بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده فیزیک

ماده تاریک آناپولی

رسالهی کارشناسی ارشد

مهری رحیمی

استاد راهنما
دکتر منصور حقیقت

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده ی فیزیک

رساله‌ی کارشناسی ارشد مهری رحیمی
تحت عنوان

ماده تاریک آناپولی

در تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۲۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱ - استاد راهنما پایان‌نامه	دکتر منصور حقیقت
۲ - استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر غلامرضا خسروی
۳ - استاد داور	دکتر بهروز میرزا
۴ - استاد داور	دکتر مسلم زارعی
سرپرست تحصیلات دانشکده‌ی فیزیک	دکتر مجتبی اعلایی

سپاس گزاری

سپاس خداوندگار حکیم راکه بالطف بی کران خود، آدمی رازیور عقل آراست.

در آغاز بوسه می زنم بردستان پر مهرپدر و مادر عزیزیم و بعد از خدا، ستایش می کنم وجود مقدس شان را به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان، که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان من بودند.

وظیفه خود می دانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر منصور حقیقت صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعا بدون راهنمایی های ارزنده ایشان این مجموعه به انجام نمی رسید.

از استاد مشاور گرامیم جناب آقای دکتر غلامرضا خسروی به خاطر آموزه های باارزش ایشان در جهت بهبود این پایان نامه و جناب آقای دکتر مسلم زارعی که در این مدت بارها پاسخ گوی سوالاتم بوده اند و در آخر نیز زحمت خواندن و داوری را تقبل کردند، کمال تشکر و سپاس گزاری را دارم و همچنین زحمات جناب آقای دکتر بهروز میرزا را برای داوری و مطالعه این پایان نامه قدردانم.

همچنین از توجه و تشویق خواهرم که همواره مرا در طول زندگی یاری کرد و دو برادر عزیزم که در طول این پروژه با من همراه بودند تشکر می نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

چکیده ۱

۱ مقدمه ۲

۲ ماده تاریک ۴
۱.۲ محاسبه سرعت لبه‌ی کهکشان‌ها ۵
۲.۲ ماده تاریک در خوشه‌های کهکشانی ۵
۳.۲ عدسی گرانشی ۶
۴.۲ نقش ماده تاریک در تشکیل ساختارهای اولیه ۶
۵.۲ ماده تاریک داغ، گرم و سرد ۹
۶.۲ کاندیدهای ماده تاریک ۹

۳ ماده تاریک آناپولی ۱۲
۱.۳ فرمیون مایورانا ۱۲
۲.۳ عدم پایستگی عددلپتونی ۱۴
۳.۳ عامل شکل ۱۵
۴.۳ برهم‌کنش الکترومغناطیسی فرمیون‌ها ۱۵
۵.۳ آناپول ۱۶
۶.۳ مقایسه آناپول با چنبره ۱۸
۷.۳ ضریب جفت شدگی آناپول ۱۹
۸.۳ قواعد فاینمن ۲۱
۹.۳ جرم ماده تاریک ۲۱
۱۰.۳ نابودی ماده تاریک ۲۱
۱۱.۳ محاسبه سطح مقطع نابودی ذره تاریک به دو فرمیون ۲۳
۱۲.۳ محاسبه سطح مقطع نابودی ماده تاریک به دو بوزون W ۲۶
۱۳.۳ محاسبه میانگین گرمایی سطح مقطع کل نابودی ۲۷
۱۴.۳ ماده تاریک آناپولی در آشکارسازهای روی زمین ۲۸

۴ نظریه‌های بنیادی ۳۳
۱.۴ مدل استاندار در فضا-زمان ناجابجایی ۳۳
۱.۱.۴ تاریخچه ناجابجایی ۳۳
۲.۱.۴ اهمیت فضا-زمان ناجابجایی ۳۴
۳.۱.۴ ضرب ستاره ای ویل-مویال ۳۵
۴.۱.۴ خواص ضرب ستاره‌ای ۳۶

۵.۱.۴ تقارن پیمانه‌ای ۳۶
۶.۱.۴ نظریه میدان ناجابجایی بدون استفاده از نگاشت سایبرگ - ویتن ۳۸
۷.۱.۴ نظریه میدان ناجابجایی با استفاده از نگاشت سایبرگ - ویتن ۳۹
۲.۴ مدل استاندارد تعمیم یافته ۳۹
۱.۲.۴ تبدیلات لورنتس ۳۹
۲.۲.۴ تقارن لورنتس ۴۰
۳.۲.۴ نقض تقارن لورنتس ۴۱
۴.۲.۴ قضیهCPT ۴۱
۵.۲.۴ مدل استاندارد تعمیم یافته ۴۲

