

نمودار سنی جدید در گرانش دورهمسان اصلاح شده با سیال چسبنده

طیبه میرزائی رضائی و علیرضا امانی

گروه فیزیک، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

پست الکترونیکی: a.r.amani@iauamol.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۸/۲۵)

چکیده

در این مقاله مدل نمودار سنی جدید به عنوان جایگزینی برای مدل گرانش دورهمسان اصلاح یافته در نظر گرفته شده است. ابتدا معادلات فریدمن را، با احتساب ماده تاریک و انرژی تاریک به همراه جمله چسبندگی حجمی در متریک تخت فریدمن-رابرتسون-واکر محاسبه می‌کنیم. سپس پارامترهای کیهان شناسی و تابع $f(T)$ را با کمک قانون توانی عامل مقیاس و تطابق بین مدل نمودار سنی و گرانش دورهمسان به دست می‌آوریم. با رسم تغییرات معادله حالت انرژی تاریک بر حسب پارامتر انتقال به سرخ، انبساط شتابدار عالم را توصیف می‌کنیم. در خاتمه، شرط پایداری را به کمک تابع سرعت صوت بررسی کرده و قیود انرژی-ضعیف را برای پارامترهای آزاد پیدا می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: نمودار سنی جدید، گرانش دورهمسان اصلاح شده، معادله حالت، انرژی تاریک

۱. مقدمه

عالم، حدود ۷۰ درصد چگالی انرژی عالم کنونی را تشکیل داده و بایستی دارای فشار منفی باشد، عهده دار توصیف شتاب کنونی عالم شده است. لازم به ذکر است، انبساط شتابدار عالم اولین بار در سال ۱۹۹۸ در ابرنواختر نوع-Ia کشف و مجدداً این موضوع در سال ۱۹۹۹ با ۴۲ ابرنواختر دیگر تأیید شد. در سال ۲۰۰۳ شتاب انبساط عالم، توسط تابش زمینه کیهانی و در سال ۲۰۰۴ در ساختار مقیاس‌های بزرگ تأیید شد [۱-۴].

تمامی این شواهد به این معنی هستند که انرژی تاریک موجب انبساط شتابدار عالم بوده است. به منظور توصیف

از چند دهه گذشته، شاهد توسعه قابل توجهی از دیدگاه بشر از عالم پیرامون خود بوده‌ایم. حدود نود و پنج درصد عالم از دو مؤلفه اسرارآمیز به نام‌های ماده تاریک و انرژی تاریک، و فقط حدود پنج درصد مابقی آن از ماده باریونی معمولی تشکیل شده است. ماهیت ناشناخته این دو مؤلفه، سوالات اساسی بسیاری را پدید آورده که منجر به تعریف فیزیک جدیدی از آنها شده است. ماده تاریک حدود ۲۵ درصد کل چگالی انرژی عالم را تشکیل می‌دهد و ماهیت آن همچنان ناشناخته است. انرژی تاریک که به عنوان مؤلفه دیگری از

انرژی تاریک مدل‌هایی از قبیل ثابت کیهان‌شناسی [۵ و ۶]، میدان‌های نرده‌ای [۷-۹]، میدان تاکیونی [۱۰-۱۲]، گرانش اصلاح یافته [۱۳-۱۸] و غیره [۱۹-۲۲] در فضا-زمان همسانگرد و همگن مطرح شده است.

یکی دیگر از مدل‌های مطرح‌شده به عنوان گرانش دوره‌همسان اصلاح شده است. برای این منظور، اینشتین طی تلاش‌هایی با کمک ساختار ریاضی مسافت همسان، وحدتی بین الکترومغناطیس و گرانش را ایجاد کرده است که این موضوع به عنوان نظریه دوره‌همسان معرفی شد. در این نظریه، فضا-زمان با یک ارتباط خطی بدون انحنا توسط یک میدان تانسور متریک مشخص می‌شود که این تانسور متریک به نام میدان چارپایه دینامیکی تعریف می‌شود. در نسبت عام، میدان چارپایه‌ها مجموعه‌ای از میدان‌های برداری قطری هستند، که یک بعد آن زمان گونه و سه بعد دیگر آن فضا گونه است و بر روی خمینه لورنتس تعریف می‌شود که مفهوم فیزیکی آن به عنوان مدلی از فضا-زمان است. بنابراین یک میدان چارپایه به طور طبیعی برای تعریف یک ارتباط وایتزناک خطی استفاده می‌شود، که معرف یک ارتباط پیچشی فاقد انحنا است. همچنین یک میدان چارپایه می‌تواند به طور طبیعی برای تعریف یک متریک ریمانی به کار رود و بر حسب ارتباط لوی‌چی‌ویتا برای نمایش ارتباط انحنای فاقد پیچش می‌تواند پایه‌ریزی شود. بنابراین می‌توان گفت که حضور یک میدان چارپایه کوچک در یک نظریه پیمانه‌ای موجب هر دو تعریف دوره‌همسان و ساختار ریمانی در فضا-زمان می‌شود، که اولی مربوط به وایتزناک، و دومی به ارتباط لوی‌چی‌ویتا مربوط است. با توجه به جهان شمولی برهم‌کنش‌های گرانشی، ممکن است این ساختار هندسی به گرانش پیوند یابد. با این وجود، گرانش دوره‌همسان نظریه‌ای از گرانش است که به جای ارتباط لوی‌چی‌ویتا در نسبت عام، از ارتباط وایتزناک بدون انحنا برای تعریف مشتق هموردا استفاده می‌کند، و سعی در توصیف اثرات گرانشی از نظر پیچشی به جای خمیدگی دارد. بنابراین، ارتباط لوی‌چی‌ویتا یک ارتباط متقارن در خمینه ریمانی است که با متریک سازگار است، و ارتباط وایتزناک یک ارتباط نامتقارن است.

