Shakil Mahmud • Research Monograph

SHAKIL MAHMUD EDITORIAL & RESEARCH MONOGRAPHS

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত

১৩.৮ বিলিয়ন বছরের মহাজাগতিক উপাখ্যান: মহাবিস্ফোরণের মহাপ্রসারণ ও নক্ষত্রমণ্ডলীর নিউক্লিওসিন্থেসিস থেকে গ্র্যান্ড ইন্টেলিজেন্স ও মহাবিশ্বের ভবিষ্যৎ।

SHAKIL MAHMUD

গবেষক ও লেখক

SHAKIL MAHMUD EDITORIAL & RESEARCH SERIES

প্রথম সংকলিত সংস্করণ • ঢাকা ও সিঙ্গাপুর • ২০২৬

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত

১৩.৮ বিলিয়ন বছরের মহাজাগতিক উপাখ্যান: মহাবিস্ফোরণের মহাপ্রসারণ ও নক্ষত্রমণ্ডলীর নিউক্লিওসিন্থেসিস থেকে গ্র্যান্ড ইন্টেলিজেন্স ও মহাবিশ্বের ভবিষ্যৎ।

LIBRARY & CATALOGING-IN-PUBLICATION DATA

Title: মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত
Author: Shakil Mahmud
Series: Shakil Mahmud Editorial & Research Series (Monograph Collection)
Subjects: Science -- History -- Philosophy -- Mathematics -- Civilization
Published: Dhaka & Singapore, 2026
Format: Digital Monograph Offprint (PDF) • Complete 20-Part Collected Edition
Permanent URI: https://shakilmahmud.com/series/universe/

প্রস্তাবিত সাইটেশন:
Mahmud, Shakil. (2026). *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত: The Complete 20-Part Collected Monograph*. Shakil Mahmud Research Series. https://shakilmahmud.com/series/universe/

Open Scholarly Access: This collected monograph is published under Open Scholarly Access for personal study, academic citation, university pedagogy, and non-commercial research.

© 2026 Shakil Mahmud. All rights reserved. Typeset and published at Dhaka and Singapore.

Shakil Mahmud • Research Monograph

তাত্ত্বিক ভূমিকা

ভূমিকা: জ্ঞানের একীভূত রূপরেখা

১৩.৮ বিলিয়ন বছরের পরিক্রমায় এক চরম উত্তপ্ত ও ঘন বিন্দু থেকে কোটি কোটি গ্যালাক্সি, ট্রিলিয়ন নক্ষত্র এবং সচেতন প্রাণের আবাসস্থল হিসেবে মহাবিশ্বের আত্মপ্রকাশ ঘটেছে। এই মনোগ্রাফে ২০টি গভীর অধ্যায়ে বর্ণিত হয়েছে মহাবিস্ফোরণ, স্ফীতি তত্ত্ব, মহাজাগতিক মাইক্রোওয়েভ পটভূমি, নক্ষত্রের জীবনচক্র, কৃষ্ণগহ্বর এবং মহাবিশ্বের চূড়ান্ত তাপগতীয় পরিণতি।

এই গবেষণামূলক কাজের উদ্দেশ্য কেবল তথ্য উপস্থাপন নয়, বরং চিন্তার গভীর বিকাশকে পাঠকের সামনে উন্মোচন করা। প্রতিটি পরিচ্ছদ এক একটি যুগান্তকারী বৌদ্ধিক সংকটের সমাধান হিসেবে কীভাবে আবির্ভূত হয়েছে, তা এখানে পদ্ধতিগতভাবে লিপিবদ্ধ করা হলো।

— Shakil Mahmud
Dhaka & Singapore, 2026

অধ্যায় সূচি

সূচিপত্র

প্রথম পর্যায়: প্রাচীন ও শাস্ত্রীয় যুগ

খণ্ড ১ — সময়ের শুরুর আগের মুহূর্ত — সিঙ্গুলারিটি, মহাজাগতিক স্ফীতি এবং আদিম পিকোসেকেণ্ড — 1,809 শব্দ
সময়ের শুরুর আগের মুহূর্ত — সিঙ্গুলারিটি, মহাজাগতিক স্ফীতি এবং আদিম পিকোসেকেণ্ড

খণ্ড ২ — পদার্থের অগ্নিপরীক্ষা — কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা, ব্যারোজেনেসিস এবং আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস — 2,818 শব্দ
পদার্থের অগ্নিপরীক্ষা — কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা, ব্যারোজেনেসিস এবং আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস

খণ্ড ৩ — আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং অন্ধকার যুগ — 2,355 শব্দ
আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং অন্ধকার যুগ

খণ্ড ৪ — মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সি এবং পুনরায়নায়ন যুগ — 1,990 শব্দ
মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সি এবং পুনরায়নায়ন যুগ

খণ্ড ৫ — মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম — 2,234 শব্দ
মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম

দ্বিতীয় পর্যায়: মধ্যযুগীয় রূপান্তর

খণ্ড ৬ — ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে — 2,147 শব্দ
ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে

খণ্ড ৭ — সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য — 2,027 শব্দ
সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য

খণ্ড ৮ — প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম — 1,695 শব্দ
প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম

খণ্ড ৯ — আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, উল্কাপাত এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম — 1,895 শব্দ
আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, উল্কাপাত এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম

খণ্ড ১০ — অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ — 2,341 শব্দ
অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ

তৃতীয় পর্যায়: আধুনিক বিপ্লব ও বিজ্ঞান

খণ্ড ১১ — অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও মহা-অক্সিডেশন ঘটনা — 2,084 শব্দ
অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও মহা-অক্সিডেশন ঘটনা

খণ্ড ১২ — জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়ন — 2,108 শব্দ
জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়ন

খণ্ড ১৩ — ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — ট্রাইলোবাইট, শিকারী-শিকার যুদ্ধ এবং দ্বিপাক্ষিক দেহের পরিকল্পনা — 1,893 শব্দ
ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — ট্রাইলোবাইট, শিকারী-শিকার যুদ্ধ এবং দ্বিপাক্ষিক দেহের পরিকল্পনা

খণ্ড ১৪ — ডাঙার বিজয় — সিলুরিয়ান উদ্ভিদ, টেট্রাপড এবং অ্যামনিওটিক ডিম — 2,198 শব্দ
ডাঙার বিজয় — সিলুরিয়ান উদ্ভিদ, টেট্রাপড এবং অ্যামনিওটিক ডিম

খণ্ড ১৫ — ডাইনোসর সাম্রাজ্য ও মহাপ্রলয় — মেসোজোয়িক বিশ্ব এবং স্তন্যপায়ীর ঊষা — 2,093 শব্দ
ডাইনোসর সাম্রাজ্য ও মহাপ্রলয় — মেসোজোয়িক বিশ্ব এবং স্তন্যপায়ীর ঊষা

চতুর্থ পর্যায়: সমকালীন যুগ ও ভবিষ্যতের দিগন্ত

খণ্ড ১৬ — ঋজু মানব — রিফ্ট ভ্যালি, দ্বিপদগমন এবং আগুনের প্রভুত্ব — 1,850 শব্দ
ঋজু মানব — রিফ্ট ভ্যালি, দ্বিপদগমন এবং আগুনের প্রভুত্ব

খণ্ড ১৭ — জ্ঞানীয় বিপ্লব — হোমো স্যাপিয়েন্স, প্রতীকী ভাষা এবং বিমূর্ত চিন্তা — 1,903 শব্দ
জ্ঞানীয় বিপ্লব — হোমো স্যাপিয়েন্স, প্রতীকী ভাষা এবং বিমূর্ত চিন্তা

খণ্ড ১৮ — প্রকৃতির বশ্যতা — নিওলিথিক স্ফুলিঙ্গ, কিউনিফর্ম এবং নগরের উত্থান — 1,839 শব্দ
প্রকৃতির বশ্যতা — নিওলিথিক স্ফুলিঙ্গ, কিউনিফর্ম এবং নগরের উত্থান

খণ্ড ১৯ — যুক্তির অনুশাসন — তড়িচ্চুম্বকত্ব, টুরিং মেশিন এবং সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর — 1,844 শব্দ
যুক্তির অনুশাসন — তড়িচ্চুম্বকত্ব, টুরিং মেশিন এবং সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর

Shakil Mahmud • Research Monograph

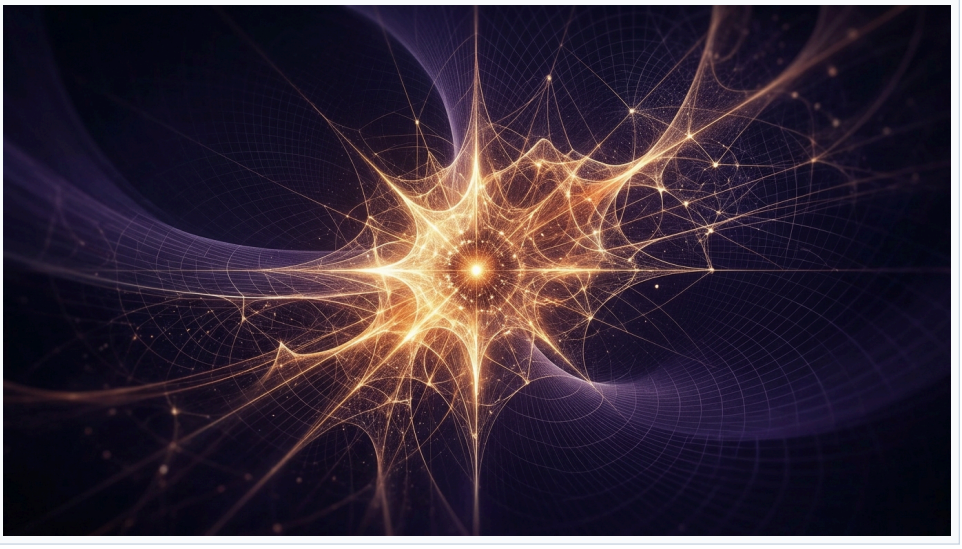
খণ্ড ২০ কৃত্রিম মনন — নিউরাল নেটওয়ার্ক, ট্রান্সফরমার এবং গ্রহীয় বুদ্ধিমত্তার ঊষা 1,993 শব্দ
কৃত্রিম মনন — নিউরাল নেটওয়ার্ক, ট্রান্সফরমার এবং গ্রহীয় বুদ্ধিমত্তার ঊষা

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • প্রথম খণ্ড

সময়ের শুরুর আগের মুহূর্ত — সিঙ্গুলারিটি, মহাজাগতিক স্ফীতি এবং আদিম পিকোসেকেণ্ড

সময়ের শুরুর আগের মুহূর্ত — সিঙ্গুলারিটি, মহাজাগতিক স্ফীতি এবং আদিম পিকোসেকেণ্ড

1,809 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১: *চিত্র: প্লাঙ্ক যুগে ($t \leq 10^{-43}$ সেকেন্ড) কোয়ান্টাম স্থান-কালের দোলাচল এবং মহাজাগতিক স্ফীতি (Cosmic Inflation), যা অতিপারমাণবিক বিন্দু থেকে স্থান-কালের সূচকীয় প্রসারণ ঘটিয়ে মহাবিশ্বের ভিত্তি স্থাপন করেছিল।*

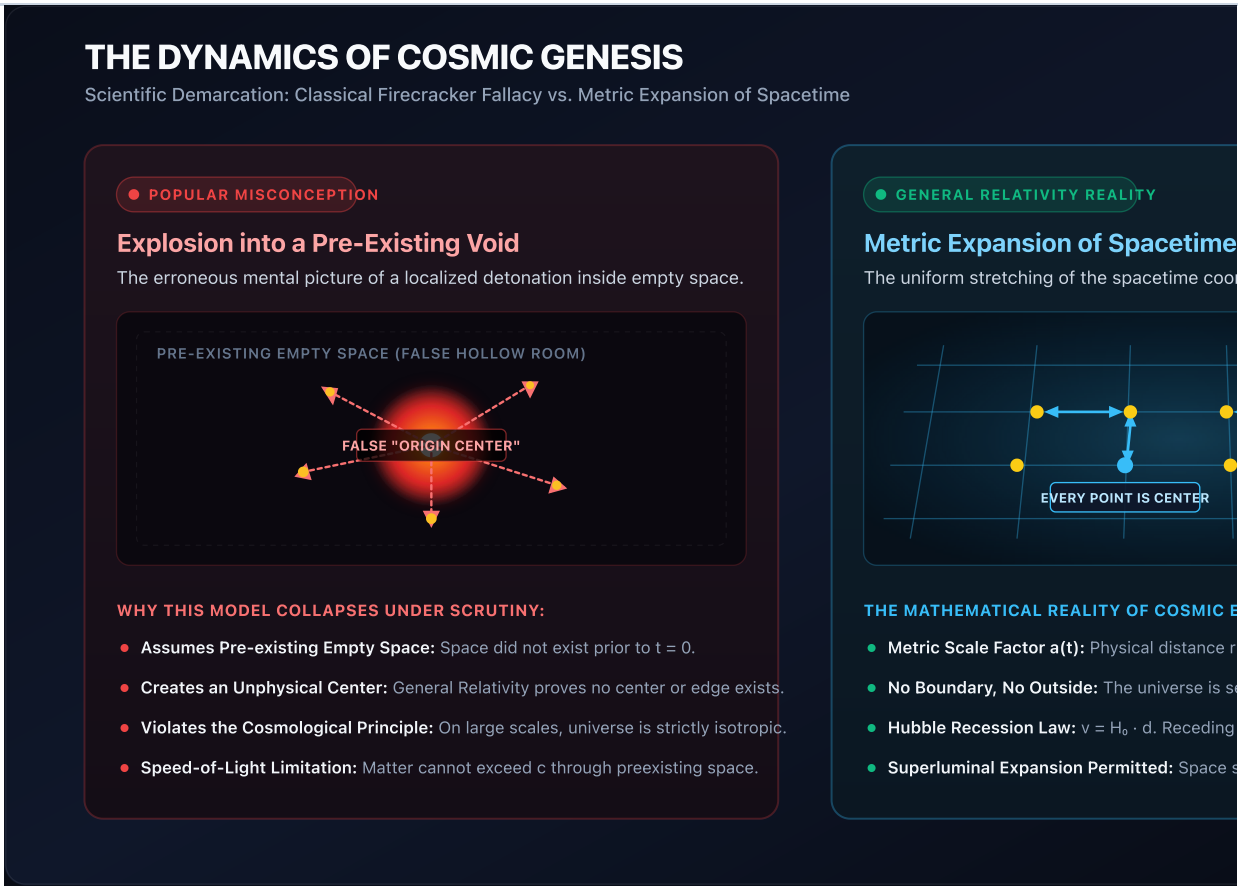
নক্ষত্র, পরমাণু কিংবা খোদ সময়ের প্রবাহ শুরুর আগে, এই মহাবিশ্বের অস্তিত্ব ছিল এক অকল্পনীয় ভৌত অবস্থায়: এক নিখুঁত পরম প্রতিসাম্য, যেখানে স্থান, কাল, পদার্থ এবং প্রকৃতির সমস্ত মৌলিক বল সংকুচিত ছিল একটিমাত্র অবিভাজ্য কোয়ান্টাম বিন্দুতে। মহাকালের সূচনা মুহূর্তের প্রথম এক কোটি ট্রিলিয়ন ভাগের এক ট্রিলিয়ন ভাগ সেকেন্ডের মধ্যে স্থান-কালের এক প্রচণ্ড সূচকীয় প্রসারণ—যাকে পদার্থবিজ্ঞানে **মহাজাগতিক স্ফীতি (Cosmic Inflation)** বলা হয়—অতি-পারমাণবিক স্তরের অতিক্ষুদ্র কোয়ান্টাম কম্পনকে মহাজাগতিক বিস্তারে টেনে প্রসারিত করেছিল। সেই অতিক্ষুদ্র কোয়ান্টাম বীজ থেকেই আজ জন্ম নিয়েছে দুই ট্রিলিয়ন গ্যালাক্সির সুবিশাল মহাজাগতিক জাল।

জ্ঞানের প্রান্তসীমা: t = 0 মুহূর্তে আসলে কী ঘটেছিল?

বিগ ব্যাং বা মহাবিস্ফোরণ সম্পর্কে জনসাধারণের সাধারণ কল্পনাটি প্রায়শই একটি বিভ্রান্তিকর চিত্রের ওপর দাঁড়িয়ে আছে: যেন একটি অন্ধকার, শূন্য ঘরের মধ্যে হঠাৎ একটি প্রচণ্ড পটকা ফেটে গেল। একটি উজ্জ্বল আলোর ঝলকানি হলো, ধ্বংসাবশেষ মহাশূন্যে চারদিকে ছিটকে পড়ল এবং সেই শূন্যতার ভেতরে গ্রহ-নক্ষত্র তৈরি হলো। আধুনিক তাত্ত্বিক পদার্থবিজ্ঞান এবং আলবার্ট আইনস্টাইনের সাধারণ আপেক্ষিকতা (General Relativity) অনুসারে, এই মানসিক চিত্রটি সম্পূর্ণ ত্রুটিপূর্ণ।

প্রথমত, বিগ ব্যাং কোনো শূন্য মহাশূন্যের ভেতর ঘটা বিস্ফোরণ ছিল না; বিগ ব্যাং ছিল **খোদ স্থান এবং কালের জন্মমুহূর্ত**। বিগ ব্যাং-এর “বাইরে” বলে কোনো শূন্য স্থান আগে থেকে বিরাজ করছিল না। দ্বিতীয়ত, মহাবিশ্বের কোনো ভৌগোলিক কেন্দ্র নেই। মহাবিশ্বের প্রতিটি বিন্দু থেকেই মনে হয় প্রসারণটি ঠিক সেখান থেকেই ঘটছে। তৃতীয়ত, $t = 0$ মুহূর্তে ক্লাসিক্যাল সাধারণ আপেক্ষিকতা যেখানে অসীম ঘনত্ব এবং অসীম বক্রতার এক গাণিতিক “সিঙ্গুলারিটি” (Singularity) নির্দেশ করে, সেখানে কোয়ান্টাম বলবিদ্যা সাক্ষ্য দেয় যে স্থান-কাল নিজেই তার ধারাবাহিকতা হারিয়ে ফেলেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১.১: মহাজাগতিক উৎপত্তির গতিবিদ্যা। প্রচলিত পটকা বিস্ফোরণের ভ্রান্ত ধারণা (একটি শূন্য স্থানে পদার্থের ছড়িয়ে পড়া) বনাম সাধারণ আপেক্ষিকতার প্রকৃত সত্য: খোদ স্থান-কালের সুষম মেট্রিক প্রসারণ, যার কোনো একক কেন্দ্র নেই এবং যার কোনো বহিরাগত সীমানা নেই।

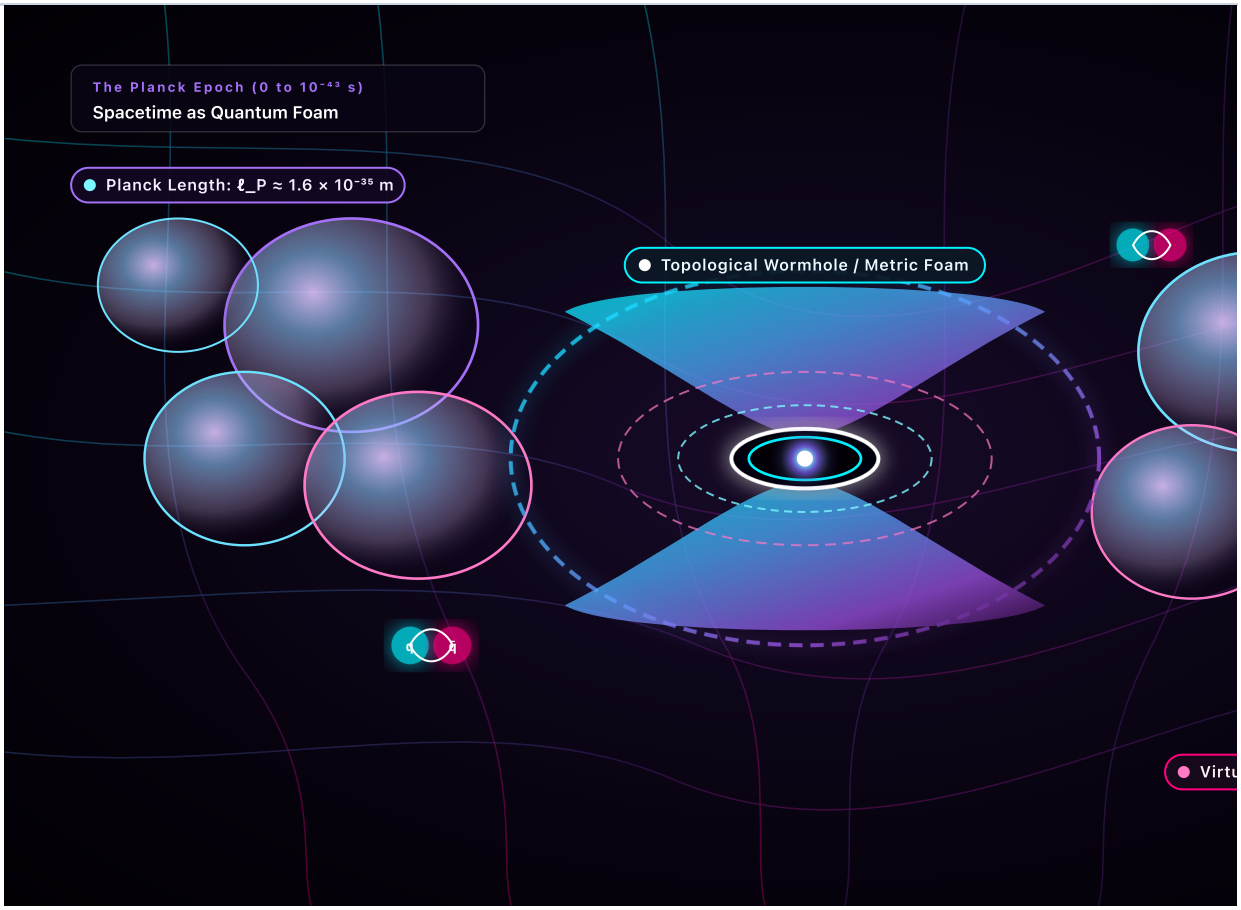
প্ল্যাঙ্ক কাল (০ থেকে ১০⁻⁴³ সেকেন্ড): কোয়ান্টাম ফোম হিসেবে স্থান-কাল

বর্তমান পদার্থবিজ্ঞানের তাত্ত্বিক সমীকরণসমূহ যে চরম সীমায় এসে তাদের কার্যকারিতা হারায়, তাকে বলা হয় **প্ল্যাঙ্ক কাল (Planck Epoch)**। এই চরম ক্ষণটি নির্ধারিত হয় প্রকৃতির তিনটি অপরিবর্তনীয় মৌলিক ধ্রুবক দ্বারা: প্ল্যাঙ্কের হ্রাসকৃত ধ্রুবক ($\hbar$), মহাকর্ষীয় ধ্রুবক (G), এবং শূন্যস্থানে আলোর দ্রুতি (c):

$$\text{প্ল্যাঙ্ক সময়: } t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.39 \times 10^{-44} \text{ সেকেন্ড}$$

$$\text{প্ল্যাঙ্ক দৈর্ঘ্য: } l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.62 \times 10^{-35} \text{ মিটার}$$

এই স্কেলে মহাকর্ষের শক্তি এত প্রবল হয়ে ওঠে যে স্থান-কালের মসৃণ জ্যামিতি সম্পূর্ণরূপে ধ্বংস হয়ে যায়। স্থান-কাল কোনো মসৃণ ক্যানভাস নয়, বরং একটি ফুটন্ত, তোলপাড় করা **কোয়ান্টাম ফোম (Quantum Foam)**-এ পরিণত হয়, যেখানে অতিক্ষুদ্র মাইক্রোস্কোপিক ব্ল্যাকহোল এবং ওয়ার্মহোল নিরন্তর জন্ম নেয় এবং পরক্ষণেই মিলিয়ে যায়। প্রকৃতির চারটি মৌলিক বল—মহাকর্ষ, সবল নিউক্লীয়, দুর্বল নিউক্লীয় এবং তড়িৎচুম্বকীয় বল—একীভূত হয়ে এক অবিভাজ্য **পরম একক বল (Superforce)** হিসেবে ক্রিয়াশীল ছিল।

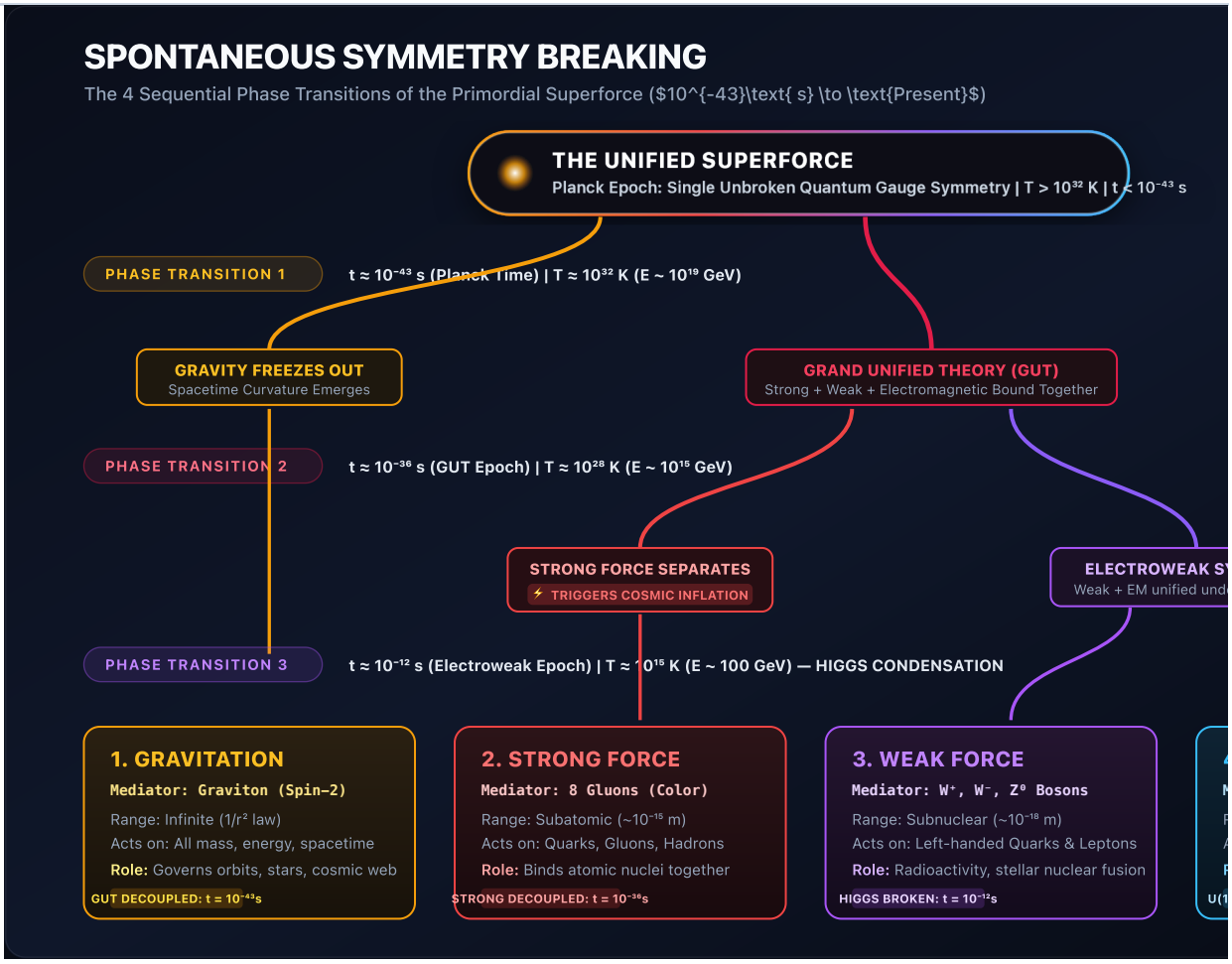


প্ল্যাঙ্ক কালে হুইলারের কোয়ান্টাম স্পেসটাইম ফোম ($t \leq 10^{-43}$ s)। প্ল্যাঙ্ক দৈর্ঘ্য স্কেলে ($\ell_P \approx 1.6 \times 10^{-35}$ m), কোয়ান্টাম ফ্লাকচুয়েশন সাধারণ আপেক্ষিকতার মসৃণ জ্যামিতিকে চূর্ণ করে দেয়। স্থান-কাল এক ফুটন্ত কোয়ান্টাম ফোমে রূপ নেয়, যেখানে প্ল্যাঙ্ক ভরের মাইক্রোস্কোপিক ব্ল্যাকহোল ও ক্ষণস্থায়ী অতিক্ষুদ্র ওয়ার্মহোল নিরন্তর জন্ম নেয় এবং বিলীন হয় ($T \sim 10^{32}$ K)।

স্বতঃস্ফূর্ত প্রতিসাম্য ভঙ্গ: সুপারফোর্সের বিভাজন

মহাবিশ্বের বয়স যখন মাত্র 10^{-43} সেকেন্ড স্পর্শ করে, তখন আদিম মহাবিশ্বের তাপমাত্রা ছিল প্রায় 10^{32} কেলভিন। এই তাপমাত্রায় মহাবিশ্ব তার প্রথম নাটকীয় দশান্তর বা ফেজ ট্রানজিশনের (Phase Transition) সম্মুখীন হয়: পরম সুপারফোর্স থেকে মহাকর্ষ বিচ্ছিন্ন হয়ে পড়ে। এর ফলে সূচনা ঘটে **মহা-একীভূত বলের যুগ বা GUT Epoch (Grand Unified Theory Epoch)**-এর।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১.২: স্বতঃস্ফূর্ত প্রতিসাম্য ভঙ্গ এবং বলের পৃথকীকরণ। মহাবিশ্বের তাপমাত্রা > ১০^{32} কেলভিন থেকে হ্রাস পেয়ে ১০^{15} কেলভিনে নেমে আসার সাথে সাথে আদিম পরম একক বল (Superforce) ক্রমান্বয়ে চারটি পৃথক মৌলিক বলে (মহাকর্ষ, সবল নিউক্লীয়, দুর্বল নিউক্লীয় ও তড়িৎচুম্বকীয় বল) বিভক্ত হওয়ার পর্যায়ক্রমিক চিত্র।

তাপমাত্রা যখন আরও হ্রাস পেয়ে 10^{27} কেলভিনে নেমে আসে (বয়স প্রায় 10^{-36} সেকেন্ড), তখন প্রকৃতিতে ঘটে দ্বিতীয় ও সবচেয়ে বৈপ্লবিক প্রতিসাম্য ভঙ্গ। সবল নিউক্লীয় বল (Strong Nuclear Force) ইলেকট্রোউইক (Electroweak) বল থেকে পৃথক হয়ে যায়। এই বিচ্ছেদের ফলে একটি প্রচণ্ড শক্তির উদ্ভব ঘটে, যা স্থান-কালের শূন্যস্থান বা ভ্যাকুয়ামকে এক চরম পরাবাস্তব অবস্থায় রূপান্তরিত করে।

স্ট্যান্ডার্ড বিগ ব্যাং মডেলের তিনটি মারাত্মক ত্রুটি

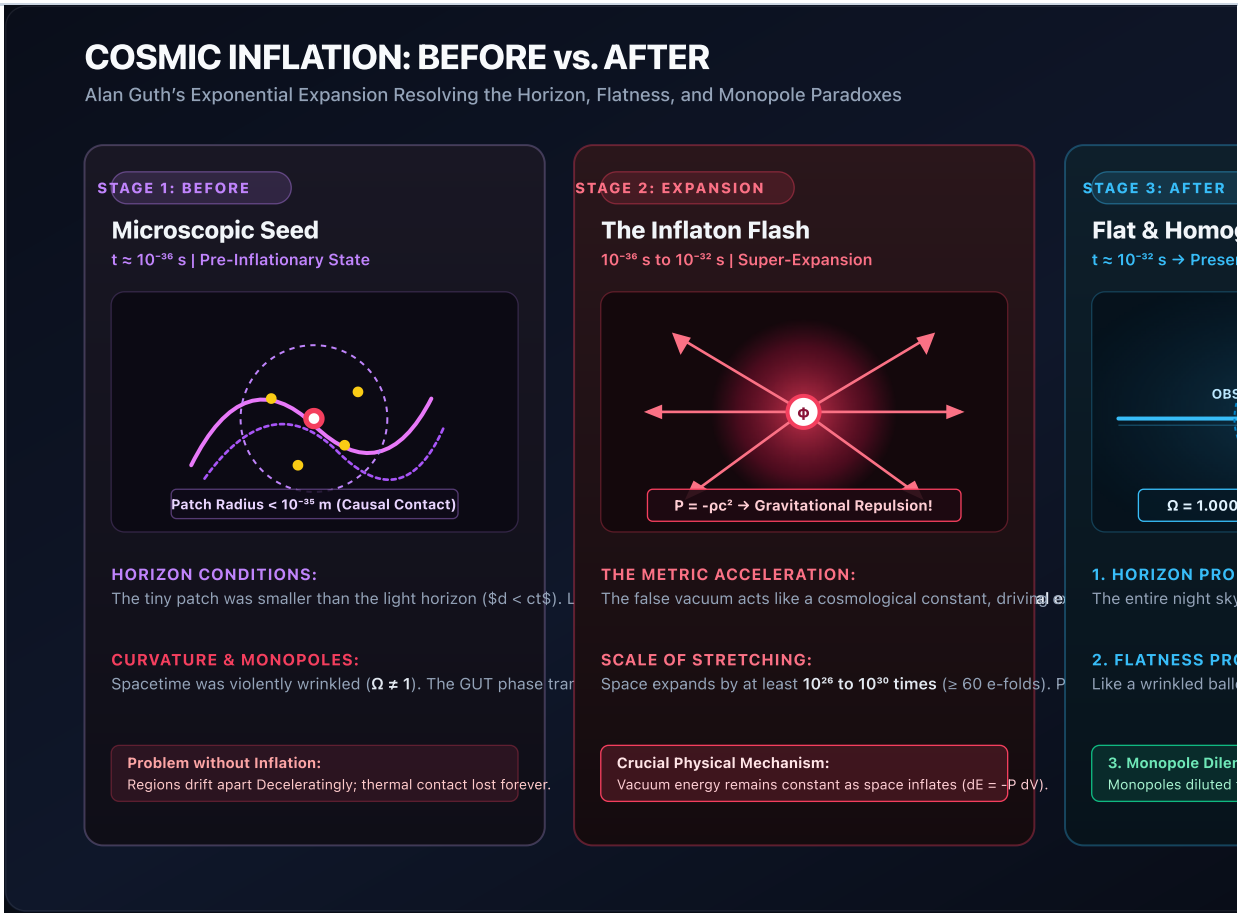
বিংশ শতাব্দীর শেষভাগে মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ (CMB) আবিষ্কারের পর বিজ্ঞানীরা বুঝতে পারেন যে মূল প্রথাগত বিগ ব্যাং তত্ত্বে তিনটি অমীমাংসিত প্যারাডক্স রয়ে গেছে:

- **দিগন্ত সমস্যা (The Horizon Problem):** রাতের আকাশে বিপরীত দিকে অবস্থিত মহাবিশ্বের দুটি প্রান্তের দূরত্ব প্রায় ৪৬ বিলিয়ন আলোকবর্ষ। আলোর গতিতে তথ্য আদান-প্রদান করেও তারা কখনো একে অপরের সংস্পর্শে আসতে পারেনি। অথচ তাদের তাপমাত্রা দশমিকের পর চার ঘর পর্যন্ত হুবহু এক (2.7255 K)। কার্যকারণ সম্পর্কহীন দুটি অঞ্চল কীভাবে একই তাপমাত্রায় পৌঁছাল?
- **সমতলতা সমস্যা (The Flatness Problem):** আইনস্টাইনের সমীকরণ অনুযায়ী মহাবিশ্বের ঘনত্বের অনুপাত Ω যদি শুরুর মুহূর্তে ১.০০০০০০০০০০০০০১ হতো, মহাবিশ্ব বহু আগেই সংকুচিত হয়ে ধ্বংস হয়ে যেত; আর যদি ০.৯৯৯৯৯৯৯৯৯৯৯৯৯৯ হতো, মহাবিশ্ব এত দ্রুত প্রসারিত হতো যে কোনো গ্যালাক্সি তৈরি হতে পারত না। শুরুর মুহূর্তে Ω-এর মান ১-এর এত নিখুঁত কাছাকাছি কেন ছিল?
- **চৌম্বকীয় মনোপোল সমস্যা (The Monopole Problem):** কণা পদার্থবিজ্ঞানের গ্র্যান্ড ইউনিফায়েড তত্ত্ব অনুযায়ী উচ্চ তাপমাত্রায় প্রচুর বিচ্ছিন্ন উত্তর বা দক্ষিণ মেরুবিশিষ্ট অতিভারী চৌম্বকীয় মনোপোল তৈরি হওয়ার কথা ছিল। কিন্তু সমগ্র দৃশ্যমান মহাবিশ্বে একটিও মনোপোলের সন্ধান পাওয়া যায়নি কেন?

মহাজাগতিক স্ফীতির অলৌকিক ঘটনা: অ্যালান গুথের সূচকীয় প্রসারণ

১৯৭৯ সালের ডিসেম্বরে তরুণ মার্কিন তাত্ত্বিক পদার্থবিদ **অ্যালান গুথ (Alan Guth)** এই তিন জটিল ধাঁধার এক যুগান্তকারী সমাধান আবিষ্কার করেন: **মহাজাগতিক স্ফীতি তত্ত্ব (Cosmic Inflation)**।

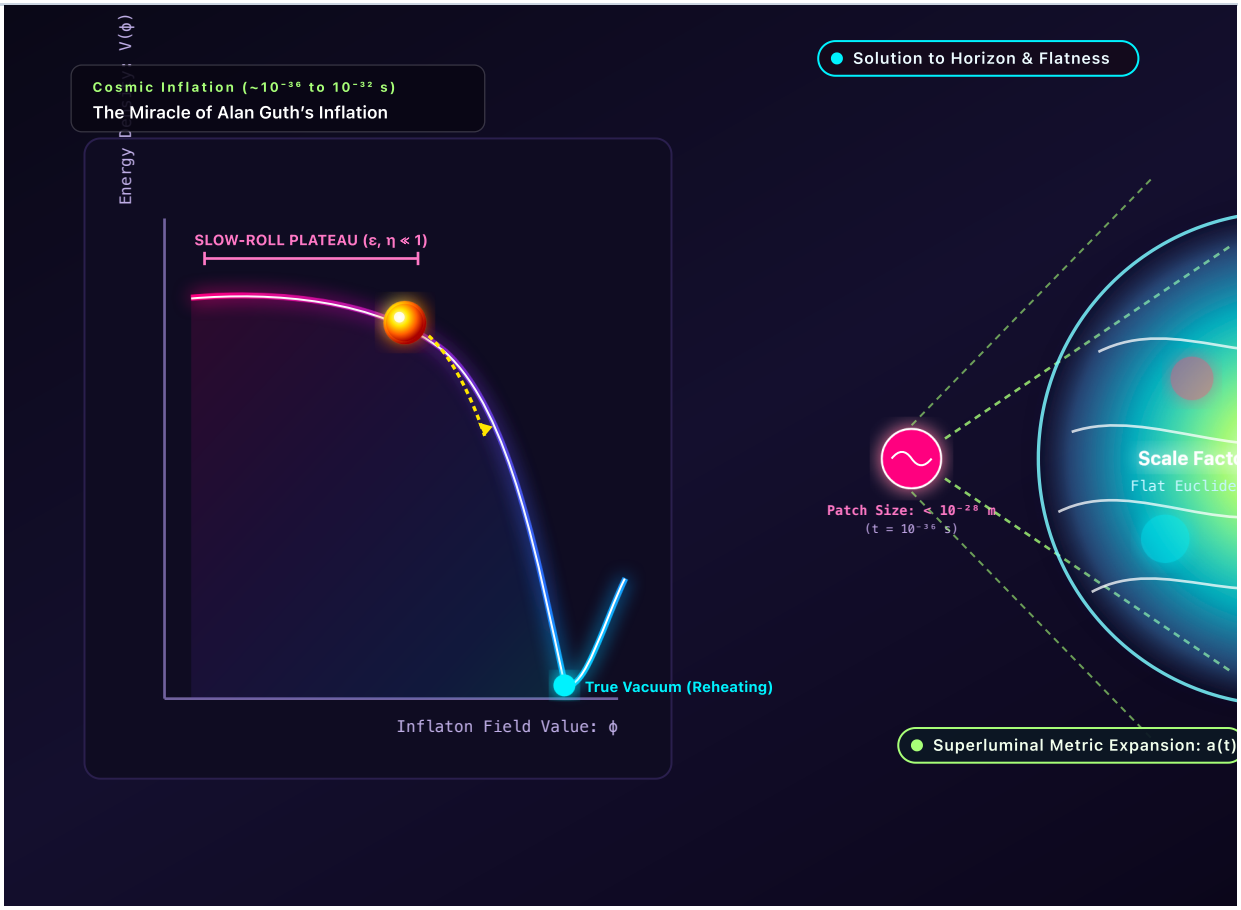
গুথ দেখালেন, সবল বল পৃথক হয়ে যাওয়ার সময় একটি কাল্পনিক স্কেলার কোয়ান্টাম ক্ষেত্র—**ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্র (ϕ)**—তার সর্বনিম্ন শক্তি স্তরে পৌঁছাতে না পেরে একটি "মিথ্যা ভ্যাকুয়াম" (False Vacuum) দশায় আটকে পড়ে। এই মিথ্যা ভ্যাকুয়ামের শক্তি ঘনত্ব ছিল ধ্রুবক এবং এটি এক প্রচণ্ড ঋণাত্মক চাপ (Negative Pressure) সৃষ্টি করে। সাধারণ আপেক্ষিকতা অনুযায়ী, ঋণাত্মক চাপ তীব্র মহাকর্ষীয় বিকর্ষণ বা রিপালশন তৈরি করে।



চিত্র ১.৩: মহাজাগতিক স্ফীতির পূর্ব ও পরবর্তী রূপান্তর। কীভাবে ডি সিটার (de Sitter) সূচকীয় প্রসারণ ($a(t) \propto e^{Ht}$) কার্যকারণ ভারসাম্যে থাকা একটি অতি-ক্ষুদ্র কোয়ান্টাম অঞ্চলকে মহাজাগতিক আকারে প্রসারিত করেছিল, যার ফলে স্থানিক বক্রতা সমতল হয়ে গিয়েছিল ($\Omega \to 1.000$) এবং দিগন্ত সমস্যার সম্পূর্ণ সমাধান হয়েছিল।

মাত্র 10^{-36} থেকে 10^{-32} সেকেন্ডের ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র সময়ের মধ্যে মহাবিশ্ব সূচকীয় হারে প্রসারিত হয় ($a(t) \propto e^{Ht}$)। মহাবিশ্ব তার আদি আকারের চেয়ে কমপক্ষে 10^{26} গুণ (অন্য মতে 10^{78} গুণেরও বেশি) প্রসারিত হয়। এটি একটি প্রোটনের চেয়ে কোটি গুণ ছোট অঞ্চলকে এক লহমায় একটি মার্বেলের আকারে এবং পরবর্তীতে বর্তমান দৃশ্যমান মহাবিশ্বের চেয়েও বহু গুণ বিশাল আকারে রূপান্তরিত করে।

Shakil Mahmud • Research Monograph

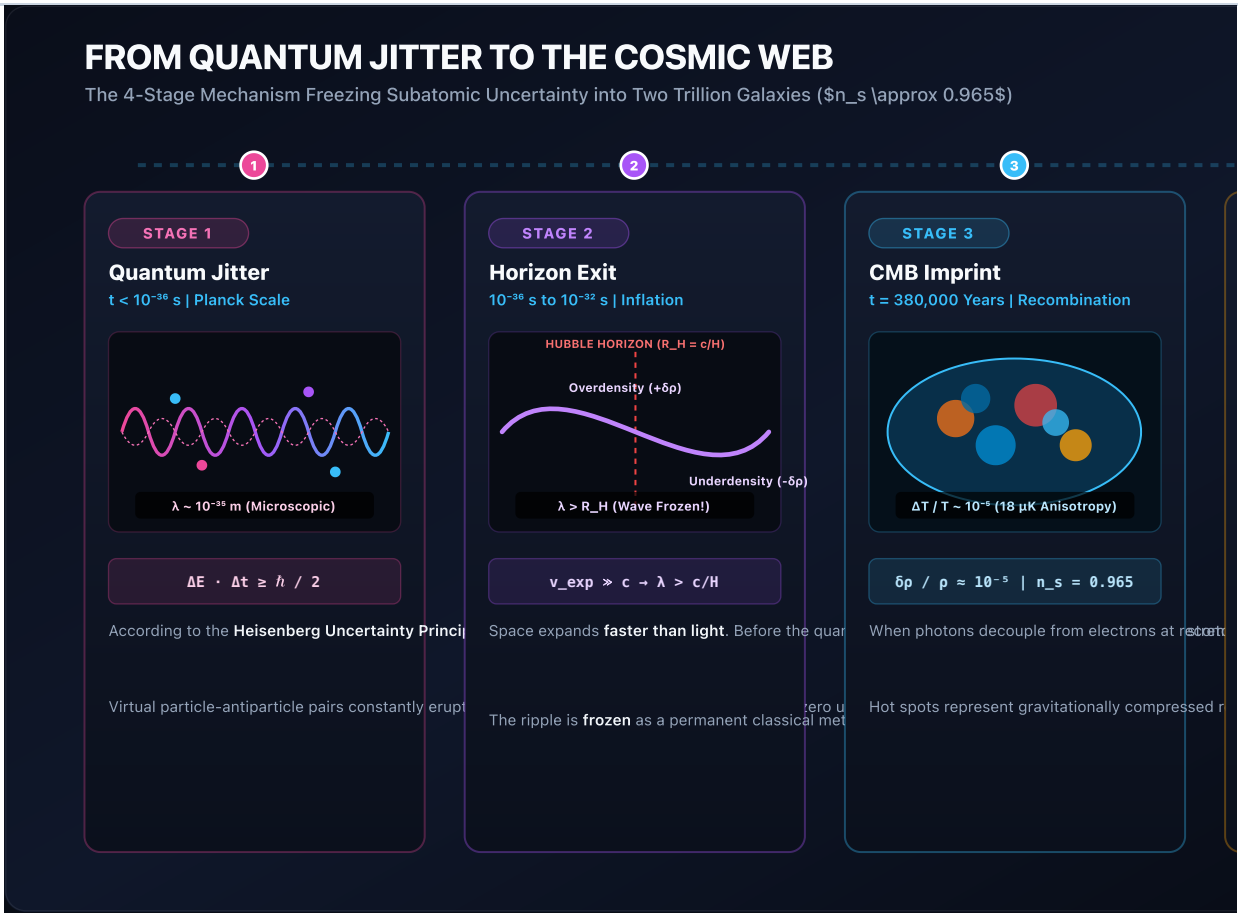


মহাজাগতিক ইনফ্ল্যাটন বিভব $V(\phi)$ ও মিথ্যা ভ্যাকুয়ামের সূচকীয় প্রসারণ ($10^{-36}\ \mathrm{s} \leq t \leq 10^{-32}\ \mathrm{s}$)। স্কেলার ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্র ϕ একটি সমতল সম্ভাব্যতা মালভূমির ওপর দিয়ে ধীর গতিতে গড়িয়ে পড়ে ($\epsilon, \eta \ll 1$), যা একটি মিথ্যা ভ্যাকুয়াম দশায় রূপ নেয়। এর অপরিবর্তনীয় শক্তি ঘনত্ব তীব্র ঋণাত্মক চাপ ($P = -\rho c^2$) সৃষ্টি করে মহাবিশ্বকে সূচকীয় হারে ($a(t) \propto e^{Ht}$) কমপক্ষে ৬০ e-ফোল্ড প্রসারিত করে।

মহাজাগতিক রোসেটা স্টোন: কোয়ান্টাম অস্থিরতা যেভাবে গ্যালাক্সিতে পরিণত হলো

মহাজাগতিক স্ফীতি শুধু দিগন্ত ও সমতলতা সমস্যার সমাধানই করেনি, এটি আমাদের নিজস্ব অস্তিত্বের সবচেয়ে গভীর রহস্যটিরও মীমাংসা করেছে: *শূন্যস্থান থেকে গ্যালাক্সি ও নক্ষত্র কীভাবে সৃষ্টি হলো?*

হাইসেনবার্গের অনিশ্চয়তা নীতি ($\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$) অনুসারে শূন্যস্থানের ভেতরেও শক্তির ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র কোয়ান্টাম অস্থিরতা বা ফ্লাকচুয়েশন সতত ক্রিয়াশীল থাকে। স্ফীতি শুরু হওয়ার আগে এই অস্থিরতাগুলো ছিল অতিক্ষুদ্র পারমাণবিক স্কেলে। কিন্তু স্ফীতির প্রচণ্ড দ্রুত প্রসারণ এই কোয়ান্টাম তরঙ্গগুলোকে আলোর গতির চেয়েও দ্রুত মহাজাগতিক ইভেন্ট হরাইজনের বাইরে টেনে নিয়ে যায়।