۵ ماده تاریک آناپولی در نظریه‌های بنیادی **۴۴**
۱.۵ ناجابجایی ۴۴
۲.۵ مدل استاندارد تعمیم یافته ۴۶

۶ بحث و نتیجه‌گیری **۴۹**

آ محاسبه سطح مقطع واپاشی ماده تاریک یه دو فرمیون در چارچوب مدل استاندارد تعمیم یافته **۵۱**

ب واپاشی به دو بوزون$W^{\pm}$ **۵۵**

مراجع **۵۸**

فهرست تصاویر

۱.۳ $\chi\chi \to f\bar{f}$ ۲۲
۲.۳ $\chi\chi \to W^+W^-$ ۲۲
۳.۳ $\chi\chi \to \gamma\gamma$ برهم‌کنش کانال t ۲۳
۴.۳ $\chi\chi \to \gamma\gamma$ برهم‌کنش کانال u ۲۳
۵.۳ تولید ماده تاریک ۲۹
۶.۳ داده‌های آشکارساز CMS (منحنی نقطه‌چین) و چگالی ماندگاری ماده تاریک [۱۱] ۳۰

ب.۱ راس فاینمن فوتون به دو W ۵۶

چکیده

ما فرض می‌کنیم ماده تاریک فرمیون مایورانای اسپین $\frac{۱}{۲}$ است و از طریق ممان آناپول برهم‌کنش الکترومغناطیسی انجام می‌دهد. واپاشی‌های ممکن آن را بررسی کرده و داده‌های بدست آمده را با چگالی ماندگاری تجربی مقایسه می‌کنیم و حدی روی پارامترهای نظریه می‌گذاریم. از طرفی انرژی گمشده مشاهده شده در آزمایشگاه را به تولید ماده تاریک آناپولی نسبت می‌دهند و پیش‌بینی نظریه برای تولید ماده تاریک در شرایط آزمایشگاه را با مقدار انرژی گمشده مقایسه کرده‌اند و به این ترتیب حدی دیگر روی پارامترهای نظریه گذاشته‌اند. با تطبیق این دو داده‌ی تجربی -چگالی ماندگاری و انرژی گمشده در آزمایشگاه- حد پایین $m_\chi \geq ۱۰۰ GeV$ را بدست می‌آوریم. سپس این نظریه را در چارچوب مدل استاندارد در فضا-زمان ناجابجایی و مدل استاندارد تعمیم یافته با نقض لورنتس مطرح می‌کنیم و روی پارامترهای این دو نظریه حدهای $\Lambda_{NC} \leq ۰/۵ TeV$ و $d^{··} \geq ۰/۲$ را بدست می‌آوریم.

کلمات کلیدی:
ماده تاریک، آناپول، مدل استاندارد در فضا- زمان ناجابجایی، نقض تقارن لورنتس.

فصل ۱

مقدمه

امروزه ماده تاریک و انرژی تاریک از سوالات اساسی کیهان‌شناسی محسوب می‌شوند.
فرض اولیه بر این بوده که ذراتی وجود دارند که بدون بار الکتریکی‌اند و امکان جفت‌شدگی با فوتون و انجام برهم‌کنش الکترومغناطیسی را ندارند. از این رو آن‌ها را تاریک نامیدند. هنوز فرض بدون بار بودن این ذرات پابرجاست. اما نظریه‌هایی در مورد امکان برهم‌کنش الکترومغناطیسی این ذرات مطرح شده است. در ادامه یکی از این نظریه‌ها را بررسی می‌کنیم.
در فصل دوم ابتدا مروری بر شواهد تجربی حضور ماده تاریک در کیهان و تاریخچه‌ای از ورودش به کیهان‌شناسی بیان می‌کنیم. خواهیم دید که ماده تاریک روی دینامیک کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی تاثیر گذاشته است. جرم ماده تاریک چند برابر جرم ماده‌ای که می‌بینیم تخمین زده شده بنابراین طبیعی است که دینامیک جهان بیش‌تر متاثر از ماده تاریک باشد تا ماده مرئی. از طرفی این که برای آینده‌ی جهان چه اتفاقی می‌افتد و جهان تا چه اندازه به انبساط شتاب‌دار ادامه می‌دهد، بستگی به چگالی جهان دارد بنابراین جرم ماده تاریک به عنوان جرمی که چند برابر جرم ماده‌ی مرئی است، می‌تواند مهم باشد.(قابل ذکر است که تاثیر انرژی تاریک از همه بیشتر است. در اینجا تنها مقایسه‌ای بین تاثیر ماده تاریک و ماده مرئی انجام شده است.)
می‌دانیم ماده تاریک ذره‌ی نسبتا پایداری است؛ احتمالا برهم‌کنش مستقیم با فوتون نمی‌کند، بنابراین بدون بار الکتریکی است. آهنگ واپاشی‌اش را می‌توانیم از روی داده‌های کیهان‌شناسی و عمر عالم تخمین بزنیم؛ اما با این وجود هنوز نظریه‌های زیادی می‌توان نوشت که ادعای توضیح ماده تاریک را داشته باشند. شاید تنها راه نوشتن آن نظریه‌ها و کار کردن روی تمام آن‌هاست. باید پیش‌بینی و نتایجی از نظریه حاصل شود تا با محدود دانشی که از ماده تاریک داریم مقایسه کنیم و آن‌گاه است که می‌توان تصمیم گرفت نظریه را کنار گذاشت و یا همچنان برای تحقیقات بعدی مورد مطالعه قرار

داد.

