

Model Kosmologi Baru: Inflasi Didorong Radiasi dengan Cakrawala Kausal Lokal dan Redistribusi Energi Pergeseran Merah

Saya mengusulkan model kosmologi di mana masa inflasi didorong oleh tekanan radiasi alih-alih medan inflaton skalar. Dimulai dengan ekspansi linier pada masa Planck, alam semesta beralih ke inflasi eksponensial pada $t \approx 10^{22} t_P$ ketika ruang-waktu meregang melampaui cakrawala kausal, mendefinisikan ulang kecepatan cahaya (c) sebagai parameter yang secara lokal invarian. Dihipotesiskan bahwa energi yang hilang akibat pergeseran merah foton didistribusikan kembali ke tekanan radiasi, sehingga memicu inflasi dan memastikan konservasi energi dalam alam semesta yang sedang mengembang. Patch Minkowski lokal mempertahankan invariansi c , mengatasi masalah cakrawala dan kerataan sambil merekonsiliasi relativitas khusus dengan resesi superluminal kosmologis. Delapan uji observasi diuraikan, dengan tanda-tanda yang diharapkan pada CMB, gelombang gravitasi, dan struktur berskala besar. Data saat ini selaras dengan Λ CDM tetapi tidak mengecualikan model ini, membuka jalan untuk validasi dengan eksperimen presisi tinggi di masa depan.

1. Pendahuluan

Kosmologi standar Λ CDM menggambarkan Big Bang panas pada $t = 0$, diikuti oleh periode inflasi singkat dari $t \approx 10^{-36}$ s hingga 10^{-34} s. Masa ini didorong oleh medan "inflaton" skalar, yang potensinya menghasilkan ekspansi eksponensial ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2]. Ini menyelesaikan masalah cakrawala dan kerataan serta meninggalkan jejak pada latar belakang mikro kosmik (CMB). Namun, meskipun sukses, Λ CDM bergantung pada bahan spekulatif: partikel inflaton yang belum terdeteksi, lanskap potensial yang disetel halus, dan toleransi terhadap ketidakkonservasi energi yang tampak akibat pergeseran merah foton.

Saya memperkenalkan alternatif yang didorong oleh radiasi. Model saya dimulai dengan ekspansi linier, secara alami beralih ke inflasi eksponensial begitu foton mendominasi dan cakrawala terpisah, dan berlanjut ke era percepatan modern. Tiga prinsip utama membedakan kerangka ini:

1. **Tidak diperlukan inflaton.** Tekanan radiasi itu sendiri, yang diperkuat oleh energi pergeseran merah, mendorong inflasi.
2. **Konservasi energi dipulihkan.** Energi yang hilang akibat pergeseran merah didaur ulang secara termodinamis ke tekanan radiasi, melakukan kerja pada alam semesta yang mengembang.
3. **Invariansi lokal c .** Dalam setiap patch kausal, pengamat mengukur kecepatan cahaya yang sama, sesuai dengan postulat Einstein. Secara global, resesi

superluminal muncul secara alami dari pemisahan kausal.

2. Kerangka Teoretis

2.1 Ekspansi Linier Awal ($t = 0$ hingga $t = 10^{20} t_P$)

Pada masa Planck ($t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44}$ s), alam semesta mengembang secara linier dengan faktor skala $a(t) \propto t$. Ukuran sebenarnya adalah $R(t) = ct$, dan densitas energi berada pada skala Planck:

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

Persamaan Friedmann mengatur ekspansi:

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

dengan $H = 1/t$ dan kelengkungan yang dapat diabaikan. Pada tahap ini, foton tidak ada, sehingga tekanan radiasi belum berkontribusi.

2.2 Awal Tekanan Radiasi ($t = 10^{20} t_P$)

Pada $t \sim 10^{20} t_P$ ($\sim 10^{-36}$ s), pembentukan partikel menghasilkan foton dalam plasma quark-gluon pada $T \approx 10^{28}$ K. Tekanan radiasi muncul:

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

dengan $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$. Ini menghasilkan $P \sim 10^{92}$ Pa. Meskipun besar, gravitasi masih mendominasi, dan ekspansi tetap melambat.

2.3 Pemisahan Kausal dan Invariansi Lokal c ($t = 10^{22} t_P$)

Pada $t \approx 10^{22} t_P$ ($\sim 10^{-34}$ s), radius alam semesta melebihi cakrawala mirip Schwarzschild:

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

Ketika cakrawala partikel $d_p \approx ct$ melampaui r_s , wilayah-wilayah terpisah secara kausal.

Di dalam setiap patch cakrawala, pengamat mengukur $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, sesuai dengan eksperimen pemikiran kereta dan roket Einstein. Namun, secara global, kecepatan resesi melebihi c , seperti dalam kosmologi standar. Saya memparametrikannya sebagai:

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

tidak menyiratkan variasi literal dari c , melainkan mengkodekan lokalitasnya. Dengan demikian, c tetap invarian bagi setiap pengamat dalam cakrawala kausal mereka,

sementara ekspansi superluminal global mencerminkan pemisahan, bukan pelanggaran relativitas.

