https://farid.ps/articles/cosmology_radiation_driven_inflation/fa.html

یک مدل کیهان‌شناسی جدید: تورم رانده‌شده توسط تابش با افق‌های علّی محلی و بازتوزیع انرژی جابه‌جایی سرخ

من یک مدل کیهان‌شناسی پیشنهاد می‌کنم که در آن دوران تورم به جای یک میدان اسکالر اینفلاتون، توسط فشار تابش هدایت می‌شود. با شروع از انبساط خطی در دوران پلانک، جهان در $t \approx 10^{22}\, t_P$ به تورم نمایی گذار می‌کند، زمانی که فضازمان فراتر از افق‌های علّی کشیده می‌شود و سرعت نور (c) را به عنوان یک پارامتر ثابت محلی بازتعریف می‌کند. فرض می‌شود که انرژی از دست رفته به دلیل جابه‌جایی سرخ فوتون‌ها به فشار تابش بازتوزیع می‌شود، در نتیجه تورم را تغذیه کرده و حفظ انرژی را در یک جهان در حال انبساط تضمین می‌کند. تکه‌های محلی مینکوفسکی، تغییرناپذیری c را حفظ می‌کنند و مشکلات افق و تخت بودن را حل می‌کنند، در حالی که نسبیت خاص را با انحسار فراسرعت کیهانی سازگار می‌کنند. هشت آزمون مشاهده‌ای با امضاهای مورد انتظار در پس‌زمینه میکروموج کیهانی (CMB)، امواج گرانشی و ساختارهای بزرگ‌مقیاس مشخص شده‌اند. داده‌های کنونی با ΛCDM همخوانی دارند اما این مدل را رد نمی‌کنند و مسیری برای اعتبارسنجی با آزمایش‌های دقیق آینده باز می‌گذارند.

۱. مقدمه

کیهان‌شناسی استاندارد ΛCDM یک مه‌بانگ داغ را در $t = 0$ توصیف می‌کند که به دنبال آن یک دوره تورم کوتاه از $t \approx 10^{-36}$ ه‌ی‌ن‌اث تا 10^{-34} ه‌ی‌ن‌اث رخ می‌دهد. این دوره توسط یک میدان اسکالر "اینفلاتون" هدایت می‌شود که پتانسیل آن انبساط نمایی $(a(t) \propto e^{Ht})$ ایجاد می‌کند [۱، ۲]. این مدل مشکلات افق و تخت بودن را حل کرده و اثراتی در پس‌زمینه میکروموج کیهانی (CMB) به جا می‌گذارد. با وجود موفقیتش، ΛCDM به اجزای گمانه‌زنانه وابسته است: یک ذره اینفلاتون کشف‌نشده، مناظر پتانسیل تنظیم‌شده دقیق، و پذیرش عدم حفظ ظاهری انرژی به دلیل جابه‌جایی سرخ فوتون‌ها.

من یک جایگزین رانده‌شده توسط تابش معرفی می‌کنم. مدل من با انبساط خطی آغاز می‌شود، به طور طبیعی به تورم نمایی گذار می‌کند هنگامی که فوتون‌ها غالب شده و افق‌ها جدا می‌شوند، و به دوران شتاب‌دار مدرن ادامه می‌یابد. سه اصل کلیدی این چارچوب را متمایز می‌کنند:

۱. **بدون نیاز به اینفلاتون.** فشار تابش خود، تقویت‌شده توسط انرژی جابه‌جایی سرخ، تورم را هدایت می‌کند. ۲. **بازگرداندن حفظ انرژی.** انرژی از دست رفته به دلیل جابه‌جایی سرخ به طور ترمودینامیکی به فشار تابش بازیافت می‌شود و روی جهان در حال انبساط کار انجام می‌دهد. ۳. **تغییرناپذیری محلی c.** در هر تکه علّی، ناظران همان سرعت نور را اندازه‌گیری می‌کنند، سازگار با فرضیه‌های اینشتین. در سطح جهانی، انحسار فراسرعت به طور طبیعی از جدایی علّی ناشی می‌شود.

۲. چارچوب نظری

۲.۱ انبساط خطی اولیه $(t = 0$ تا $t = 10^{20}\, t_P)$

در دوران پلانک (ه‌ی‌ن‌اث $t = 1\,t_P = 5.39 \times 10^{-44}$)، جهان به صورت خطی با عامل مقیاس $a(t) \propto t$ منبسط می‌شود. اندازه واقعی آن $R(t) = ct$ است و چگالی انرژی در مقیاس پلانک است:

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ ر‌ت‌م م‌رگ‌ول‌ی‌ک}^{-3}.$$

معادله فریدمن انبساط را کنترل می‌کند:

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

با $H = 1/t$ و انحنای ناچیز. در این مرحله، فوتون‌ها وجود ندارند، بنابراین فشار تابش هنوز نقشی ندارد.

