دکتر حسن بلوری برلین، ۲۰۲۰٫۰۹٫۲۷

**ساز‌و‌کارها**



**Centaurus A**

**چکیده**

در ابتدای مقاله‌ی پیشین تحت عنوان ’مفهوم مادّه در تراکم‌های بسیار بالا‘ گفته شد: ".... که در این مقاله دانسته به مسائل نظریِ سیاه‌چاله‌ها مانند نظریه نسبیت عام، دینامیکِ سیاه‌چاله‌ها، مکانیسم هم‌جوشی سیاه‌چاله‌ها، ترمودینامیک و آنتروپی سیاه‌چاله‌ها پرداخته نمی‌شود." حال در این مقاله می‌کوشم نکات نام‌برده را توضیح دهم.

**۱. نظریه نسبیت عام**

نظریه نسبیتِ عام اینشتین۱ توضیحِ کنش و واکنش مادّه (جرم) و فضا ـ زمان است، توضیحی به زبان هندسه‌‌ی ریمانی۲ که نیروی گرانشی را به‌عنوان خاصیتِ هندسی فضازمانِ ۴بعدیِ انحنادار می‌بیند. این نظریه‌ توان تشریح بخش‌های وسیع و گوناگون کیهان از جمله کهکشان‌ها، ستارگان، ستارگان نوترونی۳، سیاه‌چاله‌ها۳ و سیر تکاملی کیهان۴ از زمان بیگ بنگ را دارد. نظریه نسبیت عام یک نظریه کلاسیک (نسبیتی) است و به‌همین دلیل می‌تواند تنها تا مرز دنیای کوانتوم پاسخ‌گو باشد..

نظریه نسبیت عام بر پایه تنها یک اصل، اصل هم ارزی شتاب و گرانش، بنا شده و تاکنون در تست‌های مختلف تایید شده است. در هیج آزمایشی اختلاف قابل سنجشی میان تاثیر حاصل از شتاب و تاثیر حاصل از نیروی گرانشی مشاهده نشده است. این نظریه تعمیم دو نظریه، نظریه نسبیت خاص و نظریه کلاسیک نیوتنی، نیز تعبیر می‌شود، چرا که هر دوی این نظریه‌ها براحتی از معادلات نظریه نسبیت عام قابل استنتاج هستند. به این شکل که چنانچه مقدار جرم (مادّه) را در نظریه نسبیت عام مساوی با صفر بدانیم، در این‌صورت ساختار آن شکل نظریه نسبیت خاص را پیدا می‌کند. به بیان دیگر، نظریه نسبیت خاص حالت مرزی نظریه نسبیت عام در غیاب ماده (جرم) است. و یا اکر چنانچه سرعت در نظریه نسبیت عام کوچک نسبت به سرعت نور، در حد سرعت‌های متداول، در نظر گرفته شود، در این‌صورت نظریه‌ای را پیشِ روی خود خواهیم داشت که به آن فیزیک کلاسیک نیوتنی می‌گوئیم. به عبارت دیگر،، فیزیک نیوتنی حالت مرزی نظریه نسبیت عام است. این حالت‌های مرزیِ نظریه نسبیت عام تایید انکارناپذیری هستند برای صحت آن.

هیچ نظریه‌ای را، به‌ویژه در علم فیزیک، نمی‌توان پذیرا بود که تا حد امکان تجربی به تایید نرسیده باشد. در مورد نظریه نسبیت عام باید گفت که کلیه‌ی تست‌های انجام شده از زمان ارائه‌ آن در سال ۱۹۱۵ از جانب اینشتین تاکنون بدون استثناء این نظریه را تایید کرده‌اند. یکی از جالب‌ترین آن‌ها تایید پیش‌گوئی وجود امواج گرانشی پس از یک قرن در سال ۲۰۱۵ بود.

