بسم الله الرحمن الرحیم

۹۳۳۱۱۲۰۰

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکدهٔ علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد فیزیک

عنوان:

مدل‌های تورمی و آثار قابل مشاهدهٔ آن‌ها در کیهان‌شناسی

استاد راهنما:

دکتر حبیب‌اله عصاره

استاد مشاور:

دکتر پیمان امیری

نگارنده:

فروغ چاهوشی‌زاده

شهریورماه ۱۳۹۳

به نام آن که آسمان را برافراشت

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. شکرِ شایان نثار ایزد منان، که توفیق را رفیق راهم ساخت تا بعد از مدت‌ها و پس از پیمودن راه‌های فراوان که با حضور اساتید عزیزم با راهنمایی‌ها و دغدغه‌های فراوانشان، نگاه‌های پدر و مادرم با چشم‌های پر از برق و امیدشان، شوق و زیبایی حضور عزیزانم در کنارم که خستگی‌های این راه را به‌امید و روشنی راه تبدیل کردند و امیدوارم بتوانم در آینده‌ی نزدیک جواب‌گوی این همه محبت آن‌ها باشم، این پایان‌نامه را به‌اتمام رساندم. نمی‌توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان و عزیزان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سرایم، کم گفته‌ام.

بر خود واجب می‌دانم مراتب تقدیر و تشکر خود را از تمامی کسانی‌که در این راه مرا همراهی و مشایعت نموده‌اند، مبذول دارم:

از **پدر و مادر عزیزم** که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشتند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی‌چشم‌داشت برایم بوده‌اند؛ از استاد عزیز و شایسته‌ام؛ جناب آقای **دکتر حبیب‌اله عصاره** که در کمال سعه‌ی صدر، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را برعهده گرفتند؛ از استاد دلسوزم؛ جناب آقای **دکتر پیمان امیری**، که زحمت مشاوره‌ی این پایان‌نامه را متقبل شدند؛ از استادان فرزانه‌ام؛ جناب آقای **دکتر حمداله صالحی** و جناب آقای **دکتر داود افشار** که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند و زحمت داوری این پایان‌نامه را عهده‌دار شدند؛ از استاد بامحبت و گرامی‌ام؛ جناب آقای **دکتر مهرزاد اشرف‌پور** که افتخار حضور و نظارت ایشان بر این پایان‌نامه نصیب اینجانب شد؛ از مدیریت محترم کرسی گروه جناب آقای **دکتر منصور فربد** که وجودشان موجب برقراری نظم و آرامش می‌باشد؛ و با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی دوستان گران‌مایه‌ام به‌ویژه **آقای دکتر مصحفی، آقای دکتر نامجو، آقای هادیان‌پور، خانم نادری، آقای پورمولا، آقای خانی، آقای عباس‌پور، خانم هادیان‌پور** و دوستان دلسوز و مهربانم **خانم تمنا** و **خانم رستگارپور** و تمامی کسانی که مرا صمیمانه، خالصانه و مشفقانه یاری داده‌اند و حضورشان چون شمعی در تاریکی، روشنگر راهم بود؛ کمال تشکر و قدردانی دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

با سپاس بیکران از همدلی، همراهی و همگامی شما عزیزان

به نام آن که از انوار هستی دو عالم را بلندی داد و پستی

تقدیم با بوسه بر دستان پر سخاوت پدر مهربانم

ای پدر، از تو هر چه گویم باز هم کم آورم!

خورشیدی شدی و از روشنایی ات جان گرفتم و در ناامیدی ها لبریزم کردی از شوق!

اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد، به خود تبریک می گویم که تو را دارم و دنیا با همه ی بزرگیش مثل تو را ندارد!

تقدیم با عشق به مادر عزیزتر از جانم

ای مادر، ای شوق زیبای نفس کشیدنم!

تو رنگ شادی هایم شدی و غم ها را با تمام وجود از من دور کردی!

عمری خستگی ها را به جان خریدی تا اکنون توانستی طعم خوش پیروزی را به من بچشانی!

و تقدیم به خواهران دلسوزم، برادر دوست داشتنی ام، شوهر خواهر مهربانم، یگانه فرشته ی قلبم و شیرینی لحظه های زندگیم، خواهرزاده ی زیبا و محبوبم آرشان!

به پاس عاطفه ی سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران، مایه ی آرامش و تکیه گاه من بودند!

..... به امید آن که بتوانم ذره ای از محبت این عزیزان را جواب گو باشم .....