[۲۳ و ۲۴].

در سال‌های اخیر، بسیاری از مدل‌های انرژی تاریک هنگام آزمون انتقال به سرخ برخی از اجسام بسیار دور و قدیمی با مشکل مواجه می‌شوند. واضح است که جهان نمی‌تواند جوان‌تر از اجزای آن باشد، بنابراین اگر اندازه‌گیری دقیق باشد سن برخی از اجسام نجومی، برای آزمون مدل‌های کیهان‌شناسی بر اساس این اصل ساده سنی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. امروزه تلاش‌های بسیاری برای بررسی ماهیت انرژی تاریک بر اساس برخی اصول گرانش کوانتومی در حال وقوع است. در این راستا، دو مدل هولوغرافی و نمودار سنی نمونه‌هایی از این قبیل‌اند، که از برخی از ویژگی‌های نظریه گرانش کوانتومی نشئت گرفته است [۲۵] و [۲۶].

مدل نمودار سنی انرژی تاریک با کمک رابطه عدم قطعیت در مکانیک کوانتومی و به همراه اثر گرانشی در نسبت عام در نظر گرفته می‌شود. در نسبت عام بدون هیچ محدودیتی فضا-زمان را می‌توان اندازه‌گیری کرد، اما اندازه‌گیری‌ها در مکانیک کوانتومی با محدودیتی همراه است. فرض بر این است که مدل انرژی تاریک نمودار سنی از فضا-زمان و افت‌وخیزهای میدان ماده در عالم به وجود آید. بنابراین در این مدل، سن عالم به عنوان اندازه طول انتخاب شده و از فاصله افق که مشکل علیت در انرژی تاریک هولوغرافی است اجتناب می‌شود. این موضوع نتیجه مطلوبی را به همراه دارد و توانسته است سازگاری بسزایی با مشاهدات نجومی داشته باشد [۲۷ و ۲۸].

از آنجایی که داده‌های رصدی ناهمسانگردی‌های ناچیزی را تأیید می‌کنند لذا مدل‌های ناهمسانگردی اما همگن نیز برای توجیه انرژی تاریک مطرح می‌شوند. یکی از این مدل‌های ناهمسانگرد به عنوان یک سیال با چسبندگی حجمی است. لازم به ذکر است که مکانیسم دقیقی برای منشأ فشار حجمی در عالم هنوز به درستی درک نشده است، اما از دیدگاه نظری، منشأ فشار حجمی را به واسطه انحراف از تعادل ترمودینامیک محلی می‌توان بیان کرد. بنابراین وجود ماده چسبنده در عالم کنونی به سیالی با فشار منفی ظاهر می‌شود، که منجر به شتاب

$$\rho_{DE} \approx \frac{1}{t_p^2 t^2} \approx \frac{m_p^2}{t^2}. \quad (2)$$

منشأ انرژی تاریک نمودار سنی را بر اساس چگالی انرژی فوق در نظر می‌گیریم که زمان t به عنوان سن عالم و زمان همدیس τ به صورت

$$\tau = \int \frac{dt}{a} = \int_0^a \frac{da}{Ha}, \quad (3)$$

است، که در آن $\dot{\tau} = \frac{1}{a}$ است. بنابراین منبع انرژی تاریک نمودار سنی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\rho_{DE} = \frac{3n^2}{\kappa^2 \tau^2}, \quad (4)$$

که ضریب عددی $3n^2$ جهت پارامتری کردن برخی عدم قطعیت‌ها از قبیل انواع میدان‌های کوانتمی در عالم است.

