ماده تاریک

نویسنده: یاسمن فرزان

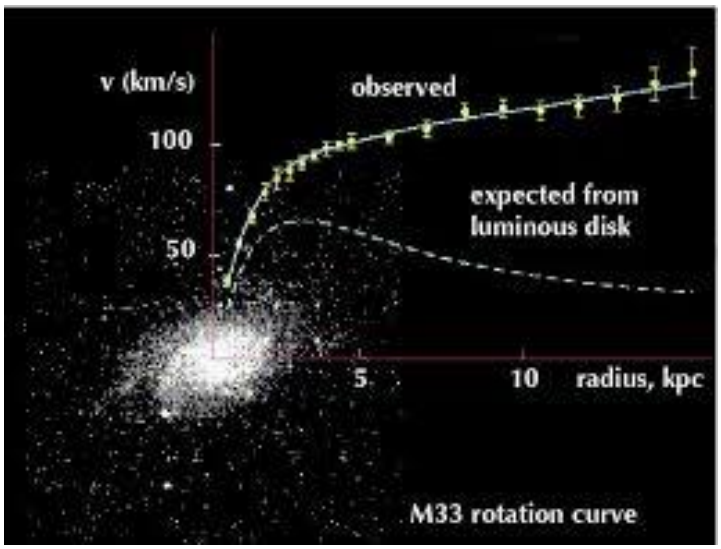
پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه دانش های بنیادی

در این درسنامه ابتدا به طور گذرا شواهد وجود ماده تاریک را مرور می‌کنیم. سپس ویژگی‌های ذراتی را که کاندیدای مناسبی برای ماده تاریک می‌توانند باشند برمی‌شماریم. آن‌گاه برخی از مدل‌های معروف ماده تاریک را معرفی می‌کنیم.

در انتها به آزمایش‌ها و مشاهداتی که با استفاده از آنها می‌توان به اثرات ذرات تشکیل‌دهنده‌ی ماده تاریک آشکار کرد می‌پردازیم.

شواهد دال بر وجود ماده تاریک

بشر از دیرباز با اثرات نیروی گرانش آشنا بوده است. نیوتن حدود سیصد سال پیش شدت این نیرو را به طور کمّی فرمول‌بندی کرده است. از آن زمان تاکنون آزمایش‌ها و مشاهدات متعددی برای آزمودن این فرمول بندی، طراحی و اجرا شده‌اند. مشاهدات و آزمایش‌ها در ابعاد منظومه شمسی و کوچک‌تر همگی با دقت زیاد این فرمول بندی را (یا به طور دقیق‌تر تعمیم این فرمول‌بندی را در قالب نسبیت عام) تایید می‌نمایند. با این حال در ابعاد بزرگ‌تر مشاهدات چندی هستند که با اثرات گرانشی ماده مشاهده شده، همخوانی ندارند. شاید معروفترین و ملموس‌ترین این شواهد سرعت ستارگان در کهکشان باشد. در نمودار نشان داده شده در شکل، داده-نقاط، سرعت مشاهده شده ستارگان به دور مرکز کهکشان ام-33 را برحسب فاصله از مرکز کهکشان نشان می‌دهند. منحنی خط‌چین، بر حسب فاصله سرعتی را نشان می‌دهد که با گرانش ماده روشن داخل کهکشان (مشتمل بر ستارگان و گاز بین-ستاره‌ای) می‌تواند در مدار حول مرکز کهکشان نگاه داشته شود. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید سرعت مشاهده شده ستارگان بسیار بیشتر از این حد هست. بنابراین در چارچوب گرانش نیوتنی، نیاز به ماده‌ی تاریک در کهکشان هست تا گرانش لازم را برای نگاه داشتن ستاره‌هایی با چنین سرعت‌های بالا در مدار اعمال نماید.



علاوه بر این مشاهده، مشاهدات اختر فیزیکی و کهکشانی متعدد دیگری نیز وجود دارد که با حضور ماده تاریک در چارچوب گرانش نیوتنی و یا نسبیت عام توضیح داده می‌شوند. قبل از این که این مشاهدات را برشماریم لازم به تذکر هست که در مقالات متعدد راه حل‌های جایگزینی برای توضیح سرعت ستارگان در کهکشان مبتنی بر اصلاح گرانش نیوتنی پیشنهاد شده است. اما پارادایم غالب در مقالات حضور ماده تاریک است. دراین درسنامه تمرکز ما بر پارادایم ماده تاریک از دیدگاه فیزیک ذرات خواهد بود.

اثرات گرانشی ماده تاریک در مشاهدات متعدد دیگری نیز دیده شده‌اند. حضور ماده تاریک برای توضیح حرکت کهکشان‌ها در خوشه کهکشانی لازم هست. در واقع در دهه 30 میلادی، زویکی با مشاهده حرکت کهکشان‌ها در خوشه کهکشانی کُما به حضور ماده تاریک پی‌برد. حضور ماده تاریک برای تشکیل ساختارهای بزرگ در جهان نیز لازم هست. می‌دانیم ساختارهای بزرگ مانند خوشه‌های کهکشانی از رشد افت وخیزهای کوچک در پس زمینه ماده در طول زمانی که ازهنگام تورم به این سو سپری شده‌است به وجود آمده‌اند. بدون حضور ماده تاریک نیروی گرانشی ماده معمولی برای چنین رشدی کافی نمی‌بود. مشاهدات همگرایی نور ستارگان دوردست که در مسیر رسیدن به زمین از خوشه کهکشان عبور می‌کنند نیز دال بر وجود ماده تاریک هست. به عبارت دیگر حضور تنها ماده روشن در این توده‌های جرم نمی‌تواند بر این میزان از همگرایی نور بیانجامد. با استفاده از این تکنیک همین طور می‌توان به پروفایل چگالی ماده تاریک پی‌برد. دراوایل دهه گذشته میلادی با همین روش پروفایل ماده در خوشه کهکشانی گلوله (bullet cluster) به دست آمد. خوشه کهکشانی گلوله از برخورد دو خوشه با یکدیگر تشکیل شده‌است.

