

## انرژی تاریک اولیه برآمده از اندرکنش ماده و انرژی تاریک

عبدالعلی بنی‌هاشمی و نیما خسروی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

پست الکترونیکی: n-khosravi@sbu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳)

### چکیده

در این مقاله ما نوع خاصی از برهمکنش میان ماده و انرژی تاریک را بررسی می‌کنیم که در آن انرژی تاریک اولیه بروز پیدا می‌کند. این مدل برای اولین بار است که مطرح می‌شود و از این نظر خاص است که برخلاف مدل ما، مدل‌های مرسوم برهمکنش میان ماده و انرژی تاریک در کیهان اخیر تاثیر می‌گذارند. هرچند به نظر می‌رسد این مدل بایستی به رفع تنش هابل کمک کند، اما برازش پارامترهای آزاد مدل ما با داده‌های تابش زمینه کیهانی، ثابت هابل  $H_0 = 67/4 \pm 1/5$  را نشان می‌دهد که با اندازه‌گیری‌های موضعی و مستقل از مدل در تعارض است. در مورد علت این مسئله بحث می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: انرژی تاریک اولیه، اندرکنش انرژی و ماده تاریک، تنش هابل

### ۱. مقدمه

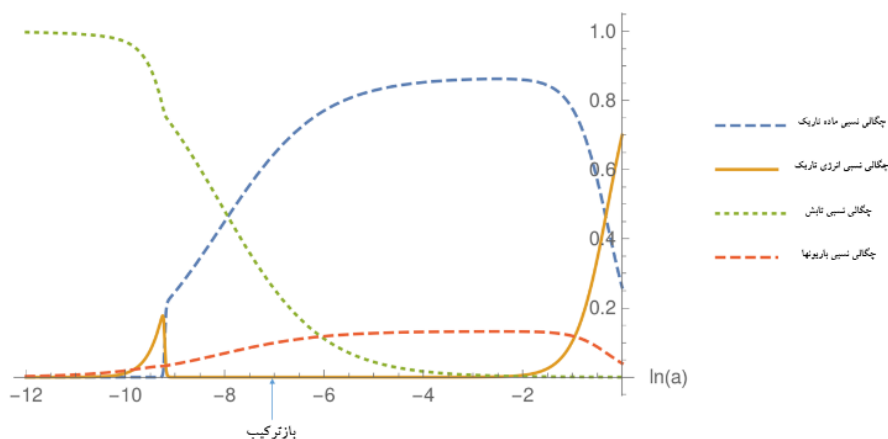
در پس‌قائل شدن به اندرکنش غیر گرانشی میان ماده و انرژی تاریک انگیزه‌های زیادی نهفته است: از مطالعه و تلاش برای حل مسئله همزمانی [۱] تا بهره‌مندی از یک سازوکار طبیعی برای فزاینده شدن چگالی انرژی تاریک<sup>۱</sup> [۲]. اخیراً که مدل استاندارد  $\Lambda$ CDM دچار تنش‌ها و مشکلاتی شده است [۳ و ۴]، دسته‌ای از راه‌حل‌ها، در اندرکنش این دو سیال تاریک پیشنهاد شده‌اند. برای پیدا کردن شهادی برای این برهمکنش،

طیف وسیعی از انواع برهمکنش‌های احتمالی بررسی شده‌اند

[۵، ۶ و ۷].

از طرفی اخیراً در [۸] نشان داده شد که اگر مولفه جدید انرژی تاریک اولیه را به تاریخ انبساط کیهانی اضافه کنیم، با کاهش یافتن افق صوتی در زمان بازترکیب، ثابت هابل امروزی افزایش می‌یابد و به مقداری که به طور مستقیم اندازه گرفته شده نزدیک می‌شود [۹]. این مؤلفه جدید باید قبل از بازترکیب به سرعت از میان برود.

