

سیاه‌چاله‌های مهبانگ خوان گارسی بلیدو - سِپِستِشِن کِلیس

برگردان: امید برومند

چندی پس از پیدایش جهان، گروه متراکمی از سیاه‌چاله‌ها در جهان جوان گسترده شدند. بسیاری از این اشیاء احتمالاً تا به امروز موجودند. آنها کاندیداهایی پذیرفتنی برای ماده‌ی تاریک نامرئی و مرموزند.



خوان گارسیا بلیدو (سمت چپ) استاد موسسه‌ی فیزیک نظری دانشگاه مادرید است و عضو بررسی انرژی تاریک (Survey Dark Energy) و همچنین عضو ماموریت-های فضایی اتحادیه‌ی اروپا (Euclid و LISA Laser Antenna Space Interferometer) است. سِپِستِشِن کِلیس (سمت راست) کیهان‌شناس بلژیکی است. او دوره‌ی فوق دکترا در مدرسه فنی عالی آخن RWTH در آلمان را می‌گذراند و عضو ماموریت Euclid و رادیو تلسکوپ Square Kilometre Array است.



فیزیکدان‌ها هم اکنون می‌توانند سیاه‌چاله‌هایی را که به دور یکدیگر در گردش‌اند به‌واسطه امواج گرانشی اندازه‌گیری کنند. علائم دریافت شده حتی نشان می‌دهند که آیا این اشیاء احتمالاً از زمان اولیه‌ی آغاز جهان هستند یا خیر.

بیش از یک میلیارد سال پیش در اعماق جهان، دو سیاه‌چاله بر روی مدار مارپیچی شکل تنگ شونده‌ای، دور یکدیگر چرخیده و در نهایت در یکدیگر سقوط کردند. این روند شدید، ساختار فضا-زمان را لرزاند و امواج گرانشی تولید کرد که در همه جهات با سرعت نور پخش شدند. در سپتامبر 2015، نوسانات و ارتعاشات در نهایت به سیاره‌ی ما رسیدند و در سنسورهای رصدخانه گرانشی LIGO (رصدخانه‌ی موج گرانشی تداخل لیزری) (1) در ایالات متحد آمریکا با علامت‌های شاخصه‌ای توجه را به خود جلب کردند.

این نخستین اثبات مستقیم امواج گرانشی، پیش بینی 100 ساله‌ی آلبرت اینشتین از چنین ارتعاشات فضا-زمان را تأیید کرد؛ چیزی که اینشتین آن را هرگز اثبات‌پذیر تلقی نمی‌کرد. با توجه به علامت‌ها، هر دو سیاه‌چاله باید 30 بار سنگین‌تر از خورشید می‌بودند.

بدین ترتیب چرم‌های آنها 2 تا 3 برابر بزرگتر از سیاه‌چاله‌های معمولی می‌بودند که از انفجار اَبَرنوآختر ستاره‌های کلان‌چرم ناشی می‌شوند. آیا چنین اجسامی می‌توانستند از ستارگان بوجود آمده باشند؟ حتی اگر دو ستاره‌ی به‌خصوص کلان‌چرم، مستقل از یکدیگر، در پایان به شکل چنین هیولاهایی درآیند، (دست‌کم در جریان توسعه‌ی احتمالی جهان) بعید به نظر می‌رسد که آن دو هم‌دیگر را پیدا کرده و در یک‌دیگر ادغام شده باشند. بدین جهت این فرض احتمال دارد که این سیاه‌چاله‌های کلان‌چرم به طریق دیگری، بدون ستاره‌های اولیه بوجود آمده باشند. احتمالاً LIGO (رصدخانه موج گرانشی تداخل لیزری) نه تنها امواج گرانشی، بلکه چیزی شگفت‌انگیزتر از آن را کشف کرده است؛ سیاه‌چاله‌هایی که پیش از تشکیل اولین ستارگان وجود داشته‌اند.

اگر چه کسی چنین سیاه‌چاله‌های «اولیه» را ندیده است، اما بر اساس برخی از مدل‌های نظری، آنها در توده‌های کلان از پلاسمای داغ و متراکم که کمتر از یک ثانیه بعد از مهبانگ کیهان را پر کرده بودند، ظاهر شدند. این چرم‌های پنهان چندین معمای کیهان‌شناسی مدرن را حل خواهند کرد. سیاه‌چاله‌های اولیه می‌توانند به خصوص تا اندازه‌ای ماده‌ی تاریک را توضیح دهند. ماده‌ی تاریک، 85% کل ماده‌ی جهان است که قابل دیدن نیست و به واسطه‌ی نیروی جاذبه‌اش کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی را نیرومندتر از آنچه که به تنهایی توسط ماده‌ی قابل دیدن توجیه‌پذیر باشد، به هم متصل می‌کند. پژوهش‌های آینده با LIGO و دیگر تأسیسات به زودی این فرضیه‌ها را بررسی خواهند کرد و احتمالاً انگار اساسن جدیدی از کیهان را به تصویر خواهند کشید.

سیاه‌چاله‌ها خود نامزدهای ایده‌آلی برای ماده‌ی تاریک‌اند، زیرا که آنها نوری منتشر نمی‌کنند. در کنار دیگر اجسام آسمانی تیره، همانند سیارات سرگردان و کوتوله‌های قهوه‌ای (2)، آنها در ابتدا بمثابه MACHO (massive compact halo objects) یعنی «اشیای هاله‌ای متراکم عظیم» (3) مطلوب‌ترین پاسخ به این سوال بودند که ماده‌ی تاریک از چه تشکیل شده است. ظاهر MACHO‌ها می‌بایست هاله‌ی کروی شکل متشکل از چرم‌های نامرئی که احاطه‌کننده‌ی هر کهکشان است را تشکیل داده و همچنین در نزدیکی مرکز درخشان کهکشان‌ها وجود داشته که توضیح‌گر حرکات غیرقابل درک ستاره‌ها و گازها در لبه‌های کهکشان‌ها را با جاذبه‌ی گرانشی خود باشند. در توضیحی ساده می‌شود گفت که کهکشان‌ها سریع‌تر از آن می‌چرخند که چرم قابل رویت ستارگان آنها، توانایی کنار هم و باهم نگاه‌داشتن کل کهکشان را داشته باشند. ماده‌ی تاریک آن جاذبه‌ی اضافی را فراهم می‌کند که مانع از پرتاب ستاره‌ها از کهکشان‌ها می‌شود.

