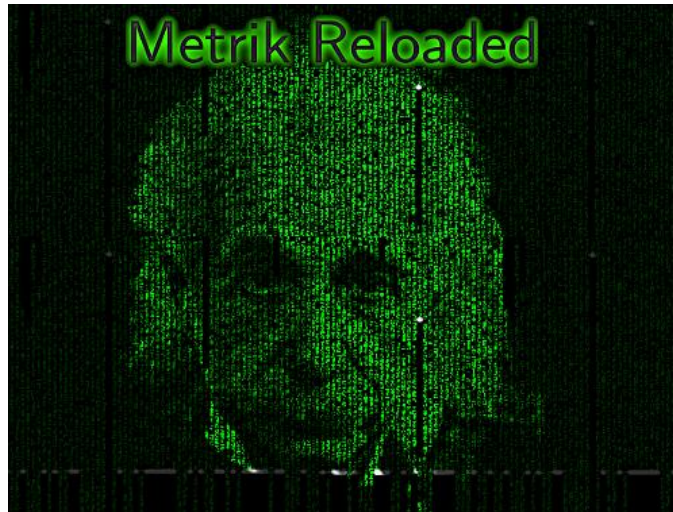


گرانشِ آنتروپیک

ترمودینامیکِ فضا زمان



Entropic gravity; Thermodynamics of spacetime¹

نظریه نسبیت عام اینشتین علت خمیدگی فضا زمان را حضور ماده و انرژی می‌داند. اما یافته‌های جدید بعکس، نواساناتِ خلاء کوانتومی را دلیل بروز ماده و انرژی در مکان‌هایی که فضا زمان خمیده است می‌انگارد.^۴ این تفسیر نو، چشم‌انداز جدیدی را برای حل برخی مسائل بنیادی فیزیک و کیهان‌شناسی ایجاد می‌کند.

فشرده

بررسی نتایج پژوهش‌های دهه‌های اخیر نشان از لزوم خوانش اساسی جدیدی از نظریه نسبیت عام اینشتین دارد. نظریه نسبیت عام علت خمیدگی فضا زمان را حضور ماده و انرژی می‌داند.^۳ اما یافته‌های جدید بعکس، نواسانات کوانتومی^۴ را دلیل بروز ماده و انرژی در مکان‌هایی که فضا زمان خمیده است می‌انگارد.^۵

"یک چنین تفسیر معکوسی از رابطه‌ی مفهوم‌های اساسی فیزیک، رویکرد کاملن تازه‌ای را برای حل برخی مسائل کیهان‌شناسی، وحدت نظریه‌های کوانتوم و نسبیت، مسئله بینهایت‌ها در فیزیک و انرژی تاریک ایجاد می‌کند."^۵

در سطح میکروسکوپی متغیرهایی مانند متریک و خمیدگی فضا زمان به‌شکلی که از نظریه کلاسیک نسبیت عام می‌شناسیم قابل تصور نیست. چراکه به‌نظر بخت کوانتزه شدن آنها، حداقل در حال حاضر، بسیار کم است. البته می‌توان فضا زمان را ساختاری شکل گرفته از واحدهای بسیار کوچک به اصطلاح "کوانتای فضا زمان یا اتم‌های فضا زمان"^۶ تصور کرد. نظریه نسبیت عام (معادلات اینشتین)، فضا زمان را در رابطه با ماده و انرژی قرار می‌دهد. بررسی‌های نظری افق رویداد سیامچاله‌ها نشان از رابطه میان آنتروپی سیامچاله و سطح افق رویداد آن دارد. به این معنا که هرچه سطح افق رویداد بزرگتر است آنتروپی سیامچاله نیز بیشتر است و بعکس. آنتروپی اما مفهومی از علم ترمودینامیک (آماری) است.