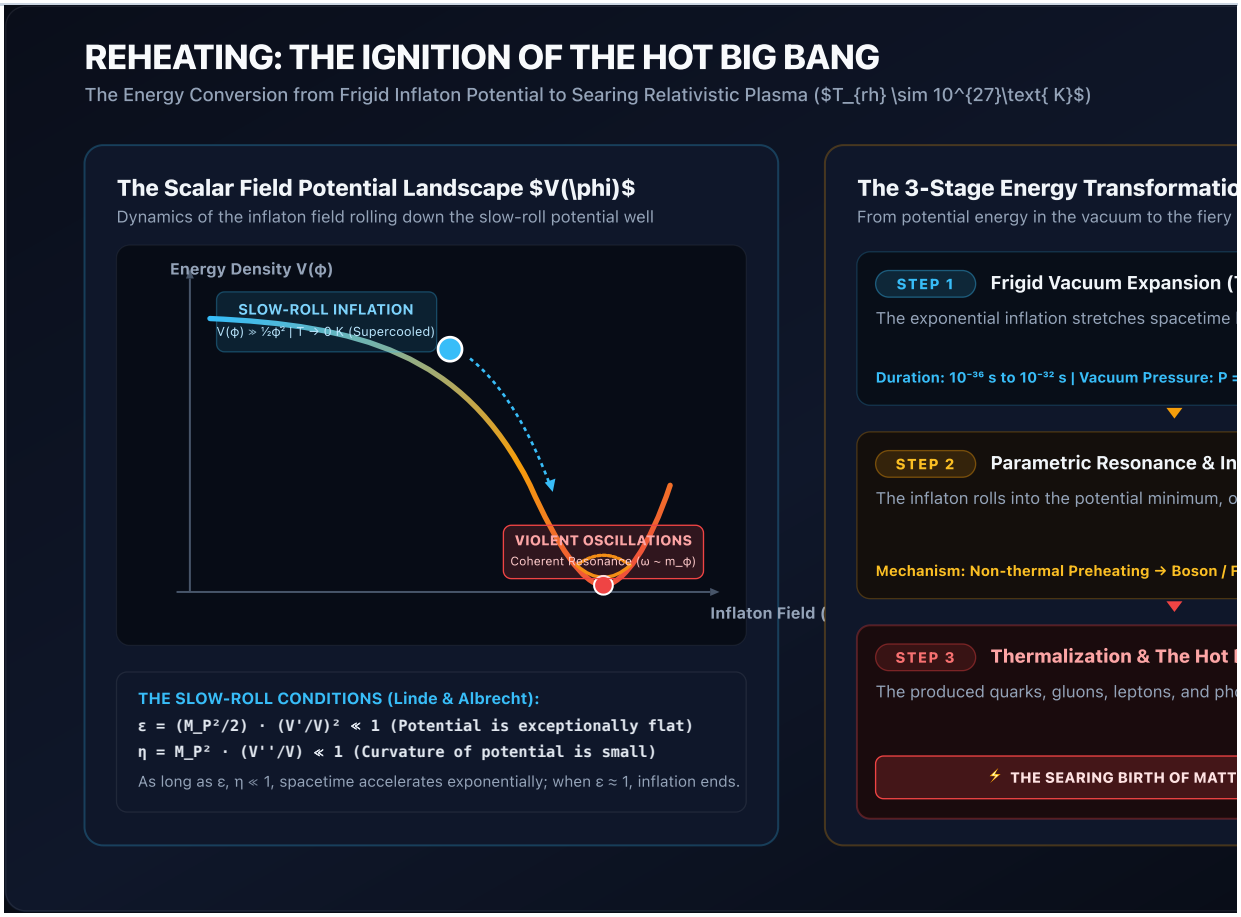
চিত্র ১.৪: কোয়ান্টাম অস্থিরতা থেকে গ্যালাক্সির মহাজাগতিক জাল। চারটি সুনির্দিষ্ট রূপান্তর ধাপ: শূন্য-বিন্দু ভ্যাকুয়াম ফ্লাকচুয়েশন স্ফীতির সময় মহাজাগতিক ঘটনা দিগন্ত অতিক্রম করে প্রসারিত হয়, ক্লাসিক্যাল বক্রতার তরঙ্গে পরিণত হয়, সিএমবি-তে তাপমাত্রার ক্ষুদ্র তারতম্য ($\Delta T/T \sim 10^{-5}$) হিসেবে মুদ্রিত হয় এবং মহাকর্ষীয় পতনে গ্যালাক্সিতে রূপ নেয়।

যখন স্ফীতি থেমে যায়, তখন এই প্রসারিত তরঙ্গগুলো স্থান-কালের ঘনত্বে স্থায়ী ক্ষুদ্র ঢেউ হিসেবে জমে যায়। মহাবিশ্বের কিছু অংশ অন্য অংশের চেয়ে মাত্র ১ লাখ ভাগের এক ভাগ বেশি ঘন হয়ে পড়ে ($\Delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$)। এই সামান্যতম অতিরিক্ত ঘন অঞ্চলগুলোই পরবর্তীতে মহাকর্ষীয় আকর্ষণে আশেপাশের গ্যাস টেনে নিয়ে তৈরি করেছে মিল্কিওয়ে, অ্যান্ড্রোমিডা এবং কোটি কোটি গ্যালাক্সির মহাজাগতিক ওয়েব।

রিহিটিং: উত্তপ্ত বিগ ব্যাং-এর সূচনা

স্ফীতির সময় মহাবিশ্ব এত নাটকীয়ভাবে প্রসারিত হয়েছিল যে তার ভেতরের সমস্ত কণা পাতলা হয়ে গিয়েছিল এবং তাপমাত্রা পরম শূন্যের কাছাকাছি নেমে মহাবিশ্ব এক সম্পূর্ণ প্রাণহীন, বরফশীতল শূন্য মরুভূমিতে পরিণত হয়েছিল। তবে এই শূন্যতা ছিল ছদ্মবেশ মাত্র; কারণ সমস্ত শক্তি সঞ্চিত ছিল ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রের অন্তর্নিহিত বিভব শক্তিতে।

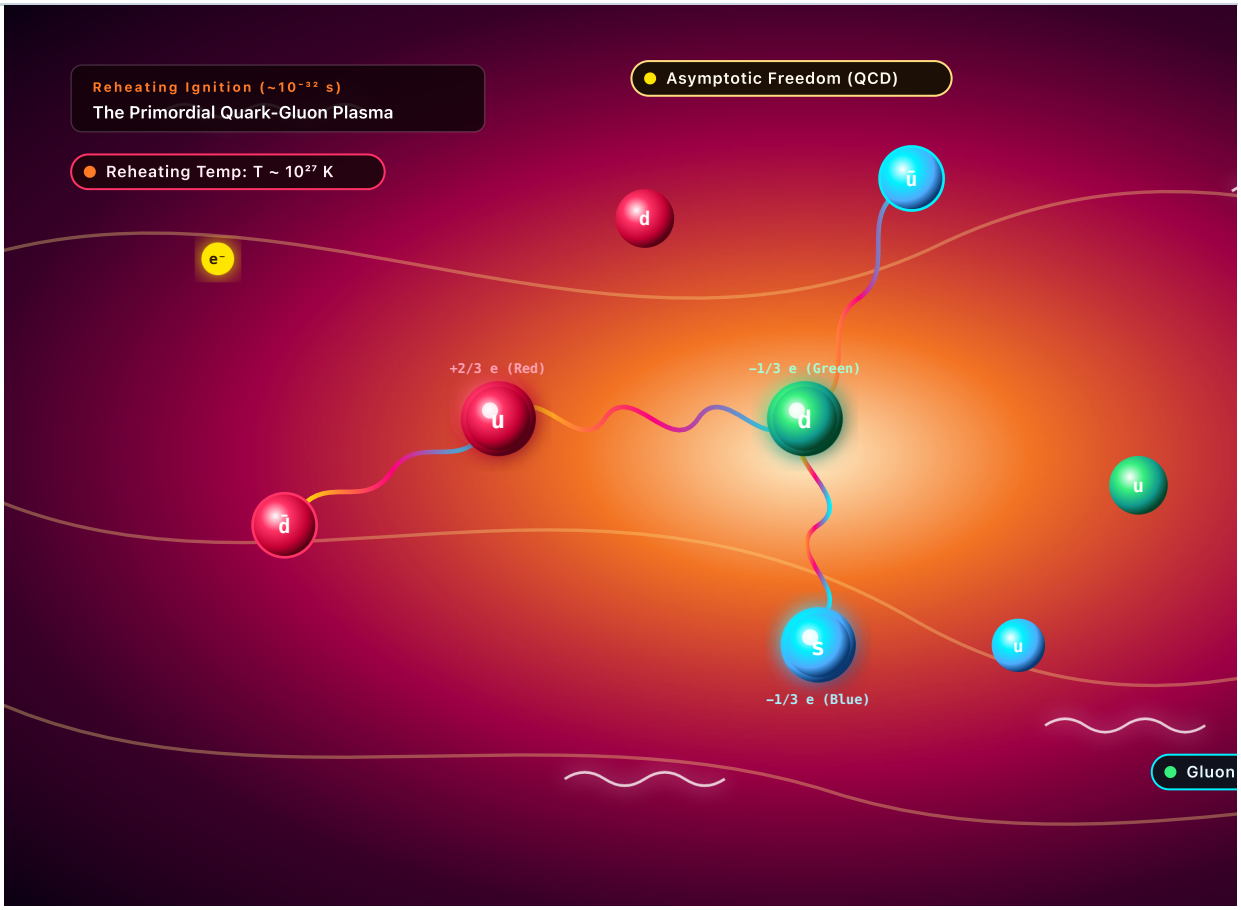
Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১.৫: রিহিটিং এবং মহাজাগতিক তাপীয় পুনর্জন্ম। শক্তির রূপান্তরের গতিশীলতা: ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্র সম্ভাব্যতা ($V(\phi)$) বেয়ে নিচে নেমে আসে এবং সর্বনিম্ন বিন্দুতে প্রচণ্ড কম্পনের মাধ্যমে স্ট্যান্ডার্ড মডেলের কোয়ার্ক, গ্লুয়ন ও লেপ্টন কণিকায় রূপান্তরিত হয় ($T_{\rm rh} \sim 10^{27}$ K), যা মহাবিশ্বকে প্রচণ্ড উত্তপ্ত প্লাজমায় পূর্ণ করে।

যখন ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রটি তার সম্ভাব্যতা কূপের সর্বনিম্ন বিন্দুতে নেমে আসে, তখন এটি প্রচণ্ড বেগে দোদুল্যমান হতে থাকে। এই কম্পন ইনফ্ল্যাটন ফিল্ডকে ভেঙে গুঁড়িয়ে দেয়। ক্ষণিকের মধ্যে ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রের সমগ্র শক্তি স্ট্যান্ডার্ড মডেলের মৌলিক কণিকা—কোয়ার্ক, গ্লুয়ন, ইলেকট্রন, নিউট্রিনো এবং তাদের প্রতি-পদার্থে (Antimatter)—রূপান্তরিত হয়। এই প্রক্রিয়াকে পদার্থবিজ্ঞানে বলা হয় **রিহিটিং (Reheating)**।

মহাবিশ্বের তাপমাত্রা পুনরায় এক অভাবনীয় উচ্চতায় ($T_{\rm rh} \sim 10^{27}$ K) লাফিয়ে ওঠে। এখান থেকেই শুরু হয় আমাদের পরিচিত সেই "উত্তপ্ত বিগ ব্যাং" (Hot Big Bang) এবং কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমার আদিম ফুটন্ত সমুদ্র।



আদিম রিহিটিং এবং আপেক্ষিক কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা ($t \sim 10^{-32}$ s)। স্ফীতির সমাপ্তিলগ্নে ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রের তীব্র কম্পন প্যারামেট্রিক রেজোন্যান্সের মাধ্যমে ভেঙে গিয়ে স্ট্যান্ডার্ড মডেলের কণিকাসমূহে রূপান্তরিত হয়। মহাবিশ্ব পুনর্বার উত্তপ্ত হয়ে ওঠে ($T_{\rm rh} \sim 10^{27}$ K), যা মুক্ত কোয়ার্ক, গ্লুয়ন ও লেপ্টন কণিকার ফুটন্ত সমুদ্র—উত্তপ্ত বিগ ব্যাং-এর সূচনা করে।

কালানুক্রম: মহাজাগতিক উৎপত্তির প্রথম ভগ্নাংশ সেকেন্ড

যুগ ও কালপরিক্রমা	সময়সীমা (t)	তাপমাত্রা (T)	মূল ভৌত রূপান্তর ও ঘটনাবলী
প্ল্যাঙ্ক কাল (Planck Epoch)	0 থেকে 10^{-43} s	> 10^{32} K	কোয়ান্টাম গ্র্যাভিটি রাজত্ব; স্থান-কাল কোয়ান্টাম ফোম সদৃশ; চারটি মৌলিক বল একক সুপারফোর্স হিসেবে সংবদ্ধ।
গ্র্যান্ড ইউনিফিকেশন (GUT Epoch)	10^{-43} থেকে 10^{-36} s	10^{32} থেকে 10^{27} K	সুপারফোর্স ভেঙে মহাকর্ষের পৃথকীকরণ; সবল, দুর্বল ও তড়িৎচুম্বকীয় বল ইলেকট্রোনিউক্লিয়ার বল হিসেবে অখণ্ড।
মহাজাগতিক স্ফীতি (Inflationary Epoch)	10^{-36} থেকে 10^{-32} s	তাপমাত্রা চরম হ্রাস পায়	ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রের ঋণাত্মক চাপে স্থান-কালের সূচকীয় সম্প্রসারণ (10^{26} গুণ); সমতলতা ও দিগন্ত সমস্যার সমাধান।
পুনঃউত্তপ্তকরণ (Reheating)	10^{-32} থেকে 10^{-12} s	10^{27} থেকে 10^{15} K	ইনফ্ল্যাটন ক্ষেত্রের ক্ষয়; কোয়ার্ক, লেপ্টন ও গেজ বোসনের জন্ম; উত্তপ্ত বিগ ব্যাং প্লাজমার সূচনা।
ইলেকট্রোউইক রূপান্তর (Electroweak Epoch)	10^{-12} s (১ পিকোসেকেন্ড)	$\sim 10^{15}$ K	হিগস মেকানিজমের সক্রিয়করণ; দুর্বল বল ও তড়িৎচুম্বকীয় বলের চূড়ান্ত পৃথকীকরণ; মৌলিক কণিকাসমূহের ভর লাভ।

দার্শনিক উপসংহার: শূন্য থেকে মহাবিশ্ব?

আমরা যখন রাতের আকাশের পানে তাকাই, তখন আমরা কেবল দূর নক্ষত্রের আলো দেখি না; আমরা তাকিয়ে থাকি সেই আদিম কোয়ান্টাম বীজের দিকে, যা আজ থেকে ১৩.৮ বিলিয়ন বছর পূর্বে স্থান-কালের শূন্যতায় অঙ্কুরিত হয়েছিল। কোয়ান্টাম ক্ষেত্রতত্ত্ব আমাদের শিক্ষা দেয় যে “পরম শূন্য” বা নাথিংনেস (Absolute Nothingness) বলে কোনো স্থির অবস্থার বাস্তব অস্তিত্ব নেই। কোয়ান্টাম অস্থিরতা নিজেই শূন্যতার বুক থেকে সৃষ্টির আগুন জ্বালিয়ে দেওয়ার জন্য যথেষ্ট ছিল।

মহাকালের প্রথম পিকোসেকেণ্ডের এই অতি-পারমাণবিক নৃত্যই নির্ধারণ করে দিয়েছিল ভবিষ্যতের প্রতিটি গ্যালাক্সির সীমানা, প্রতিটি নক্ষত্রের পারমাণবিক চুল্লি, এবং কোটি কোটি বছর পর পৃথিবীর সমুদ্রতটে জন্ম নিতে যাওয়া জীবনের রাসায়নিক ব্যাকরণ। আমরা সেই একই আদিম মহাজাগতিক আগুনের উত্তরসূরি—যে আগুন ১৩.৮ বিলিয়ন বছর আগে জ্বলে উঠেছিল সময়ের সূচনালগ্নে।

প্রাতিষ্ঠানিক তথ্যসূত্র ও মৌলিক গ্রন্থপঞ্জি

1. Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23(2), 347–356. doi:10.1103/PhysRevD.23.347

Shakil Mahmud • Research Monograph

2. Linde, A. (1982). A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 108(6), 389–393. doi:10.1016/0370-2693(82)91219-9
3. Mukhanov, V. F., & Chibisov, G. V. (1981). Quantum fluctuations and a nonsingular universe. *JETP Letters*, 33(10), 532–535.
4. Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. doi:10.1051/0004-6361/201833910
5. Weinberg, S. (2008). *Cosmology*. Oxford University Press. ISBN:978-0198526827.

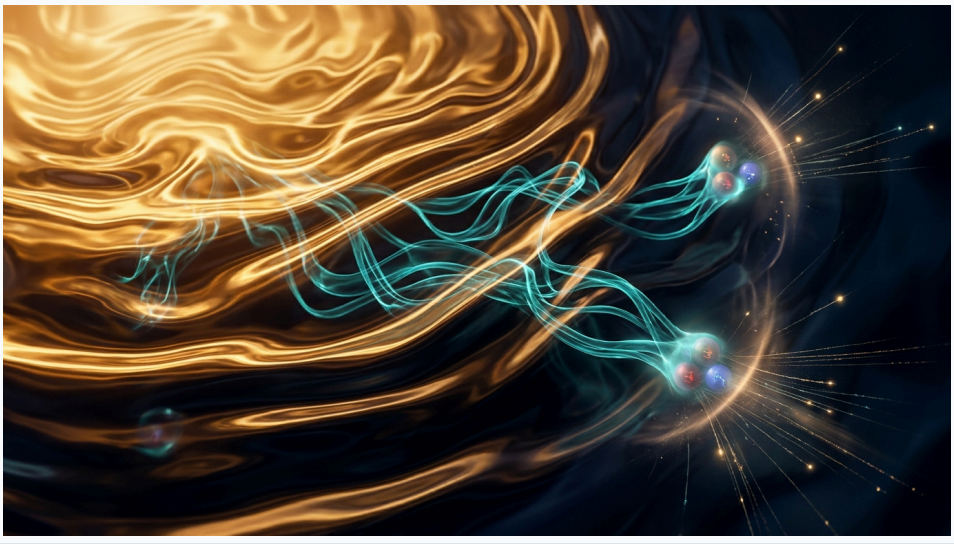
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "সময়ের শুরুর আগের মুহূর্ত — সিঙ্গুলারিটি, মহাজাগতিক স্ফীতি এবং আদিম পিকোসেকেন্ড"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-1-the-beginning-before-time-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • দ্বিতীয় খণ্ড

পদার্থের অগ্নিপরীক্ষা — কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা, ব্যারোজেনেসিস এবং আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস

পদার্থের অগ্নিপরীক্ষা — কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা, ব্যারোজেনেসিস এবং আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস

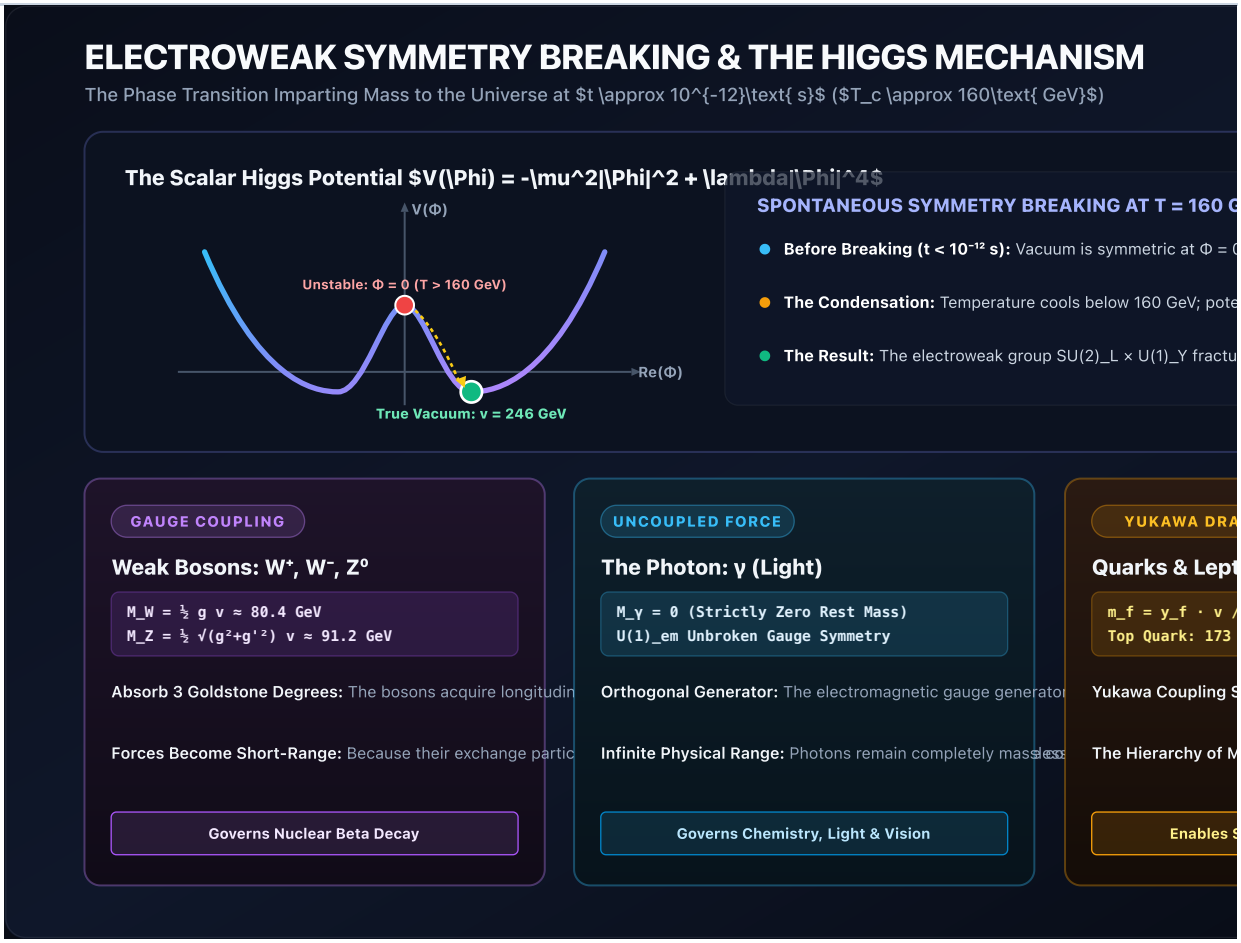
2,818 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ২: *চিত্র: আদিম মহাবিশ্বের ট্রিলিয়ন ডিগ্রি তাপমাত্রায় কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমার নিখুঁত তরল প্রবাহ; এর পরপরই কালার কনফাইনমেন্টের মাধ্যমে হ্যাড্রন সৃষ্টি এবং হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের আদিম নিউক্লিয়ার ফিউশন সম্পন্ন হয়।*

অস্তিত্বের শুরুর প্রথম কুড়ি মিনিটে সমগ্র মহাবিশ্ব একটি অখণ্ড, মহাজাগতিক থার্মোনিউক্লিয়ার চুল্লি (thermonuclear reactor) হিসেবে কাজ করেছিল। এই অতি-উত্তপ্ত অগ্নিকুণ্ডে, পদার্থের মৌলিক গাঠনিক উপাদানগুলো এক প্রায়-ঘর্ষণহীন মুক্ত কোয়ার্কের তরল থেকে আত্মপ্রকাশ করে, প্রতিপদার্থের সাথে মহাপ্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষে অলৌকিকভাবে টিকে থাকে, এবং ফিউশনের মাধ্যমে ঠিক সেই আদিম রাসায়নিক অনুপাতে রূপান্তরিত হয়—৭৫% হাইড্রোজেন এবং ২৫% হিলিয়াম—যা আজও রাতের আকাশে জ্বলতে থাকা প্রতিটি নক্ষত্রের মূল জ্বালানি।

Shakil Mahmud • Research Monograph



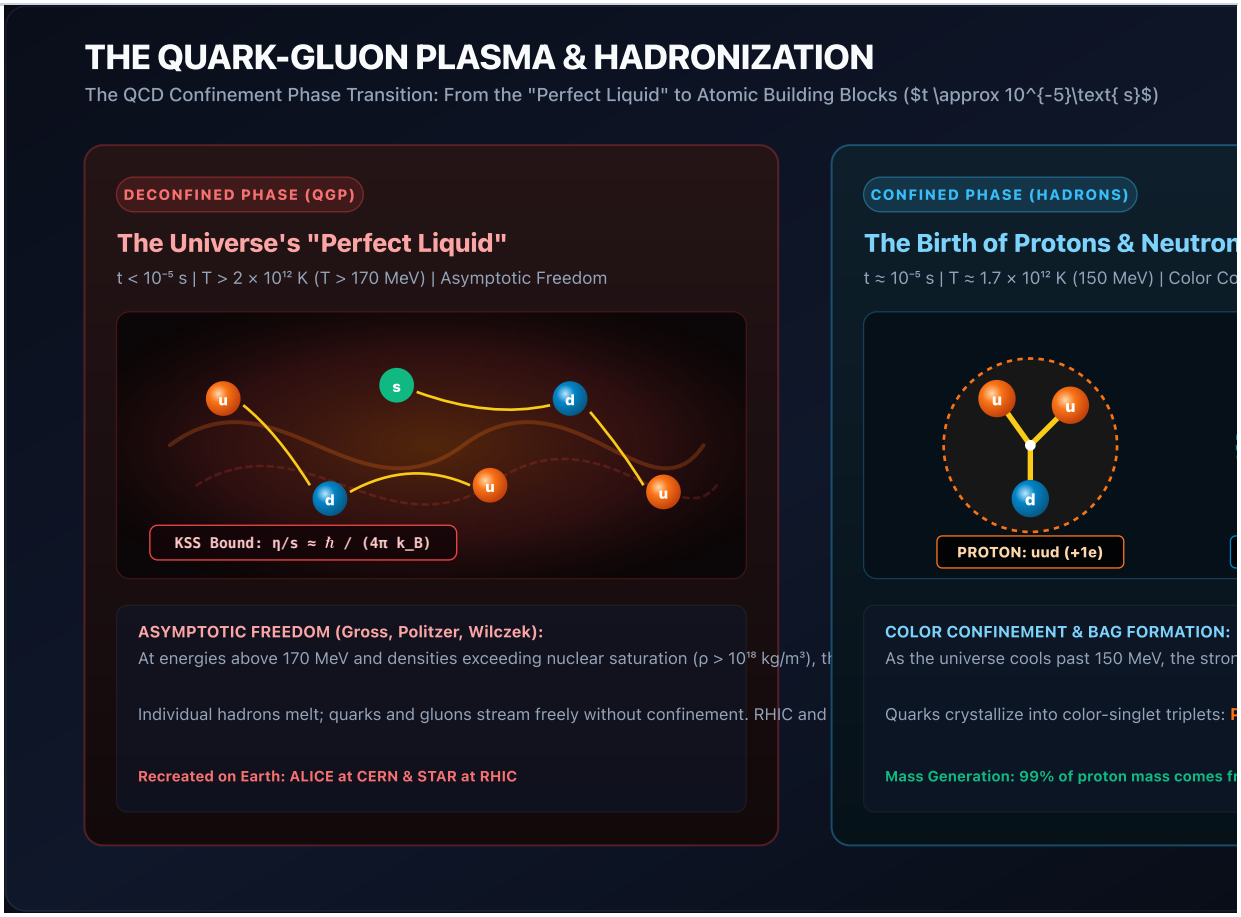
চিত্র ২.১: তড়িদ্দুর্বল প্রতিসাম্য ভাঙন ও ভরের উদ্ভব। স্কেলার হিগস ক্ষেত্র অস্থির কেন্দ্রবিন্দু থেকে গড়িয়ে তার শূন্যস্থান প্রত্যাশিত মানে ($v = 246\ \text{GeV}$) স্থিতিশীল হয়; এর ফলে W এবং Z গেজ বোসন বিপুল জড় স্থিতিভর লাভ করে, অথচ ফোটন সম্পূর্ণ ভরহীন থেকে যায়।

তড়িদ্দুর্বল যুগ (10^{-12} সেকেন্ড): কণা কীভাবে ভর লাভ করল

মহাজাগতিক স্ফীতি (Cosmic Inflation) শেষ হওয়ার পর এবং পুনঃউত্তাপন (Reheating)-এর প্রচণ্ড বিস্ফোরণের পর মহাবিশ্ব **তড়িদ্দুর্বল যুগে (Electroweak Epoch)** প্রবেশ করে। তখন সমগ্র মহাবিশ্ব লেপটন, কোয়ার্ক এবং গেজ বোসনের এক তীব্র আপেক্ষিকীয় স্যুপে নিমজ্জিত ছিল, যার তাপমাত্রা ছাড়িয়ে গিয়েছিল 10^{15} কেলভিন ($E \sim 100\ \text{GeV}$)। এই অবিশ্বাস্য শক্তিমাত্রায় তড়িচ্চুম্বকীয় বল এবং দুর্বল নিউক্লীয় বলের মাঝে কোনো পার্থক্য ছিল না; তারা একটি সমন্বিত $SU(2)_L \times U(1)_Y$ তড়িদ্দুর্বল গেজ প্রতিসাম্যের অধীনস্থ ছিল।

তখনকার প্রতিটি মৌলিক কণা ছিল সম্পূর্ণ ভরহীন এবং তারা স্থান জুড়ে আলোর গতিবেগে ছুটে চলত। কিন্তু বিগ ব্যাংয়ের প্রায় 10^{-12} সেকেন্ড পর মহাবিশ্বের তাপমাত্রা সংকটকালীন তড়িদ্দুর্বল সীমার ($T_c \approx 160\ \text{GeV}$) নিচে নেমে আসে। স্কেলার হিগস ক্ষেত্র (scalar Higgs field) তখন **তড়িদ্দুর্বল প্রতিসাম্য ভাঙন (Electroweak Symmetry Breaking)** ঘটায় এবং শূন্যস্থান প্রত্যাশিত মানে ($v \approx 246\ \text{GeV}$) স্থিতিশীল হয়:

- **দুর্বল গেজ বোসনসমূহ (W^+, W^-, এবং Z^0):** হিগস ক্ষেত্রের সাথে প্রচণ্ড শক্তিতে আবদ্ধ হয়ে বিপুল পরিমাণ জড় স্থিতিভর লাভ করে ($\approx 80.4\ \text{GeV}$ এবং $91.2\ \text{GeV}$)। যেহেতু এদের বাহক কণাগুলো ভারী হয়ে গেল, দুর্বল নিউক্লীয় বল তাৎক্ষণিকভাবে একটি স্বল্প-পাল্লার বলে রূপ নিল, যা কেবল পরমাণুর অতি-ক্ষুদ্র দূরত্বের (10^{-18} মিটার) ভেতরেই কাজ করতে পারে।
- **ফোটন (γ):** হিগস ক্ষেত্রের সাথে সম্পূর্ণ অবিচ্ছিন্ন থেকে যায় এবং এর স্থিতিভর শূন্যই রয়ে যায়। এর ফলে তড়িচ্চুম্বকত্ব একটি অসীম পাল্লার বলে রূপান্তরিত হয়, যা অক্ষত $U(1)_{em}$ প্রতিসাম্য দ্বারা পরিচালিত।
- **ফার্মিয়নসমূহ (কোয়ার্ক ও চার্জযুক্ত লেপটন):** হিগস ঘনীভবনের সাথে ইউকাওয়া কাপলিংয়ের (Yukawa coupling) মাধ্যমে পৃথক পৃথক ভর লাভ করে। টপ কোয়ার্ক সবচেয়ে তীব্রভাবে আবদ্ধ হয়ে সবচেয়ে ভারী কণিকায় ($173\ \text{GeV}$) পরিণত হয়, অন্যদিকে ইলেকট্রন খুব দুর্বলভাবে আবদ্ধ হয়ে স্বল্প ভর ($0.511\ \text{MeV}$) লাভ করে।



চিত্র ২.২: মুক্ত "নিখুঁত তরল" থেকে পারমাণবিক হ্যাড্রোনাইজেশন। 10^{-5} সেকেন্ডের আগে কোয়ার্ক ও গ্লুয়ন মুক্তভাবে এক অতি-ঘন, শূন্যের কাছাকাছি সান্দ্রতার কোয়ান্টাম তরল হিসেবে প্রবাহিত হতো; তাপমাত্রা ১৫০ মেগা-ইলেকট্রনভোল্টের নিচে নামতেই কালার কনফাইনমেন্টের মাধ্যমে কোয়ার্ক চিরতরে প্রোটন (uud) ও নিউট্রনে (udd) আবদ্ধ হয়।

কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা: মহাবিশ্বের "নিখুঁত তরল"

10^{-12} থেকে 10^{-5} সেকেন্ড-এর মধ্যবর্তী সময়ে মহাবিশ্ব পদার্থের এমন এক চরম অবস্থায় অবস্থান করছিল, যা পৃথিবীতে কেবল ব্রুকহ্যাভেনের আরএইচআইসি (RHIC) এবং সার্নের এলএইচসি (LHC)-র সংঘর্ষ প্রকোষ্ঠে এক সেকেন্ডের কোটি ভাগের এক ভগ্নাংশের জন্য তৈরি করা সম্ভব হয়েছে: **কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা (Quark-Gluon Plasma বা QGP)**।

সাধারণ পৃথিবীতে শক্তিশালী নিউক্লীয় বল পরিচালিত হয় *কোয়ান্টাম ক্রোমোডাইনামিক্স (QCD) কালার কনফাইনমেন্ট* দ্বারা: কোয়ার্ক কখনো মুক্ত অবস্থায় থাকতে পারে না। আপনি যদি দুটি কোয়ার্ককে পরস্পরের থেকে টেনে আলাদা করার চেষ্টা করেন, তাদের মধ্যবর্তী গ্লুয়ন ফ্লাক্স টিউবে সঞ্চিত শক্তি রৈখিকভাবে বাড়তে থাকে, যতক্ষণ না শূন্যস্থান থেকে নতুন একটি কোয়ার্ক-অ্যান্টিকোয়ার্ক জোড়া তৈরি করা শক্তির দিক থেকে সুবিধাজনক হয় ($E = mc^2$)।

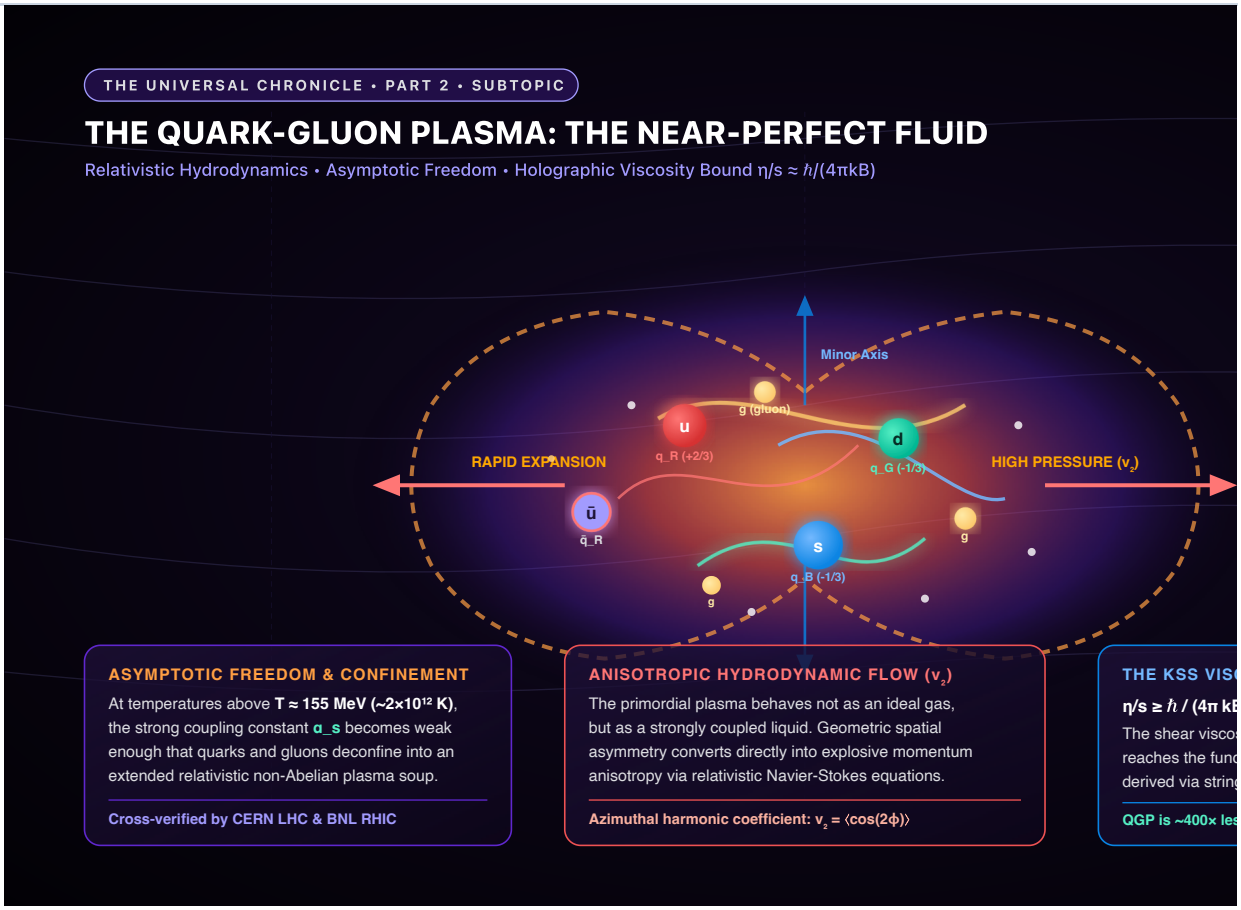
অ্যাসিম্পটোটিক ফ্রিডম বা অনন্তস্পর্শী মুক্তি (গ্রস, পলিৎজার ও উইলচেক, ১৯৭৩)
১৯৭৩ সালে ডেভিড গ্রস, ফ্র্যাঙ্ক উইলচেক এবং ডেভিড পলিৎজার প্রমাণ করেন যে অতি-উচ্চ শক্তিমাত্রা এবং ক্ষুদ্রতম দূরত্বে শক্তিশালী বলের ধ্রুবক α_s লগারিদমিক হারে হ্রাস পায়। আদিম মহাবিশ্বে, যখন ঘনত্ব পারমাণবিক ঘনত্বের চেয়েও বেড়ে গিয়েছিল ($\rho > 10^{18}\text{ kg/m}^3$) এবং তাপমাত্রা 2×10^{12} কেলভিন ($T > 170\text{ MeV}$) ছাড়িয়েছিল, তখন হ্যাড্রনগুলো গলে গিয়ে কোয়ার্ক, অ্যান্টিকোয়ার্ক ও গ্লুয়ন সম্পূর্ণ মুক্ত হয়ে প্লাজমা হিসেবে ভাসতে শুরু করেছিল।

সবচেয়ে বিস্ময়কর বিষয় হলো, সার্ন ও ব্রুকহ্যাভেনের গবেষণায় প্রমাণিত হয়েছে যে এই কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা কোনো গ্যাসীয় কণার মতো আচরণ করেনি। এটি ছিল প্রকৃতিতে পরিমাপ করা সবচেয়ে নিখুঁত কোয়ান্টাম তরল, যার **সান্দ্রতা ও এন্ট্রপি ঘনত্বের অনুপাত (η/s) ইতিহাসে সর্বনিম্ন**—যা কোভতুন-সন-স্টারিনেটস (KSS) মৌলিক কোয়ান্টাম সীমার কাছাকাছি:

$$\frac{\eta}{s} \approx \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

আদিম মহাবিশ্ব কোনো অগোছালো গ্যাসের মেঘ ছিল না; এটি ছিল এক অতি-ঘন, ঘর্ষণহীন *নিখুঁত তরল (perfect liquid)*, যা কোয়ান্টাম ঘূর্ণিতে আন্দোলিত হচ্ছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমায় আপেক্ষিক হাইড্রোডাইনামিক প্রবাহ ও অ্যাসিম্পটোটিক ফ্রিডম ($10^{-12}\ \mathrm{s} \leq t \leq 10^{-5}\ \mathrm{s}$)। মুক্ত কোয়ার্ক ও গ্লুয়নের অতি-আপেক্ষিক প্লাজমায় ($T \sim 2 \times 10^{12}\ \mathrm{K}$) সান্দ্রতা ও এন্ট্রপি ঘনত্বের অনুপাত কোয়ান্টাম সর্বনিম্ন হলোগ্রাফিক সীমায় পৌঁছায়: $\eta/s \approx \hbar/(4\pi k_B)$। প্রাথমিক জ্যামিতিক অসামঞ্জস্য অ্যানিসোট্রপিক উপবৃত্তাকার প্রবাহের (v_2) মাধ্যমে সরাসরি গতিবেগের অসামঞ্জস্যে রূপান্তরিত হয়।



চিত্র ২.৩: ব্যারোজেনেসিসের রহস্য এবং সাখারভ প্রক্রিয়া। সাখারভের তিনটি শর্ত কীভাবে প্রতি ১০০ কোটি প্রতিপদার্থের বিপরীতে ১টি অতিরিক্ত পদার্থের সৃষ্টি করেছিল: এক বিলিয়ন জোড়া কোয়ার্ক-অ্যান্টিকোয়ার্ক পারস্পরিক ধ্বংসযজ্ঞে মহাজাগতিক আলোর সাগরে বিলীন হয়, আর বেঁচে যাওয়া সেই নিঃসঙ্গ উদ্বৃত্ত কণাগুলো দিয়েই আজ মহাবিশ্বের সব নক্ষত্র, গ্যালাক্সি ও প্রাণের শরীর গঠিত।

ব্যারোজেনেসিসের রহস্য: কেন মহাবিশ্বে পদার্থের অস্তিত্ব আছে?

আধুনিক পদার্থবিজ্ঞানের গভীরতম অমীমাংসিত রহস্যগুলোর একটি হলো: আমাদের মহাবিশ্ব কেন প্রায় সম্পূর্ণভাবে কেবল পদার্থ দিয়ে গঠিত, যেখানে পদার্থ ও প্রতিপদার্থের পরিমাণ সমান হওয়ার কথা ছিল? কোয়ান্টাম ইলেকট্রোডাইনামিক্স (QED) এবং স্ট্যান্ডার্ড মডেলের সমীকরণগুলো প্রায় নিখুঁতভাবে প্রতিসম: যখনই বিশুদ্ধ শক্তি যুগল সৃষ্টির মাধ্যমে পদার্থে রূপান্তরিত হয় ($\gamma + \gamma \to q + \bar{q}$), তখন সমান সংখ্যক কণা এবং প্রতিকণা তৈরি হয়।

আদিম মহাবিশ্বে যদি এই প্রতিসাম্য সম্পূর্ণ অক্ষুণ্ণ থাকত, তবে তাপমাত্রা কমার সাথে সাথে প্রতিটি কোয়ার্ক একটি অ্যান্টিকোয়ার্কের মুখোমুখি হতো এবং সম্পূর্ণ ধ্বংস হয়ে গামা-রশ্মি ফোটনে পরিণত হতো:

$$q + \bar{q} \to \gamma + \gamma$$

ফলস্বরূপ, মহাবিশ্ব পরিণত হতো সম্পূর্ণ প্রাণহীন, শীতল বিকিরণের এক শূন্য প্রান্তরে—যেখানে কোনো প্রোটন, নিউট্রন, পরমাণু, নক্ষত্র বা মানুষের কোনো অস্তিত্ব থাকত না। কিন্তু বাস্তবে আমরা পর্যবেক্ষণযোগ্য মহাবিশ্বে প্রায় 10^{80} প্রোটন ও নিউট্রন দেখতে পাই, অথচ কোথাও আদিম প্রতিপদার্থের কোনো ম্যাক্রোস্কোপিক সন্ধান মেলে না।

আন্দ্রেই সাখারভের তিনটি শর্ত (১৯৬৭)

১৯৬৭ সালে সোভিয়েত পারমাণবিক পদার্থবিদ **আন্দ্রেই সাখারভ** একটি প্রতিসম অবস্থা থেকে নেট ব্যারিয়ন অসমতা সৃষ্টির জন্য তিনটি অপরিহার্য গাণিতিক শর্ত চিহ্নিত করেছিলেন:

- **১. ব্যারিয়ন সংখ্যা (B) লঙ্ঘন:** এমন ভৌত প্রক্রিয়া থাকতে হবে যা মোট ব্যারিয়ন সংখ্যা সংরক্ষণ করে না। স্ট্যান্ডার্ড মডেলে তড়িদ্দুর্বল *স্ফ্যালেরন (sphaleron)* রূপান্তর B লঙ্ঘন করতে পারে। গ্র্যান্ড ইউনিফায়েড তত্ত্বে অতি-ভারী বোসনের ক্ষয়ে সরাসরি অসম সংখ্যক কোয়ার্ক ও লেপটন উৎপন্ন হয়।
- **২. C এবং CP প্রতিসাম্য লঙ্ঘন:** চার্জ কনজুগেশন (C) এবং প্যারিটি মিলিয়ে CP প্রতিসাম্য অবশ্যই লঙ্ঘিত হতে হবে। যদি CP নিখুঁত থাকত, তবে পদার্থ সৃষ্টির বিক্রিয়ার হার ($\Gamma(X \to q + q)$) প্রতিপদার্থ সৃষ্টির হারের ($\Gamma(\bar{X} \to \bar{q} + \bar{q})$) হুবহু সমান হতো, ফলে কোনো উদ্বৃত্ত থাকত না।
- **৩. তাপীয় ভারসাম্যহীনতা (Departure from Thermal Equilibrium):** নিখুঁত তাপীয় ভারসাম্যে CPT উপপাদ্য গ্যারান্টি দেয় যে পদার্থ ও প্রতিপদার্থের ঘনত্ব সর্বদা সমান থাকবে। তাই ব্যারিয়ন সৃষ্টির বিক্রিয়াগুলোকে মহাবিশ্বের সম্প্রসারণকালীন দ্রুত ভারসাম্যহীন পরিবর্তনের মধ্য দিয়ে ঘটতে হয়েছিল।

এই তিনটি শর্ত পূরণ হওয়ার ফলেই এক অতি-সূক্ষ্ম অসমতার জন্ম হয়েছিল: **প্রতি ১,০০০,০০০,০০০ অ্যান্টিকোয়ার্কের বিপরীতে ছিল ১,০০০,০০০,০০১টি কোয়ার্ক।** তাপমাত্রা কমতেই যখন মহাপ্রলয়ঙ্কর পারস্পরিক ধ্বংসযজ্ঞ ঘটল, তখন এক বিলিয়ন জোড়া কোয়ার্ক-অ্যান্টিকোয়ার্ক একে অপরকে বিলীন করে এক তীব্র আলোর সাগরে রূপ নিল। **আমাদের সমগ্র দৃশ্যমান মহাবিশ্ব—প্রতিটি গ্যালাক্সি, প্রতিটি কার্বন পরমাণু, এক ফোঁটা পানি এবং আপনার মস্তিষ্ক—সেই একশো কোটির মাঝে বেঁচে যাওয়া মাত্র ১টি নিঃসঙ্গ কণার উদ্বৃত্ত দিয়ে তৈরি!**

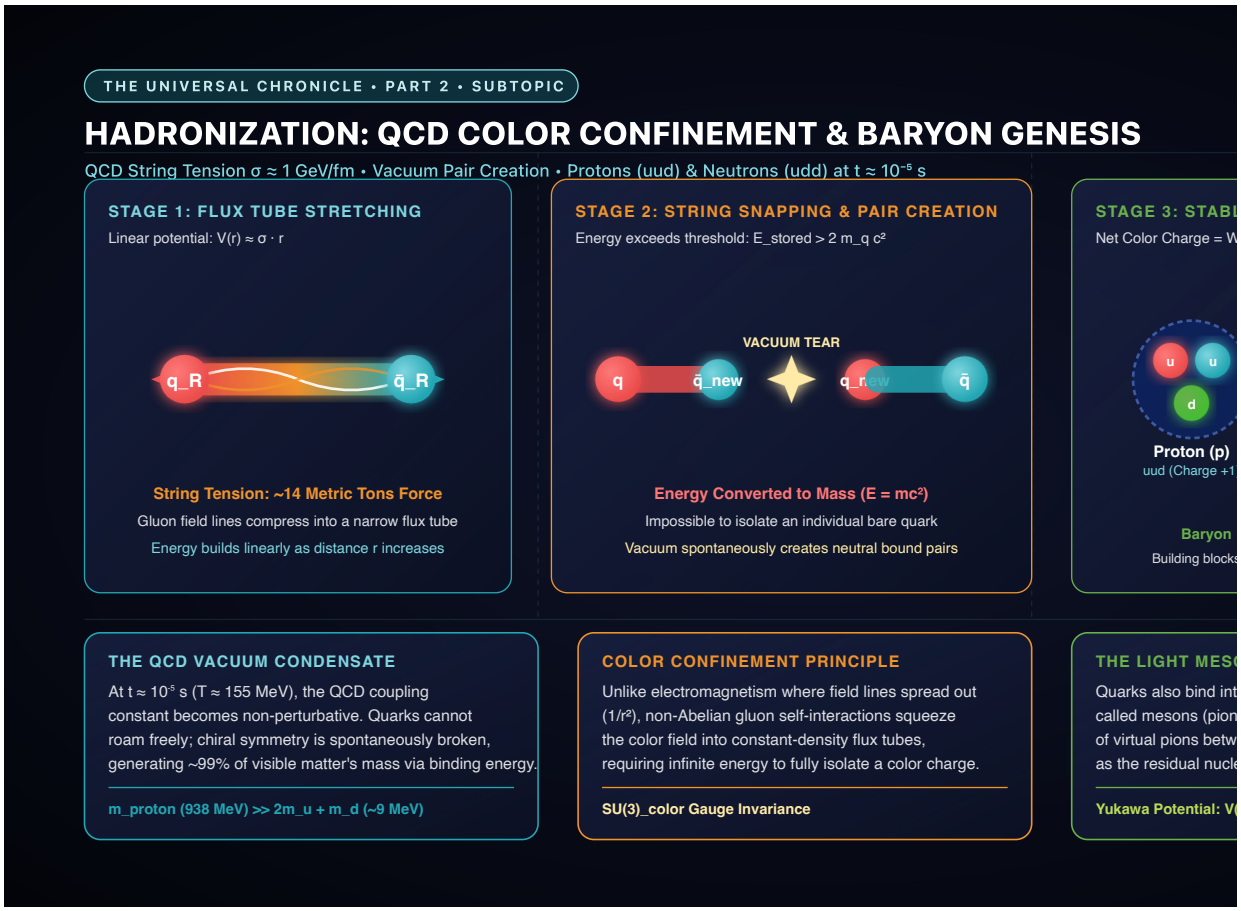
Shakil Mahmud • Research Monograph

হ্যাড্রোনাইজেশন ($t \approx 10^{-5}$ সেকেন্ড): প্রোটন ও নিউট্রনের স্ফটিকায়ন

বিগ ব্যাংয়ের ১০ মাইক্রোসেকেন্ডের মাথায় (10^{-5} s) মহাবিশ্বের তাপমাত্রা নেমে আসে 1.7×10^{12} কেলভিন (150 MeV)-এ। এই তাপমাত্রায় শক্তিশালী কাপলিং ধ্রুবক α_s এত শক্তিশালী হয়ে ওঠে যে কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা আর মুক্ত থাকতে পারে না। মহাবিশ্ব **QCD কনফাইনমেন্ট দশান্তর** বা *হ্যাড্রোনাইজেশন* প্রক্রিয়ায় প্রবেশ করে।

