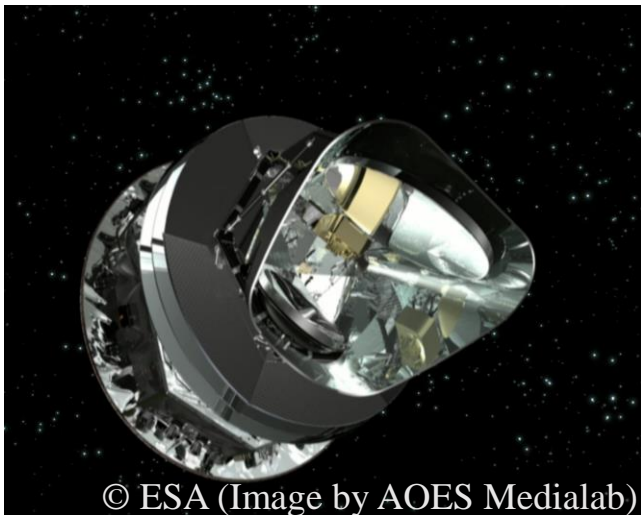


# Planck 2018 results

## VI. Cosmological parameters X. Constraints on inflation

---



A&A 641, A6 (2020) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>  
A&A 641, A10 (2020) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833887>

# スペース重力波アンテナDECIGO

## 観測目標

- **原始重力波**  
→インフレーション理論の証明、初期宇宙の解明
- 連星合体からの重力波など

## 特徴

- 宇宙空間に3機の衛星を展開 (1cluster)  
→ 地面振動雑音、懸架系の熱雑音の除去
- **光共振器を用いた干渉計**

## 研究の背景

- 原始重力波の上限強度の引き下げ  
(プランク衛星等の観測)



- 検出器の感度向上が必要



- 感度を制限している**量子雑音の低減**が必要

**この観測結果の論文**

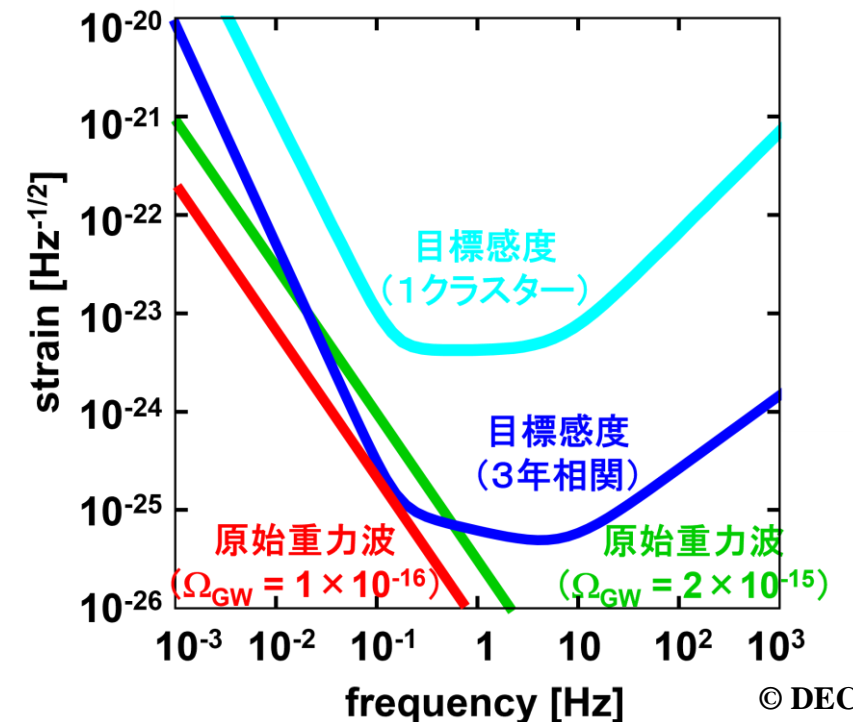
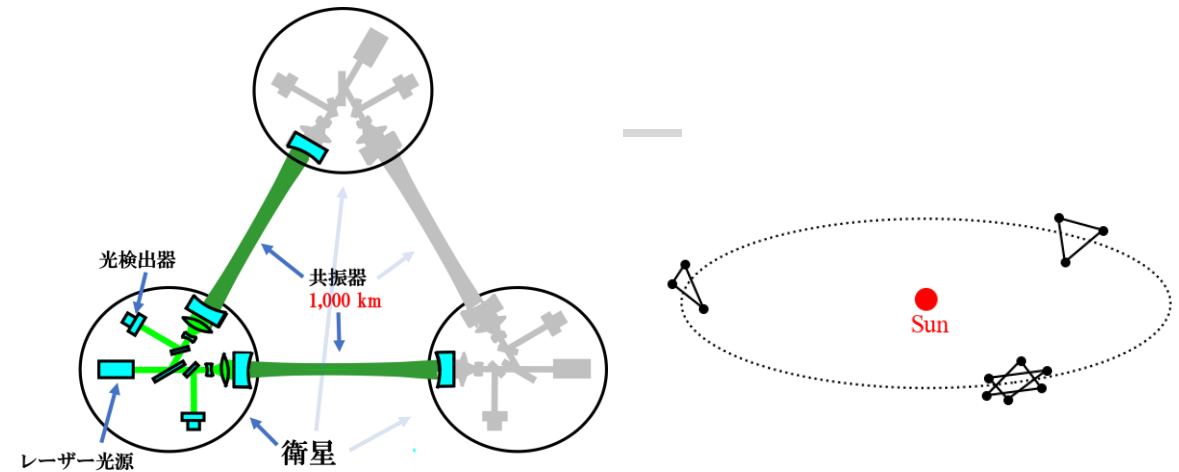


Figure: DECIGOの目標感度

# 重力波とは

## ➤ 重力波

- アインシュタインが一般相対論で予言
- 時空の歪みが波となって伝搬
- 2015年に初検出

## ➤ Einstein方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

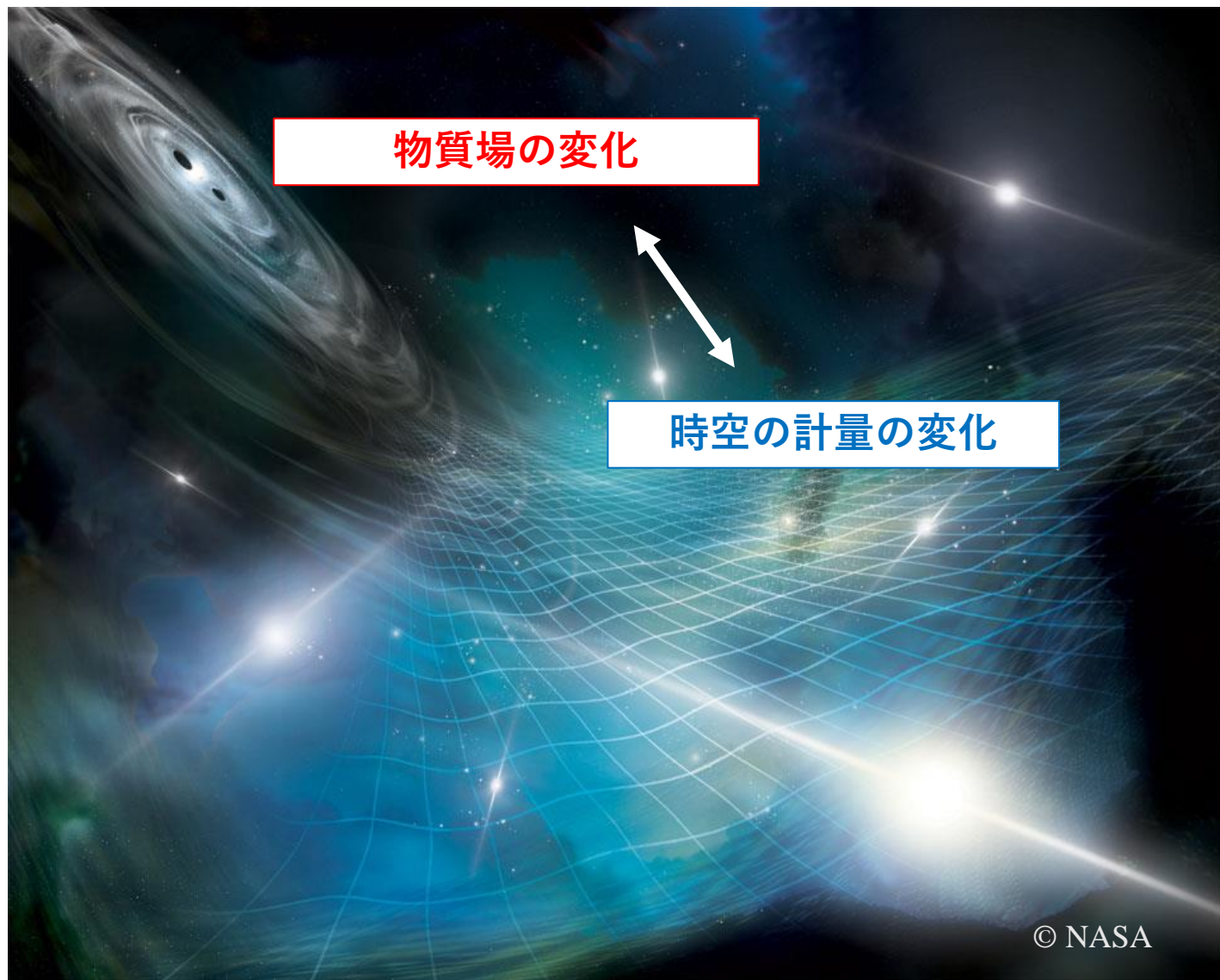
時空の計量



物質(エネルギー運動量)