(در واقع نام خوشه کوچکتر خوشه کهکشانی گلوله است.)

مشاهده نشان می‌دهد که مرکز جرم گاز درون خوشه‌ای بر مرکز جرم ماده که با تکنیک همگرایی نور به دست می‌آید منطبق نیست. این ملاحظه شاهدی در تحکیم پارادایم ماده تاریک است چرا که با تصحیح گرانش نمی‌توان چنین انحرافی بین دو مرکز جرم را به آسانی توضیح داد (البته مرجع [1] این ادعا را زیر سئوال برده‌است.) اما در چارچوب پارادایم ماده تاریک این انحراف به سادگی قابل توضیح است. گاز درون خوشه‌ها در اثربرخورد پراکنده شده‌است ولی ماده تاریک موجود در آنها بدون برخورد از یکدیگر عبور کرده است بنابراین انحراف مشاهده شده به وجود آمده‌است. از این ملاحظه می‌توان حدی بر نسبت سطح مقطع پراکندگی σ ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک به جرم m_X تعیین کرد. بنا به مرجع [2] این حد به صورت زیر است

$$\sigma/m_X < 1cm^2 gr^{-1}$$

همبستگی زاویه‌ای افت و خیزهای دمایی در تابش ریز موج پس-زمین(Cosmic Microwave Background (CMB) به مسافتی که امواج صوتی در پلاسمای کیهانی از زمان تورم تا برهه تشکیل اتم‌ها (recombination) پیموده‌اند بستگی دارد. این مسافت به نوبه خود با چگالی ماده (که بیشتر به صورت ماده تاریک هست) تعیین می‌شود. بنابراین با بررسی همبستگی زاویه‌ای می‌توان چگالی ماده تاریک را تعیین نمود. با بررسی نتایج ماهواره پلانک[3] اطلاعات زیر به دست آمده‌است

$$\Omega_m = 0.315 \pm 0.017$$

که در آن $\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$ و ρ_m چگالی ماده غیر نسبیتی و

$$\rho_c = \frac{3}{8\pi G_N} H_\circ^2 \simeq 0.52 \times 10^{-5} GeV\ cm^{-3}$$

لازم به ذکر هست که در این درسنامه ما از واحدهایی استفاده می‌کنیم که در آن

$$\hbar = C = k_B = 1$$

منظور از k_B ثابت بولتزمن است. بنابراین کمیت‌های جرم و دما ابعاد انرژی دارند و با واحدهایی نظیر الکترون-ولت بیان می‌شوند.

ویژگی‌های ماده تاریک

با این که سهم ماده تاریک به چگالی انرژی در جهان با دقت چشمگیری از داده‌های کیهانشناسی استخراج شده‌است، هنوز اطلاعات ما در مورد ویژگی‌های ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک ناچیز هست. در واقع اغلب اطلاعاتی که از مشاهدات در مورد ویژگی‌های ماده تاریک به دست آمده بر پیش فرض‌هایی استوار است. با زیر

سئوال بردن این پیش فرض‌ها می‌توان درستی گزاره ها در مورد ویژگی‌های ماده تاریک را زیر سئوال برد. کمبود اطلاعات مشاهداتی در مورد ماده تاریک راه را بر مدل‌سازی در مورد کاندیداهای ماده تاریک باز می‌کند. البته هر مدل برای ماده تاریک باید خوش تعریف باشد. مدل پدیده شناسانه قابل اعتنا برای ماده تاریک، مدلی است که پیش بینی‌های مشاهده پذیر دارد. این پیش بینی‌ها را باید با دقت با مشاهدات تجربی مطابقت داد و آزمود. ویژگی‌های ماده تاریک که در این بخش برمی‌شماریم در واقع خصوصیات کاندیدای ماده تاریک در چارچوب مدل‌های معروف است که بر پیش فرض‌هایی استوار می‌باشد.

یکی از بدیهی‌ترین ویژگی‌های ماده تاریک که وجه تسمیه آن نیز هست ساطع نکردن نور است. ماده تاریک برعکس گاز بین ستاره‌ای یا گاز درون خوشه‌های کهکشانی از خود نوری گسیل نمی‌کند تا به مدد آن دیده شود. ساده‌ترین کاندیدای ماده تاریک که با این ملاحظه به ذهن می‌رسد اجرامی نظیرسیاره‌ها، کوتوله‌های قهوه‌ای و یا سیاهچاله‌ها هستند که از ذرات معمولی تشکیل شده‌اند اما کم نورتر از آن هستند که در مشاهدات اخترفیزیکی آشکار شوند. تکنیک همگرایی ضعیف می‌تواند چنین اجرامی را بنمایاند. مشاهدات همگرایی ضعیف نشان می‌دهد که این نوع اجرام با جرم در بازه $0.6 \times 10^{-7} M_{\odot} < M < 15 M_{\odot}$ نمی‌تواند ماده تاریک غالب در جهان را تشکیل دهند[4].

با اندازه‌گیری سرعت چرخش ستارگان حول مرکز کهکشان برحسب فاصله از مرکز و با فرض تقارن استوانه‌ای می‌توان توزیع ماده تاریک را به دست آورد. این مشاهدات نشانگر آن هستند که هاله ماده تاریک در کهکشان‌ها شعاع بسیار بزرگتری از شعاع دیسک کهکشانی (که از ماده معمولی تشکیل شده‌است) دارد. این در حالی است که انتظار می‌رود افت و خیزهای اولیه در چگالی پس زمینه ماده معمولی وماده تاریک پس از مرحله تورم به یکسان در فضا توزیع شده باشند. ماده معمولی با ساطع کردن فوتون از خود می‌تواند انرژی از دست بدهد ودر نتیجه سریع‌تر از ماده تاریک متراکم می‌شود. این ملاحظه نشان می‌دهد که نه تنها ماده تاریک فوتون معمولی نمی‌تواند ساطع کند بلکه راهی مشابه برای از دست‌دادن انرژی و سرد شدن نظیر ساطع کردن ذرات بی‌جرم جدید مانند ذره فرضی "فوتون تاریک" نیز بر آن محدود است. در غیر این صورت توزیع ماده تاریک کهکشان متراکم تر از آن می‌بود که مشاهدات نشان می‌دهند.

