بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

عنوان:

بررسی مدل های انرژی تاریک ایجگرافیک در گرانش انشتینی

پژوهشگر:

زهره آذرمی

استاد راهنما:

دکتر کیومرث کرمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری

25 **آبان ماه** 1389

دانشگاه کردستان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش نظری

عنوان:

بررسی مدل های انرژی تاریک ایجگرافیک در گرانش انشتینی

پژوهشگر:

زهره آذرمی

در تاریخ ۲۵ / ۸ / ۱۳۸۹ توسط کمیته تخصصی وهیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با نمره ۲۰ و درجه عالی به تصویب رسید.

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱ـ استاد راهنما	دکتر کیومرث کرمی	دانشیار	
۲ـ استاد داور خارجی	دکتر محمد ملک جانی	استادیار	
۳ـ استاد داور داخلی	دکتر خالد سعیدی	دانشیار	

مهر و امضاء گروه

دانشکده

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

مهر و امضاء معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشگاه کردستان
دانشکده علوم پایه
معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی

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 زهره آذرمی 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

زهره آذرمی

۱۳۸۹/۸/۲۵

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

باسپاس از الطاف ایزد منان

و با قدرانی از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر کیومرث کرمی که با راهنمایی های ارزنده و صبوری ایشان این رساله به اتمام رسید. از خداوند متعال سلامتی و توفیق روز افزون در عرصه علم و دانش را برای ایشان خواستارم .

از خانواده عزیزم که همیشه راهنما، حامی و مشوق من بوده اند ، سپاسگزارم .

همچنین از تمام دوستان عزیزی که در این راه مرا یاری نمودند کمال تشکر را دارم .

چکیده

در این رساله مدل های انرژی تاریک ایجگرافیک را برای توجیه انبساط شتابدار کیهان بررسی می کنیم . پارامترهای معادله حالت و شتاب، معادله تحول و سرعت مربعی صوت را برای مدل های انرژی تاریک ایجگرافیک و ایجگرافیک جدید در کیهان شناسی استاندارد با گرانش انشتینی، استخراج نموده و این مدل ها به ازای پارامترهای مشاهداتی در حالت های برهم کنشی و غیربرهم کنشی، مطالعه می شوند. سپس نشان داده می شود که مدل های انرژی تاریک ایجگرافیک ناپایداری کلاسیکی دارند و همچنین مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید می تواند مسأله انطباق کیهانی را حل کند. در ادامه مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید را با در نظر گرفتن تصحیحات کوانتومی (آنتروپی) در گرانش برانز- دیکی مطالعه می کنیم و پارامتر معادله حالت دینامیکی و پارامتر شتاب را به دست می آوریم و نشان داده خواهد شد وقتی انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی- تصحیح یافته برهم کنشی با میدان برانز دیکی ترکیب می شود گذار فانتومی در مقایسه با گرانش انشتینی آسان تر حاصل می شود. در نهایت مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی- تصحیح یافته وشکسان برهم کنشی با ثابت گرانشی متغیر G در کیهان شناسی FRW تعدیل یافته را بررسی خواهیم نمود.

کلید واژه ها : انبساط شتابدار کیهان، انرژی تاریک، مدل انرژی تاریک ایجگرافیک ، مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید

فهرست

مقدمه . . . . . پنج

۱ کیهان شناسی استاندارد

۱—۱ پیدایش و تحول عالم ۱

۱—۲ انبساط عالم ۲

۱—۳ معادله انشتین ۳

۱—۴ معادلات فریدمان ۴

۱—۴—۱ تحول عالم ماده— غالب ٦

۱—۴—۲ تحول عالم تابش— غالب ۷

۱—۵ هندسه عالم ۸

۱—۵—۱ هندسه تخت $(k = 0)$ ۸

۱—۵—۲ هندسه کروی $(k = +1)$ ۹

۱—۵—۳ هندسه هذلولوی $(k=-1)$ ۹
۱—٦ افق های کیهانی ۱۰
۱—٦—۱ افق ذره ۱۰
۱—٦—۲ افق رویداد ۱۱
۱—٦—۳ افق ظاهری ۱۱

