

Un nuevo modelo cosmológico: Inflación impulsada por radiación con horizontes causales locales y redistribución de energía por desplazamiento al rojo

Propongo un modelo cosmológico en el que la época inflacionaria es impulsada por la presión de la radiación en lugar de un campo escalar de inflatón. Comenzando con una expansión lineal en la época de Planck, el universo transita a una inflación exponencial en $t \approx 10^{22} t_P$ a medida que el espacio-tiempo se extiende más allá de los horizontes causales, redefiniendo la velocidad de la luz (c) como un parámetro localmente invariante. Se plantea que la energía perdida por el desplazamiento al rojo de los fotones se redistribuye en presión de radiación, alimentando así la inflación y asegurando la conservación de energía en un universo en expansión. Los parches locales de Minkowski preservan la invariancia de c , abordando los problemas del horizonte y de la planitud, mientras reconcilan la relatividad especial con la recesión superlumínica cosmológica. Se delinean ocho pruebas observacionales, con firmas esperadas en el fondo cósmico de microondas (CMB), ondas gravitacionales y estructuras a gran escala. Los datos actuales se alinean con Λ CDM, pero no excluyen este modelo, dejando abierta la posibilidad de validación con futuros experimentos de alta precisión.

1. Introducción

La cosmología estándar Λ CDM describe un Big Bang caliente en $t = 0$, seguido por un breve período inflacionario desde $t \approx 10^{-36}$ s hasta 10^{-34} s. Esta época está impulsada por un campo escalar “inflatón”, cuyo potencial produce una expansión exponencial ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2]. Esto resuelve los problemas del horizonte y de la planitud y deja huellas en el fondo cósmico de microondas (CMB). Sin embargo, a pesar de su éxito, Λ CDM depende de ingredientes especulativos: una partícula inflatón no detectada, paisajes potenciales finamente ajustados y una tolerancia a la aparente no conservación de energía debido al desplazamiento al rojo de los fotones.

Introduzco una alternativa impulsada por radiación. Mi modelo comienza con una expansión lineal, transita naturalmente a una inflación exponencial una vez que los fotones dominan y los horizontes se desconectan, y continúa en la era actual de aceleración. Tres principios centrales distinguen este marco:

1. **No se requiere inflatón.** La presión de la radiación misma, potenciada por la energía del desplazamiento al rojo, impulsa la inflación.
2. **Conservación de energía restaurada.** La energía perdida por el desplazamiento al rojo se recicla termodinámicamente en presión de radiación, realizando trabajo en el

universo en expansión.

3. **Invariancia local de c .** Dentro de cada parche causal, los observadores miden la misma velocidad de la luz, consistente con los postulados de Einstein. Globalmente, la recesión superlumínica surge naturalmente de la desconexión causal.

2. Marco teórico

2.1 Expansión lineal temprana ($t = 0$ a $t = 10^{20} t_P$)

En la época de Planck ($t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$ s), el universo se expande linealmente con un factor de escala $a(t) \propto t$. Su tamaño propio es $R(t) = ct$, y la densidad de energía está en la escala de Planck:

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

La ecuación de Friedmann rige la expansión:

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

con $H = 1/t$ y una curvatura insignificante. En esta etapa, los fotones están ausentes, por lo que la presión de radiación aún no contribuye.

2.2 Inicio de la presión de radiación ($t = 10^{20} t_P$)

En $t \sim 10^{20} t_P$ ($\sim 10^{-36}$ s), la formación de partículas produce fotones en un plasma de quarks-gluones a $T \approx 10^{28}$ K. Surge la presión de radiación:

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

con $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$. Esto da como resultado $P \sim 10^{92}$ Pa. Aunque enorme, la gravedad aún domina, y la expansión permanece desacelerada.

2.3 Desconexión causal e invariancia local de c ($t = 10^{22} t_P$)

En $t \approx 10^{22} t_P$ ($\sim 10^{-34}$ s), el radio del universo excede su horizonte tipo Schwarzschild:

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

Cuando el horizonte de partículas $d_p \approx ct$ supera r_s , las regiones se desconectan causalmente.

Dentro de cada parche de horizonte, los observadores miden $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, consistente con los experimentos mentales de Einstein del tren y el cohete. Sin embargo, globalmente, las velocidades de recesión superan c , como en la cosmología estándar. Parametrizo esto como:

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

sin implicar una variación literal de c , sino codificando su localidad. Así, c permanece invariante para cualquier observador dentro de su horizonte causal, mientras que la expansión superlumínica global refleja la desconexión, no una violación de la relatividad.

