

泡宇宙創生シナリオにおけるビッグバン元素合成

土肥明 (理研), 古賀一成 (Proxima Technology, Inc.), 上田和茂 (徳山高専)

arXiv:2209.05625, JHEP 2023, 107 (2023) / arXiv:2408.10315, Phys. Rev. D 111, 063501 (2025)



BBN と諸問題・本研究の目的

ビッグバン元素合成 (BBN) : 宇宙誕生から 20 分間の物質進化 (図 1)

- $n/p \simeq e^{-1.3\text{MeV}/T_F} \simeq 1/6-1/7$ に freeze out (D 生成前)

$T_F (\lesssim 0.8 \text{ MeV})$: $n \leftrightarrow p$ の弱い相互作用の freeze-out 温度

- $D \leftrightarrow n + p$ 発生以降、 ${}^7\text{Li}$ までの軽元素が瞬時に生成

- 1000 秒を超えると、全軽元素が freeze out (BBN 終了)

○ BBN の観測・理論不一致問題

- ${}^4\text{He}$ アノマリー: 64 の極金属欠乏銀河の観測データ解析による Y_p の値の更新 (EMPRESS、図 2 を参照)
- ${}^7\text{Li}$ 推定値が過剰 (${}^7\text{Li}$ 問題)

○ 解決候補となる非標準物理過程

- 余剰次元由来の暗黒放射
- レプトン非対称性の効果
- 重力理論の拡張
- Axion 等の DM による影響

先行研究 (Sasankan+17): 5 次元無回転 BH からの暗黒放射で Y_p が上昇することを発見

本研究の目的 泡宇宙シナリオで如何にして ${}^4\text{He}$ アノマリーを解決しうるか? BH の回転も考慮し、暗黒放射の軽元素量への影響を明らかにする。

時空の相転移と泡宇宙

- 泡宇宙のシナリオでは準安定な 5 次元 AdS 時空 (偽真空: False Vacuum) がより安定な真真空 (True Vacuum) へ相転移するトンネリングの過程を考える。(図 3)
- 偽真空中に真真空で満たされた泡が生じ、それが広がることで時空の相転移が進む。(図 4)