۲ انرژی تاریک

۲—۱ ذرات موجود در کیهان ۱۲
۲—۱—۱ باریون‌ها ۱۲
۲—۱—۲ تابش ۱۳
۲—۱—۳ نوترینوها ۱۳
۲—۱—۴ ماده تاریک ۱۴
۲—۱—۵ انرژی تاریک ۱٦
۲—۲ پارامترهای مشاهده‌پذیر ۱۷
۲—۲—۱ ثابت هابل ۱۷
۲—۲—۲ پارامتر چگالی ۱۸
۲—۲—۳ پارامتر کندشوندگی ۲۰
۲—۲—۴ ثابت کیهان‌شناسی ۲۱
۲—۲—۵ مشکل تنظیم ظریف ۲۳
۲—۲—٦ مشکل انطباق کیهانی ۲۴

۳ مدل‌های انرژی تاریک ایجگرافیک

۳–۱ مقدمه ۲۵

۳–۲ افت و خیزهای کوانتومی فضا– زمان ۲۶

۳–۳ مدل انرژی تاریک ایجگرافیک ۲۹

۳–۳–۱ مدل ایجگرافیک برهم‌کنشی ۳۵

۳–۳–۲ ناپایداری مدل ایجگرافیک ۴۲

۳–۴ مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید ۴۷

۳–۴–۱ مدل ایجگرافیک جدید برهم‌کنشی ۵۱

۳–۴–۲ ناپایداری مدل ایجگرافیک جدید ۵۳

۳–۴–۳ حل مسأله انطباق در مدل ایجگرافیک جدید ۵۷

۴ مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی– تصحیح‌یافته در نظریه برانز–دیکی

۴–۱ مقدمه ۶۰

۴–۲ مدل ایجگرافیک جدید آنتروپی– تصحیح‌یافته در نظریه برانز–دیکی ۶۳

۴–۳ مدل ایجگرافیک جدید آنتروپی– تصحیح‌یافته غیربرهم‌کنشی ۶۶

۴–۴ مدل ایجگرافیک جدید آنتروپی–تصحیح‌یافته برهم‌کنشی ۶۸

۴–۵ حل مسأله انطباق کیهانی ۷۱

۵ مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی– تصحیح‌یافته وشکسان برهم‌کنشی با ثابت گرانشی G متغیر در کیهان‌شناسی FRW تعدیل یافته

