جلسهٔ چهارم
خورشید و ستارگان

میلاد جمالی

هر کدام از ستارگان آسمان یک رآکتور همجوشی هسته‌ای طبیعی و بزرگ است. کره‌های گازی داغی که فشار و دما در مرکزشان به قدری زیاد است که اتم‌های هیدروژن در واکنش‌های زنجیره‌ای تبدیل به هلیوم می‌شود. نزدیک‌ترین ستاره به ما خورشید است؛ پس بیشتر اطلاعات ما از ستارگان حاصل مطالعهٔ خورشید است.

۱ خورشید

خورشید ستارهٔ مرکزی منظومهٔ شمسی است. قطر خورشید ۱۰۹ برابر قطر زمین است؛ یعنی می‌توانیم ۱۰۹ عدد زمین را کنار هم داخل خورشید بچینیم. اگرچه خورشید یک کرهٔ گازی است، اما چگالی کلی آن ۱٫۴ برابر چگالی آب است؛ یعنی اگر خورشید را در آب بیاندازیم، در آب غرق می‌شود. ٪۷۳ از جرم خورشید را هیدروژن، فراوان‌ترین و سبک‌ترین عنصر جهان تشکیل می‌دهد. دومین عنصر فراوان در خورشید، اولین بار از طریق بررسی خطوط طیفی خورشید کشف شد. از آن‌جایی که چنین عنصری پیش‌تر در زمین دیده نشده بود، اسم این عنصر جدید را از نام یونانی خورشید یعنی هلیوس[1]، هلیم گذاشتند. هلیوم با ٪۲۵ از جرم خورشید را تشکیل می‌دهد و درصد کمی هم سهم دیگر عناصر از جمله کربن، نیتروژن، اکسیژن، نئون، آهن و است. این که ستاره‌ها از چه چیزی تشکیل شده‌اند تز دکترای خانم سیسیلیا پین-گاپوشکین[2] در سال ۱۹۲۵ میلادی (۱۳۰۱ ه.خ) بود. او اولین زن آمریکا بود که دکترای نجوم می‌گرفت[3]. این نکته که ستارگان از عناصر سبک و فراوانی مثل هیدروژن و هلیوم تشکیل شده باشند برای سیسیلیا دور از ذهن بود. او به داده‌های خودش مشکوک شده بود و در همان زمان نوشته بود: «فراوانی عظیمی که برای عناصر جو ستارگان به دست آمده مطمئناً حقیقت ندارد.[4]»

بیشتر عناصر در خورشید به صورت اتم حضور دارند. مقدار مولکول‌ها نسبتاً اندک است. از آن‌جا که این مادهٔ گازمانند دمای بسیار بالایی دارد، اتم‌ها در آن یونیده‌اند. این حالتی از ماده است که به آن پلاسما گفته می‌شود.

خورشید هم مانند بقیهٔ کرات منظومهٔ شمسی، لایه‌لایه است. هر لایه نقش به خصوصی در تولید انرژی ایفا می‌کند. در مرکز خورشید که دما و فشار بسیار بالا است، اتم‌های هیدروژن بر اثر همجوشی هسته‌ای به اتم هلیوم تبدیل می‌شود و از این طریق انرژی آزاد می‌گردد. هستهٔ خورشید تقریباً ٪۲۰ از شعاع ستاره را شامل می‌شود. دما در هستهٔ خورشید به رقم باور نکردنی ۱۵ میلیون درجه می‌رسد. لایهٔ بعدی «ناحیهٔ تابشی»[5] نام دارد که نسبت به هسته خنک‌تر است و ۱٫۵ میلیون درجه دما دارد. نکتهٔ شگفت‌انگیز این لایه این است که

[1] Helios

[2] Cecilia Payne-Gaposchkin

[3] زن بودن در زندگی حرفه‌ای گاپوشکین تأثیر بدی گذاشت. او تا سال ۱۹۳۸ عنوان رسمی در دانشگاه هاروارد نداشت و تازه در سال ۱۹۵۶ عنوان استادی را دریافت کرد.

[4] "The enormous abundance derived for these elements in the stellar atmosphere is almost certainly not real."

[5] radiative zone

برای فوتون‌ها، ذرات سازندهٔ نور، به طور متوسط ۱۷۱٫۰۰۰ سال زمان می‌برد که از این ناحیه عبور کنند. مسلماً این لایه ۱۷۱٫۰۰۰ سال نوری ضخامت ندارد. دلیل این زمان طولانی این است که به خاطر تراکم بسیار بالای ماده در این منطقه، فوتون‌ها نمی‌توانند آزادانه مسیر خود به سمت بیرون را بدون برخورد با ذرهٔ دیگری بپیمایند. فوتون‌ها در مسیرشان به اندازه‌ای با ذرات دیگر برخورد می‌کنند و تغییر مسیر می‌دهند که دست آخر پس از طی مسیر پیچ در پیچی به درازای صدها هزار سال نوری از این لایه فرار می‌کنند. لایهٔ بعد «منطقهٔ همرفت»[۶] است که تقریباً ۲۰۰,۰۰۰ کیلومتر ضخامت دارد. همانطور که از نام این لایه بر می‌آید، این لایه پلاسمای داغ بالای ناحیهٔ تابشی را از طریق همرفت به سطح خورشید می‌آورد و پس از آن که در سطح خنک شد به کف لایه باز می‌گرداند.

ما تنها بیرونی‌ترین لایه یعنی نورسپهر[۷] را می‌بینیم که لایه‌ای مه‌آلود است. خورشید تنها از دوردست دارای مرز است. اگر به داخل خورشید شیرجه بزنیم، می‌بینیم که گاز اطرافمان طی مسافت ۴۰۰ کیلومتر به تدریج متراکم و کدر می‌شود. این ۴۰۰ کیلومتر همان لایهٔ مرئیی است که ذکر شد: نورسپهر. این ناحیه از دریچهٔ یک تلسکوپ خورشیدی قدرتمند، دیگر منطقه‌ای صاف و یکدست نیست؛ بلکه ناحیه‌ای است دانه‌دانه. به این دانه‌ها گرانول‌های خورشیدی گفته می‌شود. این گرانول‌ها که ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر قطر دارند، حاصل جریان‌های سریع همرفتی‌اند که پلاسمای داغ را به سطح خورشید می‌آورند.