- ✓ 物質場が変化することで計量に歪みが生じる  
⇒ **重力波の発生**



# 重力波とは

## ➤ 重力波

- アインシュタインが一般相対論で予言
- 時空の歪みが波となって伝搬
- 2015年に初検出

## ➤ Einstein方程式

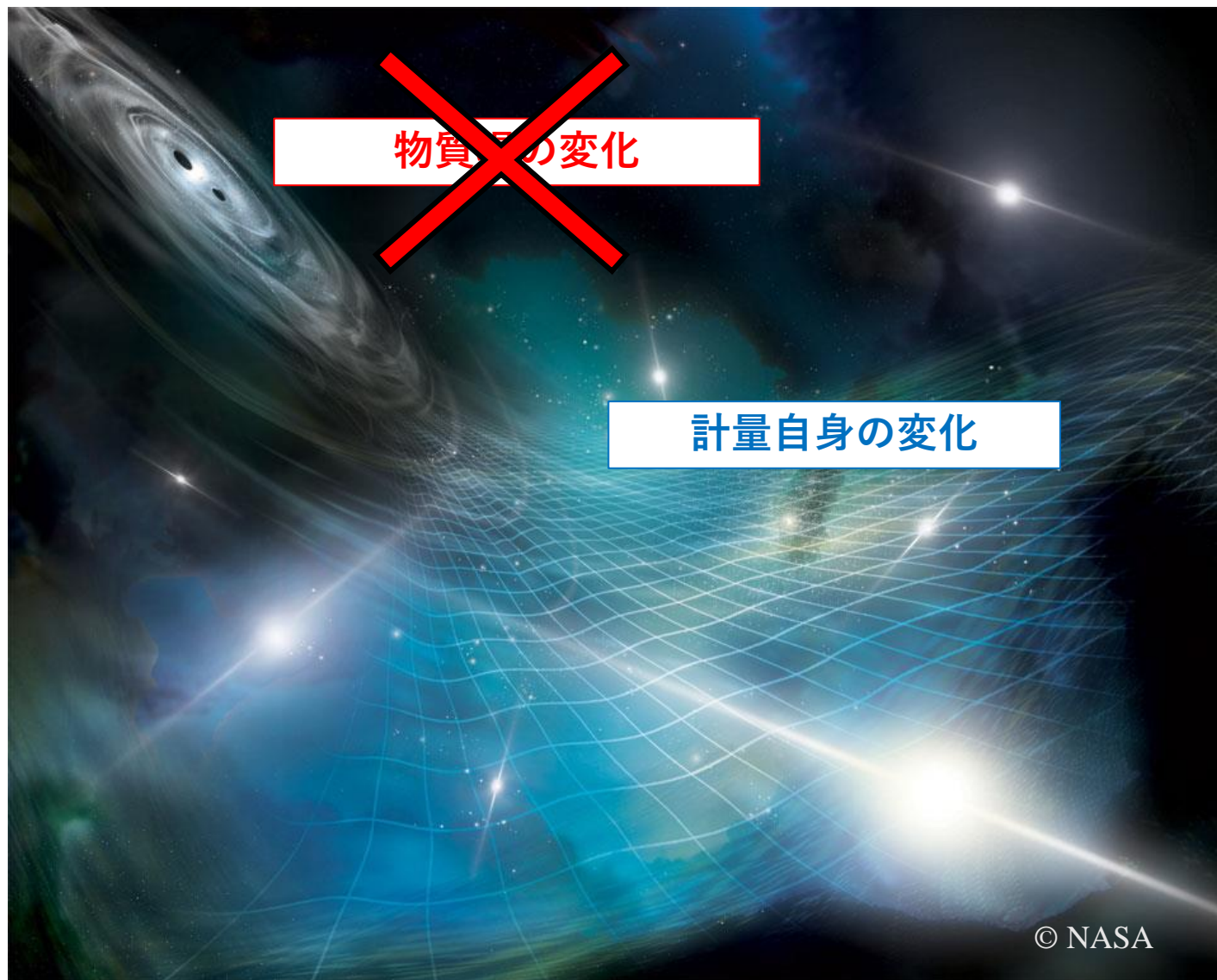
$$\left(\bar{R}_{\mu\nu} + R_{\mu\nu}^{(1)}\right) - \frac{1}{2} \left(\bar{g}_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}^{(1)}\right) \left(\bar{R} + R^{(1)}\right) = 0$$

背景の計量 + 計量の揺らぎ



✓ 計量が量子的に揺らぐ  
⇒ **重力波の発生**

➡ 通常、観測が期待できるほど強度は大きくはない





# 宇宙の進化

## ▶ インフレーション

- 宇宙誕生 $10^{-36}$ ~ $10^{-34}$ 秒後に起こったとされている宇宙の指数関数的膨張
- 地平線問題や平坦性問題などを解決
- 宇宙論において最も妥当性のある理論

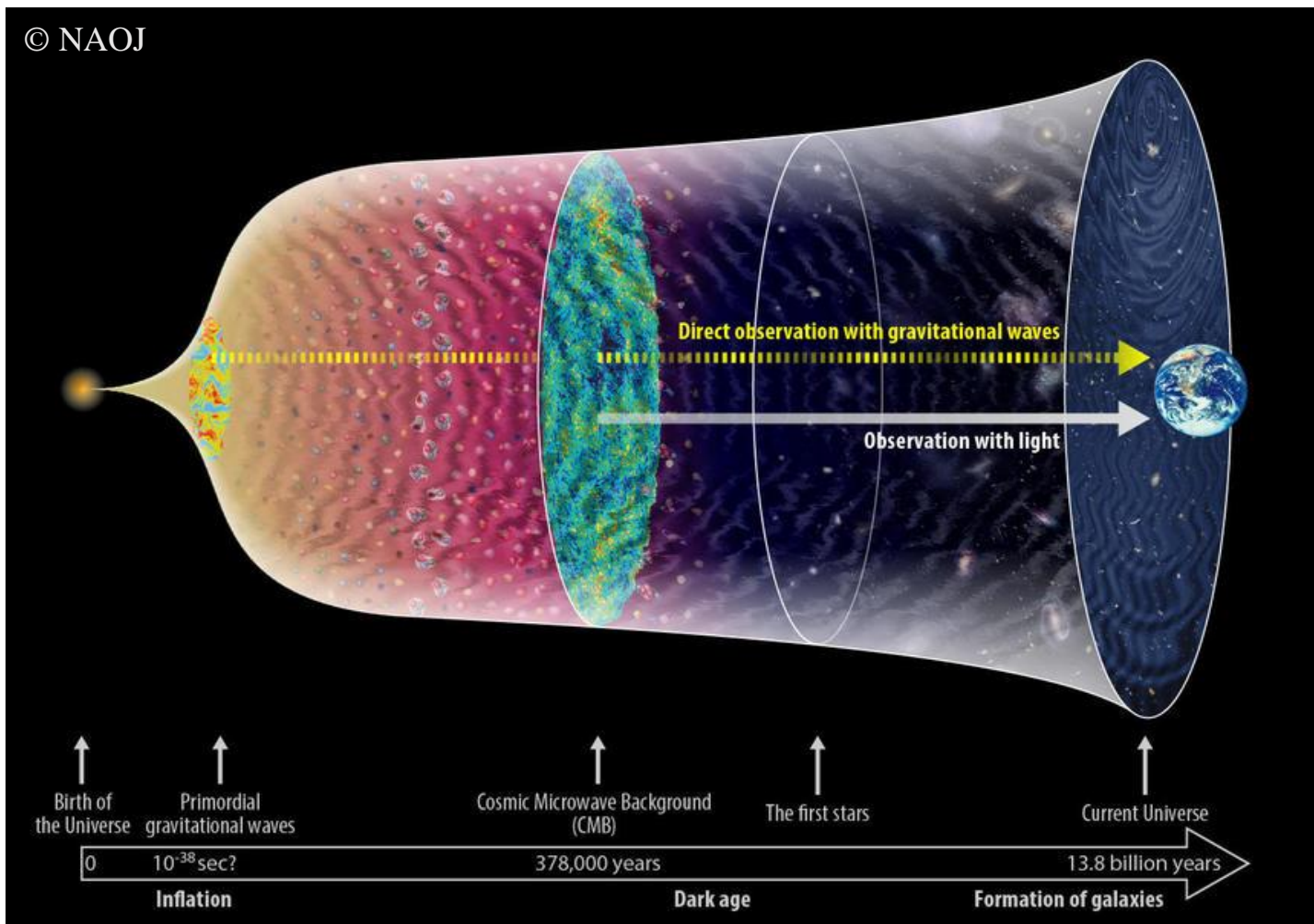


## ▶ 宇宙の標準モデル( $\Lambda$ CDM model)

- Dark energy :  $\Lambda$
- Cold dark matter : CDM



- ◆ 6つのパラメータで記述可能
- ◆ 初期状態はインフレーション期の場の量子揺らぎが決める
- ◆ 時間経過とともに $\Lambda$ に起因する負の圧力が支配的となり、宇宙は加速膨張する



# インフレーション

## ➤ スカラー場

- 宇宙の指数関数的膨張を実現するためには負の圧力源、またはそれと等価な一定のエネルギー密度が必要



- 実現するための単純な理論がインフラトン(スカラー場)の導入

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{1}{2} R + \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \frac{\partial\phi}{\partial\mu} \frac{\partial\phi}{\partial\nu} - V(\phi) \right] = S_{\text{EH}} + S_\phi$$