2.4 Redistribución de energía por desplazamiento al rojo

En Λ CDM, la energía de los fotones disminuye a medida que las longitudes de onda se estiran:

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

La aparente pérdida de energía se atribuye a la expansión, sin una ley de conservación global.

Mi modelo resuelve esta paradoja: la energía perdida por el desplazamiento al rojo es absorbida en los horizontes causales y redistribuida en presión de radiación, realizando efectivamente trabajo en la métrica:

$$\Delta E_{\text{desplazamiento al rojo}} \rightarrow \Delta P_{\text{radiación}} \cdot V.$$

2.4.1 Desplazamiento al rojo como trabajo en la métrica

El principio de equivalencia de Einstein identifica la gravedad con la aceleración. Esto proporciona una forma concreta de ver el desplazamiento al rojo no como una destrucción de energía, sino como su conversión en trabajo cinético.

Experimento mental: Considere un láser azul disparado hacia arriba desde la superficie de un planeta. Los fotones ascienden fuera del potencial gravitacional y llegan a un observador lejano desplazados al rojo. Para el observador, cada fotón parece llevar menos energía. Sin embargo, el láser en la fuente experimentó la masa-energía completa de los fotones emitidos: transfirió un momento consistente con su energía no desplazada y la presión de radiación.

¿Dónde ha ido la energía “perdida”? Se ha invertido en el campo gravitacional, realizando el trabajo necesario para elevar los fotones fuera del pozo potencial.

Por analogía, en cosmología, los fotones emitidos en tiempos tempranos pierden energía por el desplazamiento al rojo cosmológico. Localmente, la región emisora experimenta su presión de radiación completa. Pero globalmente, el déficit aparente no se pierde; se ha convertido en **trabajo en la métrica**, específicamente en una expansión acelerada.

$$\Delta E_{\text{fotón}} = W_{\text{expansión}}.$$

2.4.2 Termodinámica del horizonte y mecanismo de redistribución

Basándome en esta analogía, propongo que los horizontes causales actúan como mediadores de la energía del desplazamiento al rojo:

1. **Transferencia de energía.** La energía de los fotones disminuye como $E \propto a^{-1}$. En lugar de desvanecerse, esta energía es absorbida en los horizontes de partículas o en límites causales tipo Schwarzschild.
2. **Mapeo del desplazamiento al rojo gravitacional.** Así como el desplazamiento al rojo gravitacional transfiere energía al campo, el desplazamiento al rojo cosmológico transfiere energía a la expansión de la métrica.
3. **Termodinámica del horizonte.** Los horizontes poseen entropía ($S \propto A/4$) y temperatura (Gibbons-Hawking). La energía desplazada al rojo contribuye a la entropía del horizonte y, a través del marco termodinámico de gravedad de Padmanabhan [3], reaparece como presión que realiza trabajo en la expansión.
4. **Mejora de la presión.**

$$P = \frac{1}{3} \rho c_{\text{ef}}^2 + \Delta P_{\text{desplazamiento al rojo}},$$

modificando la ecuación de aceleración:

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

Con $\Delta P_{\text{desplazamiento al rojo}} > 0$, la expansión se acelera sin invocar un inflatón.

2.4.3 Consideraciones formales

Formalizar este mecanismo requiere:

- Teoría cuántica de campos en espacio-tiempo curvo para describir las interacciones fotón-horizonte.
- Termodinámica del horizonte (gravedad emergente de Padmanabhan, entropía de Bekenstein-Hawking) para modelar la absorción y reemisión de energía.
- Simulaciones numéricas de la dinámica de Friedmann modificada con $\Delta P_{\text{desplazamiento al rojo}}$.

2.5 Era moderna

En $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$ (13.8 Gyr), la temperatura del CMB es $T = 2.7 \text{ K}$, y la presión de radiación ha disminuido a $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$. Sin embargo, persiste el mismo mecanismo mediado por horizontes: la energía del desplazamiento al rojo continúa alimentando la aceleración cósmica, contribuyendo a la dinámica de tiempo tardío típicamente atribuida a la energía oscura ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$).

3. Avances conceptuales

1. **No se requiere inflatón.** La inflación surge naturalmente de la presión de radiación potenciada por la energía del desplazamiento al rojo, eliminando la necesidad de un

- campo escalar no detectado.
2. **Conservación de energía restaurada.** La energía del desplazamiento al rojo se recicla en presión de radiación, alineando la expansión con principios termodinámicos.
 3. **Invariancia local de c .** El postulado de Einstein se mantiene dentro de los parches causales, mientras que la recesión superlumínica se explica por la separación de horizontes.

