

از بیگ بنگ تا هسته‌زایی ستاره‌ای: ما از غبار ستاره‌ها ساخته شده‌ایم

جهان، بوم عظیم و پویایی است که با نور ستارگان و عناصری که خلق می‌کنند، نقاشی شده است. از تولد فاجعه‌بار بیگ بنگ تا آینده‌ای دور و در حال محو شدن یک کیهان سرد، نسل‌های ستاره‌ای — جمعیت‌های سوم، دوم و اول، و جانشینان احتمالی آن‌ها — تکامل شیمیایی، فیزیکی و زیستی جهان را شکل داده‌اند. ستارگان از طریق زندگی‌های آتشین و مرگ‌های انفجاری خود، عناصری را ایجاد کرده‌اند که کهکشان‌ها، سیارات و خود حیات را تشکیل می‌دهند. این مقاله، دوران‌های کیهانی را کاوش می‌کند، به بررسی ریشه‌ها، محیط‌ها و میراث نسل‌های ستاره‌ای می‌پردازد، با نگاهی عمیق به هسته‌زایی ستاره‌ای — فرآیندهای کیمیاگرانه‌ای که ستارگان را نیرو می‌دهند و عناصر جهان را تولید می‌کنند. این مقاله در حقیقت عمیقی به پایان می‌رسد که ما غبار ستاره‌ها هستیم، از خاکستر ستارگان باستانی باززایی شده‌ایم، و آینده تشکیل ستارگان در جهانی که رو به تاریکی می‌رود را در نظر می‌گیرد.

فصل اول: بیگ بنگ و سپیده‌دمان کیهان

جهان حدود 13.8 میلیارد سال پیش با بیگ بنگ آغاز شد، رویدادی با چگالی و دمای بی‌نهایت که در آن تمام ماده، انرژی، فضا و زمان از یک تکینگی پدید آمدند. این جهنم اولیه، داغ‌تر از 10^{32} کلین، نیروهای بنیادی — گرانش، الکترومغناطیس، نیروی هسته‌ای قوی و نیروی هسته‌ای ضعیف — را در حالتی یکپارچه نگه داشت، لحظه‌ای زودگذر از تقارن کیهانی.

انبساط و سرد شدن کیهانی

در عرض 10^{-36} ثانیه، تورم — انبساطی نمایی — جهان را از مقیاس‌های زیراتمی به ابعاد ماکروسکوپی کشاند، ناهمواری‌ها را صاف کرد و نوسانات چگالی را کاشت که بعدها کهکشان‌ها را تشکیل دادند. تا 10^{-12} ثانیه، نیروی قوی از نیروی الکتروضعیف جدا شد، و به دنبال آن الکترومغناطیس و نیروی ضعیف در حدود 10^{-6} ثانیه با افت دما به زیر 10^{15} کلین از هم جدا شدند. این جدایی‌ها قوانین فیزیکی حاکم بر ماده را از کوارک‌ها تا کهکشان‌ها برقرار کردند.

تشکیل عناصر اولیه

تا یک ثانیه، جهان به حدود 10^{10} کلین سرد شد، که به کوارک‌ها و گلوئون‌ها اجازه داد از طریق نیروی قوی به پروتون‌ها و نوترون‌ها متراکم شوند. در چند دقیقه بعدی — دوران هسته‌زایی بیگ بنگ (BBN) — پروتون‌ها و نوترون‌ها برای تشکیل عناصر اولیه همجوشی کردند: حدود 75% هیدروژن-1 (^1H ، پروتون‌ها)، 25% هلیوم-4 (^4He)، و مقادیر ناچیزی از دوتریوم (^2H)، هلیوم-3 (^3He)، و لیتیوم-7 (^7Li). دمای بالا ($\sim 10^9$ کلین) این هسته‌ها را یونیزه نگه داشت و پلاسمایی از ذرات باردار را حفظ کرد.

