

# インフレーション理論、 -観測的実証への期待-

佐藤 勝彦  
自然科学研究機構

# BICEP2グループ 原始重力波を発見?

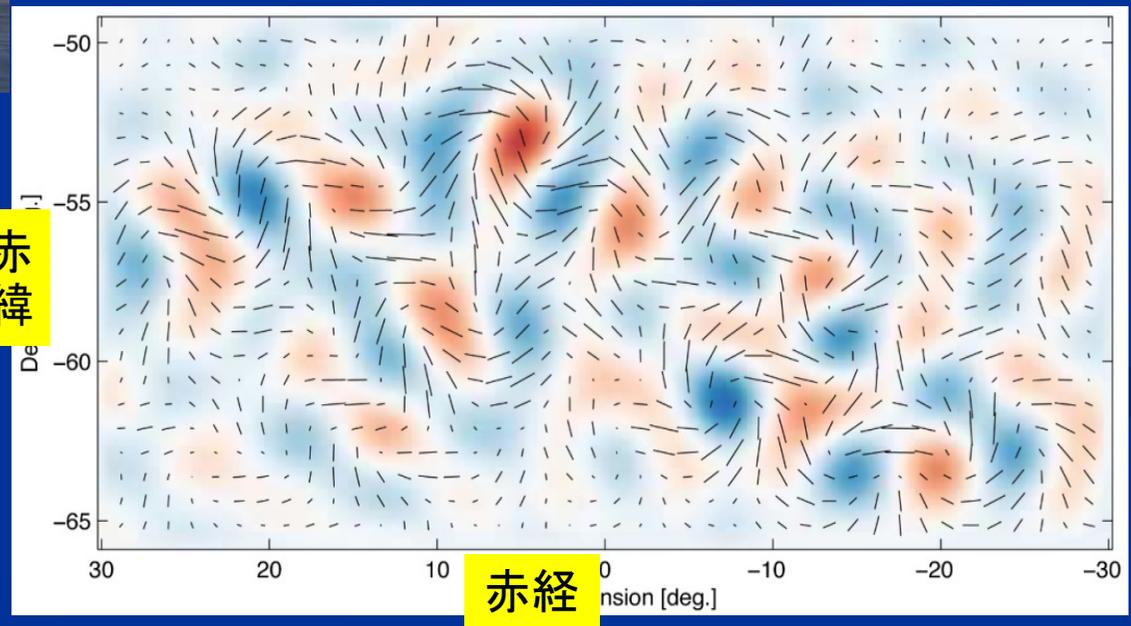
(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)



南極点に設置された電波望遠鏡  
BICEP2 ホームページより

2014年3月17日 全天の1%ほどの領域を観測し、宇宙マイクロ波背景放射の偏光測定によって、原始重力波によるB-mode発見と発表

B-モード: マイクロ波電波の偏光面の渦巻きパターン



# 新聞、TV、YouTubeなどで広く報道

宇宙初期における加速的宇宙膨張、インフレーションの証拠をつかんだ。さらにインフレーションのモデルを観測的に決める道を広げた。

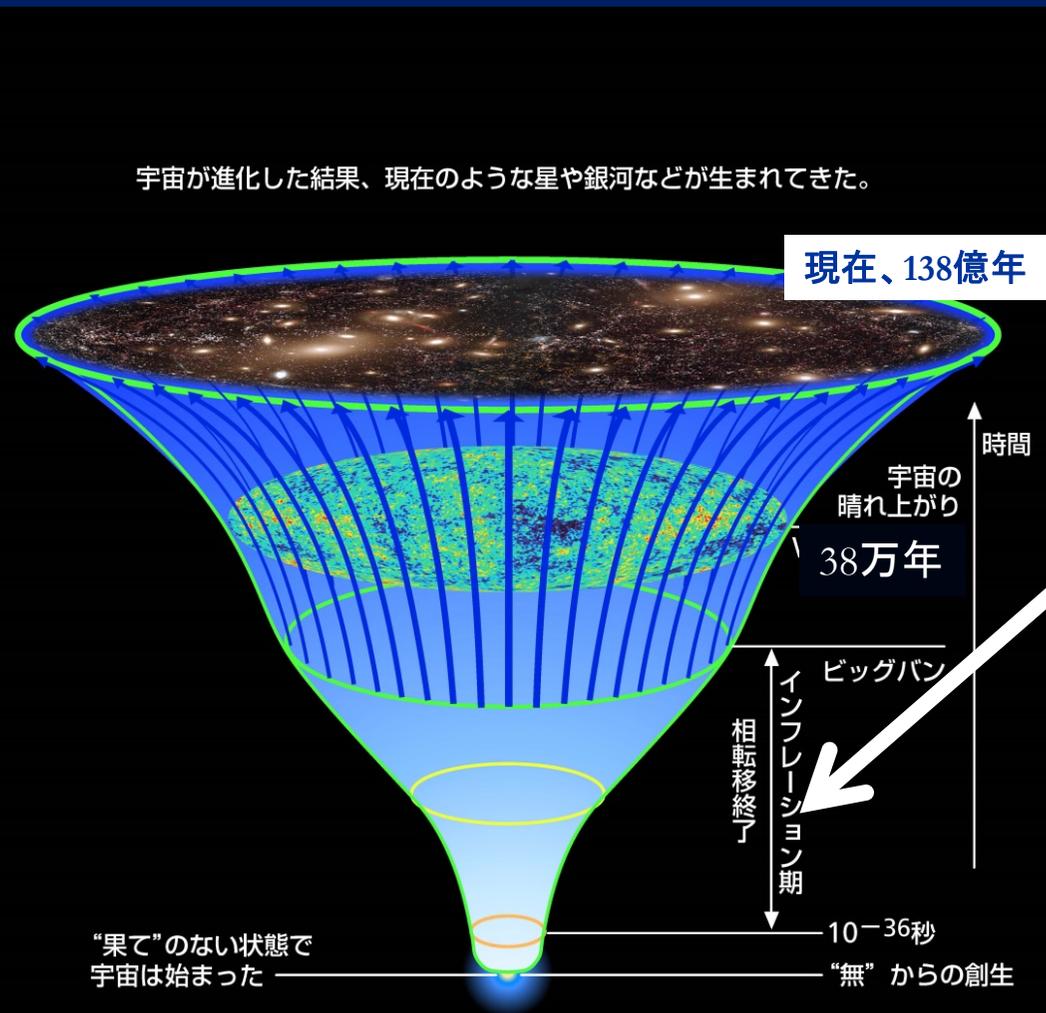
・この発表後、他の研究者から天の川銀河のダスト(埃)からの放射の可能性を指摘された。

・6月20日の印刷されたPhys.Rev.Lett.では、「発見した」との結論は変えていないが、主張は弱くなった。

"Has my confidence gone down? Yes," Prof Clem Pryke, from the University of Minnesota, told his audience. (ダストの可能性を、highly unlikely → disfavor)

・原始重力波を間接的に発見した可能性はあるが、他のグループの確認が必要。

# インフレーション理論



微小な量子宇宙を  
1) 加速的に急膨張させ、  
2) 銀河や銀河団などに成長する種を仕込み、  
それが終わるとき、  
3) 宇宙を加熱し熱い火の玉宇宙にする理論。

相対論やスカラー場の理論など局所的にエネルギー保存則を満たす法則を使いながら、“無”から物質エネルギーに満ちた宇宙を創る。

日本は世界のインフレーション研究の大研究拠点

# インフレーションは何を説明するのか？

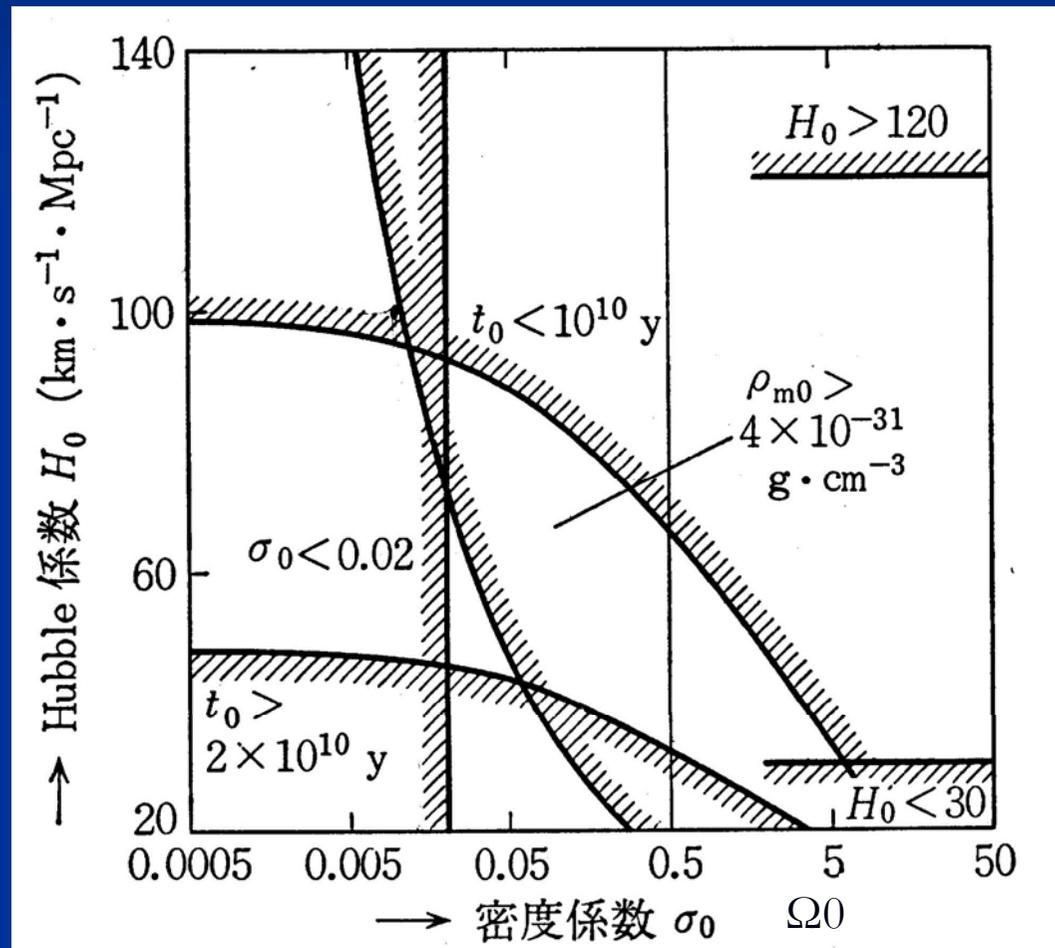
## ・ビッグバン(火の玉)宇宙を創るメカニズム。

1. 量子宇宙を加速的に膨張させ、宇宙を膨張するようにさせた。
2. 量子宇宙を加熱し、高温の火の玉にした。
3. 後に銀河や銀河団などに成長する宇宙構造の種(密度揺らぎ)を仕込んだ。

## ・旧来のビッグバンモデルの問題点を解決。

1. 宇宙の地平面(光速で信号が伝わる因果律の限界距離)を急拡大。
  - a) 宇宙の一様性問題(因果律を越えて宇宙は一様なのか)を解決。
  - b) 因果律を越えているような巨大な宇宙構造の種を仕込めた。
  - c) 磁気単極子問題(統一理論に従うなら、磁気単極子が大量に作られてしまう)を解決。
  - d) CP対称性が宇宙初期に自発的に破れたのなら、物質-反物質がそれぞれドメイン構造を持つ宇宙モデルを作れる。(もしインフレーションが起これなければ小さなドメインは対消滅し、物質は対消滅して無くなる。)
2. 宇宙を、ほとんど平坦にする。

# 1980年代以前は観測的に 宇宙の曲率は負と信じられていた



# 指数関数的膨張モデル(インフレーション理論)

## 提唱のころ (1970-1981)

- I. Weinberg-Salam Modelを使って超新星ニュートリノの研究 (益川の示唆によって)
- II. ニュートリノなど相互作用の弱い粒子の質量・寿命に対する宇宙論・宇宙物理からの制限 (小林など共に)
- III. W-S Model、大統一理論 の予言する  
真空の相転移の宇宙への影響
- IV. 指数関数的膨張モデル (M.Einhornなど、  
後に、佐々木、小玉、前田と共に)

# I. 中性流相互作用による ニュートリノ・トラッピング理論

- 1970年頃 Weinberg-Salam Modelを使って超新星ニュートリノの研究開始。(しかしWSは誤りという意見も強かった。)

- 1973年、中性流相互作用、GARGAMELにより発見 1973.

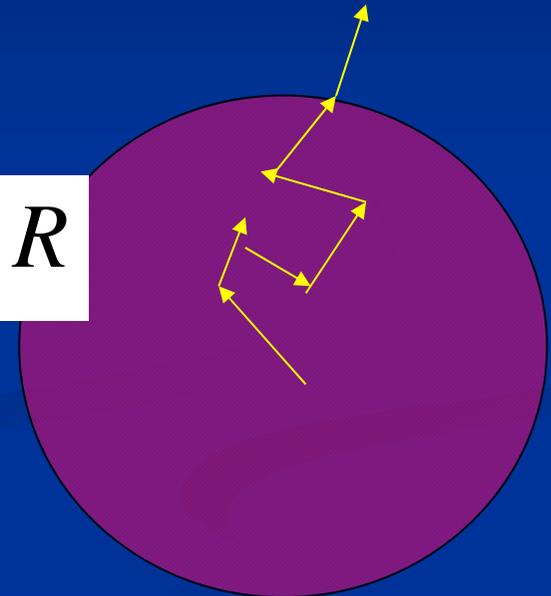
$$\sigma \sim \sigma_0 A^2$$

- ニュートリノがトラッピングされることを認識 ( $\tau_{\text{dif}} \sim 10 \text{ s}$ )

且つ、ニュートリノが強くフェルミ縮退することに気づく

( $E_F \sim 100 \text{ MeV}$ ).

$$l_{mfp} < R$$



ニュートリノバーストの持続時間は 10秒程度

KAMIOKADEによる  
SN1987Aで実証

## II. 弱い相互作用をする粒子の質量と寿命に対する宇宙論・天体物理からの制限

- Higgs 粒子の崩壊(小さな質量を仮定)とそれによる宇宙背景放射の変形、及び質量に対する制限。

K. Sato & H. Sato, PTP,1975.

WIMP崩壊による背景放射変形の世界最初の論文？

- Higgs粒子放射と星の進化への影響。 K.Sato & H.Sato,PTP,1975
- ヘビーレプトンニュートリノ( $\tau_\nu$ )の質量と寿命に対する宇宙論・天体物理からの制限。 Sato & Kobayashi, PTP、1977.
- Axion放射と星の進化からの制限。 K.Sato,PTP,1978.

