

# BICEP2のインパクト

早田 次郎

神戸大学素粒子宇宙理論

# なぜ 宇宙背景重力波か？

重力波の存在はほぼ確実 → 直接観測ももうすぐ → 重力波天文学の幕開け

□ Inflation は宇宙背景重力波を预言する

重力波は宇宙の進化の過程でほとんど相互作用しない

GWを観測することは難しい!

しかし不可能ではない!!

→ 宇宙の始まりを見ることができる!

重力波宇宙論の幕開け

□ 量子重力の証拠

大統一理論の証拠?

重力波素粒子論の幕開け

# Plan of this talk

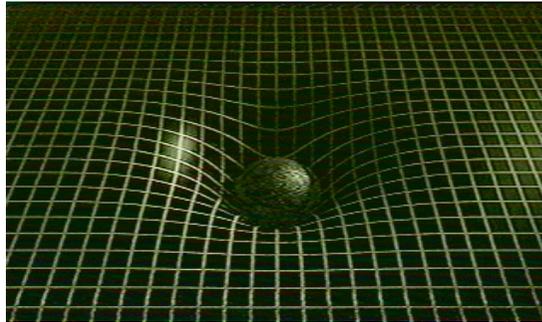
- Gravitational waves
- Inflation: a paradigm
- **BICEP2**
- Prospects

# Gravitational waves

# 一般相対性理論

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

時空の曲率 物質のエネルギー



$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

重力波

$$\left[ -\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right] h_{\mu\nu} = -16\pi G \left( T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} T \right)$$

# Astrophysical sources

Free fall time scale  $t_{ff} \sim 1/\sqrt{G\rho}$   $\rightarrow$  frequency  $f \sim \sqrt{G\rho}$

Ex. NS binary  $M \sim M_{\odot}$   $R \sim 10\text{km}$

$$f \sim \sqrt{G \frac{M}{R^3}} \sim \sqrt{6.6 \times 10^{-11} \cdot \frac{10^{30}}{10^{4 \times 3}}} \sim 10^4 \text{ Hz}$$

LIGO range

ソースが 100Mpc の距離にあるとすると, 重力波の振幅はだいたい  $h \sim 10^{-22}$

Ex. White dwarf binary  $M \sim 0.6M_{\odot}$   $R \sim 10^5 \text{ km}$

$$f \sim 10^{-3} \text{ Hz}$$

Ex. Giant BH binary  $M \sim 10^6 M_{\odot}$   $R \sim 10^7 \text{ km}$

$$f \sim 10^{-3} \text{ Hz}$$

LISA range

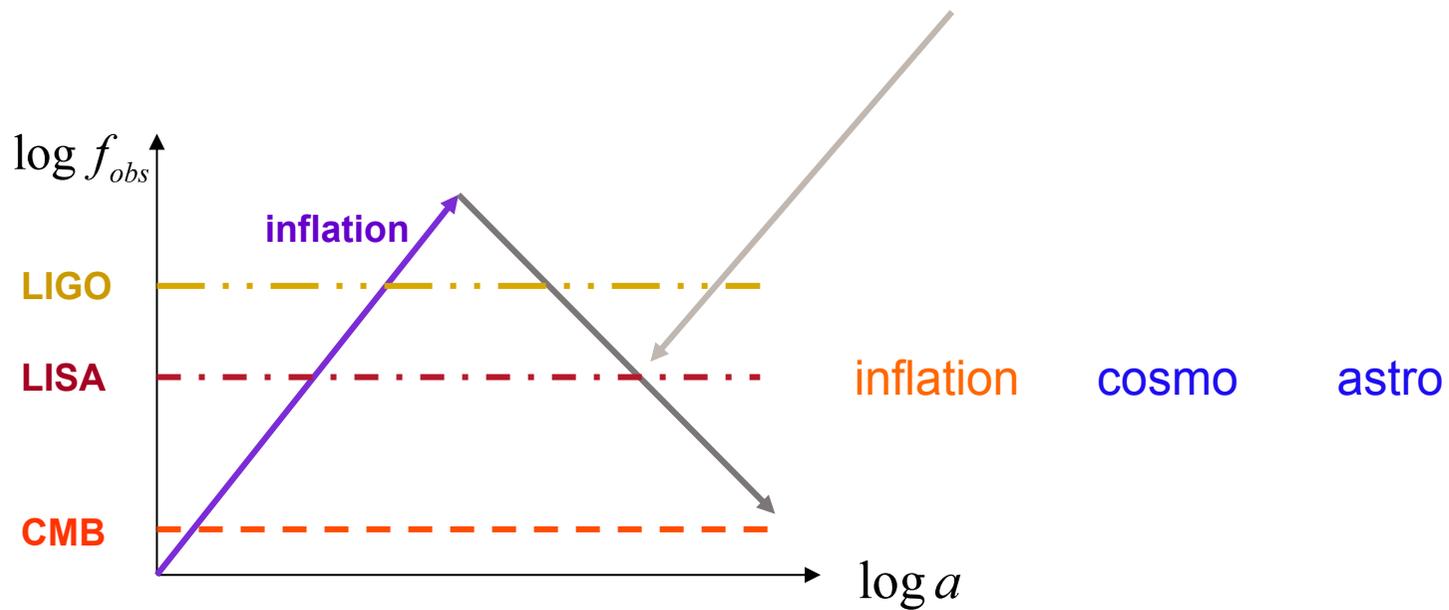
# Cosmological sources

宇宙論的な場合、典型的な振動数は、free fall timeより  $f \sim \sqrt{G\rho} \sim H$

これが赤方偏移したものが観測される振動数  $f_{obs} \sim Ha \sim \dot{a}$

熱平衡な宇宙膨張では  $f_{obs} \sim Ha \sim \frac{T_0}{T} \times 10^{44} \left( \frac{T}{M_p} \right)^2$

Ex. **EW scale**  $T \sim 10^2 \text{ GeV} \longrightarrow f_{obs} \sim 10^{-3} \text{ Hz}$



# How to quantify GW?

Energy density of GW

$$\rho_{GW} = \frac{1}{32\pi G} \langle \dot{h}_{ij} \dot{h}^{ij} \rangle = \int \frac{df}{f} \frac{d\rho_{GW}(f)}{d \log f}$$

Density parameter

$$\Omega_{GW}(f) = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \frac{d\rho_{GW}(f)}{d \log f}$$

Let us define

$h_c$  by

$$\frac{d\rho_{GW}(f)}{d \log f} \equiv \frac{h_c^2 (2\pi f)^2}{32\pi G}$$

$$h_c = 1.5 \times 10^{-20} \sqrt{\Omega_{GW}} \left( \frac{f}{100\text{Hz}} \right)^{-1}$$