بازترکیب و پس‌زمینه میکروموجی کیهانی

تا حدود 380,000 سال (انحراف به قرمز $z \approx 1100$)، جهان به حدود 3000 کلوین سرد شد و به پروتون‌ها و هسته‌های هلیوم اجازه داد تا در بازترکیب، الکترون‌ها را جذب کنند. این کار پلازما را خنثی کرد و اتم‌های پایدار هیدروژن و هلیوم را تشکیل داد. فوتون‌ها، که قبلاً توسط الکترون‌های آزاد پراکنده می‌شدند، آزاد شدند و پس‌زمینه میکروموجی کیهانی (CMB) را ایجاد کردند — یک تصویر لحظه‌ای حرارتی که اکنون به دلیل انبساط به 2.7 کلوین انتقال به قرمز یافته است. نوسانات کوچک CMB (~ 1 بخش در 10^5) بذره‌های ساختار کیهانی را آشکار می‌کنند که امروزه توسط رصدخانه‌هایی مانند پلانک قابل تشخیص هستند.

دوران تاریک

پس از بازترکیب، جهان وارد دوران تاریک شد، دوره‌ای بدون ستاره که تحت سلطه گاز خنثی هیدروژن و هلیوم بود. فروپاشی گرانشی در هاله‌های ماده تاریک شروع به تشکیل توده‌های متراکم کرد و صحنه را برای اولین ستارگان آماده کرد. عناصر اولیه، ساده و اندک، مواد خام برای تشکیل ستارگان بودند و ماده تاریک ساختار گرانشی را فراهم کرد.

فصل دوم: ستارگان جمعیت سوم — نسل اول: پیشگامان کیهانی

ستارگان جمعیت سوم، اولین نسل ستاره‌ای، حدود 100 تا 400 میلیون سال پس از بیگ بنگ ($z \approx 20-10$) شعله‌ور شدند، دوران تاریک را پایان دادند و “سپیده‌دمان کیهانی” را آغاز کردند. این ستارگان در جهانی متراکم ($\sim 10^4-10^{24}$ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، گرم ($100-200$ CMB کلوین)، و از نظر شیمیایی دست‌نخورده تشکیل شدند که تقریباً به‌طور کامل از هیدروژن ($\sim 76\%$) و هلیوم ($\sim 24\%$) با فلزی بودن $Z \approx 10^{-10}$ تشکیل شده بود.

محیط و تشکیل

چگالی بالای جهان اولیه به ابرهای گازی اجازه داد تا در مینی‌هاله‌های ماده تاریک ($\sim 10^5-10^6$ جرم خورشیدی) فروپاشی کنند و به چگالی‌های $\sim 10^4-10^6$ ذره بر سانتی‌متر مکعب برسند. فشرده‌سازی گرانشی ابرها را تا $\sim 10^3-10^4$ کلوین گرم کرد، اما خنک‌سازی به هیدروژن مولکولی (H_2) وابسته بود که از طریق واکنش‌هایی مانند $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$ ، و سپس $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ تشکیل شد. خنک‌سازی H_2 از طریق انتقال‌های چرخشی و ارتعاشی ناکارآمد بود، ابرها را گرم نگه داشت و از تکه‌تکه شدن جلوگیری کرد. جرم جینز بالا ($\sim 10^2-10^3$ جرم خورشیدی) به نفع پروتوستاره‌های عظیم بود.

ویژگی‌ها

ستارگان جمعیت سوم احتمالاً عظیم ($10-1000$ جرم خورشیدی)، داغ ($\sim 10^5$ کلوین دمای سطح)، و درخشان بودند و پرتوهای فرابنفش شدیدی ساطع می‌کردند. جرم بالای آن‌ها همجوشی سریع را، عمدتاً از طریق چرخه CNO (با استفاده از مقادیر ناچیز کربن از همجوشی اولیه)، به پیش راند و سوخت را در حدود $1-3$ میلیون سال مصرف کرد. سرنوشت آن‌ها متفاوت بود: - **10-100 جرم خورشیدی**: ابرنواهای فروپاشی هسته‌ای، که فلزاتی مانند کربن، اکسیژن و آهن را پراکنده کردند. - **بیش از 100 جرم خورشیدی**: فروپاشی مستقیم به سیاه‌چاله‌ها، که احتمالاً بذر کوزارهای اولیه را کاشتند. - **140-260 جرم خورشیدی**: ابرنواهای ناپایداری جفتی، که تولید جفت‌های الکترون-پوزیترون باعث تخریب کامل شد و هیچ باقیمانده‌ای باقی نگذاشت.

