دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک
(گرایش نظری)

گرانش تصحیح یافته و انبساط کیهان

از

گلناز فرپور فداکار

استاد راهنما

دکتر حسین فرج الهی

استاد مشاور

آروین روان پاک

اسفند ۱۳۸۹

تقدیم به همسر عزیزم

آروین

قدردانی و تشکر

توفیق دادار بزرگ که اگر نمی‌بود این کار رنگ بودن نمی‌گرفت. **از همسر مهربان و صبورم** که مشوق اصلی من برای تحصیل و تحقیق بوده نهایت تشکر را دارم. از او که همواره مشوق و یار و همراه مهربانی برایم بوده است، به خاطر همه چیز سپاس‌گزارم. از خانواده عزیزم، که در تمام مراحل زندگی‌ام پشتیبان من بوده‌اند کمال تشکر را دارم. از پشتیبانی‌های خانواده محترم و بزرگوار همسرم نیز متشکرم. از استاد راهنمای محترم خود، آقای دکتر حسین فرج الهی به خاطر همکاری‌ها و بحث‌های مفیدشان تشکر می‌کنم. بی‌شک آموختن نکته‌های بسیار ارزنده و راهنمایی‌های بی‌دریغ و سودمند ایشان نقش تعیین کننده‌ای در شکل گیری اطلاعات علمی‌ام در زمینه کیهان‌شناسی داشته است. از نظرات ارزنده مشاور محترم این پایان‌نامه جناب آقای آروین روان‌پاک کمال قدردانی را دارم. مراتب قدردانی خود را از نظرات ارزشمند اساتید داور این پایان‌نامه، جناب دکتر پناهی و جناب دکتر صفاری و همچنین از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی، جناب دکتر مشایخی اعلام می‌کنم.

فهرست مندرجات

چکیده فارسی . . . . . ج

چکیده انگلیسی . . . . . چ

مقدمه ۱

۱ معادلات میدان کیهان شناسی

۱.۱ معادلات میدان انشتین ۱۳

۲.۱ معادلات فریدمان ۱۵

۳.۱ معادله حالت ۱۷

۴.۱ نواحی گسترشی ۱۹

۲ بررسی تحول کیهان با استفاده از نظریه گرانش تصحیح یافته

۱.۲ مقدمه ۲۲

۲.۲ گرانش تصحیح یافته $f(R)$ ۲۲

۳.۲ معادلات میدان در گرانش تصحیح یافته $f(R)$ ۲۳
۴.۲ بررسی چند مدل از گرانش تصحیح یافته $f(R)$ ۲۴
۵.۲ گرانش تصحیح یافته غیر موضعی $f(R)$ برای توضیح تورم اولیه و شتاب کنونی کیهان ۲۹
۱.۵.۲ کیهان‌شناسی فانتومی و کواینتسنس در گرانش تصحیح یافته غیر موضعی ۳۶
۲.۵.۲ اتحاد تورم اولیه با شتاب کیهانی در گرانش تصحیح یافته غیر موضعی $F(R)$ ۳۸

۳ دینامیک کیهان در کیهان‌شناسی کملون تاکیون

۱.۳ مقدمه ۴۱
۲.۳ بررسی مدل ۴۲
۳.۳ آزمون‌های کیهانی ۴۶
۱.۳.۳ سرعت سوق انتقال به سرخ کیهانی ۴۷
۲.۳.۳ مدل ΛCDM ۴۸
۳.۳.۳ پارامتربندی CPL ۴۹
۴.۳.۳ بررسی سرعت سوق انتقال به سرخ در مدل کملون تاکیون ۵۱
۵.۳.۳ مدول فاصله ۵۲

۴ نتیجه گیری و پیشنهادات

۱.۴ نتیجه گیری ۵۵
۲.۴ پیشنهادات ۵۶
مراجع ۵۷

چکیده

گلناز فرپور فداکار

این پایان‌نامه بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه نظریه‌های گرانشی که به عنوان تصحیح یا تعمیم نسبیت عام شناخته می‌شوند، نوشته شده است. انگیزه تفکر در این نظریه‌ها ریشه در کیهان‌شناسی و اخترفیزیک دارد که در آن‌ها مسائلی چون انرژی تاریک و ماده تاریک مطرح است. از آنجا که مدل استاندارد کیهان‌شناسی و معادله میدان انشتین قادر به توضیح کاملی از رفتار عالم نمی‌باشد، نا گزیر از ایجاد نظریه‌های جدیدی هستیم که بتواند درک درستی از رفتار عالم در تمام دوره‌های کیهانی بویژه در دوره تورم اولیه و دوره شتابدار کنونی کیهان نشان دهند. اصول اولیه و تعابیر هندسی که یک نظریه گرانش از آن سرچشمه می‌گیرد، آورده شده است. بررسی این اصول و تعابیر موجب روشن شدن فرضیات بنیادی نسبیت عام و درنتیجه پیشنهادهای ممکن برای تصحیح آن می‌شود. تعدادی از تصحیحات ممکن با تأکید بر نظریه‌های متریکی $f(R)$ و انرژی تاریک مورد مطالعه قرار گرفته و ویژگی‌های این نظریه‌ها تا حد امکان بیان شده است. مسلماً ما به نظریه‌هایی احتیاج داریم که بتوانند به خوبی با داده‌های تجربی همخوانی داشته باشند. برای این منظور در پایان با ارائه یک مدل و با تکیه بر داده‌های رصدی مربوط به فاصله درخشندگی ابرنواخترهای نوع Ia در انتقال به سرخ‌های مختلف و سرعت سوق انتقال به سرخ کیهانی، نشان داده‌ایم که این نظریه توانایی حل مشکلات موجود در مقیاس‌های مختلف کیهانی را دارند.

واژه‌های کلیدی: گرانش تصحیح یافته، معادله میدان انشتین، انبساط کیهان، تورم کیهانی، انرژی تاریک، نظریه‌های متریکی $f(R)$.

