https://farid.ps/articles/we_are_made_of_stardust/ur.html

بگ بینگ سے ستاروں کی نیوکلیو سنتھیسز تک: ہم ستاروں کی گرد سے بنے ہیں

کائنات ایک وسیع اور متحرک کینوس ہے، جو ستاروں کی روشنی اور ان کے بنائے ہوئے عناصر سے مزین ہے۔ بگ بینگ کی نباہ کن پیدائش سے لے کر ایک دور اور سرد کائنات کے دھندلے مستقبل تک، ستاروں کی نسلوں—آبادی I، II اور III، اور ان کے ممکنہ جانشینوں—نے کائنات کی کیمیائی، طبیعیاتی اور حیاتیاتی ارتقاء کو شکل دی ہے۔ اپنی جلی ہوئی زندگیوں اور دھماکہ خیز موت کے ذریعے، ستاروں نے وہ عناصر بنائے ہیں جو کہکشاؤں، سیاروں اور خود زندگی کو تشکیل دیتے ہیں۔ یہ مضمون کائناتی ادوار کی کھوج کرتا ہے، ستاروں کی نسلوں کے ماخذ، ماحول اور وراثت میں گہرائی سے جاتا ہے، اور ستاروں کی نیوکلیو سنتھیسز—وہ کیمیاوی عمل جو ستاروں کو طاقت دیتے ہیں اور کائنات کے عناصر پیدا کرتے ہیں—کا تفصیلی جائزہ لیتا ہے۔ یہ ایک گہری حقیقت پر منتج ہوتا ہے کہ ہم ستاروں کی گرد ہیں، قدیم ستاروں کی راکھ سے دوبارہ پیدا ہوئے، اور ایک تاریک ہوتی کائنات میں ستاروں کی تشکیل کے مستقبل پر غور کرتا ہے۔

باب اول: بگ بینگ اور کائنات کی صبح

کائنات تقریباً 13.8 ارب سال پہلے بگ بینگ کے ساتھ شروع ہوئی، ایک ایسی واقعہ جس میں لامحدود کثافت اور درجہ حرارت تھا، جہاں تمام مادہ، توانائی، خلاء اور وقت ایک نقطہ سے پیدا ہوئے۔ یہ ابتدائی جہنم، جو 10^{32} K سے زیادہ گرم تھا، بنیادی قوتوں —کشش ثقل، برقی مقناطیسیت، مضبوط نیوکلیائی قوت اور کمزور نیوکلیائی قوت—کو ایک متحد حالت میں رکھتا تھا، جو کائناتی توازن کا ایک عارضی لمحہ تھا۔

کائناتی پھیلاؤ اور ٹھنڈک

10^{-36} سیکنڈ سے بھی کم وقت میں، افراط زر—ایک تیزی سے پھیلاؤ—نے کائنات کو ذیلی جوہری پیمانوں سے بڑے پیمانوں تک کھینچ لیا، بے قاعدگیوں کو ہموار کیا اور کثافت کے اتار چڑھاؤ کے بیج بوئے جو بعد میں کہکشاؤں کی تشکیل کریں گے۔ 10^{-12} سیکنڈ تک،

مضبوط قوت برقی کمزور قوت سے الگ ہو گئی، اس کے بعد تقریباً 10^{-6} سیکنڈ پر برقی مقناطیسیت اور کمزور قوت کا علیحدگی ہوئی، جب درجہ حرارت 10^{15} K سے نیچے گر گیا۔ ان علیحدگیوں نے طبیعی قوانین قائم کیے جو مادہ کو کنٹرول کرتے ہیں، کوارک سے لے کر کہکشاؤں تک۔

ابتدائی عناصر کی تشکیل

ایک سیکنڈ کے بعد، کائنات تقریباً 10^{10} K تک ٹھنڈی ہو گئی، جس سے کوارک اور گلوون مضبوط قوت کے ذریعے پروٹون اور نیوٹران میں گاڑھے ہو سکے۔ اگلے چند منٹوں کے دوران—بگ بینگ نیوکلیو سنتھیسز (BBN) کا دور—پروٹون اور نیوٹران نے ابتدائی عناصر بنانے کے لیے مل کر فیوز کیا: تقریباً 75% ہائیڈروجن-1 (^{1}H، پروٹون)، 25% ہیلیئم-4 (^{4}He)، اور ڈیوٹیریئم (^{2}H)، ہیلیئم-3 (^{3}He) اور لیتھیم-7 (^{7}Li) کی معمولی مقداریں۔ بلند درجہ حرارت (~10^9 K) نے ان نیوکلائی کو آئنائزڈ رکھا، جس سے چارج شدہ ذرات کا پلازما برقرار رہا۔