اهمیت

ستارگان جمعیت سوم معماران کیهانی بودند. پرتوهای فرابنفش آن‌ها هیدروژن را یونیزه کردند و باعث باز یونیزاسیون (z 15–6) شدند که جهان را شفاف کرد. ابرنواهای آن‌ها محیط بین‌ستاره‌ای (ISM) را با فلزات غنی کردند و امکان تشکیل ستارگان جمعیت دوم را فراهم کردند. بازخورد از پرتوها، بادها و انفجارها تشکیل ستارگان را تنظیم کرد و کهکشان‌های اولیه را شکل داد. بقایای سیاه‌چاله‌های آن‌ها ممکن است بذره‌های سیاه‌چاله‌های عظیم در مراکز کهکشانی را تشکیل داده باشند.

تشخیص احتمالی و چشم‌اندازهای آینده

رصد مستقیم ستارگان جمعیت سوم به دلیل فاصله و عمر کوتاه آن‌ها چالش‌برانگیز است. تلسکوپ فضایی جیمز وب (JWST) سرنخ‌هایی ارائه داده است: در سال 2023، GN-z11 ($z \approx 11$) انتشار هلیوم یونیزه (He II) بدون خطوط فلزی را نشان داد که حاکی از ستارگان جمعیت سوم است. RX J2129-z8He II (2022، $z \approx 8$) نیز نشانه‌های احتمالی را نشان داد، هرچند هسته‌های فعال کهکشانی (AGN) یا ستارگان جمعیت دوم فقیر از فلز همچنان گزینه‌های جایگزین هستند. تأیید نیاز به طیف‌سنجی با وضوح بالا برای تأیید نبود فلزات و انتشار قوی He II 1640Å دارد.

ابزارهای آینده مانند تلسکوپ بسیار بزرگ (ELT) و NIRSpec جیمز وب، $z > 10-20$ را کاوش خواهند کرد و کهکشان‌های دست‌نخورده را هدف قرار می‌دهند. شبیه‌سازی‌ها پیشنهاد می‌کنند که ابرنواهای جمعیت سوم از طریق منحنی‌های نوری منحصربه‌فرد یا امواج گرانشی از انفجارهای ناپایداری جفتی قابل تشخیص هستند. ستارگان جمعیت دوم فقیر از فلز، مانند آن‌هایی در هاله کهکشانی، ممکن است بازده ابرنواهای جمعیت سوم را حفظ کنند و شواهد غیرمستقیمی ارائه دهند. این تلاش‌ها می‌توانند جرم، فلزی بودن و نقش ستارگان جمعیت سوم در تکامل کیهانی را آشکار کنند.

فصل سوم: ستارگان جمعیت دوم — نسل دوم: پلی به سوی پیچیدگی

ستارگان جمعیت دوم حدود 400 میلیون تا چند میلیارد سال پس از بیگ بنگ ($z \approx 10-3$) شکل گرفتند، زمانی که کهکشان‌ها در جهانی کمتر متراکم و خنک‌تر جمع شدند. این ستارگان پلی بین دوران اولیه و کهکشان‌های مدرن ایجاد کردند و از طریق غنی‌سازی فلزی، پیچیدگی را ساختند.

محیط و تشکیل

چگالی متوسط جهان با انبساط کاهش یافت، اما ابرهای تشکیل‌دهنده ستارگان در کهکشان‌های اولیه به 10^4-10^2 ذره بر سانتی‌متر مکعب در هاله‌های ماده تاریک بزرگ‌تر (10^9-10^7 جرم خورشیدی) رسیدند. CMB به 10^2-20 کلوین سرد شد و ابرها، که توسط ابرنواهای جمعیت سوم غنی شده بودند، فلزی بودن $Z \approx 10^{-4}-10^{-2}$ داشتند. فلزات (مانند کربن، اکسیژن) از طریق خطوط اتمی ([C II] 158 میکرومتر، [O I] 63 میکرومتر) خنک‌سازی را ممکن کردند و دما را به 10^2-10^3 کلوین کاهش دادند. مقادیر ناچیز غبار، خنک‌سازی را از طریق انتشار حرارتی تقویت کرد. جرم جینز کاهش یافته ($\sim 1-100$ جرم خورشیدی) امکان تکه‌تکه شدن را فراهم کرد و جرم‌های ستاره‌ای متنوعی تولید کرد.

