

[https://farid.ps/articles/we\\_are\\_made\\_of\\_stardust/ru.html](https://farid.ps/articles/we_are_made_of_stardust/ru.html)

# От Большого Взрыва до звёздного нуклеосинтеза: Мы сделаны из звёздной пыли

Вселенная — это огромное динамичное полотно, расписанное светом звёзд и элементами, которые они создают. От катастрофического рождения Большого Взрыва до далёкого, угасающего будущего холодного космоса звёздные поколения — Популяция III, II и I, а также их потенциальные преемники — формировали химическую, физическую и биологическую эволюцию Вселенной. Благодаря их пылающей жизни и взрывной смерти звёзды создали элементы, из которых состоят галактики, планеты и сама жизнь. Это эссе исследует космические эпохи, углубляясь в происхождение, среду и наследие звёздных поколений, с подробным анализом звёздного нуклеосинтеза — алхимических процессов, которые питают звёзды и производят элементы Вселенной. Оно завершается глубокой истиной о том, что мы — звёздная пыль, возрождённая из пепла древних звёзд, и рассматривает будущее звездообразования в затемняющейся Вселенной.

## Глава 1: Большой Взрыв и заря Вселенной

Вселенная началась около 13,8 миллиардов лет назад с Большого Взрыва — события бесконечной плотности и температуры, в котором вся материя, энергия, пространство и время возникли из сингулярности. Этот первозданный ад, горячее  $10^{32}$  К, удерживал фундаментальные силы — гравитацию, электромагнетизм, сильное ядерное взаимодействие и слабое ядерное взаимодействие — в едином состоянии, в мимолётный момент космической симметрии.

### Космическое расширение и охлаждение

В течение  $10^{-36}$  секунды инфляция — экспоненциальное расширение — растянула Вселенную от субатомных масштабов до макроскопических размеров, сглаживая неравномерности и засевая флуктуации плотности, которые позже сформировали галактики. К  $10^{-12}$  секунде сильное взаимодействие отделилось от электрослабого, за чем последовало разделение электромагнетизма и слабого взаимодействия примерно через  $10^{-6}$  секунды, когда температура упала ниже  $10^{15}$  К. Эти разделения установили физические законы, управляющие материей, от кварков до галактик.

### Формирование первичных элементов

Через 1 секунду Вселенная охладилась до  $\sim 10^{10}$  К, что позволило кваркам и глюонам конденсироваться в протоны и нейтроны посредством сильного взаимодействия. В течение следующих нескольких минут — эпохи нуклеосинтеза Большого Взрыва (BBN)

— протоны и нейтронысливались, образуя первичные элементы: около 75% водорода-1 ( $^1\text{H}$ , протоны), около 25% гелия-4 ( $^4\text{He}$ ) и следовые количествадейтерия ( $^2\text{H}$ ), гелия-3 ( $^3\text{He}$ ) и лития-7 ( $^7\text{Li}$ ). Высокая температура ( $\sim 10^9$  К) сохраняла эти ядра ионизированными, поддерживая плазму заряженных частиц.

## Рекомбинация и космический микроволновый фон

К  $\sim 380\,000$  годам (красное смещение  $z \approx 1100$ ) Вселенная охладилась до  $\sim 3000$  К, что позволило протонам и ядрам гелия захватывать электроны в процессе рекомбинации. Это нейтрализовало плазму, формируя стабильные атомы водорода и гелия. Фотоны, ранее рассеиваемые свободными электронами, были освобождены, создавая космический микроволновый фон (CMB) — тепловой снимок, который теперь, из-за расширения, сместился до 2,7 К. Крошечные флюктуации CMB ( $\sim 1$  часть на  $10^5$ ) раскрывают зародыши космической структуры, обнаруживаемые сегодня обсерваториями, такими как Planck.

## Тёмные века

После рекомбинации Вселенная вошла в Тёмные века — беззвёздную эру, доминирующую нейтральным газом водорода и гелия. Гравитационный коллапс внутри гало тёмной материи начал формировать плотные сгустки, подготавливая почву для первых звёзд. Первичные элементы, простые и редкие, были сырьём для звездообразования, с тёмной материей, обеспечивающей гравитационный каркас.

