

اندازه گیری سرعت چرخش سیاه چاله های فضایی

برگردان: امید برومند
به یاد مادر عزیزمان اختر عسگری

برای په دست آوردن اطلاعات پایه ای از سیاه چاله ها می توان از پرتوهای ایکس در نزدیکی آنها استفاده کرد، وگرنه سیاه چاله ها از دید ما کاملن پنهان خواهند ماند.



این تصویر هنری نشان دهنده ی پندار اخترفیزیک دانان از ناحیه داخلی اطراف یک سیاه چاله است. ماده گرم شده در دیسکی از گاز، می تواند از طریق جریان های جت عمود بر این دیسک، به بیرون پرتاب شود.

سیاه چاله ها پدیده های بسیار عجیبی هستند، اما از دیدگاه نظری می توان آنها را بسیار ساده و تنها با دو پارامتر توصیف کرد. به همین دلیل گفته می شود که سیاه چاله ها مو ندارند. منظور فیزیک دان آمریکایی جان ا. ویلر (1911-2008) از این توصیف کنایه آمیز این بود که هر چند سیاه چاله ها پدیده های کلان مقیاس (ماکروسکوپی) با شعاعی تا چندین میلیارد کیلومتر هستند، به غیر از یک جرم و یک سرعت چرخش که اغلب **تکانه ی زاویه ای (1)** نامیده می شود، مشخصه ی دیگری ندارند. تا کنون، با وجود پژوهش های گسترده در دهه های اخیر، هیچ انحرافی از این پیش بینی نظریه ی نسبیت عام پیدا نشده است.

یک سیاه چاله به علت ویژگی های افراطی اش، به شدت بر محیط اطرافش تأثیر گذار است. اندازه ی سیاه چاله توسط شعاع شوارتزشیلد (2) معین می شود، که برای سیاه چاله های غیر چرخان، مرزی را توصیف می کند که از آن به بعد هیچ چیزی، حتی نور نمی تواند از سیاه چاله بگریزد. ناحیه درونی شعاع شوارتزشیلد از بیرون دیده نمی شود، به این جهت سطح جداکننده، **افق رویداد (3)** نامیده می شود.

جرم یک سیاه چاله تعیین کننده شدت گرانش آن است و چرخش سیاه چاله موجب پیچ و تاب فضا-زمان چهار بعدی می شود. این واقعیت که فضا و زمان جدا از یکدیگر نیستند، در مجاورت مستقیم **افق رویداد** به ویژه نمایان است. پیچش اشاره شده تنها در مجاورت مستقیم **افق رویداد** اتفاق می افتد. از این رو اخترشناسان در کوشش اند که در حد امکان نزدیک ترین مکان به **افق رویداد** را رصد کنند. بزرگی **افق رویداد** بستگی به سرعت چرخش سیاه چاله دارد.

نگاهی به درون پرتگاه

سیاه چاله ای که با سرعت بالایی در چرخش است، به دلیل پیچش فضا-زمان، شعاعی کوچکتر از شعاع شوارتزشیلد دارد. به این دلیل، پژوهش گران گرانش به جای شعاع شوارتزشیلد از شعاع **گرانشی (4)** استفاده می کنند (به شکل های صفحه 3 مراجعه شود). شعاع **گرانشی**

دقیقا نصف شعاع شوارتزشیلد است - بر اساس نظریه‌ی نسبیت عام، یک سیاه‌چاله که با حداکثر سرعت امکان‌پذیر می‌چرخد، نمی‌تواند کوچکتر از شعاع گرانشی باشد.

از این‌رو با مشخص کردن تکانه زاویه‌ای سیاه‌چاله‌های فضایی، می‌توان گزاره‌های بنیادینی درباره فضا-زمان وضع کرد. علاوه بر این، سرعت چرخش، کلن برای فیزیک اخترشناسی از اهمیت اساسی برخوردار است. برای مثال، تکانه‌ی زاویه‌ای احتمالاً وابستگی شدیدی با پدید آمدن فواره‌های قطبی، یعنی جت‌ها دارد. بنابراین، اندازه‌گیری چرخش یک سیاه‌چاله، از این نقطه نظر نیز مورد توجه است.

اما با چه دقتی می‌توان سرعت چرخش اشیایی را که از خود تابش قابل تشخیصی ندارند، معین کرد؟ تنها امکان دست‌یابی به اطلاعات درباره‌ی این اشیاء، بررسی تأثیر آنها بر ماده و تابش در نزدیکی‌شان است. در واقع در اطراف تعداد بسیاری از سیاه‌چاله‌ها دیسکی از گاز - یعنی قرص برافزایشی - شکل گرفته است که از آن ماده به درون سیاه‌چاله می‌ریزد.