۱. Phantom dark energy



شکل ۱. تحول چگالی نسبی مؤلفه‌های گوناگون بر حسب لگاریتم طبیعی عامل مقیاس برای حالت  $\xi = e^{-\tau}$ . همان طور که روشن است در زمان قبل از بازترکیب، انرژی تاریک چگالی نسبی قابل اعتنا بی‌پیدا می‌کند و فاز انرژی تاریک اولیه پدیدار می‌شود. با افزایش آهنگ برهمکنش، زمان بروز این فاز به زمان حال نزدیک‌تر می‌شود.

$$\rho'_d + \tau H(1+w)\rho_d = -\frac{\tau \xi H \rho_c \rho_d}{\rho_c^{cr}}, \quad (2)$$

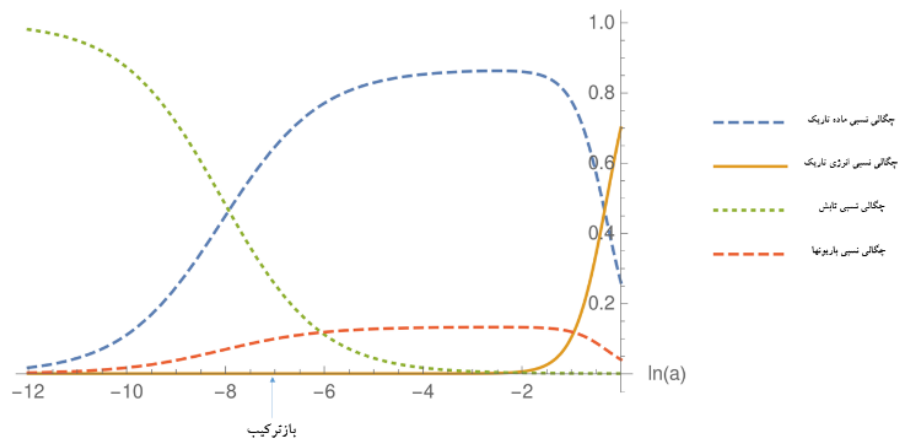
در روابط فوق،  $\xi$  به معنی مشتق نسبت به زمان همدیس بوده و  $H$  ثابت هابل همدیس است. آهنگ برهمکنش را پارامتر بی‌بعد  $\xi$  کنترل می‌کند و به ازای  $\xi = 0$  معادلات فوق به معادلات استاندارد مبدل می‌شوند.  $\rho_c^{cr}$  که چگالی بحرانی فعلی عالم است، برای بی‌بعد کردن پارامتر  $\xi$  به روابط اضافه شده است. قطعاً به کمک هر کمیت دیگری با بعد چگالی (مثل  $\rho_d + \rho_c$ ) این مهم انجام می‌گیرد؛ لیکن برای منظور ما که پیدایش انرژی تاریک اولیه است، این انتخاب خاص مناسب است. با توجه به علامت  $\xi$  که مثبت است، برای احتراز از ناپایداری‌های ازلی کمیت اختلال انحنای، از مقدار  $w = -1/0.01$  برای معادله حالت انرژی تاریک استفاده کرده‌ایم تا هم به ثابت کیهان‌شناختی نزدیک باشد و هم مدل با ناپایداری مواجه ن [10]. همان‌گونه که از جمع معادلات (۱) و (۲) پیداست، بخش تاریک در کلیت خود بقا دارد. این دو معادله جفت شده غیر خطی حل تحلیلی ندارند و آنها را بایستی با روش‌های عددی حل کرد. در شکل ۱ تحول چگالی نسبی سیالات کیهانی بر حسب لگاریتم عامل مقیاس را نمایش داده‌ایم.

