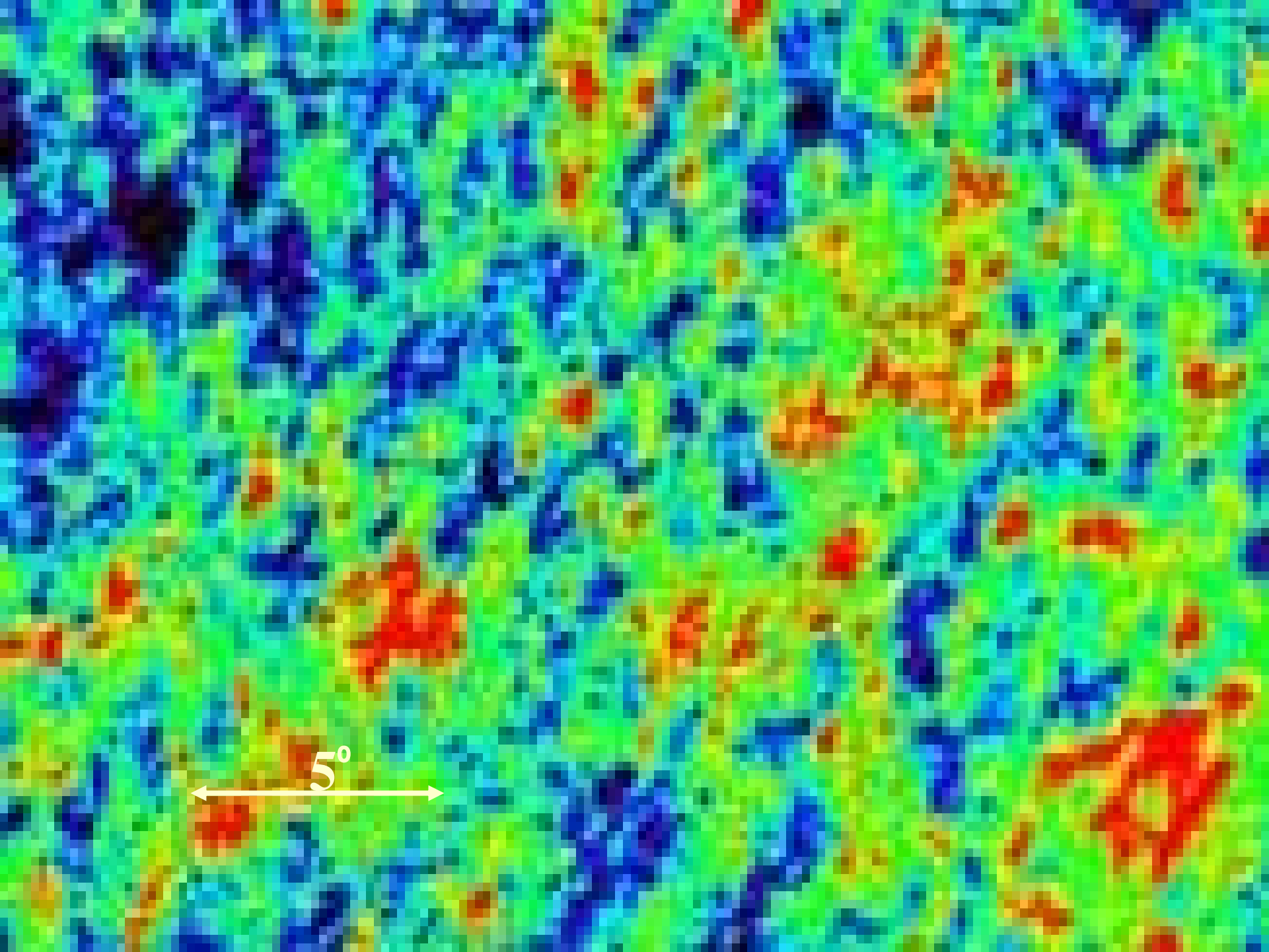
W - 94GHz



W - 94GHz







What Have We Learned?

