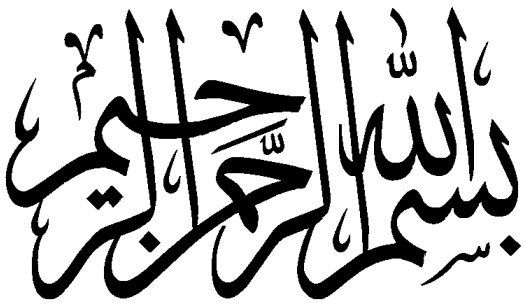
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک
(گرایش نظری)

بررسی ترمودینامیکی فاز فانتومی کیهان

از

فاطمه طیبی نعیم پور

استاد راهنما

دکتر حسین فرج الهی

استاد مشاور

فرزاد میلانی

اسفند ۱۳۸۹

تقدیم به

پیمان عزیزم
با عشق

قدردانی و تشکر

سپاس و تعظیم بر پروردگار کیهان

شایسته است تا از تمام کسانی که مرا در انجام این رساله یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایم. بدین منظور مراتب امتنان و سپاس و علاقه خویش را حضور استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حسین فرج الهی که بی مبالغه انسانی شریف و استادی گرانمایه است، تقدیم می‌نمایم. به راستی، زحمات و رهنمودهای صبورانه ایشان، در این مدت در پربار شدن بار علمی این شاگرد نوپای مکتب علم نقش تعیین کننده‌ای داشته است.

مراتب قدردانی خود را از نظرات ارزشمند اساتید داور این پایان‌نامه، بزرگواران، جناب دکتر پناهی و جناب دکتر عزیزپور که در بازخوانی این رساله و داوری جلسه دفاعیه قبول زحمت فرمودند، اعلام می‌کنم. همچنین از نماینده‌ی محترم تحصیلات تکمیلی، جناب دکتر باطبی سپاس‌گذارم. از راهنماییهای بی دریغ و ارزنده جناب آقای امین صالحی، کمال قدردانی را دارم. از تمامی دوستان عزیزم که در این مدت با دلگرمی‌هایشان به من انرژی دادند نیز سپاسگذارم.

از خانواده‌ی عزیزم، که در تمام مراحل زندگی پشتیبان و حامی و دلیل شادی من بوده و هستند، کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم. از پشتیبانی‌ها و دلگرمی‌های خانواده‌ی محترم و بزرگوار همسرم نیز متشکرم.

از همسر مهربان و صبورم که مشوّق اصلی من برای تحصیل بوده، نهایت تشکر را دارم. هر چند نمی‌توان با این چند جمله کوتاه جبران محبتهایش را کرد، اما خوشحالم که در این رساله و در این صفحه فرصتی دارم تا صمیمانه قدردانی خود را نسبت به او اعلام کنم. او که درین راه صبورانه چون یک آموزگار به من یاد داد تا چشمهایم را بشویم و از دریچه حقیقت کیهان و پروردگارش را جستجو کنم.