دیسک برافزایشی می‌تواند در موارد حادّ، تا افق رویداد امتداد یابد، اما معمولاً فاصله‌اش از افق رویداد که از آن به بعد ماده بطور مستقیم به درون سیاه‌چاله می‌ریزد، بیشتر است. طبق نظریه‌ی نسبیت عام، هر چه سرعت چرخش سیاه‌چاله بیشتر باشد، به همان نسبت این مسیر باثبات درونی [افق رویداد م.]، کوچکتر خواهد بود. برای مثال سیاه‌چاله‌ای با جرمی برابر جرم خورشید را در نظر بگیریم. اندازه شعاع شوارتزشیلد این سیاه‌چاله 3 کیلومتر خواهد بود، و قرص برافزایشی در اطرافش می‌تواند تا فاصله 6 کیلومتری افق رویداد آن برسد. سیاه‌چاله با چرخش خود، فضا-زمان را خم کرده و با یکی بودن جهت چرخش‌اش با قرص برافزایشی، به ثبات قرص برافزایشی یاری خواهد رساند. در این مثال، در چرخش‌های بسیار پرسرعت، قرص برافزایشی می‌تواند تا فاصله 300 متری سیاه‌چاله امتداد یابد.

در چنین فاصله نزدیکی از سیاه‌چاله، گازهای قرص برافزایشی تا بیش از 1 میلیون درجه گرم می‌شوند. در این جریان، پلاسمای داغ‌تری به نام تاج (Corona) (5) نیز ایجاد می‌شود. مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهند که تاج سیاه‌چاله، بسیار نزدیک به محور چرخش آن و احتمالاً در بالا و پایین سیاه‌چاله واقع است. این تاج داغ از خود پرتوهای پرنرژی X منتشر می‌کند که در مسیرهای منحنی، در میان فضا-زمان که پیچش خورده و به شدت تغییر شکل یافته، حرکت می‌کنند. انرژی آنها در این مسیر، با عمل کردن بر ضد پتانسیل گرانشی (6)، تغییر می‌یابد.