ایده‌ی ایجاد رابطه میان فضا زمان و ترمودینامیک را آندره ساخاروف (Andrei D. Sakharov) فیزیکدان شوروی سابق (۱۹۸۹-۱۹۲۱) در مقاله‌ای از سال ۱۹۶۸ "در ارتباط با گرانش کوانتومی که گرانش را به‌عنوان اثری شکل‌گرفته از نواسانات خلاء کوانتومی می‌دید مطرح نمود."^۷ این ایده در دهه هشتاد میلادی قرن بیستم از جانب کیپ تورن (Kip Thorne) فیزیکدان آمریکایی (۱۹۴۰*) و تیباولت دامور (Thibault Damour) فیزیکدان فرانسوی (۱۹۵۱*) به نوع دیگری (سنجش بین سطح افق رویداد سیامچاله‌ها^۳ و هیدرو دینامیک) با نتایج مشابه پی‌گیری شد. از آن زمان به این سو اشتقاق ترمودینامیکی معادلات نسبیت عام اینشتین به‌عنوان "نیروی آنتروپی"^۸، حاصل از حرکت جنبشی (حرارتی) ذرات، توجه فیزیکدان‌ها را به خود جلب نموده است.

در این مقاله برآنیم با چشم‌انداز جدید، یعنی گرانش آنتروپیک، برای حل مسائل بنیادی فیزیک و کیهان‌شناسی کوانتومی^۸ آشنا شویم.

حدود یک قرن پیش از ارائه‌ی نظریه نسبیت عام از جانب آلبرت اینشتین در سال ۱۹۱۵، یوهان کارل فریدریش گاوس (Johan Carl Friedrich Gauß) ریاضیدان و ستاره‌شناس آلمانی (۱۸۵۵-۱۷۷۷) دریافته بود که فضای خمیده اساسی‌تر از فضای مسطح است. به این معنا که در واقع فضای مسطح یک مورد خاص از فضای خمیده است، مانند یک خط که به‌طور خاص می‌تواند یک خط مستقیم باشد. در فیزیک، یک سیستم شتابدار هم‌ارز (معادل) با فضا‌مان خمیده (محلی) شناخته می‌شود.

تجربه‌ی روزمره‌ی ما از دنیای ماکروسکوپی نشان از پیوسته بودن ساختار فضا‌مان تا مقیاس پلانک (10^{-35} متر) دارد. این در حالیست که ما می‌دانیم بنیاد دنیای ماکروسکوپی را دنیای ناپیوسته‌ها (کوانتومی) تشکیل می‌دهد.^۹ از این‌رو وقتی ما نظریه کوانتوم را در یک فضای خمیده (طبق تفسیر جدید، در یک خلاء کوانتومی) ملاحظه می‌کنیم با پدیده‌های بسیار شگفت‌انگیزی مواجه هستیم به نام 'اثر آنرو'.

در سال ۱۹۷۶ ویلیام جرج آنرو (William George Unruh) فیزیکدان کانادایی (۱۹۴۵*) اثری را که به 'اثر آنرو' (Unruh effect) معروف است توصیف نمود. این اثر یکی از عجیب‌ترین پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت است. در مقاله^{۱۱} تحت عنوان 'خاستگاه فضا و زمان' در باره‌ی این اثر چنین می‌خوانیم:

"یک آشکارساز شتابدار و یا یک ناظر شتابدار می‌تواند تابش ذراتی مانند فوتون، الکترون و پوزیترون را در خلاء کوانتومی با دمایی متناسب با شتاب ملاحظه نماید. و این در حالی است که یک آشکارساز کُخت یا یک ناظر کُخت (مرجع کُخت، به دستگاه مختصاتی که عاری از شتاب است گفته می‌شود) قادر به مشاهده‌ی یک چنان پدیده‌ای نیست. برای مثال یک آشکارساز در فاصله‌ی ناچیزی از افق رویداد^{۱۰} یک سیاهچاله در معرض میدان گرانش قوی سیاهچاله قرار دارد. معنای این گفته با در نظر گرفتن اصل هم‌ارزی گرانش و شتاب آن است که آشکارساز مربوطه از شتاب بالائی برخوردار است. یعنی، می‌تواند نمایانگر (شاهد) تابشی با دمایی به نام 'دمای آنرو'، اندکی کوچکتر از دمای پس‌زمینه ماکروویو کیهانی، باشد. طبق این نظریه به دلیل آنکه ذرات کوانتومی واقعیت دارند کیهان نمی‌تواند کاملن مسطح باشد.