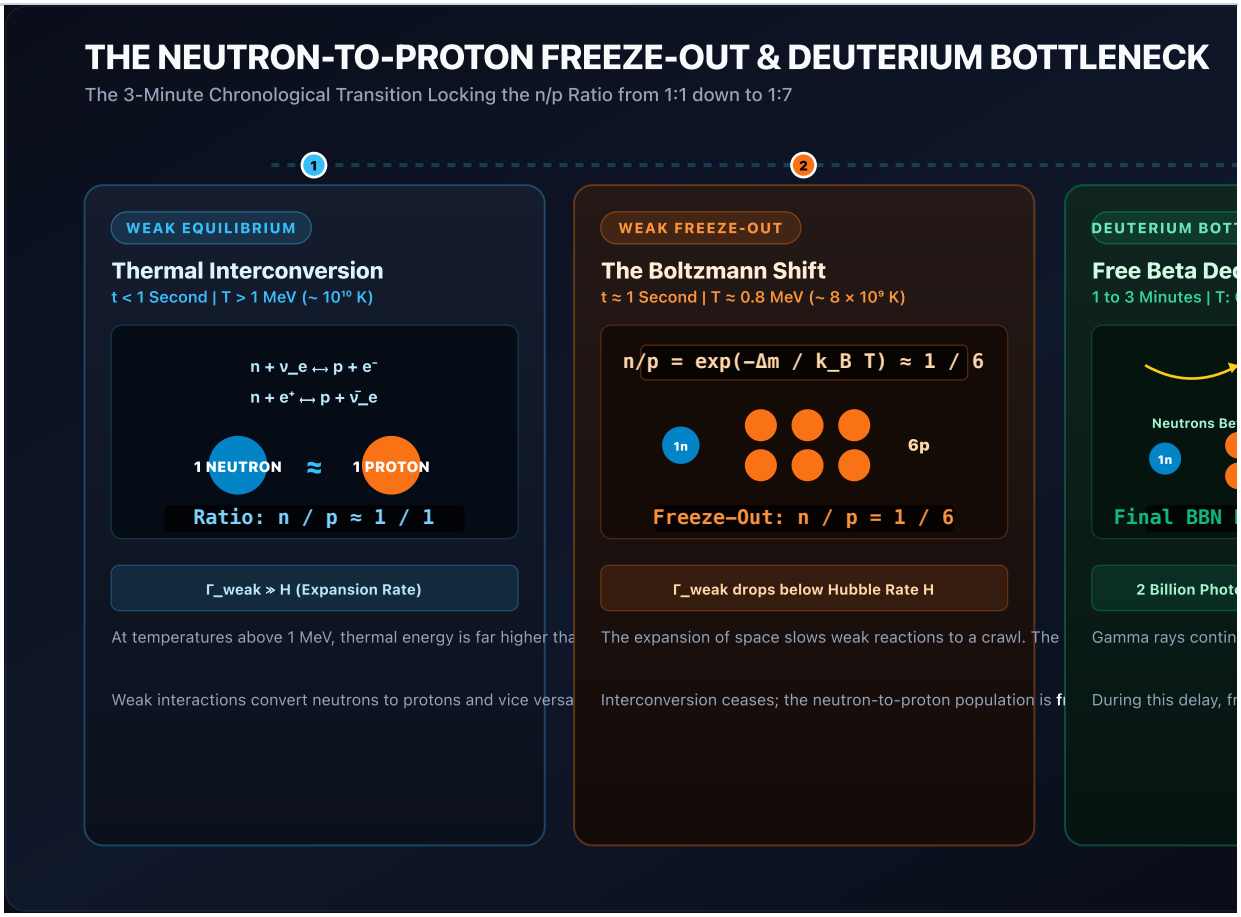
গ্লুয়ন বিনিময়ের মাধ্যমে কোয়ার্কগুলো চিরতরে আবদ্ধ হয়ে বর্ণ-নিরপেক্ষ যৌগিক কণা (হ্যাড্রন)-এ পরিণত হয়:

- **প্রোটন ($p = uud$):** দুটি আপ কোয়ার্ক ($+2/3e$) এবং একটি ডাউন কোয়ার্ক ($-1/3e$), যার মোট চার্জ $+1$। এটি চিরস্থায়ীভাবে স্থিতিশীল।
- **নিউট্রন ($n = udd$):** একটি আপ কোয়ার্ক ($+2/3e$) এবং দুটি ডাউন কোয়ার্ক ($-1/3e$), যার মোট চার্জ 0। একটি মুক্ত নিউট্রন প্রোটনের চেয়ে সামান্য ভারী ($\Delta m \approx 1.293$ MeV) এবং বিটা ক্ষয়ের মাধ্যমে ($n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$) প্রায় ৮৭৯ সেকেন্ডের (১৪.৬ মিনিট) অর্ধায়ু নিয়ে প্রোটনে রূপান্তরিত হয়।
- **মেসন (π^+, π^-, π^0):** কোয়ার্ক-অ্যান্টিকোয়ার্ক জোড়া, যা দ্রুত ক্ষয়প্রাপ্ত হয়ে ফোটন ও লেপটনে রূপ নেয়।



কিউসিডি কালার কনফাইনমেন্ট এবং হ্যাড্রোনাইজেশন ($t \approx 10^{-5}$ s)। মহাবিশ্বের তাপমাত্রা $T_c \approx 155$ MeV-এর নিচে নামতেই কোয়ার্কের মধ্যকার গ্লুয়ন ফ্লাক্স টিউব অবিচল টানে ($\sigma \approx 1$ GeV/fm) প্রসারিত হয়। সঞ্চিত শক্তি $2m_q c^2$ অতিক্রম করলে ভ্যাকুয়াম ছিঁড়ে গিয়ে নতুন $q\bar{q}$ জোড়া সৃষ্টি করে, যা কোয়ার্কগুলোকে চিরতরে কালার-সিঙ্গলেট প্রোটন (uud), নিউট্রন (udd) এবং মেসনে ($u\bar{d}$) আবদ্ধ করে ফেলে।

এরপর মহাবিশ্ব **লেপটন যুগে** ($t \approx 10^{-5}$ s থেকে 1 সেকেন্ড) প্রবেশ করে। তাপমাত্রা তখনও প্রচুর ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়া তৈরির জন্য যথেষ্ট ছিল। বিগ ব্যাংয়ের ঠিক 1 সেকেন্ড পর ($T \approx 10^{10}$ K ≈ 1 MeV), দুর্বল মিথস্ক্রিয়ার হার হাবল সম্প্রসারণ হারের চেয়ে কমে যায়। **নিউট্রিনো প্লাজমা থেকে বিচ্ছিন্ন (Decouple) হয়ে যায়**, যা স্থান জুড়ে মুক্তভাবে প্রবাহিত হয়ে তৈরি করে *মহাজাগতিক পটভূমি নিউট্রিনো (Cosmic Neutrino Background বা CνB)*—যা আজও ১.৯৫ কেলভিন তাপমাত্রায় সমগ্র মহাবিশ্ব জুড়ে নিঃশব্দে বিরাজ করছে।



চিত্র ২.৪: নিউট্রন ফ্রিজ-আউট এবং ডয়টেরিয়াম বাধা। $t \approx 1$ সেকেন্ডে নিউট্রন ও প্রোটনের অনুপাত ১:৬-এ স্থির হয়ে যায়; তীব্র ব্ল্যাকবডি গামা বিকিরণ পুরো ৩ মিনিট ধরে ডয়টেরিয়াম গঠন আটকে রাখে, যার মাঝে মুক্ত নিউট্রনের বিটা ক্ষয় ঘটে অনুপাতটি চূড়ান্তভাবে ১টি নিউট্রন বনাম ৭টি প্রোটনে (১:৭) নেমে আসে।

বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিস ($t = 10$ সেকেন্ড থেকে 20 মিনিট): আদিম পরমাণুর জন্ম

বিগ ব্যাংয়ের ১০ সেকেন্ড থেকে ২০ মিনিটের মধ্যবর্তী সময়ে মহাবিশ্বের ইতিহাসের সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ রাসায়নিক রূপান্তর সংঘটিত হয়: **বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিস (Big Bang Nucleosynthesis বা BBN)**। মহাজাগতিক ইতিহাসে প্রথম ও শেষবারের মতো সমগ্র মহাবিশ্ব এক সর্বব্যাপী পারমাণবিক ফিউশন চুল্লি হিসেবে কাজ করেছিল।

১. নিউট্রন ও প্রোটনের ফ্রিজ-আউট অনুপাত

লেপটন যুগের শুরুতে প্রোটন ও নিউট্রন দুর্বল মিথস্ক্রিয়ার মাধ্যমে একে অপরে রূপান্তরিত হচ্ছিল:

$$n + \nu_e \leftrightarrow p + e^- \quad \text{এবং} \quad n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$$

যেহেতু নিউট্রন প্রোটনের চেয়ে $1.293\ \text{MeV}$ ভারী, বোল্টজম্যান বণ্টন কম শক্তির প্রোটন অবস্থাকে অগ্রাধিকার দেয় ($n/p \propto e^{-\Delta m/k_B T}$)। তাপমাত্রা যখন $0.8\ \text{MeV}$ ($t \approx 1\ \text{s}$)-এর নিচে নামল, দুর্বল বিক্রিয়াগুলো মহাজাগতিক সম্প্রসারণের সাথে তাল মেলাতে ব্যর্থ হয়। এর ফলে নিউট্রন ও প্রোটনের অনুপাত **স্থির হয়ে যায় (Freeze-out) প্রায়** $n/p \approx 1/6$ **মানে**।

পরবর্তী কয়েক মিনিটে মুক্ত নিউট্রনগুলো বিটা ক্ষয়ের মাধ্যমে ক্ষয় হতে থাকে ($n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$)। ফিউশন যখন সক্রিয়ভাবে শুরু হলো, অনুপাতটি নেমে দাঁড়ায় প্রায় $n/p \approx 1/7$ (প্রতি ৭টি প্রোটনের বিপরীতে ১টি নিউট্রন)।

২. ডয়টেরিয়াম বাধা (The Deuterium Bottleneck)

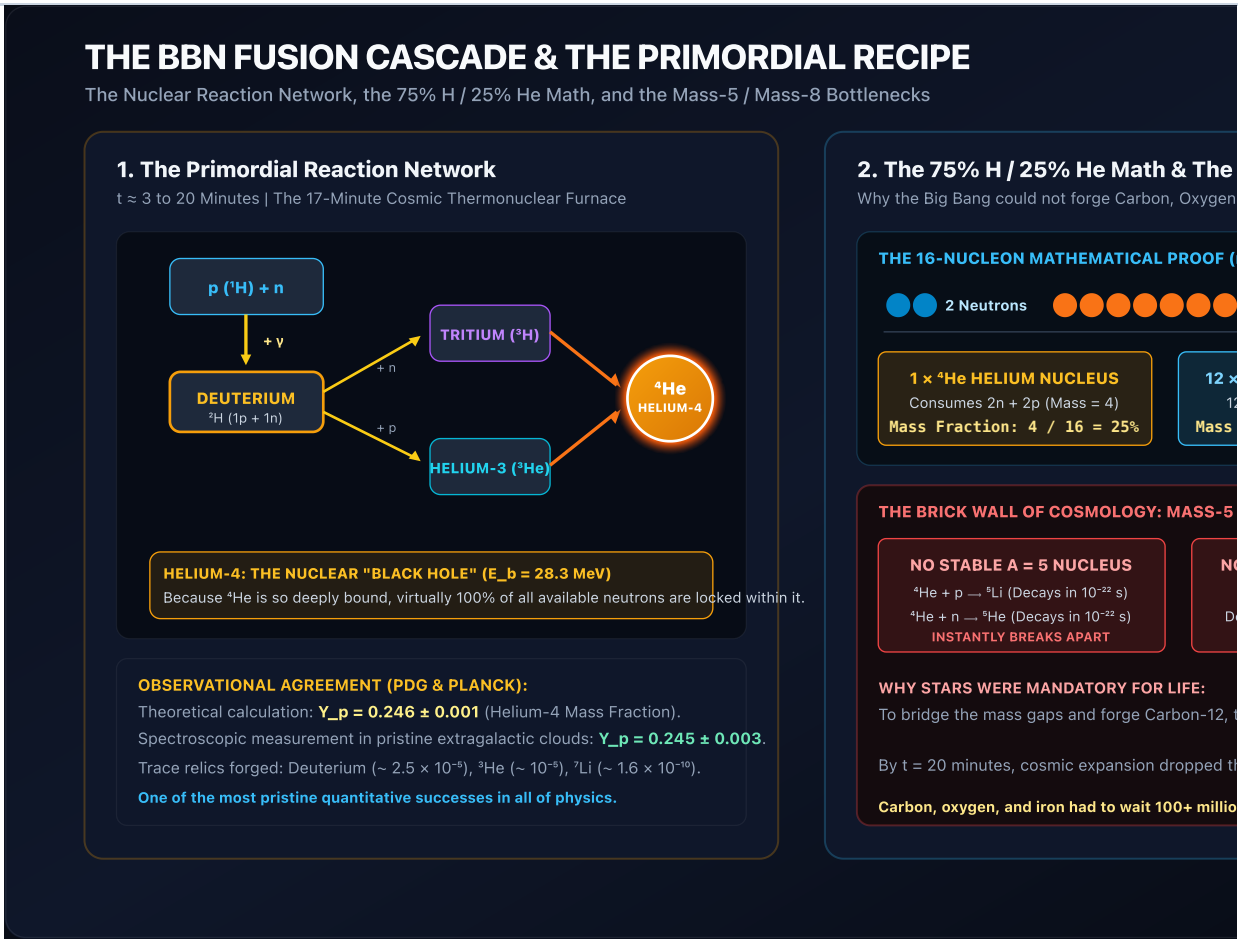
ভারী মৌল তৈরি করতে হলে প্রথমে একটি প্রোটন ও একটি নিউট্রনকে যুক্ত করে ডয়টেরিয়াম (ভারী হাইড্রোজেন) তৈরি করতে হয়:

$$p + n \to {}^2\text{H} + \gamma$$

ডয়টেরিয়ামের বন্ধন শক্তি অত্যন্ত ভঙ্গুর: মাত্র $E_b = 2.22\ \text{MeV}$। যদিও মহাবিশ্বের গড় তাপমাত্রা $2.22\ \text{MeV}$-এর নিচে ছিল, কিন্তু ফোটন ও ব্যারিয়নের অনুপাত ছিল বিশাল—**প্রতিটি ব্যারিয়নের বিপরীতে প্রায় ২০০ কোটি ফোটন** ($\eta \approx 6 \times 10^{-10}$)। ব্ল্যাকবডি বিকিরণের উচ্চ-শক্তির প্ল্যাঙ্কিয়ান প্রান্তে কোটি কোটি গামা-রশ্মি ফোটন নতুন তৈরি হওয়া ডয়টেরিয়ামকে পলকের মাঝে ভেঙে আবার প্রোটন ও নিউট্রনে আলাদা করে দিচ্ছিল।

এই বিলম্বকে বলা হয় **ডয়টেরিয়াম বাধা (Deuterium Bottleneck)**। তাপমাত্রা যতক্ষণ না 8×10^8 কেলভিন ($0.08\ \text{MeV}$, প্রায় $t \approx 3$ মিনিট)-এ নামল, ততক্ষণ ফিউশন শুরুই হতে পারেনি।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ২.৫: আদিম পারমাণবিক রেসিপি এবং ভর-৫/৮ প্রাচীর। নিউক্লিয়ার ফিউশন প্রায় সমস্ত নিউট্রনকে গ্রাস করে হিলিয়াম-৪ তৈরি করে, যার ফলে সামগ্রিক ভরের ৭৫% হাইড্রোজেন ও ২৫% হিলিয়াম নির্ধারিত হয়; অস্থিতিশীল ভর সংখ্যা $A = 5$ এবং $A = 8$-এর প্রাচীর বিগ ব্যাং ফিউশনকে চিরতরে থামিয়ে দেয়।

৩. হিলিয়াম-৪-এ ফিউশন ক্যাসকেড

ডয়টেরিয়াম টিকে থাকার মতো পরিবেশ তৈরি হতেই কয়েক সেকেন্ডের বিস্ফোরক শৃঙ্খল বিক্রিয়ায় উপলব্ধ সমস্ত নিউট্রন হিলিয়ামে রূপান্তরিত হয়:

- $^2\mathrm{H} + p \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma$ (হিলিয়াম-৩)
- $^2\mathrm{H} + n \rightarrow {}^3\mathrm{H} + \gamma$ (ট্রিটিয়াম)
- $^2\mathrm{H} + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + n$
- $^3\mathrm{H} + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + n$ (হিলিয়াম-৪)
- $^3\mathrm{He} + {}^2\mathrm{H} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + p$ (হিলিয়াম-৪)

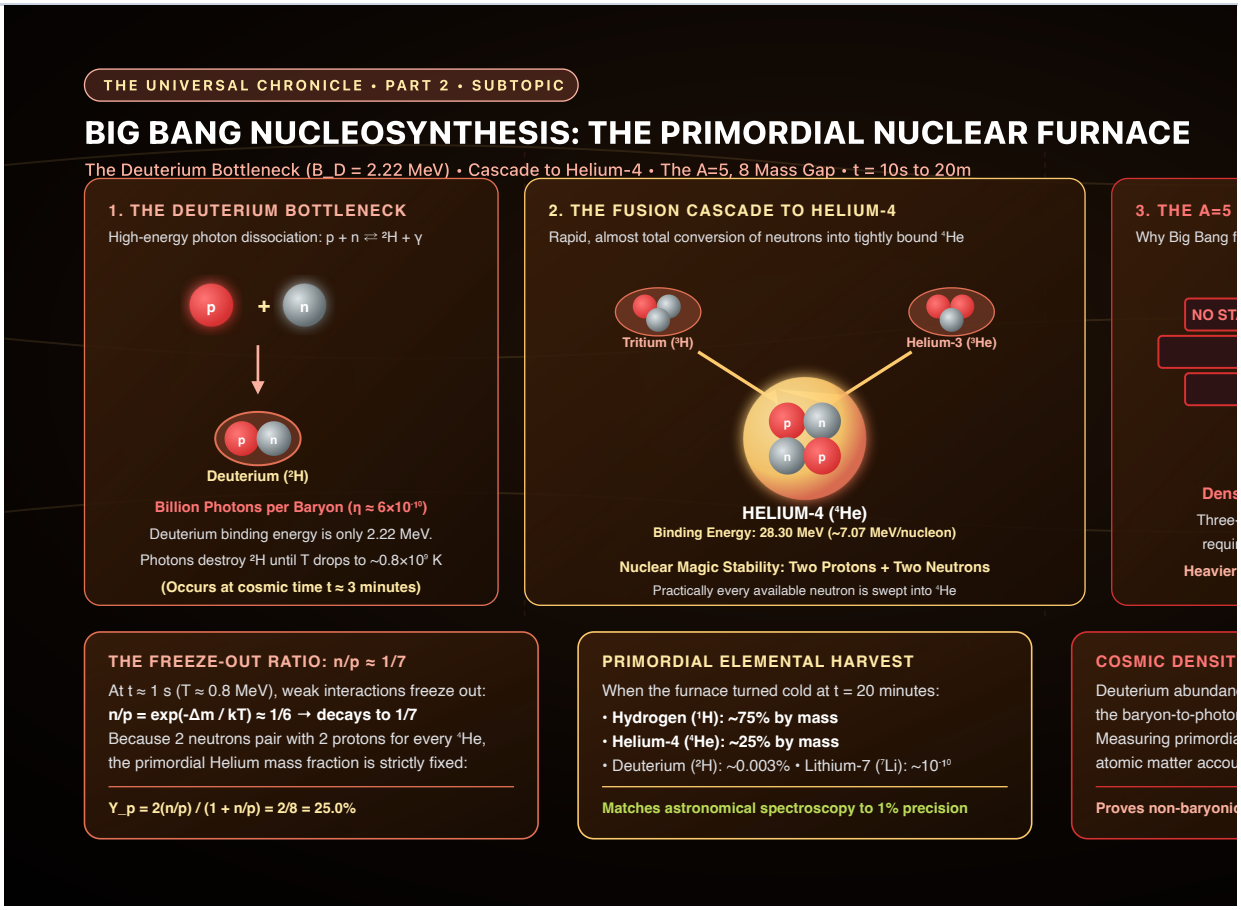
যেহেতু হিলিয়াম-৪ ($^4\mathrm{He}$) নিউক্লিয়াসের বন্ধন শক্তি অবিশ্বাস্য রকমের দৃঢ় ($28.3\ \mathrm{MeV}$, বা নিউক্লিয়ন প্রতি $7.07\ \mathrm{MeV}$), এটি একটি নিউক্লিয়ার "ব্ল্যাক হোল"-এর মতো আচরণ করে—উপলব্ধ প্রায় প্রতিটি নিউট্রন হিলিয়াম-৪ নিউক্লিয়াসে বন্দী হয়ে যায়। ১টি নিউট্রন বনাম ৭টি প্রোটনের অনুপাত থেকে অতি সহজ একটি গণনায় সমগ্র মহাবিশ্বের আদিম রাসায়নিক ভর অনুপাত স্পষ্ট হয়ে ওঠে:

আদিম হিলিয়ামের প্রাচুর্য (Y_p) গণনা
১৬টি নিউক্লিয়নের একটি দল কল্পনা করুন: ২টি নিউট্রন এবং ১৪টি প্রোটন (১:৭ অনুপাত)। ২টি নিউট্রন ২টি প্রোটনের সাথে যুক্ত হয়ে ১টি $^4\mathrm{He}$ নিউক্লিয়াস গঠন করে (যার মোট ভর = ৪)। এর ফলে অবশিষ্ট থাকে 14 – 2 = 12টি মুক্ত প্রোটন (হাইড্রোজেন নিউক্লিয়াস, ভর = ১২)।

অতএব হিলিয়াম-৪-এর ভর ভগ্নাংশ দাঁড়ায়:

$$Y_p = \frac{\text{হিলিয়ামের ভর}}{\text{মোট ভর}} = \frac{4}{4+12} = \frac{4}{16} = 25\%$$

বাকি ৭৫% ব্যারিয়নিক ভর মুক্ত প্রোটন হিসেবে থেকে যায়—যা সাধারণ **হাইড্রোজেনের** নিউক্লিয়াস।



আদিম নিউক্লিয়ার চুল্লি এবং $A = 5, 8$ ভর-বিরতি ($t = 10\ \text{s}$ থেকে $20\ \text{min}$)। $T \sim 0.8 \times 10^9\ \text{K}$ তাপমাত্রায় ডয়টেরিয়াম বাধা অতিক্রান্ত হলে নিউক্লিয়ার বিক্রিয়ার মাধ্যমে উপলব্ধ প্রায় সমস্ত নিউট্রন ($n/p \approx 1/7$) অভাবনীয় দৃঢ় হিলিয়াম-৪-এ (^4He, বন্ধন শক্তি $28.3\ \text{MeV}$) রূপান্তরিত হয়। ভর সংখ্যা $A = 5$ এবং $A = 8$-এ কোনো স্থায়ী নিউক্লিয়াস না থাকায় মহাজাগতিক ফিউশন বন্ধ হয়ে যায়, যা মহাবিশ্বের রাসায়নিক অনুপাত ৭৫% হাইড্রোজেন ও ২৫% হিলিয়ামে স্থির করে দেয়।

৪. কেন বিগ ব্যাং কার্বন বা লোহা তৈরি করতে পারল না?

কেন নিউক্লিওসিন্থেসিস হিলিয়ামেই থেমে গেল? কেন বিশাল নক্ষত্রের মতো মহাবিশ্ব কার্বন, নাইট্রোজেন, অক্সিজেন বা লোহা পর্যন্ত ফিউশন চালিয়ে যেতে পারল না?

প্রকৃতিতে দুটি অলঙ্ঘনীয় পারমাণবিক প্রাচীর রয়েছে: **ভর সংখ্যা $A = 5$ বা $A = 8$-এর কোনো স্থিতিশীল আইসোটোপ নেই**। হিলিয়াম-৪ যদি একটি প্রোটন বা নিউট্রন শোষণ করে, তবে তা তৈরি করে ^5Li বা ^5He, যা এক সেকেন্ডের ট্রিলিয়ন ভাগের এক ভাগে ($10^{-21}\ \text{s}$) চূর্ণবিচূর্ণ হয়ে যায়। আবার দুটি হিলিয়াম-৪ যুক্ত হলে তৈরি হয় বেরিলিয়াম-৮ (^8Be), যার অর্ধায়ু মাত্র 10^{-16} সেকেন্ড এবং তা সাথে সাথে ভেঙে আবার দুটি আলফা কণায় রূপ নেয়।

দানবাকৃতির নক্ষত্রের কেন্দ্রে ট্রিপল-আলফা প্রক্রিয়ার ($^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \to {}^{12}\text{C}$) মাধ্যমে এই বাধা অতিক্রম করা সম্ভব হয়, যার জন্য প্রয়োজন বছরের পর বছর ধরে অপরিসীম ঘনত্ব ও মাধ্যাকর্ষণ। কিন্তু আদিম মহাবিশ্বে সম্প্রসারণের বেগ ছিল এত তীব্র যে বিগ ব্যাংয়ের মাত্র ২০ মিনিটের মাথায় তাপমাত্রা ও ঘনত্ব ফিউশন বন্ধ হওয়ার স্তরে নেমে যায়। মহাজাগতিক পারমাণবিক চুল্লির দরজা চিরতরে বন্ধ হয়ে যায়।

ভারী মৌলগুলোর মধ্যে কেবল অতি-নগণ্য ভগ্নাংশ টিকে থাকতে পেরেছিল: কিছু অবিক্রীত ডয়টেরিয়াম ($^2\text{H}/\text{H} \approx 2.5 \times 10^{-5}$), হিলিয়াম-৩ ($^3\text{He}/\text{H} \approx 10^{-5}$) এবং এক চিমটি লিথিয়াম-৭ ($^7\text{Li}/\text{H} \approx 1.6 \times 10^{-10}$)।

Shakil Mahmud • Research Monograph

কালানুক্রমিক সারণী: কোয়ার্ক স্যুপ থেকে প্রথম পারমাণবিক নিউক্লিয়াস

পর্যায় / যুগ	অতিবাহিত সময়	তাপমাত্রা (K)	শক্তিমাত্রা	প্রধান ভৌত রূপান্তর
তড়িদ্দুর্বল প্রতিসাম্য ভাঙন	10^{-12} s	10^{15} K	100 GeV	হিগস ক্ষেত্র ভ্যাকুয়াম মান লাভ করে; $W^{\pm}$, Z^0 ভর লাভ করে; তড়িচ্চুম্বকত্ব ও দুর্বল বল আলাদা হয়ে যায়।
কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা (QGP)	10^{-12} থেকে 10^{-5} s	> 2 \times 10^{12}\text{ K}	> 170\text{ MeV}	অ্যাসিম্পটোটিক ফ্রিডম; কোয়ার্ক ও গ্লুয়ন মুক্তভাবে শূন্য-সান্দ্রতার নিখুঁত তরল হিসেবে প্রবাহিত হয়।
ব্যারোজেনেসিস যুগ	10^{-11} থেকে 10^{-6} s	$\sim 10^{13}$ K	~ 1 GeV	সাখারভ শর্তাবলির অধীনে প্রতি ১০০ কোটিতে ১টি পদার্থের উদ্বৃত্ত সৃষ্টি; পারস্পরিক ধ্বংসযজ্ঞে আলোর সাগরের উৎপত্তি।
হ্যাড্রোনাইজেশন	10^{-5} s (10 \mus)	1.7×10^{12} K	150 MeV	কালার কনফাইনমেন্ট কোয়ার্ককে প্রোটন (uud) ও নিউট্রনে (udd) চিরতরে আবদ্ধ করে।
নিউট্রিনো বিচ্ছিন্নকরণ (Decoupling)	1.0 s	10^{10} K	1 MeV	দুর্বল বল ফ্রিজ-আউট হয়; n/p অনুপাত প্রায় ১:৬-এ স্থির হয়; মহাজাগতিক পটভূমি নিউট্রিনো (CνB) মুক্ত হয়।
ডয়টেরিয়াম বাধা	10 থেকে 180 s	10^9 থেকে 8×10^8 K	0.1 MeV	উচ্চ ফোটন-ব্যারিয়ন অনুপাতের কারণে ফিউশনে বিলম্ব; নিউট্রন ক্ষয় হয়ে অনুপাত ১:৭-এ পৌঁছায়।
আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস (BBN)	3 থেকে 20 min	8×10^8 থেকে 3×10^8 K	< 0.05\text{ MeV}	পারমাণবিক ফিউশন শৃঙ্খল; ৭৫% ^{1}H, ২৫% ^{4}He, সামান্য ডয়টেরিয়াম ও লিথিয়াম তৈরি হয়। মহাজাগতিক সম্প্রসারণ ফিউশন থামিয়ে দেয়।

মহাজাগতিক উত্তরাধিকার: বিগ ব্যাংয়ের স্বর্ণালি আঙুলের ছাপ

মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ (CMB) এবং মহাজাগতিক লোহিত অপসরণ (Redshift)-এর পাশাপাশি বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিস বিগ ব্যাং মডেলের সবচেয়ে মজবুত ও অভ্রান্ত তিনটি পর্যবেক্ষণমূলক স্তম্ভের একটি। ১৯৪৮ সালে রাল্ফ আলফার, হ্যান্স বেথে এবং জর্জ গ্যামো তাদের যুগান্তকারী $\alpha\beta\gamma$ *গবেষণাপত্রে* ভবিষ্যদ্বাণী করেছিলেন যে আদিম মহাবিশ্বের সিংহভাগ উপাদানই হতে হবে মহাবিশ্বের শুরুর কুড়ি মিনিটে তৈরি হওয়া হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম।

প্রাচীনতম বামন গ্যালাক্সি এবং ধাতুমুক্ত আন্তঃগ্যালাকটিক গ্যাস মেঘের আধুনিক স্পেকট্রোস্কোপিক পর্যবেক্ষণ এই হিসাবের অভ্রান্ত সত্যতা নিশ্চিত করেছে: মহাবিশ্বে আদিম হিলিয়ামের ভর অনুপাত পরিমাপ করা হয়েছে $Y_p = 0.245 \pm 0.003$, যা বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিসের গাণিতিক ভবিষ্যদ্বাণীর সাথে দশমিকের পর শতভাগ মিলে যায়! ডয়টেরিয়ামের অনুপাত মহাবিশ্বের মোট ব্যারিয়নিক পদার্থের ঘনত্বকে ($\Omega_b h^2 \approx 0.022$) নিখুঁতভাবে সীমাবদ্ধ করে, যা প্রমাণ করে যে আমাদের পরিচিত সাধারণ পারমাণবিক পদার্থ **মহাবিশ্বের মোট শক্তি ঘনত্বের মাত্র ৫%**।

মঞ্চ প্রস্তুত হয়েছিল। পারমাণবিক নিউক্লিয়াসগুলো গঠিত হয়েছিল। কিন্তু মহাবিশ্ব তখনও মুক্ত ইলেকট্রন ও প্রোটনের এক অন্ধ, অস্বচ্ছ প্লাজমা কুয়াশায় আচ্ছন্ন ছিল, যেখানে আলো এক পা-ও ভ্রমণ করতে পারত না। *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের* **তৃতীয় পর্বে** আমরা উন্মোচন করব মহাকাশের প্রথম আলো ফোটার সেই মাহেন্দ্রক্ষণ: **আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং ১০ কোটি বছরের অন্ধকার যুগ**।

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1948).** “The Origin of Chemical Elements.” *Physical Review*, 73(7), 803–804. doi:10.1103/PhysRev.73.803.
- **Sakharov, A. D. (1967).** “Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe.” *JETP Letters*, 5, 24–27.
- **Gross, D. J., & Wilczek, F. (1973).** “Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories.” *Physical Review Letters*, 30(26), 1343–1346. doi:10.1103/PhysRevLett.30.1343.
- **Kovtun, P. K., Son, D. T., & Starinets, A. O. (2005).** “Viscosity in Strongly Coupled Gauge Theories from AdS/CFT.” *Physical Review Letters*, 94(11), 111601. doi:10.1103/PhysRevLett.94.111601.
- **Fields, B. D., Olive, K. A., Yeh, T. H., & Young, C. (2020).** “Big-Bang Nucleosynthesis after Planck.” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020(03), 010. doi:10.1088/1475-7516/2020/03/010.
- **Weinberg, S. (1977).** *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Basic Books.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "পদার্থের অগ্নিপরীক্ষা — কোয়ার্ক-গ্লুয়ন প্লাজমা, ব্যারোজেনেসিস এবং আদিম নিউক্লিওসিন্থেসিস"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ২। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-2-the-crucible-of-matter-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • তৃতীয় খণ্ড

আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং অন্ধকার যুগ

আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং অন্ধকার যুগ

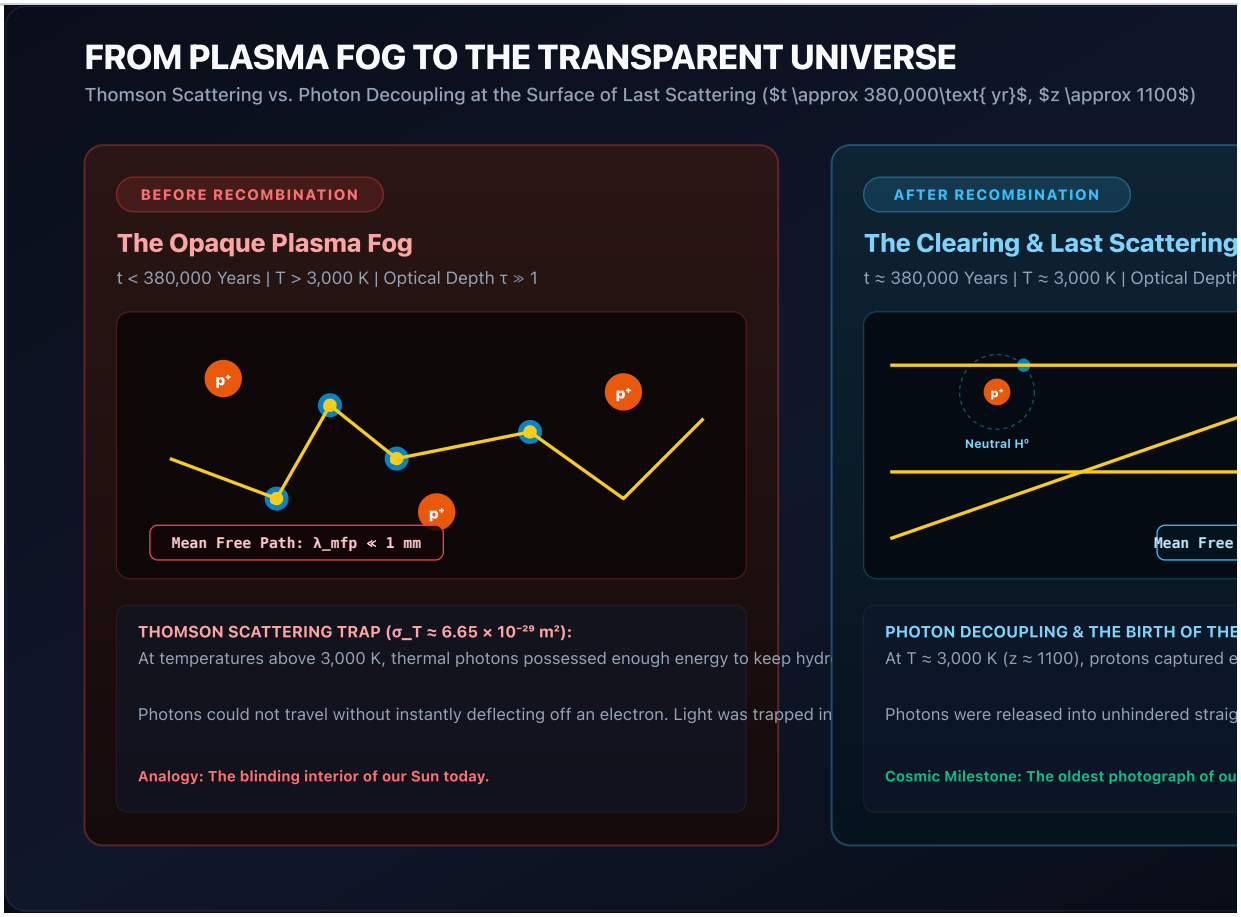
2,355 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৩: *চিত্র: বিগ ব্যাং-এর ৩৮০,০০০ বছর পর রিকম্বিনেশনের মাধ্যমে মহাবিশ্বের প্রথম স্বচ্ছ রূপ ধারণ (approx ১১০০$); ফোটন কণা মুক্ত হয়ে সৃষ্টি করে মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ (CMB) এবং মহাবিশ্ব প্রবেশ করে ১০০ মিলিয়ন বছরের দীর্ঘ অন্ধকার যুগে।*

মহাজাগতিক ইতিহাসের প্রথম ৩,৮০,০০০ বছর মহাবিশ্ব ছিল সম্পূর্ণ অন্ধ। সমগ্র মহাশূন্য ছিল আলোক-অভেদ্য, অতি-উত্তপ্ত এক সাদা-ধকধকে প্লাজমায় পূর্ণ, যেখানে কোনো ফোটন একটি মিলিমিটারের ভগ্নাংশও স্বাধীনভাবে ভ্রমণ করতে পারত না—প্রতি মুহূর্তেই তা মুক্ত ইলেকট্রনের সাথে আছড়ে পড়ত। এরপর মহাবিশ্বের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ রূপান্তরমূলক পর্যায়—**রিকম্বিনেশন (Recombination)**-এ পারমাণবিক নিউক্লিয়াসগুলো সেই ইলেকট্রনগুলোকে পাকড়াও করে নিজেদের কক্ষপথে বন্দী করে ফেলে। এক পলকে মহাবিশ্ব স্ফটিকের মতো স্বচ্ছ হয়ে ওঠে, মহাশূন্যে মুক্তির নিঃশ্বাস ফেলে ছুটে চলে প্রথম আলো—আর এর মধ্য দিয়েই সূচনা হয় মহাজাগতিক অন্ধকার যুগের (Cosmic Dark Ages) রহস্যময়, নিঃশব্দ দশ কোটি বছরের যুগান্তর।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৩.১: আকাশের উন্মোচন ও মহাবিশ্বের স্বচ্ছতা। ৩,৮০,০০০ বছরের পূর্বে ফোটন মুক্ত ইলেকট্রনের সাথে অবিরাম থমসন বিচ্ছুরণের কারণে আটকা পড়েছিল; রিকম্বিনেশনে পরমাণুর নিউক্লিয়াস ইলেকট্রন ধরে ফেলতেই অপটিক্যাল ডেপথ একের নিচে নেমে আসে এবং মহাবিশ্বের প্রথম আলো মুক্তভাবে মহাশূন্যে ছড়িয়ে পড়ে।

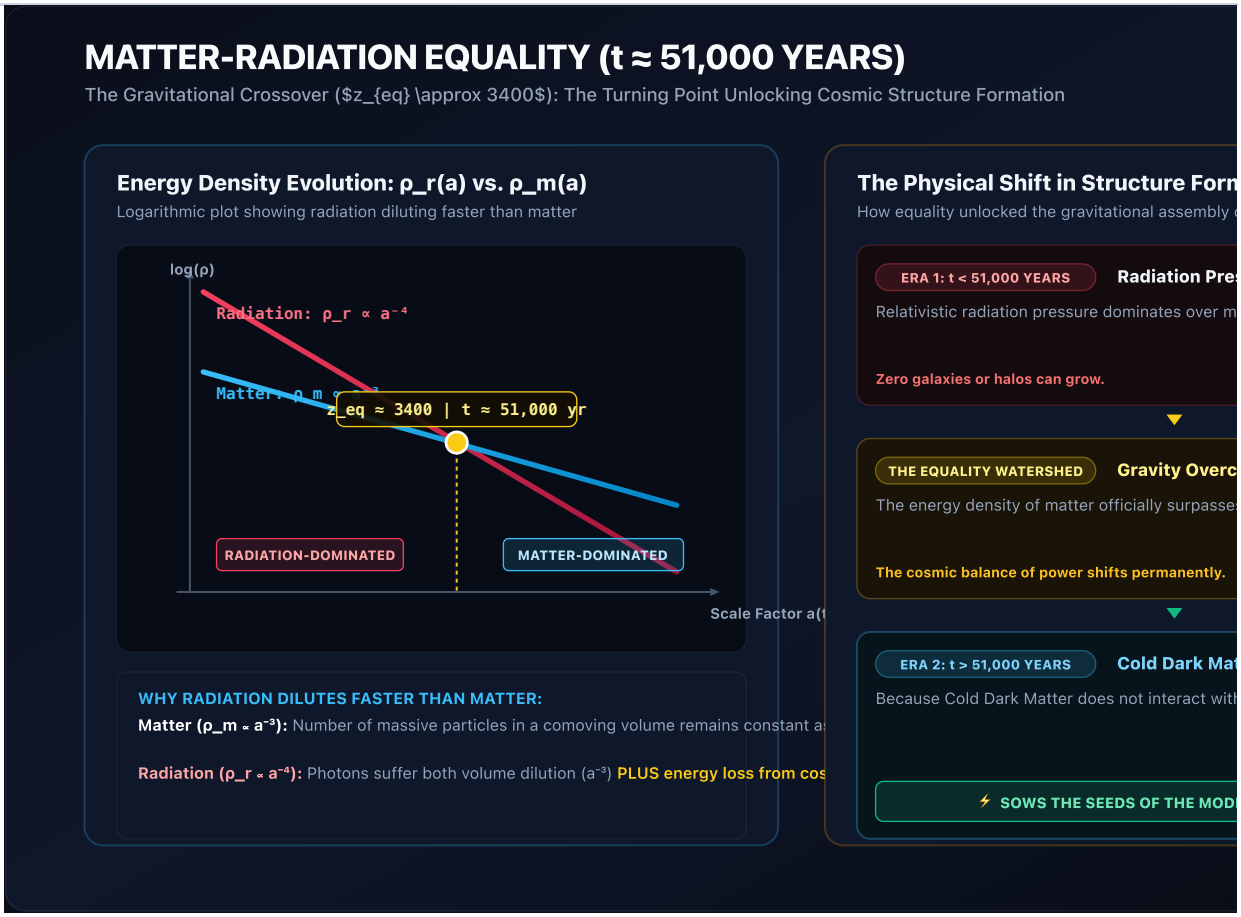
প্লাজমার কুয়াশাচ্ছন্ন চুল্লি: কেন আদিম মহাবিশ্ব আলো-অভেদ্য ছিল

বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিসের পর মহাবিশ্বের তাপমাত্রা শত কোটি ডিগ্রি থেকে কমে দশ হাজার ডিগ্রির কোঠায় নেমে এসেছিল। যদিও পারমাণবিক নিউক্লিয়াসসমূহ (প্রোটন, আলফা কণা এবং সামান্য লিথিয়াম) নিখুঁতভাবে গঠিত হয়েছিল, তবুও তারা কোনো ইলেকট্রনকে নিজেদের চারপাশের কক্ষপথে ধরে রাখতে পারছিল না। মহাজাগতিক বিকিরণের গড় তাপীয় শক্তি হাইড্রোজেনের আয়নন শক্তির ($13.6\ \text{eV}$) চেয়ে বহুগুণ বেশি ছিল, যা সমগ্র মহাবিশ্বের পদার্থকে সম্পূর্ণ আয়নিত প্লাজমা অবস্থায় আটকে রেখেছিল।

যখনই কোনো আলোর ফোটন এই প্লাজমার ভেতর দিয়ে যাত্রা করার চেষ্টা করত, তখনই তা **থমসন বিচ্ছুরণ (Thomson Scattering)**-এর মাধ্যমে কোনো না কোনো মুক্ত ইলেকট্রনের গায়ে ধাক্কা খেত ($\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2 \approx 6.65 \times 10^{-29}\ \text{m}^2$)। যেহেতু মুক্ত ইলেকট্রনের ঘনত্ব ছিল অতিমাত্রায় বেশি, তাই ফোটনের গড় মুক্ত পথ (Mean Free Path)—বা বিচ্যুত হওয়ার পূর্বে একটি ফোটন যে গড় দূরত্ব অতিক্রম করতে পারে—তা ছিল অবিশ্বাস্য রকমের ক্ষুদ্র:

$$\lambda_{\text{mfp}} = \frac{1}{n_e \sigma_T}$$

ফোটনগুলো অনন্তকাল ধরে এক বিচ্ছুরিত এলোমেলো পদক্ষেপে (Random walk) আটকা পড়েছিল, প্রতি সেকেন্ডে শত কোটি বার দিক পরিবর্তন করছিল। পুরো মহাবিশ্ব ছিল আলোকীয়ভাবে অতি-ঘন ও অস্বচ্ছ এক জ্বলন্ত কুয়াশা—ঠিক যেমনটি আজ সূর্যের গভীর অভ্যন্তরে দেখা যায়। সেই যুগে যদি কোনো দর্শক বেঁচে থাকত, তবে সে চারপাশে কেবল এক অন্ধ ও তীব্র সাদা আলোর অভিন্ন ঝলকানি ছাড়া কিছুই দেখতে পেত না।



চিত্র ৩.২: পদার্থ-বিকিরণ সমতা এবং মাধ্যাকর্ষণের মোড় পরিবর্তন। বিকিরণের শক্তি ঘনত্ব (a^{-4}) পদার্থের ঘনত্বের (a^{-3}) চেয়ে দ্রুত হ্রাস পায়; প্রায় ৫১,০০০ বছর বয়সে ($z_{eq} \approx 3400$) এদের সংযোগস্থল ঘটে, যার ফলে শীতল অন্ধকার পদার্থ (Cold Dark Matter) বিকিরণের চাপমুক্ত হয়ে ছায়াপথের মূল কাঠামো নির্মাণ শুরু করতে পারে।

পদার্থ-বিকিরণ সমতা ($t \approx 50,000$ বছর): মাধ্যাকর্ষণের ক্ষমতার পালাবদল

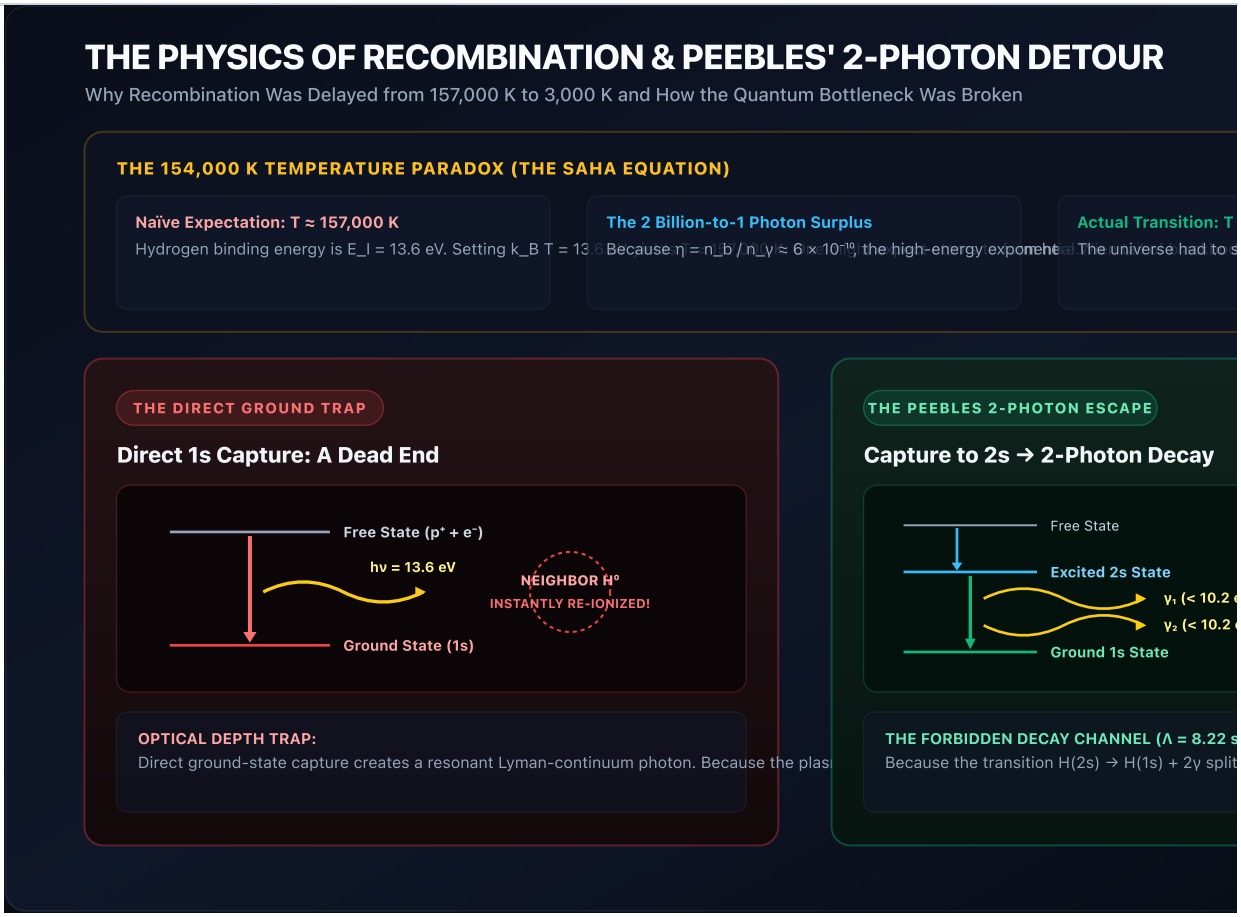
মহাবিশ্বের স্থানিক সম্প্রসারণের সাথে সাথে পদার্থ এবং বিকিরণের শক্তি ঘনত্ব দুটি মৌলিকভাবে ভিন্ন গতিতে হ্রাস পাচ্ছিল:

- **পদার্থের ঘনত্ব (ρ_m):** মহাবিশ্বের ত্রিমাত্রিক আয়তন বৃদ্ধির সাথে সরাসরি ব্যস্তানুপাতিক হারে কমে: $\rho_m(a) \propto a^{-3}$।
- **বিকিরণের শক্তি ঘনত্ব (ρ_r):** এটি স্থানিক আয়তন (a^{-3})-এর সাথে হ্রাসের পাশাপাশি অতিরিক্ত আরও একটি a^{-1} গুণ হারে কমে; কারণ মহাজাগতিক স্ফীতির সাথে সাথে প্রতিটি ফোটনের নিজস্ব তরঙ্গদৈর্ঘ্যও প্রসারিত হয়ে শক্তি কমে যায় ($\lambda \propto a$, সুতরাং $E = hc/\lambda \propto a^{-1}$)। অতএব: $\rho_r(a) \propto a^{-4}$।

যেহেতু বিকিরণের ঘনত্ব পদার্থের চেয়ে দ্রুত গতিতে নিঃশেষ হচ্ছিল, অবশেষে বিগ ব্যাংয়ের প্রায় ৫১,০০০ বছর বয়সে ($z_{eq} \approx 3400$) তাদের ঘনত্ব একে অপরকে স্পর্শ করে—যাকে বলা হয় **পদার্থ-বিকিরণ সমতা (Matter-Radiation Equality)**:

মহাকর্ষীয় স্তূপীকরণের ঐতিহাসিক মোড়
সমতার পূর্বে বিকিরণের তীব্র চাপ মহাবিশ্বকে শাসন করছিল এবং পদার্থকে মাধ্যাকর্ষণের প্রভাবে জমাট বাঁধতে বাধা দিচ্ছিল। কিন্তু যখনই পদার্থের মহাকর্ষীয় প্রভাব বিকিরণকে ছাড়িয়ে গেল (\rho_m > \rho_r), তখনই শীতল অন্ধকার পদার্থ (Cold Dark Matter) কোনো বাধা ছাড়াই নিজস্ব মহাকর্ষীয় কূপ বা হ্যালো তৈরি করা শুরু করে—যা পরবর্তীকালে মহাজাগতিক জাল ও ছায়াপথ গঠনের মূল ভিত্তি হয়ে দাঁড়ায়।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৩.৩: রিকম্বিনেশন এবং জিম পিবলসের ২-ফোটন বিকল্প পথ। সরাসরি ভূমিস্তরে ইলেকট্রন প্রবেশ করলে নির্গত ১৩.৬ eV ফোটন সাথে সাথে পাশের পরমাণুকে পুনরায়নায়ন করত; তাই রিকম্বিনেশন কেবল উত্তেজিত $2s$ স্তর এবং নিষিদ্ধ দ্বি-ফোটন ক্ষয়ের ($2s \to 1s + 2\gamma$) মাধ্যমেই স্থায়ীভাবে নিরপেক্ষ পরমাণু গঠনে সফল হয়।

রিকম্বিনেশনের পদার্থবিজ্ঞান ($z \approx 1100$, $t \approx 380,000$ বছর): মহা-নিরপেক্ষকরণ

পরমাণু পদার্থবিদ্যার সাধারণ নিয়ম অনুযায়ী কেউ হয়তো ভাবতে পারেন, যখনই মহাবিশ্বের গড় গতিশক্তি ($k_B T$) হাইড্রোজেনের বন্ধন শক্তির ($E_I = 13.6\,\text{eV}$) নিচে নামল—অর্থাৎ প্রায় $157,000$ কেলভিন তাপমাত্রায়—তখনই পরমাণু গঠিত হওয়ার কথা ছিল। কিন্তু বাস্তবে রিকম্বিনেশন ঘটতে মহাবিশ্বকে অপেক্ষা করতে হয়েছিল তাপমাত্রা মাত্র **৩,০০০ কেলভিনে** ($k_B T \approx 0.26\,\text{eV}$) নেমে আসা পর্যন্ত—প্রায় লক্ষাধিক বছরের এক দীর্ঘ বিলম্ব!