همان‌طوری که در بخش قبل دیدیم مشاهده جدا شدن توزیع ماده تاریک از توزیع ماده معمولی در خوشه‌های کهکشانی که با هم برخورد داشته‌اند حد بالا روی سطح مقطع پراکندگی ذرات ماده تاریک از یکدیگر به ما می‌دهد. علاوه بر آن برهمکنش دورُبرد ذرات ماده تاریک با یکدیگر منجر به کروی شدن هاله کهکشان‌ها می‌شود. اما مشاهدات نشان می‌دهد که اغلب هاله‌های کهکشانی بیضوی می‌باشند. این مشاهده وجود برهمکنش دوربرد بین ذرات ماده تاریک را نفی می‌کند. بنابراین ذرات ماده تاریک نباید بار الکتریکی داشته باشند.

اثرات ماده تاریک در مشاهده پذیرها از زمان تشکیل اتم‌ها (حدود صد هزار سال بعد از مهبانگ) تا به امروز دیده شده‌اند. درنتیجه ماده تاریک باید عمری بیش از عمر جهان داشته باشد. اگر واپاشی ماده تاریک منجر به تولید ذرات مدل استاندارد نظیر فوتون شود با توجه به تعداد بسیار زیاد ذرات ماده تاریک در هاله‌های کهکشان ها انتظار می‌رفت فوتون‌های ناشی از واپاشی مشاهده شوند. عدم مشاهده چنین فوتون‌هایی حد بالا روی آهنگ واپاشی ماده تاریک به فوتون می‌گذارد که چند مرتبه بزرگی کمتر از معکوس عمر جهان هست.

به عبارت دیگر زمانی که لازم هست ماده تاریک به فوتون و ذرات دیگر واپاشی کند چند مرتبه از عمر جهان بیشتر هست. در بخش‌های بعد به طور کمی به این مسئله می‌پردازیم.

در مورد جرم ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک نیز اطلاعات ما بسیار محدود است. با این پیش فرض که انرژی ذرات ماده تاریک در ابتدای عالم از مرتبه دمای فوتون‌های پیش زمینه بود می‌توان ماده تاریک را برحسب جرم آن به سه بازه تقسیم کرد به گونه‌ای که در هر کدام از این بازه‌ها، تاثیر ماده تاریک بر تشکیل ساختار متفاوت هست. در برهه‌ای از زمان، ماده تاریک از تعادل جنبشی با ذرات معمولی بیرون آید و آزادانه منتشر می‌شود. دمای متناظر را با T_d نشان می‌دهیم. اگراین دما خیلی کمتر از جرم ذرات ماده تاریک (m_X) باشد، در زمان جفت‌شدگی، ذرات ماده تاریک در زمان واجفتیدگی غیرنسبیتی خواهند بود و ماده تاریک سرد خوانده می‌شود. حالت $T_d > m_X$ خود به دو دسته تقسیم می‌شود: اگر جرم ماده تاریک از دمای برابری ماده-تابش (منظور دمای برهه‌ای که سهم ماده غیر نسبیتی و تابش به انرژی کیهان برابر می‌شود) بیشتر باشد (یعنی وقتی $m_X > 1eV$) ماده تاریک گرم است. به حالت عکس($m_X < 1eV$) ماده تاریک داغ می‌گوییم. در هرکدام از این حالات، تاثیر ماده تاریک بر تشکیل ساختار متفاوت است. تا وقتی $T_d \gtrsim T \gtrsim M_X$، ذرات ماده تاریک ازمناطقی که چگالی ماده تاریک در آن بالاست به سمت مناطقی که چگالی ماده تاریک در آن پایین هست پخش می‌شوند. اندازه افق در زمانی که دمای فوتون‌های پس زمینه به حدود جرم ماده تاریک $(T \sim m_X)$ می‌رسد برابر است با

$$l_H \sim \frac{M_{pl}^*}{T^2} \sim \frac{M_{pl}^*}{M_X^2}$$

که در آن

$$M_{pl}^* = \frac{M_{pl}}{1.66\sqrt{\hat{g}_X}} = 4 \times 10^{18} GeV$$

با عددگذاری درمی‌یابیم که به ازای $M_X \sim 1\ keV$

$$l_{X,0} = l_H \frac{T}{T^\circ} \sim 0.1\ Mpc$$

و به ازای $M_X \sim 1\ eV$

$$l_{X,0} \sim 100\ Mpc$$

که در آن اندیس 0 نشانگر مقدار کمیت در زمان حال است. ضریب $\frac{T}{T^\circ}$ اثر انبساط عالم را از زمان دمای T تا دمای T° لحاظ می‌کند.

