

دانشمندان موفق به ثبت اولین تصویر از سیاهچاله در مرکز یک کهکشان شدند

دانشمندان برای اولین بار موفق شده‌اند آن چیزی را که تصور می‌رفت در کیهان غیر قابل دیدن است، مشاهده کنند. آنها توانستند از یک سیاهچاله گول‌پیکر در مرکز یک کهکشان عکس بگیرند. یک تیم ۲۰۰ نفره از دانشمندان در ۶۰ مرکز تحقیقاتی و در طول دو سال، ۱۲۰۰۰ شبیه‌سازی از پرتوهای نوری که از محیط اطراف سیاهچاله به ما می‌رسند را انجام داده و نهایتاً به تصویری از این سیاهچاله دست یافتند. این کشف بزرگ می‌تواند دلیلی بر اثبات نظریه نسبیت عام اینشتین باشد.

ستارگانی که در عالم مشاهده می‌کنیم وقتی به پایان عمر خود نزدیک می‌شوند و در حال مصرف ذخایر پایانی سوخت خود هستند دچار فرایند رمبش گرانشی شده و در خود فرو می‌ریزند. در طول این فرایند، ستاره شروع به فشرده‌شدن کرده و جاذبه گرانشی روی سطح آن افزایش می‌یابد. اگر جرم ستاره به اندازه کافی زیاد باشد، رمبش آن بدون توقف ادامه پیدا می‌کند تا آنجا که جاذبه گرانشی آن به حدی زیاد می‌شود که اجازه فرار هیچ ذره مادی و حتی نور را هم از سطح آن نمی‌دهد. تصور کنید جسمی را که چندین برابر خورشید جرم دارد را در حجمی به وسعت یک شهر جا داده‌ایم. یک چنین جسم بسیار فشرده‌ای، جاذبه گرانشی آنچنان شدیدی ایجاد می‌کند که نیروی جاذبه گرانشی در سطح آن چندین میلیارد بار از نیروی جاذبه روی سطح زمین بیشتر باشد. از آنجایی که نیروی جاذبه گرانشی یک جسم به فاصله از آن وابسته است، نیروی جاذبه یک چنین موجودی با نزدیک شدن به آن به طرز باورنکردنی افزایش می‌یابد. بنابراین در یک چنین حالتی اگر در دام این جسم گرفتار شویم، به عنوان مثال شصت پای ما هزاران بیشتر از انگشتان دستان به سمت این جسم کشیده خواهد شد و در مدت زمان کوتاهی به ذرات و عناصر سازنده خود تجزیه خواهیم شد. از یک چنین اجسامی به عنوان **سیاهچاله** یاد می‌شود که برای اولین بار در سده ۱۸ (میلادی) توسط جان میچل و پیر سیمون لاپلاس مورد توجه قرار گرفتند. این دو دانشمند، به دلیل غیرقابل رویت بودن این اجسام، نام ستاره تاریک را بر آنها نهادند و این نام سالها بعد توسط دانشمندان به سیاهچاله تغییر پیدا کرد. تا پیش از دستیابی به این عکس، تصور می‌شد که امکان مشاهده سیاهچاله بصورت مستقیم وجود ندارد و آنها را تنها می‌توان از طریق اثراتی که روی محیط پیرامون خود دارند شناسایی کرد.