دایره‌ی اعتبار نظریه

هر نظریه‌ای، بقول اینشتین، زمانی ’نه‌‘ی خود را می‌گیرد. البته این گفته به‌معنای آن نیست که نظریه‌ا‌ی که تجربی به اثبات رسیده صحت و ‌اعتبار خود را به‌کلی از دست می‌دهد، بلکه منظور محرز شدن دایره‌ی اعتبار و توان آن نظریه‌ است. محرز شدن مرز اعتبار یک نظریه نه تنها نامیمون نیست بلکه نشان از پیشرفت و دست‌یابی ما به‌مرحله‌‌‌ی بالاتر دارد. به این دلیل که منجر به طرح پرسش‌هائی شده است که نظریه‌ی موجود توان پاسخ‌ به آن‌ها را ندارد. در یک چنین مقطعی ما ناچاریم یا دامنه‌ی عملکرد نظریه‌ی موجود را توسعه دهیم، چنانچه اصولا امکان پذیر باشد، و یا این‌که در پی طرح نظریه‌ای کاملا جدیدی باشیم. در واقع این همان راه توسعه علم از مرحله موجود به سطح بالاتر و پیشرفته‌تر است. این شیوه‌ی توسعه‌ی علم را می‌توان در تاریخ علم به‌وفور مشاهده نمود. برای مثال ما از فیزیک ارسطو (تعیین حرکت با مقوله‌ی سرعت) شروع کردیم تا به فیزیک گالیله، متکی به آزمایش و تعیین حرکت با مقوله‌ی شتاب رسیدیم و از گالیله تا فیزیک نظری نیوتن با فضا و زمان مطلق و نیروی جاذبه و از فیزیک نیوتن تا نسبیت خاص اینشتین با فضا و زمان نسبیتی و ..... در هریک از این مراحل اعتبار یافته‌های متکی به تجربه حفظ، محدوده‌ی اعتبار نظریه معلوم و لزوم توسعه‌ی آن و یا طرح نظریه جدید آشکار شده است. مسلما این شیوه‌ی توسعه علم تنها شامل گذشته‌ی علم نمی‌شود بلکه اکنون نیز وضعیت مشابهی را شاهدیم. در حال حاضر پرسش‌هائی در علم فیزیک مطرح هستند که نظریه‌های موجود توان پاسخ‌ به آن‌ها را ندارند، برای مثال، تلنگر اولیه که "بیگ بنگ" را سبب شده چه چیزی و چگونه بوده است و یا چگونه می‌توان ناهمآهنگی میان دو نظریه اساسی، نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتوم، را برطرف نمود.

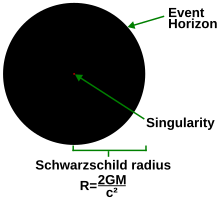
ناهمآهنگی در حیطه مشترک

ناهمآهنگی میان دو نظریه‌ی ذکر شده بیان از ناکامل بودن هر دو و یا یکی از آن‌ها را دارد. به‌نظر بیشتر این نظریه نسبیت عام اینشتین است که با گذشت زمان دایره‌ی اعتبار خود را نشان می‌دهد و وحدت میان دو نظریه را دشوار کرده است. محدود بودن دایره‌ی عملکرد نظریه نسبیت عام را می‌توان برای مثال در تکینگی۵ (singularity) ملاحظه نمود. طبق این نظریه کمیت‌های فیزیکی در تکینگی مساوی با بی‌نهایت هستند، مانند انرژی بی‌نهایت، چگالی بی‌نهایت و یا دمای بی‌نهایت. چنین اندازه‌هائی بی‌تردید با علم فیزیک مغایرت دارند. این وضعیت نشان می‌دهد که نظریه نسبیت عام تنها تا مرز معینی، تا مرز فیزیک کوانتوم معتبر است و از آن به‌بعد عملکرد درستی ندارد. از این‌رو لازم است یا نظریه نسبیت عام را توسعه داد، یعنی آن را کوانتیزه کرد، و یا نظریه‌ی جامع‌تری ارائه نمود که توان لحاظ قوانین هر دو نظریه را دارد. شاید یک چنان نظریه‌ای ’نظریه گرانش کوانتومی‘ باشد. تلاش‌ فیزیکدان‌ها در دهه‌های گذشته در این‌باره چندان رضایت‌بخش نبوده است. نظریه ریسمان‌ها نیز، با گذشت بیش از نیم قرن تلاش، نتوانسته است به حل مسئله یاری رساند.