Abstract

Modified gravity and expansion of the universe
Golnaz Farpoor Fadakar

The modified grvity theories are discussed in this thesis with the motivation to solve some of problems in cosmology and astrophysics related to dark matter and dark energy. Since the standard model of cosmology and Einstein field equations are not able to explain behavior of universe completely, new theories are presented to interpret the evolution of the universe in all epochs, especially in inflation era and current cosmic acceleration era. In this work, we first discuss the geometry of the gravitational models. By analyzing the models, some of modified gravitational theories arediscussed. In particular, f(R) gravity and its relation to dark energy is examined. Since any cosmological model has to satisfy observational tests, at the end, we represent a cosmological model verified by twoobservational tests, i.e. distance modulus and CRD.

Key words: Modified gravity, Einstein field equation, expansion of the universe, cosmic inflation,dark energy, f(R) theories.

مقدمه

سرگذشت کیهان

ما از جهان چه می دانیم و معلومات خود را چگونه بدست آورده ایم؟ جهان از کجا آمده و به کجا می رود؟ آیا جهان ابتدایی داشته است؟ آیا هرگز به پایان خواهد رسید؟ تحولات اخیر در فیزیک به کمک تکنولوژی کنونی تا حدی پاسخ این سوالات را داده است. شاید روزی پاسخ این سوالات همان اندازه بدیهی به نظر برسد که امروز چرخش زمین به دور خورشید واضح و بدیهی است.

۳۴۰ سال قبل از میلاد، ارسطو[۱] در کتاب خود بنام "درباره افلاک " این موضوع را بیان کرد که زمین جسمی کروی است. او می‌اندیشید که زمین ثابت است و خورشید، ماه، سیارات و ستارگان در مدارهای دایره‌ای حول زمین در گردشند. در سال ۱۵۱۴ یک کشیش لهستانی به نام نیکولاس کوپرنیکوس[۲] مدل ساده تری را پیشنهاد کرد. به اعتقاد او خورشید در مرکز ثابت بود و زمین و دیگر سیارات در مدارهای دایره‌ای گرد آن در گردش بودند. تقریباً یک قرن طول کشید تا دو ستاره شناس، کپلر[۳] آلمانی و گالیله[۴] ایتالیایی از نظریه او پشتیبانی کردند. مدتی بعد کپلر نظریه کوپرنیک را اصلاح کرد و گفت مسیر سیارات در گردش به دور خورشید بیضوی است نه دایره‌ای. او بر حسب تصادف فهمیده بود که مدارهای بیضوی به خوبی با مشاهدات مطابقت دارد.

پیش از قرن بیستم این سوال که جهان در حال گسترش است یا انقباض در ذهن هیچ کس مطرح نشده بود. عموماً می‌پنداشتند جهان یا در حالتی ثابت وجود داشته یا آنکه در زمانی معین در گذشته خلق شده و کما بیش به همان صورت که اکنون می‌بینیم، وجود داشته است. حتی کسانی که فهمیده بودند بر طبق نظریه گرانش نیوتون جهان نمی‌تواند ایستا باشد، به فکرشان هم خطور نمی‌کرد که جهان ممکن است در حال گسترش باشد. در عوض تلاش می‌کردند این نظریه را اصلاح کنند و می‌گفتند نیروی گرانش در فاصله‌های دور به نیروی دافعه تبدیل می‌شود.

هنگامی که انشتین[۵] در سال ۱۹۱۵ نظریه نسبیت عام خود را فرمول بندی کرد، متوجه شد که این نظریه با یک جهان ایستا ناسازگار است معادلات او پیش بینی می کرد که جهان یا باید گسترش یابنده باشد یا منقبض شونده. اعتقاد

[۱] Aristotle

[۲] Nicolaus Copernicus

[۳] Kepler

[۴] Galilei

[۵] Einstein

انشتین به ثبات عالم چندان قوی بود که باعث شد او معادلاتش را به نفع یک جهان ایستا تغییر دهد. در سال ۱۹۲۹ ادوین هابل [۶] در مشاهدات خود متوجه شد که به هر سوی جهان که نظر بیفکنیم کهکشان‌ها به سرعت از ما فاصله می‌گیرند و این سرعت با افزایش فاصله آنها بیشتر می شود. یعنی هر چه کهکشان‌ها از ما دورتر باشند سرعت دور شدنشان از ما بیشتر می‌شود. در واقع به نظر می رسد در حدود بیست میلیارد سال قبل همه آنها در نقطه واحدی قرار داشتند و در نتیجه چگالی جهان در یک حجم بسیار کوچک، بینهایت بود. این کشف سرانجام مساله آغاز جهان را به قلمرو علم وارد کرد. بنا به مشاهدات هابل می‌توان در گذشته‌های دور زمانی را یافت بنام انفجار بزرگ [۷] که در آن جهان بینهایت کوچک و فوق العاده چگال و داغ بود. تحت چنین شرایطی تمام قوانین علم فرو خواهد ریخت و بنابراین همه توان پیش بینی آینده از هم خواهد گسیخت. می توان انفجار بزرگ را آغاز زمان خواند زیرا زمان یک خاصیت هستی است که پیش از خلق عالم وجود نداشته است، بنابراین مفهوم زمان پیش از خلق عالم بی معنی است. مدل انفجار بزرگ در توضیح جنبه‌های شناخته شده عالم و پیش گویی صحیح مشاهدات کنونی بسیار موفق عمل کرده است. در هر حال این مدل نیز مشکلات خود را داشت به طوری که بعضی از پیش گویی‌های آن در تناقض با مشاهدات بود. این مسائل باعث شد افراد زیادی برای اصلاح این نظریه پیش قدم شوند، بدون اینکه چیزی از موفقیت‌هایی که در پیش بینی‌های صحیح آن داشته کم شود.

