مـــــادهٔ تاریک

دان لینکن[1]، گردآوری و ترجمه: **مریم نادمی**
کارشناسی ارشد فیزیک، گرایش کیهان شناسی

چکیده

شک نیست که معماهای کیهانی حل نشدهٔ بسیاری وجود دارد. کهکشان‌ها سریع‌تر از آن می‌چرخند که بتوان حرکت آن‌ها را با قانون‌های نیوتون و جرم درخشان توضیح داد. کهکشان‌های تک در پیرامون خوشه‌های کهکشانی به قدری سریع حرکت می‌کنند که خوشه‌ها در طول زمان باید پراکنده شده باشند. عدسی گرانشی که به لحاظ کیفی مانند میکرولنزینگ توصیف شده در اینجا در مقیاس وسیع وجود دارد و مقادیر بسیار عظیمی از جرم مشاهده نشده را نشان می‌دهد که در سراسر عالم پخش شده است.

بحث دربارهٔ مادهٔ تاریک گفت و گوی علمی جاری را تشکیل می‌دهد، در حالی که بیشتر جامعهٔ علمی فرضیهٔ مادهٔ تاریک سرد را ترجیح می‌دهند. اما این جر و بحث به هیچ‌وجه پایان نیافته است. تا زمانی که مادهٔ تاریک در بسیاری از آزمایش‌ها مشاهده شود و حکایت یکسانی را بیان کند و تا وقتی که مادهٔ تاریک در آزمایشگاه‌های فیزیک ذرات تولید شود، هویت و حتی وجود مادهٔ تاریک باید پرسشی باز باقی بماند: پرسشی که یکی از وسوسه انگیزترین و مهم‌ترین پرسش‌ها در فیزیک معاصر است.

کلیدواژه‌ها: مادهٔ تاریک، کهکشان راه شیری، خوشه‌های کهکشانی مادهٔ تاریک سرد، دوران کهکشانی

عالم در فضا تاریک، تاریک است، منظورم سیاهی آسمان شب نیست. زیرا وقتی سایه زمین را ترک کنید و وارد فضا شوید، نورهای زیادی شما را احاطه کرده‌اند که هر کجا را نگاه کنید چشمک می‌زنند. اما با وجود میلیاردها میلیارد ستاره و کهکشان ساگان[2]، حقیقت شگفت‌انگیز آن است که مادهٔ معمولی که من و شما از آن ساخته شده‌ایم فقط ۵ درصد موجودی انرژی عالم را تشکیل می‌دهد. منظرهٔ درخشان آسمان‌ها فقط لایهٔ نازک تزئینی روی یک کیک بزرگ تاریک است.

طبق جدیدترین برآوردها، مادهٔ معمولی صرفاً ٤/٦ درصد عالم را تشکیل می‌دهد، و مادهٔ مرسوم به «مادهٔ تاریک» ۲۲/۷ درصد آن را. یک مؤلفه حتی شگفت‌انگیزتر کیهان «انرژی تاریک» است که ۷۲/۸ درصد موجودی انرژی و مادهٔ عالم متشکل از آن است. این مقاله شناخت کنونی ما از مادهٔ تاریک و اینکه چرا بسیاری از اخترشناسان از وجود آن اطمینان دارند را شرح می‌دهد. یکی از وجوه بررسی وجود مادهٔ تاریک اهمیت آموزشی هم دارد، چون شاید به لحاظ اینکه تنها مسئله بغرنج در مرزهای کیهانی است که می‌توان آن را فقط با استفاده فیزیک پایه مبتنی بر جبر فهمید منحصر به فرد باشد.

اولین سرنخی که اخترشناسان در مورد اینکه شاید تلسکوپ‌های آن‌ها تمام ماجرا را بیان نمی‌کند در اختیار داشتند اندکی پس از چاپ یک مقالهٔ ادوین هابل[3] در سال ۱۹۲۵ به‌دست آمد. هابل با ترکیب رصدهای اخترشناسان دیگر با یافته‌های خود جامعهٔ علمی را از وجود کهکشان‌های دیگر آگاه ساخت، که پیامد آن این بود که مادر کهکشانی متعلق به خودمان یعنی کهکشان راه شیری زندگی می‌کنیم. تشخیص اینکه راه شیری مجموعهٔ متراکمی از ستارگان است که با نیروی گرانشی به هم پیوند یافته‌اند، برتیل لیندبلاد[4] نظریه‌پرداز و یان اورت[5] رصدکننده (که ابر اورت به نام اوست) را بر آن داشت که پیش‌بینی‌های نیوتونی دوران راه شیری را با مشاهده‌ها مقایسه کنند. نتایج آن روشن بود. راه شیری تندتر از آن می‌چرخید که اصول نیوتونی و مقدار مادهٔ مشاهده شده پیش‌بینی می‌کردند کار لیند بلاد و اورت باعث شد که اورت در سال ۱۹۳۲ بگوید که به نظر می‌رسد جرم موجود در راه شیری دو تا سه برابر چیزی باشد که می‌توان مشاهده کرد. البته، این در سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ بود که سازگاری داده‌ها با نظریه با ضریب دو در واقع بسیار خوب به حساب می‌آمد. کاملاً امکان داشت که توضیح سادهٔ (خطای رصد) در مورد آن صادق باشد. در سال ۱۹۳۳ فریتس تسویکی[6] خوشه کهکشانی گیسو را بررسی می‌کرد و اطمینان یافت که کهکشان‌های واقع در پیرامون خوشه سریع‌تر از آن حرکت می‌کردند که در پیوند گرانشی با مرکز کهکشان باقی بمانند. این اختلاف بسیار بیشتر از آن بود که اورت با جرم درخشان بتواند به‌حساب فقط ۱۰ درصد گرانی لازم برای حرکت این کهکشان‌ها بگذارد. مسئله جدی شد. تلاش‌های بعدی برای اندازه‌گیری جرم کهکشان‌ها با استفاده از پدیدهٔ عدسی گرانشی به این تنش‌ها اضافه شد. تسویکی اصطلاح «جرم تاریک» را برای توصیف این مؤلفه نامرئی کیهان ابداع کرد.

