بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه کردستان**

**دانشکده علوم**

**گروه فیزیک**

**عنوان:**

# مطالعه مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین

**پژوهشگر:**

**سجاد ضیائی**

**استاد راهنما:**

**دکترخالد سعیدی**

**پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری**

**آبان ماه ۱۳۸۹**

**کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایـج مطالعات،**

**ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع**

**این پایان‌نامه (رسـاله) متعلق به دانشـگاه کردستان است.**

# ***تعهد نامه***

اینجانب سجاد ضیائی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه گروه فیزیک تعهد می نمایم که محتوای این پایان نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

سجاد ضیائی

۱۳۸۹/ ۸ / ۱

**دانشگاه کردستان**

**دانشکده علوم**

**گروه فیزیک**

**پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری**

**عنوان:**

# مطالعه مدل‌های کیهانشناسی غیر تکین

**پژوهشگر:**

**سجاد ضیائی**

در تاریخ ۱۳۸۹/۸/۱ توسط کمیته تخصصی وهیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ..... و درجه ..... به تصویب رسید.

| هیات داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---|---|---|---|
| ۱ـ استاد راهنما | دکتر خالد سعیدی | دانشیار | |
| ۲ـ استاد داور خارجی | دکتر محمد نوری زنوز | دانشیار | |
| ۳ـ استاد داور داخلی | دکتر بهروز ملک الکلامی | استاد یار | |

مهر و امضاء مدیر گروه

دانشگاه کردستان
گروه فیزیک

مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی

## خدایا...

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

به من 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 تنها شوم، باز خدا هست

او جانشین همه نداشتن‌هاست...

# تقدیم به پدر و مادر عزیزم

بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگار مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان را به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که در این سردترین روزگاران، بهترین پشتیبان من بودند.

# قدردانی

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

اینک که به فضل و لطف خداوند توفیق اتمام این رساله نصیبم شده است، با کمال ادب و احترام وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر خالد سعیدی صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

# چکیده

هدف ما در این پایان‌نامه مطالعه وبررسی مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین است. ما می‌خواهیم مدل‌هایی را بررسی کنیم که از تکینگی مدل انفجار بزرگ اجتناب کرده‌اند وآن را با عالم‌های چرخه‌ای غیرتکین، شامل چهار مرحله‌ی متوالی *جهش کیهانی*، *فاز انبساط*، *برگشت کیهانی* و *فاز انقباض* جایگزین می‌کنند. ما ابتدا مفاهیم، معادلات و شرط‌های لازم وضروری (شامل شرط‌های انرژی) در مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین را بیان می‌کنیم. سپس به تحلیل و بررسی کرم چاله‌های تولمن و مسئله سیاه چاله‌ها در این مدل می‌پردازیم و مکانیسم‌های غالبی را که شامل انرژی تاریک فانتوم هستند و در دهه‌ی اخیر برای جواب مسئله سیاه چاله‌ها در فاز انبساط ارائه شده‌اند بطور کامل مطالعه و بررسی می‌کنیم. در پایان، مسئله مهم ناهمسانگردی در فاز انقباض مدل‌های غیرتکین را آنالیز کرده و با استفاده از یک معادله حالت غیر خطی جامع، که ترکیبی دوتایی از شاره کامل و انرژی تاریک است، روش نوینی را برای حل این مسئله ارائه خواهیم کرد.

**واژه‌های کلیدی:** *کیهانشناسی غیرتکین، جهش کیهانی، برگشت کیهانی، عالم چرخه‌ای، فاز انبساط، فاز انقباض، انرژی تاریک فانتوم*.