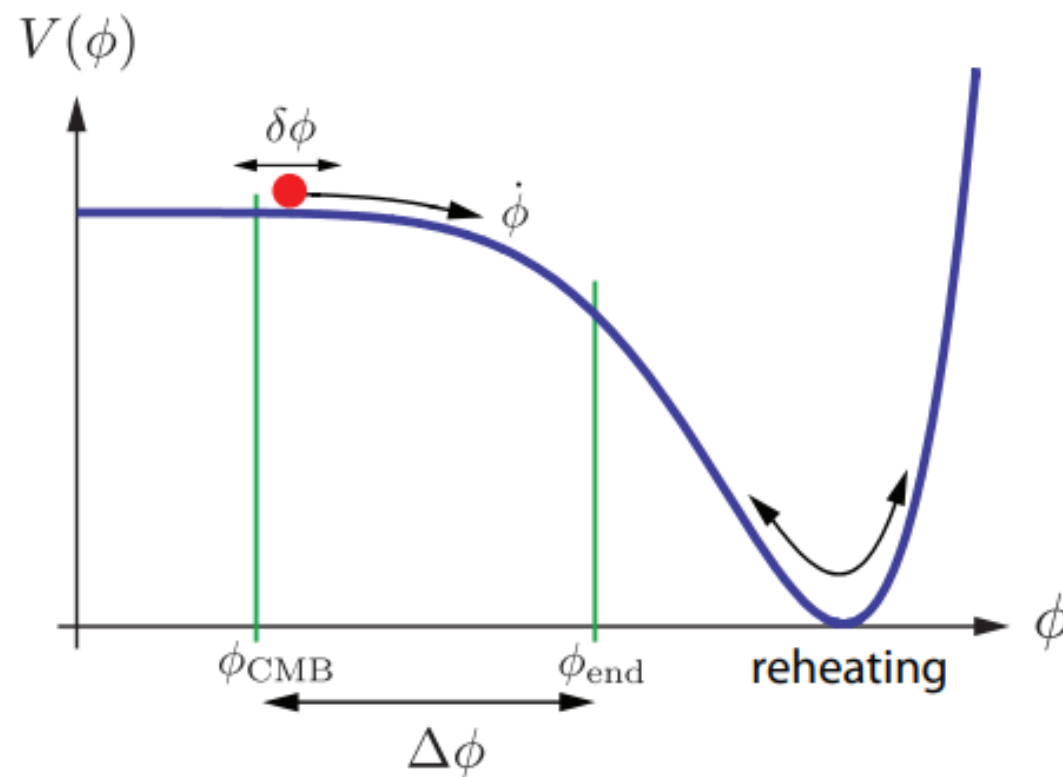


ポテンシャルの形は？  
✓  $\Lambda$ CDMモデルに接続

## ➤ Single-Field Slow-Roll Inflation

- ゆっくりとポテンシャルを転がるモデル

\* 条件に適したポテンシャルには多くの種類がある  
→ インフレーションモデルは様々



**Figure:** Example of an inflation potential.

Cite: Daniel Baumann, 2012, TASI Lectures on Inflation. arXiv:0907.5424

# インフレーション

## ▶ 原始重力波

- インフレーション期の時空の量子揺らぎから生成

## ◆ 発展方程式

$$-\frac{1}{2}\nabla_\alpha\nabla^\alpha\bar{h}_{\mu\nu} - R_{\nu\beta\mu\alpha}\bar{h}^{\beta\alpha} + \frac{1}{2}\left(R_{\alpha\nu}^{(0)}\bar{h}_\mu^\alpha + R_{\alpha\mu}^{(0)}\bar{h}_\nu^\alpha - \bar{h}_{\mu\nu}R^{(0)} + g_{\mu\nu}\bar{h}^{\alpha\beta}R_{\alpha\beta}^{(0)}\right) = 0$$

## ▶ FLRW計量

- 宇宙の時間発展を記述可能な計量

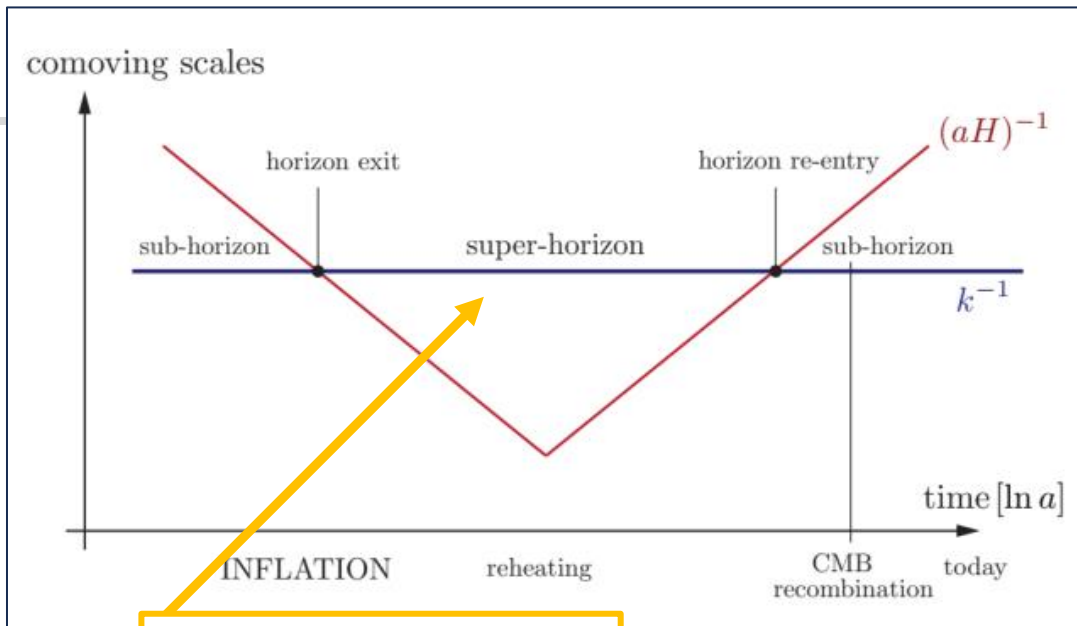
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) dx^i dx^j$$

$$= a^2(\eta) [-d\eta^2 + dx^i dx^j]$$

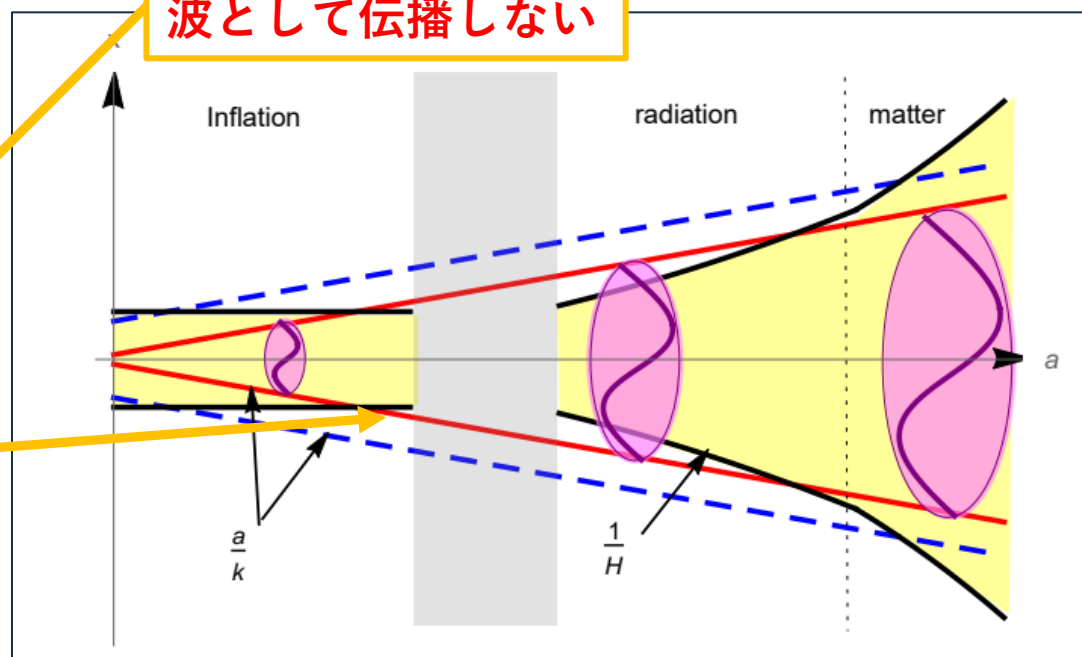
$$\frac{d^2 h_k}{d\eta^2} + \left(k^2 - \frac{a''}{a}\right) h_k = 0$$

$$h_k \sim \begin{cases} \text{Const.} & \left(\text{for } \frac{a}{k} \gg \frac{1}{H}\right) \\ \propto \frac{1}{a} \sin\left(\frac{1}{a} + \alpha\right) & \left(\text{for } \frac{a}{k} \ll \frac{1}{H}\right) \end{cases}$$

\*  $h_k$  は  $h_{\mu\nu}$  のモード展開から得られる



波として伝播しない



# インフレーション

## ▶ 原始重力波

- インフレーション期の時空の量子揺らぎから生成

## ◆ 発展方程式

$$-\frac{1}{2}\nabla_\alpha\nabla^\alpha\bar{h}_{\mu\nu} - R_{\nu\beta\mu\alpha}\bar{h}^{\beta\alpha} + \frac{1}{2}\left(R_{\alpha\nu}^{(0)}\bar{h}_\mu^\alpha + R_{\alpha\mu}^{(0)}\bar{h}_\nu^\alpha - \bar{h}_{\mu\nu}R^{(0)} + g_{\mu\nu}\bar{h}^{\alpha\beta}R_{\alpha\beta}^{(0)}\right) = 0$$