در دهه‌های بعد، رصدهای بسیاری از این عقیده که مادهٔ تاریک همه‌جا هست حمایت کرد، از حرکت خوشه‌های کهکشانی فوق‌الذکر، تا پدیده عدسی گرانشی در مورد اجسامی مانند NGC٤٥٥٥، یک کهکشانی بیضوی احاطه شده با گاز هیدروژن در دمای ۱۰/۰۰۰/۰۰۰K. دمای این گاز به اندازه‌ای زیاد است که اگر چیزی در کهکشان آن را نگه نمی‌داشت باید پراکنده می‌شد. با این همه، دلیل وجود مادهٔ تاریک که درک آن برای شاگردان فیزیک پایه از همه راحت‌تر است منحنی‌های چرخش کهکشان‌هاست.

اخترشناسان می‌توانند با استفاده از انتقال دوپلر سرعت

ایدهٔ کلی مادهٔ تاریک این است که ماده‌ای در عالم‌وجود دارد که نور را گسیل یا جذب نمی‌کند

ستارگان در کهکشان‌ها را اندازه بگیرند. به علاوه، حتی می‌توانند از رابطه‌های شناخته شده بین درخشندگی و رنگ ستارگان تا جرم ستاره استفاده کرده و توزیع مادهٔ نور گسیل (یعنی، مرئی) را در کهکشـان اندازه بگیرند. با ترکیب سادهٔ اصول نیوتونی، به راحتی می‌توان جنبه‌های غالبی را به‌دست آورد که انتظار داریم در منحنی دوران وجود داشته باشد. محاسبه با در نظر گرفتن گرانی به‌عنوان یک نیروی مرکز گرا شـروع می‌شـود. سـپس فرمول‌های استاندارد مربوط را در آن می‌گذاریم:

$$\frac{m_{\text{ستاره}}\,\upsilon^2_{\text{ستاره}}}{r} = G\frac{m_{\text{ستاره}}M_{\text{جاذبه}}}{r^2} \qquad (۱)$$

با کمی دستکاری به دست می آوریم

$$\upsilon_{\text{ستاره}} = \sqrt{\frac{GM_{\text{جاذبه}}}{r}} \qquad (۲)$$

$M_{\text{جاذبه}}$ مقدار جرم کهکشـان است که ستاره را جذب و سبب حرکت آن در مدارش می شود محاسبه آن در بیرون کهکشان سـاده است و $M_{\text{جاذبه}} = M_{\text{کهکشـان}}$. با این همه، در داخل کهکشان تمام جرم آن در تعیین حرکت سـتاره نقش ندارد. توزیع جرم در یک کهکشـان نوعی دشوار اسـت و باید از روش‌های عددی استفاده کرد. اما، برای نشان دادن مطلب می‌توانیم کهکشان را کره‌ای با چگالی یکنواخت در نظر بگیریم. با اسـتفاده از قضیهٔ پوستهٔ نیوتون، که همان منطقی است که همه شاگردان فیزیک پایه در قانون گاؤس با آن آشنا هستند، مشاهده می‌کنیم جرمی که سـتاره را جـذب می‌کند جرم داخل کره‌ای به شـعاع برابر فاصلهٔ بین مرکز کهکشان و ستاره است. پس در داخل کهکشان $M_{\text{جاذبه}} = M_{\text{کهکشان}} \times (\frac{r}{R_{\text{کهکشان}}})^3$ با قرار دادن این جمله در معادلهٔ (۲)، می‌توانیم منحنی دوران ستارگان داخل این کهکشان ساده شده را پیش‌بینی کنیم.