# III. 真空 (Higgs場) の相転移

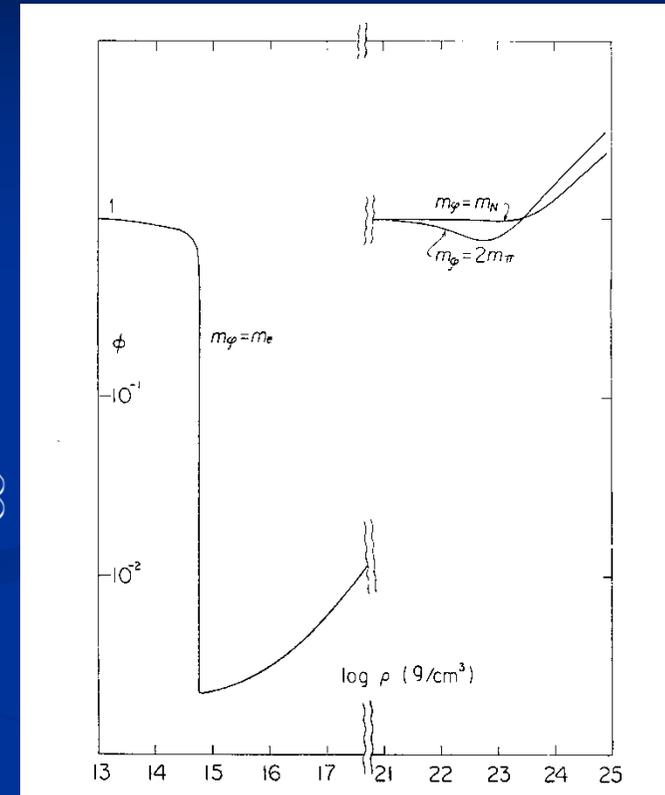
- WSやGUTは、高温、高密度で真空の相転移を予言していることに気づき、様々な宇宙現象に応用

例)

ゲージ対称性は密度の上昇により湯川結合の効果で回復、しかしゲージ相互作用で再び破れてゆく。Sato & Nakamura '76.

1976年、  
A.Linde (Lebedev)  
から 自分も同じ結論  
を得たと手紙、プレプ  
リントを送ってきた。

Higgs field

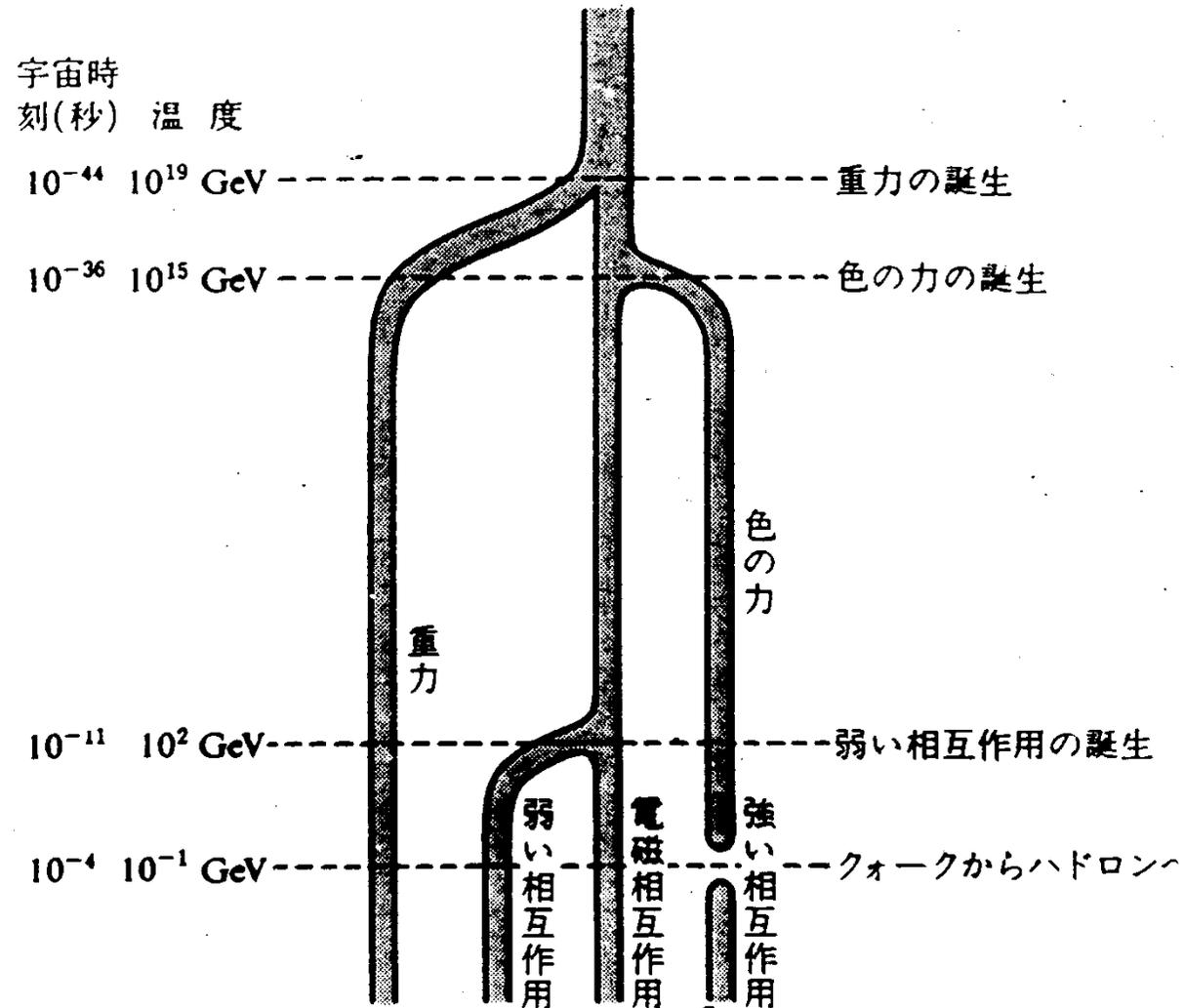


density

# IV. 指数関数的宇宙膨張モデル (インフレ理論)

統一理論の予想する  
「力の進化」  
佐藤 & 佐藤  
自然 '78

生物の進化と  
同じように、  
力も枝分かれ  
し進化する。



# 指数関数的膨張モデル(インフレーション)の論文

Guthより早く投稿した論文

## 1. Cosmological Baryon-Number Domain Structure and the First Order Phase Transition of a Vacuum

Phys. Lett. **99B** (1981), 66-70 K. Sato. submitted 1980 February 4.

バリオン領域、反バリオン領域が対称的にドメイン構造のなっている宇宙は、対消滅を起こすが、インフレーションによって拡大し消滅を避けるモデル。

## 2. First Order Phase Transition of a Vacuum and the Expansion of the Universe

Mon. Not. Roy. Astr. Soc. **195** (1981), 467-479 K. Sato . 1980 February 21.

相転移で作られる揺らぎをインフレーションで拡大し、超地平線スケールの揺らぎを作り、現在の宇宙の大構造の種を仕込む。

## 3. Monopole Production in the Very Early Universe in a First- Order Phase Transition 磁気単極子問題を解決し、ビッグバンと統一理論の矛盾を解消

Nucl. Phys. **B180** (1981), 385-404 M.B. Einhorn and K. Sato. 1980 July 30.

## Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2011

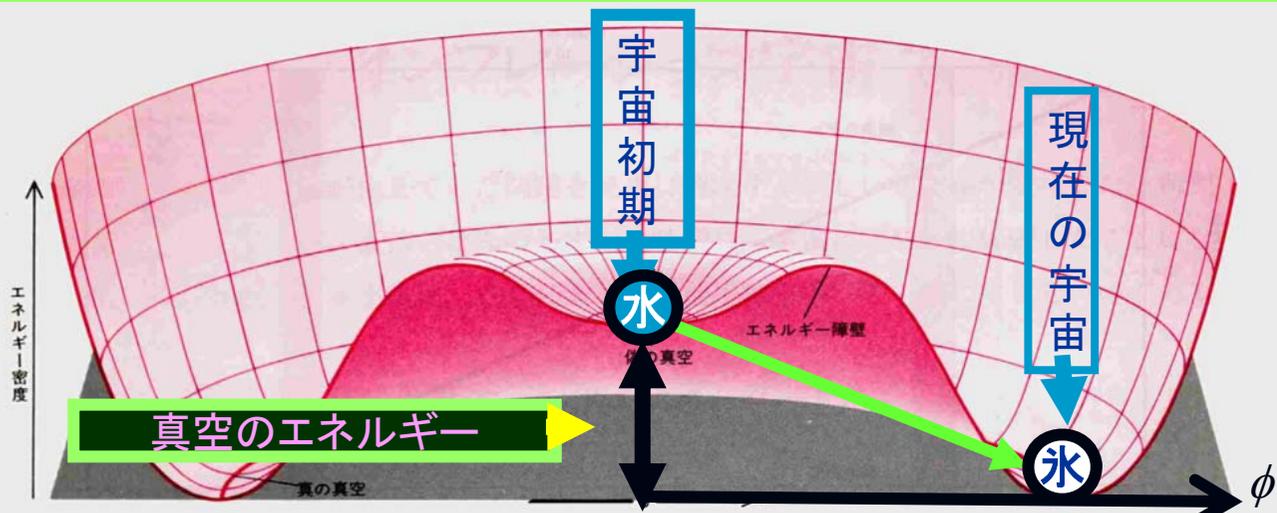


# THE ACCELERATING UNIVERSE で引用されているインフレーション論文

- A. Starobinsky, Phys. Lett., B91, 99-102, (1980);  
    アインシュタイン方程式を改変、量子補正として
- K. Sato, MNRAS, 195, 467-479, (1981); (佐藤 第2論文)  
    大統一理論からの予言、1次相転移モデル
- A.H. Guth, Phys. Rev., D23, 347-356, (1981); 上に同じ
- A.D. Linde, Phys. Lett., B108, 389-393, (1981);  
    遅速転落モデル、はじめは大統一理論モデルの微調整改良版として
- A. Albrecht and P.J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett., 48, 1220-1223, (1982), 上に同じ
  
- K.Sato, Phys. Lett. **99B** (1981), 66-70. (佐藤 第1論文)  
    CP対称性の自発的破れによる物質・反物質ドメイン宇宙モデル提唱  
    ヒッグスポテンシャルの微調整による Graceful Exit of Inflationを示唆した。  
    (A.Vilenkinによる評価)
- M.B. Einhorn and K. Sato (佐藤 第3論文) 磁気単極子過剰生産問題の解決  
    Nucl. Phys. **B180** (1981), 385-404

# 大統一理論に基づく原初インフレーションモデル

1981



統一理論は宇宙初期に真空のエネルギーを示唆。

真空エネルギーに働く斥力で急膨張 (一般相対論)

落下で宇宙加熱

ヒッグス場の代わりにインフレーションを引き起こす仮想的場を

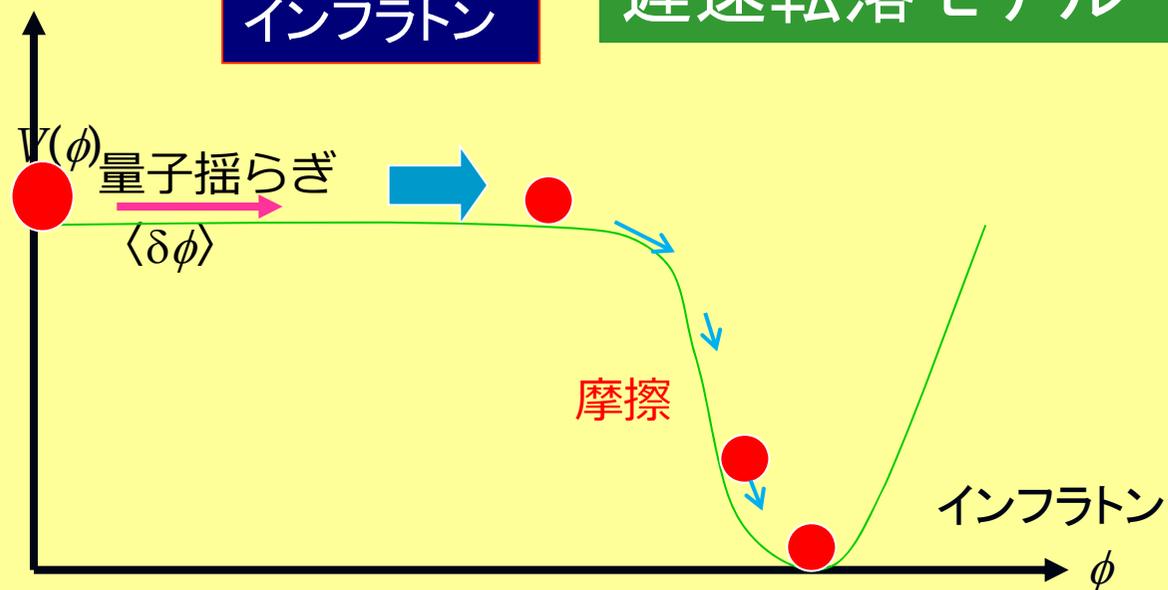
**インフラトン場**

と呼び、その量子揺らぎが種と考えられるようになった。

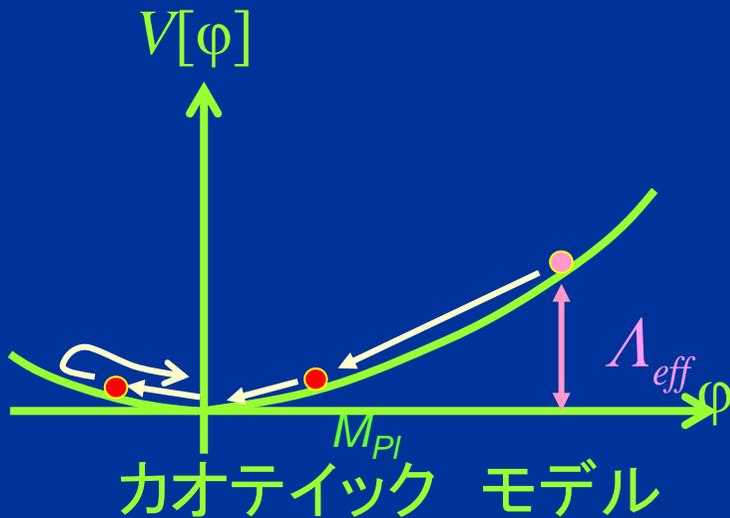
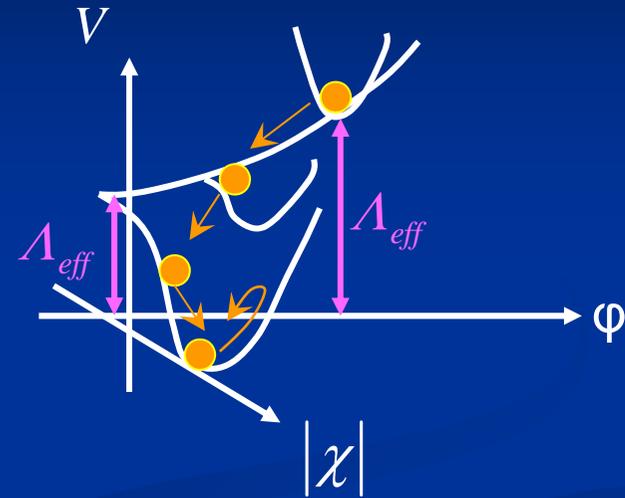
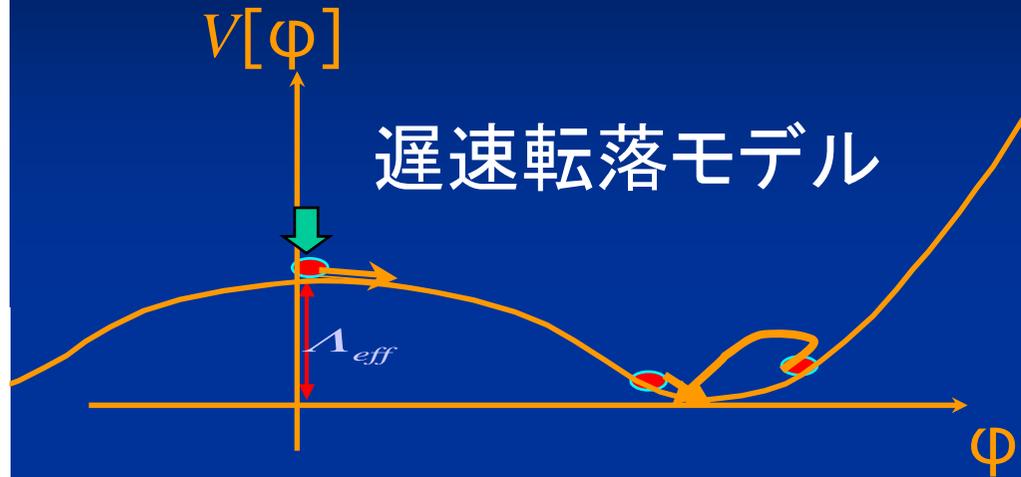
大統一理論のヒグス場

**インフラトン**

**遅速転落モデル**



# 多様なインフレーション モデル



横山スライドより

# 今や、ものすごい数 (> 100) の インフレーションモデル

カオティックインフレーション、ハイブリッドインフレーション、拡張インフレーションモデル、超拡張インフレーションモデル、ソフトインフレーション、ナチュラルインフレーション、オープンインフレーション、スカラーニュートリノモデル……など

もともと、インフレーション理論の基本的予言、

1. 宇宙が平坦、 $\Omega = 1$ 、
2. 揺らぎのパワースペクトル指数、 $n_s = 1$ 、
3. 揺らぎはガウス分布

だったが、大きくずれたものも可能になった。

# IUCAAでの講演に対する T. Padmanabhanの質問、1990年頃

どのような観測事実が、インフレーション理論  
が嘘だと証明できるのか？

What observational facts are able to falsify the inflation theory?