هدف نهایی علم تدبیر نظریه یگانه‌ای است که همه جهان را توصیف کند. با این همه بیشتر دانشمندان رویکردی را انتخاب می کنند که مساله را به دو بخش تقسیم می کند. نخست قوانینی که ما را در جریان چگونگی تغییر و تحول عالم نسبت به زمان قرار می دهند، یعنی اگر در هر لحظه بدانیم جهان چه شکل و شمایلی دارد، قوانین فیزیکی به ما خواهند گفت که در هر لحظه دلخواه پس از آن، هستی چگونه خواهد بود. دوم مساله حالت اولیه عالم مطرح می‌باشد. پیداست که تدبیر نظریه‌ای یکپارچه که تمام عالم را توضیح دهد دشوار است. در عوض دانشمندان مساله را به چند بخش تقسیم می‌کنند و تعدادی نظریه پاره‌ای [۸] ابداع می‌کنند. هر یک از این نظریه‌های پاره‌ای دسته معین و محدودی از مشاهدات را توضیح می‌دهند و تاثیر دیگر کمیت ها را نادیده می‌گیرند.

دانشمندان امیدوارند که در نهایت بتوانند به نظریه‌ای کامل و سازگار دست یابند که همه این تئوری‌های پاره‌ای را به عنوان تقریب‌هایی دربر داشته باشد و برای جور در آمدن با واقعیت نیازی به برخی اعداد دلخواه در نظریه نداشته باشد. چنین نظریه‌ای وحدت و یکپارچگی فیزیک نام گرفته است. انشتین بیشتر سال‌های پایانی عمرش را با جستجوی ناموفق همین نظریه سپری کرد، اما شرایط آن زمان مساعد نبود هر چند نظریه‌های پاره‌ای مربوط به گرانش

[۶] Edwin Hubble

[۷] Big bang

[۸] Partial theory

و نیروی الکترومغناطیسی موجود بود ولی اطلاعات کمی در مورد نیروهای هسته‌ای وجود داشت. از این گذشته انشتین به رغم اینکه نقش برجسته‌ای در تکامل مکانیک کوانتومی بازی کرده بود ولی هرگز آن را نپذیرفت. با این حال به نظر می‌رسد که اصل عدم قطعیت در مکانیک کوانتومی وجه بنیادین جهان است و یک نظریه یکپارچه موفق باید ضرورتاً این اصل را دربرداشته باشد. در واقع این همان چیزی بود که انشتین از آن ناخرسند بود. امروزه دانشمندان عالم را بر حسب دو نظریه پاره‌ای بنیادی که حاصل تلاش فکری قرن بیستم هستند، توضیح می‌دهند: نظریه نسبیت عام و مکانیک کوانتوم. نسبیت عام نیروی گرانش و ساختمان کلان هستی را توضیح می دهد، یعنی از مقیاس چند مایل تا اندازه جهان قابل مشاهده. از سوی دیگر مکانیک کوانتوم در مقیاسی بسیار کوچک با پدیده ها سر و کار دارد، یعنی یک میلیون میلیونیوم یک اینچ. ولی متاسفانه این دو با یکدیگر سازگار نیستند و امروزه به دنبال نظریه‌ای هستیم که این دو تئوری را یکپارچه گرداند و وحدت بخشد یعنی نظریه کوانتومی گرانش[۹]. هر چند راه درازی برای دستیابی به آن باقی مانده اما هم اکنون چیزهای بسیاری درباره پیش بینی‌هایی که نظریه کوانتومی گرانش باید دارا باشد را می‌دانیم. اگر ما بر این باور هستیم که جهان به صورت دلبخواه رفتار نمی‌کند بلکه قوانین معینی بر آن حکم فرما است، به ناچار ناگزیر از آنیم که نظریه‌های پاره‌ای را در غالب یک نظریه واحد، متحد و یکپارچه گردانیم و با آن همه چیز را در جهان توضیح دهیم[۱].

مدل انفجار بزرگ داغ [۱۰]

برای توضیح اندیشه‌هایی که پیرامون چگونگی تاثیر مکانیک کوانتوم بر سرچشمه و سرنوشت جهان هستی وجود داشت، لازم است که تاریخچه هستی را مبتنی بر مدل انفجار بزرگ داغ که مورد پذیرش همگانی است، باز گو کنیم. در اینجا فرض می‌شود که جهان از لحظه انفجار بزرگ تا کنون بر اساس یک مدل توضیح داده می‌شود. در این مدل همه مواد یا تابش‌های درون آن با گسترش جهان سردتر می‌شوند. از آنجا که درجه حرارت بیانگر انرژی ذرات است، سرد شدن جهان تاثیری عمده بر ماده درونش دارد. در درجه حرارت‌های بسیار بالا ذرات چنان پر انرژی‌اند که در هر برخورد زوج‌های متفاوت بسیاری متشکل از ذره/پاد ذره تولید می‌کنند. اگر چه برخی از این ذرات در برخورد با پاد ذره‌ها نابود می‌شوند ولی سرعت تولید آنها بیشتر از نابودیشان است. اما در دماهای پایین‌تر ذرات انرژی کمتری دارند، زوج‌های ذره/پاد ذره با سرعت کمتری تولید می‌شوند و نابودی تندتر از خلق و ایجاد انجام می‌گیرد.