## Глава 2: Звёзды Популяции III — Поколение 1: Космические пионеры

Звёзды Популяции III, первое звёздное поколение, зажглись примерно через 100–400 миллионов лет после Большого Взрыва ( $z \approx 20\text{--}10$ ), положив конец Тёмным векам и открыв «космический рассвет». Эти звёзды сформировались в плотной ( $\sim 10^{-24}$  г/см $^3$ ), тёплой (CMB  $\sim 20\text{--}100$  К) и химически чистой Вселенной, состоящей почти полностью из водорода ( $\sim 76\%$ ) и гелия ( $\sim 24\%$ ), с металличностью  $Z \approx 10^{-10} Z_\odot$ .

## Среда и формирование

Высокая плотность ранней Вселенной позволяла газовым облакам коллапсировать внутри мини-гало тёмной материи ( $\sim 10^5\text{--}10^6$  солнечных масс), достигая плотности  $\sim 10^4\text{--}10^6$  частиц/см $^3$ . Гравитационное сжатие нагревало облака до  $\sim 10^3\text{--}10^4$  К, но охлаждение зависело от молекулярного водорода ( $\text{H}_2$ ), образующегося в реакциях, таких как  $\text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^- + \gamma$ , затем  $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$ . Охлаждение через  $\text{H}_2$ , посредством вращательных и вибрационных переходов, было неэффективным, сохраняя облака тёплыми и предотвращая фрагментацию. Высокая масса Джинса ( $\sim 10^2\text{--}10^3$  солнечных масс) способствовала формированию массивных протозвёзд.

## Характеристики

Звёзды Популяции III, вероятно, были массивными (10–1000 солнечных масс), горячими ( $\sim 10^5$  К на поверхности) и яркими, испуская интенсивное УФ-излучение. Их большая масса приводила к быстрому синтезу, в основном через цикл CNO (используя следовые количества углерода от раннего синтеза), исчерпывая топливо за  $\sim 1$ –3 миллиона лет. Их судьбы варьировались: - **10–100 солнечных масс**: Сверхновые с коллапсом ядра, рассеивающие металлы, такие как углерод, кислород и железо. - **>100 солнечных масс**: Прямой коллапс в чёрные дыры, возможно, засевающие ранние квазары. - **140–260 солнечных масс**: Сверхновые с парной нестабильностью, где производство пар электрон-позитрон вызывало полное разрушение без остатка.

## Значение

Звёзды Популяции III были космическими архитекторами. Их УФ-излучение ионизировало водород, вызывая реионизацию ( $z \approx 6$ –15), делая Вселенную прозрачной. Их сверхновые обогащали межзвёздную среду (ISM) металлами, позволяя формировать звёзды Популяции II. Обратная связь от излучения, ветров и взрывов регулировала звездообразование, формируя ранние галактики. Остатки их чёрных дыр, возможно, стали зародышами сверхмассивных чёрных дыр в галактических центрах.

## Возможное обнаружение и перспективы

Прямое наблюдение звёзд Популяции III затруднено из-за их удалённости и короткой жизни. Космический телескоп Джеймса Уэбба (JWST) предоставил подсказки: в 2023 году GN-z11 ( $z \approx 11$ ) показал эмиссию ионизированного гелия (He II) без металлических линий, предполагая звёзды Популяции III. RX J2129–z8He II (2022,  $z \approx 8$ ) также показал потенциальные признаки, хотя активные галактические ядра (AGN) или звёзды Популяции II с низким содержанием металлов остаются альтернативами. Подтверждение требует спектроскопии высокого разрешения для проверки отсутствия металлов и сильной эмиссии He II 1640 Å.

Будущие инструменты, такие как Extremely Large Telescope (ELT) и NIRSpec JWST, будут исследовать  $z > 10$ –20, нацеливаясь на нетронутые галактики. Моделирование предполагает обнаружение сверхновых Популяции III по их уникальным кривым блеска или гравитационным волнам от взрывов с парной нестабильностью. Звёзды Популяции II с низким содержанием металлов, такие как в галактическом гало, могут сохранять выходы сверхновых Популяции III, предоставляя косвенные доказательства. Эти усилия могут раскрыть массу, металличность и роль звёзд Популяции III в космической эволюции.