۳. گرانش دورهمسان $f(T)$

در گرانش دورهمسان، به جای استفاده از انحنای حاصل از ارتباط لوی چی ویتا در نسبیت عام، از ارتباط وایتزبناک استفاده می‌شود؛ به این معنی که فضا-زمان انحنایی نداشته و فقط شامل پیچش است. برای این منظور، در گرانش دورهمسان از مؤلفه‌های چهارتایی یا میدان چارپایه متعامد $e_A(x^\mu)$ استفاده می‌شود که در آن شاخص یونانی مشخص کننده فضا-زمان است و شاخص لاتین مشخص کننده فضای مماس در هر نقطه x^μ از خمینه مربوطه است. لازم به ذکر است جایگشت شاخص‌های فوق مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۳ است. رابطه بین میدان چارپایه و تانسور متریک به شکل $g_{\mu\nu} = \eta_{AB} e_\mu^A e_\nu^B$ که در آن متریک مینکوفسکی $\eta_{AB} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ است. کنش دور همسان تصحیح شده به شکل زیر بیان می‌شود:

$$s = \frac{1}{2\kappa^2} \int d^4x e(f(T) + \mathcal{L}_m), \quad (5)$$

که در آن $e = \det(e_\mu^A) = \sqrt{-g}$ درمینان میدان چارپایه، T نرده‌ای پیچش، \mathcal{L}_m لاگرانژی ماده و $\kappa^2 = 8\pi G$ است. در این مقاله از متریک فریدمن به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (6)$$

که $a(t)$ عامل مقیاس است، و مؤلفه‌های چارپایه به صورت

کنونی عالم می‌شود. این فشار به عنوان یک فشار مؤثر برای بازگرداندن سیستم به تعادل گرمایی خود نشان می‌دهد، که هنگامی که سیال کیهانی خیلی سریع منبسط می‌شود موجب شکست تقارن لورنتس می‌شود. فشار چسبندگی حجمی که بدین ترتیب تولید می‌شود، به محض رسیدن سیال به حالت تعادل متوقف می‌شود [۲۹-۳۲].

بنابراین در این مقاله، گرانش دورهمسان اصلاح شده را در یک سیال چسبیده مورد بررسی قرار می‌دهیم و سپس آن را با مدل انرژی تاریک نمودار سنی مطابقت می‌دهیم. همچنین با محاسبه معادله حالت انرژی تاریک و سرعت صوت سیال مربوطه به ترتیب به بررسی انبساط عالم و پایداری عالم می‌پردازیم. در خاتمه قیودی توسط شروط انرژی-ضعیف برای پارامترهای آزاد به دست می‌آوریم و نمودارهای لازم را برای برخی از پارامترهای کیهان‌شناسی بر حسب پارامتر انتقال به سرخ رسم می‌کنیم.

۲. نمودار سنی جدید

در این بخش، به مرور مختصری بر پیدایش مدل انرژی تاریک نمودار سنی جدید می‌پردازیم. همان طور که می‌دانیم در نسبیت عام، فضا-زمان بدون هر گونه محدودیتی قابل اندازه‌گیری است، اما در مکانیک کوانتومی، طبق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ محدودیتی در اندازه‌گیری وجود دارد. بنابراین به دنبال افت‌وخیزهای کوانتومی فضا-زمان، مشاهداتی در مورد اندازه‌گیری مسافت t در فضا-زمان مینکوفسکی با دقت زیر انجام شد [۳۳ و ۳۴].

$$\delta t = \lambda t_p^2 t^3, \quad (1)$$

که در آن λ ثابت بدون بعد و t_p زمان کاهیده پلانک است. کمیت‌های مربوطه در واحد پلانک در نظر گرفته شدند و همچنین $m_p^2 = (\lambda \pi G)^{-1} = \kappa^{-2}$ است. با کمک رابطه عدم قطعیت انرژی-زمان و رابطه (۱) چگالی انرژی کوانتومی حاصل از نوسان‌های متریکی فضا-زمان مینکوفسکی به صورت زیر به دست می‌آید:

انرژی و فشار کل عالم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + \bar{p}) = 0. \quad (15)$$

با استفاده از مؤلفه‌های چارپایه برای متریک فریدمن فوق، مؤلفه‌های تانسور انرژی-تکانه به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$T_{\mu}^{\nu} = \text{diag}(\rho, -\bar{p}, -\bar{p}, -\bar{p}). \quad (16)$$

حال محتویات عالم را مرکب از مؤلفه‌های ماده و نرده‌ای پیچش در نظر می‌گیریم و روابط زیر را می‌نویسیم.