2.4 Redistribusi Energi Pergeseran Merah

Dalam Λ CDM, energi foton berkurang saat panjang gelombang meregang:

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

Kehilangan energi yang tampak dikaitkan dengan ekspansi, tanpa hukum konservasi global.

Model saya menyelesaikan paradoks ini: energi yang hilang akibat pergeseran merah diserap di cakrawala kausal dan didistribusikan kembali ke tekanan radiasi, secara efektif melakukan kerja pada metrik:

$$\Delta E_{\text{pergeseran merah}} \rightarrow \Delta P_{\text{radiasi}} \cdot V.$$

2.4.1 Pergeseran Merah sebagai Kerja pada Metrik

Prinsip ekivalensi Einstein mengidentifikasi gravitasi dengan percepatan. Ini memberikan cara konkret untuk melihat pergeseran merah bukan sebagai penghancuran energi, melainkan konversinya menjadi kerja kinetik.

Eksperimen Pemikiran: Pertimbangkan laser biru yang ditembakkan ke atas dari permukaan planet. Foton-foton naik keluar dari potensial gravitasi dan tiba di pengamat jauh dengan pergeseran merah. Bagi pengamat, setiap foton tampak membawa energi lebih sedikit. Namun, laser di sumber mengalami massa-energi penuh dari foton yang dipancarkan: ia mentransfer momentum yang konsisten dengan energi tanpa pergeseran merah dan tekanan radiasi.

Ke mana energi “yang hilang” pergi? Energi tersebut telah diinvestasikan ke dalam medan gravitasi, melakukan kerja yang diperlukan untuk mengangkat foton keluar dari sumur potensial.

Secara analogi, dalam kosmologi, foton yang dipancarkan pada waktu awal kehilangan energi melalui pergeseran merah kosmologis. Secara lokal, wilayah yang memancarkan mengalami tekanan radiasi penuh mereka. Namun secara global, defisit yang tampak tidak hilang; ia telah dikonversi menjadi **kerja pada metrik** – khususnya, menjadi ekspansi yang dipercepat.

$$\Delta E_{\text{foton}} = W_{\text{ekspansi}}.$$

2.4.2 Termodinamika Cakrawala dan Mekanisme Redistribusi

Berdasarkan analogi ini, saya mengusulkan bahwa cakrawala kausal bertindak sebagai mediator energi pergeseran merah:

1. **Transfer Energi.** Energi foton berkurang sebagai $E \propto a^{-1}$. Alih-alih lenyap, energi ini diserap di cakrawala partikel atau batas kausal mirip Schwarzschild.
2. **Pemetaan Pergeseran Merah Gravitas.** Seperti pergeseran merah gravitasi mentransfer energi ke medan, pergeseran merah kosmologis mentransfer energi ke ekspansi metrik.
3. **Termodinamika Cakrawala.** Cakrawala memiliki entropi ($S \propto A/4$) dan suhu (Gibbons–Hawking). Energi yang mengalami pergeseran merah berkontribusi pada entropi cakrawala, dan melalui kerangka gravitasi termodinamis Padmanabhan [3], muncul kembali sebagai tekanan yang melakukan kerja pada ekspansi.
4. **Peningkatan Tekanan.**

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

memodifikasi persamaan percepatan:

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

Dengan $\Delta P_{\text{pergeseran merah}} > 0$, ekspansi dipercepat tanpa memerlukan inflaton.

2.4.3 Pertimbangan Formal

Untuk memformalkan mekanisme ini diperlukan:

- Teori medan kuantum dalam ruang-waktu melengkung untuk menggambarkan interaksi foton-cakrawala.
- Termodinamika cakrawala (gravitasi emergen Padmanabhan, entropi Bekenstein–Hawking) untuk memodelkan penyerapan dan emisi ulang energi.
- Simulasi numerik dari dinamika Friedmann yang dimodifikasi dengan $\Delta P_{\text{pergeseran merah}}$.

2.5 Era Modern

Pada $t \approx 2.6 \times 10^{71} t_P$ (13.8 miliar tahun), suhu CMB adalah $T = 2.7 \text{ K}$, dan tekanan radiasi telah menurun menjadi $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$. Namun, mekanisme yang dimediasi cakrawala yang sama tetap berlangsung: energi pergeseran merah terus memicu percepatan kosmik, berkontribusi pada dinamika waktu akhir yang biasanya dikaitkan dengan energi gelap ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$).

3. Kemajuan Konseptual

1. **Tidak diperlukan inflaton.** Inflasi muncul secara alami dari tekanan radiasi yang diperkuat oleh energi pergeseran merah, menghilangkan kebutuhan akan medan skalar yang belum terdeteksi.
2. **Konservasi energi dipulihkan.** Energi pergeseran merah didaur ulang ke tekanan radiasi, menyelaraskan ekspansi dengan prinsip termodinamis.