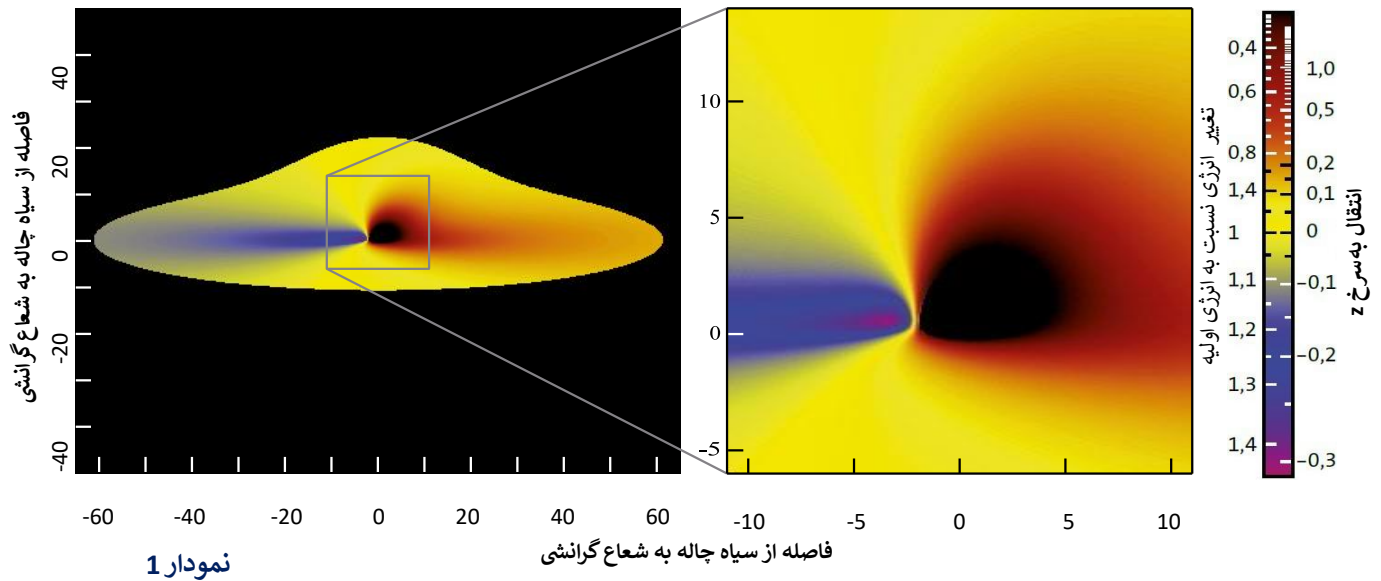
چرخش و تغییر انرژی

برای مشخص کردن تکانه زاویه‌ای یک سیاه‌چاله، دقیقا این تغییر انرژی تجزیه و تحلیل می‌شود. این روش بر پایه انعکاس بخشی از پرتوهای X در قرص برافزایشی و به دنبال آن تحریک فوتون‌های فلورسنت (7) بنا شده است. نور فلورسنت با جذب اشعه ایکس در قرص برافزایشی پدید آمده و سپس انتشار اشعه‌ای با انرژی قدری ضعیف‌تر را به دنبال دارد. انرژی فوتون‌های فلورسنت به دلیل گذار و انتقالات اتمی (8) مقدار مشخص ثابتی دارد. هنگامی که این فوتون‌ها به زمین می‌رسند، تغییرات انرژی‌ای را تجربه کرده‌اند که نشان‌دهنده اطلاعاتی از قرص برافزایشی و سیاه‌چاله هستند.

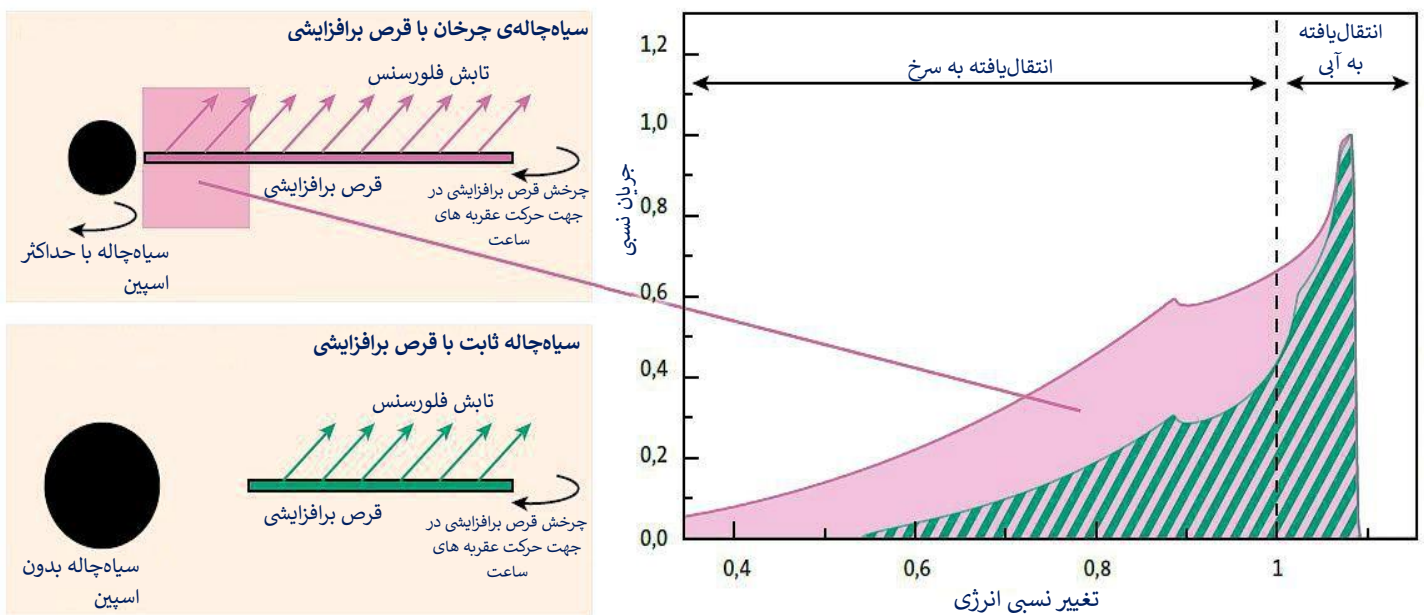
تغییر انرژی، وابسته به مکان انتشار فوتون بر روی قرص برافزایشی است (بنگرید به نمودار 1 صفحه بعد). هر چه فوتون نزدیک‌تر به سیاه‌چاله باشد، پتانسیل گرانشی که از آن باید فرار کند کمتر خواهد بود و به همین دلیل انرژی بیشتری را از دست خواهد داد. این تغییر به انرژی‌های کمتر، انتقال به سرخ گرانشی (9) نامیده می‌شود. علاوه بر این، به دلیل چرخش قرص برافزایشی به دور سیاه‌چاله و ایجاد اثر دوپلر (10)، فوتون‌ها به انرژی‌های بالاتر انتقال می‌یابند، که انتقال به آبی نامیده می‌شود. این تغییر انرژی در نمودار 1 در صفحه بعد نشان داده شده است.

