بسم ا... الرحمن الرحیم

ذره هیگز کاندیدایی برای ماده تاریک

توسط:

ملیحه ملک حسینی

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های

تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک ذرات بنیادی

از

دانشگاه اراک

اراک- ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: ..... عالی .....

دکتر کریم قربانی (استاد راهنما و رئیس کمیته) ..... استادیار

دکتر سید کامران مؤیدی (دانشگاه اراک) ..... استادیار

دکتر حسین صادقی(دانشگاه اراک) ..... دانشیار

آذرماه ۱۳۹۰

چکیده

قدمت پازل ماده تاریک به هفتاد و پنج سال پیش می‌رسد. یافتن ماهیت ماده تاریک، یکی از بزرگ‌ترین مسائلی است که امروزه کیهان‌شناسان و فیزیکدانان ذرات بنیادی را به خود مشغول کرده‌است. تنها پنج درصد ماده و انرژی در دنیا برای ما شناخته شده‌است و بقیه‌ی ماده و انرژی، تاریک است. در این تحقیق ابتدا شواهدی کیهان شناختی بر وجود ماده تاریک ارائه می‌کنیم. سپس مدلی را معرفی می‌کنیم که مدل استاندارد فیزیک ذرات را گسترش می‌دهد و به مدل دوتایی هیگز خنثی معروف است. یکی از ذرات هیگز خنثی در این مدل می تواند به عنوان کاندیدایی برای ماده تاریک در نظر گرفته شود. در ادامه به بررسی ناحیه‌ی جدید و پایداری که در بازه‌ی بین جرم W و $160GeV$ قرار دارد، می‌پردازیم و با مطالعه آشکارسازی غیرمستقیم ماده تاریک_نشان می‌دهیم، چگالی ماده تاریک در این گستره جرمی با نتایج تجربی سازگار است و اهمیت آن را از دیدگاه کیهان‌شناسی مورد بحث قرار می‌دهیم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

پیشگفتار ۱

فصل اول

مقدمه ۴

۱-۱نظریه مهبانگ ۵

۱-۱-۲ شاره کیهانی ۵

۱-۱-۳ همگنی و همسانگردی ۵

۱-۱-۴ اصل کیهان شناختی ۶

۱-۲ معادله فریدمان ۶

۱-۲-۱ اثبات معادله فریدمان ۶

۱-۳ قانون هابل ۱۰

۱-۴ جهان در عصر تابش غالب ۱۲

۱-۵ جهان در عصر ماده غالب ۱۳

۱- ۶ پارامتر چگالی $\Omega(t)$ ۱۵

۱- ۷ ماده تاریک ۱۶

فصل دوم

مقدمه ۲۲

۲-۱ تاریخچه حرارتی جهان ۲۳
۲-۲ ترمودینامیک جهان آغازین ۲۸
۲-۲-۱ توزیعهای تعادلی ۲۹
۲-۲-۲ آنتروپی ۳۳
۲-۳ معادله بولتزمان ۳۴
۲-۳-۱ حل معادله بولتزمان ۴۱
۲-۴ ذرات باقیمانده ی داغ از جهان آغازین ۴۳
۲-۵ ذرات باقیمانده ی سرد از جهان آغازین ۴۴

فصل سوم

مقدمه ۵۰
۳-۱ مدل استاندارد فیزیک ذرات ۵۱
۳-۱-۱ مشکل جرم ۵۲
۳-۱-۲ مکانیزم هیگز در مدل استاندارد ۵۲
۳-۲ مدل دوتایی هیگز خنثی ۵۵
۳-۲-۱ ذرات جدید در مدل دوتایی هیگز خنثی ۵۶
۳-۲-۲ ذرات هیگز خنثی، کاندیدایی برای ماده تاریک ۵۷
۳-۲-۳ محدودیتهای آزمایشگاهی و تئوری حاکم بر پارامترهای آزاد ۵۹
۳-۲-۴ نواحی پایدار شناخته شده ۶۲

فصل چهارم

مقدمه ۶۸

۴-۱ ناحیه جرمی $M_W < M_{H^0} < 160\ GeV$ ۶۹

۴-۲ محاسبه چگالی باقیمانده کاندیدای ماده تاریک از جهان آغازین..... ۸۱

۴-۳ نتیجه گیری ۸۷

۴-۴ پیشنهادات ۸۷

مراجع ۸۹

چکیده و عنوان به زبان انگلیسی.....