در فصل سوم نظریه‌ی ماده تاریک آناپولی [۱] را بررسی می‌کنیم. در این نظریه ماده تاریک، فرمیون مایورانای[۲] اسپین $\frac{۱}{۲}$ است که از طریق ممان آناپول برهم‌کنش الکترومغناطیسی انجام می‌دهد. در ابتدای فصل توضیحی در مورد فرمیون مایورانا و ممان آناپول داده شده است و لاگرانژی برهم‌کنشی آن را نوشته‌ایم. اشاره‌ای به شواهد تجربی که می‌توانند این نظریه را رد یا تایید کنند، مانند چگالی ماندگاری[۳] ماده تاریک و نتایج آزمایشگاهی مانند انرژی گمشده[۴] مشاهده شده در آزمایشگاه LHC و آزمایشگاه زنون۱۰۰ را داریم و در آخر حدی روی جرم ماده تاریک آناپولی می‌گذاریم. لاگرانژی برهم‌کنشی ماده تاریک آناپولی در فصل سوم نوشته شده است، اما در مورد نظریه‌های بنیادی که می‌توانند این لاگرانژی برهم‌کنش را از آن‌ها استخراج کرد ایده‌ای داده نشده بود. در فصل چهارم توضیح کوتاهی در مورد دو نظریه بنیادی مدل استاندارد تعمیم یافته[۵] با نقض لورنتس و مدل استاندارد در فضا-زمان ناجابجایی [۶] داده می‌شود. در فصل پنجم خواهیم دید که لاگرانژی برهم‌کنشی نظریه ماده تاریک آناپولی را می‌توان از لاگرانژی‌های نوشته شده در این دو نظریه استخراج کرد. سپس بررسی می‌کنیم که اگر نظریه ماده تاریک آناپولی را از هر کدام از این دو نظریه بنیادی استخراج کنیم، چه پیامدهایی خواهد داشت. انتظار داریم داده‌های نظری بدست آمده از نظریه‌های بنیادی با حدهای داده‌های تجربی هم‌مرتبه باشد. با این برابری حدهایی روی پارامتر ناجابجایی و پارامتر نقض تقارن لورنتس بدست می‌آوریم. در فصل آخر نیز مروری بر نتایج بدست آمده داریم.

---

[۱] Anapole dark matter

[۲] Majorana fermion

[۳] Relic density

[۴] Missing energy

[۵] Standard model extension

[۶] Non-commutative space-time

فصل ۲

ماده تاریک

ماهیت ماده تاریک و چگونگی برهم‌کنش آن یکی از سوالات اساسی کیهان شناسی است. سرعت شعاعی بالای کهکشان‌ها در خوشه‌های کهکشانی و سرعت بالای ابرهای هیدروژنیِ لبه کهکشان‌ها اولین نشانه‌های حضور ماده تاریک بود. البته در ابتدا لازم به ذکر است که دو دیدگاه کلی در مورد این مشاهداتی وجود دارد:

- دیدگاه اول :گرانش و نسبیت عام انیشتن نیاز به اصلاح دارند در این صورت باید نسبیت عام اصلاح شده را طوری نوشت که این مشاهدات را توجیه کند.
- دیدگاه دوم: ماده‌ای را فرض می‌کند که ما آن را نمی‌بینیم و تنها اثرات گرانشی آن را احساس می‌کنیم؛ آن را ماده تاریک می‌نامیم. ما در ادامه این دیدگاه را دنبال می‌کنیم.

نظریات دیگری هم در رد هر دو دیدگاه فوق وجود دارد مثلا اخیرا دراگان اسلاوکوف[۱] که در سرن مشغول به کار است نظریه‌ای نوشته که می‌گوید احتمالا ماده تاریک یک توهم است و دوقطبی‌های گرانشی نظریه‌اش، قطبیدگی گرانشی خلا کوانتومی را به وجود می‌آورند. و اثرات این قطبیدگی‌ها، توهمِ نیاز به ماده تاریک را به‌وجود آورده است [۳]. البته عدسی‌های گرانشی و تشکیل ساختارهای اولیه‌ی کیهانی به شکلی که امروز وجود دارد، نیز شواهدی برای وجود ماده تاریک هستند.