این پدیده‌ی پیچیده منجر به این می‌شود، فوتون‌ها که از انرژی ثابت دیسک برافزایشی سرچشمه می‌گیرند، در اندازه‌گیری‌ها انرژی‌های متفاوتی از خود نشان دهند. بدین ترتیب هر فوتون اطلاعاتی در مورد مکانی از قرص برافزایشی حمل می‌کند که در آنجا بوجود آمده است. به‌ویژه فوتون‌های به سرخ انتقال یافته، در فاصله‌ی بسیار نزدیکی از سیاه‌چاله انتشار می‌یابند (بنگرید به نمودار 1 در صفحه بعد).

این اطلاعات اکنون چگونه در محاسبه‌ی سرعت چرخش یک سیاه‌چاله، به ما کمک خواهند کرد؟ عامل تعیین‌کننده در اینجا، ارتباط توضیح داده شده با قرص برافزایشی است؛ هر چه سرعت چرخش سیاه‌چاله بیشتر باشد، به همان نسبت لبه‌ی داخلی قرص برافزایشی به افق رویداد نزدیک‌تر خواهد بود. از آنجا که انتقال به سرخ انرژی فوتون‌ها با کاهش فاصله به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در صورت



در این شبیه سازی از یک دیسک گاز کمی مایل در اطراف یک سیاه چاله، تغییر انرژی فوتون ها به دلیل پتانسیل گرانشی و چرخش آنها، با استفاده از تصویری از طیف های رنگی نشان داده شده است: در نزدیکی سیاه چاله (با مختصات $(0,0)$)، به سبب پتانسیل گرانشی کم، تمام فوتون ها به انرژی های پایین تر و به طیف سرخ انتقال می یابند. گردش دیسک بر خلاف حرکت عقربه های ساعت، باعث می شود که بخشی از فوتون ها تحت اثر دوپلر، به انرژی های بالاتر، یعنی به طیف آبی انتقال یابند (نگاه شود به بخش بزرگ نشان داده شده درون مربع، در سمت راست). این اثر در شبیه سازی به دلیل حرکت این بخش از دیسک به سمت مشاهده گر به رنگ آبی نشان داده شده است.



در مقایسه قرص برافزایشی یک سیاه چاله ی به سرعت در حال چرخش و یک سیاه چاله ی ساکن و غیرچرخان، مشاهده می شود که قرص برافزایشی سیاه چاله ی به سرعت در حال چرخش، به مراتب نزدیک تر به افق رویداد خواهد بود (به نمودار سمت چپ نگاه شود). با رعایت مقیاس در نمایش بزرگی سیاه چاله و قرص برافزایشی، جهت چرخش مربوطه نشان داده شده است. جریان فوتون از قرص برافزایشی با پیکان نشان داده شده است. برای هر دو مورد در نمودار سمت راست، مقدار جریان فوتون های مورد انتظار در هر تغییر انرژی مشخص ایجاد شده از طریق پتانسیل گرانشی و پیچش فضا-زمان، با رنگ مربوطه نشان داده شده اند. از آنجا که قرص برافزایشی در سرعت بالای چرخش، به افق رویداد نزدیک تر است (مربع صورتی)، جریان بالاتری از طریق سطح افزایش یافته ی قرص برافزایشی مشاهده می شود.

بالا بودن **تکانه‌ی زاویه‌ای**، مقدار بسیار بیشتری فوتون‌های **انتقال‌یافته به سرخ** انتظار خواهند رفت. به بیان دیگر، در حالت کم بودن سرعت چرخش، **قرص برافزایشی**، بخش درونی‌ای نخواهد داشت و بنابراین مقدار کمتری فوتون‌های **انتقال‌یافته به سرخ** در این شیء دیده خواهد شد (بنگرید به نمودار 2).

