

# Del Big Bang a la Nucleosíntesis Estelar: Estamos Hechos de Polvo de Estrellas

El universo es un vasto lienzo dinámico, pintado con la luz de las estrellas y los elementos que forjan. Desde el nacimiento cataclísmico del Big Bang hasta el futuro lejano y desvaneciente de un cosmos frío, las generaciones estelares —Población III, II y I, y sus posibles sucesores— han moldeado la evolución química, física y biológica del universo. A través de sus vidas ardientes y muertes explosivas, las estrellas han creado los elementos que forman galaxias, planetas y la vida misma. Este ensayo explora las épocas cósmicas, profundizando en los orígenes, entornos y legados de las generaciones estelares, con un examen detallado de la nucleosíntesis estelar, los procesos alquímicos que alimentan las estrellas y producen los elementos del universo. Culmina en la profunda verdad de que somos polvo de estrellas, renacidos de las cenizas de estrellas antiguas, y considera el futuro de la formación estelar en un universo que se oscurece.

## Capítulo 1: El Big Bang y el Amanecer del Cosmos

El universo comenzó hace  $\sim$ 13.8 mil millones de años con el Big Bang, un evento de densidad y temperatura infinitas donde toda la materia, energía, espacio y tiempo surgieron de una singularidad. Este infierno primordial, más caliente que  $10^{32}$  K, mantuvo las fuerzas fundamentales —gravedad, electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil— en un estado unificado, un momento fugaz de simetría cósmica.

### Expansión y Enfriamiento Cósmico

En  $10^{-36}$  segundos, la inflación —una expansión exponencial— estiró el universo desde escalas subatómicas hasta dimensiones macroscópicas, suavizando irregularidades y sembrando fluctuaciones de densidad que luego formarían galaxias. Para los  $10^{-12}$  segundos, la fuerza fuerte se separó de la fuerza electrodébil, seguida por la división del electromagnetismo y la fuerza débil a  $\sim 10^{-6}$  segundos cuando las temperaturas cayeron por debajo de  $10^{15}$  K. Estas separaciones establecieron las leyes físicas que gobiernan la materia, desde quarks hasta galaxias.

### Formación de Elementos Primordiales

A los 1 segundo, el universo se enfrió a  $\sim 10^{10}$  K, permitiendo que los quarks y gluones se condensaran en protones y neutrones a través de la fuerza fuerte. Durante los siguientes minutos —la época de la nucleosíntesis del Big Bang (BBN)— los protones y neutrones se fusionaron para formar los elementos primordiales:  $\sim 75\%$  hidrógeno-1 ( $^1\text{H}$ , protones),  $\sim 25\%$  helio-4 ( $^4\text{He}$ ), y trazas de deuterio ( $^2\text{H}$ ), helio-3 ( $^3\text{He}$ ) y litio-7 ( $^7\text{Li}$ ). La alta temperatura ( $\sim 10^9$  K) mantuvo estos núcleos ionizados, sosteniendo un plasma de partículas cargadas.

## Recombinación y el Fondo Cósmico de Microondas

A los  $\sim 380,000$  años (desplazamiento al rojo  $z \approx 1100$ ), el universo se enfrió a  $\sim 3000$  K, permitiendo que los protones y núcleos de helio capturaran electrones en la recombinación. Esto neutralizó el plasma, formando átomos estables de hidrógeno y helio. Los fotones, previamente dispersados por electrones libres, se liberaron, creando el fondo cósmico de microondas (CMB), una instantánea térmica ahora desplazada al rojo a 2.7 K debido a la expansión. Las pequeñas fluctuaciones del CMB ( $\sim 1$  parte en  $10^5$ ) revelan las semillas de la estructura cósmica, detectables hoy por observatorios como Planck.

## Las Edades Oscuras

Tras la recombinación, el universo entró en las Edades Oscuras, una era sin estrellas dominada por gas neutro de hidrógeno y helio. El colapso gravitacional dentro de halos de materia oscura comenzó a formar cúmulos densos, preparando el escenario para las primeras estrellas. Los elementos primordiales, simples y escasos, fueron las materias primas para la formación estelar, con la materia oscura proporcionando el andamiaje gravitacional.