Ex.  $f \sim 10^{-3} \text{ Hz}$

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-14}$$

$$h_c \sim 10^{-22}$$

Detector sensitivity

LISA

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-11}$$

at 1 mHz

BBO

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-15}$$

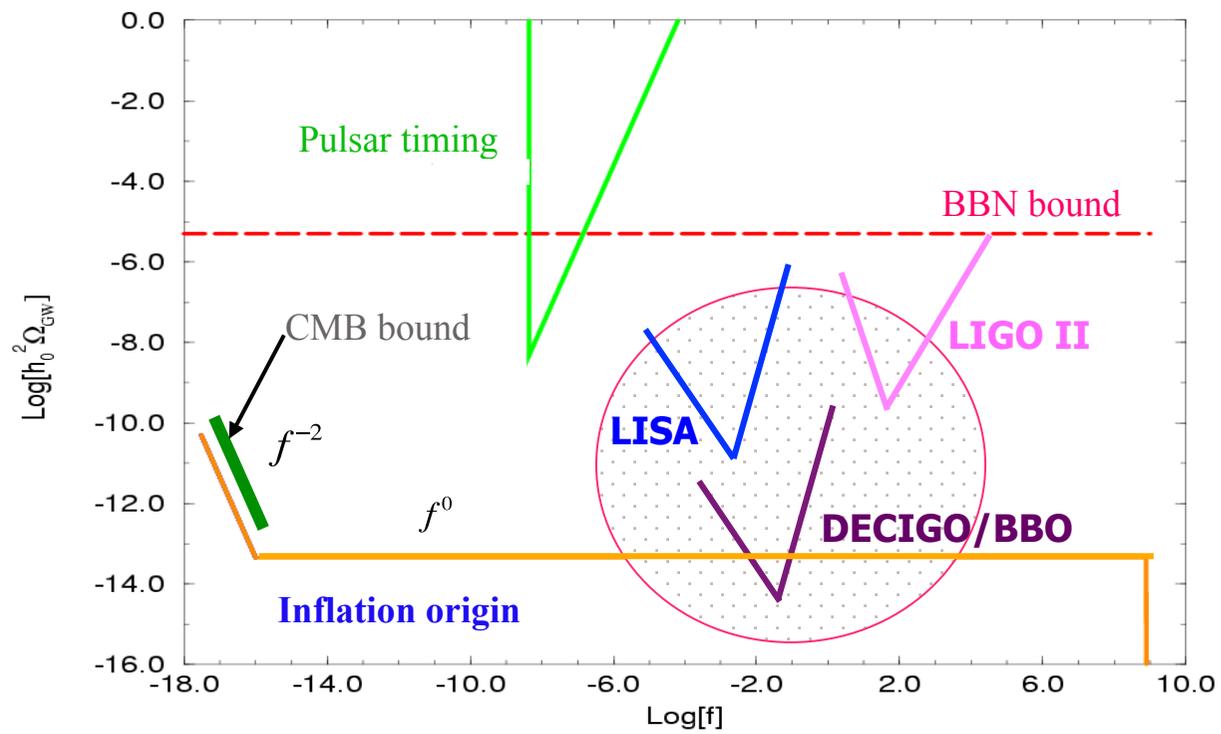
at 0.1 Hz

Ultimate DECIGO

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-20}$$

at 0.1 Hz

# Primordial GW



# Inflation: a paradigm

# ビッグバン宇宙

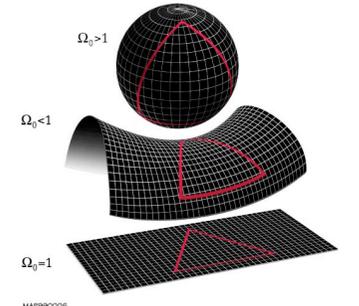
ハッブルの法則  $\mathbf{r} = a(t) \mathbf{x}$   $H = \frac{\dot{a}}{a}$

宇宙原理 = 宇宙は空間的に（平均の意味で）一様かつ等方



FLRW 宇宙  
 $k = 0$

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) [dx^2 + dy^2 + dz^2]$$



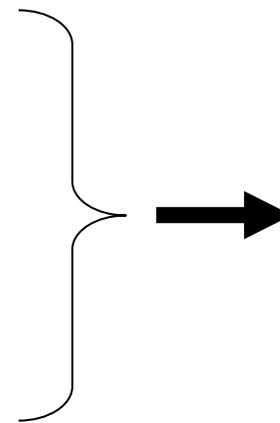
$$k = \begin{cases} 1, & \text{closed universe} \\ 0, & \text{flat universe} \\ -1, & \text{open universe} \end{cases}$$

アインシュタイン方程式より

フリードマン方程式  $H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$

エネルギー保存則  $\frac{d\rho}{dt} + 3H(\rho + p) = 0$

状態方程式  $p = p(\rho) = w\rho$



$$a(t) = t^{\frac{2}{3(1+w)}}$$

$$w = \frac{1}{3} \quad a(t) = t^{1/2}$$

$$w = 0 \quad a(t) = t^{2/3}$$

# インフレーションのモデル

スカラー場(インフラトン)のダイナミクス

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left[ \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right]$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

初期のエネルギー密度が大きいとする

→ 膨張率が大きいため  $\frac{1}{H} \ll \frac{1}{m}$  となり、振動できず、ゆっくり転がる

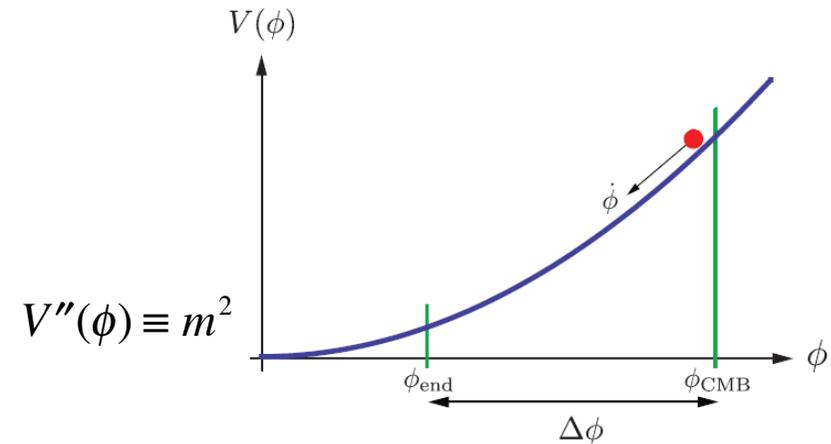
→ ポテンシャルが優勢となり加速膨張宇宙となる

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \text{const.}$$

$$a(t) = e^{Ht}$$

$H = m$  で振動が始まりインフレーション終了

粒子生成が起こり、熱化する



# スローロールインフレーション

$$S = \frac{M_p^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} R + \int d^4x \sqrt{-g} \left[ -\frac{1}{2} \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi - V(\phi) \right] \quad M_p = (8\pi G)^{-1/2} = 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