ویژگی‌ها

ستارگان جمعیت دوم از جرم پایین (0.1–1 جرم خورشیدی، طول عمر $< 10^{10}$ سال) تا عظیم (10–100 جرم خورشیدی، 10^6-10^7 سال) متغیر هستند. آن‌ها در هاله‌های کهکشانی، خوشه‌های کروی (مانند M13) و برآمدگی‌های کهکشانی اولیه

یافت می‌شوند و دارای فلزی بودن پایین هستند که طیف‌های قرمزتری تولید می‌کنند. تشکیل آن‌ها در خوشه‌ها نشان‌دهنده تکه‌تکه شدن است و ابرنواهای آن‌ها ISM را تا $\sim 0.1 Z$ غنی‌تر کردند.

اهمیت

ستارگان جمعیت دوم تکامل کهکشانی را پیش بردند. ابرنواهای آن‌ها عناصر سنگین‌تر (مانند سیلیسیم، منیزیم) را سنتز کردند و غبار و مولکول‌هایی را تشکیل دادند که تشکیل ستارگان را تسهیل کردند. ستارگان جمعیت دوم با جرم پایین، قابل مشاهده در خوشه‌های کروی و هاله راه شیری، امضاهای ابرنواهای جمعیت سوم را حفظ می‌کنند. بازخورد از پرتوها و انفجارها دیسک‌های کهکشانی را شکل داد و تشکیل ستارگان را تنظیم کرد. آن‌ها پایه‌ای برای ستارگان جمعیت اول و سیستم‌های سیاره‌ای فراهم کردند.

شواهد رصدی

ستارگان جمعیت دوم در خوشه‌های کروی، هاله‌های کهکشانی و به‌عنوان ستارگان فقیر از فلز (مانند $HD\ 122563$, $Z \approx 0.001$) قابل مشاهده هستند. ستارگان به شدت فقیر از فلز ($Z < 10^{-3}$) ممکن است بازده‌های جمعیت سوم را منعکس کنند. بررسی‌هایی مانند SDSS و Gaia و مشاهدات آینده ELT درک ما از تشکیل جمعیت دوم و تجمع کهکشان‌های اولیه را بهبود خواهند بخشید.

فصل چهارم: ستارگان جمعیت اول — نسل سوم: عصر سیارات و حیات

ستارگان جمعیت اول، که از حدود 10 میلیارد سال پیش تا کنون ($0 < z \approx 2$) تشکیل شده‌اند، بر کهکشان‌های بالغ مانند دیسک راه شیری تسلط دارند. این ستارگان، از جمله خورشید، از طریق محیط‌های غنی از فلز خود، امکان وجود سیارات و حیات را فراهم کردند.

محیط و تشکیل

جهان پراکنده است (10^{-30} گرم بر سانتی‌متر مکعب)، با تشکیل ستارگان در ابرهای مولکولی متراکم (10^2 – 10^6 ذره بر سانتی‌متر مکعب) که توسط امواج چگالی مارپیچی یا ابرنواها تحریک می‌شوند. CMB 2.7 کلوین است و ابرها، با $Z \approx 0.1$ – 2 ، از طریق خطوط مولکولی (مانند CO، HCN) و انتشار غبار به 10^2 – 20 کلوین خنک می‌شوند. جرم جینز پایین (10 – 0.1 جرم خورشیدی) ستارگان کوچک را ترجیح می‌دهد، اگرچه ستارگان عظیم در مناطق فعال تشکیل می‌شوند.