$$\upsilon_{\text{ستاره}} = \begin{cases} r\sqrt{\dfrac{GM_{\text{کهکشان}}}{R^3_{\text{کهکشان}}}} & r < R_{\text{کهکشان}} \\ \sqrt{\dfrac{GM_{\text{کهکشان}}}{r_{\text{کهکشان}}}} & r \geq R_{\text{کهکشان}} \end{cases} \qquad (۳)$$

بنابراین می‌بینیم که سـرعت مداری یک ستاره با زیاد شدن شـعاع داخل کهکشـان به‌طور خطی افزایش می‌یابد و سپس در بیرون توزیع جرم کهکشـان با عکس مجذور ریشهٔ دوم آن فرو می‌افتد. در حالی‌که کهکشـان‌های فیزیکـی دارای توزیع جـرم پیچیده‌تر از چیزی هسـتند که در اینجا بـه کار بردیم، اما منحنی‌های دوران واقعی، مطابق شـکل (۱) شکل مشابهی دارند. در نزدیکی مرکز کهکشان، سرعت با شعاع مداری تقریباً متناسب است و در بیرون کهکشان سرعت کاهش می‌یابد زیرا شعاع بیشـتر جرمی را اضافه نمی‌کند ولی نیروی گرانی را کم می‌کند. در پیرامون کهکشـان، پیش‌بینی می‌شود که منحنی دوران ایـن دو رفتار را به‌صورت هموار به هم مرتبط سـازد که گویای این واقعیت است که کهکشان واقعی کره‌های یکنواخت نیستند بلکه دارای گرادیان توزیع جرم‌اند.

شکل ۱- منحنی‌های دوران هزاران کهکشان همه یک حکایت را بیان می‌کنند. در داخل کهکشان، داده‌ها و نظریه سازگارند. با این همه، در پیرامون کهکشان ستارگان با سرعت تقریبا ثابت می‌چرخند. این با پیش‌بینی‌ها تضادی آشکار دارد.

شکل ۱ یک پیش‌بینی و مشاهده را برای نمونه‌ای از کهکشان نشان می‌دهد. طی چند دهه، هزاران کهکشان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بارها و بارها، اخترشناسان دریافته‌اند که در شعاع‌های زیاد، همه سـتارگان تمایل به حرکت مداری با سرعت یکسان دارند که در تضاد آشکار با پیش‌بینی‌هاست.

زیبایی آموزشی مسئلهٔ پیچیدهٔ مادهٔ تاریک در سادگی معادلهٔ (۱) نمایان اسـت. منحنی معادلهٔ (۱) نشـان می‌دهد که منشأ نیروی مرکز گرا نیروی گرانشی است. برای توجیه اختلافی که در شکل ۱ دیده می‌شود. باید نتیجه‌گیری کنیم که یک یا چند فرض ساده‌ای که در نظر گرفتیم غلط است.

این موارد عبارت اند از:

۱. قانون دوم نیوتون (F=ma) غلط است؛

۲. نظریهٔ گرانی نیوتون $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ غلط است؛

۳. نیروهایی در نظر گرفته نشده‌اند(یعنی $F_{\text{گرانی}} \neq F_{\text{مرکزگرا}}$)؛یا

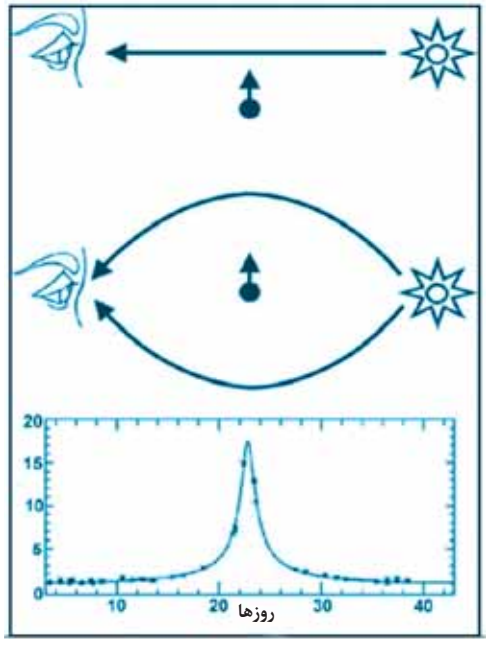
٤. عالم حاوی نوعی جرم است که مرئی نیست.

MOND[۶]: اصلاح دینامیک نیوتونی

مردخای میلگروم[۷] فیزیک‌دان در سال ۱۹۸۱ مطرح کرد که قانون دوم نیوتون برای مقادیر بسیار کم شتاب معتبر نیست. او به‌جای فرمول معروف F=ma فرمول $F = ma\mu(\frac{a}{a_0})$ را پیشـنهاد کـرد که تابع $\mu(\frac{a}{a_0})$ به دقت مشـخص نشـده اسـت، اما برای شتاب‌هایی که در مقایسه با a_0 بزرگ‌اند برابر یک و برای $a<a_0$ برابر $\frac{a}{a_0}$ است. متغیر a شتاب از مرتبهٔ $10^{-10}\ \frac{m}{s^2}$ است در حالی‌که شکل $\mu(\frac{a}{a_0})$ معلوم نیست، می‌توانیم تأثیر آن بر قانون دوم نیوتون را با این فرض ساده کننده در نظر بگیریم که فقط می‌تواند دو مقدار مربوط به آنچه در فاصله‌های زیاد از a_0 مشاهده می‌شود را اختیار کند. این موضوع رابطهٔ بین نیرو و شـتاب را به‌صورت زیر در می‌آورد.

