

बिग बैंग से तारकीय नाभिकीय संश्लेषण तक: हम तारों की धूल से बने हैं

ब्रह्मांड एक विशाल, गतिशील कैनवास है, जो तारों की रोशनी और उनके द्वारा निर्मित तत्वों से रंगा हुआ है। बिग बैंग के विनाशकारी जन्म से लेकर एक ठंडे, लुप्तप्राय ब्रह्मांड के दूरस्थ भविष्य तक, तारों की पीढ़ियों—जनसंख्या III, II और I, और उनके संभावित उत्तराधिकारियों—ने ब्रह्मांड के रासायनिक, भौतिक और जैविक विकास को आकार दिया है। अपनी प्रज्वलित जिंदगी और विस्फोटक मृत्यु के माध्यम से, तारों ने उन तत्वों को बनाया है जो आकाशगंगाओं, ग्रहों और स्वयं जीवन को बनाते हैं। यह निबंध ब्रह्मांडीय युगों की खोज करता है, तारों की पीढ़ियों के मूल, पर्यावरण और विरासत में गहराई से उतरता है, और तारकीय नाभिकीय संश्लेषण—उन कीमियाई प्रक्रियाओं का विस्तृत अध्ययन करता है जो तारों को शक्ति प्रदान करती हैं और ब्रह्मांड के तत्वों को उत्पन्न करती हैं। यह उस गहन सत्य पर समाप्त होता है कि हम तारों की धूल हैं, प्राचीन तारों की राख से पुनर्जनन हुए, और एक अंधेरे होते ब्रह्मांड में तारों के निर्माण के भविष्य पर विचार करता है।

अध्याय 1: बिग बैंग और ब्रह्मांड का प्रभात

ब्रह्मांड की शुरुआत लगभग 13.8 अरब साल पहले बिग बैंग के साथ हुई, एक ऐसी घटना जिसमें अनंत घनत्व और तापमान था, जहां सारी सामग्री, ऊर्जा, स्थान और समय एक विलक्षणता से उत्पन्न हुए। यह प्रारंभिक नरक, 10^{32} K से अधिक गर्म, मूलभूत बलों—गुरुत्वाकर्षण, विद्युत चुंबकत्व, मजबूत नाभिकीय बल और कमजोर नाभिकीय बल—को एक एकीकृत अवस्था में रखता था, जो कॉस्मिक समरूपता का एक क्षणभंगुर क्षण था।

ब्रह्मांडीय विस्तार और ठंडक

10^{-36} सेकंड से भी कम समय में, मुद्रास्फीति—एक घातीय विस्तार—ने ब्रह्मांड को उपपरमाणविक पैमानों से मैक्रोस्कोपिक आयामों तक खींच लिया, अनियमितताओं को समतल किया और घनत्व उतार-चढ़ाव के बीज बोए जो बाद में आकाशगंगाओं का निर्माण करेंगे। 10^{-12} सेकंड तक, मजबूत बल विद्युत-कमजोर बल से अलग हो गया, इसके बाद विद्युत चुंबकत्व और कमजोर बल का 10^{-6} सेकंड के आसपास अलगाव हुआ, जब तापमान 10^{15} K से नीचे गिर गया। इन अलगावों ने भौतिक नियमों को स्थापित किया जो पदार्थ को नियंत्रित करते हैं, क्वार्कों से लेकर आकाशगंगाओं तक।

प्रारंभिक तत्वों का निर्माण

एक सेकंड के बाद, ब्रह्मांड लगभग 10^{10} K तक ठंडा हो गया, जिससे क्वार्क और ग्लूऑन मजबूत बल के माध्यम से प्रोटॉन और न्यूट्रॉन में संकुचित हो सके। अगले कुछ मिनटों के दौरान—बिग बैंग नाभिकीय संश्लेषण (BBN) का युग—प्रोटॉन और न्यूट्रॉन प्रारंभिक तत्वों को बनाने के लिए संनादित हुए: लगभग 75% हाइड्रोजन-1 (^1H , प्रोटॉन), 25% हीलियम-4 (^4He), और ड्यूटेरियम (^2H), हीलियम-3 (^3He) और लिथियम-7 (^7Li) की सूक्ष्म मात्राएँ। उच्च तापमान ($\sim 10^9$ K) ने इन नाभिकों को आयनित रखा, जिससे आवेशित कणों का प्लाज्मा बना रहा।

पुनर्संयोजन और कॉस्मिक माइक्रोवेव पृष्ठभूमि

लगभग 380,000 वर्ष बाद (लाल विचलन $z \approx 1100$), ब्रह्मांड लगभग 3000 K तक ठंडा हो गया, जिससे प्रोटॉन और हीलियम नाभिक पुनर्संयोजन में इलेक्ट्रॉनों को पकड़ सके। इससे प्लाज्मा तटस्थ हो गया, जिससे हाइड्रोजन और हीलियम के स्थिर परमाणु बने। पहले मुक्त इलेक्ट्रॉनों द्वारा बिखरे हुए फोटॉन मुक्त हो गए, जिससे कॉस्मिक माइक्रोवेव पृष्ठभूमि (CMB) बनी—एक थर्मल स्नैपशॉट जो अब विस्तार के कारण 2.7 K तक लाल विचलन में है। CMB की छोटी-छोटी उतार-चढ़ाव ($\sim 10^{-5}$ में 1 हिस्सा) कॉस्मिक संरचना के बीजों को प्रकट करते हैं, जो आज प्लैंक जैसे वेधशालाओं द्वारा पता लगाए जा सकते हैं।

अंधेरे युग

पुनर्संयोजन के बाद, ब्रह्मांड अंधेरे युगों में प्रवेश कर गया, एक तारारहित युग जो तटस्थ हाइड्रोजन और हीलियम गैस द्वारा प्रभुत्व में था। अंधेरे पदार्थ के हेलो में गुरुत्वाकर्षण पतन ने सघन समूहों का निर्माण शुरू किया, जिसने पहले तारों के लिए मंच तैयार किया। प्रारंभिक तत्व, सरल और दुर्लभ, तारा निर्माण के लिए कच्चा माल थे, और अंधेरा पदार्थ गुरुत्वाकर्षण ढांचा प्रदान करता था।

अध्याय 2: जनसंख्या III तारे – पीढ़ी 1: कॉस्मिक अग्रदूत

जनसंख्या III तारे, तारों की पहली पीढ़ी, बिग बैंग के लगभग 100-400 मिलियन वर्ष बाद ($z \approx 20-10$) प्रज्वलित हुए, जिसने अंधेरे युगों को समाप्त किया और “कॉस्मिक प्रभात” की शुरुआत की। ये तारे एक सघन ($\sim 10^{-2} \text{ g/cm}^3$), गर्म (CMB $\sim 20-100$ K) और रासायनिक रूप से शुद्ध ब्रह्मांड में बने, जो लगभग पूरी तरह से हाइड्रोजन ($\sim 76\%$) और हीलियम ($\sim 24\%$) से बना था, जिसमें धात्विकता $Z \approx 10^{-10} Z_{\odot}$ थी।

पर्यावरण और निर्माण

प्रारंभिक ब्रह्मांड की उच्च घनत्व ने गैस बादलों को अंधेरे पदार्थ के मिनीहेलो ($\sim 10^5-10^6$ सौर द्रव्यमान) में ढहने की अनुमति दी, जो $\sim 10^{-4}-10^{-6}$ कण/cm³ की घनत्व तक पहुँचे। गुरुत्वाकर्षण संपीड़न ने बादलों को $\sim 10^3-10^4$ K तक गर्म किया, लेकिन ठंडक आणविक हाइड्रोजन (H_2) पर निर्भर थी, जो $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$, और फिर $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ जैसी प्रतिक्रियाओं के माध्यम से बनी। H_2 ठंडक, घूर्णन और कंपन संक्रमणों के माध्यम से, अक्षम थी, जिसने बादलों को गर्म रखा और विखंडन को रोका। उच्च जीन्स द्रव्यमान ($\sim 10^2-10^3$ सौर द्रव्यमान) ने विशाल प्रोटो-तारों को प्राथमिकता दी।

विशेषताएँ

जनसंख्या III तारे संभवतः विशाल (10-1000 सौर द्रव्यमान), गर्म ($\sim 10^5$ K सतह तापमान) और चमकीले थे, जो तीव्र पराबैंगनी विकिरण उत्सर्जित करते थे। उनके उच्च द्रव्यमान ने तेजी से संनादन को बढ़ावा दिया, मुख्य रूप से CNO चक्र (प्रारंभिक संनादन से कार्बन की निशान मात्रा का उपयोग करके), जिसने $\sim 1-3$ मिलियन वर्षों में ईंधन को समाप्त कर दिया। उनके भाग्य भिन्न थे: - **10-100 सौर द्रव्यमान:** कोर पतन सुपरनोवा, जो कार्बन, ऑक्सीजन और लोहे जैसे धातुओं को बिखेरते थे। - **100 सौर द्रव्यमान से अधिक:** प्रत्यक्ष पतन से ब्लैक होल में, जो संभवतः प्रारंभिक क्वासरों के बीज बोए। - **140-260 सौर द्रव्यमान:** जोड़ी अस्थिरता सुपरनोवा, जहां इलेक्ट्रॉन-पॉजिट्रॉन जोड़ों का उत्पादन पूर्ण विघटन को प्रेरित करता था, बिना अवशेष छोड़े।

महत्व

जनसंख्या III तारे कॉस्मिक वास्तुकार थे। उनकी पराबैंगनी विकिरण ने हाइड्रोजन को आयनित किया, जिसने पुनर्जनन ($z \approx 6-15$) को प्रेरित किया, जिससे ब्रह्मांड पारदर्शी हो गया। उनके सुपरनोवा ने अंतरतारकीय माध्यम (ISM) को धातुओं से समृद्ध किया, जिससे जनसंख्या II तारों का निर्माण संभव हुआ। विकिरण, हवाओं और विस्फोटों से प्रतिक्रिया ने तारा निर्माण को नियंत्रित किया और प्रारंभिक आकाशगंगाओं को आकार दिया। उनके ब्लैक होल अवशेषों ने गैलेक्टिक केंद्रों में सुपरमैसिव ब्लैक होल के बीज बनाए हो सकते हैं।

संभावित खोज और भविष्य की संभावनाएँ

जनसंख्या III तारों का प्रत्यक्ष अवलोकन उनकी दूरी और छोटी जीवन अवधि के कारण चुनौतीपूर्ण है। जेम्स वेब अंतरिक्ष दूरबीन (JWST) ने संकेत दिए हैं: 2023 में, GN-z11 ($z \approx 11$) ने आयनित हीलियम (He II) उत्सर्जन को धातु रेखाओं के बिना दिखाया, जो जनसंख्या III तारों की ओर इशारा करता है। RX J2129-z8He II (2022, $z \approx 8$) ने भी संभावित संकेत दिखाए, हालांकि सक्रिय गैलेक्टिक नाभिक (AGN) या धातु-गरीब जनसंख्या II तारे वैकल्पिक रहते हैं। पुष्टि के लिए उच्च-रिज़ॉल्यूशन स्पेक्ट्रोस्कोपी की आवश्यकता है ताकि धातुओं की अनुपस्थिति और मजबूत He II 1640Å उत्सर्जन की पुष्टि हो।

भविष्य के उपकरण, जैसे अत्यंत बड़ा दूरबीन (ELT) और JWST का NIRSpec, $z > 10$ -20 की खोज करेंगे, जो प्राचीन गैलेक्सियों को लक्षित करेंगे। सिमुलेशन जनसंख्या III सुपरनोवा को उनकी अद्वितीय प्रकाश वक्रों या जोड़ी अस्थिरता विस्फोटों से गुरुत्वाकर्षण तरंगों के माध्यम से पहचानने का सुझाव देते हैं। धातु-गरीब जनसंख्या II तारे, जैसे कि गैलेक्टिक हेलो में, जनसंख्या III सुपरनोवा की उपज को संरक्षित कर सकते हैं, अप्रत्यक्ष सबूत प्रदान करते हुए। ये प्रयास जनसंख्या III तारों की द्रव्यमान, धात्विकता और कॉस्मिक विकास में उनकी भूमिका को उजागर कर सकते हैं।

अध्याय 3: जनसंख्या II तारे - पीढ़ी 2: जटिलता की ओर पुल

जनसंख्या II तारे बिग बैंग के लगभग 400 मिलियन से कुछ अरब वर्ष बाद ($z \approx 10$ -3) बने, जब गैलेक्सियाँ एक कम सघन और ठंडे ब्रह्मांड में इकट्ठा हुईं। ये तारे प्रारंभिक युग और आधुनिक गैलेक्सियों के बीच एक पुल के रूप में कार्य करते थे, धातु संवर्धन के माध्यम से जटिलता का निर्माण करते थे।

पर्यावरण और निर्माण

ब्रह्मांड की औसत घनत्व विस्तार के साथ कम हो गई, लेकिन प्रारंभिक गैलेक्सियों में तारा बनाने वाले बादल $\sim 10^2$ - 10^4 कण/cm³ तक पहुँचे, बड़े अंधेरे पदार्थ हेलो ($\sim 10^7$ - 10^9 सौर द्रव्यमान) के भीतर। CMB ~ 10 -20 K तक ठंडा हो गया, और जनसंख्या III सुपरनोवा द्वारा समृद्ध बादलों में धात्विकता $Z \approx 10^{-4}$ - $10^{-2} Z_{\odot}$ थी। धातुएँ (उदाहरण के लिए, कार्बन, ऑक्सीजन) ने परमाणु रेखाओं ([C II] 158 μ m, [O I] 63 μ m) के माध्यम से ठंडक को सक्षम किया, जिससे तापमान $\sim 10^2$ - 10^3 K तक कम हुआ। धूल के निशान ने थर्मल उत्सर्जन के माध्यम से ठंडक को बढ़ाया। कम जीन्स द्रव्यमान (~ 1 -100 सौर द्रव्यमान) ने विखंडन की अनुमति दी, जिससे विविध तारकीय द्रव्यमान उत्पन्न हुए।

विशेषताएँ

जनसंख्या II तारे कम द्रव्यमान (0.1-1 सौर द्रव्यमान, जीवनकाल $> 10^{10}$ वर्ष) से लेकर विशाल (10-100 सौर द्रव्यमान, $\sim 10^6$ - 10^7 वर्ष) तक भिन्न होते हैं। वे गैलेक्टिक हेलो, गोलाकार तारा समूहों (उदाहरण के लिए, M13) और प्रारंभिक गैलेक्टिक उभारों में पाए जाते हैं, और कम धात्विकता के साथ, अधिक लाल स्पेक्ट्रम उत्पन्न करते हैं। उनका समूहों में निर्माण विखंडन को दर्शाता है, और उनके सुपरनोवा ने ISM को $\sim 0.1 Z_{\odot}$ तक और समृद्ध किया।

महत्व

जनसंख्या II तारों ने गैलेक्टिक विकास को बढ़ावा दिया। उनके सुपरनोवा ने भारी तत्वों (उदाहरण के लिए, सिलिकॉन, मैग्नीशियम) को संश्लेषित किया, धूल और अणुओं को बनाया जो तारा निर्माण को सुगम बनाते थे। कम द्रव्यमान वाले जनसंख्या II तारे, जो गोलाकार तारा समूहों और मिल्की वे के हेलो में अवलोकन योग्य हैं, जनसंख्या III सुपरनोवा के हस्ताक्षर को संरक्षित करते हैं। विकिरण और विस्फोटों से प्रतिक्रिया ने गैलेक्टिक डिस्क को आकार दिया और तारा निर्माण को नियंत्रित किया। उन्होंने जनसंख्या I तारों और ग्रह प्रणालियों के लिए आधार तैयार किया।

अवलोकन साक्ष्य

जनसंख्या II तारे गोलाकार तारा समूहों, गैलेक्टिक हेलो और धातु-गरीब तारों (उदाहरण के लिए, HD 122563, $Z \approx 0.001 Z_{\odot}$) में अवलोकन योग्य हैं। अत्यधिक धातु-गरीब तारे ($Z < 10^{-3} Z_{\odot}$) जनसंख्या III की उपज को प्रतिबिंबित कर सकते हैं। SDSS और Gaia जैसे सर्वेक्षण, और भविष्य के ELT अवलोकन, जनसंख्या II के गठन और प्रारंभिक गैलेक्सी संयोजन की हमारी समझ को परिष्कृत करेंगे।

अध्याय 4: जनसंख्या I तारे - पीढ़ी 3: ग्रहों और जीवन का युग

जनसंख्या I तारे, जो लगभग 10 अरब साल पहले से वर्तमान तक ($z \approx 2$ -0) बने, परिपक्व गैलेक्सियों जैसे मिल्की वे की डिस्क पर हावी हैं। ये तारे, जिनमें सूर्य शामिल है, अपने धातु-समृद्ध पर्यावरण के माध्यम से ग्रहों और जीवन को संभव बनाते हैं।

पर्यावरण और निर्माण

ब्रह्मांड विरल है ($\sim 10^{-30}$ g/cm³), और तारा निर्माण सघन आणविक बादलों ($\sim 10^2$ – 10^6 कण/cm³) में होता है, जो सर्पिल घनत्व तरंगों या सुपरनोवा द्वारा शुरू होता है। CMB 2.7 K है, और बादल, $Z \approx 0.1$ – $2 Z_\odot$ के साथ, आणविक रेखाओं (उदाहरण के लिए, CO, HCN) और धूल उत्सर्जन के माध्यम से ~ 10 – 20 K तक ठंडे होते हैं। कम जीन्स द्रव्यमान (~ 0.1 – 10 सौर द्रव्यमान) छोटे तारों को प्राथमिकता देता है, हालांकि सक्रिय क्षेत्रों में विशाल तारे बनते हैं।

विशेषताएँ

जनसंख्या I तारे लाल बौनों (0.08–1 सौर द्रव्यमान, $>10^{10}$ वर्ष) से लेकर O-प्रकार के तारों (10–100 सौर द्रव्यमान, $\sim 10^6$ – 10^7 वर्ष) तक भिन्न होते हैं। उनकी उच्च धात्विकता Fe I और Ca II जैसे रेखाओं के साथ चमकीले, धातु-समृद्ध स्पेक्ट्रम उत्पन्न करती है। वे खुले तारा समूहों (उदाहरण के लिए, प्लेइड्स) या नीहारिकाओं (उदाहरण के लिए, ओरियन) में बनते हैं। सूर्य, 4.6 अरब साल पुराना जनसंख्या I तारा, विशिष्ट है।

महत्व: ग्रह और जीवन

उच्च धात्विकता ने चट्टानी ग्रहों के निर्माण को सक्षम किया, क्योंकि प्रोटोप्लैनेटरी डिस्क में धूल और धातुओं ने प्लैनेटसिमल्स बनाए। सूर्य की डिस्क ने लगभग 4.5 अरब साल पहले पृथ्वी को जन्म दिया, जिसमें सिलिकॉन, ऑक्सीजन और लोहा ने स्थलीय ग्रह बनाए, और कार्बन ने जैविक अणुओं को संभव बनाया। सूर्य का स्थिर उत्पादन और लंबी जीवन अवधि ने द्रव जल के लिए एक रहने योग्य क्षेत्र को बनाए रखा, जिसने अरबों वर्षों तक कार्बन-आधारित जीवन को बढ़ावा दिया। जनसंख्या I तारों की विविधता ISM के निरंतर संवर्धन को प्रेरित करती है, तारा और ग्रह निर्माण को बनाए रखती है।

अवलोकन साक्ष्य

जनसंख्या I तारे मिल्की वे की डिस्क पर हावी हैं, और तारा निर्माण क्षेत्रों और समूहों में अवलोकन योग्य हैं। एक्सोप्लैनेट सर्वेक्षण (उदाहरण के लिए, केपलर, TESS) दिखाते हैं कि उच्च धात्विकता वाले तारे ग्रहों को आश्रय देने की अधिक संभावना रखते हैं, जिसमें लगभग 50% सूर्य जैसे तारे चट्टानी दुनिया को होस्ट कर सकते हैं। स्पेक्ट्रोस्कोपी उनकी धातु-समृद्ध संरचना को प्रकट करती है, संचयी संवर्धन को ट्रैक करती है।

अध्याय 5: भविष्य की तारकीय पीढ़ियाँ: एक अंधेरा, ठंडा कॉस्मोस

जैसे-जैसे अंधेरी ऊर्जा कॉस्मिक विस्तार को बढ़ावा देती है, ब्रह्मांड ठंडा, कम सघन और धातु-समृद्ध हो जाएगा, जिससे तारा निर्माण बदल जाएगा। लगभग 100 अरब वर्षों में ($z \approx -1$), तारा निर्माण धीमा हो जाएगा, और $\sim 10^{12}$ वर्षों में यह रुक सकता है, जिससे एक अंधेरा, एन्ट्रॉपिक कॉस्मोस बन जाएगा।

भविष्य की स्थितियाँ

औसत घनत्व कम हो जाएगा, जिससे गैलेक्सियाँ अलग-थलग हो जाएँगी। CMB < 0.3 K तक ठंडा हो जाएगा, और $Z > 2$ – $5 Z_\odot$ वाले बादल धातुओं (उदाहरण के लिए, [Fe II], [Si II]) और धूल के माध्यम से प्रभावी ढंग से ठंडे होंगे। तारा निर्माण दुर्लभ गैस जेबों पर निर्भर करेगा, क्योंकि अधिकांश गैलेक्टिक गैस तारा निर्माण, सुपरनोवा या ब्लैक होल जेट्स द्वारा खपत हो जाएगी। गैलेक्टिक विलय अस्थायी रूप से तारा निर्माण को बढ़ा सकते हैं।

भविष्य के तारों की विशेषताएँ

भविष्य के तारे कम द्रव्यमान वाली लाल बौनी (0.08–1 सौर द्रव्यमान, 10^{10} – 10^{12} वर्ष) होंगी, प्रभावी ठंडक और कम जीन्स द्रव्यमान के कारण। विशाल तारे दुर्लभ होंगे, क्योंकि उच्च धात्विकता बड़े प्रोटो-तारों की वृद्धि को रोकती है। ये तारे मंद इन्फ्रारेड प्रकाश उत्सर्जित करेंगे, जिससे गैलेक्सियाँ मंद हो जाएँगी। धातु-समृद्ध डिस्क चट्टानी ग्रहों को प्राथमिकता देंगे।

कॉस्मिक परिप्रेक्ष्य

गैलेक्सियाँ तारों के मरने के साथ फीकी पड़ जाएँगी, जिससे सफेद बौने, न्यूट्रॉन तारे और ब्लैक होल पीछे रह जाएँगे। जीवन कृत्रिम ऊर्जा या दुर्लभ तारकीय मरुदानों पर निर्भर हो सकता है, एक ऐसे ब्रह्मांड में जो “थर्मल डेथ” की ओर बढ़ रहा है।

अध्याय 6: तारकीय नाभिकीय संश्लेषण: तत्वों का निर्माण और न्यूट्रिनो विस्फोट

तारकीय नाभिकीय संश्लेषण एक कॉस्मिक भट्टी है जिसमें तारे हल्के तत्वों से भारी तत्वों का संश्लेषण करते हैं, जिससे ब्रह्मांड का रासायनिक विकास आगे बढ़ता है। तारकीय नाभिकों में शांत संनादन से लेकर सुपरनोवा में विस्फोटक प्रक्रियाओं तक, यह उन तत्वों को उत्पन्न करता है जो ग्रहों, जीवन और गैलेक्सियों को बनाते हैं। प्रोटॉन-प्रोटॉन श्रृंखला, CNO चक्र, ट्रिपल-अल्फा प्रक्रिया, s-प्रक्रिया, r-प्रक्रिया, p-प्रक्रिया और फोटोडिसइंटीग्रेशन, जो न्यूट्रिनो विस्फोटों में चरम पर पहुँचते हैं, तत्व निर्माण के जटिल तंत्रों को प्रकट करते हैं और सुपरनोवा की तेजी से खोज को सक्षम बनाते हैं।

प्रोटॉन-प्रोटॉन श्रृंखला

प्रोटॉन-प्रोटॉन श्रृंखला (pp) कम द्रव्यमान वाले तारों ($T \sim 10^7$ K, उदाहरण के लिए, सूर्य) को शक्ति प्रदान करती है। यह दो प्रोटॉनों के डिप्रोटॉन बनाने के लिए संनादन से शुरू होती है, जो बीटा क्षय के माध्यम से ड्यूटेरियम में परिवर्तित हो जाता है ($^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$, एक न्यूट्रिनो जारी करता है)। बाद के चरणों में शामिल हैं: $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$ (फोटॉन उत्सर्जन)। $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$, दो प्रोटॉन जारी करता है।

Pp श्रृंखला में शाखाएँ (ppI, ppII, ppIII) हैं, जो विभिन्न ऊर्जाओं (0.4–6 MeV) के न्यूट्रिनो उत्पन्न करती हैं। यह धीमी है, सूर्य को $\sim 10^{10}$ वर्षों तक बनाए रखती है, और इसके न्यूट्रिनो, जो Borexino जैसे प्रयोगों द्वारा पता लगाए गए हैं, तारकीय संनादन मॉडल की पुष्टि करते हैं।

CNO चक्र

कार्बन-नाइट्रोजन-ऑक्सीजन चक्र (CNO) विशाल तारों (>1.3 सौर द्रव्यमान, $T > 1.5 \times 10^7$ K) में प्रभुत्व रखता है। यह ^{12}C , ^{14}N और ^{16}O को उत्प्रेरक के रूप में उपयोग करता है ताकि चार प्रोटॉनों को ^4He में संनादित किया जा सके: $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$ - $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ - $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$ - $^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$ - $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ - $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$

CNO चक्र तेजी से है, तेजी से संनादन ($\sim 10^6$ – 10^7 वर्ष) को बढ़ावा देता है, और उच्च ऊर्जा (~ 1 – 10 MeV) के न्यूट्रिनो उत्पन्न करता है, जो Super-Kamiokande द्वारा पता लगाए जा सकते हैं।

ट्रिपल-अल्फा प्रक्रिया

8 सौर द्रव्यमान से अधिक के तारों में, हीलियम दहन ($T \sim 10^8$ K) तीन ^4He नाभिकों को ट्रिपल-अल्फा प्रक्रिया के माध्यम से ^{12}C में संनादित करता है। दो ^4He एक अस्थिर ^8Be बनाते हैं, जो एक और ^4He को पकड़कर ^{12}C बनाता है, ^{12}C के ऊर्जा स्तरों में एक संनादन का उपयोग करता है। कुछ ^{12}C एक ^4He को पकड़कर ^{16}O बनाते हैं ($^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$)। यह प्रक्रिया, जो $\sim 10^5$ वर्ष तक चलती है, कार्बन और ऑक्सीजन के उत्पादन के लिए महत्वपूर्ण है, जो जीवन को संभव बनाता है।

उन्नत दहन चरण

विशाल तारे तेजी से दहन चरणों से गुजरते हैं: - **कार्बन दहन** ($T \sim 6 \times 10^8$ K, $\sim 10^3$ वर्ष): $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$ या $^{23}\text{Na} + ^1\text{H}$ । - **नियॉन दहन** ($T \sim 1.2 \times 10^9$ K, ~ 1 वर्ष): $^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$ । - **ऑक्सीजन दहन** ($T \sim 2 \times 10^9$ K, ~ 6 महीने): $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$ । - **सिलिकॉन दहन** ($T \sim 3 \times 10^9$ K, ~ 1 दिन): $^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow ^{56}\text{Fe}$, ^{56}Ni फोटोडिसइंटीग्रेशन और कैप्चर के माध्यम से।

लोहे के शिखर तत्व संनादन के अंत को चिह्नित करते हैं, क्योंकि बाद की प्रतिक्रियाएँ एंडोथर्मिक होती हैं।

S-प्रक्रिया (धीमी न्यूट्रॉन कैप्चर)

S-प्रक्रिया AGB तारों (1–8 सौर द्रव्यमान) और कुछ विशाल तारों में होती है, जहाँ न्यूट्रॉन धीरे-धीरे कैप्चर किए जाते हैं, जिससे कैप्चर के बीच बीटा क्षय संभव होता है (उदाहरण के लिए, $^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe}$, फिर $^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$)। न्यूट्रॉन $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ जैसे प्रतिक्रियाओं से आते हैं, जो AGB तारों की हीलियम परतों में होते हैं। यह स्ट्रॉन्शियम, बेरियम और सीसा जैसे तत्वों को $\sim 10^3$ – 10^5 वर्षों में उत्पन्न करता है, जिससे ISM तारकीय हवाओं के माध्यम से समृद्ध होता है।

R-प्रक्रिया (तेजी से न्यूट्रॉन कैप्चर)

R-प्रक्रिया चरम वातावरण (सुपरनोवा, न्यूट्रॉन तारा विलय) में होती है, जिसमें न्यूट्रॉन प्रवाह $\sim 10^{22}$ न्यूट्रॉन/cm²/s होता है। नाभिक न्यूट्रॉन को बीटा क्षय से तेजी से कैप्चर करते हैं, जिससे सोना, चाँदी और यूरेनियम जैसे भारी तत्व बनते हैं (उदाहरण के लिए, $^{56}\text{Fe} + \text{कई } n \rightarrow ^{238}\text{U}$)। यह सुपरनोवा शॉकवेव्स या विलय इजेक्टा में सेकंडों तक चलता है और $\sim 50\%$ भारी तत्वों के लिए जिम्मेदार है।

P-प्रक्रिया (प्रोटॉन कैप्चर/फोटोडिसइंटीग्रेशन)

P-प्रक्रिया सुपरनोवा में दुर्लभ प्रोटॉन-समृद्ध आइसोटोप (उदाहरण के लिए, ^{92}Mo , ^{96}Ru) उत्पन्न करती है। उच्च-ऊर्जा गामा किरणें ($T \sim 2\text{--}3 \times 10^9$ K) s- और r-प्रक्रिया नाभिकों को फोटोडिसइंटीग्रेट करती हैं (उदाहरण के लिए, $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$), या प्रोटॉन प्रोटॉन-समृद्ध वातावरण में कैप्चर किए जाते हैं। इसकी कम दक्षता p-नाभिकों की दुर्लभता को समझाती है।

सुपरनोवा में फोटोडिसइंटीग्रेशन

कोर पतन सुपरनोवा में, लोहे के कोर में फोटोडिसइंटीग्रेशन ($T > 10^{10}$ K) ^{56}Fe को प्रोटॉन, न्यूट्रॉन और ^4He में विघटित करता है (उदाहरण के लिए, $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$)। यह एंडोथर्मिक प्रक्रिया दबाव को कम करती है, न्यूट्रॉन तारा या ब्लैक होल की ओर पतन को तेज करती है। शॉकवेव विस्फोटक नाभिकीय संश्लेषण को ट्रिगर करती है, तत्वों को बाहर निकालती है।

