Archive of SID

معادلهٔ حالت گاز چپلیگین تکامل یافته و ارتباط آن با نظریه ریسمان

بهنام پورحسن*

گروه فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه دامغان، کد پستی 3671641167، دامغان، ایران

دریافت 1397/03/15 بازنگری نهایی: 1398/02/20 پذیرش: 1398/04/05

چکیده

در این مقاله، ما ضمن مروری به‌نسخه‌های مختلف گاز چپلیگین، به‌عنوان مدلی برای توصیف انرژی تاریک، به‌معرفی مدل تکامل یافتهٔ گاز چپلیگین می‌پردازیم (که برای اولین بار در اینجا معرفی می‌گردد) که می‌تواند پوشش‌دهندهٔ تمام مدل‌های رایج قبلی باشد. انرژی تاریک به‌عنوان یک سیال فرض می‌شود که می‌تواند به‌صورت یک سیستم بس‌ذره‌ای در نظر گرفته شود. هدف اصلی این مقاله این است که نشان دهیم معادلهٔ حالت گاز چپلیگین تکامل یافتهٔ همانند معادلهٔ حالت گاز چپلیگین معمولی می‌تواند از نظریهٔ ریسمان به‌دست آید.

کلیدواژگان: معادلهٔ حالت، انرژی تاریک، نظریهٔ ریسمان، گاز چپلیگین

مقدمه

پاسخ به‌این سؤال که جهان از چه چیزی درست شده همواره یکی از مهمترین سؤالات بشر بوده است. به‌عبارت دیگر می‌خواهیم بدانیم که جنس ماده و انرژی موجود در جهان از چیست. امروزه مشخص شده است که آنچه ما قادریم با چشم و یا قویترین تلسکوپ‌های نجومی ببینیم (یعنی هر چیزی که در این جهان قابل رؤیت هست) تنها حدود چهار درصد (4/6%) از کل عالم را تشکیل می‌دهند. بخش اعظم آن گازهای بین کهکشانی است و تنها حدود چهار دهم درصد از کل عالم را ستارگان و سیارات و دیگر اجرام آسمانی مرئی تشکیل می‌دهند که جنس آنها برای ما مشخص است. طبق مدل استاندارد ذرات بنیادی این 4/6 درصد ذکر شده از کوارک‌ها و لپتون‌ها (مثل الکترون) ساخته می‌شود. اندرکنش بین این ذرات نیز توسط ذرات واسطه انجام می‌گردد. این ذرات واسطه، همان حاملین نیروهای الکترومغناطیسی، ضعیف و قوی هستند. اما همان‌گونه که می‌دانیم ما چهار نیروی بنیادی در طبیعت داریم: نیرویی که در مدل استاندارد ذرات بنیادی صحبتی از آن نمی‌شود گرانش است. دلیل این امر آن است که نظریهٔ گرانش نیوتونی (که در ابعاد بزرگ قابل حس است) و مکانیک کوآنتومی (که مربوط به‌ابعاد بسیار ریز می‌باشد) با همدیگر سازگاری ندارند. در واقع یکی از بزرگ‌ترین اهداف فیزیکدانان ساختن یک نظریهٔ جامع و کامل می‌باشد که تمام نظریه‌های قبلی فیزیک را با هم یکی کند. یعنی نظریه‌ای که شامل گرانش کوآنتومی نیز باشد. یکی از نظریه‌هایی که موفق به‌اتحاد تمام نیروهای بنیادی شناخته شده گردید و

* نویسندهٔ مسئول: b.pourhassan@du.ac.ir

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.
این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص 4,0 بین‌المللی می‌باشد

www.SID.ir

Archive of SID

کوآنتومی هم می‌باشد به‌نظریهٔ ریسمان معروف است [1].

