

宇宙論と原始重力波

高水 裕一

CCS (計算科学研究センター)

Jun 2019 @ 筑波宇宙史センター全体会議

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

$z = 1100$

Big Bang

Universe Age

Cosmic Dark Ages
380,000-years

First Stars
< 180 million years

Black Holes and Accretion disks
250 million years

Reionization

Modern Galaxies

Now
13.8 billion years

$z = 7 - 10$
Reionization

宇宙背景放射の観測で**宇宙史138億年**の
だいたいの進化は分かっている

背景ニュートリノもCMB
より古い時代を見ることが
できる

重力波：原理的には、CMBより古い宇宙の姿が「みえる」

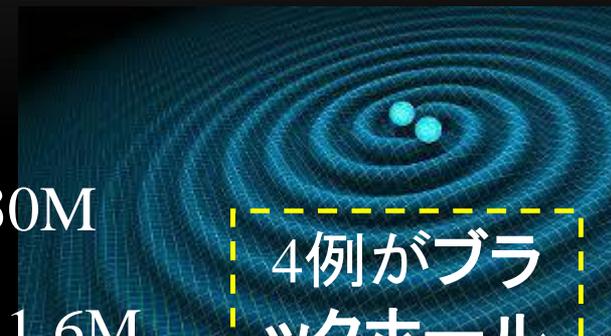
◆重力波観測



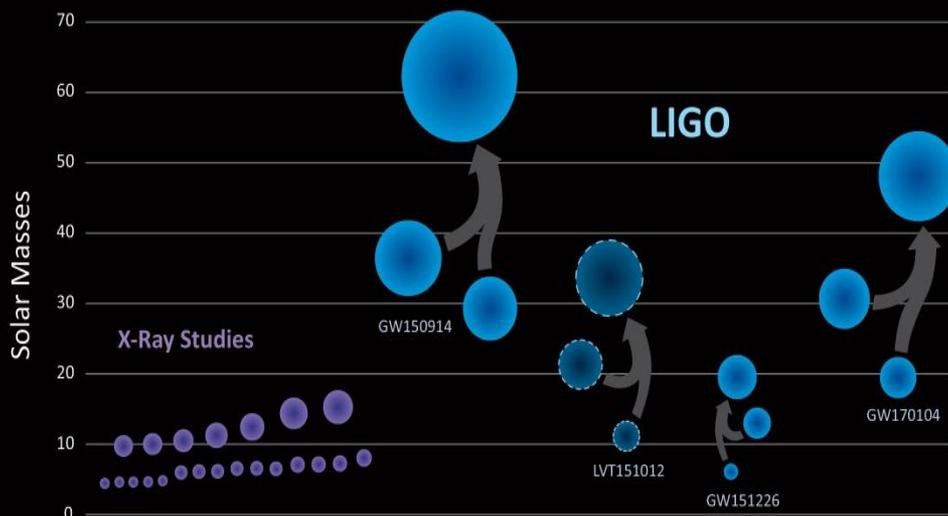
ノーベル賞(2017年)

2016年の初観測以来、すでに 5 例 観測

観測事例	公表日	距離 Mpc	発生源
GW150914	2016-2	410 (13億光年)	35M vs 30M
GW170817	2017-10	40	1.3M vs 1.6M (中性子星)



4例が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

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



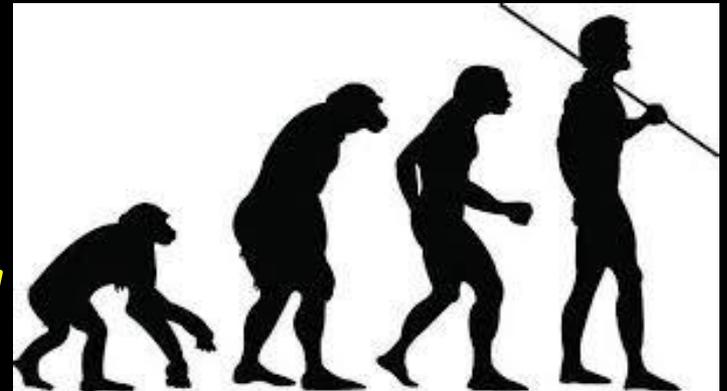
観測：宇宙背景輻射(CMB), 銀河分布, そして
将来的な宇宙背景重力波

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



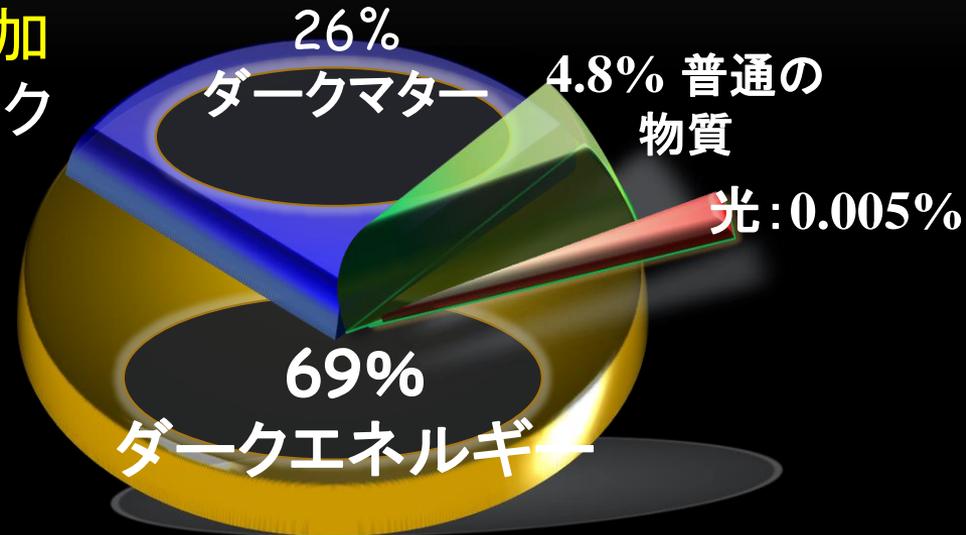
- **背景重力波**: 重力波は相互作用が低く、電磁波でみれる最古の宇宙地図(CMB)よりも、さらに昔の情報を直接得ることができる可能性

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？**

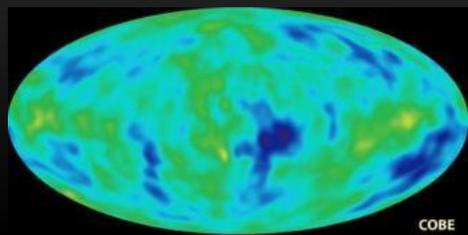
構造形成(銀河、銀河団)の主演

□ **インフレーションとは？**

構造の種の起源

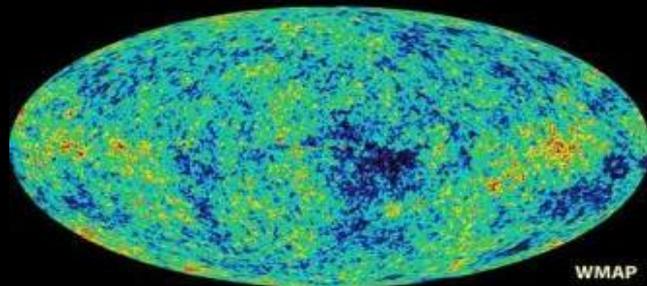
最古の宇宙地図(CMB)の詳細観測

History



COBE

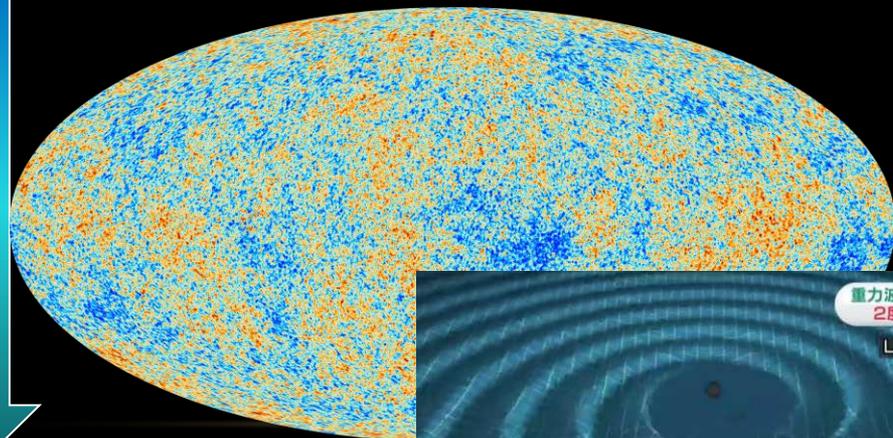
• COBE 衛星(92)