---

[۱] Dragan Slovkov

۱.۲ محاسبه سرعت لبه‌ی کهکشان‌ها

سال‌ها کیهان‌شناسان به بررسی مرکز کهکشان‌ها علاقه بیشتری نشان می‌دادند. ورا روبین [۲] از پیشگامان مطالعه‌ی ساختار لبه‌ی کهکشان‌ها هستند. با تحقیقات ایشان نشانه‌هایی از وجود ماده تاریک یافت شد.

در لبه‌ی کهکشان‌ها تا دو الی سه برابر شعاع کهکشان ابرهای هیدروژنی رقیقی داریم که حول مرکز کهکشان در چرخش‌اند. سرعت چرخش به طور تجربی قابل محاسبه می‌باشد. اگر کهکشان‌ها را از لبه نگاه کنیم، ابرهای یک طرف کهکشان به ما نزدیک و ابرهای طرف دیگر از ما دور می‌شوند، بنابراین اگر نور رسیده از آن را تجزیه کنیم، در یک طرف انتقال به آبی (طرفی که به ما نزدیک می‌شود) و یک طرف انتقال به سرخ (طرفی که از ما دور می‌شود) داریم. با اندازه‌گیری این جابه‌جایی‌ها و اثر دوپلر می‌توان سرعت این ابرهای هیدروژنی را محاسبه کرد.

محاسبه جرم کهکشان‌ها

جرم مرئی کهکشان‌ها را به طور تقریبی می‌دانستند تعداد هر نوع ستاره را در جرم تقریبی آن ضرب می‌کردند. اما با داشتن سرعت ابرهای هیدروژنی می‌توانیم دقیق‌تر جرم کهکشان را محاسبه کنیم. با فرض اینکه تنها نیرویی که باعث چرخش ابرها می‌شود، نیروی گرانشی باشد می‌توان مقدار این نیرو را با دانستن سرعت ابرهای هیدروژنی و فاصله‌شان از مرکز بدست آورد اما جواب غافلگیر کننده بود؛ جرمی تقریبا ۱۰ برابر جرم مرئی بدست می‌آمد.

۲.۲ ماده تاریک در خوشه‌های کهکشانی

قبل از روبین، زویکی [۳] در سال ۱۹۳۳با اندازه‌گیری سرعت شعاعی کهکشان‌های درون خوشه کهکشانی دریافته بود که جرم کلی این خوشه باید بیش از مقدار جرمی باشد که قابل دیدن است.
بنابراین زویکی اولین کسی بود که به وجود ماده تاریک در خوشه کهکشانی پی برد. البته ماده تاریک تا سال‌ها مورد شک و ابهام قرار داشت.

---

[۲] Vera Rubin

[۳] Zwicky

۳.۲ عدسی گرانشی

بر اساس نظریه‌ی نسبیت عام، میدان گرانشی می‌تواند مسیر نور را خمیده کند؛ بنابراین اگر یک جرم سنگین مقابل یک جسم نورانی قرار بگیرد نور آن را خمیده می‌کند، اندازه ظاهری آن را تغییر می‌دهد و یا شکل آن به صورت لکه‌های تاب‌دار یا حباب‌های بد شکل درمی‌آورد.
اجسام سنگین با کانونی کردن نور نقش عدسی گرانشی را ایفا می‌کنند. جرم عدسی گرانشی را می‌توان با عکس‌برداری از کهکشان‌ها و اندازه‌گیری میزان نزدیکی و تاب‌دار بودن تصویر بدست آورد. محاسبات نشان می‌دهند، که جرمی بیش از جرمی که ما می‌بینیم لازم است تا مسیر نور را به این اندازه منحرف کند. بنابراین حتما جرمی وجود دارد که ما نمی‌بینیم اما اثرات گرانشی دارد.