WMAPから学んだこと

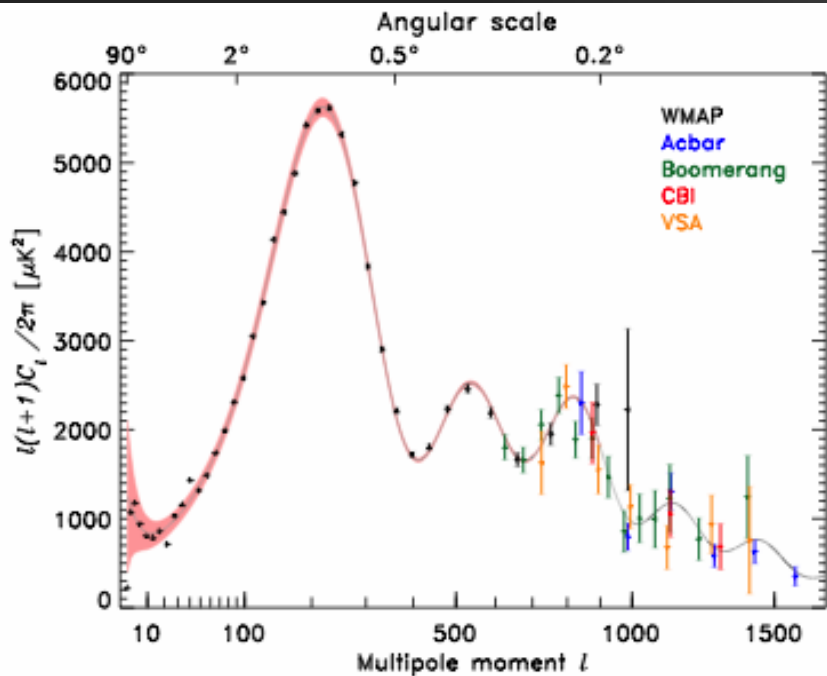
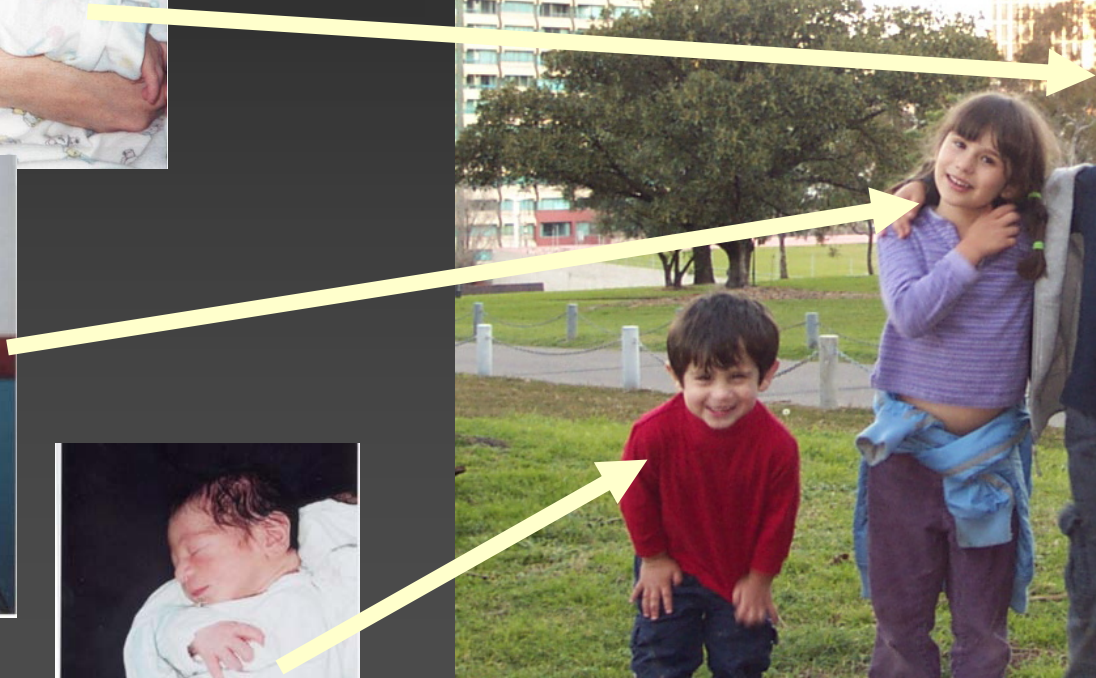