فهرست مندرجات

چکیده فارسی . . . . . خ

چکیده انگلیسی . . . . . د

مقدمه ۱

۱ گذاری بر علم ترمودینامیک و نسبیت عام

۱.۱ **جهان** ۵

۲.۱ **نسبیت عام** ٦

۳.۱ **ژئومتری یک فضای همگن و همسانگرد** ۸

۴.۱ **افق رویداد** ۱۱

۵.۱ **قوانین ترمودینامیک** ۱۳

٦.۱ **آنتروپی** ۱۴

۷.۱ **مفاهیم گرما، سیستم و محیط در کیهان‌شناسی** ۱۷

۸.۱ **خلاصه** ۱۷

۲ گرانش و قوانین ترمودینامیک

۱.۲ قانون اول تعمیم یافته و ترمودینامیک افق ظاهری در جهان FRW ۲۰

۲.۲ افق محصور و افق ظاهری در جهان FRW ۲۳

۳.۲ ترمودینامیک افق ظاهری در گرانش انیشتین ۲۶

۴.۲ رهیافت ترمودینامیکی به معادلات فریدمان ۲۹

۵.۲ کدام افق، افق رویداد یا افق ظاهری ؟ ۳۱

۶.۲ بررسی قانون اول ترمودینامیک در افق ظاهری و افق رویداد ۳۲

۷.۲ خلاصه ۳۵

۳ فانتوم ترمودینامیک

۱.۳ میدانهای اسکالر ۳۸

۲.۳ بررسی ترمودینامیک فانتوم با دمای منفی! ۴۰

۳.۳ قانون تحول دما در هندسه FRW ۴۳

۴.۳ حفظ فرضیه فانتوم و ماهیت آن ۴۴

۵.۳ خلاصه ۴۷

۴ آنتروپی و قانون دوم تعمیم یافته ترمودینامیک در کیهان‌شناسی کملنی

۱.۴ کیهان‌شناسی کملنی ۴۹

۲.۴ ترمودینامیک و GSL ۵۱

۳.۴ GSL در حضور میدان کملنی فانتومی یا کواینتسنسی ۵۵

۴.۴ خلاصه ۵۹

۵ آنتروپی و شناسه‌های $statefinder$ در ترمودینامیک

۱.۵ آنتروپی و مدل کملن ۶۳

۲.۵ شناسه‌های $statefinder$ ۶۵

۳.۵ خلاصه ۶۷

۶ ترمودینامیک و دینامیک کیهان در گرانش $F(R,\phi)$

۱.۶ گرانش $F(R,\phi)$ ۶۹

۲.۶ آزمونهای کیهان‌شناسی ۷۴

۳.۶ بررسی ترمودینامیک مدل ۷۸

۴.۶ خلاصه ۸۰

پیوست ۸۲

مراجع ۸۵

فهرست جدولها

(۱) جدول (۴–۱۱) . . . . . صفحه ٦٠

فهرست شکلها

(۱) شکل (۴–۱) . . . . . صفحه ۵۳

(۲) شکل (۴–۲) . . . . . صفحه ۵۵

(۳) شکل (۴–۳) . . . . . صفحه ٥٦

(۴) شکل (۴–۴) . . . . . صفحه ۵۷

(۵) شکل (۴–۵) . . . . . صفحه ۵۸

(٦) شکل (۵–۱) . . . . . صفحه ٦۴

(۷) شکل (۵–۲) . . . . . صفحه ٦٦

(۸) شکل (٦–۱) . . . . . صفحه ۷۱

(۹) شکل (٦–۲) . . . . . صفحه ۷۲

(۱۰) شکل (٦–۳) . . . . . صفحه ۷۳

(۱۱) شکل (٦–۴) . . . . . صفحه ۷٦

(۱۲) شکل (٦–۵) . . . . . صفحه ۷۷

(۱۳) شکل (٦–٦) . . . . . صفحه ۷۸

چکیده

بررسی ترمودینامیکی فاز فانتومی کیهان

فاطمه طیبی نعیم پور

در این پایان نامه قصد داریم نشان دهیم که قانون اول تعمیم یافته، می‌تواند برای افق ظاهری جهان FRW استفاده شود. سپس رابطه بین معادلات فریدمان و قانون اول ترمودینامیک را در افق محصور / افق ظاهری در جهان FRW بررسی خواهیم کرد. همچنین نشان خواهیم داد که در گرانش انیشتین، قانون اول ترمودینامیک همواره در افق ظاهری برقرار است. ما خواص مدلهای میدان اسکالر کوانتسنسی و فانتومی را مطالعه خواهیم کرد و نشان خواهیم داد که فرضیه فانتوم با پارامتر معادله حالت $\omega < -1$، که به لحاظ ترمودینامیکی ممنوع است، می‌تواند با در نظر گرفتن یک پتانسیل شیمیایی منفی مجاز شود. در این پایان‌نامه، رابطه‌ی آنتروپی و برقراری قانون دوم تعمیم یافته ترمودینامیک (GSL) را در کیهان‌شناسی کملنی FRW که در آن عالم بوسیله افق ظاهری دینامیکی احاطه شده، بررسی خواهیم کرد. همچنین، مدل گرانش اسکالر − تانسور $F(R,\phi)$ را معرفی و دینامیک و ترمودینامیک این مدل را در کیهان‌شناسی FRW، بررسی خواهیم کرد.

