

نحوه اندازه‌گیری سیاه‌چاله‌های فضایی

دیمیتریوس سلتیس – شپرد اس. دلمن

برگردان: امید برومند

سیاه‌چاله‌ها باعث واپیچش فضا-زمان می‌شوند. اخترشناسان با کمک شبکه‌ی عظیمی از تلسکوپ‌ها سعی در مشاهده و کنترل این نکته دارند که آیا قوانین نسبیت عام در نزدیکی **تکینگی گرانشی** (Gravitational singularity) [1] نیز صدق می‌کنند یا نه.



دیمیتریوس سلتیس (عکس سمت چپ) در دانشگاه آریزونا کار می‌کند. او رفتار سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی [2] را بررسی کرده و برای نظریه‌ی نسبیت عام، آزمایش‌های ممکن در میدان‌های گرانش قوی ابداع می‌کند. شپرد اس. دلمن اخترشناس (سمت راست) از موسسه فناوری ماساچوست و مسئول هماهنگ‌کننده‌ی تیم پروژه‌ی تلسکوپ افق رویداد (EHT) با هدف مشاهده‌ی مستقیم سیاه‌چاله‌ها است.

فیزیک‌دانان تجربی در طی یک قرن سعی بیهوده در ارزیابی و بررسی دقیق نظریه نسبیت عام اینشتین داشته‌اند. همه آزمایش‌های آنان در میدان‌های گرانشی ضعیفی صورت گرفته‌اند. زمان آن فرا رسیده که فضا-زمان، تحت شرایط فوق‌العاده سخت و منحصر به فرد کیهانی، یعنی در لبه‌ی سیاه‌چاله‌ها بررسی شوند. در این مکان، گرانش به اندازه‌ی قوی است که حتی نور با عبور از به اصلاح افق رویداد دیگر توانایی فرار از آن را ندارد.

مرکز سیاه‌چاله‌ها قابل مشاهده نیست، اما غول‌های کلان جرم با چنان شدتی ماده‌ی محیط پیرامون را جذب کرده و به سوی می‌کشند که ماده‌ی جذب شونده مقدار زیادی تابش الکترومغناطیس ایجاد می‌کند. گرانش، هر شیئی نزدیک شونده به افق رویداد را با شدت فوق‌العاده‌ی فشرده می‌کند که از این طریق دماهایی تا چندین میلیارد درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شوند. به همین علت، کاملن بر خلاف سیاه‌چاله‌ها که نامرئی‌اند، محیط پیرامون آنها جزو درخشان‌ترین مناطق کیهان به حساب می‌آیند.

اگر سیاه‌چاله‌ای را با تلسکوپ مشاهده کنیم که کیفیت کافی در تفکیک‌پذیری جزئیات برای نشان دادن افق رویداد را داراست، قادر به ردیابی مسیر ماده تا سقوط در افق رویداد خواهیم بود و درخواهیم یافت که آیا ماده در سفر بازگشت‌ناپذیر خود رفتاری مطابق نظریه‌ی نسبیت عام خواهد داشت یا نه. اما در این جا

این شبیه‌سازی نشان‌دهنده این است که نیروهای گرانشی در اطراف سیاه‌چاله، ماده را بشدت داغ می‌کنند. بدین جهت بسیاری از اشیاء تحت این نیروهای گرانشی واقع شده نامرئی نیستند بلکه به روشنی زیادی می‌درخشند.

مشکلی وجود دارد. سیاه‌چاله‌ها و از جمله سیاه‌چاله‌های فوق‌العاده کلان جرمی که امروزه اخترشناسان در مرکز بیشتر کهکشان‌ها

در یک نگاه

آزمایشگاه کهکشان برای فضا-زمان

1- در مکانهایی که تحت تاثیر فوق‌العاده شدید گرانش واقع‌اند، حتی انحرافات کوچک از پیش‌بینی‌های نسبیت عام، عواقب وسیعی را به دنبال خواهند داشت. بدین جهت معادلات اینشتین را می‌توان در این مکان‌ها به دقت مورد آزمایش قرار داد.

2- محققان در آینده نزدیک با استفاده از تلسکوپ‌های رادیویی بخش شده در سرتاسر جهان سعی در بررسی و مطالعه دقیق‌تر چنین مکان‌هایی همانند سَجِیْتِیوس A*، سیاه‌چاله‌ی واقع در مرکز کهکشان راه شیری را دارند.

3- در سال‌های آینده برای این منظور ابزارهای بیشتری مورد استفاده قرار خواهند گرفت و نتایج مستقل از یکدیگری را در مورد بودن یا نبودن تطابق در رفتار سَجِیْتِیوس A* با گمانه‌زنی‌های نظریه-پردازان ارائه خواهند داد.

وجودشان را احتمال می‌دهند، از منظر زمین بسیار کوچک به نظر می‌آیند. آن‌ها به اندازه میلیون‌ها و حتی میلیاردها برابر جرم خورشید را در خود گردآورده و حتی در برخی موارد بزرگ‌تر از کل منظومه‌ی شمسی‌اند.

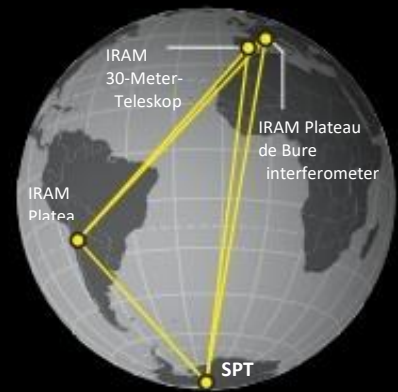
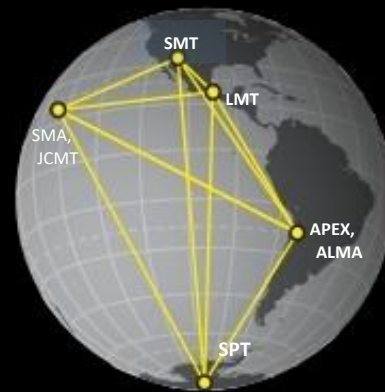
نزدیک‌ترین نماینده‌ی این گونه، سَجِیْتِیوس A* (Sagittarius A*)، شیئی با 4 میلیون برابر جرم خورشید در مرکز کهکشان راه شیری است. افق رویداد آن به اندازه 50 میکروثانیه قوسی [3] به نظر می‌آید - یعنی منطقه‌ای از آسمان، به کوچکی یک شیء ده سانتی‌متری بر روی سطح ماه. ابزاری که وضوح تصویری لازم برای مشاهده‌ی چنین شیئی از این مسافت را دارا باشد، باید 2000 مرتبه از تلسکوپ فضایی هابل بهتر باشد.

فراتر از این چالش‌های فنی، بسیاری از رویدادهای آن‌جا به لحاظ شرایط ویژه و بنیادین فیزیکی از دید ما پنهان مانده‌اند. این رویدادها در مرکز کهکشان راه شیری اتفاق می‌افتند، و ابرهای متراکمی از گاز و گرد و غبار واقع بین ما و سیاه‌چاله، حفاظی در برابر بخش بزرگی از تابش الکترومغناطیس سیاه‌چاله ایجاد می‌کنند.

علاوه بر این ماده‌ی فروریزنده در سیاه‌چاله و تابنده‌ی نور بسیار پر قدرت، خود، بخش‌های وسیعی از طیف نور را جذب می‌کند. بنابراین تنها تعداد معدودی از طول موج‌های تغییر نیافته در کهکشان نفوذ کرده و برای مشاهدات ما قابل استفاده‌اند.

