

# Un nuovo modello cosmologico: Inflazione guidata dalla radiazione con orizzonti causali locali e redistribuzione dell'energia di redshift

Propongo un modello cosmologico in cui l'epoca dell'inflazione è guidata dalla pressione di radiazione anziché da un campo scalare di inflatone. Partendo da un'espansione lineare nell'epoca di Planck, l'universo passa a un'inflazione esponenziale a  $t \approx 10^{22} t_P$  quando lo spazio-tempo si estende oltre gli orizzonti causali, ridefinendo la velocità della luce ( $c$ ) come parametro localmente invariante. Si ipotizza che l'energia persa a causa del redshift dei fotoni venga ridistribuita nella pressione di radiazione, alimentando così l'inflazione e garantendo la conservazione dell'energia in un universo in espansione. Le patch locali di Minkowski preservano l'invarianza di  $c$ , affrontando i problemi dell'orizzonte e della piattezza, conciliando la relatività speciale con la recessione superluminale cosmologica. Sono delineati otto test osservativi, con firme attese nel fondo cosmico a microonde (CMB), nelle onde gravitazionali e nella struttura su larga scala. I dati attuali sono in linea con  $\Lambda$ CDM ma non escludono questo modello, lasciando aperta la strada per una validazione con futuri esperimenti ad alta precisione.

## 1. Introduzione

La cosmologia standard  $\Lambda$ CDM descrive un Big Bang caldo a  $t = 0$ , seguito da un breve periodo di inflazione da  $t \approx 10^{-36}$  s a  $10^{-34}$  s. Questa epoca è guidata da un campo scalare "inflatone", il cui potenziale produce un'espansione esponenziale ( $a(t) \propto e^{Ht}$ ) [1, 2]. Questo risolve i problemi dell'orizzonte e della piattezza e lascia impronte nel fondo cosmico a microonde (CMB). Nonostante il suo successo,  $\Lambda$ CDM dipende da ingredienti speculativi: una particella di inflatone non rilevata, paesaggi potenziali finemente regolati e una tolleranza per l'apparente non conservazione dell'energia dovuta al redshift dei fotoni.

Introduco un'alternativa guidata dalla radiazione. Il mio modello inizia con un'espansione lineare, passa naturalmente a un'inflazione esponenziale quando i fotoni dominano e gli orizzonti si disconnettono, e continua nell'era di accelerazione moderna. Tre principi centrali distinguono questo quadro:

1. **Nessun inflatone richiesto.** La pressione di radiazione stessa, potenziata dall'energia del redshift, guida l'inflazione.
2. **Conservazione dell'energia ristabilita.** L'energia persa a causa del redshift viene riciclata termodinamicamente nella pressione di radiazione, compiendo lavoro sull'universo in espansione.

3. **Invarianza locale di  $c$ .** In ogni patch causale, gli osservatori misurano la stessa velocità della luce, coerente con i postulati di Einstein. Globalmente, la recessione superluminale emerge naturalmente dalla disconnessione causale.

## 2. Quadro teorico

### 2.1 Espansione lineare precoce ( $t = 0$ a $t = 10^{20} t_P$ )

Nell'epoca di Planck ( $t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$  s), l'universo si espande linearmente con un fattore di scala  $a(t) \propto t$ . La sua dimensione propria è  $R(t) = ct$ , e la densità di energia è su scala di Planck:

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

L'equazione di Friedmann governa l'espansione:

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

con  $H = 1/t$  e curvatura trascurabile. In questa fase, i fotoni sono assenti, quindi la pressione di radiazione non contribuisce ancora.

### 2.2 Inizio della pressione di radiazione ( $t = 10^{20} t_P$ )

A  $t \sim 10^{20} t_P$  ( $\sim 10^{-36}$  s), la formazione di particelle produce fotoni in un plasma quark-gluoni a  $T \approx 10^{28}$  K. Emerge la pressione di radiazione:

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

con  $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$ . Ciò produce  $P \sim 10^{92}$  Pa. Sebbene enorme, la gravità domina ancora, e l'espansione rimane decelerante.

### 2.3 Disconnessione causale e invarianza locale di $c$ ( $t = 10^{22} t_P$ )

A  $t \approx 10^{22} t_P$  ( $\sim 10^{-34}$  s), il raggio dell'universo supera il suo orizzonte simile a Schwarzschild:

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

Quando l'orizzonte delle particelle  $d_p \approx ct$  supera  $r_s$ , le regioni si disconnettono causalmente.

All'interno di ogni patch di orizzonte, gli osservatori misurano  $c = 3 \times 10^8$  m/s, coerente con gli esperimenti mentali di Einstein sul treno e sul razzo. Globalmente, tuttavia, le velocità di recessione superano  $c$ , come nella cosmologia standard. Parametizziamo questo come:

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

non implicando una variazione letterale di  $c$ , ma codificando la sua località. Pertanto,  $c$  rimane invariante per qualsiasi osservatore all'interno del proprio orizzonte causale, mentre l'espansione superluminale globale riflette la disconnessione, non una violazione della relatività.