کلید واژه: قانون اول تعمیم یافته، افق ظاهری، فانتوم، قانون دوم تعمیم یافته ترمودینامیک، کیهان‌شناسی کملنی، گرانش اسکالر − تانسور.

Abstract

Phantom Thermodynamics

Fatemeh Tayebi Naeempour

In this thesis, first we find that the unified first law can be used to the apparent horizon of the FRW universe. We revisit the relation between the Friedmann equations and the first law of thermodynamics. Also we will show in Einstein theory, the first law of thermodynamics is always satisfied on the apparent horizon. We study the propeties of Quintessence and Phantom scalar field models. Then it is argued here that the phantom regime $\omega < -1$, that is not thermodynamically possible, with a negative value of the chemical potential, becomes thermodynamically consistent. In this thesis, we investigate the validity of the generalized second law (GSL) of thermodynamics and entropy relation in the FRW chameleon cosmology where the boundary of the universe is assumed to be enclosed by the dynamical apparent horizon. Also, we will introduce $F(R, \phi)$ scalar-tensor gravity model and investigate it's dynamics and thermodynamics in the FRW cosmology.

Key words: Unified first law, Apparent horizon, Phantom, Generalized second law, Chameleon cosmology, Scalar-tensor gravity.

مقدمه

کیهان‌شناسی [1]، از واژه یونانی Cosmas به معنای عالم گرفته شده است. پس کیهان‌شناسی به مطالعه آغاز ساختار کلی و تکاملی عالم می‌پردازد. کیهان‌شناسی، گذشته، حال و آینده کائنات را بررسی می‌کند.

مطاله کائنات از زمین و آسمان و خورشید آغاز شد. انسانهای دوره ما قبل علم، عقیده داشتند که در مرکز جهان هستند و خورشید و سایر سیارات به گرد زمین مرکزی می‌گردند. کپرنیک، مرکز عالم را در نزدیکی خورشید فرض کرد که زمین نیز همراه سایر سیارات به گرد آن می‌چرخد، گالیله هم به کمک تلسکوپ خود واقعیاتی را جهت نظام جهانی پیشنهادی کپرنیک کشف کرد. اقلیدس، ریاضیدان یونانی، (حدود ۳۰۰ سال قبل از میلاد)، با استقاده از سه بعد طول، عرض و ارتفاع، فضا را تعریف کرد.

اسحاق نیوتن (۱۷۲۷–۱۶۴۳)، فیزیکدان و ریاضیدان انگلیسی، تعریفی که از جهان ارائه داد، مطابق با نظریات اقلیدس بود. فضایی لایتناهی که با استفاده از سه بعد طول، عرض و ارتفاع تعریف می‌شد. اما نظریه فضای لایتناهی عاری از مشکل نیست. طبق نظریه اولبرس که از نام ستاره‌شناس آلمانی، ویلهم اولبرس (۱۸۴۰–۱۷۵۸) گرفته شده، اگر ستارگان به یک شکل در تمام فضای لایتناهی پراکنده شوند، در تمام جهان ستاره‌ای وجود خواهد داشت. اگر چیزی در مسیر ستارگان دوردست قرار نگیرد، تمام آسمان درخشندگی خورشید را خواهد داشت که عملاً چنین نیست.

