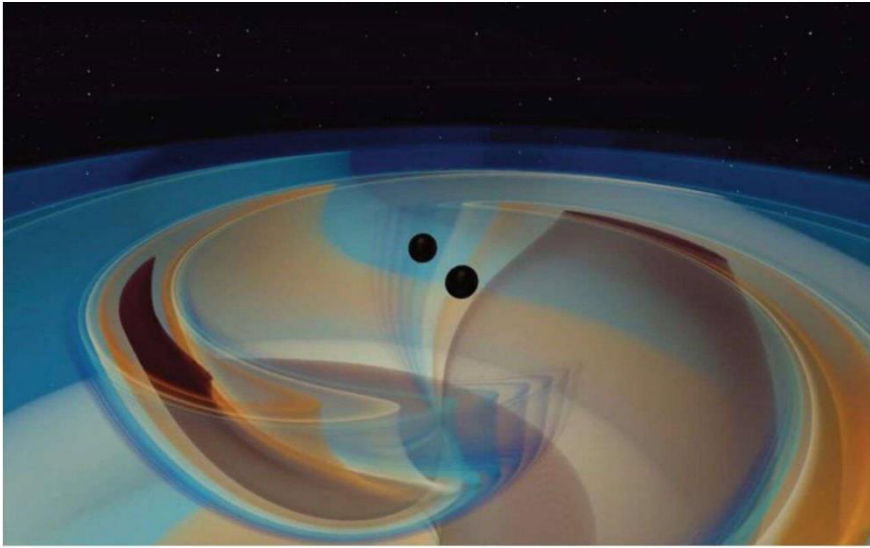


## اولین نشانه‌ها از ستاره‌های بوزونیک؟

یان حَتّین باخ  
برگردان: امید برومند



آیا این رویداد، ادغام سیاه‌چاله‌ها نبود؟ در برخورد دو جسم پرجرم موج‌های گرانشی آزاد شدند و در 21 ماه مه 2019 به زمین رسیده و به عنوان رویداد GW 190521 ثبت گردیدند. نشانه‌هایی در دست هستند که در این رویداد دو ستاره بوزونیک در یک‌دیگر ادغام شدند. در پایان این فرایند یک سیاه‌چاله نیمه‌سنگین به‌وجود آمد.

