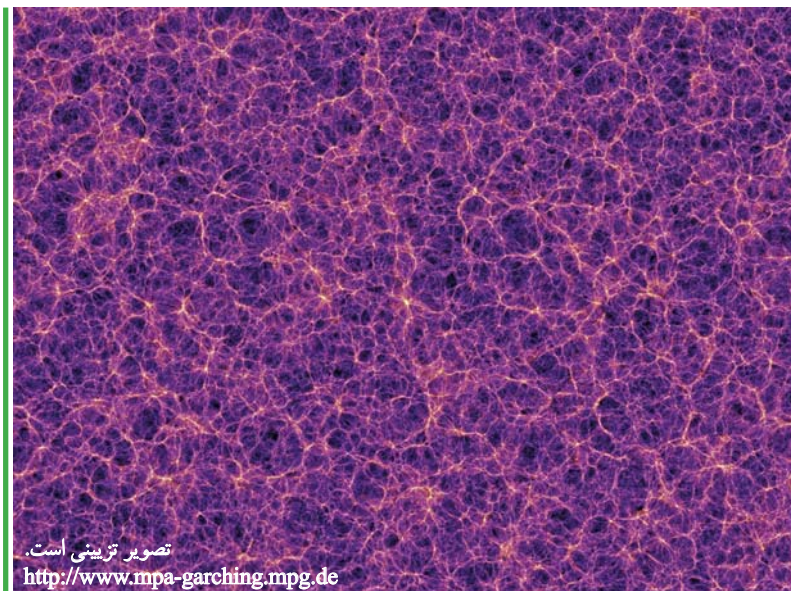


ماده‌ی تاریک

یاسمن فرزبان
پژوهشکده‌ی فیزیک، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی



تصویر تزیینی است.
<http://www.mpa-garching.mpg.de>

تصویر از شبیه‌سازی‌های
تشکیل ساختار در عالم
به دست آمده است. نقاط
روشن محل تراکم ماده‌ی
تاریک را در شبیه‌سازی‌ها
نشان می‌دهد.

پس از مروری کوتاه بر شواهد وجود ماده‌ی تاریک، ویژگی‌های این ماده را برمی‌شماریم. سپس به نقش این ذرات در تشکیل ساختارها می‌پردازیم. آن‌گاه، روش‌های جست‌وجوی ذرات سازنده‌ی ماده‌ی تاریک را مرور می‌کنیم.

مقدمه

در هشتاد سال گذشته مشاهدات گوناگون نجومی و کیهان‌شناسی انجام گرفته‌اند که تنها با حضور ماده‌ی معمولی شناخته‌شده در جهان در چارچوب نسبیت عام توضیح داده نمی‌شوند. سرعت حرکت ستاره‌ها به دور مرکز کهکشان، یکی از این مشاهدات است. اگر گرانش از گرانش نیوتونی تبعیت کند و تنها ماده‌ی موجود در کهکشان، ماده‌ی شناخته‌شده‌ی متشکل از هسته‌ها و الکترون‌ها باشد، ستاره‌های لبه‌ی کهکشان با سرعت‌های نسبتاً زیادشان نمی‌توانند در مدار خود باقی بمانند. توضیح متداول برای این مشاهده بر اساس وجود نوع جدیدی از ماده است که «ماده‌ی تاریک» نام گرفته است. ماده‌ی

تاریک از نظر الکتریکی خنثی است و در نتیجه عملاً با نور، برهم‌کنش ندارد. گرانش حاصل از این ماده‌ی جدید، ستاره‌ها را در مدار خود نگاه می‌دارد. برای توضیح حرکت ستاره‌ها راه‌حل‌های دیگری نیز وجود دارد که به‌جای فرض وجود ماده‌ی تاریک، در گرانش نیوتونی تصحیحاتی وارد می‌کنند [۱]. به این مدل‌ها، موند (از سرواژه‌های دینامیک نیوتونی تغییر یافته) گفته می‌شود. اما مشاهدات دیگری نیز مانند برخورد خوشه‌های کهکشانی گلوله‌ای^۲ و یا افت‌وخیز دمای تابش پس‌زمینه‌ی کیهان نیز به‌تازگی انجام شده است که تنها با تصحیح گرانش نیوتونی و یا تصحیح نسبیت عام نمی‌توان توضیح داد مگر آنکه در کنار تصحیح نسبیت عام، فرض وجود نوعی ماده‌ی تاریک هم پذیرفته شود. این درحالی است

خارج می‌شود. برهه‌ی این رخداد آن زمان است که آهنگ برهم‌کنش ماده‌ی تاریک با آهنگ انبساط جهان (پارامتر هابل) هم‌مرتب شود. از آن پس اگر ماده‌ی تاریک پایدار باشد تعداد ذرات ماده‌ی تاریک تقریباً ثابت می‌ماند ولی چگالی ماده‌ی تاریک به علت انبساط جهان کم می‌شود. به این روایت، روایت «ماده‌ی تاریک یخ‌بسته»^۳ می‌گویند.