به علت پخش‌شدن ماده تاریک نسبیتی پس از $T < T_d$ به مناطق رقیق‌تر انتظار داریم که از افت و خیزهای با ابعاد کمتر از l_H در زمان $T \sim m_X$ ساختاری حاصل نشود. ابعاد هاله کهکشان ها از مرتبه صد کیلوپارسک هست. اما به خاطر داشته‌باشیم چگالی متوسط ماده تاریک در کهکشان چیز حدود $10^5 - 10^6$ مرتبه بیشتر از متوسط چگالی ماده تاریک در عالم است. بنابراین ماده تاریک موجود در هاله یک کهکشان از شعاعی حدود 50 تا 100 برابر بزرگتر باید متراکم شده‌باشد. در نتیجه اگر پخش ماده تاریک نسبیتی نباشد، افت‌وخیزهایی با ابعاد ده مگاپارسک منجر به تشکیل کهکشان‌ها می‌شوند. با این ملاحظه و این واقعیت که کهکشان‌های بیشماری در جهان وجود دارند می‌توان دریافت که جرم ماده تاریک نمی‌تواند از حدود keV کوچک‌تر باشد. به عبارت دیگر ماده تاریک نمی‌تواند داغ باشد. اما ماده تاریک گرم با جرمی حدود keV پذیرفته شده است. در واقع ماده تاریک گرم از نظرتوضیح ساختارهای کوچک به ماده تاریک سرد برتری‌هایی دارد. نخست آن که در چارچوب ماده تاریک سرد تعداد پیش بینی‌شده کهکشان‌های ماهواره‌ای (کهکشان های نسبتا کوچک که حول کهکشانی بزرگ تر می چرخند) بیش از مقدار مشاهده شده است. دوم آن که شبیه سازی‌ها با ماده تاریک سرد (بدون لحاظ کردن ماده معمولی) پروفایل مرکز هاله کهکشان را در شعاع کمتر از 0.1کیلوپارسک تیزتر از آن چه که مشاهده نشان می‌دهد پیش بینی می‌کنند. ولی پیش بینی ماده تاریک گرم با این مشاهدات همخوانی بهتری دارد. دقت پیش‌بینی و مشاهده هنوز آن قدر زیاد نیست که بتوان به طور قطعی ماده تاریک سرد را رد نمود. به لحاظ تئوری مدل‌های ماده تاریک سرد محبوب‌تر هستند.

پیش از آن که دیگر ویژگی‌های ماده تاریک را برشماریم بر فهرست ذرات بنیادی شناخته شده نگاهی بیاندازیم تا دریابیم که آیا ذره شناخته شده‌ای می‌تواند نقش ماده تاریک را ایفا کند. تنها ذرات بنیادی پایدار، جرمدار و بدون بار شناخته شده نوترینوها هستند. نوترینوها در جهان اولیه می‌توانند به تعادل ترمودینامیکی با سایر ذرات بنیادی برسند چرا که به ازای دماهای بیشتر از MeV آهنگ برهمکنش های ضعیف نوترینوها بزرگتر از آهنگ انبساط هابل هست. اما از آزمایش‌های زمینی آموختیم جرم نوترینوها کمتر از 2.2 الکترون-ولت است. بنابراین نوترینوهای شناخته شده تنها می‌توانند نقش ماده تاریک داغ را ایفا نمایند. چنان که گفته شد مشاهدات ماده تاریک داغ را

رد می‌کنند. بنابراین در میان ذرات شناخته شده کاندیدای مناسبی برای ماده تاریک وجود ندارد. همان طور که در بخش قبل توضیح آن رفت مقدار عددی چگالی متوسط ماده تاریک در جهان از مشاهدات به دست آمده است. هر مدل کامل ماده تاریک باید مکانیزمی برای تولید این مقدار ماده تاریک در جهان اولیه در بر داشته باشد. سناریوهای مختلفی برای تولید ماده تاریک در جهان اولیه پیشنهاد شده است که در اینجا به برخی از آنها اشاره می‌کنیم. یک امکان آن است که ماده تاریک از واپاشی ذره سنگین‌تر در زمانی که دمای عالم از جرم آن ذره کمتر باشد به وجود آید. اگر اختلاف جرم زیادی بین جرم ذره ناپایدارمادر و ذرات تولید شده وجود داشته باشد ذرات نهایی به هنگام واپاشی نسبیتی خواهند بود. در ساختن مدل‌هایی که این سناریو را در بردارند باید دقت نمود که اثرات ناشی از این ذرات نسبیتی با مشاهدات همخوانی داشته باشند. به طور مثال، اگر واپاشی بعد از برهه هسته‌زایی باشد و ذرات نسبیتی حاصل از واپاشی با هسته‌ها برهمکنش داشته‌باشند می‌توانند بر فراوانی هسته‌های مختلف اثر بگذارند. فراوانی هسته‌ها در جهان به دقت کافی اندازه گیری شده‌اند و با دقت خوبی با مدل هسته زایی در جهان اولیه سازگارند. بنابراین مدل ماده تاریک نباید این پیش بینی‌ها را بر هم بزنند.

سناریوی دیگری که برای تولید ماده تاریک در جهان اولیه پیشنهاد شده است سناریوی Freeze-in است. در این سناریو ماده تاریک در دماهای بالاتر از جرم آن می‌توانند در اثربرهمکنش ذرات استاندارد تولید شوند اما آهنگ تولید به قدری کوچک هست که چگالی ماده تاریک هرگز به مقدار تعادل ترمودینامیکی نمی‌رسد. چگالی ماده تاریک در دمای $T\sim m_X$ با انتگرال روی آهنگ تولید ماده تاریک برواحد حجم همراه (commoving) از زمان بازگرمایش (بلافاصله بعد از تورم) تا زمانی که دما به $T\sim m_X$ می‌رسد داده می‌شود. اگر به ازای انرژی‌های بالا سطح مقطع تولید ماده تاریک به مقدار مجانبی ثابت میل کند، چگالی ماده تاریک به دمای بازگرمایش وابسته خواهد بود. به عبارت دیگر دمای اولیه پس از بازگرمایش در حافظه ماده تاریک باقی می‌ماند. پس از رسیدن به دمای $T\sim m_X$ انرژی برای تولید ذرات ماده تاریک کافی نخواهد بود.پس اگر واپاشی صورت نگیرد تعداد کل ذرات ماده تاریک ثابت باقی می‌ماند اما چگالی آن به علت انبساط عالم به صورت $(\frac{T}{m_X})^3$ کاهش می‌یابد. معروفترین کاندیدا برای ماده تاریک که به این صورت تولید می‌شود ذره فرضی گراویتینو در چارچوب برخی مدل های ابرمتقارن هست که برهمکنش آن با معکوس جرم پلانک داده می‌شود و در نتیجه آهنگ تولید آن بسیار کند می‌باشد.