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)

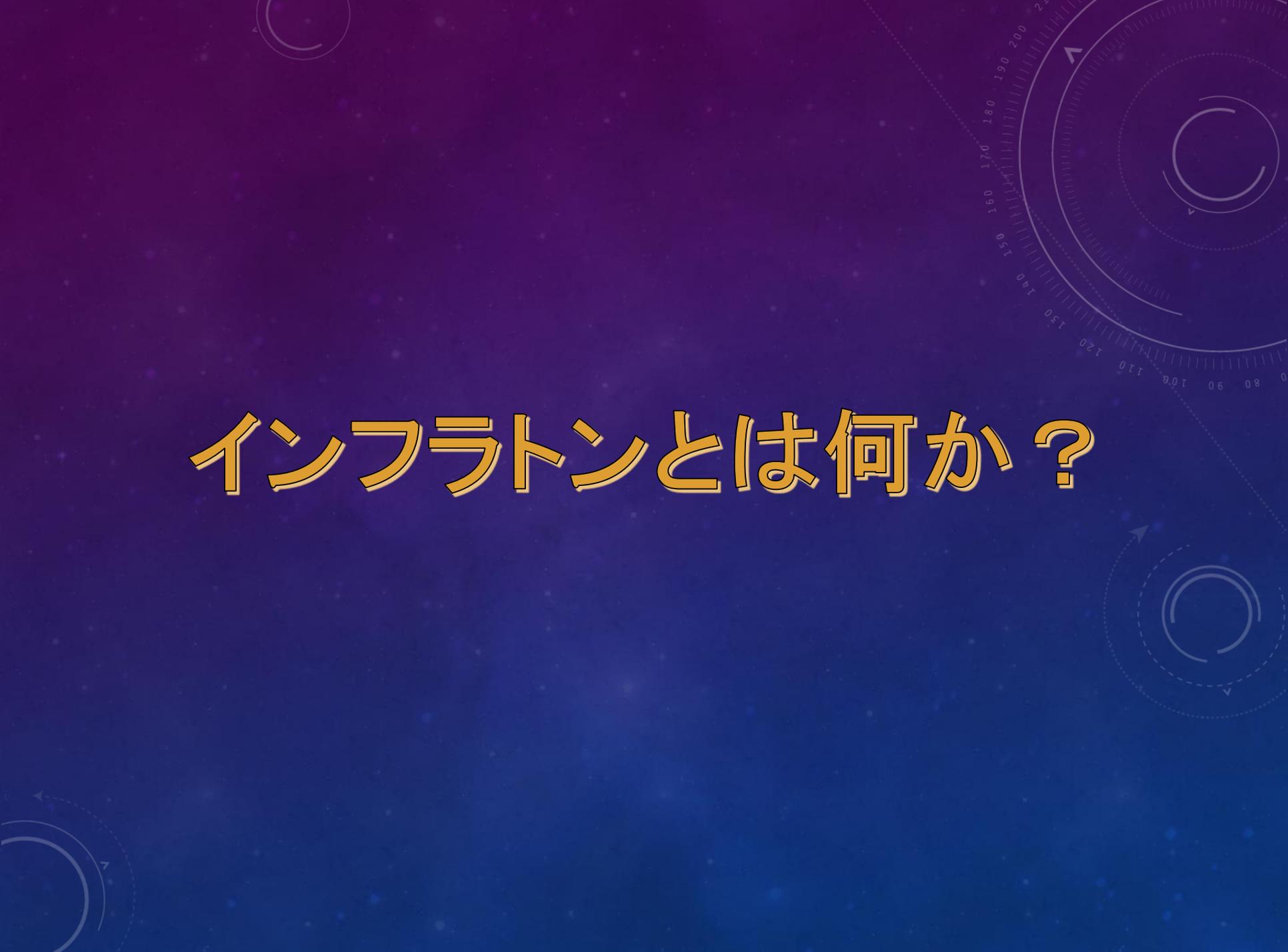
• LIGO(2016)

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

インフラトンとは何か？

The background features a dark blue gradient with a subtle pattern of white stars and faint technical diagrams. On the right side, there is a large circular diagram with concentric rings and numerical markings (0, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220) around its perimeter. In the bottom right corner, there is a smaller circular diagram with dashed lines and arrows indicating a clockwise cycle. In the bottom left corner, there is another circular diagram with solid lines and arrows indicating a clockwise cycle.

- インフレーションモデルの選別には、インフラトンというスカラー場の原始揺らぎが重要
- スカラー:「原始密度揺らぎ」とテンソル:「原始重力波」

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？)

インフラトンの候補

- 唯一のスカラー場**ヒッグス**ではインフラトンの役割は厳しい。。
- SUSYを仮定したときのパートナー粒子
- 余剰次元のコンパクト化に伴うディラトン場
- ブレインの運動の自由度 etc

どれも決定打に欠ける。。

➤ Key observation for searching Inflation models

• r-ns plane

$$P_{\zeta} \propto k^{n_s - 1} \quad r = P_{\zeta} / P_T$$

密度揺らぎのスペクトル 重力波と密度揺らぎの振幅比

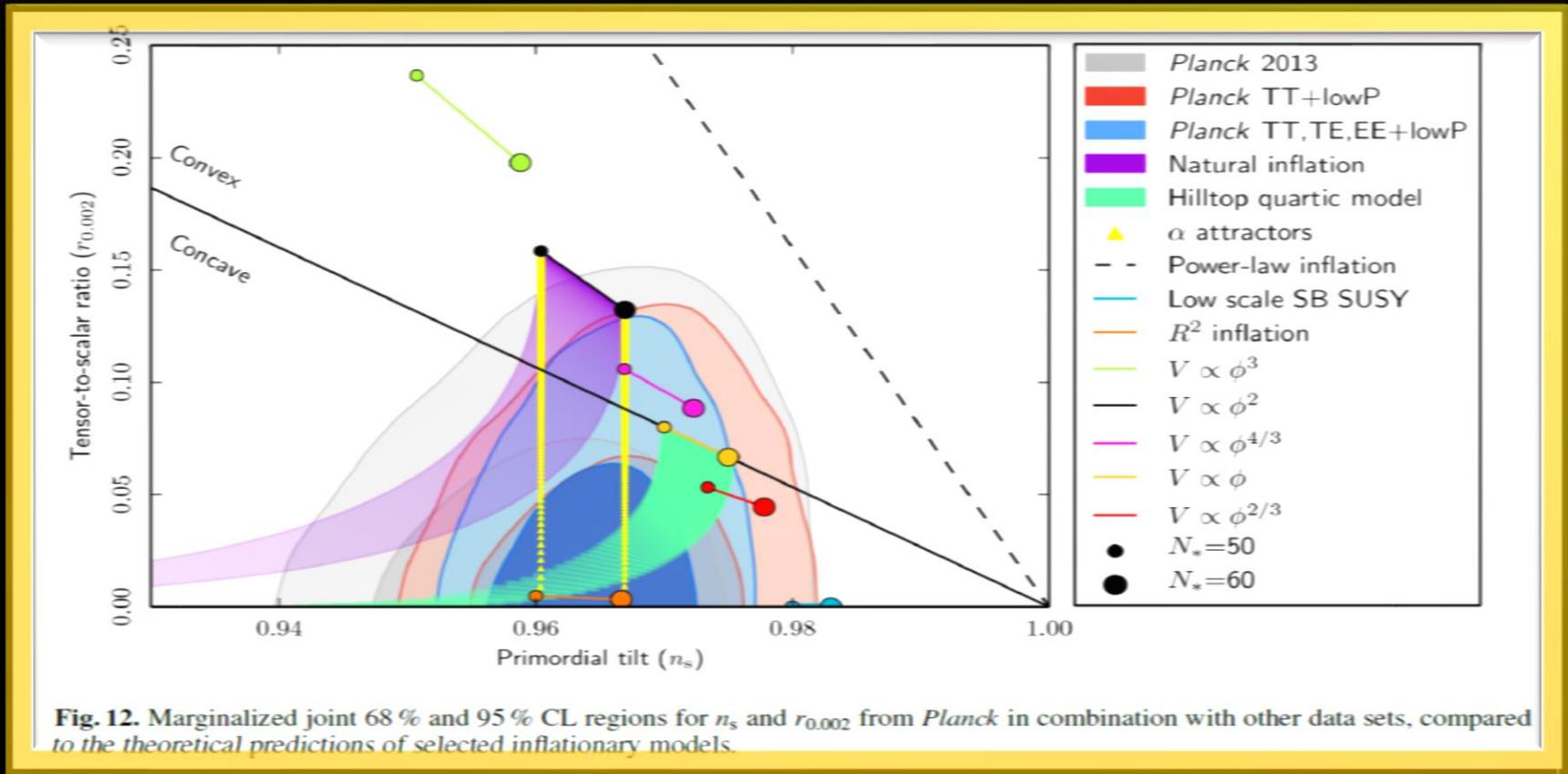
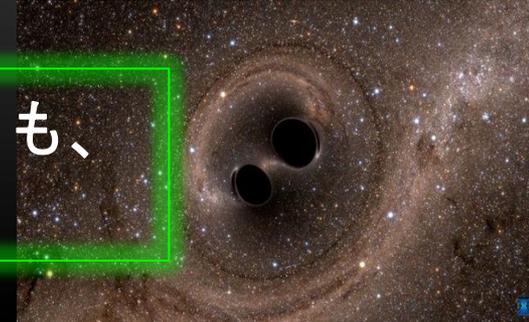