در یک نگاه

ماده‌ی تاریک از چه تشکیل شده است؟

- 1- ماهیت ماده‌ی نامرئی که با نیروی جاذبه‌اش هر کهکشانی را بعنوان یک کل پابرجا نگاه می‌دارد، هنوز یک راز است.
- 2- بسیاری از محققان، ذرات با برهم‌کنش ضعیف فرضی‌ای را در پس آن حدس می‌زنند. جستجوی تجربی برای چنین اشیایی تا کنون بی‌ثمر بوده است.
- 3- توضیح صرفن نظری دیگری را در این رابطه سیاه‌چاله‌های «اولیه» از شروع کیهان ارائه می‌کنند. امواج گرانشی حاصل از ادغام آنها می‌تواند شواهدی از وجود آنها ارائه دهد.

زوال «اشیای هاله‌ای متراکم عظیم» و برآمد «ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف» (WIMPs) (3)

اما اگر MACHO‌ها بزرگ‌ترین بخش ماده‌ی تاریک را تشکیل می‌دهند، باید مشاهدات دیگر را نیز توضیح دهند. ماده‌ی تاریک بزرگ‌ترین ساختارهای جهان را شکل می‌دهد، یعنی اثرگذار و شکل‌دهنده‌ی منشاء و رشد کهکشان‌ها، خوشه‌های کهکشانی و اَبَرخوشه‌های کهکشانی است.

ساختارهای کیهانی توسط رُمبش گرانشی (Gravitation collaps) توده‌های گاز در درون هاله‌هایی از ماده‌ی تاریک ایجاد می‌شوند. کیهان‌شناسان با نقشه‌برداری گسترده‌ی کهکشان‌ها، توزیع فضایی این توده‌های گاز را به دقت اندازه‌گرفته و با نوسانات کوچک درجه‌ی حرارت تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی -یعنی پس‌تابش مهبانگ- ربط داده‌اند. علاوه بر این، چرم ماده‌ی تاریک پنهان در کهکشان‌های بزرگ و خوشه‌های کهکشانی، فضا را قوس داده و نور اشیای به‌مراتب دورتر در پس‌زمینه را از طریق به اصطلاح لنز گرانشی خم می‌کند.

فرضیه MACHO در حدود یک دهه قبل، هنگام جستجو در پی نشانه‌های غیرمستقیم برای جرم‌های تاریک متراکم و فشرده از محبوبیت افتاد. در این رابطه اخترشناسان به نوعی از لنز گرانشی امید داشتند. در اثر به اصطلاح **ریزهمگرایی گرانشی** (Gravitational microlensing) (4)، یک سیاه‌چاله، یک کوتوله‌ی قهوه‌ای و یا یک سیاره از مقابل یک ستاره در پس‌زمینه گذشته و بطور موقت نور آن را مانند ذره بین تقویت می‌کند. نقشه‌برداری چندین ساله از میکرو لنزهایی از میلیون‌ها ستاره در ابر ماژلان کوچک و بزرگ، یعنی مهم‌ترین کهکشان‌ها همراه کهکشان راه شیری، هیچ شواهدی از آن به‌دست ندادند. با توجه به اندازه‌گیری‌ها، MACHO‌ها تا حدود ده برابر جرم خورشید غیر ممکن است جزء اصلی تشکیل دهنده‌ی ماده‌ی تاریک باشند. به همین علت، نظریه‌پردازان توضیح دیگری را ترجیح دادند که مبتنی بر **ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف** (WIMPs) است.

ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف (WIMPs) در بسط خاصی از **مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادین** پیش‌بینی شده‌اند. آن‌ها نسبت به MACHO‌ها احتمالاً سخت‌تر قابل ردیابی هستند. حتی پس از دهه‌ها جستجو با شتاب‌دهنده‌های ذرات، ردیاب‌های زیرزمینی و تلسکوپ‌های فضایی، تاکنون هیچ ردیابی از **ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف** دیده نشده است. به همین جهت، برخی از محققان دوباره به فرضیه MACHOs (اشیای هاله‌ای متراکم عظیم) و بخصوص به سیاه‌چاله‌های اولیه روی آورده‌اند. اما چه روندی می‌تواند این اشیای عجیب و غریب را در تمام جهان قابل مشاهده پراکنده باشد و چرا آنها تا مدت طولانی کشف نشده بودند؟

هنگامی که نوسانات زیراتمی به شدت افزایش یافتند

کیهان‌شناسان بریتانیایی **برنارد کار و استیون هاوکینگ** در سال‌های 70 میلادی، فرضیه‌ی سیاه‌چاله‌های اولیه را طراحی و پایه گذاری کردند. آن دو این‌ها را با چرمی در زیر کوه‌های زمین مورد بررسی قرار دادند. اما چرم‌هایی این چنین کوچک می‌بایست مدت‌ها پیش از بین رفته باشند. در طول تاریخ 14 میلیارد ساله‌ی جهان ما، آن‌ها باید به طور کامل از طریق یک فرایند مکانیک کوانتومی کشف شده توسط **هاوکینگ**، یعنی **تابش هاوکینگ**، کاملن تبخیر شده باشند. اما فیزیک‌دان‌ها قبل این امکان را در نظر گرفتند که سیاه‌چاله‌ای به‌مراتب کلان‌چرم‌تر ممکن است هنوز هم وجود داشته باشد.