آلبرت انیشتین، (۱۹۵۵–۱۸۷۹)، دانشمند آمریکایی آلمانی تبار، با ارائه نظریه نسبیت عام در سال ۱۹۱۵ مشکل نیوتن را حل کرد. انیشتین نشان داد که فضا و ماده موجود در آن، محدود اما نامحصور است (یک جهان دو بعدی به شکل سطح یک کره را تصور کنید، این جهان محدود خواهد بود اما هیچ لبه یا حصاری نخواهد داشت). جهان محدود اما نامحصور آلبرت انیشتین، ساکن است اما به آسانی می‌تواند منبسط یا منقبض شود. او کائنات را دارای تاریخ دانست.

نظریه‌ی انبساط جهان با کشفی که ادوین هابل (۱۹۵۳–۱۸۸۹)، ستاره‌شناس آمریکایی ، به عمل آورد، قوت گرفت. او دریافت که کهکشانها در حال حرکت در جهان هستند و همچنین متوجه شد که کهکشانهای دورتر، سریعتر از کهکشانهای نزدیکتر حرکت می‌کنند.

در این دوره که به دوره کیهانی معروف شده فکر بشر معطوف به گذشته جهان شد و دانشمندان در سراسر جهان اکنون در فکر پاسخ به این سؤالات هستند که:

- چرا آنگونه که ما مشاهده میکنیم انبساط جهان اینگونه سریع و شتابان است؟
- انرژی تاریک دارای چه ماهیتی است که نیروی محرکه را برای این انبساط شتابان فراهم می‌کند؟

[1] Cosmology

- جهان در گذشته چگونه بوده و در آینده چگونه خواهد بود؟
- فرایند تکوین کیهان تا کی ادامه خواهد یافت؟
- چرا هر چه به گذشته برمی‌گردیم بی‌نظمی و آنتروپی جهان کمتر می‌شود؟
- آیا قانون دوم ترمودینامیک می‌تواند تفاوت چشمگیر بین گذشته و آینده عالم را توضیح دهد؟

. . .

فصل‌اول

گذاری بر علم ترمودینامیک و نسبیت عام

۱.۱ جهان

بر پایه‌ی اندازه‌گیری انبساط جهان با به کارگیری ابرنواخترهای گونه‌ی Ia، اندازه‌گیری توده‌های ریزموج‌های زمینه‌ی کیهانی (CMB[۱]) و اندازه‌گیری چگونگی ارتباط میان کهکشان‌ها، عمر جهان ۰.۲ ± ۱۳.۷ میلیارد سال برآورد شده است.

جهان آغازین به طور باور نکردنی چگال و دارای فشار و دمای بسیار بالا اما کاملاً همگن بود. این گوی بسیار داغ، منبسط و سرد شد و به سمت طی کردن فازهای مختلف پیش رفت که شبیه به میعان گاز و یا یخ بستن آب هنگام سرد شدن بود. تقریباً در حدود $۱۰^{-۳۸}$ ثانیه پس از آغاز، طی کردن یک فاز موجب شد که جهان رشدی سریع را در دوره‌ای به نام «تورم کیهانی[۲]» تجربه کند. در ادامه تورم متوقف شد و اجزای مادی سازنده‌ی جهان که به شکل نوعی پلاسما بودند، به طور نسبی حرکت کردند. هنگامی که رشد جهان این مراحل را طی می‌کرد دما نیز افت می کرد و در یک دمای معین طی یک گذار ناشناخته، به نام «نسل باریونی[۳]»، کوارک‌ها و گلئون‌ها با هم ترکیب و به ذرات سنگین (باریون‌هایی) مانند پروتون‌ها و نوترون‌ها تبدیل شدند، به گونه‌ای که عدم تقارن میان ماده و پادماده را در پی داشت. در دماهای پایین‌تر طی کردن فازهای دیگر عدم تقارن بیشتری را در پی داشتند و قانون‌های فیزیکی و ذرات بنیادین را به شکل کنونی آن‌ها درآوردند. پس از آن برخی از پروتون‌ها و نوترون‌ها ترکیب شدند تا دوتریم‌ها و هلیوم نوکلئی‌های این جهان را در فرآیندی که به «سنتز هسته‌ای انفجار بزرگ[۴]» معروف است، ایجاد کنند. هنگامی که جهان سرد شد، رفته رفته ماده از حرکت نسبی بازایستاد. پس از حدود ۳۰۰,۰۰۰ سال، الکترون‌ها و پروتون‌ها در اتم‌ها (اغلب هیدروژن‌ها) ترکیب شدند؛ از این‌رو پرتو (تابش) از ماده جدا شد و بی هیچ ممانعتی در فضا به راهش ادامه داد. این پرتو باستانی، همان «تابش زمینه‌ی کیهانی» است.