Fig. 12. Marginalized joint 68 % and 95 % CL regions for n_s and $r_{0.002}$ from *Planck* in combination with other data sets, compared to the theoretical predictions of selected inflationary models.

「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!**

- **今後の将来観測に期待!**

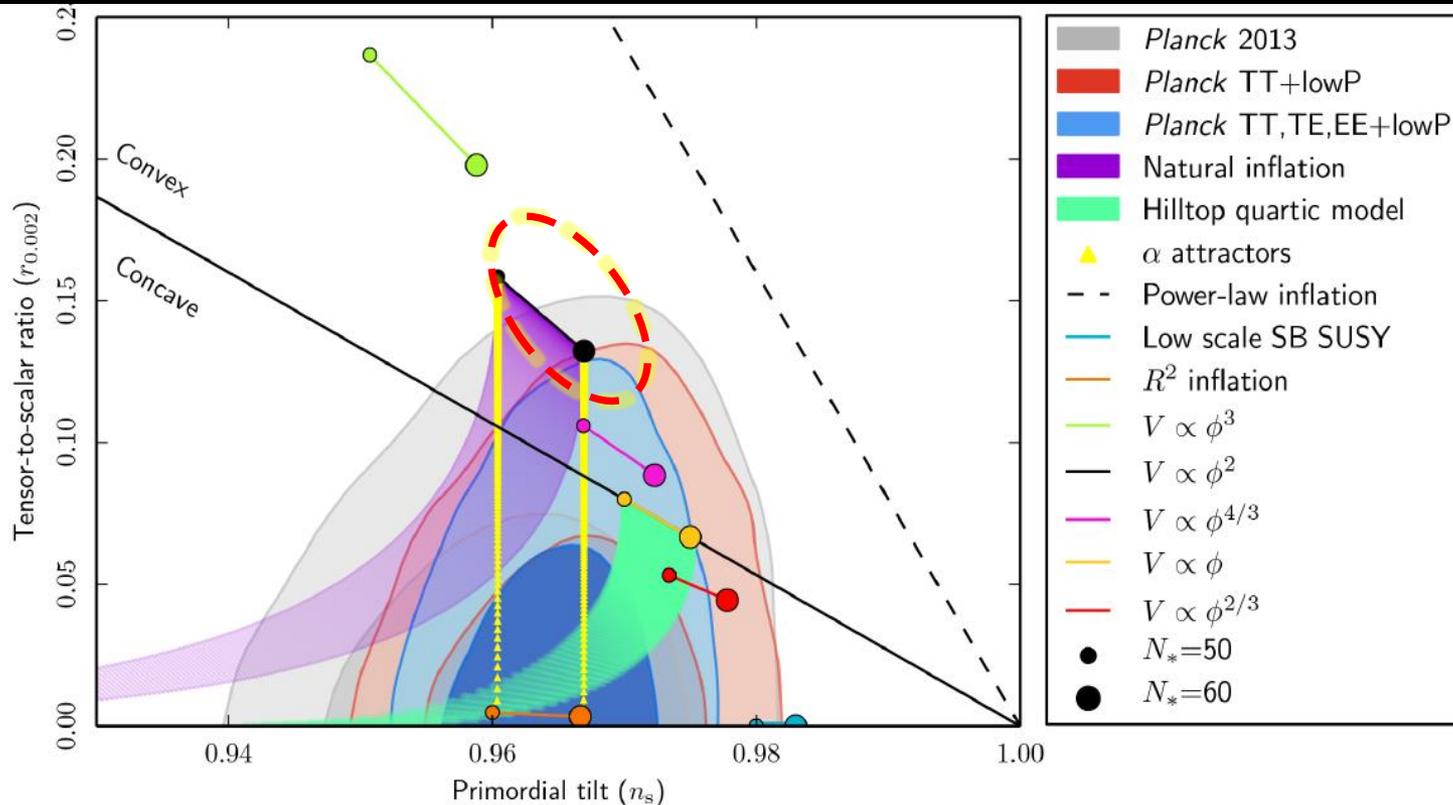


◆ PLANCK RESULT (Feb. 2015)

