

## ブレーンインフレーションモデル Brane Inflation Model

○佐藤優太<sup>1</sup>, 岩本弘一<sup>2</sup>\*Yuta Sato<sup>1</sup>, Koichi Iwamoto<sup>2</sup>

Abstract: We review the inflationary scenario based on D-branes which appear in string theory. The scenario assumes two D-branes and that the separation between the branes is interpreted as an inflationary potential called “inflaton”. The brane motion is described by slowly rolling scalar field with extremely flat plateau potential. When branes approach each other to a critical distance, the potential becomes steep and the inflation ends quickly. We introduce the standard inflationary scenario, D-branes and brane inflation models.

### 1. はじめに

インフレーション理論は、標準ビッグバン宇宙モデルが抱える諸問題を一挙に解決できる理論として 1981 年に提唱された。インフレーション理論では、宇宙誕生直後に宇宙空間の加速膨張（インフレーション）と再加熱が起きた後に、標準ビッグバン宇宙モデルが記述される時期へと遷移していく。そのような初期宇宙の高エネルギー領域を記述するためには、自然界のすべての相互作用を統一する理論が必要となる。本研究では、そのような素粒子理論の有力候補とされる弦理論に登場する D ブレーンを用いた、インフレーションの考え方とその具体的なモデルについて概観する。

### 2. 標準インフレーションモデル

一様等方な宇宙の進化は、ロバートソン・ウォーカー計量のもとでのスケール因子を  $a(t)$  として、以下のフリードマン方程式で記述される。

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho \quad (1)$$

ここで、 $K$  は曲率、 $G$  は重力定数、 $\rho$  はエネルギー密度である。

インフレーションを起こすスカラー場（インフラトン）を  $\varphi(x)$  とすると、以下の作用

$$S = \int \sqrt{-g} d^4x \left( -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - V[\varphi] \right) \quad (2)$$

の変分より、 $\varphi(x)$  の運動方程式が得られる。

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 3H \frac{d\varphi}{dt} + \frac{dV}{d\varphi} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $H$  はエネルギー密度  $\rho_\varphi = \frac{1}{2}\dot{\varphi}^2 + V[\varphi]$  を用いて

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_\varphi \quad (4)$$

と表される。

(3)式において、ポテンシャルエネルギー密度  $V[\varphi]$  が  $\rho_\varphi$  を支配する時代が十分長く続けば、インフレーションが起こる。よって(3)式の  $\dot{\varphi}$  を無視できる状況が要請される。これをスローロール条件と呼び、以下の式で記述される。

$$\epsilon_V \equiv \frac{M_G^2}{2} \left( \frac{V'[\varphi]}{V[\varphi]} \right)^2 \ll 1 \quad (5)$$

$$\eta_V \equiv M_G^2 \frac{V''[\varphi]}{V[\varphi]} \ll 1 \quad (6)$$

この条件が成り立っていると、ポテンシャルエネルギー密度がほぼ一定に保たれ、準指数関数的な宇宙膨張が実現する。ここで  $M_G$  は、既約プランクスケールである。

スカラー場の発展により、スローロール条件が満たされなくなるとインフレーションは終了し、インフラトンは極小点で振動するようになる。このとき、インフラトンと結合している場の粒子生成が起こり、インフラトンはエネルギーを放射に散逸する。これを宇宙の再加熱と呼び、後の標準ビッグバン宇宙モデルへ遷移していく。

### 3. 弦理論と D ブレーン

弦理論は、物質の基本構成要素を 0 次元的な「点」ではなく、1 次元的な「弦」であるとする理論である。弦には 2 つの端点を持つ開いた「開弦」と端点を持たない閉じた「閉弦」の 2 種類が存在する。

開弦は、その端点に対して自由端条件（Neumann 型境界条件）と固定端条件（Dirichlet 型境界条件）を課することができる。そのうち固定端条件において、弦の端点に乗る空間を D ブレーンと呼ぶ。固定端条件は、弦

のターゲット時空での座標を  $X^\mu(\tau, \sigma)$  とすると、以下の式で表される。

$$X^\mu(\tau, \sigma = 0) = X^\mu(\tau, \sigma = 2\pi) = c^\mu \quad (7)$$

ここで、 $c^\mu$  は定数であり、弦の端点を  $\sigma = 0$  と  $2\pi$  で表した。このように D ブレーンは、D 次元時空内の部分空間であり、 $p$  次元の空間的広がりを持つ D ブレーンを  $D_p$  ブレーンと呼ぶ。

D ブレーンを用いると、D ブレーンに束縛された開弦のモードが標準モデル粒子を再現し、閉弦のモードが重力子を再現する。閉弦は余剰次元空間を伝播することができるので、階層性問題を解決するのではないかとされている。よって、弦理論は全ての相互作用を統一する理論の有力候補となっている。

#### 4. ブレーンインフレーション

上述の D ブレーンを用いて、インフレーションを起こすシナリオが提唱されている。最初に D ブレーンを用いたインフレーションのアイデアを与えたのは、Dvali と Tye によるものであった[3]。彼らは、2つのブレーン間の距離をインフラトンとするモデルを構築し、ブレーン同士が互いに引き合う描像を与えた。

ブレーンの張力を  $T$  とし、余剰次元におけるブレーン間の距離を  $r$  とすると、(4) 式のエネルギー密度は 4 次元時空中で

$$\rho_{eff} = T\dot{r}^2 + V(r) \quad (8)$$

で与えられる。第 1 項は、運動するブレーンにおける運動エネルギーであり、第 2 項はブレーン間の相互作用によるポテンシャルエネルギーである。インフレーションが起きるのは、 $V(r)$  が平坦な領域

$$T\dot{r}^2 \ll V(r) \quad (9)$$

である。 $V(r)$  は、 $r$  が小さいとき傾きが大きく、 $r \rightarrow \infty$  で定数値に近づく関数でなければならない。よって、ブレーン同士が近づくことでスローロール条件が破れ、インフレーションが終了し再加熱を起こす。

これを発展させたアイデアとして、D ブレーンと反 D ブレーンの衝突・対消滅によってインフレーションを起こすシナリオが存在する。D ブレーンと反 D ブレーンが存在すると、ブレーン上のチャージが互いに逆符号であることから、ブレーン同士が引力によって引き合う描像が得られる。D ブレーン上のスカラー場を  $\varphi_{\langle 1,1 \rangle}$ 、反 D ブレーン上のスカラー場を  $\varphi_{\langle 2,2 \rangle}$  とすると、D ブレーンと反 D ブレーンの間の弦から来るタキオンの質量は

$$m^2 = -\frac{1}{l_s^2} + (\varphi_{\langle 1,1 \rangle} - \varphi_{\langle 2,2 \rangle})^2 \quad (10)$$

となる。ここで、 $l_s$  は弦の長さを表す。(10) 式を見ると、ブレーン間の距離がある値より大きい領域ではタキオンが現れず、距離が十分小さくなるとタキオンが現れ、真空凝縮を起こすことでブレーン同士が対消滅する。これはタキオン場  $T$  とスカラー場  $\varphi = \varphi_{\langle 1,1 \rangle} - \varphi_{\langle 2,2 \rangle}$  を合わせたポテンシャル  $V(T, \varphi)$  によって起こるハイブリッドインフレーションモデルと呼ばれる。タキオン場  $T$  ははじめ  $T = 0$  にとどまっているが、スカラー場  $|\varphi|$  が小さくなる方向に移動していくとインフレーションが起こる。 $|\varphi|$  が十分小さくなると、タキオン場  $T$  の質量が負となってタキオン凝縮が起こり、インフレーションは終了する。

#### 5. まとめと今後の展望

インフレーション理論の概要と D ブレーンを用いてインフレーションを起こすシナリオを紹介した。特に 2 つ目のモデルでは、ブレーンの対消滅過程において D1 ブレーンが生成されそれが宇宙ひもとして観測される可能性が指摘されている。このように実際の観測に影響を与えるような現象やデータについても考察していきたい。

また、今回は 2 枚の D ブレーンを平行に配置したインフレーションモデルを紹介したが、ブレーンの配置の仕方を変えたモデルやブレーンの次元を変えたモデル等についても調べていきたい。

#### 6. 参考文献

- [1] 佐藤勝彦・二間瀬敏史：『宇宙論 I』（シリーズ現代の天文学 2）、日本評論社（2012）
- [2] 橋本幸士：『D ブレーン』（UT Physics 2）、東京大学出版会（2006）
- [3] Gia Dvali・S.-H. Henry Tye, Phys. Lett. B 450,（1999）
- [4] Zwiebach, “A First Course in String Theory”（2009）