سیاهچاله‌ها به طرز حیرت‌انگیزی پر جرم هستند، اما تنها در ناحیه کوچکی از فضا زندگی می‌کنند. به دلیل رابطه‌ای که میان جرم و نیروی گرانشی وجود دارد، این اجرام به نیروی گرانشی بسیار عظیمی مجهز هستند، به طوری که اجسامی که به اندازه کافی به آنها نزدیک شده و از یک ناحیه مرزی به نام افق رویداد عبور کنند، دیگر هیچ شانس برای بازگشت ندارند. در واقع این مرز به عنوان مکانی در اطراف سیاهچاله تعریف می‌شود که سرعت فرار از آن برابر با سرعت نور است. سرعت فرار از سطح زمین حدوداً ۱۱ کیلومتر بر ثانیه و برای خورشید ۶۱۷ کیلومتر بر ثانیه است. به عبارت دیگر اگر بخواهیم جسمی را عمود بر سطح زمین به سمت بالا پرتاب کنیم بگونه‌ای که این جسم از جو خارج شده و از جاذبه زمین رهایی یابد باید سرعت آن را به ۱۱ کیلومتر بر ثانیه برسانیم. حال این سرعت را با سرعت نور که ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه است مقایسه کنید. پی می‌بریم که نیروی گرانشی یک چنین جسمی که اجازه فرار نور را نمی‌دهد به طرز شگرفی زیاد است. در داخل این مرز (افق رویداد) بایستی سرعتی بیشتر از سرعت نور داشته باشیم تا بتوانیم به سمت بیرون آن بازگردیم، در حالی که بر طبق قوانین حال حاضر فیزیک هیچ چیز نمی‌تواند با سرعتی بیشتر از سرعت نور در خلاء حرکت کند. ستاره‌شناسان با آن روشی که اجرامی مانند ستاره‌ها را می‌بینند، قادر به رصد سیاهچاله‌ها نیستند. در عوض ستاره‌شناسان به صورت غیرمستقیم تلاش می‌کنند تا اثرات ناشی از حضور این اجسام در عالم را ردیابی کنند. به عنوان مثال، سیاهچاله‌های با جرم بسیار زیاد که در مرکز یک کهکشان قرار دارند به دور خود ابر ضخیمی از گازهای داغ را به وجود می‌آورند که با سرعت زیاد می‌چرخند. با رصد تشعشعات ساطع شده از این ابرها، امکان رصد غیرمستقیم یک سیاهچاله فراهم می‌شود. بنابراین، اگرچه سیاهچاله‌ها به طور مستقیم غیر قابل مشاهده هستند (در مقایسه با ستارگان پرنوری که در عالم پراکنده‌اند)، اما این تشعشعات