در لحظه انفجار بزرگ اندازه جهان صفر است، بنابراین درجه حرارت آن بینهایت زیاد است. اما جهان چون به

[۹] Quantom gravity

[۱۰] Hot Big Bang model

گسترش رو آورد، درجه حرارت تابش کاهش می‌یابد. یک ثانیه پس از انفجار بزرگ درجه حرارت باید به حدود ده میلیارد درجه کلوین سقوط کرده باشد. در این حالت جهان ذراتی چون فوتون، الکترون و نوترینو و پاد ذره‌های آن بعلاوه مقداری پروتون و نوترون دربر داشت. در همان حال که جهان پیوسته گسترش و دما کاهش می‌یافت، آهنگ تولید زوج‌های الکترون/پوزیترون بر اثر برخورد ذرات با یکدیگر، از آهنگ نابودی آنها کمتر می‌شود. بنابراین بیشتر الکترون‌ها و پوزیترون‌ها یکدیگر را نابود می‌کنند و فوتون‌های بیشتری تولید می‌نمایند. اما نوترینوها و پاد نوترینوها یکدیگر را نابود نمی‌کنند زیرا اندرکنش آنها با یکدیگر و با دیگر ذرات بسیار ضعیف است. بنابراین این ذرات هنوز هم یافت می‌شوند. تقریباً یکصد ثانیه پس از انفجار بزرگ، درجه حرارت به یکهزار میلیون درجه کلوین سقوط می‌کند. در این حالت پروتون‌ها و نوترون‌ها دیگر انرژی کافی برای فرار از کشش نیروی هسته‌ای قوی را ندارند و شروع به پیوستن به یکدیگر می‌کنند و هسته‌های عناصر سنگین‌تر را بوجود می‌آورند.

این تصویر از آغازین دوره داغ جهان اولین بار توسط جرج گاموف[۱۱] در سال ۱۹۴۸ مطرح شد. ظرف مدت تنها چند دقیقه پس از انفجار بزرگ تولید هلیوم و دیگر عناصر متوقف شد. و پس از آن برای حدود یک میلیون سال بدون رویداد قابل ذکری صرفاً گسترش یافت. سرانجام وقتی درجه حرارت به چند هزار درجه کاهش یافت و الکترون‌ها و دیگر هسته‌ها انرژی کافی برای غلبه بر جاذبه الکترومغناطیسی میان خود را نداشتند، شروع به در هم آمیختن کردند و اولین اتم‌ها را تشکیل دادند. مدل انفجار بزرگ داغ پیش‌بینی می‌کند که تابش ناشی از نخستین مراحل داغ جهان هنوز هم باید در اطراف ما باشد اما دمایش به چند درجه بالای صفر مطلق کاهش یافته است. آنچه پنزیاس [۱۲] و ویلسون [۱۳] در ۱۹۶۵ یافتند، در واقع همین تابش بود. این تصویر از جهانی که در آغاز داغ بود و سپس در حین گسترش سرد شد، با شواهد تجربی که امروزه در دست داریم سازگار است با این همه همچنان چند سوال مهم باقی می‌ماند.

۱) چرا گیتی در مقیاس بزرگ چنین یکنواخت است؟ چرا به هر سو که نظر می‌افکنیم درجه حرارت تابش میکروموج‌های زمینه کیهان[۱۴] اینقدر به یکدیگر نزدیک است؟ مثل آنکه در یک امتحان تمام دانش آموزان پاسخ‌های یکسانی به سوالات بدهند. در این صورت مطمئن خواهید شد که آنها جواب‌ها را با یکدیگر رد و بدل کرده‌اند.

۲) چرا سرعت گسترش گیتی در آغاز اینهمه به سرعت بحرانی گسترش نزدیک بوده و حتی هم اکنون هم یعنی پس از ده هزار میلیون سال ، همچنان با سرعتی نزدیک به سرعت بحرانی در حال گسترش می‌باشد؟

[۱۱] George Gamov

[۱۲] Pensias

[۱۳] Wilson

[۱۴] Cosmic Microwave Back ground

۳) به رغم آنکه گیتی در مقیاس بزرگ یکنواخت و همگن است اما ناهمگونی‌های موضعی، نظیر ستارگان و کهکشان‌ها دربر دارد. سرچشمه این ناهمگونی‌ها چه بوده است؟

نسبیت عام به خودی خود نمی‌تواند این وجه از قضیه را توضیح دهد. درتکینگی،[۱۵] نسبیت عام و دیگر قوانین فیزیکی از کار باز می‌مانند. در مدل انفجار بزرگ داغ، در جهان آغازین، گرما مجال کافی برای عبور از یک منطقه به منطقه دیگر را نداشته است. این بدان معناست که حرارت سراسر جهان آغازین باید دقیقاً یکسان بوده باشد تا بتوان برابر بودن درجه حرارت تابش پیش زمینه کیهان را در کلیه جهات توجیه کرد. سرعت گسترش جهان نخستین نیز باید به دقت انتخاب شده باشد تا جهان قادر باشد همچنان با سرعتی نزدیک به سرعت بحرانی منبسط شود. یعنی اگر مدل انفجار بزرگ داغ تا لحظه شروع زمان درست باشد، حالت نخستین جهان باید براستی با دقت بسیار تعیین شده باشد [۱].

تورم کیهانی [۱۶]

در سال ۱۹۷۰ نظریه‌ای ارائه شد که مشکلات مربوط به نظریه انفجار بزرگ را بدون تغییر در کلیت آن حل می‌کرد. این نظریه جدید که تورم کیهانی نامیده شد، تصور ما را نسبت به انبساط کیهان در اولین کسر از ثانیه تغییر داد. نظریه تورم کیهانی به ما می گوید که قبل از انبساط خطی، یک دوره کوتاه انبساط نمایی وجود داشته است. تصور می‌شود عامل پیش برنده تورم کیهانی میدان‌های اسکالر با پتانسیل‌های ویژه باشند.
چهار مشکل وجود داشت که نظریه انفجار بزرگ نمی‌توانست به آن پاسخ دهد: مسئله همواری جهان[۱۷]، مسئله افق ذره[۱۸]، مسئله ساختار[۱۹] و مسئله اثرات ناخواسته[۲۰].