4. Pruebas observacionales y firmas esperadas

Propongo ocho pruebas observacionales, cada una con firmas distintas que podrían diferenciar este modelo de Λ CDM.

4.1 Anisotropías del CMB

- **Prueba:** Medir el espectro de potencia del CMB y la polarización en modo B con alta precisión.
- **Firma esperada:** Fluctuaciones incrementadas a pequeña escala en multipolos $l > 1000$, junto con polarización en modo B detectable en $l < 100$ ($r \approx 0.05\text{--}0.1$).

4.2 Densidad de energía de radiación dependiente del desplazamiento al rojo

- **Prueba:** Observar la escala de la densidad de energía de radiación $\rho_{\text{radiación}}$ con el desplazamiento al rojo.
- **Firma esperada:** En $z > 1100$, $\rho_{\text{radiación}}$ debería desviarse del escalamiento estándar $\propto a^{-4}$.

4.3 Fondo de ondas gravitacionales (GWB)

- **Prueba:** Buscar un GWB estocástico de la época inflacionaria.
- **Firma esperada:** Un pico en $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$, con una deformación característica $h_c \approx 10^{-15}$.

4.4 Tensión de Hubble y aceleración en tiempo tardío

- **Prueba:** Medir la constante de Hubble H_0 y la ecuación de estado de la energía oscura w .
- **Firma esperada:** $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$, con w entre -0.8 y 0 en $z < 1$.

4.5 Estructura a escala de horizonte

- **Prueba:** Mapear la estructura a gran escala en 10–100 Mpc.
- **Firma esperada:** Agrupamiento incrementado y vacíos anómalamente grandes.

4.6 Desplazamientos de líneas espectrales

- **Prueba:** Analizar espectros de alto desplazamiento al rojo.

- **Firma esperada:** Ensanchamiento o desplazamientos energéticos del 0.1-1% en $z > 5$.

4.7 Firmas termodinámicas del horizonte

- **Prueba:** Investigar la entropía y el flujo en los horizontes cósmicos.
- **Firma esperada:** Crecimiento de la entropía del horizonte $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

4.8 Nucleosíntesis primordial

- **Prueba:** Medir las abundancias de elementos ligeros.
- **Firma esperada:** Aumento del 1-5% en ^4He y disminución del deuterio.

5. Comparación con ΛCDM

Característica	ΛCDM	Modelo impulsado por radiación
Motor de la inflación	Campo escalar inflatón	Presión de radiación + energía del desplazamiento al rojo
Conservación de energía	No definida globalmente	Forzada termodinámicamente a través de horizontes
Velocidad de la luz	Invariante globalmente	Invariante localmente dentro de horizontes
Problemas del horizonte/planitud	Resueltos por inflatón	Resueltos por radiación + horizontes
Energía oscura	Constante cosmológica (Λ)	Continuación del mecanismo de desplazamiento al rojo-radiación
Predicciones del CMB	Espectro estándar	Mejoras a pequeña escala, posibles diferencias en modo B
Tensión de Hubble	No resuelta	H_0 intermedio natural
Estado observacional	Soportado pero incompleto	Consistente con datos, aún no falsificado

6. Discusión

Este marco reformula la inflación como un proceso termodinámico intrínseco a la radiación, sin requerir un inflatón especulativo. Proporciona un mecanismo para la conservación de energía en el espacio-tiempo en expansión y reconcilia los postulados locales de la relatividad con los horizontes cosmológicos.

Persisten desafíos. La dinámica exacta de la redistribución de energía por desplazamiento al rojo requiere un mayor desarrollo matemático, y son esenciales simulaciones numéricas de las ecuaciones de Friedmann modificadas. La discriminación observational dependerá de futuras misiones (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

7. Conclusión

Presento una cosmología en la que la presión de radiación, modulada por horizontes causales y energía del desplazamiento al rojo, impulsa tanto la inflación como la expansión actual. Este modelo elimina la necesidad de un inflatón hipotético, restaura la consistencia termodinámica y reconcilia la invariancia local de c de Einstein con la superluminalidad cosmológica. Los datos actuales son compatibles con Λ CDM, pero las pruebas observacionales propuestas ofrecen un camino hacia la validación o falsificación.

Referencias

- [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).