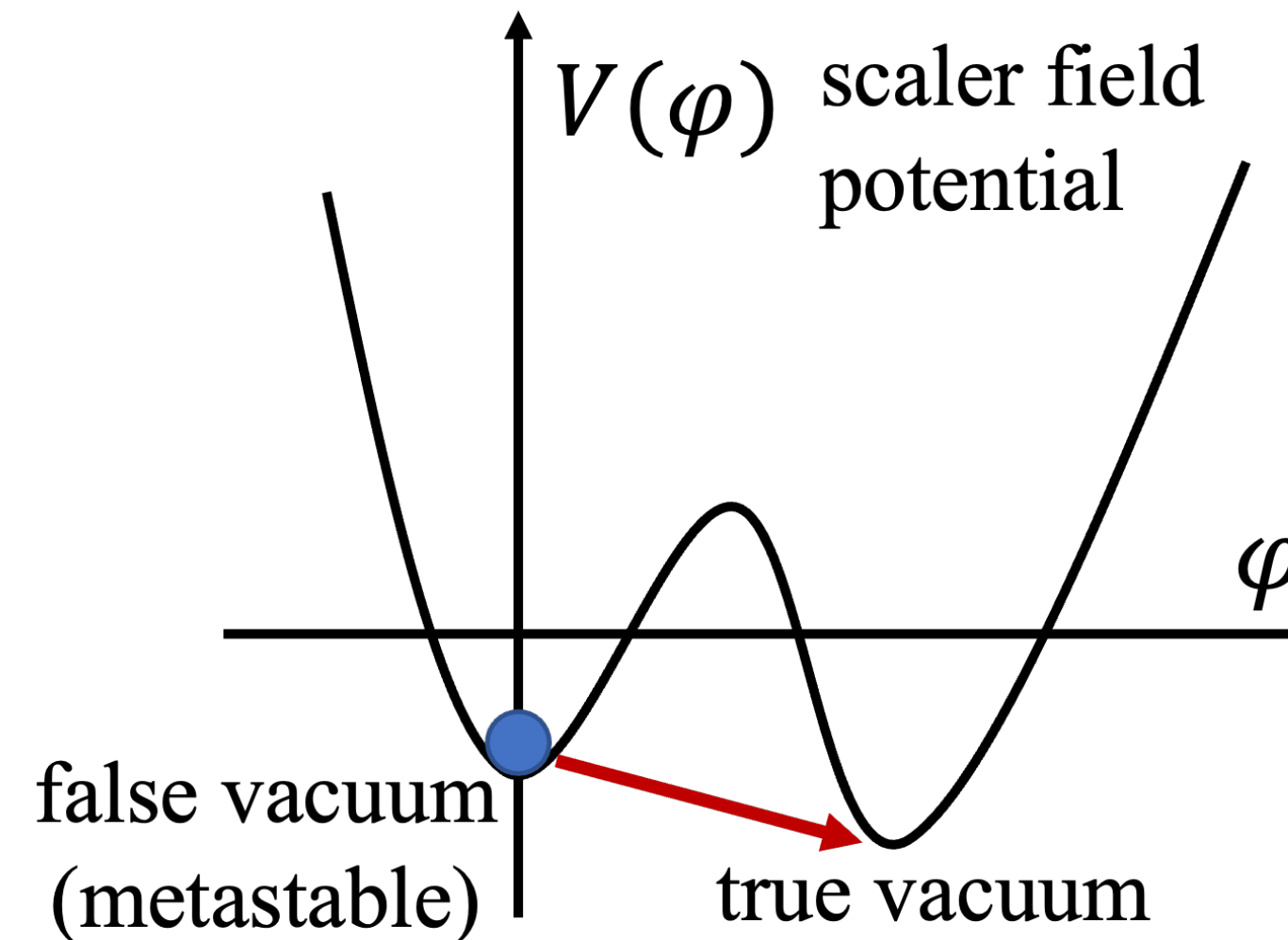


図 3: 準安定な偽真空はトンネリングによってより安定な真真空へ崩壊する

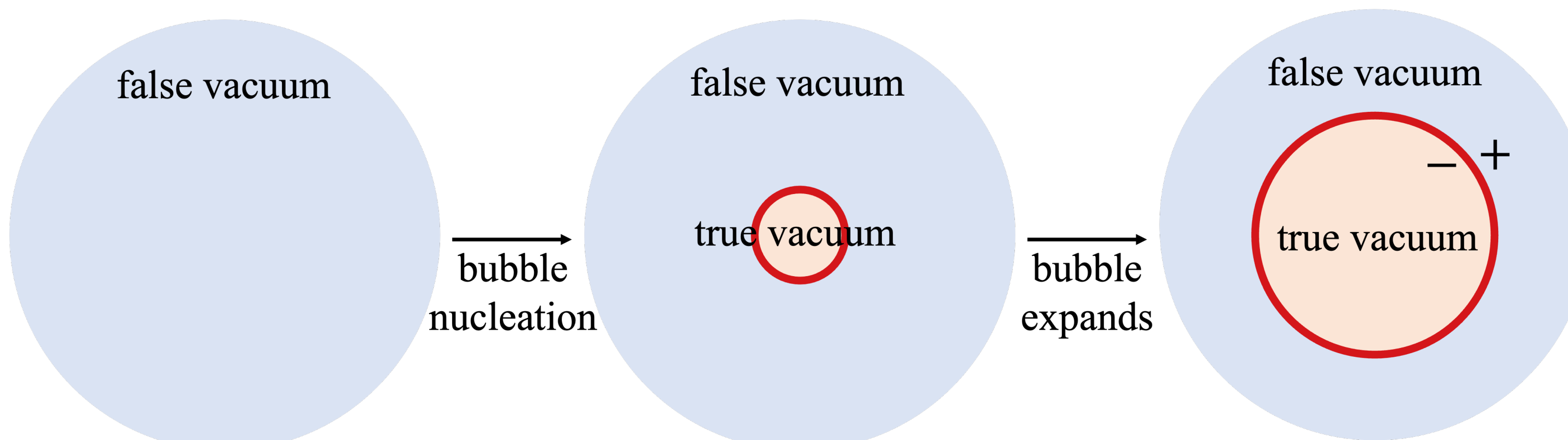


図 4: 5 次元の相転移では、相転移の時空の境界面 (泡) は 4 次元の自由度を持つ。

- 2 つの時空の境界面上での接続条件から泡の運動方程式を得ることができ、簡単な場合として球対称な 5 次元 Schwarzschild BH 時空が相転移する場合、

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} = -\frac{1}{R^2} + \frac{\Lambda^{(4)}}{3} + \frac{8\pi M_+ l_+ - M_- l_-}{3 \cdot 2\pi^2 R^4}$$

$M_{\pm}, \Lambda^{(4)}, l_{\pm}, R$ はそれぞれ BH の質量パラメータ、宇宙項、AdS 半径、泡の半径である。

- この時空の相転移面 (泡) の運動方程式が Friedman 方程式と同じ形であることから、泡を 4 次元の de Sitter 時空とみなすのが泡宇宙形成のシナリオである。
- 特に上式 3 項目が放射に対応する項となっており、5 次元 BH の質量が 4 次元上では放射のように見えるということを表している。この (暗黒) 放射を本研究において軽元素合成に影響を与える要因として考えている。

Kerr AdS₅ 時空での泡宇宙モデル

- 本研究ではより一般的な回転している BH 時空 (Kerr-AdS₅) 周りの相転移による泡宇宙のモデルを考える。以下の詳しい導出は Koga et al.(JHEP05(2023)107) を参照。