برای محاسبه‌ی اندازه‌ی سرعت چرخش - که تا حد امکان دقیق باشد-، باید مقدار زیادی فوتون را از یک سیاه‌چاله جمع‌آوری کرده و طیف اندازه‌گیری شده را با پیش‌بینی‌های پیچیده‌ی مدلی، مقایسه کرد. روش اندازه‌گیری بسیار پیچیده است؛ از این رو با وجود تلاش فراوان، اندازه‌گیری قابل اطمینان سرعت چرخش سیاه‌چاله‌ها، تا کنون تنها در مورد‌های کمی تحقق یافته است. با دقیق‌تر شدن داده‌های اندازه‌گیری شده و توسعه‌ی بیشتر مدل‌های نظری، نتیجه‌های چشمگیری در سال‌های اخیر به دست آمده‌اند. بخش بزرگی از مشاهدات، با تلسکوپ‌های اشعه ایکس XMM-Newton از آژانس فضایی اروپا (ESA) و NuSTAR از ناسا انجام یافته است.

رشد سیاه‌چاله‌ها

به‌ویژه کشف چندین سیاه‌چاله - که فوق‌العاده کلان‌جرم‌اند و با سرعت بسیار بالایی در مرکز کهکشان‌های دور دست در گردش‌اند-، شواهدی در مورد چگونگی تکامل کهکشان‌ها از آغاز جهان تا به امروز ارائه می‌دهد. برای دستیابی چنین سیاه‌چاله‌ای به سرعت چرخش بالا، باید برای مدت زمان طولانی، ماده‌ی کهکشانی به‌درون سیاه‌چاله ریزش کند. به این دلیل، برخلاف آنچه که برخی از مدل‌های توسعه و تکامل کهکشانی پیش‌بینی می‌کنند، تصادم‌های فراوان کهکشان‌های مجزا و جوان در جهان اولیه بعید به نظر می‌آیند.

چنین جسم آسمانی که به سرعت در چرخش است، **افق رویدادش** با سرعتی نزدیک به سرعت نور در حرکت است و با پیش‌فضا-زمان، آن‌گونه که در نظریه‌ی نسبیت عام پیش‌بینی شده، شدیدترین شرایطی را که در جهان شناخته شده است، ایجاد می‌کند. بنابراین این کشف‌ها نیز تایید آشکار نظریه‌ی نسبیت عام هستند.

دانشمندان اکنون با اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر تلسکوپ‌های اشعه ایکس و مدل‌های نظری تکامل‌یافته از **قرص برافزایشی**، حتی قادر به مطالعه و بررسی **تاج** پیش‌گفته در اطراف سیاه‌چاله هستند، زیرا شکل و موقعیت **تاج** نیز بر تغییرات انرژی اندازه‌گیری شده تأثیرگذار است. در اوایل سال 2018 در جریان مطالعه‌ی دقیقی از سیاه‌چاله‌ی XTE J1752-223 از این مدل پیچیده استفاده و نشان داده شد که **تاج** تنها کمی بالاتر از افق رویداد - که خود با 90 درصد سرعت نور در چرخش است- واقع شده. با وجود این که در سال‌های اخیر نشانه‌هایی در این مورد پیدا کردیم که احتمالاً این **تاج‌ها** در بالا و پایین سیاه‌چاله واقع بوده و بسیار متراکم‌اند، انتظار می‌رود که با اندازه‌گیری‌های بیشتر در سال‌های آینده، اطلاعات دقیق‌تری در مورد منشاء آنها به دست آید.

ماهنامه ستارگان و کیهان، چاپ آلمان، فوریه 2019

پی‌نوشت‌ها:

1- تکانه زاویه‌ای (ویکی‌پدیا)

در فیزیک، **تکانه زاویه‌ای** یا **تکانه دورانی** به انگلیسی Angular momentum کمیتی برداری است که برای بیان وضعیت حرکتی سیستم‌های در حال حرکت دورانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این که سرعت زاویه‌ای مرسوم‌ترین کمیت برای بیان وضعیت حرکتی جسم در حال دوران است، اما تکانه زاویه‌ای نسبت به آن اطلاعات بیشتری را در بر دارد. تکانه زاویه‌ای یک سیستم به سرعت زاویه‌ای، جرم و نحوه توزیع جرم سیستم حول محور دوران یا مرکز دوران وابسته است. تکانه زاویه‌ای همواره نسبت یک نقطه‌ی مرجع سنجیده می‌شود.