۴.۲ نقش ماده تاریک در تشکیل ساختارهای اولیه

یکی از سؤالات اساسی کیهان‌شناسی این است که ساختارهای اولیه در کیهان چگونه بعد از انفجار بزرگ شکل گرفته‌اند؟ در این بخش خواهیم دید که بر طبق نظریات موجود، ماده تاریک نقش بسیار اساسی در رشد بذرهای اولیه و تشکیل ساختارها دارد به گونه‌ای که بدون وجود ماده تاریک، کهکشان‌ها به گونه‌ای که امروزه می‌بینیم نمی‌توانند شکل بگیرند.
کیهان اولیه جرم کاملا همگنی از گازهای هلیوم و هیدروژن بوده است. برای شکل‌گیری ساختارها باید گازهای برخی مناطق، در مقایسه با سایر قسمت‌ها، متراکم‌تر و چگال‌تر شوند. میانگین چگالی ماده درون یک کهکشان در حدود $۱۰^{-۲۴}$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در حالی که چگالی میانگین کیهان $۱۰^{-۳۰}$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. بنابراین میانگین چگالی ماده درون یک کهکشان، تقریبا یک میلیون مرتبه بیشتر از چگالی میانگین کیهان است. در نتیجه برای تشکیل کهکشان، نواحی از گاز باید متراکم شود به گونه‌ای که چگالی آن بسیار بیشتر از چگالی زمینه گازی شود. گرانش تنها عاملی است که می‌تواند باعث رشد غیریکنواخت چگالی در محیط گازی شود. اگر فرض کنیم افت و خیزهای بسیار کوچکی در اثر نوسانات کوانتومی در محیط کاملا یکنواخت گازی بوجود آید، با گذشت زمان، نیروی گرانش باعث رشد این افت و خیزهای کوچک شده به گونه‌ای که بعد از مدتی برخی نواحی با چگالی بیشتر، دارای نیروی گرانشی بیشتری شده و باعث جذب ماده بیشتری به طرف خود می‌شود.
البته در عمل چالش‌ها و سوال‌های اساسی روبه‌رو می‌شویم . اولین سوال این است که آیا اثرات دیگری نقش ناپایداری گرانشی را خنثی نمی‌کنند؟ وقتی ابر گازی تحت تأثیر گرانش خود متراکم می‌شود،

حجمش کاهش و در نتیجه فشار آن افزایش می‌یابد. اگر این فشار بتواند آنقدر زیاد شود که با نیروی گرانش به تعادل برسد، آنگاه تراکم بیشتر متوقف خواهد شد. علاوه بر آن انبساط کیهانی باعث دور شدن ذرات گاز از یکدیگر می‌شود بنابراین عملکرد آن در خلاف جاذبه گرانشی است. به‌خصوص اگر انبساط خیلی سریع باشد جاذبه گرانشی در افزایش چگالی چندان مؤثر نخواهد بود.
سؤال دیگری که مطرح می‌شود، این است که اساسا افت و خیزهای اولیه در چگالی طی چه مکانیسمی ایجاد شده‌اند؟ البته این افت و خیزهای اولیه می‌توانند بسیار کوچک باشند، اما به هر حال وجودشان ضروری است، چرا که گرانش تنها می‌تواند باعث رشد افت و خیزها شود. به‌علاوه هر گونه تغییر در الگوی افت و خیزهای اولیه باعث پیدایش توزیع متفاوتی از کهکشان‌ها در زمان فعلی خواهد شد. برای آنکه کهکشان‌ها و توزیع آنها به همان‌گونه‌ای که امروزه مشاهده می‌کنیم باشند، باید الگوی افت و خیزها به درستی انتخاب شوند.
کیهان اولیه شامل پروتون‌ها، نوترون‌ها، الکترون‌ها، تابش و مقدار زیادی ماده تاریک بوده است. این را هم می‌دانیم که مقدار ماده تاریک تقریبا ده تا صد برابر نوکلئون‌ها بوده است. بنابراین هنگام مطالعه افت و خیزها باید به درستی روشن کنیم که افت و خیز در کدام بخش بوده است؟

ابتدا افت و خیز در تابش را بررسی می‌کنیم. در کیهان اولیه، قبل از تشکیل اتم‌های خنثی، پروتون‌ها و الکترون‌ها به صورت مستمر فوتون‌ها را جذب و نشر می‌کنند و به همین دلیل نوسانات چگالی در ماده معمولی باعث افت و خیزهایی در فوتون‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر نواحی که چگال‌تر است، فوتون‌های بیشتری را جذب و گسیل می‌کند. برعکس نواحی که چگالی کمتری دارد برهم‌کنش ضعیف‌تری با فوتون دارد. از آنجا که فوتون‌ها باسرعت نور حرکت می‌کنند بنابراین به راحتی از جاذبه گرانشی فرار می‌کنند و بنابراین در هیچ مقیاسی تراکمی از انرژی تابشی نداریم. با توجه به این‌که ماده معمولی و تابش به شدت با یکدیگر جفت شده‌اند، به نظر می‌رسد که تراکم ماده معمولی نیز نخواهیم داشت. در حالی که گرانشِ ماده‌ی معمولی تلاش می‌کند باعث چگالش بیشتر شود، تابش از آن جلوگیری می‌کند. نتیجه این‌که با وجود جفتیدگی ماده معمولی با تابش، افت و خیزهای چگالی نمی‌توانند رشد کنند. بنابراین ساختارهایی مانند کهکشان‌ها نمی‌توانند از ماده معمولی شکل بگیرند.
اینجاست که ماده تاریک به عنوان کلید حل مشکل وارد عمل می‌شود. اگر در کیهان اولیه افت و خیز چگالی در ماده معمولی و ماده تاریک وجود داشته باشد. چون تابش تنها با ماده معمولی جفت شده است، با انبساط کیهان، افت و خیزهای چگالی ماده تاریک متناسب با انبساط کیهان رشد خواهند کرد در حالی که افت و خیزهای چگالی ماده معمولی اندکی رشد خواهند کرد. بعد از آنکه اتم‌های خنثی شکل گرفتند و ماده معمولی از تابش جدا شد، اثرات گرانشی ماده تاریک وارد عمل می‌شوند و