インフレ理論はそれから大きくずれたような観測も  
説明できるよう対応可能？

誤りと証明されることはないのか？

# インフレーションの予言する宇宙論パラメータは多様になってしまった。

・宇宙は平坦でなくてよい。Open Inflation

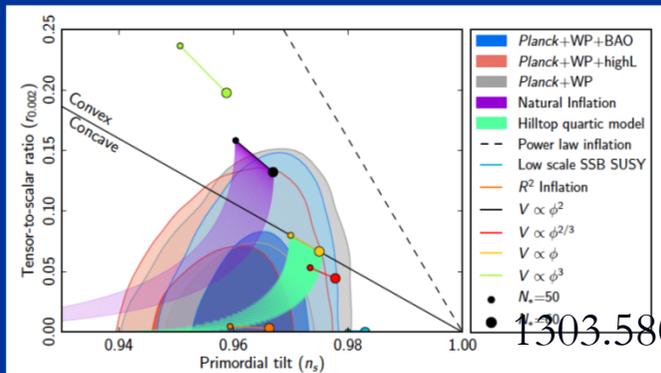
$$\Omega < 1$$

・power law indexも多様でよい。

$$n_s \approx 1 - 4\varepsilon + 2\eta$$

$$n_t \approx -2\varepsilon$$

$$r \equiv T/S = \frac{C_2^{(T)}}{C_2^{(S)}} \approx 13.7\varepsilon$$



$$\varepsilon = \frac{m_{pl}^2}{16\pi} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \ll 1$$

$$T = 6 C_2^{(T)} = 0.66V / \varepsilon m_{pl}^4$$

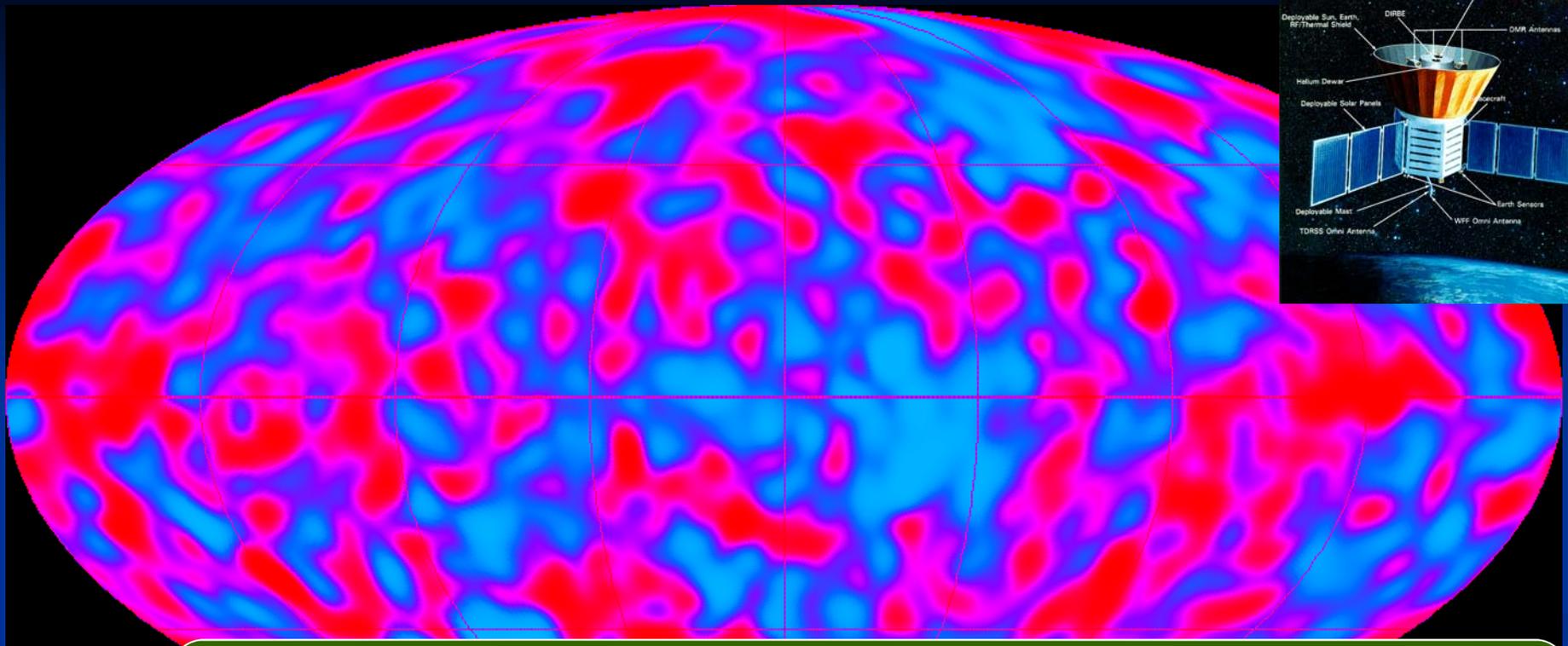
$$\eta = \frac{m_{pl}^2}{8\pi} \left( \frac{V''}{V} - \frac{1}{2} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \right) \ll 1$$

$$S = 6 C_2^{(S)} = 0.92V / m_{pl}^4$$

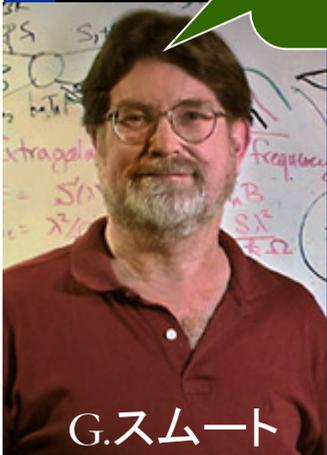
・密度揺らぎも ガウス分布でなくてよい。

# インフレーション理論を強く支持する最初の天文学的観測

米国、NASAの打ち上げた  
宇宙背景放射観測衛星(COBE)による  
インフレーションの仕込んだ、銀河団な  
ど宇宙構造の種の発見



この 揺らぎの発見によって、人々はインフレーション理論が正しいと、信じるようになるだろう。ノーベル賞（2006）



G.スムート

COBEは宇宙開闢38万年ころの宇宙の姿を描きだし、宇宙構造の種を見つけた。

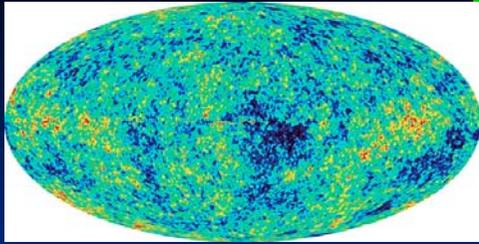
それはインフレーション理論が予言した、量子揺らぎによる種、 $n_s \sim 1$ 、と見事に一致した。

# インフレーションの成績は“不可”！ ただしWMAP前の評価

Peebles: Making Sense of Modern Cosmology、Scientific American, Jan. 2001

## 宇宙論の主要理論の成績表 (評価は、A+が最高で、A-, B+, B-と続く)

概念	評価	コメント
宇宙は熱い高密度状態から進化した	A+	天文学、物理学の各方面から説得力ある証拠が挙げられている
宇宙は一般相対性理論の予想のように膨張している	A-	これまでの結果では合格しているが、ほとんどが合格点ぎりぎり
奇妙な物質でできた暗黒物質（ダークマター）が銀河を支配している	B+	間接証拠が多いが、粒子は見つかっておらず、これに代わる理論もふるい落とされていない
宇宙のほとんどの質量は一様に分布している。それはアインシュタインの宇宙定数のように、宇宙の膨張を加速させる効果がある	B-	最近の観測結果では有望だが、証拠を積み重ねて理論的難問を解決しなければならない
宇宙はインフレーションからできた	不可	みごとな理論だが、 <u>直接証拠に欠け、物理法則を膨大に援用しなければ成り立たない</u>



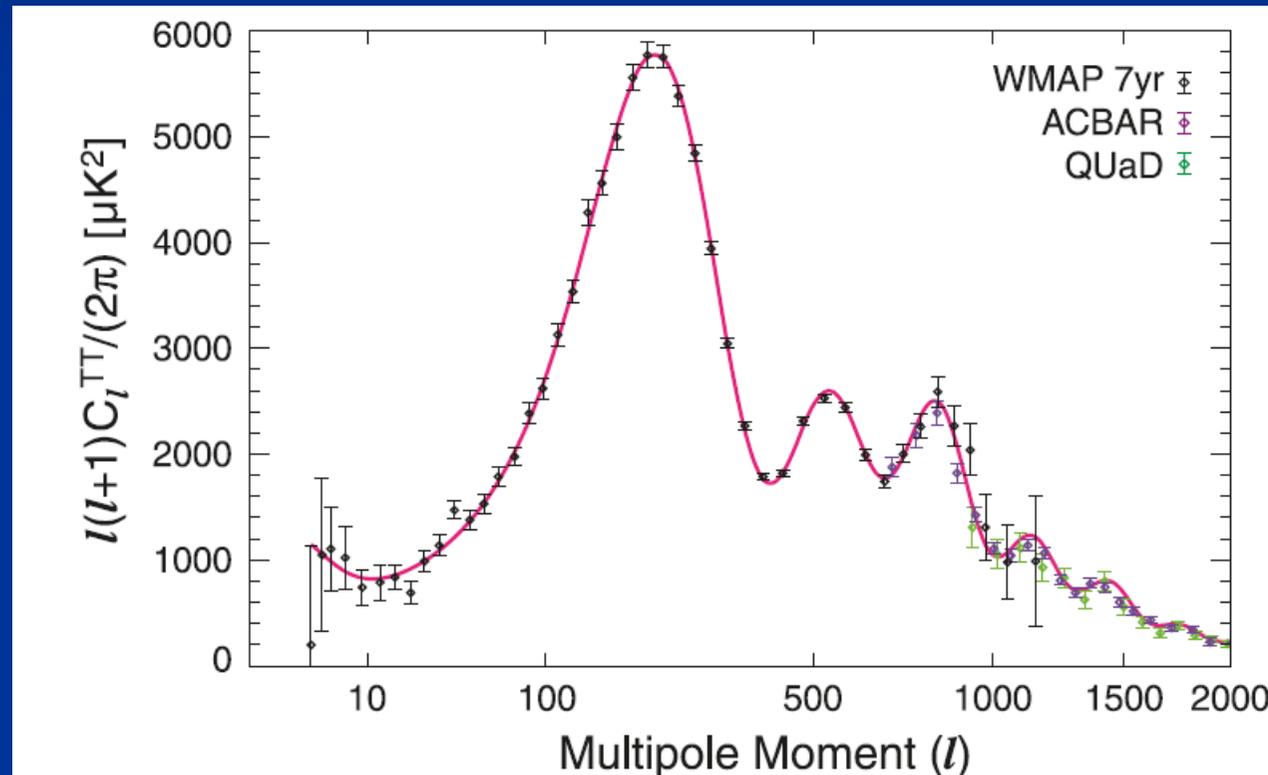
# WMAP が測定したパワースペクトル

2001年打ち上げ、2003年結果発表

$$T(\vec{n}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad \langle |a_{lm}|^2 \rangle = C_l$$

**angular power spectrum**

WMAP7 : Komatsu et.al. 2010



観測は どうして  
こんなに

物理学の予言ど  
おり一致するの  
か？

インフレーション  
宇宙論を強く支持。

$$P(k) = A k n_s - 1. \quad \underline{\underline{n_s = 0.963 \pm 0.012 (68\% CL)}}$$

# インフレーションに取って代わる 理論もない？

Endless Universe-輪廻宇宙モデル

- Beyond the Big Bang- Rewriting Cosmic  
History--- P.Steinhardt,N.Turok,2001

はたして、膜の衝突はビッグクランチからビッグバンへ転化できるのか？ サイクリックモデルのためには、都合の良いパラメータを選ばなければならない

インフレーションに取って代わるほど成熟したモデルにはなっていない。

ブレーン世界: 10次元中の空間3次元の“膜”が我々の宇宙



膜宇宙の衝突でビッグは始まった  
のか？ 永遠に繰り返すのか？

# インフレーション理論は 初期宇宙の標準パラダイムとなった

## 宇宙マイクロ波背景放射

(パワースペクトルの一致、および指数、 $n_s \sim 1$ 、揺らぎのガウス性)

大構造観測と形成シミュレーションの一致、

暗黒物質、暗黒エネルギーの観測 ( $\Omega = 1$ )

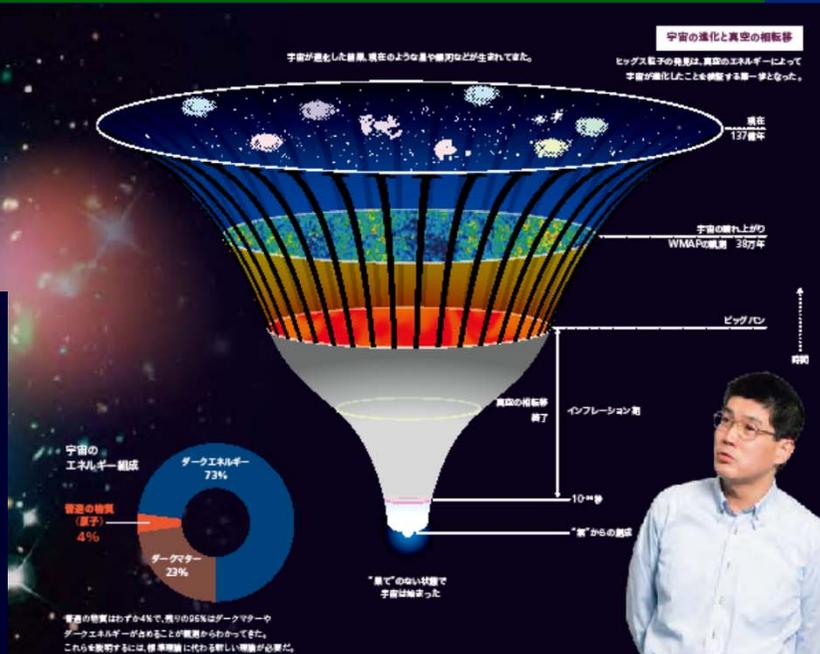
など観測からの支持を受け、モデルが確定して  
いないにもかかわらず、インフレーション理論は、  
初期宇宙の標準的パラダイムとなった。