# فهرست مطالب


**۱ مقدمه** **۱**

**۲ معادلات و مفاهیم پایه در مدل کیهانشناسی غیرتکین** **۷**

۱.۲ معادلات اینشتین . . . . . ۷

۲.۲ شرط‌های انرژی . . . . . ۱۱

۳.۲ شرط‌های لازم وضروری در کیهانشناسی غیرتکین . . . . . ۱۳

**۳ کرم چاله‌های تولمن و سیاه چاله‌ها در کیهانشناسی غیرتکین** **۲۰**

۱.۳ کرم چاله‌های تولمن . . . . . ۲۰

۱.۱.۳ معرفی کرم چاله‌های تولمن . . . . . ۲۲

۲.۱.۳ مشخصات کلی جهش کیهانی . . . . . ۲۲

۳.۱.۳ هندسه‌ی کلی در جهش کیهانی و مجاورت آن . . . . . ۲۷

۴.۱.۳ قیدهای تانسور انرژی-تکانه . . . . . ۳۰

۲.۳ سیاه چاله‌ها در عالم‌های چرخه‌ای غیرتکین . . . . . ۳۲

۳.۳ جهش کیهانی فانتوم: یک کیهانشناسی چرخه‌ای نوین . . . . . ۳۳

۴.۳ تغییر جرم سیاه چاله‌ها در فاز انبساط . . . . . ۴۱

۵.۳ رشد پیوسته‌ی انرژی فانتوم بر سیاه چاله‌ها . . . . . ۴۹

۱.۵.۳ قبل از برگشت کیهانی . . . . . ۵۰

۲.۵.۳ پس از برگشت کیهانی . . . . . ۵۲

۳.۵.۳ انهدام سیاه چاله‌ها . . . . . ۵۳

**۴ کیهانشناسی غیرتکین بدون ناهمسانگردی ۵۶**

۱.۴ مسئله‌ی ناهمسانگردی در فاز انقباض . . . . . ۵۶

۲.۴ معادله حالت غیر خطی . . . . . ۵۸

۳.۴ معادله حالت با یک جمله‌ی درجه دوم . . . . . ۶۳

۴.۴ گاز شبه پلی‌تروپیک اصلاح شده . . . . . ۶۵

۵.۴ گاز شبه چاپلیجین اصلاح شده . . . . . ۶۷

۶.۴ جمع‌بندی . . . . . ۶۹

مراجع . . . . . ۷۳

# لیست جداول

# لیست تصاویر


۱.۱ مقادیر چگالی خلاء (انرژی تاریک) و چگالی جرمی. داده‌ها توسط پروژه‌ها و یا کاوشگرهای مختلفی به دست آمده است که اسامی‌شان را در شکل می‌بینید [۳۱]. . . . ۶

۱.۳ نمایی از کرم چاله که دو عالم متمایز (شکل بالا)، و یا دو ناحیه مجزا از یک عالم (شکل پایین) را به یکدیگر وصل می‌کند [۳۳]. . . . . ۲۱

۲.۳ فاکتور مقیاس در جهش کیهانی (نمودار بالا) و برگشت کیهانی (نمودار پایین) که به صورت تابعی از زمان رسم شده‌اند. . . . . ۳۹

۳.۳ چگالی انرژی در جهش کیهانی (نمودار بالا) و برگشت کیهانی (نمودار پایین) که به صورت تابعی از زمان رسم شده‌اند. خطوط نقطه چین چگالی انرژی $\rho = \sigma$ را نشان می‌دهند. . . . . ۴۰

۴.۳ طرح تقریبی از فاز انبساط عالم فانتوم غالب در کیهانشناسی چرخه‌ای. . . . . ۴۷

۵.۳ تغییر جرم سیاه چاله به واسطه رشد پیوسته‌ی انرژی تاریک فانتوم در کیهانشناسی چرخه‌ای برای یک مثال ساده شده [۵۱]. . . . . ۴۸