2- شعاع شوارتزشیلد (ویکی‌پدیا)

شعاع شوارتزشیلد شعاعی است که بر طبق معادلات متریک برای سیاه‌چاله‌ها تعیین می‌شود. شعاع شوارتزشیلد (به انگلیسی: Schwarzschild radius) نام شعاعی در فیزیک است که تمام اجسام با هر جرمی که در آن وارد می‌شوند در یک جا جمع می‌شوند که به آن نقطه‌ی تکینگی (Gravitational singularity) گفته می‌شود و به منطقه‌ای با شعاع شوارتزشیلد افق رویداد گفته می‌شود.

3- افق رویداد (ویکی‌پدیا)

افق رویداد (به انگلیسی: Event horizon) در نسبیت عام، منطقه‌ای از فضا-زمان است که در آنجا تمام مرزهای فضا به شدت تحت تأثیر سیاه‌چاله است و اگر جسمی وارد این ناحیه شود، سرانجام بروی تکینگی سیاه‌چاله سقوط می‌کند. افق رویداد قسمتی از تقسیم‌بندی مناطق خارجی سیاه‌چاله هاست.

4- شعاع گرانشی (Gravitationsradius)

شعاع گرانشی، واحد رایج اندازه‌گیری طول در تحقیقات گرانشی، به ویژه در نسبیت عام است. شعاع گرانشی با فرمول $r_g = GM/c^2$ تعریف می‌شود. در اینجا G ثابت گرانشی، M جرم سیاه‌چاله و c سرعت نور در خلغ است. فیزیکدانان نظری و پژوهش‌گران نظریه‌ی نسبیت، کار را ساده‌تر کرده و در شکل **واحدهای هندسی**، c و G را برابر با یک قرار می‌دهند، یعنی $G = c = 1$ ، به گونه‌ای که شعاع گرانشی نیز به M تبدیل می‌شود. آنها گاهی اوقات حتی یک گام فراتر گذاشته، و M را برابر با یک قرار می‌دهند. این روش ممکن است عجیب به نظر برسد، اما در فیزیک نظری به جهت آسان‌سازی بسیار محاسبات نظری به شکل گسترده‌ای رایج است. این نتایج در مقایسه با داده‌های تجربی دوباره با مقیاس می‌شوند. شعاع شوارتزشیلد دوبار بزرگتر از شعاع گرانشی است، $R_s = 2GM/c^2$.

منبع: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitationsradius/155>

5- تاج سیاه‌چاله**5-1**

از **13 آگوست 2014** (<https://www.spektrum.de/news/die-sinkende-korona-eines-schwarzen-lochs/1304827>)

...با بررسی در گستره‌ی پرتوهای پرانرژی ایکس، می‌توان فرایندها در محدوده‌ی عمل یک سیاه‌چاله را بررسی کرد. معمولاً تابش حرارتی تاج و بازتاب تابش اولیه‌ی آن در دیسک برافزایشی، طیف پرتوهای مسلط در این گستره‌ها هستند. در آنجا خطوط ویژه‌ی فلورسنت آهن نیز به وجود می‌آیند... تاج ناحیه به‌ویژه گرمی در نزدیکی سیاه‌چاله است که احتمالاً در برهمکنش با چرخش و میدان‌های مغناطیسی، در شتاب ذرات و تولید جت‌ها نقش دارد. اخترشناسان از مشاهدات خود به این نتیجه رسیدند که تاج فرو ریخته و به فاصله‌ای برابر با چند شعاع افق رویداد به سیاه‌چاله نزدیک می‌شود. دانشمندان این نتیجه‌گیری را بر اساس نتایج بدست آمده از مدل‌های خود انجام دادند، آنها سعی کردند که با مدل‌های خود افزایش بخش بازتاب‌یافته پرتوهای نور نسبت به تابش اولیه را توضیح دهند. در صورت نزدیک‌تر شدن تاج به مرکز، پرتوهای نور بیشتری به سمت قرص برافزایشی خمیده شده و بنابراین پرتوهای بیشتری پژواک می‌یابند. علاوه بر این، سیاه‌چاله فضا-زمان را به گونه‌ای پیچانده و کژ می‌کند که کلن نور کمتری از منبع اولیه به مشاهده‌گر می‌رسد.