این امکان هم وجود دارد که برهم‌کنش ماده‌ی تاریک با ماده‌ی معمولی چنان ناچیز باشد که در هیچ برهه‌ای از تحول جهان ماده‌ی تاریک با ماده‌ی معمولی به تعادل ترمودینامیکی نرسیده باشد. برای تولید ماده‌ی تاریک در جهان اولیه سازوکارهای گوناگون می‌توان فرض کرد. به‌طور مثال، ماده‌ی تاریک می‌تواند از واپاشی ذرات سنگین‌تر در برهه‌ای به وجود آید که امکان رسیدن به تعادل ترمودینامیکی نباشد. طبعاً، در این صورت، توزیع ذرات ماده‌ی تاریک به صورت تعادلی نخواهد بود.

سطح مقطع تولید ماده‌ی تاریک اغلب از سطح مقطع پراکندگی آن کمتر است. در نتیجه، در بازه‌ای از چگالی و دما، ماده‌ی تاریک می‌تواند در تعادل دمایی با محیط باشد (یعنی توزیع انرژی-تکانه‌ی آن توزیعی دمایی با دمای برابر با دمای محیط باشد) اما فراوانی آن با توزیع حالت تعادل ترمودینامیکی داده نشود. به‌طور مثال در این شرایط مجموع پتانسیل‌های شیمیایی ذره و پادذره ممکن است غیرصفر باشد.

ماده‌ی تاریک داغ، گرم و سرد

طبق نظریه‌های فعلی، ساختارهایی چون خوشه‌های کهکشان یا کهکشان‌ها از تحول افت‌وخیزهای بسیار کوچک در چگالی جهان به‌وجود آمده‌اند که پس از مرحله‌ی تورم عالم به‌جا مانده است. یکی از گواه‌های وجود ماده‌ی تاریک تحول همین افت‌وخیزهای چگالی است. اگر ماده‌ی معمولی تنها ماده‌ی موجود در عالم بود، افت‌وخیزهای کوچک در چگالی نمی‌توانست تا این اندازه رشد کند و ساختار بسازند. در اصطلاح می‌گویند ماده‌ی تاریک نقش داربست^۴ را در شکل‌گیری ساختار عالم بازی می‌کند.

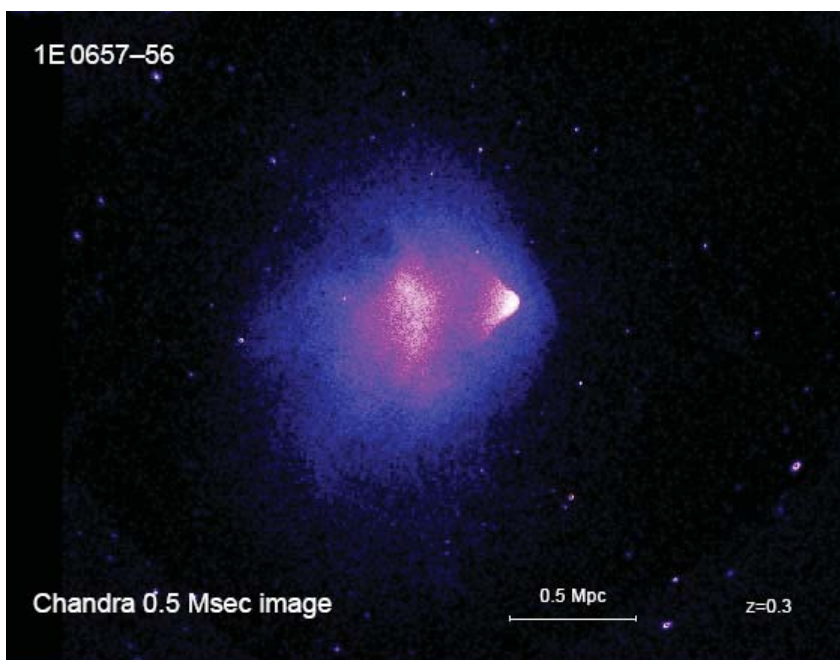
چنان‌که دیدیم حتی اگر ذرات ماده در جهان اولیه به تعادل دمایی با ذرات محیط رسیده باشند، پس از مدتی با افت دما و چگالی محیط از تعادل دمایی با محیط خارج می‌شوند. به عبارت دیگر مسافت پویش آزاد میانگین از مسافت هابل (وارون پارامتر هابل) بیشتر می‌شود. فرض کنید در بخشی از فضا چگالی ماده‌ی تاریک بیش از چگالی میانگین جهان باشد. اگر ذرات ماده‌ی تاریک نسبت به یکدیگر سرعت فرانسبیتی (یعنی سرعتی نزدیک به سرعت نور) داشته باشند و بتوانند آزادانه و بدون پراکندگی منتشر شوند ماده‌ی تاریک از این بخش از فضا پخش می‌شود، به اطراف می‌رود و فزونی چگالی در آن بخش از بین می‌رود. اما اگر ماده‌ی تاریک با سرعت غیر نسبیتی باشد، در دام گرانش آن بخش از فضا که چگالی بیش از میانگین دارد گرفتار می‌شود و رفته‌رفته چگالی آن بخش افزایش پیدا می‌کند.