一様等方宇宙  $ds^2 = -dt^2 + a^2(t) [dx^2 + dy^2 + dz^2]$

quasi-deSitter universe  $a(t) \approx e^{Ht} \quad N = \int_t^{t_f} H dt \quad dN = -H dt \quad N = 50 \sim 60$

$$\longrightarrow \quad \varepsilon = -\frac{\dot{H}}{H^2} = \frac{3}{2} \frac{\rho + p}{\rho} = \frac{1}{2M_p^2} \frac{\dot{\phi}^2}{H^2} = \frac{d \log H}{dN} = \frac{1}{2M_p^2} \left( \frac{d\phi}{dN} \right)^2 \ll 1 \quad \longleftrightarrow \quad \rho + 3p < 0$$

$$\delta = \frac{d \log \varepsilon}{dN} = 3 \left( \frac{\dot{p}}{\dot{\rho}} - \frac{p}{\rho} \right) = 2 \frac{d^2 \phi}{dN^2} \left( \frac{d\phi}{dN} \right)^{-1} \ll 1$$

slow roll eqs.  $\frac{d\phi}{dN} = M_p^2 \frac{V'}{V} \quad H^2 = \frac{1}{3M_p^2} V(\phi)$

$$\delta = 2\eta - 4\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{M_p^2}{2} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \quad \eta = M_p^2 \frac{V''}{V}$$

# 揺らぎの起源

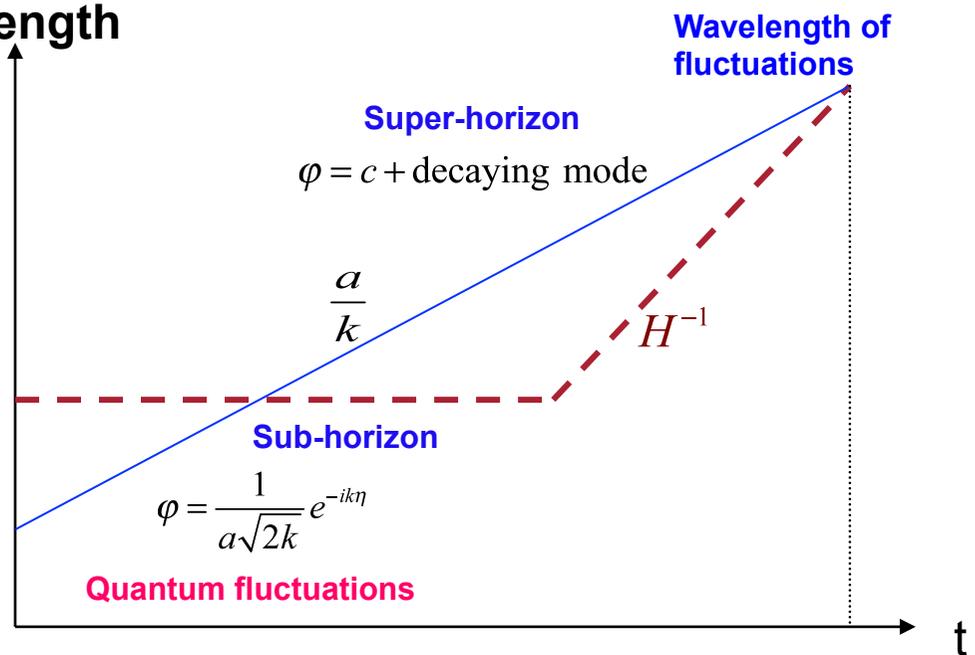
A free scalar field

$$\varphi'' + 2\frac{a'}{a}\varphi' + k^2\varphi = 0$$

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{d\eta}$$

$$ds^2 = a^2(\eta) \left[ -d\eta^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j \right]$$

length



Matching at  $aH = k$  gives

$$c = \frac{H}{\sqrt{2k^3}} \longrightarrow \langle 0 | \varphi^2 | 0 \rangle = \int \frac{dk}{k} \frac{k^3}{2\pi^2} |\varphi_k|^2 \approx \left( \frac{H}{2\pi} \right)^2$$

# 揺らぎの振幅

曲率揺らぎ

$$R_c = -\delta N = H\delta t = H \frac{\delta\phi}{\dot{\phi}} = \frac{H^2}{2\pi\dot{\phi}}$$

$$\longrightarrow P_{R_c} = \frac{H^4}{4\pi\dot{\phi}^2} = \frac{1}{8\pi^2\epsilon} \frac{H^2}{M_p^2}$$

GWの作用

$$S = \frac{M_p^2}{8} \int d^4x \left[ \dot{h}_{ij} \dot{h}^{ij} - \nabla h_{ij} \cdot \nabla h^{ij} \right]$$

対応  $\varphi = M_p h / 2$  を用いると  $h = \frac{H}{\pi M_p}$

テンソル揺らぎ

$$P_h = \frac{2}{\pi^2} \frac{H^2}{M_p^2}$$

**Polarizationの因子2をかけた**

テンソル・スカラー比

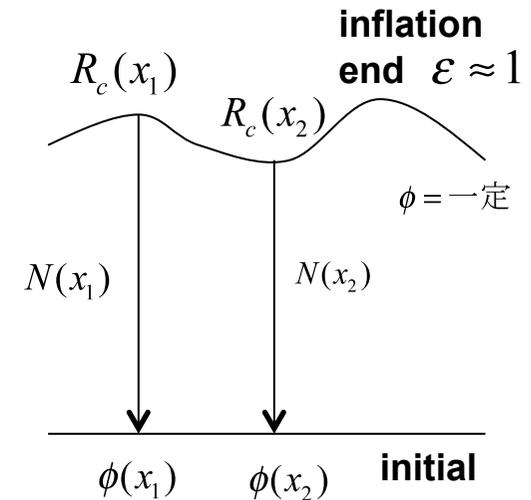
$$r = \frac{P_{R_c}}{P_h} = 16\epsilon = \frac{8}{M_p^2} \left( \frac{d\phi}{dN} \right)^2$$