فهرست تصاویر

شکل .....صفحه

شکل (۱-۱)- ذره m در شعاع r، تنها جاذبه گرانشی را از ناحیه سایه زده دریافت می‌کند..... ۷

شکل (۱-۲)- دستگاه مختصات همراه در راستای انبساط جهان گسترش می‌یابد. ۸

شکل (۱-۳) -نمودار سرعت بر حسب فاصله برای ۱۳۵۵ کهکشان..... ۱۱

شکل(۱-۴)- سیر تحولی ماده و تابش ۱۵

شکل (۱-۵)- منحنی دوران ستارگان را در کهکشان مارپیچی $M33$ ۱۸

شکل(۲-۱)- واجفتیدگی ذرات پرجرم و پایدار باقی‌مانده از جهان اولیه ۴۸

شکل(۳-۱)- فرآیندهای نابودی و هم‌نابودی ذرات H^0 به فرمیون‌ها و پاد فرمیون‌ها ۶۳

شکل (۳-۲)- نمودارهای فاینمن سهیم در فرآیندهای نابودی $H^0H^0 \to WW^* \to W\ f\ \bar{f}'$ ۶۵

شکل (۳-۳)- فرآیندهای نابودی ذرات H^0 به ذرات هیگز مدل استاندارد..... ۶۶

شکل (۴-۱)- فرآیندهای سهیم در نابودی ذرات H^0 به بوزون‌های ضعیف..... ۷۰

شکل (۴-۲)- پراکندگی ذرات در چارچوب مرکز جرم ۷۵

شکل (۴-۳)- سطح مقطع نابودی ذرات H^0 را به W^-W^+ و Z^0Z^0 در سرعت‌های بسیار کم به صورت تابعی از λ_L ۸۳

شکل (۴-۴)- چگالی باقی‌مانده ذرات H^0 را به صورت تابعی از λ_L..... ۸۴

شکل (۴-۵)- چگالی باقی‌مانده ذرات H^0 را به صورت تابعی از λ_L ۸۵

فهرست جدول

جدول ..... صفحه

جدول (۲-۱) ۲۳

پیشگفتار

یکی از مهم‌ترین مسائل فیزیک ذرات و کیهان‌شناسی مدرن، یافتن ماهیت ماده تاریک می‌باشد. ذرات ماده تاریک از نظر الکتریکی خنثی هستند و امواج الکترومغناطیسی را گسیل یا جذب نمی-کنند و تنها از طریق نیروهای ضعیف و گرانشی با ماده معمولی در جهان برهم‌کنش می‌کنند. ماده تاریک از ذراتی که تا به حال در فیزیک ذرات و کیهان‌شناسی راجع به آن‌ها صحبت شده، تشکیل نشده‌است. در نتیجه برای بررسی آن به نظریه‌هایی ورای مدل استاندارد فیزیک ذرات نیازمندیم تا وجود ذرات جدیدی را پیش‌بینی کند که بتوانیم از میان آن‌ها، کاندیدایی برای ماده تاریک انتخاب کنیم. به منظور گسترش مدل استاندارد فیزیک ذرات، مدل‌های گوناگونی معرفی شده‌اند. یکی از معروف‌ترین و در عین حال ساده‌ترین مدل‌ها، مدل دوتایی هیگز خنثی است. این مدل علاوه‌بر گسترش مدل استاندارد فیزیک ذرات توسط بخش هیگز آن، کاندیدایی نیز برای ماده تاریک درنظر می‌گیرد. در این پایان‌نامه مدل دوتایی هیگز خنثی معرفی و خصوصیات کاندیدای ماده تاریک در

فضای پارامتری این مدل به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اکنون پس از بیان کلیات تحقیق، به معرفی فصل‌های این پایان‌نامه می‌پردازیم.