بر این اساس ماده‌ی تاریک را سه دسته می‌کنند:

که تنها با فرض وجود ماده‌ی تاریک و بدون تصحیح نسبیت عام می‌توان هم‌همی این پدیده‌ها را به یک‌باره توضیح داد. در این نوشتار ما به مدل‌هایی می‌پردازیم که نسبیت عام را به شکلی که می‌شناسیم به کار می‌برند و مشاهداتی را که اشاره کردیم با فرض وجود ماده‌ی تاریک توضیح می‌دهند. در واقع افت‌وخیزهای دمای تابش پس‌زمینه دربارهِ وجود ماده‌ی تاریک حدود ۵۰۰ هزار سال پس از مه‌بانگ اطلاعاتی به ما می‌دهد. این نکته تلویحاً یعنی ماده‌ای که این هر دو پدیده را توضیح می‌دهد، باید در مدت‌زمان‌های از مرتبه‌ی عمر جهان پایدار باشد. به عبارت دیگر ماده‌ی تاریک باید نیمه‌عمر دست‌کم بیش از عمر جهان یعنی ۱۳ میلیارد سال داشته باشد. چنان‌که خواهیم دید در اغلب مدل‌هایی که برای ماده‌ی تاریک می‌سازند تقارنی وجود دارد که نتیجه‌اش پایداری ماده‌ی تاریک است. با این حال مدل‌هایی نیز وجود دارند که ماده‌ی تاریک در آنها ناپایدار است و به ذرات سبک‌تر وامی‌پاشد. در چنین صورتی عمر ماده‌ی تاریک باید از عمر جهان بیشتر باشد. در چارچوب مدل استاندارد ذرات بنیادی تنها ذره‌ای که بار الکتریکی ندارد و عمرش زیادتر از عمر جهان است نوترینو است. اما چنان‌که در بخش بعد خواهیم دید نوترینو در مدل استاندارد ذرات بنیادی نمی‌تواند نامزد مناسبی برای ماده‌ی تاریک باشد.

روایت‌های زایش ماده‌ی تاریک در جهان اولیه

در اغلب مدل‌های موجود، برهم‌کنش ماده‌ی تاریک با ماده‌ی معمولی ضعیف و سطح مقطع برخورد بسیار کوچک و ناچیز است. اما در جهان اولیه پس از مه‌بانگ که چگالی محیط بسیار زیاد بوده در اثر همین برهم‌کنش ضعیف، ماده‌ی تاریک می‌توانسته است تولید شود و با ماده‌ی معمولی به تعادل ترمودینامیکی برسد. در نتیجه، دو پارامتر دمای محیط و پتانسیل شیمیایی در جهان اولیه، چگالی ماده‌ی تاریک را معین می‌کنند. پس از گذشت زمان چگالی به دلیل انبساط جهان کم می‌شود و ماده‌ی تاریک از حالت تعادل ترمودینامیکی