تلسکوپ‌ی به بزرگی زمین

تلسکوپ رادیویی افق رویداد (EHT) حداقل از 9 تلسکوپ رادیویی در همه قاره‌ها تشکیل شده است. همه این تلسکوپ‌ها در مکان‌هایی واقع‌اند که اتمسفر زمین تا حد امکان کمترین اختلال را در علامت‌های دریافت شده ایجاد کند. اخترشناسان با تنظیم همزمان این تلسکوپ‌ها بر روی یک هدف و محاسبه کل اطلاعات جمع‌آوری شده، تلسکوپ مجازی-ای با قطری به بزرگی قطر زمین و متناسب با وضوح تصویری بالاتری ایجاد می‌کنند که توانایی تصویربرداری از منطقه‌ای از آسمان به بزرگی یک DVD بر روی سطح ماه را داراست.



شبکه ابزار

- تلسکوپ (SMT) Submillimeter Telescope در ایالات متحده آمریکا
- تلسکوپ (LMT) Large Millimeter Telescope در مکزیک
- تلسکوپ‌های (SMA) Submillimeter Array و Clerk Maxwell Telescope (JCMT) در هاوایی

- Array و Atacama Pathfinder Experiment (APEX)- Atacama Large Millimeter/submillimeter (ALMA) در شیلی
- تلسکوپ قطب جنوب (SPT) در ایستگاه قطب جنوب آموندسن اسکات در قطب جنوب
- دو تلسکوپ از موسسه Radioastronomie Millimétrique (IRAM) در اسپانیا و فرانسه

تمامی جهان به یک هدف می‌نگرد



تلسکوپ افق رویداد (EHT) یک پروژه‌ی بین‌المللی با هدف از میان برداری این موانع و مشکلات و امکان‌پذیرسازی اولین بررسی یک سیاه‌چاله در جزئیاتش می‌باشد. مهندسان برای دستیابی به بالاترین وضوح تصویری از سطح زمین، از به‌اصطلاح **تداخل‌سنجی خط پایه بسیار طولانی (VLBI)** [4] استفاده می‌کنند. اخترشناسان با استفاده از این تکنیک، همزمان تلسکوپ‌های رادیویی در سرتاسر جهان را بر روی یک هدف تنظیم کرده و پس از ضبط داده‌ها با کمک یک ابررایانه آن‌ها را در تصویر واحدی گرد هم می‌آورند. به این ترتیب تلسکوپ‌ها یک ابزار به هم‌پیوسته و به بزرگی زمین تشکیل می‌دهند. از آنجا که طبق قوانین نورشناسی، وضوح تصویری حاصل شده توسط این تلسکوپ، نسبت بین طول موج و بزرگ‌ترین فاصله‌ی بین آنتن‌ها (قطر تلسکوپ VLBI م.) است، VLBI در کل ارائه‌کننده‌ی بهترین تلسکوپ زمینی برای امواج رادیویی می‌باشد. امروزه بر این اساس، تصویرهایی حاصل می‌شوند که نسبت به تصویرهای نوری جزئیات به‌مراتب بیشتری را به نمایش می‌گذارند.

پرتوهای نور نزدیک شونده به یک سیاه‌چاله (در این تصویر پرتوهای واردشونده از سمت چپ از بالا) امکان وارد شدن به یک مدار دایره شکل را دارند. این «مدار فوتونی» خارج از افق رویداد واقع است. هر فوتون با سقوط به فضای بینابین «مدار فوتونی» و افق رویداد ناگزیر از افق رویداد عبور خواهد کرد. ذرات نوری که در خارج از این فضای بینابین، به دور سیاه‌چاله در گردش‌اند توانایی فرار دوباره از آن را دارند. مدار فوتونی نشانه‌گذار مرز بین محیط روشن سیاه‌چاله و «سایه»ی بسیار تاریک‌تر آن است.

پیشرفت‌های فنی به زودی کار با کوتاه‌ترین امواج رادیویی و از این طریق مقابله با تمامی چالش‌های مشاهده‌ی سیاه‌چاله‌های فضایی را امکان‌پذیر خواهند ساخت. کهکشان راه شیری در طول موج‌های کوتاه در محدوده‌ی حدود یک میلی‌متر، عمدتاً شفاف است، بدین

ترتیب **تلسکوپ افق رویداد (EHT)** نسبت به اختلال توانایی مشاهده‌ی سَجِیْتِیوس A^* و مناطق داخلی‌اش در مجاورت مستقیم افق رویداد را دارد. به لحاظ محاسباتی، این تصادف خوشحال‌کننده‌ای است که شبکه جهانی تلسکوپ VLBI در طول موج‌های میلی‌متری توان تصویربرداری کافی، برای تشخیص افق رویداد سیاه‌چاله‌های دیگر در کهکشان‌های نزدیک را نیز داراست.

اخترفیزیک‌دانان نظری همزمان با طراحی و توسعه مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای در پی تفسیر و درک نتایج احتمالی مشاهدات آتی هستند. آن‌ها با الگوریتم‌های تدوین شده‌ی ویژه‌ی ابر رایانه‌ها، ماده را در افق رویداد به چرخش وامی‌دارند. نتایج، نشان می‌دهند که نور منتشر شده تا حدی از شکل سیاه‌چاله در این فرآیند تأثیر می‌پذیرد.

جیمز بردین، فیزیک‌دان از دانشگاه واشنگتن، وجود این «سایه» را در سال 1973 پیش‌بینی کرده بود. بنابر تعریف، هیچ نوری با گذار از افق رویداد امکان بازگشت دوباره را ندارد. اما **بردین** منطقه‌ای بیرون از این مرز را کشف کرد، جایی که نور وارد مداری در اطراف سیاه‌چاله به نام **مدار (کره) فوتونی [5]** می‌شود (نگاه شود به تصویر بالا). اگر پرتویی این مدار (کره) را به سمت داخل قطع کند، در حرکتی مارپیچی شکل، بی‌بازگشت به داخل سیاه‌چاله سقوط خواهد کرد. پرتوهای نور ایجاد شده بین این مدار کروی شکل و افق رویداد در صورتی توانایی گریز دارند که جهت‌شان تقریباً همانند شعاع کره به سمت بیرون (از کره فوتونی م.) باشد. در غیر این صورت سیاه‌چاله مسیر آن‌ها را طوری به سمت عقب (یعنی به سمت درون سیاه‌چاله م.) خم می‌کند که آن‌ها هم به درون سیاه‌چاله سقوط می‌کنند.

فضا - زمان در آزمایش پایداری و مرز تحمل

اختر فیزیک‌دانان بر پایه نظریه نسبیت عام، مدل‌های پیچیده‌ای برای فرآیندها در مجاورت سیاه‌چاله‌ها ساخته‌اند. با اولین اندازه‌گیری‌های تلسکوپ افق رویداد، به‌زودی داده‌ها و اطلاعاتی از چنین اشیائی در دسترس خواهند بود. در صورت عدم تطابق این داده‌ها با شبیه‌سازها، بازنویسی احتمالی نظریه‌ی انشتین لازم خواهد بود.

