همگرایی گرانشی و کاربردهای آن در کلاس‌های فیزیک و نجوم[1]

ترجمهٔ مرجان روح‌نواز

اشاره

امروزه دستاوردهای نوین در اخترشناسی و کیهان‌شناسی توجه بسیاری به خود جلب کرده است. یکی از پیامدهای نظریه نسبیت عام در کیهان‌شناسی نوین اثر همگرایی گرانشی یعنی خم‌شدن پرتوهای نوری است که از کنار اجسام سنگین آسمانی عبور می‌کنند. با استفاده از این اثر می‌توان بادقتی زیاد پراکندگی ماده تاریک در کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی را بررسی کرد و در نتیجه از ساختار بزرگ مقیاس عالم اطلاع به‌دست آورد. همچنین کاربرد آن برای یافتن سیارات فراخورشیدی و نیز درک تحولات انرژی تاریک می‌تواند سودمند باشد.

کلیدواژه‌ها: همگرایی گرانشی، نسبیت عام، کیهان‌شناسی

مقدمه

پیش از گفت‌وگو درباره همگرایی گرانشی بهتر است کمی درباره مفاهیم و پیامدهای نظریه نسبیت عام بحث کنیم. برپایه نسبیت عام، گرانش آن‌گونه که نیوتون می‌پنداشت نیرو نیست. حقیقت این است که فضاو زمان در نزدیکی اجرام سنگین مانند خورشید خم می‌شود و این امر وجود یک نیروی خیالی به نام گرانش را به ذهن متبادر می‌سازد. هنگامی که نور از کنار جسمی سنگین گذر کند، از فضایی خمیده گذشته است و مسیر آن از مسیر مستقیم فضای تخت اقلیدسی منحرف می‌شود. این حالت، «همگرایی گرانشی» نامیده می‌شود و با کاربرد عدسی‌های اپتیکی به‌خوبی می‌توان آن را مدل‌سازی کرد.

قلب نظریه نسبیت عام در اصلی به نام اصل هم‌ارزی می‌تپد که براساس آن در یک میدان گرانشی یکنواخت که گرادیان آن صفر است، با هیچ آزمایشی نمی‌توان تفاوت بین نیروی جاذبهٔ گرانشی و نیروی ناشی از حرکت شتاب‌دار را آشکار کرد. آزمایش فکری زیر به خوبی پیش‌گویی‌های دور از انتظار این اصل را نشان می‌دهد: فضانوردی را در پهنه فضا در نظر بگیرید که نیرویی را بر خود حس می‌کند. آیا وی می‌تواند با انجام آزمایش‌هایی در سفینه و بدون اینکه به فضای بیرون نگاه کند یا از روشن بودن موتورهای سفینه باخبر شود، معین کند که دلیل شتاب گرفتن سفینه روشن شدن موتورهاست یا نیروی کشش گرانشی جسمی در نزدیکی آن؟ برپایه اصل هم‌ارزی، فضانورد هرگز نمی‌تواند این دو حالت را از هم تمیز دهد. اکنون فرض می‌کنیم فضانورد باریکه‌ای از نور لیزر را در سفینه بتاباند. اگر شتاب سفینه به سمت بالا باشد، از دیدگاه او مسیر باریکه نور به سوی پایین خم می‌شود. کاربرد اصل هم‌ارزی ما را به این نتیجه ناگزیر می‌رساند که اگر سفینه در نزدیکی جسمی سنگین ـ مثلاً زمین ـ باشد، نور باید مسیری خمیده را بپیماید[2].