محبوب‌ترین سناریو برای تولید ماده تاریک در جهان اولیه سناریوی Freeze-out هست. در این سناریو ذرات ماده تاریک در جهان اولیه به تعادل ترمودینامیکی می‌رسند اما وقتی دما از حدود 0.05 جرم ذرات کمتر می‌شود از تعادل ترمودینامیکی خارج می‌شوند و از آن پس تعداد کل ذرات ماده تاریک ثابت می‌ماند و در نتیجه چگالی با $(\frac{T}{m_X})^3$ افت پیدا می‌کند.

برای سادگی فرض کنیم که چگالی ذرات ماده تاریک و پادذرات آن برابر است و هر دو با n_X داده می‌شود. این فرض در اغلب مدل‌ها ارضا می‌شود. در واقع به وجود آمدن عدم تساوی نیاز به مکانیزم نسبتا پیچیده‌ای دارد (نظیر مکانیزم‌هایی که برای توضیح عدم تقارن بین چگالی ماده معمولی و پادماده ساخته و پرداخته شده‌اند). امکان دیگر آن هست که ذره ماده تاریک و پاد ذره آن برهم منطبق باشند. (مثلا ذرات ماده تاریک از ذرات اسکالر حقیقی یا فرمیون‌های مایورانا تشکیل شده باشند.) در این صورت نیز فرمول‌بندی و بحث زیرین صادق هست. فرض کنید سطح مقطع فنای زوج X و $\overline{X}$ به ذرات استاندارد با σ_{ann} داده می‌شود. تحول چگالی ماده تاریک با زمان با رابطه بولتزمن به صورت زیر داده می‌شود

$$\frac{dn_X}{dt} = -3Hn_X + < \sigma_{ann} V > (n_X^2 - n_{X,eq}^2)$$

که در آن $n_{X,eq}$ چگالی ماده تاریک در صورت برقراری تعادل ترمودینامیکی است:

$$n_{X,e_q} = g_X \left(\frac{M_X T}{2\pi}\right)^{3/2} e^{-m_X/T}$$

و g_X درجات آزادی ذره ماده تاریک را نشان می‌دهد

در اغلب مدل‌ها فنای زوج ماده تاریک در حالت تکانه زاویه‌ای مداری صفر (s-wave) صورت می‌گیرد و در نتیجه در تقریب اول، σ_{ann} به سرعت بستگی ندارد. حل این معادله نشان می‌دهد که وقتی دما به $T_f = \frac{M_X}{\log\ (\frac{g_X m_X m_{pl}^* \sigma_{ann}}{(2\pi)^{3/2}})}$ می‌رسد تعداد کل ذرات ماده تاریک ثابت باقی می‌ماند و چگالی به صورت $(T/m_X)^3$ با انبساط عالم کاهش می‌یابد [5]. سهم ماده تاریک به چگالی عالم اکنون با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\Omega_X = \frac{2m_X n_X(t_\circ)}{\rho_c} = 3 \times 10^{-10} \left(\frac{GeV^{-2}}{\sigma_{ann}}\right) \frac{1}{\sqrt{g_b}} \frac{1}{2h^2} \log\ (\frac{g_X m_X m_{pl}^* \sigma_{ann}}{(2\pi)^{3/2}})$$

در این سناریو برعکس سناریوی Freeze-in چگالی ماده تاریک به دمای بازگرمایش بستگی ندارد. رسیدن به تعادل ترمودینامیکی حافظه ماده تاریک از زمان‌های پیشتر را از بین می برد. به علاوه بستگی به جرم تنها لگاریتمی است ولی بستگی آن به σ_{ann} به صورت معکوس خطی است. درنتیجه چگالی اندازه‌گیری شده جرم ماده تاریک را مشخص نمی‌کند ولی سطح مقطع فنای زوج ماده تاریک به دقت خوبی معین می‌گردد:

$$\sigma_{ann} \simeq 1\, pb = 10^{-36} cm^2$$

در مورد اسپین ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک هیچ اطلاعی نداریم. هرچند اغلب مدل‌ها اسپین ماده تاریک را برابر صفر یا 1/2 فرض می کنند، این فرض هیچ گونه پایه مشاهداتی ندارد. ذره فرضی گراویتینو که از جمله کاندیداهای معروف ماده تاریک هست اسپین برابر 3/2 دارد. در سری مقالات [6] کاندیدایی با اسپین یک برای ماده تاریک معرفی شده است.

سناریوی ویمپ

فرض‌کنیم جرم ذرات ماده تاریک و هر ذره جدیدی که در دیاگرام فاینمن مربوط به فنای زوج ماده تاریک ظاهر می‌شود m_X باشد. ضریب جفت‌شدگی ماده تاریک با ذرات شناخته شده را g_X بگیریم. با یک برآورد ابعادی سطح مقطع فنای زوج ماده تاریک به زوج ذرات استاندارد را می‌توانیم به صورت زیر بنویسیم:

$$\sigma \sim \frac{g_X^4}{4\pi\, m_X^2}$$

در بسیاری از تئوری‌ها مقدار g_X از مرتبه تئوری الکتروضعیف پیش بینی می‌شود. محبوب‌ترین این تئوری‌ها نظریه کمینه ابرمتقارن مدل استاندارد هست که ذره فرضی نوترالینو در آن نقش ماده تاریک را بازی می‌کند.