سایه‌ی سیاه‌چاله‌ها

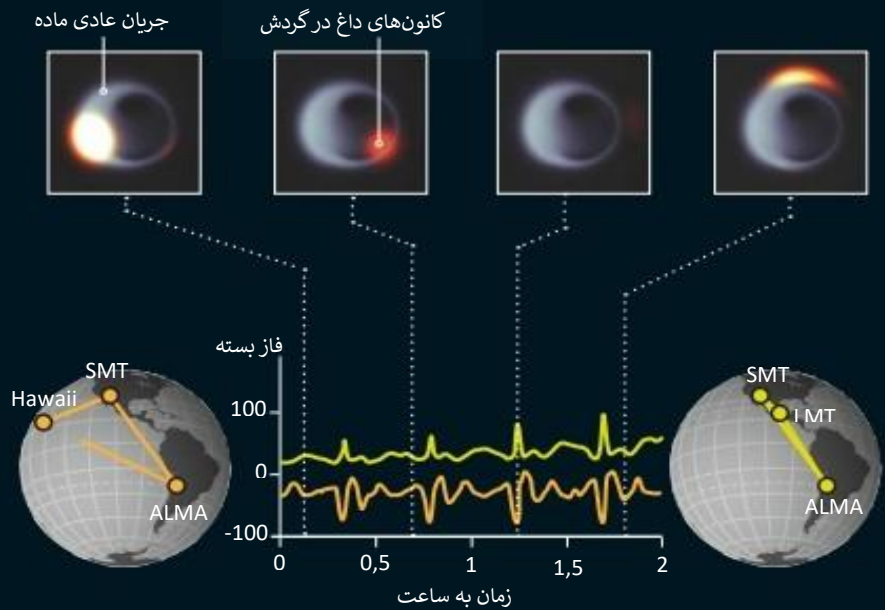


یک سیاه‌چاله بر روی ماده داغ اطرافش «سایه» می‌افکند. شکل و بزرگی این سایه در اصل وابسته به سرعت چرخش سیاه‌چاله، شدت انحراف نور در نزدیکی اش و مکان حضور ناظر می‌باشد. همه این عوامل موثر، ظاهراً به صورت اتفاقی طوری با یکدیگر در هم‌کنش‌اند که سایه‌ی سیاه‌چاله همیشه کروی شکل به نظر می‌آید (a). اما این فقط در صورتی امکان‌پذیر است که معادلات اینشتین درست بوده و «قضیه بدون مو» [7] تحقق یابد. بر طبق این نظریه 3 پارامترِ چرم، تکانه زاویه‌ای و بار الکتریکی برای شرح کامل یک سیاه‌چاله کافی‌اند. اما در عوض، اگر سیاه‌چاله‌های واقعی سایه‌های بیضی شکل همانند شکل‌های (b) و (c) ایجاد کنند، احتمالان قضیه اشتباه خواهد بود.

در حالت عدم توازن ماده

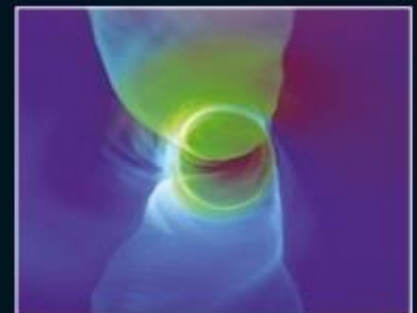
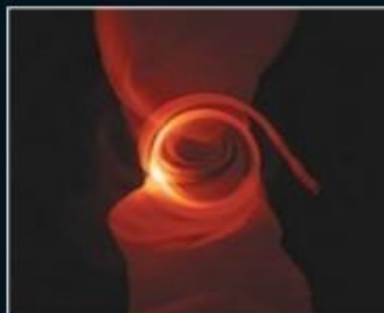
سیاه‌چاله‌ها گاهی اوقات به‌شدت می‌درخشند. «کانون» های داغ موجود در جریان‌های گاز و گرد و غبار (عکس-های بالا سمت راست) توضیح احتمالی‌ای برای این پدیده‌اند. حرارت این مکان‌ها قبل از انحلال و متلاشی شدن به‌شدت افزایش می‌یابد. تلسکوپ افق رویداد (EHT) با استفاده از خطوط بسته بین هر یک از سه تلسکوپ، زمان حرکت نور بین شبکه‌های ابزارها را اندازه‌گیری می‌کند. از طریق محاسبات هندسی، پی بردن به مکان «کانون‌های داغ» و جریان ماده در اطراف سیاه‌چاله امکان‌پذیر می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی‌ها (نمودار راست پایین) نشان‌دهنده‌ی چنین علامت‌ها یا سیگنال‌هایی هستند که فاز بسته (Closure Phase) نام دارند (مجموع فازها در امتداد مثلث بسته‌ی تلسکوپ‌ها). این دو منحنی از دو خط (بسته) مختلف‌اند. هنگام چرخش کانون داغ به‌دور سیاه‌چاله منحنی‌هایی شبیه به مدل ضریان قلب ایجاد می‌شوند. تفسیر درست منحنی‌ها، نشان‌دهنده‌ی سیر فضا-زمان به‌دور سیاه‌چاله می‌باشد که به‌توبه‌ی خود با پیش‌بینی‌های نظری مقایسه می‌شوند.



بغرئجی در رایانه

تیم‌های مختلف تلسکوپ افق رویداد، برای شبیه‌سازی‌های پیچیده از جریان‌های ماده به‌دور سیاه‌چاله‌ها از آبرایانه استفاده می‌کنند. مانند هر شیء نجومی دیگر در این‌جا نیز با پدیده‌های بسیار بغرئجی روبرویم. در عکس سمت راست سیاه‌چاله نسبتاً آرام دیده می‌شود. در سمت چپ منطقه‌ی فعالی به‌هنگام فوران تشعشع دیده می‌شود. اختر فیزیک‌دانان بعدن با کمک چنین محاسباتی رفتار واقعی مشاهده‌شده‌ی سیاه‌چاله‌ها را تفسیر می‌کنند.



تباين نوری (contrast) بين حلقه‌ی درخشان مدار فوتونی و محیط به مراتب کم‌نورتر و کم‌سوی واقع در زیر آن، سایه‌ی سیاه‌چاله است. سایه‌ی سیاه‌چاله باید از زمین به علت باد شدن ظاهری‌اش توسط میدان گرانشی پر قدرت به مراتب بزرگ‌تر جلوه کند - گرانش، نور را شدیدن خم کرده و به این علت مانند عدسی بزرگ‌نما عمل می‌کند.

تلسکوپ افق رویداد (EHT) باید اکنون این سایه و ویژگی‌های دیگر سیاه‌چاله‌ها را نمایان سازد. آزمایش‌های اولیه در سال‌های 2007 و 2009 در کل نشان‌دهنده‌ی عملکرد این رویکرد تکنولوژیکی‌اند. برای این هدف اخترشناسان 3 تلسکوپ رصدخانه‌های واقع در هاوایی، آریزونا و کالیفرنیا را به سمت سَجیتریوس A* و یک سیاه‌چاله‌ی کلان‌چرم دیگر واقع در کهکشان میسر 87 نشانه گرفته و داده‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری شده را محاسبه کردند. در هر دو مورد، شدت امواج رادیویی دریافت شده با طول موج 1.3 میلی‌متر با انتظارات دانشمندان از سایه‌ی سیاه‌چاله‌ها بر پایه‌ی شبیه‌سازی رایانه‌ای مطابقت داشتند.