خوشه‌های کهکشانی «گلوله» یا «فشنگ» (1E 0657-558) در این تصویر (متعلق به رصدخانه‌ی پرتو X چاندرا) دیده می‌شوند که در حدود صد میلیون سال پیش به هم برخورد کرده‌اند. مرکز جرم این خوشه‌ها را می‌توان با اندازه‌گیری گزنیایی کهکشان‌های پس‌زمینه معین کرد. این مرکز جرم، بر مرکز جرم ماده‌ی مرئی منطبق نیست. براساس این بررسی‌ها ادعا می‌شود که این خوشه بهترین شاهد بر وجود ماده‌ی تاریک است. منبع: http://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_Cluster.

متفاوت باشند. چنین مدل‌هایی پادمتقارن خوانده می‌شوند.^۷ علی‌الاصول می‌توان بیش از یک نوع ذره‌ی ماده‌ی تاریک داشت. به همین جهت برای ماده‌ی تاریک مدل‌های بسیار وجود دارد.

جست‌وجوی مستقیم و غیرمستقیم ماده‌ی تاریک

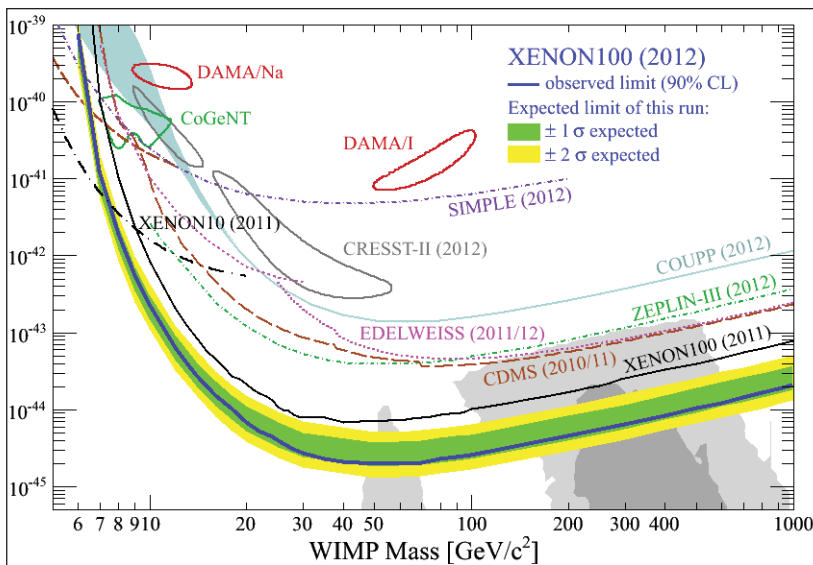
در بین نامزدهایی که برای نقش ماده‌ی تاریک مطرح شده‌اند برهم‌کنش ضعیف ویمپ‌ها با ماده‌ی معمولی می‌تواند منجر به یافتن آنها در آشکارگرها شود. روش‌های جست‌وجوی ماده‌ی تاریک را می‌توان سه دسته کرد: (۱) جست‌وجوی مستقیم؛ (۲) جست‌وجوی غیرمستقیم؛ (۳) تولید ماده‌ی تاریک در شتاب‌دهنده‌ها. در روش اول نمونه‌ای از جنس ژرمانیوم یا سدیم یدید (NaI) یا زنون در دمای کم به دور از پیش‌زمینه‌ی ذرات دیگر در آزمایشگاه بررسی می‌شود. انتظار می‌رود ذرات ماده‌ی تاریک در پیرامون ما به وفور یافت شود. اگر اثری از برهم‌کنش ماده‌ی تاریک با هسته‌های نمونه مشاهده شود ماده‌ی تاریک به‌طور مستقیم کشف شده است. چنین آشکارگرهایی به جرم ذرات ماده‌ی تاریک و سطح مقطع پراکندگی آن از پروتون و نوترون حساس هستند. نتایج چنین آزمایش‌هایی با نمودارهایی همانند آنچه که در شکل می‌بینید داده می‌شود. در این شکل دیده می‌شود که در دنیا چندین آزمایش با این روش در جست‌وجوی ماده‌ی تاریک هستند. نکته‌ی جالب این است که نتایج برخی از این آزمایش‌ها با یکدیگر سازگار نیست. آزمایش دامای [۳] در ایتالیا و آزمایش‌های CoGeNT [۴] و CDMS [۵] در آمریکا سیگنال‌هایی مشاهده کرده‌اند که می‌توان کشف مستقیم ذره‌ی ماده‌ی تاریک تعبیر کرد. اما از سیگنالی که در آزمایش CoGeNT مشاهده شده برمی‌آید که جرم ذره‌ی ماده‌ی تاریک باید حدود $10^{-41} \times 2$ سانتی‌متر مربع باشد. اما 10^{-43} و 10^{-44} سانتی‌متر مربع پراکندگی حدود $10^{-41} \times 2$ سانتی‌متر مربع باشد. اما آزمایش‌های دیگری هم وجود دارند که چنین سیگنالی مشاهده نمی‌کنند و به‌ازای هر مقدار جرم ذره‌ی ماده‌ی تاریک حد بالا روی سطح مقطع پراکندگی آن می‌گذارند. تاکنون قوی‌ترین حد برای سطح مقطع پراکندگی

ماده‌ی تاریک داغ، ماده‌ی تاریک گرم و ماده‌ی تاریک سرد. ماده‌ی تاریک داغ «گریزپا»ست و فزونی چگالی‌ای را که می‌توانسته است تحول یابد و ساختارهایی در ابعاد کهکشان‌ها را به وجود آورد از بین می‌برد. اگر ماده‌ی تاریک عالم، ماده تاریک داغ باشد انتظار داریم ابتدا ساختارهای بزرگ چون خوشه‌های کهکشانی و پس از آن ساختارهای کوچک‌تر چون کهکشان به وجود آیند. اما مشاهدات خلاف این را نشان می‌دهد و بر اساس این مشاهدات، نظریه‌ی ماده‌ی تاریک داغ رد شده است. اما در چارچوب مدل‌های ماده‌ی تاریک گرم یا سرد آن‌طور که از مشاهدات برمی‌آید ابتدا کهکشان‌ها به وجود می‌آید و سپس ساختارهای بزرگ‌تر چون خوشه‌های کهکشانی.

ساختارهای کوچک‌تر مانند کهکشان‌های کوتوله در اثر ماده‌ی تاریک گرم از بین می‌روند. از این جهت ماده‌ی تاریک گرم بهتر از ماده‌ی تاریک سرد با مشاهدات هم‌خوانی دارد زیرا تعداد کهکشان‌های کوتوله‌ای که مشاهده می‌شود کمتر از تعدادی است که در چارچوب مدل ماده‌ی تاریک سرد پیش‌بینی می‌شود. با این حال ماده‌ی تاریک سرد پارادایمی است که بیشتر فیزیک‌پیشه‌ها پذیرفته‌اند و براساس آن نظریه‌پردازی کرده‌اند. در چارچوب مدل‌هایی که ماده‌ی تاریک سرد جرمی بیش از 1 MeV (یک هزارم جرم پروتون) دارد، جرم ماده‌ی تاریک گرم بین 0.1 MeV تا 0.1 MeV است و جرم ماده‌ی تاریک داغ از 0.01 MeV کم‌تر است. نوترینوهای معمولی در مدل استاندارد می‌توانند نقش ماده‌ی تاریک داغ را بازی کنند. اما با توجه به اینکه مدل ماده‌ی تاریک داغ رد شده است می‌دانیم همه‌ی ماده‌ی تاریک نمی‌تواند از این نوع ذرات تشکیل شده باشد. در چارچوب مدل استاندارد ذرات بنیادی، نامزدی برای ماده‌ی تاریک گرم یا سرد نداریم. نوترینوی سترون^۵ (نوترینوای فرضی که حتی برهم‌کنش ضعیف نیز ندارد) با جرمی از مرتبه‌ی یک هزارم جرم الکترون یکی از نامزدهای ایفای نقش ماده‌ی تاریک گرم است. در چارچوب مدل‌های ابرمتقارن گراویتیونوها به‌عنوان نامزد ماده‌ی تاریک گرم مطرح می‌شوند. در چارچوب مدل‌هایی که فراسوی مدل استاندارد ذرات بنیادی می‌روند نامزدهایی برای ماده‌ی تاریک سرد وجود دارند. به‌دسته‌ای از این نامزدها ذره‌های پرجرم با برهم‌کنش ضعیف یا به‌اختصار ویمپ (WIMP)^۶ می‌گویند.

ویژگی‌های ماده‌ی تاریک

تاکنون تنها اثرات گرانشی ماده‌ی تاریک مشاهده شده است. در نتیجه، اطلاعات ما در مورد ویژگی‌های ذرات ماده‌ی تاریک بسیار اندک است. حتی اگر فرض کنیم ماده‌ی تاریک در جهان اولیه به تعادل ترمودینامیکی رسیده باشد در ساختن مدل، آزادی‌های بسیار وجود دارد. جرم ماده‌ی تاریک می‌تواند هر مقداری بیش از 0.033 MeV باشد [۱]. اسپین ماده‌ی تاریک را کسی نمی‌داند. در چارچوب بیشتر مدل‌ها اسپین ماده‌ی تاریک صفر یا $\frac{1}{2}$ و اسپین گراویتیونو^۳ است. به‌تازگی ماده‌ی تاریک با اسپین ۱ نیز مطرح شده است [۲]. ماده‌ی تاریک می‌تواند با پادذره‌ی خود یکی باشد یا نباشد. مثلاً اگر ماده‌ی تاریک با میدان نرده‌ای حقیقی توصیف شود با پادذره‌ی خود یکی است اما اگر با میدان نرده‌ای مختلط توصیف شود با پادذره‌ی خود متفاوت است و در این حالت دوم، چگالی‌های ماده‌ی تاریک و پادذره‌ی آن می‌توانند



نتایج آزمایش‌های جست‌وجوی مستقیم ماده‌ی تاریک. منحنی‌های باز حد بالای مشاهداتی بر روی سطح مقطع پراکندگی ماده‌ی تاریک از نوکلئون‌ها را نشان می‌دهند. منحنی‌های بسته بازه‌ی جرم و سطح مقطع بر خوردی را نشان می‌دهد که می‌تواند سیگنال مشاهده شده توسط آزمایش‌های مختلف را توضیح دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود این نتایج با یکدیگر در تضاد هستند. ناحیه‌ی خاکستری، پیش‌بینی در چارچوب مدل ابرمتقارن کمینه می‌باشد.

منبع شکل: XENON100: Phys. Rev. Lett 109 (2012).

ماده‌ی تاریک در آزمایش‌های ^{100}Xe [6] و ^{136}Xe [7] معین شده است.

در جست‌وجوی غیرمستقیم ماده‌ی تاریک، هدف آشکار کردن ذرات حاصل از نابودی زوج‌ذرات ماده‌ی تاریک است. در مدل‌های مختلف پیش‌بینی می‌شود که زوج‌ذرات ماده‌ی تاریک می‌توانند به زوج بوزون‌های W ، زوج بوزون‌های Z ، زوج کوارک و پادکوارک b ، زوج فوتون، زوج نوترینو یا ذرات دیگر تبدیل شود. ذرات ناپایدار حاصل از این نابودی‌ها، مثلاً W ، خود و امی‌پاشند و ذرات پایداری مانند فوتون، پروتون، نوترینو و یا الکترون و پوزیترون به وجود می‌آورند. چنین ذرات پایداری را می‌توان آشکار کرد. آهنگ فنی زوج ماده‌ی تاریک با توان دوم چگالی متناسب است. در نتیجه برای یافتن ماده‌ی تاریک باید سراغ مناطقی از عالم رفت که گمان می‌رود چگالی ماده‌ی تاریک در آنجا بیشتر باشد: انتظار می‌رود در نقاطی مثل مرکز کهکشان یا مرکز زمین و خورشید به دلیل گرانش بیشتر، چگالی ماده‌ی تاریک بیشتر باشد. آشکارگرهای متفاوت از جمله آشکارگر ماهواره‌ای $^{\text{Fermi}}\text{LAT}$ [8] فوتون‌های مرکز کهکشان را رصد می‌کند و آشکارگرهای فضایی $^{\text{PAMELA}}$ [9] و $^{\text{AMS02}}$ [10] ذرات پایدار باردار را آشکار می‌کنند. این آشکارگرها تاکنون چندین سیگنال دال بر وجود ماده‌ی تاریک گزارش کرده‌اند اما هیچ‌کدام از این نتایج قطعی نیست.

ماده‌ی تاریک می‌تواند انرژی جنبشی خود را در اثر پراکندگی از هسته‌های ماده‌ی خورشید یا زمین از دست بدهد و در دام میدان گرانشی آنها گرفتار آید. در نتیجه در طول عمر این اجرام، چگالی ماده‌ی تاریک در مرکز آنها می‌تواند به میزانی افزایش یابد که نوترینوهای حاصل از نابودی زوج ماده‌ی تاریک در درون آنها در آشکارسازهای زمینی قابل مشاهده شود. آشکار کردن نوترینوهای پرنرژی ($E \gg 10 \text{ MeV}$) از مرکز خورشید گواهی قطعی اما غیرمستقیم بر وجود ماده‌ی تاریک خواهد بود. تاکنون در جست‌وجوها سیگنالی مشاهده نشده است.

در برخورد ذراتی مانند پروتون یا الکترون و پوزیترون در شتاب‌دهنده‌هایی مانند ال‌اچ‌سی، وی‌مپ می‌تواند به وجود آید. از آنجا که این ذرات پایدار هستند و بار الکتریکی نیز ندارند در آشکارگرهای این شتاب‌دهنده‌ها مشاهده نخواهند شد؛ اما می‌توان از «کمبود انرژی-تکانه» در فرآیند، پی به وجود آنها برد. تاکنون در شتاب‌دهنده‌ها سیگنالی که بتوان نشانه‌ی تولید ماده‌ی تاریک تعبیر کرد یافت نشده است.

خلاصه و نتیجه‌گیری

هرچند اثرات گرانشی ماده‌ی تاریک مدت‌هاست که مشاهده و ثبت شده است، ذرات این ماده تاکنون با قطعیت در آزمایش‌ها آشکار نشده‌اند و اطلاعات ما از ویژگی‌های این ذره‌ی فرضی بسیار اندک است. با توجه به تأثیری که این ذرات در تشکیل ساختارها دارند می‌دانیم که جرم آنها باید بیش از 0.033 MeV باشد اما کسی تاکنون حد بالا برای جرم این ذرات پیدا نکرده است. از طرف دیگر می‌دانیم که این ذرات بار الکتریکی و برهم‌کنش ندارند. با توجه به اینکه ماده‌ی تاریک در جهان اولیه تولید شده و تا به امروز مانده است نیمه‌عمر آن باید از عمر جهان بیشتر باشد. در مدل استاندارد ذرات بنیادی، نامزدی برای ماده‌ی تاریک وجود ندارد. در مدل‌های فراسوی مدل استاندارد نامزدهای متعددی برای ماده‌ی تاریک مطرح می‌شود و ساختن مدل‌هایی که نامزد جدیدی برای ماده‌ی تاریک به میان آورند از موضوع‌های داغ فیزیک ذرات بنیادی است. برای آشکار کردن مستقیم و غیرمستقیم ماده‌ی تاریک آزمایش‌های متعددی طراحی شده است. در این مقاله اساس این آزمایش‌ها را مرور کردیم. هرچند در برخی از این آزمایش‌ها سیگنالی مشاهده شده است که شاید بتوان آنها را گواهی بر وجود ماده‌ی تاریک گرفت اما هنوز نتیجه و تعبیر این مشاهدات قطعی نیستند. به نظر می‌رسد برخی از این مشاهدات با یکدیگر در تضاد هستند. مدل‌سازان تلاش می‌کنند مدل‌هایی بسازند که در چارچوب آنها این تناقض‌ها از بین بروند.

مراجع

- [1] B.Famaey and S.McGaugh, Living Rev. Rel. 15, 10 (2012).
- [2] M.Viel et al., arXiv:1306.2314.
- [3] Y. Farzan and A. R. Akbarieh, JCAP 1210, 026 (2012).
- [4] <http://people.roma2.infn.it/~dama/web/home.html>.
- [5] <http://cogent.pnnl.gov/>.
- [6] <http://cdms.berkeley.edu/>.
- [7] http://xenon.astro.columbia.edu/XENON100_Experiment/.
- [8] TEXONO Collaboration, arXiv:1303.0925 [hep-ex].
- [9] <http://www-glast.stanford.edu/>.
- [10] <http://hep.fi.infn.it/PAMELA/>.
- [10] <http://www.ams02.org/>.

زیرنویس:

1. MOND (MODified Newtonian Dynamics)
2. bullet clusters
3. freeze-out
4. scaffolding
5. sterile neutrino
6. Weakly Interacting Massive Particle
7. asymmetric dark matter models

برای ارسال مقاله به صفحه‌ی راهنمای نویسندگان در وبگاه «فیزیک روز» مراجعه کنید.

www.psimag.ir

