

# Ein neues kosmologisches Modell: Strahlungsgetriebene Inflation mit lokalen kausalen Horizonten und Energieumverteilung durch Rotverschiebung

Ich schlage ein kosmologisches Modell vor, in dem die inflatorische Epoche durch Strahlungsdruck anstelle eines skalaren Inflatonfeldes angetrieben wird. Beginnend mit einer linearen Expansion in der Planck-Ära, geht das Universum bei  $t \approx 10^{22} t_P$  zur exponentiellen Inflation über, wenn sich der Raumzeit über die kausalen Horizonte hinaus ausdehnt und die Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) als lokal invariante Größe neu definiert wird. Es wird angenommen, dass die durch die Rotverschiebung von Photonen verlorene Energie in Strahlungsdruck umverteilt wird, wodurch die Inflation angetrieben und die Energieerhaltung in einem expandierenden Universum sichergestellt wird. Lokale Minkowski-Bereiche bewahren die Invarianz von  $c$ , lösen die Horizont- und Flachheitsprobleme und vereinen die spezielle Relativitätstheorie mit der kosmologischen überlichtschnellen Rezession. Es werden acht Beobachtungstests skizziert, mit erwarteten Signaturen im kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB), in Gravitationswellen und in der großräumigen Struktur. Aktuelle Daten stimmen mit  $\Lambda$ CDM überein, schließen dieses Modell jedoch nicht aus und lassen Raum für eine Validierung durch zukünftige hochpräzise Experimente.

## 1. Einführung

Die Standard- $\Lambda$ CDM-Kosmologie beschreibt einen heißen Urknall bei  $t = 0$ , gefolgt von einer kurzen inflatorischen Periode von  $t \approx 10^{-36}$  s bis  $10^{-34}$  s. Diese Epoche wird durch ein skalares „Inflaton“-Feld angetrieben, dessen Potenzial eine exponentielle Expansion ( $a(t) \propto e^{Ht}$ ) erzeugt [1, 2]. Dies löst die Horizont- und Flachheitsprobleme und hinterlässt Spuren im kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB). Trotz ihres Erfolgs hängt  $\Lambda$ CDM von spekulativen Elementen ab: einem unentdeckten Inflaton-Teilchen, fein abgestimmten Potenziallandschaften und einer Toleranz gegenüber der scheinbaren Nicht-Erhaltung von Energie aufgrund der Rotverschiebung von Photonen.

Ich stelle eine strahlungsgetriebene Alternative vor. Mein Modell beginnt mit einer linearen Expansion, geht natürlich in eine exponentielle Inflation über, sobald Photonen dominieren und Horizonte sich trennen, und setzt sich in die heutige beschleunigte Ära fort. Drei zentrale Prinzipien zeichnen diesen Rahmen aus:

1. **Kein Inflaton erforderlich.** Der Strahlungsdruck selbst, verstärkt durch die Energie der Rotverschiebung, treibt die Inflation an.
2. **Wiederherstellung der Energieerhaltung.** Die durch Rotverschiebung verlorene Energie wird thermodynamisch in Strahlungsdruck recycelt, der Arbeit am expandieren-

den Universum leistet.

3. **Lokale Invarianz von  $c$ .** Innerhalb jedes kausalen Bereichs messen Beobachter die gleiche Lichtgeschwindigkeit, in Übereinstimmung mit Einsteins Postulaten. Global entstehen überlichtschnelle Rezessionen auf natürliche Weise durch kausale Trennung.

## 2. Theoretischer Rahmen

### 2.1 Frühe lineare Expansion ( $t = 0$ bis $t = 10^{20} t_P$ )

In der Planck-Ära ( $t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$ ) expandiert das Universum linear mit einem Skalierungsfaktor  $a(t) \propto t$ . Seine tatsächliche Größe beträgt  $R(t) = ct$ , und die Energiedichte liegt im Planck-Maßstab:

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

Die Friedmann-Gleichung regelt die Expansion:

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

mit  $H = 1/t$  und vernachlässigbarer Krümmung. In dieser Phase sind keine Photonen vorhanden, sodass der Strahlungsdruck noch keinen Beitrag leistet.