با شبکه‌ی جهانی رصدخانه‌ها، سرانجام به اندازه‌ی کافی داده‌ها و اطلاعات لازم برای محاسبه‌ی تصویرهای کامل این سیاه‌چاله‌ها در اختیار خواهند بود. اندازه‌گیری‌های شبکه‌ی جهانی تلسکوپ VLBI همچنین برای ردیابی به اصطلاح کانون‌های داغ (Hotspots)، منطقه‌های مجزای بخصوص فعال و دنبال کردن مسیرهای آن‌ها مورد استفاده قرار خواهند گرفت. اگر چه نظریه‌ی نسبت عام چگونگی شکل سیاه‌چاله‌ها و گردش ماده به دور آن‌ها را پیش‌بینی می‌کند، اما مشاهدات VLBI این نظریه را در مکانی با عواقب بسیار شدید تحت آزمایش‌های دقیق قرار می‌دهد.

سیاه‌چاله یا تکینگی عریان [6]؟

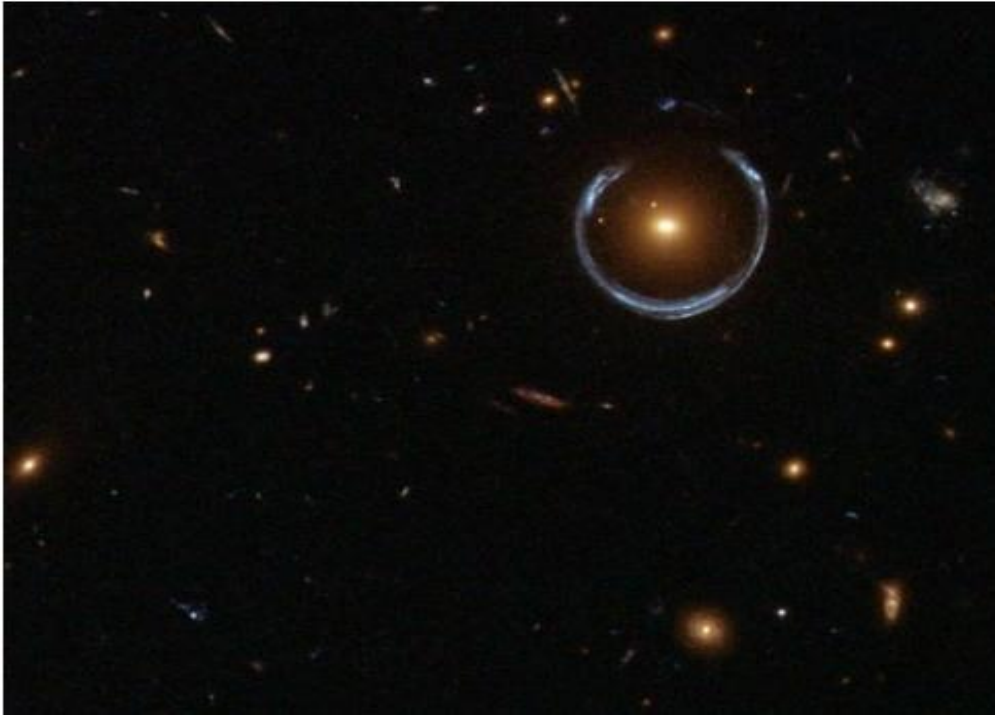
تلسکوپ افق رویداد (EHT) پاسخ به این سوال اساسی که آیا سَجیتریوس A* واقعن یک سیاه‌چاله است را امکان‌پذیر خواهد ساخت. گرچه تمام مشاهدات تا کنون این نتیجه‌گیری را تایید می‌کنند، اما تا به حال کسی سیاه‌چاله‌ای را بطور مستقیم مشاهده نکرده است. توضیحات دیگر در این مورد نیز سازگار با نظریه‌ی نسبت عام خواهند بود. بطور مثال سَجیتریوس A* احتمالن چیزی است که فیزیک‌دانان آن را به مثابه **تکینگی عریان** توصیف می‌کنند.

تکینگی گرانشی (Singularity) مکانی است که حل بعضی از معادلات در آن غیر ممکن بوده و قوانین فیزیکی آشنا در آن عملکردی ندارند. بدین ترتیب بر اساس درک فعلی، در آغاز جهان لحظه‌ای وجود داشت که تمام اجزای کیهان در نقطه‌ای دارای چگالی بی‌نهایت بزرگ متمرکز بوده‌اند. طبق نظریه‌ی نسبت عام، شکل دیگری از تکینگی گرانشی در مرکز هر سیاه‌چاله‌ای قرار دارد. در این نقطه، گرانش ماده را بی‌نهایت فشرده می‌کند.

البته افق رویداد این منطقه را از دید ما پنهان می‌کند. اما طبق نظریه‌ی نسبت عام، هر تکینگی الزامن از دیدها نباید پنهان بماند. بعضی از راه‌حل‌های معادلات اینشتین، سیاه‌چاله‌های عادی‌ای را تشریح می‌کنند که با چنان سرعتی در چرخش‌اند که افق‌های آن‌ها تا حدودی باز می‌شوند. برخی هم بدون افق رویدادند. چنین تکینگی‌های عریان، سازه‌های صرفن نظری‌اند. نسخه‌ای برای چگونگی پیدایش آنها تحت شرایط عادی وجود ندارد. هر شبیه‌سازی رایانه‌ای معقول در فیزیک نجومی از زوال و فروپاشی یک ستاره، با یک افق رویداد پایان می‌یابد. راجر پنروز ریاضی‌دان انگلیسی، در سال 1969 وجود یک «سانسور کیهانی» توسط طبیعت را فرض می‌کرد، یعنی پوشش همیشگی یک تکینگی عریان با افق رویداد. این فرضیه تا به امروز نه به اثبات رسیده و نه رد شده است. کشف یک تکینگی عریان توسط تلسکوپ افق رویداد (EHT) در مرکز کهکشان راه شیری مشکلی برای نظریه‌ی اینشتین ایجاد نخواهد کرد، چرا که طبق این نظریه در نهایت چنین ساختارهایی مجازند. البته توضیح چگونگی پیدایش این تکینگی، چالشی برای فیزیک مدرن است.

امید است که تلسکوپ افق رویداد (EHT) همچنین بررسی فرضیه قدیمی دیگری را در مود سیاه‌چاله‌ها امکان‌پذیر سازد. در صورت اشتباه بودن آن فرضیه، نظریه‌ی نسبت عام در مخمصه و تنگنای بدی قرار خواهد گرفت. بر خلاف «سانسور کیهانی» راه‌گریز ریاضی در این‌جا وجود ندارد.

«نظریه بدون مو» [7] تشریح کامل هر سیاه‌چاله توسط 3 مشخصه را می‌طلبد: چرم، تکانه‌ی زاویه‌ای و بار الکتریکی آن. به عبارت دیگر، همانطور که مثلن دو الکترون هیچ تفاوتی با یکدیگر ندارند، دو سیاه‌چاله با مقادیرهای برابر کاملن یکسان‌اند. سیاه‌چاله‌ها «مو» و علاوه بر آن هیچ مشخصه‌ی هندسی و یا مشخصه‌ی دیگری ندارند.



در این تصویر از تلسکوپ فضایی هابل، یک کهکشان ظاهر دایره‌ای شکل و آبی رنگ، از جلو به دور کهکشان عظیم و روشن دیگری حلقه زده است. هر دو کهکشان از دیدگاه زمین به شکل اتفاقی و به طرز عالی بر روی مسیر دیدی واقع‌اند که عدسی گرانشی، شکل کهکشان عقبی را به شدت به صورت واپیچش شده ترسیم می‌کند. پدیده‌ی مشابه فضا-زمانی دیگری باعث واپیچش حلقه‌ای شکل ماده به هنگام عبور از پشت یک سیاه‌چاله می‌شود.