اثبات 'اثر آنرو' به آسانی میسر نیست. به این دلیل که برای نمایش آن نیاز به شتابی است که قادر باشد آشکارساز (ناظر) را در عرض یک میکروثانیه به سرعتی نزدیک به سرعت نور برساند و این در عمل غیرممکن است. با این حال فیزیکدان‌ها از دانشگاه فنی وین (اتریش) با همکاری ویلیام آنرو و دیگر همکاران، آزمایشی را در نظر گرفته‌اند تا بتوانند 'اثر آنرو' را در سطح آزمایشگاهی مشاهده و بررسی نمایند. البته این آزمایش می‌باید در محیطی فوق‌العاده سرد، یعنی نزدیک به دمای صفر مطلق، چگالش بوز - اینشتین (Bose - Einstein condensate) در دمای $273/14 -$ درجه سانتی‌گراد صورت گیرد. در این حالت دیگر نیازی نیست آشکارساز را تا نزدیک به سرعت نور شتاب داد بلکه می‌تواند در سرعت و شتاب‌های پائین 'اثر آنرو' را مشاهده نمود.^{۱۲، ۱۳، ۱۱}

بطور خلاصه، یک ناظر (آشکارساز) شتابدار که در یک خلاء کوانتومی در حرکت است، برداشت آن دارد در محیطی پُر از ذرات با دمایی متناسب با شتاب در پرواز است. چنین به‌نظر می‌رسد که این پدیده مشابه پدیده تشعشعات سیاهچاله‌ها، اشعه هاوکینگ، است.

به این ترتیب 'اثر آنرو' بُعد کاملن تازه‌ای از نظریه نسبیت اینشتین را نمایان می‌کند. به این معنا که این نظریه نه فقط فواصل و دوره‌های زمانی را تابع مرجع بلکه ظاهر شدن ذرات از خلاء کوانتومی را نیز تابع مختصاتی به نام مختصات ریندلر (Rindler coordinates)، ولفگانگ ریندلر (Wolfgang Rindler) فیزیکدان آمریکایی (۲۰۱۹-۱۹۲۴)، می‌داند.

دستگاه مختصات ریندلر به مرجعی گفته می‌شود که "بکارگیری آن برای مثال در آنالیز 'اثر آنرو' یک افق رویداد ظاهری (افق ریندلر) را برای ناظر ایجاد می‌کند و نشان از حدی دارد که از آن فراتر ناظر قادر به دریافت سیگنال‌های نور نیست."^{۱۴}

دستگاه مختصات ریندلر یک چارچوب مرجع در نظریه نسبیت خاص (در فضا‌مان مینکوفسکی) است که در آن یک ایژکت با شتاب ثابت، در حالیکه توسط یک ناظر (شتاب سنج) متحرک اندازه‌گیری می‌شود، دچار حرکت هایپربولیک (Hyperbolic motion) با ویژگی‌های خاص مانند پشت‌سر گذاشتن نور می‌شود.^{۱۴}

ترمودینامیک فضا زمان

قانون دوم ترمودینامیک^{۱۵} از جمله می‌گوید آنتروپی (معیاری برای بی‌نظمی) سیستم‌های فیزیکی تابع اندازه‌ی انرژی است و با کاهش یا افزایش آن کم و زیاد می‌شود. طبق نظریه استیون هاوکینگ از سال ۱۹۷۴ این مطلب در مورد سیاهچاله‌ها به معنای آنست که این سیستم‌ها با پرتو زایی گرمایی، به اصطلاح اشعه هاوکینگ، سطح افق رویدادشان متناسب با کاهش آنتروپی کوچکتر می‌شود. باز طبق قانون دوم ترمودینامیک زمانی که دو سیاهچاله با هم برخورد کرده و تشکیل یک سیاهچاله‌ی بزرگتر را دهند سطح افق رویداد سیاهچاله جدید بزرگتر از جمع سطح افق رویداد دو سیاهچاله است.^{۱۶} و^{۱۷} به عبارت دیگر، سطح افق رویداد سیاهچاله‌ها متناسب با آنتروپی آنها کاهش و یا افزایش می‌یابد.