## Глава 3: Звёзды Популяции II — Поколение 2: Мост к сложности

Звёзды Популяции II сформировались примерно через 400 миллионов — несколько миллиардов лет после Большого Взрыва ( $z \approx 10$ –3), когда галактики собирались в менее плотной и более холодной Вселенной. Эти звёзды соединили первозданную эру с современными галактиками, создавая сложность через обогащение металлами.

## Среда и формирование

Средняя плотность Вселенной уменьшалась с расширением, но звездообразующие облака в ранних галактиках достигали  $\sim 10^2$ – $10^4$  частиц/см<sup>3</sup> внутри больших гало тёмной материи ( $\sim 10^7$ – $10^9$  солнечных масс). СМВ охладился до  $\sim 10$ – $20$  К, а облака, обогащённые сверхновыми Популяции III, имели металличность  $Z \approx 10^{-4}$ – $10^{-2}$   $Z_\odot$ . Металлы (например, углерод, кислород) позволяли охлаждаться через атомные линии ( $[\text{C II}]$  158 мкм,  $[\text{O I}]$  63 мкм), снижая температуры до  $\sim 10^2$ – $10^3$  К. Следы пыли усиливали охлаждение через тепловое излучение. Уменьшенная масса Джинса ( $\sim 1$ – $100$  солнечных масс) позволяла фрагментацию, производя разнообразные звёздные массы.

## Характеристики

Звёзды Популяции II варьируются от маломассивных (0,1–1 солнечная масса, продолжительность жизни  $> 10^{10}$  лет) до массивных (10–100 солнечных масс,  $\sim 10^6$ – $10^7$  лет). Они встречаются в галактических гало, шаровых скоплениях (например, M13) и ранних балджах, с низкой металличностью, производя более красные спектры. Их формирование в скоплениях отражает фрагментацию, а их сверхновые дополнительно обогащали ISM до  $\sim 0,1 Z_\odot$ .

## Значение

Звёзды Популяции II двигали эволюцию галактик. Их сверхновые синтезировали более тяжёлые элементы (например, кремний, магний), формируя пыль и молекулы, которые способствовали звездообразованию. Маломассивные звёзды Популяции II, наблюдаемые в шаровых скоплениях и гало Млечного Пути, сохраняют сигнатуры сверхновых Популяции III. Обратная связь от излучения и взрывов формировала галактические диски, регулируя звездообразование. Они заложили основу для звёзд Популяции I и планетных систем.

## Наблюдательные данные

Звёзды Популяции II наблюдаются в шаровых скоплениях, галактических гало и как звёзды с низким содержанием металлов (например, HD 122563,  $Z \approx 0,001 Z_\odot$ ). Экстремально металлонизженные звёзды ( $Z < 10^{-3} Z_\odot$ ) могут отражать выходы Популяции III. Исследования, такие как SDSS и Gaia, и будущие наблюдения ELT уточнят наше понимание формирования Популяции II и сборки ранних галактик.

## Глава 4: Звёзды Популяции I — Поколение 3: Эра планет и жизни

Звёзды Популяции I, сформировавшиеся с  $\sim 10$  миллиардов лет назад до настоящего времени ( $z \approx 2$ – $0$ ), доминируют в зрелых галактиках, таких как диск Млечного Пути. Эти звёзды, включая Солнце, сделали возможными планеты и жизнь благодаря своим богатым металлами средам.

## Среда и формирование

Вселенная разрежена ( $\sim 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>), со звездообразованием в плотных молекулярных облаках ( $\sim 10^2$ – $10^6$  частиц/см<sup>3</sup>), инициируемых спиральными волнами плотности или сверхновыми. СМВ составляет 2,7 К, а облака с  $Z \approx 0,1$ – $2 Z_\odot$  охлаждаются до  $\sim 10$ – $20$  К через молекулярные линии (например, CO, HCN) и пылевое излучение. Низкая масса Джинса ( $\sim 0,1$ – $10$  солнечных масс) способствует формированию малых звёзд, хотя массивные звёзды образуются в активных регионах.

## Характеристики

Звёзды Популяции I варьируются от красных карликов (0,08–1 солнечная масса,  $> 10^{10}$  лет) до звёзд типа О (10–100 солнечных масс,  $\sim 10^6$ – $10^7$  лет). Высокая металличность производит яркие, богатые металлами спектры с линиями, такими как Fe I и Ca II. Они формируются в открытых скоплениях (например, Плеяды) или туманностях (например, Орион). Солнце, звезда Популяции I возрастом 4,6 миллиарда лет, типична.