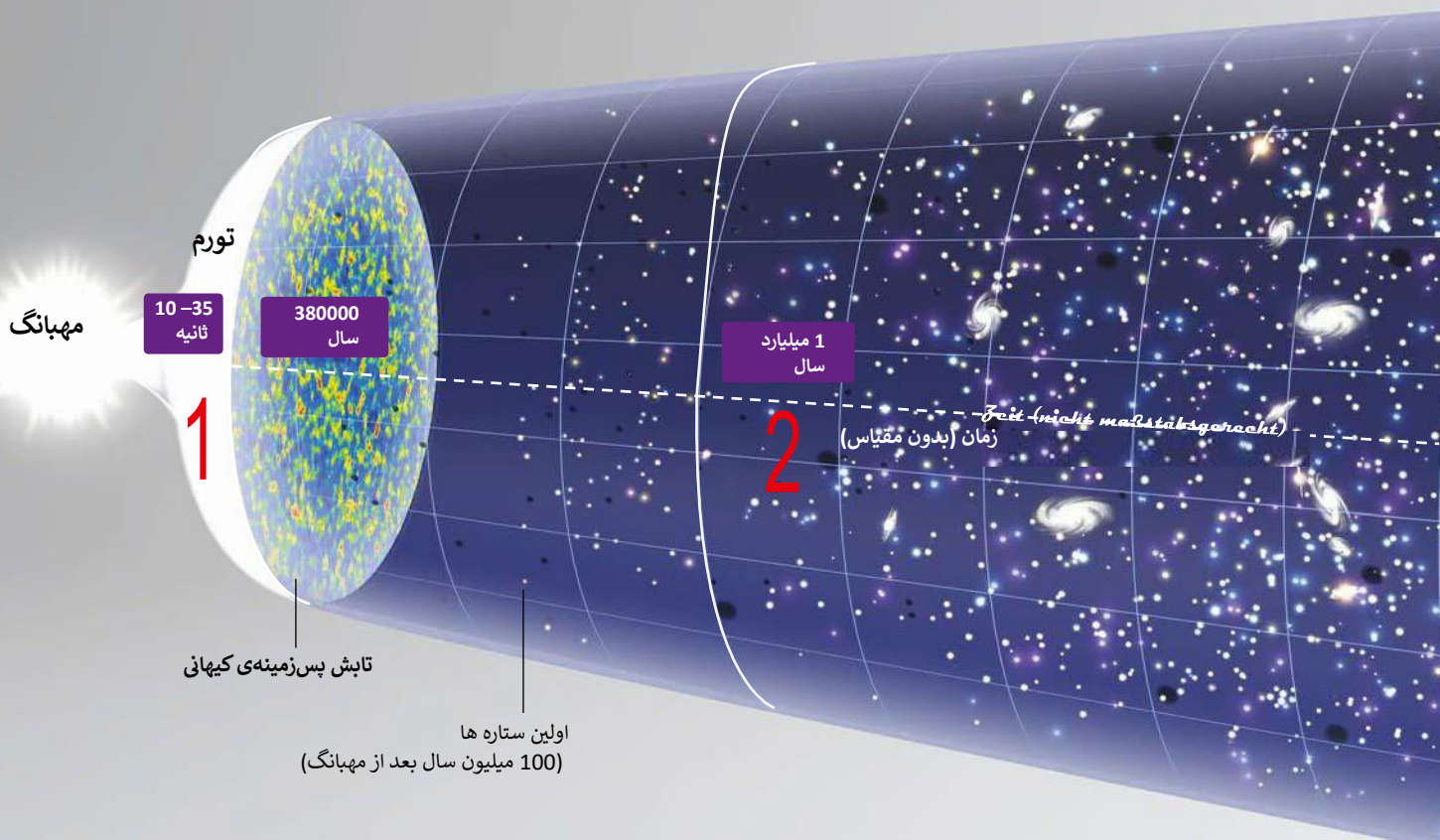
این تصور که چنین اشیای اولیه، کمکی برای شناسایی ماده‌ی تاریک خواهند بود، توسط نظریه‌پردازان در دهه 1990 به گونه‌ای دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفت. در این رابطه دانشمندان نظریه‌ی تورم کیهانی را مبنای کار قرار دادند. در اوائل دهه‌ی 80 میلادی فیزیک‌دان آمریکایی **النگات** این تصور را داشت که فوراً بعد از مهبانگ یک مرحله‌ی کوتاه انبساط رخ داده است. در 10^{-35} ثانیه دو نقطه که فاصله‌شان کمتر از شعاع یک اتم بوده به فاصله 4 سال نوری -یعنی فاصله‌ی نزدیک‌ترین ستاره به ما- از هم دور شده و جدا شده‌اند. در آن واحد، بر اثر تورم، نوسانات ریز کوانتومی به مقیاسی درشت‌نمود (ماکروسکوپی) بزرگ شده و جهان در حال رشد را پر از ماده با چگالی مختلف و منطقه‌هایی با انرژی‌های مختلف کرده، که از آنها ساختارهای امروزی پدید آمده‌اند. تئوری تورم عجیب و غریب به نظر می‌رسد، اما اکثر کیهان‌شناسان بر این باورند که مشاهدات نوسانات تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی آن را تایید می‌کنند.

در سال 1996 یکی از همکاران مان **گارسیا بلیدو** همراه با **آندره لینه** از دانشگاه **استفورد در کالیفرنیا و دیوید ونس** از دانشگاه **پرتسمووث** در انگلستان کشف کردند که تورم در طیف نوسانات چگالی جهان اولیه، برآمدگی‌هایی با نوک باریک تیز می‌تواند تولید کرده باشد (بنگرید به منحنی‌های زیر تصویر «فرآورده‌های اولیه‌ی مهبانگ» - مترجم). همانطور که نشان دادیم، نوسانات کوانتومی باد کرده و تورم زا، باید منطقه‌های به ویژه متراکمی ایجاد کنند که کمتر از یک ثانیه بعد از پایان تورم به گروهی از سیاه‌چاله‌های فضایی درهم-فرومی‌ریزند. سپس این‌ها ماده‌ی تاریک می‌شوند و بزرگ‌ترین بخش ماده در جهان امروز را تشکیل می‌دهند. این مدل، جمعی از سیاه‌چاله‌ها با جرم یکسان به وجود می‌آورد که مقدار آن چرم‌ها به مقدار انرژی موجود در منطقه‌ی درهم‌فرو ریخته بستگی دارد. دیری نگذشت که بسیاری از تیم‌های دیگر این ایده را در مدل‌های مختلف تورم بکار گرفتند.

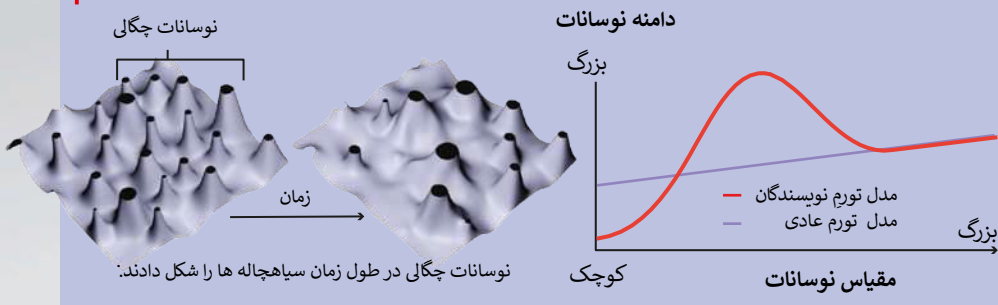
در سال 2015 ما (**کلییس و گارسیا بلیدو**) سناریوی شبیه به سناریوی سال 1996 ایجاد کردیم که در آن نوسانات اولیه به جای برآمدگی‌های نوک‌تیز، حداکثر پهن‌تری از تراکم انرژی ارائه می‌دهند و منجر به سیاه‌چاله‌ها با جرم‌های کاملن متفاوتی می‌شوند (بنگرید به منحنی‌های زیر تصویر «فرآورده‌های اولیه‌ی مهبانگ» - مترجم). در این سناریو، نوسانات چگالی بزرگ تنگ هم قرار گرفته به خوشه‌هایی

اولین فرآورده‌های مهبانگ

سیاه‌چاله‌ها احتمالاً در جزیی از ثانیه‌ی اول پیدایش کیهان به وجود آمده‌اند، زمانی که تورم -فاز کوتاهی از انبساط شدید- نوسانات چگالی زیر اتمی را به ابعاد غول‌پیکری متورم کرد. چنین سیاه‌چاله‌های اولیه تأثیرات پایداری بر ساختارهای بعدی جهان داشته‌اند. آن‌ها امروز نامزد ماده‌ی مرموز تاریک‌اند. ردیاب‌های مدرن امواج گرانشی کمک می‌کنند که به‌زودی آن‌ها را پیدا کنیم.