این پایان‌نامه شامل ۴ فصل می‌باشد. فصل اول مقدمه‌ای بر مفاهیم کیهان‌شناسی و آشنایی با ماده تاریک در جهان می‌باشد. در این فصل به معرفی ابزارهای اولیه مطالعه جهان به صورت یک مجموعه کلی می‌پردازیم. در فصل دوم ترمودینامیک جهان آغازین به طور کامل شرح داده خواهد شد. در این فصل به مطالعه تحول چگالی ذرات از آغاز جهان تا به امروز می‌پردازیم. یکی از راهکارهای این تحقیق، بهره‌گیری از معادله بولتزمان و حل این معادله به صورت تحلیلی و عددی است که در فصل دوم به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل سوم مدل دوتایی هیگز خنثی بررسی و ذرات جدید در این مدل معرفی می‌شوند. سپس از میان ذرات این مدل، ذره-ای که خصوصیات آن با خصوصیات ذرات ماده تاریک انطباق بیشتری دارد، به عنوان کاندیدای ماده تاریک درنظر گرفته می‌شود. در ادامه به مطالعه محدودیت‌هایی که ماده تاریک بر این کاندیدا، در فضای پارامتری مدل دوتایی هیگز خنثی اعمال می‌کند، می‌پردازیم و نواحی جرمی پایداری که تاکنون مطالعه شده‌اند را معرفی و به اختصار مرور می‌کنیم.

در فصل چهارم به مطالعه کاندیدای ماده تاریک در ناحیه جرمی جدیدی که در محدوده بین جرم بوزون W و $160\,GeV$ قرار دارد، می‌پردازیم. در این ناحیه جدید فرآیندهای نابودی کاندیدای ماده تاریک به ذرات مدل استاندارد به‌ویژه بوزون‌های W و Z، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه با استفاده از برنامه *Micromegas*، چگالی باقی‌مانده کاندیدای ماده تاریک در مدل دوتایی هیگز خنثی به طور بسیار دقیق محاسبه می‌شود و در نهایت به بحث و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

فصل ۱:

مقدمه‌ای بر کیهان‌شناسی

مقدمه

کیهان‌شناسی، مطالعه سیر تحولی و ساختار جهان به صورت یک مجموعه کلی است. کیهان شناسی به بررسی ستاره ها وکهکشان‌ها به طورجداگانه نمی‌پردازد بلکه خصوصیات کل عالم را از جمله مبدا جهان، سیرتحول و سرنوشت نهایی آن را مورد بررسی قرار می‌دهد. کیهان‌شناسان برای دستیابی به این اهداف رصدهایی انجام می‌دهند. آن‌ها توسط این داده‌های نجومی شرایط عالم را در میلیاردها سال پیش بررسی می‌کنند و در نهایت مدل‌هایی برای توصیف جهان براساس اصول علمی ارائه می‌دهند.

هدف ما در این فصل معرفی مفاهیم پایه و ابزارهای اولیه کیهان‌شناسی مدرن است. در ادامه به مطالعه ماده تاریک و خصوصیات آن می‌پردازیم.

۱-۱ نظریه مهبانگ

مدل استاندارد کیهان‌شناسی که به نظریه مهبانگ معروف است، جزئیات تحول ترمودینامیکی عالم را مطالعه می‌کند. در این مدل ادعا می‌شود که سن عالم بی‌نهایت نیست و وجود جهان به حدوداً ۱۴میلیارد سال پیش باز می‌گردد که در آن جهان، در انفجاری بزرگ بوجود آمده است و پس از کسر کوچکی از ثانیه با حالتی بسیار چگال و دمایی در حدود ۱۰ میلیارد کلوین شروع به انبساط می‌کند.

