

クインテッセンスの触媒効果による 5次元真空崩壊でのバブル宇宙の実現

素粒子現象論研究会2020 11/26,27,28

IK and Y. Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

IK and Y. Ookouchi, JHEP 10 (2019)

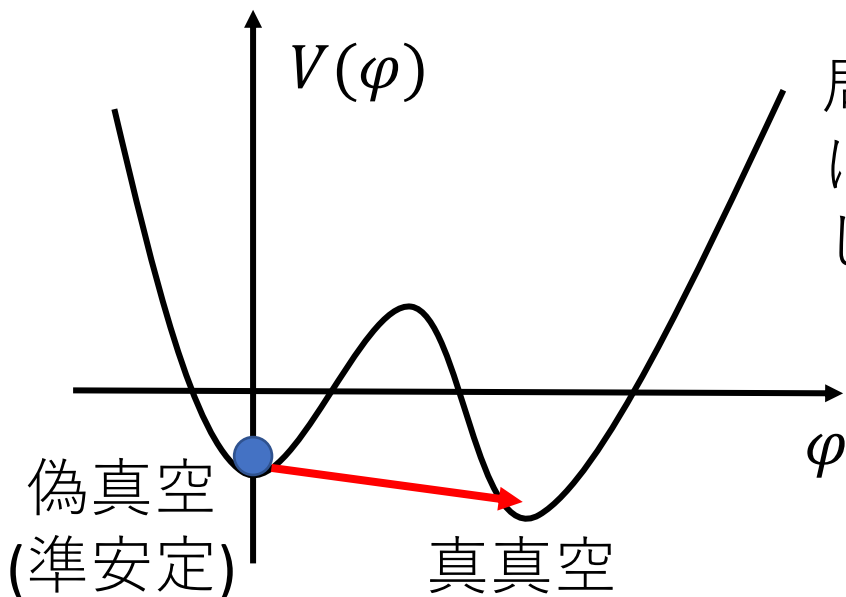
九州大学
古賀一成

共同研究者 九州大学 大河内豊

真空崩壊とバブル時空の形成

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

5次元時空が1次相転移している状態を考える



局所的な最小値になっている偽真空は有限の時間でトンネリングを起こし、より安定な真真空へ相転移する

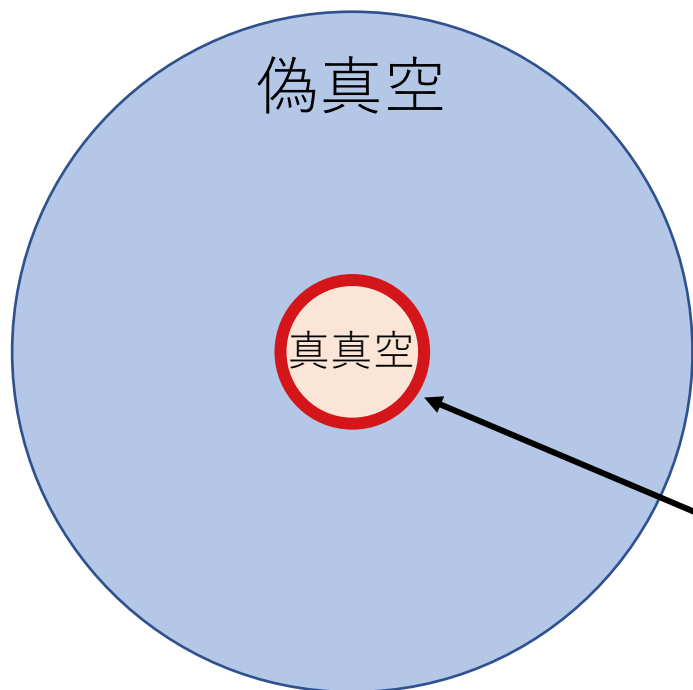
Coleman, Phys.Rev. D15 (1977)

スカラー場のポテンシャル

バブル時空の形成

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

5次元時空が1次相転移している状態を考える



局所的な最小値になっている偽真空は有限の時間でトンネリングを起こし、より安定な真真空へ相転移する

Coleman, Phys.Rev. D15 (1977)