এই বিলম্বের পেছনে দায়ী ছিল ফোটন ও ব্যারিয়নের আকাশচুম্বী অনুপাত ($\eta = n_b/n_\gamma \approx 6 \times 10^{-10}$)। প্রতিটি প্রোটন ও ইলেকট্রনের বিপরীতে প্রায় ২০০ কোটি ফোটন বিদ্যমান থাকায়, প্ল্যাঙ্কের কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ বক্ররেখার অতি-উচ্চ শক্তির উইন টেইলে (Wien tail) প্রচুর পরিমাণ অতিবেগুনী ফোটন (h\nu > 13.6\text{ eV}) সক্রিয় ছিল, যা পরমাণু তৈরির সাথে সাথেই তাকে ভেঙে টুকরো টুকরো করে দিচ্ছিল।

ভারসাম্যপূর্ণ আয়নন ভগ্নাংশ $X_e = n_e/(n_p + n_H)$ পরিচালিত হয় বিখ্যাত **সাহা আয়নন সমীকরণ (Saha Ionization Equation)** দ্বারা:

$$\frac{X_e^2}{1 – X_e} = \frac{1}{n_b} \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_I}{k_B T}\right)$$

এছাড়া যখন কোনো মুক্ত ইলেকট্রন সরাসরি হাইড্রোজেনের ভূমিস্তরে প্রবেশ করে ($e^- + p \to \text{H}(1s) + \gamma$), তখন এটি একটি ১৩.৬ ইলেকট্রনভোল্টের লাইম্যান-কন্টিনিউয়াম ফোটন নির্গত করে। সেই অতি-ঘন প্লাজমায় এই ফোটনটি পলকের মধ্যে পাশের আরেকটি নিরপেক্ষ পরমাণুতে আঘাত হেনে তাকে পুনরায় আয়নিত করত। পদার্থবিদ জিম পিবলস দেখান যে রিকম্বিনেশন সফল হতে পেরেছিল কেবল একটি বিকল্প গোপন পথের মাধ্যমে: ইলেকট্রন প্রথমে উত্তেজিত $2s$ স্তরে ধরা পড়ে এবং সেখান থেকে **নিষিদ্ধ দ্বি-ফোটন ক্ষয়ের মাধ্যমে** ($\text{H}(2s) \to \text{H}(1s) + \gamma_1 + \gamma_2$) দুটি কম শক্তির ফোটন নির্গত করে ভূমিস্তরে নেমে আসে, যার রূপান্তর হার প্রতি সেকেন্ডে মাত্র ৮.২২ বার!

বিগ ব্যাংয়ের ৩,৮০,০০০ বছরের মাথায় ($z \approx 1090$) আয়নন ভগ্নাংশ 10^{-4}-এর নিচে নেমে আসে। সমস্ত মুক্ত ইলেকট্রন স্থায়ীভাবে নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম পরমাণুর অভ্যন্তরে বন্দি হয়ে যায়। মহাজাগতিক এক পলকে মুক্ত ইলেকট্রনের ঘনত্ব শূন্যে মিলিয়ে যায়।

ফোটন বিচ্ছিন্নকরণ: মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণের (CMB) জন্ম

মুক্ত ইলেকট্রন গায়েব হয়ে যাওয়ার সাথে সাথে থমসন বিচ্ছুরণের অপটিক্যাল ডেপথ (τ) একের নিচে নেমে আসে:

$$\tau = \int \sigma_T n_e c \, dt < 1$$

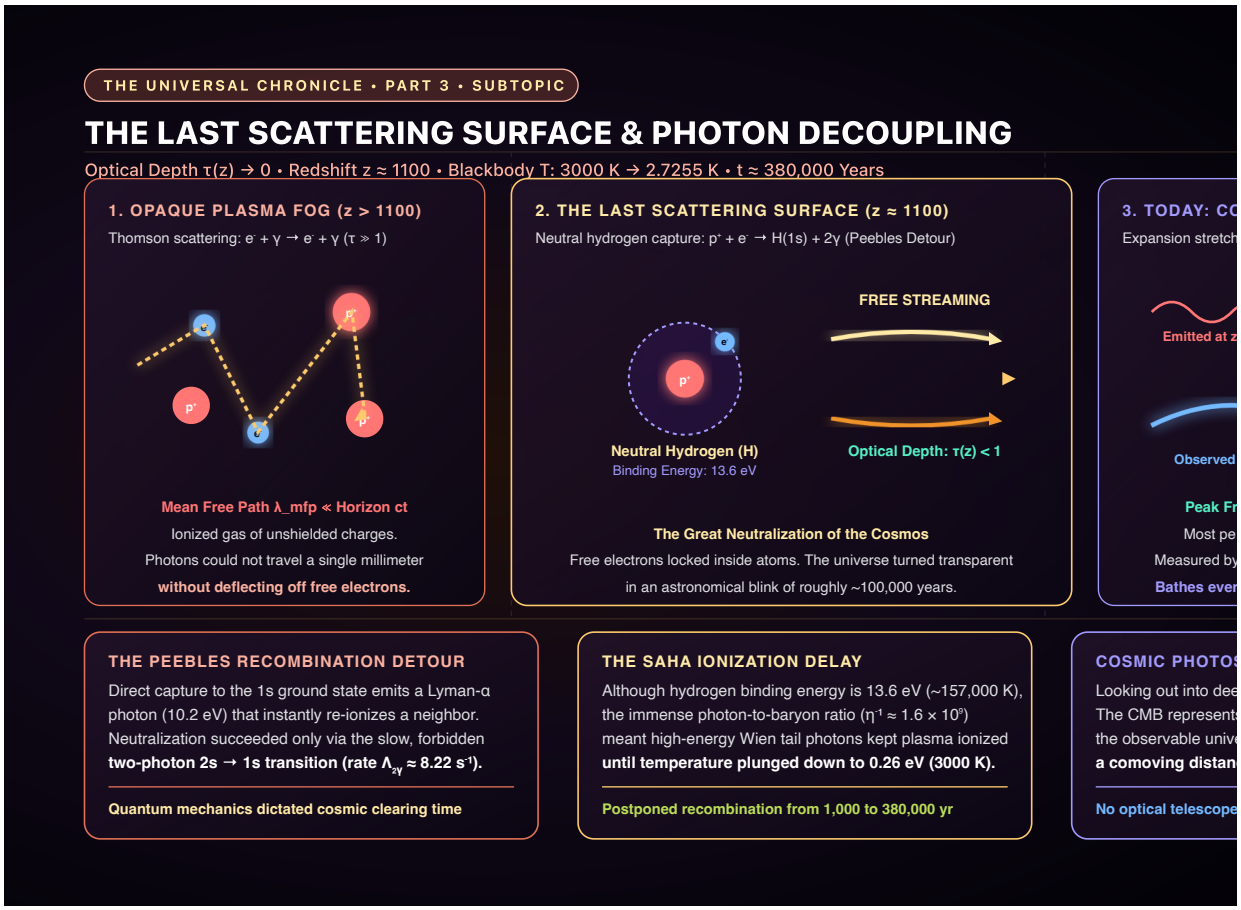
মুহূর্তের মাঝে আলোর গড় মুক্ত পথ সম্প্রসারিত হয়ে সমগ্র মহাবিশ্বের সীমানা ছুঁয়ে ফেলে। ফোটনগুলোকে আটকে রাখার আর কেউ রইল না। **মহাকাশ প্রথমবারের মতো উন্মুক্ত ও স্বচ্ছ হয়ে উঠল।**

প্লাজমার যে শেষ স্তর থেকে ফোটনগুলো বিচ্ছিন্ন হয়ে ছুটে এসেছিল, তাকে বলা হয় **শেষ বিচ্ছুরণ তল (Surface of Last Scattering)**। সেই মুহূর্তে নির্গত আলো ছিল ৩,০০০ কেলভিন তাপমাত্রার এক উষ্ণ, সোনালী-কমলা আভা—একটি উজ্জ্বল কম-ওয়াটের ফিলামেন্ট বাতির আলোর মতো। পরবর্তী ১৩.৮ বিলিয়ন বছরে মহাবিশ্বের স্থানিক সম্প্রসারণ এই ফোটনগুলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যকে ঠিক ১১০০ গুণ প্রসারিত করেছে ($z \approx 1090$):

$$\lambda_{\text{আজকে}} = \lambda_{\text{নির্গমন}} \times (1 + z) \approx 1100 \times \lambda_{\text{নির্গমন}}$$

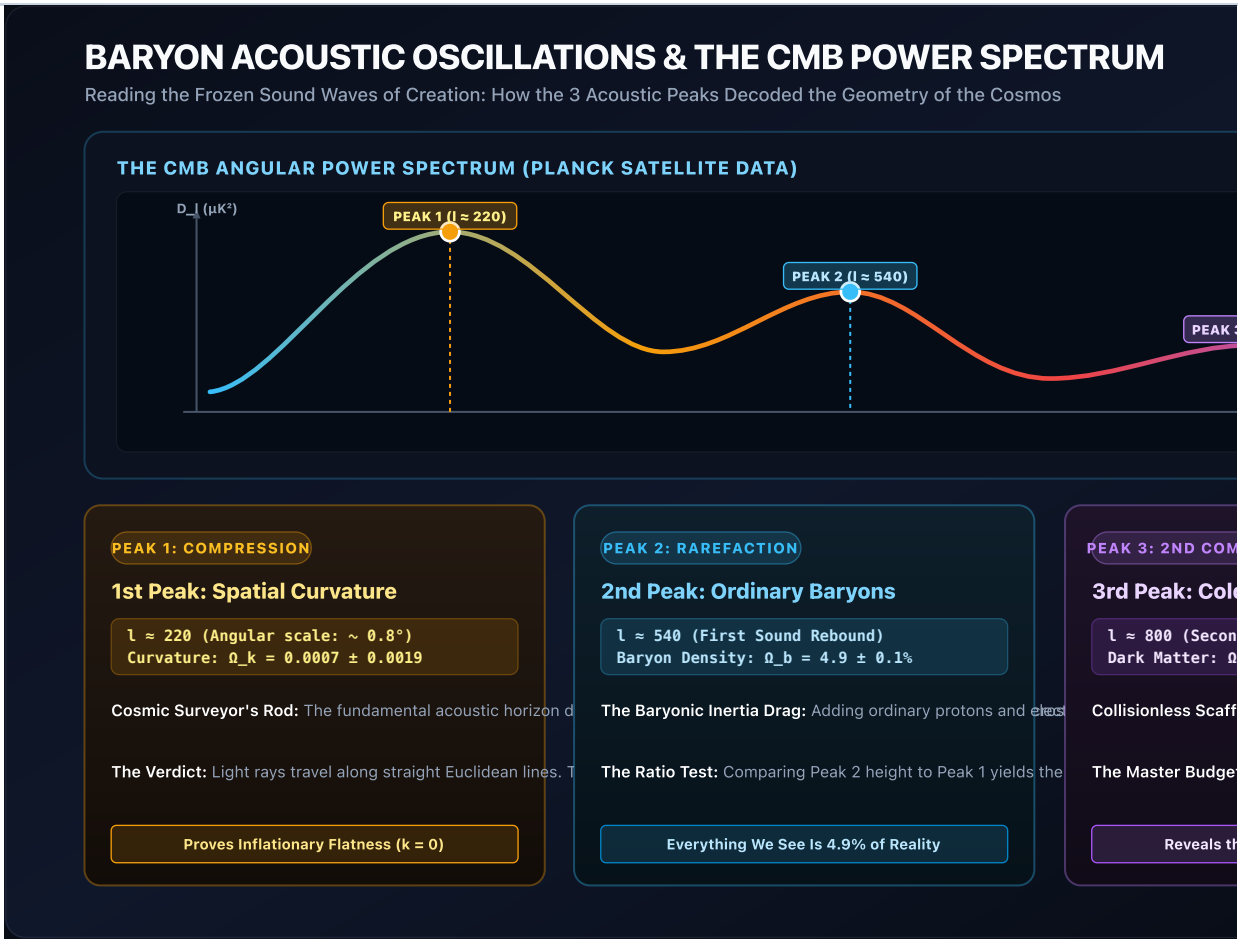
সেই প্রাচীন সোনালী আলো দৃশ্যমান পরিসীমা পেরিয়ে, অবলোহিত পেরিয়ে আজ মাইক্রোওয়েভ তরঙ্গে পরিণত হয়েছে। আজ তা মহাশূন্যের প্রতিটি ঘন সেন্টিমিটারে প্রায় **৪১১টি ফোটনের** এক শীতল সাগরে রূপ নিয়ে বিরাজ করছে, যার বর্তমান তাপমাত্রা জমে হিমশীতল **২.৭২৫৪৮ কেলভিন**: এটিই **মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ (Cosmic Microwave Background বা CMB)**।

মহাবিশ্বের সবচেয়ে নিখুঁত কৃষ্ণবস্তু (Blackbody)
১৯৯০ সালে নাসার কোবে (COBE) স্যাটেলাইটের ফিরাশ (FIRAS) যন্ত্র সিএমবি-র বর্ণালী পরিমাপ করে। তাত্ত্বিক ম্যাক্স প্ল্যাঙ্কের কৃষ্ণবস্তু বিকিরণ সূত্রের সাথে প্রাপ্ত ডেটার মিল এত বেশি নিখুঁত ছিল যে লেখচিত্রের আঁকা লাইনের চেয়েও ত্রুটির মার্জিন সরু ছিল—যা অভ্রান্তভাবে প্রমাণ করে আদিম মহাবিশ্ব নিখুঁত তাপীয় ভারসাম্যে ছিল।



শেষ বিচ্ছুরণ তল এবং মহাজাগতিক রেডশিফ্ট ($z \approx 1100, t \approx 380,000$ বছর)। রিকম্বিনেশনের ফলে আদিম প্লাজমা নিরপেক্ষ গ্যাসে পরিণত হয় এবং অপটিক্যাল ডেপথ $\tau(z)$ একের নিচে নেমে আসে। মুক্ত ইলেকট্রন থেকে ফোটন বিচ্ছিন্ন হয়ে ৩০০০ কেলভিন তাপমাত্রার একটি উজ্জ্বল কৃষ্ণবস্তু ফোটোস্ফিয়ার মহাশূন্যে ছড়িয়ে পড়ে। পরবর্তী ১৩.৮ বিলিয়ন বছরে মহাবিশ্বের স্থানিক প্রসারণ একে $(1 + z) \approx 1100$ গুণ প্রসারিত করে বর্তমান ২.৭২৫৫ কেলভিন মাইক্রোওয়েভ ব্যাকগ্রাউন্ডে পরিণত করেছে।

Shakil Mahmud • Research Monograph

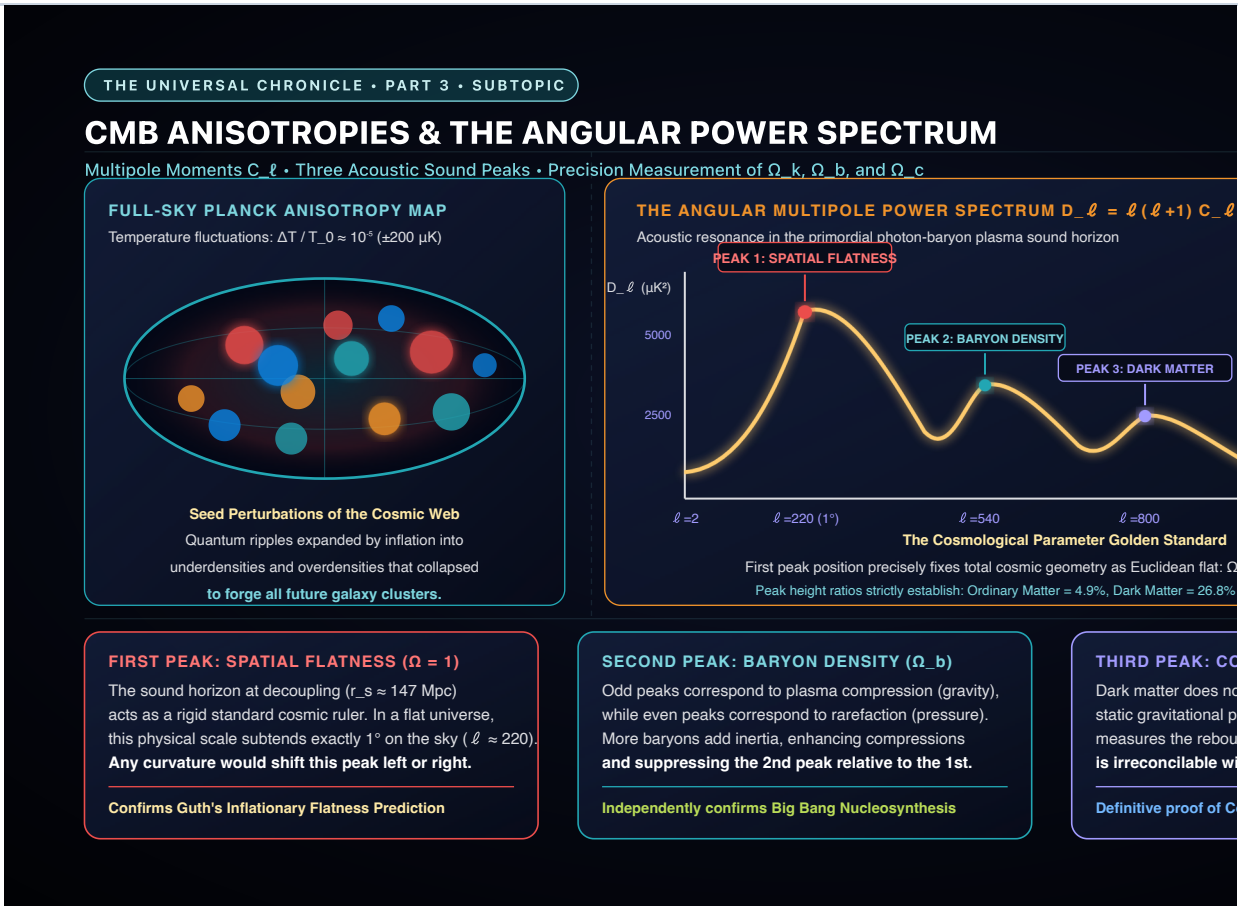


চিত্র ৩.৪: সৃষ্টির জমাটবদ্ধ শব্দতরঙ্গ (BAO ও CMB স্পেকট্রাম)। মহাকর্ষীয় টান ও বিকিরণ চাপের দ্বন্দ্বে প্লাজমার ভেতরে আলোর গতির অর্ধেকেরও বেশি বেগে আপেক্ষিকীয় শব্দতরঙ্গ সৃষ্টি হয়; সিএমবি-র তিনটি শীর্ষবিন্দু মহাবিশ্বের সমতল জ্যামিতি (শীর্ষ ১), সাধারণ ব্যারিয়ন ঘনত্ব (শীর্ষ ২) এবং শীতল অন্ধকার পদার্থের ঘনত্ব (শীর্ষ ৩) নিখুঁতভাবে প্রকাশ করে।

মহাজাগতিক রোসেটা স্টোন: সিএমবি-র তাপীয় তরঙ্গের পাঠোদ্ধার

১৯৬৫ সালে বেল ল্যাবসে আর্নো পেনজিয়াস ও রবার্ট উইলসন যখন প্রথম সিএমবি আবিষ্কার করেন, তখন এটি মহাকাশের সব দিক থেকে সম্পূর্ণ মসৃণ ও সমজাতীয় মনে হয়েছিল। কিন্তু তাত্ত্বিক পদার্থবিদরা বুঝতে পেরেছিলেন, মহাবিশ্ব যদি শতভাগ মসৃণ হতো, তবে মাধ্যাকর্ষণ কখনোই পদার্থকে একত্রিত করে ছায়াপথ সৃষ্টি করতে পারত না।

১৯৯২ সালে কোবে স্যাটেলাইট প্রথম সিএমবি-র ভেতর **তাপমাত্রার অতি-ক্ষুদ্র অ্যানাইসোট্রপি বা বৈষম্য** খুঁজে পায়—যা মাত্র $\Delta T/T \approx 10^{-5}$ **(এক লাখ ভাগে মাত্র এক ভাগ)** মাত্রার, অর্থাৎ মাত্র ৩০ মাইক্রোকেলভিনের তারতম্য। পরবর্তীকালে ডব্লিউম্যাপ (WMAP) এবং প্ল্যাঙ্ক (Planck) স্যাটেলাইট সমগ্র নভোমণ্ডলের এই মহাজাগতিক তরঙ্গের অতি-উচ্চ রেজোলিউশন মানচিত্র তৈরি করে।



সিএমবি কৌণিক মাল্টিপোল শক্তি বর্ণালী C_ℓ এবং অ্যাকোস্টিক শব্দ দিগন্ত। প্ল্যাঙ্ক স্যাটেলাইটের পূর্ণ নভোমণ্ডলীয় মানচিত্রে তাপমাত্রার ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র তরঙ্গ ($\Delta T/T_0 \sim 10^{-5}$) স্ফেরিক্যাল হারমোনিক্সে বিশ্লেষিত হয়েছে। শীর্ষ ১ ($\ell \approx 220, \theta \approx 1^\circ$) মহাবিশ্বের ইউক্লিডীয় সমতল জ্যামিতি ($\Omega_k \approx 0$) নিশ্চিত করে। শীর্ষ ২ ব্যারিয়নের সঠিক ঘনত্ব ($\Omega_b h^2$) এবং শীর্ষ ৩ শীতল অন্ধকার পদার্থের মহাকর্ষীয় কর্তৃত্ব ($\Omega_c h^2$) প্রমাণ করে।

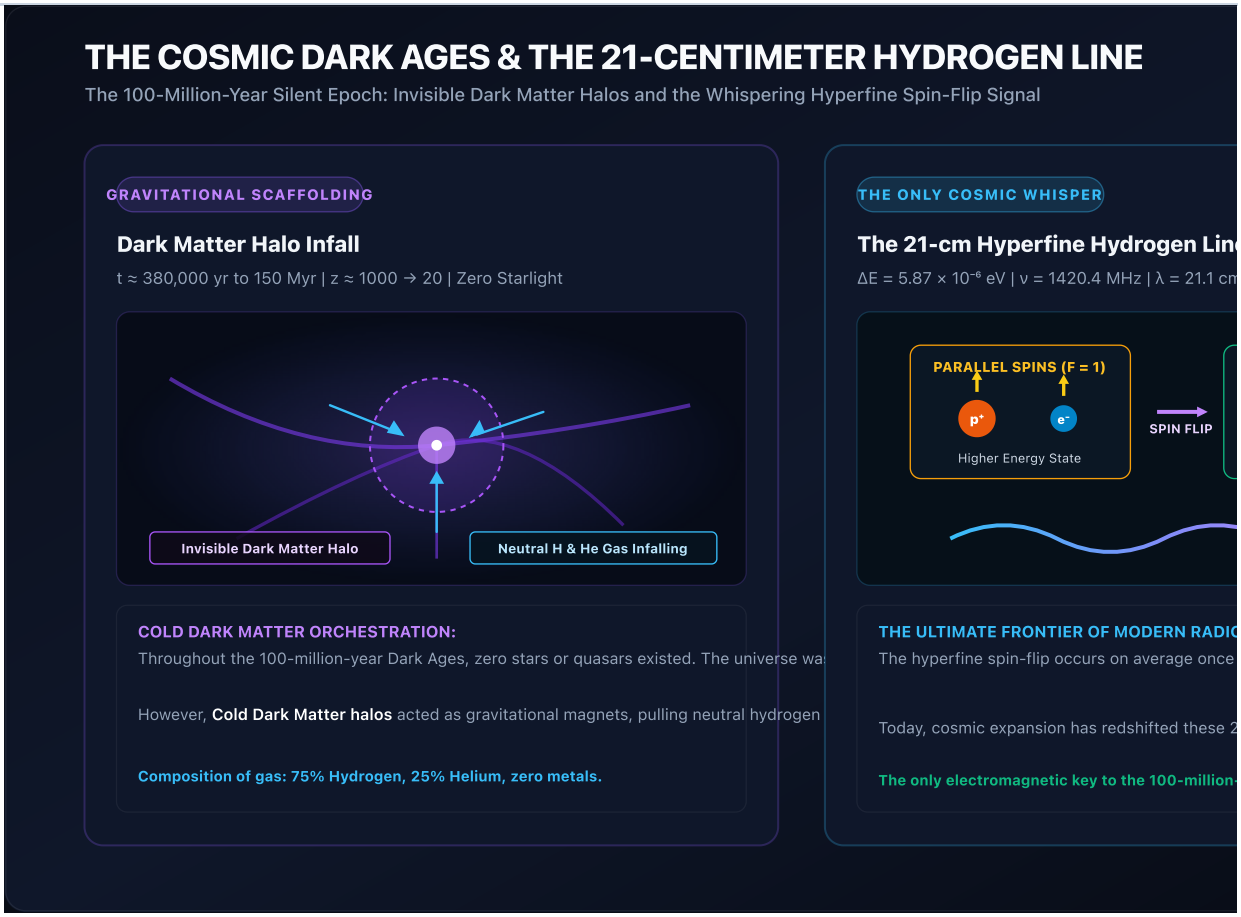
ব্যারিয়ন অ্যাকোস্টিক অসিলেশন (BAO): সৃষ্টির জমাটবদ্ধ শব্দতরঙ্গ

এই তাপমাত্রার তারতম্যগুলো কোনো বিশৃঙ্খল নয়েজ নয়; এগুলো ছিল আদিম মহাবিশ্বের প্লাজমার মধ্য দিয়ে ছুটে চলা জমাটবদ্ধ শব্দতরঙ্গ। রিকম্বিনেশনের পূর্বে মহাকর্ষ পদার্থকে ভেতরের দিকে টানছিল, আর বিকিরণের চাপ বাইরের দিকে ঠেলছিল। এই মহাকর্ষীয় টানাটানিতে প্লাজমার ভেতরে আলোর গতির অর্ধেকেরও বেশি বেগে ($c_s \approx 0.57c$) সংকোচন ও প্রসারণের শব্দতরঙ্গ তৈরি হয়।

রিকম্বিনেশনের সাথে সাথে এই শব্দতরঙ্গগুলো মহাশূন্যে চিরতরে হিমায়িত হয়ে যায়। সিএমবি পাওয়ার স্পেকট্রামের তিনটি প্রধান শীর্ষবিন্দু আধুনিক পদার্থবিজ্ঞানের সোনালী ভিত্তিপ্রস্তর:

- **প্রথম অ্যাকোস্টিক পিক ($l \approx 220$):** এটি সেই মৌলিক শব্দতরঙ্গ যা রিকম্বিনেশনের ঠিক মুহূর্তে সর্বোচ্চ সংকোচনে পৌঁছেছিল। আকাশে এর কৌণিক বিস্তার (0.8°) প্রমাণ করে যে **আমাদের মহাবিশ্বের স্থানিক জ্যামিতি সম্পূর্ণ সমতল ($\Omega_k = 0.0007 \pm 0.0019$)**।
- **দ্বিতীয় অ্যাকোস্টিক পিক ($l \approx 540$):** শব্দতরঙ্গের সর্বোচ্চ প্রতিক্ষেপ (Rarefaction) নির্দেশ করে। প্রথম ও দ্বিতীয় পিকের অনুপাত থেকে সাধারণ পারমাণবিক ব্যারিয়নের মোট ঘনত্ব নিখুঁতভাবে নির্ধারিত হয়: $\Omega_b \approx 4.9\%$।
- **তৃতীয় অ্যাকোস্টিক পিক ($l \approx 800$):** দ্বিতীয় সংকোচন চক্র প্রকাশ করে, যা সরাসরি মহাবিশ্বে **শীতল অন্ধকার পদার্থের পরিমাণকে ($\Omega_c \approx 26.8\%$)** পরিমাপ করে, আর বাকিটা হলো ডার্ক এনার্জি ($\Omega_\Lambda \approx 68.3\%$)।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৩.৫: ১০ কোটি বছরের নীরব অতল গহ্বর এবং ২১ সেন্টিমিটার হাইড্রোজেন সংকেত। নক্ষত্রহীন অন্ধকার যুগে অদৃশ্য ডার্ক ম্যাটার হ্যালো নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন গ্যাসকে মহাকর্ষ কূপে জমা করে; এই যুগের একমাত্র মৃদু কণ্ঠস্বর ছিল হাইড্রোজেনের অতিসূক্ষ্ম স্পিন-ফ্লিপজনিত ২১ সেমি রেডিও তরঙ্গ, যা আধুনিক রেডিও টেলিস্কোপের মূল লক্ষ্য।

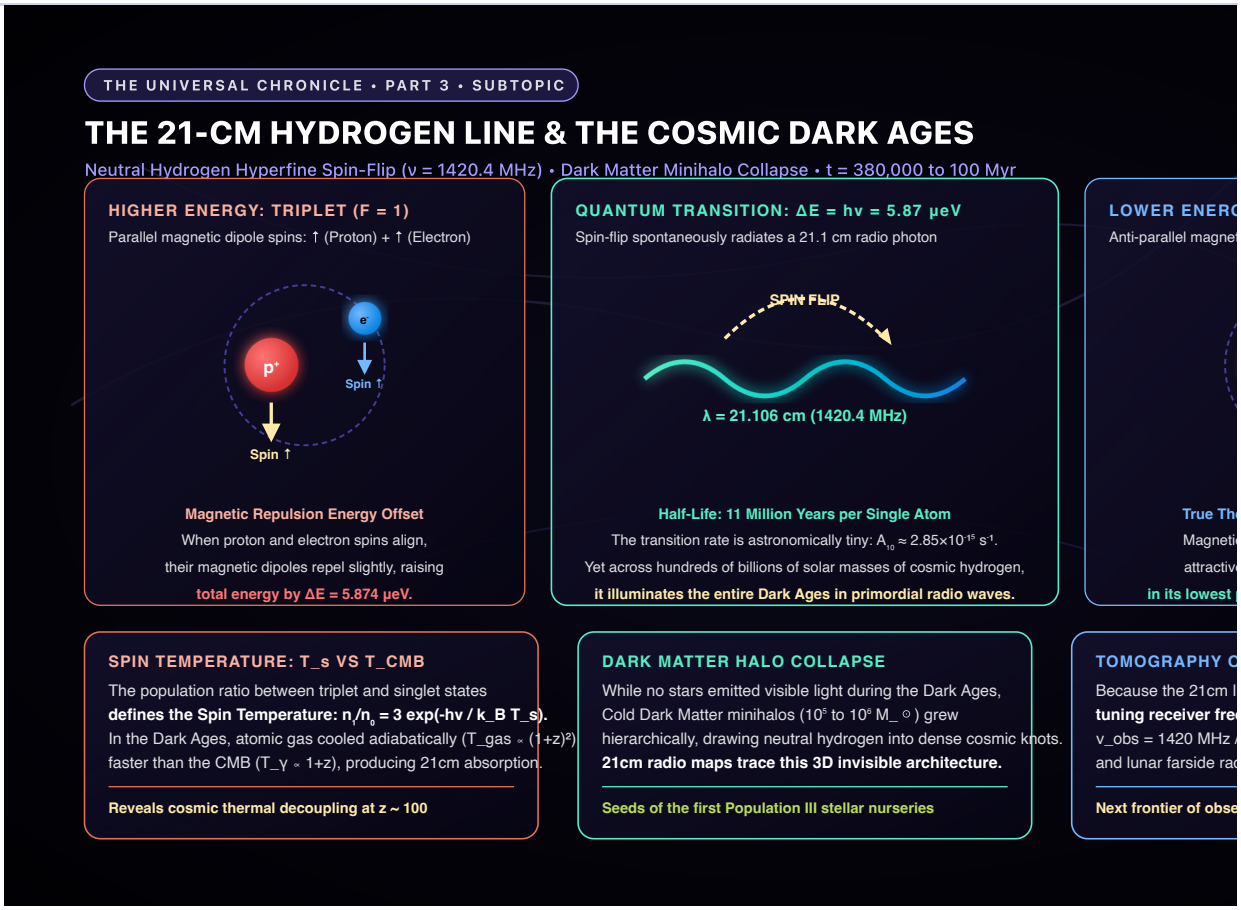
মহাজাগতিক অন্ধকার যুগ ($t = 380,000$ থেকে ১০ কোটি বছর): নিঃশব্দ অতল গহ্বর

শেষ বিচ্ছুরণের ফোটনগুলো যখন লাল হতে হতে অদৃশ্য অবলোহিত তরঙ্গে মিলিয়ে গেল, সমগ্র মহাবিশ্ব নিমজ্জিত হলো ঘুটঘুটে, নিশ্চিদ্র অন্ধকারের এক দীর্ঘ যুগে: **মহাজাগতিক অন্ধকার যুগ (The Cosmic Dark Ages)**।

তখন মহাবিশ্বে কোনো নক্ষত্র, ছায়াপথ, কোয়েসার বা ব্ল্যাক হোল ছিল না। স্থান জুড়ে বিস্তৃত ছিল কেবল ৭৫% নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন এবং ২৫% হিলিয়াম গ্যাসের এক বিশাল, শীতল, সম্প্রসারণশীল সমুদ্র। সেখানে কোনো ভারী মৌল ছিল না, কোনো রাসায়নিক দহন সম্ভব ছিল না, এবং কোনো পারমাণবিক চুল্লির আগুন জ্বলে ওঠেনি। টানা ১০ কোটি বছর ধরে মহাবিশ্ব ছিল সম্পূর্ণ নিঃশব্দ ও নিষ্প্রাণ।

কিন্তু এই অন্ধকার নিষ্ক্রিয় ছিল না। অন্ধকারের আড়ালে অদৃশ্য **শীতল অন্ধকার পদার্থ** ভবিষ্যত মহাবিশ্বকে সাজিয়ে তুলছিল। যেহেতু ডার্ক ম্যাটার কেবল মহাকর্ষ দ্বারা ক্রিয়া করে এবং ফোটন ছড়ায় না, তাই তারা বিকিরণ যুগের শুরু থেকেই মহাকর্ষীয় জালে জমাট বাঁধা শুরু করেছিল। অন্ধকার যুগে সাধারণ হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম গ্যাস সেই ডার্ক ম্যাটারের গভীর মহাকর্ষীয় খাদগুলোতে জমা হতে থাকে।

সমগ্র অন্ধকার যুগে মহাবিশ্ব থেকে নির্গত হওয়া একমাত্র তড়িচ্চুম্বকীয় বিকিরণ ছিল মৃদু **২১-সেন্টিমিটার লাইন**—হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রন ও প্রোটনের স্পিনের অতিসূক্ষ্ম রূপান্তরের ফলে নির্গত রেডিও তরঙ্গ ($\Delta E = 5.87 \times 10^{-6}\ \text{eV}$)। এই প্রাচীন ও ক্ষীণ রেডিও সংকেতই আধুনিক রেডিও জ্যোতির্বিজ্ঞানের (যেমন স্কয়ার কিলোমিটার অ্যারে) গবেষণার চূড়ান্ত সীমান্ত।



২১-সেমি হাইড্রোজেন হাইপারফাইন রূপান্তর এবং মহাজাগতিক অন্ধকার যুগ ($t = 380,000$ থেকে 10 কোটি বছর)। আলোহীন আদিম মহাবিশ্বে নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন পরমাণুর অতিসূক্ষ্ম স্পিন-ফ্লিপ ঘটে: প্রোটনের তুলনায় ইলেকট্রনের স্পিন সমান্তরাল ($F = 1$ ট্রিপলেট) থেকে বিপরীতমুখী ($F = 0$ সিংলেট) দশায় এলে ২১.১ সেমি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের রেডিও ফোটন নির্গত হয় ($\Delta E = 5.87 \mu\text{eV}, \nu = 1420.4\ \text{MHz}$)। এই মৃদু সংকেতই প্রথম নক্ষত্র জন্মের পূর্বে শীতল অন্ধকার পদার্থের অদৃশ্য মহাকর্ষীয় জালে গ্যাস জমাট বাঁধার মানচিত্র তৈরি করে।

কালানুক্রমিক সারণী: প্লাজমা কুয়াশা থেকে নক্ষত্রের আলোর দ্বারপ্রান্তে

যুগ / ঘটনা	লোহিত অপসরণ (z)	মহাজাগতিক সময় (t)	তাপমাত্রা (K)	ভৌত বৈশিষ্ট্য
পদার্থ-বিকিরণ সমতা	$z \approx 3400$	৫১,০০০ বছর	$\sim 9,000$ K	পদার্থের শক্তি ঘনত্ব বিকিরণকে ছাড়িয়ে যায়; ডার্ক ম্যাটারের মহাকর্ষীয় পতন শুরু হয়।
রিকম্বিনেশন যুগ	$z \approx 1300 \to 1000$	২,৬০,০০০ → ৩,৮০,০০০ বছর	৪,০০০ → ৩,০০০ K	২-ফোটন বিকল্প পথে ইলেকট্রন প্রোটনের সাথে যুক্ত হয়; আয়নন ১০০% থেকে ০.০১%-এর নিচে নামে।
ফোটন বিচ্ছিন্নকরণ (শেষ বিচ্ছুরণ)	$z \approx 1090$	৩,৮০,০০০ বছর	২,৯৭০ K	অপটিক্যাল ডেপথ ১-এর নিচে নামে; মহাকাশ স্বচ্ছ হয়; মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ মুক্ত হয়।
মহাজাগতিক অন্ধকার যুগ	$z \approx 1000 \to 20$	৩,৮০,০০০ বছর থেকে ১৫ কোটি বছর	৩,০০০ → ৫০ K	কোনো নক্ষত্রের আলো নেই; স্থান সম্পূর্ণ অন্ধকার; ডার্ক ম্যাটার হ্যালোতে গ্যাস জমা হয়; ২১ সেমি রেডিও নির্গমন।
মহাজাগতিক ঊষা (প্রথম নক্ষত্র)	$z \approx 20 \to 15$	১৫ কোটি → ২৫ কোটি বছর	~ 30 K	গ্যাসের মহাকর্ষীয় পতন সংকটকালীন ঘনত্বে পৌঁছায়; পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র জ্বলে ওঠে; পুনরায়নায়ন শুরু হয়।

মহাজাগতিক রায়: আধুনিক বিজ্ঞানের নোঙর

সিএমবি-র আবিষ্কার এবং নিখুঁত মানচিত্রায়ন জ্যোতির্বিজ্ঞানকে দার্শনিক জল্পনা-কল্পনা থেকে একটি নিখুঁত গাণিতিক বিজ্ঞানে রূপান্তরিত করেছে। আমাদের মহাবিশ্বের প্রতিটি মৌলিক সংখ্যা—তার বয়স (১৩.৭৮৭ ± ০.০২০ বিলিয়ন বছর), তার সমতল জ্যামিতি, তার প্রসারণের হার ($H_0 \approx 67.4\ \text{km/s/Mpc}$), এবং তার সামগ্রিক উপাদান (৬৮.৩% ডার্ক এনার্জি, ২৬.৮% কোল্ড ডার্ক ম্যাটার এবং ৪.৯% সাধারণ পদার্থ)—সবকিছুই খোদাই করা রয়েছে শেষ বিচ্ছুরণ তলের সেই প্রাচীন তরঙ্গের ভাঁজে।

অন্ধকার যুগ যত এগিয়েছে, মহাকর্ষীয় কূপগুলো তত গভীর হয়েছে। আদিম হাইড্রোজেনের বিশাল আণবিক মেঘ মহাকর্ষের টানে ধীরে ধীরে সংকুচিত হতে থাকে। *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের* **চতুর্থ পর্বে** আমরা সাক্ষী হব সেই নিস্তব্ধ অন্ধকার বিদীর্ণ করে মহাবিশ্বের প্রথম আলো জ্বলে ওঠার বিস্ময়কর ক্ষণের: **মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানবাকৃতির নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সির জন্ম এবং পুনরায়নায়ন যুগ**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Penzias, A. A., & Wilson, R. W. (1965).** “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.” *The Astrophysical Journal*, 142, 419–421. doi:10.1086/148307.
- **Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G., & Wilkinson, D. T. (1965).** “Cosmic Black-Body Radiation.” *The Astrophysical Journal*, 142, 414–419. doi:10.1086/148306.
- **Peebles, P. J. E. (1968).** “Recombination of the Primeval Plasma.” *The Astrophysical Journal*, 153, 1–11. doi:10.1086/149628.
- **Sunyaev, R. A., & Zel’dovich, Y. B. (1970).** “Small-scale fluctuations of relic radiation.” *Astrophysics and Space Science*, 7(1), 3–19. doi:10.1007/BF00653471.
- **Mather, J. C., et al. (1990).** “A measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument.” *The Astrophysical Journal*, 354, L37–L40. doi:10.1086/185717.
- **Smoot, G. F., et al. (1992).** “Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps.” *The Astrophysical Journal*, 396, L1–L5. doi:10.1086/186504.
- **Planck Collaboration (Aghanim, N., et al.) (2020).** “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.” *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. doi:10.1051/0004-6361/201833910.
- **Hu, W., & Dodelson, S. (2002).** “Cosmic Microwave Background Anisotropies.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40(1), 171–216. doi:10.1146/annurev.astro.40.060401.093926.

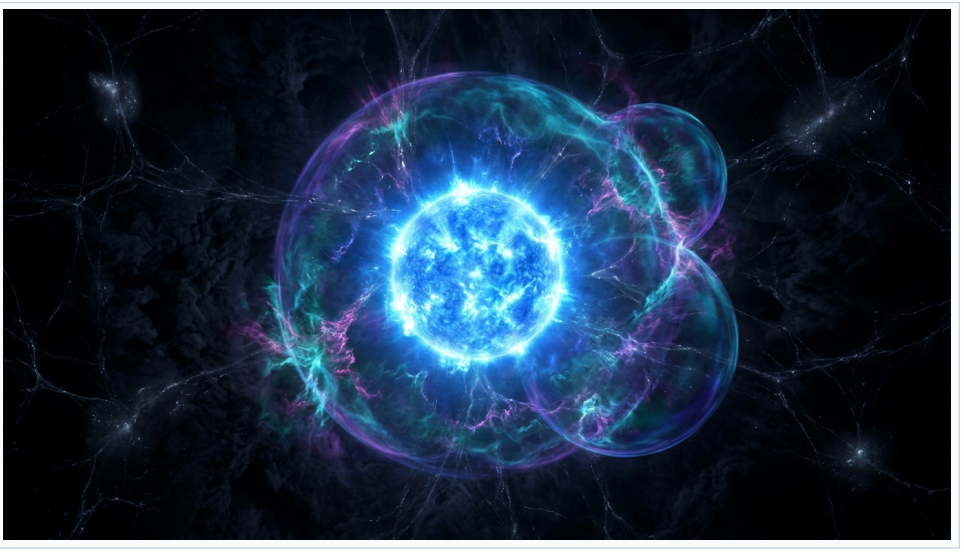
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "আকাশের উন্মোচন — রিকম্বিনেশন, মহাজাগতিক পটভূমি বিকিরণ এবং অন্ধকার যুগ"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৩। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-3-the-clearing-of-the-heavens-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • চতুর্থ খণ্ড

মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সি এবং পুনরায়নায়ন যুগ

মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সি এবং পুনরায়নায়ন যুগ

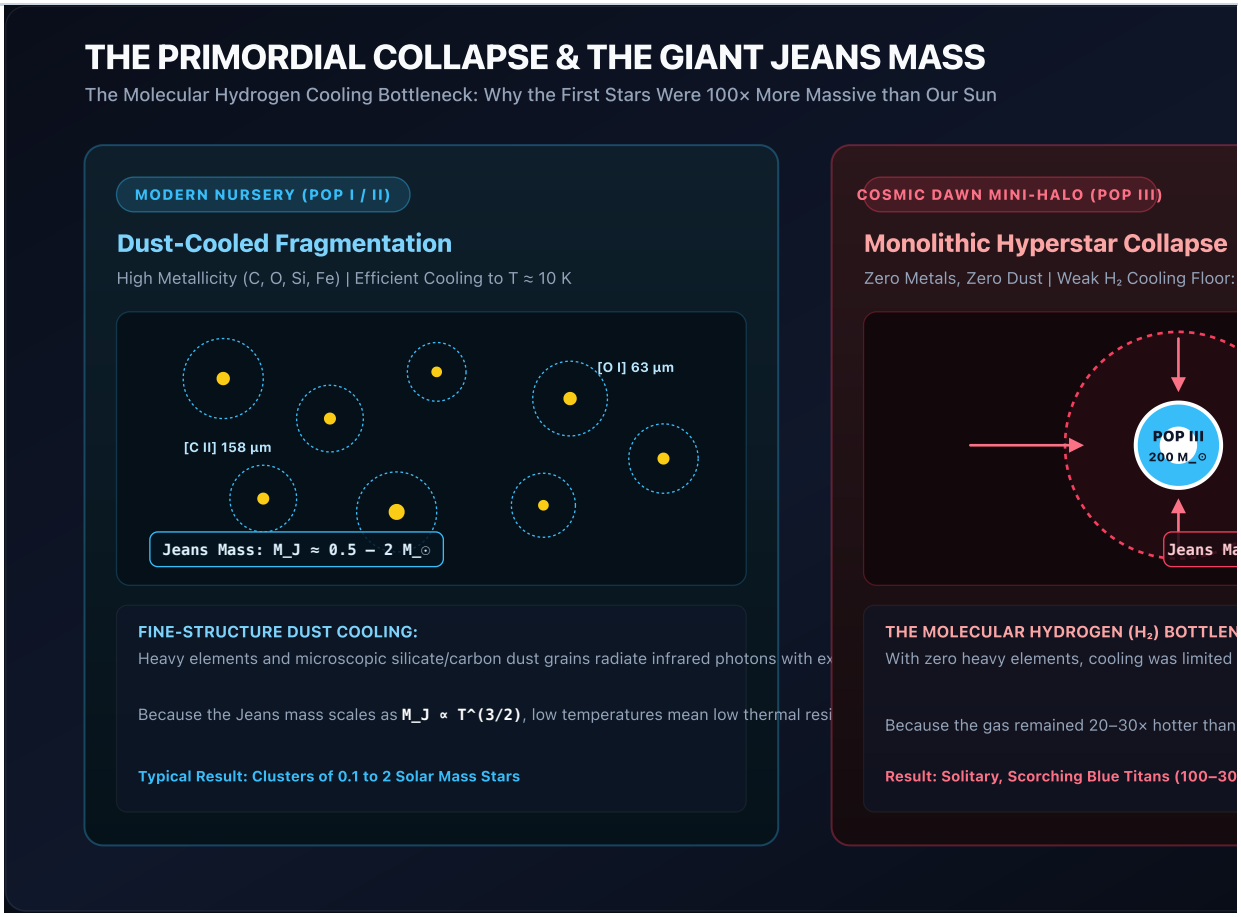
1,990 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৪: *চিত্র: মহাজাগতিক ঊষা (~১০০-২৫০ মিলিয়ন বছর পর): ধাতুমুক্ত আদিম হাইড্রোজেন মেঘ ঘনীভূত হয়ে জন্ম নেয় শতগুণ বিশালাকার পপুলেশন ৩ মহাতারকা (১০০–৩০০ সৌরভর); এদের অতিবেগুনি রশ্মি মহাবিশ্বের অন্ধকার ছিন্ন করে পুনঃআয়নিত যুগের সূচনা করে।*

বিগ ব্যাংয়ের পর টানা দশ কোটি বছরেরও বেশি সময় ধরে মহাবিশ্ব ছিল নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন এবং শীতল অন্ধকার পদার্থের এক অখণ্ড, আলোহীন মরুভূমি। এরপর আদিম অন্ধকার পদার্থের অতল মহাকর্ষীয় কূপে জমা হওয়া আদিম গ্যাস প্রচণ্ড চাপে সংকুচিত হয়ে মহাজাগতিক ইতিহাসের প্রথম নক্ষত্রগুলোকে প্রজ্বলিত করে: **পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র (Population III Hyperstars)**। এই দানবাকৃতির, অতি-উত্তপ্ত ও স্বল্পায়ু আদিম সূর্যগুলো মহাজাগতিক ঊষাকে (Cosmic Dawn) আলোকিত করে, সমগ্র স্থানকে তীব্র অতিবেগুনী রশ্মিতে প্লাবিত করে এবং পর্যায় সারণীর প্রথম ভারী মৌলগুলোর বীজ বপন করে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৪.১: আণবিক হাইড্রোজেনের শীতলীকরণ বাধা এবং জিন্স ভরের অনুপাত। কম তাপমাত্রায় তাপ বিকিরণের জন্য ভারী মৌল (কার্বন, অক্সিজেন, লোহা) না থাকায় আদিম গ্যাস কেবল H_2 আণবিক ঘূর্ণন রূপান্তরের মাধ্যমে প্রায় ২০০ কেলভিন পর্যন্ত ঠান্ডা হতে পারত। যেহেতু জিন্স ভর $M_J \propto T^{3/2}/\rho^{1/2}$ স্কেলে কাজ করে, তাই আদিম মহাকর্ষীয় খণ্ডগুলো আধুনিক নক্ষত্র নার্সারির চেয়ে ১০০ থেকে ১,০০০ গুণ বেশি ভারী ছিল।

আদিম মহাকর্ষীয় পতনের পদার্থবিজ্ঞান: আণবিক হাইড্রোজেনের শীতলীকরণ বাধা

আজকের আধুনিক মহাবিশ্বের নক্ষত্র নার্সারিতে (যেমন কালপুরুষ নীহারিকা বা ওরাইয়ন নেবুলা) আন্তঃনাক্ষত্রিক গ্যাস মেঘ অতি সহজেই সংকুচিত হয়ে আমাদের সূর্যের মতো ছোট ছোট নক্ষত্রে বিভক্ত হয়ে যায়। এর কারণ হলো আধুনিক মহাশূন্য "ধাতু"—জ্যোতির্বিজ্ঞানের ভাষায় হিলিয়ামের চেয়ে ভারী যেকোনো মৌল যেমন কার্বন, অক্সিজেন, সিলিকন ও লোহা—দ্বারা সমৃদ্ধ। এই ভারী মৌলগুলো এবং আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূলিকণা অবলোহিত বিকিরণ নির্গমন করে গ্যাস মেঘকে দ্রুত মাত্র ১০ কেলভিনের হিমশীতল তাপমাত্রায় ঠান্ডা করে ফেলতে পারে।

কিন্তু আদিম মহাবিশ্বে কোনো ধূলিকণা বা ভারী মৌলের চিহ্নমাত্র ছিল না। সেখানে ছিল কেবল ৭৫% বিশুদ্ধ হাইড্রোজেন এবং ২৫% হিলিয়াম। পারমাণবিক হাইড্রোজেন গ্যাস ১০,০০০ কেলভিনের নিচে কার্যকরভাবে তাপ বিকিরণ করতে পারে না, কারণ এর প্রথম ইলেকট্রন উদ্দীপনা স্তর ($n = 1 \to n = 2$, Lyman-α) অতিক্রম করতে বিশাল ১০.২ ইলেকট্রনভোল্ট শক্তির প্রয়োজন হয়।

ফলে আদিম মহাবিশ্বের শীতলীকরণের একমাত্র ভরসা ছিল মুক্ত ইলেকট্রনের মাধ্যমে গঠিত অতি-নগণ্য পরিমাণের **আণবিক হাইড্রোজেন (H_2)**:

- $H + e^- \to H^- + \gamma$
- $H^- + H \to H_2 + e^-$

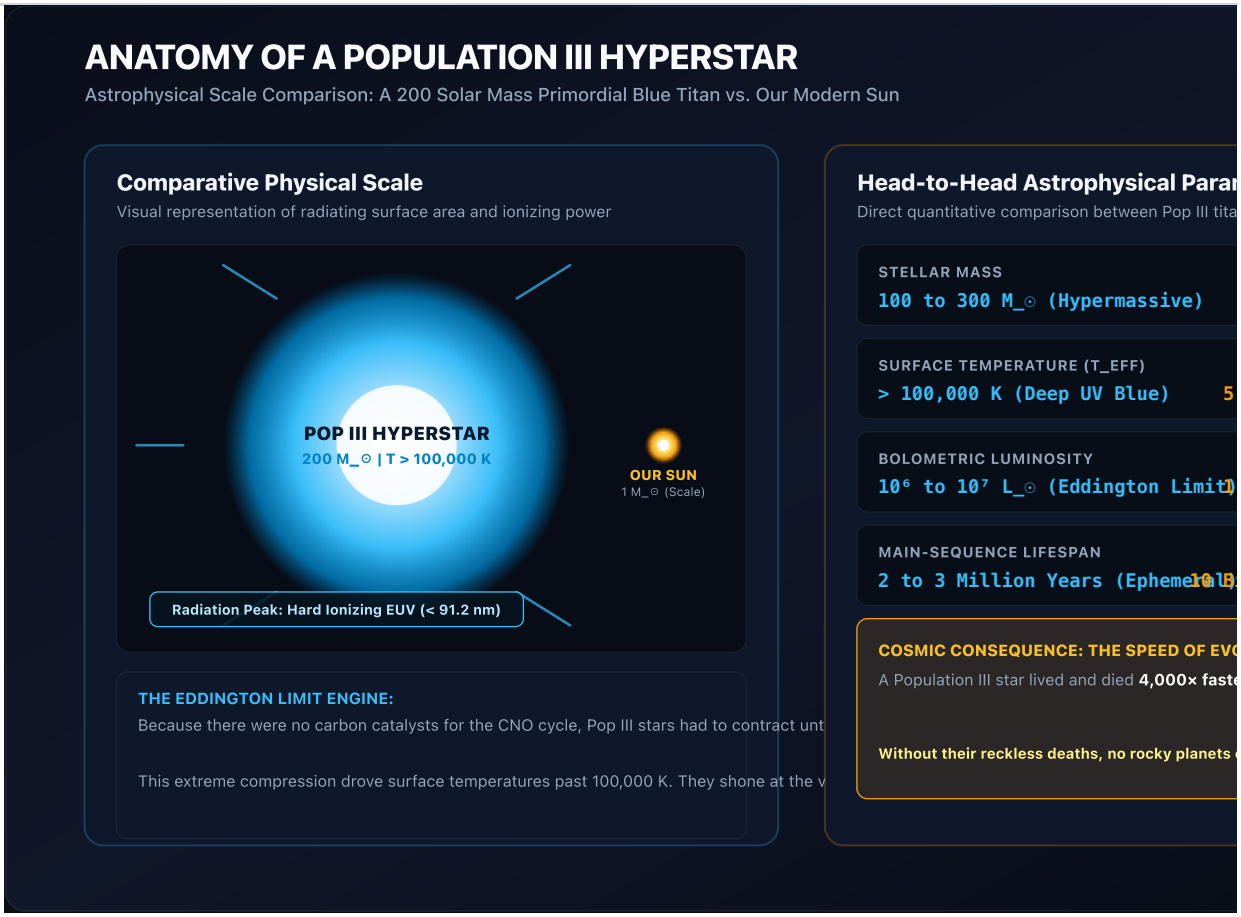
যেহেতু আণবিক হাইড্রোজেন একটি হোমোনিউক্লিয়ার ডাই-অ্যাটমিক অণু, তাই এর কোনো স্থায়ী বৈদ্যুতিক ডাইপোল মোমেন্ট নেই। এর শীতলীকরণ কেবল চতুর্ধ্রুভ ঘূর্ণন রূপান্তরের ($J = 2 \to 0$) মাঝেই সীমাবদ্ধ, যার শক্তি প্রায় ৫১২ কেলভিন তাপমাত্রার সমতুল্য। এর ফলস্বরূপ, আদিম গ্যাস মেঘ কিছুতেই প্রায় **২০০ থেকে ৩০০ কেলভিনের নিচে ঠান্ডা হতে পারত না**।

জিন্স ভর: কেন প্রথম নক্ষত্রগুলো দানবাকৃতির ছিল?