۵–۱ مدل ایجگرافیک جدید آنتروپی– تصحیح‌یافته با G متغیر ۷۳

۵–۲ مدل ایجگرافیک جدید آنتروپی–تصحیح‌یافته وشکسان برهم‌کنشی . . ۷۵

٦ جمع‌بندی و نتایج

٦–۱ نتایج ۷۹

مراجع ۸۴

مقدمه

مشاهدات کیهان‌شناسی نشان می‌دهد که در حال حاضر جهان در یک فاز انبساط شتابدار قرار دارد. یک انرژی ناشناخته و غیرمتعارف تحت عنوان انرژی تاریک[۱]، که دارای فشار منفی است، به عنوان عامل این انبساط شتابدار معرفی می‌شود. انرژی تاریک یک معمای مهم در کیهان‌شناسی مدرن به شمار می‌رود از این‌رو تحقیق در مورد ماهیت آن از مباحث گسترده کیهان‌شناسی محسوب می‌شود. مشاهدات اخیر حاکی از آن است نزدیک به هفتاد درصد جهان ما از انرژی تاریک تشکیل شده است و این در حالی است که هنوز ماهیت آن برای فیزیکدانان ناشناخته و به صورت نظری است[۱]. به همین منظور کاندیداهای مختلفی برای توصیف انرژی تاریک پیشنهاد شده است. اولین کاندیدای مطرح شده برای انرژی تاریک، ثابت کیهان‌شناسی[۲]، Λ، نام دارد که دارای پارامتر معادله حالت ثابت $(\omega = -1)$ می‌باشد. مشاهدات رصدی اخیر نشان می‌دهند که پارامتر معادله حالت (انرژی تاریک) در گذشته نزدیک به آرامی از مقدار منفی یک عبور کرده و به مقدار $(\omega < -1)$ تقلیل پیدا کرده است. به گذار از این مقدار برای پارامتر معادله حالت گذار از مرز فانتوم گفته می‌شود. از آنجایی که برای داشتن انبساط شتابدار جهان باید شرط $(\omega < -1/3)$ برای پارامتر معادله حالت برقرار باشد، بنابراین گذار فانتومی، مثبت بودن شتاب جهان را تایید می‌کند[۲]. ثابت کیهان‌شناسی با مشکلاتی نظیر مسأله‌ی تنظیم ظریف و مسأله‌ی انطباق کیهانی روبه‌رو است. همچنین از آن جایی که لازمه داشتن گذار فانتومی، دینامیکی بودن پارامتر معادله حالت است، بنابراین نظریه‌های جایگزین متفاوتی برای توصیف دینامیک سناریوی انرژی تاریک پیشنهاد شده است[۲] که در زیر به نمونه‌هایی از آن‌ها اشاره می‌شود:

۱) مدل‌های میدان اسکالر انرژی تاریک شامل کوینتسنس[۳][۳]، فانتوم[۴][۴]،

---

[۱] dark energy

[۲] cosmological constant

[۳] quintessence

[۴] phantom

کی—اسنس[۵] [۵و۶]، کوینتوم[۶] [۷]، دیلیتون [۷] [۶و۸] میدان تاخیون[۸] [۶و۹] و مدل‌های دیگر.
۲) مدل‌های شناخته شده‌ی انرژی تاریک شامل انرژی تاریک هولوگرافیک[۹] [۱۰و۱۱]، ایجگرافیک[۱۰] [۶و۱۵—۱۲] گاز چاپلین[۱۱] [۱۸—۱۶] و سایر مدل‌ها.

در این پایان نامه به بررسی مدل‌های انرژی تاریک ایجگرافیک برای توجیه انبساط شتابدار جهان می‌پردازیم.

در فصل اول مختصری در مورد مدل کیهان شناسی استاندارد و معادلات تحول کیهانی توضیح خواهیم داد. در فصل دوم به معرفی انرژی تاریک و ماده تاریک می‌پردازیم. در فصل سوم مدل‌های انرژی تاریک ایجگرافیک و انرژی تاریک ایجگرافیک جدید را معرفی خواهیم کرد و تحول این مدل‌ها را به ازای پارامترهای مشاهداتی تفسیر کرده و همچنین در مورد گذار فانتومی و ناپایداری کلاسیکی و مسأله انطباق کیهانی در این مدل‌ها توضیح خواهیم داد. در فصل چهارم به مطالعه‌ی مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی تصحیح— یافته در گرانش برانز— دیکی می‌پردازیم و در فصل پنجم مدل انرژی تاریک ایجگرافیک جدید آنتروپی تصحیح— یافته وشکسان را با در نظر گرفتن ثابت گرانشی متغیر در عالم FRW تعدیل یافته بررسی خواهیم کرد. در نهایت در فصل ششم نتیجه‌گیری و جمع‌بندی از مباحث فوق را به عمل خواهیم آورد.