## 2.4 Ridistribuzione dell'energia di redshift

In  $\Lambda$ CDM, l'energia dei fotoni diminuisce man mano che le lunghezze d'onda si allungano:

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

La perdita apparente di energia è attribuita all'espansione, senza una legge di conservazione globale.

Il mio modello risolve questo paradosso: l'energia persa a causa del redshift viene assorbita agli orizzonti causali e ridistribuita nella pressione di radiazione, compiendo effettivamente lavoro sulla metrica:

$$\Delta E_{\text{redshift}} \rightarrow \Delta P_{\text{radiazione}} \cdot V.$$

### 2.4.1 Redshift come lavoro sulla metrica

Il principio di equivalenza di Einstein identifica la gravità con l'accelerazione. Questo fornisce un modo concreto per vedere il redshift non come distruzione di energia, ma come sua conversione in lavoro cinetico.

**Esperimento mentale:** Considera un laser blu emesso verso l'alto dalla superficie di un pianeta. I fotoni salgono fuori dal potenziale gravitazionale e arrivano spostati verso il rosso a un osservatore lontano. Per l'osservatore, ogni fotone sembra portare meno energia. Tuttavia, il laser alla fonte ha sperimentato l'intera energia-massa dei fotoni emessi: ha trasferito un momento coerente con la loro energia non spostata e la pressione di radiazione.

Dove è finita l'energia "mancante"? È stata investita nel campo gravitazionale, compiendo il lavoro necessario per sollevare i fotoni fuori dal pozzo di potenziale.

Per analogia, in cosmologia, i fotoni emessi in tempi precoci perdono energia attraverso il redshift cosmologico. Localmente, la regione emittente sperimenta la loro piena pressione di radiazione. Ma globalmente, il deficit apparente non è perso; è stato convertito in **lavoro sulla metrica** - specificamente, in un'espansione accelerata.

$$\Delta E_{\text{fotone}} = W_{\text{espansione}}.$$

### 2.4.2 Termodinamica degli orizzonti e meccanismo di redistribuzione

Basandomi su questa analogia, propongo che gli orizzonti causali agiscano come mediatori dell'energia di redshift:

1. **Trasferimento di energia.** L'energia dei fotoni diminuisce come  $E \propto a^{-1}$ . Invece di svanire, questa energia viene assorbita agli orizzonti delle particelle o ai confini causali simili a Schwarzschild.
2. **Mappatura del redshift gravitazionale.** Proprio come il redshift gravitazionale trasferisce energia al campo, il redshift cosmologico trasferisce energia all'espansione della metrica.
3. **Termodinamica degli orizzonti.** Gli orizzonti possiedono entropia ( $S \propto A/4$ ) e temperatura (Gibbons-Hawking). L'energia spostata contribuisce all'entropia dell'orizzonte, e attraverso il quadro della gravità termodinamica di Padmanabhan [3], riemerge come pressione che compie lavoro sull'espansione.
4. **Amplificazione della pressione.**

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

modificando l'equazione di accelerazione:

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

Con  $\Delta P_{\text{redshift}} > 0$ , l'espansione accelera senza invocare un inflatone.

### 2.4.3 Considerazioni formali

Per formalizzare questo meccanismo è necessario:

- Teoria dei campi quantistici in spazio-tempo curvo per descrivere le interazioni fotone-orizzonte.
- Termodinamica degli orizzonti (gravità emergente di Padmanabhan, entropia di Bekenstein-Hawking) per modellare l'assorbimento e la riemissione di energia.
- Simulazioni numeriche delle dinamiche di Friedmann modificate con  $\Delta P_{\text{redshift}}$ .

## 2.5 Era moderna

A  $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$  (13,8 miliardi di anni), la temperatura del CMB è  $T = 2.7 \text{ K}$ , e la pressione di radiazione è diminuita a  $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$ . Tuttavia, lo stesso meccanismo mediato dagli orizzonti persiste: l'energia di redshift continua ad alimentare l'accelerazione cosmica, contribuendo alle dinamiche tardive generalmente attribuite all'energia oscura ( $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ ).

## 3. Avanzamenti concettuali

1. **Nessun inflatone richiesto.** L'inflazione emerge naturalmente dalla pressione di radiazione potenziata dall'energia di redshift, eliminando la necessità di un campo scalare non rilevato.

2. **Conservazione dell'energia ristabilita.** L'energia di redshift viene riciclata nella pressione di radiazione, allineando l'espansione con i principi termodinamici.
3. **Invarianza locale di  $c$ .** Il postulato di Einstein rimane valido all'interno delle patch causali, mentre la recessione superluminale è spiegata dalla separazione degli orizzonti.