একটি গ্যাস মেঘ নিজস্ব মহাকর্ষের টানে সংকুচিত হয়ে নক্ষত্রে রূপ নিতে হলে তার ন্যূনতম যে ভরের প্রয়োজন হয়, তাকে বলা হয় **জিন্স ভর (M_J)**:

$$M_J \propto \left(\frac{k_B T}{G \mu m_H}\right)^{3/2} \rho^{-1/2}$$

যেহেতু আদিম গ্যাসের তাপমাত্রার সর্বনিম্ন সীমা ($T \sim 200\text{–}300$ K) আধুনিক মেঘের ($T \sim 10$ K) তুলনায় বিশ থেকে ত্রিশ গুণ বেশি ছিল, তাই আদিম মহাকর্ষীয় খণ্ডগুলোর জিন্স ভরও ছিল আকাশচুম্বী: সাধারণত **১০০ থেকে ১,০০০ সৌর ভর ($M_\odot$)**! হাজার হাজার ক্ষুদ্র নক্ষত্রে বিভক্ত হওয়ার বদলে সেই আদিম গ্যাস মেঘগুলো একক, দানবাকৃতির প্রোটো-নাক্ষত্রিক কোরে সংকুচিত হয়, যা প্রতি বছর অত্যন্ত দ্রুত হারে আশপাশের গ্যাস গ্রাস করতে থাকে।



চিত্র ৪.২: পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্রের ব্যবচ্ছেদ। ১০০ থেকে ৩০০+ সৌর ভরের এই সম্পূর্ণ ধাতুমুক্ত দানব নক্ষত্রগুলো এডিংটন উজ্জ্বলতা সীমার ৯৯% ক্ষমতায় জ্বলত। বিকিরণ বাতাস চালানোর জন্য ধূলিকণা না থাকায় তাদের ২–৩ মিলিয়ন বছরের সংক্ষিপ্ত জীবদ্দশায় কোনো ভর হ্রাস ঘটেনি এবং তাদের পৃষ্ঠের তাপমাত্রা ১,০০,০০০ কেলভিন ছাড়িয়ে গিয়েছিল।

পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র: ঊষালগ্নের নীল টাইটান

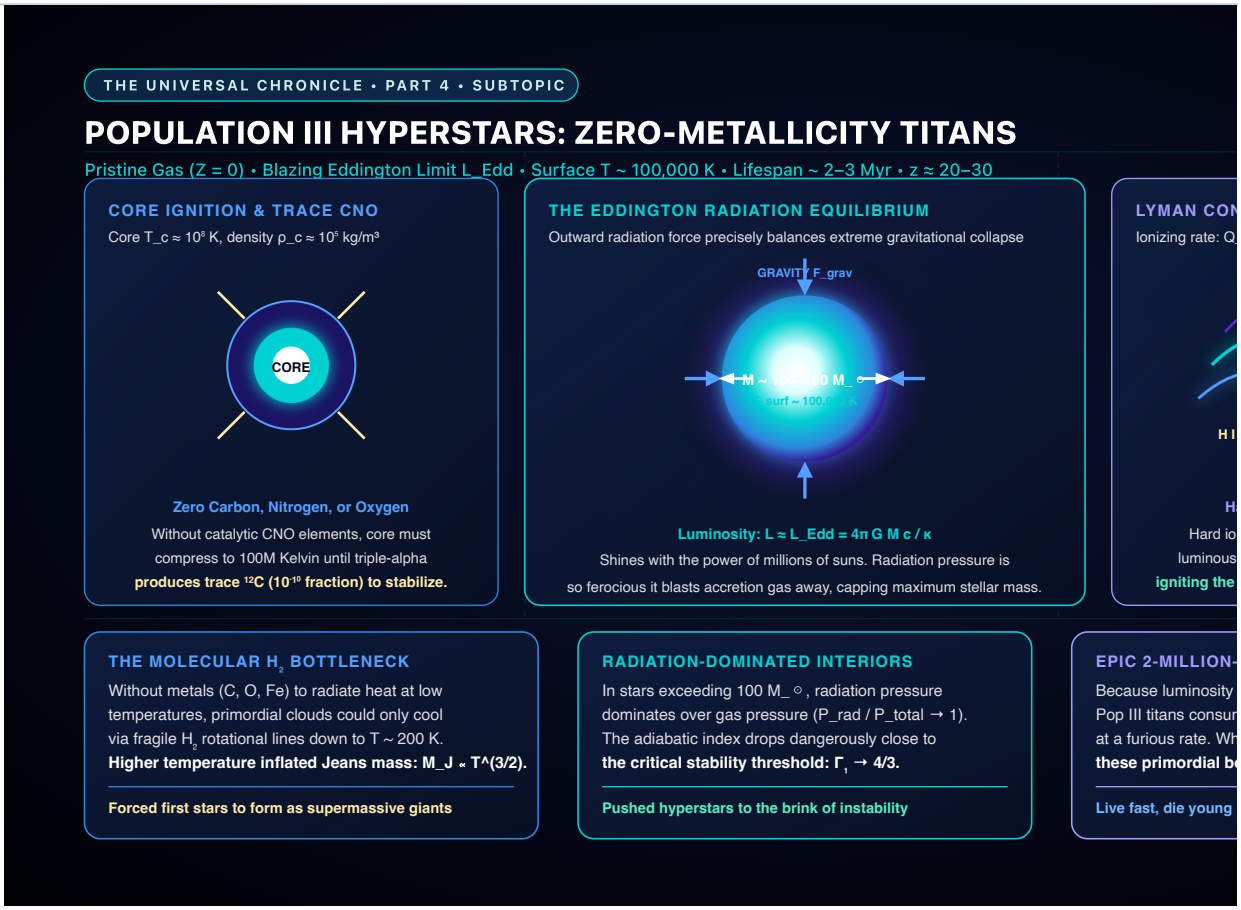
মহাজাগতিক ঊষায় ($z \sim 20\text{–}30$, বিগ ব্যাংয়ের প্রায় ১০ থেকে ২০ কোটি বছর পর) জ্বলে ওঠা নক্ষত্রগুলো আমাদের বর্তমান গ্যালাক্সির কোনো নক্ষত্রের সাথেই তুলনীয় ছিল না। **পপুলেশন ৩ (Population III)** নামে পরিচিত এই দানবগুলোর ভর ছিল **৩০ থেকে ৩০০ সৌর ভরেরও বেশি**।

পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্রের প্রকৃতি
পৃষ্ঠের তাপমাত্রা: যেহেতু তাদের অভ্যন্তরে CNO চক্র ঘটানোর মতো কার্বন ছিল না, তাই পপুলেশন ৩ নক্ষত্রকে তাদের কেন্দ্রের তাপমাত্রা ১০ কোটি কেলভিনে না পৌঁছানো পর্যন্ত সংকুচিত হতে হয়েছিল—যাতে ট্রিপল-আলফা ফিউশন শুরু হতে পারে। এই তীব্র সংকোচনের কারণে তাদের পৃষ্ঠের তাপমাত্রা ফুটন্ত **১,০০,০০০ কেলভিন** ছাড়িয়ে গিয়েছিল (তুলনামূলকভাবে সূর্যের পৃষ্ঠের তাপমাত্রা মাত্র ৫,৭৭৮ K)।

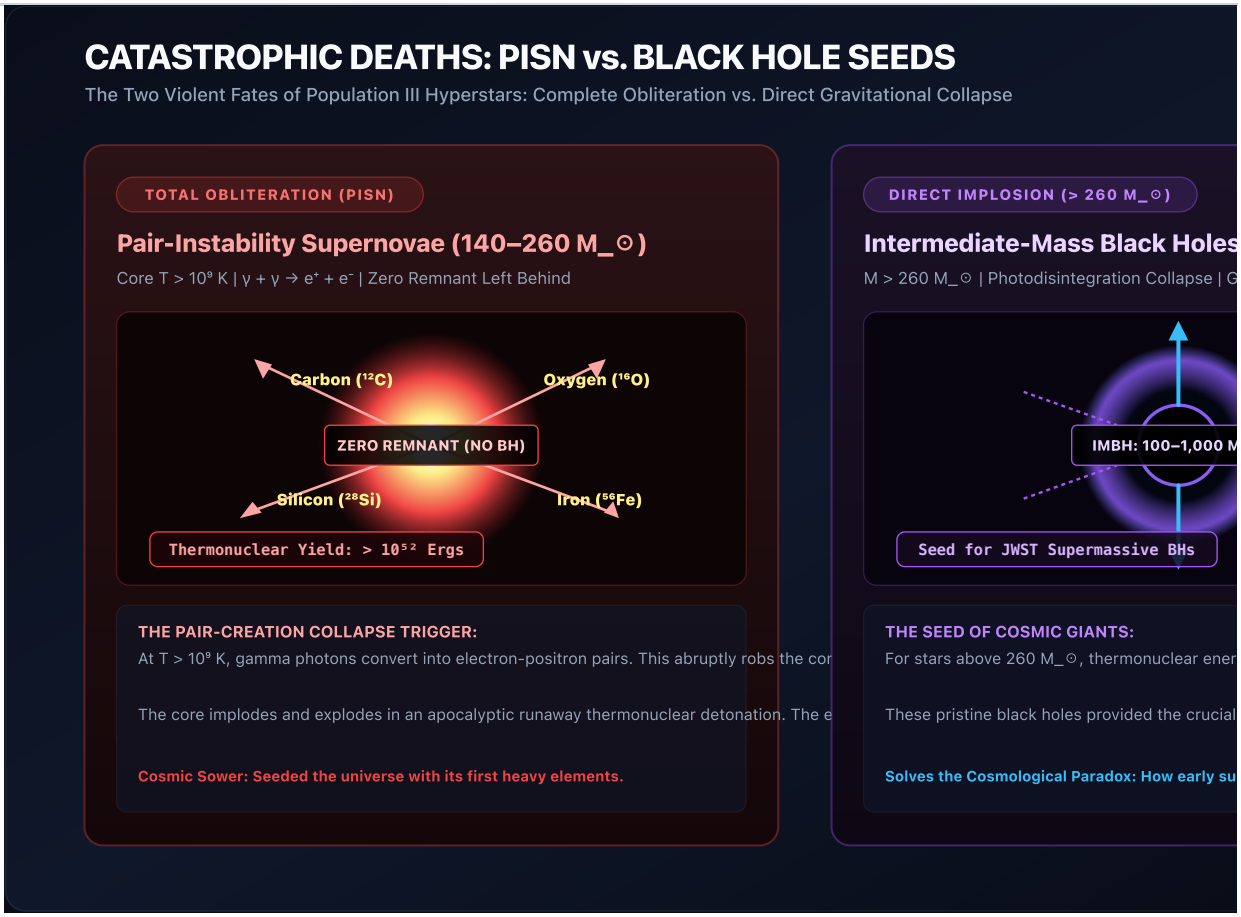
উজ্জ্বলতা: তারা তাত্ত্বিক *এডিংটন সীমার* দ্বারপ্রান্তে জ্বলত, যা সূর্যের চেয়ে লক্ষ লক্ষ গুণ বেশি শক্তি বিকিরণ করত ($L \sim 10^6\text{–}10^7 L_\odot$)। তাদের আলো সাধারণ দৃশ্যমান আলো নয়, বরং অতি-তীব্র চরম অতিবেগুনী (Extreme UV) রশ্মি হিসেবে নির্গত হতো।

পারমাণবিক জ্বালানি অবিশ্বাস্য অপচয়ে পোড়ানোর কারণে পপুলেশন ৩ নক্ষত্রের আয়ু ছিল বিস্ময়কর রকমের সংক্ষিপ্ত। আমাদের সূর্য যেখানে ১০ বিলিয়ন বছর ধরে বাঁচবে, সেখানে ২০০ সৌর ভরের একটি আদিম দানব মাত্র **২০ থেকে ৩০ লক্ষ (২–৩ মিলিয়ন) বছরের** মধ্যেই তার কেন্দ্রের সমস্ত হাইড্রোজেন পুড়িয়ে শেষ করে ফেলত।

Shakil Mahmud • Research Monograph



পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্রের গঠন এবং এডিংটন বিকিরণ সীমা ($z \approx 20\text{–}30$)। আদিম ধাতবহীন ($Z = 0$) হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম গ্যাসে গঠিত এই দানবাকৃতির নক্ষত্রগুলো ($১০০\text{–}৩০০\text{ সৌর ভর}$) তাদের কেন্দ্রস্থ তাপমাত্রা ১০ কোটি কেলভিনে উন্নীত করে ট্রিপল-আলফা প্রক্রিয়ার মাধ্যমে প্রথম কার্বনের জন্ম দেয়। তাত্ত্বিক এডিংটন সীমার কাছাকাছি আলো বিকিরণকারী ($L \sim 10^6\text{–}10^7\ L_\odot$) এবং ১,০০,০০০ কেলভিন পৃষ্ঠ তাপমাত্রার এই নীল টাইটানরা মহাশূন্যকে তীব্র অতিবেগুনী ফোটনে পূর্ণ করে মাত্র ২০-৩০ লাখ বছরের মধ্যেই ধ্বংসের মুখোমুখি হতো।



চিত্র ৪.৩: পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্রের চরম পরিণতি। ১৪০ থেকে ২৬০ সৌর ভরের নক্ষত্রে উচ্চ-শক্তির গামা রশ্মি ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়ায় রূপান্তরিত হয়ে কেন্দ্রস্থ বিকিরণ চাপ কমিয়ে দেয়, যা সর্বগ্রাসী ফিউশন ঘটিয়ে নক্ষত্রটিকে সম্পূর্ণ গুঁড়িয়ে দেয় (কোনো ব্ল্যাক হোল বা অবশিষ্টাংশ ছাড়াই)। ২৬০ সৌর ভরের ঊর্ধ্বে ফটোডিসইন্টিগ্রেশন শক্তি শুষে নিয়ে সরাসরি মাঝারি ভরের ব্ল্যাক হোল (IMBH) তৈরি করে।

প্রলয়ঙ্কর মৃত্যু: পেয়ার-ইনস্ট্যাবিলিটি সুপারনোভা এবং ব্ল্যাক হোলের বীজ

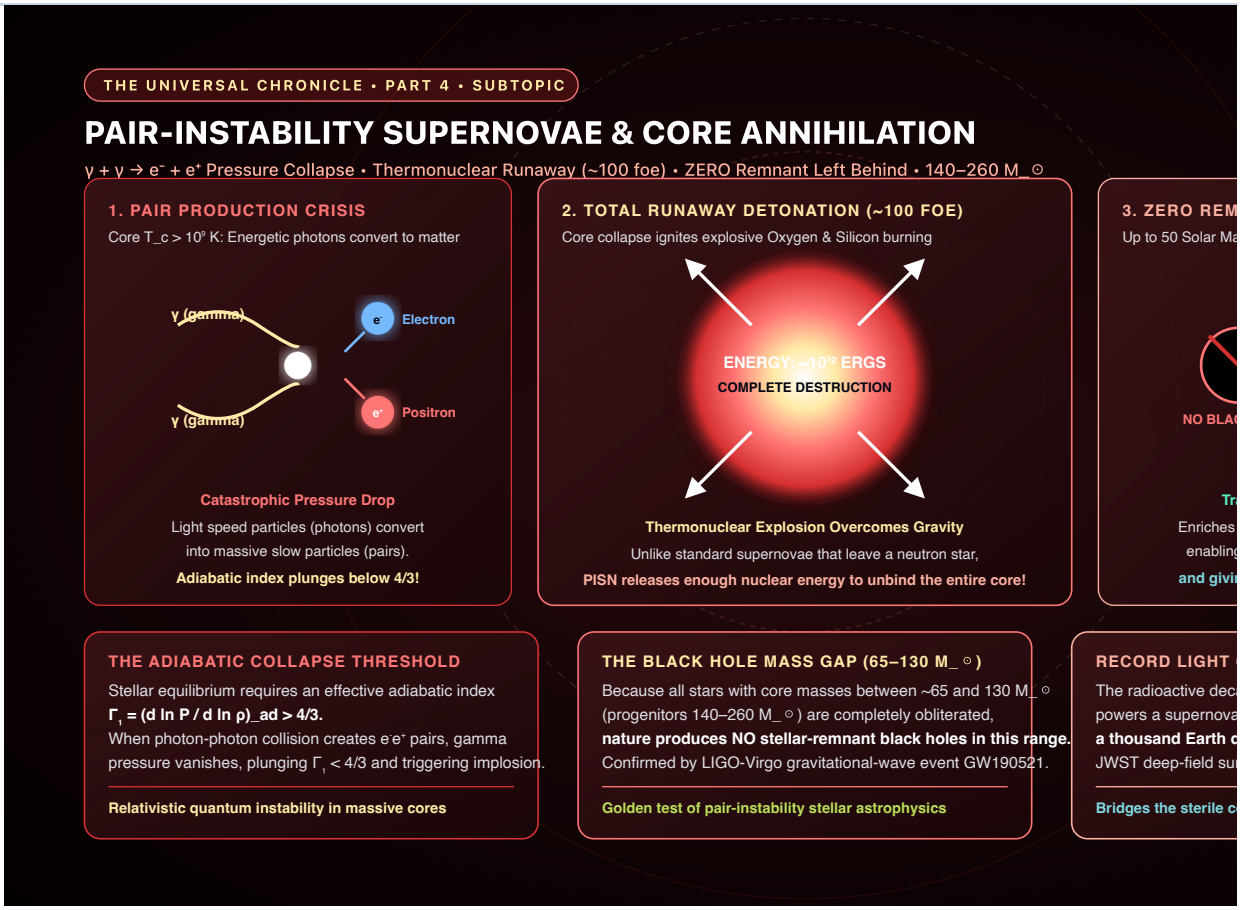
পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র যখন তার কেন্দ্রের জ্বালানি শেষ করে ফেলত, তখন তার পরিণতি নির্ভর করত তার আদি ভরের ওপর—যা মহাজাগতিক ইতিহাসের সবচেয়ে ভয়াবহ বিস্ফোরণগুলোর জন্ম দিয়েছিল:

১. পেয়ার-ইনস্ট্যাবিলিটি সুপারনোভা (১৪০ থেকে ২৬০ সৌর ভর)

যেসব নক্ষত্রের হিলিয়াম কোরের ভর ৬৪ থেকে ১৩৩ সৌর ভরের মাঝে ছিল, তাদের কেন্দ্রের তাপমাত্রা ১০০ কোটি কেলভিনে পৌঁছে যেত। এই সীমানায় ফোটনগুলো এত বেশি শক্তিশালী হয়ে ওঠে যে তারা কোয়ান্টাম যুগল সৃষ্টির মাধ্যমে সরাসরি ইলেকট্রন ও পজিট্রনে রূপান্তরিত হতে শুরু করে ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$)।

এই রূপান্তরের ফলে নক্ষত্রের কেন্দ্রস্থ বিকিরণ চাপ হঠাৎ ধসে পড়ে এবং মহাকর্ষীয় পতন শুরু হয়। আকস্মিক সংকোচনে অক্সিজেন ও সিলিকন এত অবিশ্বাস্য গতিতে বিস্ফোরক ফিউশনে লিপ্ত হয় যে তা নক্ষত্রটির মহাকর্ষীয় বাঁধন শক্তির চেয়েও বেশি থার্মোনিউক্লিয়ার শক্তি নির্গত করে। **একটি একক বিস্ফোরণে সমগ্র নক্ষত্রটি মহাশূন্যে বাষ্পীভূত হয়ে যায়—পেছনে কোনো নিউট্রন স্টার বা ব্ল্যাক হোলের চিহ্নও অবশিষ্ট থাকে না!** ৫০ সৌর ভরের সমতুল্য খাঁটি লোহা, নিকেল, কার্বন ও অক্সিজেন আদিম মহাবিশ্বে ছড়িয়ে পড়ে।

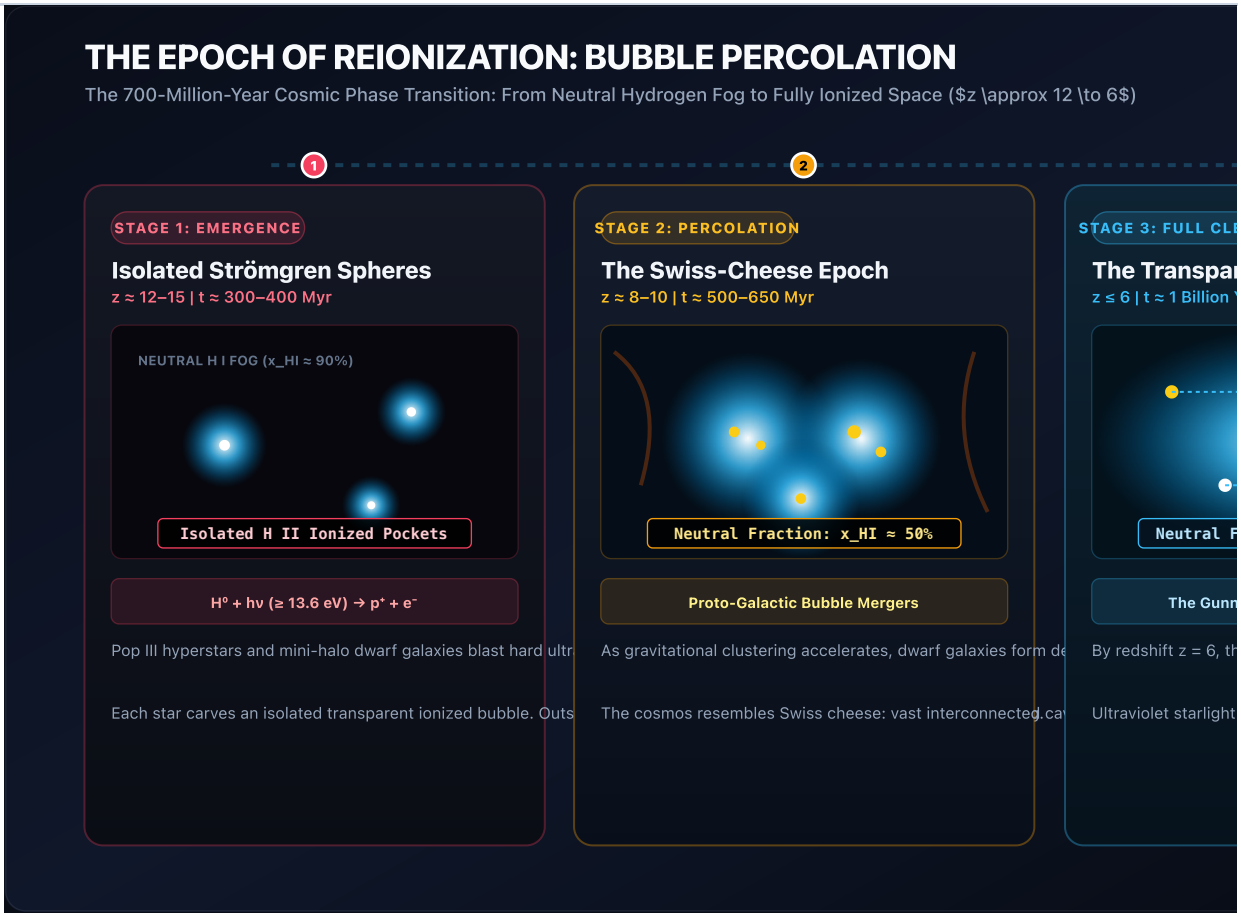
Shakil Mahmud • Research Monograph



পেয়ার-ইনস্ট্যাবিলিটি সুপারনোভা এবং নক্ষত্র কোরের সামগ্রিক বিলুপ্তি (১৪০\text{–}২৬০\text{ সৌর ভর})। ৬৪ সৌর ভরের বেশি হিলিয়াম কোরে (T_c > 10^9\text{ K}), উচ্চ-শক্তির গামা ফোটন স্বতঃস্ফূর্তভাবে ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়ায় ($\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$) রূপান্তরিত হয়। বিকিরণ চাপ বিলুপ্ত হওয়ায় নক্ষত্রের অভ্যন্তরীণ অ্যাডিয়াবেটিক সূচক ৪/৩-এর নিচে নেমে আসে, যা এক প্রলয়ঙ্কর থার্মোনিউক্লিয়ার বিস্ফোরণ ($\sim 10^{52}$ ergs) সৃষ্টি করে কোনো ব্ল্যাক হোল বা নিউট্রন স্টার না রেখেই পুরো নক্ষত্রকে ধূলিসাৎ করে দেয়।

২. সরাসরি ধস ও মাঝারি ভরের ব্ল্যাক হোল (> ২৬০ সৌর ভর)

২৬০ সৌর ভরের চেয়ে ভারী নক্ষত্রগুলোর ক্ষেত্রে থার্মোনিউক্লিয়ার বিস্ফোরণ তাদের অপরিমেয় মাধ্যাকর্ষণকে পরাজিত করতে পারত না। নক্ষত্রটি সরাসরি এবং সম্পূর্ণভাবে ধসে গিয়ে ১০০ থেকে ১,০০০ সৌর ভরের একটি **মাঝারি ভরের ব্ল্যাক হোল (Intermediate-Mass Black Hole বা IMBH)**-এ পরিণত হতো। এই আদিম নক্ষত্রজাত ব্ল্যাক হোলগুলোই ছিল সেই বীজ, যা পরবর্তীতে খাবার খেয়ে আজকের ছায়াপথগুলোর কেন্দ্রের কোটি কোটি সৌর ভরের অতি-দানব ব্ল্যাক হোলে রূপান্তরিত হয়েছে।



চিত্র ৪.৪: পুনরায়নায়ন যুগের (EoR) মহাজাগতিক বিস্তার। $z \approx 20$ থেকে $z \approx 6$ পর্যন্ত পপুলেশন ৩ নক্ষত্র থেকে নির্গত তীব্র অতিবেগুনী রশ্মি চারপাশের গ্যাসকে আয়নিত করে স্ট্রোমগ্রেন বুদবুদ তৈরি করে। গ্যালাক্সির ঘনত্ব বাড়ার সাথে সাথে এই বুদবুদগুলো পরস্পরের সাথে যুক্ত হয়ে সমগ্র মহাবিশ্বের নিরপেক্ষ হাইড্রোজেনের কুয়াশা স্থায়ীভাবে সরিয়ে দেয়।

পুনরায়নায়ন যুগ (EoR): মহাকাশকে পুনরায় আলোকিত করা

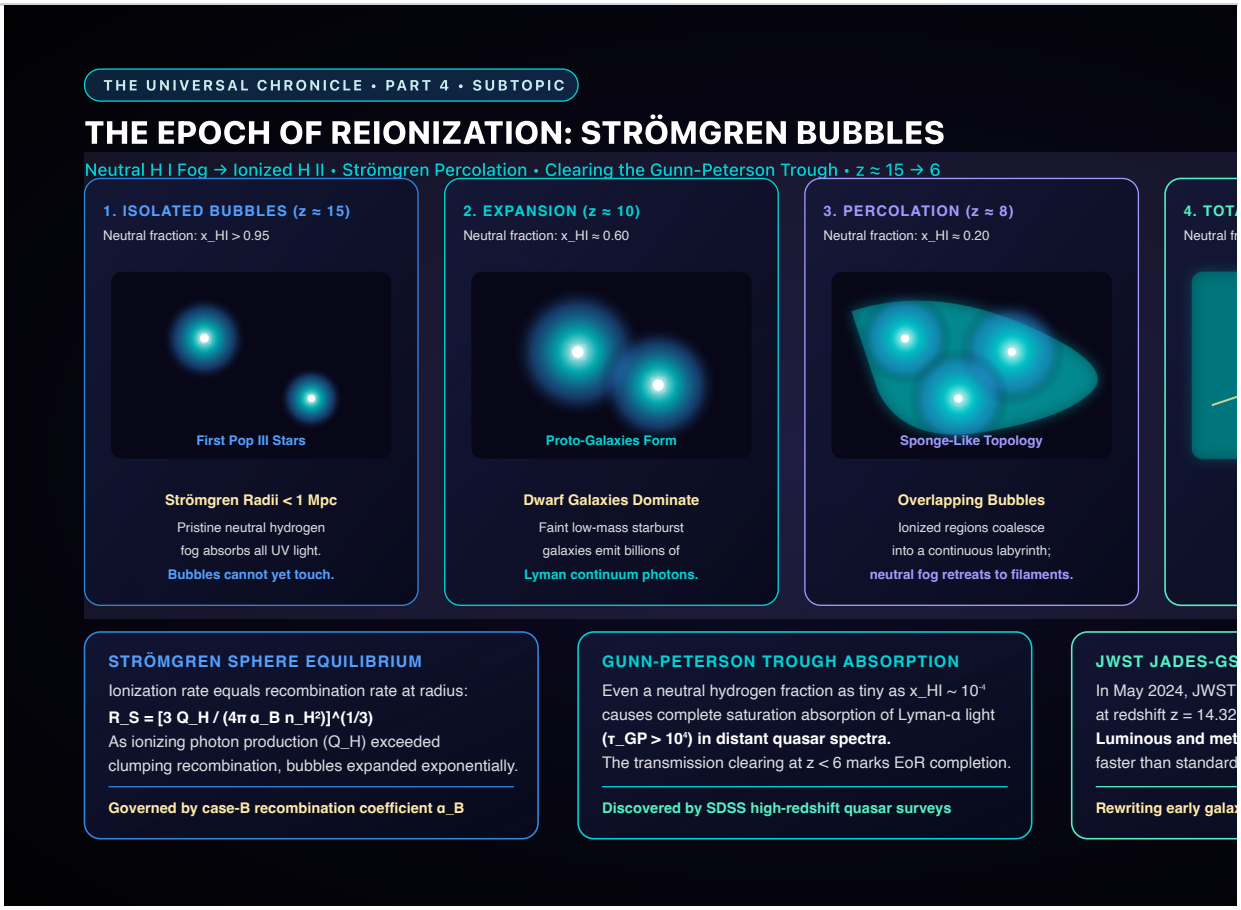
প্রথম নক্ষত্রগুলো প্রজ্বলিত হওয়ার সাথে সাথে তাদের তীব্র অতিবেগুনী বিকিরণ চারপাশের নিরপেক্ষ হাইড্রোজেন গ্যাসকে আবারও ভেঙে আয়নিত করতে শুরু করে। প্রতিটি নক্ষত্র নিজের চারপাশে একটি স্বচ্ছ, আয়নিত প্লাজমার **স্ট্রোমগ্রেন গোলক (Strömgren sphere)** তৈরি করে:

$$\mathrm{H}^0 + h\nu (\geq 13.6\ \mathrm{eV}) \rightarrow p + e^-$$

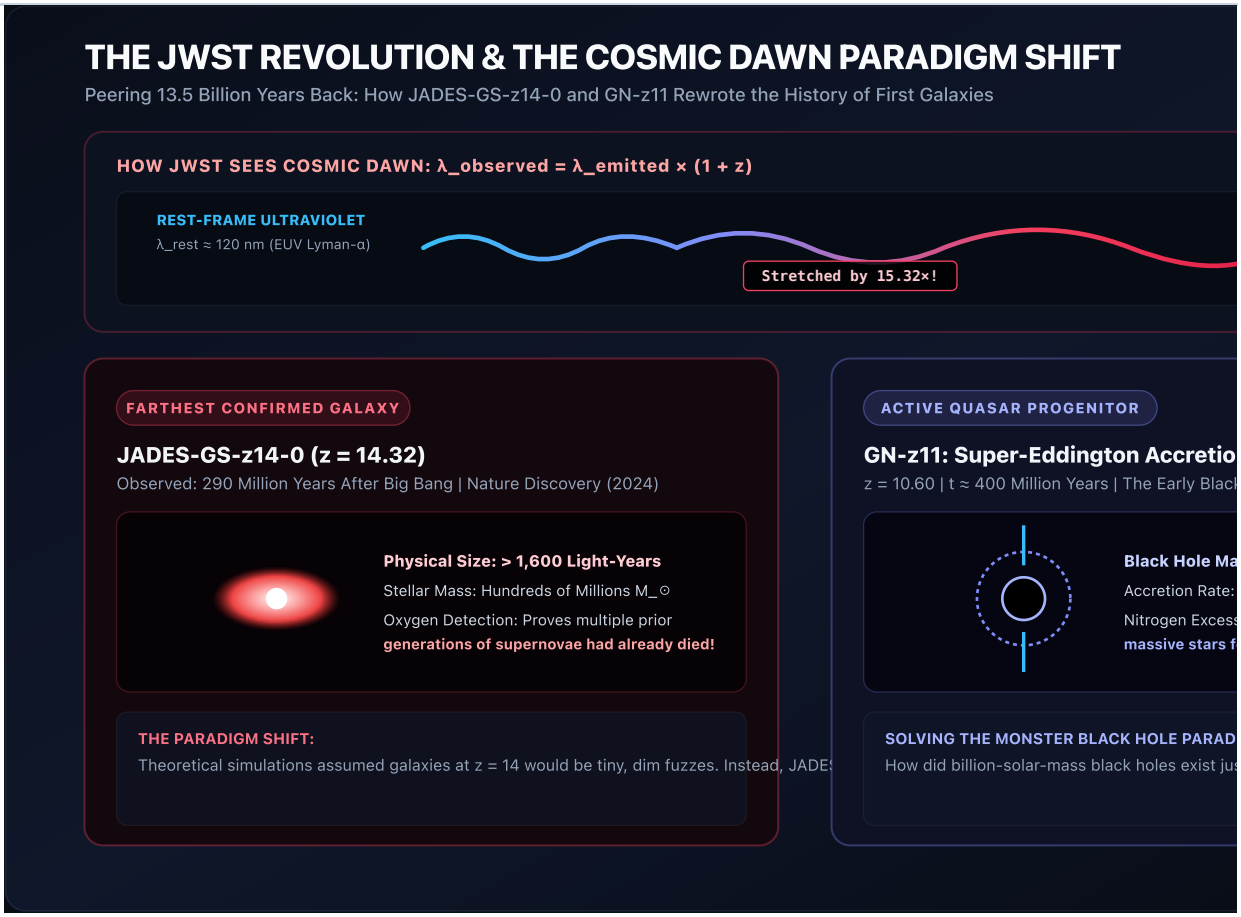
পুনরায়নায়ন যুগ জুড়ে ($z \approx 12 \rightarrow 6$, বিগ ব্যাংয়ের ৩০ কোটি থেকে ১০০ কোটি বছর পর্যন্ত) এই বিচ্ছিন্ন আয়নিত বুদবুদগুলো প্রসারিত হতে থাকে এবং একসময় একে অপরের সাথে মিশে যায়। লোহিত অপসরণ $z \approx 6$-এ পৌঁছাতে পৌঁছাতে আন্তঃগ্যালাকটিক মহাশূন্যের ৯৯.৯%-এরও বেশি হাইড্রোজেন পুনরায় একটি উষ্ণ, আয়নিত প্লাজমায় ($T \sim 10^4\ \mathrm{K}$) রূপান্তরিত হয়।

দূরবর্তী কোয়েসারের আলো পর্যবেক্ষণ করে জ্যোতির্বিজ্ঞানীরা **গান-পিটারসন ট্রফ (Gunn-Peterson Trough)**-এর মাধ্যমে এই রূপান্তরের প্রমাণ পেয়েছেন: z > 6.2-এ দূরবর্তী কোয়েসারের লাইম্যান-আলফা বর্ণালী নিরপেক্ষ হাইড্রোজেনের কুয়াশায় সম্পূর্ণ শোষিত হয়ে যায়, কিন্তু z < 6-এ মহাবিশ্ব আবারও অতিবেগুনী আলোর জন্য সম্পূর্ণ স্বচ্ছ হয়ে ওঠে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



পুনরায়নায়ন যুগে স্ট্রোমগ্রেন বুদবুদের সম্প্রসারণ ও মিলন ($z \approx 15 \to 6$)। মহাজাগতিক পুনরায়নায়নের পর্যায়ক্রমিক বিবর্তন: পপুলেশন ৩ নক্ষত্রদের দ্বারা সৃষ্ট বিচ্ছিন্ন আয়নিত হাইড্রোজেন গোলক (H_{II}) আদিম বামন গ্যালাক্সিগুলোর অতিবেগুনী বিকিরণের প্রভাবে দ্রুত প্রসারিত হয়ে একে অপরের সাথে যুক্ত হয়। বুদবুদগুলো একত্রিত হয়ে এক স্বচ্ছ মহাজাগতিক স্পঞ্জ গঠন করে, যার ফলে লোহিত অপসরণ $z \approx 6$-এ এসে গান-পিটারসন ট্রফ সম্পূর্ণ দূর হয়ে মহাবিশ্ব পুনরায় আলোক-স্বচ্ছ হয়ে ওঠে।



চিত্র ৪.৫: জেমস ওয়েব স্পেস টেলিস্কোপের উচ্চ-লোহিত অপসরণ বিপ্লব। JWST-এর পর্যবেক্ষণ (যেমন $z = 14.32$-এ বিগ ব্যাংয়ের মাত্র ২৯ কোটি বছর পরের গ্যালাক্সি JADES-GS-z14-0) অপ্রত্যাশিতভাবে উজ্জ্বল ও বিশালাকার আদিম গ্যালাক্সি উন্মোচন করেছে—যা ইঙ্গিত করে অন্ধকার যুগের গভীরে নক্ষত্র গঠন তাত্ত্বিক পূর্বাভাসের চেয়েও অনেক দ্রুত ও দক্ষ ছিল।

জেমস ওয়েব স্পেস টেলিস্কোপের (JWST) বিপ্লব

২০২১ সালের ক্রিসমাসের দিনে উৎক্ষেপিত নাসার জেমস ওয়েব স্পেস টেলিস্কোপকে বিশেষভাবে তৈরি করা হয়েছিল মহাজাগতিক লোহিত অপসরণ ভেদ করে প্রথম গ্যালাক্সিগুলোর অবলোহিত আলো ধরার জন্য। প্রথম দুই বছরের অপারেশনেই JWST পূর্ববর্তী সমস্ত তাত্ত্বিক মডেলকে স্তম্ভিত করে দিয়েছে:

- **JADES-GS-z14-0 ($z = 14.32$):** বিগ ব্যাংয়ের মাত্র ২৯ কোটি বছর পরের এই গ্যালাক্সিটি ১,৬০০ আলোকবর্ষ জুড়ে বিস্তৃত এবং এতে কোটি কোটি সৌর ভরের নক্ষত্র রয়েছে—যা প্রমাণ করে অন্ধকার যুগের গভীরে নক্ষত্র সৃষ্টির প্রক্রিয়া বিজ্ঞানীদের ধারণার চেয়েও অনেক দ্রুত ও তীব্র ছিল।
- **GN-z11 ($z = 10.6$):** বিগ ব্যাংয়ের মাত্র ৪০ কোটি বছর পরেই এই গ্যালাক্সির কেন্দ্রে একটি সক্রিয় অতি-দানব ব্ল্যাক হোল শনাক্ত হয়েছে, যা তাত্ত্বিক এডিংটন সীমার চেয়ে পাঁচ গুণ দ্রুত গতিতে আশপাশের পদার্থ গ্রাস করছিল।

কালানুক্রমিক সারণী: অন্ধকার যুগ থেকে মহাজাগতিক ঊষা

মহাজাগতিক যুগ	লোহিত অপসরণ (z)	অতিবাহিত সময় (t)	প্রধান বৈশিষ্ট্যসমূহ
অন্ধকার যুগের সর্বনিম্ন স্তর	z \approx 30\text{–}50	৫ কোটি থেকে ১০ কোটি বছর	শীতল অন্ধকার পদার্থের মিনি-হ্যালো গঠিত হয়; আদিম গ্যাস জমা হয়; H_2 আণবিক শীতলীকরণ শুরু হয়।
পপুলেশন ৩ নক্ষত্রের প্রজ্বলন	z \approx 20\text{–}30	১০ কোটি থেকে ১৮ কোটি বছর	প্রথম নক্ষত্রের জন্ম; ভর ৫০–৩০০ সৌর ভর; অতিবেগুনী রশ্মি প্রথম স্ট্রোমগ্রেন গোলক তৈরি করে।
প্রথম সুপারনোভা ও রাসায়নিক সমৃদ্ধি	z \approx 15\text{–}20	১৮ কোটি থেকে ২৭ কোটি বছর	পেয়ার-ইনস্ট্যাবিলিটি সুপারনোভায় প্রথম নক্ষত্রগুলোর বিস্ফোরণ; মহাবিশ্বে প্রথম কার্বন, অক্সিজেন ও লোহার বিস্তার; পপুলেশন ২ নক্ষত্রের সূচনা।
আদিম গ্যালাক্সির সমাবেশ	z \approx 10\text{–}15	২৭ কোটি থেকে ৪৮ কোটি বছর	মিনি-হ্যালো সংযুক্ত হয়ে বামন গ্যালাক্সি তৈরি করে (JADES-GS-z14-0, GN-z11); ব্ল্যাক হোলের আদিম বৃদ্ধি।
পুনরায়নায়নের সমাপ্তি	z \approx 6\text{–}8	৬৫ কোটি থেকে ১০০ কোটি বছর	আয়নিত বুদবুদগুলো একত্রিত হয়; আন্তঃগ্যালাকটিক মাধ্যম >৯৯.৯% আয়নিত হয়; গান-পিটারসন ট্রফ স্বচ্ছ হয়।

Shakil Mahmud • Research Monograph

মহাজাগতিক উত্তরাধিকার: রাসায়নিকভাবে রূপান্তরিত মহাবিশ্ব

পপুলেশন ৩ নক্ষত্রের যুগ ছিল সংক্ষিপ্ত, প্রলয়ঙ্কর এবং মহাবিশ্বের জন্য সম্পূর্ণ রূপান্তরমূলক। তাদের পূর্বে মহাবিশ্ব ছিল কেবল হাইড্রোজেন ও হিলিয়ামের এক অনুর্বর জগৎ। নিজেদের অতি-উত্তপ্ত পারমাণবিক চুল্লিতে এবং পেয়ার-ইনস্ট্যাবিলিটি সুপারনোভার বিস্ফোরণের মাধ্যমে এই আদিম দানবগুলো মহাশূন্যে ছড়িয়ে দেয় পর্যায় সারণীর প্রথম ভারী মৌলগুলো—কার্বন, নাইট্রোজেন, অক্সিজেন, ম্যাগনেসিয়াম ও সিলিকন।

মহাবিশ্বের ধাতবতা যখন একটি সংকটকালীন সীমা ($Z_{\rm crit} \approx 10^{-5.5} Z_\odot$) অতিক্রম করল, তখন ধূলিকণা তৈরি হলো এবং মহাবিশ্ব চিরতরে প্রবেশ করল **পপুলেশন ২ নক্ষত্রের প্রজন্মে**—যা ছিল আকারে ছোট, দীর্ঘায়ু এবং গ্রহজগৎ গঠনে সক্ষম। *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের* **পঞ্চম পর্বে** আমরা অন্বেষণ করব সেই নক্ষত্রজগতের মহান রূপকারদের: **মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম**।

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Barkana, R., & Loeb, A. (2001).** “In the beginning: the first sources of light and the reionization of the universe.” *Physics Reports*, 349(2), 125–238. doi:10.1016/S0370-1573(01)00019-9.
- **Bromm, V., & Larson, R. B. (2004).** “The First Stars.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42(1), 79–118. doi:10.1146/annurev.astro.42.053102.134034.
- **Heger, A., & Woosley, S. E. (2002).** “The Nucleosynthetic Signature of Population III.” *The Astrophysical Journal*, 567(1), 532–543. doi:10.1086/338487.
- **Fan, X., Carilli, C. L., & Keating, B. (2006).** “Observational Constraints on Cosmic Reionization.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 44(1), 415–462. doi:10.1146/annurev.astro.44.051905.092521.
- **Robertson, B. E., et al. (2015).** “Cosmic reionization and early star-forming galaxies: a joint analysis of new constraints from Planck and the Hubble Space Telescope.” *The Astrophysical Journal Letters*, 802(2), L19. doi:10.1088/2041-8205/802/2/L19.
- **Carniani, S., et al. (JADES Collaboration) (2024).** “A shining cosmic dawn: spectroscopic confirmation of two luminous galaxies at $z \sim 14$.” *Nature*, 633, 318–322. doi:10.1038/s41586-024-07680-y.
- **Gunn, J. E., & Peterson, B. A. (1965).** “On the Density of Neutral Hydrogen in Intergalactic Space.” *The Astrophysical Journal*, 142, 1633–1636. doi:10.1086/148444.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "মহাজাগতিক ঊষা — পপুলেশন ৩ দানব নক্ষত্র, প্রথম গ্যালাক্সি এবং পুনরায়নায়ন যুগ"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৪। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-4-cosmic-dawn-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • পঞ্চম খণ্ড

মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম

মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম

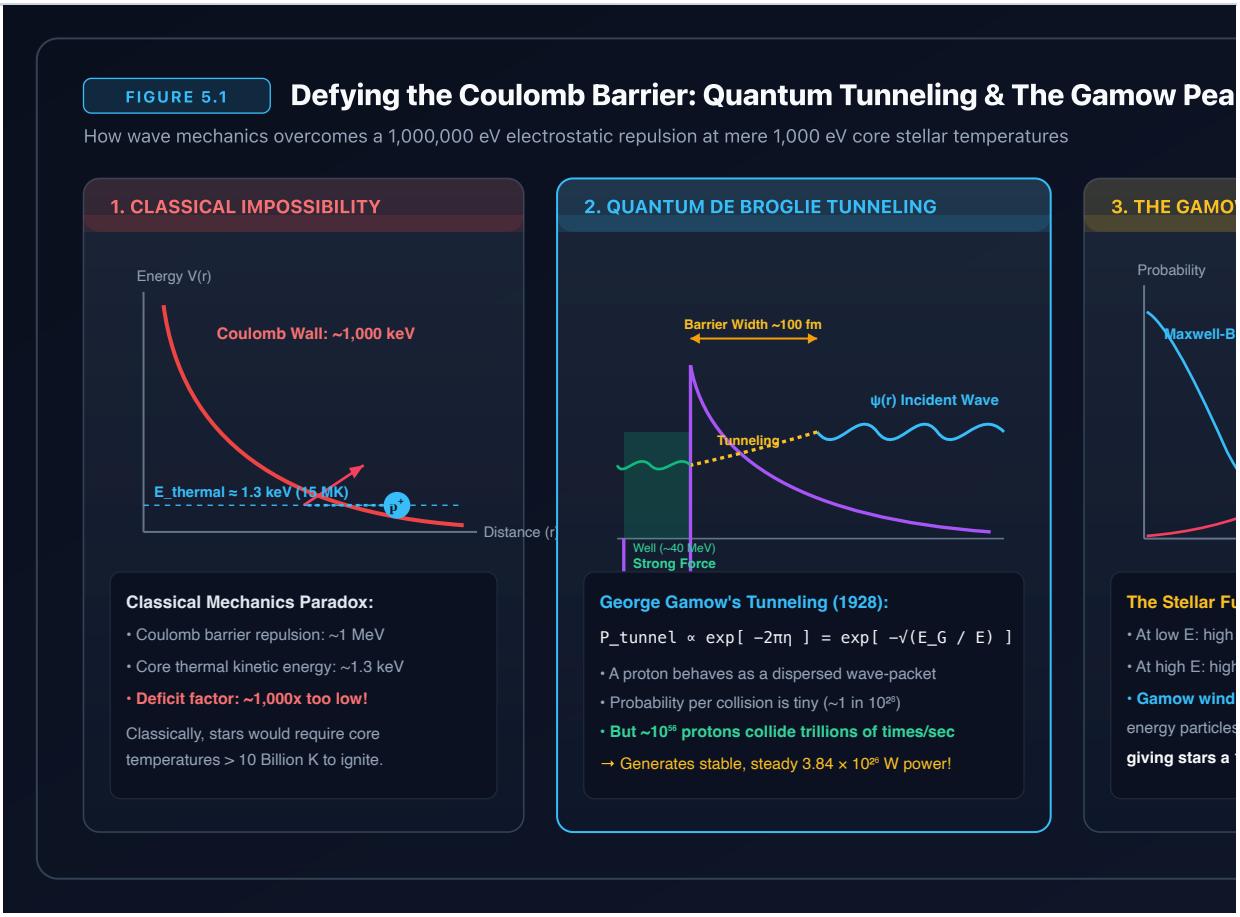
2,234 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৫: *চিত্র: একটি বিশালাকার তারার গর্ভে পেঁয়াজের খোসার মতো স্তরে স্তরে পারমাণবিক ফিউশন এবং প্রলয়ংকরী সুপারনোভা বিস্ফোরণ; এর মাধ্যমে কার্বন, অক্সিজেন, লোহা ও গোল্ডের মতো ভারী মৌল মহাবিশ্বে ছড়িয়ে পড়ে।*

বিগ ব্যাং ছিল এক চরম রক্ষণশীল রসায়নবিদ: অস্তিত্বের প্রথম বিশ মিনিটে এটি কেবল সবচেয়ে সরল তিনটি মৌল তৈরি করেছিল—হাইড্রোজেন, হিলিয়াম এবং সামান্য লিথিয়াম। মহাবিশ্ব যদি কেবল বিগ ব্যাংয়ের ওপর নির্ভর করত, তবে সমগ্র মহাশূন্য পাথর, পানি, মাটি কিংবা জীবনের অস্তিত্বহীন এক শীতল মরুভূমি হিসেবে থেকে যেত। একটি জীবন্ত মহাবিশ্ব গড়ে তুলতে প্রয়োজন ছিল মহাজাগতিক কিমিয়াবিদদের: দানবাকৃতির নক্ষত্রসমূহ, যা তাদের ফুটন্ত পারমাণবিক চুল্লিতে হালকা পরমাণুগুলোকে পিষে পর্যায় সারণীর রত্নভাণ্ডারে রূপ দিয়েছে, সুপারনোভার প্রলয়ঙ্কর অগ্নিকাণ্ডে আত্মাহুতি দিয়েছে, এবং মৃত নিউট্রন নক্ষত্রের সংঘর্ষে মহাবিশ্ব জুড়ে ছড়িয়ে দিয়েছে গ্রহ ও জীবনের বীজ।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৫.১: কুলম্বের প্রাচীর অতিক্রম (কোয়ান্টাম টানেলিং এবং গ্যামো পিক)। সমধর্মী ধনাত্মক চার্জযুক্ত দুটি প্রোটনের মাঝে ১০ লাখ ইলেকট্রনভোল্টের কুলম্ব বিকর্ষণ প্রাচীর থাকে, যা চিরায়ত তাপীয় শক্তিতে অতিক্রম করা অসম্ভব। কিন্তু প্রোটনকে ডি ব্রগলি কণা-তরঙ্গ হিসেবে বিবেচনা করলে কোয়ান্টাম টানেলিং সম্ভাব্যতা ও ম্যাক্সওয়েল-বোল্টজম্যান তাপীয় লেজের সংযোগে একটি সংকীর্ণ শক্তি ক্ষেত্র তৈরি হয়—যাকে বলে গ্যামো পিক (১৫–২৫ keV)—যার কারণে শত কোটি বছর ধরে নক্ষত্র শান্তভাবে জ্বলতে পারে।

নাক্ষত্রিক ইঞ্জিন: নক্ষত্র কীভাবে কুলম্ব বিকর্ষণকে পরাস্ত করে

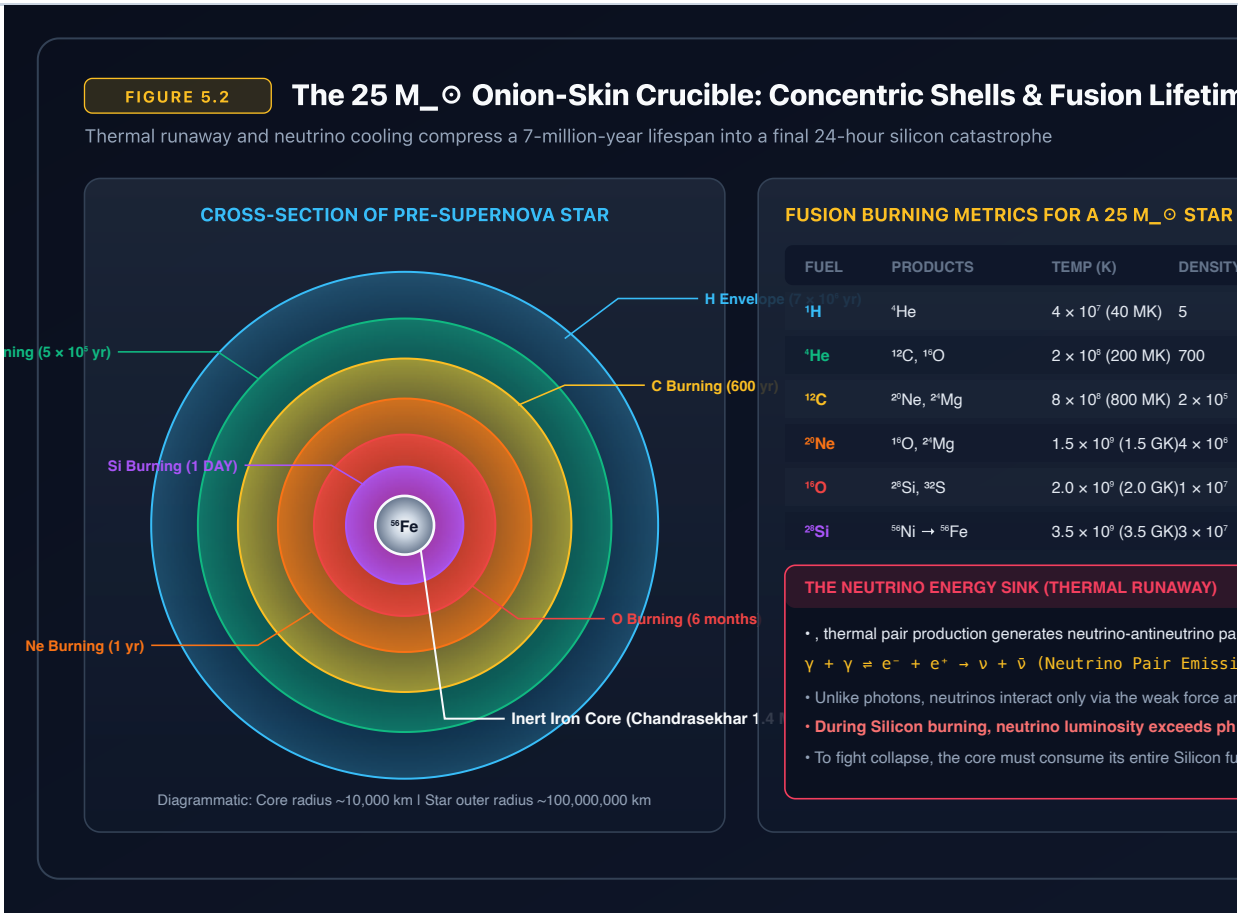
প্রতিটি পারমাণবিক নিউক্লিয়াস তার পারমাণবিক সংখ্যা (Z)-এর সমান ধনাত্মক বৈদ্যুতিক চার্জ বহন করে। কুলম্বের সূত্রানুসারে সমধর্মী চার্জ পরস্পরকে বিকর্ষণ করে; তাই দুটি নিউক্লিয়াস যত কাছে আসতে চায়, তাদের মধ্যবর্তী ইলেক্ট্রোস্ট্যাটিক বিকর্ষণ প্রাচীর তত রৈখিকভাবে বাড়তে থাকে:

$$U_C(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

চিরায়ত নিউটোনীয় পদার্থবিজ্ঞানের নিয়মে দুটি প্রোটনকে এই বাধা অতিক্রম করে একে অপরের সাথে মিশে যেতে হলে নক্ষত্রের ভেতরের তাপমাত্রা হতে হতো ১০০ কোটি কেলভিনেরও বেশি (10^9 K)—যেখানে আমাদের সূর্যের মতো নক্ষত্রের কেন্দ্রের তাপমাত্রা মাত্র দেড় কোটি কেলভিন (1.5×10^7 K)। তাহলে নক্ষত্র কীভাবে জ্বলে?

কোয়ান্টাম টানেলিং এবং গ্যামো উইন্ডো (জর্জ গ্যামো, ১৯২৮)
১৯২৮ সালে পদার্থবিদ জর্জ গ্যামো দেখান যে কোয়ান্টাম বলবিদ্যায় কণিকাসমূহ তরঙ্গের মতো আচরণ করে। একটি প্রোটনের কাছে কুলম্ব প্রাচীর টপকানোর মতো ক্লাসিক্যাল গতিশক্তি না থাকলেও, তার একটি নির্দিষ্ট সম্ভাবনা ($P \propto \exp[-2\pi\eta_G]$) থাকে সরাসরি **সেই দুর্ভেদ্য প্রাচীর ভেদ করে সুড়ঙ্গ বা টানেল তৈরি করে ওপারে চলে যাওয়ার**—যেখানে শক্তিশালী নিউক্লীয় বল ($r \approx 10^{-15}$ m) তাকে পরম মমতায় জড়িয়ে ধরে। ম্যাক্সওয়েল-বোল্টজম্যান গতিশক্তি বণ্টন এবং কোয়ান্টাম টানেলিং সম্ভাবনার গুণফলের ফলে একটি অতি-সংকীর্ণ সোনালী শক্তিমাত্রা তৈরি হয়—যাকে বলে **গ্যামো উইন্ডো (Gamow Window)**। এর ফলেই কোটি কোটি বছর ধরে নক্ষত্র শান্ত ও নিয়ন্ত্রিতভাবে জ্বলতে পারে।

সূর্যের সমান ভরের নক্ষত্রগুলোতে হাইড্রোজেন হিলিয়ামে রূপান্তরিত হয় মূলত **প্রোটন-প্রোটন (p-p) শৃঙ্খলের** মাধ্যমে, যা প্রতিটি হিলিয়াম-৪ নিউক্লিয়াসে ২৬.৭৩ মেগা-ইলেকট্রনভোল্ট শক্তি নির্গত করে। অন্যদিকে সূর্যের চেয়ে ১.৩ গুণ ভারী নক্ষত্রগুলোতে কেন্দ্রের তাপমাত্রা ১ কোটি ৮০ লাখ কেলভিন ছাড়িয়ে যাওয়ায় সেখানে প্রাধান্য বিস্তার করে **কার্বন-নাইট্রোজেন-অক্সিজেন (CNO) চক্র**, যেখানে কার্বন ক্যাটালিস্ট বা অনুঘটক হিসেবে কাজ করে তীব্র গতিতে ফিউশন ঘটায়।



চিত্র ৫.২: পেঁয়াজের খোসার মতো স্তরযুক্ত নাক্ষত্রিক চুল্লি এবং দহনকাল। একটি বিশাল নক্ষত্র যখন একের পর এক জ্বালানি পুড়িয়ে ফেলে, তখন কেন্দ্রের চারপাশে পেঁয়াজের খোসার মতো সমকেন্দ্রী ফিউশন স্তর তৈরি হয়। ১০০ কোটি কেলভিনের উপরে নিউট্রিনো নিঃসরণ সরাসরি মহাকাশে শক্তি শুষে নেয়—যার ফলে হাইড্রোজেনের ৭০ লাখ বছরের আয়ু কার্বনের জন্য ৬০০ বছর, অক্সিজেনের জন্য ৬ মাস এবং সিলিকনের ক্ষেত্রে মাত্র ২৪ ঘণ্টার এক চূড়ান্ত দৌড়ে সংকুচিত হয়ে আসে।

পেঁয়াজের খোসার মতো স্তরযুক্ত চুল্লি: ২৫ সৌর ভরের নক্ষত্রের ৬টি দহন পর্যায়

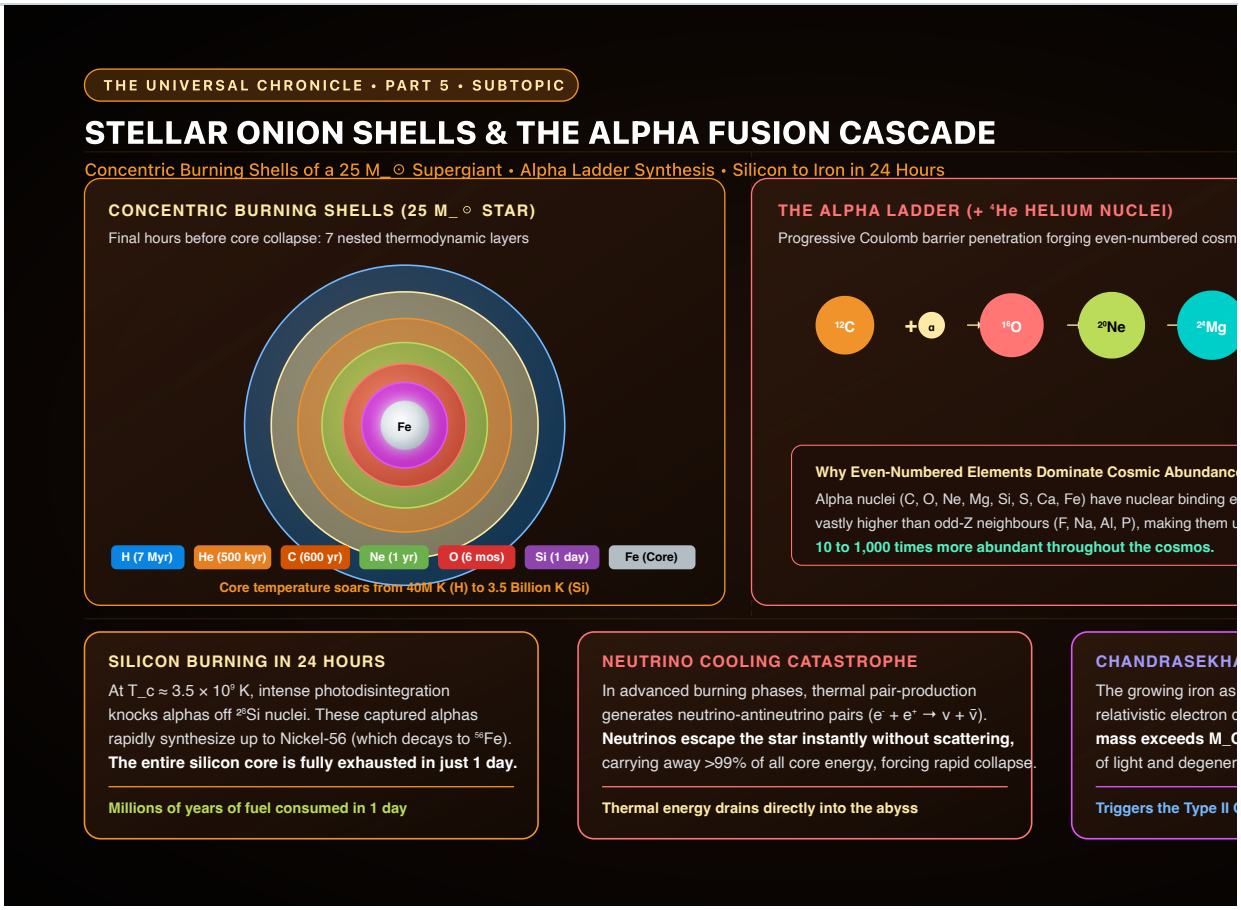
সূর্যের চেয়ে ৮ গুণ বা তার বেশি ভারী একটি নক্ষত্র যখন তার কেন্দ্রের হাইড্রোজেন পুড়িয়ে ফেলে, তখন তার ভেতরের হাইড্রোস্ট্যাটিক ভারসাম্য ভেঙে পড়ে। বিকিরণ চাপ কমে যাওয়ায় মাধ্যাকর্ষণ তার নিষ্ক্রিয় হিলিয়াম কোরকে সংকুচিত করতে থাকে, যার ফলে কেন্দ্রের তাপমাত্রা ২০ কোটি কেলভিনে এবং ঘনত্ব প্রতি ঘন সেন্টিমিটারে ১০,০০০ গ্রামে উন্নীত হয়। এই তাপমাত্রায় শুরু হয় **ট্রিপল-আলফা প্রক্রিয়া**:

$$3\,{}^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + \gamma \quad \text{এবং পরবর্তীতে} \quad {}^{12}\mathrm{C} + {}^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O} + \gamma$$

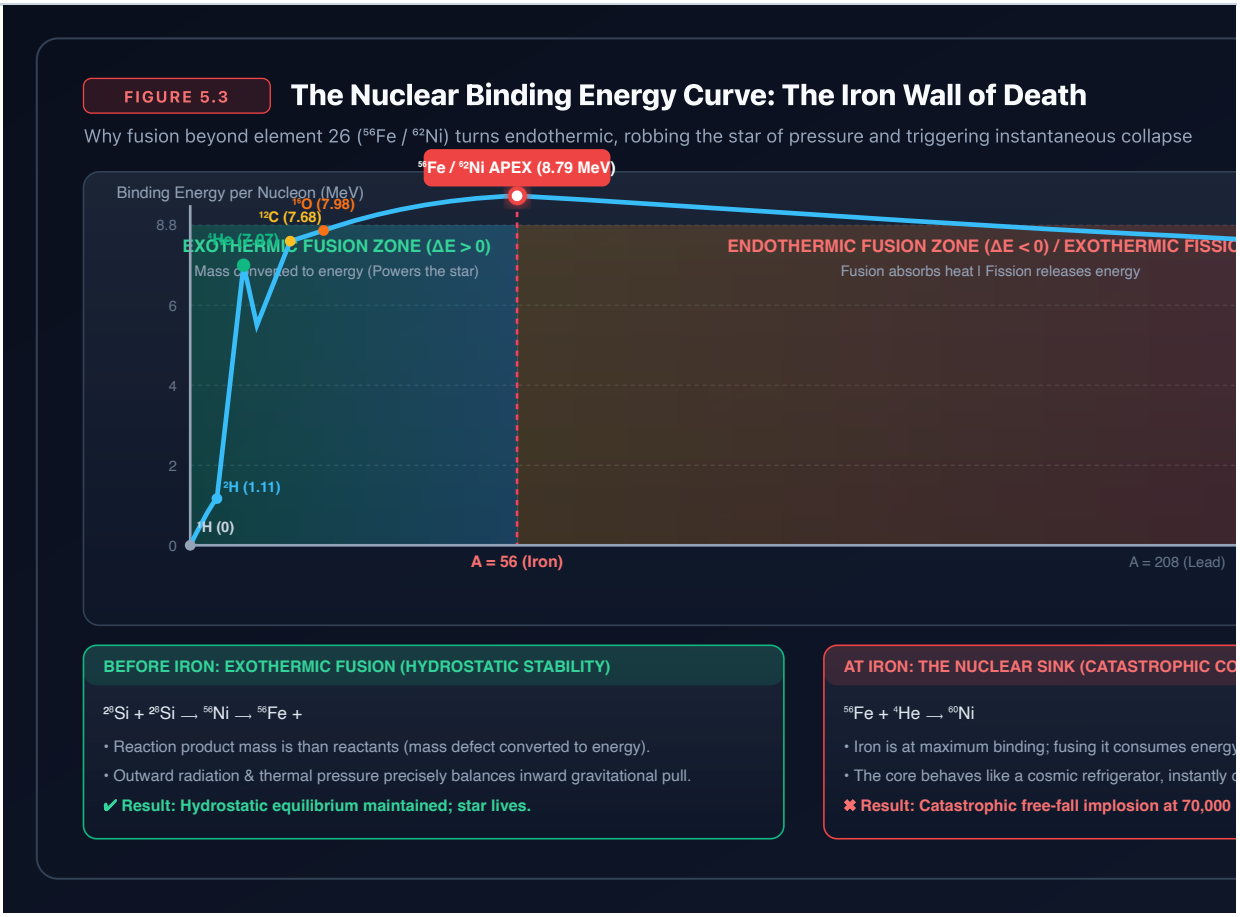
জ্বালানি শেষ হওয়া, মহাকর্ষীয় সংকোচন, তাপমাত্রা বৃদ্ধি এবং পরবর্তী ভারী মৌলের প্রজ্বলনের এই চক্রটি ক্রমান্বয়ে দ্রুত ও উন্মত্ত গতিতে ঘটতে থাকে। দানবাকৃতির একটি বিবর্তিত নক্ষত্রের অভ্যন্তর তখন সমকেন্দ্রী **পেঁয়াজের খোসার মতো স্তরযুক্ত কাঠামোয়** রূপান্তরিত হয়:

- **১. হাইড্রোজেন দহন স্তর ($T \sim ৪ \times ১০^৭$ K):** হাইড্রোজেন পুড়ে হিলিয়াম হয়। সময়কাল: $\approx$ ৭ মিলিয়ন (৭০ লাখ) বছর।
- **২. হিলিয়াম দহন স্তর ($T \sim ২ \times ১০^৮$ K):** হিলিয়াম পুড়ে কার্বন ও অক্সিজেন তৈরি করে। সময়কাল: $\approx ৫,০০,০০০$ বছর।
- **৩. কার্বন দহন স্তর ($T \sim ৮ \times ১০^৮$ K):** ${}^{12}\mathrm{C} + {}^{12}\mathrm{C} \rightarrow {}^{20}\mathrm{Ne}, {}^{24}\mathrm{Mg}, {}^{23}\mathrm{Na}$। সময়কাল: $\approx$ ৬০০ বছর।
- **৪. নিয়ন দহন স্তর ($T \sim ১.৫ \times ১০^৯$ K):** ফটোডিসইন্টিগ্রেশনের মাধ্যমে আলফা ক্যাপচার: ${}^{20}\mathrm{Ne}(\alpha,\gamma){}^{24}\mathrm{Mg}$। সময়কাল: $\approx$ ১ বছর।
- **৫. অক্সিজেন দহন স্তর ($T \sim ২.০ \times ১০^৯$ K):** ${}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} \rightarrow {}^{28}\mathrm{Si}, {}^{32}\mathrm{S}, {}^{31}\mathrm{P}$। সময়কাল: $\approx$ ৬ মাস।
- **৬. সিলিকন দহন কোর ($T \sim ৩.৫ \times ১০^৯$ K):** দ্রুত আলফা ক্যাপচারের মাধ্যমে সিলিকন পুড়ে নিকেল-৫৬ তৈরি হয়, যা তেজস্ক্রিয় ক্ষয়ে লোহা-৫৬-তে রূপ নেয়। সময়কাল: **মাত্র ২৪ ঘণ্টা!**

Shakil Mahmud • Research Monograph



২৫ সৌর ভরের সুপারজায়ান্ট নক্ষত্রের পেঁয়াজের খোসার মতো স্তরযুক্ত গঠন ও আলফা মই ফিউশন। মহাকর্ষীয় সংকোচন কেন্দ্রস্থ তাপমাত্রাকে ৩.৫ বিলিয়ন কেলভিনে উন্নীত করে সিলিকন দহন চালু করে। ধারাবাহিক আলফা কণা সংযোজনের ($+^{4}\mathrm{He}$) মাধ্যমে মহাবিশ্বের প্রধান মৌলিক পদার্থসমূহ ($^{12}\mathrm{C} \rightarrow^{16} \mathrm{O} \rightarrow^{20} \mathrm{Ne} \rightarrow^{24} \mathrm{Mg} \rightarrow^{28} \mathrm{Si} \rightarrow^{56} \mathrm{Ni} \rightarrow^{56} \mathrm{Fe}$) তৈরি হয়, যার ব্যাপ্তিকাল হাইড্রোজেনের ৭০ লাখ বছর থেকে দ্রুত সংকুচিত হয়ে সিলিকনের ক্ষেত্রে মাত্র ২৪ ঘণ্টায় নেমে আসে।



চিত্র ৫.৩: পারমাণবিক বন্ধন শক্তি বক্ররেখা এবং লোহার মৃত্যু-প্রাচীর। নিউক্লিয়ন প্রতি বন্ধন শক্তি ঠিক লোহা-৫৬ ($৮.৭৯\ \text{MeV}$) এবং নিকেল-৬২ ($৮.৭৯৫\ \text{MeV}$)-তে সর্বোচ্চ শিখরে পৌঁছায়। লোহার পূর্ব পর্যন্ত ফিউশন তাপমোচী (শক্তি উৎপন্ন করে মহাকর্ষ রোধ করে); কিন্তু লোহার পরবর্তী ফিউশন তাপহারী, যা কেন্দ্রের তাপীয় শক্তি শুষে নিয়ে নক্ষত্রের ভেতরের চাপকে মুহূর্তের মাঝে ধ্বংস করে দেয়।

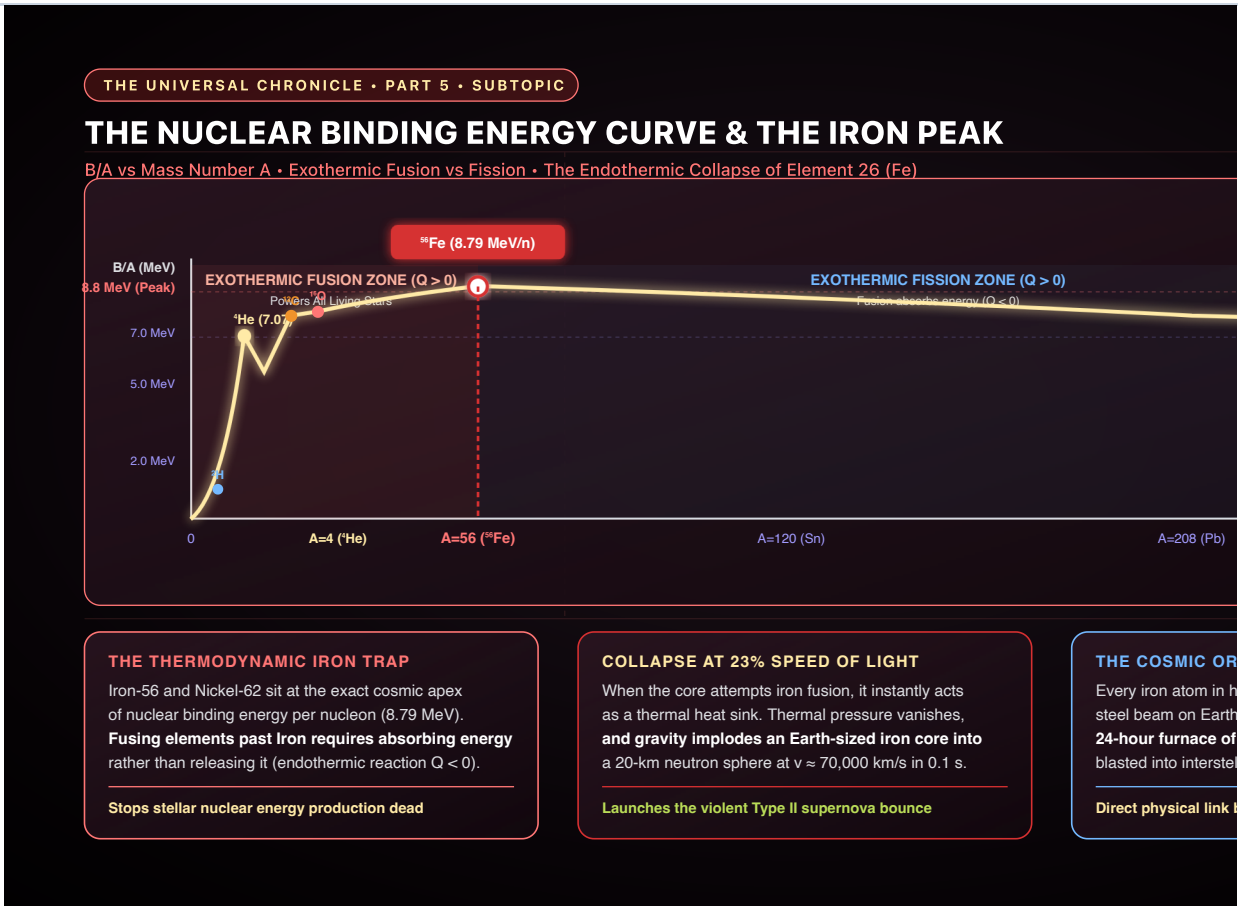
লোহার মহাবিপর্যয়: কেন ২৬ নম্বর মৌলে ফিউশন চিরতরে থেমে যায়?

লাখ লাখ বছর ধরে নক্ষত্রটি তাপমোচী ফিউশনের মাধ্যমে মাধ্যাকর্ষণের বিরুদ্ধে লড়াই চালিয়ে এসেছিল: হালকা মৌল যখন যুক্ত হয়, তখন নতুন নিউক্লিয়াসের ভর তার উপাদানের ভরের চেয়ে সামান্য কম হয় ($E = \Delta mc^2$); আর সেই হারিয়ে যাওয়া ভর তাপীয় শক্তিতে রূপান্তরিত হয়ে নক্ষত্রটিকে ফুলিয়ে রাখে।

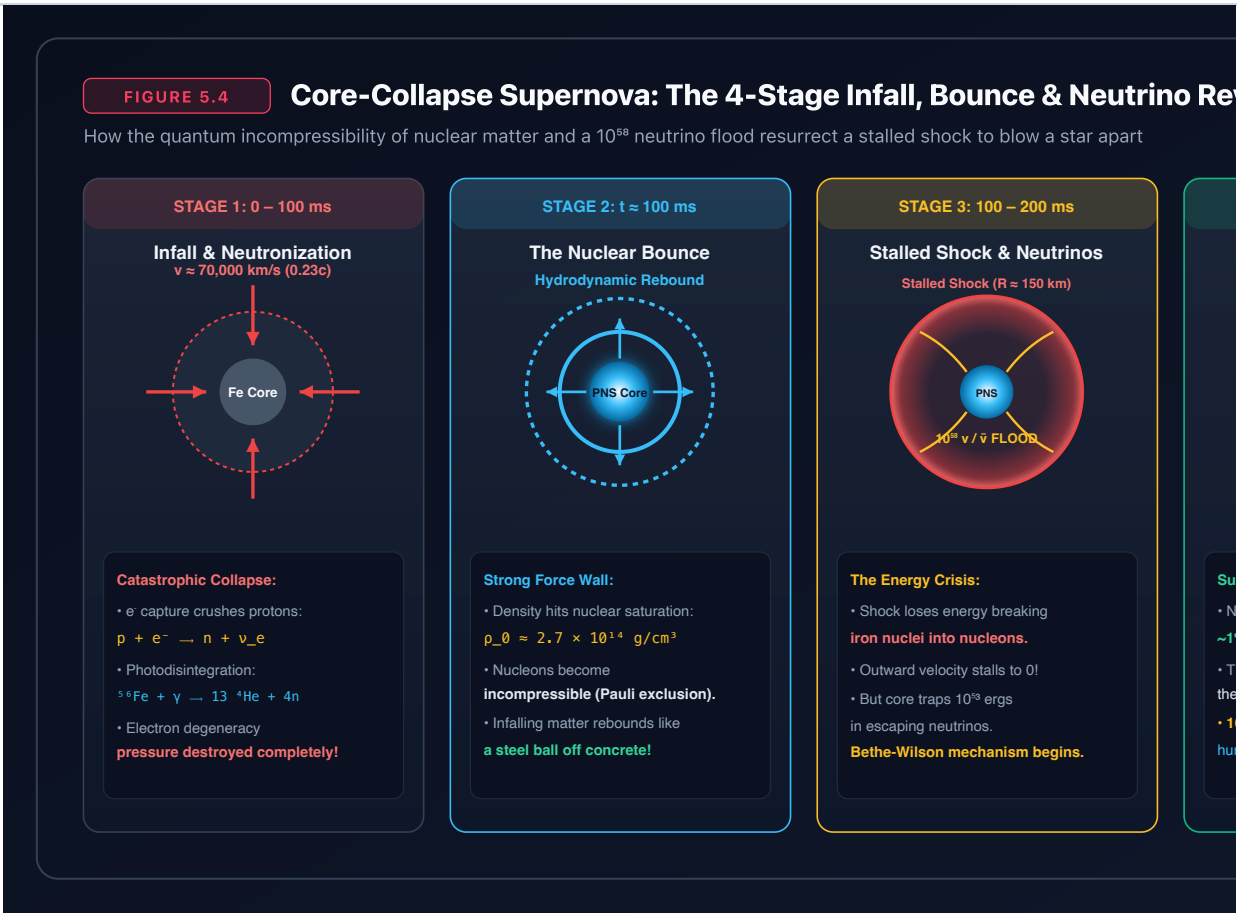
কিন্তু নিউক্লিয়ন প্রতি পারমাণবিক বন্ধন শক্তি সর্বোচ্চ সীমায় পৌঁছায় ঠিক আয়রন-গ্রুপের মৌলগুলোতে—বিশেষ করে **নিকেল-৬২, লোহা-৫৮ এবং লোহা-৫৬** ($B/A \approx ৮.৮\ \text{MeV}$ প্রতি নিউক্লিয়ন)-এ:

লোহার দুর্লঙ্ঘ্য পারমাণবিক দেওয়াল
লোহা-৫৬ থেকে ফিউশনের মাধ্যমে বাড়তি কোনো শক্তি নিষ্কাশন করা অসম্ভব। লোহার সাথে আরেকটি নিউক্লিয়াস যুক্ত করার বিক্রিয়াটি সম্পূর্ণভাবে **তাপহারী (Endothermic)**—এটি শক্তি উৎপন্ন করার বদলে উল্টো নক্ষত্রের কোরের তাপ শুষে নেয়। যে মুহূর্তে একটি দানব নক্ষত্রের কেন্দ্রে লোহার কোর জমা হতে শুরু করে, নক্ষত্রটির পারমাণবিক ইঞ্জিন চিরতরে মারা যায়। নক্ষত্রকে ফুলিয়ে রাখা কেন্দ্রস্থ চাপ এক সেকেন্ডের ভগ্নাংশে শূন্যে নেমে আসে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



পারমাণবিক বন্ধন শক্তি বক্ররেখা এবং লোহার মহাবিপর্যয়। নিউক্লিয়ন প্রতি বন্ধন শক্তি (B/A) লোহা-৫৬ এবং নিকেল-৬২-তে সর্বোচ্চ শিখরে (৮.৭৯ $\mathrm{MeV}/\text{নিউক্লিয়ন}$) পৌঁছায়। এর বামে তাপমোচী ফিউশন (Q > 0) নক্ষত্রকে বাঁচিয়ে রাখে; ডানে তাপমোচী ফিশন (Q > 0) ঘটে। লোহার ফিউশন সম্পূর্ণ তাপহারী (Q < 0) হওয়ায় তা কোরের তাপ শুষে নিয়ে কেন্দ্রস্থ চাপ ধ্বংস করে দেয়, যার ফলে নক্ষত্রটি ১০০ মিলিসেকেন্ডে আলোর গতির ২৩% বেগে অন্তর্মুখী পতনে নিমজ্জিত হয়।



চিত্র ৫.৪: কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভার ব্যবচ্ছেদ (ধস, প্রতিক্ষেপ এবং নিউট্রিনো পুনরুজ্জীবন)। ১০০ মিলিসেকেন্ডের মধ্যে ইলেকট্রন ক্যাপচার এবং ফটোডিসইন্টিগ্রেশনের কারণে আলোর গতির ২৩% বেগে মুক্ত মহাকর্ষীয় ধস ঘটে। পারমাণবিক স্যাচুরেশন ঘনত্বের ওপর আছড়ে পড়ে বহির্মুখী শকওয়েভ প্রতিক্ষিপ্ত হয়; পরে নিউট্রিনোর তীব্র প্রবাহ ধাক্কা দিয়ে ১০◌^{44} জুল শক্তির এক প্রলয়ঙ্কর সুপারনোভা বিস্ফোরণ ঘটায়।

কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভা (টাইপ ২): পারমাণবিক ঘনত্বের দেয়ালে নক্ষত্রের প্রতিক্ষেপ

যখনই লোহার কোরের ভর **চন্দ্রশেখর সীমা** ($M_{\rm Ch} \approx 1.44 M_\odot$) অতিক্রম করে, তখনই ইলেকট্রন ডিজেনারেসি চাপ আর মাধ্যাকর্ষণকে ধরে রাখতে পারে না। সমগ্র কোর এক পলকে মহাকর্ষীয় ধ্বংসের মুখে পতিত হয়:

১. ইলেকট্রন ক্যাপচার ও ফটোডিসইন্টিগ্রেশন (০ থেকে ১০০ মিলিসেকেন্ড)

ঘনত্ব যখন প্রতি ঘন সেন্টিমিটারে ১০ হাজার কোটি গ্রাম ($10^{11}\ \mathrm{g/cm^3}$) ছাড়িয়ে যায়, তখন অতি-উচ্চ শক্তির গামা রশ্মি লোহার নিউক্লিয়াসকে চূর্ণ করে আবার আলফা কণা ও মুক্ত নিউট্রনে ভেঙে ফেলে। একই সাথে ইলেকট্রনগুলো প্রচণ্ড চাপে সরাসরি প্রোটনের ভেতরে ঢুকে নিউট্রনে পরিণত হয় (ইনভার্স বিটা ক্ষয়):

$$p + e^- \to n + \nu_e$$

এর ফলে সমগ্র কোরটি পরিণত হয় খাঁটি নিউট্রনের এক পিণ্ডে। পৃথিবীর সমান আকৃতির একটি লোহার বল **১০০ মিলিসেকেন্ডেরও কম সময়ে** সংকুচিত হয়ে মাত্র **২০ কিলোমিটার ব্যাসের** একটি গোলকে পরিণত হয়, যা আলোর গতির প্রায় ২৫% বেগে (৭০,০০০ কিমি/সেকেন্ড) ভেতরের দিকে আছড়ে পড়ে।

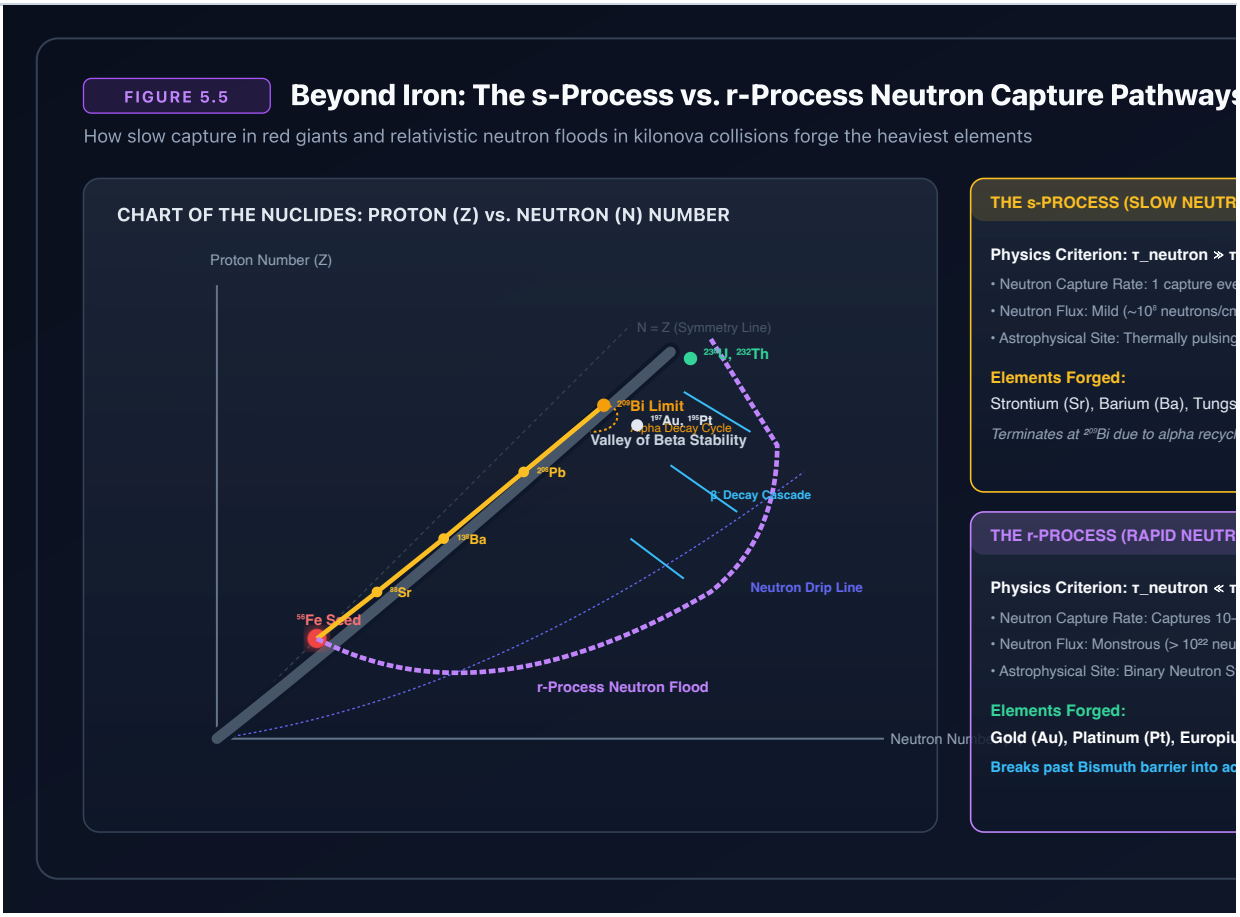
২. নিউক্লিয়ার প্রতিক্ষেপ এবং নিউট্রিনোর শকওয়েভ

কোরটি যখন পারমাণবিক স্যাচুরেশন ঘনত্বে ($\rho_{\rm nuc} \approx 3 \times 10^{14}\ \mathrm{g/cm^3}$) পৌঁছায়, তখন শক্তিশালী নিউক্লীয় বল হঠাৎ বিকর্ষণমূলক আচরণ শুরু করে। **নিউট্রন ডিজেনারেসি চাপ** কংক্রিটের নিরেট দেওয়ালের মতো ধসটিকে আটকে দেয়। ওপর থেকে ধেয়ে আসা বাইরের স্তরগুলো এই কঠিন কোরের ওপর আছড়ে পড়ে **প্রতিক্ষিপ্ত (Rebound)** হয়, তৈরি করে একটি প্রচণ্ড বহির্মুখী সুপারসনিক শকওয়েভ।

এই শকওয়েভটি সদ্যজাত নিউট্রন তারা থেকে মুক্ত হওয়া কোটি কোটি নিউট্রিনোর তীব্র শক্তিতে সঞ্জীবিত হয়ে সমগ্র নক্ষত্রটিকে উড়িয়ে দেয়। একটি কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভায় নির্গত হয় ১০^{৪৬} জুল **শক্তি**—যা আমাদের সূর্য তার পুরো ১০ বিলিয়ন বছরের জীবনে যে আলো ছড়াবে, তার চেয়েও বহুগুণ বেশি! আশ্চর্যের বিষয় হলো, **এই শক্তির ৯৯% বহন করে নিয়ে যায় নিউট্রিনো**, ১% গতিশক্তি হিসেবে নক্ষত্রটির শরীর উড়িয়ে দেয়, আর মাত্র ০.০১% দৃশ্যমান আলো হিসেবে ছড়িয়ে পড়ে।

টানা কয়েক সপ্তাহ ধরে এই বিস্ফোরিত নক্ষত্রটি তার সম্পূর্ণ ছায়াপথের শত শত কোটি তারার সম্মিলিত আলোকে একাই ছাড়িয়ে যায়, প্রতি সেকেন্ডে ১০,০০০ কিলোমিটার বেগে মহাকাশে ছড়িয়ে দেয় কোটি কোটি টন কার্বন, অক্সিজেন, নিয়ন ও সিলিকন।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৫.৫: লোহার ওপারের ভারী মৌল গঠন (s-প্রক্রিয়া বনাম r-প্রক্রিয়া)। লোহার চেয়ে ভারী মৌল তৈরির জন্য প্রয়োজন নিউট্রন গ্রহণ, যার কোনো কুলম্ব বিকর্ষণ নেই। স্পন্দিত AGB নক্ষত্রে ধীর (s) প্রক্রিয়া শত শত বছর ধরে নিউট্রন শোষণ করে বিসমাথ-২০৯ পর্যন্ত মৌল গড়ে। অন্যদিকে দুটি নিউট্রন তারার সংঘর্ষে (কিলোনোভা) তীব্র (r) প্রক্রিয়া প্রতি সেকেন্ডে ১০^{22} নিউট্রনের বন্যায় নিউক্লিয়াসকে ভাসিয়ে সোনা, প্ল্যাটিনাম ও ইউরেনিয়াম তৈরি করে।

লোহার ওপারের মৌলসমূহ: ধীর (s) ও দ্রুত (r) নিউট্রন গ্রহণ প্রক্রিয়া

যেহেতু ফিউশনের মাধ্যমে লোহার চেয়ে ভারী মৌল তৈরি সম্ভব নয়, তাই তামা, রূপা, আয়োডিন, বেরিয়াম, সোনা, প্ল্যাটিনাম ও ইউরেনিয়ামের মতো মৌলগুলো তৈরি হতে হয়েছে **নিউট্রন গ্রহণের (Neutron Capture)** মাধ্যমে। যেহেতু নিউট্রনের কোনো বৈদ্যুতিক চার্জ নেই, তাই তারা কোনো কুলম্ব বিকর্ষণের মুখোমুখি না হয়ে অতি সহজেই পারমাণবিক নিউক্লিয়াসের ভেতরে ঢুকে পড়তে পারে:

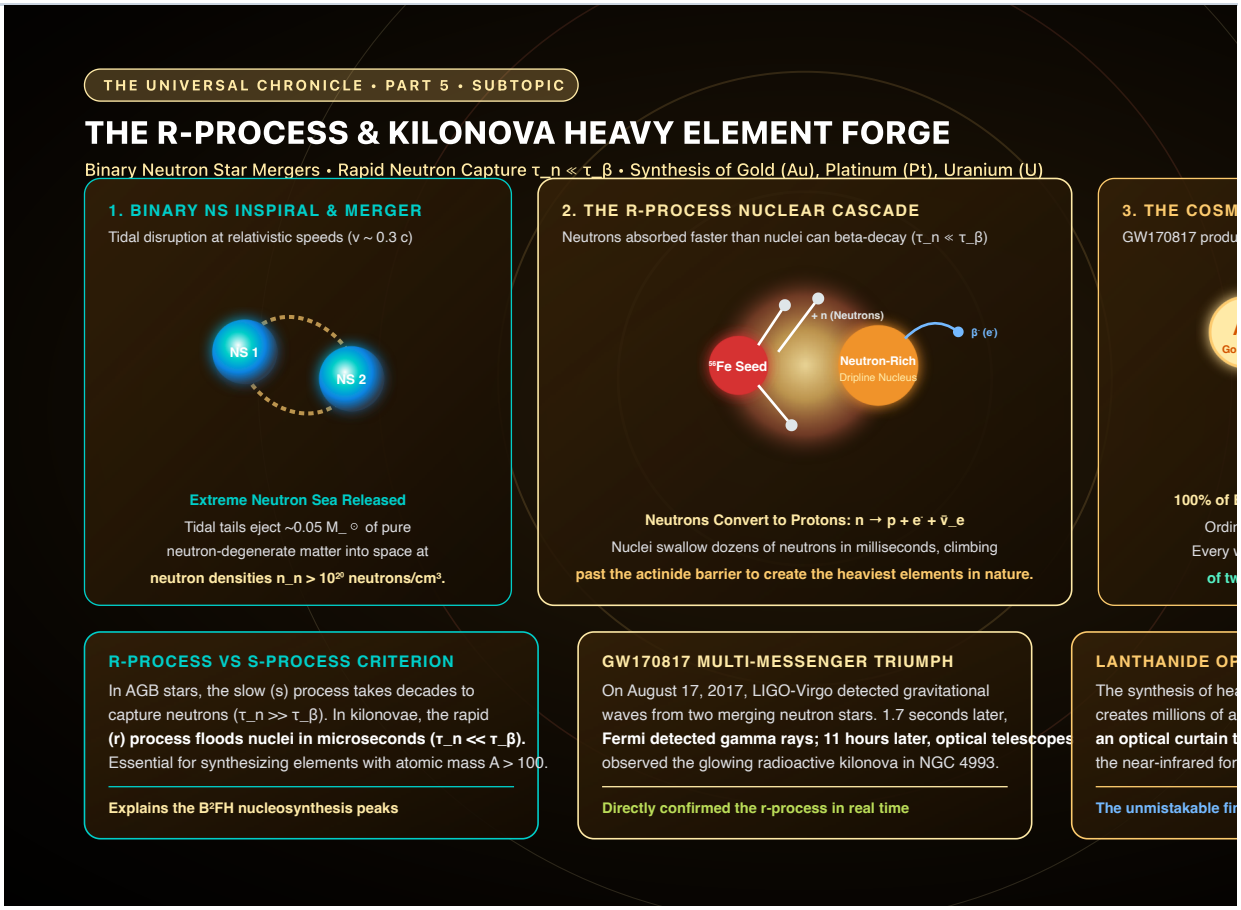
১. s-প্রক্রিয়া (ধীর নিউট্রন গ্রহণ)

মধ্যম ভরের বিবর্তিত অ্যাসিম্পটোটিক জায়ান্ট ব্রাঞ্চ (AGB) নক্ষত্রে হাজার হাজার বছর ধরে এটি ঘটে। নিউট্রনের ঘনত্ব এখানে কম থাকে: একটি নিউক্লিয়াস একটি নিউট্রন শোষণ করে, এবং যদি তা অস্থিতিশীল হয়, তবে পরবর্তী নিউট্রন আসার আগেই পর্যাপ্ত সময় পায় বিটা ক্ষয়ের মাধ্যমে ($n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$) নতুন উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যার মৌলে রূপ নেওয়ার। স্ট্রনশিয়াম, বেরিয়াম ও সীসার মতো লোহার চেয়ে ভারী মৌলগুলোর প্রায় অর্ধেক এই প্রক্রিয়ায় তৈরি হয়।

২. r-প্রক্রিয়া (কিলোনোভা ও নিউট্রন তারার সংঘর্ষে দ্রুত নিউট্রন গ্রহণ)

এর জন্য প্রয়োজন চরম প্রলয়ঙ্কর পরিবেশ, যেখানে প্রতি ঘন সেন্টিমিটারে প্রতি সেকেন্ডে ১০^{২০}-এর বেশি নিউট্রনের বন্যা বয়ে যায়। নিউক্লিয়াসগুলো এক পলকে শত শত নিউট্রন গ্রাস করে ফুলেফেঁপে ওঠে, এবং পরবর্তীতে ধাপে ধাপে বিটা ক্ষয় করে সোনা, প্ল্যাটিনাম ও ইউরেনিয়ামের মতো অত্যন্ত ভারী স্থায়ী মৌলে রূপ নেয়।

২০১৭ সালে লাইগো-ভার্গো (LIGO-Virgo) মহাকর্ষীয় তরঙ্গ মানমন্দির **GW170817** শনাক্ত করে: NGC 4993 গ্যালাক্সিতে দুটি নিউট্রন তারার প্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষ ও মহাজাগতিক **কিলোনোভা**। সেই একক সংঘর্ষে মহাশূন্যে তৈরি ও নিক্ষিপ্ত হয়েছিল **পৃথিবীর ভরের চেয়েও দশ গুণ বেশি খাঁটি সোনা ও প্ল্যাটিনাম**—যা চূড়ান্তভাবে প্রমাণ করেছে যে আমাদের হাতের সোনার আংটি তৈরি হয়েছে মহাকাশে দুটি মৃত নিউট্রন তারার আত্মঘাতী মিলনে!