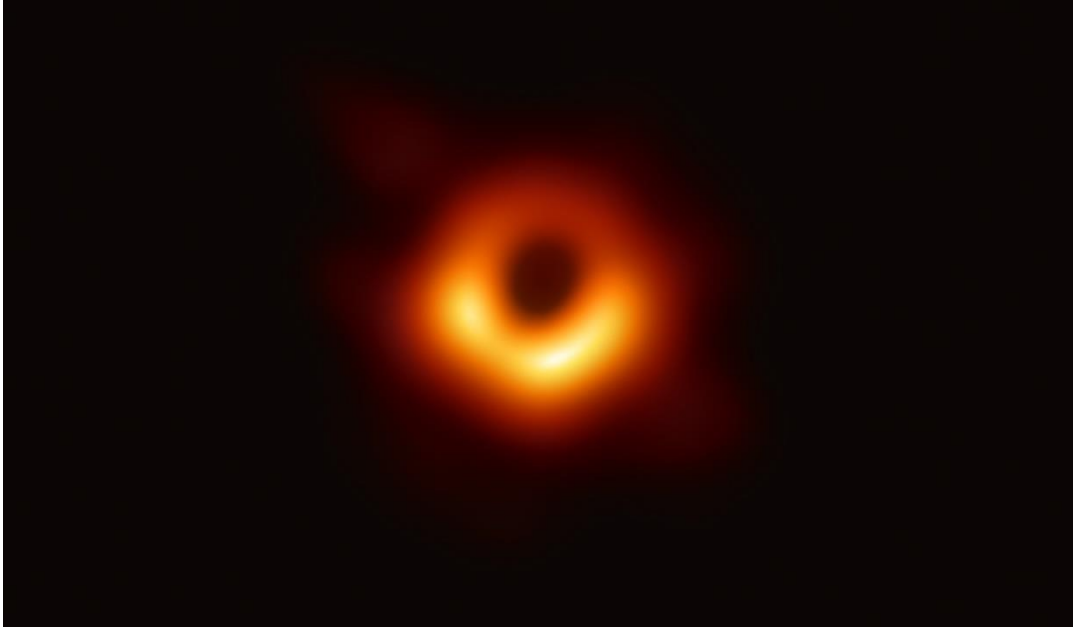
درخشان را می‌توان حتی از فواصل بسیار دور مشاهده کرد. در برخی موارد، جرمی که به سمت یک سیاهچاله جذب می‌شود (مثلاً یک ستاره)، اگر به اندازه کافی با سیاهچاله فاصله داشته باشد، به جای آنکه به درون آن کشیده شود، از مسیر اولیه خود منحرف شده و شروع به دوران حول سیاهچاله می‌کند. موقعیتی شبیه به گردش زمین به دور خورشید را در نظر بگیرید. با رصد مدار یک چنین ستارگانی متوجه می‌شویم جرمی که ستاره به دور آن در حال دوران است، علاوه بر آنکه نوری از خود ساطع نمی‌کند، مدار ستاره را هم بطور غیر معمولی دستخوش تغییر قرار می‌دهد. بنابراین، با رصد مدار یک چنین ستارگانی متوجه می‌شویم جرمی که در مرکز دوران قرار گرفته و ستارگان درخشان با سرعت زیاد در حال دوران حول آن هستند، یک سیاهچاله است. در طول چند سال گذشته دانشمندان حوزه ستاره‌شناسی تلاش کرده‌اند تا سیاهچاله را بطور مستقیم مشاهده کنند. اگر فاصله نوری که به سمت سیاهچاله جذب می‌شود به اندازه کافی زیاد باشد، این نور تنها به دور سیاهچاله دوران کرده و از طرف دیگر فرار می‌کند. دانشمندان با رصد این پرتوها توانستند عکسی بی‌نظیر از یک سیاهچاله فضایی را منتشر کنند که در قلب یک کهکشان قرار گرفته است. این تصویر حفره‌ای تاریک را نشان می‌دهد که اطراف آن را حلقه‌ای از آتش سرخ و نارنجی احاطه کرده است. حفره تاریک در واقع معرف آن ناحیه از فضای اطراف سیاهچاله است که برای نور امکان رهایی از دام میدان گرانشی وجود ندارد. حلقه آتشین در واقع بیانگر پرتوهای نوری است که برای مدتی به دور سیاهچاله چرخیده و از آن به سمت تلسکوپ‌های ما فرار کرده‌اند.

برای جزئیات بیشتر در این خصوص به ادامه متن توجه فرمائید.