Fig. 18. The WMAP three year power spectrum (in black) compared to other recent measurements of the CMB angular power spectrum, including Boomerang (Jones et al. 2003), Acbar (Kuo et al. 2004), CBI (Readhead et al. 2004), and VSA (?). For clarity, the $l < 600$ data from Boomerang and VSA are omitted; as the measurements are consistent with WMAP, but with lower weight. These data impressively confirm the turnover in the 3rd acoustic peak and probe the onset of Silk damping. With improved sensitivity on sub-degree scales, the WMAP data are becoming an increasingly important calibration source for high-resolution experiments.

- 単純なモデル(わずか5つのパラメータの値)で観測データのほとんどが説明しつくせる
- 宇宙の年齢: 136億年
- 宇宙の組成:
 - 原子: 4%
 - ダークマター: 23%
 - ダークエネルギー: 73%
- スケール不変密度ゆらぎが銀河の起源
- 宇宙誕生後約3億年で最初の星が形成された

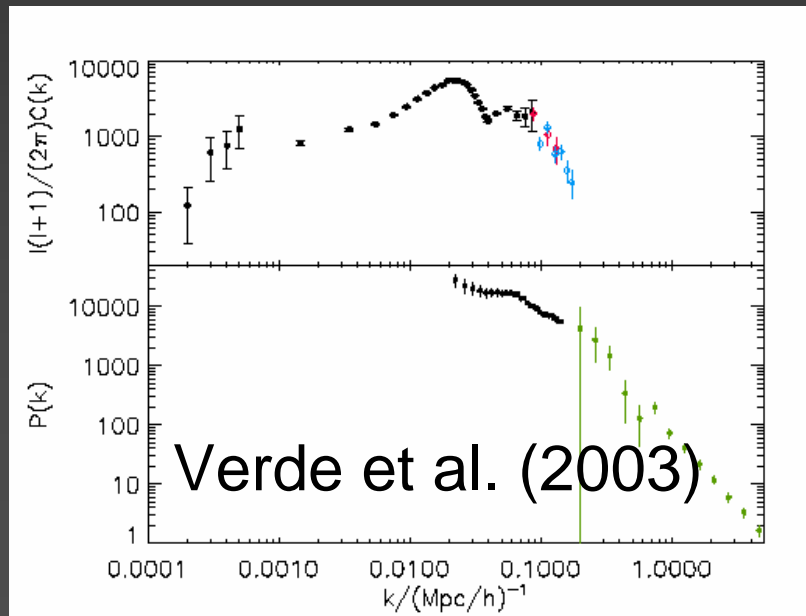
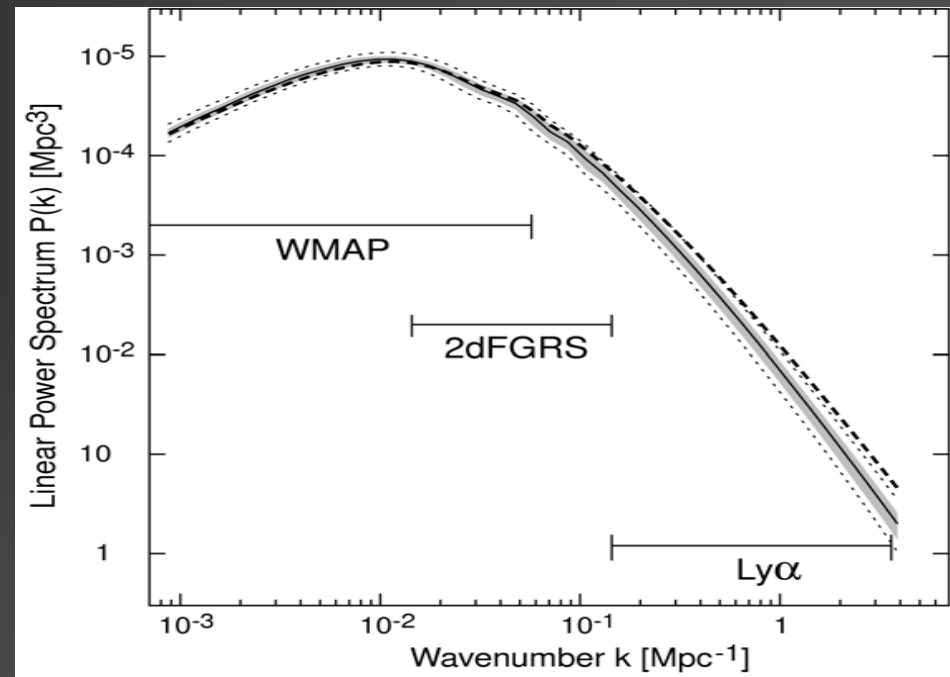
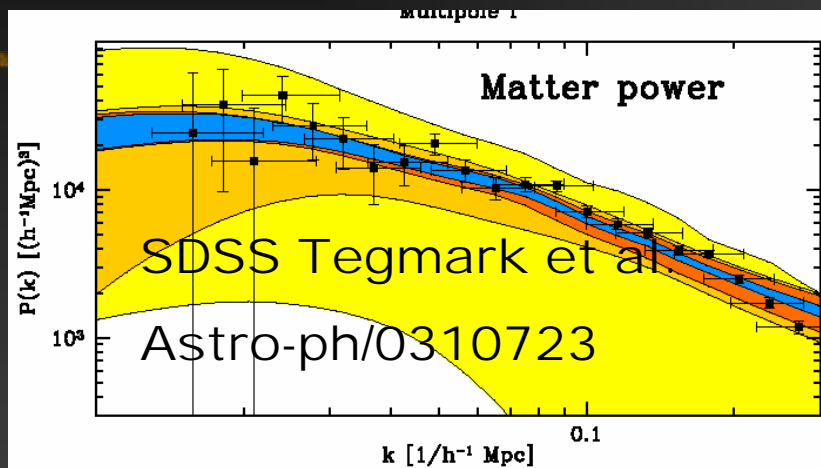
From Baby Pictures to Today's Universe