ویژگی‌ها

ستارگان جمعیت اول از کوتوله‌های قرمز (0.08 – 1 جرم خورشیدی، $< 10^{10}$ سال) تا ستارگان نوع O (100 – 10 جرم خورشیدی، $\sim 10^6$ – 10^7 سال) متغیر هستند. فلزی بودن بالای آن‌ها طیف‌های درخشان و غنی از فلز با خطوطی مانند Fe I و Ca II تولید می‌کند. آن‌ها در خوشه‌های باز (مانند خوشه پروین) یا سحابی‌ها (مانند شکارچی) تشکیل می‌شوند. خورشید، یک ستاره جمعیت اول 4.6 میلیارد ساله، نمونه‌ای معمول است.

اهمیت: سیارات و حیات

فلزی بودن بالا امکان تشکیل سیارات سنگی را فراهم کرد، زیرا غبار و فلزات در دیسک‌های پیش‌سیاره‌ای، سیاره‌سازها را تشکیل دادند. دیسک خورشید زمین را حدود 4.5 میلیارد سال پیش تولید کرد، با سیلیسیم، اکسیژن و آهن که سیارات زمین‌مانند را تشکیل دادند و کربن مولکول‌های آلی را ممکن ساخت. خروجی پایدار خورشید و طول عمر طولانی آن، منطقه‌ای قابل سکونت برای آب مایع را حفظ کرد و حیات مبتنی بر کربن را طی میلیاردها سال تقویت کرد. تنوع ستارگان جمعیت اول، غنی‌سازی مداوم ISM را پیش می‌برد و تشکیل ستارگان و سیارات را پایدار نگه می‌دارد.

شواهد رصدی

ستارگان جمعیت اول بر دیسک راه شیری تسلط دارند و در مناطق تشکیل ستاره و خوشه‌ها قابل مشاهده هستند. بررسی‌های سیارات فراخورشیدی (مانند کپلر، TESS) نشان می‌دهند که ستارگان با فلزی بودن بالا احتمال بیشتری برای میزبانی سیارات دارند، با حدود 50٪ از ستارگان شبه‌خورشیدی که ممکن است جهان‌های سنگی را در خود جای دهند. طیف‌سنجی ترکیبات غنی از فلز آن‌ها را آشکار می‌کند و غنی‌سازی تجمعی را ردیابی می‌کند.

فصل پنجم: نسل‌های ستاره‌ای آینده: کیهانی تاریک‌تر و سردتر

با رانش انرژی تاریک به انبساط کیهانی، جهان سردتر، کمتر متراکم و غنی‌تر از فلز خواهد شد و تشکیل ستارگان را تغییر خواهد داد. تا حدود 100 میلیارد سال ($z \approx -1$)، تشکیل ستارگان کاهش خواهد یافت و تا حدود 10^{12} سال ممکن است متوقف شود و به یک کیهان تاریک و آنتروپیک منجر شود.

شرایط آینده

چگالی متوسط کاهش خواهد یافت و کهکشان‌ها را ایزوله خواهد کرد. CMB به $>> 0.3$ کلوین سرد خواهد شد و ابرها، با $Z \approx 2-5$ ، از طریق فلزات (مانند [Fe II]، [Si II]) و غبار به‌طور مؤثر خنک خواهند شد. تشکیل ستارگان به جیب‌های گازی نادر وابسته خواهد بود، زیرا بیشتر گاز کهکشانی توسط تشکیل ستارگان، ابرنواها یا جت‌های سیاه‌چاله‌ها مصرف می‌شود. ادغام‌های کهکشانی ممکن است به‌طور موقت تشکیل ستارگان را تقویت کنند.

ویژگی‌های ستارگان آینده

ستارگان آینده کوتوله‌های قرمز با جرم پایین (0.08–1 جرم خورشیدی، 10^{10} – 10^{12} سال) خواهند بود، به دلیل خنک‌سازی مؤثر و جرم جینز پایین. ستارگان عظیم نادر خواهند بود، زیرا فلزی بودن بالا مانع از تجمع پروتوستاره‌های بزرگ می‌شود. این ستارگان نور مادون قرمز ضعیفی ساطع خواهند کرد و کهکشان‌ها را تاریک‌تر می‌کنند. دیسک‌های غنی از فلز سیارات سنگی را ترجیح خواهند داد.