# ヒッグス粒子の発見もインフレーション理論を強くサポート

## ヒッグス粒子の発見がもたらすもの

キーワードは時空と真空

ヒッグス粒子の発見は「真空」の意味を変化させました。真空が空っぽではなくヒッグス場が満ちていること、そしてヒッグス場に満ちた状態に相転移することでエネルギーが供給されて宇宙が進化したことを示しています。宇宙は誕生直後にインフレーションという急激な膨張を起こし、続いて超高エネルギー状態のビッグバン宇宙になりました。



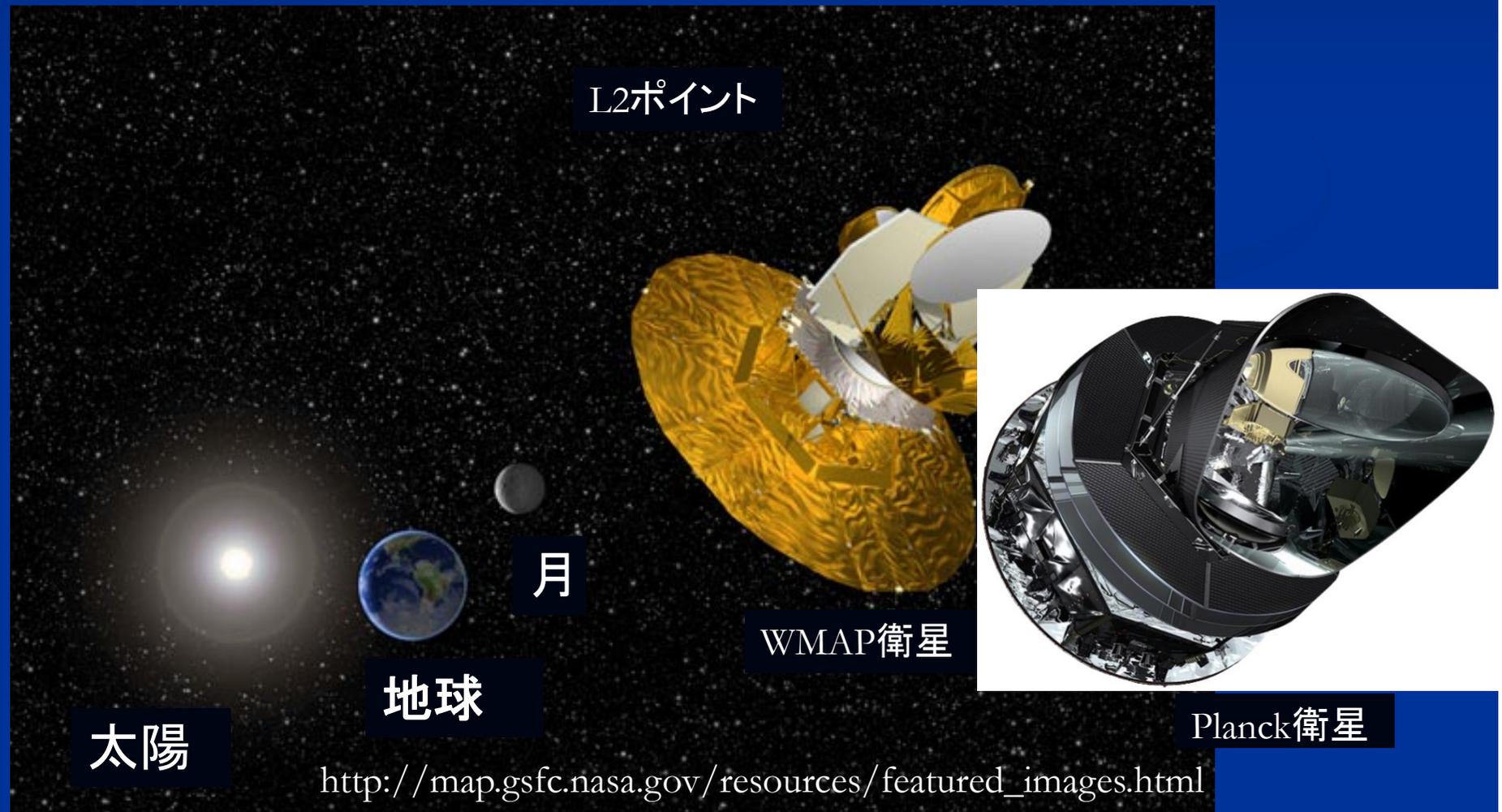
神組みではヒッグス粒子はものすごく大きな質量になるはず。しかし126ギガ電子ボルトと、かなり軽いので、そのメカニズムを説明する新しい理論が必要になります。一方、標準理論で説明できるのは宇宙のわずか4%にすぎない普通の物質に限られることがわかってきました。残りの96%の正体はまだ明らかではなく、これを説明する理論が求められています。その候補として超対称性理論などが研究されていますが、これは「ヒッグス粒子はそんなに軽いのか」という疑問に答えてくれる魅力的な理論です。

物理学の世界ではこれまで、「時空」は一般相対性理論が扱っていて、素粒子や「真空」の扱う量子力学の世界とは相容れないものでした。一般相対性理論と量子力学を結びつける原理がないから。超対称性理論はこの新しい原理になると考えられています。ヒッグス粒子の発見によって「真空」という入れ物が加わり、超対称性粒子が発見できれば、「時空」も素粒子で研究できるようになります。今後は、時空、真空、素粒子を通して宇宙の誕生を探る新しい時代を迎えようとしています。

**Asai's Point**  
LHCは素粒子を見る観測機であると同時に、タイムマシンです。光学望遠鏡で見ることができるのは、今から137億年前の宇宙誕生から38万年後までです。それより昔の宇宙は加速器の中に再現して調べることがありません。LHCが見つかりたい宇宙は誕生から10<sup>-32</sup>秒後、温度になると10<sup>16</sup>(1兆K)。そんな宇宙初期を直接つくりだして研究しているタイムマシンなのです。

素粒子センターホームページより

2003年、米国NASAのWMAP衛星  
2013年、欧州ESAのPlanck衛星は さらに詳しい  
観測によってインフレーション理論を裏付けた。



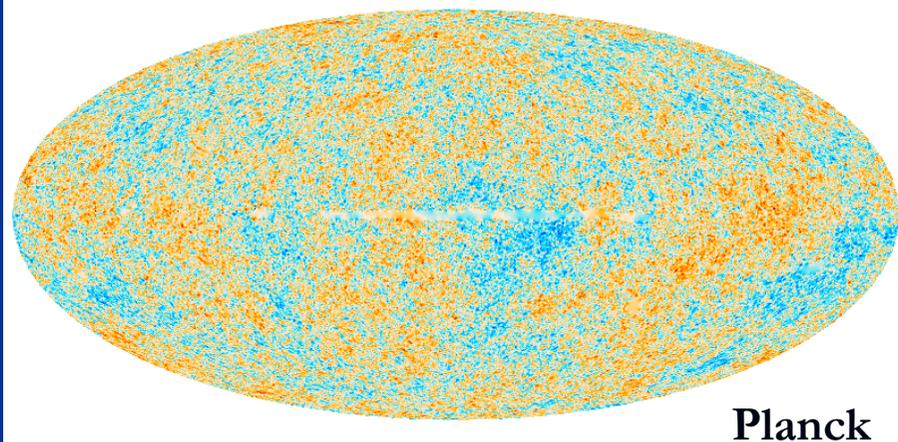
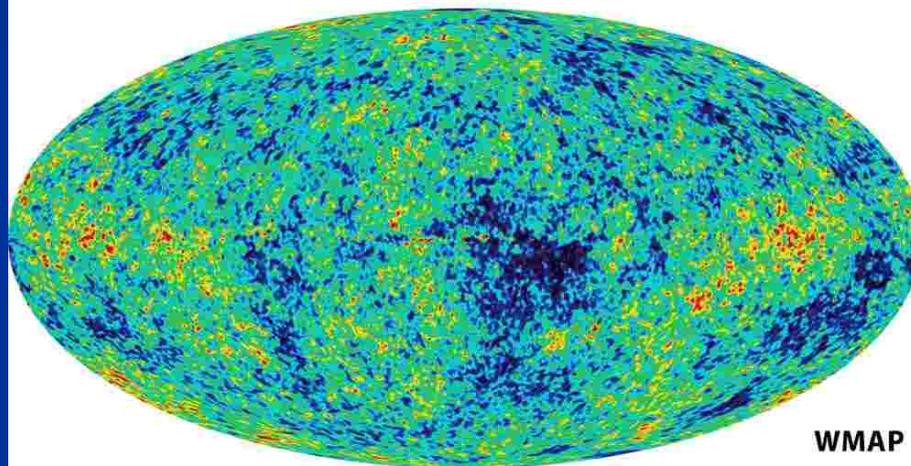
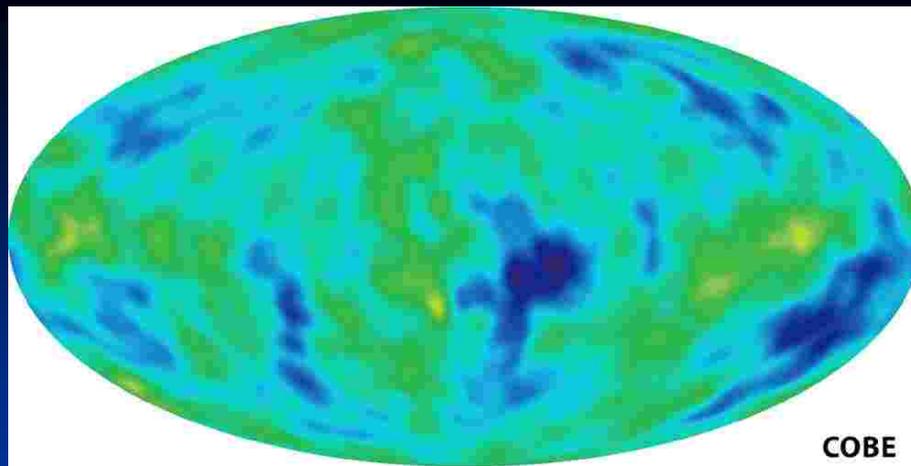
WMAP, Planck  
衛星の  
描いた  
宇宙開闢38万  
年頃の宇宙の姿

宇宙の年齢は

137億年 (WMAP)

138億年 (Planck)

2014年版発予定  
と求められた！



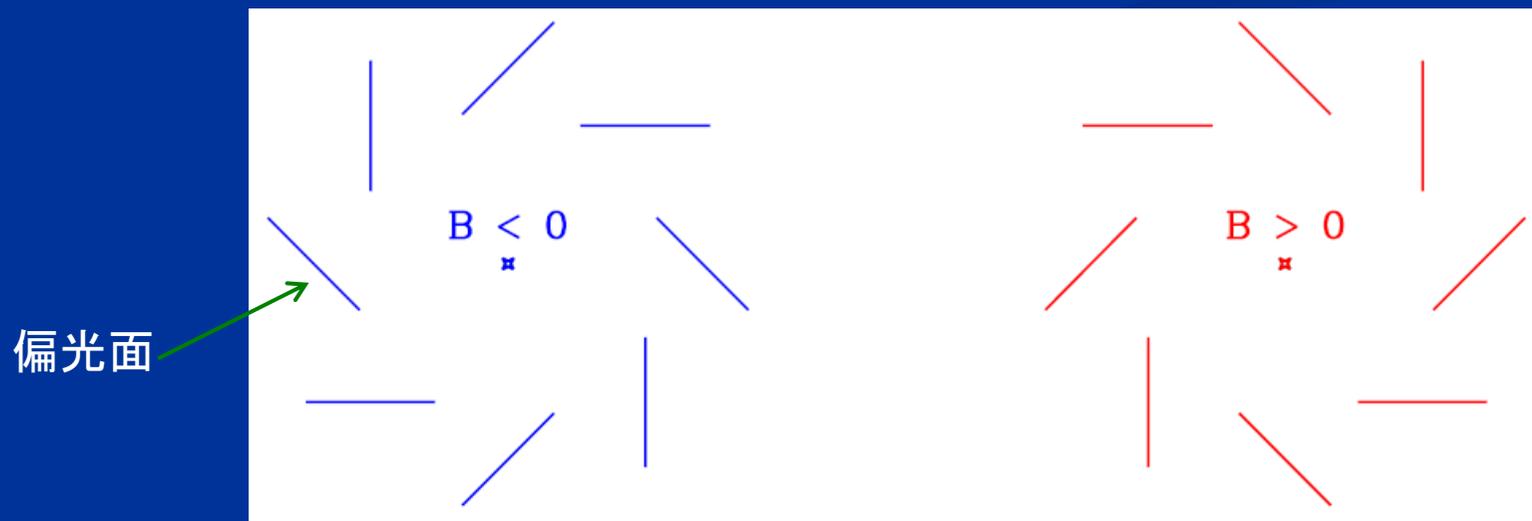
# インフレーション時代を 直接観測できないのか？

- 火の玉宇宙を創ったインフレーションの時代を  
**重力波**—**時空のさざなみ**—を使うと  
直接観測できる！

超高温の宇宙初期は**電磁波**(**光**や**電波**)に対して**不透明**なので見えないが、  
**重力波**に対しては**透明**なので、直接見ることができる。