揺らぎ

Density parameter of stochastic GW

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-4} \times 10^{-10} \sim 10^{-14}$$

radiationのdensity parameter



# スペクトルの詳細

$$aH = k \longrightarrow d \log k = d \log a = -dN$$

$$n_s - 1 = \left. \frac{d \log P_{R_c}}{d \log k} \right|_{aH=k} = -\frac{d}{dN} \log \frac{H^2}{\epsilon} = -2\epsilon + 2\eta - 4\epsilon \quad \therefore n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$$

$$n_t = \left. \frac{d \log P_h}{d \log k} \right|_{aH=k} = -\frac{d}{dN} \log H^2 = -2\epsilon = -\frac{r}{8}$$

CMB constraints

$$n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$$

$$n_s = 0.9616 \pm 0.0094$$

$$n_t = -2\epsilon$$

$$r = 16\epsilon$$

$$r < 0.11$$

# Chaotic inflation の例

$$V = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$$

$$\frac{d\phi}{dN} = M_p^2 \frac{2}{\phi}$$

$$N = \frac{1}{4M_p^2} (\phi_i^2 - \phi_f^2)$$

Inflation end

$$\varepsilon = \eta = \frac{2M_p^2}{\phi^2} \sim 1$$

$$\phi_f \sim 1.4M_p$$

$$N \sim 56$$

$$\phi_i \sim 15M_p$$

$$\varepsilon = \eta \sim 0.01 \quad \text{at COBE scale}$$

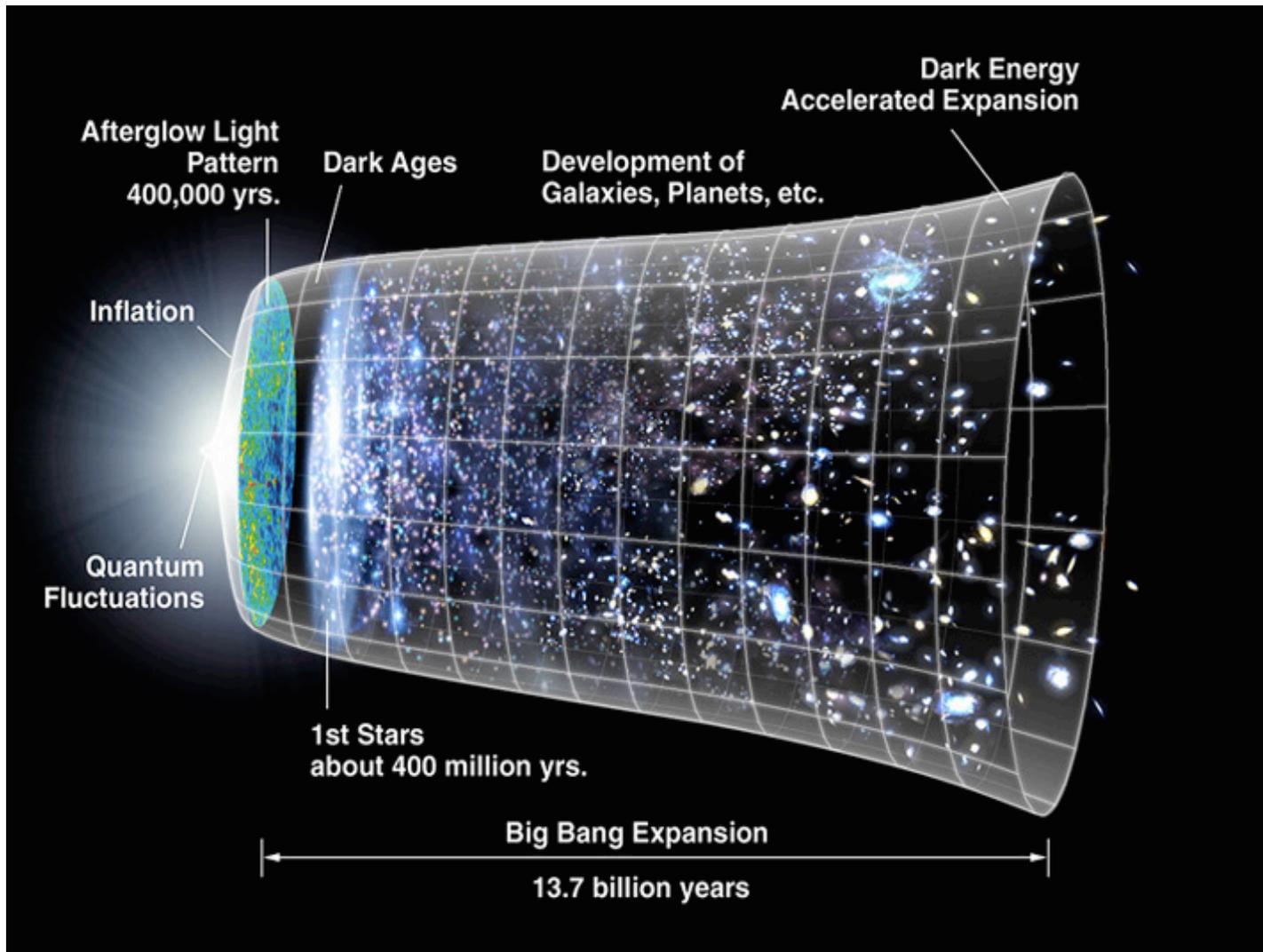
$$r \sim 0.14$$

$$n_s \sim 0.964$$

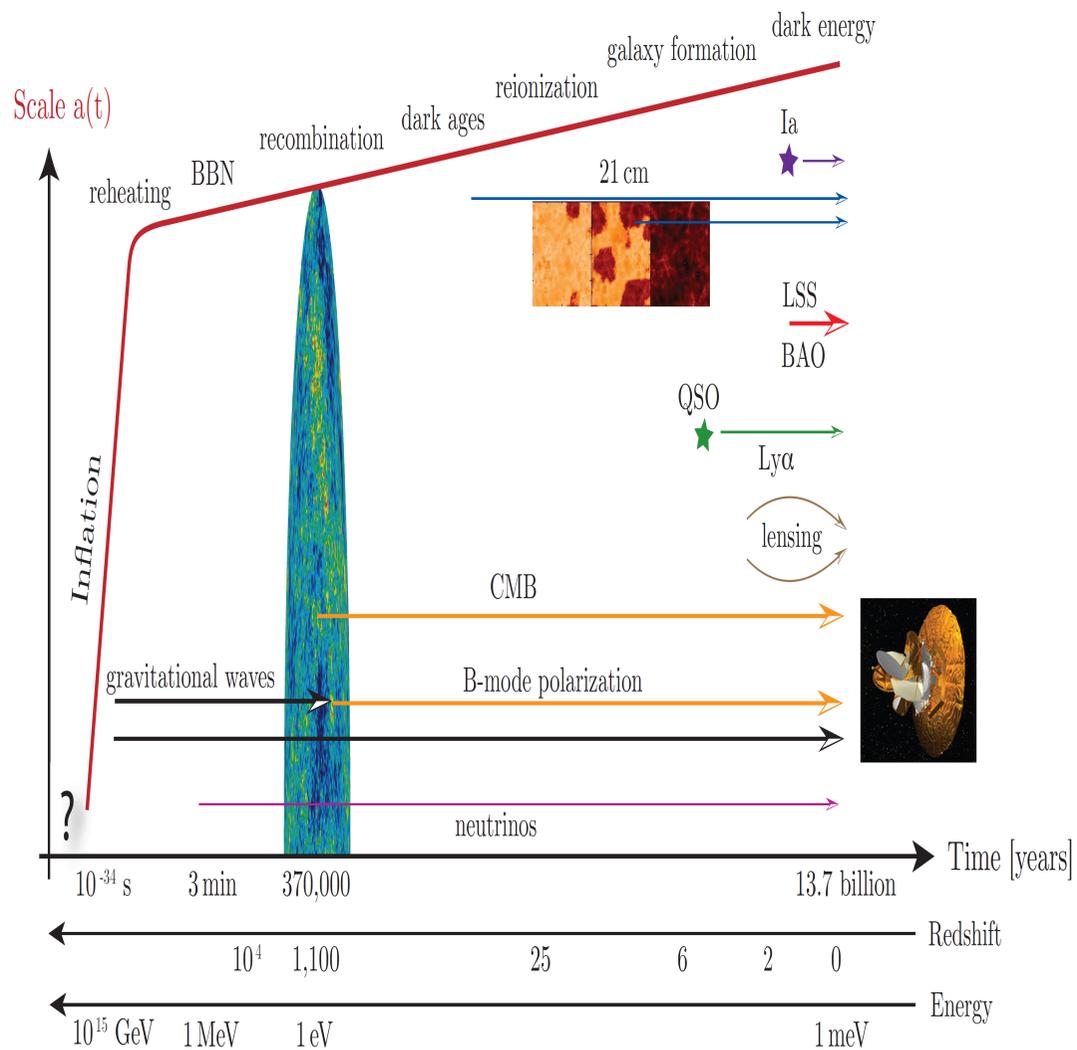
$$n_t \sim -0.02$$

**BICEP2**

# 最終散乱面



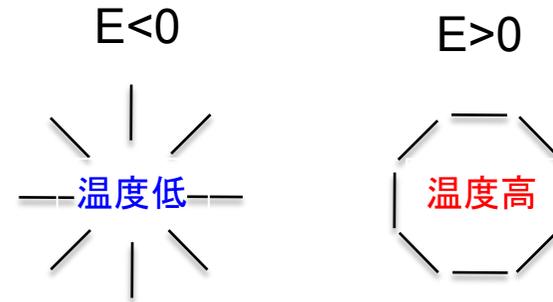
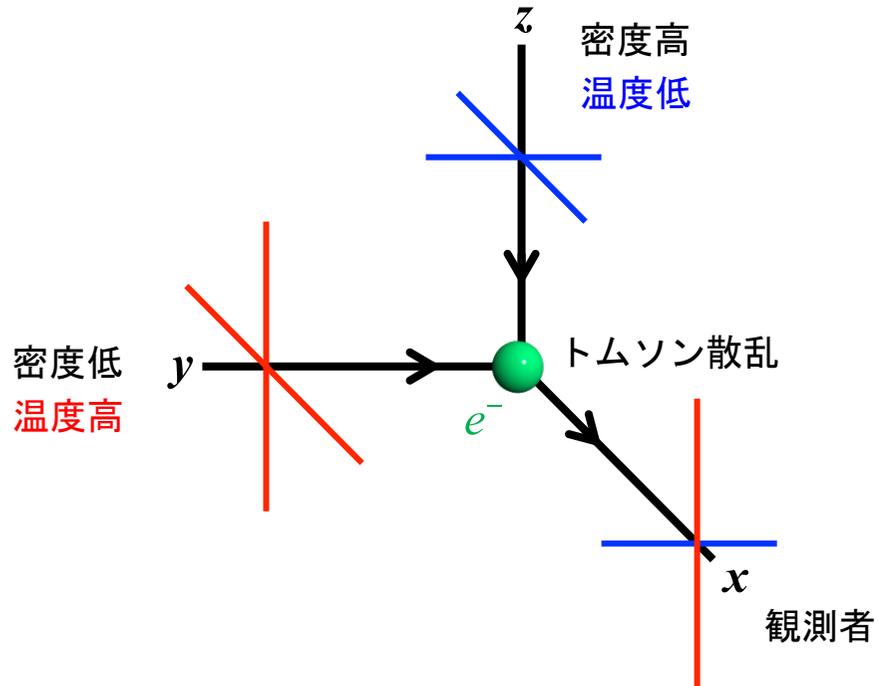
# 重力子の探査 --- インフレーションの直接証明



**CMB Bモード観測**

**DECIGOによる直接観測**

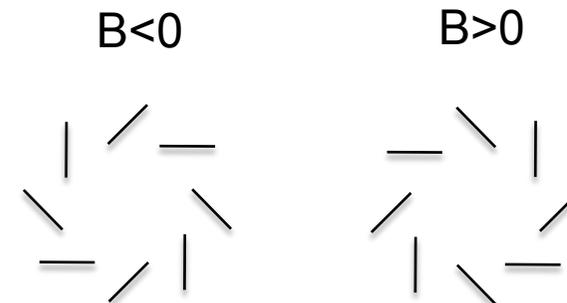
# 偏光観測



温度(T)とEモード偏光の相関がある  
密度揺らぎはEモードしかつからない

原始重力波はBモードをつくる

Bモードを観測できれば  
量子論的重力波を観測



# B mode power spectrum

B-mode:  $r \sim 0.001$  (statistical + instrumental)