چشم‌انداز کیهانی

کهکشان‌ها با مرگ ستارگان محو خواهند شد و کوتوله‌های سفید، ستارگان نوترونی و سیاه‌چاله‌ها را باقی خواهند گذاشت. حیات ممکن است به انرژی مصنوعی یا واحه‌های ستاره‌ای نادر در جهانی که به “مرگ گرمایی” نزدیک می‌شود وابسته باشد.

فصل ششم: هسته‌زایی ستاره‌ای: آهنگری عناصر و انفجارهای نوترینویی

هسته‌زایی ستاره‌ای کوره کیهانی است که در آن ستارگان عناصر سنگین‌تر را از سبک‌ترها سنتز می‌کنند و تکامل شیمیایی جهان را پیش می‌برند. از همجوشی آرام در هسته‌های ستاره‌ای تا فرآیندهای انفجاری در ابرنواها، عناصری را تولید می‌کند که سیارات، حیات و کهکشان‌ها را تشکیل می‌دهند. زنجیره پروتون-پروتون، چرخه CNO، فرآیند سه‌گانه آلفا، فرآیندهای s، r و p، و فوتوتجزیه، که در انفجارهای نوترینویی به اوج می‌رسند، مکانیسم‌های پیچیده تشکیل عناصر را آشکار می‌کنند و امکان تشخیص سریع ابرنواها را فراهم می‌کنند.

زنجیره پروتون-پروتون

زنجیره پروتون-پروتون (pp) ستارگان با جرم پایین ($T \sim 10^7$ کلوین، مانند خورشید) را نیرو می‌دهد. این فرآیند با همجوشی دو پروتون برای تشکیل یک دی‌پروتون آغاز می‌شود که از طریق واپاشی بتا به دوتریوم تبدیل می‌شود (${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ ، که یک نوترینو آزاد می‌کند). مراحل بعدی شامل موارد زیر است: ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (انتشار فوتون). ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$ ، که دو پروتون آزاد می‌کند.

زنجیره pp شاخه‌هایی (ppI، ppII، ppIII) دارد که نوترینوهای با انرژی‌های مختلف (0.4–6 MeV) تولید می‌کنند. این فرآیند کند است و خورشید را برای حدود 10^{10} سال پایدار نگه می‌دارد و نوترینوهای آن، که توسط آزمایش‌هایی مانند Borexino شناسایی شده‌اند، مدل‌های همجوشی ستاره‌ای را تأیید می‌کنند.

چرخه CNO

چرخه کربن-نیتروژن-اکسیژن (CNO) در ستارگان عظیم (< 1.3 جرم خورشیدی، $T > 1.5 \times 10^7$ کلوین) غالب است. این چرخه از ${}^{12}\text{C}$ ، ${}^{14}\text{N}$ و ${}^{16}\text{O}$ به‌عنوان کاتالیزور برای همجوشی چهار پروتون به ${}^4\text{He}$ استفاده می‌کند: ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$ - ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ - ${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$ - ${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ - ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ - ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$

چرخه CNO سریع‌تر است، همجوشی سریع ($\sim 10^6$ – 10^7 سال) را پیش می‌برد و نوترینوهای با انرژی بالاتر (~ 1 – 10 MeV) تولید می‌کند که توسط Super-Kamiokande قابل تشخیص هستند.

فرآیند سه‌گانه آلفا

در ستارگان < 8 جرم خورشیدی، احتراق هلیوم ($T \sim 10^8$ کلوین) سه هسته ${}^4\text{He}$ را از طریق فرآیند سه‌گانه آلفا به ${}^{12}\text{C}$ همجوشی می‌کند. دو ${}^4\text{He}$ یک ${}^8\text{Be}$ ناپایدار تشکیل می‌دهند که یک ${}^4\text{He}$ دیگر را جذب می‌کند تا ${}^{12}\text{C}$ را تشکیل دهد و از یک رزونانس در سطوح انرژی ${}^{12}\text{C}$ بهره می‌برد. برخی از ${}^{12}\text{C}$ یک ${}^4\text{He}$ را جذب می‌کنند تا ${}^{16}\text{O}$ تشکیل دهند (${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$). این فرآیند، که حدود 10^5 سال طول می‌کشد، برای تولید کربن و اکسیژن حیاتی است و حیات را ممکن می‌سازد.