تصویر سایه‌نمای همیشه یکسان

زمانی که برای اولین بار قصد مشاهده‌ی سیاه‌چاله‌ها با تکنیک تداخل سنجی طولانی پایه‌ی VLBI را داشتیم، در فکر استفاده‌ی اشکال و اندازه‌های سایه‌های آنها برای محاسبه تکانه‌ی زاویه‌ای و جهت‌گیری‌شان بودیم. اما شبیه‌سازی‌ها باعث غافلگیری‌ای شدند که در نهایت حتی خوشایند بود. در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، تفاوتی نداشت که یک سیاه‌چاله با چه سرعتی در گردش بود و یک ناظر در چه مکانی نسبت به آن قرار داده می‌شد، سایه سیاه‌چاله همیشه تقریباً گرد بود و بزرگی ظاهری‌اش همیشه حدود پنج برابر افق رویداد را نشان می‌داد. در صورت وجود احتمالی رابطه‌ی فیزیکی عمیق تری در مورد سایه‌ی سیاه‌چاله‌ها، این رابطه هنوز کشف نشده است. اما این پدیده یک پیش‌شرط عالی برای بررسی نظریه‌ی نسبیت عام است - چرا که این پدیده در صورت درست بودن نظریه‌ی نسبیت عام، رخ می‌دهد (نگاه شود به فضا-زمان در آزمایش پایداری و مرز تحمل). اگر **سجیترایوس A*** دارای افق رویدادی با شکل متفاوتی نسبت به محاسبات باشد، در آن صورت «نظریه‌ی بدون مو» و در نتیجه نظریه‌ی اینشتین نقض خواهند شد.

تلسکوپ افق رویداد (EHT) حجم اطلاعاتی به مراتب بیشتر از آن چه که فقط برای عکس‌ها لازم است، در اختیارمان قرار خواهد داد. آنتن‌های تلسکوپ با ثبت جهت قطبش تابش منتشر شده‌ی سیاه‌چاله، میدان‌های مغناطیسی اطراف افق رویداد را نقشه‌برداری می‌کنند. این، باعث درک بهتری از فرآیندهای فیزیکی‌ای که منجر به به اصطلاح «جت»ها در بعضی کهکشان‌ها مانند Messier 87 می‌شوند، خواهد شد. منظور فوران‌های پرتوگونه و فوق‌العاده پر انرژی ماده‌ای است که مرکز کهکشان را با سرعتی تقریباً برابر با سرعت نور ترک کرده و تا 1000 سال نوری در کیهان امتداد می‌یابند. اختر فیزیک‌دانان گمان بر این دارند که انرژی لازم برای این فوران‌ها از میدان‌های مغناطیسی نزدیک به افق رویداد سیاه‌چاله‌های فوق‌العاده کلان جرم سرچشمه می‌گیرند. اندازه‌گیری میدان‌ها، کمکی در آزمودن این فرضیه است.

با پیگیری چگونگی جریان ماده در اطراف سیاه‌چاله، اطلاعات بیشتری در مورد سیاه‌چاله‌ها به دست خواهد آمد. در قرص برافزایشی [8]، جایی که گاز و غبار، گرد آمده و فشرده می‌شوند حرکات، احتمالاً بشدت آشفته و نامنظم‌اند. در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای اغلب، مناطق متمرکز، ناپایدار و به لحاظ مغناطیسی فعالی همانند شراره‌های خورشیدی [9] ایجاد می‌شوند. این کانون‌های داغ (Hotspot) توضیحی احتمالی برای روشنایی متغیر **سجیترایوس A*** می‌باشند. آن‌ها در کم‌تر از نیم‌ساعت با سرعتی تقریباً برابر با سرعت نور یک دور به دور سیاه‌چاله می‌گردند. گاهی اوقات، هنگامی که این کانون‌های داغ در پشت سیاه‌چاله واقع‌اند، شکل آن‌ها توسط عدسی گرانشی به

حلقه‌ی ظاهری‌ای واپیچش (Verzerrung) می‌شود، که مشابه برخی تصویرهای تلسکوپ فضایی هابل از کهکشان‌های بسیار دور دست است. در موارد دیگر آنها چندین بار به دور سیاه‌چاله چرخیده، انرژی خود را از دست داده و محو می‌شوند.

کانون‌های داغ، احتمالاً باعث پیچیدگی روند تصویربرداری و ضبط، توسط تلسکوپ افق رویداد EHT می‌شوند. چرا که روش تداخل سنجی طولانی پایه‌ای VLBI تا حدودی شبیه روند نوردهی طولانی در عکاسی عمل می‌کند. در نتیجه دوربین تقریباً تمام مدت باز می‌ماند. در این جریان، تلسکوپ‌ها از چرخش زمین برای ضبط و تصویربرداری از سیاه‌چاله از زوایای هر چه بیشتر، استفاده می‌کنند. اگر لکه روشنی بدور سیاه‌چاله در گردش باشد، همانند عکس شخصی که به هنگام سرعت شاتر یا زمان نوردهی [10] دوربین، سریع حرکت می‌کند، در عکس تار ظاهر خواهد شد.

آزمودن نظریه نسبیت عام احتمالاً با کمک لکه‌های داغ نیز امکان‌پذیر خواهد شد. موقعیت‌های کانون‌های داغ در آسمان با کمک زمان‌های مختلف طی شده‌ی علامت (سیگنال)‌های نوری تا تلسکوپ و از طریق محاسبه‌ی ساده‌ی مثلثاتی، محاسبه می‌شوند. در همین ارتباط مناطق پر انرژی به هنگام چرخش به دور سیاه‌چاله، نشان‌ها و نمایه‌های ویژه‌ای را در داده‌های خام تلسکوپ‌ها ایجاد می‌کنند. همان‌طور که شکل و بزرگی سایه‌ی سیاه‌چاله‌ها توسط معادلات انشتین محاسبه می‌شوند، حداقل به لحاظ نظری، تمامی اطلاعات درباره مدار کانون‌های داغ نیز از این معادلات نتیجه می‌شوند. واقعیت به احتمال زیاد پیچیده‌تر است. با وجود این، تلسکوپ افق رویداد (EHT) باید در بهترین موقعیت کارآمدی حساسیت‌اش در اندازه‌گیری، قادر به شناخت یک ساختار در جریان و حرکت باشد. این نکته ارائه‌کننده روش دیگری برای بررسی درستی پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت عام در مورد تحرکات و جنبش در اطراف یک سیاه‌چاله است.

رقیبی برای تلسکوپ افق رویداد (EHT)

منتظر چه باید بود؟ آیا مشاهدات ما باید مغایر با نظریه‌ی اینشتین باشند؟ کارل ساگان اخترفیزیکدان معروف، که در سال 1996 میلادی درگذشت، جمله معروفی به این مضمون دارد که ادعاهای خارق‌العاده، نیازمند اثبات‌های خارق‌العاده‌اند. این نکته در علوم طبیعی به این معنی است، که آزمایش‌های مستقل باید تاییدکننده نتایج باشند. در دهه‌های آتی تلسکوپ‌های قدرتمند، اطلاعاتی از قبیل مشاهده‌ی گردش ستاره‌های نوترونی (جرم‌های آسمانی فوق‌العاده متراکم که به هنگام فروپاشی ستارگان کلان جرم پدید آمده‌اند) به دور سیاه‌چاله‌ها، را ارائه خواهند داد.