## Capítulo 2: Estrellas de Población III — Generación 1: Los Pioneros Cósmicos

Las estrellas de Población III, la primera generación estelar, se encendieron  $\sim 100$ – $400$  millones de años después del Big Bang ( $z \approx 20$ – $10$ ), poniendo fin a las Edades Oscuras e inaugurando el “amanecer cósmico”. Estas estrellas se formaron en un universo denso ( $\sim 10^{-24}$  g/cm $^3$ ), cálido (CMB  $\sim 20$ – $100$  K) y químicamente prístino, compuesto casi enteramente de hidrógeno ( $\sim 76\%$ ) y helio ( $\sim 24\%$ ), con una metalicidad de  $Z \approx 10^{-10}$  Z $_{\odot}$ .

## Entorno y Formación

La alta densidad del universo temprano permitió que las nubes de gas colapsaran dentro de minihalos de materia oscura ( $\sim 10^5$ – $10^6$  masas solares), alcanzando densidades de  $\sim 10^4$ – $10^6$  partículas/cm $^3$ . La compresión gravitacional calentó las nubes a  $\sim 10^3$ – $10^4$  K, pero el enfriamiento dependía del hidrógeno molecular (H $_2$ ), formado a través de reacciones como H + e $^-$   $\rightarrow$  H $^-$  +  $\gamma$ , seguido de H $^-$  + H  $\rightarrow$  H $_2$  + e $^-$ . El enfriamiento por H $_2$ , a través de transiciones rotacionales y vibracionales, fue ineficiente, manteniendo las nubes calientes y evitando la fragmentación. La alta masa de Jeans ( $\sim 10^2$ – $10^3$  masas solares) favoreció protoestrellas masivas.

## Características

Las estrellas de Población III probablemente fueron masivas (10–1000 masas solares), cálidas ( $\sim 10^5$  K de temperatura superficial) y luminosas, emitiendo intensa radiación UV. Su alta masa impulsó una fusión rápida, principalmente a través del ciclo CNO (usando trazas de carbono de la fusión temprana), agotando el combustible en  $\sim 1$ – $3$  millones de años. Sus destinos variaron: - **10–100 masas solares:** Supernovas de colapso del núcleo, disper-

sando metales como carbono, oxígeno y hierro. - **>100 masas solares**: Colapso directo a agujeros negros, posiblemente sembrando cuásares tempranos. - **140–260 masas solares**: Supernovas de inestabilidad de pares, donde la producción de pares electrón-positrón desencadenó una disruptión total, sin dejar restos.

## Significado

Las estrellas de Población III fueron arquitectos cósmicos. Su radiación UV ionizó el hidrógeno, impulsando la reionización ( $z \approx 6-15$ ), haciendo el universo transparente. Sus supernovas enriquecieron el medio interestelar (ISM) con metales, permitiendo la formación de estrellas de Población II. La retroalimentación por radiación, vientos y explosiones reguló la formación estelar, dando forma a las galaxias tempranas. Sus restos de agujeros negros podrían haber formado las semillas de agujeros negros supermasivos en los centros galácticos.

## Possible Detección y Perspectivas Futuras

La observación directa de estrellas de Población III es desafiante debido a su distancia y corta vida útil. El Telescopio Espacial James Webb (JWST) ha proporcionado pistas: en 2023, GN-z11 ( $z \approx 11$ ) mostró emisión de helio ionizado (He II) sin líneas metálicas, sugiriendo estrellas de Población III. RX J2129-z8He II (2022,  $z \approx 8$ ) también mostró posibles señales, aunque los núcleos galácticos activos (AGN) o estrellas de Población II pobres en metales siguen siendo alternativas. La confirmación requiere espectroscopia de alta resolución para verificar la ausencia de metales y una fuerte emisión de He II 1640Å.

Instrumentos futuros como el Telescopio Extremadamente Grande (ELT) y el NIRSpec de JWST explorarán  $z > 10-20$ , apuntando a galaxias prístinas. Las simulaciones sugieren detectar supernovas de Población III a través de sus curvas de luz únicas o ondas gravitacionales de explosiones de inestabilidad de pares. Las estrellas de Población II pobres en metales, como las del halo galáctico, podrían preservar los rendimientos de las supernovas de Población III, ofreciendo evidencia indirecta. Estos esfuerzos podrían revelar la masa, metalicidad y el papel de las estrellas de Población III en la evolución cósmica.