۲.۲ شروع فشار تابش ($t = 10^{20}\,t_P$)

تا ($\sim 10^{-36}$ ه‌ی‌ن‌اث) $t \sim 10^{20}\,t_P$، تشکیل ذرات، فوتون‌ها را در یک پلاسمای کوارک-گلوئون در ن‌ی‌ول‌ک $T \approx 10^{28}$ تولید می‌کند. فشار تابش ظاهر می‌شود:

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

با $a = 7.566 \times 10^{-16}$ ر‌ت‌م ل‌وژ$^{-3}$ ن‌ی‌ول‌ک$^{-4}$. این منجر به ل‌اک‌س‌اپ $P \sim 10^{92}$ می‌شود. اگرچه عظیم است، گرانش همچنان غالب است و انبساط کاهنده باقی می‌ماند.

۲.۳ جدایی علّی و تغییرناپذیری محلی c ($t = 10^{22}\,t_P$)

در ($\sim 10^{-34}$ ه‌ی‌ن‌اث) $t \approx 10^{22}\,t_P$، شعاع جهان از افق شبه‌شوارزشیلد خود فراتر می‌رود:

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

هنگامی که افق ذره $d_p \approx ct$ از r_s فراتر می‌رود، مناطق به طور علّی جدا می‌شوند.

درون هر تکه افق، ناظران ه‌ی‌ن‌اث/ر‌ت‌م $c = 3 \times 10^8$ را اندازه‌گیری می‌کنند، سازگار با آزمایش‌های فکری قطار و موشک اینشتین. اما در سطح جهانی، سرعت‌های انحسار از c فراتر می‌روند، همان‌طور که در کیهان‌شناسی استاندارد است. من این را به صورت زیر پارامتری می‌کنم:

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

که به معنای تغییر واقعی c نیست، بلکه محلی بودن آن را کدگذاری می‌کند. بنابراین، c برای هر ناظری در افق علّی خود ثابت می‌ماند، در حالی که انبساط فراسرعت جهانی جدایی را منعکس می‌کند، نه نقض نسبیت.

۲.۴ بازتوزیع انرژی جابه‌جایی سرخ

در ΛCDM، انرژی فوتون‌ها با کشیده شدن طول موج‌ها کاهش می‌یابد:

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

از دست رفتن ظاهری انرژی به انبساط نسبت داده می‌شود، بدون قانون حفظ جهانی.

مدلم این پارادوکس را حل می‌کند: انرژی از دست رفته به دلیل جابه‌جایی سرخ در افق‌های علّی جذب شده و به فشار تابش بازتوزیع می‌شود، که به طور مؤثری روی متریک کار انجام می‌دهد:

$$\Delta E_{\text{خرس ی‌اج‌هباج}} \;\rightarrow\; \Delta P_{\text{شباات}} \cdot V.$$

۲.۴.۱ جابه‌جایی سرخ به عنوان کار روی متریک

اصل هم‌ارزی اینشتین، گرانش را با شتاب یکسان می‌داند. این روشی ملموس برای دیدن جابه‌جایی سرخ نه به عنوان نابودی انرژی، بلکه به عنوان تبدیل آن به کار جنبشی فراهم می‌کند.

آزمایش فکری: یک لیزر آبی را تصور کنید که از سطح یک سیاره به سمت بالا شلیک می‌شود. فوتون‌ها از پتانسیل گرانشی بالا می‌روند و با جابه‌جایی سرخ به ناظر دوردست می‌رسند. برای ناظر، به نظر می‌رسد هر فوتون انرژی کمتری دارد. با این حال، لیزر در منبع، انرژی-جرم کامل فوتون‌های ساطع‌شده را تجربه کرده است: تکانه‌ای متناسب با انرژی و فشار تابش بدون جابه‌جایی سرخ منتقل کرده است.

انرژی "گمشده" کجا رفته است؟ این انرژی در میدان گرانشی سرمایه‌گذاری شده و کار لازم برای بالا بردن فوتون‌ها از چاه پتانسیل را انجام داده است.

به طور مشابه، در کیهان‌شناسی، فوتون‌های ساطع‌شده در زمان‌های اولیه از طریق جابه‌جایی سرخ کیهانی انرژی از دست می‌دهند. به طور محلی، ناحیه ساطع‌کننده فشار کامل تابش آنها را تجربه می‌کند. اما در سطح جهانی، کسری ظاهری از دست نمی‌رود؛ به **کار روی متریک** تبدیل شده است - به طور خاص، به انبساط شتاب‌دار.

$$\Delta E_{\text{نوت‌وف}} \;=\; W_{\text{طاس‌بن‌ا}}.$$

۲.۴.۲ ترمودینامیک افق و مکانیزم بازتوزیع

با تکیه بر این قیاس، پیشنهاد می‌کنم که افق‌های علّی به عنوان واسطه‌های انرژی جابه‌جایی سرخ عمل می‌کنند:

۱. **انتقال انرژی.** انرژی فوتون‌ها به صورت $E \propto a^{-1}$ کاهش می‌یابد. به جای محو شدن، این انرژی در افق‌های ذره یا مرزهای علّی شبه‌شوارزشیلد جذب می‌شود. ۲. **نقشه‌برداری جابه‌جایی سرخ گرانشی.** همان‌طور که جابه‌جایی سرخ گرانشی انرژی را به میدان منتقل می‌کند، جابه‌جایی سرخ کیهانی انرژی را به انبساط متریک منتقل می‌کند. ۳. **ترمودینامیک افق.** افق‌ها دارای آنتروپی ($S \propto A/4$) و دما (گیبونز-هاوکینگ) هستند. انرژی جابه‌جایی سرخ به آنتروپی افق کمک می‌کند و از طریق چارچوب گرانش ترمودینامیکی پادمانابان [۳]، به صورت فشار دوباره ظاهر می‌شود که روی انبساط کار انجام می‌دهد. ۴. **افزایش فشار.**

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

که معادله شتاب را اصلاح می‌کند:

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

با $\Delta P_{\text{خرس ی‌ای‌چ‌ب‌اچ}} > 0$، انبساط بدون نیاز به اینفلاتون شتاب می‌گیرد.

۲.۴.۳ ملاحظات رسمی

برای رسمی‌سازی این مکانیزم نیاز است:

- نظریه میدان کوانتومی در فضازمان منحنی برای توصیف تعاملات فوتون-افق.
- ترمودینامیک افق (گرانش نوظهور پادمانابان، آنتروپی بکنشتاین-هاوکینگ) برای مدل‌سازی جذب و بازنشر انرژی.
- شبیه‌سازی‌های عددی از دینامیک‌های فریدمن اصلاح‌شده با $\Delta P_{\text{خرس ی‌ای‌چ‌ب‌اچ}}$.

۲.۵ دوران مدرن

در $t \approx 2.6 \times 10^{71}\, t_P$ (13.8 میلیارد سال)، دمای CMB برابر با نی‌ول‌ک $T = 2.7$ است و فشار تابش به ل‌اک‌س‌اپ $P \sim 10^{-31}$ کاهش یافته است. با این حال، همان مکانیزم واسطه‌شده توسط افق ادامه می‌یابد: انرژی جابه‌جایی سرخ همچنان شتاب کیهانی را تغذیه می‌کند و به دینامیک‌های دیرهنگام که معمولاً به انرژی تاریک نسبت داده می‌شود ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$) کمک می‌کند.

۳. پیشرفت‌های مفهومی

۱. **بدون نیاز به اینفلاتون.** تورم به طور طبیعی از فشار تابش تقویت‌شده توسط انرژی جابه‌جایی سرخ ناشی می‌شود، که نیاز به یک میدان اسکالر کشف‌نشده را برطرف می‌کند. ۲. **بازگرداندن حفظ انرژی.** انرژی جابه‌جایی سرخ به فشار تابش بازیافت می‌شود و انبساط را با اصول ترمودینامیکی هم‌راستا می‌کند. ۳. **تغییرناپذیری محلی c.** فرضیه اینشتین در تکه‌های علّی معتبر است، در حالی که انحسار فراسرعت با جدایی افق توضیح داده می‌شود.

۴. آزمون‌های مشاهده‌ای و امضاهای مورد انتظار

من هشت آزمون مشاهده‌ای پیشنهاد می‌کنم که هر یک دارای امضاهای متمایزی هستند که می‌توانند این مدل را از ΛCDM متمایز کنند.

۴.۱ ناهمسان‌گردی‌های CMB

- **آزمون:** اندازه‌گیری طیف توان CMB و قطبش حالت B با دقت بالا.
- **امضای مورد انتظار:** افزایش نوسانات کوچک‌مقیاس در چندقطبی‌ها $l > 1000$، همراه با قطبش حالت B قابل تشخیص در $l < 100$ ($r \approx 0.05$–0.1).

۴.۲ چگالی انرژی تابش وابسته به جابه‌جایی سرخ

- **آزمون:** مشاهده مقیاس‌بندی چگالی انرژی تابش $\rho_{\text{تابش}}$ با جابه‌جایی سرخ.
- **امضای مورد انتظار:** در $z > 1100$، $\rho_{\text{تابش}}$ باید از مقیاس‌بندی استاندارد $\propto a^{-4}$ انحراف نشان دهد.

۴.۳ پس‌زمینه امواج گرانشی (GWB)

- **آزمون:** جستجو برای یک پس‌زمینه امواج گرانشی تصادفی از دوران تورم.
- **امضای مورد انتظار:** یک قله در زتره $\sim 10^{-9}$، با کرنش مشخص $h_c \approx 10^{-15}$.