مراحل احتراق پیشرفته

ستارگان عظیم مراحل احتراق سریعی را طی می‌کنند: - احتراق کربن ($T \sim 6 \times 10^8$ کلوین، $\sim 10^3$ سال): ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$ یا ${}^{23}\text{Na} + {}^1\text{H}$ - احتراق نئون ($T \sim 1.2 \times 10^9$ کلوین، ~ 1 سال): ${}^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^4\text{He}$ - احتراق اکسیژن ($T \sim 2 \times 10^9$ کلوین، ~ 6 ماه): ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$ - احتراق سیلیسیم ($T \sim 3 \times 10^9$ کلوین، ~ 1 روز): ${}^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow {}^{56}\text{Fe}$ ، ${}^{56}\text{Ni}$ از طریق فوتوتجزیه و جذب.

عناصر قله آهنی پایان همجوشی را نشان می‌دهند، زیرا واکنش‌های بعدی گرماگیر هستند.

فرآیند S (جذب کند نوترون)

فرآیند S در ستارگان AGB (8-1 جرم خورشیدی) و برخی ستارگان عظیم رخ می‌دهد، جایی که نوترون‌ها به آرامی جذب می‌شوند و امکان واپاشی بتا بین جذب‌ها را فراهم می‌کنند (مانند $^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ ، سپس $^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Co} + e^-$ $\bar{\nu}_e$). نوترون‌ها از واکنش‌هایی مانند $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ در پوسته‌های هلیومی ستارگان AGB می‌آیند. این فرآیند عناصری مانند استرانسیم، باریوم و سرب را طی $10^3 \sim 10^5$ سال تولید می‌کند و ISM را از طریق بادهای ستاره‌ای غنی می‌کند.

فرآیند R (جذب سریع نوترون)

فرآیند r در محیط‌های افراطی (ابرنواها، ادغام‌های ستاره نوترونی) با شارهای نوترونی $\sim 10^{22}$ نوترون بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه رخ می‌دهد. هسته‌ها نوترون‌ها را سریع‌تر از واپاشی بتا جذب می‌کنند و عناصر سنگینی مانند طلا، نقره و اورانیوم را تشکیل می‌دهند (مانند ^{56}Fe + چندین $n \rightarrow ^{238}\text{U}$). این فرآیند در موج‌های شوک ابرنواها یا پرتابه‌های ادغام چند ثانیه طول می‌کشد و حدود 50٪ از عناصر سنگین را تشکیل می‌دهد.

فرآیند P (جذب پروتون/فوتوتجزیه)

فرآیند p ایزوتوپ‌های غنی از پروتون نادر (مانند ^{92}Mo ، ^{96}Ru) را در ابرنواها تولید می‌کند. پرتوهای گاما پرانرژی ($\sim T$ $10^9 \times 2-3$ کلین) هسته‌های فرآیندهای S و r را فوتوتجزیه می‌کنند (مانند $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$)، یا پروتون‌ها در محیط‌های غنی از پروتون جذب می‌شوند. کارایی پایین آن نادر بودن هسته‌های p را توضیح می‌دهد.

فوتوتجزیه در ابرنواها

در ابرنواهای فروپاشی هسته‌ای، فوتوتجزیه در هسته آهنی ($T > 10^{10}$ کلین) ^{56}Fe را به پروتون‌ها، نوترون‌ها و ^4He تجزیه می‌کند (مانند $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$). این فرآیند گرماگیر فشار را کاهش می‌دهد و فروپاشی به یک ستاره نوترونی یا سیاه‌چاله را تسریع می‌کند. موج شوک هسته‌زایی انفجاری را تحریک می‌کند و عناصر را پرتاب می‌کند.