در نظریهٔ میدان کوآنتومی (یا همان مدل استاندارد ذرات بنیادی) ذرات نقطه‌گونه در فضا-زمان چهار بعدی در نظر گرفته می‌شوند ولی در نظریهٔ ریسمان ذرات دیگر نقطه‌گونه تصور نمی‌گردند بلکه فرض می‌شود جرم یک ذره در طول یک بعد (همانند یک ریسمان) گسترده می‌گردد. اکنون تمامی ذرات بنیادی مدل استاندارد به‌عنوان مدهای ارتعاشی مختلف یک ریسمان معرفی می‌گردند. ریسمان‌ها به‌دو صورت باز (از دو انتها آزاد) و بسته (دو انتها به‌هم وصل می‌شود) می‌توانند وجود داشته باشند. نکتهٔ جالب توجه این است که یکی از مدهای ارتعاشی ریسمان بسته متناظر با یک ذرهٔ اسپین دو (گراویتون) است و از آنجایی که نظریهٔ ریسمان یک نظریهٔ کوآنتومی هم هست پس نامزدی برای نظریهٔ گرانش کوآنتومی و در واقع متحد کنندهٔ چهار اندرکنش بنیادی است. اطلاعات بیشتر مورد نیاز دربارهٔ نظریه ریسمان را به‌بخش‌های آینده واگذار می‌نماییم و به‌بحث ابتدایی خود در مورد سهم مواد مختلف در جهان هستی باز می‌گردیم. همان‌گونه که ذکر شد، تنها حدود 4/6 درصد از عالم توسط بشر قابل دیدن است، پس بقیه 95/4 درصد عالم از چیست که به‌هیچ وسیله‌ای دیده نمی‌شود ولی اثرات گرانشی آن روی حرکت اجرام آسمانی مشاهده شده است. امروزه دانشمندان نام این بخش نامرئی و ناشناخته از عالم را مادهٔ تاریک (حدود 24 درصد) و انرژی تاریک (حدود 71/4 درصد) گذاشتند. مادهٔ تاریک از ذراتی تشکیل شده که هیچ اندرکنشی با فوتون و به‌طور کلی میدان الکترومغناطیسی نداشته و در نتیجه دیده نمی‌شوند. انرژی تاریک نیز نوعی از انرژی می‌باشد که هنوز ماهیت دقیق آن برای بشر مشخص نشده است. وجود این انرژی ناشناخته که بخش اعظم عالم را در بر می‌گیرد می‌تواند انبساط شتاب دار عالم را که توسط مشاهدات نجومی اثبات شده است [2،3]، توجیه کند. از آنجایی که ماهیت اصلی انرژی تاریک هنوز مشخص نشده است، دانشمندان فیزیک نظری مدل‌های متفاوتی برای توصیف انرژی تاریک ارائه داده‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل گاز چپلیگین است. بر طبق این مدل انرژی تاریک همچون سیالی جاری در تمام عالم در نظر گرفته می‌شود که معادلهٔ حالت (رابطهٔ بین فشار با حجم یا چگالی) آن همان معادلهٔ حالت گاز چپلیگین است که حدود یکصد و ده سال پیش توسط سرگی چپلیگین، فیزیکدان روسی، در آیرودینامیک و مطالعهٔ فشار زیر بال هواپیما مطرح گردید [4]. این یک فشار منفی است که می‌تواند هواپیما را بالا ببرد، از طرف دیگر این یک فشار منفی است که می‌تواند به‌گرانش بین اجرام کیهانی غلبه کرده و باعث انبساط شتابدار عالم شود. بنابراین گاز چپلیگین به‌عنوان مدلی برای توصیف انرژی تاریک در نظر گرفته شد [5]. پیش از آن نشان داده شده بود که چنین معادلهٔ حالتی می‌تواند از کنش نامبو-گوتو در یک حالت خاص نظریهٔ ریسمان به‌دست آید [6]. پس از آن مدل‌های کاملتری از گاز چپلیگین مطرح گردید که با مشاهدات رصدی بیشتر در توافق بود و در قسمت بعدی توضیح داده می‌شود.

اکنون هدف ما در این مقاله اینست که کاملترین معادله حالت را معرفی نموده و ثابت کنیم این معادله حالت نیز قابل استخراج از نظریهٔ ریسمان است و در واقع همه مدل‌های گاز چپلیگین را می‌توان برگرفته از نظریهٔ ریسمان دانست.