## Capítulo 3: Estrellas de Población II — Generación 2: El Puente a la Complejidad

Las estrellas de Población II se formaron  $\sim 400$  millones a unos pocos miles de millones de años después del Big Bang ( $z \approx 10-3$ ), a medida que las galaxias se ensamblaban en un universo menos denso y más frío. Estas estrellas sirvieron de puente entre la era primordial y las galaxias modernas, construyendo complejidad a través del enriquecimiento metálico.

## Entorno y Formación

La densidad promedio del universo disminuyó con la expansión, pero las nubes formadoras de estrellas en galaxias tempranas alcanzaron  $\sim 10^2-10^4$  partículas/cm<sup>3</sup> dentro de halos

de materia oscura más grandes ( $\sim 10^7$ – $10^9$  masas solares). El CMB se enfrió a  $\sim 10$ – $20$  K, y las nubes, enriquecidas por supernovas de Población III, tenían una metalicidad de  $Z \approx 10^{-4}$ – $10^{-2} Z_\odot$ . Los metales (por ejemplo, carbono, oxígeno) permitieron el enfriamiento a través de líneas atómicas ( $[\text{C II}]$  158  $\mu\text{m}$ ,  $[\text{O I}]$  63  $\mu\text{m}$ ), reduciendo las temperaturas a  $\sim 10^2$ – $10^3$  K. Las trazas de polvo mejoraron el enfriamiento mediante emisión térmica. La masa de Jeans reducida ( $\sim 1$ – $100$  masas solares) permitió la fragmentación, produciendo masas estelares diversas.

## Características

Las estrellas de Población II varían desde baja masa (0.1–1 masa solar, vida útil  $> 10^{10}$  años) hasta masivas (10–100 masas solares,  $\sim 10^6$ – $10^7$  años). Se encuentran en halos galácticos, cúmulos globulares (por ejemplo, M13) y protuberancias galácticas tempranas, con baja metalicidad, produciendo espectros más rojos. Su formación en cúmulos refleja la fragmentación, y sus supernovas enriquecieron aún más el ISM a  $\sim 0.1 Z_\odot$ .

## Significado

Las estrellas de Población II impulsaron la evolución galáctica. Sus supernovas sintetizaron elementos más pesados (por ejemplo, silicio, magnesio), formando polvo y moléculas que facilitaron la formación estelar. Las estrellas de Población II de baja masa, observables en cúmulos globulares y el halo de la Vía Láctea, preservan las firmas de las supernovas de Población III. La retroalimentación por radiación y explosiones dio forma a los discos galácticos, regulando la formación estelar. Sentaron las bases para las estrellas de Población I y los sistemas planetarios.

## Evidencia Observacional

Las estrellas de Población II son observables en cúmulos globulares, halos galácticos y como estrellas pobres en metales (por ejemplo, HD 122563,  $Z \approx 0.001 Z_\odot$ ). Las estrellas extremadamente pobres en metales ( $Z < 10^{-3} Z_\odot$ ) podrían reflejar los rendimientos de Población III. Encuestas como SDSS y Gaia, y futuras observaciones del ELT, refinarán nuestra comprensión de la formación de Población II y el ensamblaje de galaxias tempranas.

# Capítulo 4: Estrellas de Población I — Generación 3: La Era de los Planetas y la Vida

Las estrellas de Población I, formándose desde hace  $\sim 10$  mil millones de años hasta el presente ( $z \approx 2$ – $0$ ), dominan galaxias maduras como el disco de la Vía Láctea. Estas estrellas, incluyendo el Sol, permitieron planetas y vida a través de sus entornos ricos en metales.

## Entorno y Formación

El universo es disperso ( $\sim 10^{-30}$  g/cm $^3$ ), con formación estelar en nubes moleculares densas ( $\sim 10^2$ – $10^6$  partículas/cm $^3$ ) desencadenadas por ondas de densidad espirales o supernovas. El CMB es de 2.7 K, y las nubes, con  $Z \approx 0.1$ – $2 Z_\odot$ , se enfrian a  $\sim 10$ – $20$  K a través de líneas moleculares (por ejemplo, CO, HCN) y emisión de polvo. La baja masa de Jeans ( $\sim 0.1$ – $10$

masas solares) favorece estrellas pequeñas, aunque las estrellas masivas se forman en regiones activas.