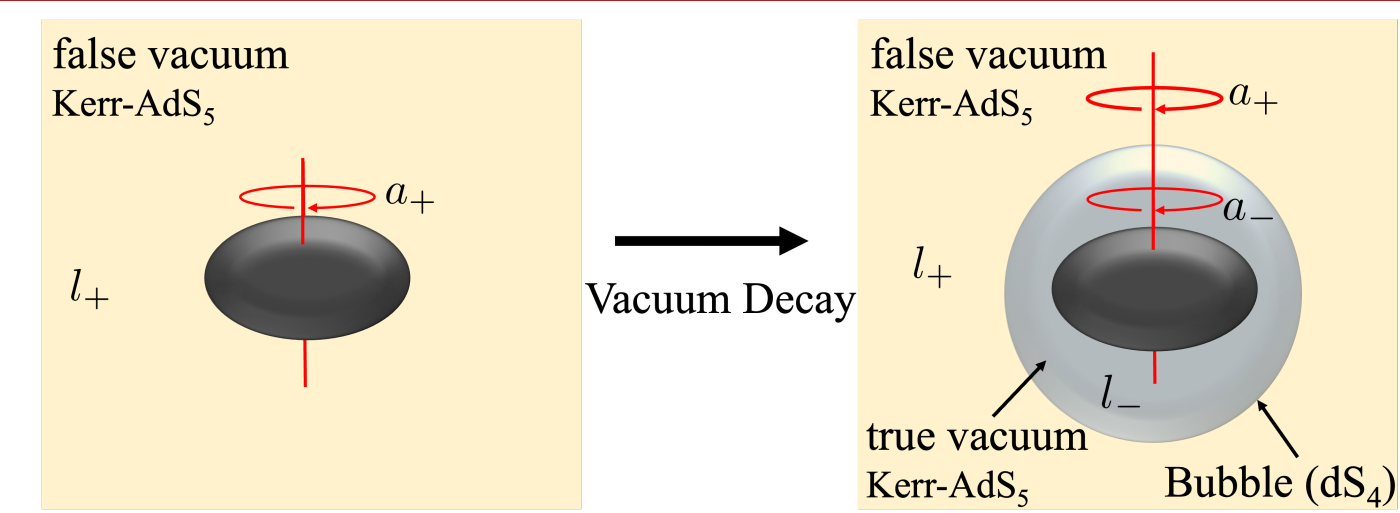


図 5: Kerr-AdS₅ での相転移と泡宇宙形成の様子

- この場合の泡宇宙の運動方程式は、

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{\Lambda_4}{3} + \frac{\rho_{r,0}}{R^4} + \frac{\rho_{m,0}}{R^3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\mu}{R^4} + \frac{W}{R^6} + \mathcal{O}(R^{-8})$$

$$\mu + \rho_{r,0} = M_- \left[1 + \left(\frac{a_-}{a_+}\right)^2 - a_-^2 \left(\frac{1}{l_-^2} + \frac{1}{l_+^2} - \frac{1}{m_0}\right) + \frac{(a_-^2 - a_+^2)(l_-^2 - l_+^2)m_0}{a_+^2 l_-^2 l_+^2} \right]$$