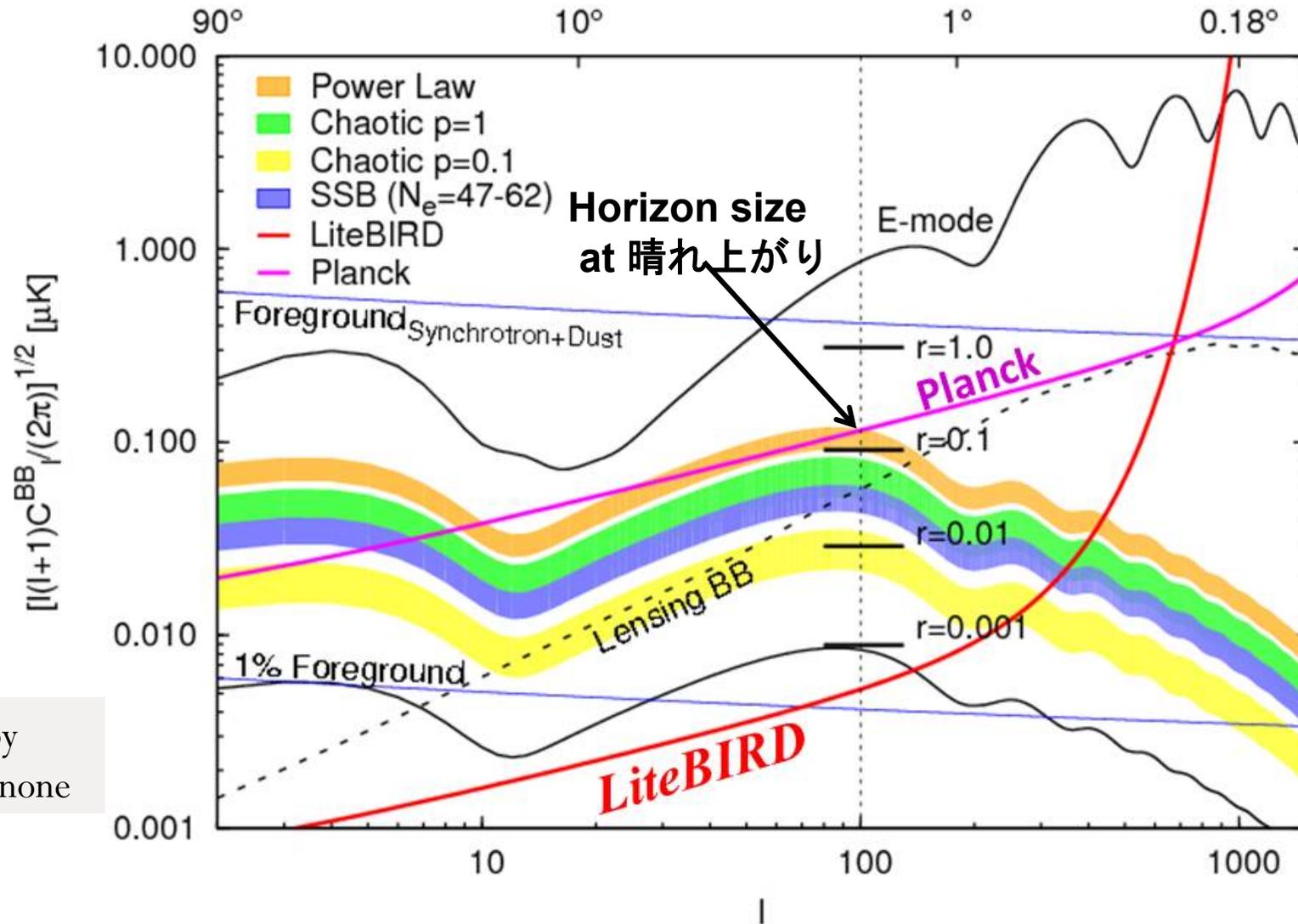
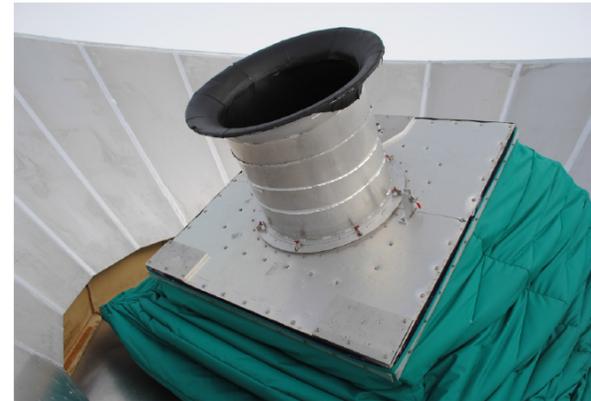
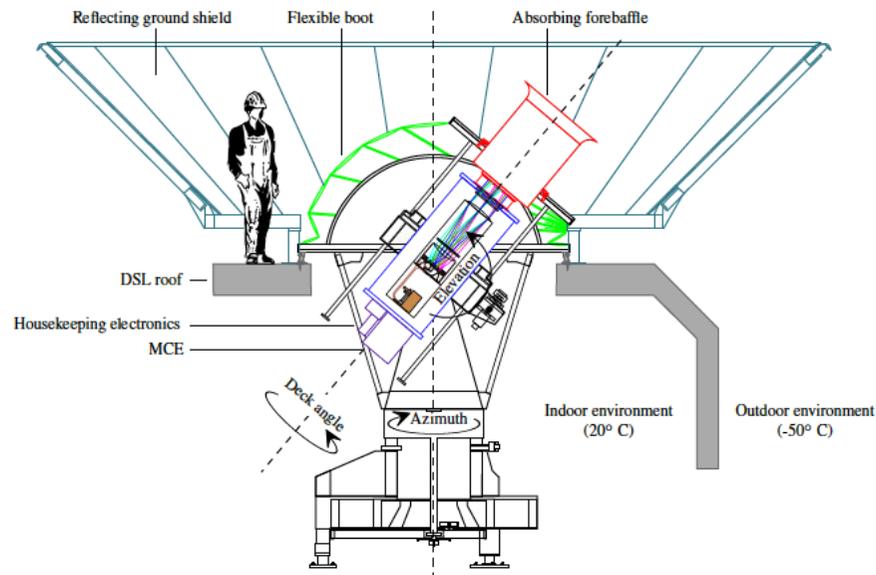


Figure by  
Yuji Chinone

# BICEP2

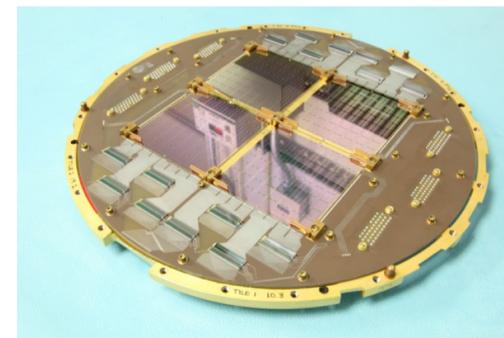
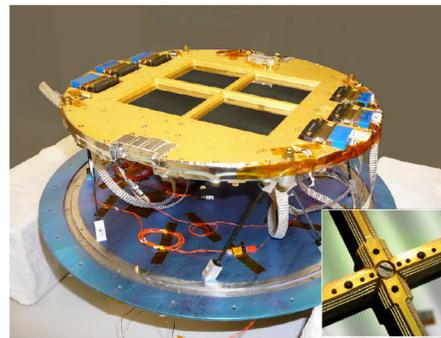
南極 2010-2012