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

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

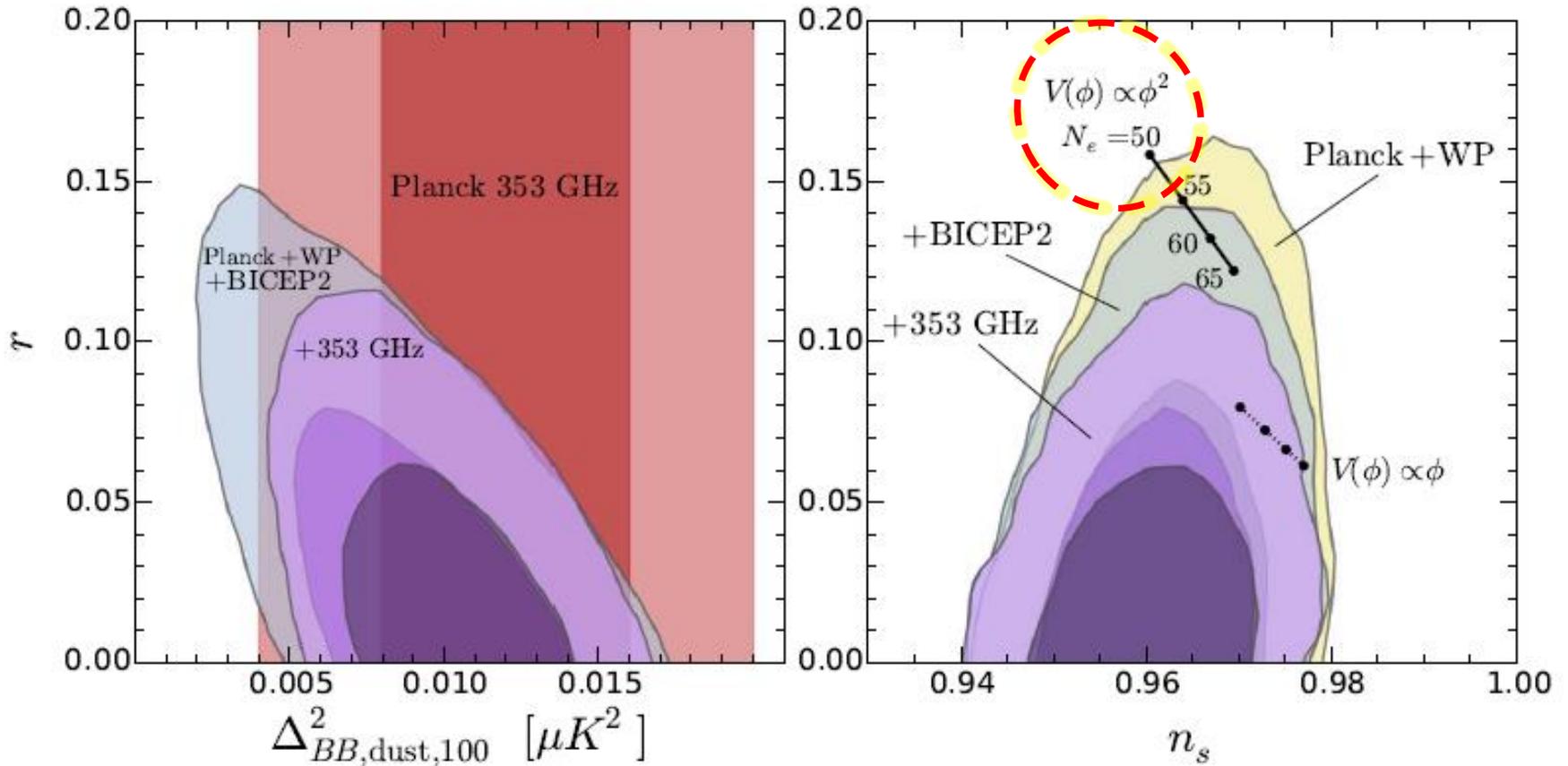
BICEP2 resultとは矛盾していたが、ダストの放射として解決された



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

すでにシンプル
な質量項は棄
却されている

◆ Constraints on 2D plane in parameter space



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

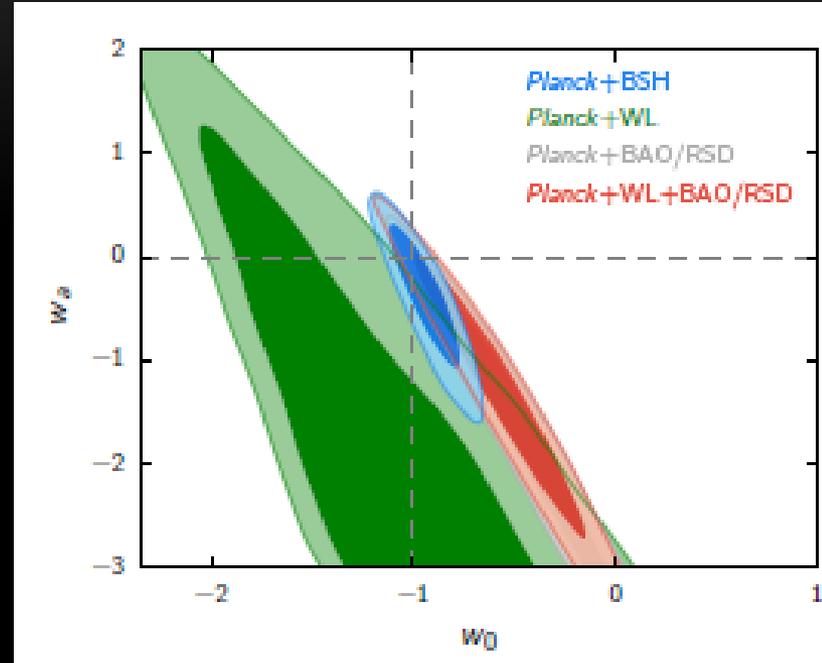
ダークエネルギーとは何か？

➤ 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

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

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

@electroweak

2. Coincidence

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

修正重力理論

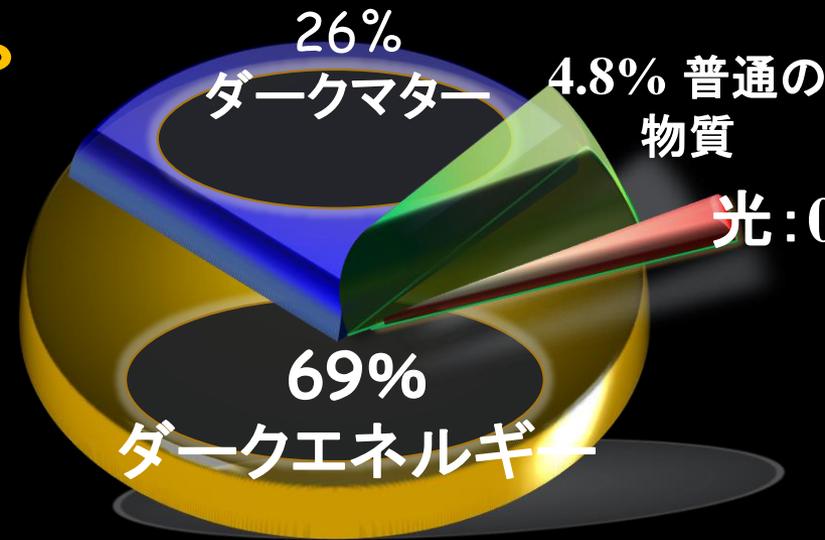
現在の宇宙を加速膨張させている正体
は何か？

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

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

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

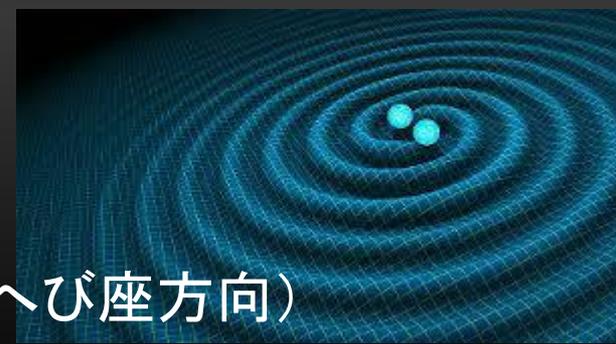
有効的には、スカラー場の自由度が増え、Horndeskiなどのスカラーテンソル理論に帰着できる

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

◆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)

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 (複素場への拡張もある)
- 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