بنابراین ابتدا در قسمت بعدی روند تکامل معادلهٔ حالت‌های گاز چپلیگین را مرور خواهیم کرد و سپس ارتباط آن با نظریهٔ ریسمان را ذکر کرده معادلهٔ حالت مورد نظر خود را از کنش نظریهٔ ریسمان استخراج

www.SID.ir

Archive of SID

می‌کنیم. در نهایت در بخش آخر به‌بحث و نتیجه‌گیری می‌پردازیم.

معادله حالت

دانشمندان فیزیک نظری در قرن بیست و یکم از معادلهٔ حالت گاز چپلیگین که با رابطهٔ زیر داده می‌شود [7]،

$$P = -\frac{A}{\rho} \qquad 1$$

استفاده نموده و با استفاده از معادلات رایج در کیهان شناسی به‌تحقیق در مورد خصوصیات عالم پرداختند و با توجه به‌داده‌های رصدی به‌تأیید، تکذیب یا تکامل مدل خود پرداختند. در رابطهٔ بالا P فشار، ρ چگالی سیال (انرژی تاریک) می‌باشند و A یک عدد ثابت مثبت است. بر طبق این مدل فشار منفی که نتیجهٔ آن انبساط شتابدار عالم می‌باشد قابل توجیه است. رابطهٔ1 به‌دلایل مختلف از جمله تطابق بیشتر نتایج با داده‌های تجربی دستخوش تغییراتی گردید. یکی از کامل‌ترین نتایج را می‌توان به‌شکل زیر نوشت:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho^n - \frac{1}{\rho^{\alpha}}\left[\frac{A}{1+w} - 1 + \left(\rho^{1+\alpha} - \frac{A}{1+w} + 1\right)^{-w}\right] - \Pi(\rho) \qquad 2$$

به‌سادگی می‌توان بررسی کرد که با قرار دادن $\Pi(\rho) = 0$ ، $w = 0$ ، $A_n = 0$ و $\alpha = 1$ در معادلهٔ بالا به‌رابطهٔ1 می‌رسیم. $\Pi(\rho)$ جملهٔ مربوط به‌چسبندگی است. یعنی اگر سیال مورد نظر را کشسان در نظر بگیریم یا به‌عبارت دیگر چسبندگی را در سیال، غیر قابل صرف‌نظر فرض کنیم باید عبارت $\Pi(\rho)$ را هم به‌حساب آوریم که در حالت کلی می‌تواند تابعی از چگالی سیال باشد و به‌شکل تابعی توانی از ρ نوشته شود. یک حالت دیگر با قرار دادن $\Pi(\rho) = 0$، $w = 0$ و $A_n = 0$ در معادلهٔ2 به‌رابطهٔ زیر می‌رسد،

$$P = -\frac{A}{\rho^{\alpha}} \qquad 3$$

که به‌گاز چپلیگین تعمیم یافته معروف است [8]. یکی از امتیازات این مدل‌ها آن است که می‌تواند علاوه بر انرژی تاریک، مادهٔ تاریک را هم توجیه کند و در واقع متحد کنندهٔ مادهٔ تاریک و انرژی تاریک است. نوع دیگری از این مدل که به‌گاز چپلیگین تغییر یافته معروف است [9] می‌تواند با قرار دادن مقادیر $\Pi(\rho) = 0$ ، $w = 0$ و $n = 1$ در رابطهٔ2 به‌دست آید:

$$P = A_1\rho - \frac{A}{\rho^{\alpha}} \qquad 4$$

در روابط بالا، A و α ثابت‌هایی لزوماً مثبت هستند، در حالی‌که A_1 یک ثابت با امکان گرفتن مقدار مثبت و منفی است. البته این امکان هم وجود دارد که این ثابت‌ها (A_1 و A) را به‌یک متغیر تغییر داد و در حالت کلی، آنها را تابعی از چگالی در نظر گرفت [10]. همین‌طور حالت خاصی از گاز چپلیگین توسعه یافته [11] با قرار دادن دادن $\Pi(\rho) = 0$، $w = 0$ و $\alpha = \frac{1}{2}$ در معادلهٔ2 به‌دست می‌آید در حالی‌که حالت کلی‌تر آن هم به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است [12]. بنابراین یکی از آخرین مدل‌های گاز چپلیگین که اخیراً معرفی گردیده، گاز چپلیگین توسعه یافته با معادلهٔ حالت زیر می‌باشد [13]،

www.SID.ir

Archive of SID

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho^n - \frac{A}{\rho^{\alpha}} \qquad 5$$