150GHz



$$20 < \ell < 340$$

380 square degrees



# B-mode detection

$$r = 0.2 \quad \begin{array}{l} +0.07 \\ -0.05 \end{array}$$

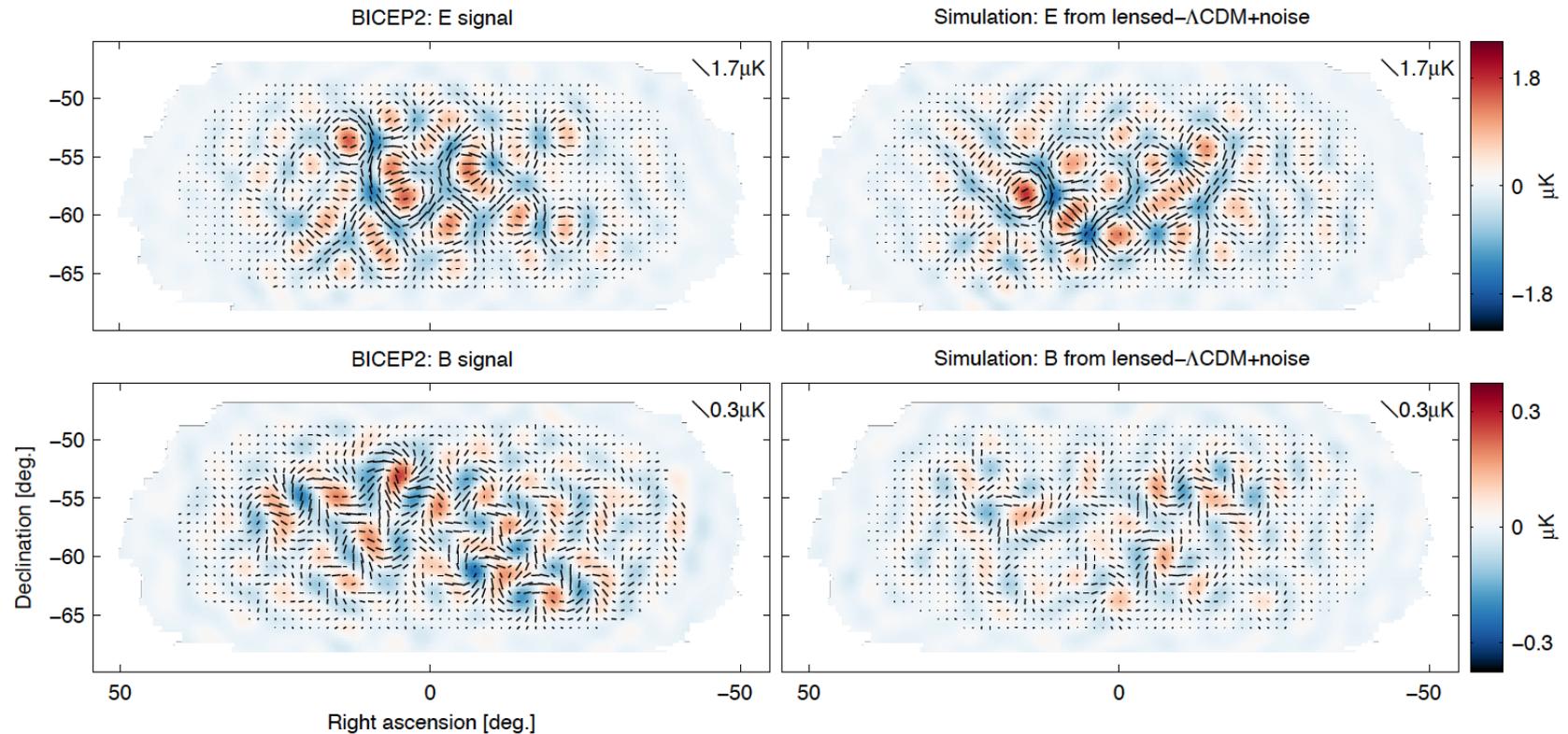


FIG. 3.— *Left:* BICEP2 apodized  $E$ -mode and  $B$ -mode maps filtered to  $50 < \ell < 120$ . *Right:* The equivalent maps for the first of the lensed- $\Lambda$ CDM+noise simulations. The color scale displays the  $E$ -mode scalar and  $B$ -mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude and orientation of linear polarization. Note that excess  $B$ -mode is detected over lensing+noise with high signal-to-noise ratio in the map ( $s/n > 2$  per map mode at  $\ell \approx 70$ ). (Also note that the  $E$ -mode and  $B$ -mode maps use different color/length scales.)