# فصل ۱

# مقدمه

درباره چگونگی پیدایش عالم، مدل‌های کیهانشناسی مختلفی ارائه شده‌اند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته طبقه‌بندی کرد. دسته‌ی اول شامل نظریه‌هایی است که تکینگی [۱] دارند، و دسته‌ی دوم نظریه‌هایی را دربر دارد که غیرتکین هستند. یکی از مشهورترین نظریه‌ها، نظریه‌ی پنرز [۲]، هاوکینگ [۳] و گروش [۴] است، این نظریه ها تکین هستند واصولا آن‌ها را مدل کیهانشناسی تکین می‌نامند [۱، ۲]. مدل کیهانشناسی تکین بیان می‌دارد که عالم (شامل زمان و هر سه بعد مکان) در حدود ۱۳.۷ میلیارد سال پیش در یک لحظه‌ی معین درون نقطه‌ای جای داشته است که در آن انرژی وچگالی ذرات بی‌نهایت بوده و عالم از این نقطه (تکینگی) به وجود آمده است و از آن زمان تا کنون در حال انبساط و سرد شدن است. این مدل کیهانشناسی، که به مدل استاندارد کیهانشناسی معروف است، حدود ۶۰ سال پیش ارائه شده و در طی این مدت با اعمال تغییراتی در آن تا حدودی توسعه یافته است. مدل استاندارد کیهانشناسی که براساس نسبیت عام پایه گذاری شده است، با تکیه بر یک سری فرض‌های اولیه توانسته بود تصویر کاملی از کیهان ارائه دهد. نظریه‌های انفجار بزرگ [۵] و پیش‌بینی‌های آن در تولید عناصر سبک، طیف توانی حاصل از تابش پس زمینه ریزموج کیهانی [۶] [۳] و مدل‌های تشکیل ساختار ریز، مدل استاندارد را مورد توجه بسیاری از کیهانشناسان قرار داده بود. اما در دهه‌های گذشته، نتایج به

---

۱ Singularity
۲ Penrose
۳ Hawking
۴ Geroch
۵ Big Bang
۶ Cosmic Microwave Backgound Radiation

دست آمده از مشاهدات کیهانی تصویر غیر منتظره‌ای از کیهان را آشکار نمود که موجب خدشه‌دار شدن مدل استاندارد کیهانشناسی شد. در واقع، مشاهدات مربوط به ابرنواخترهای [۷] نوع $Ia$ [۴، ۵] و تابش پس زمینه ریزموج کیهانی [۶، ۷] ، همگی بر این نکته دلالت می‌کنند که انبساط عالم دارای شتاب مثبت است، در حالی که مدل استاندارد کیهانشناسی که بر پایه‌های نسبیت عام استوار است چنین شتابی را پیش‌بینی نکرده بود. برخی از دانشمندان منشاء و عامل این شتاب مثبت را انرژی تاریک [۸] می‌دانند که حدود ۷۰% چگالی عالم را به خود اختصاص داده است. انرژی تاریک برهم‌کنشی از طریق نیروهای بنیادی طبیعت بجز گرانش نمی‌تواند داشته باشد و دارای ویژگی شتاب منفی است تا بتواند شتاب مثبت را در برابر جاذبه‌ی ماده ایجاد کند. دانشمندان اغلب کاندیداهای انرژی تاریک را بر اساس معادله حالت‌شان $\omega = \frac{P}{\rho}$ طبقه‌بندی می‌کنند، که در آن $\rho$ و $P$ به ترتیب چگالی انرژی و فشار را نشان می‌دهند. ساده‌ترین کاندید برای انرژی تاریک ثابت کیهانشناسی [۹] با $\omega = -1$ و چگالی انرژی نزدیک به چگالی انرژی خلاء، بدون تغییر با زمان است [۸]. کاندیداهای انرژی تاریک عبارتند از کوئینتسنس[۱۰] ($\omega > -1$) [۹]، فانتوم[۱۱] ($\omega < -1$) [۱۰] ، کی-اِسنس[۱۲] ($\omega > -1$ یا $\omega < -1$) [۱۱، ۱۲]، کوئینتوم[۱۳] ($\omega$ از $-1$ عبور می‌کند.) [۱۳] و غیره. در شکل(۱.۱) نواحی مختلفی که از داده های ابرنواخترهای نوع $Ia$، تابش پس زمینه ریزموج و رصد ساختارهای بزرگ مقیاس عالم به دست آمده رسم شده است. به عنوان مثال می بینید که مدل عالم تخت بدون انرژی تاریک [۱۴] غیر محتمل است.