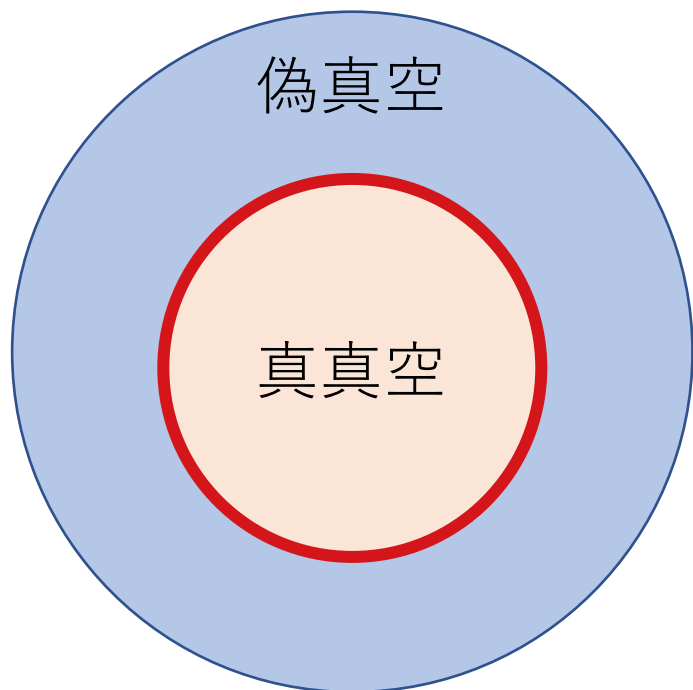
内側が真真空で満たされたバブルが出現

バブル時空 = この境界面上に我々の4次元時空を実現する

バブル時空の形成

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

5次元時空が1次相転移している状態を考える



局所的な最小値になっている偽真空は有限の時間でトンネリングを起こし、より安定な真真空へ相転移する

Coleman, Phys.Rev. D15 (1977)

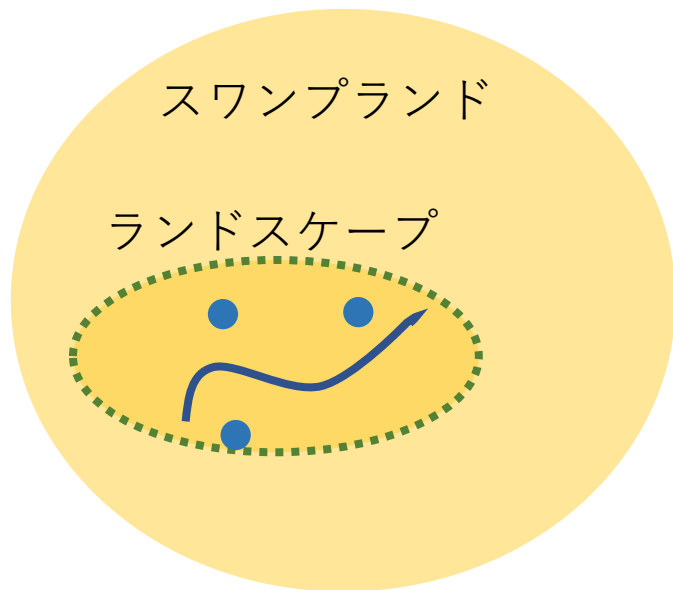
バブルが広がることで崩壊が進む

DanielssonらのモチベーションはdS予想にある

バブル時空とdS予想

Vafa,(2005)
Vafa et al.,(2019)