# インフレーション起源重力波は 宇宙マイクロ波背景放射の 偏光からも観測できる。

- 重力波によって、宇宙マイクロ波背景放射にB-モードと呼ばれる偏光のパターンがつけられる。



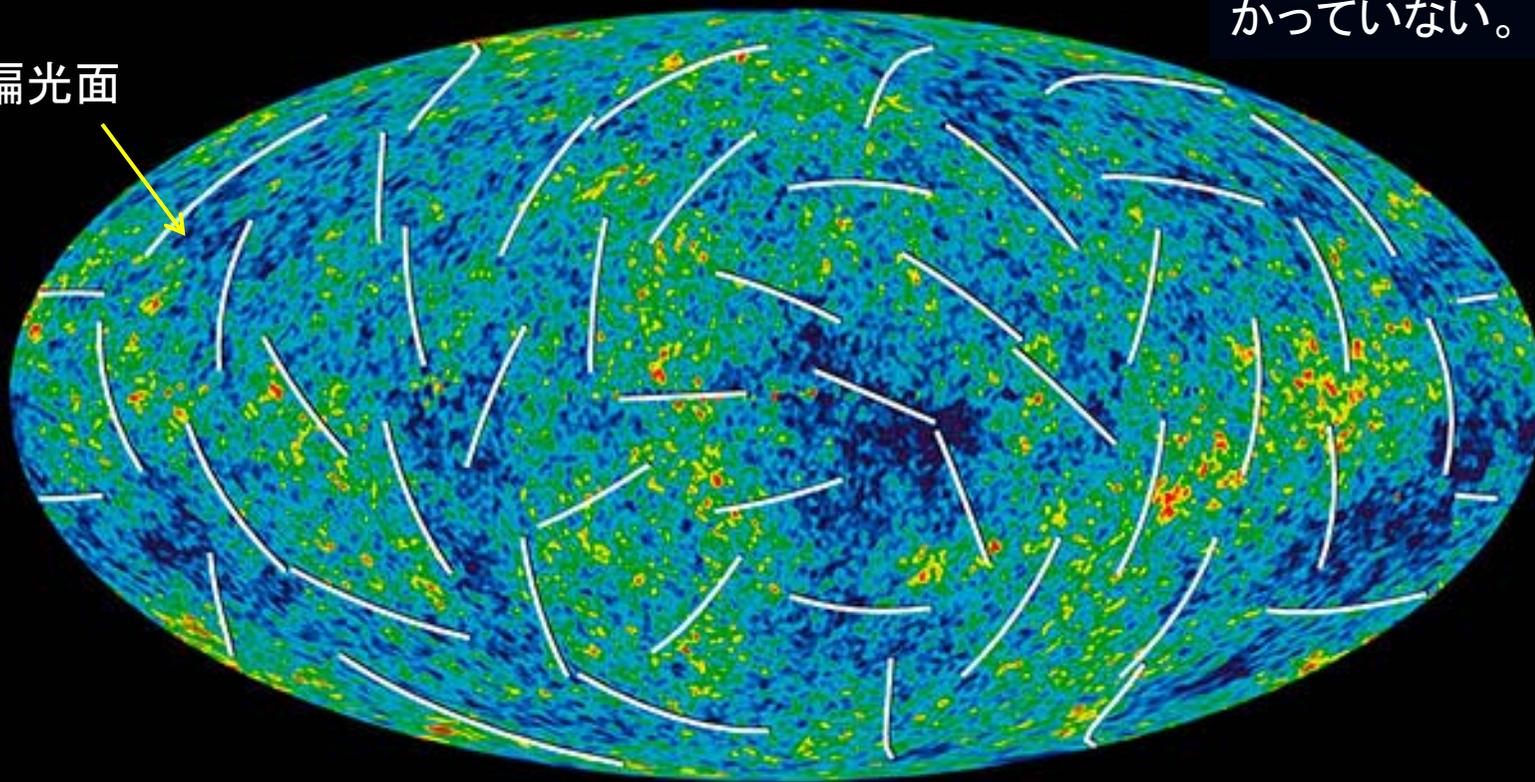
B-モード偏光パターン

# インフレーション起源重力波は宇宙マイクロ波背景放射の偏光からも観測できる。

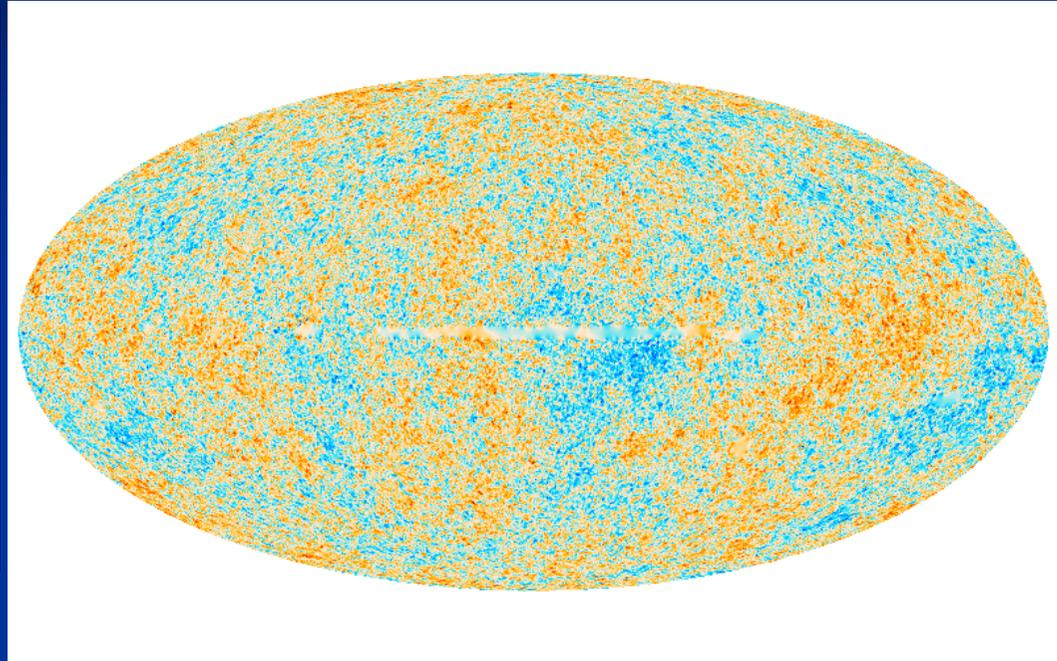
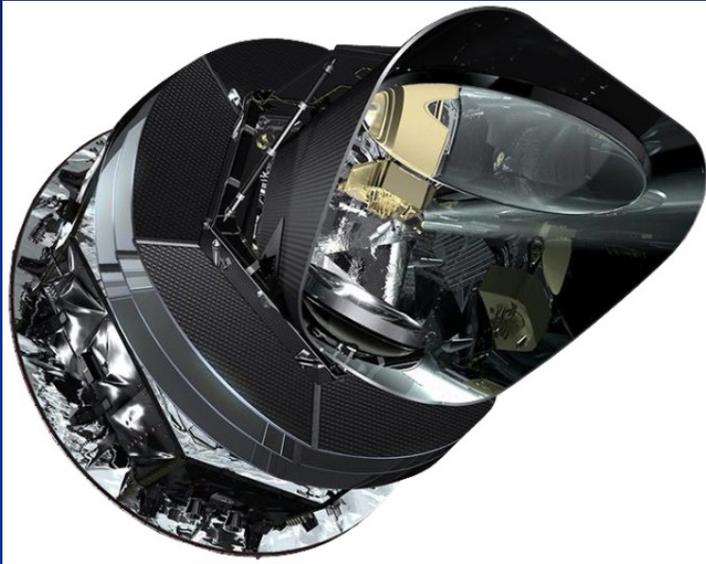
WMAP衛星による偏光観測

この段階では重力波は見つかっていない。

偏光面



# プランク衛星 偏光観測の結果



重力波の証拠は観測されなかったが、上限値が得られた。

$r = \text{テンソル}_{(\text{重力波})} / \text{スカラー}_{(\text{凸凹})}$

の大きさの比:  $r < 0.11$

# 2014年、3月 BICEP2の原始重力波発見

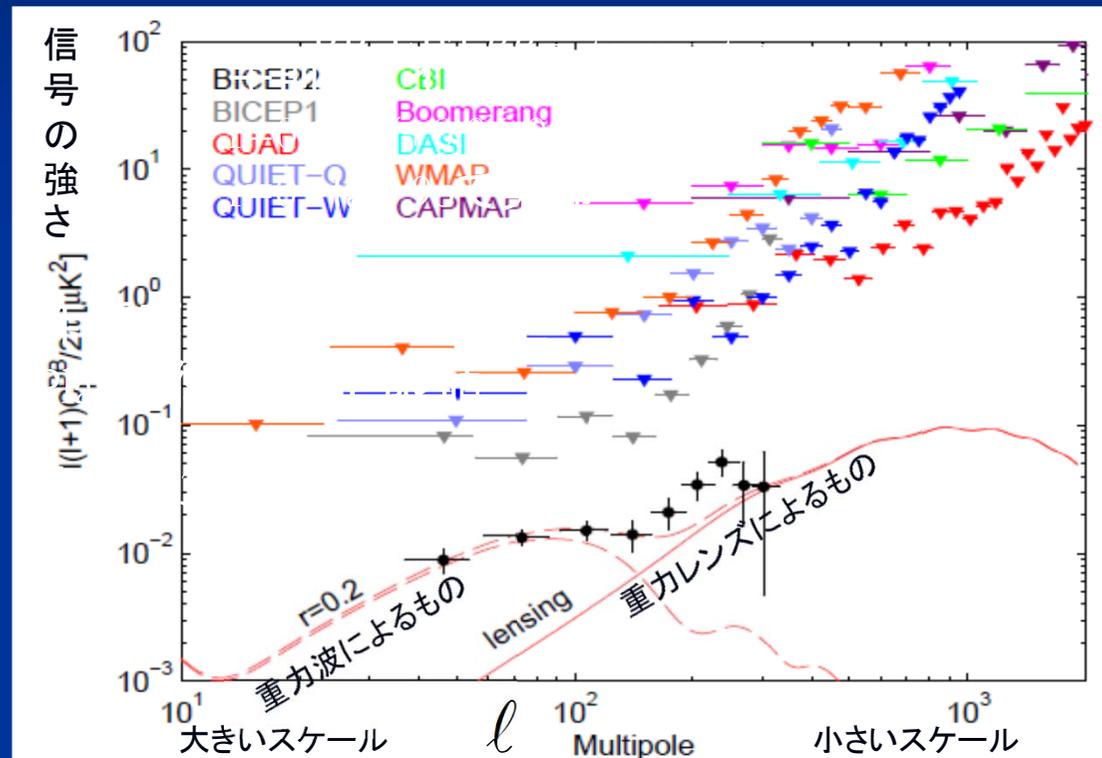
$r$ =重力波/電波凸凹

$$r = 0.20 (+0.07 \quad -0.05)$$

$r=0$  は $7\sigma$ で棄却

昨年までのWMAP衛星  
Planck衛星の上限値

$$r < 0.13 \text{ or } 0.11 \quad 95\% \text{C.L.}$$



$r=0.2$ ならほとんどモデルは除外され、カオティックインフレーションモデルしか残らない。

# 重力波を捕らえるとインフレモデルの選別が可能

- ・インフレーションの起こったエネルギースケール

$$r = 0.2 \text{ なら}$$

$$V[\phi] = (3.2 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 r = (1 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 \left( \frac{r}{0.01} \right)$$

$$E \sim 2 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

大統一理論のスケールよりやや高い程度

- ・インフレーションの起こった宇宙時刻

$$H^{-1} = 2.7 \times 10^{-38} \left( \frac{r}{0.01} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ sec}$$

$$t \sim 10^{-38} \text{ 秒}$$

大統一理論のスケールより  
2桁早い時刻、プランク時刻より5桁遅い。

スペクトルがわかると、インフレーションの終わった時刻、ビッグバンの時刻もわかるかも。

# 2014年、3月 BICEP2の原始重力波発見

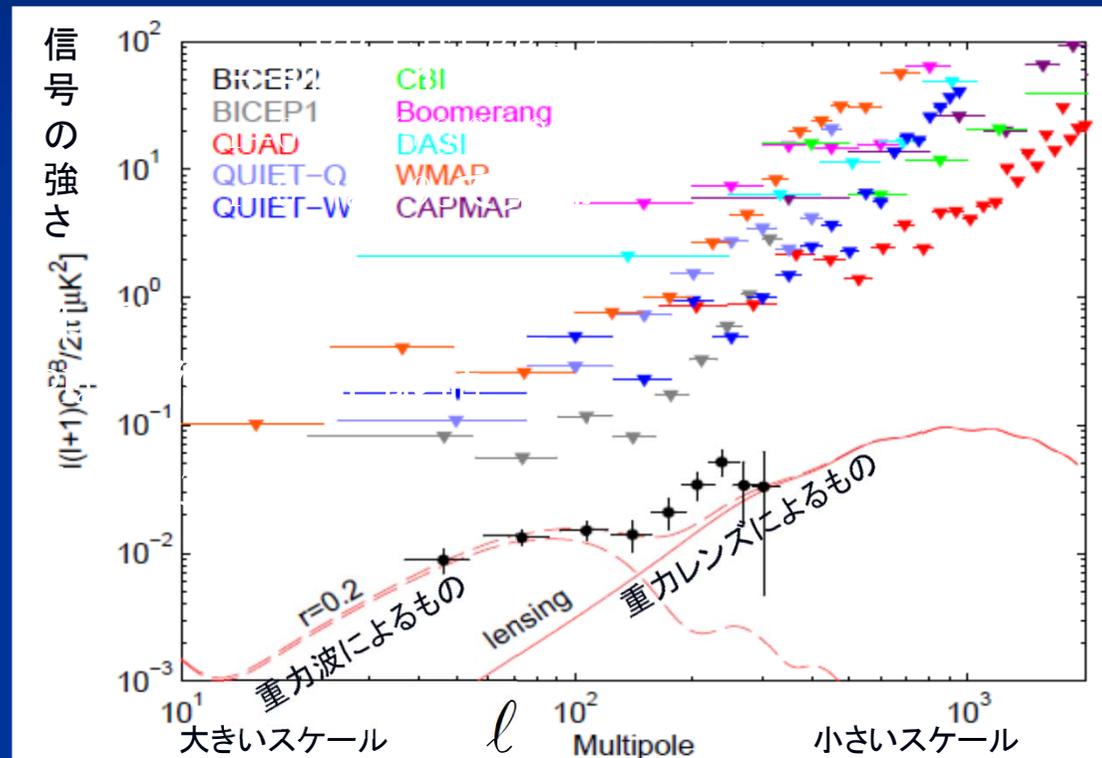
$r$ =重力波/電波凸凹

$$r = 0.20 (+0.07 \quad -0.05)$$

$r=0$  は $7\sigma$ で棄却

昨年までのWMAP衛星  
Planck衛星の上限値

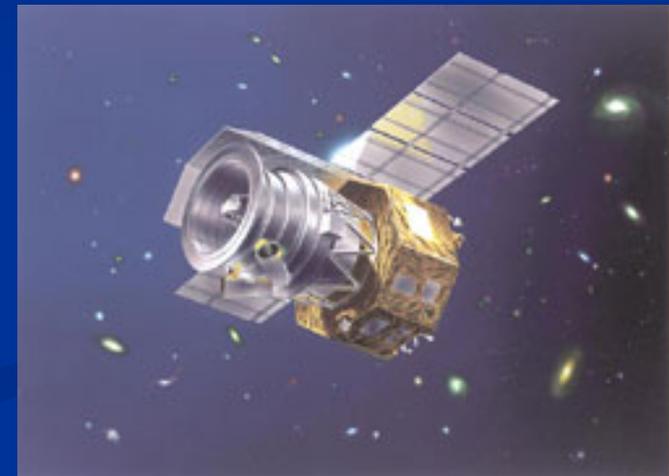
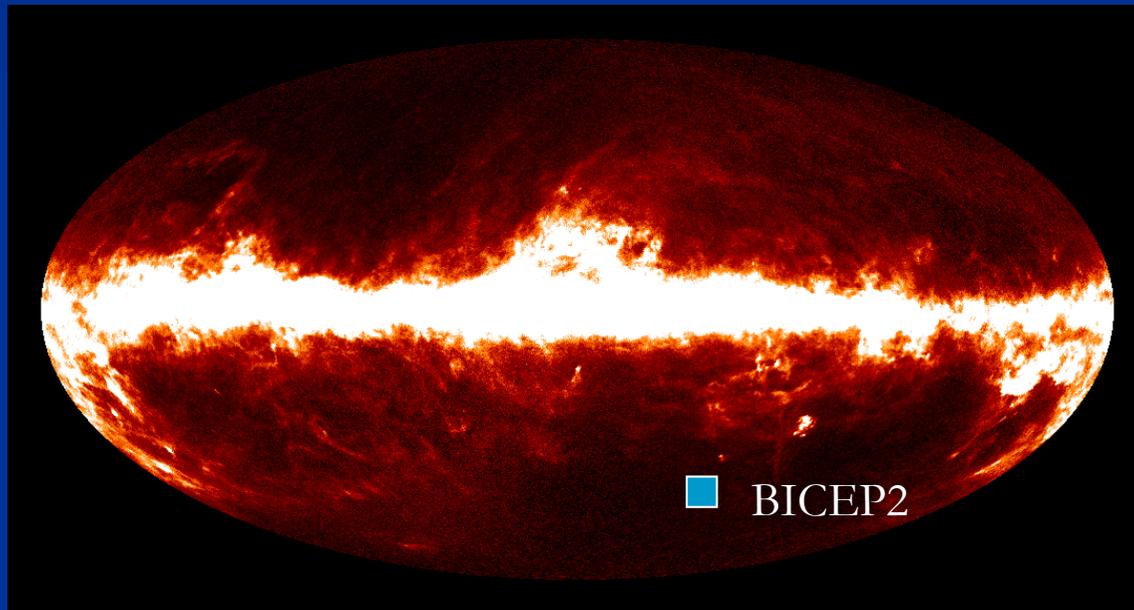
$$r < 0.13 \text{ or } 0.11 \quad 95\% \text{C.L.}$$