## ▶ FLRW計量

- 宇宙の時間発展を記述可能な計量

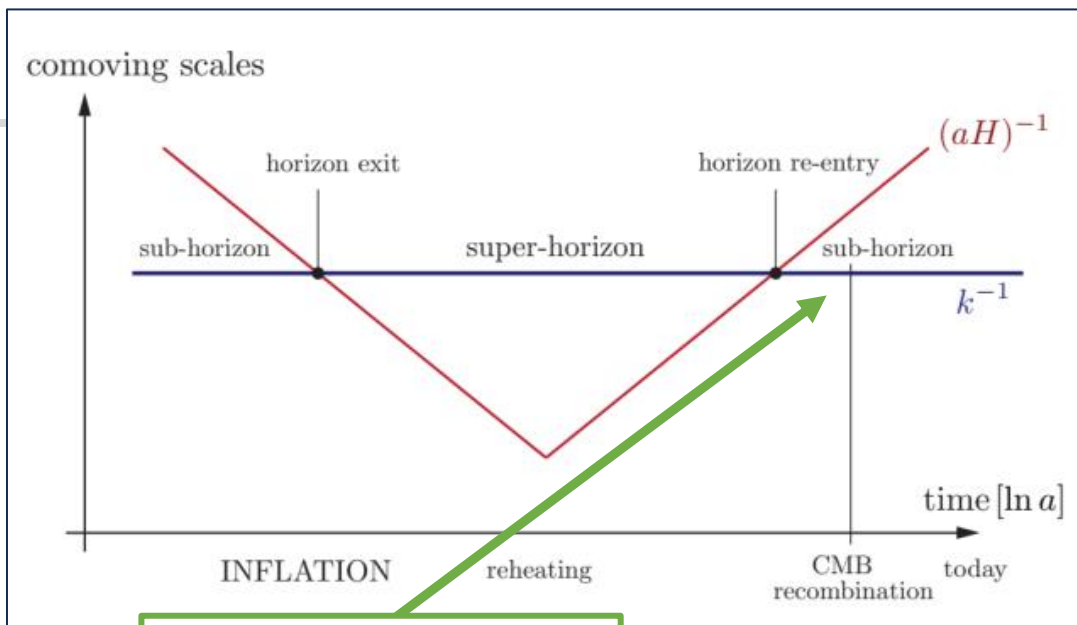
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) dx^i dx^j$$

$$= a^2(\eta) [-d\eta^2 + dx^i dx^j]$$

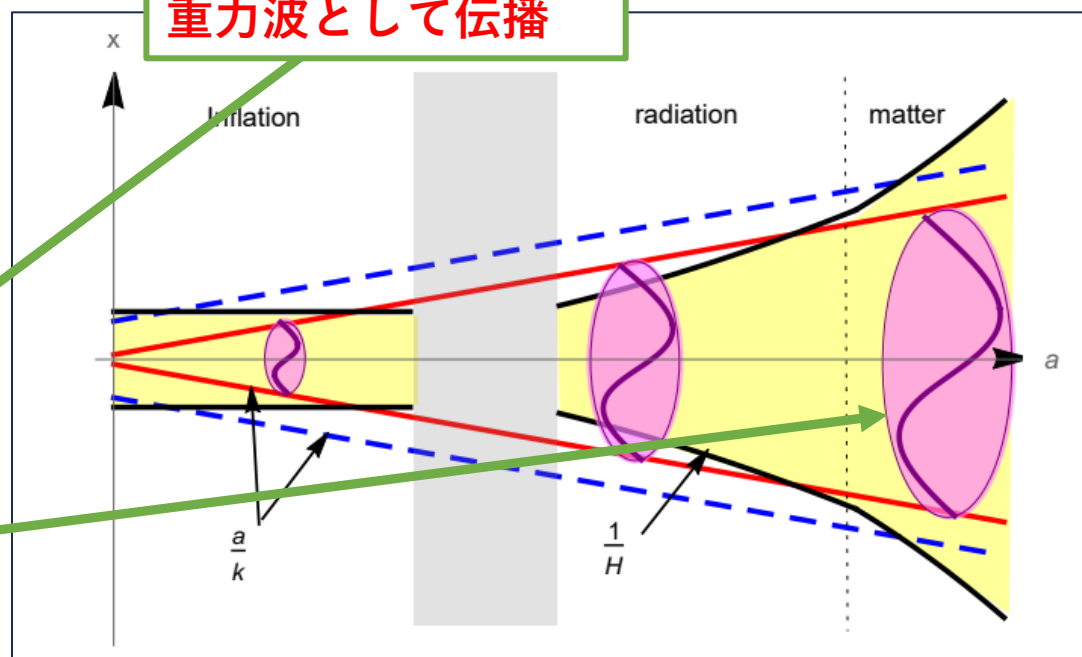
$$\frac{d^2 h_k}{d\eta^2} + \left(k^2 - \frac{a''}{a}\right) h_k = 0$$

$$h_k \sim \begin{cases} \text{Const.} & \left(\text{for } \frac{a}{k} \gg \frac{1}{H}\right) \\ \propto \frac{1}{a} \sin\left(\frac{1}{a} + \alpha\right) & \left(\text{for } \frac{a}{k} \ll \frac{1}{H}\right) \end{cases}$$

\*  $h_k$  は  $h_{\mu\nu}$  のモード展開から得られる



重力波として伝播





# 原始重力波

- ✓ 計量の歪みを観測すればよい

歪みは非常に小さいため、観測出来ていない



DECIGOで観測を目指す

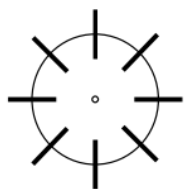
- ✓ 原始重力波が影響を及ぼすものを観測する



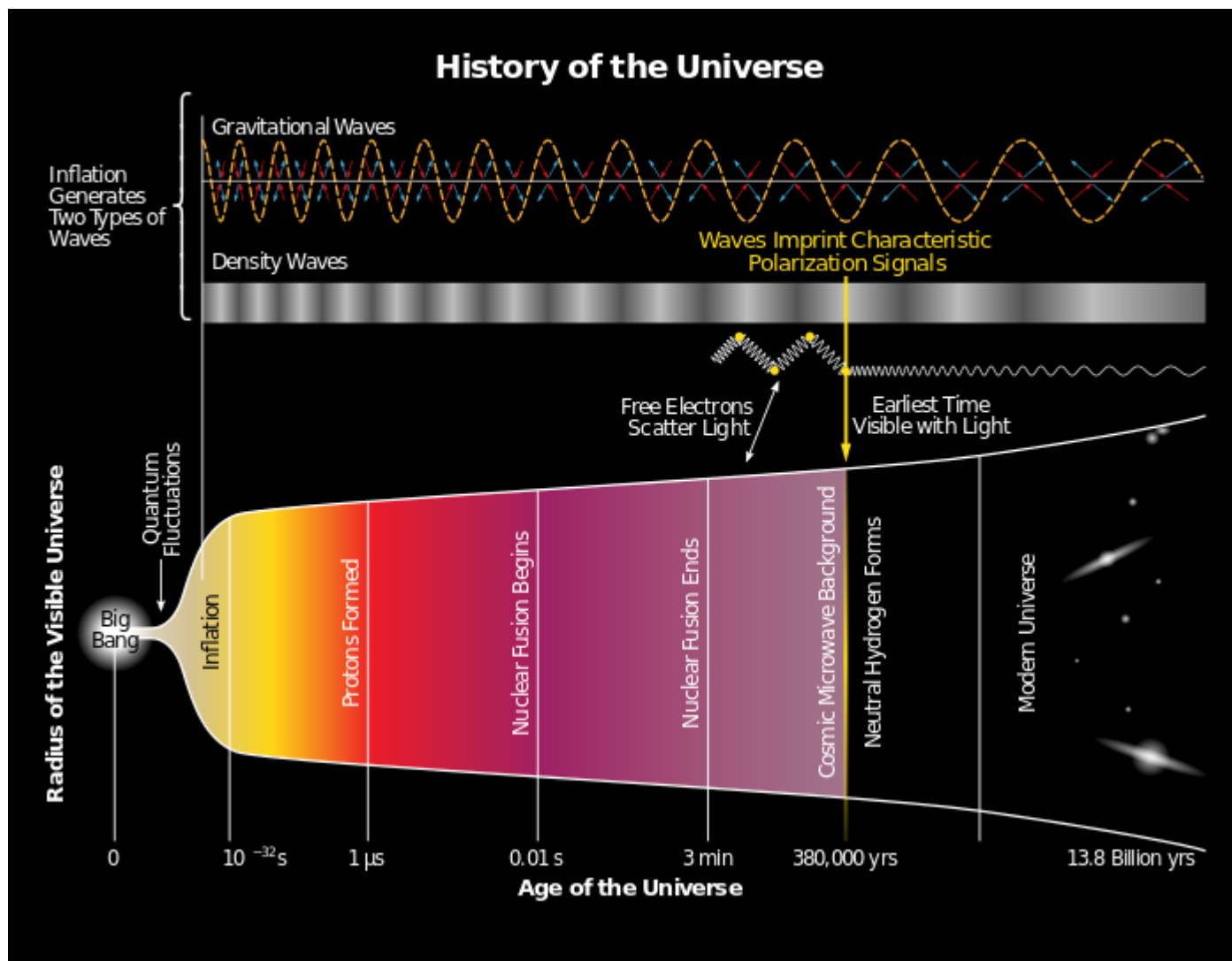
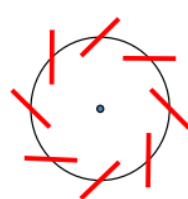
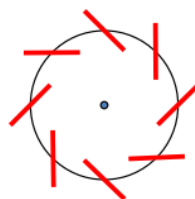
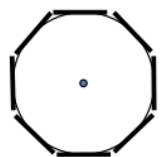
## ➤ CMBのB-mode偏光