اخیراً یک تیم بین‌المللی از اخترشناسان با بهره‌گیری از آرایه‌ای از تلسکوپها به اولین عکس از یک سیاهچاله غول پیکر در کهکشان Messier 87 (M87) دست یافته‌اند. ۵۵ میلیون سال نوری از زمین در قلب کهکشان، یک سیاهچاله غول پیکر قرار دارد که جرم آن ۶.۵ میلیارد برابر جرم خورشید است. این سیاهچاله به واسطه میدان گرانشی عظیم خود، دیسکی از ماده فوق‌داغ، که در حال دوران حول آن است، را پدید آورده است و جت‌های قدرتمندی از ذرات فوق‌نسبیتی، تابش ایکس و اشعه گاما را از قطبهای خود متساعد می‌کند. در نواحی نزدیکتر به خود سیاهچاله، میدان عظیم گرانشی، مسیر حرکت فوتونها و ذرات مادی را از مسیر اولیه شان منحرف کرده و آنها را وادار به دوران به دور خود می‌کند. آندسته از ذراتی که به اندازه کافی به سیاهچاله نزدیک شده‌اند به داخل افق رویداد^۱ آن کشیده شده و با عبور از این مرز بدون بازگشت، دیگر امکان رهایی برای آنها از دام میدان گرانشی وجود نخواهد داشت. اما با تکنولوژی مشاهداتی امروزی می‌توانیم به موادی که در اطراف سیاهچاله وجود دارند، مانند ذرات فوق‌نسبیتی که روی هم رفته تشکیل یک گاز فوق‌داغ را می‌دهند، بنگریم. برای فوتونهایی که به داخل افق رویداد سقوط نکرده‌اند این امکان وجود دارد که از این ناحیه با میدان گرانشی زیاد فرار کرده و سفر خود را به سمت تلسکوپ‌های ما آغاز کنند. تصویری که از مشاهده این فوتونها به ما می‌رسد به **سایه سیاهچاله** معروف است. مدارهای یک چنین فوتونهایی تشکیل یک کره نوری را در اطراف افق می‌دهد که شعاع این کره نوری از شعاع افق سیاهچاله بیشتر است. تصویری که توسط مجموعه تلسکوپ‌های رادیویی گرفته شده یک حلقه از فوتونهای در حال دوران در این کره نوری را نشان می‌دهد. نور مشاهده شده ناشی از این حلقه توسط پروژه تلسکوپ افق رویداد^۲ به دام افتاد. در اولین تصویر گرفته شده از این سیاهچاله، می‌بینیم که مجموعه بیشماری از فوتونهای با حرکت آشوبناک در اطراف افق رویداد، یک فضای خالی (تاریک) را احاطه کرده‌اند، شکل ۱ را ملاحظه کنید.

¹ Event Horizon

² Event Horizon Telescope Project



شکل ۱: تصویر گرفته شده از سیاهچاله در مرکز کهکشان M87. شکل از وبگاه بنیاد ملی دانش^۳ [۱] گرفته شده است.

به عنوان یک مثال ساده اجازه دهید شعاع کره نوری را برای سیاهچاله شوارزشیلد محاسبه کنیم. یک چنین سیاهچاله‌ای به عنوان حل خلاء با تقارن کروی معادله میدان اینشتین بدون در نظر گرفتن ثابت کیهانشناسی شناخته می‌شود. این حل توصیف‌کننده میدان گرانشی اطراف جرم M با تقارن کروی است که در سال ۱۹۱۶ توسط کارل شوارزشیلد^۴ پیدا شد. عنصر خط (متریک) برای فضا-زمان اطراف این سیاهچاله بصورت زیر داده می‌شود

$$ds^2 = -\left[1 - \frac{r_s}{r}\right] c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 d\Omega^2, \quad (1)$$

که در آن $d\theta^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2$ متریک استاندارد کره دوعبده است. فاصله r_s را به عنوان شعاع شوارزشیلد می‌شناسیم که مقدار آن برحسب جرم سیاهچاله بصورت $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ داده می‌شود، که در آن c سرعت نور در خلاء و G ثابت جهانی گرانش است. توجه می‌کنیم که متریک فوق برای $r = r_s$ و $r = 0$ تکین است. به عبارت دیگر عنصر خط در این دو نقطه به بینهایت میل می‌کند و اصطلاحاً خوش رفتار نیست. تکینگی نوع اول را به عنوان تکینگی مختصاتی می‌شناسیم چراکه می‌توان آن را به کمک یک تبدیل مختصات (گذار از مختصات شوارزشیلد به مختصات ادینگتون-فینکلششتین) رفع نمود. اما تکینگی در $r = 0$ را تحت هیچ تبدیل مختصاتی نمی‌توان رفع کرد. این نقطه تکینگی ذاتی فضا-زمان است که توسط افق رویداد که در $r = r_s$ قرار دارد پوشیده شده است. اکنون می‌توان مسیر حرکت منحنی-های نورگونه در اطراف این سیاهچاله را به کمک لاگرانژی زیر بررسی کرد