۱-۱-۲ شاره کیهانی

در کیهان‌شناسی، برای توصیف خصوصیات کلی جهان، از تجمع موضعی ماده صرف نظر می‌کنیم. در این‌جا فرض می‌کنیم ماده کل عالم چه به حالت تجمع یافته، مانند کهکشان‌ها و چه به صورت پخش شده، مانند ماده میان کهکشانی، همگی به طور یکنواخت در کل عالم پخش شده باشند که اصطلاحاً به آن شاره کیهانی می‌گویند.

۱-۱-۳ همگنی و همسانگردی

همگنی خاصیتی است که توزیع یکنواخت شاره کیهانی را در همه جای جهان تداعی می‌کند. اگر خصوصیات شاره کیهانی در تمام جهات فضایی یکسان باشد، این توزیع همسانگرد است. این دو خصوصیت همگنی و همسانگردی لازمه وجود یکدیگر نیستند. برای مثال، یک جهان با میدان مغناطیسی یکنواخت، همگن است چون میدان مغناطیسی در تمام نقاط به یک شکل است. اما ممکن است توزیع میدان همسانگرد نباشد. همچنین کره‌ای را در نظر بگیرید که ذرات در جهات گوناگون روی سطح آن به شکل متقارنی گسترش یافته است. اگر از مرکز کره به سطح آن نگاه کنیم توزیع ذرات همسانگرد است، اما لزوماً همگن نخواهد بود.

۱-۱-۴ اصل کیهان‌شناختی

اصل کیهان‌شناختی بیان می‌کند که جهان در سه بعد فضایی، همگن و همسانگرد است. این اصل پایه و اساس نظریه مهبانگ است[۱].

۱-۲ معادله فریدمان

معادله فریدمان مهم‌ترین معادله کیهان‌شناسی است که انبساط عالم را توصیف می‌کند. این معادله چه از طریق گرانش نیوتنی و چه از طریق نسبیت عام استخراج شود، نتیجه یکسانی در بر خواهد داشت. ما برای سادگی در روابط از نظریه گرانش نیوتن استفاده می‌کنیم.

۱-۲-۱ اثبات معادله فریدمان

مطابق شکل (۱-۱) توزیع کروی همگن از ماده به جرم M و چگالی ρ در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که این توزیع کروی به طور یکنواخت در حال انبساط است. مطابق شکل ذره‌ایی به جرم m در فاصله r از مرکز توزیع جرم در نظر می‌گیریم. ذره m فقط تحت تأثیر نیروی گرانش از سمت داخل توزیع کروی است و هیچ نیرویی از سمت خارج از توزیع کروی به آن وارد نمی‌شود. این توزیع کروی جرمی معادل M خواهد داشت.

$$M = \frac{4\pi\rho r^3}{3}. \qquad (۱-۱)$$

مطابق گرانش نیوتنی، جرم M نیروی F را به جرم m وارد می‌کند:

$$F = \frac{GM\,m}{r^2} = \frac{4\pi G\rho r m}{3}. \qquad (۱-۲)$$

همچنین پتانسیل گرانشی ذره m برابر است با:

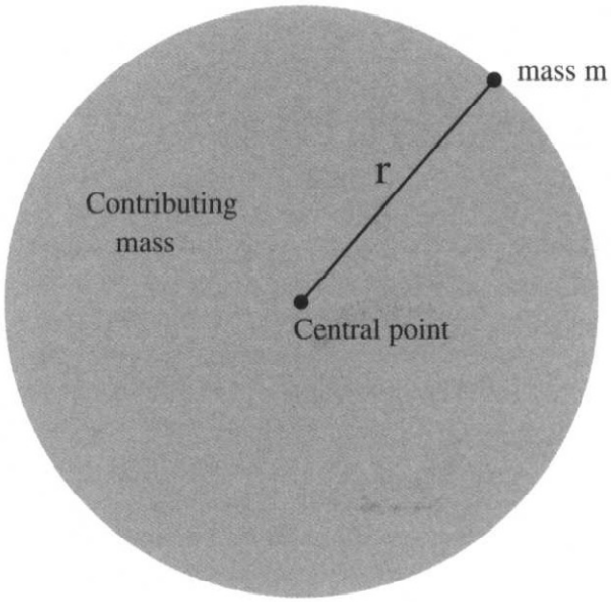
$$V = -\frac{GMm}{r} = -\frac{4\pi G\rho r^2 m}{3}. \qquad (۳-۱)$$