اندازه‌گیری‌های تابش پیش زمینه کیهان نشان می‌دهد که جهان امروز تقریباً تخت و هموار است و بر اساس معادلات توصیف کننده عالم، می‌بایست در گذشته بسیار دور نیز این گونه بوده باشد. بنابراین هموار تقریبی کنونی نیازمند شرایط بسیار خاصی در جهان اولیه است. زیرا بر اساس پیش بینی معادله انشتین در یک جهان گسترش یابنده که با ماده یا تابش پر شده است، هر انحرافی از مسطح بودن با گسترش جهان بیشتر می‌شود. این امر به عنوان مسئله

[۱۵] Singularity
[۱۶] Inflation
[۱۷] Flatness problem
[۱۸] Horizon problem
[۱۹] structure problem
[۲۰] unwanted relics problem

همواری شناخته شده است. مشاهدات تابش پیش زمینه کیهان نشان می‌دهد که به طور شگفت انگیزی دمای تابش در تمام عالم بسیار همسانگرد و در حدود ۲.۷۳ درجه کلوین است. زمان واجفت شدگی[۲۱] را در نظر بگیرید، که تقریباً ۴۰۰,۰۰۰ سال بعد از انفجار بزرگ رخ داده است در آن زمان افق ذره باید $۱۰^{۶}$ سال نوری بوده باشد که این مقیاس متناظر با زاویه ۱ درجه در آسمان است. بنابراین تابش‌های پیش زمینه کیهان که با یکدیگر زاویه‌ای بیش از ۱ درجه دارند نمی‌توانستند در تماس با یکدیگر باشند. مدل انفجار بزرگ پاسخگوی این نیست که چرا دما در ناحیه‌های مختلف آسمان دقیقاً یکسان است، همگنی موجود در عالم می‌بایست از شرایط اولیه آمده باشد و این مسئله افق ذره است. مسئله افق می‌گوید که همگنی و همسانگردی جهان در مقیاس بزرگ می‌بایست به شرایط اولیه مربوط باشد. به هر حال در عمل می‌دانیم که جهان کاملاً همگن است، هرچند در مقیاس بزرگ باشد.

ساختارهای عالم (کهکشان‌ها، خوشه‌های کهکشانی و ...) ناشی از ناهمسانگردی‌های جهان اولیه هستند. ما همان ناهمسانگردی‌ها را می‌توانیم در تابش پیش زمینه کیهان مشاهده کنیم. کهکشان‌های دو طرف مختلف عالم ویژگی‌های یکسانی دارند. چطور ممکن است همان ناهمسانگردی‌ها را در کل عالم داشته باشیم در حالیکه در بین اجزای اولیه عالم تماسی نبوده است. این مساله همان مشکل ساختار است. خنک شدن یک مایع مانند آب را در نظر بگیرید، به محض اینکه مایع به نقطه انجماد می رسد یخ زدگی به صورت نرم و یکسان رخ نمی‌دهد یخ زدگی در نقاط خاصی رخ می‌دهد و کریستال‌های یخ شروع به پیش روی می‌کنند. هنگامی که مایع در نهایت تبدیل به جامد شد دررفتگی‌هایی[۲۲] در آن ایجاد می‌شود. فرایند یخ زدن یک فرایند انتقال فاز نامیده می‌شود. میدان‌های کوانتومی مرتبط با ذرات و نیروهای عالم اولیه یک تغییر فاز را متحمل می‌شوند. همان طور که عالم شروع به خنک شدن می‌کند، دما تا اندازه‌ای پایین می آید که برخی از انتقال‌های فازی می‌توانند رخ دهند. انتقال فازی در یک نقطه خاص در فضا شروع شده و با سرعت نور پیش می‌رود. آیا دررفتگی‌های موجود در عالم می‌تواند ناشی از تصادم نواحی مختلف با یکدیگر باشد. این امر می‌تواند باعث ایجاد ساختارهای عجیبی شود که نقص توپولوژیکی[۲۳] نامیده می‌شود. مانند ساختار ورق گونه دوبعدی یا ریسمان کیهانی. نظریه اتحاد بزرگ پیش‌بینی می‌کرد که در جهان اولیه ذرات عجیبی مانند تک قطبی‌های مغناطیسی تولید شده‌اند. پیدا نشدن تک قطبی‌های مغناطیسی و دیگر آثار به عنوان مسئله آثار ناخواسته شناخته شده است.

نظریه تورم کیهانی به تمام این مسائل پاسخ قانع کننده‌ای می‌دهد. ایده اصلی تورم کیهانی ابتدا به وسیله

---

[۲۱] Decoupling

[۲۲] dislocations

[۲۳] topological defect

دانشمندی از موسسه تکنولوژی ماساچوست به نام آلن گاث[۲۴] پیشنهاد شد[۲]. او در تلاش برای یافتن مدلی از جهان که دربرگیرنده آرایش‌های آغازین مختلف بسیاری باشد و در تکامل خود به چیزی مثل جهان حاضر بینجامد، اظهار داشت که جهان آغازین ممکن است که یک دوره انبساط خیلی سریع را از سر گذرانده باشد. این گسترش تورمی بوده است که در آن جهان در بازه $t = ۱۰^{-۳۷} - ۱۰^{-۳۲}s$، متحمل یک انبساط نمایی می‌شود. در این دوره، جهان با فاکتور $۱۰^{۴۰}$ تا $۱۰^{۱۰۰}$ انبساط می‌یابد. او بیان کرد که یک میدان با فشار منفی می‌تواند تورم کیهانی را در جهان اولیه به پیش ببرد. حال این سوال مطرح می‌شود که چطور نظریه تورم کیهانی مشکلات نظریه انفجار بزرگ را حل کرد؟

یک سطح منحنی را در نظر بگیرید که با یک فاکتور بسیار بزرگ منبسط می‌شود. پس از انبساط، این سطح به طور موضعی تخت به نظر می‌رسد. بنابراین نظریه تورم کیهانی جهانی تخت و هموار را پیش بینی می‌کند.