اما خورشید بسیار بیشتر از نورسپهر است. لایهٔ بعدی که چندان هم قابل مشاهده نیست، فام‌سپهر[۸] است. این لایه همان خط قرمزی است که هنگام خورشیدگرفتگی در اطراف خورشید دیده می‌شود. در گذشته، تنها راه مشاهدهٔ فام‌سپهر این بود که نورسپهر توسط ماه پوشانده شود تا فام‌سپهر نمایان گردد. فام‌سپهر تقریباً ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلومتر ضخامت دارد. قرمزی این لایه به دلیل خطوط درخشان طیف نشری هیدروژن است. در طیف این ناحیه، مقداری خطوط نشری زرد هم دیده می‌شود که کاشف به عمل آمد که مربوط به هلیوم مذکور است که نحوهٔ کشفش را کمی قبل‌تر ذکر نمودیم.

در حالی که دمای نورسپهر ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کلوین است، فام سپهر با وجود ارتفاع بیشتر دمای بالاتری، یعنی ۱۰,۰۰۰ کلوین دارد. کمی بالاتر از فام‌سپهر، تاج[۹] خورشید قرار دارد که دمای آن یک میلیون درجه است. تاج خورشید همان ناحیهٔ نورانی است که هنگام خورشیدگرفتگی کلی دیده می‌شود. در انگلیسی و لاتین به این بخش از جو خورشید کرونا گفته می‌شود. زمانی که خانم جون آلمیدا[۱۰] و همکارش دیوید تایرل[۱۱] برای اولین بار ویروس تازه کشف‌شده‌شان را مشاهده کردند، به دلیل شباهتش با تاج خورشید اسم ویروس را «کروناویروس» گذاشتند. تاج خورشید تا میلیون‌ها کیلومتری نورسپهر خورشید امتداد دارد.

سطح خورشید یک عارضهٔ جذاب دیگر هم دارد: لکه‌های خورشیدی. لکه‌های خورشیدی نقاطی‌اند که به دلیل دمای پایین‌ترشان، تیره‌تر از نواحی اطرافشان‌اند. این نقاط که تقریباً ۳۸۰۰ کلوین دما دارند، به دلیل فعالیت‌های مغناطیسی سطح خورشید بوجود می‌آیند. گاهی اوقات این لکه‌ها به اندازه‌ای بزرگ می‌شوند که می‌توان آن‌ها را با چشم غیرمسلح هم مشاهده نمود. البته در میان مه و ابر که قرص خورشید قابل مشاهده می‌شد.

هشدار

بر خلاف همیشه که به رصد عملی آسمان توصیه می‌کنیم، اکیداً توصیه می‌کنیم که از نگاه کردن به خورشید بدون فیلتر مناسب خودداری نمایید.

[6] convective zone
[7] Photosphere
[8] Chromosphere
[9] Corona
[10] June Almeida
[11] David Tyrrell

۲ ستاره‌ها

خورشیدِ ما ستاره‌ای زرد رنگ است. البته اگر از خارج از جو زمین به خورشید بنگریم، آن را سفیدرنگ می‌بینیم. منظور از زرد بودن خورشید این است که خورشید در طول موج‌های مربوط به نور زرد درخشان‌تر است (و تسامحاً زرد هم است.). ستارگان رنگ‌های مختلفی دارند: از قرمز تا آبی.

۱.۲ ویژگی‌های ستارگان

اگر یک تکه فلز را حرارت دهیم، ابتدا سرخ می‌شود. بعد رنگ آن به نارنجی و سپس زرد میل می‌کند. اگر دما را بالاتر ببریم می‌بینیم که فلز مذکور به رنگ سفید و سپس آبی در می‌آید. این قضیه برای ستارگان هم صدق می‌کند. ستارگانی که دمای بالایی دارند به رنگ آبی می‌درخشند و ستارگان سردتر به رنگ قرمز. خورشید یک ستارهٔ متوسط است.

دمای سطح ستاره‌های آبی تقریباً ۲۵,۰۰۰ درجه است. این ستاره‌ها داغ‌ترند چراکه جرم بیشتری دارند و در نتیجه گرانش و فشار مرکزی بیشتری دارند. این ستارگان سوخت خود را سریع مصرف می‌کنند و عمر نسبتاً کوتاهی، در حدود چند ده میلیون سال دارند. کلاس بعدی ستارگان، ستارگان سفیدرنگ است. این ستارگان دمایی در حدود ۱۰,۰۰۰ درجه است. پس از آن ستاره‌هایی مانند خورشید است که تقریباً ۶۰۰۰ درجهٔ سلسیوس دما دارند و حدود ۱۰-۱۱ میلیارد سال عمر می‌کنند. خورشید ما اکنون در میانهٔ عمرش است. ستارگان نارنجی با دمای سطحی ۴۰۰۰ درجه و قرمز با دمای ۳۰۰۰ درجه سردترین ستارگان‌اند.داغ‌ترین ستارگان دمایی معادل ۴۰,۰۰۰ درجه و دمای سطح سردترین آن‌ها حداقل ۲۰۰۰ درجه است.

رنگ ستاره، تنها یکی از راه‌های تحلیل نور ستاره است. راه دیگر استفاده از طیف‌سنج است. اولین بار در سال ۱۸۱۴ میلادی (۱۱۹۳ ه.خ) فرانهوفر[12] آلمانی با مشاهدهٔ طیف خورشید متوجه نوارهای تاریکی در طیف شد. در دههٔ ۱۸۶۰، آقا و خانم هاگینز[13] پی بردند که این خطوط هم در طیف خورشید و هم در بقیهٔ ستارگان نشان‌دهندهٔ وجود عناصری است که در زمین هم یافت می‌شود. خطوط طیفی مثل اثر انگشت برای عناصر شیمیایی است.

آشکارسازی عناصر و ترکیبات یک ستاره نیز تنها کاربرد طیف‌سنجی نیست. با استفاده از طیف ستاره می‌توان شعاع و حرکات ستاره را نیز تخمین زد. ستاره‌های بزرگ، سطح بزرگتری هم دارند و این یعنی اتم‌ها در حجم بزرگ‌تری از نورسپهر قرار دارند که این هم به معنی فشار کمتر در نورسپهر است. این فشار کم باعث می‌شود که نوارهای تاریک طیف باریک‌تر شوند. پس هر چه ستاره کوچک‌تر باشد، خطوط طیفی پهن‌تری دارد.

یک کاربرد دیگر طیف ستاره، آشکارسازی حرکات ستاره است. با تحلیل طیف ستاره می‌توانیم سرعت ستاره در راستای دیدمان را با دقت بالایی اندازه‌گیری کنیم. اساس این نوع تحلیل، اثر دوپلر است. اثر دوپلر که از دوران مدرسه با آن آشناییم: همان چیزی که باعث می‌شود صدای بوق ماشین زمانی که به ما نزدیک می‌شود زیرتر و زمانی که دور می‌شود بم‌تر شود. صوت موج است. نور هم موج است. اثر دوپلر هم برای موج صادق است. زمانی که جسمی به ما نزدیک می‌شود، رنگ آن به آبی میل می‌کند و زمانی که دور می‌شود رنگ آن کمی به قرمزی می‌زند. هر چه این انتقال بیشتر باشد، سرعت ستاره هم بیشتر است.

این سرعت که فقط در راستای شعاعی، یعنی در راستای دید ما است، به ما اطلاعات زیادی می‌دهد. واضح‌ترین چیزی که به ما می‌گوید این است که آیا این ستاره از ما دور می‌شود یا به ما نزدیک می‌شود. دیگر این که اگر طی مدت‌زمانی مثل چند روز یا چند ساعت، ستارهٔ مورد بررسی نوسان کند، می‌توانیم به وجود یک سیاره یا یک ستارهٔ همدم به گرد آن پی ببریم. به هر حال بسیاری از ستارگان آسمان تنها نیستند و در منظومه‌های ستاره‌ای قرار دارند که به این کمی جلوتر خواهیم پرداخت.

دست آخر، با تحلیل طیف ستاره می‌توانیم سرعت چرخش ستاره به دور خودش را هم تخمین بزنیم که در این روش باز هم ردپای اثر دوپلر دیده می‌شود. زمانی که ستاره به دور

[12] Joseph Fraunhofer

[13] Sir William Huggins and Lady Margaret Huggins

خودش می‌چرخد، یک سمت آن به ما نزدیک می‌شود و سمت دیگر آن از ما دور می‌شود. این دور و نزدیک شدن لبه‌ها، خود را در پهنای خطوط طیفی به گونهٔ دیگری نشان می‌دهد.

۲.۲ سرشماری

ستاره‌هایی که در آسمان شب مشاهده می‌شود، درخشندگی یکسانی ندارد. بعضی از ستارگان پرنورند و بعضی به سختی با تلسکوپ دیده می‌شود. این موضوع تقریباً هیچ ارتباطی با فاصلهٔ آن‌ها ندارد. بعضی از ستارگان نورانی آسمان فواصل بسیار زیادی از ما دارند و بعضی از نزدیک‌ترین ستارگان مثل ستارهٔ بارنارد[۱۴] که چهارمین ستارهٔ نزدیک به منظومهٔ شمسی است یا پروکسیما قنطورس[۱۵] که نزدیک‌ترین ستاره به منظومهٔ شمسی است، حتی با چشم غیرمسلح هم دیده نمی‌شوند.

بیشتر ستارگان آسمان تنها نیستند و یک همدم ستاره‌ای دارند که با هم به دور مرکز جرمشان می‌چرخند. به این ستارگان ستارگان دوتایی یا چندتایی می‌گوییم. برای سادگی با ستارگان دوتایی ادامه می‌دهیم. در آسمان با مشاهدهٔ بعضی از ستارگان متوجه حضور یک همدم ستاره‌ای می‌شویم. اگر با تلسکوپ بنگریم تعداد این ستارگان دوتایی بیشتر هم می‌شود. بعضی از این ستارگان دوتایی ظاهری‌اند؛ یعنی تنها در یک راستا قرار دارند و از زمین دوتایی دیده می‌شوند. همهٔ ستارگان دوتایی با تلسکوپ قابل تفکیک نیستند و برای آشکارسازی‌شان باید از تکنیک‌های دیگری استفاده کرد. این تکنیک‌ها بسیار نبوغ‌آمیزند. یک مورد که پیش‌تر گفته شد، روش سرعت شعاعی است که در طیف ستاره خودش را نشان می‌دهد. روش دیگر، روش گرفت است. زمانی که در یک منظومهٔ ستاره‌ای، یک ستاره از مقابل ستارهٔ دیگر عبور می‌کند، باعث تغییر در روشنایی ستاره می‌شود و با تحلیل نور ستاره می‌توانیم هم به وجود ستارهٔ همدم پی ببریم و هم اطلاعات بیشتری از جمله، اندازه، دورهٔ مداری و را تخمین بزنیم.

۳.۲ فواصل نجومی

در اخترشناسی از واحدهای عجیب و غریبی برای بیان فاصله استفاده می‌کنیم که مهم‌ترینشان «سال نوری[۱۶]» است. سال نوری فاصله‌ای است که نور با سرعت ثابت تقریباً ۳۰۰,۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه، طی مدت یک سال طی می‌کند. این فاصله معادل تقریباً ۹/۵ تریلیون کیلومتر است؛ یعنی اگر با سرعت صد کیلومتر بر ساعت به راه افتیم، نزدیک به ۱۱ میلیون سال باید در راه باشیم.

در فاصلهٔ یک سال نوری از ما به جز خورشید هیچ ستارهٔ دیگری قرار ندارد. در شعاع ۲، ۳ و ۴ سال نوری از ما هم تنها ستاره‌ای که حضور دارد خورشید است. نزدیک‌ترین ستاره به منظومهٔ شمسی، پروکسیما قنطورس ۴/۳ سال نوری با ما فاصله دارد. این همسایهٔ دیوار به دیوار ماست.

اما سؤال این‌جاست که چطور فاصلهٔ با ستارگان را اندازه می‌گیریم؟ برای ستاره‌های نزدیک می‌توانیم از روش‌های مثلثاتی استفاده کنیم: روش اختلاف منظر. انگشت‌تان را جلوی چشمتان بگیرید و با یک چشم به آن نگاه کنید. سپس با چشم دیگرتان نگاه کنید. می‌بینید که انگشت‌تان نسبت به پس‌زمینه جابه‌جا می‌شود. حالا فاصلهٔ انگشت‌تان را تغییر دهید. هر چه انگشت نزدیک‌تر باشد، تغییراتش نیز بیشتر می‌شود. حال یک شب از ستارهٔ مورد نظر عکس‌برداری می‌کنیم. شش ماه صبر می‌کنیم که زمین به سمت دیگر خورشید برود؛ یعنی حدود ۳۰۰ میلیون کیلومتر فاصله بگیرد و سپس دوباره از ستاره عکس می‌گیریم. تغییراتی که ستاره نسبت به ستارگان دوردست پس‌زمینه داشته را اندازه می‌گیریم و با روش‌های مثلثاتی فاصلهٔ ستاره را به دست می‌آوریم. البته به دلیل جزئی بودن این تغییرات به ابزارهای بسیار دقیقی نیاز داریم.

[14] Barnard's Star
[15] Proxima Centauri
[16] Light Year

برای فواصل بزرگتر از روش‌های دیگری استفاده می‌شود که برای یک تک‌ستاره قابل اندازه است؛ اما در مورد کهکشان‌های دوردست چطور؟ نوع خاصی از ستارگان هستند که روشناییشان طی زمان نوسان می‌کند. به این ستارگان، ستارگان متغیر گفته می‌شود. درخشندگی این ستارگان متغیر با دورهٔ نوسانشان متناسب است. از این رو با زیر نظر گرفتن یک یا چند ستارهٔ متغیر در کهکشان هدف، می‌توانیم فاصلهٔ این کهکشان را تخمین بزنیم.

۴.۲ فضای میان‌ستاره‌ای

اگرچه فضای خالی بین ستارگان از هر خلائی که روی زمین به دست انسان ساخته می‌شود نیز خالی‌تر است؛ اما این فضا کاملاً خالی نیست. به طور متوسط در هر سانتی‌متر مکعب از فضای میان‌ستاره‌ای یک اتم وجود دارد. بخشی از مواد میان‌ستاره‌ای به صورت ابرهای بزرگی از گاز و غبار فشرده شده‌اند که به آن‌ها سحابی[۱۷] گفته می‌شود. حدود ٪۹۹ درصد از مواد میان‌ستاره‌ای گاز است که بیشتر آن را هم هیدروژن و هلیوم تشکیل داده است. ٪۱ باقی مانده نیز، ذرات غباری جامد است.

دمای مواد میان‌ستاره‌ای بسته به مکان می‌تواند از چند درجه بالای صفر مطلق تا چندین میلیون درجهٔ سلسیوس دما داشته باشد. در نواحی اطراف ستارگان که دمای این مواد به حدود ۱۰,۰۰۰ درجه می‌رسد، تابش شدید فرابنفش می‌تواند الکترون‌ها را از اتم‌های هیدروژن بکند و آن‌ها را یونیده نماید. الکترون جدا شده نیز در اولین فرصت یک پروتون تنها پیدا کرده و دوباره هیدروژن خنثی تشکیل می‌دهند و این چرخه ادامه می‌یابد. به‌طور معمول گازهای اطراف ستاره‌ها، هیدروژن یونیده است. گاهی با ابرهایی از هیدروژن یونیده طرفیم که به آن‌ها «نواحی هاش دو[۱۸]» می‌گوییم. در این ابرها زمانی که الکترون‌ها با دریافت پرتوی فرابنفش جدا می‌شوند و سپس به پروتون دیگری می‌پیوندند تا اتم هیدروژن خنثی تشکیل دهند، کمی انرژی به صورت تابش نور مرئی از دست می‌دهند. این پدیده همان فلوئورسانس[۱۹] است که باعث روشنایی لامپ‌های کم‌مصرف می‌شود.

ابرهای هاش دو فقط در اطراف بعضی از ستارگان وجود دارد؛ پس به طور کلی کمیاب است. اما جهان پر از شگفتی است. گاهی اوقات زمانی که با تلسکوپ به آسمان می‌نگریم، نواحی می‌بینیم که عاری از هر ستاره‌ای است. آیا این نواحی نوعی تونل‌اند؟ این فرضیه را ویلیام هرشل نام‌آشنا مطرح کرد، اما بعدتر مشخص شد که این لکه‌های تاریک، توده‌های غباری هستند که نور ستارگان پس‌زمینه را از خود عبور نمی‌دهد: سحابی‌های تاریک. بعضی از این سحابی‌ها بر اثر بازتاب نور ستارگان اطراف مثل ابرهای زمین می‌درخشند.

۳ زندگی ستارگان

گفتیم که ستارگان رآکتورهای همجوشی هسته‌ای بزرگی‌اند که هیدروژن را به هیلوم تبدیل کرده و انرژی آزاد شده را به صورت نور و گرما ساطع می‌کنند. گفتیم که هر چه ستاره پرجرم‌تر باشد، سوخت خود را سریع‌تر مصرف می‌کند و در نتیجه عمر کمتری هم دارد. همچنین در قسمت پیش گفته شد که در برخی مناطق فضای میان‌ستاره‌ای، ابرهای بزرگ گاز و غباری وجود دارد که نقش زایشگاه‌های ستاره‌ای را بر عهده دارد.

فرض کنید قرار است به مدت چند روز در سیاره‌ای دیگر در مورد ساکنین آن تحقیق کنید. از آن‌جا که فرصت مطالعاتی شما بسیار محدود است، چگونه باید مراحل زندگی این مردم را کشف کنید؟ این امکان وجود ندارد که از تولد تا مرگ افراد را زیر نظر گرفته و آن را مطالعه کنیم؛ در عوض راهی که باقی می‌ماند این است که افراد با سنین مختلف را مطالعه کنیم. تولدها را ببینیم، مرگ‌ها را ببینیم، کودکی و کهولت را ببینیم و در نهایت در مورد مراحل زندگی نتیجه‌گیری کنیم. می‌دانیم ستارگان حداقل چند ده میلیون سال عمر می‌کنند و این یعنی وضعیت ما بسیار شبیه به مثال سیارهٔ بیگانه هستیم.

[17] Nebula
[18] H II regions
[19] fluorescence

ابتدا از سحابی‌ها شروع می‌کنیم. جرم این ابرهای مولکولی میان‌ستاره‌ای، از هزار تا سه میلیون برابر جرم خورشید است. معمولاً در این ابرهای بزرگ که گاه تا چند هزار سال نوری امتداد دارند، مواد اولیهٔ تشکیل ستارگان بر اثر گرانش توده‌های کوچک‌تری را تشکیل می‌دهند که به تدریج کوچک و کوچک‌تر می‌شوند تا در نهایت به علت افزایش فشار شروع به گرم شدن می‌کنند. این فروپاشی سریع اتفاق می‌افتد و تنها چند هزار سال زمان می‌برد. چگالی زیاد می‌شود و بر اثر فشار، دما بالا می‌رود. در این مرحله هنوز همجوشی هسته‌ای رخ نمی‌دهد؛ برای همین هنوز ستاره نداریم، بلکه این جرم نوپا یک پیش‌ستاره[۲۰] خوانده می‌شود. البته این تولدها خودبه‌خودی نیست. زمانی که یک ابرنواختر در نزدیکی سحابی رخ می‌دهد، موج حاصل از انفجار، ماشهٔ تولد ستارگان جدید را می‌کشد.

سرنوشت ستاره مستقیماً به جرم پیش‌ستاره ارتباط دارد. اکنون سناریوهای مختلف را بررسی می‌کنیم:

ستارگان با جرم کم‌تر از ۸٪ جرم خورشید یا ۸۰ برابر جرم مشتری. دمای هستهٔ این اجرام هیچ‌گاه به اندازهٔ کافی برای همجوشی هسته‌ای بالا نمی‌رود. برای همجوشی هسته‌ای باید دمای هسته به حدود ۱۰ میلیون درجهٔ سلسیوس برسد. به این اجرام به جای ستاره، کوتولهٔ قهوه‌ای[۲۱] گفته می‌شود. در واقع این اجرام ابتدا با رنگ قرمز تیره می‌تابند؛ اما به علت این که این اجرام نمی‌توانند انرژی آزاد کنند، طی میلیاردها سال به تدریج کم‌سو شده و به «کوتولهٔ سیاه» تبدیل می‌شوند. کوتوله‌های قهوه‌ای چیزی بین سیاره و ستاره‌اند. دمای سطح این یک کوتولهٔ قهوه‌ای حدود ۲۰۰۰ درجهٔ سلسیوس است و به دلیل روشنایی اندکشان، کشف این اجرام کاری بسیار مشکل است.

ستارگان کم‌جرم که برای کوتولهٔ قهوه‌ای بودن زیادی پرجرم‌اند اما جرمشان کم‌تر از ۱٫۴ برابر جرم خورشید است. ابتدا، پیش‌ستاره بزرگ و قرمز است؛ اما نه به شکل غول‌های سرخ. درخشندگی این پیش‌ستاره‌ها به طرز نامنظمی متغیر است تا این که وارد مرحلهٔ «رشتهٔ اصلی[۲۲] می‌شوند. رشتهٔ اصلی مرحلهٔ پایداری از عمر ستارگان است. ستارگان در این مرحله بدون تغییرات قابل توجه، هیدروژن را به هلیوم تبدیل کرده و بیشتر عمرشان را در این مرحله می‌گذرانند. خورشید اکنون در همین مرحله از تکاملش است و این مرحله برای ستاره‌ای مثل خورشید حدود ده میلیارد سال به طول می‌انجامد. پس با این حساب، خورشید در میانهٔ زندگی‌اش قرار دارد. این مرحله از زندگی ستاره مدت زیادی به طول می‌انجامد، اما این نیز بگذرد. زمانی که ذخیرهٔ هیدروژن ستاره به پایان می‌رسد، ستاره دیگر نمی‌تواند انرژی آزاد کند و در نتیجه، توان مقاومت در برابر وزن لایه‌های بالایی را ندارد و فرومی‌پاشد. در اثر این فروپاشی، دمای هسته از باز هم افزایش می‌یابد و اکنون هسته پر از هلیوم شده است.

در حالی که دمای مرکز افزایش می‌یابد، لایه‌های بیرونی شروع به انبساط و سرد شدن می‌کند. در این مرحله، ستاره به «غول سرخ[۲۳]» تبدیل می‌شود. این افزایش حجم کاملاً برازندهٔ عنوان غول است؛ چرا که در این مرحله، خورشید به اندازه‌ای بزرگ خواهد شد که سیارات درونی را می‌بلعد و تا مدار زمین پیش خواهد رفت.

زمانی که دمای هسته به صد میلیون درجهٔ سلسیوس رسید، هلیوم ناگهان شروع به همجوشی می‌کند و به کربن و اکسیژن تبدیل می‌شود. در این مرحلهٔ سریع، آزادسازی انرژی برای مدت کوتاهی کاهش می‌یابد و ستاره مجدداً متراکم می‌شود: هلیوم فلش. در بسیاری از مواقع، ستاره متغیر می‌شود. این تغییرات به دلیل ضربان‌دار شدن درخشندگی ستاره است. در این مرحله، ستاره شروع به از دست دادن مواد بیرونی خود می‌کند؛ فرآیندی که به تدریج یک سحابی در اطراف خود می‌کند. این سحابی‌ها به این علت که در زمان کشفشان شبیه به سیاره بودند، سحابی سیاره‌ای نام گرفتند. این سحابی می‌تواند تا ۲۰٪ از جرم ستاره باشد. این مواد هیچ‌گاه به داخل ستاره سقوط نمی‌کند و بی‌وقفه به سفرشان در فضا ادامه می‌دهند.

[20] protostar
[21] Brown Dwarf
[22] main sequence
[23] red giant

به همین دلیل هم سحابی‌های سیاره‌ای، دست بالا ۱۰۰,۰۰۰ سال باقی می‌مانند. این اجرام زیبا گاهی متقارن‌اند و گاه نامنظم و بی‌شکل.

حال چه به روز هسته می‌آید؟ دمای هسته به اندازه‌ای که کربن و اکسیژن را هم بسوزاند کافی نیست؛ بنابر این، ستارهٔ پیر شروع به رمبش می‌کند و تبدیل به کره‌ای چگال و داغ به نام «کوتولهٔ سفید[۲۴]» می‌شود. در یک کوتولهٔ سفید، اتم‌ها شکافته شده‌اند و اجزایشان تنگاتنگ هم، بدون هدر دادن فضا جای گرفته‌اند. چگالی کوتولهٔ سفید به قدری زیاد است که تنها یک قاشق از آن می‌تواند چندین تن جرم داشته باشد. از لحاظ حجم آن‌ها در قد و قوارهٔ زمین و ماه هستند.

مواد سازندهٔ کوتوله‌های سفید اصطلاحاً «تبهگن[۲۵]» نام دارد. ستاره نمی‌تواند بیش از این فشرده شود، یعنی الکترون‌ها این اجازه را به گرانش نمی‌دهند؛ بنابراین کوتولهٔ سفید برای میلیاردها سال پایدار می‌ماند تا به تدریج سرد و تاریک شود. این کرهٔ سرد و خاموش، کوتولهٔ سیاه نام دارد، جرمی که اکنون در جهان وجود ندارد چون جهان ما برای ساختن چنین چیزی هنوز بسیار جوان است. سردترین کوتولهٔ سفیدی آشکار شده است، کمی زیر ۳۰۰۰ کلوین دما دارد.

چانداسخار اخترشناس هندی، نشان داد که ستارگانی که بیش از ۱٫۴ برابر خورشید جرم دارند، نمی‌توانند تبدیل به کوتولهٔ سفید شوند مگر این که بخشی از جرم خود را از دست بدهند. به این حد از جرم، «حد چاندارسخار» می‌گویند. سرنوشت برای ستارگان بزرگ‌تر از حد چاندراسخار به گونهٔ دیگری رقم می‌خورد.

ستارگان با جرم بیش از ۱٫۴ جرم خورشید زندگی سریعی دارند. برای ستاره‌ای به اندازهٔ ۱٫۵ برابر خورشید، مرحلهٔ پیش‌ستاره تنها چند هزار سال و رشتهٔ اصلی حدود ده میلیون سال به طول می‌انجامد. دمای هسته تا صد میلیون درجه بالا می‌رود و هلیوم به آرامی به کربن تبدیل می‌شود. زمانی که سوزاندن هلیوم به پایان نزدیک می‌شود، ستاره بزرگتر و درخشان‌تر از غول سرخ می‌شود؛ به همین دلیل نیز به این ستارگان بسیار بزرگ، «ابرغول[۲۶]» تبدیل می‌شوند.

در حالی که دمای هسته بالاتر می‌رود، نوبت به کربن می‌رسد تا سوزانده شده و به عناصر سنگین‌تری مثل اکسیژن و سیلیکون و بعد از همهٔ این‌ها آهن تولید می‌شود. آهن دیگر وارد همجوشی نمی‌شود و در این نقطه، آزادسازی انرژی به پایان می‌رسد. فاجعه رخ می‌دهد. ظرف چند ثانیه، هسته می‌رمبد و الکترون‌ها و پروتون‌ها با هم برخورد می‌کنند و تشکیل نوترون می‌دهند. یک انفجار از داخل و سپس یک انفجار از بیرون رخ می‌دهد. موج ضربه‌ای رمبش، ستاره را تکه پاره می‌کند. حال ما یک ابرنواختر نوع ۲[۲۷] داریم. روشنایی این پدیده تا یک میلیارد برابر روشنایی خورشید می‌رسد.

من این متن را با استفاده از لپتاپ نوشتم و شما نیز احتمالاً در یک ماسماسک الکترونیکی می‌خوانید. گفتیم که سیلیکون در دل یک ستارهٔ پرجرم‌تر از خورشید ساخته می‌شود. حال که این ستاره منفجر شده، لایه‌های بالایی‌اش در فضا پراکنده می‌شود تا ماشهٔ تولد ستارگان دیگری را بکشد. پس سیلیکونی که دستگاه شما با آن کار می‌کند، در دل یک ستارهٔ دیگر تولید شده و پس از میلیاردها سال به این‌جا رسیده. این فقط سیلیکونِ داخل وسایل الکترونیکی نیست. اتم‌های کربنی که پایهٔ حیات را تشکیل داده و اکسیژنی که تنفس می‌کنیم، همه و همه در دل ستاره‌ای دیگر بوجود آمده است.

ستاره‌های نوترونی در سال ۱۹۳۲ (۱۳۱۱ ه‍.خ) توسط لِف لاندائو[۲۸] فیزیکدان بزرگ روسی و مجدداً دو سال بعد توسط فریتس زویکی[۲۹] و والتر باده[۳۰] در آمریکا مطرح شد. سه دهه بعد، در سال ۱۹۶۷ (۱۳۴۶ ه‍.خ)، اولین ستارهٔ نوترونی کشف شد. ستارهٔ نوترونی حدوداً ۲۰

[24] white dwarf
[25] degenerate
[26] supergiant
[27] type II supernova
[28] Lev Landau
[29] Fritz Zwicky
[30] Walter Baade

کیلومتر قطر دارد و به اندازه‌ای فشره است که دیگر نوترون‌ها اجازهٔ فشرده‌تر شدن را نمی‌دهند. چگالی این اجرام حدود هزار میلیارد برابر چگالی آب است؛ پس تنها یک قاشق از ستارهٔ نوترونی می‌تواند تا چند میلیارد تُن جرم داشته باشد.

لایهٔ بیرونی ستارهٔ نوترونی با ضخامت تقریبی ۱۰۰ کیلومتر، کریستالی از جنس مادهٔ معمولی با درصد بالایی از آهن است. روی سطح این اجرام کوهستان‌هایی هم وجود دارد، اما ارتفاع این کوه‌ها بیشتر از یک سانتی‌متر نمی‌شود. اتمسفر این اجرام هم چگال و بسیار نازک، یعنی در حدود چند سانتی‌متر است. روی سطح این اجرام گسل‌هایی به دلیل ستاره‌لرزه‌ها یا زلزله‌هایی که روی سطح ستارگان نوترونی رخ می‌دهد وجود دارد. زیر پوسته، گوشته‌ای از مایع پر از نوترون وجود دارد. پایین‌تر از آن هسته‌ای از جنس ابرشارهٔ[۳۱] نوترونی قرار دارد.

همچنان که ستارهٔ بزرگ تا این ابعاد فشرده می‌شود، میدان مغناطیسی آن هم فشرده می‌شود. شدت میدان مغناطیسی یک ستارهٔ نوترونی معمولی تا صد میلیون تسلا می‌برسد. برای مقایسه، میدان مغناطیسی یک آهنربای یخچال حدود ۵ هزارم تسلا است. ستاره‌های نوترونی با شار مغناطیسی بزرگتر نیز وجود دارد که به آن‌ها مگنتار[۳۲] گفته می‌شود. میدان مغناطیسی مگنتارها تا صد میلیارد تسلا هم می‌رسد.

نوع دیگری از ستارگان نوترونی وجود دارد که با سرعت بسیار زیادی به دور خود می‌چرخند. این ستارگان نوترونی در سال ۱۹۶۷ (۱۳۴۶ ه.خ) توسط جاسیلین بل[۳۳] کشف شدند. بل متوجه پالس‌هایی شد که به طور منظم تقریباً هر ۱٫۳ ثانیه تکرار می‌شد. این اجرام را تپ‌اختر یا پالسار[۳۴] می‌نامند.

ابتدا دانشمندان توضیح مناسبی برای این پالس‌های منظم نداشتند. یک فرضیه برای توجیه این پالس‌ها، منشاء مصنوعی آن‌ها بود. دانشمندان این احتمال را می‌دادند که این پالس‌ها توسط موجودات فضایی ارسال شده باشد. در آن زمان برای این موجودات نام هم انتخاب شده بود و به آن‌ها اسم بامزهٔ «مردان کوچک سبز[۳۵]» داده بودند.

تپ‌اخترها با سرعت زیادی به دور خودشان می‌چرخند و نیز از قطب‌های این اجرام، تابش رادیویی گسیل می‌شود. زمانی که برای مدت کوتاهی، قطب‌ها به سمت زمین نشانه می‌رود، ما یک پالس رادیویی دریافت می‌کنیم. این درست مثل فانوس‌های دریایی است. مشخصاً تعداد بسیار بیشتری از تپ‌اخترها وجود دارد که پالس‌هایشان را به سمت زمین گسیل نمی‌کنند و در نتیجه هنوز از دید ما غایب مانده‌اند.

ستارگانی که برای نوترونی شدن زیادی سنگینند یعنی بیش از ۴۰ برابر خورشید جرم دارند، به سیاهچاله تبدیل می‌شوند. ایدهٔ سیاهچاله بسیار قدیمی‌تر از ایدهٔ ستارهٔ نوترونی است. جان میچل[۳۶] انگلیسی در سال ۱۷۸۳ و بعدتر لاپلاس[۳۷] ریاضی‌دان شهیر فرانوسوی در سال ۱۷۹۶ ایدهٔ سیاهچاله را مطرح کردند. لاپلاس هم مانند نیوتون بر این عقیده بود که نور از جریانی از ذرات تشکیل شده است. او استدلال کرد که اگر جسمی به اندازهٔ کافی فشرده باشد، حتی نور هم نمی‌تواند از دام گرانش آن بگریزد و در نتیجه نامرئی خواهد بود و اگر نور نتواند از گرانش آن جرم فرار کنید، هیچ چیز دیگری نیز نمی‌تواند.

نظریهٔ نسبیت عام، مسأله را از زاویهٔ دیگری می‌نگرد. یک جسم پرجرم، فضازمان را جوری خم می‌کند که پرتوهای نور یا ذرات ماده مسیرشان را به سمت آن کج می‌کنند. اگر جسمی فشرده شود، در شعاع به‌خصوصی دیگر نور هم نمی‌تواند از آن بگریزد، این موضوع را کارل شوارتزشیلد[۳۸] آلمانی مطرح کرد و برای همین هم به آن شعاع شوارتزشلید می‌گویند. مقدار شعاع شوارتزشیلد برای خورشید ۳ کیلومتر، برای ستاره‌ای به بزرگی ۶۰ برابر خورشید، ۶۰ کیلومتر و برای زمین تنها ۹ میلیمتر است. به مرز سیاهچاله افق رویداد[۳۹] می‌گویند. چیزی که از افق

[31] superfluid
[32] magnetar
[33] Jocelyn Bell
[34] pulsar
[35] LGM: Little Green Men
[36] John Michell
[37] Laplace
[38] Karl Schwarzschild
[39] event horizon

رویداد یک سیاهچاله عبور کند، هرگز نمی‌تواند بازگردد.