# Power spectrum

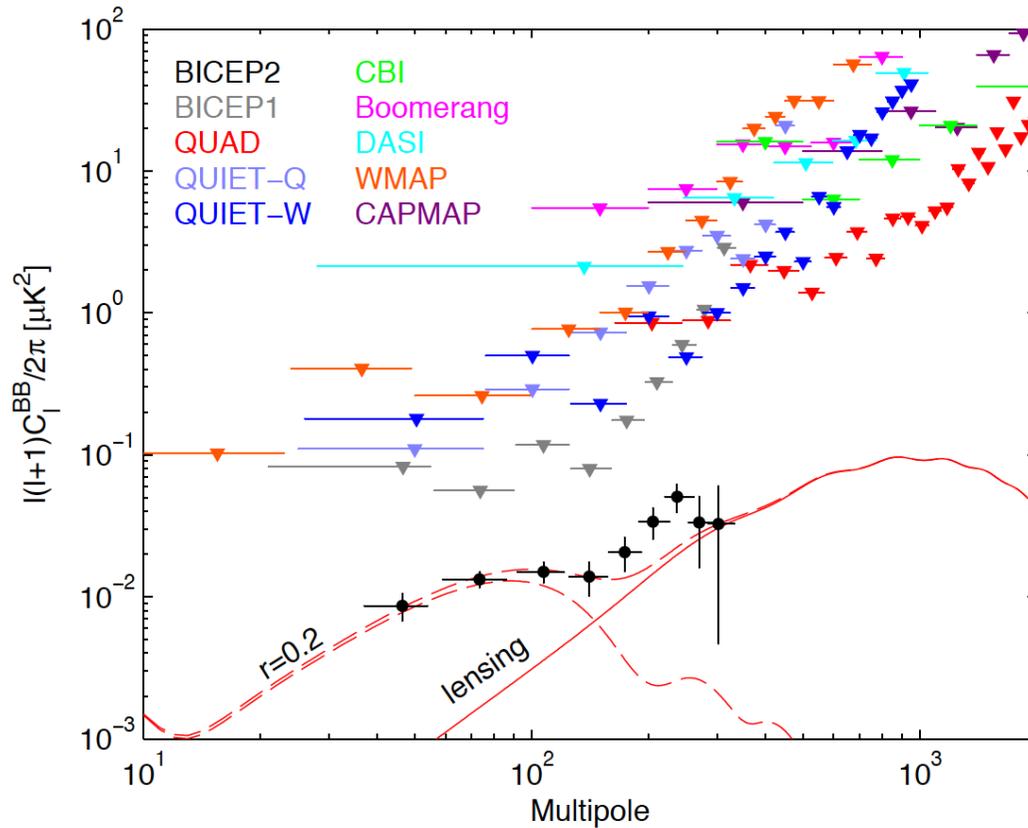
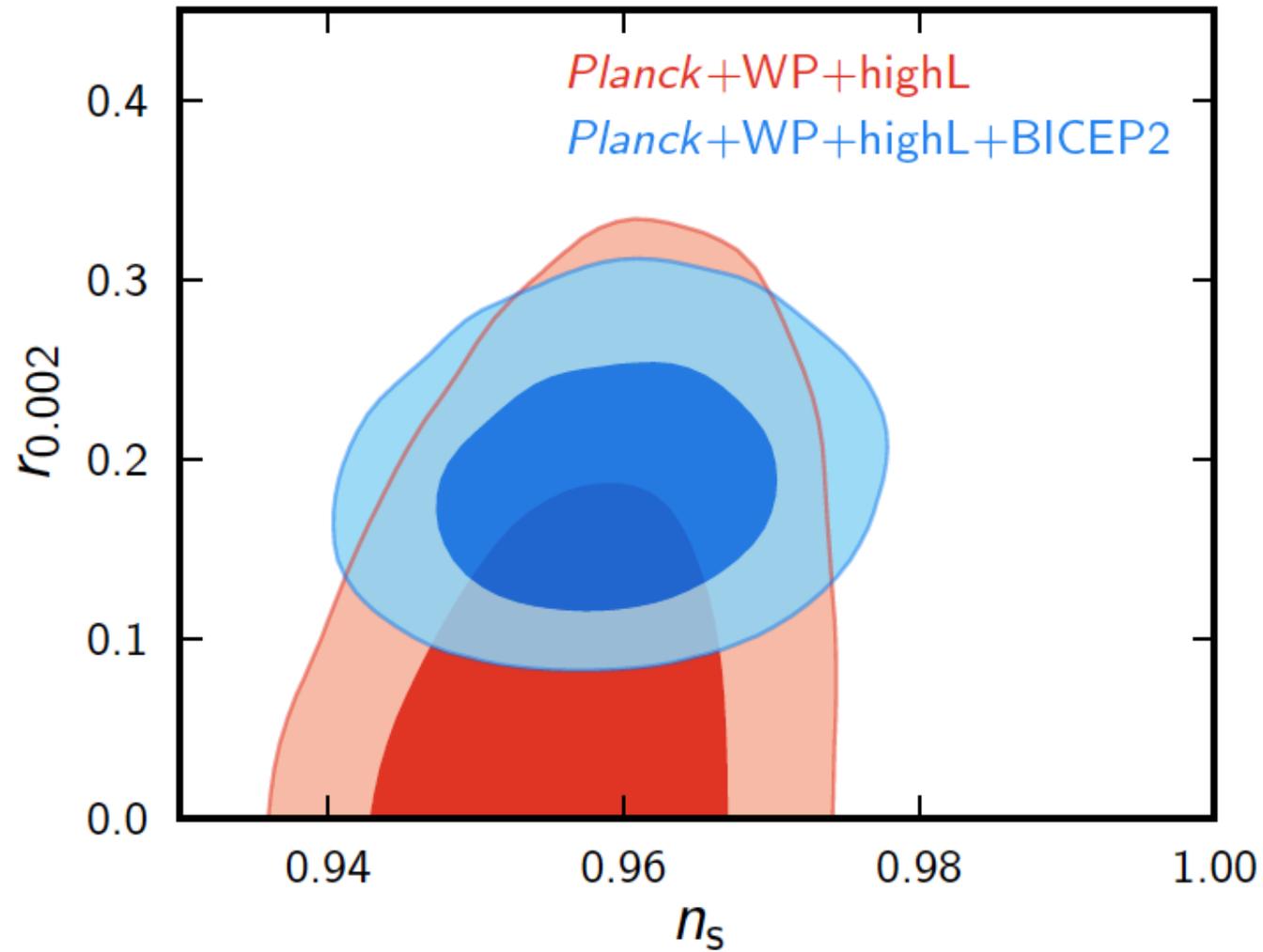


FIG. 14.— BICEP2  $BB$  auto spectra and 95% upper limits from several previous experiments (Leitch et al. 2005; Montroy et al. 2006; Sievers et al. 2007; Bischoff et al. 2008; Brown et al. 2009; QUIET Collaboration et al. 2011, 2012; Bennett et al. 2013; Barkats et al. 2014). The curves show the theory expectations for  $r = 0.2$  and lensed- $\Lambda$ CDM.

# Inflation model



# BICEP2の観測は何を意味するのか？

BICEP2                      Inflationのエネルギースケール

$$r = 0.2 \quad \Rightarrow \quad 2.2 \times 10^{16} \text{ GeV}$$

大統一理論？

重力波の間接的証拠                      スペクトルがスケール不変

直接観測を狙った干渉計衛星 eLISA に強い動機を与える

Graviton の存在を証明

インフレーションでは揺らぎの起源は量子揺らぎ

量子重力理論の必要性

# Prospects

# 宇宙論の展望

宇宙背景放射観測衛星WMAP → 現在の宇宙の物質組成

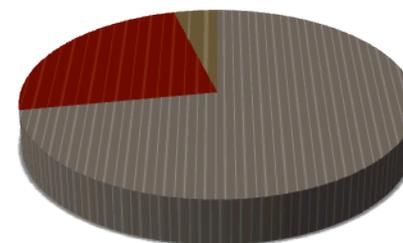
素粒子標準理論はたった4%の物理!

+ 超対称パートナー

暗黒物質

超対称粒子が暗黒物質でも28%の物理!

標準宇宙理論を超える理論が必要!



■ dark energy  
■ dark matter  
■ standard particles

BICEP2

+ 重力子

発見?

時空の起源?



時空と素粒子の新理論

Planck polarization data will be released soon!