اگر ذرات نور جرم ندارند پس چگونه اثرات گرانشی را احساس می‌کنند؟ اینشتین برای این پرسش به ظاهر سردرگم کننده پاسخی جالب ارائه داد: با اینکه نور همواره «تلاش می‌کند» تا در مسیر مستقیم حرکت کند اما در همسایگی فضای خمیده توانایی انجام این کار را ندارد. وی در سال ۱۹۱۵ با استفاده از نظریه نسبیت عام، انحراف زاویه نوری که از فاصله b_1 از جسمی به جرم M می‌گذرد را به صورت زیر محاسبه کرد[3]:

$$\alpha_1 = \frac{4G}{c^2}\frac{M}{b_1} \quad (1)$$

که در آن $b_1=\theta_1 D_L$ پارامتر برخورد است و فرض شده است که جرم کهکشان همگرا کننده (عدسی) M در مرکز آن قرار گرفته است (جرم نقطه‌ای). دقت کنید که زاویه انحراف تنها

به پارامتر برخورد، و جرم عدسی بستگی دارد و مستقل از طول موج نور است. با قرار دادن جرم و شعاع خورشید در این رابطه می‌توان به آسانی انحراف نور ستارگان دوردست در فضا به‌وسیله خورشید را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\alpha = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \simeq 1/''74$$

آرتور ادینگتون[4] در خورگرفت سال ۱۹۱۹ انحراف پرتوهای نور به‌وسیله میدان گرانشی خورشید را مشاهده و اندازه‌گیری کرد و همین امر نخستین گواه درستی نظریه نسبیت عام در مقایسه با گرانش نیوتونی شد.

شاید مفهوم فضای خمیده برای برخی شاگردان ناآشنا باشد،[5] با این همه بسیاری از آن‌ها درباره سیاهچاله‌ها چیزهایی شنیده‌اند فضازمان در همسایگی این پدیده‌های اختر فیزیکی بسیار خمیده است و بنابراین، این اجسام آزمایشگاه خوبی برای بررسی رفتار عجیب نور در فضای به شدت خمیده هستند.[6]

آشنایی با اثر همگرایی گرانشی

در آغاز می‌توان تصاویری از اثر همگرایی گرانشی کهکشان-کهکشانی که در آن به جای یک خوشه کهکشانی تصویر یک کهکشان به‌وسیله کهکشانی دیگر همگرا شده است را نشان داد (شکل ۱). همان‌گونه که در پیش اشاره شد همگرایی گرانشی پیامدی از خم شدگی مسیر نور در نسبیت عام است به این شکل که توزیع گسترده‌ای از جرم (عدسی) ـ مانند کهکشان یا خوشه‌های کهکشانی ـ نوری را که از کهکشان‌ها یا خوشه‌های کهکشانی دوردست در فضا (چشمهٔ نور) در ورای عدسی گسیل شده است منحرف می‌کند. این پدیده سبب واپیچش و بزرگنمایی تصویر سرچشمه نور در فضا می‌شود. در پدیده‌ای که همگرایی ضعیف نامیده می‌شود درصد این واپیچش‌ها کوچک است و بنابراین تنها از نظر آماری قابل برآورد هستند. اما در همگرایی قوی، واپیچش بسیار زیاد است و می‌توان با چشم آن را دید. حالتی ویژه از همگرایی قوی حلقه اینشتین نام دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است و هنگامی پدید می‌آید که چشمهٔ نور، عدسی و بیننده روی یک خط راست قرار داشته باشند.

آزمایش عملی پدیده

برای نمایش این پدیده در کلاس درس به موادی کم و بسیار ساده نیاز است: یک کاغذ رسم نمودار که از آن برای نشان دادن چارچوب فضای اقلیدسی زمینه استفاده می‌شود، تصویری از ژرفای فضا که در شکل ۲ نشان داده است (برگرفته شده از تصاویر تلسکوپ هابل) و یک عدسی اپتیکی گرانشی. برای ساخت عدسی می‌توان از یک ظرف مخصوص دسر که انتهای پایه آن شکسته شده است، استفاده کرد (شکل ۳). دقت کنید که ظرف باید کاملاً متقارن و قوس آن نیز مانند قوس نمودار لگاریتم باشد (شکل ۴).

برای رعایت ایمنی بهتر است قسمت شکسته شده را بانوار چسب تیره بپوشانید. این کار سبب می‌شود تا مرکز ظرف که نمایانگر کهکشان یا خوشه کهکشان جلویی (عدسی) است از نظر پنهان شود (شکل۵).