قراردادها:

- علامت متریک در فصل ۴ به صورت $(-، -، -، +)$ و در دیگر فصل‌ها به صورت $(+، +، +، -)$ می‌باشد.
- روابط در دستگاه واحدهای طبیعی $(\hbar = c = k_B = 1)$ نوشته شده‌اند.
- جرم پلانک: $M_p = G^{-1/2} = 1.22 \times 10^{19} \ \ GeV$ (G ثابت گرانشی نیوتن است)
- جرم کاهش یافته پلانک: $m_p = (8\pi G)^{-1/2} = 2.44 \times 10^{18} \ \ GeV$

---

[۵] K-essence
[۶] quintom
[۷] dilaton
[۸] tachyon field
[۹] holographic
[۱۰] agegraphic
[۱۱] Chaplygin gas

فصل اول

کیهان شناسی استاندارد

۱–۱ پیدایش و تحول عالم

انقلاب کوپرنیکی[۱] دیدگاه قدیم کیهان‌شناسی زمین مرکزی را تغییر داد. امروزه با توجه به مشاهدات نجومی و بررسی کهکشان‌های دور دست، نه کهکشان ما و نه هیچ جسم کیهانی دیگر نمی‌تواند به عنوان مرکز عالم در نظر گرفته شود. اساس کیهان‌شناسی مدرن بر پایه این اعتقاد است که نه تنها مکانی که ما در عالم اشغال کرده‌ایم بلکه هیچ نقطه‌ای در عالم خاص نیست و به بیان دیگر عالم در مقیاس‌های بزرگ (10^8 پارسک[۲]) همگن و همسانگرد است. این خاصیت به اصل کیهان شناسی معروف است[۱۹].

[۱] Copernican

[۲] $1parsec \approx 3.086 \times 10^{16} m \approx 3.262\ light - year$

یکی از نظریه‌های متداول برای توصیف پیدایش و تحول عالم نظریه انفجار بزرگ داغ [۳] است که در حال حاضر بیش از سایر موارد مورد قبول کیهان‌شناسان است. اساس این نظریه بر پایه اصل کیهان‌شناسی است. مدل استاندارد کیهان‌شناسی، مدل انفجار بزرگ داغ است که بیان می‌کند عمر جهان محدود و از مرتبه ۱۳ تا ۱۴ میلیارد سال است. بر اساس این مدل عالم در ابتدا گوی آتشینی از گازهای بی نهایت سوزان و چگال بوده است به عبارتی عالم از یک تکینگی بسیار داغ شروع شده است که پس از سپری شدن کسر بسیار کوچکی از ثانیه، این گوی آتشین منفجر شده است. به علت وجود شدت گرمایی که باعث گسیختگی سریع حتی پروتون‌ها و نوترون‌ها به کوارک‌ها می‌شود، هیچ حالت مقیدی نمی‌توانسته است وجود داشته باشد. سپس با انبساط و سرد شدن جهان، تشکیل ساختارها ممکن می‌شود و پروتون‌ها، نوترون‌ها، هسته، اتم‌ها، مولکول‌ها، ابرها، ستارگان و ...تشکیل می‌شوند[۱۹].

مشاهداتی که مدل انفجار بزرگ را تایید می‌کنند متعدد هستند، مهمترین آن ها انبساط عالم، تابش زمینه میکروموج کیهانی و فراوانی عناصر سبک در عالم است[۱۹].

۱—۲ انبساط عالم

بنیادی‌ترین جنبه کیهان‌شناسی استاندارد، انبساط عالم است. این مفهوم بیان می‌کند که کهکشان‌ها نه تنها از کهکشان ما دور می‌شوند بلکه هر کهکشانی از کهکشان دیگر دور می‌شود این افزایش فاصله کهکشان‌ها معلول این است که تمام عالم در حال انبساط است.

مشاهدات نشان می‌دهد که اجرام فیزیکی انتقال به سرخی [۴] دارند که متناسب با فاصله‌شان است چون انتقال به سرخ با فاصله افزایش می‌یابد می‌توان نتیجه گرفت سرعت دور شدن با فاصله زیاد می‌شود. انبساط عالم اولین بار در سال ۱۹۲۹ توسط هابل[۵] مشاهده شد. قانون

[۳] hot big bang

[۴] red shift

[۵] Hubble

هابل از رابطه

$$\vec{v} = H_0 \vec{r} \qquad (۱.۱)$$

پیروی می کند. در این معادله $\vec{v}$ سرعت شعاعی، $\vec{r}$ فاصله فیزیکی و H_0 ثابت هابل است. قانون هابل برای کهکشان‌های نزدیک که اصل کیهان‌شناسی برای آن‌ها برقرار نیست، معتبر نمی‌باشد. همچنین ممکن است که رابطه سرعت— فاصله در فواصل بزرگ از این رفتار خطی منحرف شود[۱۹].