در زمان‌های بعد ناحیه‌های چگال‌تر، مواد نزدیک را به شیوه‌ی گرانشی جذب کردند و بدین گونه چگال‌تر شدند و ابرهای گازی، کهکشان‌ها و ساختارهای قابل مشاهده‌ی جهان امروزی شکل گرفتند. جزئیات این فرآیند به مقدار و نوع ماده‌ی جهان وابسته است. سه گونه‌ی ممکن با نام‌های «ماده‌ی تاریک سرد[۵]»، «ماده‌ی تاریک داغ[۶]» و «ماده‌ی

[۱] Cosmic Microwave Background

[۲] Inflation

[۳] baryogenesis

[۴] Big Bang nucleosynthesis

[۵] cold dark matter

[۶] hot dark matter

باریونی[۷]» شناخته شده هستند. شواهدی وجود دارد مبنی بر اینکه ماده تاریک از نوعی ذره بنیادی عجیب تشکیل شده است. چون فرض می‌شود که ماده تاریک از نظر الکتریکی خنثی است، ویژگی کلیدی این ذره بنیادی جرم آن خواهد بود . از طرفی در عالم بسیار اولیه، همه‌ی ذرات با هم برخورد می‌کردند و برهم‌کنش داشتند در نتیجه به دمای مشترکی رسیده بودند. دمای یک سیستم معیاری است از انرژی جنبشی تک تک ذرات آن، بنابراین اگر جرم ذره ماده تاریک در مقایسه با سایر ذرات بنیادی شناخته شده بسیار کم باشد، برای داشتن انرژی جنبشی یکسان با دیگر ذرات می‌باید سرعت بسیار بالا داشته باشد. صفت «داغ» بدان معناست که همچنان که عالم سردتر می‌شد و مرحله‌ای فرا رسید که ذره ماده تاریک کاملاً از بقیه جدا شد، هنوز با سرعت بسیار بالا حرکت می‌کرد. از سوی دیگر، اگر ذره ماده تاریک بسیار سنگین‌تر از ذرات بنیادی شناخته شده باشد، وضعیتی که توصیف شد برعکس می‌شود. وقتی ذره از بقیه ماده جدا شد سرعت بسیار کمتری داشته، که به آن ماده تاریک «سرد» می‌گویند. بهترین اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط کاوشگر ریزموج ناهمسانگرد وینکلسون(WMAP[۸]) نشان می‌دهد که شکل غالب ماده در جهان «ماده‌ی تاریک سرد» است و دو نوع دیگر کم‌تر از ۲۰ درصد از کل ماده‌ی جهان را تشکیل می‌دهند.