باعث رشد افت و خیزهای چگالی ماده معمولی می‌شوند. به این ترتیب افت و خیزهای چگالی ماده معمولی و ماده تاریک به رشد خود ادامه خواهند داد تا در نهایت ساختارهایی نظیر کهکشان‌ها ساخته شوند.

ماده تاریک بار الکتریکی ندارد و به همین دلیل با تابش برهم‌کنش نمی‌کنند. بنابراین توده‌ای از ماده تاریک که در کنار هم قرار گرفته‌اند، نمی‌توانند انرژی از دست دهند و در نتیجه اندازه آن تغییر نمی‌کند. اما این هاله می‌تواند باعث جذب ذرات اطراف خود شوند و شبیه به چاه پتانسیل عمل کند. ماده معمولی در چاه پتانسیل ماده تاریک به دام می‌افتند. چون ماده معمولی با تابش برهم‌کنش دارد به تدریج به علت نشر تابش سرد می‌شود، همچنان که گاز سرد می‌شود، دما و انرژی جنبشی‌اش کاهش می‌یابد و به سمت پایین‌ترین نقطه چاه پتانسیل ماده تاریک حرکت می‌کند. به این ترتیب ماده معمولی در مرکز هاله‌های ماده تاریک شکل می‌گیرند. این تصویر با شواهد تجربی که امروزه از توزیع ماده تاریک در اطراف کهکشان‌ها داریم کاملا سازگاری دارد.

لازم به ذکر است که این مدل، تنها یک الگوسازی نظری نیست، بلکه شواهد تجربی وجود دارد که وجود افت و خیزهای چگالی در کیهان اولیه را تایید می‌کنند. مهمترین این شواهد اطلاعات بدست آمده از تابش میکروموج زمینه کیهانی است. در کیهان اولیه ماده و تابش به شدت با هم در ارتباط بوده‌اند، به همین دلیل هر گونه افت و خیز در ماده باعث ایجاد یک افت و خیز در تابش می‌شود. چون تابش گرمایی با پارامتر دما توصیف می‌شود، هر گونه افت و خیز چگالی باعث افت و خیز در دمای تابش می‌شود. بنابراین اگر زمانی که تابش از ماده جدا شده، ماده دارای نوسانات چگالی بوده است، تابش زمینه کیهانی نیز باید دارای افت و خیزهای مشابهی در دمایش باشد. محاسبات نظری نشان می‌دهند که تغییرات اندک دمایی در تابش زمینه کیهانی باید از مرتبه یک میلیونم باشد. به دلیل کوچکی، اندازه‌گیری این تغییرات دمایی اندک بر روی زمین عملا امکان‌پذیر نبوده، زیرا جو زمین و بخار آب موجود در آن اجازه آشکارسازی آن را نمی‌دهد. در نتیجه برای اندازه‌گیری این تغییرات دمایی باید آشکارساز را در بیرون جو زمین قرار داد. در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی ناسا کاوشگر زمینه کیهانی [۴] ، را به همین منظور در مدار قرار داد و توانست افت و خیزهای دمایی از مرتبه یک میلیونم را اندازه‌گیری کند. این کشف نشان دادکه مدل‌های نظری تشکیل ساختار در کیهان، از نظر بنیادی درست هستند. کیهان در گذشته یکنواخت‌تر بوده است اما نه کاملا. این انحراف از یکنواختی آنچنان که کوبه نشان داد، توانست به شکل‌گیری کهکشان‌های امروزی بینجامد [۱].

[۴] Cosmic background explorer(COBE)

۵.۲ ماده تاریک داغ، گرم و سرد

در ابتدای عالم تمام ذرات با یک‌دیگر در تعادل بوده‌اند. ماده‌ی تاریک نیز با دیگر ذرات در تعادل جنبشی [۵] بوده‌اند. با پایین آمدن دما ذرات از تعادل خارج شده و آزادانه منتشر می‌شوند. دمایی را که در آن دما ذره از تعادل خارج شده را دمای واجفتیدگی [۶] گوییم. با توجه به این دما ذرات ماده تاریک را نام‌گذاری می‌کنند:

- اگر دمای واجفتیدگی خیلی کوچکتر از جرم ماده تاریک باشد، زمانی که این ذرات از تعادل خارج شده، غیر نسبیتی بوده‌اند. این ذرات را ماده تاریک سرد [۷] گوییم.
- اما اگر دمای واجفتیدگی از مرتبه جرم ذره تاریک یا بزرگ‌تر از آن باشد باید دو امکان را بررسی کرد:

  اگر جرم ذره تاریک از دمای برابری ماده-تابش [۸] بیشتر باشد، آن را ماده تاریک گرم [۹] می نامیم. این ذرات در مبدأ برابری ماده-تابش غیرنسبیتی می‌شوند.