## Características

Las estrellas de Población I van desde enanas rojas (0.08–1 masa solar,  $>10^{10}$  años) hasta estrellas de tipo O (10–100 masas solares,  $\sim 10^6$ – $10^7$  años). Su alta metalicidad produce espectros brillantes y ricos en metales con líneas como Fe I y Ca II. Se forman en cúmulos abiertos (por ejemplo, Pléyades) o nebulosas (por ejemplo, Orión). El Sol, una estrella de Población I de 4.6 mil millones de años, es típico.

## Significado: Planetas y Vida

La alta metalicidad permitió la formación de planetas rocosos, ya que el polvo y los metales en discos protoplanetarios formaron planetesimales. El disco del Sol produjo la Tierra hace  $\sim 4.5$  mil millones de años, con silicio, oxígeno y hierro formando planetas terrestres, y el carbono permitiendo moléculas orgánicas. La salida estable del Sol y su larga vida útil sostuvieron una zona habitable para agua líquida, fomentando la vida basada en carbono durante miles de millones de años. La diversidad de las estrellas de Población I impulsa el enriquecimiento continuo del ISM, sosteniendo la formación de estrellas y planetas.

## Evidencia Observacional

Las estrellas de Población I dominan el disco de la Vía Láctea, observables en regiones de formación estelar y cúmulos. Las encuestas de exoplanetas (por ejemplo, Kepler, TESS) muestran que las estrellas con alta metalicidad tienen más probabilidades de albergar planetas, con  $\sim 50\%$  de las estrellas similares al Sol posiblemente hospedando mundos rocosos. La espectroscopia revela sus composiciones ricas en metales, rastreando el enriquecimiento acumulativo.

# Capítulo 5: Generaciones Estelares Futuras: Un Cosmos Más Oscuro y Frío

A medida que la energía oscura impulsa la expansión cósmica, el universo se volverá más frío, menos denso y más rico en metales, alterando la formación estelar. Para  $\sim 100$  mil millones de años ( $z \approx -1$ ), la formación estelar disminuirá, y para  $\sim 10^{12}$  años, podría cesar, conduciendo a un cosmos oscuro y entrópico.

## Condiciones Futuras

La densidad promedio disminuirá, aislando galaxias. El CMB se enfriará a  $<<0.3$  K, y las nubes, con  $Z > 2-5 Z_\odot$ , se enfriarán eficientemente a través de metales (por ejemplo, [Fe II], [Si II]) y polvo. La formación estelar dependerá de bolsas de gas raras, ya que la mayor parte del gas galáctico se agotará por la formación estelar, supernovas o chorros de agujeros negros. Las fusiones galácticas podrían impulsar temporalmente la formación estelar.

## Características de las Estrellas Futuras

Las estrellas futuras serán enanas rojas de baja masa (0.08-1 masa solar,  $10^{10}$ - $10^{12}$  años), debido al enfriamiento eficiente y la baja masa de Jeans. Las estrellas masivas serán raras, ya que la alta metalicidad dificulta la acreción de protoestrellas grandes. Estas estrellas emitirán una tenue luz infrarroja, oscureciendo las galaxias. Los discos ricos en metales favorecerán planetas rocosos.

## Perspectiva Cósmica

Las galaxias se desvanecerán a medida que las estrellas mueran, dejando enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros. La vida podría depender de energía artificial o oasis estelares raros en un universo que se acerca a la “muerte térmica”.

# Capítulo 6: Nucleosíntesis Estelar: Forjando los Elementos y Estallidos de Neutrinos

La nucleosíntesis estelar es la forja cósmica donde las estrellas sintetizan elementos más pesados a partir de los más ligeros, impulsando la evolución química del universo. Desde la fusión silenciosa en los núcleos estelares hasta los procesos explosivos en supernovas, produce los elementos que forman planetas, vida y galaxias. La cadena protón-protón, el ciclo CNO, el proceso triple-alfa, los procesos s, r y p, y la fotodesintegración, que culminan en estallidos de neutrinos, revelan los intrincados mecanismos de la formación de elementos y permiten la detección rápida de supernovas.