استیون هاوکینگ معتقد بود که اثرات کوانتومی در نزدیکی سیاهچاله‌ها سبب 'تابش گرمایی' می‌شود. مطلبی که با در نظر گرفتن نظریه نسبیت و نظریه کوانتوم ناممکن نمی‌نماید. چرا که برای مثال، همان‌گونه که پیش‌تر گفتیم، یک فضانورد شتابدار (accelerated astronaut) در یک فضای خالی (خلأ کوانتومی) در اطراف خود دمایی به نام 'دمای آنرو' را حس می‌کند. البته این دما بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی (اغماض) است. ولیکن از نظر علمی دارای اهمیت بسزایی است.^{۱۶} بی‌گمان این مطلب بیان از وجود رابطه میان نظریه نسبیت و نظریه کوانتوم دارد که بسیار قابل تامل است. در واقع ما در اینجا با رابطه‌ای یا نظریه‌ای سر و کار داریم به نام 'نظریه ترمودینامیک فضا زمان' یا 'نظریه ترمودینامیک گرانشی' و یا 'نظریه گرانش آنتروپیک'.

از آنجا که در ترمودینامیک، مفهوم‌های انرژی و آنتروپی همواره در رابطه با مفهوم دما مطرح می‌شوند، طبیعی است که این امر را در رابطه با مفهوم 'دمای آنرو' و مفهوم‌های 'انرژی آنرو' و 'آنتروپی آنرو' نیز به بینیم.^{۱۷}

امید است با توسعه این مفهوم‌های جدید در چارچوب نظریه ترمودینامیک گرانشی متکی به داده‌های عینی بتوان به حل مسائلی مانند چرایی و چگونگی انفجار بزرگ و پروسه‌های اولیه آن، وحدت نیروهای اساسی در فیزیک و همین‌طور مسائل مربوط به کیهان‌شناسی برای مثال علت شدت یافتن انبساط کیهان دست یافت.

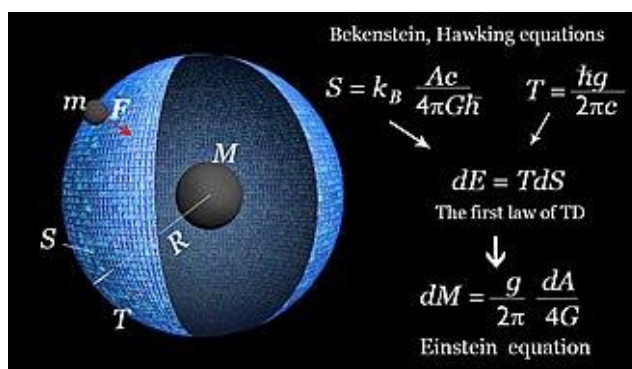
ترمودینامیک و گرانش

ترمودینامیک گرانشی در دهه هفتاد قرن بیستم از جانب یاکوب بکنشتاین (Jacob Beenstein) فیزیکدان اسرائیلی - آمریکایی متولد مکزیک (۲۰۱۵-۱۹۴۷) و استیون هاوکینگ در رابطه با ترمودینامیک سیاهچاله‌ها مطرح و توصیف شد. در سال ۱۹۹۵ تئودر جاکبسون (Theodore Jacobson)، فیزیکدان آمریکایی (۱۹۵۴*) با ارزیابی 'اثر آنرو' از یک طرف و بررسی رابطه‌ی میان سطح افق رویداد و اندازه آنتروپی سیاهچاله‌ها از طرف دیگر به این نتیجه رسید که هر نقطه از فضا زمان روی افق رویداد، یک سیاهچاله کوچک است. بر این مبنا او توانست معادلات نسبیت عام اینشتین را بدون استفاده از هندسه ریمانی (فضاهای خمیده) ارائه دهد. به عبارت دیگر، جاکسون توانست با یاری مفهوم‌های ترمودینامیک آماری به شناخت مهمی که نشان از ماهیت آماری گرانش دارد دست یابد. "از سال ۲۰۰۲ تانو پادمانابان (Thanu Padmanabhan) فیزیکدان و اخترشناس هندی. (۲۰۲۱-۱۹۵۷) توانست رویکرد جاکسون و یافته‌های آنرو، بکنشتاین، هاوکینگ را در رابطه با ترمودینامیک افق رویدادهای سیاهچاله‌ها در نظریه نسبیت عام توسعه دهد. پادمانابان با بررسی رابطه بین گرانش و آنتروپی نشان داد که فضا زمان انحنادار اینشتین تقریباً میکروسکوپی از اجزاء نامرئی 'گرانش آنتروپیک' است"^{۱۸}

