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

من الانفجار العظيم إلى التخليق النووي النجمي: نحن مصنوعون من غبار النجوم

الكون لوحة شاسعة وديناميكية، مرسومة بضوء النجوم والعناصر التي تصنعها. منذ الولادة الكارثية للانفجار العظيم إلى المستقبل الباهت والمتجمد للكون البارد، شكلت الأجيال النجمية—السكان الثالث، الثاني، والأول، وخلفاؤهم المحتملون—التطور الكيميائي والفيزيائي والبيولوجي للكون. من خلال حياتهم النارية وموتهم المتفجر، خلقت النجوم العناصر التي شكلت المجرات والكواكب والحياة نفسها. تستكشف هذه المقالة العصور الكونية، متعمقة في أصول وتأثيرات الأجيال النجمية، مع دراسة متعمقة للتخليق النووي النجمي—العمليات الكيميائية التي تغذي النجوم وتنتج عناصر الكون. تتكلل المقالة بالحقيقة العميقة أننا غبار نجوم، أعيدت ولادتنا من رماد النجوم القديمة، وتنظر في مستقبل تكوّن النجوم في كون يظلم.

الفصل الأول: الانفجار العظيم وفجر الكون

بدأ الكون منذ حوالي 13.8 مليار سنة في الانفجار العظيم، حدث ذو كثافة وحرارة لا نهائيتين حيث ظهرت كل المادة والطاقة والفضاء والزمن من نقطة فرادة. هذا الجحيم البدائي، الذي كان أكثر حرارة من 10^{32} كلفن، جمع القوى الأساسية—الجاذبية، الكهرومغناطيسية، القوة النووية القوية، والقوة النووية الضعيفة—في حالة موحدة، لحظة عابرة من التناسق الكوني.

التمدد والتبريد الكوني

خلال 10^{-36} ثانية، أدى التضخم—تمدد أسي—إلى تمدد الكون من مقاييس دون ذرية إلى أبعاد كبيرة، مسطحاً التشوهات وباذراً تقلبات الكثافة التي ستشكل المجرات لاحقاً. بحلول 10^{-12} ثانية، انفصلت القوة النووية القوية عن القوة الكهروضعيفة، تلتها انفصال الكهرومغناطيسية والقوة الضعيفة عند حوالي 10^{-6} ثوانٍ مع انخفاض الحرارة إلى أقل من 10^{15} كلفن. هذه الانفصالات أسست القوانين الفيزيائية التي تحكم المادة، من الكواركات إلى المجرات.

تكوّن العناصر البدائية

بحلول ثانية واحدة، برد الكون إلى حوالي 10^{10} كلفن، مما سمح للكواركات والغلوونات بالتكثف إلى بروتونات ونيوترونات عبر القوة القوية. خلال الدقائق القليلة التالية—عصر التخليق النووي للانفجار العظيم (BBN)—اندمجت البروتونات والنيوترونات لتشكيل العناصر البدائية: حوالي 75% هيدروجين-1 (^{1}H، بروتونات)، 25% هيليوم-4 (^{4}He)، وكميات ضئيلة من الديوتيريوم (^{2}H)، الهيليوم-3 (^{3}He)، والليثيوم-7 (^{7}Li). أبقت الحرارة العالية (~10^9 كلفن) هذه النوى متأينة، محافظة على بلازما من الجسيمات المشحونة.

إعادة التركيب والخلفية الكونية الميكروية

بحلول حوالي 380,000 سنة (الإزاحة الحمراء $z \approx 1100$)، برد الكون إلى حوالي 3000 كلفن، مما مكّن البروتونات ونوى الهيليوم من التقاط الإلكترونات في إعادة التركيب. هذا حيّد البلازما، مكوناً ذرات هيدروجين وهيليوم مستقرة. تحررت

الفوتونات، التي كانت تتشتت سابقاً بواسطة الإلكترونات الحرة، مكونة الخلفية الكونية الميكروية (CMB)—لقطة حرارية أُزيحت الآن إلى 2.7 كلفن بسبب التمدد. تكشف تقلبات الخلفية الكونية الميكروية الدقيقة (~1 جزء في 10^5) عن بذور البنية الكونية، وهي قابلة للكشف اليوم بواسطة مراصد مثل بلانك.

العصور المظلمة

بعد إعادة التركيب، دخل الكون العصور المظلمة، وهي حقبة بلا نجوم يسيطر عليها غاز الهيدروجين والهيليوم المحايد. بدأ الانهيار الجاذبي داخل هالات المادة المظلمة بتشكيل كتل كثيفة، مهيئة المسرح للنجوم الأولى. كانت العناصر البدائية، البسيطة والنادرة، المواد الخام لتكوّن النجوم، مع توفير المادة المظلمة للسقالة الجاذبية.

الفصل الثاني: نجوم السكان الثالث—الجيل الأول: الرواد الكونيون

أضاءت نجوم السكان الثالث، الجيل النجمي الأول، منذ حوالي 100–400 مليون سنة بعد الانفجار العظيم ($z \approx 10–20$)، منهية العصور المظلمة ومبشرة بـ"الفجر الكوني". تشكلت هذه النجوم في كون كثيف (~10^{-24} غرام/سم^3)، دافئ (CMB ~20–100 كلفن)، ونقي كيميائياً، يتألف تقريباً بالكامل من الهيدروجين (~76%) والهيليوم (~24%)، مع معدنية $Z \approx 10^{-10} Z_\odot$.

البيئة والتكوّن

مكّنت الكثافة العالية للكون المبكر سحب الغاز من الانهيار داخل هالات المادة المظلمة الصغيرة (~10^5–10^6 كتلة شمسية)، محققة كثافة ~10^4–10^6 جسيمات/سم^3. أدى الضغط الجاذبي إلى تسخين السحب إلى ~10^3–10^4 كلفن، لكن التبريد اعتمد على الهيدروجين الجزيئي (H_2)، الذي تشكل عبر تفاعلات مثل $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$، تليها $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$. كان تبريد H_2، عبر الانتقالات الدورانية والاهتزازية، غير فعال، مما أبقى السحب ساخنة ومنع التفتت. فضّلت كتلة جينز العالية (~10^2–10^3 كتلة شمسية) تكوّن نجوم أولية ضخمة.

الخصائص

كانت نجوم السكان الثالث على الأرجح ضخمة (10–1000 كتلة شمسية)، ساخنة (~10^5 كلفن لدرجة حرارة السطح)، ومضيئة، تنبعث إشعاعات فوق بنفسجية قوية. دفع كتلتها العالية إلى اندماج سريع، بشكل رئيسي عبر دورة CNO (باستخدام كربون ضئيل من الاندماج المبكر)، مستنفدة الوقود في حوالي 1–3 ملايين سنة. تنوعت مصائرها: - **10–100 كتلة شمسية**: انفجارات سوبرنوفا انهيار نووي، مبعثرة المعادن مثل الكربون والأكسجين والحديد. - **>100 كتلة شمسية**: انهيار مباشر إلى ثقوب سوداء، ربما زرعت بذور الكوازارات المبكرة. - **140–260 كتلة شمسية**: انفجارات سوبرنوفا عدم استقرار الزوج، حيث أدى إنتاج أزواج الإلكترون-البوزيترون إلى التفكك الكامل، دون ترك بقايا.

الأهمية

كانت نجوم السكان الثالث مهندسي الكون. أدت إشعاعاتها فوق البنفسجية إلى تأيين الهيدروجين، مدفوعة إعادة التأيين ($z \approx 6–15$)، مما جعل الكون شفافاً. أثرت انفجاراتها السوبرنوفا على الوسط البينجمي بالمعادن، مما مكّن تكوّن نجوم السكان الثاني. نظمت التغذية الراجعة من الإشعاع والرياح والانفجارات تكوّن النجوم، مشكلة المجرات المبكرة. ربما شكلت بقاياها من الثقوب السوداء بذور الثقوب السوداء الهائلة في مراكز المجرات.

الكشف المحتمل وآفاق المستقبل

يعد رصد نجوم السكان الثالث مباشرة تحدياً بسبب بعدها وأعمارها القصيرة. قدم تلسكوب جيمس ويب (JWST) أدلة: في عام 2023، أظهر GN-z11 ($z \approx 11$) انبعاث هيليوم متأين (He II) دون خطوط معدنية، مما يشير إلى نجوم السكان الثالث. كما أظهر RX J2129–z8He II (2022، $z \approx 8$) علامات محتملة، على الرغم من أن النوى النشطة للمجرات (AGN) أو نجوم السكان الثاني منخفضة المعادن تظل بدائل. يتطلب التأكيد التحليل الطيفي عالي الدقة للتحقق من غياب المعادن وانبعاث He II 1640Å القوي.

ستستكشف الأدوات المستقبلية مثل التلسكوب الكبير للغاية (ELT) وNIRSpec التابع لـ JWST مناطق $z > 10–20$، مستهدفة المجرات النقية. تشير المحاكاة إلى اكتشاف انفجارات سوبرنوفا السكان الثالث عبر منحنيات الضوء الفريدة أو موجات الجاذبية من انفجارات عدم استقرار الزوج. قد تحافظ نجوم السكان الثاني منخفضة المعادن، مثل تلك الموجودة في الهالة المجرية، على عائدات انفجارات سوبرنوفا السكان الثالث، مقدمة دليلاً غير مباشر. يمكن لهذه الجهود أن تكشف عن الكتلة، المعدنية، ودور نجوم السكان الثالث في التطور الكوني.

الفصل الثالث: نجوم السكان الثاني—الجيل الثاني: الجسر إلى التعقيد

تشكلت نجوم السكان الثاني منذ حوالي 400 مليون إلى بضعة مليارات سنة بعد الانفجار العظيم ($z \approx 10–3$)، مع تجمع المجرات في كون أقل كثافة وأبرد. هذه النجوم شكلت جسراً من العصر البدائي إلى المجرات الحديثة، مبنية التعقيد من خلال التخصيب المعدني.

البيئة والتكوّن

انخفضت الكثافة المتوسطة للكون مع التمدد، لكن السحب المكونة للنجوم في المجرات المبكرة وصلت إلى $\sim 10^2–10^4$ جسيمات/سم^3 داخل هالات المادة المظلمة الأكبر ($\sim 10^7–10^9$ كتلة شمسية). بردت الخلفية الكونية الميكروية إلى $\sim 10–20$ كلفن، وكانت السحب، المخصبة بانفجارات سوبرنوفا السكان الثالث، ذات معدنية $Z \approx 10^{-4}–10^{-2}\ Z_\odot$. مكّنت المعادن (مثل الكربون والأكسجين) التبريد عبر الخطوط الذرية ([C II] 158 ميكرومتر، [O I] 63 ميكرومتر)، مخفضة الحرارة إلى $\sim 10^2–10^3$ كلفن. عززت الغبار الضئيل التبريد عبر الانبعاث الحراري. سمحت كتلة جينز المنخفضة ($\sim 1–100$ كتلة شمسية) بالتفتت، مكونة كتل نجمية متنوعة.

الخصائص

تتراوح نجوم السكان الثاني من كتلة منخفضة (0.1–1 كتلة شمسية، أعمار $> 10^{10}$ سنة) إلى ضخمة (10–100 كتلة شمسية، $\sim 10^6–10^7$ سنوات). توجد في هالات المجرات، العناقيد الكروية (مثل M13)، وانتفاخات المجرات المبكرة، وتتميز بمعدنية منخفضة، مكونة أطيافاً أكثر احمراراً. يعكس تكوّنها في عناقيد التفتت، وأثرت انفجاراتها السوبرنوفا على الوسط البينجمي إلى $\sim 0.1\ Z_\odot$.

الأهمية

دفع نجوم السكان الثاني تطور المجرات. ركبت انفجاراتها السوبرنوفا عناصر أثقل (مثل السيليكون والمغنيسيوم)، مكونة غباراً وجزيئات سهلت تكوّن النجوم. نجوم السكان الثاني منخفضة الكتلة، القابلة للرصد في العناقيد الكروية وهالة درب

التبانة، تحافظ على توقيعات انفجارات سوبرنوفا السكان الثالث. شكلت التغذية الراجعة من الإشعاع والانفجارات أقراص المجرات، منظمة تكوّن النجوم. وضعت الأساس لنجوم السكان الأول وأنظمة الكواكب.

الدليل الرصدي

نجوم السكان الثاني قابلة للرصد في العناقيد الكروية، هالات المجرات، وكنجوم منخفضة المعادن (مثل HD 122563، $Z \approx 0.001\ Z_\odot$). قد تعكس النجوم منخفضة المعادن للغاية ($Z < 10^{-3}\ Z_\odot$) عائدات السكان الثالث. ستعمل مسوحات مثل SDSS وGaia، وملاحظات ELT المستقبلية، على تحسين فهمنا لتكوّن السكان الثاني وتجميع المجرات المبكرة.

الفصل الرابع: نجوم السكان الأول—الجيل الثالث: عصر الكواكب والحياة

تشكلت نجوم السكان الأول منذ حوالي 10 مليارات سنة حتى الآن ($z \approx 0–2$)، مسيطرة على المجرات الناضجة مثل قرص درب التبانة. مكّنت هذه النجوم، بما في ذلك الشمس، الكواكب والحياة من خلال بيئاتها الغنية بالمعادن.

البيئة والتكوّن

الكون متفرق ($\sim 10^{-30}$ غرام/سم³)، مع تكوّن النجوم في سحب جزيئية كثيفة ($\sim 10^{2}–10^{6}$ جسيمات/سم³) يتم إطلاقها بواسطة موجات كثافة لولبية أو انفجارات سوبرنوفا. الخلفية الكونية الميكروية هي 2.7 كلفن، والسحب، مع $Z \approx 0.1–2\ Z_\odot$، تبرد إلى ~10–20 كلفن عبر الخطوط الجزيئية (مثل CO، HCN) وانبعاث الغبار. تفضل كتلة جينز المنخفضة (~0.1–10 كتلة شمسية) النجوم الصغيرة، على الرغم من تكوّن النجوم الضخمة في المناطق النشطة.

الخصائص

تتراوح نجوم السكان الأول من الأقزام الحمراء (0.08–1 كتلة شمسية، $>10^{10}$ سنة) إلى نجوم من النوع O (10–100 كتلة شمسية، $\sim 10^{6}–10^{7}$ سنوات). تنتج معدنيتها العالية أطيافاً مشرقة غنية بالمعادن مع خطوط مثل Fe I وCa II. تتشكل في عناقيد مفتوحة (مثل الثريا) أو سدم (مثل أوريون). الشمس، نجم السكان الأول يبلغ من العمر 4.6 مليار سنة، نمطية.

الأهمية: الكواكب والحياة

مكّنت المعدنية العالية تكوّن الكواكب الصخرية، حيث شكل الغبار والمعادن في الأقراص البروتوكوكبية كويكبات أولية. أنتج قرص الشمس الأرض منذ حوالي 4.5 مليار سنة، مع السيليكون والأكسجين والحديد مكوناً الكواكب الأرضية، والكربون مكّن الجزيئات العضوية. دعم الإخراج المستقر للشمس وعمرها الطويل منطقة صالحة للسكن للماء السائل، مما عزز الحياة القائمة على الكربون على مدى مليارات السنين. تدفع تنوع نجوم السكان الأول التخصيب المستمر للوسط البينجمي، مستدامة تكوّن النجوم والكواكب.

الدليل الرصدي

تسيطر نجوم السكان الأول على قرص درب التبانة، قابلة للرصد في مناطق تكوّن النجوم والعناقيد. تظهر مسوحات الكواكب الخارجية (مثل كيبلر، TESS) أن النجوم ذات المعدنية العالية أكثر احتمالية لاستضافة الكواكب، مع ~50% من النجوم

الشبيهة بالشمس قد تستضيف عوالم صخرية. تكشف التحليلات الطيفية عن تركيباتها الغنية بالمعادن، متتبعة التخصيب التراكمي.

الفصل الخامس: الأجيال النجمية المستقبلية: كون أظلم وأبرد

مع دفع الطاقة المظلمة للتمدد الكوني، سيصبح الكون أبرد وأقل كثافة وأكثر غنى بالمعادن، مغيراً تكوّن النجوم. بحلول ~100 مليار سنة ($z \approx -1$)، سينخفض تكوّن النجوم، وبحلول ~10^{12} سنة، قد يتوقف، مما يؤدي إلى كون مظلم وإنتروبي.

الظروف المستقبلية

ستنخفض الكثافة المتوسطة، معزولة المجرات. ستبرد الخلفية الكونية الميكروية إلى <<0.3 كلفن، والسحب، مع $Z > 2–5$ $Z\odot$، ستتبرد بكفاءة عبر المعادن (مثل [Fe II]، [Si II]) والغبار. سيعتمد تكوّن النجوم على جيوب غاز نادرة، حيث يتم استنفاد معظم غاز المجرات بواسطة تكوّن النجوم، انفجارات السوبرنوفا، أو نفاثات الثقوب السوداء. قد تعزز اندماجات المجرات تكوّن النجوم مؤقتاً.

خصائص النجوم المستقبلية

ستكون النجوم المستقبلية أقزاماً حمراء منخفضة الكتلة (0.08–1 كتلة شمسية، 10^{10}–10^{12} سنة)، بسبب التبريد الفعال وكتلة جينز المنخفضة. ستكون النجوم الضخمة نادرة، حيث تعيق المعدنية العالية تراكم البروتوستار الكبير. ستنبعث هذه النجوم ضوءاً أحمر خافتاً، معتمة المجرات. ستفضل الأقراص الغنية بالمعادن الكواكب الصخرية.

النظرة الكونية

ستتلاشى المجرات مع موت النجوم، تاركة الأقزام البيضاء، النجوم النيوترونية، والثقوب السوداء. قد تعتمد الحياة على الطاقة الاصطناعية أو واحات نجمية نادرة في كون يقترب من "الموت الحراري".

الفصل السادس: التخليق النووي النجمي: صيغة العناصر وانفجارات النيوترينو

التخليق النووي النجمي هو الفرن الكوني حيث تصنع النجوم عناصر أثقل من العناصر الأخف، مدفوعة التطور الكيميائي للكون. من الاندماج الهادئ في قلوب النجوم إلى العمليات المتفجرة في السوبرنوفا، ينتج العناصر التي تشكل الكواكب والحياة والمجرات. تكشف سلسلة البروتون-البروتون، دورة CNO، عملية الألفا الثلاثية، العملية s، العملية r، العملية p، والتفكك الضوئي، التي تتكلل بانفجارات النيوترينو، عن الآليات المعقدة لتكوّن العناصر وتمكن من الكشف السريع عن السوبرنوفا.

سلسلة البروتون-البروتون

تعمل سلسلة البروتون-البروتون (pp) على تشغيل النجوم منخفضة الكتلة ($T \sim 10^7$ كلفن، مثل الشمس). تبدأ باندماج بروتونين لتكوين ديبروتون، يتحلل بيتا إلى ديوتيريوم ($^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$، مطلقاً نيوترينو). تشمل الخطوات اللاحقة: ${}^2H + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma$ (انبعاث فوتون). - ${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2{}^1H$، مطلقة بروتونين.

تتفرع سلسلة pp (ppI، ppII، ppIII)، مكونة نيوترينو بطاقات مختلفة (0.4–6 ميغا إلكترون فولت). إنها بطيئة، مستدامة الشمس لمدة ~10^{10} سنة، وتؤكد نماذج الاندماج النجمي نيوترينوها، التي كشفت عنها تجارب مثل Borexino.

دورة CNO

تسيطر دورة الكربون-النيتروجين-الأكسجين (CNO) على النجوم الضخمة (>1.3 كتلة شمسية، $T > 1.5 \times 10^7$ كلفن). تستخدم ^{14}N، ^{12}C، و^{16}O كمحفزات لدمج أربعة بروتونات إلى ^4He: - $^{12}C + {}^1H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$ - $^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu_e$ - $^{13}C + {}^1H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$ - $^{14}N + {}^1H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$ - $^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu_e$ - $^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^{12}C + {}^4He$

تكون دورة CNO أسرع، مدفوعة الاندماج السريع (~10^6–10^7 سنوات)، وتنتج نيوترينو أعلى طاقة (~1–10 ميغا إلكترون فولت)، قابلة للكشف بواسطة Super-Kamiokande.

عملية الألفا الثلاثية

في النجوم >8 كتلة شمسية، يندمج احتراق الهيليوم ($T \sim 10^8$ كلفن) ثلاث نوى ^4He إلى ^{12}C عبر عملية الألفا الثلاثية. يشكل اثنان من ^4He نواة ^8Be غير مستقرة، تلتقط ^4He أخرى لتشكيل ^{12}C، مستغلة رنيناً في مستويات طاقة ^{12}C. يلتقط بعض ^{12}C نواة ^4He لتشكيل ^{16}O ($^{12}C + {}^4He \rightarrow {}^{16}O + \gamma$). هذه العملية، التي تستغرق ~10^5 سنوات، حاسمة لإنتاج الكربون والأكسجين، مكّنة الحياة.

مراحل الاحتراق المتقدمة

تخضع النجوم الضخمة لمراحل احتراق سريعة: - **احتراق الكربون** ($T \sim 6 \times 10^8$ كلفن، ~10^3 سنوات): $^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^4He$ أو $^{23}Na + {}^1H$. - **احتراق النيون** ($T \sim 1.2 \times 10^9$ كلفن، ~1 سنة): $^{20}Ne + \gamma \rightarrow {}^{16}O + {}^4He$. - **احتراق الأكسجين** ($T \sim 2 \times 10^9$ كلفن، ~6 أشهر): $^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^4He$. - **احتراق السيليكون** ($T \sim 3 \times 10^9$ كلفن، ~1 يوم): $^{28}Si + \gamma \rightarrow {}^{56}Ni$، ^{56}Fe عبر التفكك الضوئي والالتقاط.

تمثل عناصر ذروة الحديد نهاية الاندماج، حيث تكون التفاعلات الإضافية ماصة للطاقة.

العملية S (الالتقاط النيوتروني البطيء)

تحدث العملية s في نجوم AGB (1–8 كتلة شمسية) وبعض النجوم الضخمة، حيث يتم التقاط النيوترونات ببطء، مما يسمح بالتحلل بيتا بين الالتقاطات (مثل $^{56}Fe + n \rightarrow {}^{57}Fe$، ثم $^{57}Fe \rightarrow {}^{57}Co + e^- + \bar{\nu}_e$). تأتي النيوترونات من تفاعلات مثل $^{13}C(\alpha,n)^{16}O$ في أغلفة الهيليوم لنجوم AGB. تنتج عناصر مثل السترونتيوم، الباريوم، والرصاص على مدى ~10^3–10^5 سنوات، مخصبة الوسط البينجمي عبر الرياح النجمية.

العملية R (الالتقاط النيوتروني السريع)

تحدث العملية r في بيئات متطرفة (السوبرنوفا، اندماجات النجوم النيوترونية) مع تدفقات نيوترونية ~10^{22} نيوترون/سم²/ث. تلتقط النوى النيوترونات أسرع من التحلل بيتا، مكونة عناصر ثقيلة مثل الذهب، الفضة، واليورانيوم (مثل ^{56}Fe + نيوترونات متعددة → ^{238}U). تدوم ثوانٍ في موجات صدم السوبرنوفا أو نفثات الاندماج، مسؤولة عن ~50% من العناصر الثقيلة.

العملية P (الالتقاط البروتوني/التفكك الضوئي)

تنتج العملية p نظائر غنية بالبروتونات نادرة (مثل ^{92}Mo، ^{96}Ru) في السوبرنوفا. تؤدي أشعة غاما عالية الطاقة (T ~ 2–3 × 10^9 كلفن) إلى تفكيك نوى العمليتين s وr ضوئياً (مثل ^{98}Mo + γ → ^{97}Mo + n)، أو يتم التقاط البروتونات في بيئات غنية بالبروتونات. تفسر كفاءتها المنخفضة ندرة نوى p.

التفكك الضوئي في السوبرنوفا

في انفجارات السوبرنوفا انهيار النواة، يكسر التفكك الضوئي في نواة الحديد (T > 10^{10} كلفن) ^{56}Fe إلى بروتونات، نيوترونات، و^{4}He (مثل ^{56}Fe + γ → 13^{4}He + 4n). تقلل هذه العملية الماصة للطاقة الضغط، معجلة الانهيار إلى نجم نيوتروني أو ثقب أسود. تؤدي موجة الصدم إلى التخليق النووي المتفجر، مطلقة العناصر.

انفجار النيوترينو واكتشاف السوبرنوفا

خلال انهيار النواة، يتم إطلاق ~99% من طاقة السوبرنوفا (~10^{46} جول) كنيوترينو عبر النيوترونية (p + e^- → n + ν_e) والعمليات الحرارية ($e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$). يسبق الانفجار البصري انفجار ~10 ثوانٍ، قابل للكشف بواسطة مرافق مثل Super-Kamiokande، IceCube، وDUNE. أكدت ~20 نيوترينو من SN 1987A ذلك. يحدد التثليث من كاشفات متعددة مواقع السوبرنوفا خلال ثوانٍ، مكّنة ملاحظات متابعة في الأطوال الموجية البصرية، أشعة إكس، وأشعة غاما، كاشفة خصائص السلف ونواتج التخليق النووي.

الوفرة غير المتساوية

تعكس وفرة العناصر التخليق النووي: - **H، He**: ~98% من BBN. - **C، O، Ne، Mg**: وفيرة من الاندماج. - **Fe، Ni**: ذروة بسبب الاستقرار النووي. - **Au، U**: نادرة، من العملية r. - **نوى P**: الأكثر ندرة، من العملية p.

دراسة حالة: اليورانيوم-235 واليورانيوم-238

يتشكل ^{235}U و^{238}U عبر العملية r في السوبرنوفا أو اندماجات النجوم النيوترونية. يتحلل ^{235}U (نصف العمر ~703.8 مليون سنة) أسرع من ^{238}U (نصف العمر ~4.468 مليار سنة). عند تكوّن الأرض (~4.54 مليار سنة مضت)، كانت نسبة ^{235}U/^{238}U (~23.7% ^{235}U) ~0.31. بحلول ~2 مليار سنة مضت، كانت ~0.037 (~3.6% ^{235}U)، كافية للانشطار. تشكل مفاعل أوكلو في الغابون عندما تفاعل خام اليورانيوم عالي الجودة (~20–60% أكاسيد اليورانيوم)، المركز بعمليات الترسيب، مع المياه الجوفية، التي خففت النيوترونات. لم يحدث تخصيب نظائري؛ مكّن ~3.6% ^{235}U الطبيعي من الحرجية، مستدماً تفاعلات انشطار متقطعة على مدى ~150,000–1 مليون سنة، مكوناً نظائر مثل ^{143}Nd وحرارة.

الخاتمة: نحن غبار نجوم، أعيدت ولادتنا من النيران الكونية

من الولادة النارية للانفجار العظيم إلى المستقبل الباهت، شكلت النجوم الكون. أضاءت نجوم السكان الثالث الكون، صيغت أول المعادن. بنت نجوم السكان الثاني التعقيد، ومكّنت نجوم السكان الأول الكواكب والحياة. صيغت العناصر عبر التخليق النووي النجمي—من خلال سلسلة pp، دورة CNO، عملية الألفا الثلاثية، العمليات s، r، وp، والتفكك الضوئي—مع إشارات انفجارات النيوترينو إلى انتشارهم المتفجر. يجسد مفاعل أوكلو، المدفوع بوفرة ^{235}U الطبيعية، هذا الإرث. نحن غبار نجوم،

أعيدت ولادتنا من النجوم القديمة، حاملين عناصرها في أجسادنا. مع ظلمة الكون، قد يلهم إرثنا الكوني الأجيال المستقبلية لإشعال نجوم جديدة، مديمة الخلق في فراغ إنتروبي.