## Cadena Protón-Protón

La cadena protón-protón (pp) alimenta estrellas de baja masa ( $T \sim 10^7$  K, por ejemplo, el Sol). Comienza con dos protones fusionándose para formar un diprotón, que se desintegra por beta en deuterio ( $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + \text{e}^+ + \nu_e$ , liberando un neutrino). Los pasos posteriores incluyen: -  $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$  (emisión de fotones). -  $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + ^2\text{H}$ , liberando dos protones.

La cadena pp tiene ramas (ppI, ppII, ppIII), produciendo neutrinos de diferentes energías (0.4-6 MeV). Es lenta, sosteniendo al Sol durante  $\sim 10^{10}$  años, y sus neutrinos, detectados por experimentos como Borexino, confirman los modelos de fusión estelar.

## Ciclo CNO

El ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (CNO) domina en estrellas masivas ( $>1.3$  masas solares,  $T > 1.5 \times 10^7$  K). Utiliza  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  y  $^{16}\text{O}$  como catalizadores para fusionar cuatro protones en  $^4\text{He}$ : -  $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$  -  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_e$  -  $^{13}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$  -  $^{14}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$  -  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_e$  -  $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$

El ciclo CNO es más rápido, impulsando una fusión rápida ( $\sim 10^6$ - $10^7$  años), y produce neutrinos de mayor energía ( $\sim 1$ -10 MeV), detectables por Super-Kamiokande.

## Proceso Triple-Alpha

En estrellas  $>8$  masas solares, la quema de helio ( $T \sim 10^8$  K) fusiona tres núcleos de  $^4\text{He}$  en  $^{12}\text{C}$  a través del proceso triple-alfa. Dos  $^4\text{He}$  forman un  $^8\text{Be}$  inestable, que captura otro  $^4\text{He}$  para formar  $^{12}\text{C}$ , explotando una resonancia en los niveles de energía de  $^{12}\text{C}$ . Algunos  $^{12}\text{C}$  capturan  $^4\text{He}$  para formar  $^{16}\text{O}$  ( $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ ). Este proceso, que dura  $\sim 10^5$  años, es crucial para la producción de carbono y oxígeno, permitiendo la vida.

## Etapas de Quema Avanzadas

Las estrellas masivas atraviesan etapas de quema rápidas: - **Quema de carbono** ( $T \sim 6 \times 10^8$  K,  $\sim 10^3$  años):  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$  o  $^{23}\text{Na} + ^1\text{H}$ . - **Quema de neón** ( $T \sim 1.2 \times 10^9$  K,  $\sim 1$  año):  $^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$ . - **Quema de oxígeno** ( $T \sim 2 \times 10^9$  K,  $\sim 6$  meses):  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$ . - **Quema de silicio** ( $T \sim 3 \times 10^9$  K,  $\sim 1$  día):  $^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Ni}$  a través de fotodesintegración y captura.

Los elementos del pico de hierro marcan el fin de la fusión, ya que las reacciones posteriores son endotérmicas.

## Proceso S (Captura Lenta de Neutrones)

El proceso s ocurre en estrellas AGB (1-8 masas solares) y algunas estrellas masivas, donde los neutrones se capturan lentamente, permitiendo la desintegración beta entre capturas (por ejemplo,  $^{56}\text{Fe} + n \rightarrow ^{57}\text{Fe}$ , luego  $^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Co} + e^- + \bar{v}_e$ ). Los neutrones provienen de reacciones como  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  en las capas de helio de las estrellas AGB. Produce elementos como estroncio, bario y plomo durante  $\sim 10^3$ - $10^5$  años, enriqueciendo el ISM mediante vientos estelares.

## Proceso R (Captura Rápida de Neutrones)

El proceso r ocurre en entornos extremos (supernovas, fusiones de estrellas de neutrones) con flujos de neutrones de  $\sim 10^{22}$  neutrones/cm $^2$ /s. Los núcleos capturan neutrones más rápido que la desintegración beta, formando elementos pesados como oro, plata y uranio (por ejemplo,  $^{56}\text{Fe} + \text{múltiples } n \rightarrow ^{238}\text{U}$ ). Dura segundos en las ondas de choque de supernovas o eyecciones de fusión, representando  $\sim 50\%$  de los elementos pesados.