となる。 $a_{\pm}$ は BH の回転パラメータ、 $\rho_{r,0}, \rho_{m,0}, \mu$ はそれぞれ放射、物質、暗黒放射の成分である。

- 5 次元由来の暗黒放射の影響を直接計算するのは複雑なため、あたかも追加のニュートリノが存在するかのように有効的な世代数 N_{eff} を求め、その影響を取り入れた。

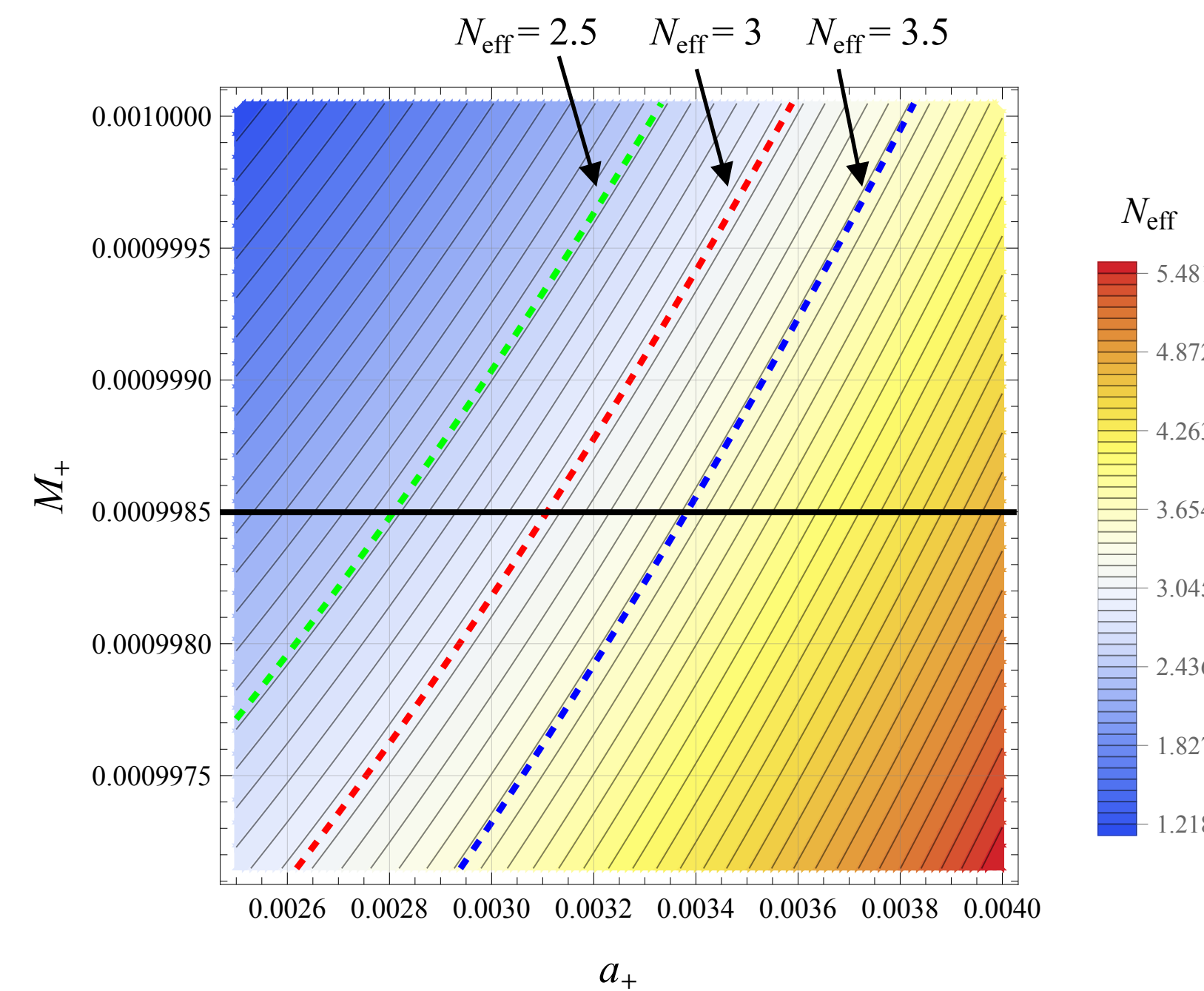
$$N_{\text{eff}} \equiv \frac{8}{7} \left(\frac{11}{4}\right)^{4/3} \frac{\rho_{\text{DR}} + \rho_r - \rho_\gamma}{\rho_\gamma}, \quad \rho_{\text{DR}} \equiv \frac{3}{8\pi G_4} \frac{\mu}{R^4}$$