در این مقاله ما در پی آن هستیم که نشان دهیم انرژی تاریک اولیه، آن هم به گونه‌ای که به سرعت قبل از بازترکیب چگالی نسبی خود را از دست بدهد، می‌تواند از نوع خاصی برهمکنش انرژی تاریک مرسوم با ماده تاریک نتیجه شود و نیازی به معرفی یک مؤلفه یا میدان جدید نیست. در بخش‌های بعدی، ضمن معرفی مدل پیشنهادی «بخش تاریک وحشی»، به بررسی انطباق آن با داده‌های کیهانی می‌پردازیم. این یک مدل خاص است زیرا که مدل‌های دارای برهمکنش بین ماده و انرژی تاریک تأثیر خود را در کیهان اخیر می‌گذارند؛ در حالی که مدل ما تأثیر خود را در کیهان اولیه نشان می‌دهد و در کیهان اخیر مدل ما شبیه مدل استاندارد کیهان‌شناسی رفتار می‌کند.

## ۲. مدل بخش تاریک وحشی

در این مدل که برگرفته از مقوله شکار و شکارچی در طبیعت است، و از این رو مدل بخش تاریک وحشی نامیده می‌شود، برهمکنشی به صورت زیر را میان انرژی تاریک (با چگالی  $\rho_d$  و معادله حالت  $w$ ) و ماده تاریک (با چگالی  $\rho_c$ ) در نظر می‌گیرد:

$$\rho'_c + \tau H \rho_c = \frac{\tau \xi H \rho_c \rho_d}{\rho_c^{cr}}, \quad (1)$$



شکل ۲. چگالی نسبی مؤلفه‌های گوناگون بر حسب لگاریتم طبیعی عامل مقیاس برای حالت  $\epsilon = 0$  یا همان مدل استاندارد  $\Lambda$ CDM.

تاریک وحشی را در کد CAMB [۱۲] وارد کرده و سپس به کمک کد CosmoMC [۱۳ و ۱۴] و تحلیل  $\chi^2$ ، در فضای پارامتری به دنبال بهترین مقادیر گشته‌ایم.

#### ۴. نتایج

در جدول ۱ بهترین مقادیر برای پارامترهای آزاد مدل به همراه نایقینی به اندازه دو برابر انحراف معیار (۲σ) داده شده‌اند. همان گونه که پیداست، برای لگاریتم آهنگ برهمکنش حد پایین پیدا نشده و این یعنی آهنگ برهمکنش با مقدار صفر،  $\epsilon = 0$ ، یا همان  $\Lambda$ CDM سازگار است. مقدار  $H_0$  نیز به مقدار مستقیماً اندازه‌گیری شده نزدیک نشده است و همان مقداری را اختیار کرده است که در مدل استاندارد می‌گرفت.

همچنین در شکل ۳ منحنی‌های هم‌تراز دویعدی و همچنین نمودارهای احتمال یک بعدی به دست آمده از تحلیل  $\chi^2$  نمایش داده شده‌اند. در نمودار مربوط به  $\ln \epsilon$  مشهود است که با وجود بسته نشدن از پایین، اما بیشینه احتمال در جایی غیر از  $\epsilon = 0$  اتفاق افتاده است. در شکل ۴ که بزرگنمایی شده قسمتی از شکل ۳ است، عدم همبستگی آهنگ برهمکنش و ثابت هابل کنونی به تصویر درآمده است.

همان‌گونه که پیداست، چگالی انرژی تاریک در قبل از بازترکیب رشد می‌کند و یک فاز انرژی تاریک اولیه پیدا می‌شود و سپس چگالی نسبی خود را در همان دوره پیشابازترکیب از دست می‌دهد و در نهایت در کیهان متأخر مولفه غالب می‌شود. در شکل ۲ تحول همان کمیت‌ها در مدل استاندارد  $\Lambda$ CDM نشان داده شده‌اند. طبق پژوهش‌های پیشین، [۸]، انرژی تاریک اولیه باعث کم شدن افق صوتی شده و این امر موجب افزایش  $H_0$  می‌شود؛ چرا که  $r_s$  و  $H_0$  به دست آمده از تابش زمینه کیهانی همبستگی منفی دارند.

$$r_s = \int_{z^*}^{\infty} \frac{c_s(z) dz}{H(z)}, \quad (3)$$

در بخش بعد این حدس را در مدل بخش تاریک وحشی بررسی می‌کنیم.

