

新しい宇宙論モデル：局所的因果的視野と赤方偏移エネルギー再分配を伴う放射駆動インフレーション

私は、インフレーション期がスカラーインフラトン場ではなく放射圧によって駆動される宇宙論モデルを提案します。プランク時代の線形膨張から始まり、宇宙は時空が因果的視野を超えて広がる $t \approx 10^{22} t_P$ で指数関数的インフレーションに移行し、光速 (c) を局所的に不変のパラメータとして再定義します。光子の赤方偏移によるエネルギー損失は、放射圧に再分配され、インフレーションを推進し、膨張宇宙におけるエネルギー保存を保証すると仮定されています。局所的なミンコフスキーパッチは c の不変性を保持し、視野問題と平坦性問題を解決し、特殊相対性理論を宇宙的超光速後退と調和させます。CMB、重力波、大規模構造における予想される特徴とともに、8つの観測テストが概説されています。現在のデータは Λ CDMと一致していますが、このモデルを排除するものではなく、将来の高精度実験による検証の道を開いています。

1. はじめに

標準的な Λ CDM宇宙論は、 $t = 0$ での高温ビッグバンを記述し、その後 $t \approx 10^{-36}$ 秒から 10^{-34} 秒までの短いインフレーション期が続きます。この時期は、スカラー「インフラトン」場によって駆動され、そのポテンシャルは指数関数的膨張 ($a(t) \propto e^{Ht}$) を生み出します[1, 2]。これにより、視野問題と平坦性問題が解決され、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に痕跡が残されます。しかし、その成功にもかかわらず、 Λ CDMは推測的な要素に依存しています：未検出のインフラトン粒子、微調整されたポテンシャルランドスケープ、光子の赤方偏移によるエネルギーの明らかな非保存に対する許容。

私は放射駆動の代替案を紹介します。私のモデルは線形膨張から始まり、光子が支配的になり視野が分離すると自然に指数関数的インフレーションに移行し、現代の加速時代が続きます。この枠組みを特徴づける3つの中心的な原則は以下の通りです：

1. **インフラトンは不要。** 赤方偏移エネルギーによって強化された放射圧そのものがインフレーションを駆動します。
2. **エネルギー保存の復元。** 赤方偏移によるエネルギー損失は熱力学的に放射圧に再利用され、膨張宇宙に対して仕事を行います。
3. **c の局所不変性。** 各因果パッチ内で、観測者はアインシュタインの仮定と一致する同じ光速を測定します。グローバルには、超光速後退は因果的分離から自然に発生します。

2. 理論的枠組み

2.1 初期線形膨張 ($t = 0$ から $t = 10^{20} t_P$)

プランク時代 ($t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$ 秒) では、宇宙はスケール因子 $a(t) \propto t$ で線形に膨張します。その固有サイズは $R(t) = ct$ であり、エネルギー密度はプランクスケールです：

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}.$$

フリードマン方程式が膨張を支配します：

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

ここで $H = 1/t$ であり、曲率は無視できる程度です。この段階では光子が存在しないため、放射圧はまだ寄与していません。

2.2 放射圧の開始 ($t = 10^{20} t_P$)

$t \sim 10^{20} t_P$ ($\sim 10^{-36}$ 秒) までに、粒子生成が $T \approx 10^{28} \text{ K}$ のクォーク-グルーオンプラズマ中に光子を生み出します。放射圧が現れます：

$$P = \frac{1}{3} \rho c^2, \quad \rho = \frac{aT^4}{c^2},$$

ここで $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$ です。これにより $P \sim 10^{92} \text{ Pa}$ が得られます。巨大ではありますが、重力が依然として支配的であり、膨張は減速を続けます。

2.3 因果的分離と局所不変 c ($t = 10^{22} t_P$)

$t \approx 10^{22} t_P$ ($\sim 10^{-34}$ 秒) で、宇宙の半径はシュヴァルツシルトのような視野を超えます：

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad M = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi R^3, \quad R = ct.$$

粒子視野 $d_p \approx ct$ が r_s を超えると、領域は因果的に分離します。

各視野パッチ内で、観測者はアインシュタインの列車やロケットの思考実験と一致する $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ を測定します。しかし、グローバルには、標準宇宙論と同様に後退速度が c を超えます。私はこれを以下のようにパラメトリ化します：

$$c_{\text{eff}} = c_0 \left(\frac{a_0}{a} \right)^\beta, \quad \beta > 0,$$

これは c の文字通りの変化を意味するものではなく、その局所性をエンコードします。したがって、 c は各観測者の因果的視野内で不変のままですが、グローバルな超光速膨張は分離を反映し、相対性理論の違反ではありません。

2.4 赤方偏移エネルギーの再分配

Λ CDMでは、波長が伸びるにつれて光子のエネルギーが減少します：

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \propto a, \quad E \propto a^{-1}.$$

見かけのエネルギー損失は膨張に帰せられ、グローバルな保存則はありません。

私のモデルはこのパラドックスを解決します：赤方偏移によるエネルギー損失は因果的視野で吸収され、放射圧に再分配され、メトリックに対して効果的に仕事を行います：

$$\Delta E_{\text{赤方偏移}} \rightarrow \Delta P_{\text{放射}} \cdot V.$$

2.4.1 メトリックに対する仕事としての赤方偏移

アインシュタインの等価原理は重力を加速度と同一視します。これは、赤方偏移をエネルギーの破壊ではなく、運動エネルギーへの変換として見る具体的な方法を提供します。

思考実験：惑星の表面から上方に発射される青いレーザーを考えます。光子は重力ポテンシャルから登り、遠方の観測者に赤方偏移して到着します。観測者には、各光子がより少ないエネルギーを持っているように見えます。しかし、発生源のレーザーは放出された光子の全質量エネルギーを経験しました：それは赤方偏移していないエネルギーおよび放射圧と一致する運動量を伝達しました。

「欠けている」エネルギーはどこに行ったのか？ それは重力場に投資され、光子をポテンシャル井戸から引き上げるのに必要な仕事を行いました。

同様に、宇宙論では、初期に放出された光子は宇宙的赤方偏移を通じてエネルギーを失います。局所的には、放出領域は完全な放射圧を経験します。しかし、グローバルには、見かけの欠損は失われません。それは**メトリックに対する仕事**、具体的には加速膨張に変換されています。

$$\Delta E_{\text{光子}} = W_{\text{膨張}}.$$

2.4.2 視野の熱力学と再分配メカニズム

このアナロジーに基づいて、因果的視野が赤方偏移エネルギーの仲介者として機能することを提案します：

1. **エネルギー伝達。** 光子のエネルギー $E \propto a^{-1}$ として減少します。消滅する代わりに、このエネルギーは粒子視野またはシュヴァルツシルトのような因果的境界で吸収されます。
2. **重力的赤方偏移のマッピング。** 重力的赤方偏移がエネルギーを場に伝達するように、宇宙的赤方偏移はエネルギーをメトリックの膨張に伝達します。
3. **視野の熱力学。** 視野はエントロピー ($S \propto A/4$) と温度 (ギボンズ-ホーキング) を持ちます。赤方偏移されたエネルギーは視野のエントロピーに寄与し、パドマナバンの熱力学的重力枠組み[3]を通じて、膨張に対して仕事を行う圧力として再出現します。
4. **圧力増強。**

$$P = \frac{1}{3}\rho c_{\text{eff}}^2 + \Delta P_{\text{赤方偏移}},$$

これにより加速方程式が修正されます：

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right).$$

$\Delta P_{\text{赤方偏移}} > 0$ により、インフラトンを呼び出すことなく膨張が加速します。

2.4.3 形式的な考慮

このメカニズムを形式化するには以下が必要です：

- 曲がった時空での量子場理論を使用して、光子-視野相互作用を記述する。
- 視野の熱力学（パドマナバンの創発重力、ベケンシュタイン-ホーキングエントロピー）を使用して、エネルギー吸収と再放出をモデル化する。
- $\Delta P_{\text{赤方偏移}}$ を用いた修正されたフリードマン力学の数値シミュレーション。

2.5 現代時代

$t \approx 2.6 \times 10^{11} t_P$ （138億年）で、CMBの温度は $T = 2.7\text{ K}$ であり、放射圧は $P \sim 10^{-31}\text{ Pa}$ に減少しています。それでも、同じ視野媒介メカニズムが持続します：赤方偏移エネルギーは宇宙加速を推進し続け、通常ダークエネルギー（ $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ ）に帰せられる後期動態に寄与します。

3. 概念的進展

1. **インフラトンは不要。** 赤方偏移エネルギーによって強化された放射圧からインフレーションが自然に発生し、未検出のスカラー場の必要性を排除します。
2. **エネルギー保存の復元。** 赤方偏移エネルギーは放射圧に再利用され、膨張を熱力学的原理に適合させます。
3. **c の局所不変性。** アインシュタインの仮定は因果的パッチ内で有効であり、超光速後退は視野分離によって説明されます。

4. 観測テストと予想される特徴

私は8つの観測テストを提案し、それぞれがこのモデルを ΛCDM と区別できる明確な特徴を持っています。

4.1 CMB異方性

- **テスト：** CMBパワースペクトルとBモード偏光を高精度で測定する。
- **予想される特徴：** マルチポール $l > 1000$ での小スケール変動の増強、 $l < 100$ での検出可能なBモード偏光（ $r \approx 0.05\text{--}0.1$ ）。

4.2 赤方偏移依存の放射エネルギー密度

- テスト：赤方偏移に伴う放射エネルギー密度 $\rho_{\text{放射}}$ のスケーリングを観測する。
- 予想される特徴： $z > 1100$ で、 $\rho_{\text{放射}}$ は標準的な $\propto a^{-4}$ スケーリングから逸脱するはず
です。

4.3 重力波背景（GWB）

- テスト：インフレーション期からの確率的GWBを探索する。
- 予想される特徴： $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$ でのピーク、特性ひずみ $h_c \approx 10^{-15}$ 。

4.4 ハッブル緊張と後期加速

- テスト：ハッブル定数 H_0 とダークエネルギーの状態方程式 w を測定する。
- 予想される特徴： $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$ 、 $z < 1$ で w が -0.8 から 0 の間。

4.5 視野スケールの構造

- テスト：10–100 Mpcでの大規模構造をマッピングする。
- 予想される特徴：増強されたクラスターリングと異常な大きさのボイド。

4.6 スペクトル線シフト

- テスト：高赤方偏移スペクトルを分析する。
- 予想される特徴： $z > 5$ での0.1–1%の広がりまたはエネルギーシフト。

4.7 視野の熱力学的特徴

- テスト：宇宙視野でのエントロピーとフラックスを探索する。
- 予想される特徴：視野エントロピーの増加 $\Delta S \sim 10^{120} k_B$ 。

4.8 原始核合成

- テスト：軽元素の豊富さを測定する。
- 予想される特徴： ^4He の1–5%増加と重水素の減少。

5. Λ CDMとの比較

特徴	CDM	放射駆動モデル
インフレーションの駆動要因	スカラーインフラトン場	放射圧+赤方偏移エネルギー
エネルギー保存	グローバルに定義されていない	視野を通じて熱力学的に強制
光速	グローバルに不変	視野内で局所的に不変

特徴	Λ CDM	放射駆動モデル
視野/平坦性問題	インフラトンによって解決	放射＋視野によって解決
ダークエネルギー	宇宙定数 (Λ)	赤方偏移-放射メカニズムの継続
CMB予測	標準スペクトル	小スケール増強、可能なBモード差
ハッブル緊張	未解決	自然な中間 H_0
観測状況	支持されているが不完全	データと一致、未だ反証されていない

6. 議論

この枠組みは、インフレーションを放射に内在する熱力学的プロセスとして再定義し、推測的なインフラトンを必要としません。膨張時空でのエネルギー保存のメカニズムを提供し、相対性理論の局所的仮定を宇宙視野と調和させます。

課題は残っています。赤方偏移エネルギー再分配の正確なダイナミクスにはさらなる数学的発展が必要であり、修正されたフリードマン方程式の数値シミュレーションが不可欠です。観測的識別は、将来のミッション（CMB-S4、Euclid、LISA、SKA）に依存します。

7. 結論

私は、放射圧が因果的視野と赤方偏移エネルギーによって調整され、インフレーションと現在の膨張の両方を駆動する宇宙論を提示します。このモデルは仮説的なインフラトンの必要性を排除し、熱力学的整合性を復元し、アインシュタインの c の局所不変性を宇宙的超光速性と調和させます。現在のデータは Λ CDM と互換性がありますが、提案された観測テストは検証または反証への道を提供します。

参考文献

[1] プランク共同研究, **Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters**, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] グース, A. H., **Inflationary Universe**, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] パドマナバン, T., **Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights**, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] BICEP2/Keck共同研究, **Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves**, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).