۱—۳ معادله انشتین

در زمینه اختر فیزیک نوین و کیهان‌شناسی موضوعات فراوانی وجود دارد که تنها در قالب نظریه نسبیت عام انشتین توضیح درست و مناسبی دارند. در سال ۱۹۱۵ معادلات نظریه نسبیت عام انشتین به صورت یک معادله تانسوری تحت عنوان معادلات میدان انشتین منتشر شدند. معادله میدان انشتین به صورت

$$G^{\mu}_{\nu} = R^{\mu}_{\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu}_{\nu} R = 8\pi G T^{\mu}_{\nu} \qquad (۱.۲)$$

است. R^{μ}_{ν} تانسور ریچی، R اسکالر خمش، g^{μ}_{ν} تانسور متریک، T^{μ}_{ν} تانسور انرژی— تکانه و G ثابت گرانشی می‌باشد. این معادلات به طور موفقیت‌آمیزی چگونگی تاثیر ماده بر هندسه فضا— زمان را توصیف می‌کنند.

یکی از نتایج مهمی که از معادلات میدان انشتین به دست می آید پایستگی موضعی تانسور انرژی— تکانه است. این مطلب با استفاده از اتحاد بیانکی[۶] ($G^{\mu\nu}{}_{;\nu} \equiv 0$) و معادله (۱.۲) به صورت زیر حاصل می شود

$$T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0 \qquad (۱.۳)$$

[۶] Bianchi identities

دینامیک عالم با استفاده از معادله میدان انشتین که یک معادله غیرخطی و پیچیده است توصیف می‌شود[۲].

۱—۴ معادلات فریدمان

متریک فریدمان— رابرتسون— واکر[۷] (FRW) عمومی‌ترین متریکی است که جهان همگن و همسانگرد را توصیف می‌کند. بنابراین جهت بررسی دینامیک عالم می‌توان متریک FRW را در نظر گرفت که این متریک به صورت زیر است

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)\Big[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 sin^2(\theta) d\phi^2\Big] \qquad (۱.۴)$$

که در آن $a(t)$ ضریب مقیاس کیهان[۸] نامیده می‌شود که در متریک فریدمان— رابرتسون— واکر (FRW) دینامیک عالم را نشان می‌دهد، k یک عدد صحیح است که هندسه فضایی عالم را توصیف می‌کند، که برای عالم بسته، تخت و باز به ترتیب عبارت از $-1, 0, +1$ می‌باشد. t زمان کیهانی و (r, θ, ϕ) مختصات کروی در دستگاه همراه است.
با استفاده از معادلات میدان انشتین و متریک فریدمان— رابرتسون— واکر (FRW) مولفه‌های تانسور ریچی و اسکالر ریچی به صورت زیر حاصل می‌شوند

$$R_0^0 = \frac{3\ddot{a}}{a} \qquad (۱.۵)$$

$$R_j^i = \Big(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{2\dot{a}^2}{a^2} + \frac{2k}{a^2}\Big)\delta_j^i \qquad (۱.۶)$$

$$R = 6\Big(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{2\dot{a}^2}{a^2} + \frac{k}{a^2}\Big) \qquad (۱.۷)$$