しかし、天の川銀河のダスト(ほこり)によるものは、小さいとして解析していたが、解析は不十分と指摘された。

# 天の川銀河ダストによる観測への影響

私たちは天の川銀河の中に住んでいるので、銀河の外を観測するとき、内側にあるダストの影響を受ける。

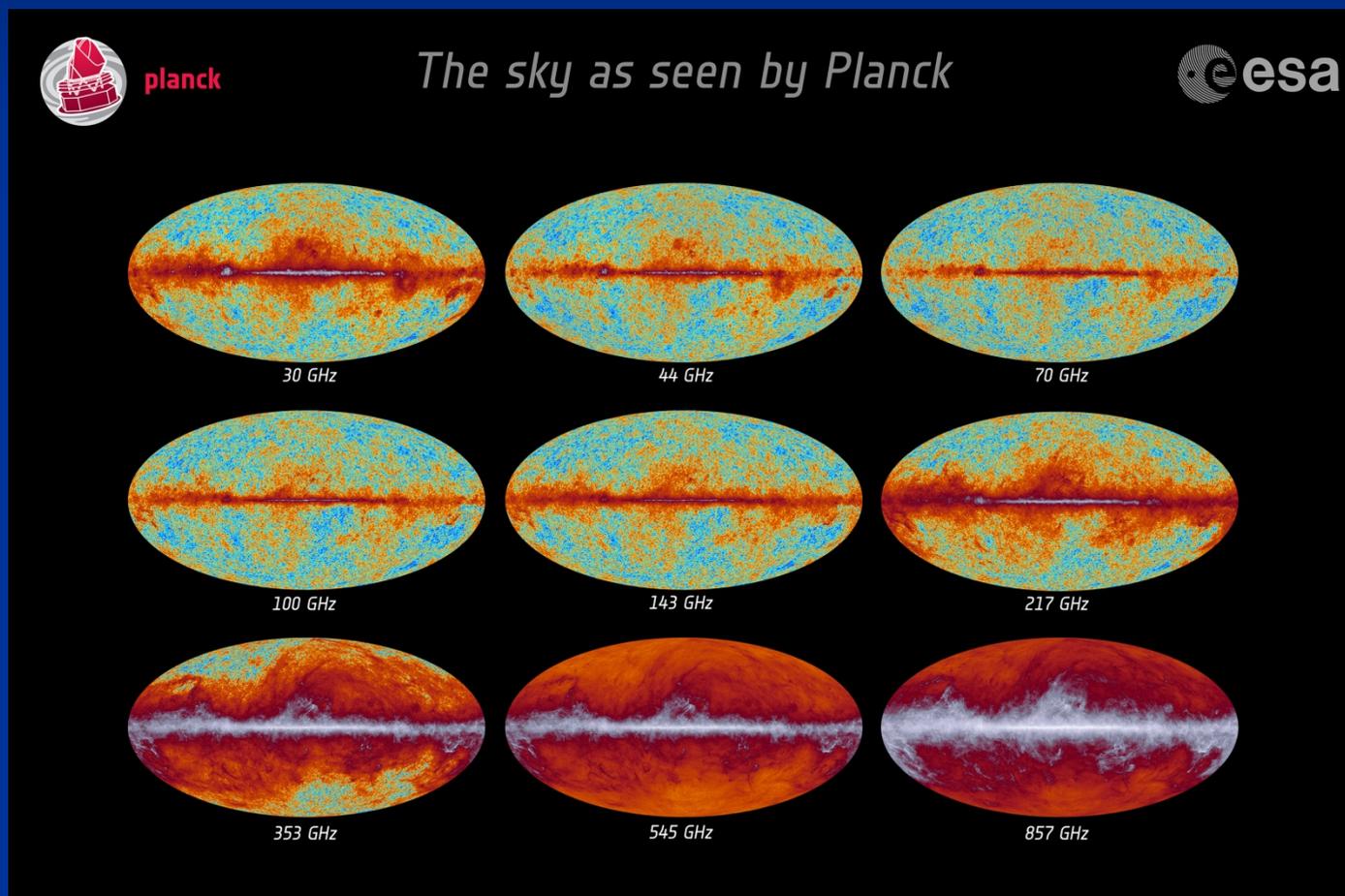


「赤外線天文衛星、あかり」  
(JAXA)

赤外線で見た天の川銀河全天図  
ダストの多いところ、銀河円盤が輝いている。  
銀河円盤の外でも埃の影響を受ける。

# 天の川銀河ダストによる観測への影響

Planck衛星による、いろいろな周波数での全天の地図。



赤道に  
銀河円盤見える。  
る。

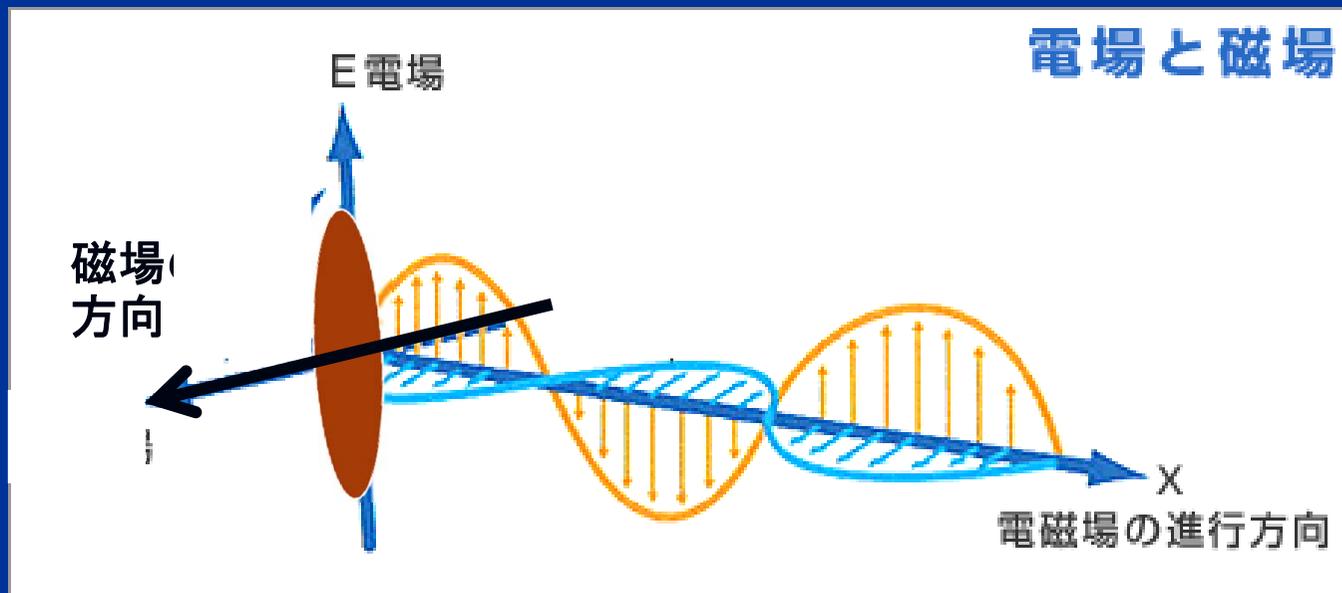
低い周波数(上  
段)では銀河の  
シンクロtron  
電波が

高い周波数(下  
段)ではダスト  
からの電波が  
主にきている。

下の段は主にダストからの放射

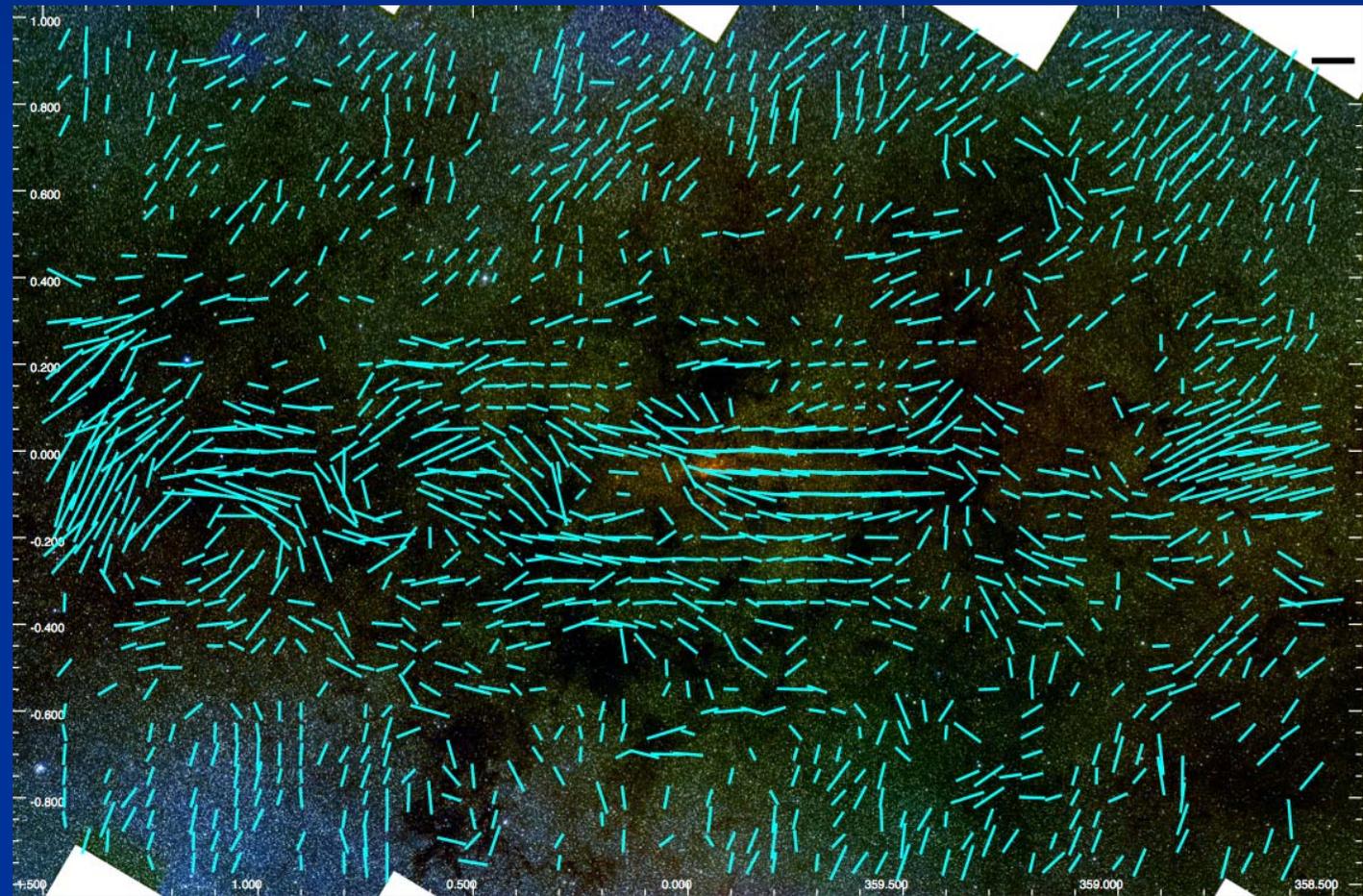
# ランダムな磁場によって、B-mode偏向も作られる。

- ・磁場があるところでは、ダストの長軸は磁場に直交する方向にそろろう。（ウイナーを竹串で刺したように）
- ・ダストの放射する電磁波は、長軸方向に偏光する。

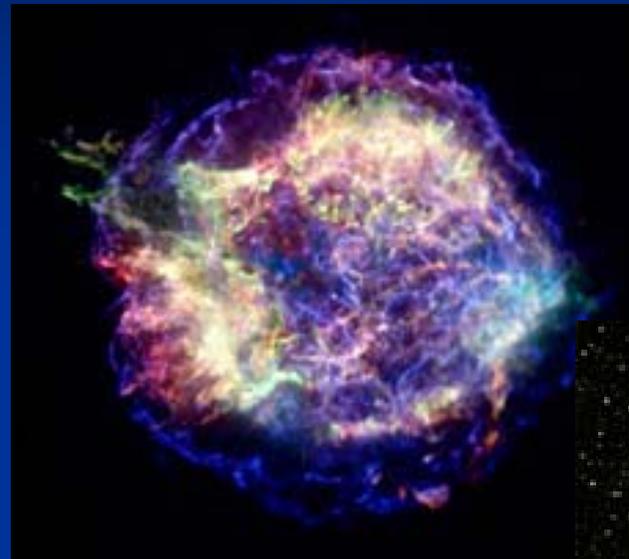
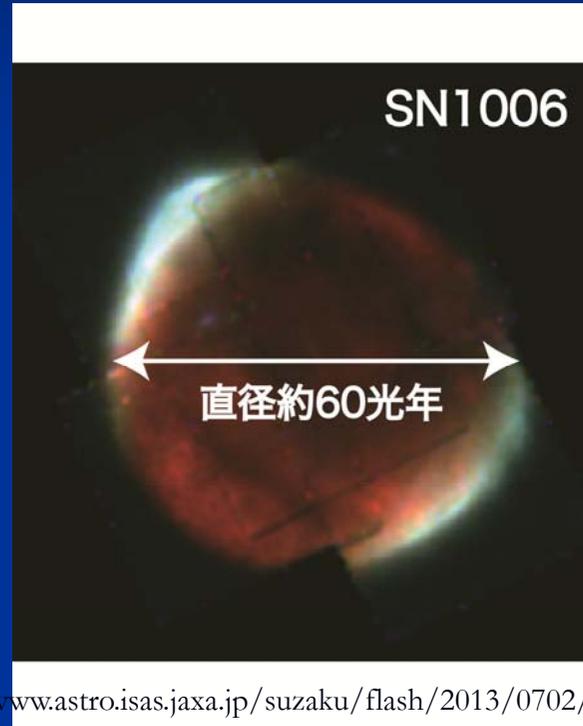


# 銀河中心領域の偏光パターン

K<sub>s</sub> 偏光マップ  
3° × 2°  
(西山正吾、  
宮城教育大  
提供、  
2014年6月)



# 渦巻きパターンは超新星残骸か？



:NASA/CXC/UMass  
Amherst/M.D.Stage et al.