توجه داشته باشید که تمامی معادلات بالا حالت‌های خاصی از معادلهٔ2 هستند. اکنون ما می‌خواهیم معادلهٔ حالت کلی‌تری معرفی کنیم که در بر گیرندهٔ تمام حالت‌های بالا باشد. ما معادلهٔ حالت سیال مورد نظر خود را به‌شکل زیر نوشته و آن را گاز چپلیگین تکامل یافته می‌نامیم،

$$P = \sum_{k \in Z} A_{k(Z)} \rho^{k(Z)} \qquad 6$$

با یک نگاه عمیق می‌توان فهمید که تمامی معادلهٔ حالت‌های گاز چپلیگین که پیش از این مطرح شده می‌تواند از از رابطهٔ سادی6 به‌دست آید. در این رابطه، k هر عدد حقیقی صحیح و غیر صحیحی را شامل می‌شود. به‌عنوان مثال، رابطهٔ2 را در نظر بگیرید. فشار ویسکوزیته Π معمولاً به‌شکل زیر نوشته می‌شود [14]:

$$\Pi = 3\xi H \qquad 7$$

که ξ ضریب کشسانی می‌باشد و می‌تواند یک ثابت یا تابعی از چگالی باشد (در اینجا فرض می‌کنیم که ضریب کشسانی یک عدد ثابت است ولی در نظر گرفتن آن به‌عنوان تابعی از چگالی مشکلی در کار ایجاد نمی‌کند)، و H پارامتر هابل می‌باشد که از طریق معادلهٔ فریدمن به‌چگالی ارتباط پیدا می‌کند [15]:

$$H^2 = \frac{\rho}{3} \qquad 8$$

با ترکیب معادلات7 و 8 به‌رابطهٔ زیر می‌رسیم،

$$\Pi = \sqrt{3}\xi \, \rho^{\frac{1}{3}} \qquad 9$$

و همان‌گونه که قبلاً ذکر شد فشار چسبندگی برحسب توانی از چگالی نوشته شد. می‌توان نشان داد که جملهٔ دوم سمت راست معادلهٔ2 نیز می‌تواند به‌شکل چند جمله توانی از چگالی نوشته شود. بنابراین با ترکیب روابط 2 و 9 خواهیم داشت،

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho^n - \frac{1}{\rho^{\alpha}} \left[\frac{A}{1+w} - 1 + \left(1 + \rho^{1+\alpha} - \frac{A}{1+w} \right)^{-w} \right] - \sqrt{3}\xi \, \rho^{\frac{1}{3}} \qquad 10$$

با در نظر گرفتن $\rho^{1+\alpha} - \frac{A}{1+w} \ll 1$ می‌توانیم رابطهٔ10 را به‌صورت زیر بنویسیم،

$$P \approx \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho^n - \frac{1}{\rho^{\alpha}} \left[\frac{A}{1+w} - w\rho^{1+\alpha} + \frac{wA}{1+w} \right] - \sqrt{3}\xi \, \rho^{\frac{1}{3}} \qquad 11$$

که به‌صورت زیر مرتب می‌شود

$$P \approx \sum_{n=1}^{\infty} A_n \rho^n - A\rho^{-\alpha} + w\rho - \sqrt{3}\xi \, \rho^{\frac{1}{3}} \qquad 12$$

که حالت خاصی از رابطهٔ6 با فرض $A_{-\alpha} = -A$، $A_{-1} = W$ و $A_{\frac{1}{3}} = -\sqrt{3}\xi$ است در حالی که بقیهٔ ضرایب غیر صحیح صفر هستند.