تداخل سنجی نوری GRAVITY که بر روی تلسکوپ بسیار بزرگ (VLT) در رصدخانه‌ی جنوبی اروپا در شیلی در حال نصب است و همچنین نسل بعدی تلسکوپ‌های آینه‌ای با قطر بیش از سی متر، در کهکشان راه شیری قادر به ردیابی ستارگان در حال گردش در مدار سَجِیترِیوس *A که به بزرگی چند صد برابر افق رویداد آن‌اند، خواهند بود. **SKA Square Kilometre Array** که در آفریقای جنوبی و استرالیا هم اکنون در دست ساختمان است، مدار ستاره‌های نوترونی یا پالسار (Pulsar)‌هایی را که با سرعت بسیار بالا در حال گردش به دور سیاه‌چاله‌اند، هدف می‌گیرند. علاوه بر این پسان‌تر، **تداخل سنجش لیزری ماهواره‌ی eLISA**، امواج گرانشی اشیاء بسیار فشرده (چگال) در مدار سیاه‌چاله‌ها را دریافت و ثبت خواهد کرد.

میدان گرانشی یک سیاه‌چاله با چنان شدتی اجسام اطراف خود را می‌کشد که مدارهای بیضی شکل‌شان دچار اختلالات و تغییر جهت می‌شوند. این پدیده‌ی به اصطلاح گردش **خط آپساید** (Apsidal precession) [11] به قدری شدید است که نقطه‌ی اوج مدار پس از چند گردش کامل مداری، دایره‌ی کاملی را در فضا ترسیم خواهد کرد. در مجموع می‌توان از تغییرات مدار گردش اجسام گوناگون در فاصله‌های متغیر نسبت به سیاه‌چاله مدلی سه بُعدی از فضا-زمان در مجاورت سیاه‌چاله ایجاد و از این طریق بررسی کرد که آیا پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت عام تاییدی برای مشاهدات‌اند یا نه.

همان‌گونه که نظریه‌ی اینشتین جایگزین معادلات نیوتن شد، این ابزارها هم کمکی در تصمیم‌گیری در مورد دوام و ادامه‌ی نظریه‌ی اینشتین برای یک سده دیگر و یا حداقل جایگزینی آن در رابطه با شرایط خارق‌العاده‌ی سیاه‌چاله‌ها توسط نظریه‌ی بهتری می‌باشند.

پی‌نوشت‌ها:

1- تکینگی گرانشی (ویکی‌پدیا)

تکینگی گرانشی یا **تکینگی فضازمان** محلی است که در آن کمیت‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری میدان گرانشی به صورت رقم بسیار بالا ولی نه بینهایت استفاده می‌شوند، به‌طوری‌که دیگر تابع دستگاه مختصات مورد استفاده نیستند. این کمیت‌ها همان، انحنای فضازمان هستند که شاخصی از چگالی ماده می‌باشند. دو نوع مهم تکینگی فضازمان، تکینگی منحنی و تکینگی مخروطی می‌باشند.

2- ستاره نوترونی (ویکی‌پدیا)

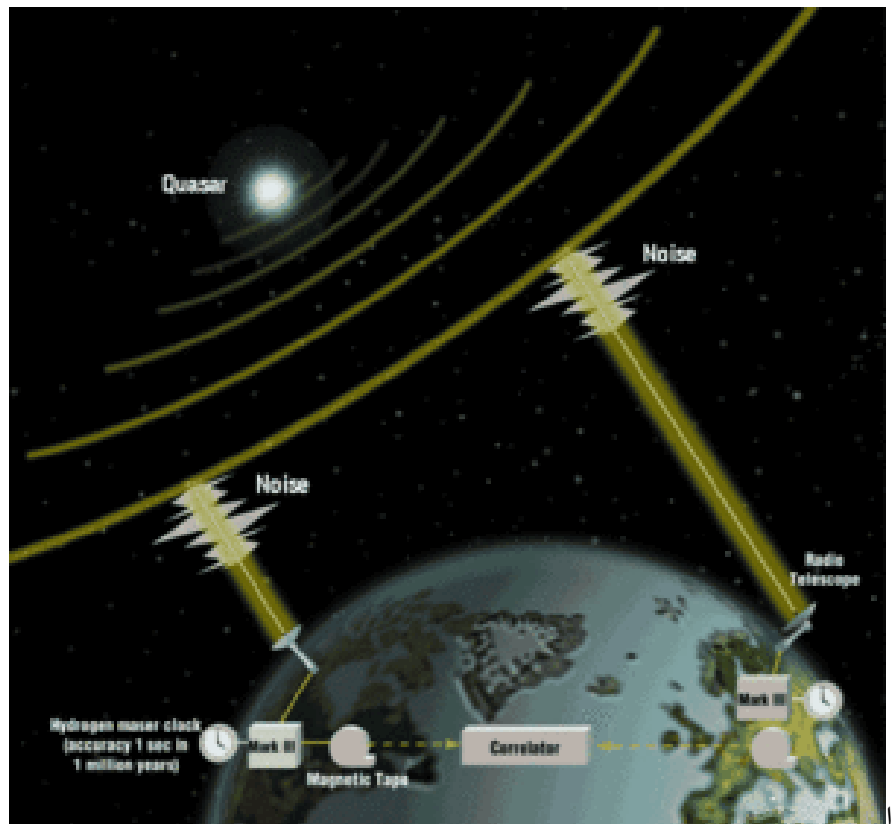
یک **ستاره نوترونی** هسته فروپاشی‌شده یک ستاره بزرگ است که پیش از فروپاشی جرم آن در مجموع بین ۱۰ تا ۲۹ جرم خورشیدی بوده‌است. ستاره‌های نوترونی کوچکترین و متراکمترین ستارگانی هستند که تاکنون شناخته شده‌اند. هنگامی که ستاره پر جرمی به شکل ابرنواختر منفجر می‌شود، گاهی هسته آن می‌تواند سالم و برجا بماند. اگر جرم هسته بین ۱٫۴ تا ۳ جرم خورشیدی باشد پدیده طبیعی گرانش، آن را فراتر از مرحله کوتوله سفید متراکم می‌کند تا جایی که پروتون‌ها و الکترون‌ها برای تشکیل نوترون‌ها به یکدیگر فشرده می‌شوند. این نوع شیء آسمانی ستاره نوترونی نامیده می‌شود. وقتی که شعاع ستاره‌ای ۱۰ کیلومتر (۶ مایل) باشد، انقباضش متوقف می‌شود. برخی از ستارگان نوترونی در زمین به شکل تپ اختر شناسایی می‌شوند که با چرخش خود، ۲ نوع اشعه منتشر می‌کنند.

برای این که تصور بهتری از یک ستاره نوترونی در ذهن‌تان بوجود بیاید، می‌توانید فرض کنید که تمام جرم خورشید در مکانی به وسعت یک شهر جا داده شده‌است. یعنی می‌توان گفت یک قاشق از ستاره نوترونی یک میلیارد تن جرم دارد. به اضافه اینکه سرعت چرخش این ستاره‌ها به دور خودشان تا ۷۰۰ دور در ثانیه هم می‌رسد و این چرخش با روند بسیار بسیار آهسته کند می‌شود. به عنوان مثال ستاره نوترونی که در هر ثانیه یک دور می‌زند پس از صد سال در هر ۰۰۰۰۰۳ / ۱ ثانیه یک دور می‌زند، به عبارت دیگر پس از یک میلیون سال هر ۰۳/۱ ثانیه یک دور می‌زند.