$$\rho = \rho_m + \rho_T, \quad (17)$$

$$p = p_m + p_T, \quad (18)$$

که در آن شاخص‌های m و T به ترتیب مؤلفه ماده و نرده‌ای پیچش است. از روابط (۱۲) الی (۱۸)، چگالی انرژی و فشار نرده‌ای پیچش به شکل زیر در می‌آیند:

$$\rho_T = \frac{1}{2\kappa^2} (12H^2 f_T + f) - \rho_m, \quad (19)$$

$$\bar{p}_T = -\frac{1}{2\kappa^2} \quad (20)$$

$$\left(2(3H^2 + \dot{H})f_T - 48H^2 \dot{H} f_{TT} + f \right) - p_m,$$

که $\bar{p}_T = p_T - 3\xi H$ است. از آنجایی که در این مقاله، چشمه انرژی تاریک از گرانش دورهمسان در نظر گرفته شده، لذا پارامتر معادله حالت انرژی [۳۵] تاریک برابر است با:

$$\omega_T = \frac{p_T}{\rho_T} = -1 - \frac{2\dot{H}f_T - 48H^2 \dot{H} f_{TT} + 2\kappa^2(1 + \omega_m)\rho_m - 6\kappa^2 \xi H}{12H^2 f_T + f - 2\kappa^2 \rho_m}, \quad (21)$$

که در آن ω_m معادله حالت ماده است. جالب توجه است که اگر در غیاب چسبندگی $f(T) = T$ شود، معادلات فریدمن (۱۲) و (۱۳) تبدیل به معادلات فریدمن استاندارد نسبت عام می‌شود.

۴. تطابق بین گرانش دورهمسان چسبنده و نمودار

سنی جدید

در این بخش قصد داریم، منشأ انرژی تاریک را که از گرانش دورهمسان حاصل می‌شود با نمودار سنی جدید مرتبط سازیم. با توجه به این که مشاهدات رصدی با مدل نمودار سنی

به دست می‌آیند. نرده‌ای و تانسور

پیچش به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$T = S_{\rho}^{\mu\nu} T^{\rho}_{\mu\nu}, \quad (7)$$

$$T^{\rho}_{\mu\nu} = e_A^{\rho} \left(\partial_{\mu} e^A_{\nu} - \partial_{\nu} e^A_{\mu} \right), \quad (8)$$

که در آن

$$S_{\rho}^{\mu\nu} = \frac{1}{\gamma} \left(K^{\mu\nu}_{\rho} + \delta_{\rho}^{\mu} T^{\alpha\nu}_{\alpha} - \delta_{\rho}^{\nu} T^{\alpha\mu}_{\alpha} \right), \quad (9)$$

$$K^{\mu\nu}_{\rho} = -\frac{1}{\gamma} \left(T^{\mu\nu}_{\rho} - T^{\nu\mu}_{\rho} - T_{\rho}^{\mu\nu} \right), \quad (10)$$

هستند. از روابط فوق، نرده‌ای پیچش را می‌توان توسط میدان

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad T = -6H^2 \quad \text{که در آن}$$

چارپایه مذکور به صورت $T = -6H^2$ است به دست آورد. با وردش گیری از کنش (۵) نسبت به میدان چارپایه داریم.

$$e_A^{\rho} S_{\rho}^{\mu\nu} \partial_{\mu} (T) f_{TT} (T) + \left[e^{-1} \partial_{\mu} \left(e e_A^{\rho} S_{\rho}^{\mu\nu} \right) - e^{\lambda} A^{\rho}{}_{\mu\lambda} S_{\rho}^{\nu\mu} \right] \quad (11)$$

$$f_T (T) + \frac{1}{\xi} e_A^{\nu} f (T) = \frac{\kappa^2}{\gamma} e_A^{\rho} T_{\rho}^{\nu},$$

که شاخص T نشان دهنده مشتق نسبت به نرده‌ای پیچشی، و T_{ρ}^{ν} تانسور انرژی-تکانه است. از معادله بالا معادلات فریدمن را به شکل زیر می‌توان به دست آورد:

$$2\kappa^2 T_{\circ} = 12H^2 f_T + f, \quad (12)$$

$$2\kappa^2 T_i^i = 2(3H^2 + \dot{H})f_T - 48H^2 \dot{H} f_{TT} + f. \quad (13)$$

با این وجود که عالم از یک سیال کامل پر شده و بخواهیم آن را با واقعیت وفق دهیم، نیاز به آن است که محتوی عالم را به شکل یک سیال چسبنده در نظر بگیریم. انتظار می‌رود که این موضوع سازگاری بسیار خوبی با داده‌های رصدی داشته باشد، زیرا پارامترهای کیهان‌شناسی مربوطه وابسته به پارامتر چسبندگی سیال خواهد شد. بنابراین تانسور انرژی-تکانه با وجود جمله چسبندگی می‌شود:

$$T_{\mu}^{\nu} = (\rho + \bar{p}) u_{\mu} u^{\nu} - \bar{p} \delta_{\mu}^{\nu}, \quad (14)$$