تصویر هنری از یک سیاهچاله‌ی چرخان. تاج سیاهچاله، خاستگاه بخش بیشتر پرتوهای ایکس در مجاورت سیاهچاله‌های فوق‌العاده کلان‌جرم است. بخشی از این پرتوها در قرص برافزایشی منعکس شده و با تاخیر زمانی به مشاهده‌گر می‌رسند. در این تصویر تاج به شکل ناحیه‌ی سفید رنگی در پایین جت دیده می‌شود. پژوهش‌هایی در مورد شکل واقعی تاج در جریان‌اند.

5-2

<https://sobh-eqtasad.ir/%D8%B3%D8%AA%D8%A7%D8%B1%D9%87%E2%80%8C-%D8%B4%D9%86%D8%A7%D8%B3%D8%A7%D9%86-%D8%A7%D8%B2-%D9%86%D9%82%D8%B4%D9%87-%D9%85%D8%AD%DB%8C%D8%B7-%D8%B3%DB%8C%D8%A7%D9%87%E2%80%8C%DA%86%D8%A7%D9%84%D9%87/%D8%B9%D9%84%D9%85-%D9%88-%D9%81%D9%86%D8%A7%D9%88%D8%B1%DB%8C/>

"... در بالای این دیسک برافزایشی ناحیه‌ای از الکترون‌های گرم - با دمای حدود یک میلیارد درجه - به نام تاج قرار دارد. در حالی که دانشمندان انتظار داشتند که تکرار واکنشی را که برای ترسیم هندسه منطقه داشتند، ببینند، اما چیزی غیرمنتظره را نیز مشاهده کردند: اندازه تاج به سرعت در طی چند روز تغییر کرد.

آلستون می‌گوید: "هرچه اندازه تاج تغییر می‌کند، با آکو نور نیز مطابقت دارد - مانند سقف کلیسای جامع بالا و پایین حرکت می‌کند، صدای شما را تغییر می‌دهد."

وی گفت: "با ردیابی پژواک‌های نور، ما توانستیم این تاج در حال تغییر را ردیابی کنیم، و برای توده و چرخش سیاهچاله مقادیر بهتری بدست آوریم. ما می‌دانیم که جرم سیاهچاله نمی‌تواند نوسان داشته باشد، بنابراین هرگونه تغییر در آکو باید به محیط‌گازی کاهش یابد..."

6- پتانسیل گرانشی (ویکی‌پدیا)

انرژی پتانسیل گرانشی با حرکت دادن جسم در خلاف جهت نیروی گرانشی در جسم ذخیره می‌شود. انرژی پتانسیل گرانشی در کره زمین به انرژی ذخیره شده در جسم بخاطر ارتفاع از سطح زمین گفته می‌شود. در این تعریف مبداء انرژی پتانسیل برای اجسام سطح زمین در نظر گرفته شده است. می‌توان مبداء صفر انرژی پتانسیل گرانشی را برای اجسام اطراف کره زمین یا هر جسم دارای جرم را به صورت قراردادی در نظر گرفت. هر چه فاصله جسم از مرکز زمین بیشتر باشد یا به عبارت دیگر ارتفاع بیشتری داشته باشد انرژی ذخیره شده در جسم بیشتر است. جسمی که در مرکز زمین قرار گرفته کمترین انرژی پتانسیل گرانشی را دارد. در فاصله‌ی بسیار دور از زمین یا اجسام دارای جرم پتانسیل گرانشی به سمت صفر میل می‌کند یعنی می‌توان صفر فرض کرد. آبی که در پشت سد ذخیره شده است دارای انرژی پتانسیل گرانشی می‌باشد که توربین-ژنراتور این انرژی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. فرض کنید شخصی پایین یک تپه ایستاده است و به یک توپ ضربه می‌زند توپ شروع به حرکت می‌کند و از تپه بالا می‌رود سرعت توپ لحظه لحظه کم و بالاخره توپ برای یک لحظه متوقف می‌شود یعنی سرعت توپ صفر می‌شود انرژی که توپ در این لحظه دارد انرژی پتانسیل گرانشی نامیده می‌شود. انرژی پتانسیل گرانشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$u = mgh$ در این رابطه u انرژی پتانسیل گرانشی جسم بر حسب ژول و m جرم جسم بر حسب کیلوگرم و g شتاب گرانش زمین برابر 9.8 متر بر مجذور ثانیه (نیوتن بر کیلوگرم) و h ارتفاع جسم از مبدأ انرژی پتانسیل بر حسب متر است. انرژی پتانسیل گرانشی به دو عامل

بستگی دارد: ۱. وزن جسم هر چه بیشتر باشد انرژی پتانسیل گرانشی بیشتر است. ۲. ارتفاع (h) جسم از سطح زمین هر چه بیشتر باشد انرژی پتانسیل گرانشی بیشتر است. نکته: مبدا انرژی پتانسیل گرانشی جاییست که انرژی پتانسیل گرانشی در آنجا صفر باشد که معمولاً مبدأ را زمین در نظر میگیرند ولی این مبدا می تواند متفاوت باشد.