$$F = \begin{cases} ma & a > a_0 \\ ma^2/a_0 & a \leq a_0 \end{cases} \qquad (٤)$$

با اسـتفاده از رابطهٔ استاندارد بین شتاب مرکز گرا و سرعت، $a = \frac{\upsilon^2}{r}$ و گذاشتن مقادیر تقریبی در معادلهٔ (۱)، در می‌یابیم کـه MOND پیش‌بینـی می‌کند در شـعاع‌های مـداری زیاد $\upsilon_{\text{ستاره}} = \sqrt[4]{GMa_0}$ که مسـتقل از شـعاع اسـت. در شـعاع‌های کوچک‌تر، پیش‌بینی‌های MOND با نظریهٔ معمولی نیوتونی



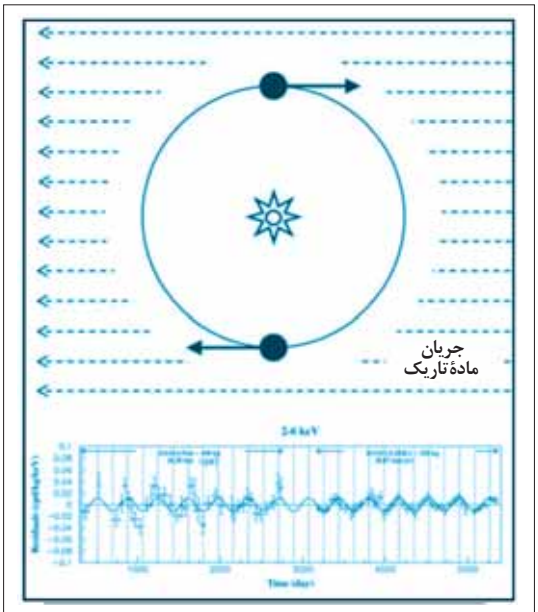
▲ شکل ۲- وقتی جسمی سنگین از بین ستاره‌ای دوردست و چشم شما بگذرد (بالا)، به‌طور گرانشی طوری نور ستاره را کانونی می‌کند که نور بیشتری به دستگاه شما می‌رسد (وسط). یک نمونه منحنی درخشان شدن در شکل پایین نشان داده شده است. محور عمودی درخشندگی نسبی است و خروجی نور پیش از رویداد میکرولنزینگ به واحد بهنجار شده است. برای محافظت در برابر ستارگانی که طبیعتاً خروجی نور متغیر دارند، از چند رنگ مختلف نمونه‌گیری شده است تا اطمینان حاصل شود که همهٔ رنگ‌ها به یک اندازه درخشان شده‌اند. اگر این کار انجام گیرد، مورد نامزدی برای رویداد میکرولنز است.

یکسان است. این رفتار با مشاهده‌ها سازگار است. البته، این سازگاری ساختگی است. انتقادهای معتبر زیادی در مورد نظریهٔ MOND وجود دارد. اولاً، شکل تابع $\mu(\frac{a}{a_0})$ فقط در موارد حدی معلوم است. انتقاد دیگر شکل ساده شدهٔ معادلهٔ (٤) است که در آن نه انرژی و نه تکانه پایسته نیست. اما هیلگروم و یاکوب بکنشتاین[8] در یک مقالهٔ سال ۱۹۸٤، که در آن از فرمول‌بندی لاگرانژی استفاده شده بود، این نقص جدی را برطرف کردند. یک نقد دیگر بر شکل‌های اولیهٔ MOND نسبتی نبودن این نظریه بود. کار بعدی که بخشی از آن مربوط به بکنشتاین بود، راه‌های مختلفی را برای پیوند MOND با نسبیت یافت.

دلیل صحت یک نظریه خوب کار کردن آن است. بنابراین، MOND چقدر خوب کار می‌کند؟ در مورد منحنی‌های دوران کهکشان، این نظریهٔ بسیار خوب کار می‌کند. همچنین در موارد بسیار زیادی که به معمای مادهٔ تاریک انجامیده تا اندازه‌ای موفقیت‌آمیز است. ما پس از بحث دربارهٔ راه‌حل‌های دیگر به میزان موفقیت راه‌حل‌های پیشنهادی مختلف باز خواهیم گشت.