از طرف دیگر انرژی جنبشی ذره m برابر است با:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{r}^2, \qquad (۴-۱)$$

بنابراین برای انرژی کل ذره m داریم:

$$U = T + V = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 - \frac{4\pi}{3}G\rho r^2 m. \qquad (۵-۱)$$

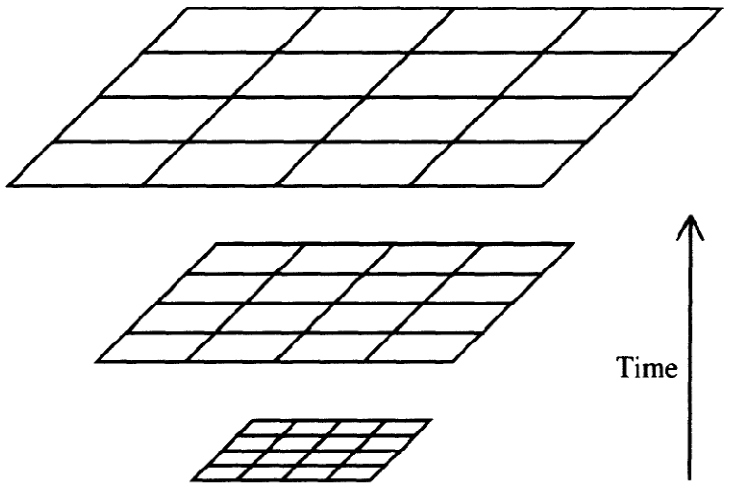


شکل (۱-۱)- ذره m در شعاع r، تنها جاذبه گرانشی را از ناحیه سایه زده دریافت می‌کند

در رابطه (۱-۵) مقدار U ثابت است، اما U برای ذرات با فواصل متفاوت مقدار ثابت یکسانی نخواهد داشت. این بحث برای هر دو ذره نوعی در جهان صادق است.

چون جهان را همگن در نظر می‌گیریم، این خصوصیت اجازه می‌دهد که دستگاه مختصات را به دستگاه همراه[۱] تغییر دهیم. در دستگاه مختصات همراه، مقیاس دستگاه با انبساط جهان بزرگ می‌شود به طوری که ناظر درون این دستگاه متوجه انبساط عالم نمی‌شود.

به منظور درک بهتر، فضایی مشبک همانند شکل (۱-۲) درنظر می‌گیریم که به طور یکنواخت با زمان انبساط می‌یابد. مطابق شکل، مکان نقاط شبکه در دستگاه مختصات همراه که خود با انبساط فضا منبسط می‌شود، ثابت است در حالی که مختصات نقاط در دستگاه مختصات فیزیکی تغییر کرده است.



شکل (۱-۲)- دستگاه مختصات همراه در راستای انبساط جهان گسترش می‌یابد.

[۱] The comoving coordinate

رابطه بین فاصله فیزیکی r (فاصله واقعی) و فاصله همراه x (آن چه ناظر درون دستگاه همراه می بیند) عبارت است از:

$$\vec{r} = a(t)\vec{x}, \qquad (۶-۱)$$

که $a(t)$ ضریب انبساط جهان نامیده می‌شود و به دلیل همگنی جهان فقط تابعی از زمان است و افزایش فواصل فیزیکی با زمان را نشان می‌دهد در حالی که این فواصل در مختصات همراه ثابت‌اند. برای مثال اگر در فاصله زمانی t_1 و t_2 $(t_2 > t_1)$ ضریب انبساط دو برابر می‌شود یعنی $a(t_2) = 2a(t_1)$، آن‌گاه اندازه جهان دو برابر شده است.