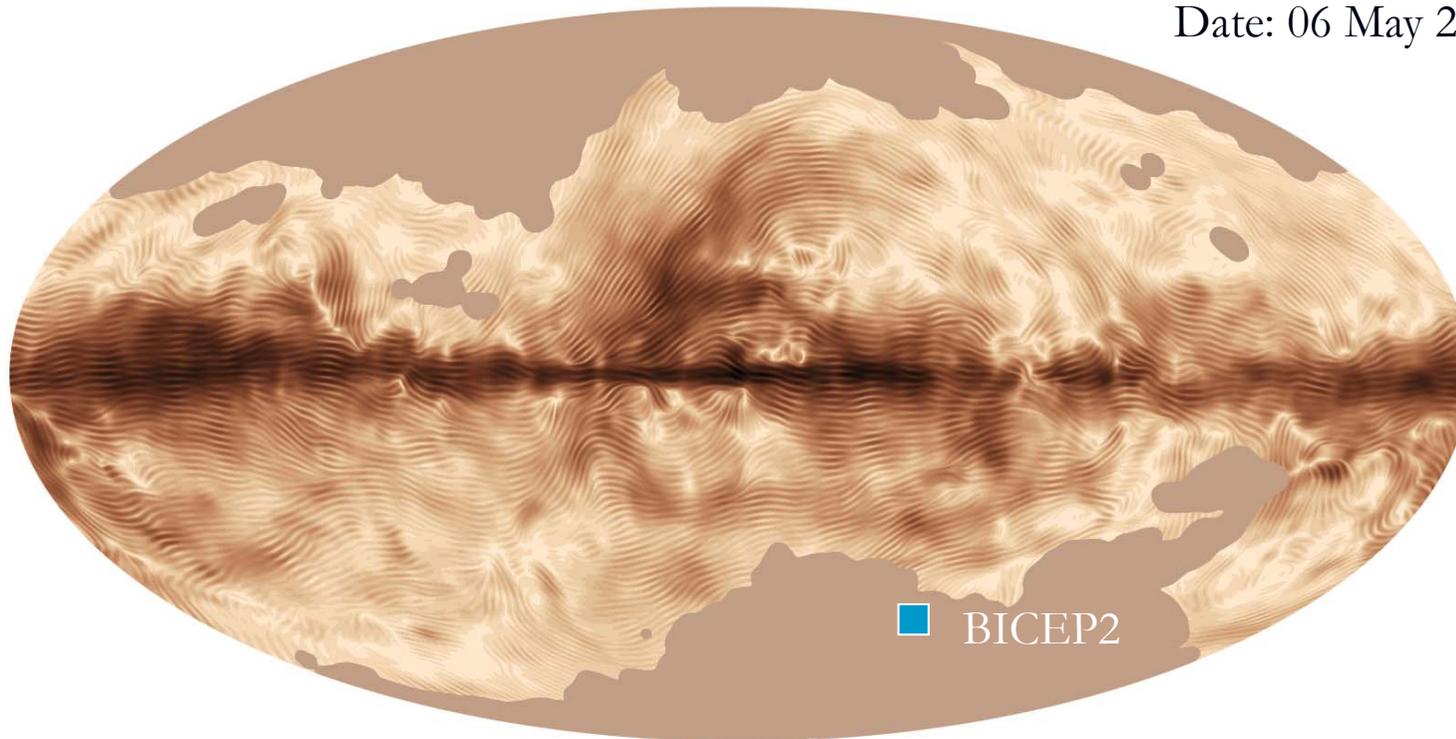


NASA/CXC/Penn State/S.Park  
et al.; Optical: Pal.Obs. DSS

いくらかの渦巻きパターンは  
超新星残骸と一致

# Planck衛星のダスト偏光観測による磁場の方向分布図

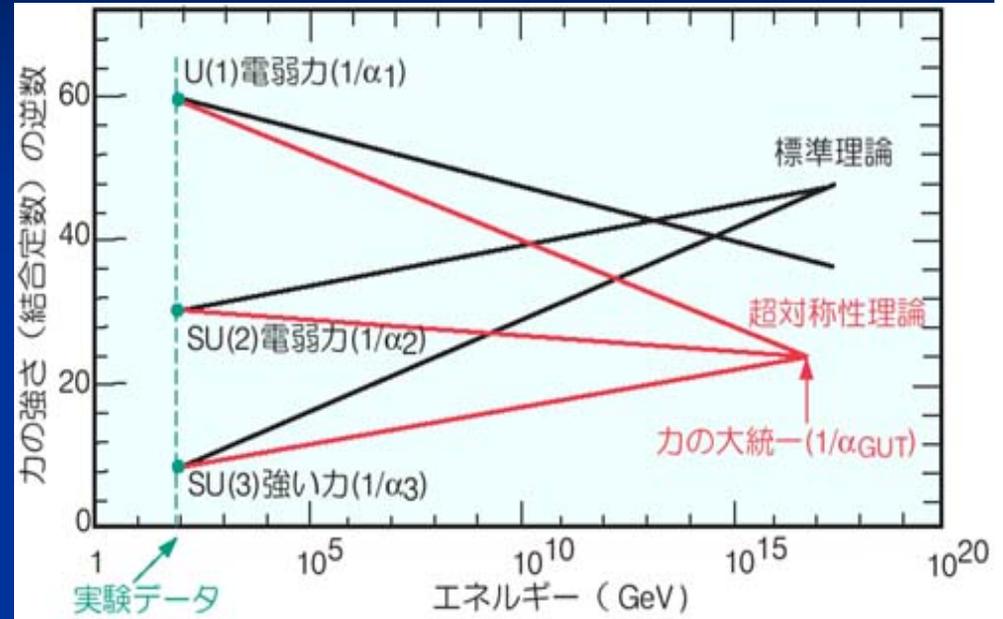
Date: 06 May 2014



- ・BICEP2はPlanck衛星によるダストの観測に基づき、解析したが、それは古いものだった。
- ・あたらしいダストのデータも公表されたが、BICEP2の領域は未発表。すべて公表されればBICEP2はじめ地上観測グループも用いることができる。
- ・この10月にPlanck衛星の新しい解析結果も発表される。

# 理論への期待

- インフロン場の現象論的モデルビルディングも必要だが  
超大統一理論, super GUT  
など素粒子論的に根拠あるもの  
に基づいた理論の構築を目指す  
ことを期待。



例) K.Nakayama、F.Takahashi JCAP05(2012)035など  
 $SO(10) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \times U(1)_{\{B-L\}} \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)_{\{Y\}}$

↑は小さいだろうが、LiteBIRDに期待

# インフレーションは隣のブレーン、反ブレーンの衝突で引き起こされるのか？

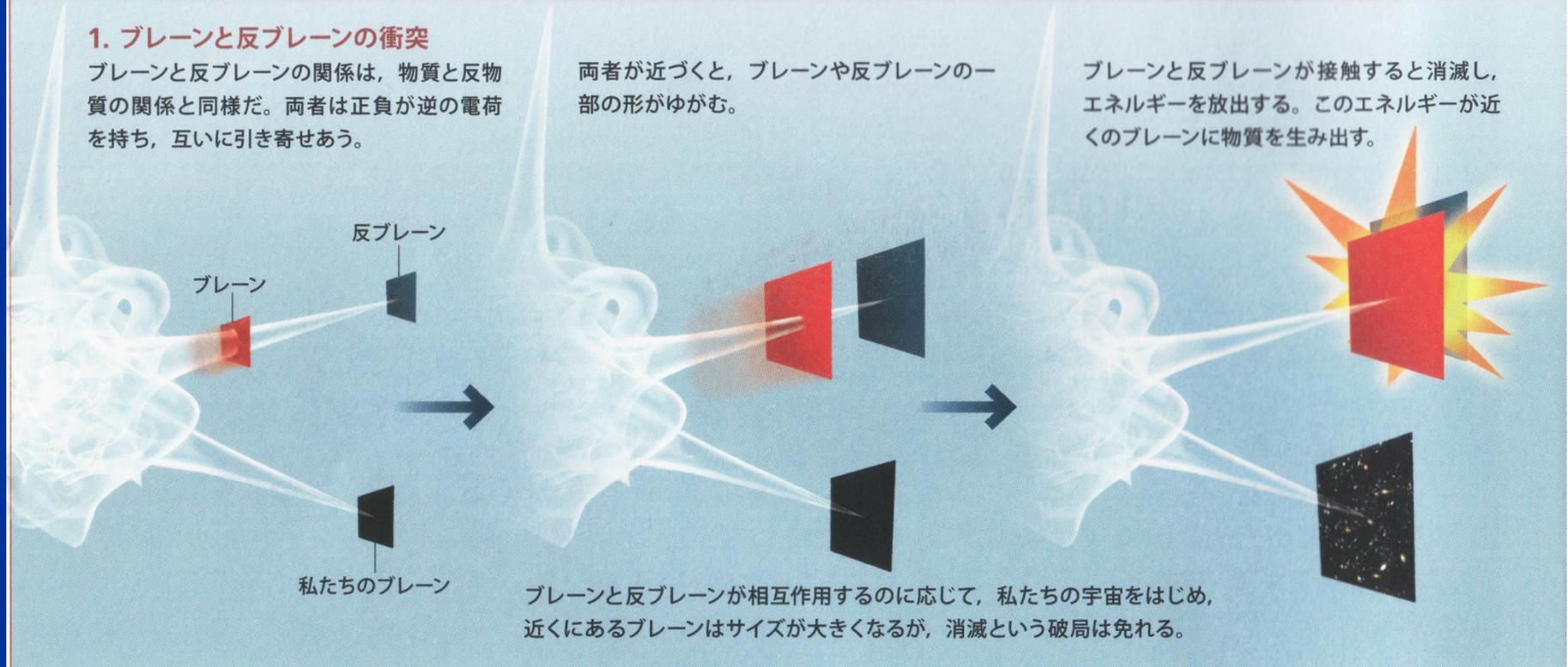
## インフレーションの原動力は？——ひも理論が示す2つの可能性

### 1. ブレーンと反ブレーンの衝突

ブレーンと反ブレーンの関係は、物質と反物質の関係と同様だ。両者は正負が逆の電荷を持ち、互いに引き寄せあう。

両者が近づくと、ブレーンや反ブレーンの一部の形がゆがむ。

ブレーンと反ブレーンが接触すると消滅し、エネルギーを放出する。このエネルギーが近くのブレーンに物質を生み出す。



ブレーンと反ブレーンが相互作用するのに応じて、私たちの宇宙をはじめ、近くにあるブレーンはサイズが大きくなるが、消滅という破局は免れる。

# 今後の観測への期待

- Planck衛星の10月の最終解析結果発表？

0.1 < r < 0.2 追認？ もしくは否定？

もしくは小さな値で発見 r ~ 0.05 ?

- 地上観測は30余のグループが進めている。

極めて過剰競争分野。ACTPol, CLASS, ABS, SPT,

POLARBEAR (KEK 羽澄など) グループなど高エネルギー分野の凄腕を持った研究者が参入

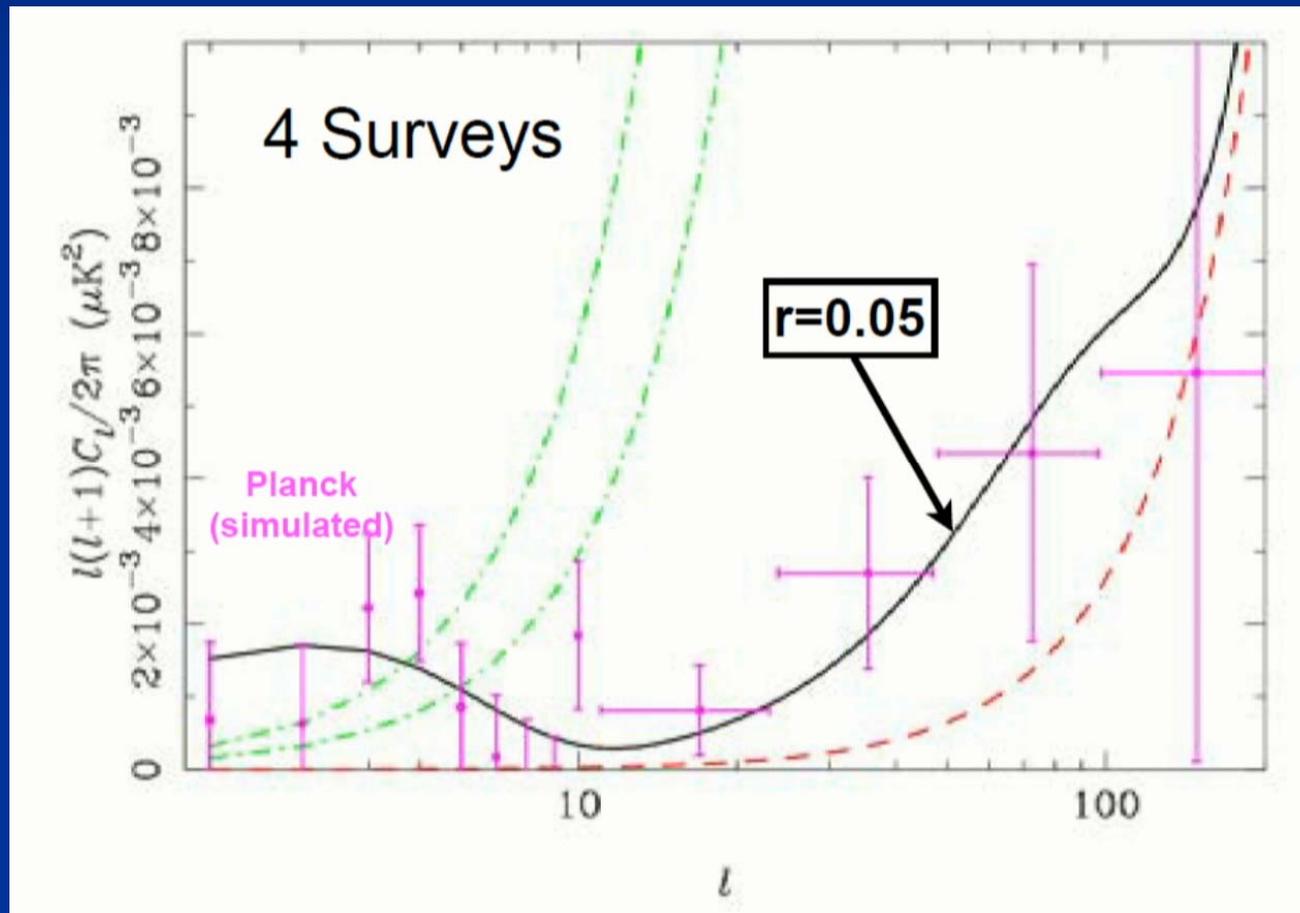
~ 数十億円程度

- B-モード観測専用人工衛星観測計画

LiteBIRD (r ~ 0.001 の感度で全天観測) も期待

# Planck Polarization data release expected in October

Douglas Scott: BICEP2 workshop @Perimeter Institute, Apr. 4



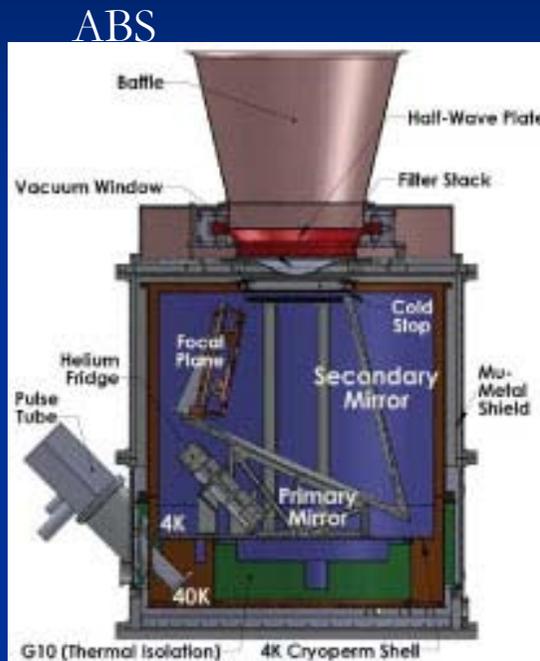
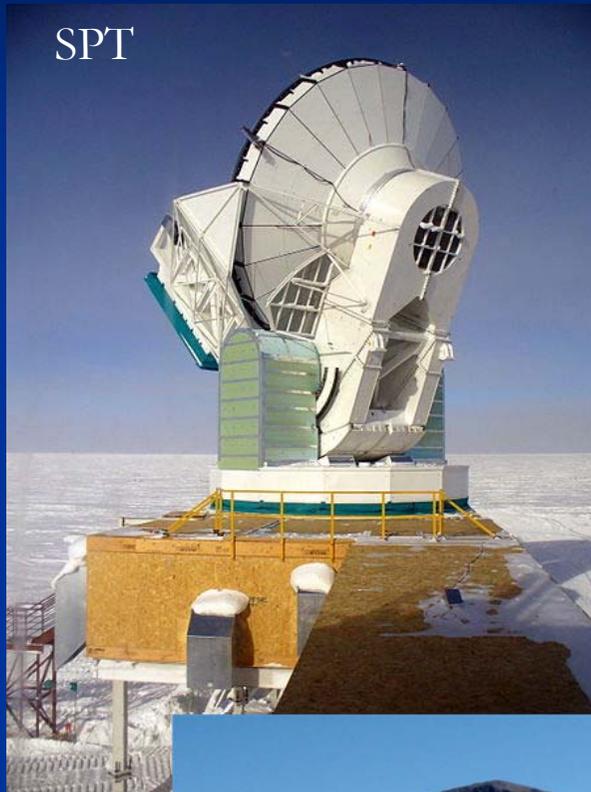
$r=0.05$ まで感度があるなら、有限の値が得られるのではないかと期待。