اکنون می‌توان شاگردان را در گروه‌های چند نفره دسته‌بندی کرد و از آن‌ها خواست با انجام آزمایش‌هایی به پرسش‌های زیر پاسخ دهند:

(دقت کنید که هنگام آزمایش با عدسی ثابت یا در حال حرکت همواره باید به مرکز آن نگاه کرد)

۱. عدسی گرانشی خود را روی کاغذ نمودار حرکت دهید و مشاهده کنید که خط‌ها چگونه دچار واپیچش می‌شوند (به داخل؟ به خارج؟ به شکل دایره یا مربع؟ به‌صورت متقارن؟) اگر خط‌های مشبک نشانگر فضای تخت باشند چه چیز سبب واپیچش آن‌ها می‌شود؟ روی کاغذ شکل‌های دیگری مانند مثلث، بیضی و دایره بکشید و بررسی کنید که عدسی گرانشی چگونه آن‌ها را تغییر می‌دهد؟

۲. چه هنگام پایه ظرف همانند یک عدسی گرانشی رفتار می‌کند و در چه شرایطی مدلی ناقص از یک عدسی گرانشی است؟

۳. در محل تقاطع دو خط شبکه، یک بیضی توپر (نماینده کهکشان) به اندازه نصف یک ناخن بکشید. با حرکت عدسی پیرامون این کهکشان فرضی شکل آن به‌گونه‌ای نسبت به فضا زمان گسترش می‌یابد که چهار تصویر دیده شود: کهکشانی که دچار واپیچش نشده، کهکشانی که دچار واپیچش شده، دو کهکشان که به شدت دچار واپیچش شده‌اند و تشکیل یک حلقه اینشتین (شکل ۷).

موقعیت کهکشان نسبت به مرکز عدسی را در هر یک از حالت‌های زیر توصیف کنید:

+ هنگامی که کهکشان زیر عدسی قرار دارد ولی دچار واپیچش نشده است (اثر همگرایی ضعیف).

+ هنگامی که کهکشان دچار واپیچش می‌شود ولی تنها یک تصویر از آن دیده می‌شود (اثر همگرایی قوی).

+ هنگامی که دو تصویر از کهکشان در زیر عدسی دیده می‌شود. (این حالت نیز نمونه‌ای از همگرایی قوی است؛ این پدیده در تپ‌اخترهای دوگانه نیز مشاهده می‌شود).

+ هنگامی که کهکشان به شکل یک حلقه درمی‌آید (حلقه اینشتین؛ ویژگی همگرایی قوی).

۴. چهار کهکشان با شعاع‌های متفاوت روی کاغذ بکشید.

ارتباط میان حلقه اینشتین و شعاع کهکشان چیست؟ اگرشعاع کهکشان صفر باشد چه مشاهده می‌کنید؟

۵. طرحی از همگرایی گرانشی در شکل ۶ نشان داده شده است.

+ همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود سرچشمه نوری که در فاصله زاویه‌ای θ_s قرار گرفته به گونه‌ای دیده می‌شود که گویی در زاویه θ_I قرار دارد (به مسیر رسیدن نور از کهکشان زمینه به چشم خود دقت کنید).

+ کدام متغیر انحراف زاویه‌ای را نشان می‌دهد ؟ وکدام متغیرها را می‌توان با تلسکوپ اندازه گرفت؟ (پاسخ: دو متغیر)

آیا می‌توانید معادله‌ای بنویسید که ارتباط این سه متغیر به یکدیگر را نشان دهد؟

۶. اکنون ارتباط بین فاصله‌های میان چشم، عدسی و سرچشمه نوری (کاغذ) را بیازمایید. D_I فاصله عدسی تا چشم، D_{Is} فاصله عدسی تا کهکشان (کاغذ نمودار)، و D_s فاصله چشم تا کهکشان است. هنگامی که عدسی و سرچشمه نوری کمابیش نزدیک هم هستند (و بنابراین زمینه فضا، فضای تخت اقلیدسی است) با تقریب خوبی می‌توان نوشت:

$$d_{LS} = d_S - d_L$$

رابطه بالا در فاصله‌ها کیهانی بزرگ‌تر درست نیست.

عدسی را به‌گونه‌ای قرار دهید تایک حلقه اینشتین ببینید.

در هر یک از حالت‌های زیر، اندازه حلقه چه تغییری می‌کند؟ کدام متغیر (D_L، D_{LS} و D_S) تغییر کرده و کدام ثابت می‌مانند؟

+ هنگامی که فاصله عدسی را تغییر داده‌اید ولی چشمتان در همان فاصله باشد.

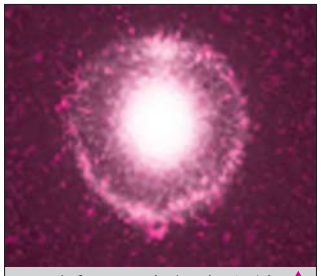
+ هنگامی که فاصله چشم خود را تغییر دهید و عدسی در همان مکان پیشین باشد.

+ هنگامی که هم فاصله چشم و هم فاصله عدسی را تغییر داده‌اید ولی فاصله بین آن‌ها ثابت است.

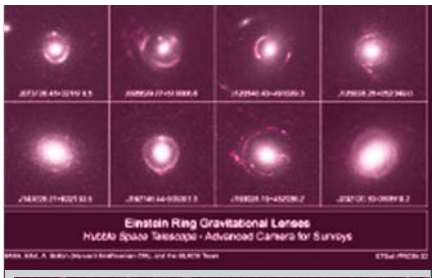
در عمل هرگونه تغییر فاصله بین ناظر، عدسی و چشمه نور (که به‌وسیله انتقال به سرخ طیف نور رسیده از آن‌ها مشخص می‌شود) بر روی اندازه حلقه اینشتین و در نتیجه بر روی برآورد جرم نهایی تأثیر می‌گذارد.

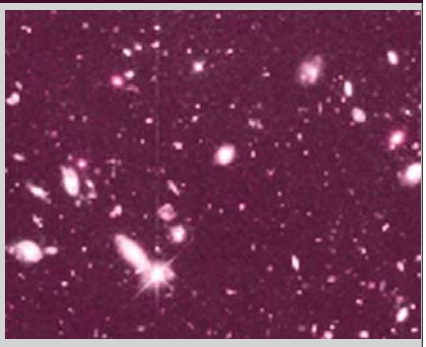
برای به‌دست آوردن رابطه‌ای بین این متغیرها و شعاع حلقه، مقدار b_I را در رابطه (۱) قرار می‌دهیم:

یکی از پیامدهای نظریهٔ نسبیت عام در کیهان‌شناسی نوین اثر همگرایی گرانشی یعنی خم شدن پرتوهای نوری است که از کنار اجسام سنگین آسمانی عبور می‌کنند



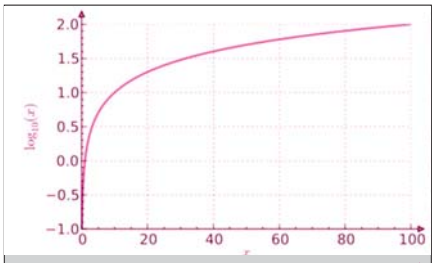
▲ شکل ۱. حلقه‌های اینشتین برگرفته شده از تصویرهای تلسکوپ هابل. لکه‌های روشن در میان هر حلقه، کهکشان‌های بیضی‌شکل غول‌پیکری هستند که نزدیک به ۲ تا ۴ بیلیون سال نوری با ما فاصله دارند. حلقه دور هر لکه نیز از کهکشان‌های زمینه‌ای که ۴ تا ۸ میلیارد سال نوری با ما فاصله دارند و به دلیل اثر همگرایی گرانشی دچار واپیچش شده‌اند، سرچشمه می‌گیرد. این کهکشان‌ها بسیار جوان و در مرحله ساخت ستارگان هستند. تصویر سمت راست‌نیز بزرگنمایی یکی از همین تصویرهاست (همگرایی کهکشان ـ کهکشانی). همچنین کهکشان‌هایی بدون واپچش نیز در تصویر نشان داده شده‌اند.



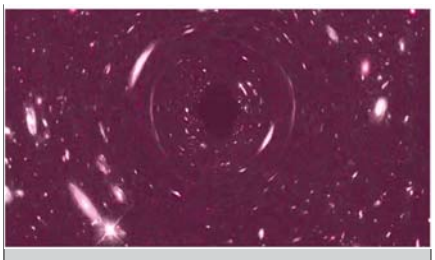


▲ شکل ۲. تصویر ژرفای فضا برگرفته شده از تصاویر تلسکوپ هابل نزدیک به ۱۵۰۰ کهکشان در مراحل مختلف زندگی خود در ۱۰ میلیارد سال پیش را نشان می‌دهد.

▲ شکل ۳. ظرف مخصوص دسر به‌عنوان عدسی گرانشی که پایه شکسته آن با نوار چسب سیاه پوشانده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، سرچشمه نوری در زمینه دوردست فضا لزوماً در مرکز عدسی گرانشی (که می‌تواند خوشه یا جرم درخشان و سنگین دیگری باشد) قابل مشاهده نیست. بنابراین نوار سیاه‌رنگ افزون بر جنبه ایمنی کاربردی علمی نیز دارد.

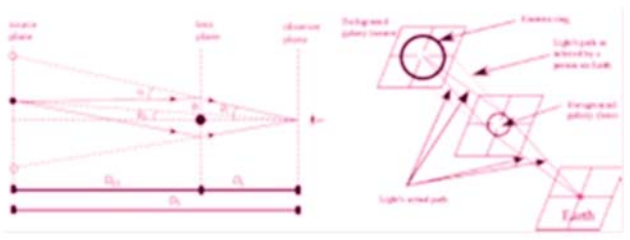


▲ شکل ۴. شیب نمودار لگاریتم. نیمرخ ظرف شما باید چنین شیبی داشته باشد.

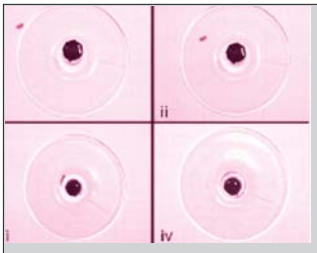


▲ شکل ۵. حالتی از همگرایی که کهکشان جلویی (عدسی) در مرکز تصویر سیاه دیده میشود.

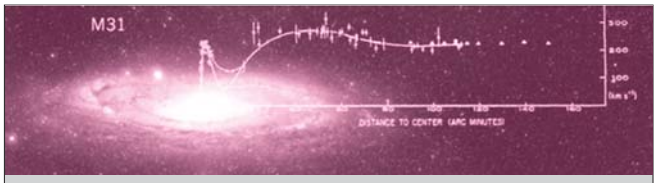
آرتور ادنیگتون در خورگرفت سال ۱۹۱۹ انحراف پرتوهای نور به وسیله میدان گرانشی خورشید را مشاهده و اندازه‌گیری کرد و همین امر نخستین گواه درستی نظریهٔ نسبیت عام در مقایسه با گرانش نیوتونی شد



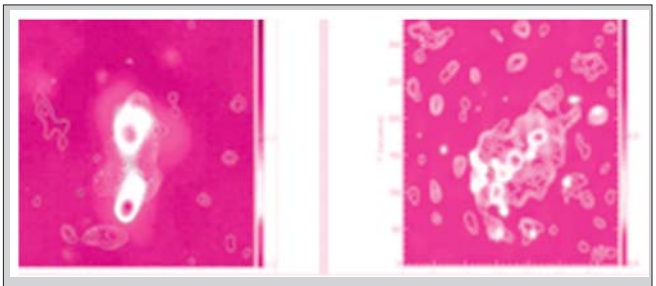
▲ شکل ۶. طرحی از همگرایی گرانشی. شکل سمت راست آرایش ویژه‌ای را نشان می‌دهد که در آن کهکشان دور دست، عدسی گرانشی و زمین در یک راستا هستند، بنابراین هنگامی که نور کهکشان زمینه همگرا می‌شود، بیننده زمینی آن را به شکل حلقه اینشتین می‌بیند.



◀ شکل ۷. برای کهکشانی بیضی‌شکل، چهار حالت می‌تواند روی دهد:
(بالا سمت چپ) شکل کهکشان دچار تغییر نشده؛ اما دقت کنید که زمینه فضا (چارچوب اقلیدسی تخت) دچار واپیچش شده است. (بالا سمت راست) همگرایی ضعیف؛ واپیچش تصویر کهکشان بسیار کم و به دشواری قابل تشخیص است. (پایین سمت چپ) همگرایی قوی، که به‌گونه‌ای سبب واپیچش قابل مشاهده در شکل کهکشان شده است که تصویر دیگری از کهکشان در سوی دیگر عدسی دیده می‌شود. (پایین سمت راست) همگرایی قوی و تشکیل حلقه اینشتین هنگامی که هر سه جرم در یک خط قرار دارند.



▲ شکل ۸. منحنی سرعت چرخش ستارگان در کهکشان زن به زنجیر بسته M۳۱ برحسب فاصله از مرکز کهکشان. در فاصله‌های دور از مرکز درخشان کهکشان، منحنی سرعت هموار است و آن گونه که انتظار داریم با نسبت $1/\sqrt{r}$ کاهش نمی‌یابد.



▲ شکل ۹. نقشه ماده درخشان و تاریک به همراه یکدیگر. بخش رنگی، پراکندگی ماده درخشان و خط‌های منحنی، پراکندگی ماده تاریکی که با روش همگرایی گرانشی به‌دست می‌آید را نشان می‌دهد. به فراوانی و تفاوت مقدار پراکندگی ماده در بخش‌هایی که هیچ ماده درخشانی دیده نمی‌شود دقت کنید.

$$\alpha_1(\theta_1) = \frac{4G}{c^2}\frac{M}{\theta_1}\frac{1}{D_L} \qquad (۲)$$

با اســـتفاده از شـــکل (۶) معادله سازوکار عدسی گرانشی برابر است با:

$$\theta_1 D_S = \theta_S D_S + \alpha_1 D_{LS}$$

در صورتی‌که α_1 را از معادله بالا به‌دست آوریم:

$$\alpha_1(\theta_1) = \frac{D_S}{D_{LS}}(\theta_1 - \theta_S)$$

و مقدار آن را در معادله (۲) قرار دهیم، داریم:

$$\theta_1 - \theta_S = \frac{4G}{c^2}\frac{M}{\theta_1}\frac{D_{LS}}{D_S D_L}$$

برای چشمه‌ای که به صورت متقارن، درست پشت عدسی گرانشـــی قرار گرفته باشد (حلقه اینشـــتین) داریم: $\theta_S = 0$ و $\theta_1 \theta_E$

در نتیجه شعاع زاویه‌ای حلقه اینشتین به دست می‌آید:

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2}\frac{D_{LS}}{D_L D_S}\right)^{\frac{1}{2}}$$

(دقت کنید که در میان اخترشناسان معمول است که این شعاع را چکیده‌وار شعاع حلقه اینشتین بنامند، در صورتی‌که شعاع خطی حلقه برابر است با: $R_E = d_L \theta_E$)

هرچه عدسی سنگین‌تر (M بزرگ‌تر) باشد، پرتوهای نوری بیشتر منحرف می‌شوند و شـــعاع حلقه بزرگ‌تر خواهد بود. اخترشناســـان از این اثـــر برای ردیابی مـــاده تاریک در فضا استفاده می‌کنند.

در پایان نیز می‌توان معادله همگرایی جرم (عدسی) نقطه‌ای شکل را برحسب شعاع اینشتین به شکل زیر نوشت:

$$\theta_1 = \theta_S + \frac{\theta_E^2}{\theta_1}$$

به‌همین ترتیب برای زاویه پرتو زیرین خواهیم داشت:

$$\theta_2 D_s = -\theta_S D_S + \alpha_2 D_{LS}$$

و

$$\theta_2 + \theta_S = \frac{4G}{c^2}\frac{M}{\theta_2}\frac{D_{LS}}{D_S D_L}$$

و در نتیجه

$$\theta_2 = -\theta_S + \frac{\theta_E^2}{\theta_2}$$

+ تأثیر شـــکل و ضخامت پایه ظرف دســـرخوری بر پدیده همگرایی گرانشـــی چیســـت؟ (آزمایش را بـــا ظرف‌هایی با شکل‌های گوناگون انجام دهید).