- 得られた N_{eff} を元に Mathematica の公開コード PRIMAT (Pitrou+18) を用いて BBN 計算を行った。

BH の質量・回転による軽元素量の影響

$M_+/10^{-4}$	$a_+/10^{-3}$	$M_-/10^{-4}$	$a_-/10^{-3}$	N_{eff}
9.98500	3.25120	9.98593	3.25105	3.20
9.98500	3.13998	9.98593	3.13983	3.00
9.98500	3.08283	9.98593	3.08268	2.90
9.98500	2.84260	9.98593	2.84247	2.50
9.98500	2.77930	9.98593	2.77917	2.40
9.98500	2.74705	9.98593	2.74692	2.35
9.98500	2.71443	9.98593	2.71430	2.30
9.98585	2.74705	9.98679	2.74692	2.30
9.98500	2.64798	9.98594	2.64785	2.20
9.98756	2.74705	9.98850	2.74692	2.20
9.98585	2.74705	9.98679	2.74692	2.30
9.98756	2.74705	9.98850	2.74692	2.20

図 6: N_{eff} に対する BH の質量 $M_{\pm}$ とスピンパラメータ $a_{\pm}$ の依存性。 $m_0 = 347000, l_+ = 7, l_- = 7/2$ で固定。



- BH の質量 $\rightarrow N_{\text{eff}}$ を小さくする。回転 $\rightarrow N_{\text{eff}}$ を大きくする。
 $\Rightarrow$ BH の質量と回転は、 N_{eff} に対して反相関

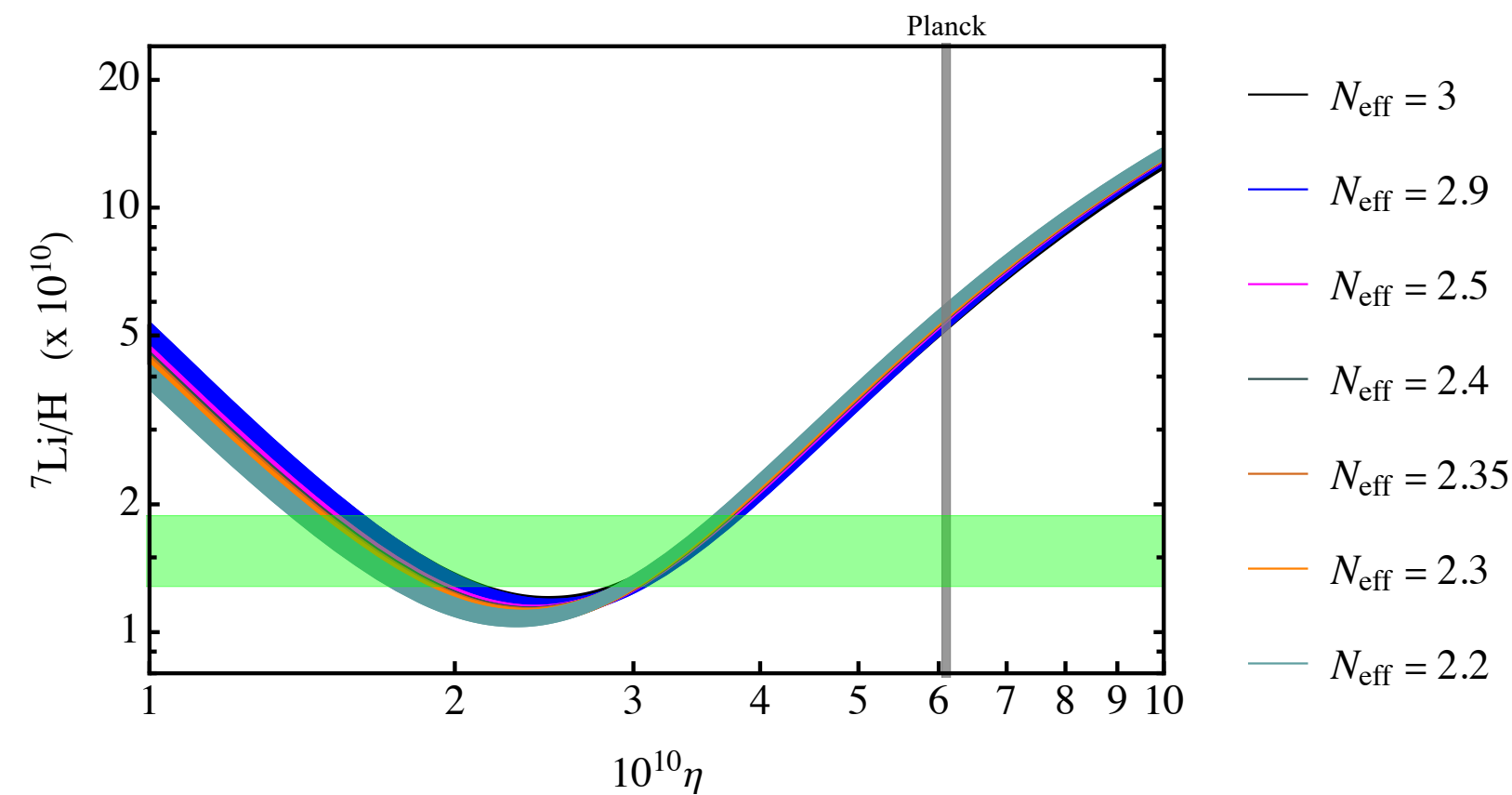
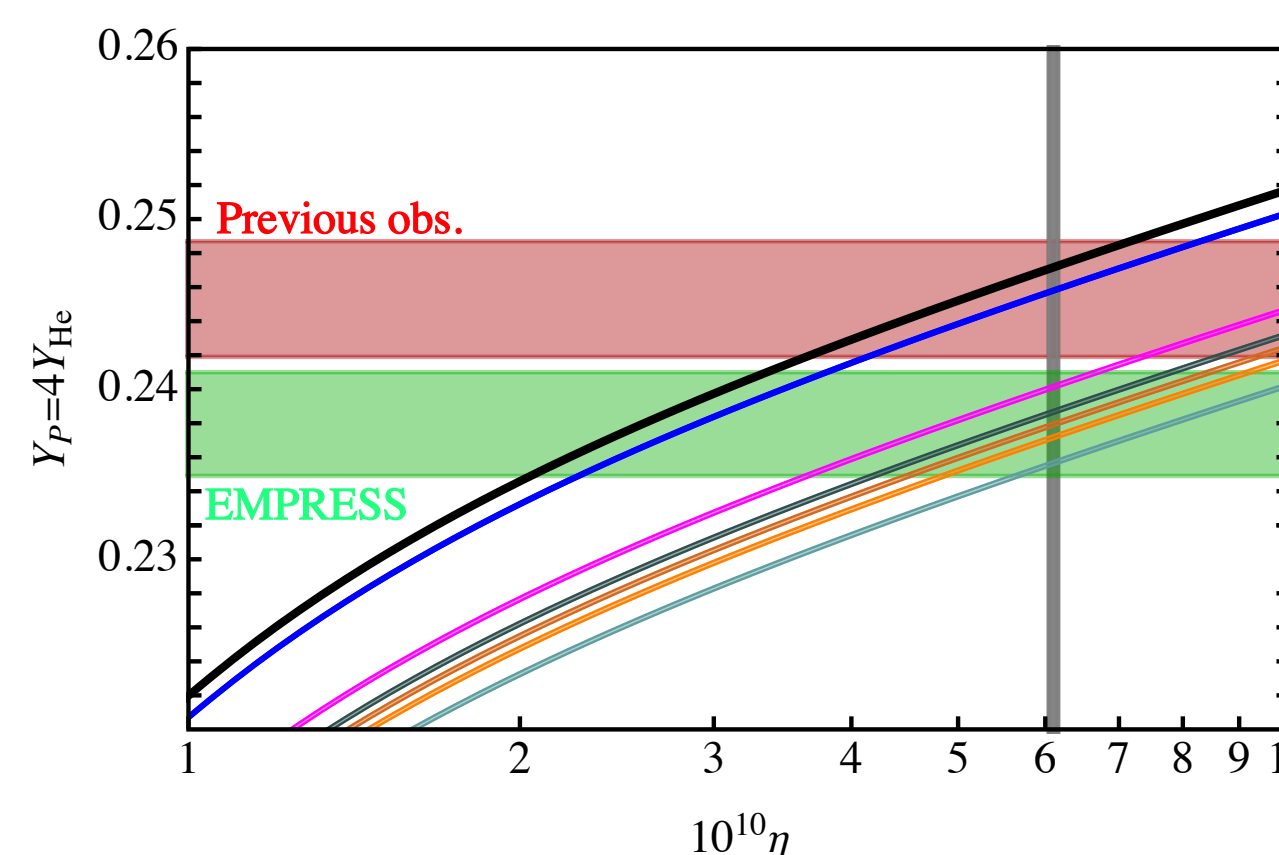


図 7: Y_p と ${}^7\text{Li}/\text{H}$ のバリオン・光子数比の N_{eff} 依存性

- Y_p : N_{eff} ④で小さくなる ($R(t)$ ④より D 生成が遅れるため)
 $\Rightarrow$ BH の質量・回転の不定性で ${}^4\text{He}$ アノマリーを解決可能
- ${}^7\text{Li}$: 泡宇宙シナリオによる暗黒放射ではほぼ変化しない
 $\Rightarrow$ ${}^7\text{Li}$ 問題解決は困難 (他の現象やシナリオも検討)

まとめ・課題

- 5 次元回転 BH 時空 (Kerr AdS₅) 周りの偽真空泡としての宇宙創生シナリオの下で BBN の数値計算を行った。
- 5 次元 BH の質量と回転は、 N_{eff} に対して反相関であり、 ${}^4\text{He}$ アノマリーを解決する手がかりとなる可能性がある。
- 今後は泡宇宙による宇宙創生モデルの精密化、他の現象との組み合わせなどにより、Li 問題等を含めた宇宙論の諸問題にアプローチする。