پادمانابان معتقد بود "در فضا زمان می‌باید بطور مشخص درجات آزادی میکروسکوپی (microscopic degrees of freedom) وجود داشته باشد که مسئول رفتار حرارتی هستند، منطبق با منطق [استفان] بولتزمن. چراکه 'اثر آنرو' مانند گرم شدن فضا زمان است. ارتباط بین ترمودینامیک و گرانش چیز عجیب و غریب ریاضیاتی نیست بلکه یک واقعیت فیزیکی است. توصیف کافی گرانش باید از چگالی آنتروپی فضا زمان یا معادل آن چگالی اتم‌های فضا زمان شروع شود."^{۱۸} (بجای عبارت 'درجات آزادی میکروسکوپی فضا زمان' می‌توان از عبارت 'اتم‌های فضا زمان' و یا "کوانتای فضا زمان" استفاده کرد.)

در سال ۲۰۰۹ اریک فرلینده (Erik Verlinde) فیزیکدان هلندی (۱۹۶۲*) یک مدل مفهومی را ارائه نمود که گرانش را یک نیروی آنتروپیک می‌گمارد. تصویر ۲ برگرفتن (اشتیاق) گرانش آنتروپیک از نظریه‌های میکروسکوپی را نشان

می‌دهد^{۱۸} (از توضیح فرمول‌های درج شده در تصویر صرف‌نظر می‌کنم).



تصویر ۲: اشتقاق گرانش آنتروپیک^{۱۹}

گرانش آنتروپیک

گرانش آنتروپیک به نظریه‌ی جدیدی گفته می‌شود که نیروی گرانش را به‌عنوان یک نیروی آنتروپیک (گرانش درگاشتی) توصیف می‌کند. این نظریه، گرانش را پیامد گرانش سیستم‌های فیزیکی به افزایش آنتروپی (درگاشت) می‌داند.

به علت آنکه فضا زمان انحنادار در نظریه نسبیت عام اینشتین در مقیاس طول‌های بسیار کوچک در معرض نواناسات کوانتومی است، می‌توان تصور کرد که شتاب گرانشی آن بسیار کوچک باشد. به این معنا که اندازه‌ی آن نه با معکوس فاصله‌ی بین ذرات به توان دو ($\frac{1}{r^2}$) بلکه با معکوس طول به توان یک ($\frac{1}{r}$) کاهش می‌یابد. این وضعیت علت چرایی غیرقابل مشاهده بودن برای مثال ماده تاریک را حاصل از اثرات کوانتومی می‌داند. قابل توجه است که تئودر جاکسون و اریک فرلینده گرانش را پیامد اطلاعات مرتبط با موقعیت اجرام مادی نسبت به یکدیگر تفسیر می‌کنند.^{۱۹}

"مدل فرلینده، رویکرد ترمودینامیکی به گرانش را با اصل هولوگرافیک^{۱۴} جرارد توفت^{۱۴} پیوند می‌دهد. با این تفسیر که گرانش یک اندرکنش اساسی به حساب نمی‌آید بلکه پدیده‌ایست نوری (emergent) حاصل از رفتار آماری درجه‌های آزادی میکروسکوپی (microscopic degrees of freedom). مقاله‌ی فرلینده، اندر زمان منجر به تحقیقات در زمینه‌های مرتبط مانند کیهان‌شناسی، نظریه انرژی تاریک، شتاب انبساط کیهان، فاز تورم کیهانی^{۱۹} و گرانش کوانتومی حلقه‌ای^{۲۰} گردید. در ادامه یک مدل میکروسکوپی ویژه پیشنهاد شده است که امکان دارد گرانش آنتروپیک را در مقیاس‌های بزرگتر آشکار کند."^{۱۹}

آنتروپی سیستم‌های کوانتومی

این بخش اندکی نسبت به بخش‌های پیشین انتزاعی‌تر است. اما از آنجا که مفهوم 'آنتروپی سیستم‌های کوانتومی' زیربنای موضوعات ذکر شده را تشکیل می‌دهد لازم است هر چند کوتاه به نکاتی از آن اشاره شود.