## Значение: Планеты и жизнь

Высокая металличность позволила формировать скалистые планеты, поскольку пыль и металлы в протопланетных дисках формировали планетезимали. Диск Солнца создал Землю около 4,5 миллиардов лет назад, с кремнием, кислородом и железом, формирующими земные планеты, и углеродом, позволяющим создавать органические молекулы. Стабильный выход Солнца и его долгая жизнь поддерживали обитаемую зону для жидкой воды, способствуя углеродной жизни на протяжении миллиардов лет. Разнообразие звёзд Популяции I поддерживает продолжающееся обогащение ISM, сохраняя звездообразование и формирование планет.

## Наблюдательные данные

Звёзды Популяции I доминируют в диске Млечного Пути, наблюдаются в регионах звездообразования и скоплениях. Исследования экзопланет (например, Kepler, TESS) показывают, что звёзды с высоким содержанием металлов чаще имеют планеты, с  $\sim 50\%$  звёзд, подобных Солнцу, потенциально содержащих скалистые миры. Спектроскопия раскрывает их богатый металлами состав, отслеживая кумулятивное обогащение.

## Глава 5: Будущие звёздные поколения: Более тёмная и холодная Вселенная

По мере того как тёмная энергия ускоряет космическое расширение, Вселенная станет холоднее, менее плотной и более богатой металлами, изменяя звездообразование. К  $\sim 100$  миллиардам лет ( $z \approx -1$ ) звездообразование уменьшится, а к  $\sim 10^{12}$  лет может прекратиться, приводя к тёмной, энтропийной Вселенной.

## Будущие условия

Средняя плотность уменьшится, изолируя галактики. СМВ охладится до <<0,3 К, а облака с  $Z > 2-5 Z_{\odot}$  будут эффективно охлаждаться через металлы (например, [Fe II], [Si II]) и пыль. Звездообразование будет зависеть от редких газовых карманов, поскольку большая часть галактического газа истощится звездообразованием, сверхновыми или струями чёрных дыр. Слияния галактик могут временно стимулировать звездообразование.

## Характеристики будущих звёзд

Будущие звёзды будут красными карликами малой массы (0,08-1 солнечная масса,  $10^{10}-10^{12}$  лет) из-за эффективного охлаждения и низкой массы Джинса. Массивные звёзды будут редкими, поскольку высокая металличность препятствует аккреции крупных протозвёзд. Эти звёзды будут излучать слабый инфракрасный свет, затемняя галактики. Богатые металлами диски будут способствовать скалистым планетам.

## Космическая перспектива

Галактики угаснут по мере умирания звёзд, оставляя белые карлики, нейтронные звёзды и чёрные дыры. Жизнь может зависеть от искусственной энергии или редких звёздных оазисов во Вселенной, приближающейся к «тепловой смерти».

# Глава 6: Звёздный нуклеосинтез: Ковка элементов и нейтринные вспышки

Звёздный нуклеосинтез — это космическая кузница, где звёзды синтезируют более тяжёлые элементы из более лёгких, двигая химическую эволюцию Вселенной. От тихого синтеза в звёздных ядрах до взрывных процессов в сверхновых, он производит элементы, формирующие планеты, жизнь и галактики. Цепочка протон-протон, цикл СНО, тройной альфа-процесс, s-процесс, r-процесс, p-процесс и фотодезинтеграция, завершающиеся нейтринными вспышками, раскрывают сложные механизмы формирования элементов и позволяют быстро обнаруживать сверхновые.

## Цепочка протон-протон

Цепочка протон-протон (pp) питает звёзды малой массы ( $T \sim 10^7$  К, например, Солнце). Она начинается с слияния двух протонов в дипротон, который бета-распадается в дейтерий ( $^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ , выделяя нейтрино). Последующие шаги включают: -  $^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$  (эмиссия фотонов). -  $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2^1\text{H}$ , выделяя два протона.