به نظر می‌رسد که جهان امروز به تسلط یک شکل مرموز از انرژی به نام «انرژی تاریک» در آمده است. کمابیش ۷۰ درصد از انرژی جهان امروزی از این گونه‌ی انرژی است. این بخش از ساختمان جهان با ویژگی‌های آشکار شده‌ی انبساط جهان شناسایی شده است. این رموز هنگامی که به آغاز جهان نزدیک‌تر می‌شویم، مبهم‌تر می‌شوند. یعنی زمانی که انرژی‌های ذره از آنچه امروزه با آزمایش به دست می آید بسیار بیشتر بوده است. هم‌اکنون هیچ مدل فیزیکی قابل توجهی برای $۱۰^{-۳۳}$ ثانیه‌ی آغازین نداریم. درک این دوره از تاریخ جهان یکی از بزرگترین مسأله‌های حل نشده‌ی فیزیک است. با این حال، نظریه نسبیت عام می‌تواند پاسخگوی بسیاری از سؤالات حل نشده درباره کیهان باشد [۱]، [۲].

۲.۱ نسبیت عام

یک رویداد، در نقطه‌ای معین از فضا و در زمانی مشخص اتفاق می‌افتد. بنابراین هر رویداد را می‌توان با چهار مختصه مشخص نمود. در انتخاب مختصات مختاریم هر مختصات سه گانه مکانی تعریف شده و هر واحد زمانی را برگزینیم. تصور یک رویداد با چهار مؤلفه در یک دستگاه مختصات چهار بعدی بنام فضا — زمان، مشابه تصور

[۷] barionic matter

[۸] Wilkinson Microwave Anisotropy Prob

گسترش امواج در سطح آب در مدل سه بعدی می‌باشد. در این مدل که سطح آبگیر دو بعد و زمان بعد دیگر این مدل را تشکیل می‌دهد، دایره‌های مواج گسترش‌یابنده، مخروطی به وجود می آورند که رأس آن همان نقطه و زمانی است که سنگ به آب برخورد کرده است. به همین ترتیب، انتشار نور بر اثر یک رویداد، مخروطی سه بعدی را در دستگاه فضا — زمان چهار بعدی به وجود می‌آورد که مخروط نوری آینده‌ی رویداد نام دارد . به روشی مشابه، مخروط دیگر را می‌توان رسم کرد که مخروط نوری گذشته نامیده می‌شود و مجموعه‌ای از رویدادهاست که بوسیله‌ی آنها، نور قادر است به یک رویداد مفروض برسد. این مخروط دوتایی یا مخروطهای نول که هر رویداد در فضا — زمان در مرکز آن قرار دارد ، بر اساس انتخاب قراردادی واحدهای به کار رفته در نسبیت، کناره‌هایش دارای شیب ۴۵ درجه از محور زمانی و صفحات همزمانی هستند، که مربوط می‌شود به انتخاب واحدهایی که زمان با ثانیه و فاصله با ثانیه نوری اندازه‌گیری می‌شود. مخروط نوری گذشته و آینده هر رویداد P ، مکان — زمان را به سه ناحیه تقسیم می‌کند. آینده‌ی مطلق رویداد درون مخروط نوری آینده‌ی P است و مجموعه‌ی همه رویدادهایی است که محتملاً می‌توانند از آنچه در P روی می‌دهد، متأثر شوند. علائم گسیل شده از P به رویدادهای خارج مخروط نوری آینده‌ی P دسترسی ندارند چرا که هیچ چیز سریعتر از نور حرکت نمی‌کند. بنابراین آنچه که در P می‌گذرد تأثیری بر رویدادها ندارد. گذشته مطلق P درون مخروط نوری گذشته قرار دارد و مجموعه‌ای از رویدادهاست که علائم آنها با سرعت نور یا کمتر از آن حرکت می‌کنند و می‌توانند به P برسند.