به خاطر آورید که در چارچوب سناریوی Freeze-out، مقدار عددی σ_{ann} باید از حدود پیکوبارن باشد تا فراوانی مشاهده شده ماده تاریک به دست آید. اگرمقدار عددی g_X حدود ضریب جفت شدگی‌ها در تئوری الکتروضعیف باشد، m_X باید در محدوده 100GeV تا 1TeV باشد. این ملاحظه از دیدگاه آزمایشگاهی بسیار هیجان‌انگیز است. چرا که اگر جرم و ضریب جفت شدگی ماده تاریک به ذرات استاندارد از این حدود باشد انتظار داریم در آزمایشی چون LHC این ذرات بتوانند تولید شوند. همین‌طور در این بازه امکان برای جست و جوی مستقیم و غیر مستقیم ماده تاریک فراهم است.

به این کلاس از مدل‌ها WIMP اطلاق می‌شود که مخففWeakly Interacting Massive Particle می‌باشد. آزمایش‌های متعددی برای جست و جوی ویمپ‌ها طراحی شده‌اند.

نوترینوی استریل کاندیدای ماده تاریک

همان‌طوری که در بخش‌های قبل اشاره شد نوترینوهای شناخته شده نمی‌توانند نقش ماده تاریک را ایفا کنند. اما ذرات فرضی نوترینوی استریل با جرمی حدود چند کیلوالکترون ولت که با نوترینوهای معمولی در می‌آمیزند از جمله معروف‌ترین کاندیداها برای ماده تاریک هستند. این نوترینوها به واسطه درآمیختگی با نوترینوهای معمولی که با پارامتر θ داده می‌شود می‌توانند به نوترینوی معمولی و فوتون واپاشی کنند:

$$\Gamma(\nu_s \to \nu \quad \gamma) = 1.38 \times 10^{-29} sec^{-1} (\frac{\sin^2 2\theta}{10^{-7}})(\frac{m_s}{1keV})^5$$

که در آن m_s جرم نوترینوی استریل می‌باشد.

توجه کنید که ذرات ماده تاریک در کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی سرعت‌های غیرنسبیتی دارند. درنتیجه انرژی فوتون ناشی از واپاشی برابر نصف جرم نوترینوهای استریل خواهد بود. به عبارت دیگر انتظار داریم طیف فوتون تک رنگ باشد. اگر جرم نوترینو استریل حدود چند کیلوالکترون ولت باشد پرتو فوتون حاصله، پرتو ایکس خواهد بود. آشکارسازهای متعددی بر فراز ماهواره‌ها نظیر

XMM-Newton یا Chandra Observatory (یا در آینده نزدیک Astro-H) به دنبال یافتن چنین خطی در طیف پرتو ایکس از کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی هستند. هر از گاهی ادعا می‌شود چنین خطی که نشانگر واپاشی ماده تاریک هست یافت شده‌است ولی تا کشف قطعی فاصله داریم. در حال حاضر از روی حدهای مشاهداتی می‌دانیم اگر ماده تاریک از نوترینوی استریل با جرم چند کیلوولت ساخته شده باشد طول عمر واپاشی آن به فوتون از حدود 10^{21} سال (یعنی از حدود 10^{11} برابر طول عمر جهان) بیشتر است.

جست وجوی ذرات تشکیل دهنده ماده تاریک

بسته به ویژگی های مدل ماده تاریک و اثرات آزمایشگاهی آن راهکارهای جست و جو برای ماده تاریک نیز متفاوت باید باشد. در بخش قبل دیدیم که راهکار استاندارد برای جست و جوی نوترینوی استریل به عنوان ماده تاریک، مشاهده خط تک-رنگ در طیف پرتو ایکس از ناحیه هایی از فضا مانند خوشه های کهکشانی یا کهکشان های ماهواره ای کروی است که چگالی ماده تاریک در آن زیاد است. این نوع جست و جو در دسته جست و جوی غیر مستقیم ماده تاریک قرار می گیرد.در زیر برخی از راهکارها که برای یافتن ذرات ویمپ (به عنوان کاندیدای ماده تاریک) به کار گرفته می شوند مرور می شود:

راهکار جست‌وجوی مستقیم ماده تاریک: چگالی ماده تاریک در کهکشان‌ها بسیار بیشتر از چگالی متوسط ماده تاریک در جهان است. علت آن است که ماده در کهکشان متراکم شده است. چگالی ماده تاریک در منطقه‌ای از فضا که زمین نیز در آن واقع است حدود $0.3 - 0.5\ GeV\ cm^3$ برآورد شده است. اگر جرم ماده تاریک حدود 100 GeV باشد حدود چند ماده تاریک در هر لیتر وجود خواهد داشت. سرعت متوسط این ذرات نسبت به زمین از مرتبه سرعت