چکیدهٔ پایان‌نامه

نام‌خانوادگی: چاهوشی**زاده**	**نام:** فروغ	**شمارهٔ دانشجویی:** ۹۰۳۱۱۰۲
عنوان پایان‌نامه: مدل‌های تورمی و اثرات قابل مشاهدهٔ آن‌ها در کیهان‌شناسی		
استاد راهنما: دکتر حبیب‌اله عصاره		
استاد مشاور: دکتر پیمان امیری		
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** فیزیک	**گرایش:** نجوم
دانشگاه: شهید چمران اهواز	**دانشکده:** علوم	**گروه:** فیزیک
تاریخ فارغ التحصیلی: شهریورماه ۱۳۹۳		**تعداد صفحه:** ۱۸۶

کلید واژه‌ها: تورم، میدان تورمی‌زا، پتانسیل تورمی، افت‌وخیزها و اختلالات کیهان‌شناسی، طیفِ توانِ ناهمسانگردی‌هایِ تابشِ ریزموجِ زمینه‌یِ کیهانی.

کیهان‌شناسی تورمی اولین بار به‌عنوان مدلی برای حل مشکلات نظریه‌ی استاندارد انفجار بزرگ ارائه شد. در این الگو فرض می‌شود که ماده‌ی غالب جهان در لحظات بسیار اولیه پس از انفجار، یک میدان اسکالر است که میدان اینفلیتون یا تورمی‌زا نامیده می‌شود و باعث می‌شود که عالم در بازه‌ی بسیار کوچکی از زمان دارای انبساطی شتابدار شود و شعاع عالم به‌مقدار زیادی رشد کند. یکی از مسائل اساسی در کیهان‌شناسی نوین، منشأ افت‌وخیزهای اولیه‌ی میدان اینفلیتون در طول این دوره، به‌عنوان هسته‌های اولیه‌ی تشکیل ساختارها می‌باشد. این نظریه دارای پیش‌بینی‌هایی برای توزیع ناهمسانگردی‌ها و اختلالات مشاهده شده در عالم می‌باشد. اختلال‌های نخستین که در طی تورم ایجاد شده‌اند، اثرشان را روی طیف توان تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی (CMB) به‌خوبی نشان می‌دهند و قیود قابل مشاهده‌ای را روی این طیف ایجاد می‌کنند. می‌توان اثرات این اختلالات را روی طیف توان CMB، با محاسبه‌یِ پارامترهایِ اختلالیِ مدل‌هایِ تورمی، مشاهده کرد. در این پژوهش به‌ترتیب موارد زیر انجام شده است:

۱- معادلات میدان به‌طور دقیق و مستقیم بدون تقریب حل شده و یک مدل تورمی که قادر به‌حل مشکلات تختی و افق می‌باشد، ارائه شده است. این روش منجر به‌یافتن تعداد نامتناهی از جواب‌ها می‌شود.

۲- انواع مدل‌های تورمی معرفی شده و ۵ نوع از پتانسیل‌های تورمی که جزء مدل‌های تک میدان می‌باشند، بررسی شده‌اند. سپس به‌حل معادلات زمینه با شرط غلتش آرام پرداخته شده و پارامترها و معادلات موردنیاز محاسبه گردیده و نمودارهای مربوط برای هر مدل ترسیم شده‌اند.

۳- پس از مرور فیزیک حاکم بر تابش CMB و اختلالات کیهان‌شناسی و همچنین معرفی کدِ CAMB، که یکی از قویترین و سریع‌ترین کدهای کیهان‌شناختی می‌باشد، به‌محاسبه‌ی پارامترهای اختلالی برای پتانسیل‌های تورمی انتخابی، پرداخته شده است. سپس برای هر پتانسیل، نمودارهای طیفِ توانِ اختلالات را با دریافت خروجی مناسب از کد کَمب، رسم شده‌اند. این نمودارها، با طیفِ توان ناهمسانگردی‌هایِ CMB که با داده‌های ماهواره‌ی پلانک و مدل تطابقی ΛCDM ترسیم گردیده، مقایسه شده‌اند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ۱

فصل اول: تاریخچه‌ی کیهان‌شناسی و پیدایش نظریه‌ی انفجار بزرگ

الف- مقدمه ۵
ب- کیهان‌شناسی غیرنسبیتی(پیش‌نسبیتی) ۵
ج- آغاز کیهان‌شناسی نسبیتی(نوین) ۷
د- معادلات میدان در نسبیت عام ۹
ه - ثابت کیهان‌شناختی ۱۰
و- اصول و مفاهیم اولیه‌ی کیهان‌شناسی نسبیتی ۱۱
و-۱- اصل کیهان‌شناختی ۱۱
و-۲- انبساط عالم ۱۳
و-۳- کشف تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی ۱۷
ز- متریک فریدمن و سینماتیک آن ۱۹
ز-۱- معرفی متریک فریدمن ۱۹
ز-۲- انتقال به‌سرخ کیهان‌شناختی و قانون هابل ۲۱
ز-۳- تعاریف افق در کیهان‌شناسی ۲۳
ز-۳-۱- افق ذره ۲۳
ز-۳-۲- افق رویداد ۲۳
ز-۳-۳- دینامیک متریک فریدمن ۲۳
ح- تاریخچه‌ی گرمایی عالم ۲۶
ط- مدل تطابقی ΛCDM ۳۰