۷. اکنون عدسی خود را برروی تصویر ژرفای فضا قرار دهید و آن را بررســـی کنید (برای این کار نیاز به تصویری بزرگ و

رنگی باکیفیت بالا از شکل ۲ دارید[۷])

+ آنچه با قرار دادن عدسی و بدون آن مشاهده می‌کنید را گزارش کنید.

+ چگونه می‌توان با استفاده از عدسی گرانشی سیاهچاله یافت.

+ چگونه می‌توان بین سیاهچاله‌های کم‌جرم وکوچک ناشی از ستارگان (با جرمی ۵ برابر جرم خورشید) و سیاهچاله‌های بسیار سنگین فرق گذاشت (راهنمایی: به تصویر ۶ دقت کنید). گمان می‌رود سیاهچاله‌های بسیار سنگین در مرکز بیشتر کهکشان‌ها وجود داشته باشند و ۱۰۰۰۰بار سنگین‌تر از خورشید باشند.

+ اگر چشم‌اندازی واضح و دقیق از آسمان شب داشته باشیم، هنگامی که سیاهچاله‌ای نزدیک زمین شود، چه روی خواهد داد وچه خواهیم دید؟ در فاصله‌های نزدیک، سیاهچاله همانند یک عدسی همگرا کننده قوی که به سرعت در آسمان حرکت می‌کند رفتار خواهد کرد[۸].

یکی از ویژگی‌های همگرایی گرانشی این است که واپیچش‌های مشاهده شده، تنها به دلیل حضور جرم هستند. این ویژگی ساده اما مهم به اختر فیزیک‌دانان اجازه می‌دهد که پراکندگی ماده تاریک که به‌وسیله تلسکوپ رصد و دیده نمی‌شود را به‌طور غیرمستقیم اندازه بگیرند. همچنین اندازه‌گیری جرم اجسام فضایی که محاسبه جرم آن‌ها به روش‌های متداول دشوار است را آسان‌تر می‌کند.

در حقیقت بیشتر ماده کیهان، ماده تاریک نامرئی است که تنها از روی آثار گرانشی خود می‌تواند ردیابی شود. اگر جرم کهکشان‌ها تنها از اجسام قابل مشاهده مانند ستاره‌ها و غبارهای کیهانی تشکیل شده بود، سرعت چرخش ستارگان در لبه بیرونی آن‌ها باید کمتر از مقدار مشاهده و اندازه‌گیری شده می‌بود. سرعت چرخش مورد انتظار برای ستارگان کهکشان‌ها را می‌توان به آسانی از قوانین نیوتون به‌دست آورد. برای نمونه اگر ستاره‌ای دور از مرکز یک کهکشان را در نظر بگیریم، نیرویی که این ستاره را بر مدار خود نگه می‌دارد نیروی جاذبهٔ گرانشی کل جرمی است که داخل مدار آن قرار دارد. با استفاده از قانون دوم نیوتون داریم:

$$F = ma_c = G\frac{Mm}{r^2},$$

که در آن m جرم ستاره و $a_c = v^2/r$ شتاب مرکزگرای آن، M جرم بخشی از کهکشان که درون مدار ستاره قرار دارد و r فاصله مرکز کهکشان تا مدار ستاره است. سرعت مداری ستاره بنابراین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (۳)$$

یعنی سرعت مداری ستاره با مقدار جرم درون مدار افزایش و با افزایش فاصله شعاعی آن کاهش می‌یابد. این مسئله با فهم فیزیکی ما نیز همخوانی دارد: در حالی‌که ستارگان دور از مرکز، نیروی گرانشی کمتری را تجربه می‌کنند و در نتیجه سرعت مداری کمتری دارند، جرم بیشتر، بهتر می‌تواند ستاره‌ای سریع‌تر را در مدار خود نگه دارد.