دوبارہ ملاپ اور کائناتی مائیکروویو پس منظر

تقریباً 380,000 سال بعد (ریڈ شفٹ $z \approx 1100$)، کائنات تقریباً 3000 K تک ٹھنڈی ہو گئی، جس سے پروٹون اور ہیلیئم نیوکلائی دوبارہ ملاپ میں الیکٹرانز کو پکڑ سکتے تھے۔ اس نے پلازما کو غیر جانبدار کیا، ہائیڈروجن اور ہیلیئم کے مستحکم ایٹم بنائے۔ اس سے پہلے آزاد الیکٹرانز کے ذریعے بکھرے ہوئے فوٹون آزاد ہو گئے، جس سے کائناتی مائیکروویو پس منظر (CMB) بنایا—ایک تھرمل تصویر جو اب پھیلاؤ کی وجہ سے 2.7 K تک ریڈ شفٹ ہو چکی ہے۔ CMB کے چھوٹے اتار چڑھاؤ (~10^5 میں 1 حصہ) کائناتی ڈھانچے کے بیجوں کو ظاہر کرتے ہیں، جو آج پلانک جیسے مشاہداتی اداروں کے ذریعے قابل تشخیص ہیں۔

تاریک ادوار

دوبارہ ملاپ کے بعد، کائنات تاریک ادوار میں داخل ہوئی، ایک بے ستارہ دور جو غیر جانبدار ہائیڈروجن اور ہیلیئم گیس کے زیر اثر تھا۔ تاریک مادہ کے ہیلوز میں کشش ثقل کا انہدام گھنے گچھوں کی تشکیل شروع کرتا تھا، جو پہلے ستاروں کے لیے مرحلہ تیار کرتا تھا۔ ابتدائی عناصر، سادہ اور نایاب، ستاروں کی تشکیل کے لیے خام مال تھے، اور تاریک مادہ نے کشش ثقل کا ڈھانچہ فراہم کیا۔

باب دوم: آبادی III ستارے—پہلی نسل: کائناتی پیش رو

آبادی III کے ستارے، ستاروں کی پہلی نسل، بگ بینگ کے تقریباً 100 سے 400 ملین سال بعد ($z \approx 20–10$) روشن ہوئے، جس نے تاریک ادوار کو ختم کیا اور "کائناتی صبح" کا آغاز کیا۔ یہ ستارے ایک گھنی ($\sim 10^{-24}$ g/cm³)، گرم (~20–100 CMB K) اور کیمیائی طور پر خالص کائنات میں بنے، جو تقریباً مکمل طور پر ہائیڈروجن (~76%) اور ہیلیئم (~24%) پر مشتمل تھی، جس کی دھاتی مقدار $Z \approx 10^{-10} Z_\odot$ تھی۔

ماحول اور تشکیل

ابتدائی کائنات کی بلند کثافت نے گیس کے بادلوں کو تاریک مادہ کے منی ہیلوز ($\sim 10^5–10^6$ شمسی ماس) میں گرنے کی اجازت دی، جو $\sim 10^4–10^6$ ذرات/cm³ کی کثافت تک پہنچ گئے۔ کشش ثقل کی دبانے نے بادلوں کو $\sim 10^3–10^4$ K تک گرم کیا، لیکن ٹھنڈک ہائیڈروجن مالیکیول (H_2) پر منحصر تھی، جو رد عمل جیسے کہ $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$، اور اس کے بعد $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ کے ذریعے بنے۔ H_2 کی گھماؤ اور ارتعاشی منتقلی کے ذریعے ٹھنڈک غیر موثر تھی، جس نے بادلوں کو گرم رکھا اور ٹکڑوں کو روکا۔ بلند جینس ماس ($\sim 10^2–10^3$ شمسی ماس) نے بڑے پروٹو ستاروں کو ترجیح دی۔

خصوصیات

آبادی III کے ستارے ممکنہ طور پر بڑے پیمانے پر (10–1000 شمسی ماس)، گرم ($\sim 10^5$ K سطحی درجہ حرارت) اور چمکدار تھے، جو شدید الٹرا وایلیٹ تابکاری خارج کرتے تھے۔ ان کا بلند ماس تیز فیوزن کو فروغ دیتا تھا، بنیادی طور پر CNO سائیکل کے ذریعے (ابتدائی فیوزن سے کاربن کی معمولی مقدار کا استعمال کرتے ہوئے)، جو تقریباً 1–3 ملین سال میں ایندھن ختم کر دیتا تھا۔ ان کے مقدر مختلف تھے: - **10–100 شمسی ماس:** کور گرنے والی سپرنووا، جو کاربن، آکسیجن اور لوہے جیسے دھاتوں کو بکھیر دیتی تھیں۔ - **100 شمسی ماس سے زیادہ:** براہ راست بلیک ہولز میں گرنا، جو ممکنہ طور پر ابتدائی کوازر کے بیج بوئے۔ - **140–260 شمسی ماس:** جوڑی عدم استحکام سپرنووا، جہاں الیکٹران-پوزیٹران جوڑوں کی پیداوار نے مکمل تحلیل کو متحرک کیا، بغیر کسی باقیات کے۔