۴.۴ تنش هابل و شتاب دیرهنگام

- **آزمون:** اندازه‌گیری ثابت هابل H_0 و معادله حالت انرژی تاریک w.
- **امضای مورد انتظار:** کسر اپاگم/هیناث/رتمولیک $H_0 \approx 70$، با w بین -0.8 و 0 در $z < 1$.

۴.۵ ساختار در مقیاس افق

- **آزمون:** نقشه‌برداری ساختارهای بزرگ‌مقیاس در 10–100 مگاپارسک.
- **امضای مورد انتظار:** خوشه‌بندی تقویت‌شده و حفره‌های غیرعادی بزرگ.

۴.۶ جابه‌جایی‌های خط طیفی

- **آزمون:** تجزیه و تحلیل طیف‌های با جابه‌جایی سرخ بالا.
- **امضای مورد انتظار:** پهن‌شدگی یا جابه‌جایی‌های انرژی 0.1–1% در $z > 5$.

۴.۷ امضاهای ترمودینامیک افق

- **آزمون:** کاوش آنتروپی و شار در افق‌های کیهانی.
- **امضای مورد انتظار:** رشد آنتروپی افق $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

۴.۸ هسته‌زایی اولیه

- **آزمون:** اندازه‌گیری فراوانی عناصر سبک.
- **امضای مورد انتظار:** افزایش 1–5% در He^4 و کاهش در دوتریوم.

۵. مقایسه با ΛCDM

ویژگی	CDM	مدل رانده‌شده توسط تابش
محرک تورم	میدان اسکالر اینفلاتون	فشار تابش + انرژی جابه‌جایی سرخ
حفظ انرژی	به طور جهانی تعریف نشده	از طریق افق‌ها به طور ترمودینامیکی اعمال می‌شود
سرعت نور	به طور جهانی تغییرناپذیر	به طور محلی تغییرناپذیر در افق‌ها
مشکلات افق/تخت بودن	توسط اینفلاتون حل شده	توسط تابش + افق‌ها حل شده

ویژگی	ΛCDM	مدل رانده‌شده توسط تابش
انرژی تاریک	ثابت کیهانی (Λ)	ادامه مکانیزم تابش-جابه‌جایی سرخ
پیش‌بینی‌های CMB	طیف استاندارد	تقویت‌های کوچک‌مقیاس، تفاوت‌های احتمالی در حالت B
تنش هابل	حل‌نشده	H_0 میانی طبیعی
وضعیت مشاهده‌ای	پشتیبانی‌شده اما ناقص	سازگار با داده‌ها، هنوز رد نشده

۶. بحث

این چارچوب، تورم را به عنوان یک فرآیند ترمودینامیکی ذاتی در تابش بازتعریف می‌کند، بدون نیاز به یک اینفلاتون گمانه‌زنانه. این چارچوب مکانیزمی برای حفظ انرژی در فضازمان در حال انبساط فراهم می‌کند و فرضیه‌های محلی نسبیت را با افق‌های کیهانی سازگار می‌کند.

چالش‌ها باقی می‌مانند. دینامیک دقیق بازتوزیع انرژی جابه‌جایی سرخ نیاز به توسعه ریاضی بیشتری دارد و شبیه‌سازی‌های عددی معادلات فریدمن اصلاح‌شده ضروری هستند. تمایز مشاهده‌ای به ماموریت‌های آینده (CMB-S4، Euclid، LISA، SKA) وابسته خواهد بود.

۷. نتیجه‌گیری

من یک کیهان‌شناسی ارائه می‌دهم که در آن فشار تابش، تنظیم‌شده توسط افق‌های علّی و انرژی جابه‌جایی سرخ، هم تورم و هم انبساط کنونی را هدایت می‌کند. این مدل نیاز به یک اینفلاتون فرضی را حذف می‌کند، سازگاری ترمودینامیکی را بازمی‌گرداند و تغییرناپذیری محلی c اینشتین را با فراسرعت کیهانی سازگار می‌کند. داده‌های کنونی با ΛCDM سازگار هستند، اما آزمون‌های مشاهده‌ای پیشنهادی مسیری برای اعتبارسنجی یا رد این مدل ارائه می‌دهند.

مراجع

[۱] همکاری پلانک، **نتایج پلانک ۲۰۱۸. VI. پارامترهای کیهان‌شناختی،** Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [۲] گوت، آ. اچ.، **جهان تورمی،** Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [۳] پادمانابان، تی.، **جنبه‌های ترمودینامیکی گرانش: بینش‌های جدید،** Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [۴] همکاری BICEP2/Keck، **محدودیت‌های بهبودیافته بر امواج گرانشی اولیه،** Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).