خورشید حول مرکز کهکشان و حدود $200\ km/sec$ می‌باشد. درنتیجه شار نسبتاً بزرگی از ماده تاریک در هر ثانیه از هر سطحی بر زمین عبور می‌کند.اگر این ذرات با هسته‌های موجود در ماده معمولی برهمکنش کنند انرژی پس‌زنی از مرتبه چند کیلو الکترون ولت برجای خواهند گذاشت. علی‌الاصول با اندازه‌گیری این انرژی پس‌زنی می‌توان به وجود ماده تاریک پی برد. طبعاً بر روی سطح زمین شار قوی‌ای از ذرات معمولی مانند پرتو کیهانی با برهمکنش بسیار شدیدتر از برهمکنش ماده تاریک وجود دارد که اثر مشابه به جا می‌گذارند. برای کاهش این پیش زمینه، چنین آزمایش‌هایی را در اعماق زمین (در معادن متروکه یا تونل‌هایی زیر کوه‌های بلند) انجام می‌دهند. سنگ‌وخاک بالای آزمایشگاه پرتو کیهانی را متوقف می‌کند و در نتیجه شار پرتو کیهانی که به نمونه آزمایشگاهی می‌رسد بسیار کوچک‌تر است. آزمایش‌های متعددی از این دست در آزمایشگاه‌های مختلف جهان وجود دارند. نکته جالب آن است که نتایج برخی از این آزمایش‌ها با بقیه سازگاری ندارند. به عنوان مثال آزمایش داما واقع در آزمایشگاه گران ساسو در نزدیکی شهر رُم اثری می‌بینند که با ماده تاریکی با جرم حدود$\mathrm{GeV}10$ و سطح مقطع برخورد از حدود $10^{-40}cm^2$ همخوانی دارد. اما آزمایش‌های دیگر مانند $\mathrm{XENON100}$ ویا LUX اثری از ماده تاریک نمی‌بینند. دست کم در قالب ساده‌ترین مدل ماده تاریک، این دو آزمایش بخشی از فضای پارامتر جرم- سطح مقطع پراکندگی ماده تاریک را که با نتایج داما سازگار است رد می‌کنند. ساختن مدل‌های پیچیده‌تر ماده تاریک که این ناسازگاری را رفع می‌کنند از جمله موضوعات پژوهشی باز است. آزمایش LUX نشان می‌دهد که به ازای $m_X{\sim}10-100Gev$ سطح مقطع برخورد مستقل از اسپین ذرات ماده تاریک با نوکلئون‌ها از $10^{-45}cm^2$ کوچک‌تر است. به ازای جرم‌های کوچک‌تر حد آزمایشگاهی بر سطح مقطع برخورد ضعیف‌تر می‌شود. علت آن است که به ازای جرم‌های کوچک‌تر انرژی پس زنی در برخورد ذره ماده تاریک و هسته کاهش می‌یابد و دیگر قابل اندازه‌گیری نیست. این راهکار برای جست‌وجوی مستقیم ماده تاریک در حال حاضر بسیار جدی دنبال می‌شود و حدهای آزمایشگاهی ماه به ماه بهبود می‌یابند.

راهکار جست‌وجوی غیرمستقیم ماده تاریک:این راهکار بر اساس مشاهده‌ی ذرات پایدار حاصل از واپاشی و یا فنای زوج ماده تاریک در مناطقی از فضا بنا نهاده شده است که در آنها چگالی ماده تاریک نسبتا بالاست. هنوز نمی‌دانیم ذرات حاصل از واپاشی یا فنای زوج ماده تاریک چه ذراتی

هستند. مدل‌های مختلف ذرات متفاوتی به عنوان ذرات حاصل از فنای زوج ماده تاریک پیش‌بینی می‌کنند. به طور مثال، در بازه‌ای از پارامترها در چارچوب مدل کمینه ابرمتقارن استاندارد ذرات ناشی از فنای زوج ماده تاریک زوج W^+W^- یا ZZ هستند. در بازه‌ای دیگر از فضای پارامتر این مدل انتظار داریم که ذرات نهایی ناشی از فنای زوج ماده تاریک $b\bar{b}$ باشد. چنین پیش‌بینی‌هایی در بسیاری از سایر مدل‌های ماده تاریک نیز صادق هست. برخی مدل‌ها ذرات نهایی را زوج ذره ناپایدار مدل استاندارد مانند HH، $\tau\bar{\tau}$، $\mu\bar{\mu}$ یا زوج کوارک و پاد کوارک پیش‌بینی می‌کنند. این ذرات ناپایدار می‌توانند به ذرات پایدار واپاشی کنند و شارّی از الکترون، پوزیترون، فوتون، نوترینوها و هسته‌ها و پادهسته‌های پایدار به وجود می‌آورند. ذرات نهایی ثانویه می‌توانند به آشکارسازهای ما برسند. در چارچوب برخی دیگر از مدل‌ها، فنا یا واپاشی ماده تاریک می‌تواند مستقیماً زوجی از ذرات پایدار به وجود آورد. در این صورت، با توجه به این که سرعت‌های ذرات ماده تاریک امروزه غیرنسبیتی هستند، طیف انرژی ذرات نهایی تک‌رنگ خواهد بود. ذرات بدون بارالکتریکی نظیر فوتون و نوترینو بدون آن که دچار تغییر جهت یا انرژی شوند به آشکارسازها می‌رسند. اما ذرات باردار نظیر الکترون و پوزیترون‌ها در میدان مغناطیسی کهکشان‌ها یا فضای بین کهکشانی تغییر جهت می‌دهند. یا در اثر برخورد با ذرات بین ستاره‌ای انرژی خود را ازدست می‌دهند. همین‌طور الکترون یا پوزیترون پرانرژی می‌توانند در مسیر خود با فوتون‌های پیش زمینه کیهانی برخورد کنند و قسمتی از انرژی خود را به آنها دهند. حاصل شار فوتون با انرژی بالاتر خواهد بود که می‌تواند توسط آشکارسازها مشاهده شود. به این برخورد، برخورد کامپتون معکوس گفته می‌شود.

درزیر برخی از ذرات پیام‌آور از ماده تاریک را بر می‌شماریم.

نوترینوها: اگر ماده تاریک جرمی بیش از حدود چند GeV و برهمکنش با سطح مقطع برخورد بیش از حدود $10^{-9}pb$ با هسته داشته باشد، در اثر برخورد با ذرات تشکیل دهنده اجرامی مانند خورشید انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند و به دام چاه پتانسیل گرانشی خورشید می‌افتند. رفته رفته چگالی ماده تاریک در درون این اجرام افزایش می‌یابد. آهنگ فنای زوج ماده تاریک با توان دوم چگالی ماده تاریک متناسب است. بنابراین آهنگ فنای زوج ماده تاریک در درون ستاره‌ها بسیار بیشتر از متوسط درجهان خواهد بود. چگالی ماده معمولی در داخل خورشید چنان زیاد است که فوتون