از جمله مسائل دیگری که مدل انفجار بزرگ نمی‌تواند به آن‌ها پاسخ دهد شامل مسئله تکینگی اولیه، افق کیهانی [۱۵] ، مسئله تخت بودن [۱۶]، فراوانی ذرات مؤثر، مسئله همگنی [۱۷] ، ماده تاریک و انرژی تاریک است. در دهه‌ی ۱۹۸۰ مفهوم بسیار اساسی تورم [۱۸] به این مدل افزوده شد. اگرچه نظریه تورمی

---

[۷] Supernova
[۸] dark energy
[۹] cosmological constant
[۱۰] Quintessence
[۱۱] Phantom
[۱۲] K-essence
[۱۳] Quintom
[۱۴] در شکل (۱.۱) ثابت کیهانشناسی به عنوان انرژی تاریک در نظر گرفته شده است.
[۱۵] horizon
[۱۶] flatness
[۱۷] homogeneity
[۱۸] inflationary

به بخشی از این سؤالات پاسخ داد، اما نتوانست مسائل بحرانی و مهمی مانند تکینگی اولیه را حل کند [۱۴]. در واقع وجود تکینگی اولیه سرچشمه‌ای از بی‌قانونی است [۱۵]، زیرا توصیف فضا-زمان در آن‌جا کارایی ندارد، در حالی که قوانین فیزیکی مستلزم فضا-زمان هستند. بنابراین، دلایلی بر این فرض که تکینگی اولیه یک مشخصه از عالم ما نیست وجود دارند. از اینرو، دانشمندان به دنبال ارائه‌ی مدل‌ها و ایده‌هایی از یک عالم غیرتکین بودند تا بتوانند بدون احتیاج به شرط تکینگی اولیه، مشاهدات تجربی عالم را به نحو شایسته‌ای توجیه کنند و از مشکلات مدل‌های تکینگی اجتناب کنند. نخستین بحث‌های علمی که *Bouncing cosmology* را شرح می‌داد، مقاله‌هایی از فریدمن [۱۹] [۱۶] ، اینشتین [۲۰] [۱۷] ، تولمن [۲۱] [۱۸] و لومیتر [۲۲] [۱۹] بود، که همه آن‌ها در دهه ۱۹۳۰ منتشر شده‌اند. در این مقاله‌ها از تکینگی مدل انفجار بزرگ اجتناب کرده و آن را با عالم‌های چرخه‌ای غیرتکین جایگزین می‌کنند که از یک سری فازهای انقباض و انبساط تشکیل شده‌اند. در مدل کیهانشناسی تکین فرض شده است که عالم کاملا همگن و ایزوتروپیک است، در حالی که عالم به تقریب این گونه است. بنابراین، اگر عالم در حال انقباضی را تصور کنیم که شعاع آن به صفر میل می‌کند، ذرات همگرا به خاطر ناهمگونی توزیع‌شان در یک نقطه متمرکز نخواهند شد، بلکه از هم می‌گذرند و برگشتی ایجاد می‌کنند که منجر به مرحله جدیدی از انبساط می‌شود. به بیان لیفشیتز [۲۳] و خالاتنیکوف [۲۴]، که یکی از جدیدترین نظریه‌های این پدیده را در سال ۱۹۶۳ ارائه دادند، این نوسان امکان وجود تکینگی در آینده انقباضی عالم را از میان می‌برد و حاکی از آن است که فاز انقباض عالم باید سرانجام منجر به فاز انبساط دیگری شود. این مبنای عالم‌های چرخه‌ای غیرتکین است که مطابق آن عالم دچار چرخه‌های پیاپی انبساط و انقباض می‌شود. در نتیجه، مرحله‌ی انبساط فعلی عالم را می‌توان ناشی از یک مرحله‌ی انقباض قبلی دانست.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، نظریه تورمی که برای حل بخشی از مشکلات مدل کیهانشناسی استاندارد ارائه شده است، نوسانات کوانتومی را در حالت خلاء اولیه پیشگویی می‌کند که منجر به اختلال‌های اساسی در ساختار مقیاس بزرگ کیهانی می‌شود. این نوسانات اولیه دارای یک طیف مقیاس-ثابت هستند که با مشاهدات پس زمینه ریزموج کیهانی سازگارند [۲۰]. از سوی دیگر مشکلات