³ National Science Foundation

⁴ Karl Schwarzschild

$$L = \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu = \frac{1}{2} \left[- \left(1 - \frac{r_s}{r} \right) c^2 \dot{t}^2 + \frac{\dot{r}^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 \dot{\phi}^2 \right], \quad (2)$$

که در آن $x^\mu = \{t, r, \theta, \phi\}$ و $\dot{x}^\mu = \frac{d}{d\lambda} x^\mu$ و λ یک پارامتر تعریف شده در طول منحنی نورگونه است. از آنجاییکه مساله دارای تقارن کروی است ما می‌توانیم بدون از دست دادن کلیات کار θ را ثابت بگیریم. حال به کمک معادله اولر-لاگرانژ، می‌توانیم معادلات حاکم بر مسیر منحنی‌های نورگونه را بصورت زیر بیابیم:

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{t}} \right) - \frac{\partial L}{\partial t} = -c^2 \frac{d}{d\lambda} \left(\left[1 - \frac{r_s}{r} \right] \dot{t} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = \frac{d}{d\lambda} (r^2 \dot{\phi}) = 0, \quad (2)$$

$$L = 0 \Rightarrow - \left[1 - \frac{r_s}{r} \right] c^2 \dot{t}^2 + \frac{\dot{r}^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 \dot{\phi}^2 = 0 \quad (3)$$

معادله (۳) در واقع شرط حاکم بر منحنی‌های نورگونه است. از معادلات (۱) و (۲) داریم

$$r^2 \dot{\phi} = \ell = cte, \quad \text{و} \quad \left[1 - \frac{r_s}{r} \right] \dot{t} = E = cte \quad (4)$$

که در آن E و ℓ ثابت‌های حرکت‌اند و از آنها به ترتیب به عنوان انرژی کل ذره در مدار و تکانه زاویه ای آن یاد می‌شود. با تقسیم معادله (۳) بر $\dot{\phi}^2$ به همراه استفاده از معادلات (۱) و (۲) به رابطه زیر برای منحنی‌های نورگونه دست می‌یابیم

$$\left(\frac{dr}{d\phi} \right)^2 = \frac{c^2 E^2 r^4}{L^2} - r^2 + r_s r, \quad (5)$$

که با مشتق‌گیری مجدد نسبت به ϕ داریم

$$2 \frac{dr}{d\phi} \frac{d^2 r}{d\phi^2} = \left[\frac{4c^2 E^2 r^3}{L^2} - 2r + r_s \right] \frac{dr}{d\phi}. \quad (6)$$

برای مدارهای دایروی شرایط $\frac{dr}{d\phi} = 0, \frac{d^2 r}{d\phi^2} = 0$ برقرار است که منجر به معادلات زیر می‌شوند:

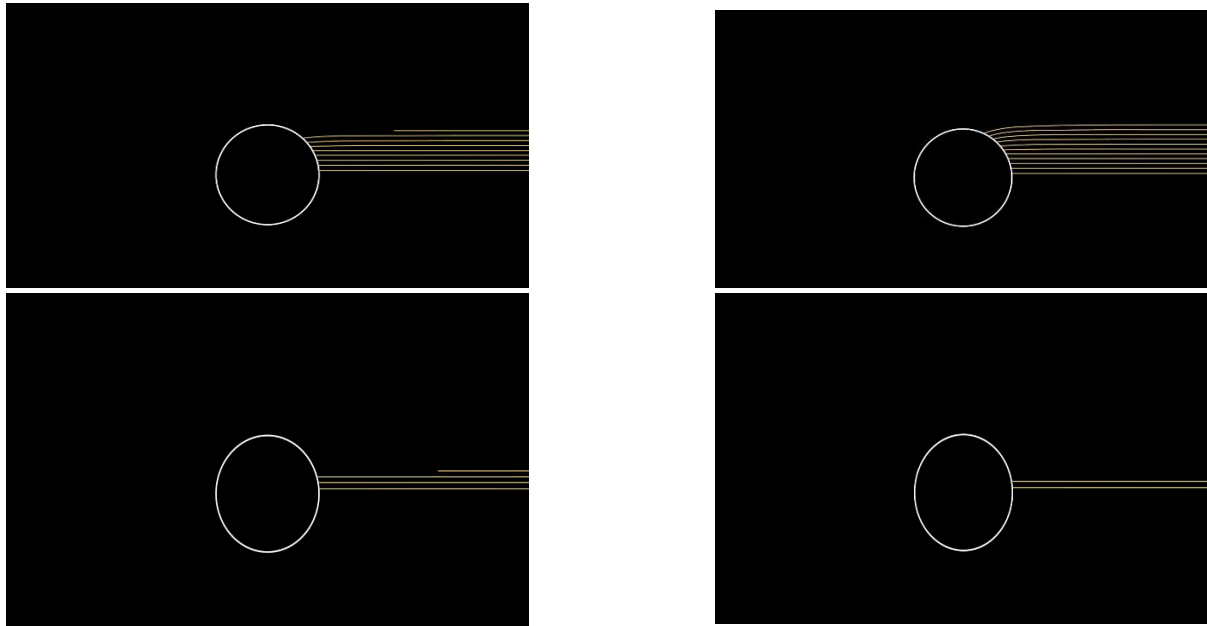
$$\frac{c^2 E^2 r^4}{L^2} - r^2 + r_s r = 0, \quad (7)$$

$$\frac{4c^2 E^2 r^3}{L^2} - 2r + r_s = 0.$$

با حذف $\frac{E^2}{L^2}$ از معادلات فوق درمی‌یابیم که