اہمیت

آبادی III کے ستارے کائناتی معمار تھے۔ ان کی الٹرا وایلیٹ تابکاری نے ہائیڈروجن کو آئنائز کیا، جس نے دوبارہ آئنائزیشن ($z \approx 6–15$) کو فروغ دیا، جس سے کائنات شفاف ہو گئی۔ ان کی سپرنووا نے بین النجمی میڈیم (ISM) کو دھاتوں سے افزودہ کیا، جس

سے آبادی II کے ستاروں کی تشکیل ممکن ہوئی۔ تابکاری، ہواؤں اور دھماکوں سے فیڈبیک نے ستاروں کی تشکیل کو منظم کیا اور ابتدائی کہکشاؤں کو شکل دی۔ ان کے بلیک ہول باقیات نے کہکشائی مراکز میں سپر میسیو بلیک ہولز کے بیج بنائے ہو سکتے ہیں۔

ممکنہ پتہ لگانا اور مستقبل کے امکانات

آبادی III کے ستاروں کا براہ راست مشاہدہ ان کی دوری اور مختصر عمر کی وجہ سے مشکل ہے۔ جیمز ویب خلائی دوربین (JWST) نے اشارے دیے ہیں: 2023 میں، GN-z11 (z≈11) نے دھاتی لکیروں کے بغیر آئنائزڈ ہیلیئم (He II) اخراج دکھایا، جو آبادی III کے ستاروں کی طرف اشارہ کرتا ہے۔ RX J2129–z8He II (2022، z≈8) نے بھی ممکنہ علامات دکھائیں، حالانکہ فعال کہکشائی نیوکلائی (AGN) یا کم دھاتی آبادی II کے ستارے متبادل رہتے ہیں۔ تصدیق کے لیے ہائی ریزولوشن اسپیکٹروسکوپی کی ضرورت ہے تاکہ دھاتوں کی غیر موجودگی اور مضبوط He II 1640Å اخراج کی تصدیق ہو۔

مستقبل کے آلات، جیسے ایکسٹریملی لارج ٹیلیسکوپ (ELT) اور JWST کا NIRSpec، z > 10–20 کی کھوج کریں گے، جو خالص کہکشاؤں کو نشانہ بنائیں گے۔ نقلیں آبادی III کے سپرنووا کو ان کے منفرد روشنی کے منحنیات یا جوڑی عدم استحکام دھماکوں سے کشش ثقل کی لہروں کے ذریعے پتہ لگانے کی تجویز دیتی ہیں۔ کم دھاتی آبادی II کے ستارے، جیسے کہکشائی ہیلو میں موجود، آبادی III کے سپرنووا کی پیداوار کو محفوظ رکھ سکتے ہیں، جو بالواسطہ ثبوت فراہم کرتے ہیں۔ یہ کوششیں آبادی III کے ستاروں کے ماس، دھاتی مقدار اور کائناتی ارتقاء میں ان کے کردار کو ظاہر کر سکتی ہیں۔

باب سوم: آبادی II ستارے—دوسری نسل: پیچیدگی کی طرف پل

آبادی II کے ستارے بگ بینگ کے تقریباً 400 ملین سے چند ارب سال بعد (z≈10–3) بنے، جب کہکشائیں ایک کم گھنی اور ٹھنڈی کائنات میں جمع ہوئیں۔ یہ ستارے ابتدائی دور اور جدید کہکشاؤں کے درمیان پل کے طور پر کام کرتے تھے، دھاتی افزودگی کے ذریعے پیچیدگی بناتے تھے۔

ماحول اور تشکیل

کائنات کی اوسط کثافت پھیلاؤ کے ساتھ کم ہوئی، لیکن ابتدائی کہکشاؤں میں ستاروں کے بننے والے بادل ~10^{2}–10^{4} ذرات/cm^{3} تک پہنچ گئے، بڑے تاریک مادہ کے ہیلوز (~10^{7}–10^{9} شمسی ماس) کے اندر۔ CMB ~10–20 K تک ٹھنڈا ہو گیا، اور آبادی III کے سپرنووا سے افزودہ بادلوں کی دھاتی مقدار $Z \approx 10^{-4}$–10^{-2} $Z_{\odot}$ تھی۔ دھاتیں (مثال کے طور پر، کاربن،