न्यूट्रिनो विस्फोट और सुपरनोवा खोज

कोर पतन के दौरान, सुपरनोवा की $\sim 99\%$ ऊर्जा ($\sim 10^{46}$ J) न्यूट्रिनो के रूप में न्यूट्रॉनाइजेशन ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$) और थर्मल प्रक्रियाओं ($e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$) के माध्यम से जारी होती है। ~ 10 सेकंड का विस्फोट ऑप्टिकल विस्फोट से पहले होता है और Super-Kamiokande, IceCube और DUNE जैसे सुविधाओं द्वारा पता लगाया जा सकता है। SN 1987A के ~ 20 न्यूट्रिनो ने इसकी पुष्टि की। कई डिटेक्टरों से त्रिकोणमिति सुपरनोवा को सेकंडों में स्थानीयकृत करती है, जिससे ऑप्टिकल, एक्स-रे और गामा तरंगदैर्ध्य में अनुवर्ती अवलोकन संभव होते हैं, जो प्रोजेनिटर गुणों और नाभिकीय संश्लेषण उपज को प्रकट करते हैं।

असमान प्रचुरता

तत्वों की प्रचुरता नाभिकीय संश्लेषण को दर्शाती है: - **H, He**: BBN से $\sim 98\%$ । - **C, O, Ne, Mg**: संनादन से प्रचुर। - **Fe, Ni**: नाभिकीय स्थिरता के कारण शिखर। - **Au, U**: r-प्रक्रिया से दुर्लभ। - **P-नाभिक**: p-प्रक्रिया से सबसे दुर्लभ।

केस स्टडी: यूरेनियम-235 और यूरेनियम-238

^{235}U और ^{238}U सुपरनोवा या न्यूट्रॉन तारा विलय में r-प्रक्रिया के माध्यम से बनते हैं। ^{235}U (अर्ध-जीवन ~ 703.8 मिलियन वर्ष) ^{238}U (अर्ध-जीवन ~ 4.468 अरब वर्ष) से तेजी से क्षय करता है। पृथ्वी के निर्माण (~ 4.54 अरब वर्ष पहले) के समय, $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ अनुपात ~ 0.31 ($\sim 23.7\%$ ^{235}U) था। लगभग 2 अरब साल पहले, यह ~ 0.037 ($\sim 3.6\%$ ^{235}U) था, जो विखंडन के लिए पर्याप्त था। गैबॉन में ओक्लो रिएक्टर तब बना जब उच्च-गुणवत्ता वाली यूरेनियम अयस्क ($\sim 20\text{--}60\%$ यूरेनियम ऑक्साइड), तलछटी प्रक्रियाओं द्वारा केंद्रित, न्यूट्रॉन मॉडरेट करने वाले भूजल के साथ परस्पर क्रिया की। कोई

आइसोटोपिक संवर्धन नहीं हुआ; प्राकृतिक ~3.6% ^{235}U ने क्रिटिकलिटी को सक्षम किया, जिसने ~150,000–1 मिलियन वर्षों तक रुक-रुक कर विखंडन प्रतिक्रियाओं को बनाए रखा, ^{43}Nd जैसे आइसोटोप और गर्मी उत्पन्न की।

निष्कर्ष: हम तारों की धूल हैं, कॉस्मिक आग से पुनर्जनन

बिग बैंग के प्रज्वलित जन्म से लुप्तप्राय भविष्य तक, तारों ने ब्रह्मांड को आकार दिया है। जनसंख्या III तारों ने कॉस्मोस को प्रज्वलित किया और पहले धातुओं को गढ़ा। जनसंख्या II तारों ने जटिलता का निर्माण किया, और जनसंख्या I तारों ने ग्रहों और जीवन को संभव बनाया। तारकीय नाभिकीय संश्लेषण—pp श्रृंखला, CNO चक्र, ट्रिपल-अल्फा प्रक्रिया, s-, r- और p-प्रक्रियाओं, और फोटोडिसइंटीग्रेशन के माध्यम से—ने तत्वों को बनाया, न्यूट्रिनो विस्फोटों ने उनकी विस्फोटक प्रसार को संकेत दिया। ओक्लो रिएक्टर, जो ^{235}U की प्राकृतिक प्रचुरता से संचालित था, इस विरासत को मूर्त रूप देता है। हम तारों की धूल हैं, प्राचीन तारों से पुनर्जनन, उनके तत्वों को हमारे शरीर में ले जाते हैं। जैसे-जैसे ब्रह्मांड अंधेरा होता जाता है, हमारी कॉस्मिक विरासत भविष्य की पीढ़ियों को नए तारे प्रज्वलित करने और एन्ट्रॉपिक रिक्तता में सृजन को बनाए रखने के लिए प्रेरित कर सकती है।