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

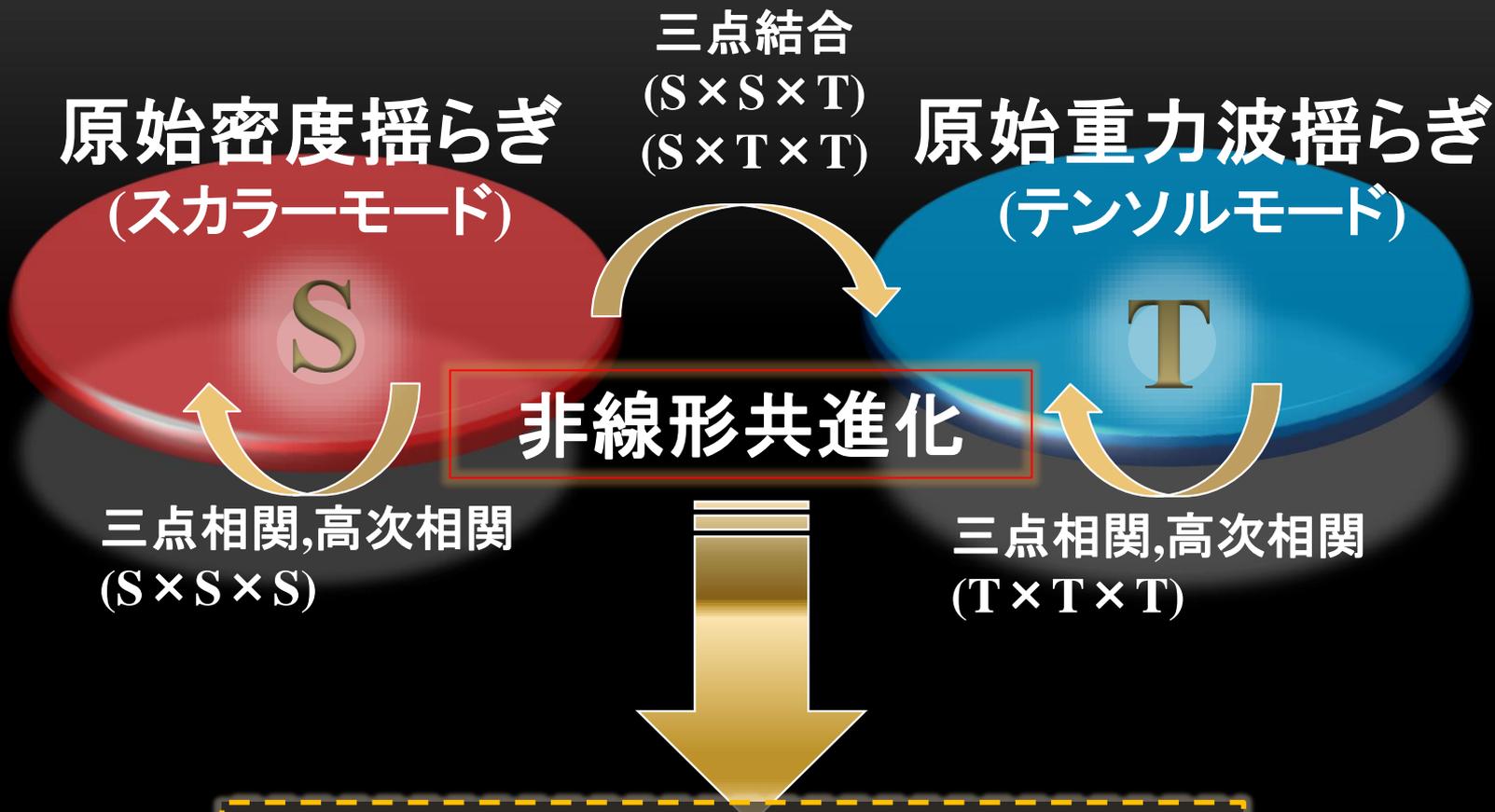
最も一般的なスカラーテンソル理論における原始重力波の予言

➤ 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



- 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

ダークマターとは何か？

銀河とダークマター

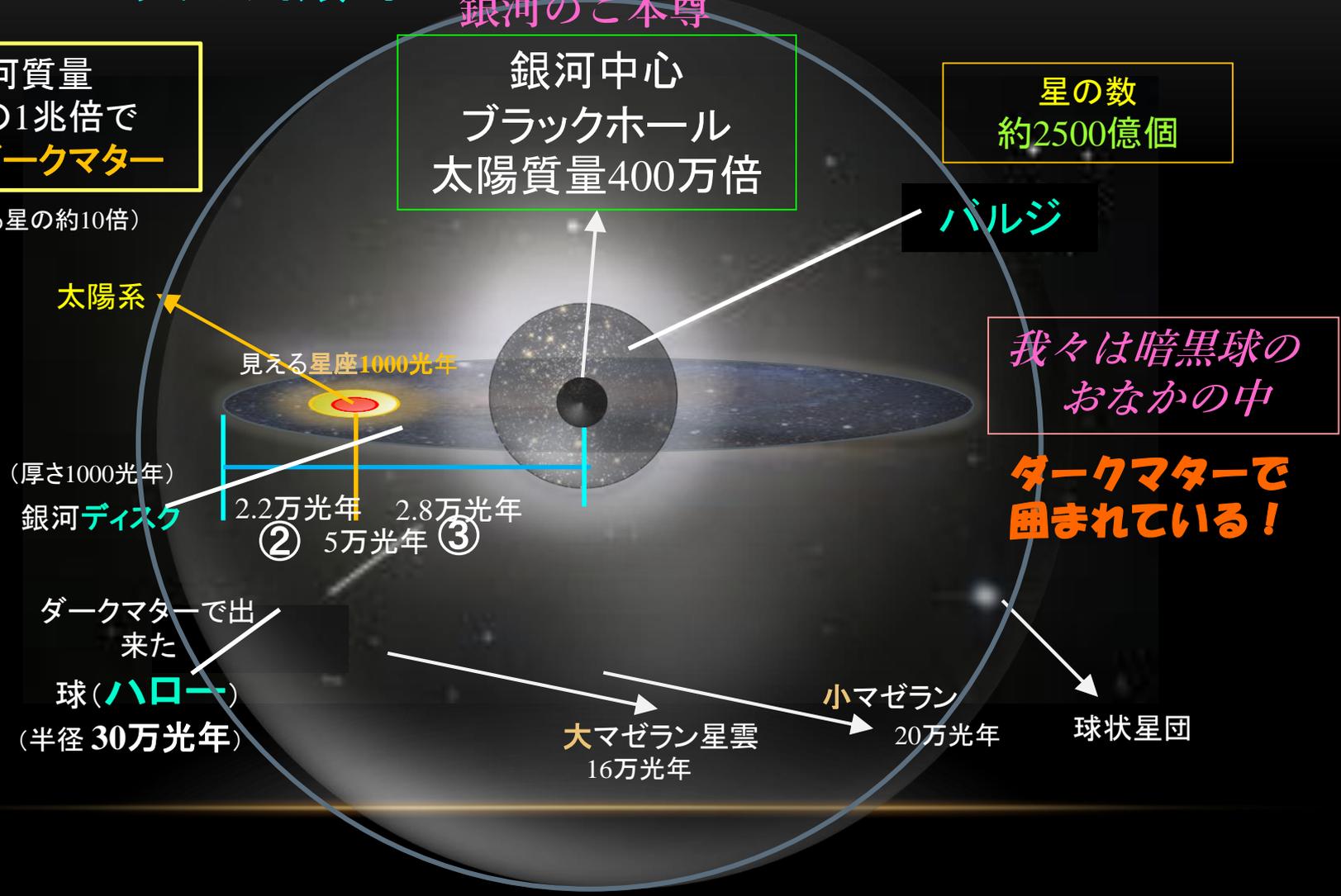
天の川銀河

銀河質量
太陽の1兆倍で
9割がダークマター

(見えている星の約10倍)

銀河のご本尊
銀河中心
ブラックホール
太陽質量400万倍

星の数
約2500億個



ダークマターとは何か？

- 銀河などの宇宙の大規模構造形成のシミュレーションに欠かせない粒子 **でも正体不明**
- 重力のみが作用する 構造形成 重力レンズetc
- ダークマターなしの修正重力理論は**現在かなり観測的に劣勢**
- 銀河全体を覆いつくす**ダークハロー**という天体
- 生命や星の起源にとって**なくてはならない**

縁の下の力持ち

現在のモデル候補

- 性質：冷たい(速度分散小さい) 自己相互作用も小さい
- 標準理論を越えた粒子**WIMP**
- **SUSY**粒子 加速器で未発見 **100TeV以上の物理？**
- インフラトンの崩壊で生成された新粒子？ インフラトンへの足掛かり
- ブラックホールもある種ダークマターの一部 **でも天体起源では限界**

ダークマター: ミリチャージ粒子モデル



[1] Nature 555 67-70(2018)

Bowman, Rogers et al

➤ **21cm Signal from cosmic dawn**

[2] Nature 555 70-74 (2018)