قبل از دوره تورم کیهانی $t = ۱۰^{-۳۷}s$ ذرات در فاصله بسیار کمی $r = ۱۰^{-۲۹}m$ از هم قرار داشتند، بنابراین به طور اتفاقی با هم در ارتباط بوده‌اند. اما پس از این دوره ذرات به طور ناگهانی در فاصله زیادی $۱۰^{۷۰}m - ۱۰^{۱۰}$ از هم قرار می‌گیرند. بعد از این مرحله یک انبساط عادی از مرتبه $۱۰^{۲۲}$ از پایان تورم کیهانی تا مرحله واجفت‌شدگی رخ می‌دهد. بنابراین در زمان واجفت شدگی تماس اتفاقی در شعاع $r = ۱۰^{۳۳}m$ رخ می‌دهد و در نتیجه این نظریه به مسئله افق ذره نیز پاسخ می‌دهد.

ناهمگنی‌های اولیه به واسطه نوسانات کوانتومی در دوره تورم کیهانی هستند. جفت ذره‌های مجازی که ایجاد شده‌اند، پیش از آنکه بتوانند نابود شوند با انبساط تورمی از هم جدا می‌شوند و چگالی‌های ناهمواری را تولید می‌کنند. ناهمگنی‌ها به طور مداوم تولید شده و سپس به مقیاس‌های خیلی بزرگتر کشیده می‌شوند. بنابراین افق ذره بزرگتر از مقیاس نوسان می‌شود و ساختارهای بزرگ امروزی نیز نتیجه همین نوسانات است که در مقیاس بسیار ریز اتفاق افتاده‌اند. در نتیجه جهان در مقیاس بزرگ همگن به نظر می‌رسد اما در مقیاس‌های میکروسکوپی ناهمگن خواهد بود. فرض کنید ذرات یا ساختارهای عجیبی مثل ریسمان‌های کیهانی، تک‌قطبی‌های مغناطیسی و غیره در جهان بسیار اولیه وجود داشته‌اند. چون فضا انبساط بسیار زیادی را در دوره تورم کیهانی متحمل شده بنابراین اینها بسیار رقیق شده‌اند. به همین دلیل احتمال اینکه ما این ذرات را در جهان کنونی مشاهده کنیم، بسیار کم است. به این ترتیب نظریه تورم کیهانی به مسائل موجود جواب قانع کننده‌ای می‌دهد[۳]. بعدها نظریه تورم کیهانی نیز جزئی از نظریه انفجار بزرگ داغ شد.

---

[۲۴] Alen guth

انرژی تاریک[۲۵]

در سال ۱۹۹۸ ریز[۲۶] و پرلموتر[۲۷] به طور جداگانه بر مبنای مشاهدات بدست آمده از ابرنواختر[۲۸] نوع Ia شتاب کنونی کیهانی را پیش بینی کردند[۴]. این کشف زمینه تحقیقات جدیدی را در کیهان شناسی نوین ایجاد کرد. برای مدتی طولانی دانشمندان متعجب بودند که چرا عالم با سرعتی بیش از آنچه انتظار می‌رود گسترش می‌یابد. برخی این انبساط شتابدار را به نوعی انرژی ناشناخته مرتبط دانستند. به نظر آنها جهان امروز به تسلط یک شکل مرموز از انرژی به نام انرژی تاریک در آمده است. انرژی تاریک نوعی انرژی فرضی است که در تمام فضا نفوذ کرده و تمایل دارد نرخ انبساط عالم را افزایش دهد. این انرژی معمول‌ترین راه برای توضیح مشاهدات اخیر است که نشان می‌دهند عالم با یک نرخ شتابدار منبسط می‌شود. انرژی تاریک به صورت همگن و نه خیلی چگال شناخته می‌شود. هنوز پاسخی برای این سوال که آیا این انرژی با چهار نیروی بنیادی طبیعت بویژه گرانش دارای برهم کنش می‌باشد یا خیر، یافت نشده است. از آنجا که این انرژی خیلی چگال نیست تصور آزمایشی برای آشکار کردن آن در آزمایشگاه دشوار است. دانشمندان به این نتیجه رسیدند که هیچ راه آسانی برای درک ماهیت انرژی تاریک وجود ندارد. در مدل استاندارد کیهان‌شناسی انرژی تاریک ۷۴ درصد کل جرم و انرژی عالم را دربردارد این مقدار توسط داده‌های تجربی متفاوت مانند تابش پیش زمینه کیهان (CMB)، ساختار بزرگ مقیاس[۲۹] عالم و داده‌های رصدی ابر نواختر نوع Ia به تایید رسیده است. این هستی اسرارآمیز ممکن است نوعی ماده، میدان و یا چیزی کاملاً متفاوت باشد. انرژی تاریک با ماده معمولی تفاوت دارد. بعداً نشان خواهیم داد که آن دارای یک فشار منفی می‌باشد.

دو گونه متداول برای انرژی تاریک پیشنهاد شده است، ثابت کیهان‌شناسی و میدان‌های اسکالر. اولین گام برای درک ماهیت انرژی تاریک این است که بفهمیم آیا آن یک ثابت کیهان‌شناسی ساده است یا از منابع دیگری که به صورت دینامیکی با زمان تغییر می‌کنند سرچشمه گرفته است. می‌توان مدل‌های دینامیکی انرژی تاریک را با بررسی تحول پارامتر معادله حالت[۳۰] (ω_{DE}) از ثابت کیهان‌شناسی تشخیص داد. به هر حال داده‌های تجربی به اندازه‌ای نیستند که مزیت مدل‌های دارای پارامتر معادله حالت متغیر را نسبت به مدل‌های با پارامتر معادله حالت ثابت به ما نشان دهند.