اگر کسی از تأثیرات گرانش صرفنظر کند، به نسبیت خاص دست خواهد یافت. برای هر حادثه‌ای در فضا ـزمان می‌توان مخروط نوری ساخت. بر اساس اصول نسبیت خاص، همه ناظران صرفنظر از حرکتشان ، بدلیل قوانین ماکسول، در همه جهتها سرعت نور را یکسان اندازه می‌گیرند. بنابراین از آنجا که سرعت نور در هر جهت و برای هر رویداد ثابت است، همه‌ی مخروطهای نوری یکسان بوده و همگی همسو و هم‌جهت می‌باشند. به عبارت دیگر، همه ناظران در مخروطهای نوری هر رویداد توافق دارند. هر ناظر می‌تواند سایه رویدادها را روی محور زمانی [۹] و روی صفحات همزمانی تصویر کند [۱]، [۵] .

اما اگر اثرات گرانشی در نظر گرفته شود مسیر نور چگونه خواهد بود ؟

بین سالهای ۱۹۰۸ تا ۱۹۱۴ انیشتین چندین بار کوشید نظریه گرانشی تدوین کند که با نسبیت خاص همساز باشد اما موفق نشد. سرانجام در سال ۱۹۱۵، نظریه‌ای را مطرح ساخت که امروز بنام نسبیت عام معروف است. انیشتین این ایده انقلابی را عرضه کرد که گرانش نیرویی همانند سایر نیروها نیست، بلکه نتیجه این واقعیت است که فضا — زمان مسطح نمی‌باشد. فضا — زمان به سبب توزیع جرم و انرژی، خمیده است. حرکت اجسامی چون زمین بر

[۹] world-line

مدارهایی خمیده بخاطر اعمال نیروی جاذبه نیست، بلکه آنها در فضایی خمیده مسیری را که کاملاً مشابه خط راست است و ژئودزیک نام دارد، می‌پیماید. ژئودزیک، کوتاهترین (یا طولانی‌ترین) مسیر بین دو نقطه‌ی مجاور است . پس طبق نظریه نسبیت عام، مخروطهای نوری در نقاط نزدیک به مثلاً یک سیاهچاله که در آن انحنای فضا — زمان بی‌نهایت است، به طرف داخل خم می‌شوند. در پرتو نسبیت عام، فضا و زمان کمیت‌هایی پویا هستند . فضا و زمان نه تنها تأثیر گذارند، بلکه از آنچه در پهنه هستی رخ می‌دهد، متأثر می‌شوند. همانطور که بدون مفاهیم فضا و زمان نمی‌توان از رویدادهای جهان سخن گفت، در نسبیت عام سخن از فضا و زمان فراتر از مرزهای جهان بی‌معناست.

۳.۱ ژئومتری یک فضای همگن و همسانگرد

تصور نوین ما از جهان از سال ۱۹۲۴ شروع به شکل گرفتن کرد. در آن سال ستاره‌شناس آمریکایی، ادوین هابل [۱۰] نشان داد که کهکشان ماتنها کهکشان جهان نیست. هابل با مطالعه‌ی طیف نوری کهکشانها متوجه شد طیف اکثر آنها انتقال به سرخ دارند. به عبارت دیگر، فاصله‌ی کهکشانهای مختلف از یکدیگر همواره در حال افزایش است. کشف اینکه جهان در حال گسترش است یکی از انقلابهای فکری بزرگ قرن بیستم بود. با این همه، باور به ایستایی جهان چنان نیرومند بود که تا اوایل قرن بیستم پایدار ماند . حتی انیشتین، هنگام فرمول‌بندی نظریه نسبیت عام در سال ۱۹۱۵، چنان به ایستا بودن جهان اطمینان داشت که اصلاحاتی در تئوری خود به عمل آورد تا آنرا امکان‌پذیر سازد. او در معادلات خود ثابتی بنام ثابت کیهانی وارد کرد و نیرویی بنام پادگرانش را معرفی نمود که بر خلاف دیگر نیروها، از منبع خاصی ناشی نمی‌شد بلکه در کالبد فضا — زمان نهفته بود. او ادعا کرد که فضا — زمان گرایش درونی به گسترش دارد که دقیقاً در تقابل با خاصیت جاذبه همه اجسام موجود در جهان، موجب ثبات و قرار عالم می‌شود. هنگامی که انیشتین و دیگر فیزیکدانان در جستجوی راهی بودند تا مانع از پیش‌بینی جهانی پویا بوسیله نسبیت عام شوند، فیزیکدان و ریاضیدان روسی، الکساندر فریدمان [۱۱] دست به توضیح وتبیین آن زد.