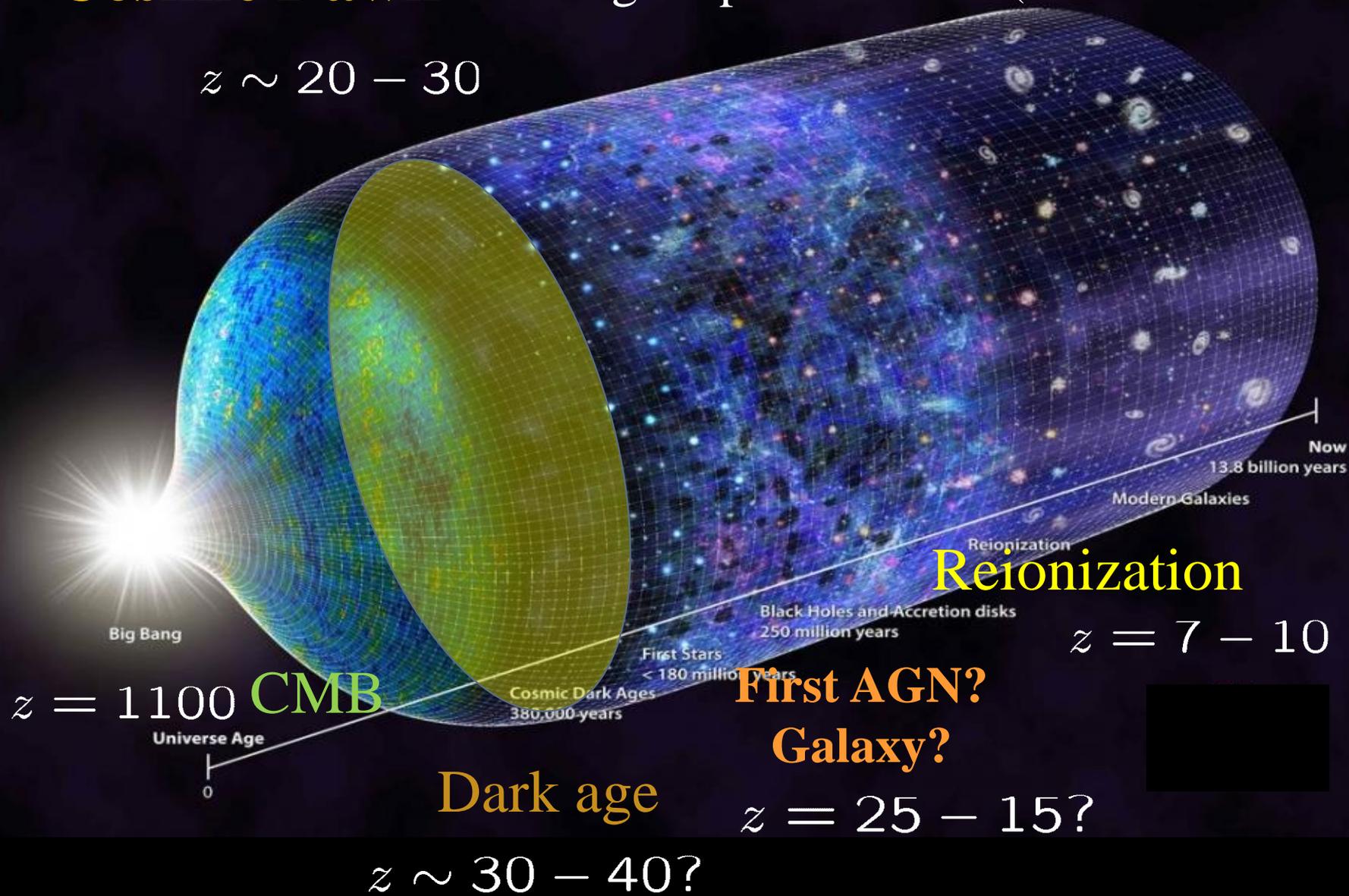
R. Barkana et al

(arXiv:1803.06698)

➤ **Also Hint at presence of Dark matter**

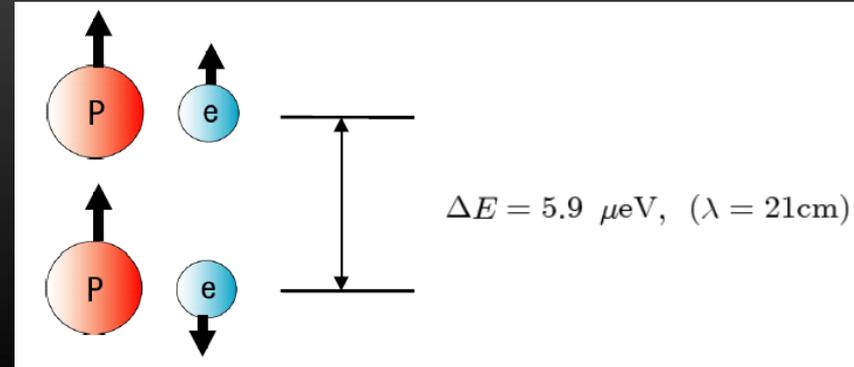
Cosmic Dawn First light up the Universe (First Star **POP III**)

$z \sim 20 - 30$



- **21 cm transition**

Hyper fine structure of Neutral hydrogen HI

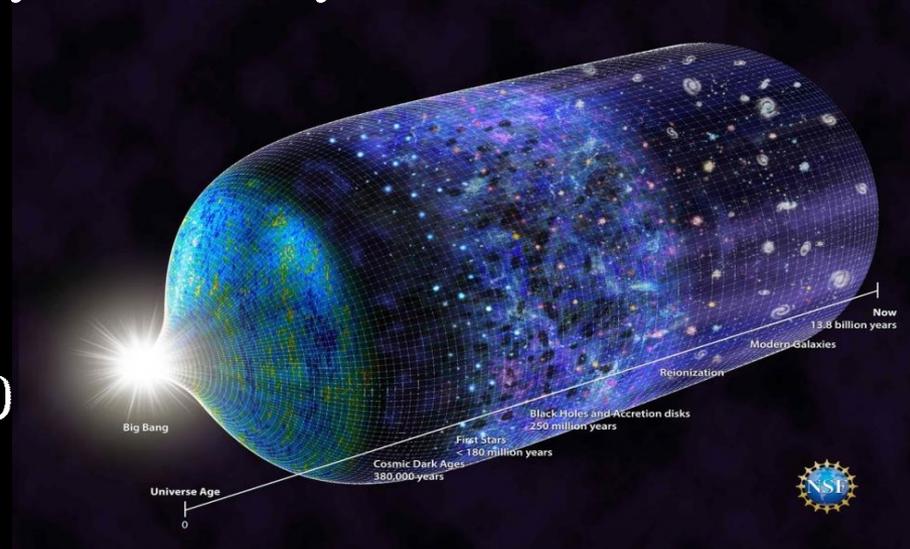


Good for cosmic reionization, X-ray/UV history etc

Cosmic Dawn

Light from the first star is so faint and good way to use 21cm line signal once stellar **Lyman- α** photons via coupling of Wouthuysen-Field effect $z \sim 20$

Wouthuysen-Field effect



$$21 \times (1 + z) \text{ cm} \quad 1420 \times (1 + z)^{-1} \text{ MHz}$$

$$T_{21} = 26.8 x_{\text{HI}} \frac{\rho_{\text{g}}}{\bar{\rho}_{\text{g}}} \left(\frac{\Omega_{\text{b}} h}{0.0327} \right) \left(\frac{\Omega_{\text{m}}}{0.307} \right)^{-1/2} \left(\frac{1 + z}{10} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{\text{S}} - T_{\text{CMB}}}{T_{\text{S}}} \right) \text{ mK}$$

Mass fraction of neutral hydrogen

Spin temp

[1] Nature 555 67-70(2018)
Bowman team (Arizona state University)

$$T_{21} = -500 \pm 200 \text{ mK}$$

Peak absorption of 21 cm signal at $\nu \sim 78 \text{ MHz}$

$$z = 17.2$$

13.8 billion year : the AGE of
the Universe

13.6 billion years ago (Just 180 million years after Big Bang !)

$z = 11.1$ GN-z11: the most far Galaxy
(13.4 billion years ago)



EDGES (Experiment to Detect the
Global Epoch of Reionization
Signature)

Australia

'This is the first time we've seen any signal from this early in the Universe, aside from **the afterglow of the Big Bang**'

Two years checking 'After two years, we passed all of these tests and couldn't find any alternative explanation'



The latest onset of the cosmic dawn to **180 million years**, but the **second milestone** disappeared (X-rays from the **deaths of the first stars** around 250 million years after Big Bang)

Primordial star: Important not only for Dawn, but also for heavier elements (C,O)

$$T_{21} = -500 \pm 200 mK$$

Implies excess cooling of the cosmic gas !

$$T_{21} = -209 mK$$
 Standard Astrophysics

Two possibilities

- More radiation than expected in the cosmic dawn
- Gas was **Cooler** than predicted

[2] R.Barkana et al. Second related paper in Nature (arXiv:1803.06698)

'The gas was **cooled by something**, that is **Dark matter**.'

The signal can potentially yield not only a discovery of the first stars, but also **a direct detection of dark matter** if it scatters with baryons

Consider the **weak non-gravitational interaction**

Then baryon becomes cooler and dark matter is also **highly non-relativistic** rather cold