dS予想：スワンプランド問題の1つ
弦理論でdSが構成できない予想



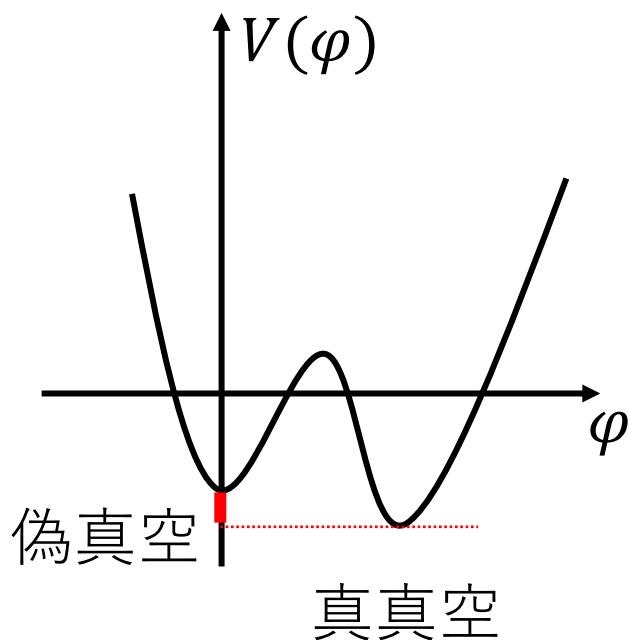
スワンプランド問題

量子重力理論のEFTとして無矛盾なもの
とそれ以外の境界を求めていく

バブル時空とdS予想

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

dS予想：スワンプランド問題の1つ
弦理論でdSが構成できない予想



スワンプランド問題

量子重力理論のEFTとして無矛盾なもの
とそれ以外の境界を求めていく

AdSからAdSへの崩壊ではdS予想
に反していない

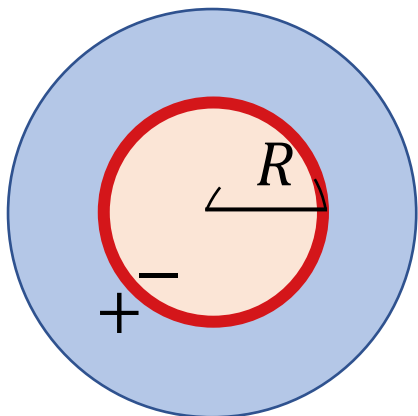
ナイーブには2つの真空のエネルギー差
がバブル上のダークエネルギーとなる

バブルの運動方程式

Israel, Nuovo Cimento Soc. B44 (1966)

一様等方宇宙 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -dt^2 + a^2(t) d\sigma^2$

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = -\frac{1}{a^2} + \frac{\Lambda^{(4)}}{3} + \frac{8\pi G_4}{3} \left(\frac{\rho_{rad}}{a^4} + \frac{\rho_{mat}}{a^3} \right)$$



崩壊する5次元時空 $ds^2 = -f_{\pm}(r) dt^2 + \frac{dr^2}{f_{\pm}(r)} + r^2 d\Omega_3^2$

バブル上での計量 $ds_b^2 = -d\lambda^2 + R^2(\lambda) d\Omega_3^2$

境界面上の計量の接続条件

$$\sqrt{\frac{f_+}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2}} - \sqrt{\frac{f_-}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2}} = -\frac{8\pi G_5 \sigma}{3}$$

σ : バブルの張力
自由な変数

ポテンシャルによる

バブル宇宙

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

IK and Y. Ookouchi, JHEP 10 (2019)

IK and Y. Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

崩壊する5次元時空の計量によって、バブル時空の性質が決まる

DanielssonらはBHとSCが5次元時空に存在する場合を考え、物質と放射をバブル上に実現 [Danielsson et al,2019]

$$f(r)_{\pm} = 1 - \frac{\Lambda_{\pm}^{(5)} r^2}{6} - \frac{2a_{\pm}}{3r} - \frac{8G_5 M_{\pm}}{3\pi r^2}$$

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} = -\frac{1}{R^2} + \frac{\Lambda^{(4)}}{3} + \frac{8\pi G_4}{3} \left(\frac{M_+ l_+ - M_- l_-}{2\pi^2 R^4} + \frac{a_+ l_+ - a_- l_-}{8\pi G_5 R^3} \right)$$

バブル上での宇宙定数は
張力と真空のエネルギー差による

バブル宇宙

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

IK and Y. Ookouchi, JHEP 10 (2019)

IK and Y. Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

崩壊する5次元時空の計量によって、バブル時空の性質が決まる

DanielssonらはBHとSCが5次元時空に存在する場合を考え、物質と放射をバブル上に実現 [Danielsson et al,2019]

- ・インフレーションが実現できていない
- ・BHとSCの触媒効果を考慮していない

→ 触媒効果を考慮に入れることで、バブル上の宇宙定数が非常に小さくなるバブルが形成されやすい

[IK and Ookouchi,2019]

→ 5次元時空にクインテッセンスが存在する場合を考えていく

[IK and Ookouchi,2020]

クインテッセンス

Kiselev, Class. Quant. Grav. 20 (2003)
Toledo and Bezerra, Gen. Rel. Grav. 51 (2019)

4次元フリードマン方程式 $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4}{3}G_4(1 + 3w_{(4)})\rho$

$$p = w_{(4)}\rho$$

$-1 \leq w_{(4)} < -1/3$ で加速膨張する

$w_{(4)} = -1$ のとき宇宙定数に対応する

$-1 < w_{(4)} < -1/3$ のときクインテッセンス

$$S_q = - \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + V(\phi) \right)$$

$w_{(4)} = -0.8$ 程度までは観測と無矛盾

クインテッセンス時空の崩壊

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10
(2019) Kiselev, Class. Quant. Grav. 20 (2003)
Toledo and Bezerra, Gen. Rel. Grav. 51 (2019)

クインテッセンスが5次元に存在する場合の計量

$$f(r) = 1 - \frac{\Lambda^{(5)} r^2}{6} - \sum_n \frac{q^n}{r^{4w^n+2}}$$

ミンコフスキー時空からAdSへ崩壊する場合

$$f_+ = 1 - \frac{q_+}{\tilde{r}^{4w+2}} \quad f_- = 1 - \frac{q_-}{\tilde{r}^{4w+2}} + \left(\frac{\gamma}{l_- \alpha} \right)^2 \tilde{r}^2$$

$$\sqrt{\frac{f_+}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2}} - \sqrt{\frac{f_-}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2}} = -\frac{8\pi G_5 \sigma}{3}$$

クインテッセンス時空の崩壊

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

Kiselev, Class. Quant. Grav. 20 (2003)

Toledo and Bezerra, Gen. Rel. Grav. 51 (2019)

$$\dot{\tilde{R}}^2 = 1 - \tilde{R}^2 - \left(\bar{q} + \frac{\Delta q}{8\eta^2} \right) \frac{1}{\tilde{R}^{4w+2}} - \left(\frac{(1 + \eta^2)\alpha\Delta q}{16\eta^2} \right)^2 \frac{1}{\tilde{R}^{8w+6}}$$

クインテッセンスが存在する5次元時空が崩壊するとき
バブル時空上に4次元でのクインテッセンスが存在する
ように見える

崩壊する5次元のクインテッセンスとバブル上の4次元のク
インテッセンスを対応させることができる

$$w_{(4)} \iff \frac{1}{3}(4w + 1)$$

クインテッセンス時空の崩壊

Banerjee, Danielsson, Dibitetto, Giri and Schillo, JHEP 10 (2019)

Kiselev, Class. Quant. Grav. 20 (2003)

Toledo and Bezerra, Gen. Rel. Grav. 51 (2019)

バブル時空のセットアップで我々の宇宙を実現したい

クインテッセンスによってインフレーション、ダークエネルギーを説明する

- クインテッセンスの触媒効果
- trans-Planckian censorship conjecture (TCC)

この2つを考慮に入れることで、どのようなバブル時空が許されるのかをまずは考えていく

クインテッセンスの触媒効果

Gregory et al, JHEP1403,081 (2014)
IK and Ookouchi, arXiv hep-th 2011.07437

触媒効果：ブラックホールが時空に存在すると真空崩壊が促進される

$$\Gamma \sim e^{-B}$$

崩壊率 バウンス作用

触媒がない場合のバウンス作用 B_{CDL} との比が $B/B_{CDL} < 1$ のとき触媒効果を示している

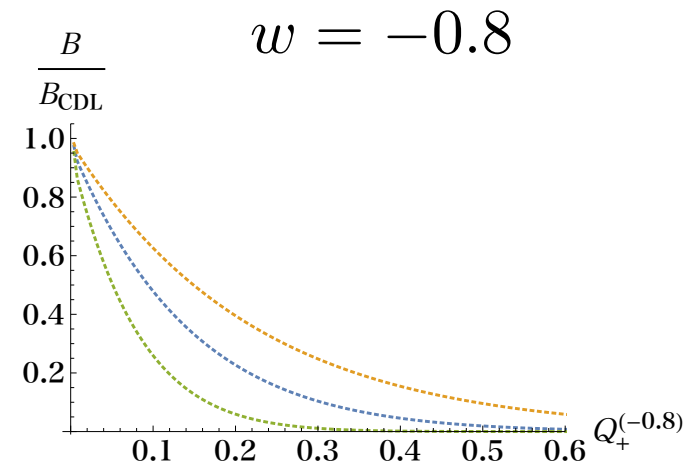
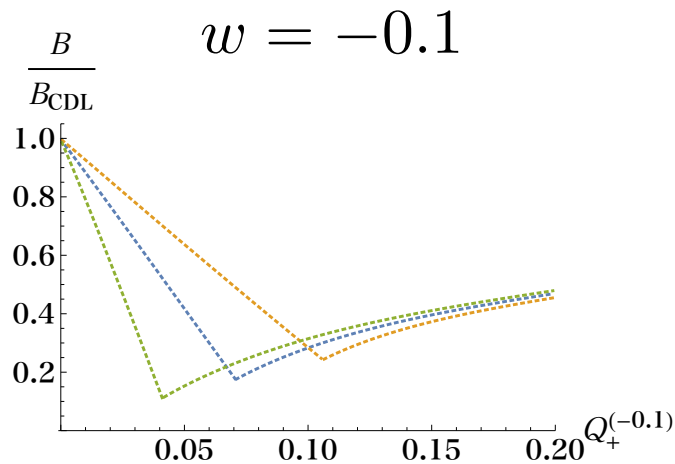
ミンコフスキーからAdSへと崩壊する場合のクインテッセンスの触媒効果を見してみる

クインテッセンスの触媒効果

Gregory et al, JHEP1403,081 (2014)
IK and Ookouchi, arXiv hep-th 2011.07437

バブル張力と真空のエネルギー差を固定 $\eta = 0.15, 0.2, 0.25$

$$\eta = \bar{\sigma} l \quad l^2 = \frac{6}{\Delta\Lambda^{(5)}}$$



クインテッセンスも触媒効果を持つことがわかった

クインテッセンス時空の宇宙定数

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

どのような崩壊でも触媒効果を持つのか？

バブル時空がAdSになる時はバウンス解が存在しない

$$\dot{\tilde{R}}^2 = 1 - \boxed{\tilde{R}^2} - \left(\bar{q} + \frac{\Delta q}{8\eta^2} \right) \frac{1}{\tilde{R}^{4w+2}} - \left(\frac{(1 + \eta^2)\alpha\Delta q}{16\eta^2} \right)^2 \frac{1}{\tilde{R}^{8w+6}}$$

バブル上の宇宙定数は、バブルの張力と真空のエネルギー差の組み合わせから得られる

$$\left(\frac{(1 + 4\eta^2)^2}{16\eta^2} - 1 \right) = \frac{\Lambda^{(4)}l^2}{3}$$

これがゼロ以上である

trans-Planckian censorship conjecture (TCC)

Vafa et al, arXiv:2008.07555 [hep-th]
Brandenberger et al, Phys.Rev.D 64 (2001)

スワンプランド問題の1つ

インフレーションは量子ゆらぎを古典的なゆらぎへと成長

プランク長よりも短いスケールが古典的なゆらぎへと成長し観測されるのは問題が起こりそう

無矛盾な量子重力理論からはそのような理論が生まれな
いという思想のもと

trans-Planckian censorship conjecture (TCC)

Vafa et al, arXiv:2008.07555 [hep-th]
Brandenberger et al, Phys.Rev.D 64 (2001)

TCC条件 [Vafa et al,2020]

$$\frac{a_f}{a_i} < \frac{M_{pl}}{H_f}$$

—————→ $T \leq H_f^{-1} \log \frac{M_{pl}}{H_f}$

dS宇宙の寿命に関する条件

TCCの条件を破る前に真空崩壊する必要がある

バブル時空とTCC

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

バブル上で我々の宇宙を構成する場合、そこにもTCCを課すことができる(課すべき)

AdS→AdSの崩壊で、崩壊後のAdSが完全な真真空であると形成されたバブルは永久に存在する

バブル上で正の宇宙定数の実現されていると、そこではいつかTCCを破ってしまう

TCCの条件を尊重するとバブル上での宇宙定数はゼロ以下になっているべき

バブル時空とTCC

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

- 触媒効果 \longrightarrow AdSは形成されない
- TCC \longrightarrow 宇宙定数はゼロ以下

$$\left(\frac{(1 + 4\eta^2)^2}{16\eta^2} - 1 \right) = \frac{\Lambda^{(4)} l^2}{3} \quad \begin{array}{l} \text{この組み合わせによる} \\ \text{宇宙定数はゼロ} \end{array}$$

TCCを満たし、インフレーション、ダークエネルギーを実現する

インフレーションのためのクインテッセンス w_1

ダークエネルギーのためのクインテッセンス w_2

2つのクインテッセンスを導入する

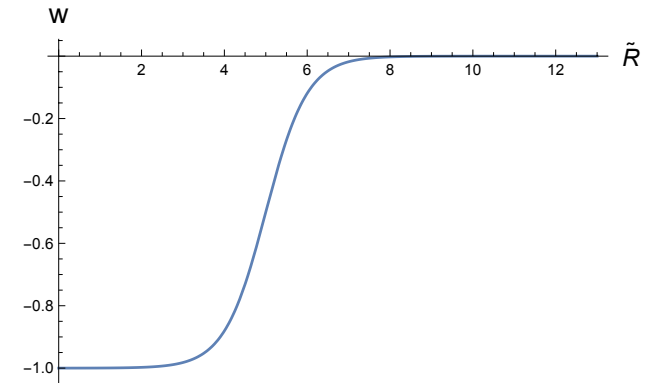
クインテッセンズ w_1 w_2

Tsujikawa, Class. Quant. Grav. 30 (2013)

クインテッセンズ w_1

thawing model $-1 \rightarrow 0$

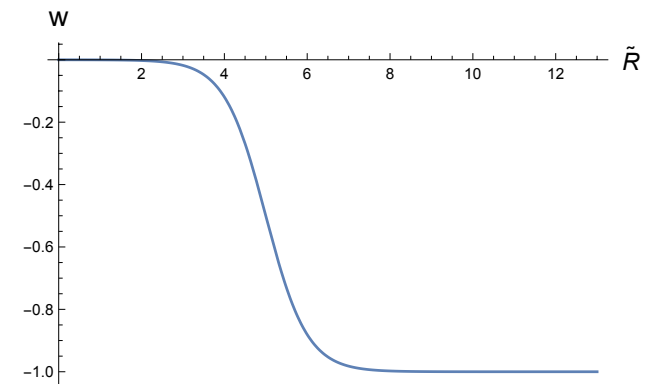
バブル形成直後のインフレーション



クインテッセンズ w_2

freezing model $0 \rightarrow -1$

時間が経った後のダークエネルギー



インフレーション w_1

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

真空崩壊直後 $w_1 \simeq -1$ $w_2 \simeq 0$

w_1 のクインテッセンスによりインフレーションを起こす

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} = -\frac{1}{R^2} + \frac{q_{+1}}{R^{4w_1+4}} + \cancel{\frac{q_{+2}}{R^{4w_2+4}}} + \frac{l^2}{4} \left(\frac{\Delta q_1}{R^{4w_1+4}} + \cancel{\frac{\Delta q_2}{R^{4w_2+4}}} \right)^2$$

w_1 が増加することでインフレーションが終わり、 w_2 が減少し、 $w_2 \simeq -1$ となった場合を考える

ダークエネルギー w_2

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

インフレーションが終わり、 w_2 が減少し、 $w_2 \simeq -1$ となった場合を考える

w_2 が減少すると無視できていた項が復活してくる

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} = \frac{q_{+2}}{R^{4w_2+4}} + \frac{l^2}{4} \left(\frac{\Delta q_2}{R^{4w_2+4}} \right)^2 + \dots$$

ダークエネルギー

$$\left(\frac{1}{e^{70}} \right)^{\frac{1}{10}} \simeq 9.1 \times 10^{-4}$$

$$\left(\frac{1}{e^{70}} \right)^{\frac{1}{100}} \simeq 0.49$$

ダークエネルギー w_2

IK and Ookouchi, arXiv:2011.07437 [hep-th]

触媒となった5次元クインテッセンスの値が $\frac{\Lambda_0^{(4)}}{3} \simeq \frac{q+2}{R_0^{w_0+4}}$

を満たしていれば、現在の宇宙定数を説明することができる

そこまで大きなチューンが必要なく小さなダークエネルギーを導出が可能

まとめ

スワンブランド問題が議論されるなで提案された方法をもとに、5次元でクインテッセンスが存在するモデルでバブル時空を構成した

触媒効果とTCCからバブル上での宇宙定数がゼロになることを導いた

2つのクインテッセンスを用いることでバブル上でインフレーションと小さな値のダークエネルギーを説明することができた

課題

具体的なクインテッセンスのモデルを構築する
インフレーション後の熱史の議論