- Thomson散乱による偏光
- 重力波の×モードによって生じる非対称分布

トムソン散乱(Eモード)



重力波(Bモード)



# 重力波の伝播

## ➤ Einstein方程式の線形化

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- ✓ Minkowski計量に摂動項を加えて線形化  
 $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

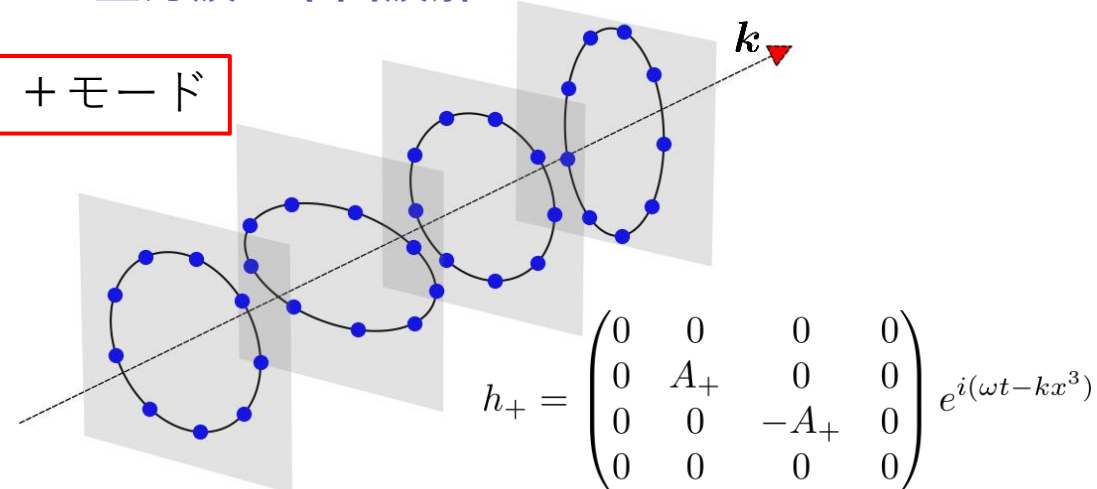
- ✓ 遠方では波源のエネルギー-運動量を見做せる弱い重力場を想定  
 $T_{\mu\nu} = 0$

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

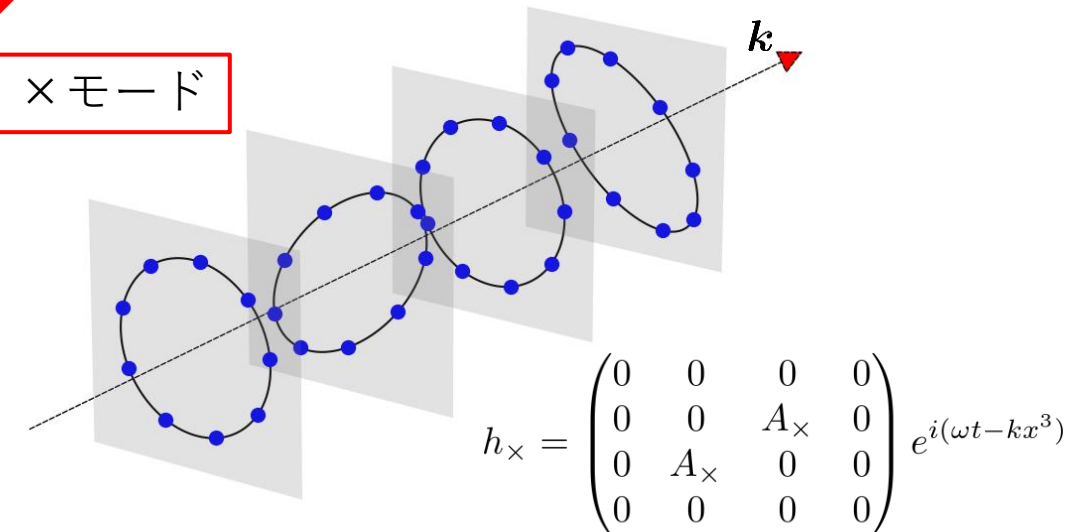
**波動方程式**

## ➤ 重力波の平面波解

+モード



×モード



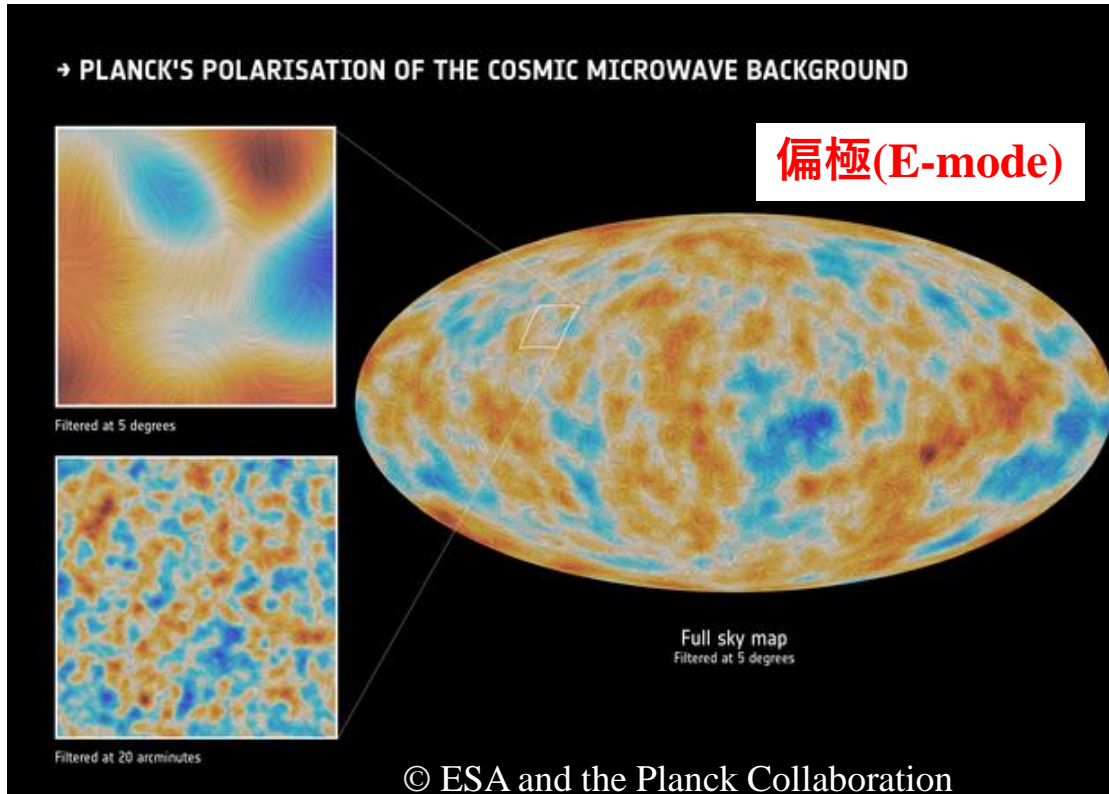
# Planck

## 観測対象

- Cosmic Microwave Background (CMB)

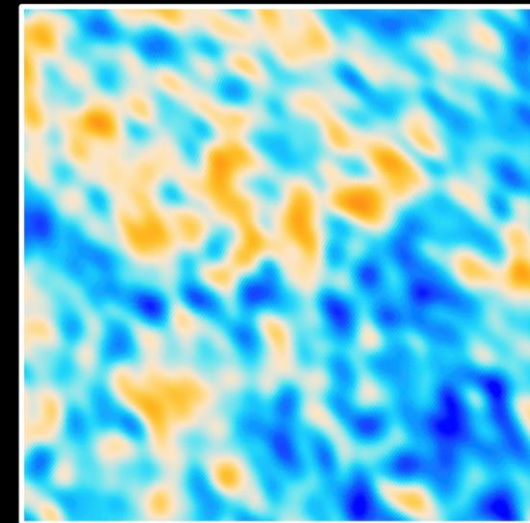
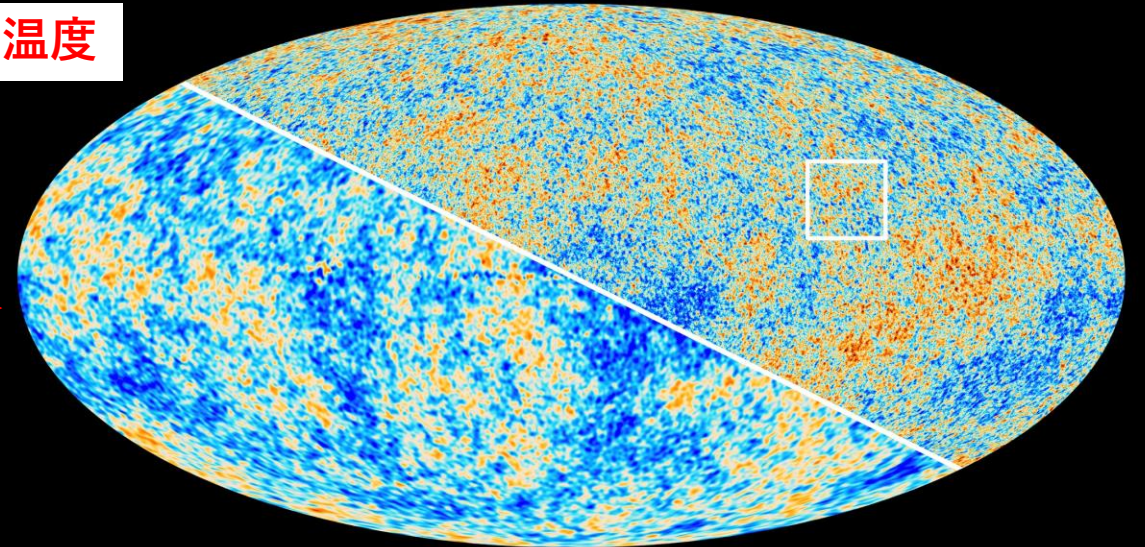
## 特徴

- CMBの高精度測定（異方性測定）
- 温度と偏光の情報が得られる

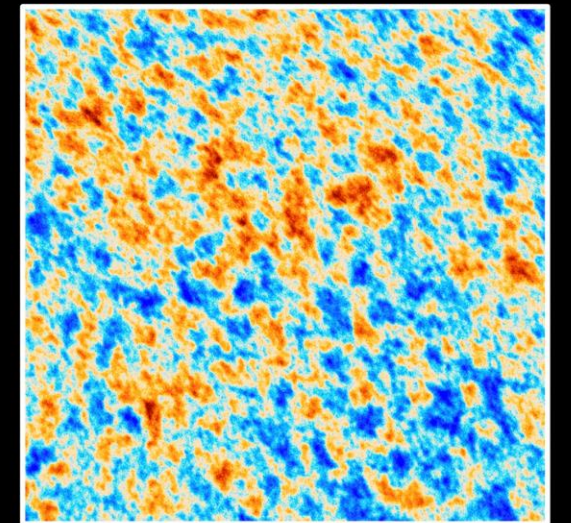


## The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP

温度



WMAP

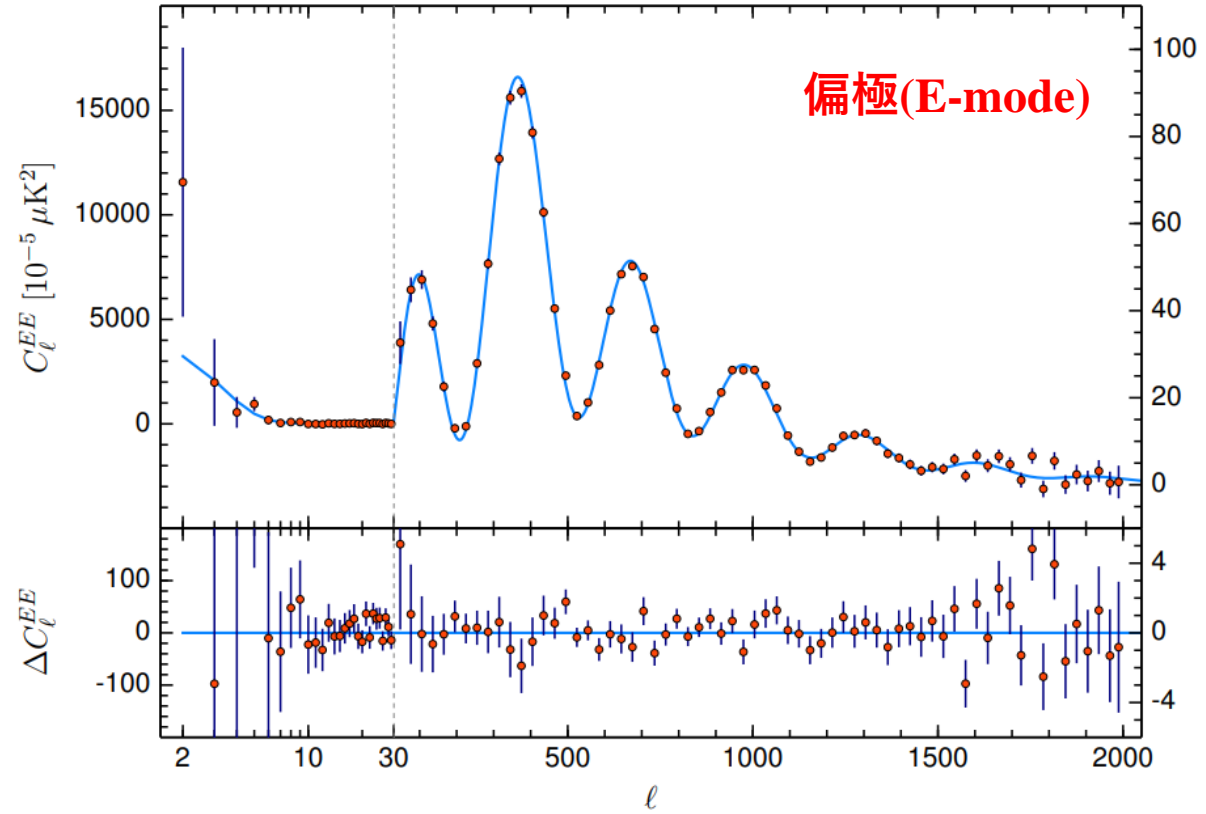
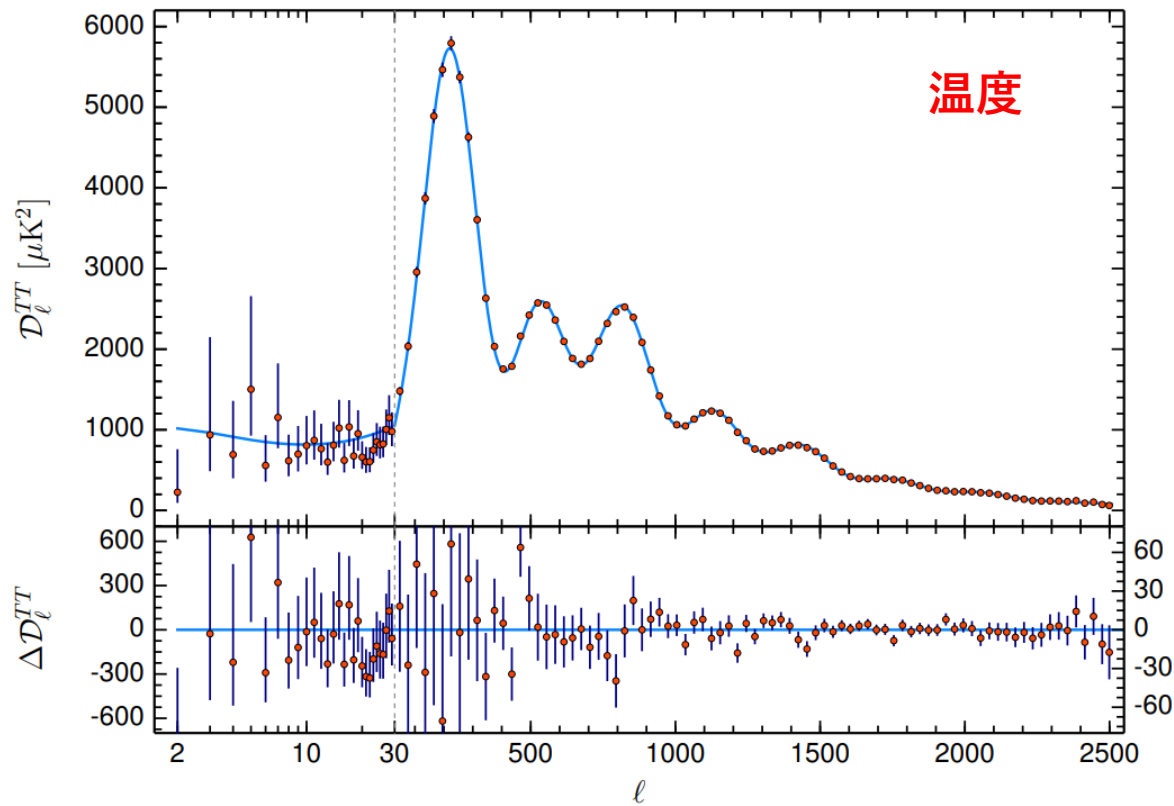


Planck

© ESA and the Planck Collaboration; NASA / WMAP Science Team



## 宇宙の標準モデルは正しいのか？



揺らぎの大きさ

空間の距離(角度)

\*  $l$ が大きいほど狭い範囲

“理論値と観測値がほぼ一致”