赤ちゃんの写真から現在の宇宙へ



Model Predicts Universe Today

理論モデルが予言する現在の宇宙



New Challenges and Questions

さらなる謎への挑戦

- 今後も観測データがモデルと一致し続けるとしてもまだ重要な謎は残ったまま
 - ダークマターの正体は何か？
 - ダークエネルギーの正体は何か？
 - インフレーションモデルは素粒子物理学のなかでどのように説明されるのか？
 - 銀河はどのように生まれたのか？
-

Next Step: High Resolution Cosmology 次のステップ：高解像度宇宙論

- 400平方度をズームアップし現在の10倍の解像度で観測する
- 構造形成の研究：最初の10億年
- マイクロ波背景放射のデータと他の観測とを組み合わせ第一世代天体誕生の現場を探る



Atacama Cosmology Telescope Installation at 5200 m

アタカマ宇宙論望遠鏡(標高5200m)

Photographs by Michele Limon, ACT Scientist
March 10, 2007



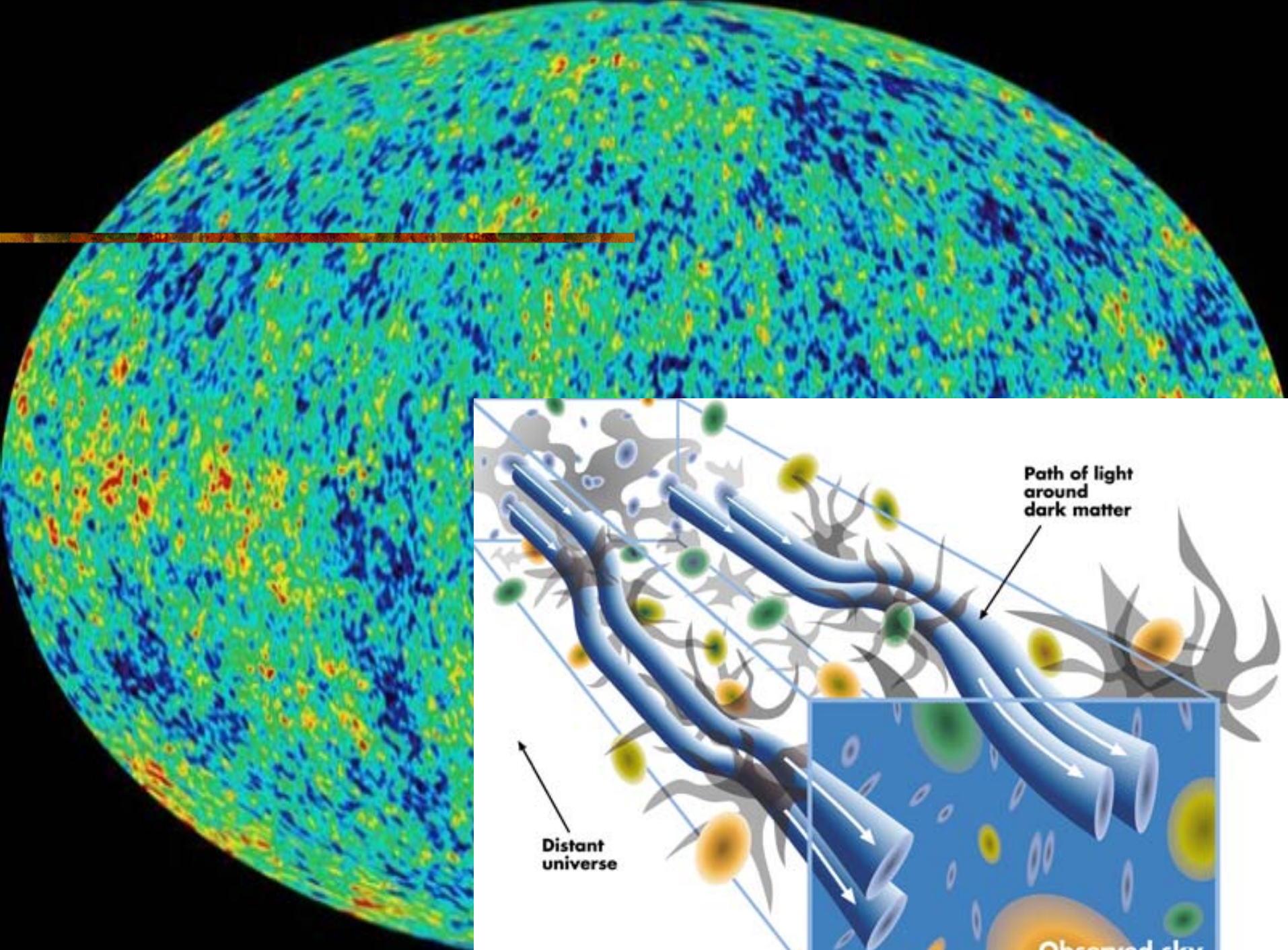
Azimuth-Elevation
Mount



Primary and Secondary
Mirrors on Back-up Structure