آکسیجن) نے ایٹمی لکیروں ([C II] 158 μm، [O I] 63 μm) کے ذریعے ٹھنڈک کو فعال کیا، جس سے درجہ حرارت ~10^2–10^3 K تک کم ہوا۔ دھول کے آثار نے حرارتی اخراج کے ذریعے ٹھنڈک کو بڑھایا۔ کم جینس ماس (~1–100 شمسی ماس) نے ٹکڑوں کی اجازت دی، جس سے متنوع ستاروں کے ماس پیدا ہوئے۔

خصوصیات

آبادی II کے ستارے کم ماس (0.1–1 شمسی ماس، عمر >10^{10} سال) سے لے کر بڑے ماس (10–100 شمسی ماس، ~10^6–10^7 سال) تک مختلف ہوتے ہیں۔ وہ کہکشائی ہیلو، کروی ستارہ جھرمٹوں (مثال کے طور پر، M13) اور ابتدائی کہکشائی بلجز میں پائے جاتے ہیں، اور کم دھاتی مقدار کے ساتھ، زیادہ سرخ سپیکٹرا پیدا کرتے ہیں۔ ان کی جھرمٹوں میں تشکیل ٹکڑوں کی عکاسی کرتی ہے، اور ان کے سپرنووا نے ISM کو ~0.1 Z⊙ تک مزید افزودہ کیا۔

اہمیت

آبادی II کے ستاروں نے کہکشائی ارتقاء کو فروغ دیا۔ ان کے سپرنووا نے بھاری عناصر (مثال کے طور پر، سلیکون، میگنیشیم) کو ترکیب کیا، دھول اور مالیکیول بنائے جو ستاروں کی تشکیل کو آسان بناتے تھے۔ کم ماس آبادی II کے ستارے، جو کروی ستارہ جھرمٹوں اور دودھیا راہ کے ہیلو میں قابل مشاہدہ ہیں، آبادی III کے سپرنووا کے نشانات محفوظ رکھتے ہیں۔ تابکاری اور دھماکوں سے فیڈبیک نے کہکشائی ڈسکوں کو شکل دی اور ستاروں کی تشکیل کو منظم کیا۔ انہوں نے آبادی I کے ستاروں اور سیاراتی نظاموں کے لیے بنیاد رکھی۔

مشاہداتی ثبوت

آبادی II کے ستارے کروی ستارہ جھرمٹوں، کہکشائی ہیلوز اور کم دھاتی ستاروں (مثال کے طور پر، HD 122563، Z ≈ 0.001 Z⊙) میں قابل مشاہدہ ہیں۔ انتہائی کم دھاتی ستارے (Z < 10^{-3} Z⊙) آبادی III کی پیداوار کو عکاس کر سکتے ہیں۔ SDSS اور Gaia جیسے سروے، اور مستقبل کے ELT مشاہدات، آبادی II کی تشکیل اور ابتدائی کہکشاؤں کی اسمبلی کے بارے میں ہماری سمجھ کو بہتر بنائیں گے۔

باب چہارم: آبادی I ستارے—تیسری نسل: سیاروں اور زندگی کا دور

آبادی I کے ستارے، جو تقریباً 10 ارب سال پہلے سے اب تک ($z \approx 2$–0) بنے، بالغ کہکشاؤں جیسے دودھیا راہ کی ڈسک پر غلبہ رکھتے ہیں۔ یہ ستارے، جن میں سورج شامل ہے، اپنے دھات سے بھرپور ماحول کے ذریعے سیاروں اور زندگی کو ممکن بناتے ہیں۔

ماحول اور تشکیل

کائنات گھنی ہے ($\sim 10^{-30}$ g/cm³)، اور ستاروں کی تشکیل گھنے مالیکیولر بادلوں ($\sim 10^{2}$–10^{6} ذرات/cm³) میں ہوتی ہے، جو سرپل کثافت کی لہروں یا سپرنووا کے ذریعے شروع ہوتی ہیں۔ CMB 2.7 K ہے، اور $Z \approx 0.1$–$2\ Z_\odot$ والے بادل مالیکیولر لکیروں (مثال کے طور پر، CO، HCN) اور دھول کے اخراج کے ذریعے ~ 10–20 K تک ٹھنڈے ہوتے ہیں۔ کم جینس ماس (~ 0.1–10 شمسی ماس) چھوٹے ستاروں کو ترجیح دیتا ہے، حالانکہ فعال علاقوں میں بڑے ماس کے ستارے بنتے ہیں۔