انفجار نوترینو و تشخیص ابرنواها

طی فروپاشی هسته، حدود 99٪ از انرژی ابرنواها ($\sim 10^{46}$ ژول) به صورت نوترینو از طریق نوترینوآسیون ($p + e^- \rightarrow n + \bar{\nu}_e$) و فرآیندهای حرارتی ($e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$) آزاد می‌شود. انفجار حدود 10 ثانیه‌ای قبل از انفجار نوری رخ می‌دهد و توسط امکاناتی مانند Super-Kamiokande، IceCube و DUNE قابل تشخیص است. حدود 20 نوترینوی SN 1987A این را تأیید کردند. مثلث‌بندی از چندین آشکارساز ابرنواها را در چند ثانیه مکان‌یابی می‌کند و امکان مشاهدات بعدی در طول موج‌های نوری، اشعه ایکس و گاما را فراهم می‌کند که ویژگی‌های پیش‌ساز و بازده‌های هسته‌زایی را آشکار می‌کنند.

فراوانی نابرابر

فراوانی عناصر هسته‌زایی را منعکس می‌کند: $\sim 98\%$ از H ، He ، C ، O ، Ne ، Mg : BBN. فراوان از همجوشی. Fe ، Ni : قله به دلیل پایداری هسته‌ای. Au ، U : نادر، از فرآیند r. P : نادرترین، از فرآیند p.

مطالعه موردی: اورانیوم-235 و اورانیوم-238

^{235}U و ^{238}U از طریق فرآیند r در ابرنواها یا ادغام‌های ستاره نوترونی تشکیل می‌شوند. ^{235}U (نیمه‌عمر ~ 703.8 میلیون سال) سریع‌تر از ^{238}U (نیمه‌عمر ~ 4.468 میلیارد سال) واپاشی می‌کند. در زمان تشکیل زمین (~ 4.54 میلیارد سال پیش)، نسبت $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ حدود 0.31 ($\sim 23.7\% \text{ } ^{235}\text{U}$) بود. حدود 2 میلیارد سال پیش، این نسبت به حدود 0.037 ($\sim 3.6\% \text{ } ^{235}\text{U}$) رسید، که برای شکافت کافی بود. راکتور Oklo در گابن زمانی تشکیل شد که سنگ معدن اورانیوم با کیفیت بالا ($\sim 20\text{--}60\%$ اکسیدهای اورانیوم)، که توسط فرآیندهای رسوبی متمرکز شده بود، با آب زیرزمینی که نوترون‌ها را تعدیل می‌کرد، تعامل کرد. هیچ غنی‌سازی ایزوتوپی رخ نداد؛ $\sim 3.6\% \text{ } ^{235}\text{U}$ طبیعی امکان بحرانی شدن را فراهم کرد و واکنش‌های شکافت متناوب را برای حدود 150,000–1 میلیون سال حفظ کرد و ایزوتوپ‌هایی مانند ^{143}Nd و گرما تولید کرد.

نتیجه‌گیری: ما غبار ستاره‌ها هستیم، از آتش‌های کیهانی باززایی شده‌ایم

از تولد آتشین بیگ بنگ تا آینده‌ای در حال محو شدن، ستارگان جهان را شکل داده‌اند. ستارگان جمعیت سوم کیهان را شعله‌ور کردند و اولین فلزات را آهنگری کردند. ستارگان جمعیت دوم پیچیدگی را ساختند و ستارگان جمعیت اول سیارات و حیات را ممکن کردند. هسته‌زایی ستاره‌ای — از طریق زنجیره pp، چرخه CNO، فرآیند سه‌گانه آلفا، فرآیندهای r، s، و p، و فوتوتجزیه — عناصر را خلق کرد، با انفجارهای نوترینویی که پراکندگی انفجاری آن‌ها را نشان می‌دادند. راکتور Oklo، که توسط فراوانی طبیعی ^{235}U هدایت می‌شد، این میراث را تجسم می‌بخشد. ما غبار ستاره‌ها هستیم، از ستارگان باستانی باززایی شده‌ایم و عناصر آن‌ها را در بدن‌هایمان حمل می‌کنیم. در حالی که جهان تاریک‌تر می‌شود، میراث کیهانی ما ممکن است نسل‌های آینده را الهام بخشد تا ستارگان جدیدی را شعله‌ور کنند و خلقت را در خلأ آنتروپیک ادامه دهند.