لازم است تأکید کنیم بسط کلی 6 برای تمام حالت‌های توانی برحسب چگالی با ضریب ثابت [16] نوشته شد و اگر به‌عنوان مثال برای فشار چسبندگی غیر صفر وقتی که ضریب چسبندگی تابعی لگاریتمی از چگالی باشد،

$$\xi = \xi_0 \ln \rho \qquad 13$$

www.SID.ir

Archive of SID

تنها در حالت‌های خاصی می‌توانیم از این تعمیم استفاده نماییم. به‌این صورت که رابطهٔ13 را به‌صورت زیر می‌نویسیم،

$$\xi = \xi_0 \ln(1 + \rho - 1) \qquad 14$$

و با در نظر گرفتن $\rho - 1 \ll 1$ خواهیم داشت،

$$\xi \approx \xi_0 (\rho - 1) \qquad 15$$

بنابراین باز هم می‌توانیم از بسط کلی6 استفاده کنیم. با این حال با توجه به‌اینکه در اکثر مدل‌های رایج قبلی، چسبندگی سیال تنها تابعی توانی از چگالی است، حالت خاص ذکر شده محدودیت مهمی در مدل ما ایجاد نمی‌کند.

بنابراین ما در این مقاله معادلهٔ 6 را به‌عنوان معادلهٔ حالت گاز چپلیگین تکامل یافته معرفی می‌نماییم و تحقیقات روی نتایج آن را به‌آینده موکول می‌نماییم، زیرا هدف اصلی این مقاله اینست که نشان دهیم معادلهٔ6 همانند معادلهٔ1 می‌تواند از نظریهٔ ریسمان به‌دست آید [17].

رابطه با نظریهٔ ریسمان

برای استخراج معادله حالت6 نیاز داریم تا معادلهٔ حرکت را از هامیلتونی به‌دست آوریم. در مورد یک ذرهٔ نقطه گونه می‌دانیم که انرژی به‌صورت $\frac{1}{2}mv^2$ نوشته می‌شود که سرعت v مشتق مختصه نسبت به‌زمان است. اما همانگونه که در ابتدا ذکر شد، ریسمان همان ذرهٔ نقطه‌گونه است که جرمش در یک بعد گسترده شده است پس نسبت به‌ذرهٔ نقطه‌گونه به‌یک مختصه بیشتر نیاز است. به‌عبارت دیگر وقتی یک ذرهٔ نقطه‌گونه در فضا حرکت می‌کند مسیرش یک خط است (به‌آن جهان خط می‌گویند) که می‌تواند با پارامتر زمان مشخص شود (پارامتریزه شود). ولی مسیر جاروب شده توسط یک ریسمان در فضا یک صفحه می‌باشد (به‌آن جهان سطح می‌گویند) که با τ و σ پارامتریزه می‌شود.

پس در اینجا دو نوع سرعت داریم، یکی مشتق مختصه نسبت به τ (که می‌تواند به‌عنوان پارامتر زمان، t، در نظر گرفته شود) و دیگری مشتق مختصه نسبت به σ (که مختصهٔ فضایی جهان سطح است). بنابراین هامیلتونی را می‌توانیم به‌شکل زیر بنویسیم:

$$H = \frac{1}{2}\int[(\partial_\tau x)^2 + (\partial_\sigma x)^2]d\sigma \qquad 16$$

که $\partial_\tau x \equiv \frac{\partial x}{\partial \tau}$ و $\partial_\sigma x \equiv \frac{\partial x}{\partial \sigma}$ همان سرعت‌ها هستند، یعنی همان‌گونه که انتظار داریم، انرژی متناسب با مربع سرعت نوشته شده است. در نتیجه معادلهٔ حرکت به‌سادگی به‌دست می‌آید:

$$\partial_{\tau\tau} x - \partial_{\sigma\sigma} x = 0 \qquad 17$$

مشتقات مختصه را می‌توانیم به‌صورت زیر تعبیر کنیم:

$$\partial_\tau x = v \qquad 18$$

که v سرعت ریسمان است، و

$$\partial_\sigma x = f(\rho) \qquad 19$$

که $f(\rho)$ تابعی از چگالی می‌باشد. اکنون با استفاده از معادلات 18 و 19 در معادلهٔ حرکت 17 و به‌کارگیری قواعد مشتق زنجیره‌ای می‌توانیم رابطهٔ زیر را به‌دست آوریم:

$$\partial_t v + v\partial_x v - f(\rho)\partial_x f(\rho) = 0 \qquad 20$$

www.SID.ir

Archive of SID

از طرفی می‌دانیم که معادلهٔ اولر در مکانیک سیالات به‌شکل زیر است:

$$\partial_t v + v\partial_x v + \partial_x W = 0 \qquad 21$$

که تغییرات کار انجام شده ($\partial_x W$) برابر است با تغییرات فشار بر چگالی، یعنی

$$\partial_x W = \frac{\partial_x P}{\rho} \qquad 22$$

با قرار دادن رابطهٔ 22 در 21 و مقایسه با معادلهٔ 20 می‌فهمیم:

$$\partial_x P = -\rho f(\rho)\partial_x f(\rho) \qquad 23$$

یک جواب صریح معادلهٔ بالا به‌ازای $f(\rho) = \frac{1}{\rho}$ و $P = -\frac{1}{\rho}$ به‌دست می‌آید که همان معادلهٔ1 با $A = 1$ یا معادلهٔ6 با $k = -1$ و $A_{-1} = 1$ می‌باشد. جواب کلی معادلهٔ 23 را با یک تغییر متغیر به‌شکل $\rho = x$ به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$f(x) = \left[\sum \frac{2nA_n}{n-1} x^{n-1}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad 24$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\partial_x P = -\partial_x \sum A_n \rho^n \qquad 25$$

اکنون با یک تغییر $n \to k$ و $A_n \to -A_k$ به‌عبارت زیر می‌رسیم:

$$P = \sum A_k \rho^k \qquad 26$$

که با فرض این که k یک عدد حقیقی می‌باشد (می‌تواند مثبت، منفی، صحیح و غیر صحیح باشد و در واقع برای اینکه مدل کاملی داشته باشیم ترکیبی از تمام آنها نیاز است) همان معادلهٔ6 است که به‌معادلهٔ حالت گاز چپلیگین تکامل یافته نام‌گذاری شد.

بنابراین نشان دادیم که این معادلهٔ حالت همانند نسخه‌های ابتدایی آن چگونه می‌تواند از نظریهٔ ریسمان به‌دست آید و در واقع منشاء سیالی به‌نام گاز چپلیگین که نامزدی برای توصیف انرژی و ماده تاریک بوده، نظریهٔ ریسمان است.

بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه دستاورد این مقاله را می‌توان اینگونه بیان کرد که معادلهٔ حالت گاز چپلیگین تکامل یافته به‌عنوان یک سیستم بس‌ذره‌ای می‌تواند توصیف کنندهٔ سیالی باشد که نامزدی برای انرژی و مادهٔ تاریک عالم است و این معادلهٔ حالت کاملاً با معادلات نظریهٔ ریسمان در تطابق است. اکنون سؤالی که ایجاد می‌شود این است که این مدل چقدر کارایی دارد و چقدر می‌تواند با مشاهدات تجربی تطابق داشته باشد. برای فهمیدن این موضوع مطالعات جامع و کاملی نیاز است که برنامهٔ تحقیقات آینده می‌باشد. در صورت تأیید شدن مدل چپلیگین تکامل یافته تمامی مدل‌ها و معادلات حالت متعدد به‌کار گرفته شده در تحقیقات قبلی متحد شده و به‌یک شکل واحد نوشته می‌شود که از مزایای مدل مطرح شده می‌باشد. لازم به‌ذکر است که مدل قبلی یعنی گاز چپلیگین توسعه یافته نیز اولین بار توسط نویسنده این مقاله و همکاران معرفی گردیده و نتایج کیهان شناسی بر پایهٔ آن مدل در مراجع [11-13] به‌چاپ رسیده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان مدل گاز چپلیگین تکامل یافته را در نظریه‌های مختلف گرانشی