خصوصیات

آبادی I کے ستارے سرخ بونوں (0.08–1 شمسی ماس، $> 10^{10}$ سال) سے لے کر O-قسم کے ستاروں (10–100 شمسی ماس، $\sim 10^{6}$–10^{7} سال) تک مختلف ہوتے ہیں۔ ان کی بلند دھاتی مقدار Fe I اور Ca II جیسی لکیروں کے ساتھ روشن، دھات سے بھرپور سپیکٹرا پیدا کرتی ہے۔ وہ کھلے ستارہ جھرمٹوں (مثال کے طور پر، پلیڈیز) یا نیبولا (مثال کے طور پر، اورین) میں بنتے ہیں۔ سورج، 4.6 ارب سال پرانا آبادی I کا ستارہ، عام ہے۔

اہمیت: سیارے اور زندگی

بلند دھاتی مقدار نے چٹانی سیاروں کی تشکیل کو ممکن بنایا، کیونکہ پروٹوپلانیٹری ڈسک میں دھول اور دھاتیں نے پلانیٹسیمل بنائے۔ سورج کی ڈسک نے تقریباً 4.5 ارب سال پہلے زمین کو جنم دیا، جس میں سلیکون، آکسیجن اور لوہا نے زمینی سیاروں کو بنایا، اور کاربن نے نامیاتی مالیکیولز کو ممکن بنایا۔ سورج کی مستحکم پیداوار اور لمبی عمر نے مائع پانی کے لیے رہائشی زون کو برقرار رکھا، جو اربوں سالوں تک کاربن پر مبنی زندگی کو فروغ دیتا ہے۔ آبادی I کے ستاروں کی تنوع ISM کی مسلسل افزودگی کو فروغ دیتی ہے، ستاروں اور سیاروں کی تشکیل کو برقرار رکھتی ہے۔

مشاہداتی ثبوت

آبادی I کے ستارے دودھیا راہ کی ڈسک پر غلبہ رکھتے ہیں، اور ستاروں کی تشکیل کے علاقوں اور جھرمٹوں میں قابل مشاہدہ ہیں۔ ایکسوپلانیٹ سروے (مثال کے طور پر، کیپلر، TESS) دکھاتے ہیں کہ بلند دھاتی مقدار والے ستارے سیاروں کو پناہ دینے کے زیادہ امکان رکھتے ہیں، تقریباً 50% سورج جیسے ستاروں میں چٹانی دنیائیں ہو سکتی ہیں۔ اسپیکٹروسکوپی ان کی دھات سے بھرپور ترکیب کو ظاہر کرتی ہے، جو جمع شدہ افزودگی کو ٹریک کرتی ہے۔

باب پنجم: مستقبل کی ستاروں کی نسلیں: ایک تاریک، سرد کائنات

جیسے جیسے تاریک توانائی کائناتی پھیلاؤ کو فروغ دیتی ہے، کائنات ٹھنڈی، کم گھنی اور دھات سے بھرپور ہو جائے گی، جس سے ستاروں کی تشکیل بدل جائے گی۔ تقریباً 100 ارب سال بعد ($z \approx -1$)، ستاروں کی تشکیل سست ہو جائے گی، اور تقریباً 10^{12} سال بعد یہ رک سکتی ہے، جس سے ایک تاریک، اینٹروپک کائنات بن جائے گی۔

مستقبل کے حالات

اوسط کثافت کم ہو جائے گی، جس سے کہکشائیں الگ تھلگ ہو جائیں گی۔ CMB $<< 0.3$ K تک ٹھنڈا ہو جائے گا، اور $Z > 2–5$ $Z_\odot$ والے بادل دھاتوں (مثال کے طور پر، [Fe II]، [Si II]) اور دھول کے ذریعے مؤثر طریقے سے ٹھنڈے ہوں گے۔ ستاروں کی تشکیل نایاب گیس کے جیبوں پر منحصر ہوگی، کیونکہ زیادہ تر کہکشائی گیس ستاروں کی تشکیل، سپرنووا یا بلیک ہول جیٹس کے ذریعے استعمال ہو جائے گی۔ کہکشائی انضمام عارضی طور پر ستاروں کی تشکیل کو بڑھا سکتے ہیں۔

مستقبل کے ستاروں کی خصوصیات

مستقبل کے ستارے کم ماس سرخ بونے (0.08–1 شمسی ماس، 10^{10}–10^{12} سال) ہوں گے، مؤثر ٹھنڈک اور کم جینس ماس کی وجہ سے۔ بڑے ماس کے ستارے نایاب ہوں گے، کیونکہ بلند دھاتی مقدار بڑے پروٹو ستاروں کی اضافہ کو روکتی ہے۔ یہ ستارے ہلکی انفراریڈ روشنی خارج کریں گے، جس سے کہکشائیں دھندلی ہو جائیں گی۔ دھات سے بھرپور ڈسکیں چٹانی سیاروں کو ترجیح دیں گی۔

کائناتی تناظر

کہکشائیں ستاروں کی موت کے ساتھ دھندلی ہو جائیں گی، سفید بونوں، نیوٹران ستاروں اور بلیک ہولز کو چھوڑ کر۔ زندگی مصنوعی توانائی یا نایاب ستارہ نخلستانوں پر منحصر ہو سکتی ہے، ایک ایسی کائنات میں جو "تھرمل موت" کی طرف بڑھ رہی ہے۔

باب ششم: ستاروں کی نیوکلیو سنتھیسز: عناصر کی تشکیل اور نیوٹرینو دھماکے

ستاروں کی نیوکلیو سنتھیسز ایک کائناتی بھٹی ہے جس میں ستارے ہلکے عناصر سے بھاری عناصر کی ترکیب کرتے ہیں، جو کائنات کی کیمیائی ارتقاء کو آگے بڑھاتے ہیں۔ ستاروں کے مرکزوں میں خاموش فیوزن سے لے کر سپرنووا میں دھماکہ خیز عمل تک، یہ وہ عناصر پیدا کرتا ہے جو سیاروں، زندگی اور کہکشاؤں کو بناتے ہیں۔ پروٹون-پروٹون چین، CNO سائیکل، ٹرپل ایلفا عمل، s-عمل، r-عمل، p-عمل اور فوٹوڈیزینٹیگریشن، جو نیوٹرینو دھماکوں میں عروج پر ہوتے ہیں، عناصر کی تشکیل کے پیچیدہ میکانزم کو ظاہر کرتے ہیں اور سپرنووا کی تیزی سے شناخت کو ممکن بناتے ہیں۔

پروٹون-پروٹون چین

پروٹون-پروٹون چین (pp) کم ماس ستاروں ($T \sim 10^7$ K، مثال کے طور پر، سورج) کو طاقت دیتی ہے۔ یہ دو پروٹونوں کے فیوزن سے شروع ہوتی ہے جو ایک ڈی پروٹون بناتے ہیں، جو بیٹا ڈیکے کے ذریعے ڈیوٹیریم میں تبدیل ہوتا ہے ($^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H +$ $e^+ + \nu_e$، ایک نیوٹرینو خارج کرتا ہے)۔ بعدی مراحل شامل ہیں: ${}^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma$ (فوٹون اخراج)۔ ${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2{}^1H$، دو پروٹون خارج کرتا ہے۔

Pp چین کے شاخیں (ppI، ppII، ppIII) ہیں، جو مختلف توانائیوں (0.4–6 MeV) کے نیوٹرینو پیدا کرتی ہیں۔ یہ سست ہے، سورج کو $\sim 10^{10}$ سال تک برقرار رکھتی ہے، اور اس کے نیوٹرینو، جو Borexino جیسے تجربات کے ذریعے پتہ لگائے گئے ہیں، ستاروں کے فیوزن ماڈلز کی تصدیق کرتے ہیں۔

CNO سائیکل

کاربن-نائٹروجن-آکسیجن سائیکل (CNO) بڑے ماس کے ستاروں (>1.3 شمسی ماس، $T > 1.5 \times 10^7$ K) میں غلبہ رکھتا ہے۔ یہ ${}^{12}C$، ${}^{14}N$ اور ${}^{16}O$ کو کیٹلیسٹ کے طور پر استعمال کرتا ہے تاکہ چار پروٹونوں کو ${}^4He$ میں فیوز کیا جا سکے: ${}^{12}C + {}^1H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$ - ${}^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu_e$ - ${}^{13}C + {}^1H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$ - ${}^{14}N + {}^1H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$ - ${}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu_e$ - ${}^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^{12}C + {}^4He$

CNO سائیکل تیز ہے، تیزی سے فیوزن ($\sim 10^6$–10^7 سال) کو فروغ دیتا ہے، اور زیادہ توانائی (1–10 MeV~) کے نیوٹرینو پیدا کرتا ہے، جو Super-Kamiokande کے ذریعے پتہ لگائے جا سکتے ہیں۔

ٹرپل ایلفا عمل

8 شمسی ماس سے زیادہ کے ستاروں میں، ہیلیئم جلن ($T \sim 10^8$ K) ٹرپل ایلفا عمل کے ذریعے تین ^4He نیوکلائی کو ^{12}C میں فیوز کرتی ہے۔ دو ^4He ایک غیر مستحکم ^8Be بناتے ہیں، جو ایک اور ^4He کو پکڑ کر ^{12}C بناتا ہے، ^{12}C کے توانائی کی سطحوں میں ایک ریزونینس کا استعمال کرتے ہوئے۔ کچھ ^{12}C ایک ^4He کو پکڑ کر ^{16}O بناتے ہیں ($^{12}C + {}^4He \rightarrow {}^{16}O + \gamma$)۔ یہ عمل، جو $\sim 10^5$ سال تک جاری رہتا ہے، کاربن اور آکسیجن کی پیداوار کے لیے اہم ہے، جو زندگی کو ممکن بناتا ہے۔