فریدمان دو فرض بسیار ساده درباره عالم مطرح نمود، فرض اینکه جهان ما همگن [۱۲] و همسانگرد [۱۳] است به این معنی که تحول آن می‌تواند به عنوان یک تسلسل مرتب زمانی از فضای شبیه ابرسطح‌های سه بعدی نمایش داده شود، که هر کدام همگن و همسانگرد هستند. این ابرسطح‌ها انتخاب طبیعی از سطح‌های با زمان ثابت هستند.

[۱۰] Edvin Habel

[۱۱] Alexander Friedmann

[۱۲] homogeneous

[۱۳] isotropic

همگنی به این معنی است که وقتی از یک نقطه داده شده روی ابرسطح مشاهده می‌شود، شرایط فیزیکی در هر نقطه از ابرسطح‌های داده شده، یکسان باشد. همسانگردی به این معناست که شرایط فیزیکی در تمامی جهات یکسان باشد. همسانگردی در هر نقطه به طور اتوماتیک همگنی را به وجود می آورد. به هر حال همگنی ضرورتاً به همسانگردی دلالت نمی‌کند.

فضاهای همگن و همسانگرد، بیشترین امکان گروه تقارنی را دارند. در سه بعد، سه انتقال مستقل و سه دوران مستقل وجود دارد. این تقارن‌ها به شدت هندسه‌ی مجاز را برای چنین فضاهایی محدود می‌کنند. تنها سه نوع فضای همگن و همسانگرد وجود دارد: a) فضای تخت، b) یک کره‌ی سه بعدی با انحنای ثابت مثبت، c) یک فضای هیپربولیک[۱۴] سه‌بعدی با انحنای ثابت منفی برای کمک به تشخیص این فضاها، سطوح همگن و همسانگرد دوبعدی مشابه را بررسی می‌کنیم و بعد به سه‌بعد تعمیم می‌دهیم. دو مورد شناخته شده از این فضاها، صفحه و کره است که هر دو می‌توانند در فضای اقلیدسی سه‌بعدی با مختصات کارتزین x، y و z محاصره شوند. معادله‌ای که محصور شدن یک کره‌ی دوبعدی را شرح می‌دهد به شکل زیر است:

$$x^۲ + y^۲ + z^۲ = a^۲, \qquad (۱.۱)$$

که a شعاع کره است. با مشتق گیری از این معادله داریم

$$dz = -\frac{xdx + ydy}{z} = \pm\frac{xdx + ydy}{\sqrt{a^۲ - x^۲ - y^۲}},$$

با قرار دادن این در متریک اقلیدسی سه بعدی

$$dl^۲ = dx^۲ + dy^۲ + dz^۲, \qquad (۲.۱)$$

به دست می آوریم

$$dl^۲ = dx^۲ + dy^۲ + \frac{(xdx + ydy)^۲}{a^۲ - x^۲ - y^۲}. \qquad (۳.۱)$$

این مختصات همگن هستند، به این معنی که برای هر (x, y) داده شده، متناظر است با دو نقطه متفاوت روی کره، که در نیمکره‌ی شمالی و جنوبی قرار گرفته‌اند. با x و y بر حسب مختصات قطبی ، $y = r' \sin\theta$ ، $x = r' \cos\theta$ و با مشتق گیری از رابطه‌ی $x^۲ + y^۲ = r'^۲$، و ترکیب آن با

$$dx^۲ + dy^۲ = dr'^۲ + r'^۲ d\theta^۲,$$

[۱۴] hyperbolic