اگر تمام جرم کهکشان‌ها مربوط به ماده نورانی (ماده‌ای که با امواج الکترومغناطیسی یا همان نور برهم‌کنش دارد) بود آنگاه انتظار داشتیم که سرعت چرخش ستارگان بیرونی با نسبت $1/\sqrt{r}$ کاهش یابد. ولی اخترشناسان در ناسازگاری با این مطلب مشاهده کرده‌اند که خارج از مرکز درخشان کهکشان، سرعت چرخش ستارگان برحسب فاصله‌شان از مرکز کهکشان تقریباً ثابت است (شکل ۸)[۹]. از معادله (۳) چنین برمی‌آید که برای اینکه سرعت چرخش ثابت باشد، جرم کل کهکشان باید به‌صورت خطی با r افزایش یابد.

+ چگونه می‌توان باکاربرد همگرایی گرانشی ماده تاریک را ردیابی کرد؟

+ اگر ماده تاریک در فاصله‌های زیاد پراکنده باشد، چگونه می‌توان با استفاده از عدسی‌های کوچک‌تر فراوان همانند آنچه در آزمایش خود داشتید، مدلی از پراکندگی آن ساخت؟ پراکندگی ماده تاریک چه تأثیری بر پدیده همگرایی دارد؟

گفتیم که با کاربرد اثر همگرایی گرانشی، اخترشناسان می‌توانند به‌طور غیرمستقیم ماده تاریک را مشاهده کنند شکل ۹ نقشه جرم دو خوشه کهکشانی متفاوت را نشان می‌دهد. در هر شکل هم نگاشت جرم رصد شده به‌وسیله همگرایی گرانشی و هم‌نگاشت جرم رصد شده به‌وسیله پرتو X نشان داده شده است. روش پرتو X ماده درخشان و قابل دید ستارگان را به‌طور مستقیم نشان می‌دهد که با مناطق تیره و روشن نشان داده شده است (آن را نگاشت گرمایی نیز می‌نامند چرا که مناطق تیره‌تر نشانگر مناطق دارای جرم بیشتر هستند) خط‌های منحنی در هر نقشه نیز تجمع جرم رصد شده به‌وسیله اثر همگرایی گرانشی را نشان می‌دهند برای درست کردن این تصاویر اخترشناسان سیگنال‌های ناشی از همگرایی ضعیف را در هزاران کهکشان ورای خوشه‌ها بررسی و آن‌ها را به‌طور آماری با یکدیگر ترکیب کرده‌اند. پس از نمایش این تصاویر می‌توانید از دانش‌آموزان بخواهید تا «ماده گمشده» را در شکل مشخص کنند و هر یک نظریه‌ای درباره تفاوت بین منحنی‌های همگرایی گرانشی و نگاشت گرمایی پرتو X پیشنهاد کنند. بیشتر نظریه‌های متداول در این زمینه عبارت‌اند از: ابعاد اضافی فضا، وجود سیارات، جرم نوترینوها، خطا در اندازه‌گیری فاصله و ابرهای غباری شکل.

در نگاشت همگرایی گرانشی ـ و نه در نگاشت گرمایی ـ ناحیه‌هایی که تجمع جرم زیاد دارند نشانگر ماده تاریک هستند.

پی‌نوشت‌ها

1. The Physics Teacher: Modern Gravitational Lens Cosmology for Introductory Physics and Astronomy Students, May 2015 & Simulating Gravity: Dark Matter and Gravitational Lensing in the Classroom , December 2015 - https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_radius
2. J.B. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity (Addison-Wesley, 2003)- ch.6

۳. برای بحث کمی و ریاضی به‌دست آوردن این رابطه به منبع زیر (فصل ۳) مراجعه کنید:
Singularity Theory and Gravitational Lensing- Arlie O. Petters & Harold Levine & Joachim Wambsganss

4. Arthur Eddington

۵. مقاله دوم منبع ۱، و منبع زیر را ببینید:
http://www.compadre.org/portal/items/detail.cfm?ID=11451

۶. منابع زیر را ببینید:
https://www.youtube.com/watch?v=eI9CvipHl_c
http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/index.html

۷. نمونه‌ای با کیفیت از این تصویر را می‌توان از تارنمای زیر به‌دست آورد:
http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA12110

8. https://www.youtube.com/watch?v=2-My-9CChyBw

۹. برای شرح بیشتر درباره ماده تاریک می‌توانید به مقاله زیر مراجعه کنید:
The Physics Teacher, dark matter, march 2013