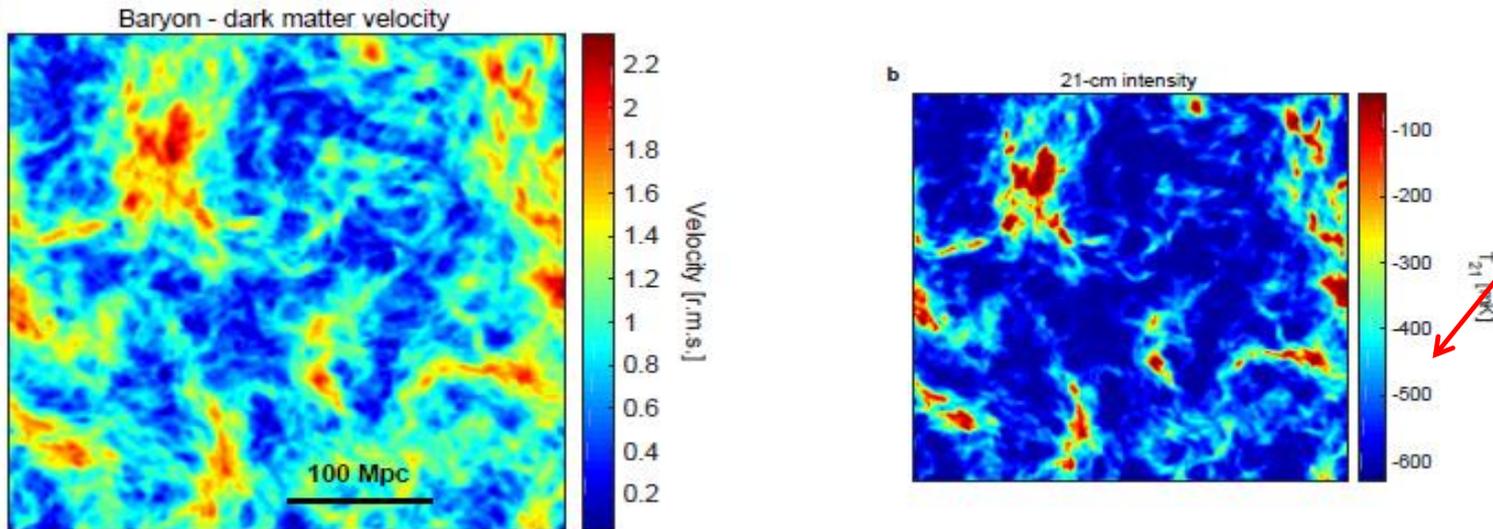
Baryon-DM scattering

The case of DM millicharged
Via Rutherford/Coulomb scattering

$$\sigma(v) = \sigma_c \left(\frac{v}{c}\right)^{-4} = \sigma_1 \left(\frac{v}{1 \text{ km/s}}\right)^{-4}$$

Vary with Temperature and Relative velocity between baryon and DM

Cosmic dawn : Unique physical conditions that can probe a presence of such **b-DM scattering**



Excess cooler
-500mK

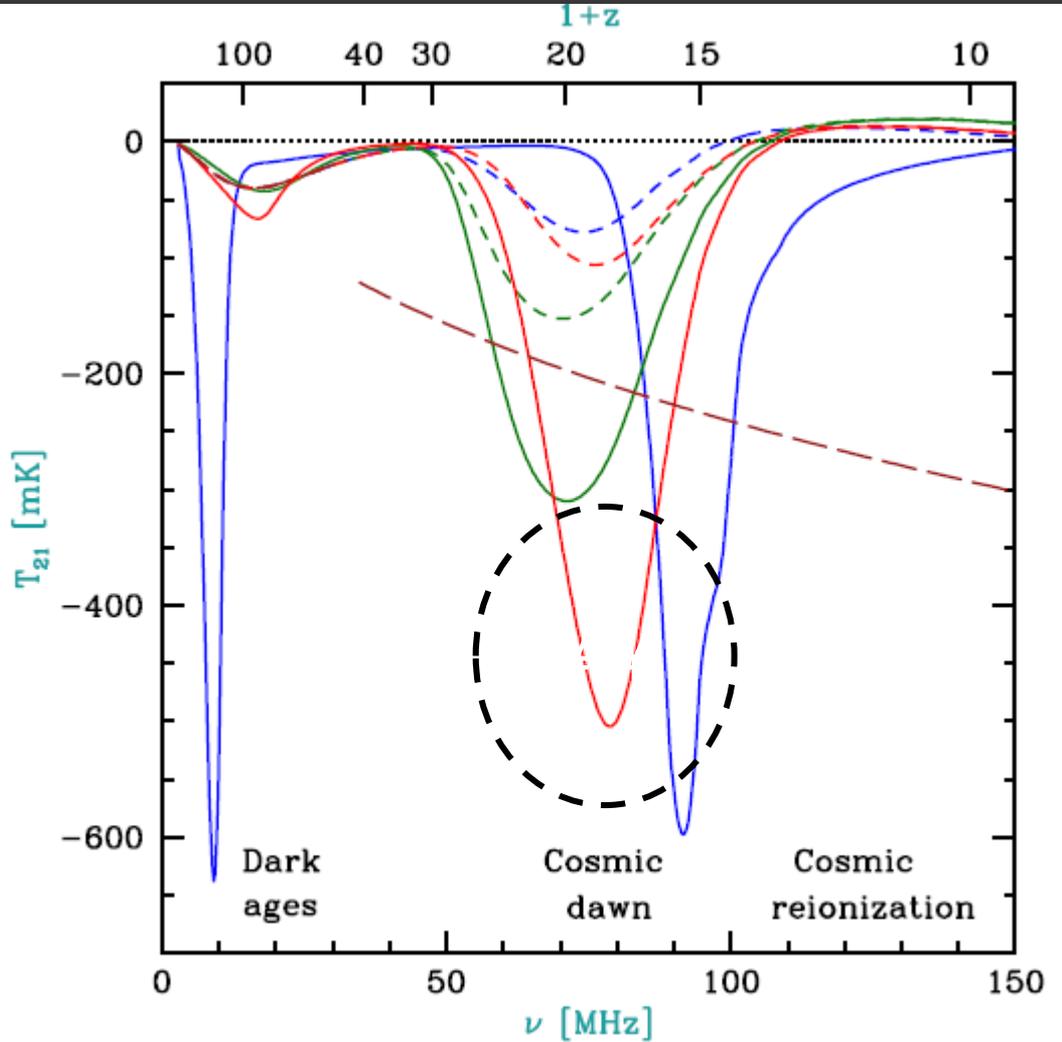
Star formation
only in halo
Atomic cooling

$$f_* = 1.58\%$$

lengths comoving) on a side. We consider $z = 17$ ($\nu = 78.9$ MHz) at which this model (with $\sigma_1 = 8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ and DM particle mass $m_\chi = 0.3 \text{ GeV}$) reaches its maximum global 21-cm

Relative b-DM velocity affect 21 cm intensity (*Looks Cooler*)

FIG2 Global 21cm signal in models with b-DM scattering



$\nu < 33 MHz$

Unlikely to be observed in the near future observation

$\nu \sim 50 MHz$

Purely cosmological signal would disappear after the dark ages

Standard estimate **Red dash**
(Xray, Lyman α , ionized photo)

Ly α : 10 times higher **Green dash**
(More Radiation)

Xray : 4 times higher **Blue dash**

$f_* = 0.5\%$, star formation occurs in halos
molecular cooling,

$\sigma_1 = 8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ and DM particle mass $m_\chi = 0.3 \text{ GeV}$

Red solid

$\sigma_1 = 3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ and $m_\chi = 2 \text{ GeV}$