বাইনারি নিউট্রন তারার কিলোনোভা সংঘর্ষে দ্রুত নিউট্রন গ্রহণ (r-প্রক্রিয়া)। চরম আপেক্ষিক সংঘর্ষের ফলে (যেমন GW170817) মহাশূন্যে অতি-ঘন নিউট্রনের বন্যা ($n_n > 10^{20}$ নিউট্রন/সেমি^{3}) বয়ে যায়। নিউট্রন গ্রহণের হার বিটা ক্ষয়ের চেয়ে বহুগুণ দ্রুত হওয়ায় ($\tau_n \ll \tau_\beta$) লোহার আদি নিউক্লিয়াসগুলো নিউট্রন গ্রহণ করে স্ফীত হয় এবং পরবর্তীতে বিটা ক্ষয়ের মাধ্যমে পৃথিবীর ভরের ১০ গুণেরও বেশি খাঁটি সোনা ($^{197}\mathrm{Au}$), প্ল্যাটিনাম ($^{195}\mathrm{Pt}$) ও ইউরেনিয়াম ($^{238}\mathrm{U}$) তৈরি করে।

পর্যায় সারণীর মহাজাগতিক বংশলতিকা

উৎপত্তির মাধ্যম	প্রধান মৌলসমূহ	মহাজাগতিক পরিবেশ	মানবদেহ ও পৃথিবীর গুরুত্ব
বিগ ব্যাং নিউক্লিওসিন্থেসিস	হাইড্রোজেন ($^1\mathrm{H}$), হিলিয়াম ($^4\mathrm{He}$), লিথিয়াম	আদিম মহাজাগতিক চুল্লি (৩\text{–}২০\text{ মিনিট})	পানির অণু ($\mathrm{H_2O}$), সূর্যের পারমাণবিক জ্বালানি।
মাঝারি ভরের নক্ষত্র (AGB)	কার্বন ($^{12}\mathrm{C}$), নাইট্রোজেন ($^{14}\mathrm{N}$), s-প্রক্রিয়া (Sr, Ba, Pb)	প্ল্যানেটারি নেবুলা ও নাক্ষত্রিক বায়ু	জৈব রসায়ন, ডিএনএ/আরএনএ-র ব্যাকবোন, অ্যামাইনো অ্যাসিড।
কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভা (টাইপ ২)	অক্সিজেন ($^{16}\mathrm{O}$), সিলিকন ($^{28}\mathrm{Si}$), ম্যাগনেসিয়াম, সালফার	বিস্ফোরিত দানব নক্ষত্র (M > 8 M_\odot)	বায়ুমণ্ডলের অক্সিজেন, পাথুরে গ্রহের ভূতক ($\mathrm{SiO_2}$)।
টাইপ ১এ সুপারনোভা (শ্বেত বামন)	লোহা ($^{56}\mathrm{Fe}$), নিকেল, ক্রোমিয়াম, কোবাল্ট	ডিজেনারেট শ্বেত বামনের থার্মোনিউক্লিয়ার বিস্ফোরণ	রক্তের হিমোগ্লোবিন, পৃথিবীর গলিত লোহার কোর ও চৌম্বক ক্ষেত্র।
নিউট্রন তারার সংঘর্ষ (কিলোনোভা)	সোনা ($^{197}\mathrm{Au}$), প্ল্যাটিনাম ($^{195}\mathrm{Pt}$), ইউরেনিয়াম ($^{238}\mathrm{U}$)	দুটি নিউট্রন তারার আপেক্ষিকীয় সংঘর্ষ	অলঙ্কার, পারমাণবিক জ্বালানি, পৃথিবীর ভূ-অভ্যন্তরীণ তেজস্ক্রিয় তাপ।
কসমিক রে স্প্যালেশন	বোরন ($^{11}\mathrm{B}$), বেরিলিয়াম ($^{9}\mathrm{Be}$), লিথিয়াম ($^{6}\mathrm{Li}$)	মহাজাগতিক রশ্মির আঘাতে পরমাণুর ভাঙন	দুর্লভ খনিজ, আধুনিক ইলেকট্রনিক্স খাদ।

কার্ল সাগানের অমর সত্য: আমরা সবাই নক্ষত্রের ধূলিকণা

১৯৫৭ সালে মার্গারেট বারবিজ, জিওফ্রে বারবিজ, উইলিয়াম ফাউলার এবং ফ্রেড হয়েল তাদের যুগান্তকারী গবেষণাপত্র *“Synthesis of the Elements in Stars”* (B^2FH) প্রকাশ করেন, যা নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিসের পারমাণবিক ব্লুপ্রিন্ট প্রতিষ্ঠা করে।

তাদের আবিষ্কার মানুষের চেতনায় এনে দিয়েছিল এক অবিস্মরণীয় উপলব্ধি, যাকে পরবর্তীতে জ্যোতির্বিজ্ঞানী কার্ল সাগান চিরন্তন কাব্যে রূপ দিয়েছিলেন: **“মহাবিশ্ব আমাদের ভেতরেই রয়েছে। আমরা সবাই নক্ষত্রের উপাদান দিয়ে তৈরি। মহাবিশ্ব যেন নিজেকে নিজে জানার জন্যই আমাদের সৃষ্টি করেছে।”**

আমাদের ডিএনএ-র নাইট্রোজেন, হাড়ের ক্যালসিয়াম, রক্তের লোহিত কণিকার লোহা এবং কম্পিউটারের মাইক্রোচিপের সিলিকন সময়ের শুরুতে সৃষ্টি হয়নি। কোটি কোটি বছর আগে যেসব প্রাচীন দানব নক্ষত্র পৃথিবী সৃষ্টির পূর্বেই মহাকাশে নিজেদের জীবন বিসর্জন দিয়েছিল, তাদের সেই ভস্ম থেকেই তৈরি হয়েছে আমাদের পৃথিবী ও সৌরজগৎ।

Shakil Mahmud • Research Monograph

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের **ষষ্ঠ পর্বে** আমরা দেখব কীভাবে এই রাসায়নিকভাবে সমৃদ্ধ গ্যাস মেঘগুলো মহাকর্ষের নৃত্যে একত্রিত হয়ে নির্মাণ করেছিল মহাজাগতিক দ্বীপপুঞ্জ: **ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে**।

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957).** “Synthesis of the Elements in Stars.” *Reviews of Modern Physics*, 29(4), 547–650. doi:10.1103/RevModPhys.29.547.
- **Bethe, H. A. (1939).** “Energy Production in Stars.” *Physical Review*, 55(5), 434–456. doi:10.1103/PhysRev.55.434.
- **Woosley, S. E., Heger, A., & Weaver, T. A. (2002).** “The evolution and explosion of massive stars.” *Reviews of Modern Physics*, 74(4), 1015–1071. doi:10.1103/RevModPhys.74.1015.
- **Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (2017).** “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral.” *Physical Review Letters*, 119(16), 161101. doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101.
- **Thielemann, F.-K., et al. (2011).** “What are the sources of the r-process?” *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 66(2), 346–353. doi:10.1016/j.ppnp.2011.01.032.
- **Nomoto, K., Kobayashi, C., & Tominaga, N. (2013).** “Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51(1), 457–509. doi:10.1146/annurev-astro-082812-140956.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "মহাবিশ্বের কিমিয়াবিদ — নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, সুপারনোভা এবং ভারী মৌলসমূহের জন্ম"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৫। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-5-the-alchemists-of-the-universe-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • ষষ্ঠ খণ্ড

ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে

ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে

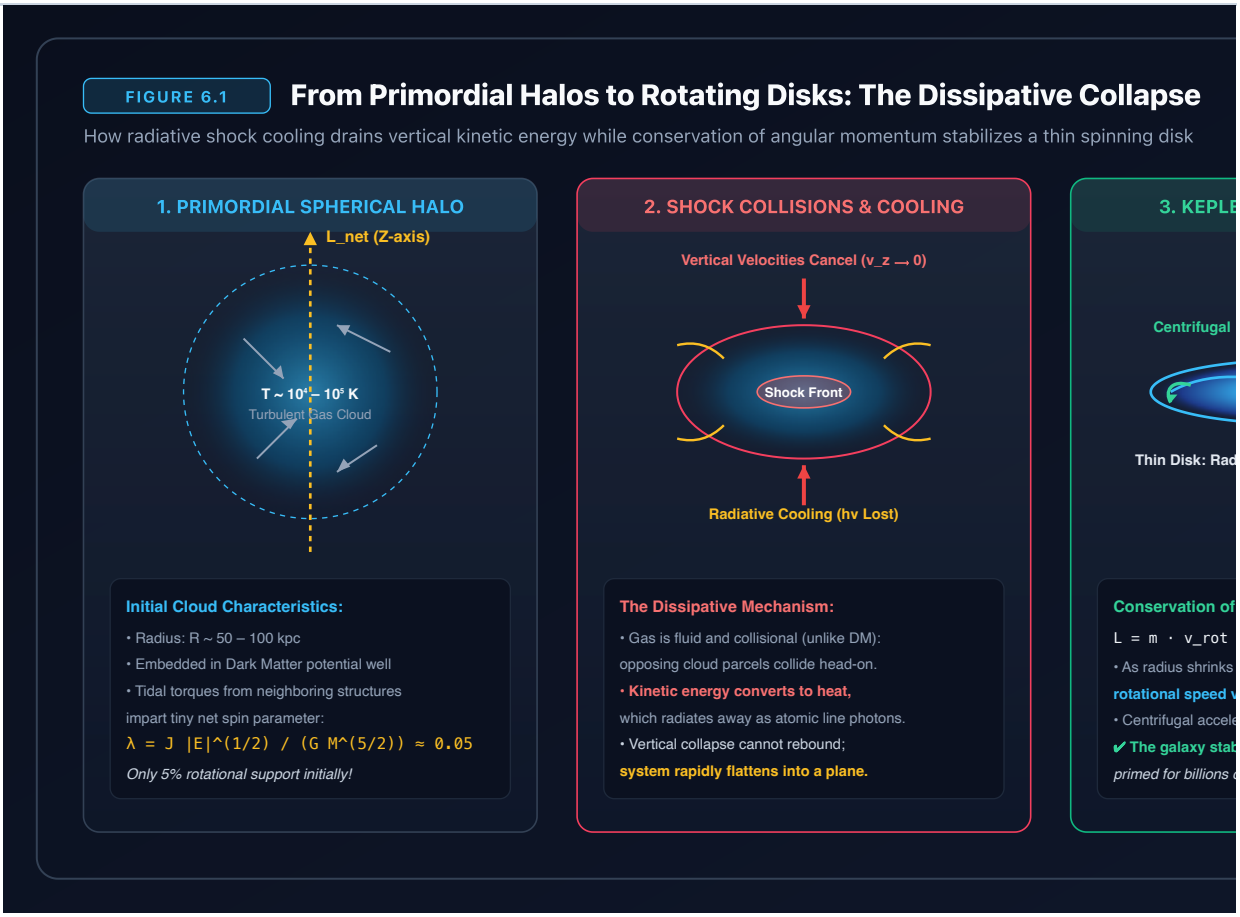
2,147 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৬: *চিত্র: আকাশগঙ্গা (Milky Way) ছায়াপথের সর্পিল বাহু এবং কেন্দ্রস্থিত সুপারম্যাসিভ ব্ল্যাক হোল স্যাজিটেরিয়াস এ*; অদৃশ্য ডার্ক ম্যাটার বলয়ের মহাকর্ষীয় টান এই বিশাল তারকাপুঞ্জকে একসাথে ধরে রেখেছে।*

ছায়াপথগুলো হলো মহাবিশ্বের মহান দ্বীপ সাম্রাজ্য—শত শত কোটি নক্ষত্র, আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূলিমেঘের নার্সারি এবং অতি-দানব ব্ল্যাক হোলের এক সুবিশাল মহাকর্ষীয় সমাবেশ। কোনো বিশৃঙ্খল নক্ষত্রপুঞ্জ নয়; আমাদের মিল্কিওয়ের মতো সর্পিল ছায়াপথগুলো হলো এক অতি-গতিশীল, স্বনিয়ন্ত্রিত মহাজাগতিক স্থাপত্য—যা অন্ধকার পদার্থের অদৃশ্য জালে আশ্রিত, কৌণিক ভরবেগের নিত্যতায় এক অপূর্ব ঘূর্ণায়মান চাকতিতে রূপান্তরিত, এবং মহাকর্ষীয় সিংহাসনে আসীন এক দানবাকৃতির ব্ল্যাক হোলের চারপাশে ভারসাম্য বজায় রেখে আবর্তিত।

Shakil Mahmud • Research Monograph



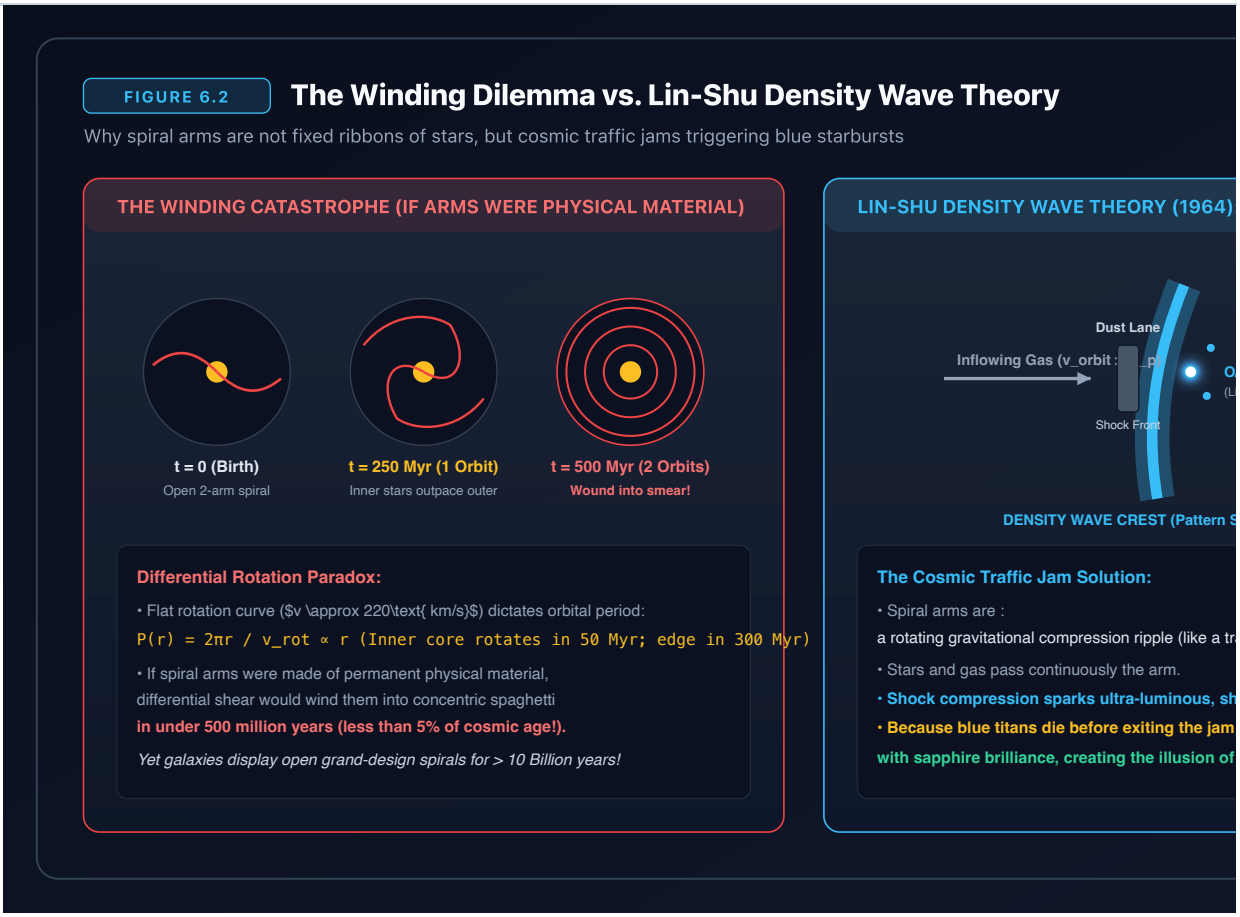
চিত্র ৬.১: গোলীয় হ্যালো থেকে ঘূর্ণায়মান ডিস্ক (অপচয়মূলক মহাকর্ষীয় পতন)। ডার্ক ম্যাটার হ্যালোতে আটকে থাকা গ্যাস মেঘ আদিম মহাকর্ষীয় টর্কের কারণে সামান্য ঘূর্ণন লাভ করে। সংঘর্ষহীন ডার্ক ম্যাটারের মতো না হয়ে গ্যাসীয় কণাগুলো পারস্পরিক সংঘর্ষে উল্লম্ব গতিশক্তি বিকিরণ করে ফেলে ($v_z \to 0$); অথচ কৌণিক ভরবেগের নিত্যতার কারণে অনুভূমিক পতন আটকে গিয়ে একটি অতি-পাতলা, সুষম ঘূর্ণায়মান ছায়াপথ ডিস্ক তৈরি হয়।

আদিম হ্যালো থেকে ঘূর্ণায়মান ডিস্ক: কৌণিক ভরবেগের নিত্যতা

স্ট্যান্ডার্ড ΛCDM মহাজাগতিক মডেলে ছায়াপথগুলো বিচ্ছিন্নভাবে গঠিত হয় না। তারা গড়ে ওঠে **কসমিক ওয়েব বা মহাজাগতিক জালের** সংযোগস্থলে—বিগ ব্যাংয়ের প্রথম সেকেন্ডের ভগ্নাংশে বোনা অন্ধকার পদার্থের স্পঞ্জের মতো এক সুবিশাল নেটওয়ার্কে।

আদিম গ্যাস যখন এই ডার্ক ম্যাটার কূপগুলোতে আছড়ে পড়েছিল, তখন পার্শ্ববর্তী ভরগুলোর অসম মহাকর্ষীয় জোয়ারি টর্ক (Tidal Torques) মেঘটিকে একটি সার্বিক ঘূর্ণন বা কৌণিক ভরবেগ (J) প্রদান করেছিল। ডার্ক ম্যাটারের কণাগুলো সংঘর্ষহীন হওয়ায় তারা একটি বিশাল গোলীয় বা ত্রি-অক্ষীয় হ্যালো হিসেবে ভেসে থাকে। কিন্তু সাধারণ গ্যাসীয় কণাগুলো একে অপরের সাথে আছড়ে পড়ে উত্তপ্ত হয় এবং তড়িৎচৌম্বকীয় বিকিরণ নির্গমন করে নিজেদের গতিশক্তি হারিয়ে ফেলে (Dissipative Cooling)।

ছায়াপথ ডিস্ক গঠনের মৌলিক উপাদ্য
যেহেতু গ্যাস কণাগুলো ঘূর্ণন অক্ষের সমান্তরালে সংঘর্ষের মাধ্যমে তাপ বিকিরণ করে ভেতরের দিকে সহজে চেপে যেতে পারে, কিন্তু অক্ষের লম্ব বরাবর নিট কৌণিক ভরবেগের নিত্যতা ($J = I\omega =$ ধ্রুবক) রক্ষা করতে বাধ্য—তাই মহাকর্ষীয় পতনের মুখে কেন্দ্রবিমুখী বল (Centrifugal force) অনুভূমিক সংকোচনকে আটকে দেয়। কয়েক কোটি বছরের মধ্যেই একটি অশান্ত গোলীয় গ্যাস মেঘ সংকুচিত হয়ে একটি অতি-পাতলা, ঘূর্ণায়মান **ছায়াপথ ডিস্কে (Galactic Disk)** রূপান্তরিত হয়।



চিত্র ৬.২: উইন্ডিং সমস্যা বনাম লিন-শু ডেনসিটি ওয়েভ তত্ত্ব। সর্পিল বাহুগুলো যদি একই নক্ষত্রের তৈরি নিরেট কাঠামো হতো, তবে ডিফারেনশিয়াল ঘূর্ণনে ৫০ কোটি বছরের মধ্যে তা পেঁচিয়ে ধ্বংস হয়ে যেত। লিন-শু তত্ত্ব প্রমাণ করে সর্পিল বাহু হলো ঘূর্ণায়মান মহাকর্ষীয় ঘনত্ব তরঙ্গ (ট্রাফিক জ্যাম); যার ভেতর দিয়ে গ্যাস প্রবেশ করে সংকুচিত হয়, উজ্জ্বল নীল O/B নক্ষত্র সৃষ্টি করে এবং অপর পাশ দিয়ে বেরিয়ে যায়।

উইন্ডিং সমস্যা এবং লিন-শু ঘনত্ব তরঙ্গ তত্ত্ব (১৯৬৪)

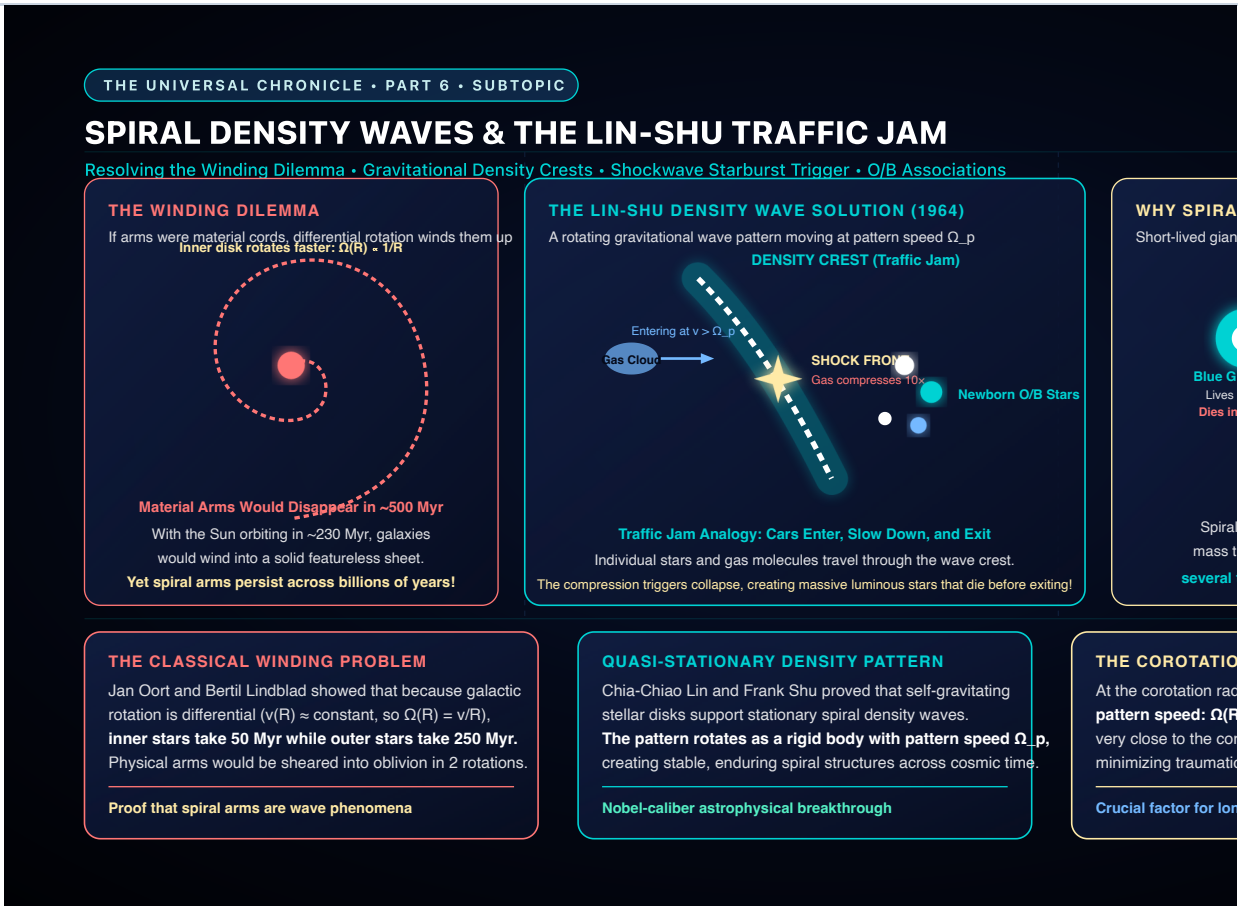
বিংশ শতাব্দীর শুরুতে যখন জ্যোতির্বিজ্ঞানীরা মেসিয়ার ৫১ (হুইরলপুল গ্যালাক্সি)-এর মতো মনোহর সর্পিল ছায়াপথের ছবি তোলেন, তখন তারা একটি মৌলিক গাণিতিক ধাঁধার মুখোমুখি হন—যাকে বলা হয় **উইন্ডিং সমস্যা (Winding Dilemma)**।

ছায়াপথগুলো *ডিফারেনশিয়াল ঘূর্ণনে* ঘোরে: কেন্দ্রের কাছের নক্ষত্রগুলো বাইরের নক্ষত্রের চেয়ে অনেক দ্রুত কক্ষপথ প্রদক্ষিণ করে। মিল্কিওয়ের কেন্দ্রে ২ কিলোপারসেক দূরত্বের একটি নক্ষত্র মাত্র ৫ কোটি বছরে একবার ঘোরে, যেখানে ৮ কিলোপারসেক দূরত্বে আমাদের সূর্য একবার ঘুরতে সময় নেয় প্রায় ২৩ কোটি বছর! সর্পিল বাহুগুলো যদি একই নক্ষত্র দিয়ে তৈরি নিরেট দড়ির মতো হতো, তবে মাত্র দুই-তিনটি আবর্তনের (৫০ কোটি বছর) মধ্যে কেন্দ্রের চারদিকে জিলিপির মতো পেঁচিয়ে চিরতরে বিলীন হয়ে যেত। অথচ ছায়াপথগুলো শত শত কোটি বছর ধরে তাদের খোলা, রাজকীয় বাহু টিকিয়ে রেখেছে!

ঘনত্ব তরঙ্গের সমাধান (লিন এবং শু, ১৯৬৪)

১৯৬৪ সালে গণিতবিদ **চিয়া-চিয়াও লিন এবং ফ্র্যাঙ্ক শু** এই ধাঁধার অভ্রান্ত সমাধান দেন: **সর্পিল বাহুগুলো কোনো স্থায়ী বস্তুর তৈরি নয়; এগুলো হলো ছায়াপথ ডিস্কের মধ্য দিয়ে ছুটে চলা মহাকর্ষীয় ঘনত্ব তরঙ্গ (Density Waves)**—ঠিক যেন মহাশূন্যের হাইওয়ের একটি চলমান ট্রাফিক জ্যাম!

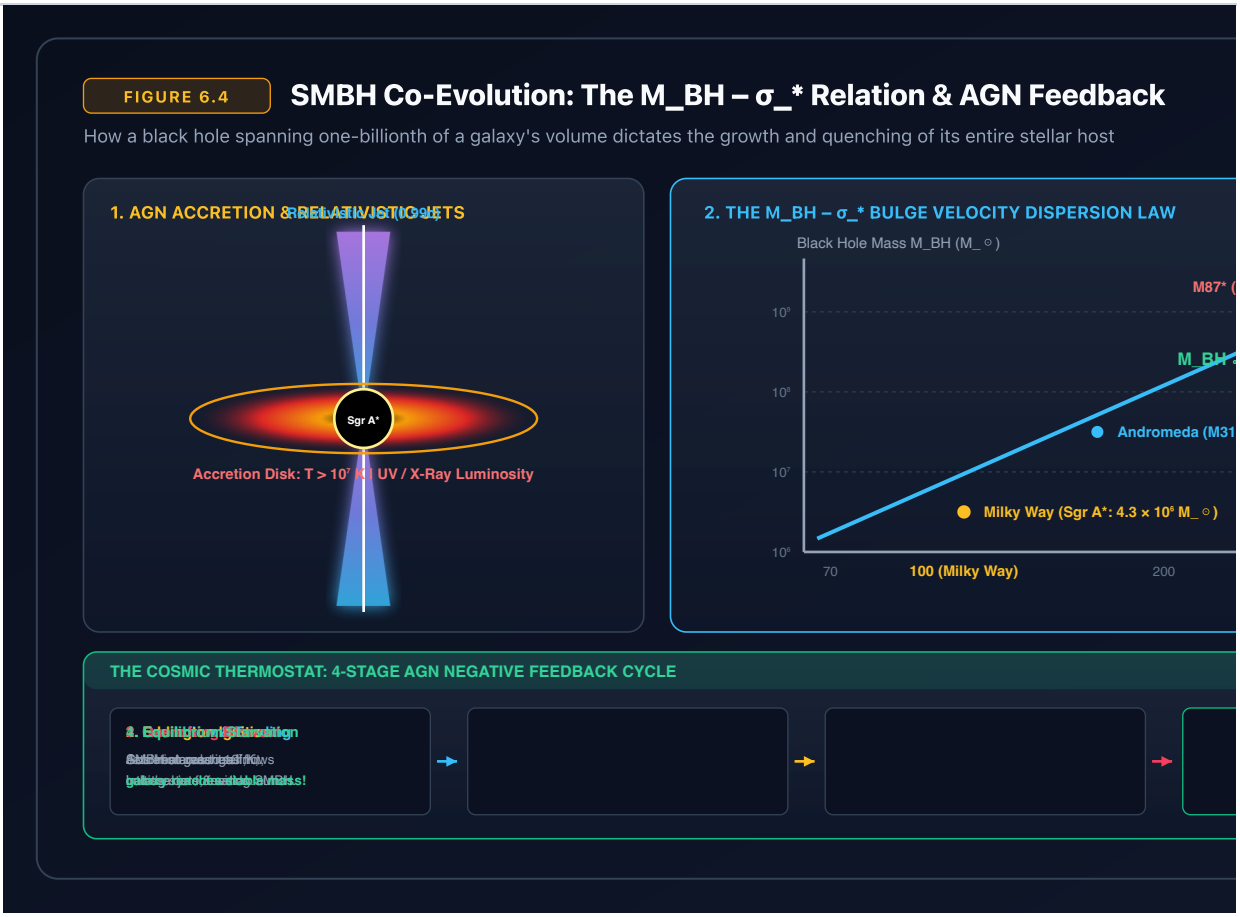
Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৬.২ক: সর্পিল ঘনত্ব তরঙ্গের গতিবিদ্যা ও মহাজাগতিক ট্রাফিক জ্যাম। ইন্টারস্টেলার গ্যাস মেঘ যখন ঘূর্ণায়মান মহাকর্ষীয় তরঙ্গে প্রবেশ করে, তখন শকওয়েভ সংকোচনের ফলে তৈরি হয় অতি-উজ্জ্বল নীল O এবং B শ্রেণির নক্ষত্র নার্সারি; যা সর্পিল বাহু অতিক্রম করার আগেই সুপারনোভায় বিস্ফোরিত হয়ে বাহুগুলোকে উজ্জ্বল নীল আভায় আলোকিত করে।

একটি ব্যস্ত সড়কে ধীরগতির ট্রাকের পেছনে যেমন গাড়িগুলো সাময়িকভাবে জমাট বাঁধে, ধীরে চলে এবং ট্রাক পার হয়ে আবার দ্রুত ছুটে যায়—তেমনি নক্ষত্র ও গ্যাস মেঘগুলো সর্পিল বাহুর ভেতরে প্রবেশ করে, সাময়িকভাবে ঘনত্ব বৃদ্ধি পায় এবং আবার অন্য পাশ দিয়ে বেরিয়ে যায়:

- **শকওয়েভ সংকোচন:** গ্যাস মেঘ যখন এই মহাকর্ষীয় ঘনত্ব তরঙ্গে প্রবেশ করে, তখন তা প্রচণ্ড চাপে সংকুচিত হয়ে ধূলিস্তর তৈরি করে।
- **নক্ষত্রের নার্সারি:** সংকুচিত গ্যাস ভেঙে হাজার হাজার অতি-উজ্জ্বল, বিশাল ও নীল O এবং B শ্রেণির নক্ষত্রের জন্ম দেয়।
- **বাহুগুলো কেন নীল দেখায়:** এই দানব নীল নক্ষত্রগুলো সূর্যের চেয়ে লাখ লাখ গুণ বেশি উজ্জ্বল হলেও তারা বাঁচে মাত্র ৫০ লাখ থেকে ২ কোটি বছর। সর্পিল বাহুর অন্য পাশ দিয়ে বেরিয়ে যাওয়ার আগেই তারা সুপারনোভায় বিস্ফোরিত হয়ে মারা যায়! তাই সর্পিল বাহুগুলো সর্বদা নবীন নীল নক্ষত্র ও গোলাপী আয়নিত হাইড্রোজেন মেঘে জ্বলজ্বল করে, আর আমাদের সূর্যের মতো দীর্ঘায়ু হলুদ-লাল বামন তারকারা ডিস্কের মাঝে নির্বিঘ্নে ছড়িয়ে থাকে।



চিত্র ৬.৩: অতি-দানব ব্ল্যাক হোলের সহ-বিবর্তন এবং AGN ফিডব্যাক। পর্যবেক্ষণমূলক $M_{\rm BH} \propto \sigma_*^{4.4}$ সম্পর্ক প্রমাণ করে ছায়াপথের কেন্দ্রীয় ব্ল্যাক হোলের ভর তার চারপাশের নক্ষত্রের বেগ বিচ্ছুরণের সাথে শক্তভাবে আবদ্ধ। ব্ল্যাক হোলে গ্যাস পতনের মাত্রা সীমা ছাড়িয়ে গেলে তীব্র বিকিরণ ও আপেক্ষিকীয় জেট নক্ষত্র তৈরির ঠান্ডা গ্যাস উড়িয়ে দিয়ে গ্যালাক্সির অতিরিক্ত বৃদ্ধি রোধ করে এক মহাজাগতিক থার্মোস্ট্যাট হিসেবে কাজ করে।

ঘূর্ণির কেন্দ্রস্থলে দানব: স্যাজিটেরিয়াস এ* এবং অতি-দানব ব্ল্যাক হোলের যৌথ বিবর্তন

প্রায় প্রতিটি বিশালাকার ছায়াপথের ঠিক মহাকর্ষীয় কেন্দ্রবিন্দুতে বাস করে এক মহাজাগতিক দানব: একটি **সুপারম্যাসিভ ব্ল্যাক হোল (Supermassive Black Hole বা SMBH)**, যা সূর্যের চেয়ে লক্ষ থেকে কোটি গুণ ভারী। আমাদের নিজস্ব মিল্কিওয়ের কেন্দ্রে ধনু রাশিতে ২৬,০০০ আলোকবর্ষের ধূলিমেঘের আড়ালে লুকিয়ে রয়েছে **স্যাজিটেরিয়াস এ* (Sagittarius A*)**—যার ভর সূর্যের প্রায় **৪৩ লাখ গুণ** ($4.3 \times 10^6 M_\odot$), কিন্তু যা বুধ গ্রহের কক্ষপথের চেয়েও ছোট আয়তনে বন্দী!

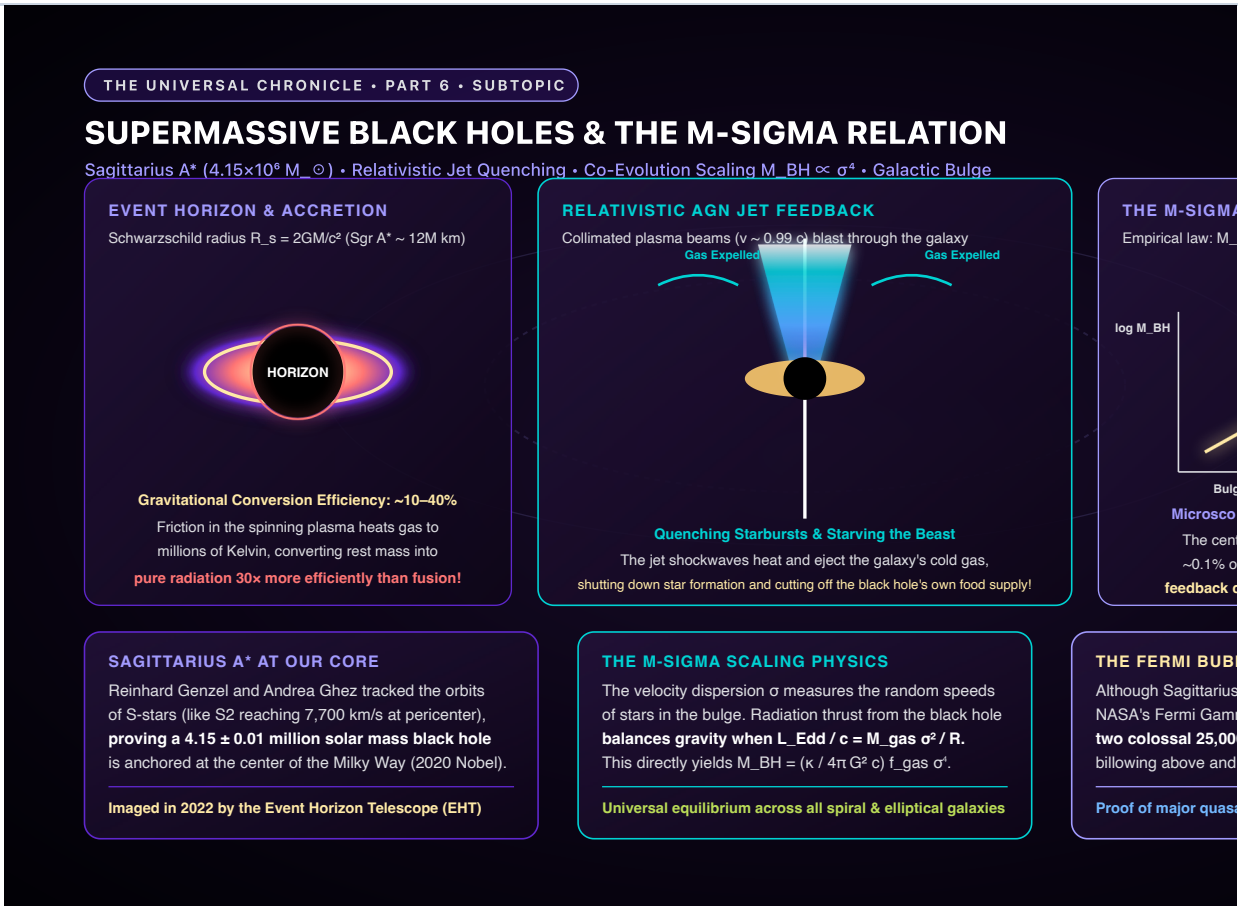
দশকের পর দশক ধরে বিজ্ঞানীরা ভাবতেন এই ব্ল্যাক হোলগুলো হয়তো গ্যালাক্সির অবশিষ্টাংশ মাত্র। কিন্তু ২০০০-এর দশকে আবিষ্কৃত হয় বিখ্যাত **M\text{–}\sigma সম্পর্ক**:

$$M_{\rm BH} \propto \sigma_*^{4 \text{ থেকে } 5}$$

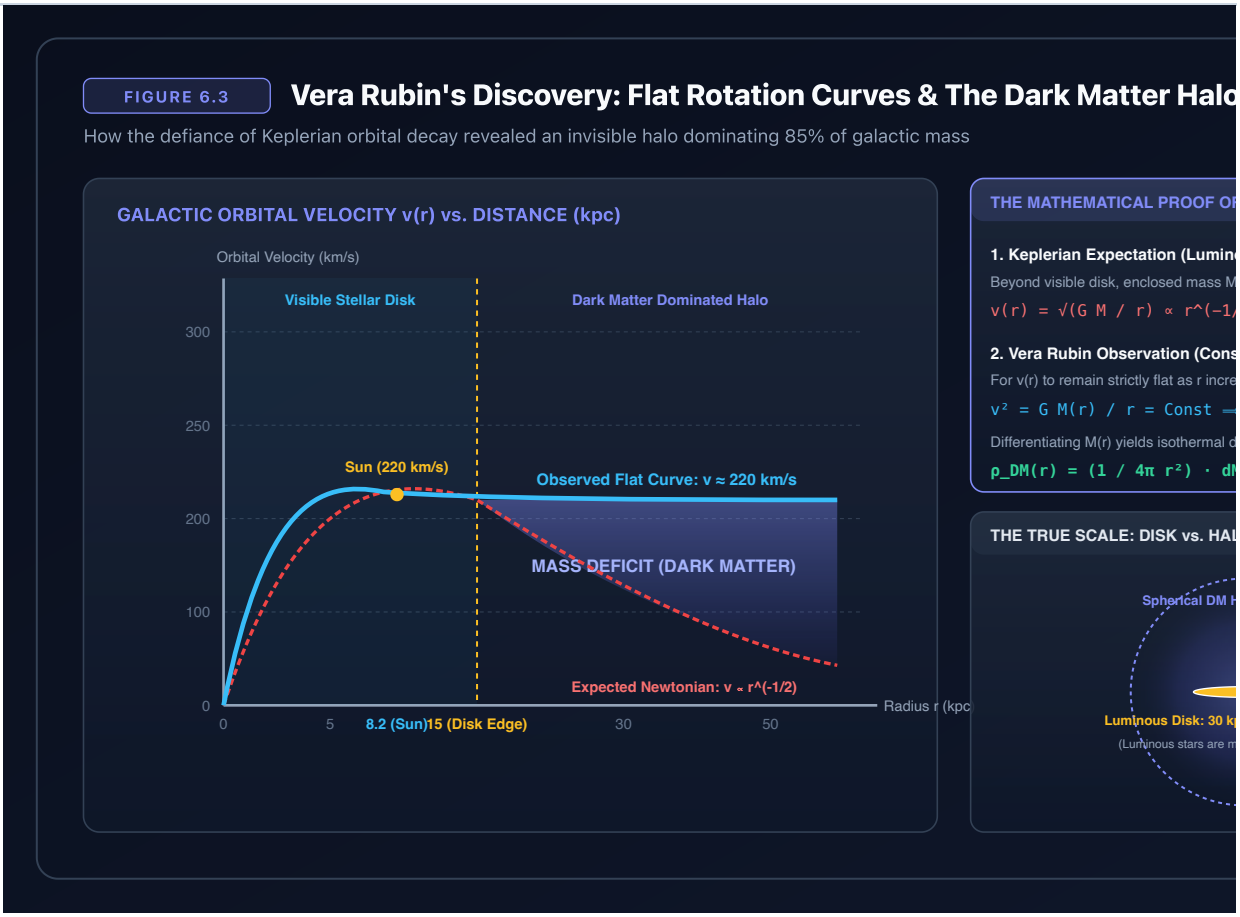
ছায়াপথের কেন্দ্রীয় বাল্‌জের নক্ষত্রগুলোর বেগের বিস্তৃতির (σ_*) সাথে ব্ল্যাক হোলের ভরের ($M_{\rm BH}$) এমন এক অবিশ্বাস্য সূচকীয় সম্পর্ক রয়েছে যা দশের পাঁচ ঘাত জুড়ে নিখুঁতভাবে সত্য! অথচ ব্ল্যাক হোলের প্রত্যক্ষ মহাকর্ষ কেবল কয়েক আলোকবর্ষ পর্যন্ত বিস্তৃত, আর বাল্‌জটি হাজার হাজার আলোকবর্ষ চওড়া। কীভাবে কেন্দ্রের এক ক্ষুদ্র বিন্দু সমগ্র ছায়াপথের গতিবিধি নিয়ন্ত্রণ করে?