به‌خاطر آن‌که مطالب مقاله‌ی حاضر از یک طرف به حیطه‌ مشترک ولیکن ناهمآهنگِ نظریه نسبیت عام و فیزیک کوانتوم مربوط می‌شود ـ نمونه‌ی بارز آن مسئله‌ی تکینگی و سیاه‌چاله‌هاست ـ و از طرف دیگر اطلاعات تجربی کافی در ‌باره‌ی آن‌ها وجود ندارد، لذا در زیر تنها به مطالبی می‌پردازم که به لحاظ نظری قابل دفاع هستند.

**۲. دینامیک سیاه‌چاله‌ها**

معادلات نظریه نسبیت عام معروف به معادلات اینشتین، معادلات دیفرنسیلی اینشتین یا معادلات میدانی اینشتین، بیان از رابطه‌ی‌ میان دو کمیت دارند: تانسورِ انرژی‌تکانه۵ و هندسه‌ی فضازمان۱. علت انحنای فضازمان حضور تانسور انرژی‌تکانه، کمیتی فیزیکی متشکل از انرژی (جرم، ماده) و تکانه (ضربه) است. هرچه چگالی ماده در منطقه‌ای از فضازمان بیشتر باشد، به‌همان میزان نیز انحنای فضازمان آن شدیدتر است.۳ برای مثال، هرچه شعاع ۷۰۰۰۰۰کیلومتری خورشید کوچکتر شود، چگالی آن بیشتر و در نتیجه فضای اطراف آن خمیده‌تر می‌شود. چنانچه شعاع خورشید تنها ۳کیلومتر شود، چگالی و خمیدگی فضازمان آن‌چنان افزایش می‌یابد، یعنی نیروی گرانشی بقدری شدید می‌شود که هیچ شئ‌ای، حتی نور، را توان گریز از میدان آن نیست، در این‌صورت خورشید به یک سیاه‌چاله۳ تبدیل می‌شود. حال اگر پروسه‌ی کوچک کردن شعاع خورشید را تا آن‌جا ادامه دهیم که برابر با صفر شود در این‌صورت شدت انحنای فضازمان چنان بالا خواهد بود که بی‌شباهت به ایجاد سوراخی در آن نیست. یک چنان نقطه‌ای تکینگی (singularity) نامیده می‌شود. به‌خاطر نیروی گرانشی بسیار قوی اطراف این نقطه تا شعاع، دایره، معینی هیچ چیزی نمی‌تواند از داخل این ناحیه به بیرون نفوذ کند. این شعاع را شعاع شوارتزشیلد۳ و ناحیه مربوطه را، با مرز کروی شکل، افق رویداد۳ نقطه تکینگی می‌نامند: تصویر ۲: نمایش ساده یک سیاه‌چاله۸



سیاه چاله‌های چرخشی

سیاه‌چاله‌های چرخشی به سیاه‌چاله‌هائی گفته می‌شود که دارای اسپین (Eigendrehimpuls,Spin، حرکت زاویه‌ای ذاتی) هستند. سیاه‌چاله‌های چرخشی مانند هر سیاه‌چاله‌ی دیگری هندسه‌ی فضازمان منطقه‌ی خود را تغییر می‌دهند. مضافا این‌که در این‌جا چرخش سیاه‌چاله باعث چرخش فضازمان در جهت اسپین (اثر لنزه ـ تیرینگ: تاثیر هر جرم چرخشی بر سیستم اینرسی مکان) و تکینگی آن سبب پاره شدن فضازمان می‌شود. چرخش فضازمان در این منطقه برای یک ناظر ساکن، ساکن نسبت به محیط خود، چنان می‌نماید که گوئی کل کیهان بدور او می‌چرخد.