Цепочка pp имеет ветви (ppI, ppII, ppIII), производя нейтрино разных энергий (0,4-6 МэВ). Она медленная, поддерживая Солнце  $\sim 10^{10}$  лет, и её нейтрино, обнаруженные экспериментами, такими как Borexino, подтверждают модели звёздного синтеза.

## Цикл СНО

Цикл углерод-азот-кислород (CNO) доминирует в массивных звёздах ( $> 1,3$  солнечной массы,  $T > 1,5 \times 10^7$  К). Он использует  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  в качестве катализаторов для слия-

ния четырёх протонов в  ${}^4\text{He}$ :  ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$  -  ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu_{\text{e}}$  -  ${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$  -  ${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$  -  ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu_{\text{e}}$  -  ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$

Цикл СНО быстрее, обеспечивая быстрый синтез ( $\sim 10^6$ – $10^7$  лет), и производит нейтринно более высокой энергии ( $\sim 1$ – $10$  МэВ), обнаруживаемые Super-Kamiokande.

## Тройной альфа-процесс

В звёздах  $> 8$  солнечных масс горение гелия ( $T \sim 10^8$  К) сливает три ядра  ${}^4\text{He}$  в  ${}^{12}\text{C}$  через тройной альфа-процесс. Два  ${}^4\text{He}$  образуют нестабильный  ${}^8\text{Be}$ , который захватывает ещё один  ${}^4\text{He}$ , формируя  ${}^{12}\text{C}$ , используя резонанс в энергетических уровнях  ${}^{12}\text{C}$ . Некоторые  ${}^{12}\text{C}$  захватывают  ${}^4\text{He}$ , образуя  ${}^{16}\text{O}$  ( ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$ ). Этот процесс, длящийся  $\sim 10^5$  лет, критически важен для производства углерода и кислорода, делая жизнь возможной.

## Продвинутые стадии горения

Массивные звёзды проходят быстрые стадии горения: - **Горение углерода** ( $T \sim 6 \times 10^8$  К,  $\sim 10^3$  лет):  ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$  или  ${}^{23}\text{Na} + {}^1\text{H}$ . - **Горение неона** ( $T \sim 1,2 \times 10^9$  К,  $\sim 1$  год):  ${}^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^4\text{He}$ . - **Горение кислорода** ( $T \sim 2 \times 10^9$  К,  $\sim 6$  месяцев):  ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$ . - **Горение кремния** ( $T \sim 3 \times 10^9$  К,  $\sim 1$  день):  ${}^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow {}^{56}\text{Fe}, {}^{56}\text{Ni}$  через фотодезинтеграцию и захват.

Элементы пика железа обозначают конец синтеза, так как дальнейшие реакции эндотермичны.

## S-процесс (медленный захват нейтронов)

S-процесс происходит в звёздах AGB (1–8 солнечных масс) и некоторых массивных звёздах, где нейтроны захватываются медленно, позволяя бета-распаду между захватами (например,  ${}^{56}\text{Fe} + \text{n} \rightarrow {}^{57}\text{Fe}$ , затем  ${}^{57}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}\text{Co} + \text{e}^- + \bar{\nu}_{\text{e}}$ ). Нейтроны поступают из реакций, таких как  ${}^{13}\text{C}(\alpha, \text{n}){}^{16}\text{O}$  в гелиевых оболочках звёзд AGB. Он производит элементы, такие как стронций, барий и свинец, в течение  $\sim 10^3$ – $10^5$  лет, обогащая ISM через звёздные ветры.

## R-процесс (быстрый захват нейтронов)

R-процесс происходит в экстремальных условиях (сверхновые, слияния нейтронных звёзд) с потоками нейтронов  $\sim 10^{22}$  нейтронов/ $\text{см}^2/\text{с}$ . Ядра захватывают нейтроны быстрее, чем бета-распад, формируя тяжёлые элементы, такие как золото, серебро и уран (например,  ${}^{56}\text{Fe} + \text{n} \rightarrow {}^{238}\text{U}$ ). Он длится секунды в ударных волнах сверхновых или выбросах слияний, составляя  $\sim 50\%$  тяжёлых элементов.