[۱۹] Friedmann
[۲۰] Einstein
[۲۱] Tolman
[۲۲] Lemaitre
[۲۳] Lifshitz
[۲۴] Khalatnikov

جایگذاری تورم در نظریه گرانش کوانتومی و ماندگاری تکینگی اولیه در نظریه تورمی چندین پیشنهاد برای جایگزینی در مدل‌های کیهانشناسی را بر می‌انگیزد. در یک اجماع کلی، وجود فاز پرانرژی، وقتی که به مرتبه‌ای از مقیاس پلانک می‌رسد، قطع می‌شود که در این حالت نسبیت عام کلاسیکی توسط نظریه گرانش کوانتومی جایگزین می‌شود. بنابراین، دراین صورت نظریه گرانش کوانتومی باید تکینگی را، که بر پایه نسبیت عام استوار است، با حداکثر خمش و چگالی انرژی عالم جایگزین کند. بعبارت دیگر، وقتی که چگالی انرژی عالم به مقداری از مرتبه چگالی انرژی پلانک می‌رسد، سیر تکاملی کیهان مسیرش را تغییر می‌دهد. یعنی اگر عالم در فاز انبساط بوده است، پس از رسیدن به بیشترین اندازه‌اش در ناحیه‌ای که **برگشت کیهانی** [۲۵] نامیده می‌شود تغییر مسیر می‌دهد و شروع به انقباض مجدد می‌کند، و اگر عالم در فاز انقباض بوده است، پس از رسیدن به کوچک‌ترین اندازه‌اش در ناحیه‌ای که **جهش کیهانی** [۲۶] [۲۱] نامیده می‌شود دوباره شروع به انبساط می‌کند. در واقع، در مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین از تکینگی نسبیت عام اجتناب کرده و آن را توسط جهش کیهانی جایگزین می‌کنند. به طور کلی، یک عالم چرخه‌ای غیرتکین شامل چهار مرحله متوالی جهش کیهانی، فاز انبساط، برگشت کیهانی و فاز انقباض است. لازم به ذکر است، وجود جهش کیهانی یکی از مشخصه‌های اساسی و بارز مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین است که توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. یکی از ویژگی‌های بارز مدل کیهانشناسی غیرتکین این است که یک فاز انقباض به سادگی مسائلی هم‌چون مسئله تخت بودن و افق کیهانی از مدل استاندارد را بدون نیاز به نظریه تورم حل می‌کند. هم‌چنین به خوبی انبساط با شتاب مثبت عالم حال حاضر را نشان می‌دهد. مدل کیهانشناسی چرخه‌ای غیرتکین علی‌رغم موفقیت‌هایش نسبت به مدل‌های کیهانشناسی تکین، با مشکلاتی در دهه اخیر مواجه شده است که چرخه‌های نامحدود را غیرممکن می‌کند. یکی از این مشکلات، مسئله تشکیل سیاه چاله‌ها در فاز انبساط است که منجر به وقوع مشکلی در فاز انقباض عالم می‌شود. در حقیقت، سیاه چاله‌ها در حین چرخه‌های متوالی رشد می‌کنند و بزرگ و بزرگ‌تر می‌شوند تا این‌که آن‌ها تمام حجم افق را در حین فاز انقباض اشغال می‌کنند به طوری که محاسبات در مدل‌های چرخه‌ای غیرتکین کارایی خود را از دست می‌دهند. مشکل دیگر این مدل‌ها مربوط به رشد ناهمسانگردی [۲۷] عالم در فاز انقباض

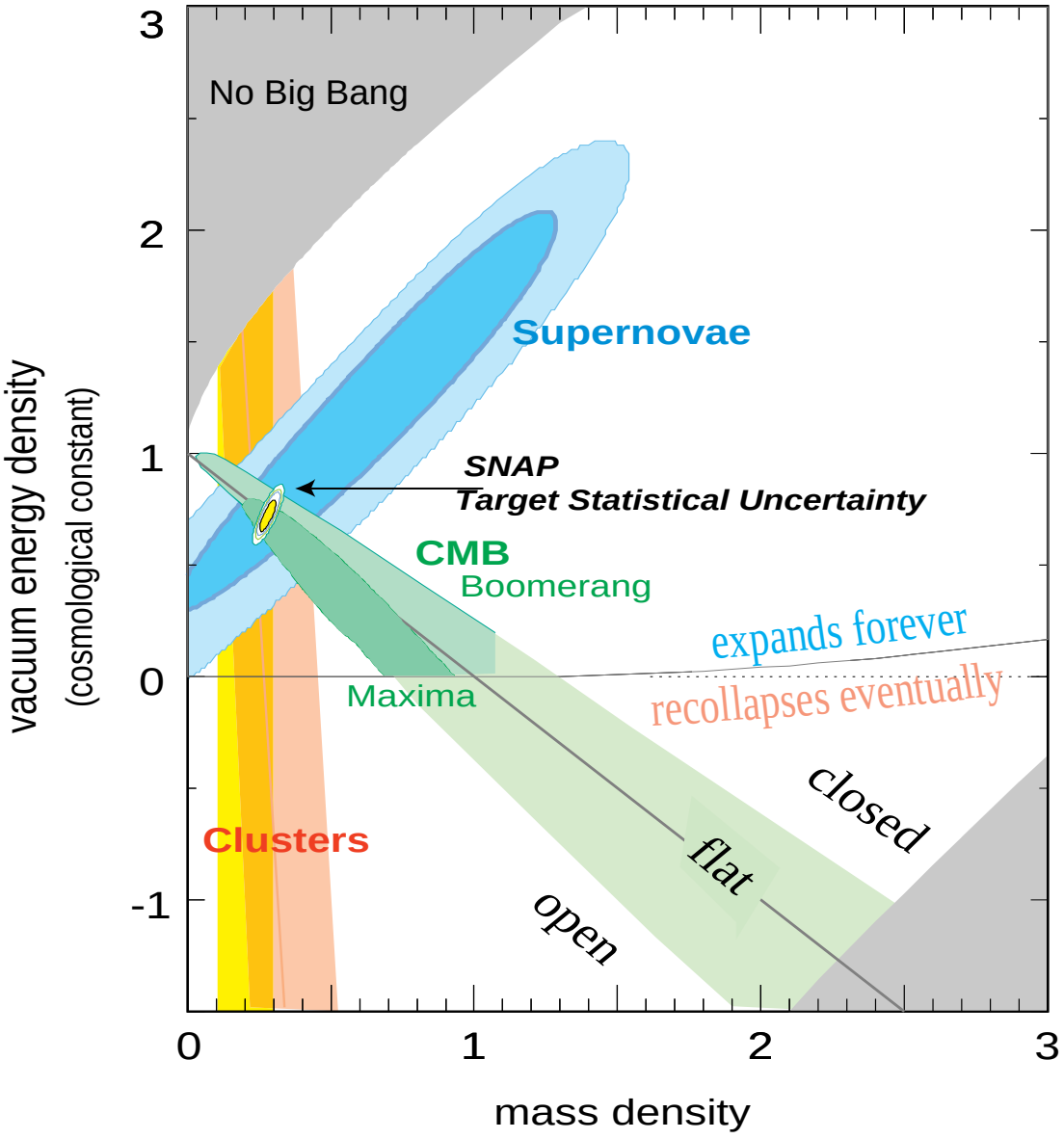
[۲۵] cosmic turnaround
[۲۶] cosmic bounce
[۲۷] anisotropy

است که سرانجام منجر به یک رفتار آشفته و بی نظم میکس‌مستر[۲۸] [۲۲] می‌شود. در دهه‌های اخیر دانشمندان با در نظر گرفتن یک مدل چرخه‌ای ویژه این مشکلات را به خوبی از نظریه‌هایی مانند عالم غشایی[۲۹] [۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶] و گرانش کوانتوم حلقه‌ای[۳۰] [۲۷] و یا مدل‌های دیگری حل کرده‌اند. از جمله‌ی این افراد نووِلو و سلیم[۳۱] [۲۸]، ملنیکوف و ارلوو[۳۲] [۲۹] در اواخر دهه ۱۹۷۰ می باشند. هم‌چنین ویزر و مولینا[۳۳] [۳۰] در سال ۱۹۹۸، نووِلو و پرزبرگ لیافا[۳۴] [۲۱] در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌هایی تحولات عالم را در مدل‌های غیرتکین مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. در این پایان‌نامه ما می‌خواهیم تحولات عالم در مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین را که در دهه‌های اخیر ارائه شده‌اند وبیانگر ترکیبی از مفاهیم استاندارد فیزیکی و سایر مفاهیم پیشرفته فیزیکی‌اند و مشاهدات تجربی عالم را به نحو شایسته‌ای توجیه می‌کنند مورد مطالعه و بررسی قرار دهیم. موضوعات ارائه شده در این پایان‌نامه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: در فصل دوم خلاصه‌ای از معادلات اینشتین در نسبیت عام را بیان می‌کنیم، سپس شرط‌های انرژی در نسبیت عام را معرفی کرده و سرانجام شرط‌های لازم و ضروری برای وجود جهش کیهانی، که یکی از زیر بناهای مدل‌های کیهانشناسی غیرتکین است، را مطالعه و بررسی می‌کنیم. در فصل سوم، ابتدا یک نمونه اولیه و بنیادی از مدل عالم‌های نوسانی غیرتکین در کیهانشناسی را آنالیز می‌کنیم، و در ادامه‌ی این فصل مسئله سیاه چاله‌ها در فاز انبساط را، که در چند سال گذشته مدل‌های چرخه‌ای غیرتکین را با مشکل جدی مواجه کرده است مطالعه و سپس مکانیسم‌های غالبی را که برای حل این مسئله وجود دارند بیان می‌کنیم. در فصل چهارم مسئله مهم و جدی ناهمسانگردی در فاز انقباض مدل‌های غیرتکین را بررسی می‌کنیم و در آخر مکانیسم نوینی را برای حل این مشکل ارائه خواهیم کرد.

---

[۲۸] mixmaster
[۲۹] brane world
[۳۰] loop quantum gravity
[۳۱] Salim and Novello
[۳۲] Orlov and Melnikov
[۳۳] Molina and Visser
[۳۴] Perez Bergliaffa

شکل ۱.۱: مقادیر چگالی خلاء (انرژی تاریک) و چگالی جرمی. داده‌ها توسط پروژه‌ها و یا کاوشگرهای مختلفی به دست آمده است که اسامی‌شان را در شکل می‌بینید [۳۱].



# فصل ۲

# معادلات و مفاهیم پایه در مدل کیهانشناسی غیرتکین

## ۱.۲ معادلات اینشتین

در نسبیت عام فضا-زمان به عنوان یک رویه چهاربعدی در نظر گرفته می‌شود به طوری که به یک متریک مجهز شده است.

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu, \qquad g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}, \qquad g^{\mu\alpha}g_{\nu\alpha} = \delta^\mu_\nu. \tag{۱.۲}$$

برای این‌که با تغییر دستگاه مختصات کمیت‌های فیزیکی به نحوی تبدیل شوند که شکل معادلات فیزیک تغییر نکنند و هموردا باشند، کمیت‌های فیزیکی در نسبیت عام را به صورت تانسوری می‌نویسند. تبدیل مختصات از یک سیستم مختصات به سیستم دیگر به صورت زیر است

$$T'^{\mu}_{\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^m}\frac{\partial x^n}{\partial x'^{\nu}}T^m_n. \tag{۲.۲}$$