7- فلورسنس

مواد معدنی فلورسنت وقتی که در معرض نور فرابنفش قرار بگیرند، از خودشان نور مرئی ساطع می کنند. فلورسانس یا فلوئورسانس به انگلیسی Fluorescence خاصیت برخی مواد شیمیایی، و یکی از زیرمجموعه های خاصیت تابناکی است. مخالف این خاصیت، فسفرسانس است.

دلیل

پس از آنکه که الکترون با جذب فوتون پرنرژی (نور با طول موج کوتاه) از تراز پایه به تراز برانگیخته می رود، تمایل دارد که با تابش فوتون انرژی خود را از دست بدهد و به تراز پایه برگردد. در اینجا ممکن است که الکترون مستقیماً به تراز پایه برنگردد؛ بلکه ابتدا به ترازهای برانگیخته پایین تر رفته و سپس به تراز پایه برسد که در این حالت الکترون، فوتون هایی با انرژی کمتر (یعنی طول موج بلندتر) از خود ساطع می کند که ممکن است برای چشم انسان قابل دیدن باشد.

کاربرد

این خاصیت در کانی شناسی، گوهرشناسی، پزشکی، و لامپ فلورسنت به کار می رود.

8- گذار یا انتقال اتمی (https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_electron_transition)

گذار و یا انتقال اتمی الکترون ها، تغییر مقدار انرژی الکترون ها در گذار از یک سطح انرژی به سطح دیگر در درون یک اتم است. این گذار که با "پرش" الکترون از یک سطح انرژی به سطحی دیگر و معمولاً در کمتر از چند نانو ثانیه و یا کمتر اتفاق می افتد، ناپیوسته و نامداوم جلوه می کند. از این گذار به عنوان تحریک الکترونیکی و یا گذار یا انتقال اتمی و یا پرش یا جهش کوانتومی نیز نام برده می شود.

9- انتقال به سرخ گرانشی

<https://www.spektrum.de/lexikon/astonomie/gravitations-rotverschiebung/151>

در فیزیک انتقال به سرخ گرانشی زمانی رخ می دهد که نور بخواهد در مسیر مخالف جاذبه گرانشی قوی حرکت کند و برای اینکه بتواند از میدان جاذبه فرار کند باید انرژی مصرف کند و این کاهش انرژی به شکل افزایش طول موج بروز می کند که به آن انتقال به سرخ گرانشی گویند.

ویکی پدیا: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung>

انتقال به سرخ گرانشی و یا انتقال به سرخ در گرانش در چارچوب نظریه نسبیت عام، افزایش طول موج نور منتشر شده ای است که از یک یک مرکز گرانش دور می شود. در مقابل، انتقال به آبی گرانشی هنگامی رخ می دهد که طول موج نور در حال حرکت به سمت یک مرکز گرانش کاهش می یابد.

10- اثر دوپلر (ویکیپدیا)

اثر دوپلر به انگلیسی Doppler effect: در فیزیک امواج می گویند که بسامد یک موج بر اثر حرکت فرستنده یا گیرنده آن تغییر می کند. این پدیده را کریستیان یوهان دوپلر (۱۸۵۳-۱۸۰۳ میلادی) فیزیکدان اتریشی در مقاله ای در سال ۱۸۴۲ بیان کرد. اثر دوپلر در همه ی امواج مانند امواج صوتی و امواج الکترومغناطیسی (نور) دیده می شود. هرگاه گیرنده ای به سمت یک منبع ساکن که از خود موج صوتی می فرستد برود، بسامد صوتی که می گیرد بیشتر از وقتی است که نسبت به منبع ساکن باشد (شنونده صدا را زیرتر می شنود). و اگر از منبع صوت دور شود، موجی را با بسامد کمتر می گیرد (شنونده صدا را بم تر می شنود). اگر منبع موج نیز از گیرنده دور یا به او نزدیک شود، بسامد صوتی که شنونده می شنود نیز به ترتیب کمتر یا بیشتر می شود.