این ستارگان هنگام انفجار برخی از ابرنواخترها بوجود می‌آیند. پس از انفجار یک ابرنواختر ممکن است به خاطر فشار بسیار زیاد حاصل از رمبش مواد پخش شده ساختار اتمی همه عناصر شیمیایی شکسته شود و تنها اجزای بنیادی بر جای بمانند. بیشتر دانشمندان عقیده دارند که جاذبه و فشار بسیار زیاد باعث فشرده شدن پروتون‌ها و الکترون‌ها به درون یکدیگر می‌شوند که خود سبب به وجود آمدن توده‌های متراکم نوترونی خواهد شد. عده کمی نیز معتقدند که فشرده‌گی پروتون‌ها و الکترون‌ها بسیار بیش از اینهاست و این باعث می‌شود که تنها کوارک‌ها باقی بمانند؛ و این ستاره کوارکی متشکل از کوارک‌های بالا و پایین (Up & down quarks) و نوع دیگری از کوارک که از بقیه سنگین تر است خواهد بود که این کوارک تاکنون در هیچ ماده‌ای کشف نشده است.

3- دقیقه قوسی (ویکی‌پدیا)

دقیقه قوسی واحدی است در زاویه که معادل یک شصتم یک درجه است. دقیقه قوسی یک بر روی ۲۱۶۰۰ م یک دایره بسته‌است. مقادیر کم‌تر همچون ثانیه قوسی و میلی‌ثانیه قوسی بسیار کم کاربرد هستند و فقط در ستاره‌شناسی استفاده می‌شوند. یک ثانیه قوسی برابر ۱/۳۶۰۰ درجه بوده و ۱۵ میکرو آرک‌ثانیه برابر زاویه‌ی میدان دیدی است که هنگام دیدن یک توپ گولف روی کره‌ی ماه خواهیم داشت.

4- تداخل‌سنجی خط پایه بسیار طولانی (ویکی‌پدیا)

چگونگی کارکرد وی‌ال‌بی‌ای

تداخل خط پایه بسیار طولانی به انگلیسی (very long baseline interferometry) یا به اختصار وی‌ال‌بی‌ای (VLBI) یکی از روش‌های انجام ژئودزی فضایی است. این روش، در ایجاد یک دستگاه مرجع لخت و اندازه‌گیری محل قرارگیری زمین در این دستگاه کاربرد دارد. وی‌ال‌بی‌ای محل قرارگیری زمین را به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌کند و نیازی به تکانه زاویه‌ای اتمسفری، امواج دریاها و پاسخ الاستیکی زمین سخت ندارد.

وی‌ال‌بی‌ای روشی هندسی است. در این روش زمانی که طول می‌کشد تا دو آنتن رادیویی در دو سوی زمین یک موج رادیویی متصاعد شده از یک اخترش را پس از یک دیگر دریافت کنند اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری امواج اخترش‌های متفاوت در نقاط مختلف زمین، وی‌ال‌بی‌ای دستگاه مرجع لخت را با استفاده از مختصات دقیق آنتن‌ها ایجاد می‌کند.

از آنجا که اندازه‌گیری تغییر زمان‌ها در حدود پیکوثانیه است، این روش موفق می‌شود که محل اخترش‌ها را با خطای میلی ثانیه قوسی و محل آنتن‌ها را با خطای چند میلی‌متر بسنجد. از آنجا که آنتن‌ها روی زمین ثابت هستند، چرخش آن‌ها نمایانگر چرخش زمین در این دستگاه مختصات لخت است. تغییرهای نسبی در محل آنتن‌ها، نمایانگر جابه‌جایی پوسته زمین، تغییر شکل منطقه‌ای زمین و بالا یا پایین آمدن یک نقطه از زمین است. اتحادیه اخترشناسی بین‌المللی، حدود ۵۰۰ جسم خارج از کهکشان را از سیستم وی‌ال‌بی‌ای استخراج کرده و از آن‌ها در سامانه بین‌المللی مرجع آسمانی استفاده می‌کند.

5- مدار (کره) فوتونی

کره فوتونی محدوده‌ای است که با ضخامت صفر و فوتون‌هایی که در طول مسیر مماس بر این کره حرکت می‌کنند در مدار دایره‌ای گرد آن به دام می‌افتند. این بدان معناست که فوتون‌ها با حرکت مماس بر این کره می‌توانند به دور سیاه‌چاله بچرخند و از افتادن به آن امتناع بورزند... البته فوتون‌ها به دو دلیل به مدت طولانی نمی‌توانند در این مدار حرکت کنند: ۱- به احتمال زیاد فوتون‌ها با دیگر مواد موجود در حلقه‌ی گاز و گرد و غبار در حال گردش بدور سیاه‌چاله برخورد می‌کنند که یا جذب می‌شوند یا پراکنده. ۲- این مدار از لحاظ دینامیکی ناپایدار است و کوچکترین انحرافات از این مسیر دایره‌ای می‌تواند خیلی سریع به انحرافات بزرگ‌تر منجر شود که به سقوط یا گریز فوتون‌ها می‌انجامد.

6- تکینگی برهنه (ویکی‌پدیا)

در نسبیت عام، **تکینگی برهنه** به انگلیسی (Naked singularity): یک نوع تکینگی گرانشی بدون افق رویداد است. در یک سیاه‌چاله تکینگی کاملاً در مرزی که افق رویداد نام دارد، دربرگرفته می‌شود. درون افق رویداد نیروی گرانش تکینگی به اندازه‌ای قوی است که حتی نور نیز نمی‌تواند از آن بگریزد، از این رو اجسام داخل افق رویداد - که شامل خود تکینگی نیز می‌شود- مستقیماً قابل مشاهده نیستند؛ در مقابل، یک تکینگی برهنه از بیرون قابل مشاهده است. وجود تکینگی‌های برهنه سبب بروز مسائل بنیادی برای نسبیت عام می‌شود، زیرا نسبیت عام نمی‌تواند چگونگی تکامل فضا-زمان در نزدیکی یک تکینگی برهنه را پیش‌بینی کند. در سیاه‌چاله‌های عمومی این مسئله وجود ندارد زیرا هیچ ناظری قادر به مشاهده فضا-زمان درون افق رویداد نخواهد بود.

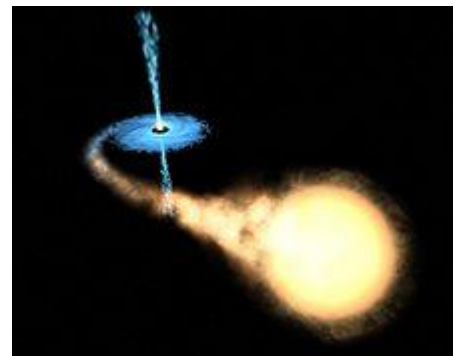
برخی از پژوهشگران بر این باورند که اگر گرانش کوانتومی حلقه درست باشد، تکینگی‌های برهنه نیز در طبیعت وجود خواهند داشت و در نتیجه فرضیه سانسور کیهانی برقرار نخواهد بود. محاسبات عددی و برخی از بحث‌های دیگر نیز به نوعی این امکان را پیشنهاد می‌دهند. تا به امروز هیچ تکینگی برهنه (و هیچ افق رویدادی) مشاهده نشده است.