مادهٔ تاریک: باریونی

ایدهٔ کلی مادهٔ تاریک این است که ماده‌ای در عالم وجود دارد که نور را گسیل یا جذب نمی‌کند. در حالی که ایده‌های جدید مادهٔ تاریک عجیب‌اند فکر اولیه بسیار عادی‌تر بود. به پیروی از ماکسیم «با شنیدن صدای سم، به دنبال اسب‌ها



▲ شکل ۳- حرکت زمین در WIMPS عبوری از منظومهٔ شمسی باعث تغییر سرعت بین WIMPS و آشکارسازها می‌شود. این تغییر می‌تواند به مدولاسیون سالانه‌ای در آهنگ رصد نامزدهای WIMPS آزمایش شود.

بگردید، نه گورخرها»، اخترشناسان نامزدهای مادهٔ تاریکی را در نظر گرفتند که از مادهٔ معمولی تشکیل شده بودند. چون جرم ماده معمولی در باریون‌ها (پروتون‌ها و نوترون‌ها) در مرکز اتم‌ها مستقر شده است، به این نوع مادهٔ تاریک «مادهٔ تاریک باریونی» می‌گوییم. مثال‌های مادهٔ تاریک باریونی شامل ابرهای گازی سرد، سیاهچاله‌ها، کوتوله‌های قهوه‌ای، کوتوله‌های سفید سوخته، سیاره‌های میان‌ستاره‌ای و مانند آن است.

جست‌وجو برای این نوع اجسام در سال‌های ۱۹۹۰ در همکاری‌هایی مانند OGLE، MACHO و دیگران انجام شد. این آزمایش‌ها از اصل عدسی گرانشی استفاده می‌کردند که اولین بار اورست خولوسون[9] در سال ۱۹۲٤ پیش‌بینی کرد، اما سال‌ها بعد با یک مقاله اینشتین شهرت یافت، وقتی جسم سنگینی از خط دید بین یک ستارهٔ دوردست و ناظر بگذرد، ستاره درخشان‌تر می‌شود زیرا جسم سنگین عملاً مانند یک عدسی عمل می‌کند و نور بیشتری را به دستگاه‌های ناظر می‌فرستد. تلسکوپ‌ها به سوی ابرهای بزرگ و کوچک ماژلانی نشانه‌گیری شدند. این هدف‌ها نمونهٔ بزرگی از ستارگان دوردست را در اختیار می‌گذاشتند. اگر اجسام متراکم سنگین نامرئی در هالهٔ کهکشانی وجود داشتند، می‌باید گاهی از مقابل یکی از این ستارگان دوردست بگذرند. یک پرنور و کم نور شدن مشخصه مشاهده می‌شود و پدیده «هیکرولنزینگ[10]» نامیده می‌شود. اصول مهم آن را می‌توان در شکل ۲ دید.

هر یک از تقریباً نیم دو جین آزمایش تعدادی رویدادهای میکرولنزینگ را از ستارگان ابرهای ماژلانی و از ستارگان با یک مرتبهٔ بزرگی بیشتر در مرکز کهکشان راه شیری رصد کردند. پس از گزارش اولیهٔ یک مؤلفهٔ بزرگ مادهٔ تاریک MACHO، آزمایش‌های جدید به این نتیجه‌گیری رسیدند که مؤلفهٔ متراکم

اگر اجسام متراکم سنگین نامرئی در هالهٔ کهکشانی وجود داشتند، می‌باید گاهی از مقابل یکی از این ستارگان دوردست بگذرند

شبیه‌سازی‌های چگونگی تحول عالم تحت تأثیر دماهای مختلف ممکن مادهٔ تاریک غیرباریونی به‌عالم‌های بسیار متفاوتی می‌انجامد

مادهٔ تاریک بیش از ۲۰ درصد جرم مفقود لازم برای توجیه منحنی دوران راه شیری نیست، و بعضی از این آزمایش‌ها نتیجه گرفتند که این کسر بسیار کوچک‌تر است و برخی اصلاً چیزی را اندازه نگرفتند.

مادهٔ تاریک: غیر باریونی

اگر مادهٔ تاریک متراکم را برای توجیه تعداد بسیار زیاد پرسش‌های بدون پاسخ کیهانی مانند منحنی‌های دوران کهکشان‌ها کنار بگذاریم، چه چیزی باقی می‌ماند؟ این امکان وجود دارد که انواعی از ماده وجود داشته باشند که باریونی نیستند. یک امکان آن نوترینوهای باقی مانده از مهبانگ است. در سال ۱۹۹۸ معلوم شد که جرم نوترینوها گرچه اندک ولی غیر صفر است و تعداد عظیمی نوترینو از آفرینش عالم باقی مانده است. با این همه، چنان‌که خواهیم دید، این دیگر به‌عنوان یک نامزد معتبر در نظر گرفته نمی‌شود...