تکینگیِ عریان

آیا می‌توان سیاه‌چاله‌هائی را تصور کرد که فاقد افق رویداد باشند؟ آیا امکان دارد نیروی گرانشی سیاه‌چاله‌ها را به‌نحوی خنثی کرد و تکینگی آن‌ها را مشاهده نمود؟ به این پرسش‌ها می‌توان به‌طور نظری در رابطه با سیاه‌چاله‌‌های چرخشی چنین پاسخ داد: سیاه‌چاله‌های فاقد افق رویداد را می‌توان زمانی مشاهده نمود که برای مثال سرعت چرخش فضازمان اطراف سیاه‌چاله چرخشی به اندازه‌ای بالا باشد که اشیاء در حال سقوط از چنان شتابی برخوردار شوند (یعنی نیروی گریز از مرکز آن‌ها چنان بالا باشد) که قادر به خنثی کردن نیروی گرانشی موجود باشند. در این‌صورت سیاه‌چاله فاقد افق رویداد شده و می‌توان تکینگی آن را به اصطلاح برهنه، عریان (naked singularity)، مشاهده نمود.

**۳. مکانیسم هم‌جوشی سیاه‌چاله‌ها**

هم‌جوشی سیاه‌چاله‌ها۳ زمانی به‌وقوع می‌پیوندد ‌که حداقل دو سیاه‌چاله در مجاورت هم، در میدان گرانشی هم، قرار بگیرند. سیاه‌چاله‌ها از دو راه مختلف در کنار هم قرارمی‌گیرند: ۱ـ از دو ستاره پرجرم۳ در حال گردش بدور هم پس از فرایند ابرنواختری۳.۲ـ از سیاه‌چاله‌هائی که در منطقه‌ا‌ی پر ستاره مستقل از هم به‌وجود آمده اما بطور تصادفی در کنار هم قرارمی‌گیرند. فرق اساسی میان این دو حالت در چرخش ("اسپپن spin") سیاه‌چاله‌هاست که در امواج گرانشی آن‌ها قابل اندازه‌گیری است. به احتمال آن‌ها با سرعت بالائی هم دور خود و هم دور یکدیگر می‌چرخند. طبق نظریه نسبت عام حداکثِر سرعتِ چرخشِ سیاه‌چاله بدور خود تابع جرم سیاه‌چاله است. فاصله‌ی میان دو سیاه‌چاله‌ی هم‌جوار، به علت نیروی گرانشی مدام کمتر و در عین حال سرعت چرخش‌ دورهم آن‌ها بیشتر می‌شود. این چرخش در لحظه آخر، پیش از هم‌جوشی، چنان شتابی برمی‌دارد که با تولید امواج گرانشی و انتشار مقداری از انرژی و ماده همراه است.

هاوکینگ و سطح افق رویداد

در مقاله۳ توضیح دادیم که سیاه‌چاله‌ها دارای افق رویداد، با سطحی معین، هستند. در صورت ازدیاد جرم سیاه‌چاله شعاع افق رویداد نیز افزایش می‌یابد. در مقابل با ازدیاد چرخش سیاه‌چاله، شعاع افق رویداد رو به کاهش می‌گذارد.

پرسش: سطح افق رویداد سیاه‌چاله‌ی متشکل از سیاه‌چاله‌ها چه مقدار است؟

پاسخ به این پرسش مهم را استیون هاوکینگ محاسبه نموده و چنین داده است:

سطح افق رویداد سیاه‌چاله‌ی متشکل از سیاه‌چاله‌ها هرگز کوچکتر از جمع سطوح افق رویداد آن‌ سیاه‌چاله‌ها نیست.