اعلیٰ جلن کے مراحل

بڑے ماس کے ستارے تیزی سے جلن کے مراحل سے گزرتے ہیں: - **کاربن جلن** ($T \sim 6 \times 10^8$ K، $\sim 10^3$ سال): $^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^4He$ یا $^{23}Na + {}^1H$ - **نیون جلن** ($T \sim 1.2 \times 10^9$ K، ~1 سال): $^{20}Ne + \gamma \rightarrow {}^{16}O + {}^4He$ - **آکسیجن جلن** ($T \sim 2 \times 10^9$ K، ~6 ماہ): $^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^4He$ - **سلیکون جلن** ($T \sim 3 \times 10^9$ K، ~1 دن): $^{28}Si + \gamma \rightarrow {}^{56}Fe, {}^{56}Ni$
فوٹوڈیزینٹیگریشن اور کیپچر کے ذریعے۔

لوہے کے عروج کے عناصر فیوزن کے اختتام کو نشان زد کرتے ہیں، کیونکہ بعد کے رد عمل اینڈوتھرمک ہوتے ہیں۔

S- عمل (سست نیوٹران کیپچر)

S- عمل AGB ستاروں (1–8 شمسی ماس) اور کچھ بڑے ماس کے ستاروں میں ہوتا ہے، جہاں نیوٹران آہستہ آہستہ کیپچر کیے جاتے ہیں، جس سے کیپچر کے درمیان بیٹا ڈیکے ممکن ہوتا ہے (مثال کے طور پر، $^{56}Fe + n \rightarrow {}^{57}Fe$، پھر $^{57}Fe \rightarrow {}^{57}Co + e^- + \bar{\nu}_e$)۔ نیوٹران رد عمل جیسے $^{13}C(\alpha,n)^{16}O$ سے آتے ہیں، جو AGB ستاروں کی ہیلیئم پرتوں میں ہوتے ہیں۔ یہ $\sim 10^3$–10^5 سالوں میں سٹرانشیم، بیریم اور سیسہ جیسے عناصر پیدا کرتا ہے، جو ستاروں کی ہواؤں کے ذریعے ISM کو افزودہ کرتا ہے۔

R- عمل (تیز نیوٹران کیپچر)

R- عمل انتہائی ماحول (سپرنووا، نیوٹران ستاروں کے انضمام) میں ہوتا ہے، جہاں نیوٹران کا بہاؤ $\sim 10^{22}$ نیوٹران/cm²/s ہوتا ہے۔ نیوکلائی بیٹا ڈیکے سے زیادہ تیزی سے نیوٹران کیپچر کرتے ہیں، سونا، چاندی اور یورینیم جیسے بھاری عناصر بناتے ہیں (مثال کے طور پر، ^{56}Fe + کئی $^{238}U \rightarrow n$)۔ یہ سپرنووا شاک ویو یا انضمامی ایجیکٹا میں سیکنڈوں تک جاری رہتا ہے اور بھاری عناصر کا ~50% حصہ رکھتا ہے۔

P- عمل (پروٹون کیپچر/فوٹوڈیزینٹیگریشن)

P- عمل سپرنووا میں نایاب پروٹون سے بھرپور آئسوٹوپس (مثال کے طور پر، ^{96}Ru، ^{92}Mo) پیدا کرتا ہے۔ بلند توانائی کے گاما شعاعیں ($T \sim 2–3 \times 10^9$ K) s- اور r- عمل کے نیوکلائی کو فوٹوڈیزینٹیگریٹ کرتی ہیں (مثال کے طور پر، $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow {}^{97}\text{Mo} + n$)، یا پروٹون پروٹون سے بھرپور ماحول میں کیپچر کیے جاتے ہیں۔ اس کی کم کارکردگی p-نیوکلائی کی نایابی کی وضاحت کرتی ہے۔

سپرنووا میں فوٹوڈیزینٹیگریشن

کور گرنے والی سپرنووا میں، لوہے کے کور میں فوٹوڈیزینٹیگریشن ($T > 10^{10}$ K) ^{56}Fe کو پروٹون، نیوٹران اور ^{4}He میں توڑ دیتی ہے (مثال کے طور پر، $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13\,^4\text{He} + 4n$)۔ یہ اینڈوتھرمک عمل دباؤ کو کم کرتا ہے، نیوٹران ستارہ یا بلیک ہول کی طرف گرنے کو تیز کرتا ہے۔ شاک ویو دھماکہ خیز نیوکلیو سنتھیسز کو متحرک کرتی ہے، عناصر کو باہر نکالتی ہے۔