سیاهچاله‌ها حاصل فروپاشی ستارگان بسیار پرجرمند. اگر جرم ستاره از حدی بیشتر باشد، رمبش را رسیدن به نقطه‌ای با چگالی بینهایت ادامه می‌دهد. ما به این نقطه می‌گوییم تَکینِگی[۴۰] که مفهومی پیچیده است. اما پیش از رسیدن به تکینگی، ستارهٔ درحال رمبش از افق رویداد خودش عبور کرده و ناپدید می‌شود!

نزدیک سیاهچاله‌ها اتفاقات عجیبی رخ می‌دهد. یک مورد آن اثر اتساع زمان است. در یک میدان مغناطیسی قوی، زمان کندتر می‌گذرد (و این به صورت تجربی نیز تأیید شده است.). فضانوردی را تصور کنید که با یک ساعت دقیق به درون یک سیاهچاله شیرجه می‌زند. مشاهده‌گری که از فاصلهٔ ایمن به آن نگاه می‌کند، متوجه می‌شود که تیک تاک ساعت کند شده و هر ثانیهٔ روی ساعت طولانی‌تر به نظر می‌رسد. اما برای فضانورد، همه‌چیز عادی است و می‌بینند که با سرعت زیاد در حال سقوط به داخل سیاهچاله است. در این حین، اوضاع فضانورد هم خوب نیست. نیروی گرانشی که به پاهای او وارد می‌شود، بسیار قوی‌تر از نیرویی است که به سر آن وارد می‌شود. پس پیش از رسیدن به افق رویداد، تکه‌تکه خواهد شد.

اما در دل یک سیاهچاله چه می‌گذرد؟ آیا هستهٔ ستاره نیست و نابود می‌شود؟ کسی نمی‌داند. دانستن این موضوع به علت این که هیچ اطلاعاتی از افق رویداد سیاهچاله نمی‌گذرد.

اگر سیاهچاله چرخان باشد، شرایط خاصی بر آن حاکم است. سیاهچاله‌های چرخان که به آن‌ها سیاهچالهٔ کِر (به افتخار جان کر[۴۱]، کسی که این نوع سیاهچاله را توصیف کرد.) گفته می‌شود؛ توسط ناحیهٔ بیضی‌گونی به نام اِرگوسفر[۴۲] احاطه شده است. ذراتی که در ارگوسفر قرار می‌گیرند مجبور به چرخش به دور افق رویداد می‌شوند و درنتیجهٔ این چرخش، انرژی به صورت پرتوی گاما گسیل می‌کنند که توسط ما قابل رصد است. تکینگی این سیاهچاله‌ها به جای یک نقطه صفر بعدی، یک حلقه است. ممکن است فضانوردی وارد افق رویداد سیاهچالهٔ کر شده و بدون برخورد با تکینگی از طریق کرْم‌چاله[۴۳] در جای دیگری از همین کیهان یا جهان دیگری ظاهر شود.

استفن هاوکینگ معروف در تز دکترای خود این ایده را داد که سیاهچاله‌ها نیز در نهایت تبخیر می‌شوند. در فضای خالی اتفاقات جالبی رخ می‌دهد. گاهی یک جفت ذره و پادذره از هیچ بوجود می‌آید و بلافاصله پس از برخورد با یکدیگر نابود می‌شوند. اگر این اتفاق در نزدیکی افق رویداد رخ دهد، یکی از ذرات وارد افق رویداد شده و دیگری می‌تواند بگریزد. این فرایند به تدریج باعث ازدست رفتن سیاهچاله می‌شود. با کوچک‌تر شدن سیاهچاله، این فرایند سرعت بیشتری به خود می‌گیرد تا این که سیاهچاله کاملاً نیست و نابود شود. تبخیر یک سیاهچاله مدت زمان زیادی به طول می‌انجامد، به طوری که هنوز عمر جهان کفاف نمی‌دهد؛ اما این را هم می‌دانیم که تاکنون هیچ سیاهچالهٔ کوچکی کشف نشده است.

سیاهچاله‌ها را معمولاً از روی اثر گرانشی که بر ستارگان اطرافشان می‌گذارند و نیز پرتوهای گاما و ایکسی که گسیل می‌کنند آشکار می‌کنند. تا همین چند سال پیش تنها می‌توانستیم همین آثار را از یک سیاهچاله ببینیم؛ اما به لطف تلسکوپ افق رویداد[۴۴]، اولین تصاویر از سیاهچاله‌ها گرفته شد. برای گرفتن چنین تصاویری، به تلسکوپی به اندازهٔ قطر زمین نیاز داریم؛ افق رویداد هم چنین تلسکوپی است! این تلسکوپ در واقع آرایه‌ای از تلسکوپ‌های رادیویی در سراسر سیارهٔ زمین است. با ترکیب داده‌های بدست آمده از این تلسکوپ‌ها، به توان تفکیک بالایی برای رصد افق رویداد یک سیاهچاله می‌رسیم. برای این که مقیاس درستی از عظمت این کار داشته باشیم، با قدرت این تلسکوپ می‌توان یک توپ تنیس را روی سطح ماه رصد کرد. البته از این تلسکوپ برای رصد سطح سیارات استفاده نمی‌شود چرا که اصلاً این تلسکوپ رادیویی است و رزولوشن کافی برای رصد اجرام در ابعاد چند متر را ندارد.

و اما نکتهٔ آخر در مورد سیاهچاله‌ها این است که این اجرام، آن‌گونه که مردم تصور می‌کنند، مثل جاروبرقی مکنده نیستند. اگر فرضاً همین الان ناگهان خورشید به یک سیاهچاله

---

[40] singurarity
[41] John Kerr
[42] ergosphere
[43] wormhole
[44] EHT: Event Horizon Telescope

تبدیل شود، هیچ تغییری در مدار سیارات رخ نخواهد داد. سیاهچاله‌ها خاصند چرا که هیچ چیز نمی‌تواند از آن‌ها فرار کند نه به این علت که همه را می‌خورند. اکنون می‌توانید دوباره فیلم میان‌ستاره‌ای[۴۵] را تماشا کنید.

[45] interstellar