به عبارت دیگر و برای مثال، سطح افق رویداد یک سیاه‌چاله‌ی شکل‌گرفته از دو سیاه‌چاله، بزرگتر از جمع سطوح افق رویداد دو سیاه‌چاله است.

موفقیت بزرگ

در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۵ و برای اولین‌‌بار در تاریخ بشر، فیزیک‌دان‌ها موفق شدند امواج گرانشیِ ایجاد شده بر اثر برخورد دو سیاه‌چاله با جرم‌های حدودا ۲۹ و۳۶ برابر جرم خورشید را مشاهده کنند. نتیجه‌ی این برخورد یا هم‌جوشی شکل‌گیری یک سیاه‌چاله بزرگ‌تر با جرم ۶۲ برابر جرم خورشید بود. مقدار جرمی که در برخورد این دو سیاه‌چاله در زمان بسیار کوتاهی به انرژی تبدیل شد معادل تقریبا ۳برابر جرم خورشید بود. انرژیِ ساطع شده به فضا معادل ۵۰برابر کل انرژی الکترومغناطیسی گسیلی از کیهانِ قابلِ رؤیت بود. طنینِ این روخداد ۲۵صدمِ ثانیه‌ای پس از ۱،۳میلیارد سال به زمین رسید. طول موج نوسان مشاهده شده برابر بود با یک‌هزارم قطر ذره‌ی پروتون. یک قرن پیش‌ از این موفقیت، آلبرت اینشتین امواج گرانشی را بطور نظری پیش‌بینی کرده بود. کشفِ امواج گرانشی به‌معنای گشودن پنجره‌ی تازه‌ای به کیهان و آغاز عصری جدید در تاریخ علم و تاریخ بشر است.۳

**۴. ترمودینامیک و آنتروپی سیاه‌چاله‌‌ها**

ترمودینامیک و آنتروپی کلاسیک

برای فهم بهتر ترمودینامیک و آنتروپی سیاه‌چاله‌ها لازم است ابتدا نگاه کوتاهی به اصول علم ترمودینامیک کلاسیک، ۴قانون بنیادی آن (Main principles of thermodynamics)، تحت نام‌های قانون صفر(م)، اول، دوم و سوم، داشته باشیم. این قوانین بطور تجربی بدست آمده و از اهمیت بسیار بالائی در علوم پایه و فنی برخوردارند.

**۱**ـ قانون صفر(م) ترمودینامیک: این قانون می‌گوید: اگر دو سیستم با سیستم سومی در حال تعادل گرمایی باشند، با یکدیگر هم‌دما هستند.

**۲**ـ قانون اول ترمودینامیک: این قانون تحت نام قانون انرژی و کار نیز معروف است و می‌گوید: انرژی درونی یک سیستم ایزوله (منزوی، بسته) ثابت و پایدار است (قانون یا اصل بقاء انرژی).

تذکر: امکان ندارد بتوان سیستمی را بطور کامل، ایده‌آل، صد در صد، ایزوله کرد، یعنی تاثیر محیط بر سیستم را به صفر رساند. در واقع آن‌چه از آن به‌عنوان سیستم ایزوله نام‌برده می‌شود حالتی است که در آن کنش و واکنش‌های درون سیستم به‌مراتب قوی‌تر از کنش و واکنش‌های آن با محیط است.

**۳**ـ قانون دوم ترمودینامیک: این قانون تحت نام قانون آنتروپی نیز مشهور است و می‌گوید: پروسه‌هائی می‌توانستند وجود داشته باشند که قانون بقاء انرژی را خدشه‌دار نمی‌کنند ولیکن در طبیعت مشاهده نمی‌شوند. برای مثال هرگز ملاحظه نشده است که گرما از جسم سرد به طرف جسم گرم جاری شود، هرچند اگر چنان هم می‌شد در تضاد با قانون بقاء انرژی قرار نمی‌گرفت.