نیوٹرینو دھماکہ اور سپرنووا کی شناخت

کور گرنے کے دوران، سپرنووا کی تقریباً 99% توانائی (~10^{46} J) نیوٹرانائزیشن ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$) اور تھرمل عمل ($e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$) کے ذریعے نیوٹرینو کے طور پر خارج ہوتی ہے۔ تقریباً 10 سیکنڈ کا دھماکہ آپٹیکل دھماکے سے پہلے ہوتا ہے اور Super-Kamiokande، IceCube اور DUNE جیسے سہولیات کے ذریعے پتہ لگایا جا سکتا ہے۔ SN 1987A کے تقریباً 20 نیوٹرینو نے اس کی تصدیق کی۔ متعدد ڈیٹیکٹرز سے ٹرائینگولیشن سیکنڈوں میں سپرنووا کی جگہ کا تعین کرتی ہے، جس سے آپٹیکل، ایکس رے اور گاما ویو لینتھ پر فالو اپ مشاہدات ممکن ہوتے ہیں، جو پیش رو خصوصیات اور نیوکلیو سنتھیسز کی پیداوار کو ظاہر کرتے ہیں۔

غیر یکساں فراوانی

عناصر کی فراوانی نیوکلیو سنتھیسز کی عکاسی کرتی ہے: - BBN: **H, He** سے ~98%۔ - **C, O, Ne, Mg**: فیوزن سے وافر۔ - **Fe, Ni**: نیوکلیائی استحکام کی وجہ سے عروج۔ - r: **Au, U**- عمل سے نایاب۔ - **P-نیوکلائی**: p- عمل سے سب سے نایاب۔

کیس اسٹڈی: یورینیم-235 اور یورینیم-238

^{235}U اور ^{238}U سپرنووا یا نیوٹران ستاروں کے انضمام میں r- عمل کے ذریعے بنتے ہیں۔ ^{235}U (نصف زندگی ~703.8 ملین سال) ^{238}U (نصف زندگی ~4.468 ارب سال) سے زیادہ تیزی سے زوال پذیر ہوتا ہے۔ زمین کی تشکیل کے وقت (~4.54 ارب سال پہلے)، ^{235}U/^{238}U تناسب تقریباً 0.31 (~23.7% ^{235}U) تھا۔ تقریباً 2 ارب سال پہلے، یہ ~0.037 (~3.6% ^{235}U) تھا، جو فیشن کے لیے کافی تھا۔ گیبون میں اوکلو ری ایکٹر اس وقت بنا جب اعلیٰ معیار کی یورینیم ایسک (~20–60% یورینیم آکسائیڈ)،

جو تلچھٹی عمل سے مرتکز ہوئی تھی، نیوٹران ماڈریٹ کرنے والے زیر زمین پانی کے ساتھ تعامل کیا۔ کوئی آئسوٹوپک افزودگی نہیں ہوئی؛ قدرتی ~^{235}U %3.6 نے کریٹیکلٹی کو فعال کیا، جس نے ~150,000–1 ملین سال تک وقفے وقفے سے فیشن رد عمل کو برقرار رکھا، ^{143}Nd جیسے آئسوٹوپس اور گرمی پیدا کی۔

نتیجہ: ہم ستاروں کی گرد ہیں، کائناتی آگ سے دوبارہ پیدا ہوئے

بگ بینگ کی جلی ہوئی پیدائش سے لے کر دھندلے مستقبل تک، ستاروں نے کائنات کو شکل دی ہے۔ آبادی III کے ستاروں نے کائنات کو روشن کیا اور پہلی دھاتیں بنائیں۔ آبادی II کے ستاروں نے پیچیدگی بنائی، اور آبادی I کے ستاروں نے سیاروں اور زندگی کو ممکن بنایا۔ ستاروں کی نیوکلیو سنتھیسز—pp چین، CNO سائیکل، ٹرپل ایلفا عمل، r-، s- اور p- عمل، اور فوٹوڈیزینٹیگریشن کے ذریعے—عناصر بنائے، نیوٹرینو دھماکوں نے ان کی دھماکہ خیز پھیلاؤ کو نشان زد کیا۔ اوکلو ری ایکٹر، جو قدرتی ^{235}U کی فراوانی سے چلتا تھا، اس وراثت کو مجسم کرتا ہے۔ ہم ستاروں کی گرد ہیں، قدیم ستاروں سے دوبارہ پیدا ہوئے، ان کے عناصر کو اپنے جسموں میں لے کر۔ جیسے جیسے کائنات تاریک ہوتی جاتی ہے، ہماری کائناتی وراثت مستقبل کی نسلوں کو نئے ستاروں کو روشن کرنے اور اینٹروپک خلا میں تخلیق کو جاری رکھنے کی ترغیب دے سکتی ہے۔