بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد
گرایش نظری

عنوان

بررسی مدل انرژی تاریک هولوگرافیک

استاد راهنما

دکتر خالد سعیدی

نگارش

داود بیننده

مهر ۱۳۹۱

تقدیم به

شاهکار خلقت

مادر و

تقدیم به

امید بودنم

همسر و

تقدیم به

یاد و خاطره

پدرم

خدایا[1]...

به‌من زیستنی عطا کن که در لحظه مرگ بر بی‌ثمری لحظه‌ای که برای زیستن گذشته است حسرت نخورم و مردنی عطا کن که بر بیهودگی‌اش سوگوار نباشم. بگذار تا آن را، خود انتخاب کنم.

خدایا

به‌من توفیق تلاش در شکست، صبر در نومیدی ، جهاد بی‌سلاح، کار بی‌پاداش، فداکاری در سکوت، دین بی‌دنیا، مذهب بی‌عوام، عظمت بی‌نام، خدمت بی‌نان، ایمان بی‌ریا، خوبی بی‌نمود، گستاخی بی‌خامی، قناعت بی‌غرور، عشق بی‌هوس و دوست داشتن بی‌آنکه دوست بداند روزی کن.

اگر تنهاترین تنهاشوم، باز خدا هست

او جانشین همه نداشتن‌هاست...

[1] مناجاتی از دکتر علی شریعتی

سپاس گزاری...

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را زیور عقل آراست.

در آغاز وظیفه‌ی خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر خالد سعیدی صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده‌ی ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

از جناب آقای دکتر بهروز ملک‌الکلامی و جناب آقای دکتر علی آقامحمدی که زحمت مطالعه و داوری را تقبل فرمودند، کمال تشکر و امتنان را دارم.

در پایین نه در آخر، بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگار مهر و مهربانی، مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌اش را و تشکر می‌کنم از همسر دلسوز، برادر عزیز و خواهر مهربانم به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان من بودند.

در پایان از دوست عزیز و فراموش نشدنیم، ابوالحسن محمدی صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین تشکر می کنم از دوستان خوبم، طیب گل‌عنبری، حیدر شیخ‌احمدی، ایمان حسن‌زاده، هادی ایوبی و رضا آقامعلی‌پور که هر یک به‌نحوی در دوره‌ی تحصیلی کارشناسی ارشد مرا یاری کردند.

مهر ۱۳۹۱

چکیده

انرژی تاریک یکی از مرموزترین مسائل در زمینه مطالعات کیهان‌شناسی می‌باشد و تا به حال کاندیداهای مختلفی برای توصیف آن معرفی شده‌اند تا بتوانند به فهم و درک ما در مورد طبیعت این شاره مرموز کمک کند. هر کدام از این کاندیداها نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند. در این رساله قصد داریم که انرژی تاریک هولوگرافیک را مورد بررسی قرار دهیم که از سوی دانشمندان نیز مورد توجه خاصی قرار گرفته است. برای این کار ما نیازمند معرفی یک طول قطع هستیم. در نظر گرفتن هر طول قطع ما را به سوی نتایج متفاوتی سوق می‌دهد. تا به حال طول قطع‌های مختلفی معرفی شده‌اند که در این میان می‌توان از طول قطع هابل، افق ذره، افق رویداد آینده، اسکالر ریچی و ... نام برد. در سال ۲۰۱۲ هونگ و وو، طول قطع جدیدی به نام طول قطع همدیس عمر گونه را معرفی کردند. در ابتدا ما نتایج حاصل از طول قطع‌های مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در نهایت مدل انرژی تاریک هولوگرافیک با طول قطع همدیس عمر گونه را در مدل $\Lambda(t)CDM$ و همچنین در چارچوب برانز-دیکی مورد مطالعه قرار می‌دهیم و نتایج حاصل را با نتایج حاصل از طول قطع‌های مختلف دیگر مقایسه خواهیم کرد.

کلمات کلیدی: *انرژی تاریک هولوگرافیک، طول قطع هابل، طول قطع افق ذره، طول قطع افق رویداد آینده، طول قطع اسکالر ریچی، طول قطع همدیس عمرگونه، گرانش برانز دیکی*

فهرست مطالب

۱ معادلات و مفاهیم پایه در کیهان‌شناسی ۱

۱.۱ انبساط کیهان ۱

۲.۱ ذرات موجود در کیهان ۲

۱.۲.۱ باریونها ۲

۲.۲.۱ تابش ۳

۳.۲.۱ نوترینوها ۳

۴.۲.۱ ماده تاریک ۳

۵.۲.۱ انرژی تاریک ۵

۳.۱ معادله اینشتین ۵

۴.۱ معادلات فریدمان ۶

۱.۴.۱ تحول عالم ماده غالب ۸

۲.۴.۱ تحول عالم تابش غالب ۹

۵.۱ افق‌های کیهانی ۹

۱.۵.۱ افق ذره ۱۰

۲.۵.۱ افق رویداد آینده ۱۰

۳.۵.۱ افق ظاهری ۱۰

۶.۱ هندسه عالم ۱۰

۱.۶.۱ هندسه تخت $(k = ۰)$ ۱۱

۲.۶.۱ هندسه کروی $(k > ۰)$ ۱۱

۳.۶.۱ هندسه بیضوی $(k < ۰)$ ۱۲

۷.۱ پارامترهای مشاهده پذیر ۱۲

۱.۷.۱ پارامتر هابل ۱۲
۲.۷.۱ پارامتر چگالی ۱۳
۳.۷.۱ پارامتر کندشوندگی ۱۴

۲ انرژی تاریک **۱۵**
۱.۲ ثابت کیهان‌شناختی ۱۶
۱.۱.۲ مشکل ثابت کیهان‌شناختی ۱۷
۲.۲ مدل‌های دیگر انرژی تاریک ۱۸
۱.۲.۲ میدان کوییِنتسنس ۱۸
۲.۲.۲ میدان فانتوم ۱۹

۳ انرژی تاریک هولوگرافیک **۲۱**
۱.۳ معادلات اساسی ۲۵
۲.۳ طول قطع هابل ۲۷
۱.۲.۳ پارامتر معادله حالت متغییر ۲۸
۳.۳ طول قطع افق رویداد آینده ۲۸
۱.۳.۳ مقیاس بندی نسبت چگالی انرژی ۳۰
۲.۳.۳ حد بدون برهم کنشی ۳۲
۳.۳.۳ ثابت r ۳۴
۴.۳ طول قطع همدیس عمرگونه ۳۶
۱.۴.۳ مقیاس بندی نسبت چگالی انرژی ۳۷
۲.۴.۳ حد بدون برهم کنشی ۳۹
۵.۳ طول قطع ریچی ۴۱
۱.۵.۳ روابط کلی ۴۱
۲.۵.۳ پارامتربندی CPL ۴۳
۳.۵.۳ برهم کنش $Q = ۳H\beta\rho_H$ ۴۴
۴.۵.۳ حد بدون برهم کنشی ۴۶
۶.۳ بررسی قانون دوم ترمودینامیک تعمیم‌یافته در مدل انرژی تاریک هولوگرافیک ۴۸

۱.۶.۳ تغییرات آنتروپی کل برای حالت برهم کنشی ۴۹
۲.۶.۳ تغییرات آنتروپی کل برای حالت بدون برهم کنش ۵۰

۴ مدل $\Lambda(t)CDM$ ۵۳
۱.۴ طول قطع همدیس عمرگونه به عنوان طول مقیاس کیهانی ۵۶
۲.۴ نگاهی دیگر به چگونگی تغییرات Λ ۵۷

۵ مدل انرژی تاریک هولوگرافیک تعمیم‌یافته در چارچوب نظریه برانز-دیکی ۶۲
۱.۵ مقدمه ۶۲
۲.۵ معادلات پایه ۶۲
۳.۵ بدون بر هم کنش ۶۵
۴.۵ بر هم کنشی ۷۰

۶ نتیجه‌گیری ۷۵

لیست تصاویر

۱.۱ نمودار فاکتور مقیاس بر حسب زمان کیهانی ۱۲

۱.۳ طول قطع افق رویداد، حد بدون برهم‌کنشی. این نمودار رفتار تغییرات r بر حسب پارامتر ω را برای دو مقدار مختلف ω_0 با $r_0 = \frac{3}{7}$ نشان می‌دهد. ۳۳

۲.۳ طول قطع افق رویداد، حد بدون برهم‌کنشی. این نمودار رفتار تغییرات r را بر حسب ضریب مقیاس a برای دو مقدار ω_0 برای $r_0 = \frac{3}{7}$ و $\omega_1 = 0/31$ نشان می‌دهد. ۳۴

۳.۳ طول قطع افق رویداد، حد بدون برهم‌کنشی. این نمودار رفتار تغییرات r را بر حسب ضریب مقیاس a برای مقدار $\omega_0 = -0/9$ برای $r_0 = \frac{3}{7}$ و $\omega_1 = 0/31$ نشان می‌دهد. . . . ۳۵

۴.۳ طول قطع همدیس عمر گونه. این نمودار تغییرات ω را بر حسب a برای سه مقدار $\xi = 1, 2, 3$ نشان می‌دهد، که نمودار کم‌رنگ، خطچین و پررنگ به ترتیب برای $\xi = 1$ ، $\xi = 2$ و $\xi = 3$ رسم شده‌اند. ۳۸

۵.۳ طول قطع همدیس عمر گونه. حد بدون برهم‌کنشی. نمودار تغییرات ω را بر حسب a، برای $r_0 = \frac{1}{3}$ و $\omega_0 = -1$ و با قرار دادن $r = r_0 a^{-\xi}$، برای $\xi = 1$ نشان می‌دهد. ۴۰

۶.۳ طول قطع همدیس عمر گونه. حد بدون برهم‌کنشی. نمودار تغییرات ω را بر حسب a، برای $r_0 = \frac{1}{3}$ و $\omega_0 = -1$ و با قرار دادن $r = r_0 a^{-\xi}$، برای $\xi = 2$ نشان می‌دهد. ۴۰

۷.۳ طول قطع همدیس عمر گونه. حد بدون برهم‌کنشی. نمودار تغییرات ω را بر حسب a، برای $r_0 = \frac{1}{3}$ و $\omega_0 = -1$ و با قرار دادن $r = r_0 a^{-\xi}$، برای $\xi = 3$ نشان می‌دهد. ۴۱

۸.۳ طول قطع اسکالر ریچی. نمودار تغییرات پارامتر ω را بر حسب a، برای سه مقدار پارامتر برهم‌کنشی β، برای $\omega_0 = -1$ و $r_0 = \frac{3}{7}$ را نشان می‌دهد. ۴۵

۹.۳ طول قطع اسکالر ریچی. نمودار تغییرات r را بر حسب پارامتر a، برای سه مقدار پارامتر برهم‌کنشی β، برای $\omega_0 = -1$ و $r_0 = \frac{3}{7}$ نشان می‌دهد. ۴۶

۱.۵ این نمودار رفتار Ω_Λ را بر اساس a برای $c = ۰/۲$ نشان می دهد. نمودار نشان می دهد که رفتار Ω_Λ افزایشی است و با گذر زمان تقریبا به سمت ۱ میل می کند. ۶۸

۲.۵ این نمودار رفتار ω_Λ را بر اساس a نشان می دهد با $c = ۰/۲$. بر اساس شکل ۱.۵ ما سه مقدار متفاوت را برای Ω_Λ در نظر می‌گیریم. ۰/۷۳ (خط ممتد)، ۰/۸۳ خطچین، ۰/۹۳ (نقطه خط) . شکل نشان می دهد که ω_Λ مقدار منفی دارد و می‌تواند انبساط شتابدار عالم را توجیه کند. همچنین این پارامتر از مرز فانتوم عبور می‌کند. ۶۹

۳.۵ نمودار رفتار Ω_Λ را بر اساس a نشان می دهد. ما قرار می دهیم $c = ۰/۱۸$، $b^۲ = ۰/۱$. Ω'_Λ یک مقدار مثبت می شود، چراکه با گذشت زمان Ω_Λ یک رفتار افزایشی نشان می دهد، به هر حال به علت وجود برهم‌کنش بین انرژی تاریک و ماده تاریک، پارامتر چگالی انرژی تاریک Ω_Λ به آرامی تغییر می‌کند و به یک مقدار خاص که کمتر از یک است متمایل می شود. ۷۴

۴.۵ نمودار رفتار ω_Λ را بر اساس a برای سه مقدار متفاوت Ω_Λ ، ۰/۷۳ (خط)، ۰/۸۳ (خطچین) و ۰/۹ (خط-نقطه)که از شکل (۳.۵) گرفته شده‌اند برای $c = ۰/۱۸$ ، $b^۲ = ۰/۱$ و $\varepsilon = ۰/۰۰۲$ نشان می دهد. بر اساس شکل، ω_Λ یک مقدار منفی به خود می‌گیرد و این پارامتر این توانایی را دارا است که با گذشت زمان طولانی از مرز فانتوم گذر کند. ۷۴

فصل ۱
معادلات و مفاهیم پایه در کیهان‌شناسی

۱.۱ انبساط کیهان

بین سالهای ۱۹۱۲ و ۱۹۲۵ وی. ام. اسلیفر [۱] جابجایی‌هایی را در طیف بیش از ۲۰ جسم اندازه گرفت که بعدها معلوم شد کهکشان هستند. اسلیفر متعجب شد که چرا همه این جابجایی‌ها به طرف انتهای سرخ طیف هستند [۲].

اگر از فرمول انتقال دوپلر نیوتنی استفاده کنیم، سرعت شعاعی عقب نشینی کهکشان را به صورت $V = cz$ به دست می‌آوریم، که z انتقال به سرخ است، (چون در این رصدها $z \ll ۱$ است، می‌توان از فرمول انتقال دوپلر نیوتونی استفاده کرد).

سپس ادوین‌هابل و میلتون هیومیسون فهرست رصدهای اسلیفر را به کهکشان‌های بیشتر و درخشانترین خوشه‌های کهکشانی گسترش دادند.

در واقع هابل، سرعت شعاعی کهکشان را بر حسب قدر ظاهری آن رسم کرد. اگر همه کهکشان‌های مشاهده‌شده به یک اندازه شدت روشنایی داشته باشند، قدر آنها با لگاریتم فاصله‌شان از زمین متناسب است. بنابراین خط راستی که از بین خوشه نقطه‌ها رسم می شود از رابطه خطی زیر پیروی می‌کند.

$$V = cz = H_{\circ} D \qquad (۱.۱)$$

که در آن D فاصله کهکشان و z انتقال به سرخ است. ثابت $H_{\circ}$ را اکنون ثابت هابل می‌نامند.

رابطه (۱.۱) به قانون هابل معروف است [۲]. این رابطه به صورت یک قانون خطی در سال ۱۹۲۹

[۱] V. M. Slipher

[۲] هر چند جابجایی طیف نوری اکثرا انتقال به سرخ است، اما در بعضی از مشاهدات که برای کهکشان‌های نزدیک مانند امراةالمسلسله انجام شده، انتقال آبی هم مشاهده شده است.

منتشر شد، و هیجان بسیار به وجود آورد زیرا تفسیر اولیه قانون هابل این بود که انفجار عظیمی در همسایگی ما در عالم صورت گرفته‌است که از آن کهکشان‌ها به بیرون پرتاب شده اند. اما، خطی بودن قانون هابل نشان می‌دهد که لازم نیست خود را در مکان خاصی از عالم فرض کنیم. اگر جمعیت کهکشان‌ها را از هر کهکشان دیگر نگاه کنیم، قانون هابل یکسانی بدست می‌آوریم. ترکیب این واقعیت با همگن بودن و همسانگردی توزیع جمعیت کهکشان‌ها ساختار بسیار منظم عالم را بدون هیچ مکان یا جهت مرجحی نشان می‌دهد.

یک تکه خمیر از آردی را که پف می‌کند را در نظر بگیرید که در تنور پخته می‌شود و فرض کنید دانه‌های زیره را بطور یکنواخت در خمیر پخش کرده‌ایم. خمیر بر اثر پخته شدن منبسط می‌شود و دانه‌های زیره از یکدیگر دور می‌شوند. پدیده عقب نشینی کهکشان‌ها را می‌توان به همین صورت در نظر گرفت. آنها نقطه‌هایی فضایی هستند که منبسط می‌شوند. بدین ترتیب مفهوم عالم در حال انبساط شکل گرفت، در اینجا نیز کهکشان‌ها منبسط نمی‌شوند بلکه فاصله آنها از یکدیگر زیاد می‌شود.

آهنگ انبساط را ثابت‌هابل مشخص می‌کند.هابل مقدار $H_۰$ را در حدود $۵۳۰\ kms^{-۱}Mpc^{-۱}$ بدست آورد. مقدار $H_۰$ را به صورت زیر می‌نویسند:

$$H_۰ = ۱۰۰h\ \ kmS^{-۱}Mpc^{-۱} \qquad (۲.۱)$$

که براساس آخرین نتایج بدست آمده از تلسکوپ فضایی هابل $h = ۰/۷۲ \pm ۰/۰۸$ می‌باشد [۱].

۲.۱ ذرات موجود در کیهان

۱.۲.۱ باریونها

باریون‌ها یک دسته از هادرون‌ها با اسپین نیمه صحیح‌اند و قسمت قابل رویت عالم از باریون بوجود آمده است. باریونها شامل پروتون و نوترون هستند که هر دو آنها از ۳ کوارک تشکیل شده اند، پروتون (۲ کوارک بالا و ۱ کوارک پایین)، نوترون (۱ کوارک بالا و ۲ کوارک پایین). عالم خنثی است یعنی به ازای هر پروتون یک الکترون وجود دارد. اگر چه الکترونها از کوارک ساخته نشده‌اند اما کیهان‌شناسان آنها را نیز از دسته باریونها به حساب می‌آورند. انرژی سکون الکترون در مقابل انرژی سکون پروتون و نوترون بسیار ناچیز است واز آن صرفنظر می‌شود. در حال حاضر باریونها حرکت غیر نسبیتی دارند. یعنی انرژی

جنبشی آنها خیلی کمتر از انرژی سکون آنهاست[۲].

۲.۲.۱ تابش

کوانتوم تابش را فوتون می نامند، و آن را γ با نمایش می‌دهند.انرژی آن $E = h\nu$ می‌باشد که h ثابت پلانک و ν فرکانس فوتون است. [۲].

۳.۲.۱ نوترینوها

نوترینوها به دلیل داشتن سطح مقطع برخورد کوچک، ذراتی با بر هم کنش بسیار ضعیف و حاصل واپا شی پرتوزا هستند. هنوز شواهد محکمی که نشان دهد نوترینوجرم دارد وجود ندارد پس نوترینو بدون جرم است و سرعت آن می‌تواند به سرعت نور برسد. نوترینوها می‌توانند شامل نوترینوی الکترونی نوترینوی میونی و نوترینوی تاوی باشند [۲].

۴.۲.۱ ماده تاریک

در کیهان‌شناختی، ماده تاریک [۳] یک ماده فرضی است و به دلیل اینکه برهم کنش الکترومغناطیسی ندارد، تنها به واسطه بر هم کنش گرانشی می‌توان به وجود آن پی برد. شواهد متعددی دال بر وجود ماده تاریک وجود دارند که به بررسی چند مورد از آنها می‌پردازیم [۲].

۱) منحنی چرخش کهکشان‌ها

بررسی منحنی چرخش کهکشان‌ها برای کهکشانی به جرم $M(R)$ و شعاع R نشان می‌دهد، ذراتی که در دیسک کهکشان قرار دارند دارای حرکت صلب بوده و سرعت آنها تابعی از شعاع نسبت به مرکز دیسک $v \sim R$ می‌باشند، که با مشاهدات مطابقت دارد. اما سرعت دوران ستاره‌های بیرونی (بازوی کهکشان) تابع قانون کپلر، و به صورت $v \sim \frac{۱}{\sqrt{R}}$ با افزایش فاصله از مرکز کهکشان کاهش می‌یابد. در صورتی که مشاهدات رصدی مقدار سرعت را بیشتر از مقداری که محاسبات نظری پیش بینی می‌کنند تخمین می‌زنند. به عبارتی آهنگ دوران ستاره‌ها به دور مرکز کهکشان به توزیع ماده $M(R)$ بستگی دارد، اما حرکت مشاهده شده برای ستاره‌های بیرونی کهکشان‌ها تندتر از آن است که جرم کل کهکشان جوابگوی

[۳] Dark matter

آن باشد. که این بیانگر آن است که درهاله کهکشانها باید مقداری ماده وجود داشته باشد که توسط آن بتوان تخت بودن منحنی چرخش کهکشان‌ها را توجیه کرد.

۲) وجود خوشه‌های کیهانی

خوشه‌های کیهانی بزرگترین ساختارهای کیهانی هستند که توسط رمبش گرانشی بسیار قوی تشکیل می‌شوند. اجزای مرئی خوشه‌های کیهانی شامل: ستاره‌های واقع در داخل کهکشان قابل رویت و گازهای بسیار داغ که در ناحیه X تابش می‌کنند، می‌باشند. اما اجزا کهکشان‌ها دارای جرم چندانی نیستند که بتوانند ماده را به این صورت متراکم کنند. مقایسه سرعت فرار خوشه کهکشانی و هر یک از کهکشان‌های داخل خوشه نشان می‌دهد که سرعت فرار هر یک از کهکشان‌ها داخل خوشه از سرعت فرار کل هر یک از کهکشان‌ها بزرگتر است. اما علی رغم آن، کهکشان‌های داخل خوشه موفق به فرار از خوشه کهکشان نشده‌اند و همچنان در داخل خوشه باقی مانده‌اند. از آنجایی که سرعت فرار خوشه کهکشانی تابع جرم کل خوشه است. بنابراین ماده ناشناخته در هاله کهکشان‌ها وجود دارد که باعث بزرگتر شدن سرعت فرار کل خوشه می‌شود [۲]. همچنین در مورد گازهای داغ درون خوشه‌های کهکشانی به نتایج مشابه می‌توان رسید. متداول ترین کاندیداهایی که برای ماده تاریک پیشنهاد شده اند به شرح زیراند.

۱) ذرات بنیادی

بسیاری بر این باورند که ماده تاریک عمدتا متشکل از ذراتی هستند که برای بررسی ویژگی آنها باید به سراغ ذرات بنیادی رفت.

- نوترینوها یک دسته از این ذرات هستند، که چنانچه بتوان برای این ذرات جرم در نظر گرفت آنها می‌توانند به عنوان کاندیدایی برای ماده تاریک منظور شوند. نوترینوهای سبک تحت عنوان ماده تاریک داغ [۴] شناخته می‌شوند که دارای سرعت‌های نسبیتی هستند و نوترینوهای سنگین نمونه‌ای از ماده تاریک سرداند [۵] که دارای سرعت‌های غیر نسبیتی و کوچک می‌باشند.

- دسته دیگر ذرات پر جرم با برهم‌کنش ضعیف هستند که اصطلاحا به آنها $WIMP$ [۶] می‌گویند.

[۴] hot dark matter
[۵] cold dark matter
[۶] Weakly Interacting Massive Particle

۲) جرم‌های فشرده [۷]

بعضی از کیهان شناسان تصور می‌کنند که ماده تاریک از جنس همان مواد متعارف اختر فیزیک هستند. در این بخش به نمونه‌ای از آنها اشاره می‌شود:

- اجرام‌هاله‌ای فشرده پر جرم تحت عنوان ماچوها [۸] که در هاله کهکشان وجود دارند(کوتوله‌های قهوه‌ای) که تنها کاندیدای ماده تاریک هستند که آشکارسازی شده‌اند.
- سیاه‌چاله‌ها مثال دیگر از جرم‌های فشرده‌اند که می‌توانند مانند ماده تاریک سرد عمل کنند.

همچنین می‌توان به نمونه‌های پیشنهادی دیگر برای ماده تاریک اشاره کرد، مانند کهکشان‌های کم‌سو، غبار، مواد سیاره‌ای و احیانا ستاره‌های نوترونی مرده که همگی به دلیل بی فروغی از قلم افتاده‌اند. در حال حاضر ماده تاریک سرد مقبول ترین کاندید برای ماده تاریک می‌باشند.

۵.۲.۱ انرژی تاریک

در مورد انرژی تاریک [۹] مجهولات ما بیشتر از معلومات ما می‌باشد. این نوع عجیب از شاره دارای فشار منفی می‌باشد و فقط در برهمکنش‌های گرانشی شرکت می‌کند به همین خاطر قابل رؤیت نیستند. بدلیل تاثیرات آن بر انبساط عالم می‌دانیم که چقدر از آن در عالم است. حدود ۷۴% عالم را انرژی تاریک پر کرده است و ماده تاریک حدود ۲۲% عالم را تشکیل داده است ۴% باقیمانده سهم ماده معمولی و تابش می‌باشد. صرفنظر از این معلومات همه چیز به صورت یک معمای بزرگ است که ذهن دانشمندان را به خود مشغول کرده است.

۳.۱ معادله اینشتین

معادله میدان اینشتین به صورت

$$G^{\mu}_{\nu} = R^{\mu}_{\nu} - \frac{۱}{۲} g^{\mu}_{\nu} R = ۸\pi G T^{\mu}_{\nu} \qquad (۳.۱)$$

[۷] compact object
[۸] Massive Astrophysical Compact Halo Object (MACHO)
[۹] Dark energy

است. که سرعت نور $c = ۱$ است. که در اینجا R^{μ}_{ν} تانسور ریچی، R اسکالر خمش، g^{μ}_{ν} تانسور متریک، T^{μ}_{ν} تانسور انرژی تکانه و G ثابت گرانشی نیوتنی می‌باشد. این معادله چگونگی تاثیر ماده بر هندسه فضا زمان را توصیف می‌کند بطوریکه سمت چپ معادله، خواص هندسه کیهان و سمت راست، خواص انرژی-تکانه را در بر می‌گیرد. یکی از نتایج مهمی که از معادلات میدان اینشتین به دست می‌آید پایستگی موضعی تانسور انرژی-تکانه است. این مطلب با استفاده از اتحاد بیانکی [۱۰] $G^{\mu\nu}_{;\nu} \equiv ۰$ و به صورت زیر حاصل می‌شود

$$T^{\mu\nu}_{;\nu} = ۰ \qquad (۴.۱)$$

دینامیک کیهان با استفاده از معادله میدان اینشتین که یک معادله غیر خطی و پیچیده است توصیف می‌شود [۳].

۴.۱ معادلات فریدمان

متریک فریدمان - رابرتسون - واکر [۱۱] (FRW) عمومی‌ترین متریکی است که جهان همگن و همسانگرد را توصیف می‌کند. بنابراین برای بررسی دینامیک عالم می‌توان متریک FRW را در نظر گرفت که این متریک به صورت بیان می شود:

$$ds^{۲} = -dt^{۲} + a^{۲}(t)\Big[\frac{dr^{۲}}{۱ - kr^{۲}} + r^{۲}d\theta^{۲} + r^{۲}\sin^{۲}(\theta)d\varphi^{۲}\Big] \qquad (۵.۱)$$

که در آن $a(t)$ ضریب مقیاس کیهان [۱۲] نامیده‌می‌شود که بیانگر دینامیک عالم است، k یک عدد صحیح است که هندسه فضایی عالم را توصیف می‌کند، که برای عالم تخت، بسته و باز به ترتیب عبارت است از ۰ و ۱ و ۱-. t زمان کیهانی و (r, θ, φ) مختصات کروی در دستگاه همراه است.

با استفاده از معادلات میدان اینشتین و متریک فریدمان - رابرتسون - واکر مولفه‌های تانسور ریچی و اسکالر ریچی به صورت زیر حاصل می‌شوند

$$R^{۰}_{۰} = \frac{۳\ddot{a}}{a} \qquad (۶.۱)$$

$$R^{i}_{j} = (\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{۲\dot{a}^{۲}}{a^{۲}} + \frac{۲k}{a^{۲}})\delta^{i}_{j} \qquad (۷.۱)$$

[۱۰] Bianchi identities
[۱۱] Friedmann- Rabertson-Walker
[۱۲] scale factor

$$R = ۶(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{۲\dot{a}^۲}{a^۲} + \frac{k}{a^۲}) \qquad (۸.۱)$$

که در آن $\dot{a} = da/dt$ آهنگ انبساط عالم و $\ddot{a}$ شتاب انبساط عالم را نشان می‌دهد.

ماده موجود در عالم را به صورت یک سیال کامل فرض می‌کنیم که تانسور انرژی تکانه این سیال کامل در سیستم مختصاتی که با سیال حرکت می‌کند به شکل زیر است

$$T^{\mu}_{\nu} = Diag(-\rho, p, p, p) \qquad (۹.۱)$$

که در آن p و ρ به ترتیب فشار و چگالی انرژی سیال می‌باشند.

با محاسبه تانسور اینشتین برای متریک فریدمان - رابرتسون - واکر و استفاده از معادله (۳.۱) و (۹.۱) دو معادله زیر حاصل می‌شوند که به معادلات فریدمان مشهورند

$$H^۲ = (\frac{\dot{a}}{a})^۲ = \frac{۸\pi G}{۳}\rho - \frac{k}{a^۲} \qquad (۱۰.۱)$$

$$\dot{H} = -۴\pi G(\rho + p) + \frac{k}{a^۲} \qquad (۱۱.۱)$$

که در آن H پارامتر هابل نامیده می‌شود. p فشار کل ماده عالم و ρ چگالی انرژی کل، که شامل مواد مختلف در عالم از جمله تابش، مواد باریونیک، ماده تاریک و انرژی تاریک می‌باشد، که هر دو تابعیت t دارند.

به کمک معادله پایستگی تانسور انرژی تکانه ، $\nabla_{\nu}T^{\mu\nu} = ۰$، معادله پیوستگی بدین صورت بدست می‌آید:

$$\dot{\rho} + ۳H(\rho + p) = ۰ \qquad (۱۲.۱)$$

همچنین، معادله پیوستگی را می‌توان از معادلات (۱۰.۱)و (۱۱.۱) نیز بدست آورد. با استفاده از معادلات (۱۰.۱)و (۱۱.۱) می‌توان معادله شتاب را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{۴\pi G}{۳}(\rho + ۳p) \qquad (۱۳.۱)$$

معادلات فریدمان، پایستگی انرژی، و شتاب معادلات اساسی کیهان‌شناختی هستند [۴]. تاکنون سه پارامتر مجهول داریم و دو معادله مستقل، و برای مشخص کردن این پارامترها به یک معادله‌ی دیگر نیازمندیم. این رابطه‌ی آخر به "معادله حالت" معروف است که رابطه‌ای بین کمیت‌های فشار و چگالی

انرژی است. یکی از ساده‌ترین نوع این معادله حالت $p = \omega\rho$ می‌باشد که ω به پارامتر معادله حالت معروف است. به کمک این سه رابطه می‌توان به توصیفی از رفتار عالم دست یافت.

۱.۴.۱ تحول عالم ماده غالب

برای بررسی تحول عالم، نیاز است که از محتوی آن اطلاع داشته باشیم. کیهانی را در نظر می‌گیریم که پر از ماده باشد (جهان ماده غالب)، منظور از ماده در اینجا مواد باریونی غیر نسبیتی به اضافه ماده تاریک که کهکشان‌ها از آنها ساخته شده اند است. این مواد در حین انبساط کیهان فشاری وارد نمی‌کنند. این مواد را (ماده غبار گونه) نیز گویند.

ارتباط بین چگالی ماده ρ، و فشار P، در رابطه تحت عنوان معادله حالت $\omega = \frac{P}{\rho}$، در نظر گرفته می‌شود که یکی از کمیت‌های مهم کیهان‌شناختی است.

تحول عالم پر شده با یک سیال کامل با پارامتر معادله حالت ω را در نظر می‌گیریم. جواب فضا زمان تخت معادلات فریدمان تقریب نسبتا خوبی برای تحول عالم در دوران بدون فشار یا ماده غالب و همچنین دوران تابش غالب دارد. بنابراین جواب‌های معادلات (۱۰.۱) و (۱۱.۱) برای فضا زمان تخت منجر به روابط زیر می‌شود.

$$H(t) = \frac{۲}{۳(۱+\omega)t} \qquad (۱۴.۱)$$

$$a(t) \propto t^{\frac{۲}{۳(۱+\omega)}} \qquad (۱۵.۱)$$

$$\rho \propto a^{-۳(۱+\omega)} \qquad (۱۶.۱)$$

ماده اصطلاحی است که کیهان‌شناسان به طور اختصاصی برای ماده غیر نسبیتی به کار می برند وآن را می‌توان برای هر نوع ماده‌ای (باریونی یا ماده تاریک) با فشار صفر $(p = ۰)$ به کار برد که گاهی اصطلاح غبار نیز به جای ماده استفاده می شود [۱۳]. جهان بدون فشار، ساده‌ترین فرضی است که می‌توان در نظر گرفت و وقتی که عالم در حال سرد شدن است می‌تواند تقریب خوبی برای اتم‌ها در عالم باشد، چون آنها کاملا از هم جدا هستند و برهم‌کنش جزئی دارند و همچنین می‌تواند توصیف خوبی از مجموعه کهکشان‌ها در عالم باشد اگر آنها برهم‌کنشی جز برهم‌کنش گرانشی نداشته باشند. اگر ماده تشکیل دهنده

[۱۳] dust

جهان عمدتا کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی باشد، فشار ناشی از حرکت‌های تصادفی کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی قابل چشم‌پوشی است. بنابراین با استفاده از معادلات (۱۴.۱)و (۱۵.۱)و (۱۶.۱) در عالم ماده غالب برای $\omega = ۰$ و $k = ۰$ بدست می آوریم

$$a(t) \propto t^{\frac{۲}{۳}} \qquad , \qquad \rho \propto a^{-۳}$$

۲.۴.۱ تحول عالم تابش غالب

تابش ذراتی هستند که با سرعت نور حرکت می‌کنند و انرژی جنبشی آن‌ها منجر به یک فشار تابشی می شود. با این فرض که جهان پر از گاز فرانسبیتی (تابش) باشد در نظریه استاندارد فشار آن به صورت $(p = \frac{۱}{۳}\rho)$ می‌باشد. بنابراین با استفاده از معادلات (۱۴.۱)و (۱۵.۱)و (۱۶.۱) برای عالم تابش غالب $(\omega = ۱/۳)$ بدست می آوریم

$$a(t) \propto t^{\frac{۱}{۲}} \qquad , \qquad \rho \propto a^{-۴}$$

مشاهده می شود که در هر دو مورد، تابش غالب و ماده غالب، انبساط کندشونده است $(\ddot{a} < ۰)$. یک انبساط با شتاب مثبت $(\ddot{a}(t) > ۰)$ برای پارامتر معادله حالت زیر رخ می‌دهد [۲]:

$$\omega < -\frac{۱}{۳}$$

۵.۱ افق‌های کیهانی

طبق مشاهداتی که از کیهان داریم، ژئودزیک فوتون‌ها به گونه‌ای است که $ds = ۰$ و چون کیهان همسانگرد می‌باشد تنها یک مسیر شعاعی را در نظر می‌گیریم $(d\theta = ۰, d\varphi = ۰)$. فرض کنید شیئی که در مختصه $r = ۰$ قرار دارد، در زمان t_e فوتونی را تابش کند و این فوتون در زمان $t_۰$ توسط ما $(r_۰)$ آشکارسازی شود، بنابراین بر اساس متریک FRW داریم که:

$$c^۲dt^۲ = \frac{a^۲dr^۲}{۱ - kr^۲} \qquad (۱۷.۱)$$

$$c\int_{t_e}^{t_۰} \frac{dt}{a(t)} = \int_{۰}^{r_۰} \frac{dr}{\sqrt{۱ - kr^۲}} \qquad (۱۸.۱)$$