"همانگونه که ویلیام جرج آنرو توصیف کرده است، دو پدیده باید در همکنش (تعامل) باشند تا ذرات بتوانند شکل بگیرند. نخست، خلاء (منظور خلاء کوانتومی^۴ است) چیز بی‌اهمیت و پیش‌پا افتاده‌ای نیست. از این‌رو لازم است آن را به‌عنوان برهم‌نهی امواج هارمونیک (harmonic waves) که به‌صورت غیرمحلی در هم‌تنیده هستند، توصیف شود. دوم اینکه توسط شتاب یا خمیدگی فضا زمان، افقی شکل می‌گیرد که می‌توان آن را در حالت محلی به‌عنوان افق ریندلر توصیف کرد. حال وقتی 'دمای آنرو' حاصل پدیده‌های در هم‌تنیدگی و افق است، طبیعی می‌نماید که آنتروپی و انرژی مرتبط با آن را نیز تابع همان پدیده‌ها ارزیابی کرد."^{۱۹}

جان فون نویمان ریاضیدان مجاری - آمریکایی (۱۹۵۷-۱۹۰۳) نشان داد که چگونه می‌توان آنتروپی یک سیستم کوانتومی را محاسبه کرد. شیوه‌ای که او در این مورد بکارگرفت تا حدودی مشابه روشی بود که پیش‌تر در نیمه اول قرن بیستم فیزیکدان‌ها برای بنای نظریه کوانتوم، یعنی به‌موجبی از مفهوم‌های فیزیک کلاسیک و تعبیر و تفسیر آنها در فیزیک

جدید انجام داده بودند. به عبارت دیگر، فون نویمان توانست با استفاده از مفهوم کلاسیک درونمایه‌ی یک مطلب (یک خبر) (Information content) که کلود شانون (Claude Elwood Shannon) مهندس الکترونیک و رمزنگار آمریکایی (۱۹۱۶-۲۰۰۱) آن را در مقاله‌ای از سال ۱۹۴۸ توصیف کرده بود، 'آنتروپی یک سیستم کوانتومی' را محاسبه کند. به عبارت دیگر، فون نویمان مفهوم کلاسیک (فرمول شانون) را در فرمالیسم کوانتومی بکار می‌گیرد و از این طریق به (فرمول) 'آنتروپی سیستم‌های کوانتومی' دست می‌یابد.^{۱۷}

رابطه‌ی بین سطح افق (افق رویداد) و آنتروپی را در مقاله‌های^{۱۸} در ارتباط با سیاهچاله‌ها توضیح دادیم و گفتیم: در سال ۱۹۷۴ استیون هاوکینگ (Stephen Hawking) به این نتیجه رسید که سیاهچاله‌ها در طول زمان بسیار طولانی جرم خود را در شکل 'تابش گرمایی' (ذرات کوانتومی) از دست می‌دهند. مطلبی که با نتایج حاصل از محاسبه‌ی فون نویمان نیز همخوانی دارد؛ در شکل تناسب میان سطح افق رویداد و آنتروپی.

در مقاله^{۲۰} توضیح دادیم که واحد اندازه‌گیری اطلاعات به‌عنوان کوچکترین مقدار انفورماسیون در سیستم‌های کلاسیک 'بیت' و در سیستم‌های کوانتومی 'کیوبیت' یا 'بیت کوانتومی' است.

سخن پایانی

در اینجا لازم می‌دانم بار دیگر در راستای رعایت منش علمی این گفته‌ی مانفرد آیکن (Manfred Eigen) شیمی - فیزیکدان بیولوژیک آلمانی برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شیمی سال ۱۹۶۷ را تکرار کنم:

"نباید، بیش از آنچه جای گفتن دارد گفت، بلکه باید تنها روابط و پدیده‌هایی را معتبر دانست که توسط مشاهدات عینی موثق شده‌اند."^{۲۱}