و ذرات باردار ناشی از فنای زوج ماده تاریک در داخل این ستاره جذب می‌شوند. اما انتظار می‌رود که نوترینوها که تنها برهمکنش الکتروضعیف دارند بدون پراکندگی خورشید را ترک کنند و به آشکارسازهای روی زمین برسند. البته به ازای انرژی‌های بیشتر از حدود GeV 500 خورشید برای نوترینوها نیز کدر می‌شود ولی درچارچوب سناریوی ویمپ، ما انتظار داریم شاری از نوترینوها با انرژی کمتر از حدود GeV 500 و بالاتر از چند GeV از خورشید خارج شود. در فرآیند همجوشی هسته‌ها نیز که در مرکز خورشید صورت می‌گیرد نوترینوها تولید می‌شوند. این نوترینوها که نوترینوهای خورشیدی نامیده می‌شوند انرژی‌ای کمتر از MeV 15دارند و در نتیجه با اندازه گیری انرژی از نوترینوهای ناشی از فنای زوج ماده تاریک متمایز می‌شوند. تلسکوپ‌های نوترینو نظیر آشکارساز عظیم آیس‌کیوب که در یخ‌های قطب جنوب نصب شده است علی‌الاصول می‌توانند نوترینوهای ناشی از فنای زوج ماده تاریک در مرکز کهکشان را آشکار سازند. البته تاکنون آیس‌کیوب شاری که بتوان آن را به این نوع نوترینوها نسبت داد نیافته است و تنها حدّی روی شار فرضی این نوترینوها منتشر شده است.

فوتون ها: واپاشی و فنای زوج ماده تاریک می‌تواند منجر به شار فوتون با انرژی دربازه‌های مختلف شود. آشکارسازهای متعددی بر زمین و برفراز ماهواره‌ها به بررسی طیف شار فوتون در بازه‌های مختلف انرژی از نقاط مختلف فضا می‌پردازند. اگر زوج ماده تاریک مستقیم به زوج فوتون تبدیل نشوند ما انتظار داریم طیف فوتونی تک‌رنگ از مناطقی نظیر مناطق نزدیک مرکز کهکشان، خوشه‌های کهکشانی و غیره ببینیم. اگر چنان که در سناریوی ماده تاریک سرد نظیر ویمپ انتظار می‌رود، جرم ماده تاریک از حدود چند keV 10 بیشتر باشد، چنین طیف تک‌رنگی نشانگر قاطعی بر واپاشی یا فنای زوج ماده تاریک خواهد بود چرا که منبع دیگری برای تولید چنین طیف تک‌رنگ فوتون در انرژی‌های بالاتر از چند ده کیلوالکترون ولت نیست. اما به ازای انرژی‌های کمتر طیف تک‌رنگ را می‌توان به گذارهای اتمی در یون‌های سنگین موجود در پلاسمای بین کهکشانی یا بین ستاره‌ای نسبت داد. تمییز دادن این دو دقت بسیار می‌خواهد. طیف فوتون‌های ثانویه پیوسته خواهد بود. منابع ستاره‌ای و سایر منابع استاندارد هم می‌توانند

منجر به طیف پیوسته از فوتون‌ها شوند. برای تشخیص اثرات ناشی از ماده تاریک تحلیل‌های پیچیده‌ای لازم است. هر از گاهی اعلام می‌شود که طیف فوتونی یافت شده است که می‌توان آن را به ماده تاریک نسبت داد. اما تاکنون هیچ‌کدام از این ادعاها به طور قطع ثابت نشده‌اند. تثبیت سیگنال دال بر ماده تاریک دشواری‌های بسیاری دارد که به برخی از آنها اشاره شد.

پادذرات: انتظار می‌رود در واپاشی و یا فنای زوج ماده تاریک ذرات و پادذرات به یک میزان تولید شوند. اما پادذرات پیام‌آوران مناسب‌تری برای کشف ماده تاریک هستند چون منابع جایگزینی که بتوانند آنها را تولید کنند کمترند. هم اکنون آشکارساز AMS02 که بر International Space Station نصب است و مجهز به میدان مغناطیسی می‌باشد به جست‌وجوی پاد ذرات می‌پردازد. شارّ پادپروتون مشاهده شده با پیش بینی‌های استاندارد همخوانی دارد اما مقدار شار پوزیترون مشاهده شده از پس زمینه انتظاری بیشتر است. این فزونی می‌تواند از ماده تاریک نشأت گرفته باشد. اما هنوز برای نتیجه‌گیری قطعی زود است چرا که منابعی مانند تپ-اخترها هم می‌توانند منجر به چنین فزونی‌ای شوند. با بررسی طیف پوزیترون با انرژی‌های بالاتر امید است که بتوان به منشا این فزونی پوزیترون پی‌برد. اگر پوزیترون‌ها ناشی از ذرات ماده تاریک با جرم مشخص باشند انتظار داریم طیف آن به ازای انرژی‌های بالاتر از جرم ماده تاریک قطع شود.

مراجع

1) G. W. Angus, B. Famaey and H. Zhao, " Can MOND take a bullet? Analytical comparisons of three versions of MOND beyond spherical symmetry," Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 371 (1) 138-146, arXiv: astro-ph/0606216. http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/moti_bullet.html;

2) M. Markevitch et al, "Direct constraints on the dark matter self-interaction cross section from the merging galaxy cluster 1E0657-56," Astrophys. J. 606 (2004) 819-824, astro-ph/0309303.

3) Planck collaboration, "Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters," Astron Astrophys. 2014, arXiv:1303.5076.

4) EROS-2 collaboration, "Limits on the MACHO content of the galactic halo from the EROS-2 survey of the Magellanic Clouds," Astron. Astrophys. 469 (2007) 387-404, astro-ph/0607207.

(5 D. Gorbunov and V. Rubakov, Introduction to the theory of the early universe, world scientific.

(6 Y. Farzan and A. Rezaei Akbarieh, "VDM: A model for Vector Dark Matter," JCAP 1210 (2012) 26, arXiv:1207.4272; "Natural explanation for 130 GeV photon line within vector boson dark matter model," Phys. Lett. B 724 (2013) 84-87, arXiv:1211.4685; "Decaying vector dark matter as an explanation for the 3.5 keV from galaxy clusters," arXiv:1408.2950.