さらに、超大波長重力波が観測される。

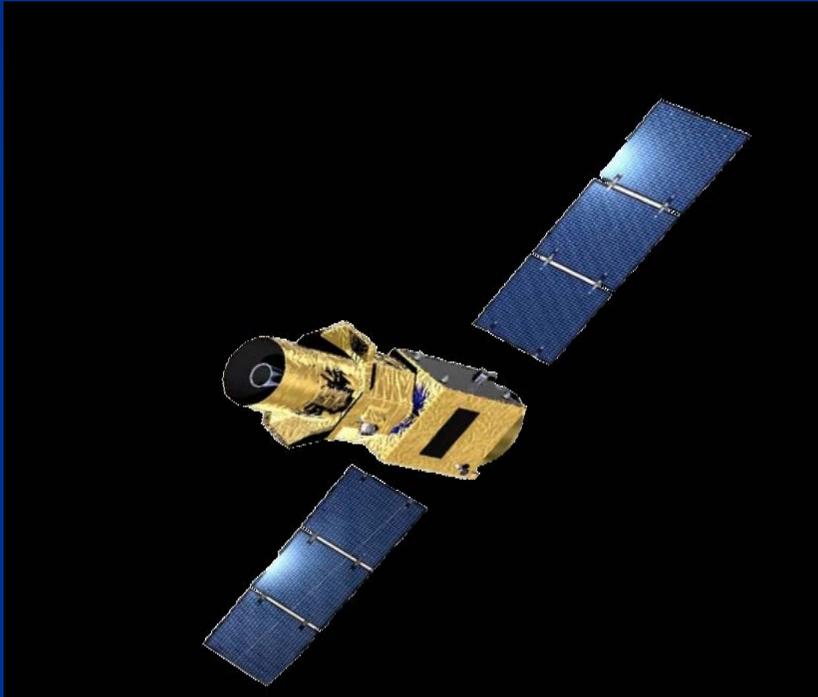
インフレーションは強く証拠付けされると期待。

# 地上観測、他のグループ

南極やアタカマ砂漠(チリー)で多くのグループが進めている



# インフレーション観測専用望遠鏡用 ライトバード (LiteBIRD)



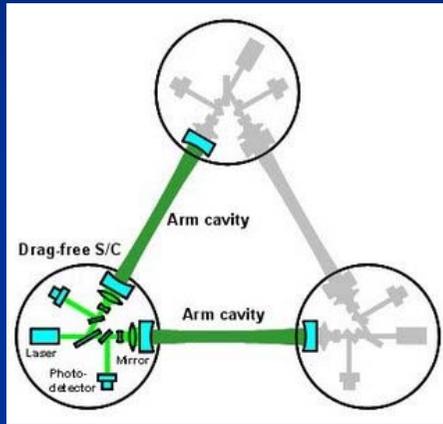
$r \sim 0.001$  の感度で全天観測  
(羽澄 KEK)

[cmbpol.kek.jp/litebird/](http://cmbpol.kek.jp/litebird/)

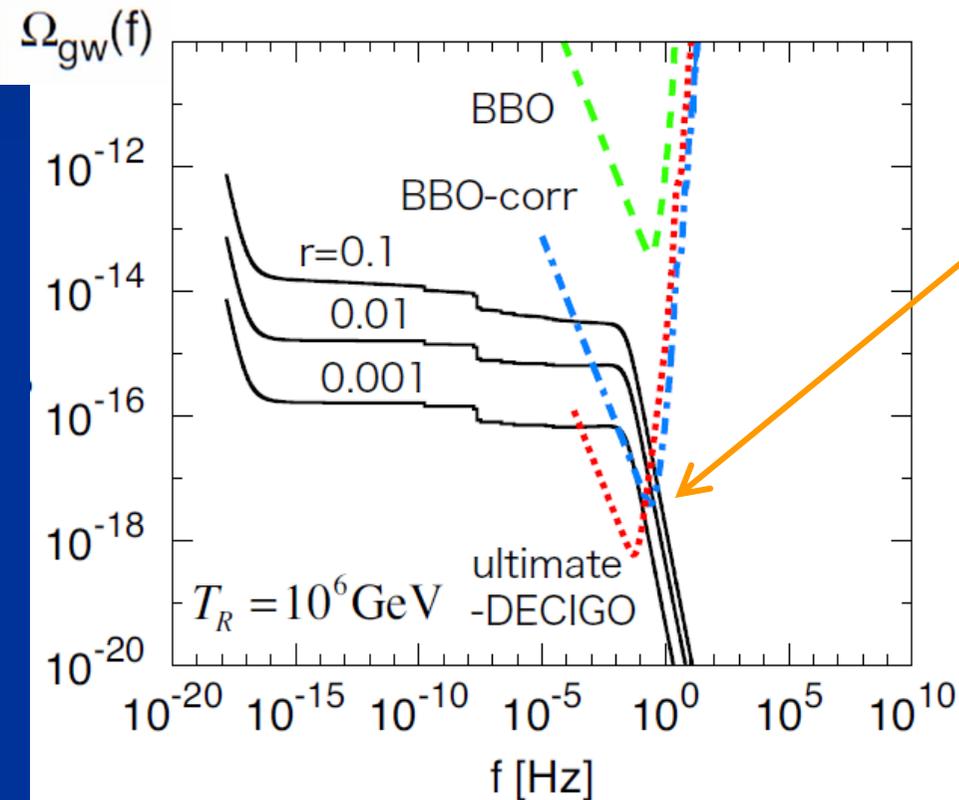
さらに、LiteBIRD観測によって全天の、 $r=0.001$ レベルの感度が実現すれば、さらにインフレーションのモデル、その根拠となる素粒子モデルについての情報も得られると期待。

# 重力波直接観測への期待

重力波観測衛星DECIGO、BBOで10Hzまで観測できるなら



K.Nakayama et al,  
JCAP('08)



平坦なスペクトルが折れ曲がるところが再加熱

再加熱時に地平線内に入った波は

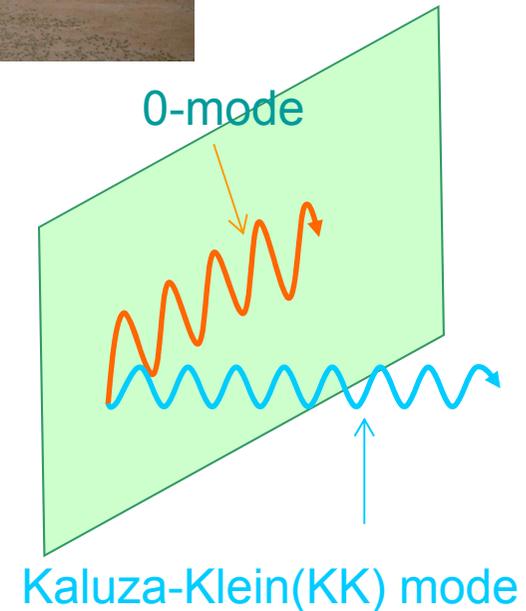
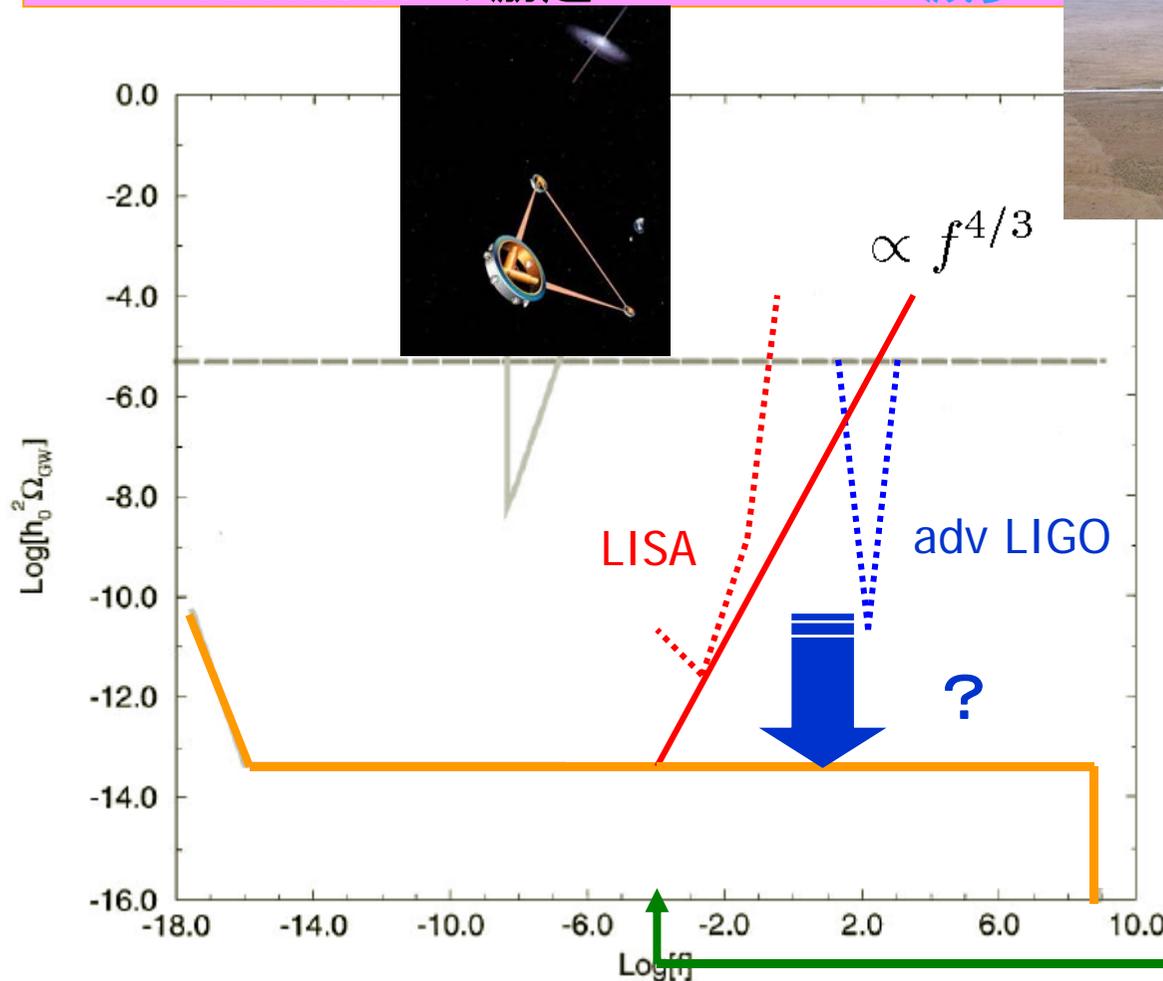
$$\propto f^{-2}$$

再加熱温度がわかる=ビッグバンがいつ起こったかわかる

- ブレーン宇宙(RSII)におけるインフレーションからの重力波をとらえ、ブレーンワールドの証拠をつかむ！

- アインシュタイン方程式補正項による異なる宇宙膨張 → 増加
- KK-mode の励起 → 減少

Hiramatsu, et.al. '04,05,06



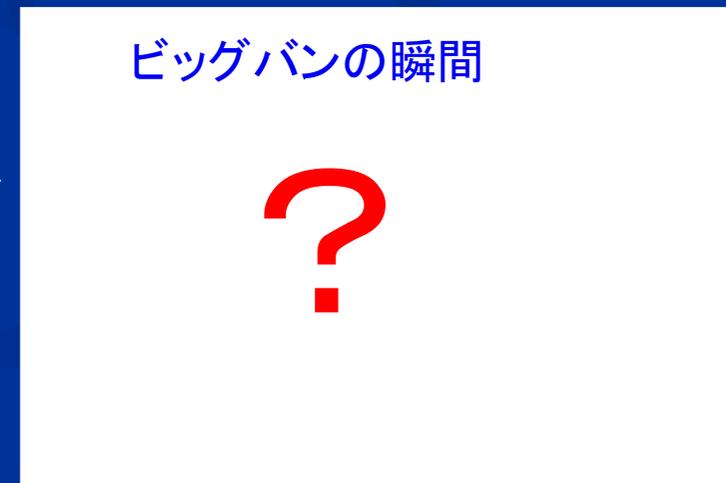
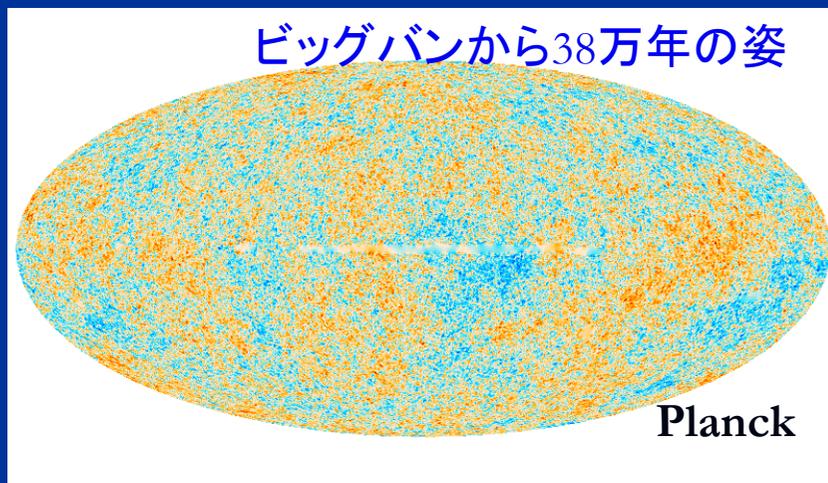
$$\ell = 0.1\text{mm}$$

$$f_{\text{crit}} \sim 2 \times 10^{-4}\text{Hz}$$

# ビッグバン、インフレーションの瞬間を重力波で写真に撮る！

▪ B-モード観測専用衛星、**LiteBIRD** (羽澄 講演) や重力波検出衛星、**DECIGO**や**LISA** などが先駆けとなり、

ビッグバンの瞬間も直接重力波観測によって描き出されるに違いない。



# 138億年前に起こった宇宙開闢のシナリオ、 インフレーション理論は観測技術の飛躍的進歩によって 実証の時代に入った。



現在、宇宙は暗黒エネルギーにより加速膨張しているが、重力波観測からインフレーションを起こした機構との関連第二の見えにくさと期待??