### 2.2 Beginn des Strahlungsdrucks ( $t = 10^{20} t_P$ )

Bei  $t \sim 10^{20} t_P$  ( $\sim 10^{-36} \text{ s}$ ) erzeugt die Teilchenbildung Photonen in einem Quark-Gluon-Plasma bei  $T \approx 10^{28} \text{ K}$ . Der Strahlungsdruck entsteht:

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

mit  $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$ . Dies ergibt  $P \sim 10^{92} \text{ Pa}$ . Obwohl enorm, dominiert die Gravitation weiterhin, und die Expansion bleibt verzögernd.

### 2.3 Kausale Trennung und lokal invariante $c$ ( $t = 10^{22} t_P$ )

Bei  $t \approx 10^{22} t_P$  ( $\sim 10^{-34} \text{ s}$ ) übersteigt der Radius des Universums seinen Schwarzschild-ähnlichen Horizont:

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

Wenn der Teilchenhorizont  $d_p \approx ct$  den  $r_s$  übersteigt, trennen sich die Regionen kausal.

Innerhalb jedes Horizontbereichs messen Beobachter  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , in Übereinstimmung mit Einsteins Gedankenexperimenten mit Zug und Rakete. Global übersteigen die Rezessionsgeschwindigkeiten jedoch  $c$ , wie in der Standardkosmologie. Ich parametrierte dies als:

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

was keine wörtliche Variation von  $c$  impliziert, sondern dessen Lokalität kodiert. Somit bleibt  $c$  für jeden Beobachter innerhalb seines kausalen Horizonts invariant, während die globale überlichtschnelle Expansion die Trennung widerspiegelt, nicht eine Verletzung der Relativitätstheorie.

## 2.4 Energieumverteilung durch Rotverschiebung

In  $\Lambda$ CDM nimmt die Photonenenergie ab, wenn sich die Wellenlängen dehnen:

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

Der scheinbare Energieverlust wird der Expansion zugeschrieben, ohne globales Erhaltungsgesetz.

Mein Modell löst dieses Paradoxon: Die durch Rotverschiebung verlorene Energie wird an kausalen Horizonten absorbiert und in Strahlungsdruck umverteilt, der effektiv Arbeit an der Metrik leistet:

$$\Delta E_{\text{rotverschiebung}} \rightarrow \Delta P_{\text{strahlung}} \cdot V.$$

### 2.4.1 Rotverschiebung als Arbeit an der Metrik

Einsteins Äquivalenzprinzip identifiziert Gravitation mit Beschleunigung. Dies bietet eine konkrete Möglichkeit, Rotverschiebung nicht als Zerstörung von Energie, sondern als deren Umwandlung in kinetische Arbeit zu sehen.

**Gedankenexperiment:** Stellen Sie sich einen blauen Laser vor, der von der Oberfläche eines Planeten nach oben geschossen wird. Die Photonen klettern aus dem Gravitationspotenzial und erreichen einen entfernten Beobachter rotverschoben. Für den Beobachter scheint jedes Photon weniger Energie zu tragen. Doch der Laser an der Quelle erlebte die volle Masse-Energie der emittierten Photonen: Er übertrug Impuls entsprechend ihrer nicht rotverschobenen Energie und Strahlungsdruck.

Wo ist die „fehlende“ Energie geblieben? Sie wurde in das Gravitationsfeld investiert, um die Arbeit zu leisten, die notwendig ist, um die Photonen aus dem Potenzial herauszuheben.

Analog dazu verlieren Photonen, die in frühen Zeiten emittiert wurden, in der Kosmologie durch kosmologische Rotverschiebung Energie. Lokal erfährt die emittierende Region ihren vollen Strahlungsdruck. Global wird der scheinbare Verlust jedoch nicht verloren; er wurde in **Arbeit an der Metrik** umgewandelt – insbesondere in beschleunigte Expansion.

$$\Delta E_{\text{photon}} = W_{\text{expansion}}.$$

### 2.4.2 Horizont-Thermodynamik und Umverteilungsmechanismus

Aufbauend auf dieser Analogie schlage ich vor, dass kausale Horizonte als Vermittler der Rotverschiebungsenergie fungieren:

1. **Energietransfer.** Die Photonenenergie nimmt ab als  $E \propto a^{-1}$ . Anstatt zu verschwinden, wird diese Energie an Teilchenhorizonten oder Schwarzschild-ähnlichen kausalen Grenzen absorbiert.
2. **Gravitative Rotverschiebungskartierung.** So wie gravitative Rotverschiebung Energie in das Feld überträgt, überträgt kosmologische Rotverschiebung Energie in die Expansion der Metrik.
3. **Horizont-Thermodynamik.** Horizonte besitzen Entropie ( $S \propto A/4$ ) und Temperatur (Gibbons-Hawking). Rotverschobene Energie trägt zur Horizontentropie bei und erscheint über den thermodynamischen Gravitationsrahmen von Padmanabhan [3] wieder als Druck, der Arbeit an der Expansion leistet.
4. **Druckverstärkung.**

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

was die Beschleunigungsgleichung modifiziert:

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

Mit  $\Delta P_{\text{rotverschiebung}} > 0$  beschleunigt die Expansion, ohne ein Inflaton zu benötigen.

### 2.4.3 Formale Überlegungen

Die Formalisierung dieses Mechanismus erfordert:

- Quantenfeldtheorie in gekrümmter Raumzeit zur Beschreibung von Photon-Horizont-Wechselwirkungen.
- Horizont-Thermodynamik (Padmanabhans emergente Gravitation, Bekenstein-Hawking-Entropie) zur Modellierung der Energieabsorption und -wiederausstrahlung.
- Numerische Simulationen der modifizierten Friedmann-Dynamik mit  $\Delta P_{\text{rotverschiebung}}$ .

## 2.5 Moderne Ära

Bei  $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$  (13,8 Gyr) beträgt die CMB-Temperatur  $T = 2.7 \text{ K}$ , und der Strahlungsdruck ist auf  $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$  gesunken. Dennoch bleibt derselbe horizontvermittelte Mechanismus bestehen: Rotverschiebungsenergie treibt weiterhin die kosmische Beschleunigung an und trägt zur spätzeitigen Dynamik bei, die normalerweise der dunklen Energie zugeschrieben wird ( $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ ).

## 3. Konzeptionelle Fortschritte

1. **Kein Inflaton erforderlich.** Die Inflation entsteht natürlich aus Strahlungsdruck, der durch Rotverschiebungsenergie verstärkt wird, wodurch die Notwendigkeit eines un-

entdeckten skalaren Feldes entfällt.

2. **Wiederherstellung der Energieerhaltung.** Rotverschiebungsenergie wird in Strahlungsdruck recycelt, wodurch die Expansion mit thermodynamischen Prinzipien in Einklang gebracht wird.
3. **Lokale Invarianz von  $c$ .** Einsteins Postulat gilt innerhalb kausaler Bereiche, während überlichtschnelle Rezession durch Horizonttrennung erklärt wird.

## 4. Beobachtungstests und erwartete Signaturen

Ich schlage acht Beobachtungstests vor, jeder mit unterschiedlichen Signaturen, die dieses Modell von  $\Lambda$ CDM unterscheiden könnten.

### 4.1 CMB-Anisotropien

- **Test:** Messung des CMB-Leistungsspektrums und der B-Modus-Polarisation mit hoher Präzision.
- **Erwartete Signatur:** Verstärkte kleinräumige Fluktuationen bei Multipolen  $l > 1000$ , zusammen mit detektierbarer B-Modus-Polarisation bei  $l < 100$  ( $r \approx 0.05$ – $0.1$ ).

### 4.2 Rotverschiebungsabhängige Strahlungsenergiedichte

- **Test:** Beobachtung der Skalierung der Strahlungsenergiedichte  $\rho_{\text{strahlung}}$  mit Rotverschiebung.
- **Erwartete Signatur:** Bei  $z > 1100$  sollte  $\rho_{\text{strahlung}}$  von der standardmäßigen Skalierung  $\propto a^{-4}$  abweichen.

### 4.3 Gravitationswellenhintergrund (GWB)

- **Test:** Suche nach einem stochastischen GWB aus der inflatorischen Epoche.
- **Erwartete Signatur:** Ein Peak bei  $\sim 10^{-9}$  Hz, mit charakteristischer Dehnung  $h_c \approx 10^{-15}$ .