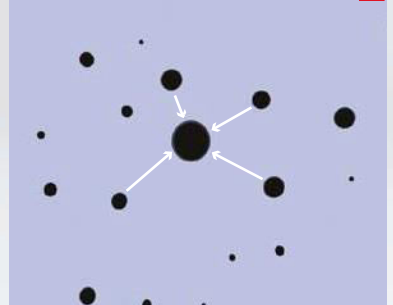
1 سیاه‌چاله‌های اولیه



تورم کیهانی - انبساط انفجاری جهان، بلافاصله پس از مهبانگ بوده که می‌تواند نوسانات کوچک کوانتومی را به سیاه‌چاله‌های اولیه متورم کرده باشد.

مدل تورم نویسنندگان (قرمز)، برخلاف مدل عادی و ساده تر تورم (بنفش) یک دامنه وسیع پراکنده از نوسانات کوچک و بزرگ چگالی را پیشنهاد می‌کند که به خوشه‌هایی از سیاه‌چاله‌های اولیه با جرمی بین یک‌صدم تا 10000 برابر جرم خورشید رشد کردند.

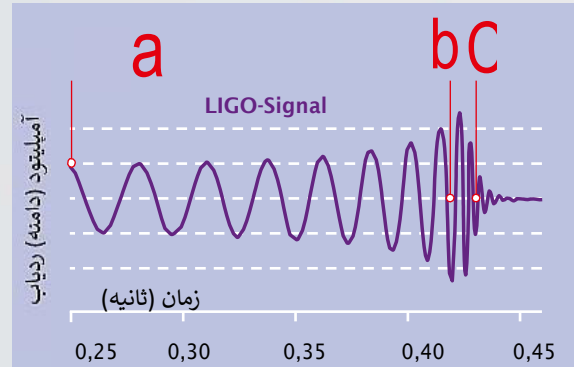
2 نطفه ساختارهای کیهانی



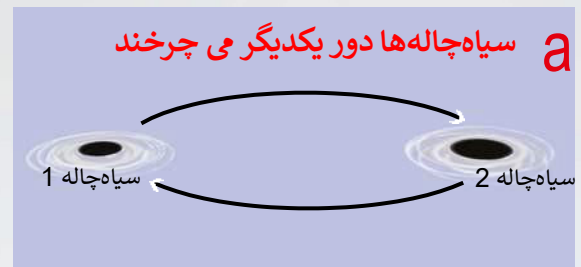
بزرگ‌ترین سیاه‌چاله‌های ابتدایی یک میلیارد سال بعد از مهبانگ نطفه و نقطه‌ی آغازین سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم و کهکشان‌ها را تشکیل دادند.

شواهد و گزینه‌های آینده توسط امواج گرانشی

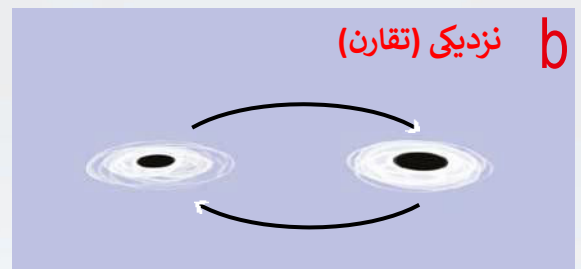
ردیاب‌هایی مانند Advanced LIGO در آمریکا و Advanced Virgo در ایتالیا احتمالان بزودی ادغام‌های دیگری از سیاه‌چاله‌ها را ردیابی خواهند کرد. تعداد به‌طور غیره منتظره بزرگی از این رویدادها می‌تواند اشاره‌ای به یک مبداء از زمان آغاز جهان باشد.



یک ردیاب امواج گرانشی، تغییرات کوچک در طول دو بازوی یک تداخل سنج (Interferometer) را که نسبت به یکدیگر به حالت عمودی واقع شده‌اند، اندازه می‌گیرد.



هنگامی که دو سیاه‌چاله به دور یکدیگر می‌چرخند، باعث می‌شوند که فضا-زمان بطور مداوم به ارتعاش درآید؛ امواج گرانشی تولید می‌شوند.



هنگامی که سیاه‌چاله‌ها تنگ‌تر و سریع‌تر دور هم دیگر می‌چرخند، فرکانس امواج گرانشی افزایش می‌یابد.



درست قبل از همجوشی، سیاه‌چاله‌ها قوی‌ترین امواج گرانشی را تولید می‌کنند. سپس علامت‌ها به سرعت فروکش می‌کند.

سیاه‌چاله‌های باقی‌مانده، امروزه به عنوان ماده‌ی تاریک نامرئی در کهکشان‌ها و یا به‌مثابه هاله‌های اطراف آن‌ها، در کمین هستند.

از سیاه‌چاله‌های مختلف با جرم‌هایی بین 1.100 تا 10000 برابر جرم خورشید در هم فرو می‌ریزند. در عرض نیم میلیون سال پس از مهبانگ، هر خوشه‌ی تکامل‌یافته به حجمی که فقط چند صد سال نوری امتداد می‌یابد، می‌تواند میلیون‌ها سیاه‌چاله‌ی اولیه را دربرگیرد.

در خوشه‌ها، سیاه‌چاله‌ها چنان تنگ هم قرار دارند، که ادغام کشف شده توسط LIGO دیگر استثناء نخواهد بود. هر از گاهی دو تا از آن‌ها به یکدیگر نزدیک شده و تحت فشار نیروی جاذبه‌شان در مداری هر چه تنگ‌تر شونده دور یک‌دیگر گشته و در این بین امواج گرانشی پخش می‌کنند. ما در ژانویه 2015 پیش بینی کردیم که LIGO امواج گرانشی چنین ادغام‌های کلان‌جرمی را کشف خواهد کرد. در پاییز همان سال پیش‌بینی ما به تحقق پیوست. اگر LIGO و دیگر تاسیسات در سال‌های آینده نتایج مشابه زیادی را ثبت کنند، **جرم و تکانه‌ی زاویه‌ای** سیاه‌چاله‌های شرکت‌کننده را می‌شود برآورد کرد و سپس یک تجزیه تحلیل آماری می‌تواند بررسی کند که آیا اشیاء احتمالاً مبداء اولیه دارند یا نه.