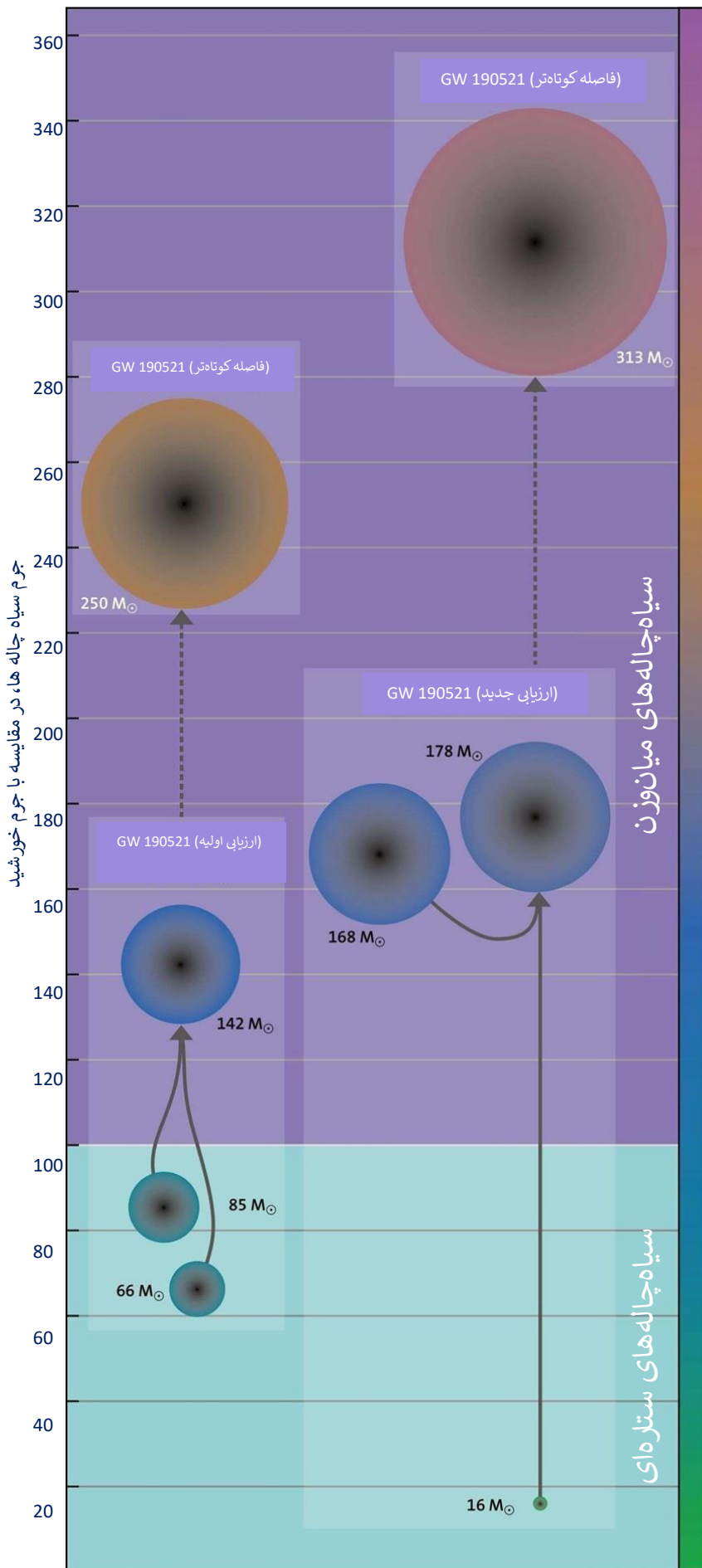
وجود سیاه‌چاله‌ها اثبات شده است. آیا ممکن است که حداقل بعضی از این هیولاهای گرانشی در واقعیت، ساختارهای عجیب و غریبی نیز باشند؟ در این راستا، اختر فیزیک‌دانان برای رویداد موج گرانشی GW 190521 سر نخ‌هایی پیدا کرده‌اند.

رویداد موج گرانشی GW 190521 که در 21 ماه مه 2019 با سرعت نور به زمین رسید و در آشکارسازهای LIGO در ایالات متحد آمریکا و Virgo در ایتالیا کشف شد، از چند جهت غیر عادی بود. از یک سو این موج گرانشی با مدت 0.1 ثانیه، کم دوام‌تر، و با 60 هرتز فرکانسی پایین‌تر از همه پالس‌های موج‌های گرانشی دریافت شده تا آن زمان را داشت. از سوی دیگر "سیگنال قبل از ادغام" (Pre-Merger-Signal) وجود نداشت، که معمولن پیشاپیش سیگنال اصلی حرکت کرده و از برخوردی که به زودی اتفاق خواهد افتاد خبر می‌دهد. فیزیک‌دانان Merger را به عنوان یک رویداد یکی شدن درک می‌کنند و تاکنون نیز به تمام سیگنال‌های امواج گرانشی ثبت شده به مثابه برخورد دو سیاه‌چاله و یا دو ستاره نوترونی و تشکیل جسم بزرگ‌تر، برخورد شده است. سیگنال قبل از ادغام در آخرین دوره‌های تنگتنگ سیستم‌های دوتایی قبل از برخورد با یکدیگر ایجاد می‌گردد. بر اساس آموزه رایج، محصول نهایی در هر حال یک سیاه‌چاله کلان‌جرم‌تر خواهد بود.

رویداد GW 190521 نیز به عنوان نتیجه ادغام دو سیاه‌چاله شناخته شد. اما آیا واقعا چنین بود و یا این که توضیح دیگری برای آن وجود دارد؟ این سوال تنها به دلیل شکل غیر عادی سیگنال مطرح نیست. در تحلیل اولیه، جرم‌های محاسبه‌شده سیاه‌چاله‌های ظاهرا ادغام شده در یک‌دیگر نیز بسیار زیاد بودند. جرم‌های آنها 85 و 66 برابر جرم خورشید محاسبه شدند. جسم بسیار بزرگ نتیجه شده ظاهرا جرمی به اندازه 142 برابر جرم خورشید داشته و باید اولین سیاه‌چاله‌ی میان وزن تا کنون مشاهده شده باشد؛ یعنی نمونه‌ای از سیاه‌چاله‌های رده میان‌وزن که مدت زمانی درازی تنها احتمال وجود آنها داده می‌شد. بررسی جدیدتر الکساندر اچ. نیتز و کولین دی کاپانو از موسسه‌ی ماکس پلانک برای فیزیک گرانشی در شهر هانوفر آلمان، حتی جرم‌هایی به اندازه 168 و 16 برابر جرم خورشید برای دو سیاه‌چاله و جرمی برابر با 178 برابر جرم خورشید برای سیاه‌چاله‌ی نتیجه شده از ادغام را نشان می‌دهد.

### مشکل جرم

سیاه‌چاله‌ی سنگین‌تر در بین دو سیاه‌چاله‌ی اولیه ادغام شده، هرگز نباید وجود می‌داشت. این سیاه‌چاله با داشتن جرمی به اندازه 85 برابر جرم خورشید، در شکاف جرمی بین 65 تا 120 برابر جرم خورشید قرار دارد. حداقل به لحاظ نظری در این محدوده جرمی، هیچ سیاه‌چاله ستاره‌ای نباید وجود داشته باشد، زیرا بقایای به اندازه کافی سنگین ستارگان، در انفجار ابر نو اختر پایانی خود نباید سیاه‌چاله‌ای از خود بجا بگذارند. دمای داخلی آنها تا اندازه‌ای زیاد می‌شود که می‌تواند اثری به نام بی‌ثباتی جفت (Pair instability) رخ دهد، یعنی فوتون‌های گاما، خودانگیز به جفت‌هایی از الکترون‌ها و آنتی‌الکترون‌ها (پوزیترون‌ها) فرومی‌پاشند و آنقدر از ستاره انرژی جذب می‌کنند که سرانجام انفجار ابر نو اختر، ستاره را کاملن تکه پاره می‌کند. تنها در صورتی که جرم باقیمانده از یک ستاره بسیار بزرگ‌تر باشد، ستارگان بدون انفجار ابر نو اختر مستقیما به سیاه‌چاله‌هایی با حداقل 120 برابر جرم خورشید درهم فروخواهند ریخت.



رویداد GW 190521 به راحتی در چارچوب استاندارد ادغام سیاه‌چاله‌ها نمی‌گنجد. در این راستا توضیح‌های کامل‌کننده‌ی بیشتری لازم‌اند. برای نمونه، سیاه‌چاله‌ای که 85 برابر خورشید جرم دارد، می‌تواند در این شکاف جرمی، با ادغام پی‌پی سیاه‌چاله‌های دیگر و با بلعیدن ابرهایی از گاز و یا کل یک ستاره، بزرگ‌تر شده باشد. در هر حال این توضیح اکنون بیشتر قابل قبول است.

اما مدل‌های عجیب و غریبی را نیز می‌توان تصور کرد، مانند مدلی که در فوریه 2021 بوسیله **خوان کالدرو باستیل یو** از دانشگاه **سانتیاگو دِ گمپاستیل** در اسپانیا و یک تیم بین‌المللی از مجله‌ی حرفه‌ای "Physical Review Letters" ارائه شد که بر اساس آن در رویداد GW 190521 دو ستاره به اصطلاح بوزونیک با یکدیگر ادغام شدند، که کاملن تازگی دارد. شاید این دیدگاه غیر واقع‌بینانه به نظر برسد، اما اگر درست باشد، پیامدهایی فراتر از این رویداد موج گرانشی، مثلاً برای جستجوی ماده‌ی تاریک خواهد داشت. پژوهش‌گران در مقاله‌ی خود نوشتند که هر چه باشد این دیدگاه، داده‌های مشاهده‌ی LIGO-Virgo را تا اندازه‌ای بهتر از فرضیه‌ی کلاسیک ادغام دو سیاه‌چاله توضیح می‌دهد.

### ستاره بوزونیک چیست؟

ستاره‌های بوزونیک نیز مانند سیاه‌چاله‌ها در نظریه نسبیت عام پیش‌بینی شده‌اند. این ستاره‌ها می‌توانند مانند سیاه‌چاله‌ها جرمی به اندازه‌ی میلیون‌ها برابر جرم خورشید داشته و در عین حال بسیار فشرده و جمع‌وجور باشند. آنها مانند سیاه‌چاله‌ها تابش انرژی بسیار کمی دارند، زیرا درون‌شان همجوشی هسته‌ای رخ نمی‌دهد. بنابراین آنها را نیز در عمل نمی‌توان دید. در حقیقت در مورد هابی، تصمیم‌گیری درباره این که آیا جسم فشرده‌ی مشاهده شده یک سیاه‌چاله است و یا یک ستاره بوزونیک به این آسانی نخواهد بود. شکلی که از جسم فشرده در مرکز کهکشان Messier 87 در سال 2019 بوسیله گروه تحقیقاتی بین‌المللی تلسکوپ افق رویداد منتشر شد را می‌توان به عنوان یک ستاره‌ی بوزونیک نیز برداشت کرد.

بررسی مجدد یک برخورد: موج گرانشی GW 190521 مشاهده شده با تداخل سنج‌های لیزری LIGO و Virgo می‌تواند ناشی از ادغام دو ستاره‌ی بوزونی باشد. در این حالت فاصله کم‌تر، و جرم سیاه‌چاله‌ی حاصل از ادغام بالغ بر 250 برابر جرم خورشید، آشکارا بزرگ‌تر خواهد بود (شکل بالا سمت چپ). در ارزیابی جدید، جرمی تا 300 برابر جرم خورشید نتیجه خواهد شد (شکل بالا سمت راست).

اما در این حالت باید سایه‌ای که دیده می‌شود بسیار کوچک‌تر از سایه‌ای باشد که در شکل تلسکوپ افق رویداد دیده می‌شود. این نتیجه‌گیری **هکتور اولیواریس** و هم‌کاران او از دانشگاه **ردباوود** در نیم **وِگن** هلند از یک محاسبه‌ی شبیه‌سازی شده است که در سال 2020 منتشر شد. یک ستاره‌ی بوزونیک حداقل در مورد Messier 87 در عمل امکان‌پذیر نیست.

اما حتمن نباید چنین باشد. پس تفاوت‌ها در چیستند؟ برخلاف سیاه‌چاله‌ها، ستاره‌های بوزونیک افق رویداد ندارند. از این‌رو، فوتون‌ها در اساس می‌توانند این ستاره‌ها را ترک کنند که در جریان آن، مسیر حرکت آنها حداکثر بوسیله گرانش قوی کمی خم می‌شود. به دلیل فشرده‌گی این ستاره‌ها، پرتوهای انتشار یافته در نزدیکی آنها، انتقال به سرخ گرانشی شدیدی را نشان می‌دهند، یعنی طول موج آنها درازتر شده و شدت‌شان ضعیف می‌شود.

وجه اشتراک آنها با ستاره‌های عادی در انباشتگی ماده است، اما این ماده «طعم»های کاملن متفاوتی دارد. گرچه ستاره‌ها از ذره‌های بنیادی به نام **فرمیون** تشکیل شده‌اند که همه‌ی ذرات تشکیل دهنده‌ی ماده‌ی عادی یعنی پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها جزو آنها هستند، ستاره‌های بوزونی از بوزون تشکیل یافته‌اند. بوزون‌ها نیز در طبیعت یافت می‌شوند. در مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادی، بوزون‌ها مسئول تبادل چهار نیروی بنیادی هستند. فوتون‌ها (ذره‌های حمل‌کننده‌ی نیروی الکترومغناطیس)، گلوئون‌ها (حمل‌کنندگان نیروی هسته‌ای قوی که موجب در پیوند ماندن هسته‌ی اتم‌ها می‌شوند) و بوزون‌های  $Z$  و  $W$ ، ذره‌های حمل‌کننده‌ی نیروی هسته‌ای ضعیف که از جمله مسئول واپاشی رادیواکتیوی هستند، جزو بوزون‌ها به حساب می‌آیند. ذره هیگز که به ذره‌های دیگر جرم می‌بخشد نیز یک بوزون است.

### منع پائولی یا نه

فیزیک‌دان اتریشی ولفگنگ پائولی در سال 1925 با تدوین اصل طرد، که منع پاولی و نیز اصل پائولی نامیده می‌شود، تفاوت پایه‌ای بین فرمیون‌ها و بوزون‌ها را مشخص کرد، که بر اساس آن و به بیان ساده، دو یا چند ذره هرگز نمی‌توانند دقیقاً وضعیت یکسانی داشته باشند و یا همه عددهای کوانتومی آنها نمی‌توانند یکسان باشند. فرمیون‌ها ذره‌هایی با اسپین کوانتومی  $1/2$ ،  $3/2$  و غیره هستند که جزو عددهای گویا به حساب می‌آیند، اما بوزون‌ها ذره‌هایی هستند که اسپین کوانتومی  $0$ ،  $1$ ،  $2$  و غیره دارند که جزو عددهای صحیح به حساب می‌آیند.

در نتیجه، کل ساختار اتم‌ها و ماده بر مبنای اصل پائولی است که برای نمونه توضیح می‌دهد چرا کوتوله‌های سفید و ستاره‌های نوترونی استوار و پایدار می‌مانند، یعنی الکترون‌ها و یا نوترون‌ها ی فرمیونی که حالت‌های کوانتومی گوناگونی دارند، یک فشار کوانتومی که **فشار تبهگنی (1)** نامیده می‌شود را ایجاد می‌کنند. این فشار در ستاره‌های بوزونیک وجود ندارد. از آنجا که بوزون‌ها از اصل پائولی پیروی نمی‌کنند، می‌توانند در محدوده‌ی پارامترها در حالت برهم نهی باشند و سپس مانند یک ذره تک رفتار کنند. نتیجه، سیستمی از ذره‌های غیرقابل تشخیص در کمترین حالت انرژی، یعنی **چگالش بوز-اینشتین (2)** است. ستاره‌های بوزونیک در نهایت از ماده‌ی چگال شده‌ی بوز-اینشتین تشکیل یافته‌اند. یک اصل بنیادی دیگر در فیزیک کوانتوم، یعنی **اصل عدم قطعیت هایزنبرگ**، موجب می‌شود که چنین ساختاری در نهایت فروپاشد. این اصل از جمله بیان می‌کند که بوزون‌ها نیز نمی‌توانند بی‌نهایت دقیق مکان‌یابی شوند، این منجر به یک فشار مکانیکی کوانتومی می‌شود که ستاره‌های بوزونیک را استوار و پایدار نگه می‌دارد.

این شرحی از خود نظریه بود. تا کنون هیچ ستاره بوزونیک مشاهده نشده است. در حالت درست بودن فرضیه‌ی **کالدرون باستیل یو** و تیم او، رویداد GW 190521 اولین نشانه‌ی غیرمستقیم برای موجودیت آنها خواهد بود. در این ارتباط، پژوهش‌گران، سیگنال موج گرانشی رویداد را با قبول این که ادغام دو ستاره‌ی بوزونیک است، تجزیه و تحلیل کردند. پژوهش‌گران برای توضیح نبود سیگنال قبل از ادغام، فرض را بر برخورد مستقیم و از جلو برای دو جسم اولیه گذاشتند. این محاسبه را نیز می‌توان برای دو سیاه‌چاله‌ی ادغام شونده انجام داد. اما آن‌گونه که در تجزیه و تحلیل مشخص شد، همخوانی با داده‌های اندازه‌گیری شده ندارد. اما برخورد دو ستاره‌ی بوزونیک این همخوانی را داشته و موجب می‌شود که فرضیه‌ی ستاره بوزونیک حداقل به شکل صوری احتمال بیشتری داشته باشد. این اما برای اثبات قطعی کافی نیست.

در هر حال فرضیه ستاره‌های بوزونیک مشکل شکاف جرمی پیش‌گفته را دور می‌زند. در واقع ستاره‌های بوزونیک می‌توانند جرمی بیش از 65 برابر جرم خورشید داشته باشند. چگونگی ایجاد شدن این جسم‌ها دقیقاً مشخص نیست و در مورد شکاف جرمی نامجاز سیاه‌چاله‌های ستاره‌ای نیز تا کنون اطلاعات کمی در دست است. در ادغام دو ستاره‌ی بوزونیک، انرژی کمتری نسبت به ادغام سیاه‌چاله‌ها آزاد می‌شود. حدود 7 درصد از جرم سیاه‌چاله‌ها به هنگام ادغام آنها در امواج گرانشی از دست می‌رود، این در حالی است که ستاره‌های بوزونیک

به هنگام ادغام، حدود 0.1 درصد از جرم خود را از دست می‌دهند. بنابراین در این سناریوی جایگزین، رویداد GW 190521 بسیار نزدیک‌تر به ما اتفاق می‌افتاد و به نوبه خود منجر به جرم محاسبه شده‌ی بیشتری برای سیاه‌چاله‌ی پدید آمده می‌شود، که با داشتن جرمی برابر با 250 برابر جرم خورشید به شکل واضح‌تری در رده‌ی وزنی سیاه‌چاله‌های میان‌وزن قرار می‌گیرد.

دو ستاره‌ی بوزونیک با ادغام خود، ستاره‌ی بوزونیک بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. در این جا دو سناریوی ممکن وجود دارند. در سناریوی اول ستاره‌ی بوزونیک نتیجه شده، می‌تواند نابود نشود. در سناریوی دوم این ستاره ناپایدار شده و در صورت بزرگ بودن جرم‌اش، در نهایت به یک سیاه‌چاله فرومی‌ریزد. باستیل یو و تیم او نتیجه می‌گیرند که برای رویداد GW 190521 سناریوی دوم رخ داده است.

فرضیه‌ی ستاره‌ی بوزونیک به دلیل دیگری نیز گیرا است، زیرا بوزون‌های این ستاره‌ها به نوع بوزون‌های تاکنون شناخته شده در مدل استاندارد فیزیک ذره‌ها (یعنی فوتون‌ها، گلوئون‌ها، بوزون‌های W و Z و ذرات هیگز) تعلق ندارند. جرم بوزون ناشناخته مانند جرم ستاره‌ی بوزونیک، یکی از پارامترهای مدل شبه‌سازی است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که جرم این بوزون حدود 0.9 پیکوالکترون ولت ( $9 \times 10^{-13} \text{ eV}$ ) بوده و از این رو خارج از محدوده‌ی جرمی معین شده در مدل استاندارد است. بنابراین باید ذره‌ی جدیدی باشد که به اندازه‌ی چندین مرتبه بزرگی، سبک‌تر از سبک‌ترین ذره‌ی بنیادی مدل استاندارد است. این ذره‌ها با وجود چنین جرم کمی، اگر به تعداد کافی موجود باشند، کاندیدایی برای ماده‌ی تاریک خواهند بود. تنها چیزی که تاکنون از ماده‌ی تاریک می‌دانیم، این است که وجود دارد، زیرا کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی تاثیر گرانشی آن را احساس می‌کنند و جهان ما نمی‌توانست بدون آن به این سرعت تکامل یابد. در این رابطه ذره‌های جدیدی باید مسئول باشند که تاکنون کشف نشده‌اند. در صورتی که این ذره‌ها بوزون باشند، به لحاظ نظری می‌توانند ستاره‌های بوزونیک نیز تشکیل دهند.

مدل‌های ستاره‌های بوزونیک چیز جدیدی نیستند و دهه‌ها است که در فیزیک ستاره‌ای مطرح‌اند. پیامدهای جدید ستاره‌شناسی موج‌های گرانشی برای این مدل‌ها، موجب تقویت فرضیه‌های قدیمی شده و الهام‌بخش علم برای رویکردهای جدید است.

مجله ستارگان و کیهان، چاپ آلمان، شماره 8، آگوست 2021

پی‌نوشت‌ها:

### 1- فشار تبهگنی الکترون (Electron Degeneracy Pressure) (وب‌پدیا فارسی)

فشار در یک ستاره کوتوله سفید به دلیل ترکیب ویژگی‌های ذره و موج مانند الکترون بالا می‌رود. طبق مکانیک کوانتومی، فقط امکان دارد تعداد معینی از الکترون‌ها در یک فضای ثابت به زور جا داده شوند، در هسته‌ی خورشید در این لحظه فضای زیادی وجود دارد، ولی هنگامی که هسته به یک ستاره‌ی کوتوله‌ی سفید تبدیل شود، خیلی خیلی کوچک‌تر شده و اندازه‌ای چگال خواهد شد که یک قاشق چایخوری از مواد جمع شده از ستاره جرمی به بزرگی یک کامیون مواد را شامل می‌شود. الکترون‌ها در فضای کوچک‌تری چپانده می‌شوند و مقاومت آن‌ها به دلیل به زور جای گرفتن باعث به وجود آمدن فشار وحشتناکی می‌شود (اصطلاح تکنیکی آن فشار تبهگنی الکترون است) که رمبش ستاره را درون خود متوقف می‌کند. فشار تبهگنی الکترون فقط می‌تواند ستاره‌ها را در یک جرم بحرانی معین پشتیبانی کند. این جرم بحرانی، حد چاندراسهکار (Chandrasekhar Limit) گفته می‌شود، که تقریباً یک چهارم مرتبه از جرم خورشید پرچرم‌تر است.

فشار تبهگنی - شرح دوم - برگردان از سایت

<https://www.einstein-online.info/explandict/entartungsdruck>

برای گازی که از الکترون‌ها تشکیل شده، اثرهای نظریه کوانتومی عمل می‌کنند. به زبان ساده، قرار گرفتن دو الکترون در یک مدار ممنوع است (اصل پائولی)، و هرگونه تلاش برای فشردن الکترون‌ها در حجم کوچکی موجب می‌شود که به سمت‌های مختلف پراکنده شوند (اصل عدم قطعیت هایزنبرگ). آشفستگی و پراکندگی، دقیقین مانند گازهای معمولی، موجب فشار تبهگنی می‌شود. برای مثال این فشار تبهگنی گاز الکترونی است که کوتوله‌های سفید را از فروپشی‌های بعدی محافظت می‌کند. فشار تبهگنی نه تنها در الکترون‌ها بلکه در رده کاملی از ذرات کوانتومی که اصطلاحن فرمیون نامیده می‌شوند، مانند نوترون‌ها و پروتون‌ها نیز رخ می‌دهد.

**2- چگالش بوز-اینشتین**

چگالش بوز-اینشتین (به انگلیسی: Bose-Einstein condensate) پنجمین و جدیدترین حالت ماده است. این حالت، حالتی از ماده است که در آن، یک گاز رقیق بوزون (به انگلیسی: Boson) را تا دمای بسیار پایین و در  $273/14$  - درجه سانتی‌گراد (بسیار نزدیک به صفر مطلق)، سرد می‌کنند. در اثر دمای بسیار پایین در این گذار فاز (به انگلیسی: Phase transition)، بخش بسیار بزرگی از بوزون‌ها، کمترین حالت کوانتومی را اشغال می‌کنند و در آن نقطه پدیده کوانتومی ماکروسکوپی آشکار می‌شود. بوزون‌های سرد در هم فرو می‌روند و ابر ذره‌هایی که رفتاری بیشتر شبیه یک ریزموج (به انگلیسی: Microwave) دارد تا ذره‌های معمولی شکل می‌گیرد. ماده چگال شده بوز-اینشتین شکننده و سرعت عبور نور در آن بسیار کم است.