www.SID.ir

Archive of SID

مورد بررسی قرار داد [18]. اکنون برای اولین بار مدل چپلیگین تکامل یافته مطرح گردیده که پیامدهای کیهان‌شناسی آن قابل بررسی است. به‌عنوان مثال قبلاً اثر انرژی تاریک دینامیک روی خوشه‌های کهکشانی مورد مطالعه قرار گرفته است [19]، حال می‌توان گاز چپلیگین تکامل یافته را به‌عنوان انرژی تاریک دینامیک در نظر گرفت و نتایج را مقایسه کرد.

مرجع‌ها

[1] M. Green, J. Schwarz, E. Witten, Superstring Theory, Vols. 1 and 2 (Cambridge, 1987).

[2] A.G. Riess et al., Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *Astronomical Journal* **116** (1998) 1009.

[3] S. Perlmutter et al., Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae, *Astrophysical Journal* **517** (1999) 565.

[4] S. Chaplygin, On gas jets, *Scientific Members of Moscow University Mathematical Physics* **21** (1904) 1.

[5] V. Gorini, A. Kamenshchik, U. Moschella, Can the Chaplygin gas be a plausible model for dark energy?, *Physical Review D* **67** (2003) 063509.

[6] M. Bordemann, J. Hoppe, The Dynamics of Relativistic Membranes I: Reduction to 2-dimensional Fluid Dynamics, *Physics Letters B* **317** (1993) 315.

[7] A. Dev, J.S. Alcaniz, D. Jain, Cosmological consequences of a Chaplygin gas dark energy, *Physical Review D* **67** (2003) 023515

[8] M.C. Bento, O. Bertolami, A.A. Sen, Generalized Chaplygin gas, accelerated expansion, and dark-energy-matter unification, *Physical Review D* **66** (2002) 043507

[9] U. Debnath, A. Banerjee, S. Chakraborty, Role of Modified Chaplygin Gas in Accelerated Universe, *Class. Quant. Grav.* **21** (2004) 5609.

[10] Z-K Guo, Y-Z Zhang, Cosmology with a Variable Chaplygin Gas, *Physics Letters B* **645** (2007) 326-329

[11] B. Pourhassan, E.O. Kahya, FRW Cosmology with the Extended Chaplygin Gas, *Advances in High Energy Physics* **2014** (2014) 231452

[12] E.O. Kahya, M. Khurshudyan, B. Pourhassan, R. Myrzakulov, A. Pasqua, Higher order corrections of the extended Chaplygin gas cosmology with varying G and Λ, *The European Physical Journal C* **75** (2015) 43

[13] B. Pourhassan, E.O. Kahya, Extended Chaplygin gas model, *Results in Physics* **4** (2014) 101.

[14] X-h Zhai, Y-d Xu, X-z Li, Viscous generalized Chaplygin gas, *The International Journal of Modern Physics D* **15** (2006) 1151.

[15] S. Chen, G.W. Gibbons, Y. Li, Y. Yang, Friedmann's equations in all dimensions and Chebyshev's theorem, *JCAP* **1412** (2014) 035

[16] M. Hu, X.H Meng, Bulk viscous cosmology: statefinder and entropy, *Physics Letters B* **635** (2006) 186

[17] N. Ogawa, Remark on the classical solution of the Chaplygin gas as d-branes, *Physical Review D* **62** (2000) 085023

www.SID.ir

Archive of SID

[18] B. Pourhassan, Extended Chaplygin gas in Horava–Lifshitz gravity, *Physics of the Dark Universe* **13** (2016) 132.

[19] B. Pourhassan, Effect of Dark Energy on the Thermodynamics and Statistical Mechanics of Galaxy Clustering, *Journal of Research on Many-body Systems* 8 18 (1397) 59

[19] بهنام پورحسن، اثر انرژی تاریک روی ترمودینامیک و مکانیک آماری خوشه‌های کهکشانی، *مجلهٔ پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای* **8** 18 (1397) 59.

www.SID.ir