رابطه (۱-۵) را با استفاده از رابطه (۱-۶) بازنویسی می‌کنیم و یادآوری می‌کنیم که مکان اجرام در دستگاه مختصات همراه ثابت است:

$$\dot{x} = 0\,, \qquad (۷-۱)$$

$$U = \frac{1}{2}m\dot{a}^2x^2 - \frac{4\pi}{3}G\rho a^2x^2m\,. \qquad (۸-۱)$$

اگر طرفین تساوی را در $\frac{2}{ma^2x^2}$ ضرب کنیم پس از مرتب سازی جملات خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2}, \qquad (۹-۱)$$

که

$$kc^2 = -\frac{2U}{mx^2}.$$

معادله (۱-۹) فرم استاندارد معادله فریدمان است. در این‌جا k ثابت مستقل از فضا وزمان است چون U پایسته و x نیز ثابت است. دیمانسیون k، $^{-2}$[طول] است و معیاری از انرژی بر واحد ذره است. k انحنای کیهان نام دارد و هندسه جهان را توصیف می‌کند [۱].

۱-۳ قانون هابل

ادوین هابل[۱] با مطالعه انتقال دوپلری خطوط جذبی طیف کهکشان ها دریافت که رابطه‌ای بین فاصله کهکشان‌های مختلف و سرعت شعاعی آن‌ها وجود دارد. و خطوط طیفی تمام کهکشان‌ها انتقال به سرخ دارند. در واقع تمام کهکشان‌ها در حال دور شدن از ما هستند. و هر چه این اجرام در فواصل دورتری از ما باشند با سرعت بیشتری دور می‌شوند.

برای کهکشان‌هایی که در حال دور شدن از ما هستند، انتقال به سرخ به این صورت تعریف می-شود:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}, \qquad (۱۰-۱)$$

که λ_{em} و λ_{obs} به ترتیب طول موج‌های نور در نقاط انتشار و مشاهده ناظر می‌باشند.

هابل نشان داد که سرعت دور شدن اجرام[۲] با فاصله آن‌ها متناسب است به‌طوری‌که

$$v = H r. \qquad (۱۱-۱)$$

به این رابطه قانون هابل می‌گویند و H ثابت هابل است. شکل (۱-۳) که به نمودار هابل معروف است نمودار سرعت برحسب فاصله را برای ۱۳۵۵ کهکشان نشان می دهد. همان‌طور که در شکل

[۱] Edwin Hubble
[۲] Recession velocity

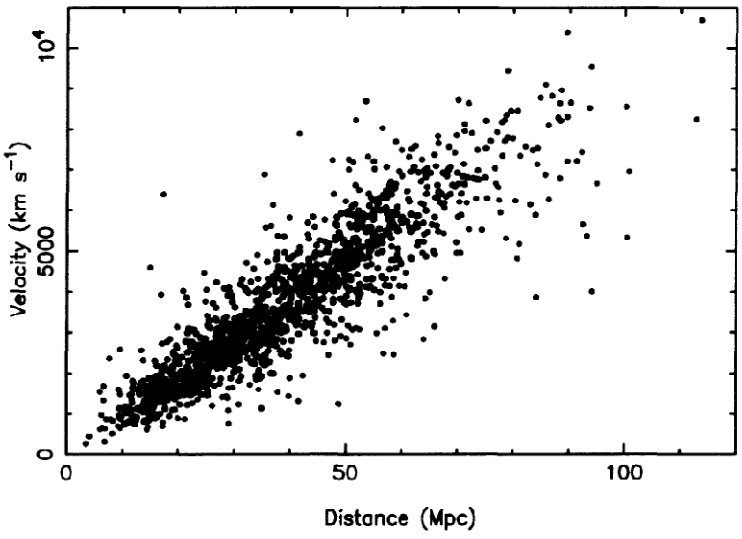
دیده می شود، نمودار حول خط $v = Hr$ پراکندگی دارد. این یعنی ثابت هابل کاملاً دقیق نیست زیرا اصل کیهان‌شناختی برای کهکشان‌هایی که بسیار به هم نزدیک‌اند صادق نیست.