7- نظریه بدون مو (ویکی‌پدیا)

نظریه بدون مو بیان می‌دارد که همهٔ جواب‌های سیاه‌چاله‌ای معادلات گرانش و الکترومغناطیس اینشتین-ماکسول در نسبیت عام را می‌توان به وسیله سه پارامتر کلاسیک قابل مشاهده از بیرون مشخص کرد: جرم، بار الکتریکی و تکانه زاویه‌ای. همهٔ اطلاعات دیگر (که در این نظریه به مو تشبیه شده‌اند) دربارهٔ موادی که سیاه‌چاله را تشکیل داده‌اند یا موادی که به درون آن ریزش می‌کند، در پشت افق رویداد سیاه‌چاله ناپدید می‌شوند و برای همیشه از دسترس مشاهده ناظرین خارجی خارج می‌شود.

مثال: دو سیاه‌چاله را در نظر بگیرید که جرم، بار و تکانه زاویه‌ای یکسانی دارند. یکی از آنها از ماده معمولی تشکیل شده است، در حالی که دیگری از ضد ماده. این دو سیاه‌چاله از دید ناظری در بیرون افق رویداد قابل تمایز نخواهند بود.

مستقل از چارچوب مرجع همچون بیشتر ایده‌های برپایه نظریه نسبیت عام، نظریه بدون مو نیز تنها با خواصی سروکار دارد که از چارچوب مرجع (دیدگاه ناظر) مستقل هستند. بنابراین، این نظریه سخنی در مورد مکان و سرعت سیاه‌چاله به میان نمی‌آورد.

8- قرص برافزایشی (ویکی‌پدیا)

یک **قرص برافزایشی** به انگلیسی: (accretion disc) یک ساختار دیسک مانند از ماده است که به شکل حلقوی به دور یک جسم خاص می‌چرخد. این جسم می‌تواند یک ستاره جوان، یک کوتوله سفید، یک ستاره نوترونی یا یک سیاه‌چاله باشد. این چرخش باعث ایجاد گرما و تابش می‌شود و دامنه این تابش برای ستارگان جوان مادون قرمز و برای بازماندگان ستاره‌ای پرتو ایکس است.

9- شراره خورشیدی (ویکی‌پدیا)

شراره خورشیدی از انفجار بزرگ در اتمسفر خورشید بوجود می‌آید و باعث آزاد شدن انرژی در حد شش ضریب ۱۰ بتوان ۲۵ ژول می‌شود. (که در حدود یک ششم انرژی خروجی از سطح خورشید در هر دقیقه است.) این پدیده در سایر ستارگان هم دیده می‌شود که به آن‌ها نیز شراره ستاره‌ای گفته می‌شود. شراره خورشیدی کلیه لایه‌های سطح خورشید شامل شیدسپهر، تاج خورشیدی و فام‌سپهر را مورد تأثیر قرار می‌دهد و باعث گرم شدن پلاسما تا چندین میلیون درجه کلوین می‌شود. همچنین باعث سرعت یافتن الکترونها و پروتونها و ینهای سنگین تا نزدیکی سرعت نور می‌شود. همچنین اشعه‌ای را تولید می‌کند و لایه‌های الکترومغناطیس را ایجاد می‌کند که شامل کلیه امواج الکترومغناطیس می‌باشد. از امواج رادیویی تا اشعه گاما. شراره‌ها خود را از آزاد سازی انرژی مغناطیسی ذخیره شده در تاج خورشیدی تغذیه می‌کنند.

اشعه ایکس و اشعه ماورای بنفش می‌توانند روی یون کره تأثیر بگذارند و تولید امواج ارتباطی با طول موج بالا بنمایند که این امواج می‌تواند باعث اختلال در رادارها و تجهیزاتی که با فرکانس کار می‌کنند بشود. شراره خورشیدی برای اولین بار در روی خورشید توسط ریچارد کریستوفر کارینگتون و همچنین توسط ریچارد هدسون در سال ۱۸۵۹ مشاهده گردید. همچنین شراره ستارگان در روی بسیاری از ستارگان دیده شده است. فرکانس‌های موجود آمده از شراره‌های خورشیدی مختلف است. از ۱ روز زمانی که خورشید در حالت فعال قرار دارد تا ۱ بار در هفته زمانی که سطح خورشید آرام است تغییر می‌کند.

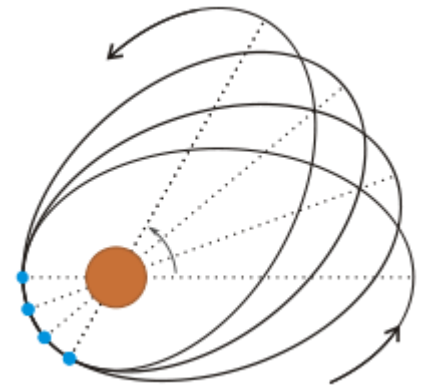
10- سرعت شاتر (ویکی‌پدیا)

سرعت نوربند ، سرعت شاتر یا زمان نوردهی به انگلیسی (Shutter speed): فاصله زمانی ست که شاتر دوربین باز است و نور روی فیلم عکاسی (در دوربین‌های غیر دیجیتالی) یا حسگرهای الکترونیکی (در دوربین‌های دیجیتالی) اثر می‌کند. در واقع سرعت شاتر عامل کنترل‌کننده زمان ورود نور به دستگاه دوربین جهت ثبت یک تصویر است. این کنترل‌کننده اکثراً از یک صفحه پلاستیکی ساخته شده که با باز و بسته شدن مقدار نور را بر روی سنسور تصویر یا فیلم در دوربین‌های آنالوگ تنظیم می‌کند . این صفحه با فشار دادن دکمه شاتر باز می‌شود و در تنظیم خودکار و بعد از اکتساب مقدار نور به مقدار کافی بسته می‌شود. زمانی که بیشتر با دوربین و کار با آن آشنا شوید صدای ناشی از این باز و بسته شدن (کلیک) را تشخیص می‌دهد و به واسطه شتاب یا کندی آن متوجه خواهید شد که چه میزان نوردهی برای ثبت یک تصویر نیاز خواهید داشت . اغلب در نور کم زمان نوردهی بیشتر است. در عکس برداری از اشیا متحرک از زمان نوردهی کمتر استفاده می‌شود.

11- خط آب سایید (در مثال گردش ماهواره به دور زمین)

خطی مستقیم است که نقطه حضیض (نقطه ای روی مدار که ماهواره نزدیکترین فاصله خود با زمین را دارد) را به نقطه اوج (نقطه ای روی مدار که ماهواره دورترین فاصله خود با زمین را دارد) وصل می‌کند ، خط آب سایید خطی مستقیم است که نقطه حضیض (نقطه ای روی مدار که ماهواره نزدیکترین فاصله خود با زمین را دارد) را به نقطه اوج (نقطه ای روی مدار که ماهواره دورترین فاصله خود با زمین را دارد) وصل می‌کند. حرکت این خط در فضا دایره ای را ترسیم می‌کند.

<http://barsadic.com/W?fid=292574>



اوج و حضیض مداری (ویکیپدیا)

چرخش خط اوج و حضیض در مدار بیضوی جرمی به دور جرم دیگر که بر اثر اختلالات گرانشی یک یا چند جرم آسمانی دیگر در نزدیک آن دو رخ می‌دهد.