فصل دوم: مشکلات مدل استاندارد انفجار بزرگ و پیدایش نظریه‌ی تورمی

الف- مقدمه ۳۵
ب- مشکلات نظریه‌ی استاندارد مهبانگ ۳۵
ب-۱- مشکل افق (همگنی) ۳۶

ب-۲- مشکل تخت بودن ۳۸
ب-۳- مشکل تک‌قطبی مغناطیسی ۳۹
ج- کیهان‌شناسی تورمی ٤۰
ج-۱- مروری بر تاریخچه‌ی مدل‌های تورمی ٤۱
ج-۱-۱- مدل تورمی قدیم ٤۲
ج-۱-۲- مدل تورمی جدید ٤٤
ج-۱-۳- مدل تورمی آشوبناک ٤٦
ج-۲- حل مسائل کیهان‌شناسی استاندارد با تورم ٤٦
ج-۲-۱) شعاع هابل همراه ٤۷
ج-۲-۲) حل مسأله‌ی افق با تورم ٤۹
ج-۲-۳) حل مسأله‌ی تخت بودن با تورم ۵۰
ج-۲-٤) حل مسأله‌ی تک قطبی مغناطیسی با تورم ۵۰
د- دینامیک تورم ۵۰
د-۱- شرایط مورد نیاز برای تورم ۵۳
د-۲- فیزیک مدل‌های تورم ۵٤
د-۳- تورم غلتش آرام ۵۵
د-٤- تعداد ایتاها ۵۷
ه - تولید ماده پس از تورم: فرآیند بازگرمایش ۵۹
و- انواع مدل‌های تورمی ٦۰

فصل سوم: حل دقیق معادلات میدان بدون تقریب و ارائه‌ی مدل تورمی

الف- مقدمه ٦۳
ب- حل معادله‌های میدانِ اسکالرِ تورمی ٦٤
ج- ارائه‌ی یک مدل تورمی و حل مسائل تختی و افق ٦۷

فصل چهارم: بررسی برخی مدل‌های تورمی تک میدان با تقریب غلتش آرام

الف- مقدمه ۷۲
ب- انواع مدل‌های تورمی ۷۲
ب-۱- مدل‌های بزرگ- میدان ۷۲
ب-۲- مدل‌های کوچک- میدان ۷۳

ب-۳- مدل‌های تورمی هیبرید ۷٤
ب-٤- مدل‌های تورمی دوتایی ۷۵
ج- پتانسیل‌های تورمی‌زای بررسی شده ۷٦
ج-۱- بررسی پتانسیل تورمی‌زای تک جمله‌ای ۷۷
ج-۲- بررسی پتانسیل تورمی‌زای قانون توانی ۸۵
ج-۳- بررسی پتانسیل تورمی‌زای PNGB ۹۲
ج-٤- بررسی پتانسیل تورمی‌زای نمایی ۱۰۰
ج-۵- بررسی پتانسیل تورمی‌زای شکست تقارنی ۱۰۷

فصل پنجم: اختلالات کیهان‌شناسی و قیود مشاهداتی مدل‌های تورمی

الف- مقدمه ۱۱۵
ب- فیزیک تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی ۱۱٦
ب-۱- تابش جسم سیاه ۱۱٦
ب-۲- سطح آخرین پراکندگی (جدایی ماده از تابش) ۱۱۸
ب-۳- بررسی آماری ناهمسانگردی‌های تابش زمینه کیهانی و طیف توان ۱۱۹
ب-٤- قطبش تابش زمینه ۱۲۲
ب-۵- مشاهده‌پذیرها ۱۲۲
ب-٦- طیف توانی افت‌وخیزهای دمایی ناشی از مدلهای تورمی ۱۲۳
ج- اختلال‌های کیهان‌شناختی ۱۲٤
ج-۱- کلیات ۱۲٤
ج-۱-۱- اختلالات خطی ۱۲٤
ج-۱-۲- بردارها، اسکالرها و تانسورها ۱۲۵
ج-۲- اختلال‌های متریک در جهان ناهمگن ۱۲۵
ج-۳- منشأ کوانتومی ساختارهای کیهانی ۱۲٦
ج-۳-۱- افت‌وخیزهای کوانتومی ۱۲۷
ج-۳-۲- خروج و باز- ورود در افق ۱۲۷
ج-٤- طیف توانی افت‌وخیزهای اولیه ۱۲۸
ج-٤-۱- طیف توانی اختلالات انحنا (اسکالر) ۱۲۸
ج-٤-۲- طیف توانی اختلالات تانسوری ۱۳۰

ج-٤-٣- نسبت توانی تانسور به‌اسکالر ١٣١
ج-٤-٤- نتایج تقریب غلتش آرام برای پارامترهای اختلالی ١٣١
ج-٥- قیود مشاهداتی بر روی پارامترهای اختلالی ١٣٣
ج-٥-١- ماهواره‌ی پلانک و مشاهدات تابش زمینه‌ی کیهانی ١٣٣
ج-٥-٢- پلانک و کیهان‌شناسی تورمی ١٣٦
د- معرفیِ کدِ محاسبه‌یِ ناهمسانگردی‌هایِ تابش زمینه‌ی کیهانی ١٣٨
د-١- قسمت‌های مختلف کد کَمب ١٣٩
د-٢- اجرای برنامه و وارد کردن پارامترها ١٤٠
هـ- روش کار ١٤١
و- محاسبه‌ی کمیت‌های اختلالی برای پتانسیل‌ها ١٤٢
و-١- پتانسیل تورمی‌زای تک جمله‌ای ١٤٢
و-٢- پتانسیل تورمی‌زای قانون توانی ١٤٨
و-٣- پتانسیل تورمی‌زای PNGB ١٥٣
و-٤- پتانسیل تورمی‌زای نمایی ١٥٩
و-٥- پتانسیل تورمی‌زای شکست تقارنی ١٦٥
ز- اثر تغییرات r و n_t در حالت کلی برای طیف توان تابش زمینه ١٦٨

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری ١٧٢
پیشنهادات ١٧٥

پیوست و منابع

پیوست ١: راه‌های ایجاد ناهمسانگردی‌های تابش زمینه ١٧٧
منابع ١٨١
چکیده‌ی انگلیسی ١٨٦

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: ویژگی‌های جهان‌های باز، بسته و تخت ۲۵

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از حل معادلات FRW برای جهان تخت با غلبه‌ی ماده، تابش و ثابت کیهان‌شناختی..... ۲۶

جدول ۱-۳: خلاصه‌ای از تاریخچه‌ی گرمایی عالم..... ۳۰

جدول ۱-٤: پارامترهای به‌دست آمده از نتایج ۷ و ۹ ساله‌ی ماهواره‌ی WMAP و پلانک..... ۳۳

جدول ۵-۱: کمیت‌های اختلالی حاصل از نتایج ۵، ۷ و ۹ ساله‌ی ماهواره‌ی WMAP و پلانک ۱۳۸

جدول ۵-۲: پارامترهای اختلالی برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ ۱٤٤

جدول ۵-۳: پارامترهای اختلالی برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=\lambda\phi^p$..... ۱۵۰

جدول ۵-٤: پارامترهای اختلالی برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ ۱۵۵

جدول ۵-۵: پارامترهای اختلالی برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ ۱۶۱

جدول ۱-٦: پارامترهای اختلالی برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ ۱۶۷

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: انحنای فضا- زمان در حضور جاذبه ۸

شکل ۱-۲: طرح شماتیکی از انبساط عالم ۱٤

شکل ۱-۳: نمودار تطابق بسیار زیاد طیف تابش زمینه با طیف تابش جسم سیاه براساس داده‌های COBE..... ۱۸

شکل ۱-٤: مقایسه‌ی افت‌وخیزهای به‌دست آمده از ماهواره‌های COBE، WMAP و Plank ۱۸

شکل ۱-۵: نمودار تجزیه‌ی نیروها پس از انفجار بزرگ ۲۷

شکل ۱-٦: مقایسه‌ی توزیع چگالی در جهان قبل و بعد از پلانک..... ۳۲

شکل ۲-۱: مشکل افق در انفجار بزرگ سوزان..... ۳۷

شکل ۲-۲: نمودار شعاع جهان قابل مشاهده برحسب زمان از لحظه‌ی انفجار تا کنون با نظریه‌ی تورم ٤۰

شکل ۲-۳: تعداد مقالات منتشر شده از زمان پیدایش نظریه‌ی تورم که عنوان آن‌ها حاوی کلمه‌ی "تورم" و مشتقات آن می‌باشد..... ٤۱

شکل ۲-٤: سازوکار پتانسیل تورمی قدیم (گذار فاز با تونل‌زنی) ٤٤

شکل ۲-۵: سازوکار پتانسیل تورمی جدید (غلتش آرام و گذار با حالت گرمایی جدید) ٤۵

شکل ۲-٦: تورم آشوبناک ٤٦

شکل ۲-۷: تغییرات شعاع هابل همراه، $(aH)^{-1}$، در عالم تورمی..... ٤۹

شکل ۲-۸: راه حل ارائه شده توسط تورم برای حل مشکل افق..... ٤۹

شکل ۲-۹: شکل پتانسیل میدان نرده‌ای ϕ، مناسب برای مدل تورمی جدید..... ۵۱

شکل ۲-۱۰: آزمایشی نظری برای محاسبه فشار خلأ کاذب ۵۳

شکل ۲-۱۱: نمونه‌ای از یک پتانسیل تورمی..... ٦۰

شکل ٤-۱: رفتار عمومی مدل‌های تورمی بزرگ- میدان ۷۳

شکل ٤-۲: رفتار عمومی مدل‌های تورمی کوچک- میدان..... ۷٤

شکل ٤-۳: رفتار عمومی مدل‌های تورمی هیبرید..... ۷۵

شکل ٤-٤: نمودار پتانسیل تورم‌زای تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $m\sim 10^{-6}m_{pl}$ ۷۸

شکل ٤-۵: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $m\simeq 10^{-6}m_{pl}$ ... ۷۹

شکل ٤-٦: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $m\simeq 10^{-6}m_{pl}$ ۷۹

شکل ٤-۷: دینامیک پارامتر هابل برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $m\simeq 10^{-6}m_{pl}$ ۸۰

شکل ٤-٨: تغییرات پارامترهای غلتش‌آرام $|\eta|$، ε برحسب زمان برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $m\simeq 10^{-6}m_{pl}$ ٨١

شکل ٤-٩: دینامیک عامل مقیاس برحسب زمان برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ به‌ازای $a=1$ و $m\simeq 10^{-6}m_{pl}$ ٨٢

شکل ٤-١٠: تحول زمانی تعداد ایتاها برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ ٨٣

شکل ٤-١١: دینامیک میدان تورمی‌زا برحسب تعداد ایتاها برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ ٨٤

شکل ٤-١٢: دینامیک مشتق دوم زمانی عامل مقیاس به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\frac{1}{2}m^2\phi^2$ ..٨٥

شکل ٤-١٣: نمودار پتانسیل تورم‌زای تک جمله‌ای قانون توانی $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ ٨٦

شکل ٤-١٤: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ و $p=4$ ٨٧

شکل ٤-١٥: دینامیک پارامتر هابل برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ و $p=4$ ٨٧

شکل ٤-١٦: تغییرات پارامترهای غلتش‌آرام $|\eta|$، ε برحسب زمان برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ و $p=4$ ٨٨

شکل ٤-١٧: دینامیک عامل مقیاس برحسب زمان به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ و $p=4$ ٨٩

شکل ٤-١٨: تحول زمانی تعداد ایتاها برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $p=4$ ٩٠

شکل ٤-١٩: دینامیک میدان تورم‌زا برحسب تعداد ایتاها برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $p=4$.
..... ٩١

شکل ٤-٢٠: دینامیک مشتق دوم زمانی عامل مقیاس به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل تک جمله‌ای $V(\phi)=\lambda\phi^p$ به‌ازای $\lambda=2\times10^{-14}$ و $p=4$ ٩١

شکل ٤-٢١: نمودار پتانسیل تورم‌زای PNGB، $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ و $f\sim m_{pl}$ ٩٣

شکل ٤-٢٢: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٤

شکل ٤-٢٣: دینامیک پارامتر هابل برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٥

شکل ٤-٢٤: تغییرات پارامترهای غلتش‌آرام $|\eta|$، ε برحسب زمان برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٦

شکل ٤-٢٥: دینامیک عامل مقیاس برحسب زمان به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٧

شکل ٤-٢٦: تحول زمانی تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ .. ٩٨

شکل ٤-٢٧: دینامیک میدان تورم‌زا برحسب تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٩

شکل ٤-٢٨: دینامیک مشتق دوم زمانی عامل مقیاس به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ به‌ازای $f\sim m_{pl}$ و $m\simeq 10^{-3}m_{pl}$ ٩٩

شکل ٤-٢٩: نمودار پتانسیل تورم‌زای $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\sim 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=1,\sqrt{2}$ ١٠٠

شکل ٤-٣٠: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠١

شکل ٤-٣١: دینامیک پارامتر هابل برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠٢

شکل ٤-٣٢: تغییرات پارامتر غلتش‌آرام ε برحسب زمان برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠٣

شکل ٤-٣٣: تغییرات پارامتر غلتش‌آرام $|\eta|$ برحسب زمان برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠٣

شکل ٤-٣٤: دینامیک عامل مقیاس برحسب زمان به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠٤

شکل ٤-٣٥: تحول زمانی تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $q=\sqrt{2}$ ١٠٥

شکل ٤-٣٦: دینامیک میدان تورم‌زا برحسب تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $q=\sqrt{2}$.
١٠٦

شکل ٤-٣٧: دینامیک مشتق دوم زمانی عامل مقیاس به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ به‌ازای $q=\sqrt{2}$ و $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$
١٠٦

شکل ٤-٣٨: نمودار پتانسیل تورم‌زای $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١٠٨

شکل ٤-٣٩: دینامیک زمینه‌ی میدان تورم‌زا برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١٠٩

شکل ٤-٤٠: دینامیک پارامتر هابل برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١٠٩

شکل ٤-٤١: تغییرات پارامترهای غلتش‌آرام $|\eta|$، ε برحسب زمان برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $\mu\sim m_{pl}$
١١٠

شکل ٤-٤٢: دینامیک عامل مقیاس برحسب زمان با $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $\mu\sim m_{pl}$
١١١

شکل ٤-٤٣: تحول زمانی تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١١٢

شکل ٤-٤٤: دینامیک میدان تورم‌زا برحسب تعداد ایتاها برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١١٢

شکل ٤-٤٥: دینامیک مشتق دوم زمانی عامل مقیاس به‌ازای $a=1$ برای پتانسیل $V(\phi)=V_0\left(1-\frac{\phi^2}{\mu^2}\right)$ به‌ازای $V_0\simeq 10^{-12}m_{pl}^4$ و $\mu\sim m_{pl}$
١١٣

شکل ٥-١: افت‌وخیزهای دمایی CMB
١١٨

شکل ٥-٢: سطح آخرین پراکندگی
١١٩

شکل ٥-٣: تصویر کلیِ توابع طیف توانی تابش زمینه‌ی ریزموج کیهانی، طبق پیش‌بینی نظریه‌های تورمی
١٢٤

شکل ٥-٤: قیود روی مدل‌های تورمی تک میدان در صفحه‌ی n_S-r با داده‌های WMAP
١٣١

شکل ٥-٥: تصویری از تمام آسمان که توسط ماهواره‌ی پلانک گرفته شده است
١٣٤

شکل ۵-٦: طیف توان زاویه‌ای ناهمسانگردی‌های دمایی تابش زمینه‌ی کیهانی (C_l^{TT}) که به‌وسیله‌ی داده‌های ماهواره ی پلانک ترسیم شده است ۱۳۵
شکل ۵-۷: قیود روی مدل‌های تورمی تک میدان در صفحه‌ی $n_S - r$ با داده‌های پلانک ۱۳۷
شکل ۵-۸: طیف توان CMB ۱٤۱
شکل ۵-۹: نمودار تأثیر همزمان دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ ۱٤۵
شکل ۵-۱۰: نمودار تأثیر تغییرات دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر با ثابت نگه‌داشتن اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ ۱٤۵
شکل ۵-۱۱: نمودار تأثیر تغییرات اندیس طیفی اسکالر با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ ۱٤٦
شکل ۵-۱۲: نمودار تأثیر دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر با در نظرگرفتن اختلالات تانسوری، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \frac{1}{2} m^2 \phi^2$ ۱٤٦
شکل ۵-۱۳: نمودار تأثیر همزمان دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \lambda \phi^p$ ۱۵۱
شکل ۵-۱٤: نمودار تأثیر تغییرات دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر با ثابت نگه‌داشتن اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \lambda \phi^p$ ۱۵۱
شکل ۵-۱۵: نمودار تأثیر تغییرات اندیس طیفی اسکالر با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \lambda \phi^p$ ۱۵۲
شکل ۵-۱٦: نمودار تأثیر دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر با در نظرگرفتن اختلالات تانسوری، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = \lambda \phi^p$ ۱۵۲
شکل ۵-۱۷: نمودار تأثیر همزمان دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = m^4 \left[1 + \cos(\frac{\phi}{f}) \right]$ ۱۵٦
شکل ۵-۱۸: نمودار تأثیر تغییرات دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر با ثابت نگه‌داشتن اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = m^4 \left[1 + \cos(\frac{\phi}{f}) \right]$ ۱۵۷
شکل ۵-۱۹: نمودار تأثیر تغییرات اندیس طیفی اسکالر با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = m^4 \left[1 + \cos(\frac{\phi}{f}) \right]$ ۱۵۷

شکل ۵-۲۰: نمودار تأثیر دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر با در نظرگرفتن اختلالات تانسوری، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi) = m^4\left[1+\cos(\frac{\phi}{f})\right]$ ۱۵۸

شکل ۵-۲۱: نمودار تأثیر همزمان دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ ۱۶۲

شکل ۵-۲۲: نمودار تأثیر تغییرات دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر با ثابت نگه‌داشتن اندیس طیفی اسکالر بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ ۱۶۳

شکل ۵-۲۳: تأثیر تغییرات اندیس طیفی اسکالر با ثابت نگه‌داشتن دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر بر روی طیف ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورم‌زای $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ ۱۶۳

شکل ۵-۲۴: نمودار تأثیر دامنه‌ی طیف توانی اختلالات اسکالر و اندیس طیفی اسکالر با در نظرگرفتن اختلالات تانسوری، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه برای پتانسیل تورمی $V(\phi)=V_0\left(1-e^{-\frac{q}{M_{pl}}\phi}\right)$ ۱۶۴

شکل ۵-۲۵: نمودار تأثیر تغییرات نسبت تانسور به‌اسکالر بدون درنظر گرفتن اختلالات تانسوری، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه‌ی کیهانی ۱۶۹

شکل ۵-۲۶: نمودار تأثیر تغییرات اندیس طیفی تانسوری بدون درنظر گرفتن اختلالات اسکالر، بر روی طیف توان ناهمسانگردی‌های تابش زمینه‌ی کیهانی ۱۶۹

پیشگفتار

شناخته‌ها محدودند، ناشناخته‌ها نامحدود. ما از نظر دانش و آگاهی، گویی در جزیره‌ای بسیار کوچک قرار گرفته‌ایم که در میان اُقیانوسی بیکران از ناشناخته‌ها وجود دارد. کار ما، در هر نسل، این است که ذره‌ی بیش‌تری از سرزمین شناخته شده را مدعی باشیم.

میلیاردها سال پیش پدیده‌ی انفجار بزرگ اتفاق افتاد، واقعه‌ای که جهان ما با آن آغاز شد. این‌که چرا این واقعه رخ داد، بزرگ‌ترین رازی است که ما نمی‌دانیم، ولی این‌که این واقعه رخ داده، برای ما واضح و روشن است. شما نمی‌توانید امروزِ جهان را بدون درک "انفجار بزرگ" بشناسید. نظریه‌ی انفجار بزرگ، یکی از مستدل‌ترین، مهم‌ترین و باشکوه‌ترین موفقیت‌های علمی قرن بیستم می‌باشد، زیرا این نظریه توانایی پیش‌گویی و پیش‌بینی دارد.

برای بررسی ریشه‌های کیهان‌شناسی نوین باید به‌اوایل قرن بیستم بازگشت، یعنی زمانی‌که انیشتین نظریه‌ی نسبیت عام خود را به‌صورت رسمی در سال ۱۹۱۵ منتشر کرد. نظریه‌ی نسبیت انیشتین بی‌گمان، بزرگ‌ترین موفقیت استنتاجی اندیشه‌ی بشر از آغاز تا کنون است که بیان می‌کرد هندسه‌ی عالم با توزیع ماده‌ی درون عالم، مشخص می‌شود. در سال ۱۹۲۲ فریدمن جواب کیهان‌شناسی معادلات انیشتین را بر پایه‌ی یک عالم همگن و همسانگرد به‌دست آورد که بعدها به‌متریک FRW معروف شد. این متریک نشان می‌داد که برخلاف تصور معمولِ آن زمان، عالم در حال انبساط است. در سال ۱۹۲۹ با تأیید تجربی انبساط عالم توسط مشاهدات هابل، متریک فریدمن به‌ابزارِ اصلیِ نظریه‌های کیهان‌شناسی تبدیل شد. در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰، جرج گاموف و شاگردانش پیش‌بینی کردند که جهان امروز باید از تابش جسم سیاه پر شده باشد، ولی مشاهده‌ی تجربی این پدیده در سال ۱۹۶۵ انجام گرفت. در دهه‌ی ۱۹۷۰ مشخص شد این تابش که تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی (CMB) نام گرفت، به‌لحاظ توزیع فرکانسی دارای طیف تابش جسم سیاه می‌باشد. سرانجام جامعه‌ی علمی قانع شد که این تابش باقی‌مانده‌ای از انفجار بزرگ است. بدین

ترتیب مدل مهبانگ به‌عنوان مدل استاندارد انفجار بزرگ سوزان پذیرفته شد. با کشف ویژگی همگنی و همسانگردی تابش زمینه‌ی کیهانی، مشکلاتی چون تخت بودن امروز عالم، همگن بودن تابش زمینه (مشکل افق)، مشکل تک‌قطبی، تشکیل ساختارها و نیز منشأ افت‌وخیزهای این تابش مطرح شدند که کیهان‌شناسی استاندارد پاسخی قانع‌کننده برای این مشکلات ارائه نمی‌داد.

کیهان‌شناسی تورمی اولین بار به‌عنوان مدلی برای حل مشکلات نظریه‌ی استاندارد انفجار بزرگ ارائه شد. در این الگو فرض می‌شود که ماده‌ی غالب جهان در لحظات بسیار اولیه پس از انفجار، یک میدان اسکالر است که میدان اینفلیتون یا میدان تورمی‌زا نامیده می‌شود. وجود این میدان باعث می‌شود که انبساط عالم دارای شتابی مثبت باشد و بدین ترتیب در بازه‌ی بسیار کوچکی از زمان، شعاع عالم به‌مقدار زیادی رشد می‌کند. یکی از مسائل اساسی در کیهان‌شناسی نوین، منشأ افت‌وخیزهای اولیه‌ی میدان تورمی‌زا در طول این دوره، به‌عنوان هسته‌های اولیه‌ی تشکیل ساختارها می‌باشد که این الگوی تورمی دارای پیش‌بینی‌هایی برای توزیع ناهمسانگردی‌ها و اختلالات مشاهده شده در عالم می‌باشد. در واقع ساختارهای بزرگ مقیاسی که در جهان امروزین مشاهده می‌شوند، از افت‌وخیزهای کوانتومی یک میدان اسکالر در طی دوران تورمی در جهان آغازین ناشی شده‌اند. اختلال‌های نخستین که در طی دوره‌ی تورم ایجاد شده‌اند، اثرشان روی توزیع ماده و تابش کاملاً مشهود می‌باشد. یکی از مهم‌ترین نتایج مدل‌های تورمی این است که وجود طیف‌هایی برای اختلالات اسکالر و اختلالات تانسوری که به‌ترتیب مسئول ایجاد ناهمگنی چگالی و امواج گرانشی هستند، پیش‌بینی می‌کنند. به‌عبارتی دیگر، این افت‌وخیزها منبع تولید اختلالات اولیه‌ی اسکالری و تانسوری هستند. اختلال‌های نخستین که در طی تورم ایجاد شده‌اند، اثرشان را روی طیف توان CMB نشان می‌دهند و قیود قابل مشاهده‌ای را روی این طیف ایجاد می‌کنند. اثرات این اختلالات را می‌توان با محاسبه‌یِ پارامترهایِ اختلالیِ مدل‌هایِ تورمی روی طیف توان CMB، مشاهده کرد.

در این پژوهش مطالب به‌شرح زیر ارائه می‌شوند:

در ابتدا به‌مرور نسبیت عام انیشتین و تاریخچه‌ی کیهان‌شناسی نظریه‌ی استاندارد انفجار بزرگ پرداخته می‌شود. سپس مهم‌ترین مشکلات این نظریه، انگیزش ارائه‌ی مدلی تورمی، چگونگی حل این مشکلات در چارچوب مدل‌های تورم و دینامیک میدان تورمی‌زا شرح داده خواهند شد. در فصل سوم معادلات میدان را به‌طور مستقیم و بدون تقریب حل کرده و یک مدل تورمی که قادر به‌حل مشکلات تختی و افق می‌باشد، ارائه داده می‌شود. آنگاه در فصل چهارم به‌معرفی انواع مدل‌های تورمی و بررسی ۵ نوع از پتانسیل‌های تورمی که از دسته‌ی مدل‌های تک میدان می‌باشند، پرداخته می‌شود. سپس به‌حل معادلات زمینه با شرط غلتش آرام پرداخته و پارامترها و معادلات موردنیاز محاسبه و نمودارهای مربوط برای هر مدل ترسیم خواهند شد. در فصل پنجم پس از مرور فیزیک حاکم بر تابش CMB و اختلالات کیهان‌شناسی و همچنین معرفی کدِ CAMB، که یکی از قوی‌ترین و سریع‌ترین کدهای کیهان‌شناختی می‌باشد، به‌محاسبه‌ی پارامترهای اختلالی برای پتانسیل‌های تورمی انتخابی، پرداخته می‌شود و برای هر پتانسیل، نمودارهای طیفِ توانِ اختلالات را با دریافت خروجی مناسب از کد کَمب، رسم کرده و با طیفِ توان ناهمسانگردی‌هایِ CMB که با داده‌های ماهواره‌ی پلانک و مدل تطابقی ΛCDM ترسیم نموده، مقایسه می‌شوند. در نهایت نتایج به‌دست آمده، پیشنهادات و هم‌چنین منابع آورده شده است.

فصل اول

تاریخچه‌ی کیهان‌شناسی و پیدایش نظریه‌ی انفجار بزرگ