شعاع کره نوری برای سیاهچاله شوارزشیلد یک و نیم برابر شعاع شوارزشیلد است و با رابطه زیر داده می‌شود:

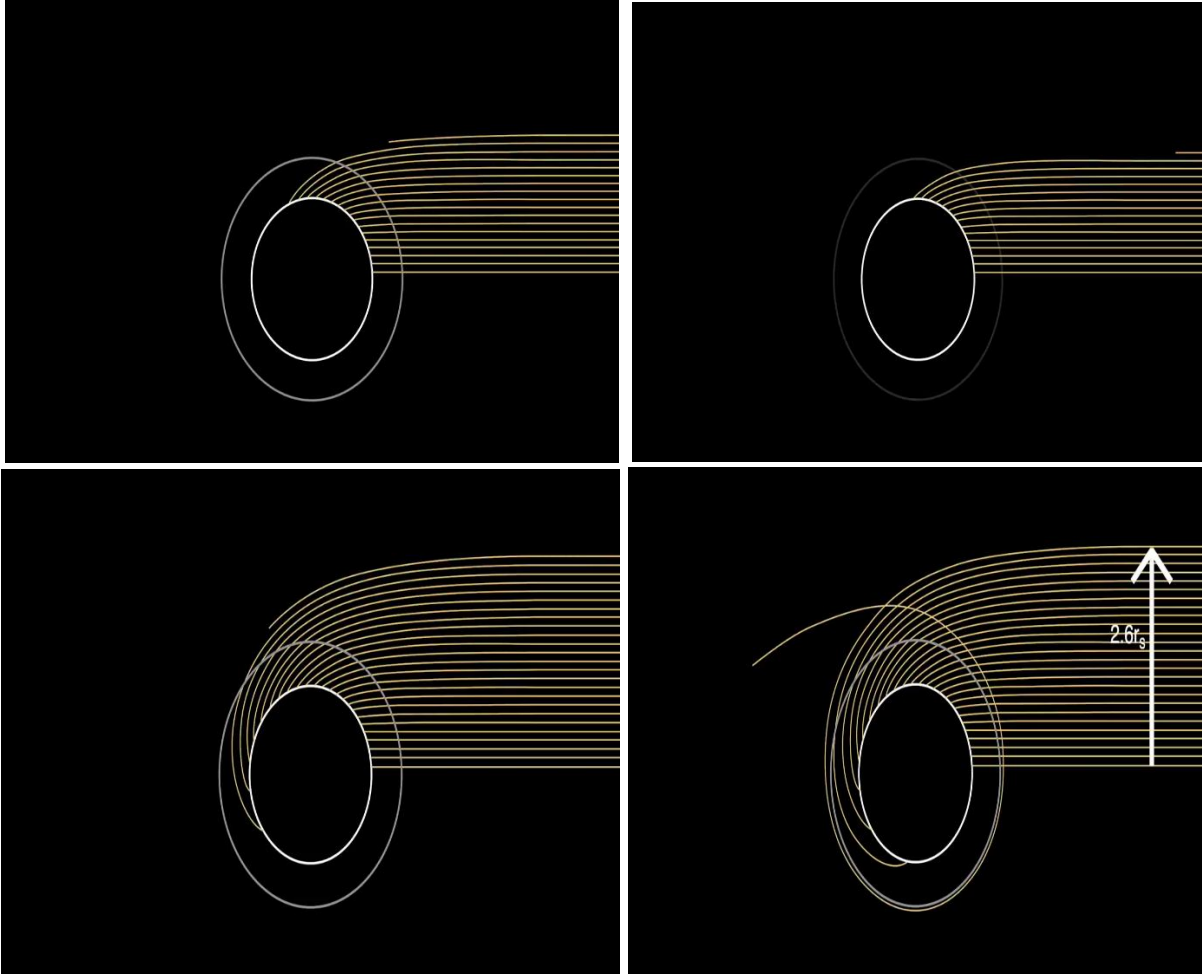
$$r_{ph} = \frac{3}{2} r_s = \frac{3GM}{c^2}. \quad (8)$$

