

重力波と宇宙論

高水 裕一

CCS (計算科学研究センター)

Jun 2018 @ 筑波宇宙史センター全体会議

◆重力波観測

2016年の初観測以来、すでに 5 例 観測

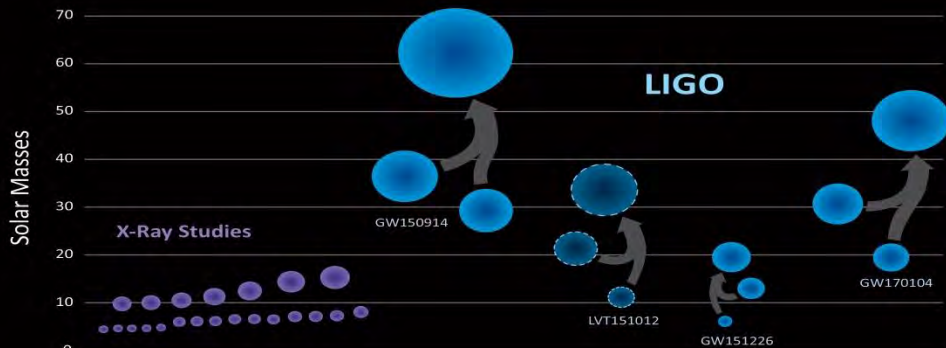


ノーベル賞(2017年)

観測事例	公表日	距離 Mpc	発生源
GW150914	2016-2	410 (13億光年)	35M vs 30M
GW151226	2016-6	440	14M vs 7M
GW170104	2017-6	880 (29億光年)	31M vs 19M
GW170814	2017-9	540 (18億光年 エリダヌス座)	30M vs 25M
GW170817	2017-10	40	1.3M vs 1.6M (中性子星)

全てブラックホール
合体

中性子星合体であり
電磁波などの同時
観測もある**特別な例**



◆重力波観測



ノーベル賞(2017年)

GW170817

40Mpc : (1.3億光年うみへび座方向)

天体:NGC4993 (13h,-23)



- これまでは全て連星ブラックホールの合体であったが、最新の観測例は、初めて**連星中性子星系**からのもの
1.3M vs 1.6M (NSs)
- **貴金属元素(金、白金)**の起源に関連している
- 距離もこれまでより**10倍も近く**、その他の同時観測(**ガンマ線、電磁波**)により、方角も定まっている。