در مقایسه با فرضیه‌ی قدیمی MACHO، مزیت بزرگ این سناریو آن است که برای جرم‌های مربوطه، حد بالایی مقرر نشده است. MACHOها تا حدود 10 برابر جرم خورشید - با توجه به اثر **ریزه‌مگرایی گرانشی** (microlensing) (4) مشاهده شده - نمی‌توانند بخش عمده‌ای از ماده‌ی تاریک را تشکیل دهند. از سوی دیگر، سیاه‌چاله‌های اولیه می‌توانند دارای هر جرم احتمالی‌ای باشند، که قسمت بسیار کوچکی از آن‌ها از طریق **ریزه‌مگرایی گرانشی** توجه را به خود جلب می‌کنند، در حالی که بخش بزرگ‌تر آنها نامرئی می‌مانند. و اگر سیاه‌چاله‌های اولیه تشکیل خوشه هم می‌دهند، احتمال آن کمتر از یک در هزار است که به صورت تصادفی در خط دید ستاره‌های کهکشان همسایه که بر طبق **ریزه‌مگرایی گرانشی** نقشه برداری شده است، واقع باشند.

برای دریافت اطلاعات بیشتر، باید از طریق چنین پدیده‌هایی در محل دیگری، نور ستارگان را که بصورت موقت تقویت شده، جستجو کرد. مثلاً در کهکشان **آندرومدا** یا حتی در **اختروش‌های** بسیار دور دست. بدین طریق حجم بسیار بزرگ‌تری از هاله‌های کهکشانی براساس علائم **سیاه‌چاله‌های اولیه** الگو برداری شد. با توجه به مشاهدات جدید، اشیاء تاریک با جرمی از 1.10 تا چندین برابر جرم خورشید، قطعاً 20 درصد جرم یک هاله‌ی کهکشانی معمولی را تشکیل می‌دهند. بنابراین، دلایلی بیان‌گر آن‌اند که ماده‌ی تاریک از انواع سیاه‌چاله‌های اولیه تشکیل شده است. این سناریو، همزمان معماهای کیهانی دیگری در رابطه با ماده‌ی تاریک و پیدایش کهکشان‌ها را حل خواهد کرد.

خوشه‌های سیاه‌چاله‌های اولیه می‌توانند به‌ویژه مسئله به اصطلاح **فقدان همراه** را حل کنند. کمبود ظاهراً آشکار کهکشان‌های کوتوله، که در پیرامون کهکشان‌های کلان‌جرمی مانند کهکشان راه شیری باید ایجاد می‌شدند. در حال حاضر، مدل‌های شبیه‌سازی برای توزیع کیهانی ماده‌ی تاریک، ساختارهای بزرگ و پرحجم جهان را به طور صحیح نشان می‌دهند. هاله‌های ماده‌ی تاریک، خوشه‌های کهکشانی را به رشته کهکشان‌ها (Filament) و لایه‌های عظیمی دسته‌بندی می‌کنند، که بین‌شان فضاهای خالی با چگالی کمتر دهان گشوده‌اند. البته در مقیاسی کوچک‌تر، شبیه‌سازی‌ها تعداد زیادی از هاله‌های جانبی از ماده‌ی تاریک که در اطراف کهکشان‌های عظیم گردش می‌کنند را پیش‌بینی می‌کنند. بر این اساس هر هاله‌ی جانبی می‌بایست یک کهکشان کوتوله در خود جا داده و صدها عدد از آنها می‌بایست کهکشان راه شیری را احاطه کرده باشند. اما کیهان‌شناسان شمار بسیار کمتری از آنچه که انتظارش می‌رود، کهکشان‌های کوتوله پیدا کرده‌اند.

یک توضیح احتمالی برای **مسئله فقدان همراه** این است که شبیه‌سازی‌ها، تأثیر ماده‌ی عادی - اساسن هیدروژن و هلیوم موجود در ستارگان - را در شکل‌گیری و رفتار کهکشان‌های کوچک به‌درستی در نظر نمی‌گیرند. اما اگر طبق سناریوی ما، ماده‌ی تاریک به‌طور عمده از خوشه‌های سیاه‌چاله‌های اولیه تشکیل شده باشد، این سیاه‌چاله‌ها در هاله‌های جانبی احاطه‌کننده‌ی کهکشان راه شیری غالب بوده و در آنجا بخشی از ماده‌ی عادی را جذب کرده و از تشکیل ستارگان جدید جلوگیری می‌کنند. حتی اگر در هاله‌های جانبی، ستارگان بسیاری به وجود می‌آمدند، به‌خاطر برخورد با سیاه‌چاله‌های اولیه‌ی کلان‌جرم به بیرون پرتاب می‌شدند. هر دو اثر به‌طور قابل توجهی باعث کاهش روشنایی همراهان می‌شود. در هر حال حساس‌ترین دوربین‌ها، ده‌ها کهکشان کوتوله‌ی بسیار ضعیف در نزدیکی راه شیری کشف کرده‌اند. ظاهراً این اشیاء نسبت به ستارگان قابل رویت صد برابر بیشتر ماده‌ی تاریک دربرداشته و بر طبق مدل ما هزاران کهکشان کوتوله‌ی کشف نشده در اطراف کهکشان راه شیری در گردش‌اند.

نشانه‌های آتی برای وجود سیاه‌چاله‌های اولیه:

- 1- **کشف امواج گرانشی بیشتر.** ردیاب‌های Advanced LIGO در آمریکا و Advanced Virgo در ایتالیا، احتمالن ادغام‌های هر چه بیشتری را ردیابی خواهند کرد. تعداد به‌طور غیر منتظره زیادی از چنین حوادثی نشانه‌ای از منشاء اولیه‌ی آنهاست، اما هنوز اثباتی برای این نخواهد بود که ماده‌ی تاریک از سیاه‌چاله‌های اولیه تشکیل شده است. فقط کشف یک سیاه‌چاله با چرمی کمتر از «حد چاندراسخار» (5) یعنی 1.45 برابر چرم خورشید - ستاره‌های کوچک‌تر نمی‌توانند به یک سیاه‌چاله درهم‌فروریزند- می‌تواند اثبات کند که شیء، منشاء ستاره‌ای نداشته، بلکه باید اولیه باشد. LIGO ی به‌طور مداوم بهبود یافته به‌زودی قادر خواهد بود چنین سیاه‌چاله‌ای را - که اگر چرم شریک آن بیش از ده برابر چرم خورشید باشد- کشف کند. افزون بر آن، در مقیاس کیهانی می‌بایست تعداد بسیاری از جفت‌های سیاه‌چاله‌ها، یک پس‌زمینه‌ی مبهم و گنگ از امواج گرانشی ایجاد کنند، که **آنتن فضایی تداخل سنج (6) لیزری (LISA)** (Laser Interferometer Space Antenna) و دستگاه‌های **سنجش تب اختر (7) (Pulsarmessanlagen)** می‌توانند وجود آنها را ثابت کنند.
- 2- **کشف شمار بیشتری از کهکشان‌های کوتوله‌ی کم نور.** در سال 2015 میلادی، ستاره‌شناسان در داده‌های **بررسی انرژی تاریک (Dark Energy Survey)** ده‌ها کهکشان کم نور در هاله‌ی کهکشانی پیدا کردند. به این دلیل، باید صدها از چنین اشیایی که غنی از ماده‌ی تاریک هستند به‌دور کهکشان راه شیری در گردش باشند. اگر ماده‌ی تاریک از سیاه‌چاله‌های اولیه تشکیل شده باشد، بیشتر آنها باید در چنین کهکشان‌های کوتوله‌ای باشند. تجهیزات آینده‌ی فضایی مانند مأموریت اقلیدس از آژانس فضایی اروپا ESA و **تلسکوپ نظاره‌گر مادون قرمز با میدان وسیع (WFIRST)** (Wide-Field Infrared Survey Telescope) از ناسا، احتمالن به‌زودی کهکشان‌های کوتوله‌ی بسیاری را پیدا خواهند کرد.
- 3- **اندازه‌گیری دقیق مکان ستارگان.** مأموریت فعلی **گایا (Gaia)** از آژانس فضایی اروپا مکان و سرعت حدود یک میلیارد ستاره را با دقت بی‌سابقه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. انحرافات کوچک از حرکت ستاره‌های همسایه ممکن است که به وجود تعداد زیادی سیاه‌چاله‌ی کلان‌چرم دلالت کند.
- 4- **اندازه‌گیری هیدروژن خنثی کیهانی.** قبل و در هنگام تشکیل اولین ستارگان، جهان به‌طور عمده از **هیدروژن خنثی** - که تابش رادیویی خودویژه‌ای با طول موجی برابر با 21 سانتیمتر منتشر می‌کند- تشکیل شده بود. حدودن از سال 2020 Square Kilometre Array (SKA)، بزرگترین رادیوتلسکوپ که تا کنون برنامه‌ریزی شده، تمام آسمان را در جستجوی این علامت (سیگنال)ها الگوبرداری خواهد کرد. ماده‌ی در حال گردش به‌دور سیاه‌چاله‌های اولیه، پرتوهای شدید اشعه X ایجاد می‌کنند، که **هیدروژن خنثی** اطراف سیاه‌چاله را یونیزه کرده و در **نقشه آسمان تابش 21 سانتیمتری**، ردهای ویژه‌ای از خود به جا می‌گذارند. بنابراین اگر ماده‌ی تاریک واقعن از سیاه‌چاله‌های کلان‌چرم اولیه تشکیل شده باشد، SKA باید وجود این سیاه‌چاله‌ها را کشف کند.
- 5- **اختلال در شکل تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی.** اشعه‌ی ایکسی که سیاه‌چاله‌های اولیه در هنگام بلعیدن گاز و گرد و غبار تابش می‌کنند، باید همچنین باعث اختلال در شکل طیف تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی شود. اهمیت این اثر هنوز بحث برانگیز است، به‌ویژه در مدل‌هایی که سیاه‌چاله‌های اولیه، خوشه‌های مترکم را تشکیل می‌دهند. با این حال، یک مأموریت ناسا به نام **PIXIE (Primordial Inflation Explorer)** برای اندازه‌گیری دقیق چنین اختلالی پیشنهاد شده است. نتیجه آن می‌تواند مدل طراحان آن را بسیار محدود کند.

پاسخی به بسیاری از پرسش‌ها

شبیه‌سازی‌های کیهانی نه تنها کهکشان‌های کوتوله و کلان‌چرم، بلکه همچنین کهکشان‌هایی با بزرگی متوسط را نیز پیش‌بینی می‌کنند. چنین اشیایی طبق زبان زد "too big to fail" - هدف بزرگتر از آن است که تیر به خطا برود- به اندازه کافی بزرگ هستند تا به آسانی آمادگی تشکیل ستاره را داشته و به راحتی کشف شوند. با این وجود، ستاره‌شناسان بهبوده در اطراف و مجاورت کهکشان راه شیری در جستجوی آنها هستند. راه حل مشکل "too big to fail" همان راه حل معما **فقدان همراه** است: در مرکز کهکشان‌های

متوسط، سیاه‌چاله‌های اولیه کلان‌جرمی پنهان شده‌اند که ستارگان و گازهای تشکیل دهنده‌ی ستارگان را از این کهکشان‌ها به بیرون پرتاب کرده و بدین‌وسیله آنها را برای اغلب نقشه‌برداری‌ها، در عمل نامرئی می‌کنند.

سیاه‌چاله‌های اولیه می‌توانند حتی توضیحی برای چگونگی ایجاد برادران کلان‌جرم بزرگ‌شان باشند. این هیولاهای میلیونی‌ها تا میلیاردی برابر خورشید جرم دارند و احتمالاً در مرکز هر کهکشان بزرگ قرار دارند. سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم نمی‌توانند به‌سادگی از فروپاشی گرانشی اولین ستارگان جهان حاصل شده باشند، زیرا که آنها در طی زمان نسبتاً کوتاهی - کمتر از یک میلیارد سال پس از مهبانگ - نمی‌توانسته‌اند چنین جرم غول‌پیکری بیابند.

در سناریوی ما، اغلب سیاه‌چاله‌های اولیه تنها چند ده برابر جرم خورشید را دارا هستند، اما بعضی از آنها به مراتب سنگین‌ترند و جرم‌شان صدها تا ده‌ها هزار برابر خورشید است. این اجسام غول‌پیکر که کمتر از 1 ثانیه پس از مهبانگ پدید آمده‌اند، هسته و نطفه‌ای برای تشکیل اولین کهکشان‌ها و *اخترشوها* بوده‌اند که به نوبه‌ی خود در مرکز آنها، سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم سریع‌رشد یافتند. چنین نطفه‌هایی همچنین وجود سیاه‌چاله‌های متوسط را - با جرمی بین هزار تا یک میلیون برابر جرم خورشید که به‌دور سیاه‌چاله‌ی کلان‌جرم گردش می‌کنند و در مرکز توده‌ی عظیمی از ستارگان قرار دارند - توضیح می‌دهند.

در مجموع، سیاه‌چاله‌های اولیه احتمالاً یک حلقه‌ی بینابینی بین *سیاه‌چاله‌های عادی ستاره‌ای* و *سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم* هستند. بسیاری از مشاهدات اخیر این سناریو را تصدیق می‌کنند. کشف غیر منتظره‌ی منابع مکرر اشعه‌ی ایکس از جهان اولیه را می‌توان در آسان‌ترین شکل‌اش با کمیت زیاد سیاه‌چاله‌های اولیه توضیح داد، که حدود یک میلیارد سال پس از مهبانگ گاز بلعیده‌اند و همراه با آن اشعه‌ی ایکس منتشر کرده‌اند.