  و اگر جرم ذره تاریک از دمای برابری ماده-تابش کمتر باشد، آن را ماده تاریک داغ [۱۰] می‌نامیم. این ذرات در مبدأ برابری ماده-تابش هنوز نسبیتی هستند.

  دمای برابری ماده-تابش در [۴] حدود ۱ الکترون ولت محاسبه شده است.

می‌توان گفت چیزی که ما به عنوان ماده تاریک می‌شناسیم ترکیبی از هر سه نوع ذره باشد. -همان‌طور که ماده مرئی از ذرات متفاوتی تشکیل شده است.- اما احتمالا ذرات تاریک داغ سهم ناچیزی در چگالی کل ماده تاریک دارند. محتمل‌ترین نوع، ماده تاریک سرد می‌باشد [۴].

۶.۲ کاندیدهای ماده تاریک

ممکن است چنین تصور شود که چون ماده تاریک اثر گرانشی دارد، بنابراین مثل بقیه مواد کیهان از پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل شده است. دلیل آن هم این است که یک کهکشان می‌تواند مقدار زیادی

---

[۵] kinetic equlibrium

[۶] decoupling temperature

[۷] Cold dark matter

[۸] matter-radiation equality

[۹] Warm dark matter

[۱۰] Hot dark matter

جرم داشته باشد که دیده نمی‌شود. مثال آن‌ها سیاهچاله‌ها، کوتوله‌های قهوه‌ای، کوتوله‌های سفید، سیارات و ستارگان کم نور می‌باشد. مجموعه‌ای از این اجرام کم‌نور روی هم رفته می‌توانند تشکیل یک جسم هاله مانند داده که به آن‌ها ماچو [۱۱] گویند.

هر چند ماچوها می‌توانند بخشی از گرانش موجود در کهکشان را تأمین کنند، اما در مجموع مقدار ماده تاریک موجود در سیستم‌های مختلف اعم از کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی آنقدر زیاد است که بخش عمده‌ای از آن نمی‌تواند از جنس ماده معمولی یعنی پروتون و نوترون باشد. توضیح اینکه مقدار ماده باریونی موجود در جهان را با مطالعه انفجار بزرگ می‌توان تخمین زد. وقتی انفجار بزرگ اتفاق افتاد، همه انواع ذرات تولید شدند و جهان را فرا گرفتند، جهان شروع به رشد کرد و دما همزمان پایین آمد. سپس ساختارهای اصلی ماده یعنی الکترون‌ها و پروتون‌ها و نوترون‌ها شروع به سرد شدن کردند و تشکیل عناصر هیدروژن و هلیوم دادند و به تدریج عناصر سنگین‌تر شکل گرفتند و در نتیجه ماده‌ای حاصل شد که امروزه در جهان می‌بینیم.

بر طبق نظریه انفجار بزرگ با اندازه‌گیری نسبت هلیوم به هیدروژن می‌توان مقدار ماده باریونی موجود در مدت فاز داغ اولیه بعد از انفجار بزرگ و در نتیجه شمار کلی پروتون‌ها و نوترون‌های امروزی را تخمین زد. محاسبات نظریه انفجار بزرگ نشان می‌دهد که مقدار کنونی ماده باریونی اعم از ماده تاریک باریونی و ماده مرئی در مجموع کمتر از ده درصد ماده موجود در کیهان را تشکیل می‌دهند. بنابراین باید قسمت عمده ماده تاریک از چیزی غیر از پروتون‌ها و نوترون‌ها ساخته شده باشند.

نوترینوها مهمترین کاندیدهای ماده تاریک غیر باریونی بوده‌اند. محاسبات انجام شده بر اساس آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهند که جرم نوترینوی الکترون کمتر از ۱۲الکترون ولت، جرم نوترینوی میوآن کمتر از ۲۵۰کیلو الکترون ولت و جرم نوترینوی تاو کمتر از ۳۵ مگا الکترون ولت است. تعداد نوترینوهای موجود در کل کیهان در حدود سی میلیون برابر تعداد نوکلئون‌ها است، بنابراین چگالی جرمی کل ناشی از نوترینوها ممکن است ده برابر چگالی جرمی نوکلئون‌ها باشد و به همین دلیل این ذرات به نظر می‌توانند گزینه مناسبی برای ماده تاریک باشند.