3. **Invariansi lokal c .** Postulat Einstein berlaku dalam patch kausal, sementara resesi superluminal dijelaskan oleh pemisahan cakrawala.

4. Uji Observasi dan Tanda-Tanda yang Diharapkan

Saya mengusulkan delapan uji observasi, masing-masing dengan tanda-tanda berbeda yang dapat membedakan model ini dari Λ CDM.

4.1 Anisotropi CMB

- **Uji:** Ukur spektrum daya CMB dan polarisasi mode-B dengan presisi tinggi.
- **Tanda yang Diharapkan:** Fluktuasi skala kecil yang ditingkatkan pada multipol $l > 1000$, bersama dengan polarisasi mode-B yang dapat dideteksi pada $l < 100$ ($r \approx 0.05-0.1$).

4.2 Densitas Energi Radiasi Bergantung pada Pergeseran Merah

- **Uji:** Amati penskalaan densitas energi radiasi ρ_{radiasi} dengan pergeseran merah.
- **Tanda yang Diharapkan:** Pada $z > 1100$, ρ_{radiasi} harus menyimpang dari penskalaan standar $\propto a^{-4}$.

4.3 Latar Belakang Gelombang Gravitasi (GWB)

- **Uji:** Cari GWB stokastik dari masa inflasi.
- **Tanda yang Diharapkan:** Puncak pada $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$, dengan regangan karakteristik $h_c \approx 10^{-15}$.

4.4 Ketegangan Hubble dan Percepatan Waktu Akhir

- **Uji:** Ukur konstanta Hubble H_0 dan persamaan keadaan energi gelap w .
- **Tanda yang Diharapkan:** $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$, dengan w antara -0.8 dan 0 pada $z < 1$.

4.5 Struktur Skala Cakrawala

- **Uji:** Petakan struktur berskala besar pada 10–100 Mpc.
- **Tanda yang Diharapkan:** Pengelompokan yang ditingkatkan dan kekosongan yang besar secara anomali.

4.6 Pergeseran Garis Spektral

- **Uji:** Analisis spektra pergeseran merah tinggi.
- **Tanda yang Diharapkan:** Pelebaran atau pergeseran energi sebesar 0.1–1% pada $z > 5$.

4.7 Tanda-Tanda Termodinamis Cakrawala

- **Uji:** Selidiki entropi dan fluks di cakrawala kosmik.

- **Tanda yang Diharapkan:** Pertumbuhan entropi cakrawala $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

4.8 Nukleosintesis Primordial

- **Uji:** Ukur kelimpahan elemen ringan.
- **Tanda yang Diharapkan:** Peningkatan 1-5% pada ^4He dan penurunan deuterium.

5. Perbandingan dengan ΛCDM

Fitur	ΛCDM	Model Didorong Radiasi
Penggerak Inflasi	Medan inflaton skalar	Tekanan radiasi + energi pergeseran merah
Konservasi Energi	Tidak didefinisikan secara global	Diterapkan secara termodinamis melalui cakrawala
Kecepatan Cahaya	Invarian secara global	Invarian secara lokal dalam cakrawala
Masalah Cakrawala/Kerataan	Diselesaikan oleh inflaton	Diselesaikan oleh radiasi + cakrawala
Energi Gelap	Konstanta kosmologis (Λ)	Kelanjutan mekanisme pergeseran merah-radiasi
Prediksi CMB	Spektrum standar	Peningkatan skala kecil, kemungkinan perbedaan mode-B
Ketegangan Hubble	Tidak terselesaikan	H_0 menengah alami
Status Observasi	Didukung tetapi tidak lengkap	Konsisten dengan data, belum dipalsukan

6. Diskusi

Kerangka ini merumuskan ulang inflasi sebagai proses termodinamis yang melekat pada radiasi, tanpa memerlukan inflaton spekulatif. Ini memberikan mekanisme untuk konservasi energi dalam ruang-waktu yang mengembang dan merekonsiliasi postulat lokal relativitas dengan cakrawala kosmologis.

Tantangan tetap ada. Dinamika pasti dari redistribusi energi pergeseran merah memerlukan pengembangan matematis lebih lanjut, dan simulasi numerik dari persamaan Friedmann yang dimodifikasi sangat penting. Diskriminasi observasi akan bergantung pada misi masa depan (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

7. Kesimpulan

Saya menyajikan kosmologi di mana tekanan radiasi, dimodulasi oleh cakrawala kausal dan energi pergeseran merah, mendorong baik inflasi maupun ekspansi saat ini. Model ini menghilangkan kebutuhan akan inflaton hipotetis, memulihkan konsistensi termodinamis, dan merekonsiliasi invariansi lokal c Einstein dengan superluminalitas kosmologis. Data saat ini kompatibel dengan ΛCDM , tetapi uji observasi yang diusulkan memberikan jalan untuk validasi atau pemalsuan.

Referensi

- [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).