که در آن $\bar{p} = p - 3\xi H$ چاربردار سرعت که $u_{\mu} u^{\mu} = 1$ و ρ و p به ترتیب چگالی انرژی و فشار درون عالم، جمله $-3\xi H$ فشار چسبندگی حجمی است که در آن ξ ضریب ثابت مثبتی به عنوان ضریب چسبندگی حجمی معرفی می‌شود. معادله پیوستگی سیال کامل بر حسب چگالی

که در آن $\eta = 3m(1-b^2 + \omega_m) - 2(1-m)$ است. با جایگذاری (۲۵) و (۲۶) در (۱۹) تابع $f(T)$ را به شکل زیر به دست می‌آوریم:

$$f(T) = C \sqrt{\frac{-T}{\epsilon}} + \frac{n^2 a_0^2 (1-m)^2 (3m(1+\omega_m) - 2(1-m))}{(1-2m) (3m(1-b^2 + \omega_m) - 2(1-m)) m^{2(1-m)}} T \left(\frac{-\epsilon}{T}\right)^m \quad (27)$$

بنابراین معادله حالت انرژی تاریک (۲۱) که از تطابق نمودار سنی و گرانش دورهمسان چسبنده حاصل شد به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\omega_{DE} \equiv \omega_T = -1 - \frac{2T f_T + 2T^2 f_{TT} + 2\kappa^2 (1+\omega_m) \rho_m - \epsilon \kappa \xi \sqrt{\frac{-T}{\epsilon}}}{-2T f_T + f - 2\kappa^2 \rho_m} \quad (28)$$

در ادامه با بیان این که رابطه بین عامل مقیاس و پارامتر انتقال به سرخ به صورت $z+1 = \frac{a_0}{a}$ است، لذا با توجه به رابطه توانی عامل مقیاس، زمان را بر حسب پارامتر انتقال به سرخ به شکل زیر به دست می‌آوریم:

$$t = \frac{1}{(1+z)^m} \quad (29)$$

حال با جایگذاری پارامترهای مربوطه در (۲۸) تغییرات چگالی انرژی، فشار و معادله حالت انرژی تاریک، که از نتیجه تطابق بین نمودار سنی و گرانش دورهمسان چسبنده است، توسط شکل‌های ۱ و ۲ بر حسب پارامتر انتقال به سرخ بسیار مهمی را در این مدل بازی می‌کنند. بنابراین نحوه انتخاب آن بر این اساس است که تغییرات چگالی انرژی و تغییرات فشار به ترتیب مثبت و منفی شوند. با این وجود پارامترهای آزاد انتخاب شده در این مدل به صورت $a_0 = 1$ ، $b = 0.6$ ، $m = 0.75$ ، $n = 5$ ، $\omega_m = -2/5$ ، $\xi = 0.5$ ، $\kappa = 0.1$ و $C = 1$ هستند. لازم به ذکر است که پارامترهای آزاد فوق نمایانگر اثرهای نمودار سنی، گرانش دورهمسان، جمله برهم‌کنش، ماده و سیال چسبنده هستند. شکل ۲ به ما نشان می‌دهد که مقدار معادله حالت انرژی تاریک در عالم

جدید تطابق خوبی دارد، پس آن را با گرانش دورهمسان چسبنده مطابقت قرار می‌دهیم. با استفاده از (۱۷) و (۱۸)، روابط پیوستگی با وجود شارش انرژی بین مؤلفه‌های عالم به شکل زیر نوشته می‌شوند [۳۶]:

$$\dot{\rho}_m + 3H(1+\omega_m)\rho_m = Q, \quad (22)$$

$$\dot{\rho}_T + 3H((1+\omega_T)\rho_T - 3\xi H) = -Q, \quad (23)$$

که در آن Q جمله برهم‌کنش است که مقدار شارش انرژی بین مؤلفه‌های عالم یعنی از انرژی تاریک به ماده تاریک را نشان می‌دهد. برای $Q > 0$ شارش انرژی از گرانش دورهمسان به ماده تاریک است و برای $Q < 0$ شارش انرژی از ماده تاریک به گرانش دورهمسان است. جالب توجه است که جمله برهم‌کنش یک مقیاس کوانتمی است که باید توسط گرانش کوانتمی تعریف شود و مقدار آن باید تابعی از عکس زمان ضرب در چگالی انرژی باشد. بنابراین در اینجا فرض می‌کنیم شکل شارش انرژی بین مؤلفه‌های عالم به صورت $Q = 3b^2 H(\rho_m + \rho_T)$ است که در آن ضریب b^2 شدت انتقال یا ثابت جفت‌شدگی است [۳۷].