#### ۳. مواجهه مدل با داده‌های کیهانی

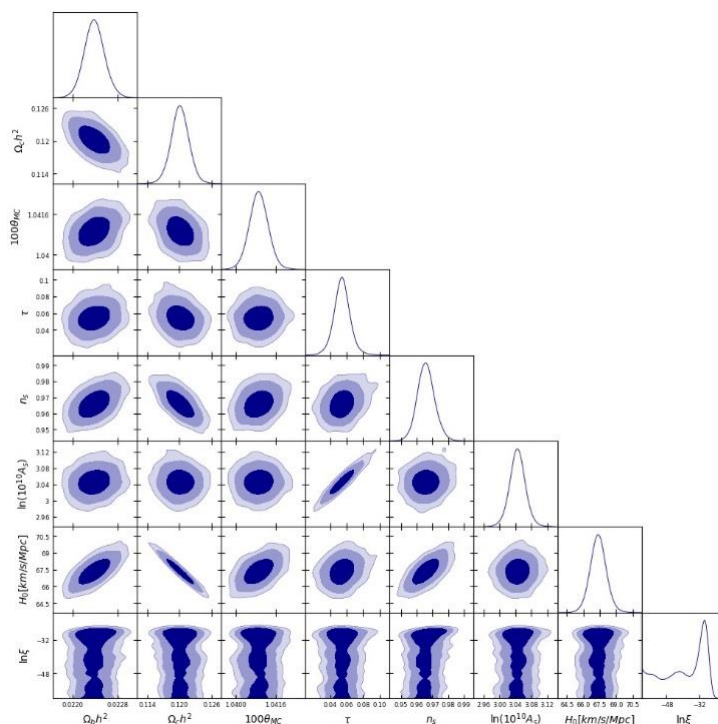
فضای پارامتری مدل ما متشکل از شش پارامتر مشترک با  $\Lambda$ CDM و یک پارامتر اضافه، آهنگ برهمکنش، است:

$$P = \left\{ \Omega_c h^2, \Omega_b h^2, 10^4 \Theta, \tau, A_s, n_s, \xi \right\}, \quad (4)$$

برای مقید کردن این پارامترها از داده‌های مربوط به افت و خیزهای دمایی و قطبش تابش زمینه کیهانی و نیز همبستگی ضربی آنها بهره می‌گیریم [۱۱]. برای این منظور ابتدا مدل بخش

جدول ۱. بهترین مقادیر برای پارامترهای آزاد مدل به همراه نایقینی متناظر با هر یک. در ردیف آخر مقدار کمینه  $\chi^2$  گزارش شده است.

پارامتر	بازه اطمینان ۹۵٪
$\Omega_b h^2$	$0.02238^{+0.00021}_{-0.00026}$
$\Omega_c h^2$	$0.1201^{+0.0023}_{-0.0024}$
$100\theta_{MC}$	$1.04092 \pm 0.00017$
$\tau$	$0.084^{+0.0021}_{-0.0020}$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.045^{+0.042}_{-0.040}$
$n_s$	$0.966^{+0.012}_{-0.011}$
$\ln \xi$	$< -27 / 6$
$H_0 [km/s / Mpc]$	$67.4 \pm 1.0$
$\chi^2_{CMB}$	۲۷۸۱



شکل ۳. منحنی‌های هم‌تراز دوبعدی (تا  $3\sigma$ ) و همچنین نمودارهای احتمال یک بعدی به دست آمده از تحلیل  $\chi^2$ .

### ۵. نتیجه‌گیری و بحث

اولیه، بدون نیاز به یک میدان جدید است. در حالی که تحقیقات نشان می‌دهند انرژی تاریک اولیه می‌تواند ثابت هابل امروزی به دست آمده از داده‌های تابش زمینه کیهانی را بالا

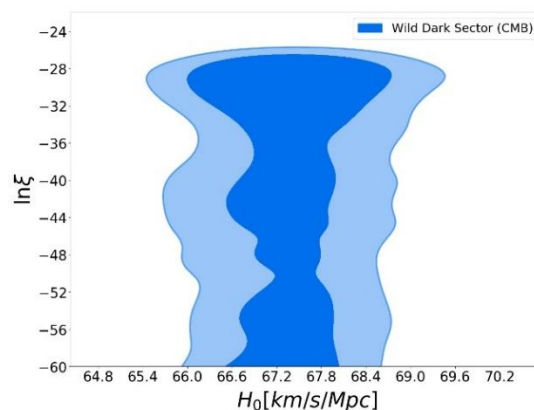
در این مقاله، مدل نوینی از برهمکنش غیر گرانشی ماده و انرژی تاریک معرفی شد که پیامد آن پیدایش فاز انرژی تاریک

کیهان وجود دارد، ثابت هابل را تا قبل از بازترکیب بالا می‌برد و لذا افق صوتی در زمان بازترکیب، کم می‌شود و این امر موجب افزایش  $H_0$  می‌شود؛ چرا که  $r_s$  و  $H_0$  به دست آمده از تابش زمینه کیهانی همبستگی منفی دارند.

افزایش ثابت هابل در دوران قبل از بازترکیب، در مدل بخش تاریک وحشی اتفاق نمی‌افتد. بدین جهت که افزایش مقدار انرژی تاریک در آن دوران مستقلاً روی نمی‌دهد، بلکه به مدد کاهش چگالی ماده تاریک است که چگالی انرژی تاریک رشد می‌کند و لذا چگالی کل و به تبع آن ثابت هابل افزایش نمی‌یابد.

### سپاس‌گزاری

از سانی و نیوتزی برای صحبت پیرامون این ایده ممنون هستیم.



شکل ۴. منحنی هم‌تراز دو بعدی برای دو کمیت  $H_0$  و  $\ln \sigma_8$  که برای وضوح بیشتر به طور جداگانه نمایش داده شده است. همان طور که پیداست، این دو کمیت هیچ همبستگی خاصی نشان نمی‌دهند و تنش هابل به این صورت حل نمی‌شود.

ببرد، تحلیل ما برای این مدل چنین چیزی را نشان نمی‌دهد. نکته کلیدی در موارد مرسوم انرژی تاریک اولیه این است که معرفی یک میدان جدید که از مهبانگ تا قبل از بازترکیب در

### مراجع

- 8- V Poulin *et. al.*, *Physical Review Letters* **122** (2019) 221301.
- 9- G Riess *et. al.*, *Astrophysics Journal* **876**, 1 (2019) 85.
- 10- M B Gavela *et. al.*, *JCAP* **07** (2009) E01.
- 11- N Aghanim *et. al.*, *Astronomy and Astrophysics* **641** (2020) A5.
- 12- A Lewis Challinor and A Lasenby, *Astrophys. J.* **538** (2000) 473.
- 13- Lewis and S Bridle, *Phys. Rev. D* **66** (2002) 103511.
- 14- Lewis, *Phys. Rev. D* **87**, 10 (2013) 103529.
- 1- L Amendola, *Physical Review D* **62** (2000) 043511.
- 2- S Das *et. al.*, *Physical Review D* **73** (2006) 083509.
- 3- E Di Valentino *et. al.*, "Cosmology intertwined II: The Hubble constant tension"; *arXiv:2008.11284*.
- 4- E Di Valentino *et. al.*, "Cosmology intertwined III:  $f\sigma_8$  and  $S_8$ "; *arXiv:2008.11285*.
- 5- E Di Valentino *et. al.*, *Physics of Dark Universe* **30** (2020) 100666.
- 6- S Pan *et. al.*, *Physical Review D* **100** (2019) 103520.
- 7- W Yang *et. al.*, *Physical Review D* **100** (2019) 083509.