امواج گرانشی به عنوان پیام‌رسانی از ماده‌ی تاریک

سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم اولیه به یک‌باره، رمز و راز ماده‌ی تاریک و دیگر مشکلات کیهان را حل خواهند کرد، اما تنها آینده نشان خواهد داد که آیا آنها می‌توانند در مقابل سایر مدل‌ها و توضیحات، مورد قبول واقع شوند یا نه. در سال‌های آینده چند آزمایش ممکن، مفهوم سیاه‌چاله‌های اولیه را به آزمون خواهند گذاشت (نگاه کنید به «نشانه‌های آتی برای سیاه‌چاله‌های اولیه»). به‌ویژه که با LIGO پیشرفته و دیگر ردیاب‌های امواج گرانشی، ابزارهای کامل‌ن جدیدی برای کاوش جهان در اختیار داریم. اگر LIGO واقعاً ادغام‌هایی از یک توده‌ی سیاه‌چاله‌های اولیه‌ی کلان‌جرم کشف کرده باشد، می‌توانیم به‌زودی در انتظار تکرار هر چه بیشتر چنین رویدادهایی باشیم. در سال‌های 2016 و 2017 محققان LIGO کشف‌های جدیدی را گزارش دادند. مثلن امواج گرانشی به‌وجود آمده، نتیجه‌ی همجوشی دو سیاه‌چاله در یک مورد با جرم 8 و 14 برابر جرم خورشید و در مورد دیگر با جرم‌های 20 و 30 برابر جرم خورشید بوده‌اند. سایر نامزدها در حال حاضر تحت بررسی هستند.

بیش از آنچه که انتظار می‌رود، پس از این مشاهدات اولیه، جفت‌های سیاه‌چاله‌های دیگری بروز کرده که توزیع جرم‌شان بسیار متفاوت است. این امر تاییدی بر سناریوی ما است که ماده‌ی تاریک را از طریق سیاه‌چاله‌های کلان‌جرم اولیه توضیح می‌دهد. منتظر بمانیم زیرا که زمان‌های روشن‌گری قریب‌الوقوع‌اند.

منشور علم - شماره 10 سال 2017

QUELLEN

Bird, S. et al.: Did LIGO Detect Dark Matter?

In: Physical Review Letters 116, 201301, 2016

Clesse, S., García-Bellido, J.: Massive Primordial Black Holes from Hybrid Inflation as Dark Matter and the Seeds of Galaxies.

In: Physical Review D 92, 023542, 2015

Clesse, S., García-Bellido, J.: The Clustering of Massive Primordial

Black Holes and Dark Matter: Measuring their Mass Distribution with Advanced LIGO. In: Physics of the Dark Universe 15, S. 142–147, 2017

García-Bellido, J. et al: Density Perturbations and Black Hole Formation in Hybrid Inflation. In: Physical Review D 54, S. 6040–6058, 1996

Kashlinsky, A.: LIGO Gravitational Wave Detection, Primordial Black Holes, and the Near-IR Cosmic Infrared Background Anisotropies. In: Astrophysical Journal Letters 823, L25, 2016

LITERATURTIPP

Dobrescu, B. A., Lincoln, D.: Der verborgene Kosmos.

In: Spektrum der Wissenschaft 11/2015, S. 42–49

Beschreibt zahlreiche Hypothesen für Dunkle Materie jenseits der WIMPs

پی‌نوشت‌ها از ویکی‌پدیا:

1- رصدخانه موج گرانشی تداخل لیزری LIGO

رصدخانه موج گرانشی تداخل لیزری (به انگلیسی: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) که به اختصار لایگو (به انگلیسی: LIGO) نیز نامیده می‌شود، یک آزمایش بزرگ فیزیکی با هدف آشکارسازی مستقیم امواج گرانشی است. در سال ۱۹۹۲ مشترکاً توسط کیپ تورن و رونالد درور از مؤسسه فناوری کالیفرنیا (گل‌تیک) و ریچر وایس از مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT) بنا شد. لایگو پروژه مشترکی بین دانشمندان MIT، گل‌تیک و بسیاری دانشگاه‌ها و دانشکده‌های دیگر است. پشتیبان مالی آن بنیاد ملی علوم است که با هزینه ۳۶۵ میلیون دلار (سال ۲۰۰۲)، بزرگترین پروژه این سازمان است.

2- کوتوله قهوه‌ای

کوتوله‌های قهوه‌ای ستارگان کوچکی هستند که هنگام تشکیل شدن مرکزشان، به اندازه کافی داغ نمی‌شوند تا فرایند ذوب یا همجوشی هسته‌ای در آنها به وجود آید. به عبارت دیگر آنها به خورشیدهای نورانی و گرم تبدیل نمی‌شوند بلکه بلافاصله پس از تشکیل سرد می‌شوند و نوری از خود نمی‌تابانند بگونه‌ای که به سختی دیده می‌شوند.



تصویر مفهومی یک هنرمند از یک کوتوله قهوه‌ای

جرم‌هایی هستند کوچکتر از ستارگان و بزرگتر از سیاره‌ها که به علت کم بودن جرمشان واکنش‌های هسته‌ای در آنها انجام نشده و در نتیجه از خود نور ندارند و چون بسیار دورند دیده نمی‌شوند. کوتوله‌های قهوه‌ای به سبب نیروی جاذبه افزایش یابنده‌شان

که در پی متراکم شدن دایمی آنها پدید می‌آید و منتشرکننده نیرومند پرتو فروسرخ هستند که با ابزارهای جدید اندازه‌گیری می‌شود. برخی از دانشمندان و ستاره‌شناسان اینها را همان جرم گمشده می‌دانند. دسته‌ای از ستارگان غیر هسته‌ای وجود دارند که باید بین آنها، کوتوله‌های سفید، سیاه و قرمز تفاوت قائل شویم. این ستارگان کوتوله‌های قهوه‌ای هستند.

3- MACHO

اختصاصی برای «اشیاء هاله‌ای مترکم عظیم» بوده، که اجرام آسمانی فشرده (توپر) ای از ماده باریونی عادی در هاله یک کهکشان شامل می‌شوند. آنها یک آزمون تفسیر برای ماده تاریک هستند، زیرا جرم آنها می‌تواند به تشریح توزیع سرعت ستاره‌ها در کهکشان‌ها که به تنهایی از جرم ستارگان نمی‌تواند مشتق شود، کمک کند.

4- ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف (WIMPs) (weakly interacting massive particles)

در اخترفیزیک، ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف) به انگلیسی (WIMPs): ذراتی فرضی هستند که ممکن است پاسخی برای مسئله ماده تاریک باشند. این ذرات با نیروی ضعیف و گرانش برهم‌کنش دارند. چون با الکترومغناطیس برهم‌کنش ندارند، نمی‌توان آنها را مستقیماً دید؛ و چون با نیروی هسته‌ای قوی برهم‌کنش ندارند، در مقابل هسته اتم عکس‌العمل چشمگیری از خود نشان نمی‌دهند.