## Proceso P (Captura de Protones/Fotodesintegración)

El proceso p produce isótopos ricos en protones raros (por ejemplo,  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}$ ) en supernovas. Los rayos gamma de alta energía ( $T \sim 2-3 \times 10^9$  K) fotodesintegran núcleos de los procesos s y r (por ejemplo,  $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$ ), o los protones se capturan en entornos ricos en protones. Su baja eficiencia explica la rareza de los núcleos p.

## Fotodesintegración en Supernovas

En las supernovas de colapso del núcleo, la fotodesintegración en el núcleo de hierro ( $T > 10^{10}$  K) descompone  $^{56}\text{Fe}$  en protones, neutrones y  $^4\text{He}$  (por ejemplo,  $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$ ). Este proceso endotérmico reduce la presión, acelerando el colapso hacia una estrella de neutrones o un agujero negro. La onda de choque desencadena una nucleosíntesis explosiva, expulsando elementos.

## Estallido de Neutrinos y Detección de Supernovas

Durante el colapso del núcleo, ~99% de la energía de la supernova ( $\sim 10^{46}$  J) se libera como neutrinos a través de la neutronización ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ) y procesos térmicos ( $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ). El estallido de ~10 segundos precede a la explosión óptica, detectable por instalaciones como Super-Kamiokande, IceCube y DUNE. Los ~20 neutrinos de SN 1987A lo confirmaron. La triangulación desde múltiples detectores localiza supernovas en segundos, permitiendo observaciones de seguimiento en longitudes de onda ópticas, de rayos X y gamma, revelando propiedades del progenitor y rendimientos de nucleosíntesis.

## Abundancia Desigual

Las abundancias de elementos reflejan la nucleosíntesis: - **H, He**: ~98% de BBN. - **C, O, Ne, Mg**: Abundantes por fusión. - **Fe, Ni**: Pico debido a la estabilidad nuclear. - **Au, U**: Raros, del proceso r. - **Núcleos P**: Los más raros, del proceso p.

## Estudio de Caso: Urano-235 y Urano-238

$^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  se forman a través del proceso r en supernovas o fusiones de estrellas de neutrones.  $^{235}\text{U}$  (vida media ~703.8 millones de años) decae más rápido que  $^{238}\text{U}$  (vida media ~4.468 mil millones de años). En la formación de la Tierra (~4.54 mil millones de años atrás), la relación  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  era ~0.31 (~23.7%  $^{235}\text{U}$ ). Hace ~2 mil millones de años, era ~0.037 (~3.6%  $^{235}\text{U}$ ), suficiente para la fisión. El reactor Oklo en Gabón se formó cuando un mineral de uranio de alta calidad (~20–60% óxidos de uranio), concentrado por procesos sedimentarios, interactuó con agua subterránea que moderó neutrones. No ocurrió enriquecimiento isotópico; el ~3.6%  $^{235}\text{U}$  natural permitió la criticidad, sosteniendo reacciones de fisión intermitentes durante ~150,000–1 millón de años, produciendo isótopos como  $^{143}\text{Nd}$  y calor.

## Conclusión: Somos Polvo de Estrellas, Renacidos de Fuegos Cósmicos

Desde el nacimiento ardiente del Big Bang hasta el futuro desvaneciente, las estrellas han moldeado el universo. Las estrellas de Población III encendieron el cosmos, forjando los primeros metales. Las estrellas de Población II construyeron complejidad, y las estrellas de Población I permitieron planetas y vida. La nucleosíntesis estelar —a través de la cadena pp, el ciclo CNO, el proceso triple-alfa, los procesos s, r y p, y la fotodesintegración— creó los elementos, con estallidos de neutrinos señalando su dispersión explosiva. El reactor Oklo, impulsado por la abundancia natural de  $^{235}\text{U}$ , ejemplifica este legado. Somos polvo de estrellas, renacidos de estrellas antiguas, llevando sus elementos en nuestros cuerpos. A medida que el universo se oscurece, nuestro legado cósmico podría inspirar a futuras generaciones a encender nuevas estrellas, perpetuando la creación en un vacío entrópico.