در یک چنین شرایطی مجموعه مدارهای دایروی فوتونها تشکیل یک کره نوری را می‌دهند اما توجه می‌کنیم که این کره نوری ناپایدار است، یعنی، مجموعه مدارهای فوتونی که تشکیل این کره نوری را می‌دهند تحت اختلال کوچکی از مسیر خود منحرف شده و به داخل افق سیاهچاله سقوط کرده و یا از این کره نوری فرار می‌کنند. البته دقت می‌کنیم که حل شوارزشیلد مدل ساده ای از یک سیاهچاله است و برای مدل‌های واقعی‌تر سیاهچاله‌ها، مثلا سیاهچاله‌ای دوار، محاسبات پیچیده‌تری نیاز است. اکنون با توجه به شکل‌های ۲ تا ۵، باریکه‌ای از پرتوهای موازی نور را تصور کنید که مسیر خود را به سمت سیاهچاله طی می‌کنند. مسیر دسته‌ای از این پرتوهای نور توسط میدان گرانشی سیاهچاله خمیده شده و این پرتوها به داخل افق سیاهچاله سقوط می‌کنند بطوریکه امکان رهایی برای آنها وجود ندارد.



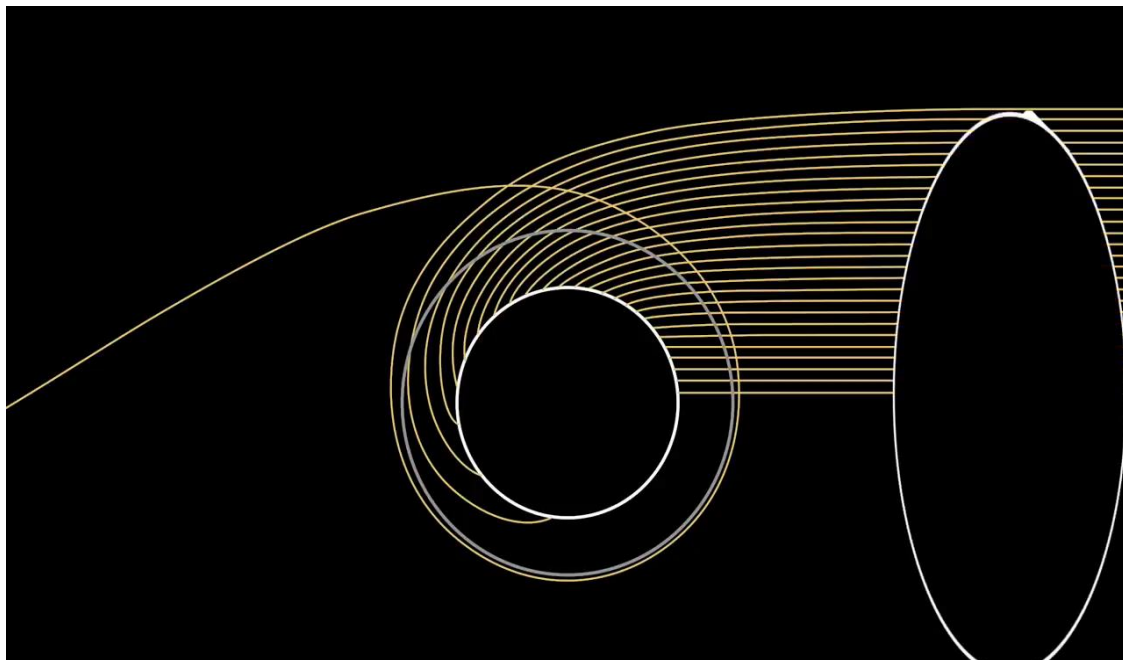
شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ - به ترتیب بصورت ساعتگرد نحوه به دام افتادن پرتوهای نوری را در افق رویداد نشان می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۹، متوجه می‌شویم که با افزایش شعاع برخورد پرتوها با سیاهچاله به شعاع بحرانی $r_{cr} = 2.6r_s$ می‌رسیم بطوریکه پرتو عبوری در یک چنین شعاعی، کره نوری را لمس کرده و از آن به سمت بینهایت فرار می‌کند.



شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ - به ترتیب بصورت پادساعتگرد نحوه به دام افتادن پرتوهای نور توسط افق رویداد (دایره با شعاع کمتر) و پرتویی که برای مدت کوتاهی کره نوری (دایره با شعاع بیشتر) را لمس کرده و به بینهایت فرار می‌کند را نشان می‌دهند.

مجموعه این پرتوها که تعداد بینهایت عکس را تشکیل می‌دهند برای ما تصویری از برهمکنش سیاهچاله با محیط اطراف افق آن را فراهم می‌کند. بنابراین چیزی را که به عنوان سایه (تاریکی) مشاهده می‌شود آندسته از پرتوهایی هستند که با شعاع $r < r_{cr}$ به طرف سیاهچاله رفته‌اند (شکل ۱۰)؛ درحالی‌که پرتوهای با $r \geq r_{cr}$ بعد از انحراف از مسیر اولیه خود، چرخیدن به دور افق برای مقدار متناهی از مختصه ϕ به سمت تلسکوپ‌های ما برگشته و تصویر ۱ را تشکیل می‌دهند. شکل‌های ۲ تا ۱۰ از وبگاه آموزشی [۲] گرفته شده‌اند. برای جزئیات بیشتر در ارتباط با سایه سیاهچاله‌ها در مدل‌های واقعی‌تر سیاهچاله‌ای مرجع [۳] را ملاحظه نمایید.



شکل ۱۰ - نحوه تشکیل سایه توسط پرتوهای نور به دام افتاده در سیاهچاله را نشان می‌دهد.

مراجع

[۱] https://www.nsf.gov/news/news_images.jsp?cntn_id=298276&org=NSF

[۲] <http://veritasium.com/>

[۳] A. Grenzebach, "The Shadow of Black Holes," Springer (2016).

گردآوری:

دکتر امیرهادی ضیایی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات نجوم و اخترفیزیک مراغه

ah.ziaie@riaam.ac.ir