به‌همین دلیل لازم است با توجه به این هشدار، مفهوم‌های علمی مانند مفهوم آنتروپی را تنها در چارچوب فهمیده شده‌شان بکاربرد و نه بیشتر. چرا که در غیراین‌صورت خطر دچار شبه علم شدن کم نیست. برای مثال گاهن در رابطه با مفهوم آنتروپی صحبت از 'مرگ گرمایی' کیهان است. آیا این بیان صحت دارد؟ ما می‌دانیم که آنتروپی در سیستم‌های بسته‌ی ماکروسکوپی (سویا پروسه‌های مکانیکی ناب و بدون اصطکاک مانند حرکت سیارات^{۲۲}) تا رسیدن به حالت تعادل افزایش یافته و به حداکثر آنتروپی و ماکسیموم احتمال ممکن دست می‌یابند. البته این حالت تنها شامل سیستم‌های بسته، یعنی سیستم‌هایی بدون برهمکنش با محیط می‌شود. بنابراین شرط لازم و ضروری استفاده از مفهوم آنتروپی در مورد کیهان و ادعای رسیدن آن به 'مرگ گرمایی'، داشتن اطلاع کافی از بسته بودن سیستم کیهان است. اما آیا ما واقعاً می‌دانیم که کیهان یک سیستم بسته است؟ بی‌تردید خیر! در نتیجه می‌باید تا کسب اطلاع کافی رعایت احتیاط علمی را کرده و از هر نوع سوداگری و دچار شبه علم شدن پرهیز کنیم. متأسفانه باید اذعان نمود که کج‌فهمی‌ها و سوء استفاده از مفهوم‌های علمی تنها محدود به مفهوم آنتروپی نمی‌شود.

مراجع

<https://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2011/02/18/wie-man-die-raumzeit-krummt-teil-1./vi>

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

۲. حسن بلوری، 'مفهوم ماده در تراکم‌های بسیار بالا'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه اوت سال ۲۰۲۰

3. Hassan Bolouri, Centaurus A

۳. حسن بلوری، 'سازوکارها'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه سپتامبر سال ۲۰۲۰

4. Hassan Bolouri, Vacuum and its structure – a discussion about "Nothing."

۴. حسن بلوری، 'خلاء و ساختار آن، بحثی در باره "هیچ"'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۳

5. Philipp Wehrli, Swise – Swiss Science Education

file:///C:/Users/hassan/Downloads/Weshalb_wir_nicht_nach_einer_Quantengrav.pdf

6. Hassan Bolouri, The Quanta of Space and Time

۶. حسن بلوری، 'کوانتای فضا و زمان'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۱

7. A. Sacharow, Vacuum quantum fluctuation in curved space and the theory of gravitation, Soviet Phys. Dokl., Bd. 12, 1968

8. Hassan Bolouri, Quantum cosmology

۸. حسن بلوری، 'کیهان‌شناسی کوانتومی'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه ژوئن سال ۲۰۲۳

9. Hassan Bolouri, The concept of matter in philosophy and science

۹. حسن بلوری، 'مفهوم ماده در فلسفه و علم'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه می ۲۰۲۰

10. Hassan Bolouri, The Concept of Reality in Quantum Theory

۱۰. حسن بلوری، 'مفهوم واقعیت در نظریه کوانتوم'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه اکتبر ۲۰۲۰

11. Hassan Bolouri, The origin of space and time

۱۱. حسن بلوری، 'خاستگاه فضا و زمان'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه مارچ سال ۲۰۲۱

12.

https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%86%DA%AF%D8%A7%D9%84%D8%B4_%D8%A8%D9%88%D8%B2%E2%80%93%D8%A7%DB%8C%D9%86%D8%B4%D8%AA%DB%8C%D9%86

13.

<https://science.orf.at/stories/3203450/#:~:text=Der%20kanadische%20Physiker%20William%20Unruh,nun%20eine%20einfachere%20Alternative%20vor>

14. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyperbelbewegung#:~:text=Rindler-Koord>

15. Hassan Bolouri, Is our universe a hologram?

۱۵. حسن بلوری، 'آیا کیهان یک هولوگرام است؟'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه سپتامبر سال ۲۰۲۳

16. Theoretical physics: The origins of Space and time in Nature 500, 2013, Or in: Spektrum der Wissenschaft, 37, 2013

17.

https://www.academia.edu/8410078/Weshalb_wir_nicht_nach_einer_Quantengravitation_suchen_sollten_sondern_nach_einer_Thermodynamik_der_Raumzeit

18. <https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/die-atome-der-raumzeit/#>

19. https://de.wikipedia.org/wiki/Entropische_Gravitation

20. Hassan Bolouri, The limits of sensory perception

۲۰. حسن بلوری، 'مرزهای ادراک حسی'، منتشر شده در سایت‌های فارسی‌زبان، ماه نوامبر سال ۲۰۲۰

21. Manfred Eigen, in: Jacqds Mond Zufall und Notwendigkeit, DTV, München 1977, S.9

22. <https://www.grin.com/document/99415#>: