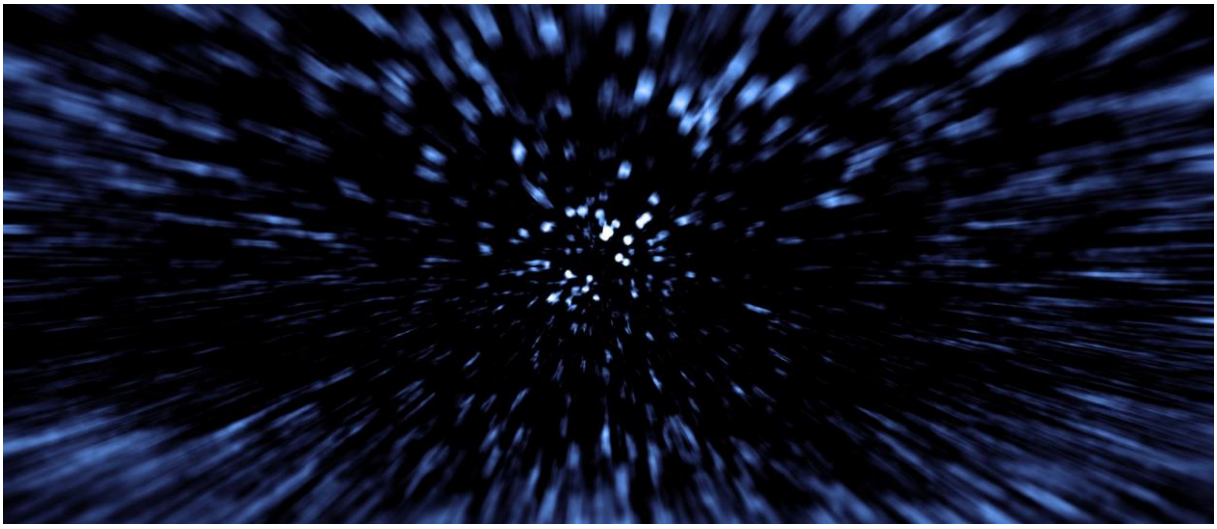
دکتر حسن بلوری

برلین، ۲۰۲۴/۱۰/۲۸

مسائلِ بزرگِ جهانِ هستی

منشاءِ و چیستیِ انرژیِ تاریک



The big problems of the universe: The origin and the essence of dark energy[1]

مشاهداتِ اخترفیزیکی نشان از انبساط تسریع شده کیهان دارند. این پدیده به وجود چیزی نامرئی به نام "انرژی تاریک" که حدود ۷۰٪ جهان هستی را تشکیل می‌دهد نسبت داده می‌شود. اما ما در واقع هیچ شناخت درستی از منشاء و چیستی آن نداریم. و حتا نمی‌دانیم که آیا اصولاً "انرژی تاریک" وجود دارد یا خیر.

فشرده

مشاهدات اخترفیزیکی نشان می‌دهند که ابژکت‌های بسیار بزرگِ قابل مشاهده در کیهان مانند کهکشان‌ها در حال دور شدن از یکدیگر هستند. علت این امر به وجود انرژی تاریک، "مفهومی" از سال ۱۹۹۸، مطرح شده از جانب اخترفیزیکدان نظری آمریکایی مایکل ترنر M. S. Turner (۱۹۴۹*) نسبت داده می‌شود. منظور از انرژی تاریک در مدل‌های فرض شده‌ی مختلف یک نوع انرژی بدون ویژگی باریونی، بدون جرم است. "مدل‌هایی که بیان از برهمکنشی (تعامل) نوعی میدان اسکالر با گرانشِ نسبیتی دارند."[۱]

در حالی‌که چیستی انرژی تاریک ناروشن است، منشاهای مختلفی برای آن پیشنهاد شده‌است، مانند ثابت کیهان‌شناسی[۲] (چگالی انرژی تاریک) و شکست تقارن[۳] (نقص‌های توپولوژیکی).

در حال حاضر اکثر کیهان‌شناسان با مرتبط کردن انرژی تاریک با مفهوم 'خلاء کوانتومی'[۴] باور به وجود انرژی تاریک دارند. ایدهِ "خلاء کوانتومی را می‌توان بهترین فرضیه برای چیستی انرژی تاریک تلقی کرد. از نظر فیزیکی این یک ایده بسیار جالبی است. زیرا 'هیچ ریزِ توزیع شده' (خلاء کوانتومی) که در همه‌جا یافت می‌شود، در این سناریو تنها در فواصل کیهانی بسیار بزرگ شایان توجه است. و در عین حال معلوم می‌شود که از نظر دینامیکی با کیهان مرتبط است."[۱] با این حال نمی‌توان این ایده را به‌دلیل اختلافِ بسیار بزرگ میان تجربه و نظریه بی‌کم و کاست پذیرفت.

دیدگاهی دیگر بر این نظر است که شاید انبساط تسریع شده کیهان "پیامد اختلالات کیهانی و نه اثر "مایع تاریک" با فشار منفی یا تغییر در نسبیت عام"[۵] باشد. از آنجاکه در حال حاضر "مفهوم انرژی تاریک"، مفهوم به معنای فهمیده شده، درست درک نشده مشکل است تعیین نمود که کدامیک از دیدگاه‌ها احتمالن با کیهان واقعی مطابقت دارد. این مسئله‌ایست که تنها تجربه (اندازه‌گیری) می‌تواند نشان دهد.

در این مقاله می‌خواهیم پس از پیشگفتار، به ناهمسانی انرژی تاریک ـ ماده تاریک، خلاء کوانتومی منشاء انرژی تاریک، سیاه‌چاله‌ها منبع انرژی تاریک، ثابت کیهانی ـ انبساط کیهان و در پایان به رابطه هندسه کیهان با انرژی تاریک بپردازیم.

پیشگفتار

مسئلهِ 'انبساط تسریع شده کیهان' موضوع پژوهش روز است. به‌همین خاطر اظهار نظر نهایی در باره آن امکان ندارد. اما از نتایج تاکنون به‌دست آمده از جمله از بررسی‌های دمای 'پرتو پس‌زمینه کیهانی'[۶] به‌عنوان مثال توسط 'کاوشگر ناهمسان‌گرد ریزموجی ویلکینسون' WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ چنین برداشت می‌شود که علت انبساط تسریع شده کیهان 'انرژی تاریک' است. و این در حالیست که هیچ نشانه‌ای از وجود آن شناسایی نشده است. با این حال مقدار آن با حدود ۷۰٪ از کل انرژی کیهان ذکر می‌شود. به این ترتیب فرض بر این است که انرژی تاریک نه تنها همه‌ی فضای گیتی را همگن با چگالی متوسط $\Lambda = ۴/۷ \cdot ۱۰^{-۲۷}\ kg/m^3$ دربرمی‌گیرد بلکه شکل‌گیری ساختارهای جدید را نیز سبب می‌شود. یعنی، انرژی تاریک با ملاحظه هم‌ارزی جرم (ماده) و انرژی، می‌باید نوعی از انرژی باشد همگن با چگالی اندک و چیستی متفاوت از ماده تاریک[۷] با حدود ۲۶٪ و ماده معمولی با حدود ۵٪ از کل انرژی کیهان. انرژی تاریک ویژگی گرانش دافعه‌ای حاصل از فشار منفی را دارد. به این معنا که عملکردی در جهت عکس عملکرد نیروی گرانش ماده معمولی و ماده تاریک دارد. تا زمان کشف انبساط تسریع شده کیهان باور بر این بود که گرانش ماده موجود باید سرعت انبساط کیهان را در طول زمان کاهش دهد. اما تجربه عکس آن را نشان داد. فیزیکدان‌ها برای یافتن پاسخ مناسب برای این مسئله ایده انرژی تاریک را مطرح کردند که اکنون یکی از بزرگترین مسایل حل نشده‌ی جهان هستی بشمار می‌آید.

در پایان دهه ۱۹۹۰ دو تیم کیهان‌شناس مستقل ازهم با استفاده از ستاره‌های در حال انفجار، به اصطلاح ابرنواخترها، برای تعیین دقیق سرعت انبساط کیهان به این نتیجه رسیدند که انبساط کیهان نه تنها کند نمی‌شود بلکه با سرعت فزاینده‌ای در حال انبساط است. سرپرستان این دو تیم: سال پرلموتر (Saul Perlmutter) اخترفیزیکدان آمریکایی متولد ۱۹۵۹ و بریان اشمیت (Brian P. Schmidt) اخترفیزیکدان استرالیایی ـ آمریکایی متولد ۱۹۶۷ و همچنین آدام گای ریس (Adam G. Riess) اخترفیزیکدان آمریکایی متولد ۱۹۶۹ به‌خاطر این کشف بزرگ جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۱ را دریافت کردند. پس از آن این پرسش مطرح شد که علت تسریع سرعت انبساط کیهان چیست؟ طبق قوانین فیزیک، پاسخ نمی‌تواند چیزی جز یک نیروی ناشناخته شده باشد. نیروی فرضی، معروف شده به انرژی تاریک که نه منشاء و نه چیستی آن مشخص است. با این حال جالب است بدانیم که این نیروی فرضی قابل ادغام در معادلات نسبیت عام اینشتین از سال ۱۹۱۵ است، یعنی، می‌توان آن را به‌راحتی به معادلات نسبیت عام اضافه کرد. برای این منظور کافیست عبارت Λ، یعنی 'ثابت کیهانی' به آن معادلات افزوده شود. به این خاطر که برداشت از "توسعه کیهان در نظریه نسبیت عام بر اساس انحنای کیهان و معادله حالت کیهانی (رابطه میان دما، فشار و ترکیبی از چگالی ماده، چگالی انرژی و چگالی انرژی خلاء برای هر منطقه از فضا) می‌باشد."[۸]

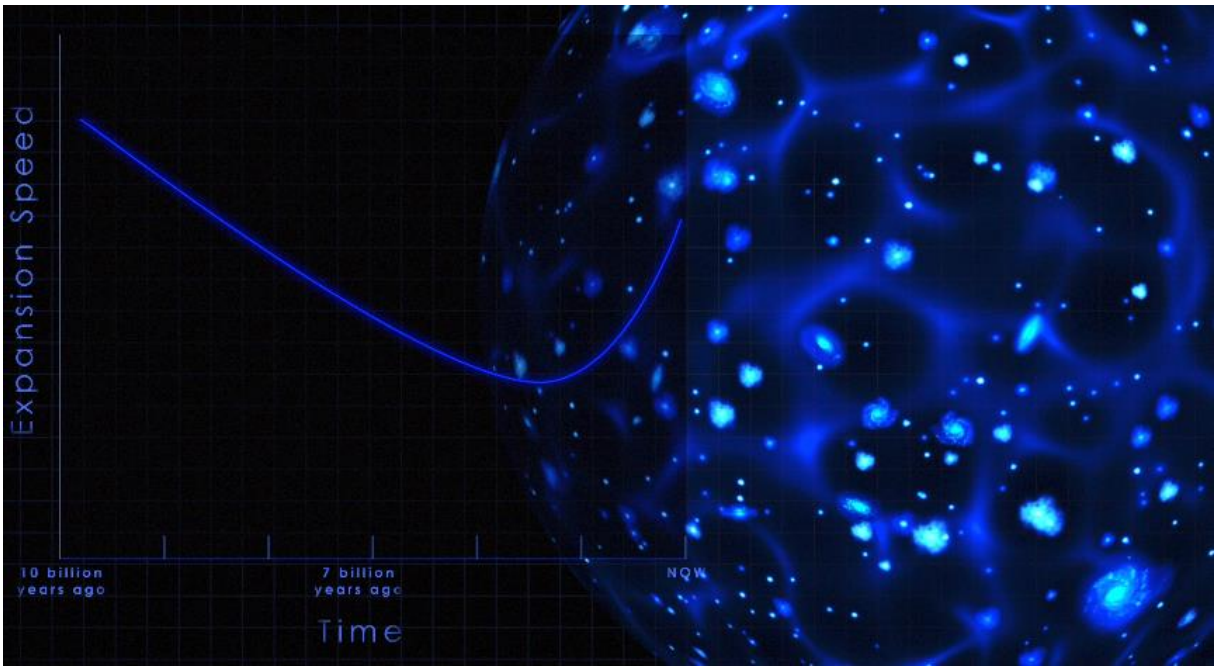
ناهمسانی انرژی تاریک و ماده تاریک

در مقاله[۷] تحت عنوان 'منشاء و چیستیِ مادّهِ تریک' نوشتیم: "ماده تاریک به ماده‌ای گفته می‌شود که حرکت 'نامتعارف' اجرامی از ماده مرئی کیهان به همکنشی با آن نسبت داده می‌شود. ... بی‌آن‌که منشاء، چیستی و اصولن وجود آن مشخص و ثابت شده باشد. ... شواهد مختلفی که گویای وجود ماده تاریک هستند از جمله عبارتند از سرعت حرکت ستاره‌های بیرونی در کهکشان‌های مارپیچی دور مرکز کهکشان، انرژی جنبشی کهکشان‌ها در خوشه‌های کهکشانی، اثر لنزهای گرانشی اجرام آسمانی، پرتوهای ایکس در اطراف خوشه‌های کهکشانی، رابطه پارامترهای چگالی با انبساط کیهان و یا نوسانات دمای پرتو پس‌زمینه کیهانی. ... اکثر فیزیکدانانِ ذرات‌نجومی بر این نظر هستند که ماده تاریک از نوعی ذرات بنیادی ناسناخته شده (به احتمال بدون بارالکتریکی) تشکیل شده است ـ ذراتی فرضی با نام‌های فوتینو یا آکسیون با جرمی بسیار کوچکتر از جرم الکترون‌ها و یا ذراتی سنگین با برهمکنش ضعیف (WIMP) با جرمی بسیار بزرگتر از جرم پروتون‌ها. اما تاکنون هیچ‌یک از این ذرات کشف نشده است."[۷]

در مقایسه، انرژی تاریک یا انرژی خلاء (متشکل از ذرات ـ پادذرات) بمراتب کمتر از ماده تاریک شناخته شده است. به‌نظر انرژی تاریک نیز مانند ماده تاریک تنها با نیروی گرانشی برهمکنشی دارد. انبساط کیهان با شتاب ثابت از حدود نیمه عمر کیهان به این سو (ویدیو: نمودار زیر از ناسا)، با فرض درست بودن مدل استاندارد کیهان‌شناسی، می‌تواند حاصل از یک فشار منفی قوی، انرژی تاریک باشد. "جدا از چیستی واقعی انرژی تاریک باید این انرژی از فشار منفی بالایی برخوردار باشد. چراکه در غیراین‌صورت توضیح سرعت انبساط مشاهده شده کیهان (با ملاحظه نیروی گرانش نسبیت عام) ناممکن به‌نظر می‌رسد."[۸] در عین حال، مشاهده کیهانِ مسطح، یعنی نبودِ انحنای قابل توجه، ضرورت وجود

یک نوع انرژی سوای ماده تاریک و ماده معمولی، به اصطلاح انرژی تاریک را آشکار می‌کند. در صورت صحت وجود انرژی تاریک، این پرسش مطرح می‌شود که این انرژی چه نوع انرژی است و چه منشایی دارد؟ آیا این انرژی یک نیروی اساسی در طبیعت است؟[۹] یعنی، آیا سوای چهار نیروی پایه‌ای شناخته شده (نیروی هسته‌ای قوی، نیروی هسته‌ای ضعیف، نیروی الکترومغناطیسم و نیروی گرانش) انرژی تاریک یک نیروی پنجم پایه‌ای در کیهان محسوب می‌شود؟ لینک زیر، ویدیوای ۳۰ ثانیه‌ای از ناسا است که توسعه سرعت انبساط کیهان را در شکل نمودار نشان می‌دهد:

https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/dark-energy-expansion-graph-final-1080p.mp4



Dark Energy Expansion Graph: Animation illustrating the changing rate of expansion due to dark energy. NASA Goddard's Scientific Visualization Studio [10]

خلاء کوانتومی منشاء انرژی تاریک؟

خلاء کوانتومی از جانب اکثر کیهان‌شناسان به‌عنوان منشاء اصلی انرژی تاریک شناخته می‌شود. و این در حالیست که اطلاع دقیقی از چیستی انرژی تاریک و منشاء آن وجود ندارد. آلترناتیوهای ارائه شده دیگر برای انرژی تاریک مانند وجود میدان اسکالر (کوینتانس Quintessenz) متشکل از ذرات بنیادی با جرمی حدود $۱۰^{-۸۲}$جرم الکترون نیز به دلیل برهمکنشی نامحسوس با ماده چندان واقعی به‌نظر نمی‌رسند. در مقاله[۴] تحت عنوان 'خلاء و ساختار آن ـ بحثی در بارهٔ "هیچ"' می‌خوانیم:

"کیهان و منشاء آن سخت با ماهیت خلاء کوانتومی گره‌خورده است. پژوهش‌ها در این زمینه ما را از فیزیک کلاسیک به فیزیک ذرات بنیادی سوق می‌هند. ... خلاء، بعکس تصور عموم مردم هم در فیزیک کلاسیک و هم در فیزیک کوانتوم به‌عنوان چیزی قابل اندازه‌گیری با اثر و تاثیرمتقابل درک می‌شود. تعریف مدرن خلاء و ساختار آن در کنش و واکنش با نیروهای پایه‌ای فیزیک در نظریه کوانتوم ارائه می‌گردد. با یاری این مفهومِ بنیادیِ است که می‌توان برخی از پدیده‌های اساسی طبیعت را توصیف کرد، مانند ایجاد و نابودی ذرات. ... آیا این ذرات از یک حداقل انرژی برخوردارند؟ پاسخ به این پرسش بحث را از دامنه‌ی فیزیک کلاسیک بسوی فیزیک کوانتوم سوق می‌دهد. فیزیک کوانتوم در این‌باره از جمله می‌گوید: هیچ ذره‌ی بنیادی وجود ندارد که بدون یک حداقل حرکت (نوسان) باشد. به این ترتیب "سکون" مفهومی است از فیزیک نیوتنی که در فیزیک کوانتوم اساساً بی‌معناست. به بیان دیگر، هر ذره‌ی کوانتومی برخوردار از یک حداقل حرکت و در نتیجه یک حداقل انرژی است."[۴]

با درنظرگرفتن هم‌ارزیِ جرم و انرژی، انرژی تاریک نیز به‌نوبه خود نیروی گرانشی ایجاد می‌کند. با این حال روشن شده است که اجرام آسمانی بزرگ مانند کهکشان‌ها در حال دور شدن از یکدیگر هستند. این بدان معناست که انرژی

تاریک در مجموع نقش گرانش دافعه‌ای دارد. یعنی، انرژی تاریک اجرام آسمانی بزرگ مانند کهکشان ها را از یکدیگر دور می‌کند. با این همه، باید به تکرار گفت که وجود انرژی تاریک تاکنون به‌طور تجربی به اثبات نرسیده است. ولیکن پژوهش‌هایی در این راستا برای مثال از طریق تلسکوپ فضایی اقلیدس از سال ۲۰۲۳ برای فهم بهتر انرژی تاریک با اندازه‌گیری دقیق سرعت انبساط کیهان در جریان است. این تلسکوپ قادر به مشاهده چندین میلیارد کهکشان و پویش (اسکن) ده میلیارد تاریخ کیهان است. به عبارت دیگر، نور بعضی از آنها تا رسیدن به زمین حدود ده میلیارد سال در راه بوده است. یعنی، از دورانی هستند که سامانه خورشیدی با طول عمر حدود ۴/۵میلیاردی خود هنوز وجود نداشته است.[۱۱]

سیاه‌چاله‌ها منبع انرژی تاریک؟

مطالعات تیم ۱۷ نفره از پژوهش‌گران ۹ کشور تحت سرپرستی دانشگاه هاوایی شامل فیزیکدانان امپریال کالج لندن و STFC RAL Space بر روی سیاه‌چاله‌ها[۱۲] که نتایج آن در سال ۲۰۲۳ در دو مقاله در دو ژورنال فیزیک (The Astrophysical Journal و The Astrophysical Journal Letters) منتشر شد، می‌گوید:

"مشاهدات اخترفیزیکی نشان می‌دهند که احتمالن سیاه‌چاله‌های مرکز کهکشان‌ها منبع انرژی تاریک هستند. اندازه‌گیری کهکشان‌های قدیمی و خفته (در اوایل کیهان تکامل یافته و تشکیل ستاره در آنها به پایان رسیده) نشان می‌دهد که سیاه‌چاله‌ها بیش از حد انتظار رشد می‌کنند. این حالت با پدیده‌ای که در نظریه گرانش اینشتین پیش‌بینی شده است مطابقت دارد. لذا احتمالن نیازی به افزودن چیز جدیدی به تصویر ما از کیهان برای توضیح انرژی تاریک نیست. به این معنا که سیاه‌چاله‌ها در ارتباط با گرانش اینشتین منبع آن هستند.
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند، سیاه‌چاله‌ها به‌نحوی جرم جذب می‌کنند که با انرژی خلاء موجود در آنها مطابقت دارد. از این طریق یک منبع انرژی تاریک ایجاد می‌شود که شکل‌گیری تکینگی[۱۲] در مرکز آنها را منتفی می‌کند. این‌ها نتایجی هستند که از بررسی داده‌های ۹میلیارد سال توسعه سیاه‌چاله‌ها گرفته شده‌اند."[۱۴]

در واقع مطالعات تیم مزبور نشان می‌دهد: ۱. بزرگی کیهان با جرم سیاه‌چاله‌ها همخوانی دارد. ۲. مقدار انرژی تاریک اندازه‌گیری شده در کیهان با انرژی خلاء سیاه‌چاله‌ها قابل توضیح است. ۳. سیاه‌چاله‌ها با انبساط کیهان مرتبط هستند. ۴. جرم سیاه‌چاله‌ها با انبساط کیهان بیشتر می‌شود.[۱۴]
با این همه، سایر فیزیکدان‌ها در صحت این نظریه که سیاه‌چاله‌ها منبع انرژی تاریک باشند، به دلیل آن‌که پاسخ‌گوی مشاهدات دیگری نیست تردید دارند.[۸]

ثابت کیهانی و انبساط کیهان

ضریب یا ثابت کیهان‌شناسی Λ در معادلات نظریه نسبیت عام به‌معنای چگالی انرژی خلاء است. ثابت کیهان‌شناسی کمیتی هم‌خوان با مفهوم انرژی[۹] است. انرژی خلاء در جهت مخالف گرانش ماده موجود در کیهان عمل می‌کند. به عبارت دیگر، ثابت کیهانی گرانشی دافعه‌ای یا فشار منفی است که باعث انبساط کیهان می‌شود.

مشاهدات، اندازه ثابت کیهانی را بسیار کوچک ولیکن مثبت نشان می‌دهند، حدود $\Lambda = ۱/۹ \cdot ۱۰^{-۵۲}$ $۱/\mathrm{m}^۲$ ؛ (m طول، در واحد متر). در مقابل، در نظریه میدان‌های کوانتومی خلاء (نوسانات کوانتومی) با چگالی انرژی، با ثابت کیهانی حدود $۹/۸ \cdot ۱۰^{۷۰} m^{-2}$ ارزیابی می‌شود. و این به وضوح بیان از اختلاف بزرگ $۱۰^{۱۲۲}$مرتبه‌ای میان تجربه و نظریه دارد. وضعیتی که به روشنی نشان می‌دهد، مفهوم انرژی تاریک درست فهمیده نشده است.

به خاطر آن‌که چگالی انرژی خلاء در طول زمان تغییر می‌کند، تغییری حاصل از نوسانات میدان‌های کوانتومی.[۴و۸] در پژوهش‌های جدید صحبت از *پارامتر* چگالی انرژی تاریک نیز می‌شود و نه فقط از *ثابت* کیهانی.

این‌که آیا ثابت کیهانی به‌معنای واقعی کلمه ثابت است یا در طول زمان تغییر می‌کند، مسئله‌ایست مورد بحث. چنانچه تغییر کند معنایش اینست که انرژی تاریک کمیتی دینامیکی است. در این‌صورت نیاز به یک نیروی بنیادی برهمکنشی ناشناخته شده (نیروی اساسی پنجم؟) است.
در رابطه با همین مطلب گاهی هم به‌عنوان آلترناتیو صحبت از جایگزینی نظریه گرانش اینشتین با یک نظریه جدید است. اما نگارنده با علم به این‌که نظریه گرانش اینشتین در طول یک قرن گذشته همواره صحت خود را به‌طور تجربی و به خوبی در تمامی بررسی‌ها در حوزه تعریف شده‌اش، یعنی در خوزه کلاسیک، به اثبات رسانده، معتقد است که پاسخ حل مسئله ثابت کیهانی را باید در جای دیگری جستجو کرد: در حوزه نظریه کوانتومی.

هندسه کیهان و انرژی تاریک

بنابر نظریه نسبیت عام اینشتین، هنسه کیهان مرتبط با کل ماده (جرم و انرژی) موجود در کیهان است. اندازه‌گیری ناهمسانگردی‌های[۳] پرتو پس‌زمینه کیهانی[۶] نشان می‌دهد که کیهان تقریبن مسطح است. اما لازمه مسطح بودن هندسه کیهان برابری 'چگالی جرم و انرژی کیهان' با 'چگالی بحرانی'[۱۲و۱۳] (critical density) است. "کل ماده در کیهان (از جمله ماده معمولی و ماده تاریک) که بر اساس طیف پرتو پس‌زمینه کیهانی اندازه‌گیری شده‌اند، تنها حدود ۳۰٪ از چگالی بحرانی را تشکیل می‌دهد."[۸] این حالت، وجود یک نوع انرژی ناشناخته شده که حدود ۷۰٪ باقیمانده را تشکیل می‌دهد ضروری می‌نماید. یک چنین درصد بالایی از یک انرژی ناشناخته شده ضروریست تا هماهنگی لازم میان هندسه کیهان (فضازمان) با کل ماده کیهان برقرار شود.

مراجع

1. https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/dunkle-energie/83

2. Hassan Bolouri, The natural constants and epistemology

۲. حسن بلوری، 'ثابت‌های طبیعی و شناخت‌شناسی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه فوریه سال ۲۰۲۱

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

۳. حسن بلوری، 'تقارن: کلید شناخت کیهان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه مارچ سال ۲۰۲۰

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

۴. حسن بلوری، 'خلاء و ساختار آن ـ بحثی در بارهٔ "هیچ"، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه دتسامبر سال ۲۰۲۳

5. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0506534

6. Hassan Bolouri, The Concept of Space

۶. حسن بلوری، 'مفهوم فضا'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه جولای سال ۲۰۲۰

7. Hassan Bolouri, The big problems of the universe: The origin and the essence of dark matter

۷. حسن بلوری، 'مسائل بزرگ جهان هستی ـ منشاء و چیستی ماده تاریک'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه سپتامبر سال ۲۰۲۴

8. https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy

9. Hassan Bolouri, The big problems of the universe: The origin and the essence of energy

۹. حسن بلوری، 'مسائل بزرگ جهان هستی ـ منشاء و چیستی انرژی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه جولای سال ۲۰۲۴

10. https://science.nasa.gov/mission/roman-space-telescope/dark-energy/

11. https://www.spektrum.de/news/erste-bilder-von-euclid-die-jagd-auf-die-dunkle-energie-ist-eroeffnet/2197401

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

۱۲. حسن بلوری، 'مفهوم مادّه در تراکم‌های بسیار بالا'ـ سفیدچاله‌ها، کرم‌چاله‌ها، سیاه‌چاله‌ها، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه اوت سال ۲۰۲۰

13. Hassan Bolouri, Centaurus A

۱۳. حسن بلوری، 'سازوکارها'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه سپتامبر سال۲۰۲۰

14. https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/