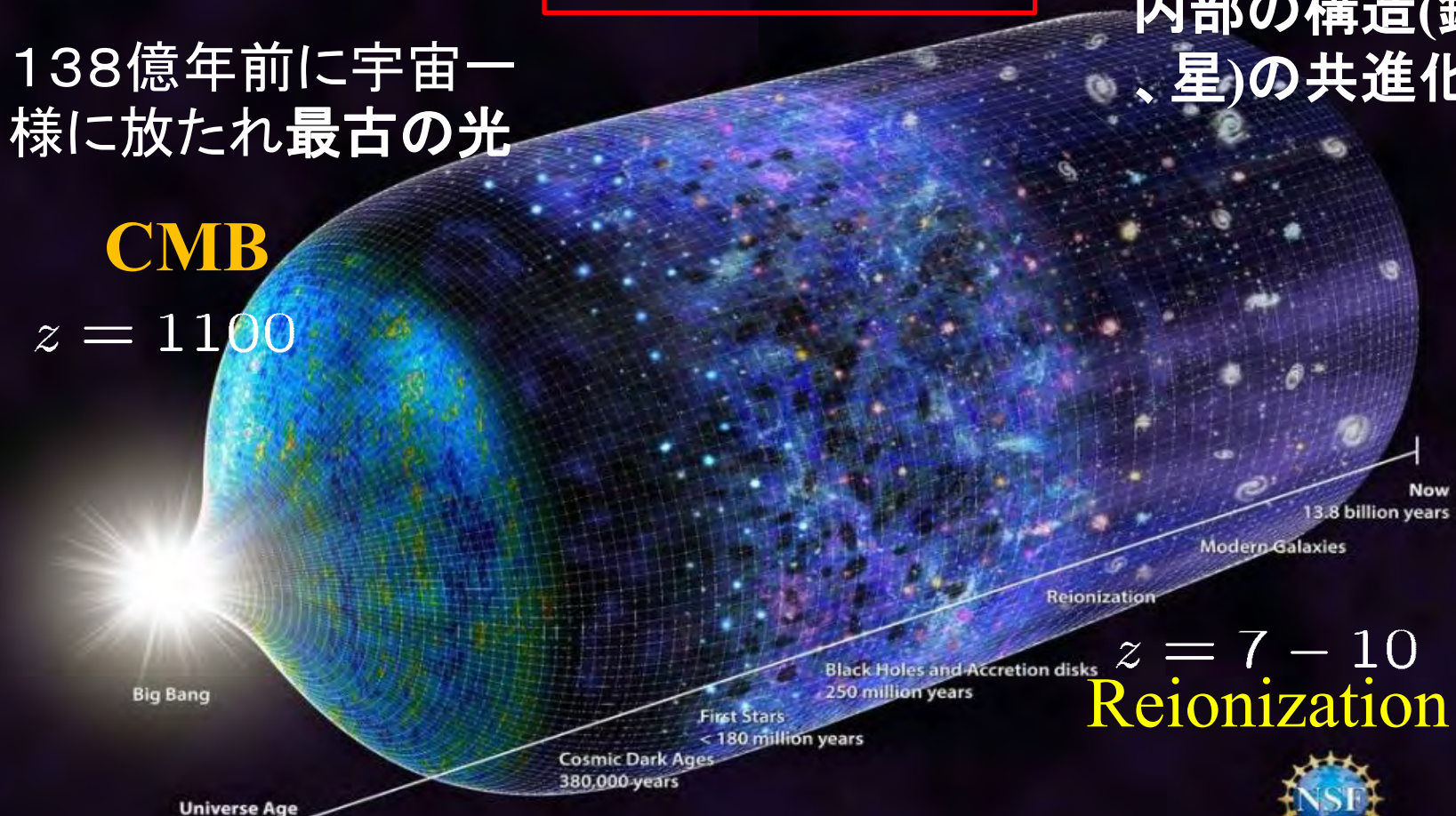
宇宙論

宇宙全体の進化と
内部の構造(銀河
、星)の共進化

138億年前に宇宙一
様に放たれ最古の光

CMB

$z = 1100$



宇宙背景輻射の観測で宇宙史138億年の
だいたいの進化は分かっている

重力波：原理的には、CMBより古い宇宙の姿が「みえる」

宇宙論

様々な観測事実から、138億年に渡る宇宙の歴史を再構築し、考察していく



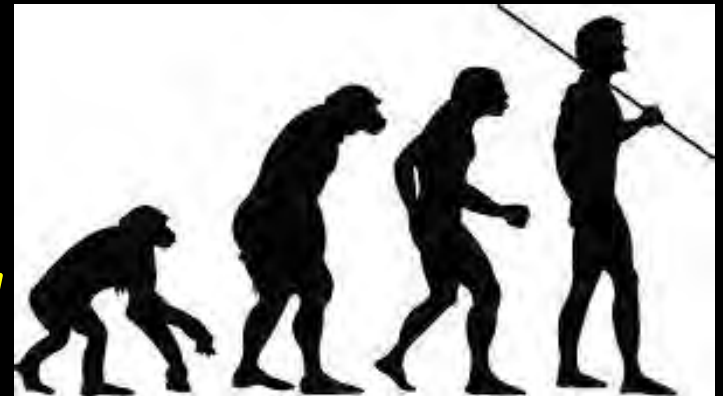
観測：宇宙背景輻射(CMB), 銀河分布, そして
将来的な宇宙背景重力波

考古学に似ている

より最古の化石が見つかるか？



これがかかるとノーベル賞



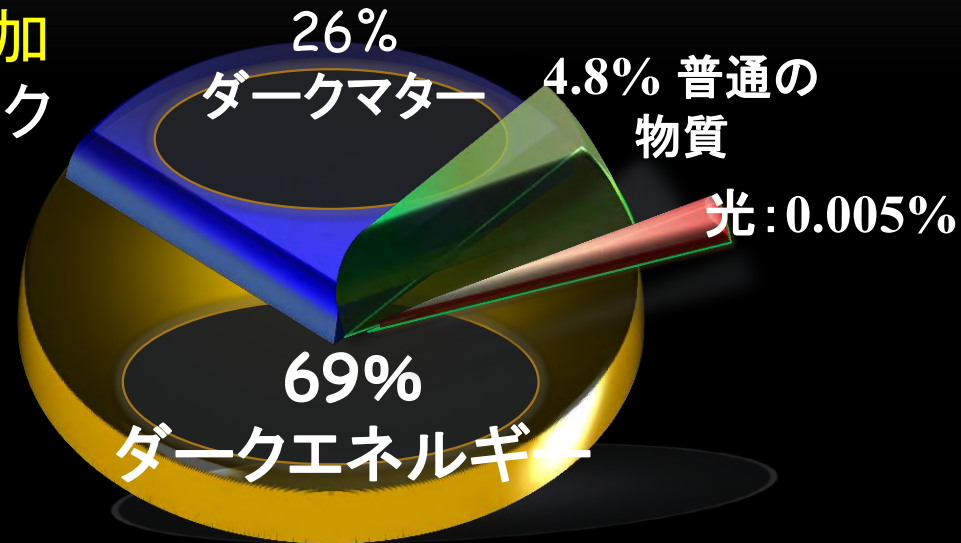
- **背景重力波**: 重力波は相互作用が低く、電磁波でみれる最古の宇宙地図(CMB)よりも、さらに昔の情報を直接得ることができる可能性

現在分かっている宇宙の物質：

ダークエネルギー(69%)、ダークマター(25.8%)、
バリオン=通常物質(4.8%)

現在の宇宙の膨張：ゆっくりとした**加速膨張期**に、約40億年前からダークエネルギーが支配的になったため

実は宇宙**誕生直後**にも加速膨張期（インフレーション）



宇宙論の三大ミステリー

□ ダークエネルギーとは？

宇宙定数？重力理論の修正？

□ ダークマターとは？

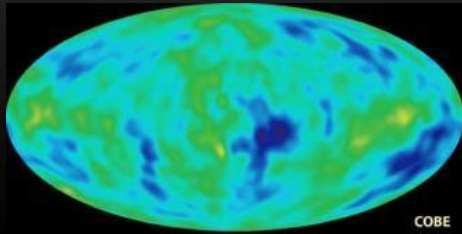
構造形成（銀河、銀河団）の主役

□ インフレーションとは？

構造の種の起源

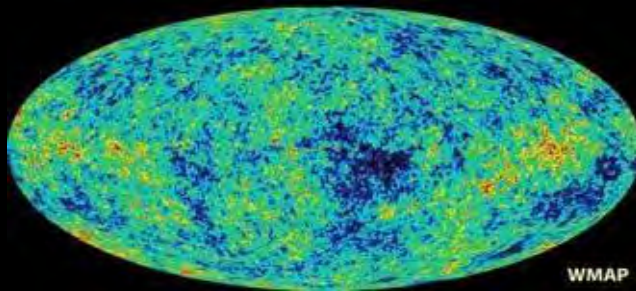
最古の宇宙地図(CMB)の詳細観測

History



COBE

• COBE 衛星(92)



WMAP

• WMAP 衛星 (03-10)

観測技術の向上で詳細に最古の宇宙地図が解析できるようになってきた。

• PLANCK 衛星(09-15)

• LIGO(2016)

人類は初めて重力波を観測。
将来的に、さらに「最古の地図」
を手にする可能性もある



➤ 背景重力波

- インフレーションモデルの選別には、「密度揺らぎ」のスケール不変からのずれと「背景重力波」の振幅

なぜそんな極初期の宇宙を探る必要があるのか？

あらゆる「起源」の大本になっているため

- 銀河などの宇宙の構造の起源は、インフラトンの量子的揺らぎが起源である。 宇宙構造、物質の起源
- 自然界の力の統一と関係が深い高エネルギー領域である。
力の起源
 - インフラトンの素粒子的起源と、ダークマターとの関連？
(SUSYとニュートラリーノetc)
- インフラトンとダークエネルギーとの関連
(宇宙定数の起源？)

➤ Key observation for searching Inflation models

• r-ns plane

$$\mathcal{P}_\zeta \propto k^{n_s-1} \quad r = \mathcal{P}_\zeta / \mathcal{P}_T$$

密度揺らぎのスペクトル 重力波と密度揺らぎの振幅比

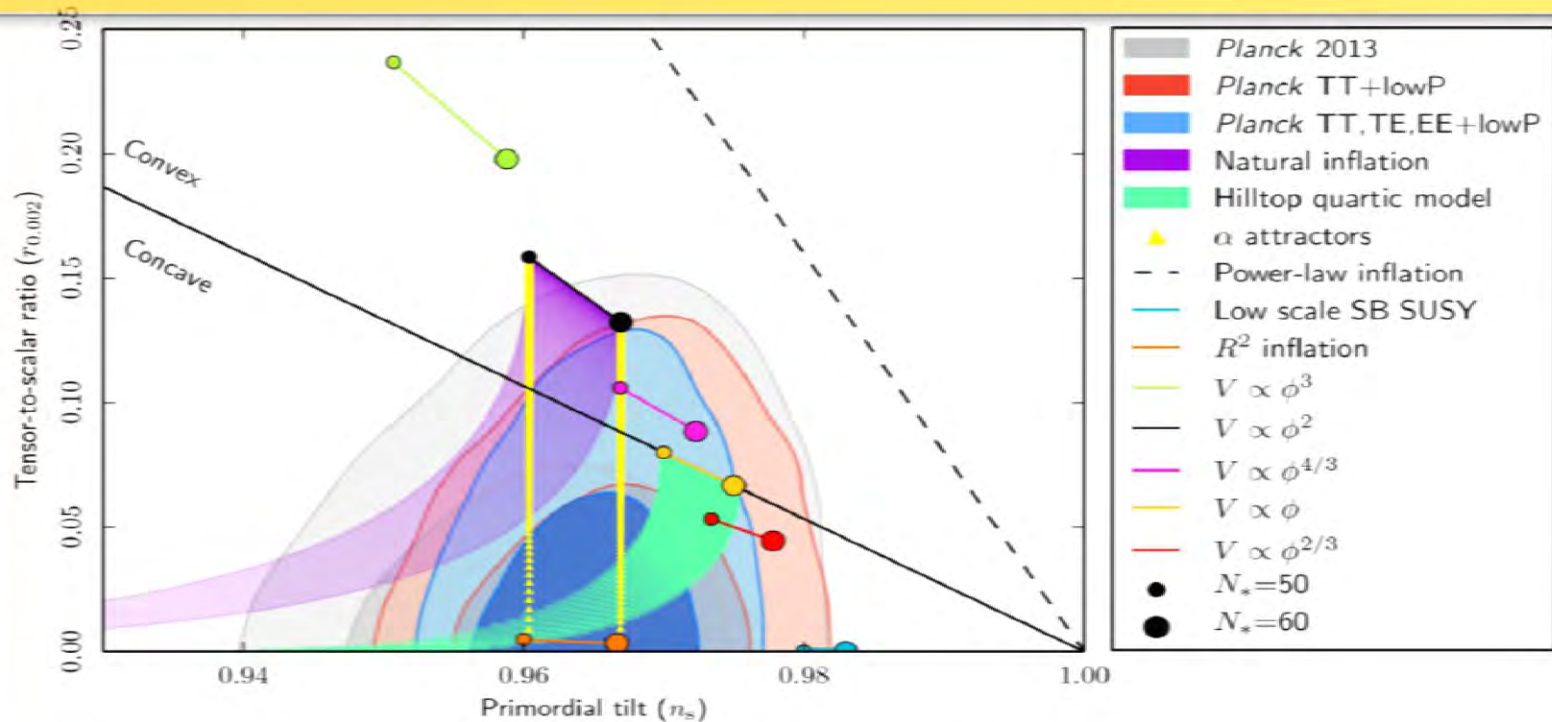
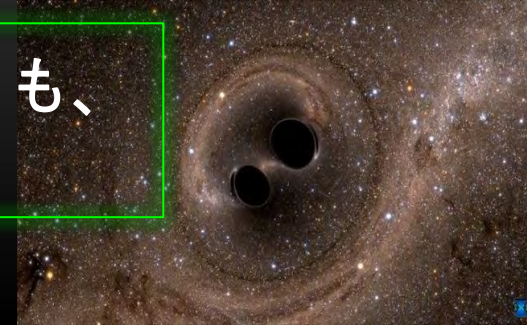


Fig. 12. Marginalized joint 68 % and 95 % CL regions for n_s and $r_{0.002}$ from Planck in combination with other data sets, compared to the theoretical predictions of selected inflationary models.

「原始重力波の制限 r 」がインフレーションモデルを制限する鍵

これがかかると**インフレーション**にもノーベル賞の可能性

- 背景重力波: 最古の宇宙地図(CMB)よりも、さらに昔の情報が直接得られる可能性



- これまでは**天体起源**の重力波
- 将来的にもっと重力波がかかり、背景重力波としてのデータが得られる可能性。
- **原始重力波**を初観測したと
2014年アメリカのチームが発表！
- **BICEP2** Detection signal for GW from Inflation
May. 2014 , **しかしこの結果は実は間違い!**



- A Joint Analysis of Planck and BICEP2 B modes including dust polarization uncertainty
M.Mortonson & U. Seljak JCAP(2014)

◆ BICEP2 RESULT (May.2014)

CMBの偏光成分によっても背景重力波の制限がつく

- B-mode Polarization of CMB by detected on sky from South Pole (Radio telescope)
- designed to search for the signal of inflationary GW in the power spectrum around $\ell \sim 80$

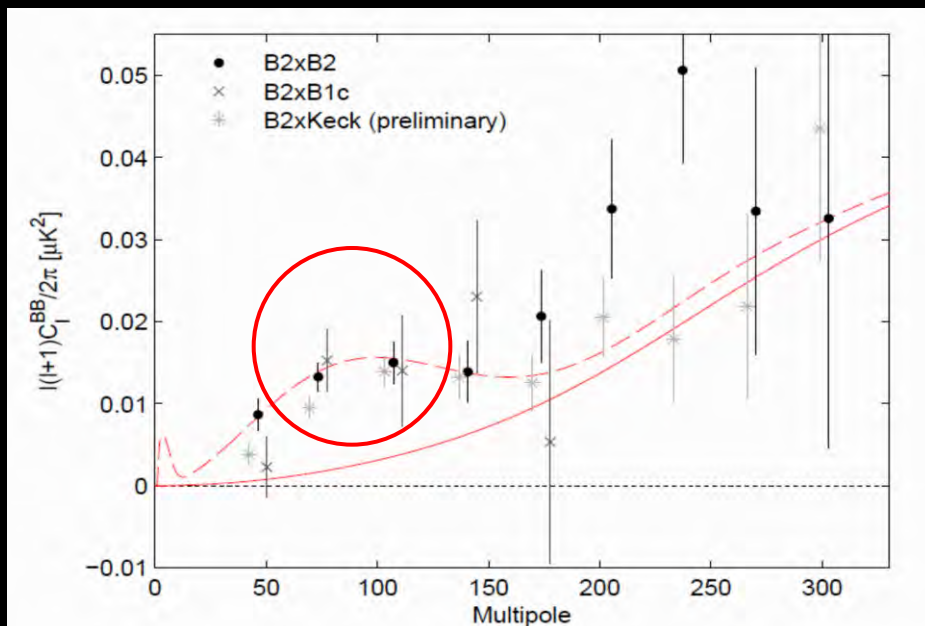


FIG. 9.— Comparison of the BICEP2 BB auto spectrum and cross spectra taken between BICEP2 and BICEP1 combined, and BICEP2 and *Keck Array* preliminary. (For clarity the cross spectrum points are offset horizontally and the BICEP2 $\times$ BICEP1 points are omitted at $\ell > 200$.)

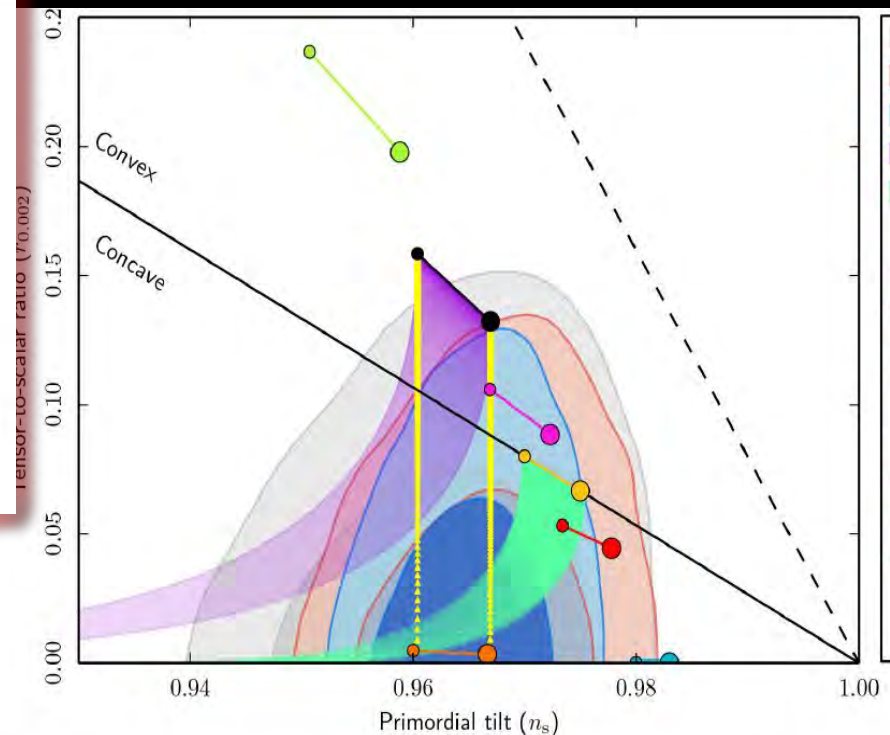
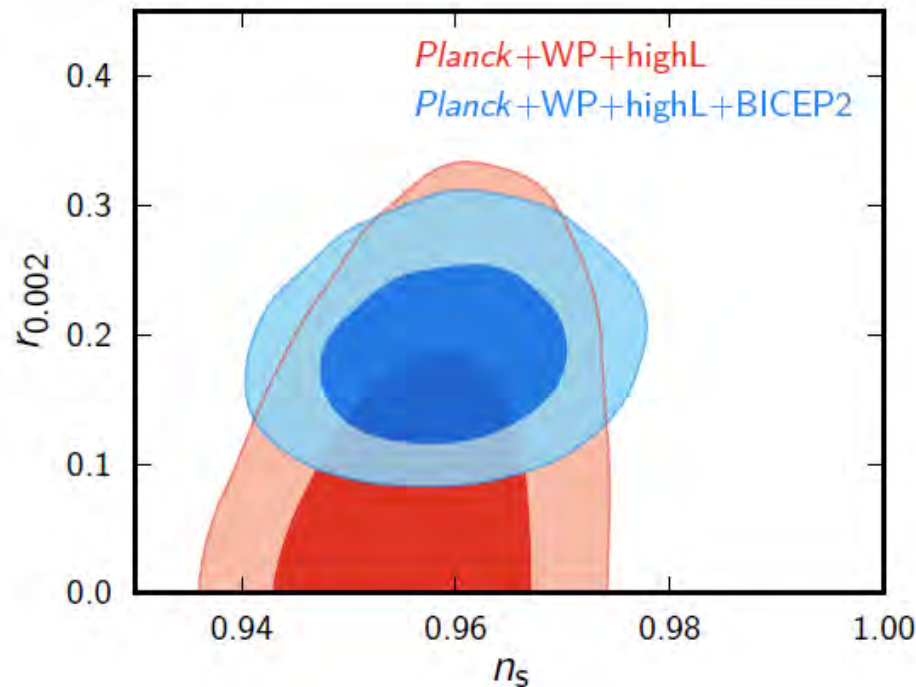
$$r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}.$$

They reported we found the evidence of GW from Inflation, *HOWEVER,,,*

◆ BICEP2 RESULT (May.2014)

理論予言との比較からインフレーションのポテンシャルへの制限が可能

Potential of Inflaton $V(\phi) = \phi^2, \phi^3$ favored ??

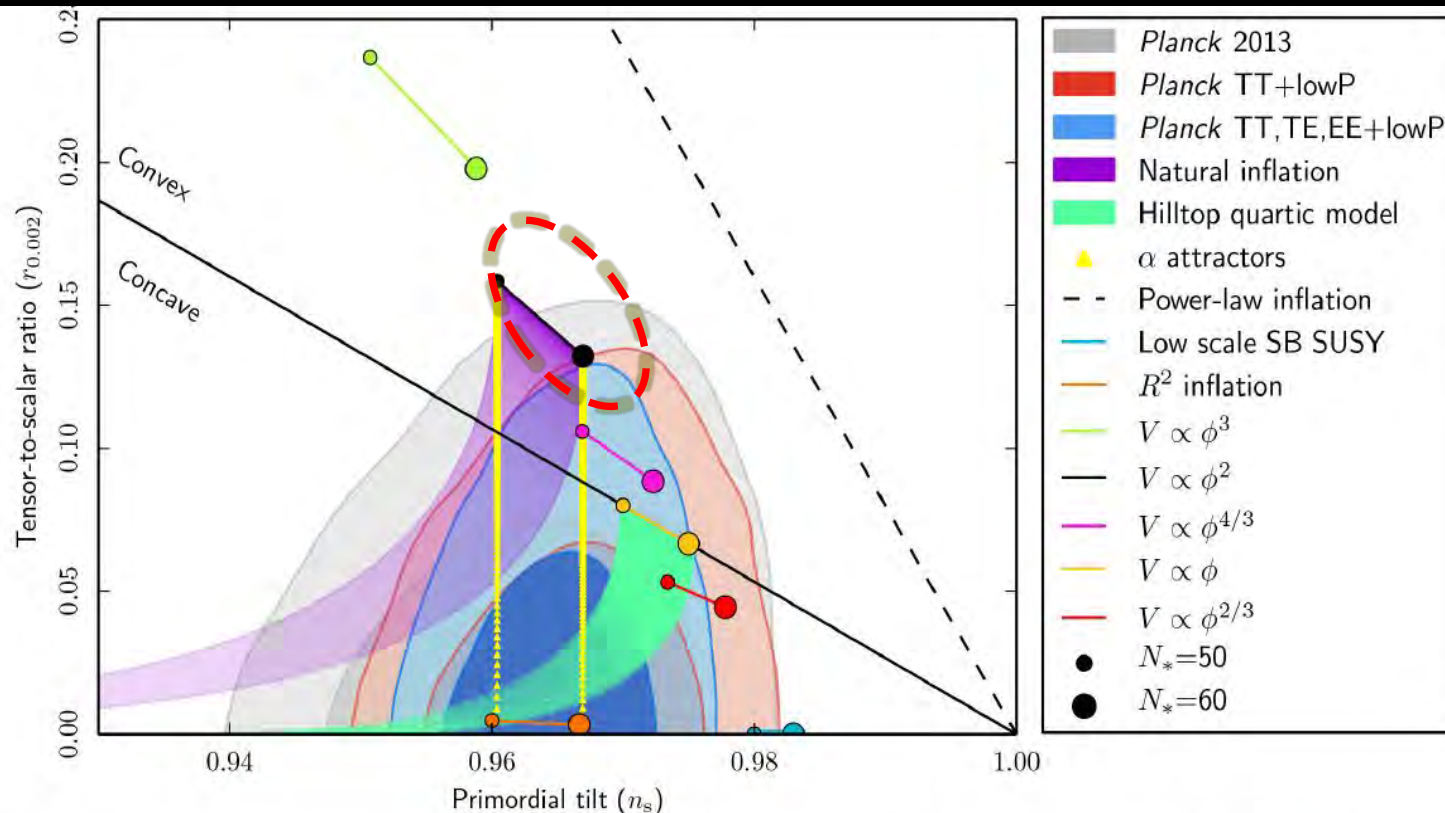


◆ PLANCK RESULT (Feb. 2015)

$n_s = 0.9677 \pm 0.0060$ (68 % CL, *Planck* TT+lowP+lensing),

$r_{0.002} < 0.11$ (95 % CL, *Planck* TT+lowP+lensing)

BICEP2 resultとは矛盾している



$V(\phi) = \phi^2$
Disfavored

◆ 矛盾の原因は、

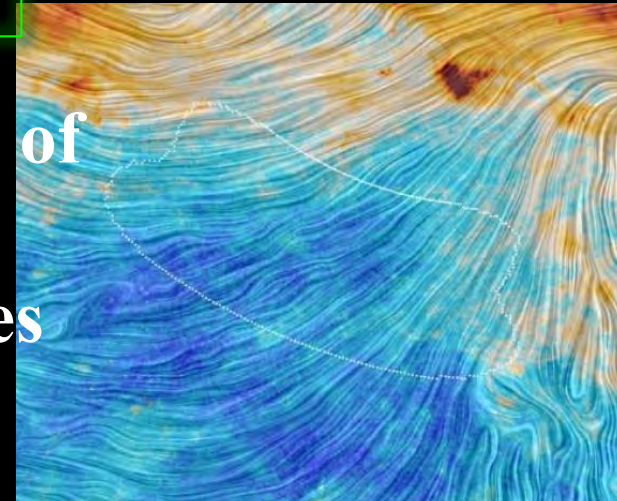
Dust Polarized Emission

- **Flauger and Spergel (2014)**
- **Mortonson and Saljak (2014)**

Synchrotron signal
and dust emission:
around 60 GHz

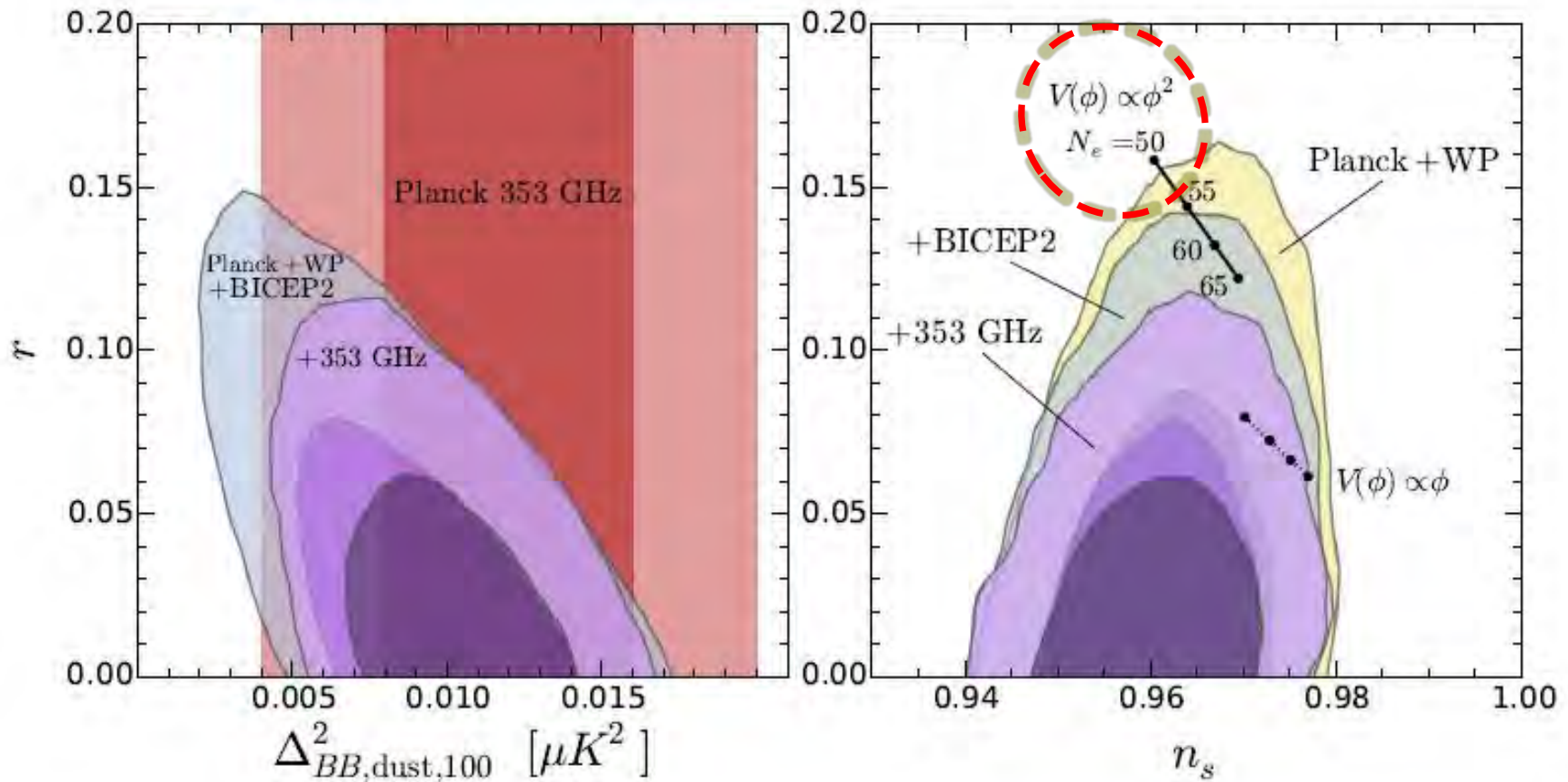
➤ All down to Dust emission

- **BICEP2 at 150 GHz is same patch of sky by PLANCK at 353 GHz**
- **Almost all the polarized light comes from Dust**



Now officially GW discovery from Inflation was
DEAD *Nature(2015)*

◆ Constraints on 2D plane in parameter space

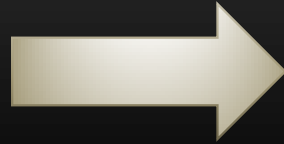


- PLANCK 353 GHz= Same patch for BICEP2 150 GHz
- Can exclude quadratic inflation at more than 2σ

◆ この話題の結論

$$r = 0.2.$$

BICEP2



$$r < 0.11,$$

PLANCK+ WMAP pol+BICEP2

A slight improvement

$$r < 0.13 \text{ (95\% c.l.)}$$

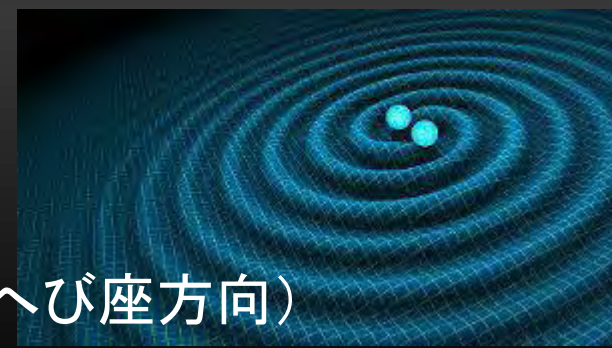
PLANCK +WMAP pol

$V = M^2 \phi^2 / 2$ inflation predicting $r = 0.14$ is disfavored at about 2.5σ

単純な質量項は棄却された！

- Main reason for mis-estimation: BICEP2 team just used the first 5 bandpowers
- Two different spectral colors (dust & synchro) can combine into a close to pure CMB spectral color

◆重力波観測



GW170817

40Mpc : (1.3億光年うみへび座方向)

- この観測例は、初めて**連星中性子星系**からのもの
- 距離もこれまでより10倍も近く、その他の同時観測(**ガンマ線、電磁波**)により、方角も定まっている。

$$|c_{\text{GW}}/c - 1| < \mathcal{O}(10^{-15})$$

重力波の光速とのずれ

一般相対論と整合的だが、証明ではない

(修正重力理論の検証へ)

修正重力理論

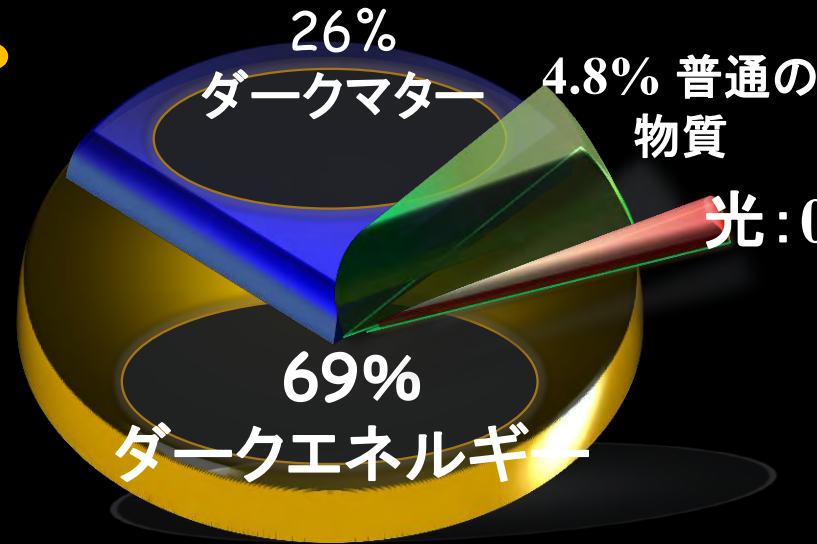
現在の宇宙を加速膨張させている正体
は何か？

ダークエネルギーとは何なのか？

□ 宇宙項？

□ Modified gravity?

□ 未知の物質？



Λ CDMモデル 現在のところ、様々な観測と整合的

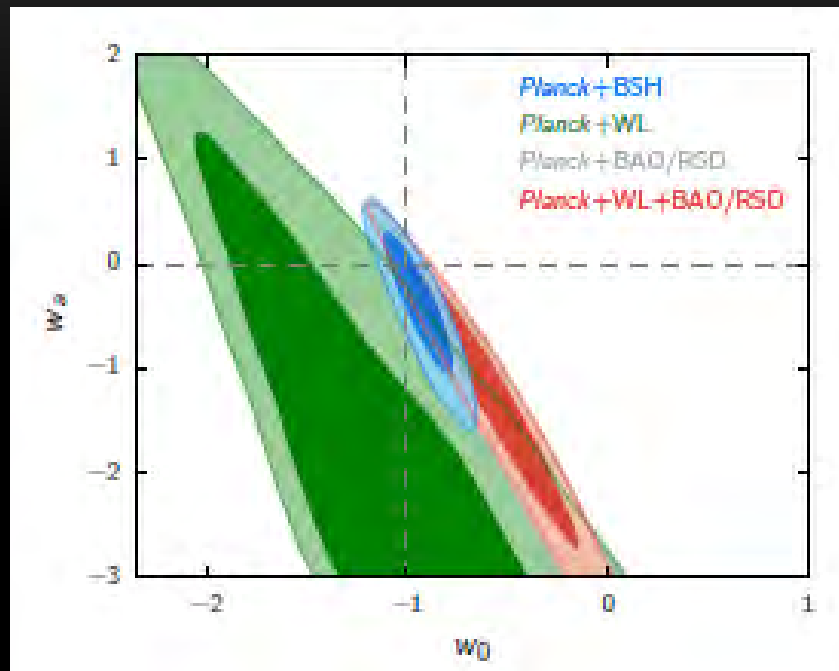
(**SN Ia**超新星爆発, **LSS**(銀河分布), **CMB**宇宙背景輻射, etc...)

➤ ダークエネルギーは宇宙定数か

● ダークエネルギーの時間変化

$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

- 時間変化⇒ 修正重力理論、
拡張した物質場の導入
- 定数値⇒ 宇宙項の問題点



1. Smallness

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda m_{\text{pl}}^2}{8\pi} \approx 10^{-47} \text{ GeV}^4 \sim (10^{-3} \text{ eV})^4$$

$$\rho_\Lambda / \rho_r \simeq 10^{-55}$$

@electroweak

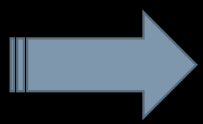
2. Coincidence

$$O(\rho_\Lambda^{(0)}) \sim O(\rho_{\text{DM}}^{(0)})$$

スカラーテンソル理論とは、 $f(g_{\mu\nu}, \phi)$

動機①: インフレーション(宇宙初期の加速期)

スカラー場(インフラトン) $\frac{1}{2} \left((\partial_t \phi)^2 - (\partial_i \phi)^2 \right) + V(\phi)$

 $X + V(\phi)$ $X = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$

➤ 運動項の拡張、一般化

$$K(\phi, X)$$

Kinetic driven
(**k-inflation**)

動機②: ダークエネルギー($z=1$ あたりからの緩やかな加速期)

➤ 重力(テンソル成分)の拡張、一般化

様々な修正重力理論は、基本的にはこの理論の枠組みに含まれる

系統的な扱いが可能となる一般的な理論

- インフレーションとダークエネルギーを統一的に扱える可能性

最も一般的なスカラーテンソル理論

$g_{\mu\nu}$ と ϕ で構成されるラグランジアン

- スカラー場は単数場 (複数場への拡張もある)
- 運動方程式は二階微分までを許す
- 時空次元は4次元

HORNDESKI THEORY (1974)

Quintessence, Brans-Dicke, $f(R)$, DGP, K-essence, Kinetic Gravity Braiding, Galileonなどの多くのモデルが含まれる。

一般に高階EOMを与える理論には、ゴースト(不安定な自由度)が出てくる

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & G_2(\phi, X) - G_3(\phi, X)\Box\phi \\ & + G_4(\phi, X)R + G_{4X} [(\Box\phi)^2 - (\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2] \\ & + G_5(\phi, X)G^{\mu\nu}\nabla_\mu\nabla_\nu\phi - \frac{1}{6}G_{5X} [(\Box\phi)^3 - 3\Box\phi(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2 + 2(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^3]\end{aligned}$$

修正重力理論

宇宙項を導入せずに、IR (低エネルギー) 側で加速膨張解を与えるモデル

- Massive Gravity
- $f(R)$ gravity
- DGP brane
- Horava gravity

有効的には、スカラー場の自由度が増え、Horndeskiなどの**スカラーテンソル理論**に帰着できる

一般的には、GR拡張による効果で、**どこかにシワ寄せ**が出てきてしまう。

例えばGRが観測されている領域で再現されないなど。
これらを回避するために、**Screening機構**が知られている

□ Vainshtein mechanism — 非線形効果により回避

Massive Gravity

Graviton(重力子)に質量を持たせる
(ニュートリノにも質量があったように)

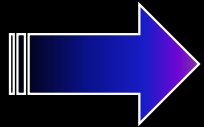
Fierz, Pauli(1939)

線形GR

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

$$\partial_\rho \partial^\rho h_{\mu\nu} = 0$$

massless KG方程式



$$(\partial_\rho \partial^\rho - m^2) h_{\mu\nu} = 0$$

De Rham Gabadadze, Tolley (2011)

$$S_{mass,L} = \frac{1}{16\pi G} \int dx^4 \left[-\frac{1}{4} m^2 (h_{\mu\nu} h^{\mu\nu} - h^2) \right]$$

- しかし質量を小さくしてもGRに一致しない問題があり、非線形項の導入
- ゴーストの問題なども... Ghost free massive gravity

Horava-Lifshitz gravity (2009)

$[G_N] = -2$ in mass units

重力の量子化の困難

$$k \ll 1$$

Graviton の propagator

$$\frac{1}{k^2}$$

UVでの発散

Lifshitz point

$$x \rightarrow bx \quad t \rightarrow b^z t$$

$$[x] = -1 \quad [t] = -z$$

$$\frac{1}{k^2 - G_N k^{2z}}$$

$$z = 3$$

$$[G_N] = z - (D-1)$$

4次元でくりこみ可能
(power counting)

GRの(3+1)分解

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left(R^{(3)} + K_{ij}^2 - K^2 \right)$$

gravitonの運動項

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left(R^{(3)} + K_{ij}^2 - \lambda K^2 \right)$$

IR: $z=1$ (GR)

UV: $z=3$ (量子化)

これらも3+1の形では、スカラーテンソル理論に帰着

最も一般的なスカラーテンソル理論における重力波

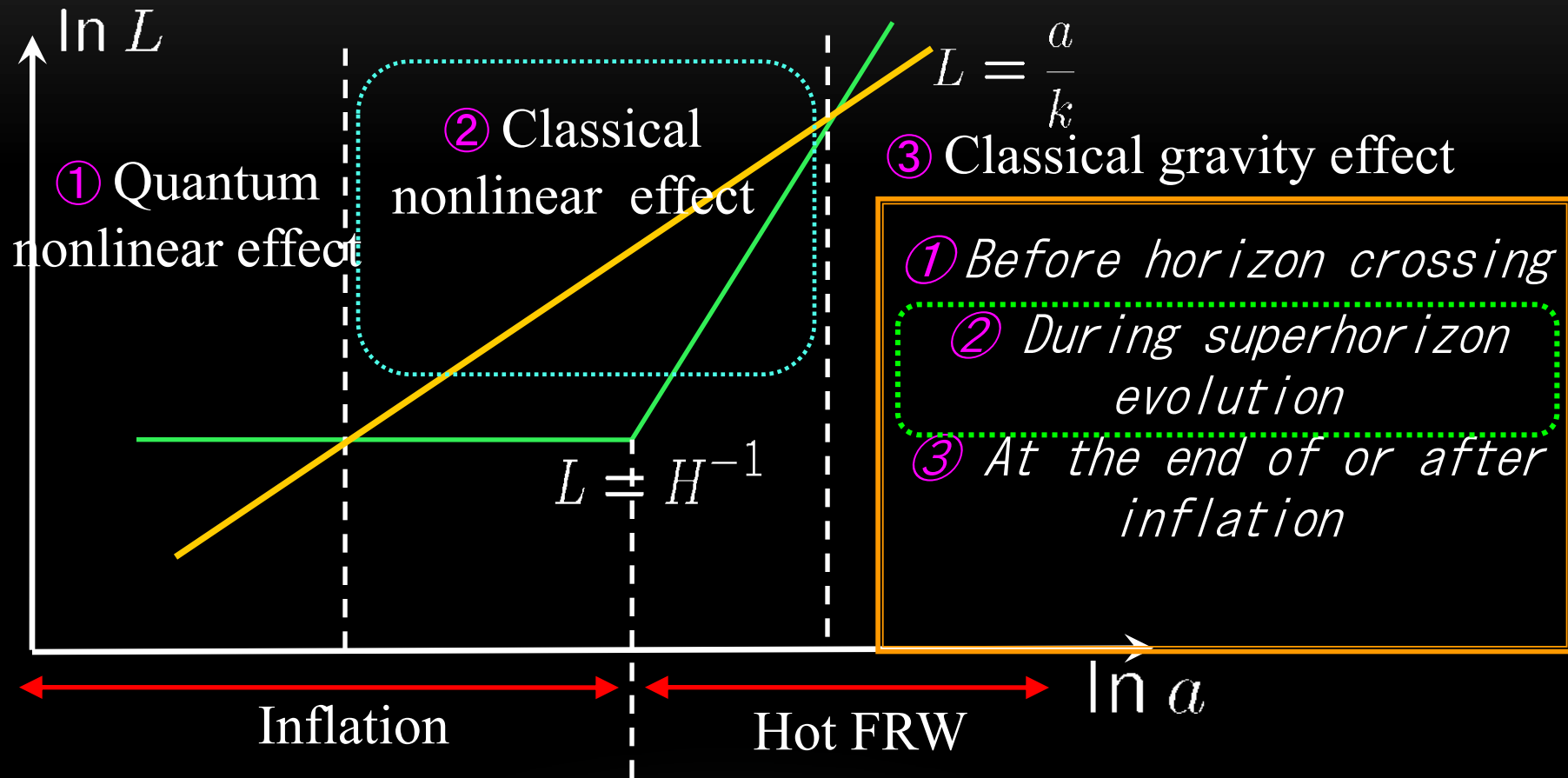
➤ YT, arXiv:180407516

「Gradient expansion formalism for nonlinear superhorizon perturbations」

➤ YT and T.Kobayashi(立教), in prep

Gradient expansionを用いて、宇宙の地平線を超える
長波長揺らぎの非線形進化を扱う一般的定式化

◆ Three stages for generating nonlinearity



初期宇宙で生成される揺らぎ(密度,重力波)が長波長領域に入っ
たときの非線形進化を扱える

原始密度揺らぎ
(スカラーモード)

三点結合
($S \times S \times T$)
($S \times T \times T$)

原始重力波揺らぎ
(テンソルモード)

非線形共進化

三点相関, 高次相関
($S \times S \times S$)

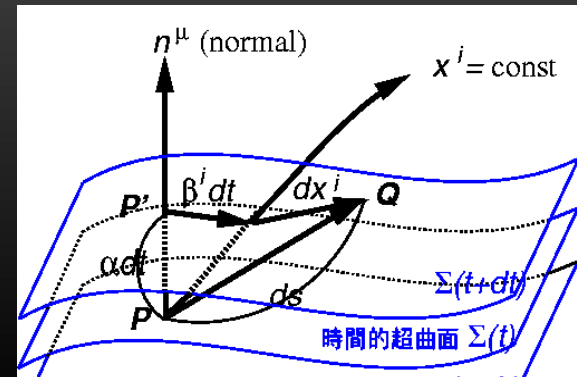
三点相関, 高次相関
($T \times T \times T$)