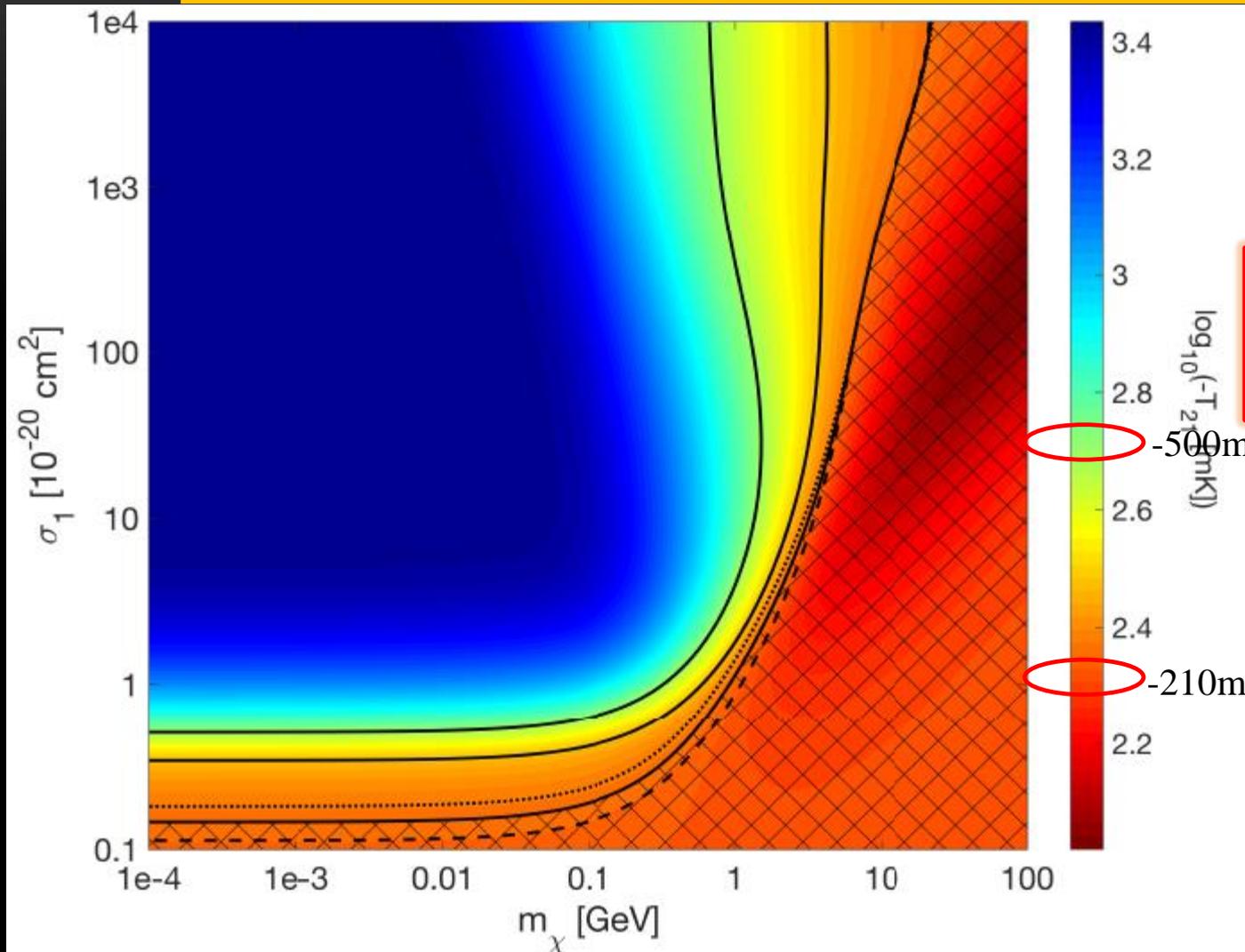
Green solid

$\sigma_1 = 1 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ and $m_\chi = 0.01 \text{ GeV}$

Blue solid

Can explain the strong absorption feature measured by the EDGES as -500 mK

FIG3: Constraints on DM properties using cosmic dawn



CERN has been motivated for Weakly interacting DM particles in the MeV-GeV mass range

$$\sigma > 3.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$$

$$\text{and } m < 3.5 \text{ GeV}$$

Unlikely to resolve the degeneracies among DM parameters and astrophysical parameters

$m \sim 3 \text{ keV}$
 Current limit on **warm** dark matter
 $v \sim 10 \text{ km/s}$

Lighter than a few GeV, much lighter than expected for WIMP, **No lower limit**

Cf) Ultralight scalar (Pulsar timing & GW) $m = 10^{-23} \text{ eV}$



SUMMARY

Two papers as
sequence in **Nature**

- **The 21cm signal** from Ly α shows a first discovery from the first star born at Cosmic Dawn **13.6 G years ago Z=17.2 !**
- The strongest absorption -500 mK @ $\nu=78$ MHz
- Excess cooler tells us to explore the **b-DM scattering**
- Accelerators motivated DM mass greater than GeV
- Cross section $\sigma > 3.6 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ and $m < 3.5 \text{ GeV}$
- DM is Highly non-relativistic and rather cold with $v=1 \text{ km/s}$
- Other global 21cm experiments: **SARAS** and **LEAD** provide upcoming 21cm fluctuation at **Cosmic Dawn**
- **SKA**(Square Kilometer Array) and **HERA**(Hydrogen Epoch of Reionization Array) corresponding **21cm power spectrum** : that provides far more information about the **b-DM relative velocity**
- Future: **Bullet clusterでの銀河衝突による違いを検証したい**

參考資料

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)

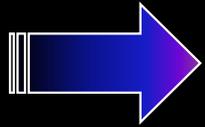
Fierz, Pauli(1939)

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

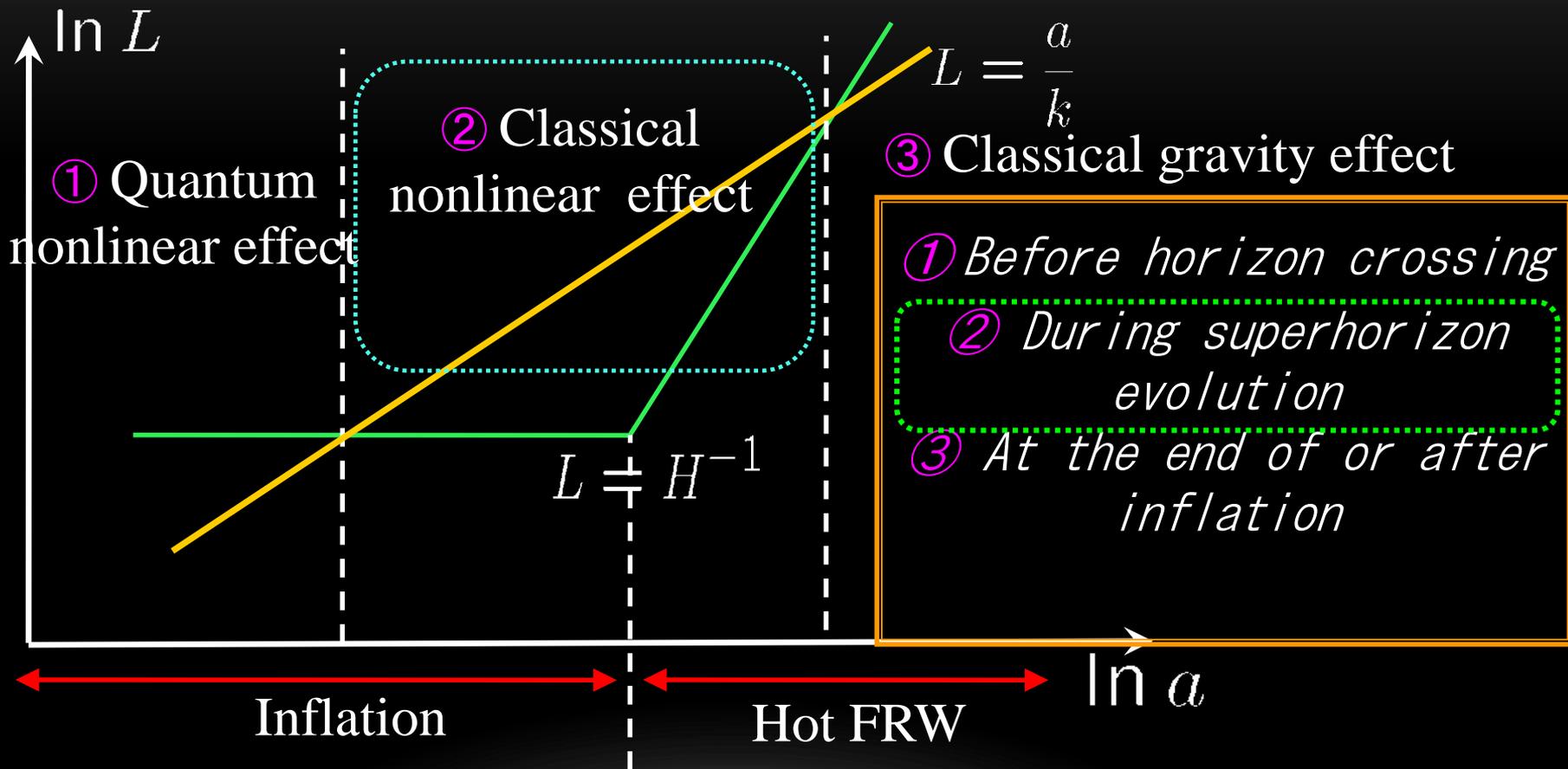
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left(R^{(3)} + K_{ij}^2 - \lambda K^2 \right)$$

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

◆ Three stages for generating nonlinearity

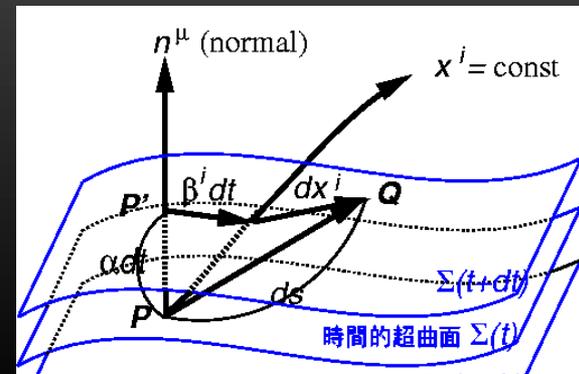


初期宇宙で生成される揺らぎ(密度,重力波)が長波長領域に入ったときの非線形進化を扱える

● 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