[۷] Friedmann- Robertson- Walker

[۸] scale factor

که در آن $\dot{a} = da/dt$ آهنگ انبساط عالم و $\ddot{a}$ شتاب انبساط عالم را نشان می‌دهد[۲].
اگر ماده موجود در عالم به صورت سیال کامل در نظر گرفته شود، تانسور انرژی— تکانه این سیال کامل در سیستم مختصاتی که با سیال حرکت می‌کند به صورت

$$T^{\mu}_{\nu} = Diag(-\rho, p, p, p) \qquad (۱.۸)$$

است. که در آن ρ و p به ترتیب چگالی انرژی و فشار سیال می‌باشد. محیط‌های زیر موارد خاصی از رابطه فوق هستند که ویژگی‌های جالبی دارند[۲]

- غبار : چگالی جرم سکون $= \rho = \rho_0$ ، $p = 0$
- تابش : $p = 1/3\rho$
- ثابت کیهان‌شناسی: ثابت$= p = -\rho$

که تمام موارد فوق بررسی می‌شوند.
با محاسبه تانسور انشتین برای متریک فریدمان— رابرتسون— واکر و استفاده از معادله (۱.۲) و (۱.۸) دو معادله مستقل زیر که به معادلات فریدمان مشهورند، حاصل می‌شوند

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}^2}{a}\right) = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} \qquad (۱.۹)$$

$$\dot{H} = -4\pi G(\rho + p) + \frac{k}{a^2} \qquad (۱.۱۰)$$

که درآن H پارامتر هابل نامیده می شود. ρ چگالی انرژی کل که شامل مواد مختلف در عالم از جمله تابش، مواد باریونیک، ماده تاریک و انرژی تاریک و p فشار کل ماده در عالم می‌باشند که در آن ρ و p فقط تابعیت t دارند.
با استفاده از پایستگی تانسور انرژی تکانه $(T^{\mu\nu}; \nu = 0)$ و اتحاد بیانکی $(G^{\mu\nu}{}_{;\nu} \equiv 0)$ می‌توان معادله پایستگی انرژی را به صورت

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0 \qquad (۱.۱۱)$$

به دست آورد. همچنین با استفاده از معادلات فریدمان می‌توان به معادله فوق رسید، که این نشان می‌دهد تنها دو معادله از معادلات (۱.۹)—(۱.۱۱) مستقل از هم هستند.
با حذف جمله k/a^2 در معادلات فریدمان، معادله شتاب حاصل می‌شود

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) \qquad (۱.۱۲)$$

انبساط شتابدار زمانی اتفاق می‌افتد که $\rho + 3p < 0$ باشد. معادلات فریدمان، پایستگی انرژی و شتاب معادلات اساسی کیهان‌شناسی فریدمان— رابرتسون— واکر هستند[۲].

۱—۴—۱ تحول عالم ماده— غالب

به منظور بررسی تحول عالم، نیاز داریم از محتوی آن آگاهی داشته باشیم. به همین منظور ارتباط بین چگالی ماده ρ و فشار p در رابطه‌ای تحت عنوان معادله حالت $(\omega = p/\rho)$ در نظر گرفته می‌شود که یکی از کمیت‌های مهم کیهان‌شناسی محسوب می‌شود.
تحول عالم پر شده با یک سیال کامل با معادله حالت ω را در نظر می‌گیریم، جواب تخت معادلات فریدمان $k = 0$ معمولاً تقریب خوبی برای تحول عالم در دوران بدون فشار یا ماده— غالب وهمچنین دوران تابش— غالب می‌باشد. بنابراین جواب‌های معادلات (۱.۹) و (۱.۱۰) برای حالت تخت $k = 0$ منجر به روابط زیر می‌شود[۲]

$$H(t) = \frac{2}{3(1+\omega)t} \qquad (۱.۱۳)$$

$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3(1+\omega)}} \qquad (۱.۱۴)$$

$$\rho \propto a^{-3(1+\omega)} \qquad (۱.۱۵)$$

ماده اصطلاحی است که کیهان‌شناسان به طوراختصاری برای ماده غیرنسبیتی به کار می‌برند و آن را می‌توان برای هر نوع ماده‌ای (باریونی — ماده تاریک) با فشار جزیی $(p = 0)$ به کار