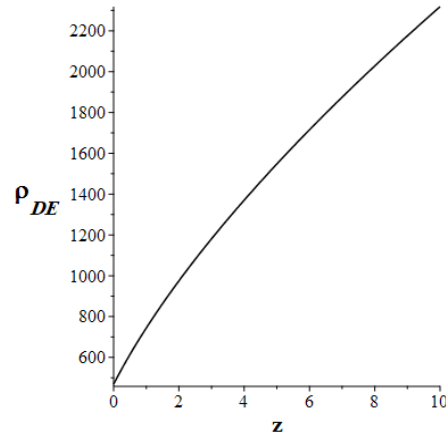
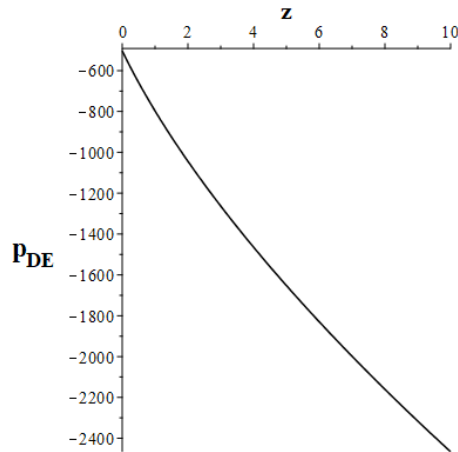
حال به منظور حل مدل فوق، مدل توانی $a(t) = a_0 t^m$ که عامل مقیاس کنونی و $m > 0$ است در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است که این انتخاب سازگاری خوبی با داده‌های رصدی خواهد داشت [۳۸]. در این صورت پارامتر هابل به صورت $H = \frac{m}{t}$ ، نرده‌ای پیچش به شکل $T = -\frac{\epsilon m^2}{t^2}$ و $\dot{H} = -\frac{m}{t^2} = \frac{T}{\epsilon m}$ به دست می‌آیند. زمان هم‌مدیس می‌شود.

$$\tau = \int_0^t \frac{dt}{a} = \frac{t^{1-m}}{a_0(1-m)} = \frac{m^{1-m}}{a_0(1-m)} \left(\frac{-\epsilon}{T}\right)^{\frac{1-m}{2}}, \quad (24)$$

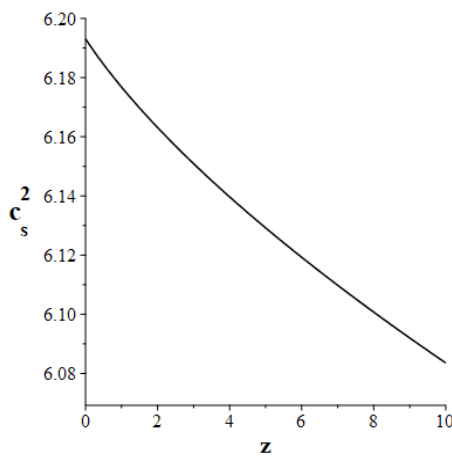
و با هم‌ارز قرار دادن $\rho_{DE} \equiv \rho_T$ ، و از روابط (۴) و (۲۲) به ترتیب چگالی انرژی نمودار سنی و چگالی انرژی ماده تاریک می‌شوند.

$$\rho_{DE} = \frac{3n^2 a_0^2 (1-m)^2}{\kappa^2 t^{2(1-m)}} = \frac{3n^2 a_0^2 (1-m)^2}{\kappa^2 m^{2(1-m)}} \left(\frac{-T}{\epsilon}\right)^{(1-m)}, \quad (25)$$

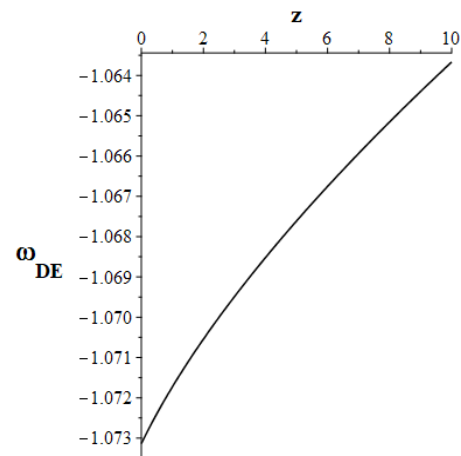
$$\rho_m = \frac{9n^2 a_0^2 b^2 m(1-m)^2}{\kappa^2 \eta t^{2(1-m)}} = \frac{9n^2 a_0^2 b^2 m(1-m)^2}{\kappa^2 \eta m^{2(1-m)}} \left(\frac{-T}{\epsilon}\right)^{(1-m)}, \quad (26)$$



شکل ۱. نمودارهای چگالی انرژی و فشار انرژی تاریک بر حسب پارامتر انتقال به سرخ.



شکل ۳. نمودار سرعت صوت بر حسب پارامتر انتقال به سرخ.



شکل ۲. نمودار معادله حالت انرژی تاریک بر حسب پارامتر انتقال به سرخ.

نشان می‌دهد و هنگامی شرط پایداری رخ می‌دهد که تابع سرعت صوت بزرگ‌تر از صفر شود. پس با مشتق‌گیری از روابط (۱۹) و (۲۰) نسبت به زمان، و به کمک محاسبات عددی نمودار تغییرات سرعت صوت بر حسب پارامتر انتقال به سرخ را در شکل ۳ رسم می‌کنیم. شکل ۳ به ما نشان می‌دهد که مقدار سرعت صوت برای عالم کنونی بزرگ‌تر از صفر است، که نشان دهنده آن است که سیستم حاضر شرط پایداری دارد.

در ادامه قصد داریم شرط عالم شتاب‌دار را برای مدل حاضر مورد بررسی قرار دهیم. با قرار دادن قانون توانی عامل مقیاس، تابع $f(T)$ و رابطه (۲۹) در روابط (۱۹) و (۲۰) مقادیر چگالی انرژی و فشار انرژی تاریک بر حسب پارامتر انتقال به سرخ به دست می‌آید. حال به منظور پیدا کردن یک

کنونی ($z = 0$) برابر -1.073 است، که نشان می‌دهد عالم تحت یک انبساط شتاب‌دار در حال گسترش است و با تحقیقات رصدی سازگاری دارد. بنابراین یکی از نتایج مهم مدل حاضر این است که عبور از خط جداکننده فانتوم را مشاهده کنیم که بیان‌کننده انبساط شتاب‌دار عالم است. بنابراین نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مرجع [۳۹] سازگار است.

۵. پایداری

در این بخش به تحلیل پایداری مدل مربوطه در حضور نرده‌ای پیچش می‌پردازیم. برای این منظور، از یک تابع سودمندی به نام سرعت صوت $c_s^2 = \partial p_{DE} / \partial \rho_{DE}$ استفاده می‌کنیم. البته این تابع، سرعت صوت را در یک سیال کامل

مدل گرانشی دورهمسان اصلاح شده در غیاب انحنای به عنوان یک مدل پیچشی معرفی شد، سپس محتوی عالم را شامل ماده تاریک، انرژی تاریک و چسبندگی حجمی به صورت برهم‌کنشی در نظر گرفتیم، که مؤلفه انرژی تاریک به واسطه گرانش دورهمسان حاصل می‌شود. از یک سو معادلات فریدمن را از مدل دورهمسان، و از سوی دیگر چگالی انرژی را از مدل نمودار سنی با اصول گرانش کوانتومی به دست آوردیم. با تطابق قرار دادن بین چگالی انرژی‌های گرانش دورهمسان و نمودار سنی، پارامترهای کیهان‌شناسی را محاسبه کردیم و با کمک مدل توانی برای عامل مقیاس توانستیم تغییرات پارامترهای کیهان‌شناسی را بر حسب پارامتر انتقال به سرخ رسم کنیم. نکته جالب توجه در این مقاله این است که با کمک روابط تطابق مربوطه تابع دلخواه $f(T)$ را بر حسب پارامتر نرده‌ای پیچش به دست آوردیم.

در ادامه به بررسی پایداری مدل حاضر پرداختیم و نمودار سرعت صوت را بر حسب پارامتر انتقال به سرخ رسم کردیم و مشاهده کردیم که عالم کنونی در یک مرحله پایدار قرار دارد. در خاتمه به کمک قیود انرژی-ضعیف، شروطی را برای پارامترهای آزاد به دست آوردیم که بر این اساس توانستیم انبساط شتابدار عالم را توصیف کنیم و عبور از خط جداکننده فانتم را مشاهده کردیم.

قید برای عالم شتابدار، شروط انرژی-ضعیف یعنی $\rho_{DE} > 0$ و $\rho_{DE} + p_{DE} > 0$ را بر حسب پارامتر انتقال به سرخ به دست خواهیم آورد. بنابراین چگالی انرژی و فشار انرژی تاریک برای عصر کنونی ($z=0$) به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\rho_{DE}|_{z=0} = \frac{3n^2 a_0^2 (1-m)^2}{\kappa^2} > 0, \quad (30)$$

$$(\rho_{DE} + p_{DE})|_{z=0} = \frac{C}{6\kappa^2} - \frac{n^2 a_0^2 (1-m)^2}{\eta\kappa^2} \left[\frac{4(1-m)(\eta + 3mb^2)}{(1-2m)} + 9mb^2(1+\omega_m) \right] > 0, \quad (31)$$

از رابطه (۳۰) به شرط مقدار $m \neq 1$ می‌رسیم. بنابراین تمام پارامترهای آزاد در مدل حاضر باید شروط فوق را برآورده کنند تا یک عالم تحت انبساط شتابدار تضمین شود. این به این معنی است که اگر مقادیر پارامترهای آزاد فوق را در قید (۳۱) قرار دهیم، مجموع چگالی انرژی و فشار انرژی تاریک در زمان حاضر ($z=0$) بزرگ‌تر از صفر می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای آزاد منتخب در این مقاله از قیود فوق استخراج شده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل انرژی تاریک نمودار سنی جدید را به عنوان یک جایگزین مناسب برای گرانش دور همسان اصلاح شده چسبنده در عالم تخت فریدمن مورد مطالعه قرار دادیم.

مراجع

1. G Riess *et al.*, *Astron. J.* **116** (1998) 1009.
2. S Perlmutter *et al.*, *Astrophys. J.* **517** (1999) 565.
3. D N Spergel *et al.*, [WMAP Collaboration], *Astrophys. J. Suppl.* **148** (2003) 175.
4. M Tegmark *et al.*, [SDSS Collaboration], *Phys. Rev. D* **69** (2004) 103501.
5. S Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1 (1989) 1.
6. P J E Peebles and B Ratra, *Rev. Mod. Phys.* **75** (2003) 559.
7. I Zlatev, L Wang, and P J Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 896.
8. A Kamenshchik, U Moschella, and V Pasquier, *Phys. Lett. B* **511** (2001) 265.
9. R R Caldwell, *Phys. Lett. B* **545** (2002) 23.
10. G W Gibbons, *Classical and Quantum Gravity* **20**, 12 (2003) S321.
11. A Sen, *JHEP* **0207** (2002) 065.
12. J S Bagla, H K Jassal and T Padmanabhan, *Physical Review D* **67**, 6 (2003) 063504.
13. S I Nojiri and S D Odintsov, *Phys. Rev. D* **74**, (2006) 086005.
14. S I Nojiri and S D Odintsov, *Phys. Lett. B* **657**, (2007) 238.
15. S M Carroll and *et al.*, *PRD* **71**, 6 (2005) 063513.
16. S Tsujikawa, In *Lectures on Cosmology*, Springer, Berlin, Heidelberg (2010) 99.
17. V Faraoni and S Nadeau, *Physical Review D* **72**, 12 (2005) 124005.
18. S Ferraro, F Schmidt and W Hu, *Physical Review D* **83**, 6 (2011) 063503.
19. T Chiba, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **08** (2008) 004.
20. J Sadeghi, M R Setare, A R Amani, and S M Noorbakhsh, *Phys. Lett. B* **685**, 4 (2010) 229.
21. H Wei, *Commun. Theor. Phys.* **52** (2009) 743.

- Theoretical* **45**, 47 (2012) 473001.
32. N D J Mohan, A Sasidharan and T K Mathew, *The Europ. Physical J. C* **77**, 12 (2017) 849.
33. F Karolyhazy, *Nuovo Cim. A* **42**, 390 (1966).
34. M Maziashvili, *Int. J. Mod. Phys. D* **16**, (2007) 1531 [gr-qc/0612110].
35. K Bamba and *et al.*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2011**, 01 (2011) 021.
36. J Sadeghi and H Farahani, *Astrophysics and Space Science* **347**, 1 (2013) 209.
37. D Pavon and B Wang, *General Relativity and Gravitation*, **41**, 1 (2009) 1.
38. S Kumar, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **422**, 3 (2012) 2532.
39. R Amanullah *et al.*, *Astrophys. J.* **716** (2010) 712.
22. V Sahni and Y Shtanov, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **11** (2003) 014.
23. K Bamba, C Q Geng, C C Lee, and L W Luo, *JCAP* **01** (2011) 021.
24. K Karami, M S Khaledian, F Felegary and Z Azarmi, *Phys. Lett. B* **686**, 4 (2010) 216.
25. X Zhang, F Q Wu, *Phys. Rev. D* **72** (2005) 043524.
26. Q G Huang, Y G Gong, *JCAP* **0408** (2004) 006.
27. H Wei and R G Cai, *Phys. Lett. B* **663** (2008) 1.
28. X Wu, Y Zhang, H Li, R Cai, and Z Zhu, arXiv preprint arXiv:0708.0349 (2007).
29. J C Fabris, S V B Goncalves, R de Sa Ribeiro, *Gen. Relativ. Gravit.* **38** (2006) 495.
30. A Avelino and U Nucamendi, *JCAP* **04** (2009) 006.
31. P Kovtun, *Journal of Physics A: Mathematical and*