نوترینوها به‌عنوان ماده تاریک احتمالی، بسته به جرم و سرعت حرکت‌شان، به دو دسته نوترینوهای داغ و سرد تقسیم می‌شوند. به دلیل سبکیِ نوترینوهای داغ، جرم کل آن‌ها در کیهان آن‌قدر نیست که بتواند ماده تاریک را به طور کامل شامل شود. -فراوانی نوترینوها در حدود ۳۰ درصد فراوانی فوتون‌های موجود در کیهان است.- اگر جرم متوسط آن‌ها را $۳۰eV$ بگیریم جرم کل نوترینوهای داغ در حدود $۱۰^{۱۶}$ برابر جرم خورشید می‌شود که معادل جرم یک ابرخوشه کهکشانی است. در مجموع

[۱۱] MACHO(Massive Compact Halo Object)

ماده تاریکِ داغ به‌وسیله شبیه‌سازی محاسبات عددی توزیع کهکشان‌ها در آسمان رد شده است. علاوه بر آن، نوترینو داغ نمی‌تواند نحوه تشکیل ساختارهای اولیه کهکشان‌ها را توضیح دهند[۱].
نوترینوهای سرد که با سرعتی بسیار کوچک‌تر از سرعت نور حرکت می‌کنندو جرم این ذرات ممکن است به بیش از ده‌ها مگا الکترون ولت نیز برسند، هنوز به عنوان کاندید ماده تاریک سرد معرفی می‌شوند [۵، ۱]. البته در بیش‌تر نظریه‌ها از نوترینوهای استریل [۱۲] به عنوان کاندید ماده تاریک نام می‌برند [۵]. نظریه ابر تقارن [۱۳] تعداد زیادی ذره را پیش‌بینی می‌کند که تاکنون موفق به کشف آن‌ها نشده‌ایم. از بین این ذرات، نوترالینو[۱۴]، اس نوترینو[۱۵] و گراویتونو[۱۶]، به‌عنوان کاندیدهای ماده تاریک مطرح می‌شوند[۵، ۴].

[۱۲] Sterile neutrinos

[۱۳] Super symmetric

[۱۴] Neutralino

[۱۵] Sneutrino

[۱۶] Gravitino

فصل ۳

ماده تاریک آناپولی

نظریه‌های زیادی در مورد ماهیت ماده تاریک و برهم‌کنش‌های آن نوشته شده است. یکی از نظریه‌ها که اخیرا مورد توجه قرار گرفته، ماده تاریک آناپولی است. در این نظریه ماده تاریک فرمیون مایورانای اسپین ۱/۲ است که از طریق ممان آناپول با ماده باریونی برهم‌کنش الکترومغناطیسی انجام می‌دهد.

۱.۳ فرمیون مایورانا

جواب عمومی معادله دیراک[۱] ذره آزاد به صورت زیر است [۲]:

$$\psi_L = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_p \sqrt{\frac{m}{2E_p}} \Big[\Big(b_{p+} e^{-\frac{\theta}{2}} |+\rangle + b_{p-} e^{\frac{\theta}{2}} |-\rangle \Big) e^{i(\vec{p}.\vec{r}-Et)} + \Big(d^*_{p+} e^{\frac{\theta}{2}} |-\rangle - d^*_{p-} e^{-\frac{\theta}{2}} |+\rangle \Big) e^{i(-\vec{p}.\vec{r}+Et)} \Big] \tag{۱.۳}$$

$$\psi_R = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_p \sqrt{\frac{m}{2E_p}} \Big[\Big(b_{p+} e^{\frac{\theta}{2}} |+\rangle + b_{p-} e^{-\frac{\theta}{2}} |-\rangle \Big) e^{i(\vec{p}.\vec{r}-Et)} + \Big(-d^*_{p+} e^{-\frac{\theta}{2}} |-\rangle + d^*_{p-} e^{-\frac{\theta}{2}} |+\rangle \Big) e^{i(+\vec{p}.\vec{r}+Et)} \Big] \tag{۲.۳}$$

زیرنویس R و L به ترتیب به راست‌گرد و چپ‌گرد بودن ذرات اشاره دارد.

به ازای هر تکانه‌ی $\vec{p}$، چهار ضریب مختلط مستقل از هم وجود دارد : $d^*_{p+}, d^*_{p-}, b_{p+}, b_{p-}$ که به ترتیب

---

[۱] Dirac equation

[۲] معادله دیراک ابتدا برای حالت سکون حل شده است، سپس با یک تبدیل لورنتس حالت عمومی را برای تکانه‌های غیر صفر بدست می‌آوریم. بنابراین پارامتر $\theta = tanh^{-1} \frac{v}{c}$ وارد می‌شود.