# Planck

- モデルとほぼ一致



- 宇宙論パラメータをMCMCによって求める

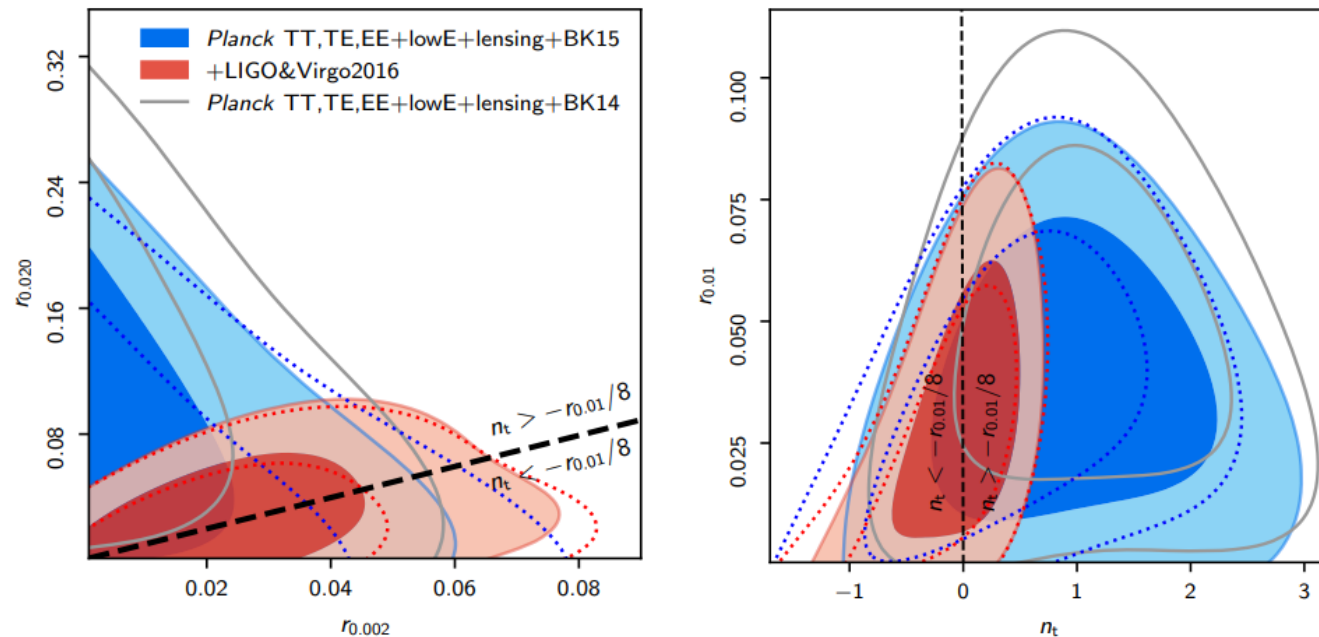
**Table 2.** Parameter 68% intervals for the base- $\Lambda$ CDM model from *Planck* CMB power spectra, in combination with CMB lensing reconstruction and BAO.

Parameter	TT+lowE 68% limits	TE+lowE 68% limits	EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing 68% limits	TT,TE,EE+lowE+lensing+BAO 68% limits
$\Omega_b h^2$ . . . . .	$0.02212 \pm 0.00022$	$0.02249 \pm 0.00025$	$0.0240 \pm 0.0012$	$0.02236 \pm 0.00015$	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02242 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	$0.1206 \pm 0.0021$	$0.1177 \pm 0.0020$	$0.1158 \pm 0.0046$	$0.1202 \pm 0.0014$	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.11933 \pm 0.00091$
$100\theta_{MC}$ . . . . .	$1.04077 \pm 0.00047$	$1.04139 \pm 0.00049$	$1.03999 \pm 0.00089$	$1.04090 \pm 0.00031$	$1.04092 \pm 0.00031$	$1.04101 \pm 0.00029$
$\tau$ . . . . .	$0.0522 \pm 0.0080$	$0.0496 \pm 0.0085$	$0.0527 \pm 0.0090$	$0.0544^{+0.0070}_{-0.0081}$	$0.0544 \pm 0.0073$	$0.0561 \pm 0.0071$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	$3.040 \pm 0.016$	$3.018^{+0.020}_{-0.018}$	$3.052 \pm 0.022$	$3.045 \pm 0.016$	$3.044 \pm 0.014$	$3.047 \pm 0.014$
$n_s$ . . . . .	$0.9626 \pm 0.0057$	$0.967 \pm 0.011$	$0.980 \pm 0.015$	$0.9649 \pm 0.0044$	$0.9649 \pm 0.0042$	$0.9665 \pm 0.0038$
$H_0$ [km s <sup>-1</sup> Mpc <sup>-1</sup> ] . .	$66.88 \pm 0.92$	$68.44 \pm 0.91$	$69.9 \pm 2.7$	$67.27 \pm 0.60$	$67.36 \pm 0.54$	$67.66 \pm 0.42$
$\Omega_\Lambda$ . . . . .	$0.679 \pm 0.013$	$0.699 \pm 0.012$	$0.711^{+0.033}_{-0.026}$	$0.6834 \pm 0.0084$	$0.6847 \pm 0.0073$	$0.6889 \pm 0.0056$
$\Omega_m$ . . . . .	$0.321 \pm 0.013$	$0.301 \pm 0.012$	$0.289^{+0.026}_{-0.033}$	$0.3166 \pm 0.0084$	$0.3153 \pm 0.0073$	$0.3111 \pm 0.0056$
$\Omega_m h^2$ . . . . .	$0.1434 \pm 0.0020$	$0.1408 \pm 0.0019$	$0.1404^{+0.0034}_{-0.0039}$	$0.1432 \pm 0.0013$	$0.1430 \pm 0.0011$	$0.14240 \pm 0.00087$
$\Omega_m h^3$ . . . . .	$0.09589 \pm 0.00046$	$0.09635 \pm 0.00051$	$0.0981^{+0.0016}_{-0.0018}$	$0.09633 \pm 0.00029$	$0.09633 \pm 0.00030$	$0.09635 \pm 0.00030$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- モデルとほぼ一致
- ↓
- 宇宙論パラメータをMCMCによって求める
- ↓
- B-mode偏光を特徴づける2つのパラメータを決定
  - Tensor-to-scalar ratio:  $r$
  - Spectral tilt:  $n_t$

$$\Omega_{\text{gw}}(f) = \Omega_{\text{gw}}^{\text{CMB}} \left( \frac{f}{f_{\text{CMB}}} \right)^{n_t} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{f_{\text{eq}}}{f} \right)^2 + \frac{16}{9} \right]$$

$$\Omega_{\text{gw}}^{\text{CMB}} = \frac{3}{128} r A_s \Omega_r$$



**Fig. 5.** 68 % and 95 % CL constraints on tensor perturbations in the  $\Lambda\text{CDM}+r_{0.002}+r_{0.02}$  model, i.e., when the inflationary consistency relation is relaxed. Filled contours in the left panel show the results for our independent primary parameters  $r_{0.002}$  and  $r_{0.02}$ , which have uniform priors, and in the right panel for the derived parameters  $n_t$  and  $r_{0.01}$ , which have non-uniform priors. The dotted lines assume uniform priors on  $r_{0.01}$  and  $n_t$ , calculated as in Fig. 4. The scale  $k = 0.01 \text{ Mpc}^{-1}$  is near the decorrelation scale of  $(n_t, r)$  for the *Planck*+BK15 data. In both panels the dashed black line indicates the inflationary consistency condition,  $n_t = -r_{0.01}/8$ . (The grey contours follow if we use the older BK14 data instead of the BK15 data.)

“ $\Lambda$ CDM+ $r_{0.002}$ + $r_{0.02}$ ” model.

$r_{0.002} < 0.064$  } (95 % CL, Planck TT,TE,EE+lowE  
 $r_{0.02} < 0.081$  } +lensing+BK15+LIGO&Virgo2016),

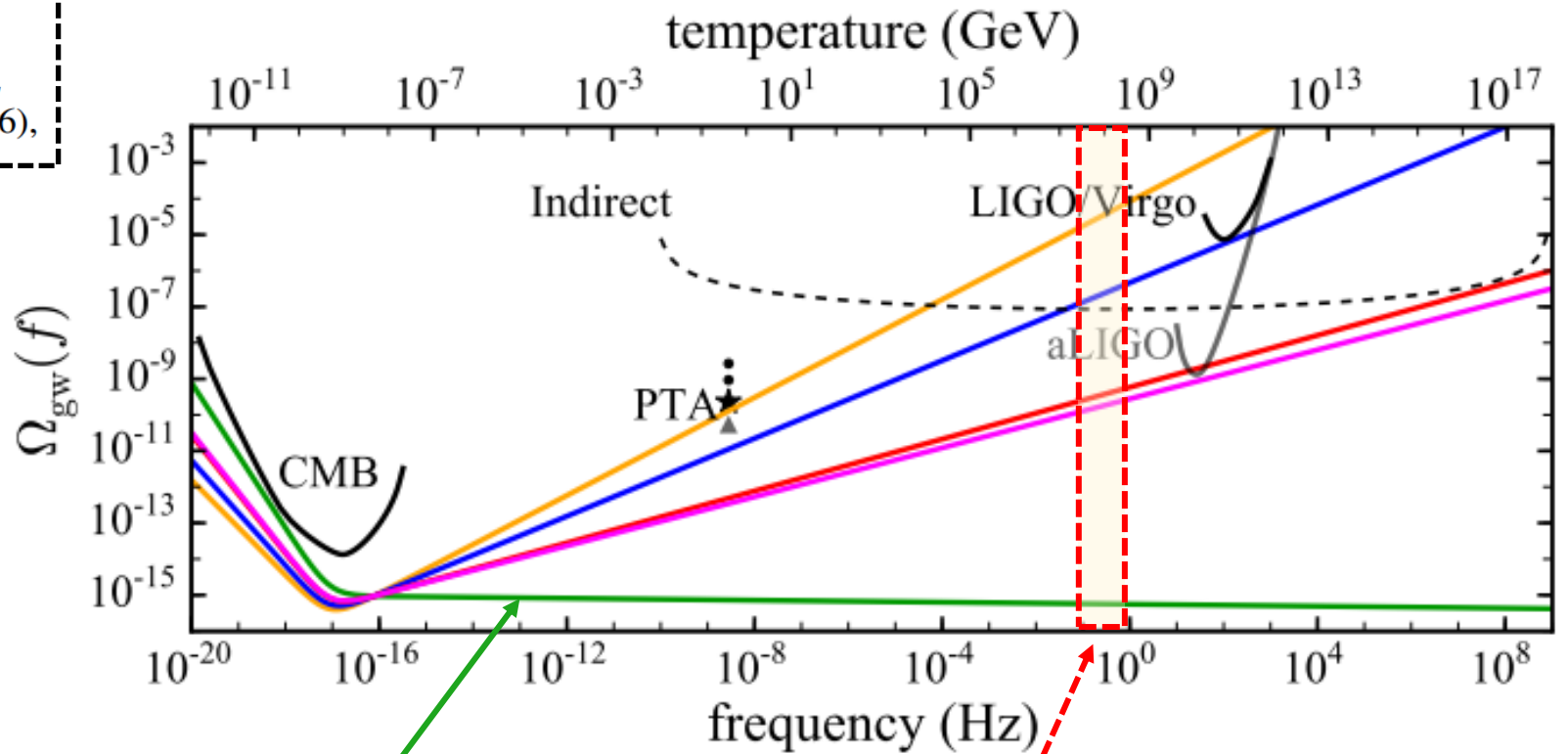


$$\Omega_{\text{gw}}(f) = \Omega_{\text{gw}}^{\text{CMB}} \left( \frac{f}{f_{\text{CMB}}} \right)^{n_t} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{f_{\text{eq}}}{f} \right)^2 + \frac{16}{9} \right]$$



$\Omega_{\text{gw}} = 1.0 \times 10^{-16}$  at  $f \sim 0.1$  Hz

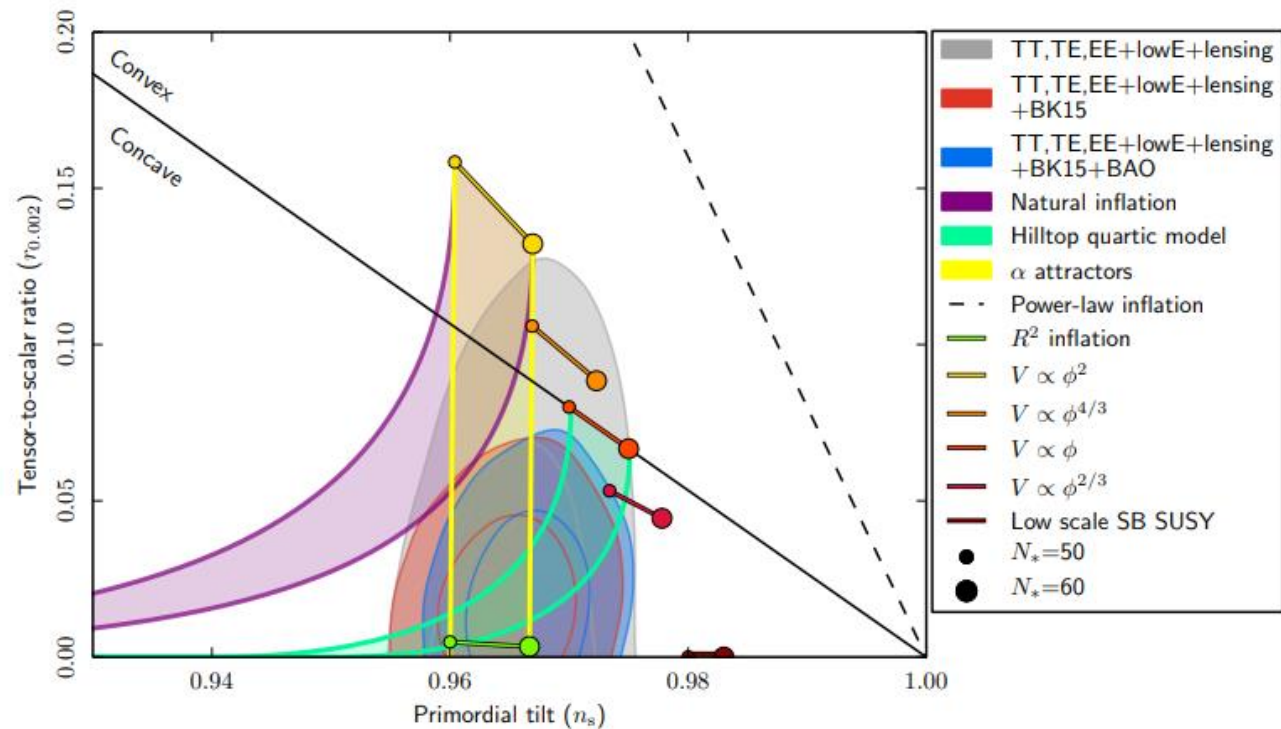
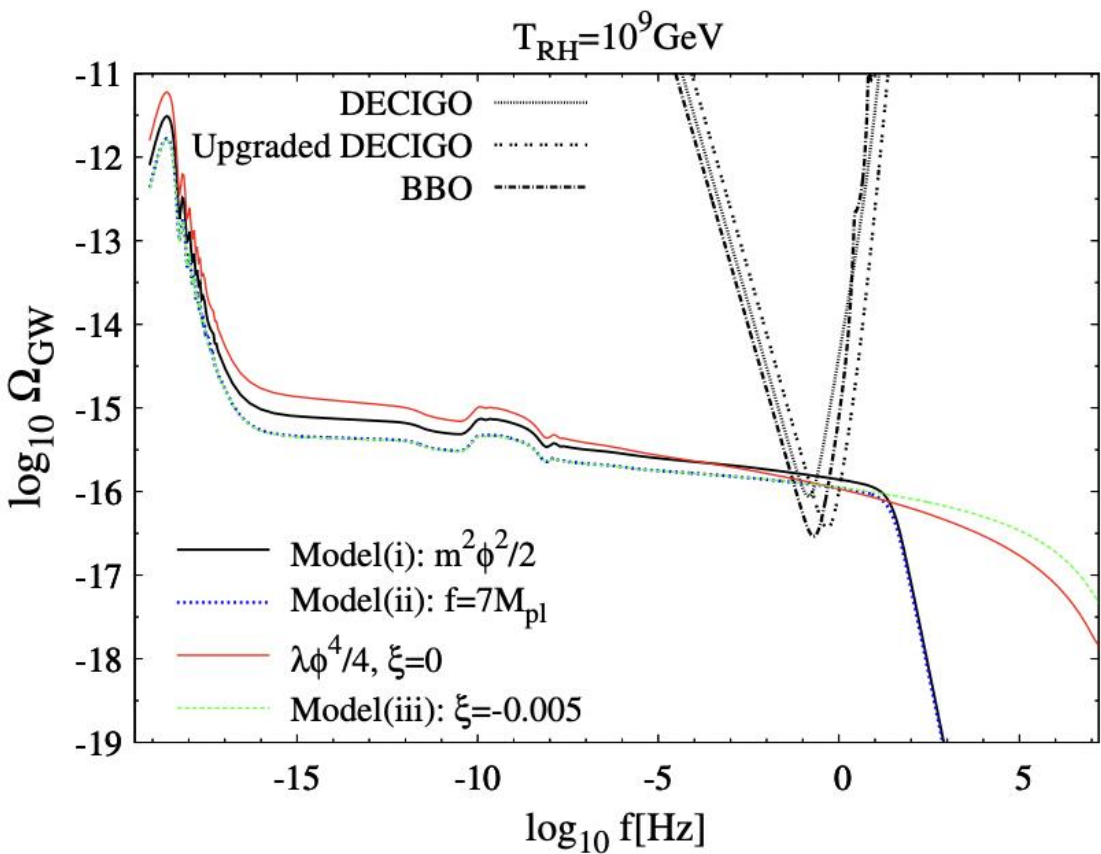
**Single-Field Slow-Roll Inflation**  
 $n_t = -r/8$



・ DECIGOのターゲット周波数(0.1~1 Hz)

Cite: Paul D. Lasky et al, Gravitational-wave cosmology across 29 decades in frequency. arXiv:1511.05994

## ➤ インフレーションモデルへの制限



**Fig. 8.** Marginalized joint 68 % and 95 % CL regions for  $n_s$  and  $r$  at  $k = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$  from *Planck* alone and in combination with BK15 or BK15+BAO data, compared to the theoretical predictions of selected inflationary models. Note that the marginalized joint 68 % and 95 % CL regions assume  $dn_s/d \ln k = 0$ .

Cite: S. Kuroyanagi et al, 2014, PRD 90, 063513



# まとめ

- 初期宇宙解明のために非常に重要な観測
- 標準宇宙論モデルと無矛盾な観測結果
- Bモード偏光から原始重力波の証拠を探索



Bモード偏光自体は見つかっていないがパラメータを制限

“ $\Lambda$ CDM+ $r_{0.002}$ + $r_{0.02}$ ” model.

$r_{0.002} < 0.064$  } (95 % CL, *Planck* TT,TE,EE+lowE  
 $r_{0.02} < 0.081$  } +lensing+BK15+LIGO&Virgo2016),



- 原始重力波の上限強度の引き下げ

$$\Omega_{\text{gw}} = 1.0 \times 10^{-16} \quad \text{at } f \sim 0.1 \text{ Hz}$$

**DECIGOで検出するためには感度の向上が必要**