مادهٔ تاریک غیرباریونی می‌تواند به‌صورت گازی از ذرات باشد که کهکشان را در بر گرفته و سراسر کیهان آکنده از آن است. می‌دانیم که این ذرات فرضی باید به لحاظ الکتریکی خنثی باشند و حاوی کوارک‌ها و گلوئون‌ها نباشند چون اگر باردار بودند، بر اثر نور ستارگان و کهکشان‌ها گرم و قابل مشاهده می‌شدند. و اگر حاوی کوارک‌ها و گلوئون‌ها بودند، پرتوهای کیهانی هنگام عبور از عالم با آن‌ها برهم کنش می‌کردند و بازهم مشاهده می‌شدند پس ذرات فرضی باید جرم (و جای پای گرانشی مطلوب را) داشته باشند و احتمالاً از طریق برهم کنش هسته‌ای ضعیف برهم کنش کنند. اگر این ذرات سبک باشند، سرعت زیادی دارند و می‌توانند پیش از برهم کنش ضعیف مسافت زیادی را طی کنند. ماده به این شکل را مادهٔ تاریک «داغ» می‌نامند. برعکس، اگر این نوع ماده سنگین و کُند باشد، مسافت آزاد میانگین نسبتاً کوچکی دارد. این نوع ماده را مادهٔ تاریک «سرد» می‌نامند. توجه کنید که مقیاس فاصلهٔ مربوطه از مرتبهٔ ده‌ها یا صدها هزار سال نوری است، یعنی تقریباً اندازهٔ ابر گازی که سرانجام با فروریختن به‌صورت کهکشان در می‌آید.

شبیه‌سازی‌های چگونگی تحول عالم تحت تأثیر دماهای مختلف ممکن مادهٔ تاریک غیر باریونی به عالم‌های بسیار متفاوتی می‌انجامد. اگر مادهٔ تاریک داغ باشد، اولین ساختارها به‌صورت ساختارهای بزرگ و پن‌کیک‌مانند گازی هستند که سرانجام به‌صورت اَبَرخوشه‌های کهکشانی در می‌آیند. این سناریوی «سرپایین» نامیده می‌شود. برعکس، مادهٔ تاریک سرد، به واسطهٔ مسافت کمتری که می‌تواند پیش از برهم کنش طی کند، ابتدا پیش - کهکشان‌ها را تشکیل می‌دهد، که سرانجام ابتدا به‌صورت تک‌کهکشان و سپس خوشهٔ کهکشانی در می‌آید. بررسی‌های مربوط به توزیع فضایی کهکشان‌ها تا فاصلهٔ میلیاردها سال نوری به نفع سناریوی مدل تاریک سرد است.

این بدان معنا نیست که مدل تاریک سرد بی‌مسئله است. به‌عنوان مثال، این مدل پیش‌بینی می‌کند که تعداد کهکشان‌های ماهواره‌ای کوچک راه شیری باید بیشتر از آن باشد که مشاهده شده است. هیچ پاسخ به پرسش مربوط به مادهٔ تاریک بی‌مسئله نیست

با این همه، معتبرترین فرضیهٔ مادهٔ تاریک همان مادهٔ تاریک سرد است. این ماده یک مادهٔ جرم‌دار و با حرکت کُند از ذرات به لحاظ الکتریکی خنثی است که به‌طور گرانشی و شاید از طریق نیروی ضعیف برهم کنش می‌کند. چون سرشت این ذره را نمی‌دانیم به آن نام عام «ذرهٔ جرم‌دار با برهم کنش ضعیف»، یا WIMP را داده ایم که تعداد ده یا صدها از آن‌ها در هر لحظه می‌توانند از بدن شما بگذرند. اگر این موضوع درست باشد، شاید بتوان مادهٔ تاریک را مشاهده کرد.

سه روش کلی برای مشاهدهٔ بالقوهٔ WIMPS وجود دارد که روش مستقیم، غیرمستقیم و تولید آن‌هاست. در روش مستقیم آشکارسازهایی را روی زمین، معمولاً در معدن‌های عمیق زیرزمینی، قرار می‌دهند. ایدهٔ اصلی آن است که WIMPS هنگام حرکت در زمین با آشکارساز برهم کنش می‌کنند و حضور خود را نمایان می‌سازند. یک دوجین آزمایش مادهٔ تاریک در سراسر جهان در جریان است. فناوری‌های مورد استفاده شامل آشکارسازهای حالت جامد، آرگون و زنون مایع، اتاقک‌های حباب، فناوری مبتنی بر سوسوزن‌ها، و دیگر رهیافت‌هاست. در بسیاری از آن‌ها آشکارسازها باید تا سطح میلی کلوین سرد شوند، گر چه در بعضی دیگر چنین چیزی ضروری نیست. باید دقت کرد تا از موادی استفاده شود که کمترین آلودگی پرتوزا را دارند. محل آشکارسازها در عمق زمین آن‌ها را در برابر رگبار همه‌جا موجود پرتوهای کیهانی محافظت می‌کند.