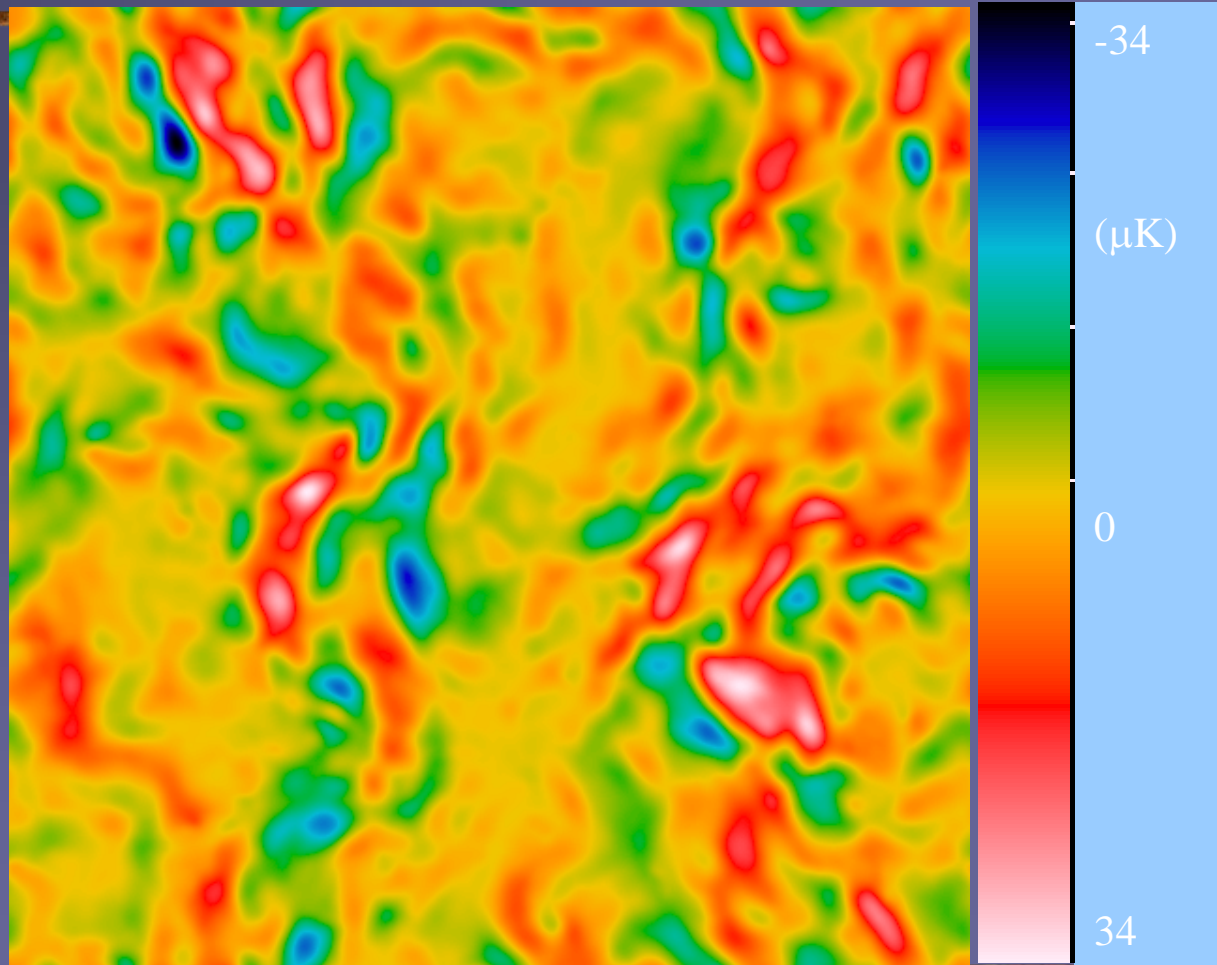
Observations to Begin in
April/May 2007



Lensing of the CMB

マイクロ波背景放射と重力レンズ

- ・ 平均的な重力レンズのシグナルはノイズレベルよりも大きく検出可能
- ・ スニャーエフ・ゼルドビッチ効果と点光源は、分光的に(異なる波長依存性を用いて)取り除く
- ・ 重力レンズシグナルに特徴的な4点関数を同定する



1.4° x 1.4°

重力レンズシグナル

CMBシグナルの2%

Combining Optical and Microwave Views of the Universe

可視光とマイクロ波で見た宇宙像を組み合わせる

- 重力レンズ：物質の空間分布を探る新しい手法
- アインシュタインは間違っていたか？：一般相対論を修正する必要があるか？宇宙は本当にダークエネルギーによって占められているのか？



Conclusions

まとめ

- 現在は宇宙論研究の黄金期である！
- 急速な技術の進歩のおかげで初期宇宙の物理、および構造の誕生を観測的に探求することが可能となりつつある
- 今のところ「標準理論」はすべての観測データをうまく説明するようである。しかし、それが何故かはまだわかっておらず、今後の研究を大いに期待していただきたい。



THANK YOU!

ご清聴ありがとうございました