## 4. Test osservativi e firme attese

Propongo otto test osservativi, ciascuno con firme distinte che potrebbero differenziare questo modello da  $\Lambda$ CDM.

### 4.1 Anisotropie del CMB

- **Test:** Misurare lo spettro di potenza del CMB e la polarizzazione in modo B con alta precisione.
- **Firma attesa:** Fluttuazioni amplificate su piccola scala a multipoli  $l > 1000$ , insieme a una polarizzazione in modo B rilevabile a  $l < 100$  ( $r \approx 0.05-0.1$ ).

### 4.2 Densità di energia di radiazione dipendente dal redshift

- **Test:** Osservare il ridimensionamento della densità di energia di radiazione  $\rho_{\text{radiazione}}$  con il redshift.
- **Firma attesa:** A  $z > 1100$ ,  $\rho_{\text{radiazione}}$  dovrebbe deviare dal ridimensionamento standard  $\propto a^{-4}$ .

### 4.3 Fondo di onde gravitazionali (GWB)

- **Test:** Cercare un fondo di onde gravitazionali stocastico dall'epoca dell'inflazione.
- **Firma attesa:** Un picco a  $\sim 10^{-9}$  Hz, con tensione caratteristica  $h_c \approx 10^{-15}$ .

### 4.4 Tensione di Hubble e accelerazione tardiva

- **Test:** Misurare la costante di Hubble  $H_0$  e l'equazione di stato dell'energia oscura  $w$ .
- **Firma attesa:**  $H_0 \approx 70$  km/s/Mpc, con  $w$  tra  $-0.8$  e  $0$  a  $z < 1$ .

### 4.5 Struttura su scala dell'orizzonte

- **Test:** Mappare la struttura su larga scala a 10–100 Mpc.
- **Firma attesa:** Aggregazione amplificata e vuoti anormalmente grandi.

### 4.6 Spostamenti delle linee spettrali

- **Test:** Analizzare gli spettri ad alto redshift.
- **Firma attesa:** Allargamento o spostamenti energetici dello 0,1–1% a  $z > 5$ .

### 4.7 Firme termodinamiche degli orizzonti

- **Test:** Sondare l'entropia e il flusso agli orizzonti cosmici.

- **Firma attesa:** Crescita dell'entropia dell'orizzonte  $\Delta S \sim 10^{120} k_B$ .

## 4.8 Nucleosintesi primordiale

- **Test:** Misurare le abbondanze degli elementi leggeri.
- **Firma attesa:** Aumento dell'1-5% di  $^4\text{He}$  e diminuzione del deuterio.

## 5. Confronto con $\Lambda\text{CDM}$

Caratteristica	$\Lambda\text{CDM}$	Modello guidato dalla radiazione
Motore dell'inflazione	Campo scalare di inflatone	Pressione di radiazione + energia di redshift
Conservazione dell'energia	Non definita globalmente	Imposta termodinamicamente tramite gli orizzonti
Velocità della luce	Globalmente invariante	Localmente invariante all'interno degli orizzonti
Problemi dell'orizzonte/piattezza	Risolti dall'inflatone	Risolti da radiazione + orizzonti
Energia oscura	Costante cosmologica ( $\Lambda$ )	Continuazione del meccanismo radiazione-redshift
Previsioni CMB	Spettro standard	Amplificazioni su piccola scala, possibili differenze in modo B
Tensione di Hubble	Non risolta	$H_0$ intermedio naturale
Stato osservativo	Supportato ma incompleto	Coerente con i dati, non ancora falsificato

## 6. Discussione

Questo quadro riformula l'inflazione come un processo termodinamico intrinseco alla radiazione, senza richiedere un inflatone speculativo. Fornisce un meccanismo per la conservazione dell'energia nello spazio-tempo in espansione e concilia i postulati locali della relatività con gli orizzonti cosmologici.

Rimangono delle sfide. La dinamica esatta della redistribuzione dell'energia di redshift richiede ulteriori sviluppi matematici, e le simulazioni numeriche delle equazioni di Friedmann modificate sono essenziali. La discriminazione osservativa dipenderà da future missioni (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

## 7. Conclusione

Presento una cosmologia in cui la pressione di radiazione, modulata dagli orizzonti causali e dall'energia di redshift, guida sia l'inflazione che l'espansione attuale. Questo modello elimina la necessità di un inflatone ipotetico, ristabilisce la coerenza termodinamica e concilia l'invarianza locale di  $c$  di Einstein con la superluminalità cosmologica. I dati attuali sono compatibili con  $\Lambda\text{CDM}$ , ma i test osservativi proposti offrono un percorso per la validazione o la falsificazione.

## Riferimenti

[1] Collaborazione Planck, *Planck 2018 Results. VI. Parametri cosmologici*, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., *Universo inflazionario*, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., *Aspetti termodinamici della gravità: nuove prospettive*, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] Collaborazione BICEP2/Keck, *Migliori vincoli sulle onde gravitazionali primordiali*, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).