سیستم‌های‌ ایزوله‌ همواره در تلاش برای دست‌یابی به حالت تعادل هستند، نیروی محرکه‌ی مربوطه را آنتروپی ‌می‌گویند. در یک سیستم ایزوله حالت تعادل زمانی برقرار است که آنتروپی سیستم به بیشترین مقدار خود رسیده باشد. برای مثال وقتی دو گاز متفاوت ("زرد و آبی") در یک ظرف بسته قرارگیرند شروع به مخلوط شدن می‌کنند و این پروسه‌ تا زمانی ادامه دارد که آنتروپی سیستم به حداکثر برسد، یعنی به حداکثر نانظمی به معنای مخلوط شدن کامل دو گاز. ما در این پروسه به وضوح شاهد جهت‌دار بودن آن هستیم. یعنی، آنتروپی نشان از جهت‌دار بودن پروسه‌ها، جهت‌دار بودن زمان دارد. پروسه‌ها به بازگشت‌ناپذیر و بازگشت‌پذیر تقسیم می‌شوند. اما در واقع همه پروسه‌ها بازگشت‌ناپذیرند و با آنتروپی آن‌ها رو به ازدیاد. آن‌چه گاهن از آن به‌عنوان پروسه‌ی بازگشت‌پذیر نام‌برده می‌شود، تصور روندی بی‌نهایت کند است که لازمه‌ی آن برقرای دما و فشار یکسان در طول کل پروسه است. بازگشت‌پذیری حالت ایده‌آل بوده و در طبیعت مشاهده نمی‌شود.

**۴**ـ قانون سوم ترمودینامیک: این قانون تحت نام قضیه نرنست ( فیزیک و شیمیدان آلمانیWalter Nernst ) نیز معروف است و می‌گوید: وقتی که انرژی یک سیستم به حداقل مقدار خود نزدیک می‌شود، آنتروپی سیستم نیز به مقدار حداقل نزدیک می‌شود. در حالت خاص در یک بلور کامل (تک ـ کریستال کامل و بی‌نهایت گسترش یافته) در دمای صفر کلوین، صفر مطلق، ذرات هیچ ‌نوع نوسانی ندارند (یعنی انرژی آن‌ها برابر با صفر است) و در نتیجه نمی‌توان انتظار تغییراتی را در آنتروپی آن داشت (یعنی آنتروپی آن برابر با صفر است، پلانک). با کوچک‌ترین انحرافی در حالت بلورِ ایده‌آل محیط اطراف ذرات از حالت یکسان بودن خارج شده و ذرات دارای نوساناتی هرچند نازل خواهند بود (یعنی دارای انرژی و تغییرات انتروپی). خوب است بدانیم که پائین‌ترین درجه دمائی که انسان تاکنون موفق به دست‌یابی آن شده برابر با ۰٫۰۰۰۰۲کلوین است.

ترمودینامیک و آنتروپی سیاه‌چاله‌ها

در مقاله۳ گفتیم که یک ’جسم سیاه‘ در علم فیزیک به جسم ایده‌آلی گفته می‌شود که توان جذب صد در صدِ نورهای تابیده به آن را دارد. جسم سیاه در حالت تعادل، تعادل گرمائی (یعنی دارای دمای ثابت)، پرتوهای الکترومغناطیسی تابش می‌کند و معروف است به ’تابشِ جسم سیاه‘. طیف تابش جسم سیاه مستقل از جنس و فرم آن است و تنها تابع دمای آن می‌باشد.