## P-процесс (захват протонов/фотодезинтеграция)

P-процесс производит редкие протонно-богатые изотопы (например,  ${}^{92}\text{Mo}, {}^{96}\text{Ru}$ ) в сверхновых. Гамма-лучи высокой энергии ( $T \sim 2$ – $3 \times 10^9$  К) фотодезинтегрируют ядра s-

и  $\gamma$ -процессов (например,  $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + \text{n}$ ), или протоны захватываются в протонно-богатых средах. Его низкая эффективность объясняет редкость р-ядер.

## Фотодезинтеграция в сверхновых

В сверхновых с коллапсом ядра фотодезинтеграция в железном ядре ( $T > 10^{10}$  К) разлагает  $^{56}\text{Fe}$  на протоны, нейтроны и  $^4\text{He}$  (например,  $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4\text{n}$ ). Этот эндотермический процесс снижает давление, ускоряя коллапс в нейтронную звезду или чёрную дыру. Ударная волна запускает взрывной нуклеосинтез, выбрасывая элементы.

## Нейтринные вспышки и обнаружение сверхновых

Во время коллапса ядра  $\sim 99\%$  энергии сверхновой ( $\sim 10^{46}$  Дж) выделяется в виде нейтрино через нейтронизацию ( $\text{p} + \text{e}^- \rightarrow \text{n} + \nu_e$ ) и тепловые процессы ( $\text{e}^+ + \text{e}^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ). Вспышка длительностью  $\sim 10$  секунд предшествует оптическому взрыву, обнаруживаемая такими установками, как Super-Kamiokande, IceCube и DUNE.  $\sim 20$  нейтрино от SN 1987A подтвердили это. Триангуляция от нескольких детекторов локализует сверхновые за секунды, позволяя проводить последующие наблюдения в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах, раскрывая свойства предшественников и выходы нуклеосинтеза.

## Неравномерное изобилие

Изобилие элементов отражает нуклеосинтез: - **H, He**:  $\sim 98\%$  от BBN. - **C, O, Ne, Mg**: Обильны из-за синтеза. - **Fe, Ni**: Пик из-за ядерной стабильности. - **Au, U**: Редкие, из  $\gamma$ -процесса. - **Р-ядра**: Самые редкие, из р-процесса.

## Пример: Уран-235 и Уран-238

$^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  формируются через  $\gamma$ -процесс в сверхновых или слияниях нейтронных звёзд.  $^{235}\text{U}$  (период полураспада  $\sim 703,8$  миллиона лет) распадается быстрее, чем  $^{238}\text{U}$  (период полураспада  $\sim 4,468$  миллиарда лет). При формировании Земли ( $\sim 4,54$  миллиарда лет назад) соотношение  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  составляло  $\sim 0,31$  ( $\sim 23,7\% \ ^{235}\text{U}$ ). Около 2 миллиардов лет назад оно составляло  $\sim 0,037$  ( $\sim 3,6\% \ ^{235}\text{U}$ ), достаточно для деления. Реактор Около в Габоне сформировался, когда высококачественная урановая руда ( $\sim 20\text{--}60\%$  оксидов урана), сконцентрированная осадочными процессами, взаимодействовала с подземными водами, модерирующими нейтроны. Изотопического обогащения не происходило; естественные  $\sim 3,6\% \ ^{235}\text{U}$  обеспечили критичность, поддерживая прерывистые реакции деления в течение  $\sim 150\ 000\text{--}1$  миллиона лет, производя изотопы, такие как  $^{143}\text{Nd}$ , и тепло.

## Заключение: Мы — звёздная пыль, возрождённая из космических огней

От пылающего рождения Большого Взрыва до угасающего будущего звёзды формировали Вселенную. Звёзды Популяции III зажгли космос, создавая первые металлы. Звёзды Популяции II создали сложность, а звёзды Популяции I сделали возможными

планеты и жизнь. Звёздный нуклеосинтез — через цепочку pp, цикл CNO, тройной альфа-процесс, s-, r- и p-процессы и фотодезинтеграцию — создал элементы, с ней-тринными вспышками, сигнализирующими об их взрывном распространении. Реактор Окло, движимый естественным изобилием  $^{235}\text{U}$ , иллюстрирует это наследие. Мы — звёздная пыль, возрождённая из пепла древних звёзд, несущая их элементы в наших телах. По мере затемнения Вселенной наше космическое наследие может вдохновить будущие поколения зажигать новые звёзды, продолжая творение в энтропийной пустоте.