بیشتر آشکارسازها موفق به یافتن هیچ دلیلی برای وجود WIMPS نشده‌اند. برخی از آن‌ها موفق شده‌اند. آزمایش DAMA مدولاسیون سالانه‌ای را مطابق شکل ۳، در سیگنال مشاهده شده دیده است. این در صورتی انتظار می‌رود که آن‌ها مادهٔ تاریک را مشاهده کنند. روش مجسم کردن آن در نظر گرفتن مادهٔ تاریک به‌صورت بادی است که از منظومهٔ شمسی می‌گذرد. در یک نقطه در طول سال مدار زمین آن را وارد باد مادهٔ تاریک می‌کند. این موضوع باعث افزایش سرعت نسبی بین آشکارساز موجود در زمین و ذرات مادهٔ تاریک می‌شود. شش ماه بعد، زمین در همان جهت باد حرکت می‌کند و سرعت نسبی مادهٔ تاریک آشکارساز کم می‌شود. این تغییر سرعت باید به‌صورت تغییر سالانه سیگنال نمایان شود؛ که درست همان چیزی است که آشکارساز DAMA برای بیش از یک دهه گزارش کرده است. بسیاری از آشکارسازهای دیگر، که انتظار می‌رود حساسیت برخی از آن‌ها بسیار بیشتر باشد، نتیجهٔ DAMA را تأیید نمی‌کنند. از سوی دیگر، آزمایش COGENT در سال ۲۰۱۱ اعلام کرد که مدولاسیون سالانه مشخصه را مشاهده کرده است. وضعیت تجربی آشکارسازی مستقیم ماده تاریک فعلاً بسیار تیره و تار است و امید می‌رود آشکارسازهای جدید و بهتری که وارد کار می‌شوند شرایط را روشن سازند.

اندازه‌گیری‌هـای غیرمسـتقیم متفاوت‌اند. اگـر ذرات مادهٔ تاریک وجود داشته باشند و از مدل‌های خاصی پیروی کنند، باید پادذرات مادهٔ تاریک هم وجود داشـته باشـند. زوج‌های مـاده/ پادماده گاهی در فضای بیرونی با هم برخورد می‌کنند و نابود می‌شـوند. شـاید این برهم کنش زوج‌های پرتوگاما یا زوج‌هـای الکترون/پوزیترون به‌وجود آورد کـه بتوان آن‌ها را در آزمایش‌هـای ماهواره‌ای مشـاهده کـرد. در این موارد هم مانند اندازه‌گیری‌های مستقیم اختلاف نظر بین آزمایش‌های مختلف وجود دارد.

در حالی که معماهای موجود در کیهان باعث شـده است تا دانشـمندان دربارهٔ وجود مادهٔ تاریک تأمل کنند، اما اگر مادهٔ تاریک نوعی ذرهٔ زیر اتمی کشف نشده باشد، احتمال تولید آن در شـتاب‌دهنده‌های بزرگ ذرت مانند برخورد دهنده بزرگ هادرونی در سـرن وجود دارد. درسـت همان‌طور که **کوارک سـر** در سال ۱۹۹۵ کشف شد و ذرهٔ جدیدی که شاید بوزون هیگز باشد در ژوئیه ۲۰۱۲ مشاهده شد. این شتاب‌دهنده‌های ذرات انرژی را به شکل‌های جدید ماده تبدیل می‌کنند. بدون آگاهی از سرشـت مادهٔ تاریک، دانسـتن اینکه چطور این کار انجام خواهد شد دشوار است. نظریه‌های حاوی اَبَرتقارن برای حل تِعداد زیادی از معماهای فیزیک ذرات پیشـنهاد شده‌اند. ظاهراً این مسائل پیچیده ربطی به پرسش‌های مربوط به مادهٔ تاریک ندارند، اما یکی از پیش‌بینی‌های بسیاری از نظریه‌های ابرتقارن وجـود ذرهٔ جرم‌دار به لحاظ الکتریکی خنثای پایدار اسـت. چون این ویژگی‌ها همان چیزی است که مادهٔ تاریک باید داشـته باشد، طبیعی است که این آزمایش‌ها توجه اختر فیزیک‌دانـان را به خود جلب کرده باشـد. شـاید اولین مادهٔ تاریکی که مشـاهده می‌شود از کیهان نباشـد، بلکه شاید از همان آشکارسـازهایی به‌وجود آید که برزون هیگز را کشـف کرده‌اند.

MOND در برابر مادهٔ تاریک سرد

اگر در مورد مادهٔ تاریک فکر کنید، چند رصد توجیه نشده را به یاد می‌آوریم که می‌توان آن‌ها را با یکی از چند فرضیه حل کـرد. همان‌طور که در این مقاله گفتیـم، راه حل مادهٔ تاریک باریونی دیگر معتبر نیسـت، همین‌طور فرضیـهٔ مادهٔ تاریک غیرباریونـی داغ. در حالی که بسـیاری از اختـر فیزیک‌دانان فرضیهٔ مادهٔ تاریک غیر باریونی سـرد را محتمل‌ترین راه حل می‌دانند، هنوز جمع کوچکی از آنان وجود دارد که به MOND بسیار علاقه‌مندند. با توجه به اینکه مادهٔ تاریک تاکنون مشاهده نشده است، بدنیست که محض احتیاط فرضیهٔ MOND را نگه داریم، با این همه، مشـاهده‌ای وجود دارد که بسـیاری گمان می‌کنند دلیل تعیین‌کننده‌ای برای مادهٔ تاریک سرد به‌عنوان پاسـخ است. این دلیل را می‌توان در بقایای یکی از بزرگ‌ترین برخوردهای در عالم یافت که در آن در خوشهٔ بزرگ کهکشانی از هم عبور کردند. این تصادف زنجیره‌ای کیهانی خوشهٔ گلوله[۱۲] نامیده می‌شود (نگاه کنید به شکل ٤)