بررسی کمیت‌ها و قوانین بخش‌های مختلف فیزیک در نظریه نسبیت عام ما را بهتر و بیش‌تر با عملکرد طبیعت، فراتر از آن‌چه از نظریه نسبیت خاص و فیزیک نیوتنی می‌شناسیم، آشنا می‌کند. قوانین ترمودینامیک در نظریه نسبیت عام نشان می‌‌دهند که می‌توان سیاه‌چاله‌ها را با کمیت‌ها و قوانین مشابهِ آن‌چه از ترمودینامیک کلایسک و جسمِ سیاه می‌شناسیم بررسی نمود. به این صورت که کمیت‌هائی، پارمترهائی، را تعریف کنیم که مطابقت با کمیت‌های شناخته شده در

ترمودینامیک کلاسیک مانند دما و آنتروپی دارند،

پارامترها و قوانین ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها

در زیر به قوانین ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها و پارامترهای مربوطه می‌پردازیم۶:

۱**.** قانون صفر(م) ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها: در یک سیاه‌چاله‌ی ثابت (stationary) گرانشِ سطحِ افقِ رویداد ثابت است.

(مطابقت گرانشِ سطح surface Gravity با دما؛ مطابقت با طیف انرژی حرارتی اشعه هاوکینگ۳)

**۲.** قانون اول ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها: پیوند کمیت‌های ترمودینامیکی دما، آنتروپی، جرم و چرخشِ سیاه‌چاله باهم. (مطابقت با قانون بقاء انرژی)

**۳.** قانون دوم ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها: سطحِ افقِ رویداد یک سیاه‌چاله‌ی شکل‌گرفته از دو سیاه‌چاله، بزرگتر از جمع سطوحِ افقِ رویدادِ دو سیاه‌چاله است.

(مطابقت فرمال: آنتروپی سیاه‌چاله‌ها را متناسب با سطحِ افقِ رویداد سیاه‌چاله‌ها دانستن. شبیه این بیان را در قانون دوم ترمودینامیک کلاسیک در مورد آنتروپی دو سیستم، برای مثال دو گاز "زرد و آبی" داشتیم.)

**۴.** قانون سوم ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها: غیرقابل دسترسی بودنِ حالتِ گرانشِ سطحِ سیاه‌چاله برابر با صفر.

(مطابقت با غیرقابل دسترسی بودن دمای صفر مطلق، صفر کلوین).

استیون هاوکنیگ، راجر پنروز و فیزیکدانان دیگری با بهره‌جوئی از این پارامترها به موفقیت‌های نظری قابل توجهی در باره‌ی سیاه‌چاله‌ها دست‌یافته‌اند. با این‌ همه ما برای کسب اطمینان از عملکرد طبیعت هنوز راه طولانی در پیش‌رو داریم.

**منابع**

1. Albert Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, In: Das Relativitäts-Prinzip, Teuber Verlag, Stuttgart, 8. Auflage. 1982

2. Hermann Weyl, Die Idee der Riemannschen Fläche, Teubner Verlag, Stuttgart, 1997

3. Hassan Bolouri, White hole, Wormhole, Black hole

۳. حسن بلوری، ’مفهوم مادّه در تراکم‌های بسیار بالا‘، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، سال ۲۰۲۰

4. Hassan Bolouri, Big Bang

۴. حسن بلوری، ’مهبانگ و پیدایش جهان‘ در کتاب: پژوهش‌هایی در نجوم، اختر فیزیک و کیهان‌شناسی در ایران معاصر، گردآورنده جعفر آقایانی چاوشی، مؤسسه‌ی انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران ۱۳۹۷

5. Hassan Bolouri, Symmetry: the key to recognizing the cosmos

۵. حسن بلوری، ’تقارن: کلید شناخت کیهان‘ منتشر شده در سلیت‌های فارسی زبان، سال ۲۰۲۰

6. Andreas Müller, Schwarze Löcher, Web–Artikel, Astronomie Wissen, TU München

۷. لینک تصویر ۱ (در آغاز مقاله):

[https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher /7](https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher%20%20%20/7) . {\displaystyle S\longrightarrow {0}}

۸. لینک تصویر ۲:

8. https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B3%DB%8C%D8%A7%D9%87%E2%80%8C%DA%86%D8%A7%D9%84%D9%87#/media/%D9%BE%D8%B1%D9%88%D9%86%D8%AF%D9%87:Black\_hole\_details.JPG