سرعت دور شدن اجرام از ما از رابطه $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ به‌دست می‌آید. با توجه به رابطه (۱-۶) می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{v} = \frac{|\dot{\vec{r}}|}{|\vec{r}|}\vec{r} = \frac{\dot{a}}{a}\vec{r}\,. \qquad (۱۲-۱)$$

با مقایسه رابطه (۱-۱۱) و (۱-۱۲) نتیجه می‌گیریم:

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}. \qquad (۱۳-۱)$$



شکل (۱-۳)- نمودار سرعت بر حسب فاصله برای ۱۳۵۵ کهکشان

پس با توجه به معادله فریدمان رابطه (۱-۹)، معادله تحول پارامتر هابل را به‌دست می‌آوریم:

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}, \qquad (۱۴-۱)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر هابل با زمان تغییر می‌کند و به مقدار پارامتر هابل در زمان کنونی ثابت هابل می‌گوییم و آن را با H_0 نشان می‌دهیم[۲و۱].

$$H_0 = 100h\ km\, s^{-1} Mpc^{-1}, \qquad (۱۵-۱)$$

$$h = 0.72 \pm 0.08, \qquad (۱۶-۱)$$

پارامتر هابل، دیمانسیون عکس زمان دارد. بنابراین می‌توان مقیاس زمانی برای انبساط جهان تعریف کرد که زمان هابل نام دارد[۲].

$$\tau_H = H_0^{-1} = 9.78\, h^{-1} \times 10^9\, yr, \qquad (۱۷-۱)$$

۱-۴ جهان در عصر تابش غالب

از زمانی حدود 10^{-34} ثانیه پس از شروع جهان (زمان پلانک)، دوره غلبه تابش آغاز می‌شود. این دوره حدوداً 10^5 سال طول می‌کشد. دمای جهان در خلال این زمان از 10^{32} کلوین به 10^3 کلوین کاهش می‌یابد. چون انرژی جهان در این دوره، عمدتاً به شکل فوتون است، بنابراین آن را دوره تابش می‌نامیم. در این زمان انرژی جنبشی ذرات سبب ایجاد فشاری می‌شود که فشار تابش نام دارد. و به این صورت تعریف می‌شود:

$$p = \frac{\rho c^2}{3}, \qquad (۱۸-۱)$$

که p فشار و ρ چگالی ذرات در دوره تابش است.

معادله شاره[۱] را برای دوره تابش تعریف می‌کنیم:

$$\dot{\rho} + 4\frac{\dot{a}}{a}\rho = 0, \qquad (۱۹-۱)$$

با حل معادله شاره، خواهیم داشت:

$$\rho \propto \frac{1}{a^4}. \qquad (۲۰-۱)$$

تناسب ρ با a^{-4} را می‌توان به طور شهودی این گونه توجیه کرد: جهان در حال انبساط است، بنابراین چگالی آن با a^3 کاهش می‌یابد. از طرفی به علت انبساط جهان و انتقال به سرخ، طول موج تابش با ضریب a فزایش می‌یابد. بنابراین ρ که با انرژی تابش رابطه‌ای مستقیم دارد باید با a^{-4} متناسب باشد [۱].

۱-۵ جهان در عصر ماده غالب

همان‌طور که گفتیم تا 10^5 سال پس از زمان پلانک، انرژی به شکل تابش به مراتب بیشتر از مقدار انرژی به صورت ماده بوده است. به محض این که دما به چند هزار کلوین کاهش می‌یابد، انرژی موجود در عالم به شکل ماده شروع به غلبه می‌کند. کیهان‌شناسان واژه ماده را برای مواد غیر نسبیتی، یعنی موادی که فشارشان قابل چشم‌پوشی است، $p = 0$ ، به کار می‌برند.

[۱] Fluid equation