▲ شکل ٤- این تصویر ناسابرخورد بین دو خوشهٔ کهکشان را نشان می‌دهد. ناحیه‌های مختلف گاز هیدروژن داغ باقیمانده بین دو خوشه در نتیجهٔ برخورد و اینکه توده ماده در کجا وجود دارد را نشان می‌دهند. این جرم همایند با کهکشان‌های مرئی و بسیار بیشتر از جرم موجود در کهکشان‌هاست. این مشاهده دلیل محکمی است که نشان می‌دهد فرضیهٔ مادهٔ تاریک سرد معتبر است.

پیش از برخورد، مرکز جرم مادهٔ معمولی درخشان (ستارگان و کهکشـان‌ها)، مادهٔ تاریـک معمولی (ابرهای هیـدروژن)، و مادهٔ تاریک «واقعی» (مادهٔ تاریک سـرد) باید در دو خوشه کم و بیش یکسان باشـد. وقتی در خوشه به هم برخورد می‌کنند، انتظار می‌رود ستارگان و کهکشان‌ها از هم عبور کنند. به لحاظ گرانشی کند شوند ولی اساساً تغییر نکنند. ابرهای گاز هیدروژن، که پراکنده شـده‌اند، باید برخورد کنند، گرم شوند و هنگام دور شدن از هم بین خوشه‌ها باقی بمانند. هر دوی این پیش‌بینی‌ها مشـاهده شـده‌اند. اما، نظریه‌های MOND و مادهٔ تاریک سرد پیش‌بینی متفاوتی می‌کنند. چون مادهٔ تاریک سرد در بهترین شـرایط دارای برهم کنش ضعیف اسـت، انتظار می‌رود که این ماده در همان محل مادهٔ درخشـان یافته شود. از سوی دیگر در MOND، انحراف‌ها از فیزیک نیوتونی باید به شکل جرم اضافی در همان محل تودهٔ باریونی قرار داشـته باشـد. این توده در گاز هیدروژن یافته شـده است. رصدهای خوشهٔ گلوله فرضیهٔ مادهٔ تاریک سرد را ترجیح می‌دهد.

اما طرفـداران MOND می‌گوینـد «نه این‌قدر سـریع». در حالی که فرضیهٔ مادهٔ تاریک سـرد به مادهٔ تاریک ۱۰ برابر مادهٔ معمولی نیاز دارد، فرضیهٔ MOND لزوم ماده غیرقابل مشاهده را فقط به دو برابر مادهٔ مشـاهده شده تقلیل می‌دهد. این اختلاف بسـیار کوچک‌تر می‌توانـد ماده‌ای معمولی باشـد که تا کنون مشاهده نشده است. به علاوه، آن‌ها متذکر می‌شوند که راه‌حل اختلاف‌های گرانشی مشاهده شده در خوشه‌های کهکشانی شاید ربطی به منحنی‌های دوران کهکشـان نداشته باشد. طرفداران مادهٔ تاریک سرد در واکنشی سریع متذکر می‌شوند که MOND هم به اصلاح دینامیک نیوتونی نیاز دارد و هم به نوعی مادهٔ تاریک باقی‌مانده تا دینامیک خوشـه‌های کهکشانی را توضیح دهد، و اینکه صرفاً مادهٔ تاریک اضافی را در نظر بگیریم تنگ‌نظرانه است.

پی‌نوشت‌ها

1. Don Lincoln
2. Sagan
3. Edwin Hubble
4. Bertil Lindblad
5. Jan Oort
6. Fritz Zwicky
7. Modifications of Newtonian Dynamics
8. Mordehai Milgrom
9. Jakob Bekenstein
10. Orest Khvolson
11. microlensing
12. Weakly Interacting Massive Particle
13. Bullet Cluster

منابع

بـرای مطالعهٔ بیشـتر رجوع کنید به

- Iain Nicolson *Dark Side of the Universe* (JHUP, 2007).
- Richard Pane, *The 4% Universe* (Mariner Books, 2011)
- Evalyn Gates, *Einsteins Telescope* (w.w.Norton & Company;2010)
- Dan Hooper, *Dark Cosmos* (Smithsonian,2006)

مرجع

The Physics Teacher.Vol si. March 2013, pp 134-138.