---

[۲۵] Dark energy

[۲۶] Riess

[۲۷] Perlmutter

[۲۸] Supernova

[۲۹] Large Scale Structure

[۳۰] Equation of state

ساده‌ترین مدل برای انرژی تاریک ثابت کیهان‌شناسی است[۵]. ثابت کیهان‌شناسی که اغلب لامبدا[۳۱] نیز نامیده می‌شود، اولین بار توسط انشتین در معادلات نسبیت عام وارد شد. ثابت کیهان‌شناسی یک چگالی انرژی[۳۲] ثابت است که فضا را به صورت همگن پر کرده است و از نظر فیزیکی معادل با انرژی خلا[۳۳] است. یعنی یک حجم معین از فضا مقداری انرژی بنیادی و ذاتی دارد. با این حال فیزیکدانان دریافتن راهی برای جا دادن یک ثابت کیهان‌شناسی در بهترین نظریات کنونی خود با مشکل مواجه‌اند. اگر ثابت کیهان‌شناسی ناشی از انرژی خلا در فیزیک ذره‌ای باشد، مقیاس انرژی آن به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از چگالی امروزی انرژی تاریک ($\rho_{DE} \approx ۱۰^{-۴۷} GeV$) است. بنابراین لازم است تا مکانیزمی پیدا کنیم که مقدار کوچکتری برای ثابت کیهان‌شناسی بدست آوریم تا مطابق با مشاهدات باشد. با این حال نیاز به نظریه‌ای داریم که تمام دوره‌های عالم را برای ما توضیح دهد.

دومین مدل برای انرژی تاریک میدان‌های اسکالر مانند کواینتسنس[۳۴] می‌باشند، این میدان‌ها کمیت‌هایی دینامیکی هستند که چگالی انرژی آن می‌تواند با فضا و زمان تغییر کند[۶]—[۱۰]. این ایده بیان می‌کند که یک میدان کوانتومی در عالم وجود دارد که تا کنون کشف نشده است.

کواینتسنس با ثابت کیهانی تفاوت دارد چونکه می‌تواند با زمان و مکان تغییر کند در حالیکه ثابت کیهان‌شناسی ایستا است و چگالی انرژی آن ثابت و پارامتر معادله حالت آن $\omega = -۱$ است. نسخه‌های مختلفی از این نظریه بسته به اینکه سرعت این تغییرات به چه میزان است، سر برآورده‌اند. یکی از این نسخه‌ها موسوم به انرژی مرموز است که می‌گوید انبساط عالم مدام سریع و سریع‌تر می‌شود تا اینکه سرانجام کل عالم تکه تکه شده و از هم می‌پاشد. هنوز هیچ گواه محکمی برای وجود کواینتسنس با دیگر میدان‌های اسکالر یافت نشده ولی به طور کامل هم کنار گذاشته نشده است. به طور کلی شتابی که کواینتسنس برای عالم پیش‌بینی می‌کند کمتر از ثابت کیهانی است. هر دو مدل شامل این ویژگی هستند که انرژی تاریک باید یک فشار منفی داشته باشد تا جهان شتابدار کنونی را توضیح دهد. این انبساط شتابدار گاهی اوقات به عنوان دافعه گرانشی یاد می‌شود که یک عبارت گیج کننده است. در واقع یک فشار منفی بر اندرکنش گرانشی بین جرم‌ها اثر نمی‌گذارد ولی به نسبت خود تمامی تحول عالم در مقیاس کیهانی را تغییر می‌دهد. برای درک چگونگی نرخ انبساط عالم با زمان اندازه‌گیری‌های دقیقی لازم است. در نسبیت عام نرخ انبساط عالم توسط معادله حالت کیهان‌شناسی پارامتربندی می‌شود. امروزه در کیهان‌شناسی اندازه‌گیری معادله حالت انرژی تاریک بیشترین تلاش‌ها را به خود اختصاص داده است همچنین شناخت ماهیت انرژی تاریک یکی از بزرگترین چالش‌های

[۳۱] Lambda

[۳۲] Energy density

[۳۳] Vacuum energy

[۳۴] Quintessence

پیش روی کیهان‌شناسی در عصر حاضر است.

گرانش تصحیح یافته[۳۵]

تصحیح گرانش یکی دیگر از راههای توصیف شتاب کیهان است. برخی از فیزیکدانان به این فکر افتادند که چرا به جای افزودن یک نیروی تازه، یکی از نیروهای قدیمی را اصلاح نکنند. شاید گرانش خواص غیر منتظره‌ای داشته باشد که در فواصل بسیار زیاد پدیدار می‌گردد و نظریه نسبیت عام انشتین آنها را پیش‌بینی نکرده است. البته شاید مشکل نه به این نظریه بلکه به یک ویژگی بسیار بنیادی‌تر عالم مربوط شود. تقریباً یک قرن است که تصور می‌شود جهان از هر سو که به آن نگاه کنیم، یکسان است. شاید اگر این تصور را رها کنیم و به سراغ پاسخ‌های پیچیده‌تر نسبیت عام برویم، نتایج آن بتواند به عالمی شتابنده و بی نیاز از انرژی تاریک منتهی شود. هر چند تصور عمومی بر آن است که گرانش در مقیاس‌های بزرگ و کوچک به یک شکل عمل می‌کند اما اگر یک اثر گرانشی غیر منتظره وجود داشته باشد که تا کنون ناشناخته مانده، ممکن است نیاز ما به انرژی تاریک را از بین ببرد. ولی یافتن تصحیحی برای گرانش که کارآمد باشد بسیار دشوار است.