- ① インフラトンの背景物理となる初期宇宙モデル
- ② ダークエネルギーと修正重力理論

● ADM decomposition

Lapse Shift $n_\mu = (-\alpha, 0, 0, 0)$

$$ds^2 = (-\alpha^2 + \beta_k \beta^k) dt^2 + 2\beta_i dx^i dt + g_{ij} dx^i dx^j$$



➤ Gauge degree of freedom

EOM: Two constraint equations ① Hamiltonian & Momentum constraint eqs

➤ EOM for g_{ij} : dynamical equations

In order to express as a set of first-order diff eqs,

Introduce the extrinsic curvature

② Evolution eqs for K_{ij}, g_{ij}

$$K_{ij} = \frac{1}{2\alpha} (\partial_t g_{ij} - \nabla_i \beta_j - \nabla_j \beta_i)$$

Further decompose,

□ Spatial metric

□ Extrinsic curvature

$$g_{ij} = a^2(t) e^{2\zeta} \gamma_{ij}$$

$$K_{ij} = a^2(t) e^{2\zeta} \left(\frac{1}{3} K \gamma_{ij} + A_{ij} \right)$$

$$\det(\gamma_{ij}) = 1$$

Traceless part

② Four Evolution eqs

● *Nonlinear perturbations on superhorizon scales*

- *Spatial gradient approach* : $\epsilon = 1/(HL)$ Salopek & Bond (90)
- Spatial derivatives are small compared to time derivative
- **Expand** Einstein eqs in terms of small parameter ϵ , and can **solve** them for nonlinear perturbations iteratively

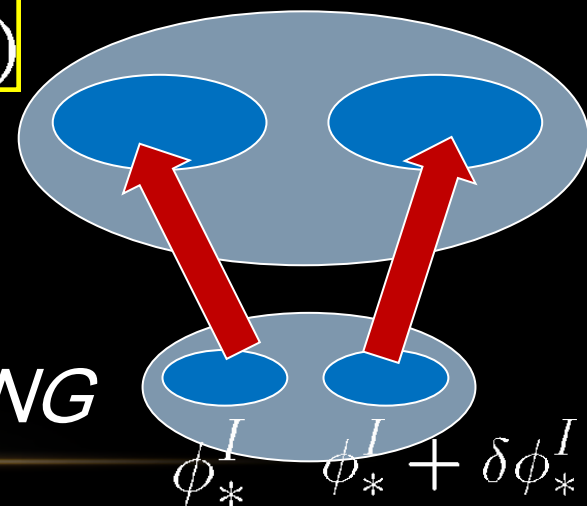
◆ **δN formalism** (*Separated universe*)

(Starobinsky 85,
Nambu & Taruya 96,
Sasaki & Stewart 96)

$$\zeta(t, \mathbf{x}) = \delta N \equiv N(t, \mathbf{x}) - N_0(t) \quad O(\epsilon^0)$$

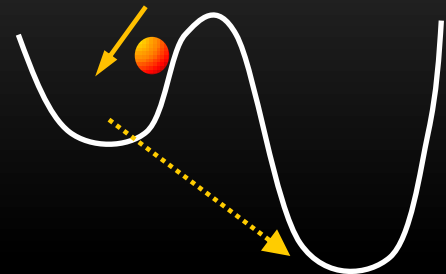
Curvature perturbation = Fluctuations of the local e-folding number

◇ *Powerful tool for the estimation of NG*



◆ *Temporary violating of slow-roll condition*

- e.g. Double inflation, False vacuum inflation
(**Multi-field** inflation always shows)



◆ *δN formalism*

$$O(\epsilon^0)$$

$$\zeta(t, \mathbf{x}) = \text{const}$$

- Ignore the **decaying mode** of curvature perturbation

◆ *Beyond δN formalism*

$$O(\epsilon^2)$$

$$\zeta(t, \mathbf{x}) \neq \text{const}$$

- **Decaying modes** cannot be neglected in this case
- **Enhancement** of curvature perturbation in the **linear theory**
[Seto et al (01), Leach et al (01)]

- δN では保存量であったが、さらに時間変化が加わる。
- γ_{ij} からもスカラーモードが非線形曲率揺らぎとして加わる。

$$R^{NL} = \zeta + \chi/3$$

◆ *Beyond δN -formalism for general scalar-tensor (Horndeski) theory*

YT 2018

- Single scalar field as *Generalized Galileon*
- the most general ensuring *second-order* EOM
- *Beyond GR* (Modified gravity)

● ADM decomposition & Gradient expansion

Spatial gauge

$$\beta^i = 0.$$

Comoving (Uniform φ) gauge Make the system Simple

- 勾配展開して、展開2次オーダーでの一般解を導出。
- **重力波成分が従う一本の発展方程式**にまとめる。

$$\gamma_{ij}$$

非線形曲率揺らぎの変数の一部としても、重力波成分としても重要

一方、テンソル揺らぎ(重力波)

● Nonlinear theory in $\mathcal{O}(\epsilon^2)$

Nonlinear interaction via

$(\gamma_{ij} \times \gamma_{ij}), (\gamma_{ij} \times \zeta), (\zeta \times \zeta), \dots, (\zeta \times \zeta \times \gamma_{ij}), \text{etc.}$

$$\frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial \tau^2} + 2 \frac{\partial_\tau z}{z} \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial \tau} + 2c_T^2 \mathcal{F}_{ij}^{(2)}[\gamma] = \mathcal{O}(\epsilon^4).$$



$$z := a\sqrt{\Xi} = a\sqrt{-(A_4 + 3A_5 H/\alpha)}$$

● Linear theory in GR

$$\frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial \tau^2} + 2\mathcal{H} \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial \tau} - \Delta \gamma_{ij} = 0.$$

$$c_T^2 = \frac{\mathcal{F}_B}{\Xi} = \frac{2B_4\alpha + \partial_t B_5}{-(2A_4\alpha + 6HA_5)},$$

GR limit

$$c_T = 1 \text{ with } A_4 = -B_4 = -1/2$$

- 重力波速度の光速からのずれ
- 重力波のNon-Gaussianityの予言

$$|c_{\text{GW}}/c - 1| < \mathcal{O}(10^{-15})$$

SUMMARY

- 一般的な単数のスカラーテンソル理論 = Horndeski を紹介。インフレーションにおいても、修正重力理論とダークエネルギーにおいても重要。
- 高階微分によるゴーストを含まない、運動方程式が二階微分までの最も一般的なスカラーテンソル理論
- インフラトンの運動項の拡張 (k-inflation, KGB, Galileon) にも対応。
- 様々な修正重力理論 (Massive, $f(R)$, DGP, Horava) を有効的に含む理論
- 多種の修正重力モデルは有効的には Horndeski で記述可能で、系統的にモデル選別を行う上で重要。
- Our formalism の紹介 長波長揺らぎ (密度、重力波) の非線形共進化を扱う一般的定式化
- 重力波成分が従う一本の非線形進化の発展方程式を導出。
- とくに重力波の伝播速度が光速からずれる効果により、修正重力理論を観測から選別する可能性を示した。
- (*Future*) 観測からの制限、伝播速度、重力波の振幅、三点相関 etc