یکی از ملحقیات نظریه استاندارد فیزیک ذرات به نام ابرتقارن (Super Symmetry)، پیشنهاد می‌کند که «ذرات سنگین با برهم‌کنش ضعیف» (WIMP) ممکن است جزء اصلی در ماده تاریک سرد باشد. یکی از نامزدهای اصلی نوترالینو (Neutralino) است - سبک‌ترین ذره ابرتقارن خنثی. در هر ثانیه میلیاردها WIMP می‌تواند از ما عبور کند! گاهی ممکن است که با هسته یک اتم برهم‌کنش داشته، آن را به عقب براند - چیزی شبیه به برخورد یک توپ درحال حرکت بلیارد و یک توپ ساکن. براساس اصول، اما با زحمت بسیار زیاد، این برهم‌کنش‌ها قابل آشکارسازی است. برخی راه‌های ممکن در تشخیص عقب‌نشینی هسته‌ای، ناشی از برهم‌کنش WIMP، عبارت است از: (۱) در نیمه‌هادی‌هایی چون سیلیسیوم و ژرمانیوم، با عقب‌نشینی اتم، بار الکتریکی آزاد می‌شود. این یونیزاسیون قابل تشخیص و اندازه‌گیری است. (۲) در انواع مشخصی از کریستال‌ها و مایعات، موسوم به سینتیلاتور، با کم شدن سرعت اتم، برق‌هایی از نور تابش می‌شود. این نور، که مقدار آن به انرژی عقب‌نشینی بستگی دارد، به وسیله لامپ فتومالتی‌پلایر (PMT) قابل تشخیص است. (۳) در کریستال، انرژی عقب‌نشینی به ارتعاشاتی موسوم به فونون (Phonon) منتقل می‌گردد.

5- ریزهمگرایی گرانشی-Gravitational microlensing

ریزهمگرایی گرانشی) به انگلیسی (Gravitational microlensing): پدیده‌ای نجومی بر اساس همگرایی گرانشی است که با آن می‌توان اجرام نجومی را، مستقل از نوری که از آن‌ها تابیده می‌شود، شناسایی کرد. با روش‌های رصدی عادی تنها می‌توان اجرام بسیار پرنور مانند ستاره‌ها را آشکار کرد، ولی با ریزهمگرایی گرانشی می‌توان اجرام کم‌نور یا حتی تاریک را هم رصد کرد. ریزهمگرایی گرانشی یکی از پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت عام است.

این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که نور یک جسم درخشان دور دست، در مسیرش تا رصدگر، از نزدیکی جسم پرجرم دیگری بگذرد و به خاطر اثر گرانشی آن جرم خمیده شود. بر اثر این پدیده، دو یا چند تصویر از جسم دور دست ساخته شده و در نتیجه درخشندگی ظاهری آن بیشتر می‌شود. با سنجش افزایش درخشندگی در طول زمان می‌توان درباره جسم پرجرم میانی (عدسی گرانشی) اطلاعاتی به دست آورد.

ریزهمگرایی گرانشی توسط یک جسم تنها، نخستین بار در سال ۱۹۹۳ دیده شد. از آن زمان این پدیده به ابزار سودمندی در مطالعه ماده تاریک و سیاره‌های فراخورشیدی تبدیل شده است.

6- حد چاندراسخار

حد چاندراسخار (به انگلیسی: Chandrasekhar limit) نام حدی در نجوم است که وضعیت ستاره بعد از انفجار را مشخص می‌کند به طوری که اگر جرم هسته ستاره بعد از انفجار از حد چاندراسخار کمتر بود هسته ستاره به کوتوله سفید تغییر می‌کند (خورشید در این دسته جای می‌گیرد) و اگر بیشتر بود هسته ستاره ستاره نوترونی یا سیاه‌چاله می‌گردد. این مقدار را فیزیکدان هندی سوبرامانیان چاندراسخار به دست آورد. مقدار این حد تقریباً برابر ۱/۴ جرم خورشید است.

7- تداخل‌سنجی-Interferometer

تداخل‌سنجی (interferometry) دانش ترکیب دو یا چند موج است به نحوی که با بررسی موج حاصل از این ترکیب بتوان اطلاعاتی در مورد موج‌های ورودی بدست آورد. ابزاری که برای تداخل امواج بکار می‌رود تداخل‌سنج نامیده می‌شود. تداخل‌سنجی روشی مهم برای تحقیق در زمینه‌های اخترشناسی، اندازه‌گیری، فیزیک نور، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات، فیزیک پلاسما، فیبر نوری، زمین‌شناسی، زلزله‌شناسی، اقیانوس‌سنجی، مکانیک کوانتومی و سنجش از راه دور است.

8- تپ‌اختر-Pulsar

تپ‌اخترها (به انگلیسی: Pulsar) ستاره‌های نوترونی چرخانی هستند که با سرعت بسیار زیادی دوران می‌کنند و پالس‌های مداومی از انرژی تابشی به همراه خطوط میدان مغناطیسی قوی را از خود منتشر می‌کنند. برخی از تپ‌اخترها نیز پرتوهای ایکس تابش می‌کنند. ستاره‌های نوترونی در حقیقت بقایای هسته ستاره منفجر شده‌ای هستند که حجم کوچک و چگالی بسیار بالایی دارند. برای نمونه تپ‌اختری به قطر ۲۰ کیلومتر ۱٫۵ برابر جرم خورشید را در خود جای داده‌است. تپ‌اخترها هنگام تولد دمایی در حدود چند میلیون درجه سلسیوس دارند و بلافاصله شروع به سرد شدن می‌کنند. نحوه و سرعت سرد شدن نیز به مواد تشکیل دهنده و چگالی آن‌ها بستگی دارد.

9- رمبش گرانشی-Gravitationskollaps

به فروریختن یک جسم به درون بر اثر گرانش خودش گفته می‌شود. در هر جسم پایداری این نیروی گرانش با فشار داخلی جسم در تعادل است. اگر نیروی گرانش به سمت داخل از برآیند تمام نیروهای به سمت خارج بیشتر شود، این تعادل از بین می‌رود و رمبشی اتفاق می‌افتد تا زمانی که فشار داخلی بیشتر از نیروی گرانشی شود و تعادل دوباره برقرار شود.

از آنجاییکه معمولاً گرانش نسبت به نیروهای دیگر ضعیف شمرده می‌شود، رمبش گرانشی تنها برای اجسام بسیار پرجرم یا مجموعه‌های پرجرم از اجسام رخ می‌دهد. برای نمونه می‌توان به ستاره‌ها (شامل ستارگان رمبش کرده مانند ابرنواختر، ستاره‌های نوترونی و سیاهچاله‌ها) یا مجموعه‌های بزرگ ستاره‌ها مانند خوشه‌های ستاره‌ای کروی و کهکشان‌ها اشاره نمود.