می‌توان نسبیت عام انشتین را به گونه‌ای اصلاح کرد تا معادلات میدانی که بدست می‌آید هم تورم اولیه و هم شتاب کنونی کیهان را توضیح دهد. به طور کلی تصحیح معادله انشتین به دو صورت می‌تواند باشد، (۱) اضافه کردن یک جمله به صورت $T_{\mu\nu}(DE)$ به سمت راست معادله انشتین که این جمله در واقع نقش انرژی تاریک را بازی می‌کند. (۲) اضافه کردن عبارتی به صورت $F(g_{\mu\nu})$ به سمت چپ معادله انشتین، که در واقع هندسه فضا زمان را تصحیح می‌کند. مدل‌هایی که اخیراً برای تصحیح گرانش به جای جایگزینی برای انرژی تاریک در نظر گرفته شده‌اند، شامل گرانش $f(R)$، نظریات اسکالر تانسور[۳۶]، مدل‌های جهان‌های رویه‌ای[۳۷]، گرانش گالیله‌ای، گرانش گاوس بانت[۳۸] و غیره هستند. مثلاً در گرانش $f(R)$ به جای اسکالر ریکی[۳۹] تابعی از آن را جایگزین می‌کنیم. گرانش $f(R)$ شتاب کنونی را توضیح می‌دهد بدون اینکه ماده تاریک[۴۰] یا انرژی تاریک را در معادله وارد کند. یا نظریه اسکالر تانسور که بر مبنای اصل کنش است و وجود یک میدان اسکالر را لازم می‌داند. این نظریه برای توصیف انحنای

[۳۵] Modified gravity

[۳۶] Scalar tensor theories

[۳۷] Braneworld models

[۳۸] Gauss Bonnet

[۳۹] Ricci scalar

[۴۰] Dark matter

چرخشی[۴۱] کهکشان‌ها به خوبی جواب داده است و در مقیاس‌های کوچکتر مثلاً منظومه شمسی هیچ انحرافی با نظریه نسبیت عام ندارد.

ما نمی‌توانیم انرژی تاریک یا تصحیح گرانش را مستقیماً مشاهده کنیم. ما فقط می‌توانیم ببینیم که کهکشان‌ها چطور تحت تاثیر آنها رفتار می‌کنند. نشان دادن تفاوت ما بین انرژی تاریک و تصحیح گرانش می‌تواند فیزیکدان‌ها را برای فهم بهتر کارکرد عالم رهنمون شود به این امید که بتوانند شتاب کنونی کیهان را به گونه‌ای که مطابق با مشاهدات نیز باشد، توضیح دهند[۱۱]—[۱۲].

[۴۱] Rotational curve

فصل‌اول

معادلات میدان کیهان شناسی

۱.۱ معادلات میدان انشتین

معادلات میدان انشتین دسته وسیعی از پدیده‌های گرانشی شناخته شده، از امواج گرانشی سیاهچاله‌ها تا کل کیهان را با دقت بالایی توضیح می‌دهند. این معادلات یک دسته شانزده تایی از معادلات نسبیت عام هستند که بر هم کنش بنیادی گرانش را در نتیجه خمیدگی فضا زمان توسط جرم و انرژی توضیح می‌دهند. این معادلات اولین بار در سال ۱۹۱۵ توسط انشتین فرمولبندی شدند. به دلیل تقارن تانسور متریک در واقع ده معادله مستقل وجود دارد. معادله انشتین علی‌رغم ظاهر ساده آن بسیار پیچیده است. برای بدست آوردن معادلات میدان از کنش از روش استاندارد متریک استفاده می‌کنیم. که در آن معادلات میدان انشتین را با وردش از کنش انشتین هیلبرت[۱] نسبت به تانسور متریک $g_{\mu\nu}$ بدست می‌آورند. در این روش نماد کریستوفل[۲] وابسته به تانسور متریک $g_{\mu\nu}$ است. کنش انشتین هیلبرت در فضای چهار بعدی را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}(\frac{R}{2\kappa^2} + l_m) \tag{۱.۱}$$

که در آن $\kappa^2 = 8\pi G$، g دترمینان تانسور متریک و l_m لاگرانژی ماده است. اصل کمترین کنش بیان می‌کند که وردش از کنش نسبت به تانسور متریک برابر با صفر است

$$\delta S = \int [\frac{1}{2\kappa^2}\frac{\delta(\sqrt{-g}R)}{\delta g^{\mu\nu}} + \frac{\delta(\sqrt{-g}l_m)}{\delta g^{\mu\nu}}]\delta g^{\mu\nu}d^4x = 0$$
$$\frac{\delta R}{\delta g^{\mu\nu}} + \frac{R}{\sqrt{-g}}\frac{\delta\sqrt{-g}}{\delta g^{\mu\nu}} = -2\kappa^2\frac{1}{\sqrt{-g}}\frac{\delta(\sqrt{-g}l_m)}{\delta g^{\mu\nu}} \tag{۲.۱}$$

سمت راست معادله فوق متناظر با تانسور انرژی تکانه است

$$T_{\mu\nu} = \frac{-2}{\sqrt{-g}}\frac{\delta(\sqrt{-g}l_m)}{\delta g^{\mu\nu}} = -2\frac{\delta l_m}{\delta g^{\mu\nu}} + g_{\mu\nu}l_m \tag{۳.۱}$$

که در آن تانسور انرژی تکانه در رابطه پیوستگی به صورت زیر صدق می‌کند

$$\nabla_\mu T_{\mu\nu} = 0 \tag{۴.۱}$$

و ∇ نشان دهنده مشتق هم وردا[۳] است. برای محاسبه وردش اسکالر ریکی ابتدا وردش تانسور ریمن[۴] را محاسبه می‌کنیم. تانسور ریمن به صورت زیر تعریف می‌شود

$$R^\rho_{\sigma\mu\nu} = \partial_\mu\Gamma^\rho_{\nu\sigma} - \partial_\nu\Gamma^\rho_{\mu\sigma} + \Gamma^\rho_{\mu\lambda}\Gamma^\lambda_{\nu\sigma} - \Gamma^\rho_{\nu\lambda}\Gamma^\lambda_{\mu\sigma} \tag{۵.۱}$$

[۱] Einstein hilbert action

[۲] Christoffel symbol

[۳] Covariant derivative

[۴] Riemann tensor