### 4.4 Hubble-Spannung und spätzeitige Beschleunigung

- **Test:** Messung der Hubble-Konstante  $H_0$  und des Zustandsgleichungsparameters der dunklen Energie  $w$ .
- **Erwartete Signatur:**  $H_0 \approx 70$  km/s/Mpc, mit  $w$  zwischen  $-0.8$  und  $0$  bei  $z < 1$ .

### 4.5 Struktur auf Horizontskala

- **Test:** Kartierung der großräumigen Struktur bei 10–100 Mpc.
- **Erwartete Signatur:** Verstärkte Clusterbildung und anomal große Leerräume.

### 4.6 Spektrallinienverschiebungen

- **Test:** Analyse von Spektren bei hoher Rotverschiebung.
- **Erwartete Signatur:** Verbreiterung oder Energieverschiebungen von 0.1–1% bei  $z > 5$ .

## 4.7 Thermodynamische Horizontsignaturen

- **Test:** Untersuchung von Entropie und Fluss an kosmischen Horizonten.
- **Erwartete Signatur:** Horizontentropiewachstum  $\Delta S \sim 10^{120} k_B$ .

## 4.8 Primordiale Nukleosynthese

- **Test:** Messung der Häufigkeit leichter Elemente.
- **Erwartete Signatur:** Anstieg von  $^4\text{He}$  um 1–5% und Abnahme von Deuterium.

## 5. Vergleich mit $\Lambda\text{CDM}$

Merkmal	$\Lambda\text{CDM}$	Strahlungsgetriebenes Modell
Inflationsantrieb	Skalares Inflatonfeld	Strahlungsdruck + Rotverschiebungsenergie
Energieerhaltung	Nicht global definiert	Thermodynamisch durchgesetzt über Horizonte
Lichtgeschwindigkeit	Global invariant	Lokal invariant innerhalb von Horizonten
Horizont-/Flachheitsprobleme	Durch Inflaton gelöst	Durch Strahlung + Horizonte gelöst
Dunkle Energie	Kosmologische Konstante ( $\Lambda$ )	Fortsetzung des Rotverschiebungs-Strahlungsmechanismus
CMB-Vorhersagen	Standard-Spektrum	Verstärkung kleiner Skalen, mögliche Unterschiede im B-Modus
Hubble-Spannung	Ungelöst	Natürlicher mittlerer $H_0$
Beobachtungsstatus	Unterstützt, aber unvollständig	Konsistent mit Daten, noch nicht widerlegt

## 6. Diskussion

Dieser Rahmen stellt die Inflation als einen thermodynamischen Prozess dar, der der Strahlung innewohnt und kein spekulatives Inflaton erfordert. Er bietet einen Mechanismus zur Energieerhaltung in expandierender Raumzeit und vereint die lokalen Postulate der Relativitätstheorie mit kosmologischen Horizonten.

Herausforderungen bleiben bestehen. Die genaue Dynamik der Energieumverteilung durch Rotverschiebung erfordert weitere mathematische Entwicklung, und numerische Simulationen der modifizierten Friedmann-Gleichungen sind unerlässlich. Die Unterscheidung durch Beobachtungen wird von zukünftigen Missionen abhängen (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

## 7. Schlussfolgerung

Ich präsentiere eine Kosmologie, in der Strahlungsdruck, moduliert durch kausale Horizonte und Rotverschiebungsenergie, sowohl die Inflation als auch die heutige Expansion

antreibt. Dieses Modell eliminiert die Notwendigkeit eines hypothetischen Inflaton, stellt die thermodynamische Konsistenz wieder her und vereint Einsteins lokale Invarianz von  $c$  mit kosmologischer Überlichtgeschwindigkeit. Aktuelle Daten sind mit  $\Lambda$ CDM kompatibel, aber die vorgeschlagenen Beobachtungstests bieten einen Weg zur Validierung oder Widerlegung.

## Referenzen

[1] Planck Collaboration, *Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters*, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., *Inflationary Universe*, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., *Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights*, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] BICEP2/Keck Collaboration, *Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves*, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).