অ্যাক্টিভ গ্যালাকটিক নিউক্লিয়াস (AGN) ফিডব্যাক
উত্তর হলো **AGN ফিডব্যাক**। আদিম মহাবিশ্বে যখন বিপুল পরিমাণ গ্যাস ব্ল্যাক হোলের মুখে আছড়ে পড়ত, তখন তা এক প্রদীপ্ত *কোয়েসারে* পরিণত হতো। ব্ল্যাক হোলের অ্যাক্রিশন ডিস্ক থেকে নির্গত হতো হাজার হাজার কিলোমিটার বেগের আপেক্ষিকীয় প্লাজমা জেট এবং বিকিরণ বাতাস। এই মহাজাগতিক ঝড় সমগ্র ছায়াপথ জুড়ে ছড়িয়ে পড়ে নক্ষত্র তৈরির ঠান্ডা গ্যাসকে এক কোটি কেলভিন পর্যন্ত উত্তপ্ত করে বাইরে ছুঁড়ে দিত—যা একই সাথে নতুন নক্ষত্রের জন্ম এবং ব্ল্যাক হোলের খাবার দুটোকেই চিরতরে থামিয়ে দিত। গ্যালাক্সি এবং তার কেন্দ্রীয় ব্ল্যাক হোল একে অপরকে শাসন করে একসাথে বেড়ে উঠেছে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৬.৩ক: কোয়েসার উইন্ড ফিডব্যাক এবং অতি-দানব ব্ল্যাক হোলের M\text{–}\sigma যৌথ বিবর্তন নীতি। স্যাজিটেরিয়াস এ*-এর অ্যাক্রিশন ডিস্ক থেকে নির্গত আপেক্ষিক প্লাজমা জেট এবং বিকিরণ চাপ কেন্দ্রীয় বাল্‌জ থেকে শীতল গ্যাস উড়িয়ে দিয়ে নক্ষত্র গঠন স্তব্ধ করে দেয়, যার ফলে ব্ল্যাক হোলের ভর গ্যালাকটিক বেগ বিচ্ছুরণের সূচকীয় সমানুপাতে আবদ্ধ হয় ($M_{\mathrm{BH}} \propto \sigma_*^{8\,(\text{থেকে }৫)}$)।



চিত্র ৬.৪: ভেরা রুবিনের আবিষ্কার (সমতল ঘূর্ণন বক্ররেখা এবং ডার্ক ম্যাটার হ্যালো)। কেপলারীয় গতিবিদ্যায় দৃশ্যমান সীমানার বাইরে নক্ষত্রের বেগ $v \propto r^{-1/2}$ হারে কমার কথা ছিল। ভেরা রুবিন প্রমাণ করেন ঘূর্ণন বেগ সমতল (২২০ কিমি/সেকেন্ড) থাকে, যা গাণিতিকভাবে প্রমাণ করে ছায়াপথগুলো এক বিশাল অদৃশ্য আইসোথার্মাল ডার্ক ম্যাটার হ্যালোর ভেতরে নিমজ্জিত—যা মিল্কিওয়ের মোট ভরের ৮৫% গঠন করে।

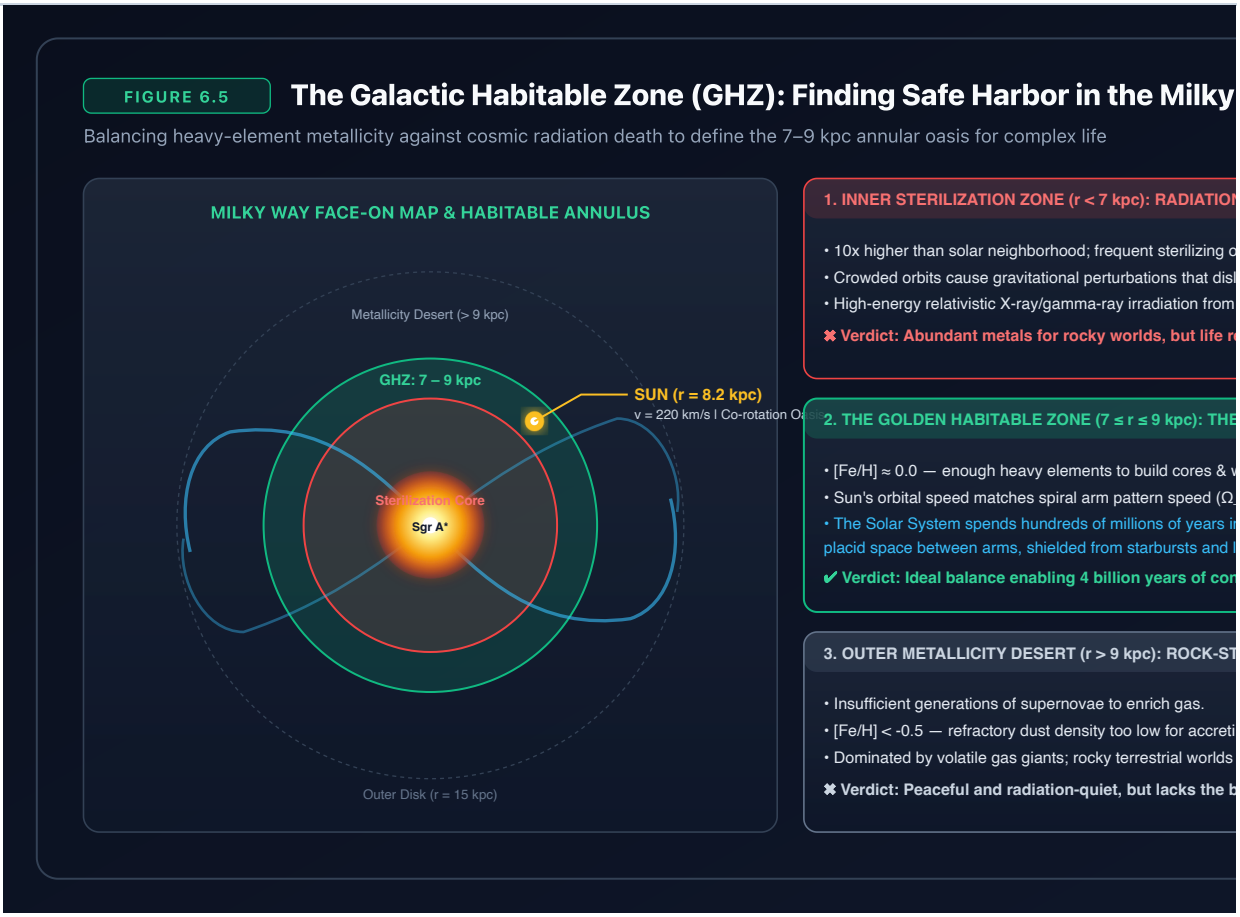
ভেরা রুবিনের ঐতিহাসিক বিজয়: অন্ধকার পদার্থের অদৃশ্য কায়া

কেপলারীয় বলবিদ্যার চিরায়ত সূত্রে কেন্দ্রীয় ভরের বাইরে কোনো বস্তুর বেগ দূরত্বের সাথে কমতে বাধ্য ($v \propto r^{-1/2}$)—যেমনটা আমাদের সৌরজগতে নেপচুন বুধের চেয়ে অনেক ধীরগতিতে সূর্যকে প্রদক্ষিণ করে। ১৯৭০-এর দশকে জ্যোতির্বিজ্ঞানী **ভেরা রুবিন** এবং কেনট ফোর্ড সর্পিল ছায়াপথগুলোর ডিস্ক জুড়ে গ্যাসীয় মেঘের বর্ণালী পর্যবেক্ষণ করেন।

বাইরের দিকে বেগ কমার বদলে তারা দেখলেন কক্ষীয় বেগ **সম্পূর্ণ সমতল ($v(r) \approx$ ধ্রুবক)** রয়ে গেছে! আমাদের মিল্কিওয়ের কেন্দ্র থেকে ৬০,০০০ আলোকবর্ষ দূরের নক্ষত্রগুলোও প্রতি সেকেন্ডে ২২০ কিলোমিটার বেগে ছুটে চলেছে—যা সমস্ত দৃশ্যমান নক্ষত্র ও গ্যাসের মোট মহাকর্ষীয় বাঁধন শক্তির চেয়ে বহুগুণ বেশি। পদার্থবিজ্ঞানের কোনো নিয়মেই তাদের ধরে রাখা সম্ভব ছিল না; ছায়াপথটির স্পিনিং হুইলের মতো মহাকাশে ছিঁড়ে উড়ে যাওয়ার কথা ছিল।

ভেরা রুবিনের এই সমতল ঘূর্ণন বক্ররেখাই বিশ্ববাসীকে প্রমাণ করে দেয় যে দৃশ্যমান নক্ষত্রের বাইরে ছায়াপথগুলো এক দানবাকৃতির অদৃশ্য **ডার্ক ম্যাটার হ্যালোর** গভীরে বাস করে। আমাদের মিল্কিওয়ের সমস্ত দৃশ্যমান তারার ভর যেখানে প্রায় ৬ হাজার কোটি সৌর ভর ($6 \times 10^{10} M_\odot$), সেখানে অন্ধকার পদার্থের হ্যালোটি ৬০ লাখ আলোকবর্ষ পর্যন্ত বিস্তৃত এবং এর মোট ভর **১.১ ট্রিলিয়ন সৌর ভর ($1.1 \times 10^{12} M_\odot$)! আমাদের ছায়াপথের ৮৫%-এরও বেশি ভর সম্পূর্ণ অদৃশ্য**।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৬.৫: গ্যালাকটিক হ্যাবিটেবল জোন (GHZ)। জটিল প্রাণের বিকাশের জন্য প্রয়োজন ভারী মৌলের প্রাচুর্য এবং মহাজাগতিক বিকিরণমুক্ত এক নিরাপদ অঞ্চলের ভারসাম্য। কেন্দ্রের কাছে ঘন ঘন সুপারনোভা ও গামা-রশ্মি বিস্ফোরণ বায়ুমণ্ডল ধ্বংস করে দেয়; আবার দূরের পরিধিতে পাথুরে গ্রহ তৈরির মতো লোহা-সিলিকন নেই। আমাদের সৌরজগৎ ৮.২ কিলোপারসেক দূরত্বে এক শান্ত, ধাতু-সমৃদ্ধ মরূদ্যানে বাস করে।

আমাদের মহাজাগতিক বাড়ির ব্যবচ্ছেদ: মিল্কিওয়ের কাঠামো

আমাদের মিল্কিওয়ে হলো একটি **SBbc শ্রেণির বার্ড স্পাইরাল (Barred Spiral) ছায়াপথ**, যা প্রায় ১,০০,০০০ আলোকবর্ষ ব্যাস জুড়ে বিস্তৃত এবং যাতে ১০০ থেকে ৪০০ বিলিয়ন নক্ষত্র রয়েছে। এটি চারটি প্রধান অংশে বিভক্ত:

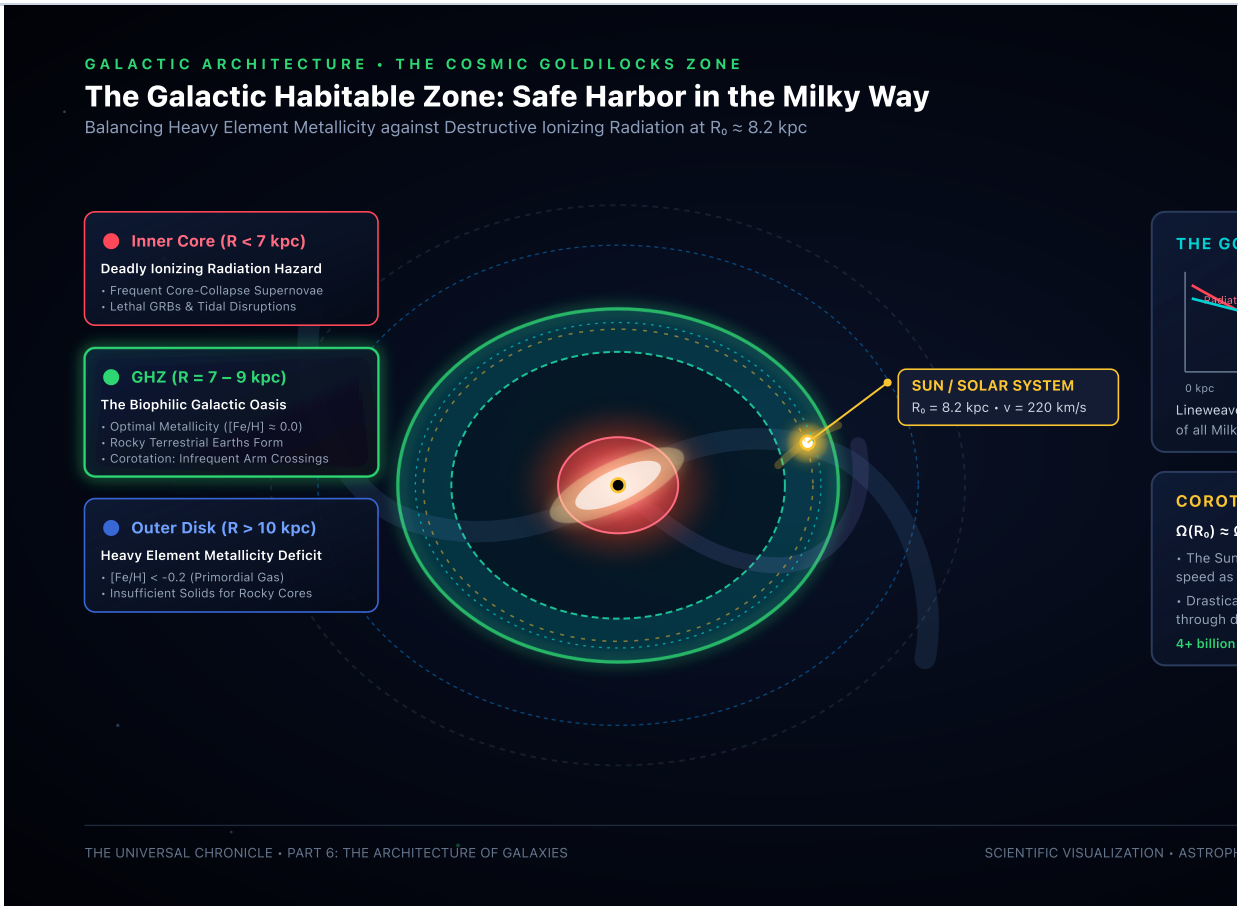
- **১. কেন্দ্রীয় বার এবং বাল্‌জ:** ২৭,০০০ আলোকবর্ষ দীর্ঘ এক ঘূর্ণায়মান চীনাবাদামের মতো কাঠামো, যার কেন্দ্রে স্যাজিটেরিয়াস এ* এবং প্রাচীন নক্ষত্ররা ঘনভাবে বাস করে।
- **২. পাতলা ডিস্ক (Thin Disk):** মাত্র ১,০০০ আলোকবর্ষ (৩০০ পারসেক) পুরু এক অতি-পাতলা চাদর, যার মাঝে সমস্ত সর্পিল বাহু, সক্রিয় গ্যাস মেঘ এবং আমাদের সূর্যের মতো ধাতু-সমৃদ্ধ পপুলেশন ১ নক্ষত্ররা অবস্থিত।
- **৩. পুরু ডিস্ক (Thick Disk):** প্রায় ৩,৩০০ আলোকবর্ষ (১ কিলোপারসেক) পর্যন্ত বিস্তৃত, যেখানে ছায়াপথের প্রাচীন আদিম নক্ষত্ররা বাস করে।
- **৪. নাক্ষত্রিক ও ডার্ক ম্যাটার হ্যালো:** ছায়াপথকে ঘিরে থাকা একটি বিশাল গোলক, যেখানে ১৫০টিরও বেশি প্রাচীন **গ্লোবিউলার ক্লাস্টার** এবং সুবিশাল অদৃশ্য অন্ধকার পদার্থ পরিব্যাপ্ত।

গ্যালাকটিক হ্যাবিটেবল জোন: মহাশূন্যে জীবনের নিরাপদ আশ্রয়

একটি নক্ষত্রজগতে যেমন তরল পানির অস্তিত্বের জন্য গোল্ডিলক জোন থাকে, তেমনি সমগ্র ছায়াপথেও রয়েছে একটি **গ্যালাকটিক হ্যাবিটেবল জোন (Galactic Habitable Zone বা GHZ)**—একটি বৃত্তাকার বলয় যেখানে কোটি কোটি বছর ধরে জটিল প্রাণ নিরাপদে বিকশিত হতে পারে:

কেন্দ্রের খুব কাছে গেলে ($r < 4\text{ kpc}$) নক্ষত্র ঘনত্ব এত বেশি যে মহাকর্ষীয় টানে গ্রহেরা তাদের কক্ষপথ হারায়। উপরন্তু সেখানে ঘন ঘন সুপারনোভা বিস্ফোরণ, গামা-রশ্মি বিচ্ছুরণ এবং কেন্দ্রীয় ব্ল্যাক হোলের বিকিরণ পৃথিবীর মতো গ্রহের বায়ুমণ্ডলকে বারবার উড়িয়ে পুড়িয়ে ছারখার করে দেয়।

অন্যদিকে ছায়াপথের প্রান্তসীমায় ($r > 10\text{ kpc}$) রাসায়নিক বিবর্তন খুব ধীরগতিতে হয়েছে: সেখানে লোহা, সিলিকন ও ম্যাগনেসিয়ামের মতো ভারী মৌল এত কম যে পাথুরে গ্রহ কিংবা গ্রহের সুরক্ষা রক্ষাকারী গলিত লোহার চৌম্বকীয় কোর তৈরি হতে পারে না।



চিত্র ৬.৫ক: মিল্কিওয়ে ছায়াপথে গ্যালাকটিক হ্যাবিটেবল জোন (GHZ)। কেন্দ্রীয় অঞ্চলের প্রাণঘাতী সুপারনোভা ও গামা-রে বিস্ফোরণের বিকিরণ এবং প্রান্তীয় অঞ্চলের ধাতব ঘাটতির ভারসাম্য বজায় রাখা এক মহাজাগতিক আশ্রয় ($r \approx ৭\text{–}৯\text{ kpc}$), যেখানে সূর্যের নিরাপদ কক্ষপথ ($R_0 = ৮.২\ \text{kpc}$) চার বিলিয়ন বছর ধরে জৈবিক বিবর্তনকে সুরক্ষিত রেখেছে।

আমাদের সৌরজগৎ ছায়াপথের কেন্দ্র থেকে ঠিক **৮.২ কিলোপারসেক (প্রায় ২৬,৭০০ আলোকবর্ষ)** দূরত্বে ওরাইয়ন-সিগনাস স্পারে বাস করে—ঠিক স্যাজিটেরিয়াস এবং পার্সিয়াস সর্পিল বাহুর মাঝখানের এক পরম শান্ত মরূদ্যানে। এখানে প্রাণঘাতী সুপারনোভা বিস্ফোরণ কোটি বছরে একবারও ঘটে না, এবং সূর্যের নিজস্ব বেগ সর্পিল ঘনত্ব তরঙ্গের গতির সমান হওয়ায় আমাদের সৌরজগৎ হিংস্র স্ট্রোমগ্রেন শকওয়েভের মুখোমুখি না হয়ে বিলিয়ন বছর ধরে স্থিতিশীল জীবন উপভোগ করতে পেরেছে।

মিল্কিওয়ের কাঠামোগত পরিমাপক সারণী

অংশ / প্যারামিটার	মাত্রা / বিস্তার	ভর ($M_\odot$)	প্রধান ভৌত বৈশিষ্ট্য
মোট ভিরিয়াল ভর	ব্যাসার্ধ $\sim ২০০\ \text{kpc}$	$\sim ১.১ \times ১০^{১২} M_\odot$	৮৫%-এর বেশি শীতল অন্ধকার পদার্থের হ্যালো দ্বারা নিয়ন্ত্রিত।
মোট নাক্ষত্রিক ভর	ব্যাস $\sim ৩০\ \text{kpc}$ ($\sim ১,০০,০০০$ আলোকবর্ষ)	$\approx ৫.৫ \times ১০^{১০} M_\odot$	১০০ থেকে ৪০০ বিলিয়ন নক্ষত্র।
পাতলা ডিস্ক	পুরুত্ব $\sim ৩০০\ \text{pc}$	$\approx ৪.৫ \times ১০^{১০} M_\odot$	সর্পিল বাহু, গ্যাস ভাণ্ডার, সূর্যের মতো পপুলেশন ১ তারকা।
পুরু ডিস্ক	পুরুত্ব $\sim ১,০০০\ \text{pc}$	$\approx ৬ \times ১০^{৯} M_\odot$	প্রাচীন স্বল্প-ধাতব তারকা; আদিম গ্যালাকটিক মিলনের ধ্বংসাবশেষ।
কেন্দ্রীয় বাল্‌জ ও বার	দৈর্ঘ্য $\sim ৮\ \text{kpc}$	$\approx ১.৫ \times ১০^{১০} M_\odot$	প্রাচীন পপুলেশন ২ তারকা, ঘূর্ণায়মান বার।
স্যাজিটেরিয়াস এ* (SMBH)	সোয়ার্জশিল্ড ব্যাসার্ধ ≈ ১২.৭ মিলিয়ন কিমি	$৪.৩ \times ১০^{৬} M_\odot$	কেন্দ্রীয় মহাকর্ষীয় সিংহাসন।
সূর্যের অবস্থান	$R_0 = ৮.২\ \text{kpc}$ (২৬,৭০০ আলোকবর্ষ)	—	গ্যালাকটিক হ্যাবিটেবল জোন; পর্যায়কাল ২৩ কোটি বছর (২২০ কিমি/সেকেন্ড)।

মঞ্চ প্রস্তুত: একটি সৌরসূতিকাগারের মহাকর্ষীয় পতন

বিগ ব্যাংয়ের প্রায় ৯০০ কোটি বছর পর—আজ থেকে ৪৬০ কোটি বছর পূর্বে—আমাদের মিল্কিওয়ে ছিল এক সম্পূর্ণ পরিণত, রাসায়নিকভাবে সমৃদ্ধ সর্পিল ছায়াপথ। এই ছায়াপথের এক নির্জন শহরতলীতে, ওরাইয়ন সর্পিল বাহুর ভেতরে, ঠান্ডা হাইড্রোজেন, হিলিয়াম এবং মহাজাগতিক ধূলিকণায় ভরা একটি বিশালাকার আণবিক মেঘ মহাকাশে নিঃশব্দে ভেসে বেড়াচ্ছিল।

মহাবিশ্ব ততদিনে প্রস্তুত করে ফেলেছিল মহাশূন্য, কণা, মৌলিক বলসমূহ, পর্যায় সারণীর ভারী উপাদান এবং ছায়াপথের নিরাপদ বন্দর। এবার প্রয়োজন ছিল কেবল একটি স্থানীয় স্ফুলিঙ্গের—একটি প্রতিবেশী মৃত্যুমুখী নক্ষত্রের সুপারনোভা শকওয়েভ—যা এই শান্ত মেঘকে কাঁপিয়ে দিয়ে শুরু করবে মহাকর্ষীয় পতন। *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের* **সপ্তম পর্বে** আমরা প্রত্যক্ষ করব আমাদের নিজেদের সৌরজগতের জন্মলগ্নের সেই অলৌকিক ইতিহাস: **সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Lin, C. C., & Shu, F. H. (1964).** “On the Spiral Structure of Disk Galaxies.” *The Astrophysical Journal*, 140, 646–655. doi:10.1086/147955.
- **Rubin, V. C., & Ford, W. K. (1970).** “Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions.” *The Astrophysical Journal*, 159, 379–403. doi:10.1086/150317.
- **Ferrarese, L., & Merritt, D. (2000).** “A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies.” *The Astrophysical Journal Letters*, 539(1), L9–L12. doi:10.1086/312838.
- **Gonzalez, G., Brownlee, D., & Ward, P. (2001).** “The Galactic Habitable Zone: Galactic Chemical Evolution.” *Icarus*, 152(1), 185–200. doi:10.1006/icar.2001.6617.
- **Bland-Hawthorn, J., & Gerhard, O. (2016).** “The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties.” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54(1), 529–596. doi:10.1146/annurev-astro-081915-023441.
- **Event Horizon Telescope Collaboration (Akiyama, K., et al.) (2022).** “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way.” *The Astrophysical Journal Letters*, 930(2), L12. doi:10.3847/2041-8213/ac6674.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "ছায়াপথের স্থাপত্য — সর্পিল বাহু, অতি-দানব ব্ল্যাক হোল এবং আমাদের মিল্কিওয়ে"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৬। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-6-the-architecture-of-galaxies-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • সপ্তম খণ্ড

সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য

সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য

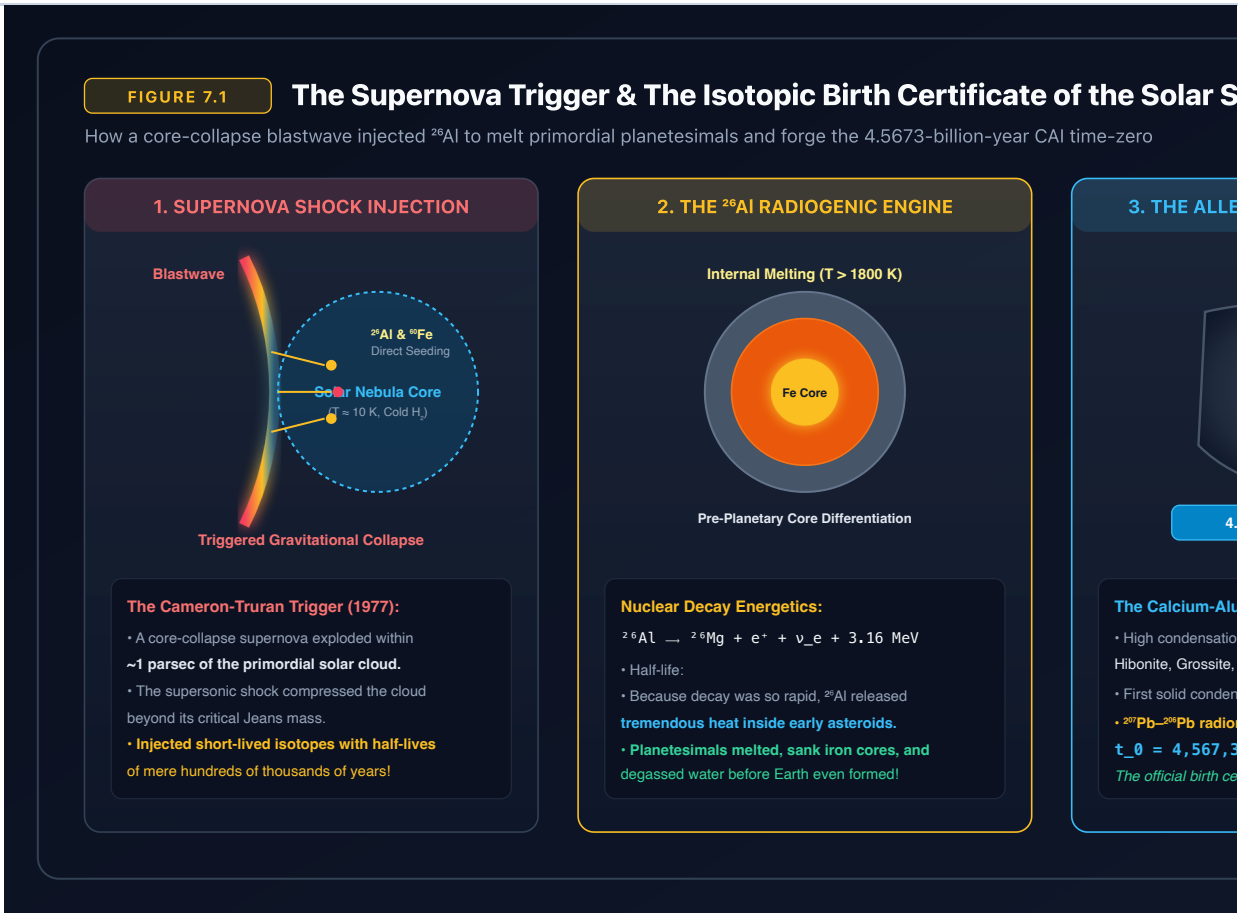
2,027 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৭: *চিত্র: প্রায় ৪.৫৭ বিলিয়ন বছর আগের সৌর নীহারিকা: ঘূর্ণায়মান প্রোটোপ্ল্যানেটারি গ্যাস ও ধূলিকণার চাকতি থেকে মহাকর্ষীয় সংঘর্ষের মাধ্যমে তরুণ সূর্যের চারপাশে গ্রহ ও গ্রহাণুগুলোর জন্ম হচ্ছে।*

আজ থেকে প্রায় ৪.৫৬৭ বিলিয়ন বছর পূর্বে, মিল্কিওয়ের ওরাইয়ন সর্পিল বাহুর গভীরে এক সাধারণ আণবিক গ্যাস মেঘে একটি স্থানীয় শকওয়েভ আঘাত হানে—যার ফলে সৌর নেবুলার মহাকর্ষীয় পতন শুরু হয়। সেই ঘূর্ণায়মান মহাকর্ষীয় ঘূর্ণির ৯৯.৮৬% পদার্থ জমা হয় কেন্দ্রের এক প্রদীপ্ত চুল্লিতে, যা হলো আমাদের তরুণ সূর্য; আর বাকি সামান্য ০.১৪% পদার্থ চ্যাপ্টা হয়ে তৈরি করে গ্যাস, খনিজ ধূলিকণা ও বরফের ঘূর্ণায়মান চাকতি—প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক। মহাকাশের ঘর্ষণ, ইলেক্ট্রোস্ট্যাটিক আকর্ষণ এবং প্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষের মধ্য দিয়ে সেই মাইক্রোস্কোপিক ধূলিকণাই গড়ে তুলেছিল আমাদের গোটা সৌরজগতের স্থায়ী স্থাপত্য।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৭.১: সুপারনোভার স্ফুলিঙ্গ এবং CAI কালনিরূপণ (৪.৫৬৭৩ বিলিয়ন বছর)। একটি নিকটবর্তী কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভা আদিম আণবিক মেঘকে সংকুচিত করে স্বল্পায়ু তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ (^{26}Al এবং ^{60}Fe) ইনজেক্ট করে। ^{26}Al-এর দ্রুত ক্ষয় (অর্ধায়ু: ৭,১৭,০০০ বছর) আদিম গ্রহাণুগুলোকে ভেতর থেকে গলিয়ে দেয়, আর কার্বনেশিয়াস কনড্রাইটের ক্যালসিয়াম-অ্যালুমিনিয়াম সমৃদ্ধ উপাদান (CAI) সৌরজগতের জন্মমুহূর্তকে ঠিক ৪,৫৬৭.৩০ মিলিয়ন বছর পূর্বে চিহ্নিত করে।

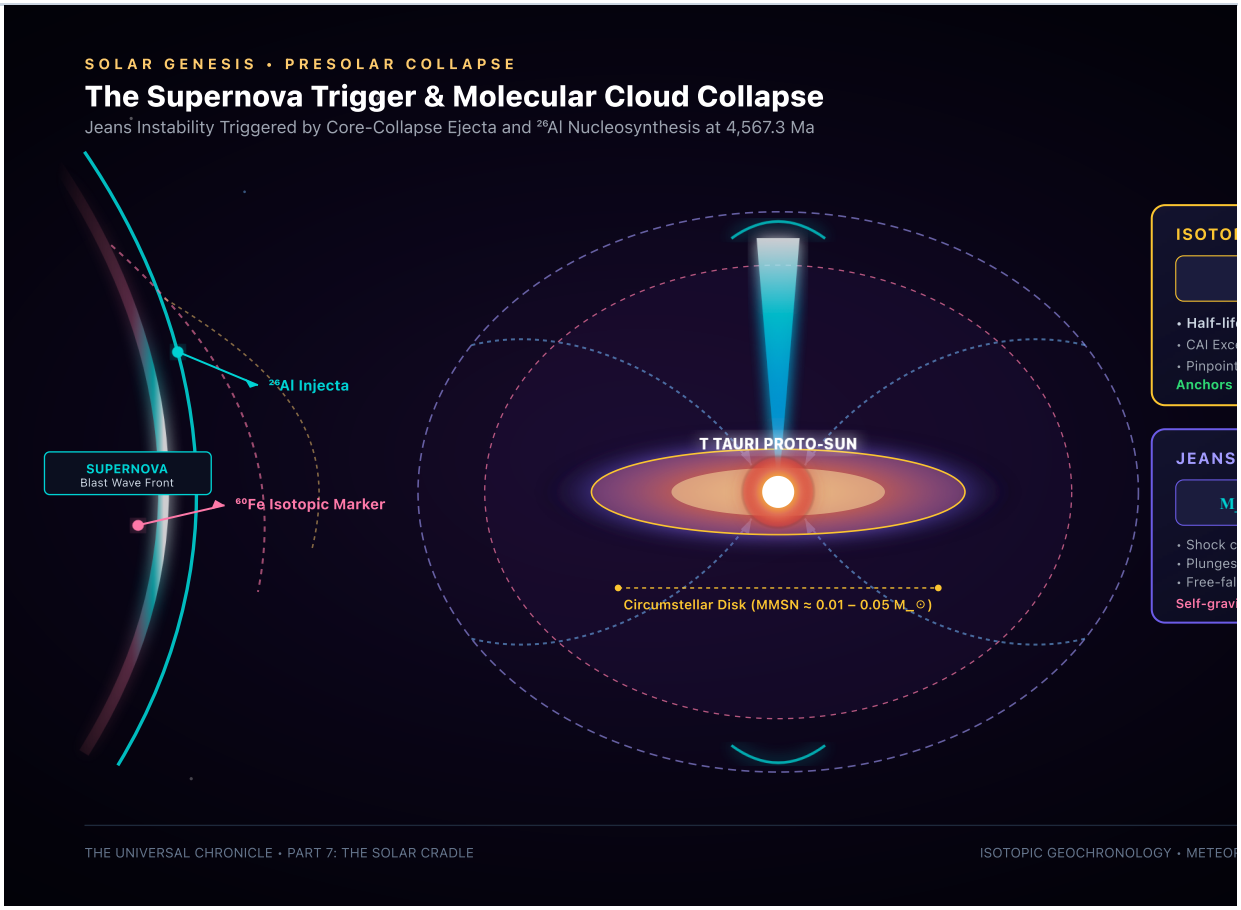
সুপারনোভার স্ফুলিঙ্গ: সৌরজগতের জন্মসনদ

আমরা ঠিক কীভাবে জানি সৌরজগত কখন জন্ম নিয়েছিল? এর উত্তর অক্ষত অবস্থায় সংরক্ষিত রয়েছে আমাদের সৌরজগতের প্রাচীনতম কঠিন পাথুরে উপাদানের ভেতরে: **ক্যালসিয়াম-অ্যালুমিনিয়াম সমৃদ্ধ ইনক্লুশন (Calcium-Aluminum-rich Inclusions বা CAIs)**—যা ১৯৬৯ সালে মেক্সিকোতে পতিত হওয়া অ্যালেন্দে (Allende) উল্কাপিণ্ডের মতো আদিম কার্বনেশিয়াস কনড্রাইটের ভেতরে পাওয়া যায়।

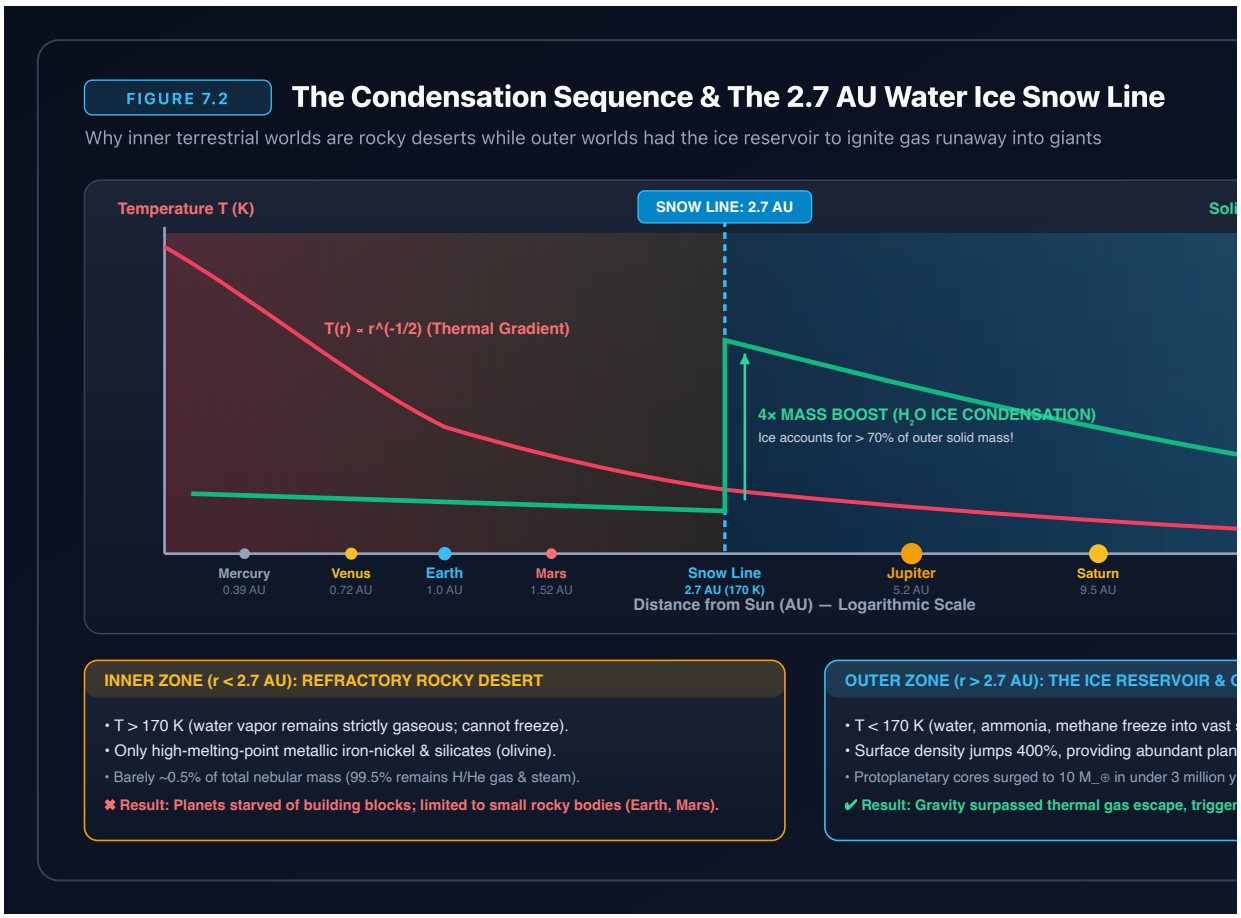
অতি-উচ্চ রেজোলিউশনের ইউরেনিয়াম-সীসা ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) তেজস্ক্রিয় কালনির্ণয় পদ্ধতির মাধ্যমে বিজ্ঞানীরা এই CAI-এর ঘনীভবনের বয়স পরিমাপ করেছেন ঠিক **৪,৫৬৭.৩০ ± ০.১৬ মিলিয়ন বছর**। এই মুহূর্তটিই হলো আমাদের সৌরজগতের 'শূন্য বছর' (Year Zero)।

বিলুপ্ত রেডিওনিউক্লাইডের সাক্ষ্য

CAI-এর ভেতরে অতিরিক্ত পরিমাণে ম্যাগনেসিয়াম-২৬ (^{26}Mg) পাওয়া যায়, যা মূলত **অ্যালুমিনিয়াম-২৬ (^{26}Al)**-এর তেজস্ক্রিয় বিটা ক্ষয়ের ফলে তৈরি হয়। যেহেতু অ্যালুমিনিয়াম-২৬-এর অর্ধায়ু মাত্র ৭,১৭,০০০ বছর, তাই এটি গ্যালাক্সির দূরবর্তী অতীত থেকে টিকে থাকা সম্ভব নয়। সৌর মেঘ সংকুচিত হওয়ার মাত্র দশ লাখ বছর আগে একটি পার্শ্ববর্তী কোর-ক্ল্যাপস সুপারনোভা এই তেজস্ক্রিয় উপাদানটি আমাদের মেঘে ছুঁড়ে দিয়েছিল। সেই মৃত তারার শকওয়েভই আমাদের মেঘটিকে কাঁপিয়ে দিয়ে সৌরজগতের জন্মকে ত্বরান্বিত করেছিল।



চিত্র ৭.১ক: সুপারনোভা শকওয়েভ এবং সৌর আণবিক মেঘের মহাকর্ষীয় পতন। স্বল্পায়ু তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ (^{26}Al এবং ^{60}Fe) সমৃদ্ধ সুপারনোভার নাক্ষত্রিক ঝড় আদিম শীতল গ্যাস মেঘকে জীনস সীমার বাইরে সংকুচিত করে, যা ৪,৫৬৭.৩ মিলিয়ন বছর পূর্বে ঘূর্ণায়মান প্রোটো-সোলার ডিস্কের জন্ম দেয়।



Shakil Mahmud • Research Monograph

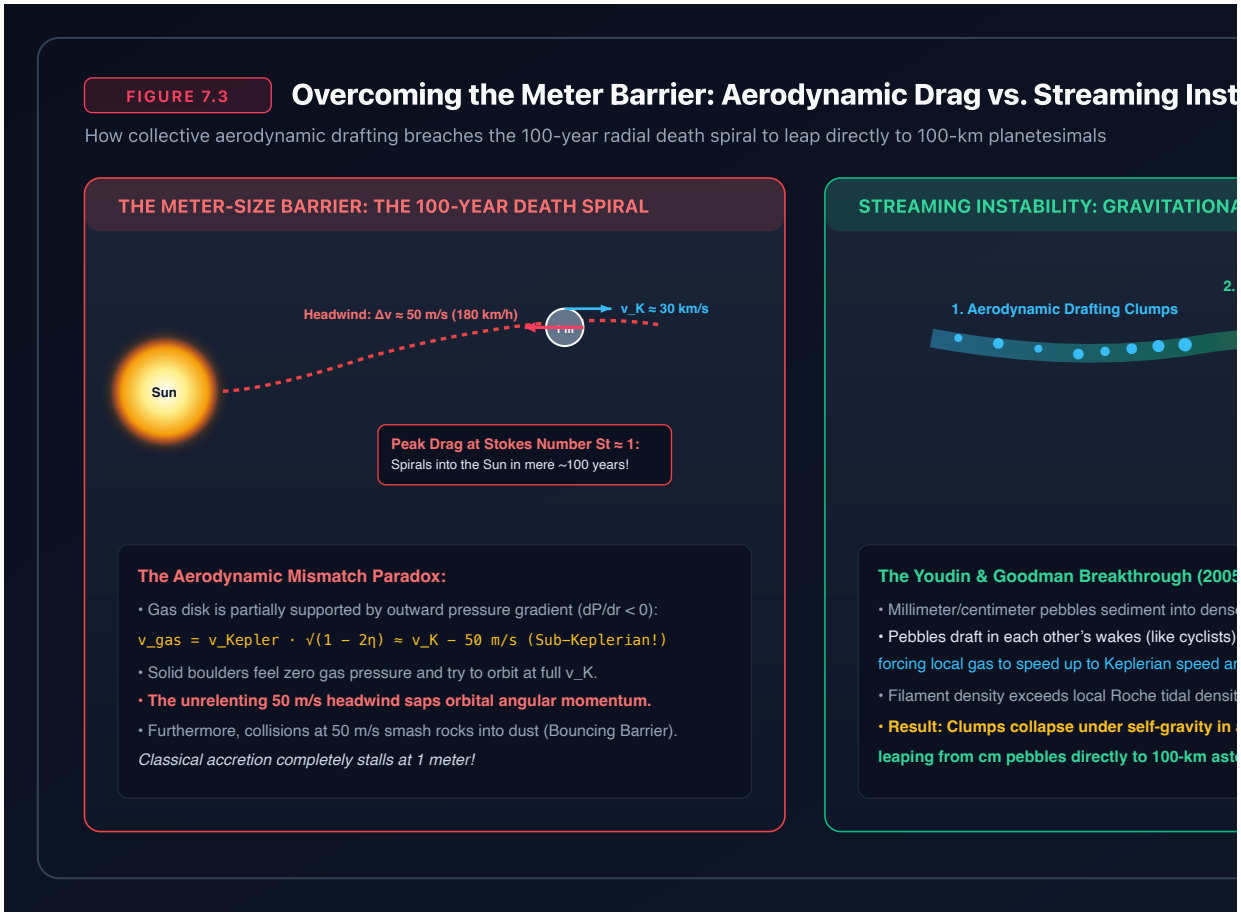
চিত্র ৭.২: তাপীয় ঘনীভবন ক্রম এবং ২.৭ এইউ তুষার রেখা। সূর্য থেকে দূরত্বের সাথে সাথে তাপমাত্রা কমে যাওয়ায় ২.৭ এইউ-এর ভেতরে কেবল উচ্চ-তাপমাত্রার লোহা ও সিলিকেট ঘনীভূত হতে পেরেছিল, যা অভ্যন্তরীণ গ্রহগুলোকে উপাদানের অভাবে ক্ষুদ্রাকার করে রাখে। কিন্তু ১৭০ কেলভিন তুষার রেখার বাইরে জলীয় বাষ্প কঠিন বরফের দানায় জমে যাওয়ায় কঠিন পদার্থের ঘনত্ব ৪০০% বৃদ্ধি পায়—যা বৃহস্পতি গ্রহের দ্রুত গ্যাসীয় গঠনের মূল চালিকাশক্তি ছিল।

টি টরি প্রোটো-সান এবং সর্বনিম্ন ভরের সৌর নেবুলা

ঘূর্ণায়মান মেঘটি সংকুচিত হওয়ার সাথে সাথে কৌণিক ভরবেগের নিত্যতার কারণে বাইরের গ্যাস ও ধূলিকণা চ্যাপ্টা হয়ে ১০০ জ্যোতির্বৈজ্ঞানিক একক (AU) চওড়া একটি **প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্কে** রূপ নেয়। কেন্দ্রে মহাকর্ষীয় স্থৈতিক শক্তি কেলভিন-হেলমহোল্টজ সংকোচনের মাধ্যমে তাপে পরিণত হয়ে তৈরি করে **প্রোটো-সান বা আদি-সূর্য**।

প্রথম এক কোটি বছর আমাদের তরুণ সূর্য ছিল অশান্ত **টি টরি (T Tauri) পর্যায়ে**: তখনও এর কেন্দ্রে পারমাণবিক ফিউশন শুরু হয়নি, বরং মহাকর্ষীয় সংকোচনের শক্তিতেই এটি জ্বলছিল। এর চৌম্বক ক্ষেত্র ছিল আজকের চেয়ে হাজার গুণ বেশি শক্তিশালী, এবং এটি দুই মেরু দিয়ে তীব্র প্লাজমা জেট এবং প্রচণ্ড সৌর বাতাস নির্গত করে ভেতরের ডিস্কে চরম অতিবেগুনী ও এক্স-রে বিকিরণ ছড়াচ্ছিল।

এই ডিস্কের ভরকে ঐতিহাসিকভাবে **সর্বনিম্ন ভরের সৌর নেবুলা (MMSN)** হিসেবে মডেল করা হয়: যা ছিল সূর্যের মোট ভরের প্রায় **১% থেকে ৫%** ($0.01\text{–}0.05\ M_\odot$), অর্থাৎ বৃহস্পতি গ্রহের চেয়ে ১০ থেকে ৫০ গুণ বেশি ভরের গ্যাস ও ধূলিকণা।



চিত্র ৭.৩: মিটার-আকারের বাধা অতিক্রম (স্ট্রিমিং ইনস্ট্যাবিলিটি)। গ্যাসীয় চাপের কারণে নেবুলার গ্যাস সূর্যের চারপাশে কেপলারীয় বেগের চেয়ে কিছুটা ধীরে ঘোরে; এর ফলে ১-মিটার পাথুরে খণ্ডগুলো প্রতি সেকেন্ডে ৫০ মিটার বেগের হেডউইন্ডের মুখে পড়ে ১০০ বছরের মধ্যে সর্পিলাকারে সূর্যের পেটে গিয়ে ধ্বংস হওয়ার ঝুঁকিতে ছিল। স্ট্রিমিং ইনস্ট্যাবিলিটি এই সমস্যার সমাধান করে: সেন্টিমিটার-আকারের ক্ষুদ্র নুড়িকণাগুলো একসাথে ঝাঁক বেঁধে গ্যাসের গতি বাড়িয়ে দেয় এবং নিজস্ব মহাকর্ষে ধসে পড়ে সরাসরি ১০০ কিমি আকারের প্ল্যানেটেসিমালে রূপ নেয়।

ঘনীভবন ক্রম: কেন ভেতরের গ্রহগুলো পাথুরে এবং বাইরেরগুলো গ্যাস দানব?

কেন্দ্রীয় সূর্যের দূরত্ব বৃদ্ধির সাথে সাথে ডিস্কের তাপমাত্রা তীব্রভাবে কমে যায়: কেন্দ্রের কাছে ১,৮০০ কেলভিন থেকে পরিধিতে ৩০ কেলভিনের নিচে। এই তাপমাত্রার তারতম্যই নির্ধারণ করে **রাসায়নিক ঘনীভবন ক্রম**:

১. অভ্যন্তরীণ রিফ্র্যাক্টরি অঞ্চল ($r < 2.7\text{ AU}$)

সূর্যের কাছাকাছি অঞ্চলে তাপমাত্রা এত বেশি ছিল যে পানি, মিথেন বা অ্যামোনিয়ার মতো উদ্বায়ী যৌগগুলো ঘনীভূত হতে পারেনি। কেবল উচ্চ গলনাঙ্কের খনিজ পদার্থই কঠিন দানায় জমতে পেরেছিল:

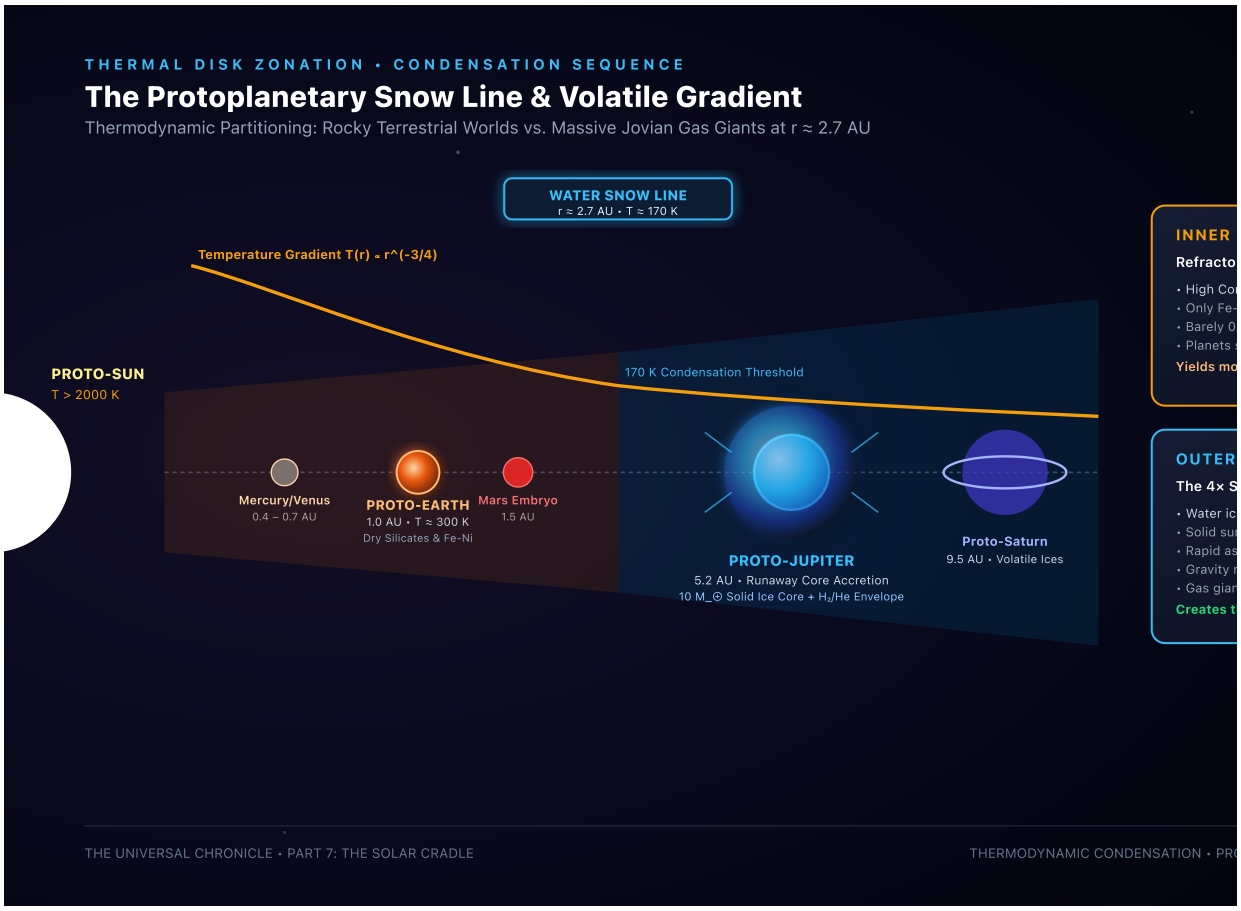
- ক্যালসিয়াম, অ্যালুমিনিয়াম ও টাইটানিয়াম অক্সাইড ($T_{\text{cond}} \sim ১,৫০০\text{–}১,৭০০\text{ K}$)
- লোহা ও নিকেলের সংকর ধাতু ($T_{\text{cond}} \sim ১,৪০০\ \text{K}$)
- ম্যাগনেসিয়াম-সমৃদ্ধ সিলিকেট খনিজ: ফরস্টেরাইট (Mg_2SiO_4) এবং এনস্ট্যাটাইট ($MgSiO_3$) ($T_{\text{cond}} \sim ১,৩০০\ \text{K}$)

যেহেতু এই ধাতু ও সিলিকেটগুলো সমগ্র নেবুলার ভরের মাত্র **০.৫%** গঠন করেছিল, তাই অভ্যন্তরীণ সৌরজগতে গ্রহ তৈরির মতো কঠিন উপাদান ছিল অত্যন্ত কম। ফলে ভেতরের চারটি গ্রহ—বুধ, শুক্র, পৃথিবী ও মঙ্গল—ছোট, ঘন ও পাথুরে হিসেবেই বেড়ে উঠেছে।

২. তুষার রেখা (Snow Line) প্রায় ২.৭ AU দূরত্বে

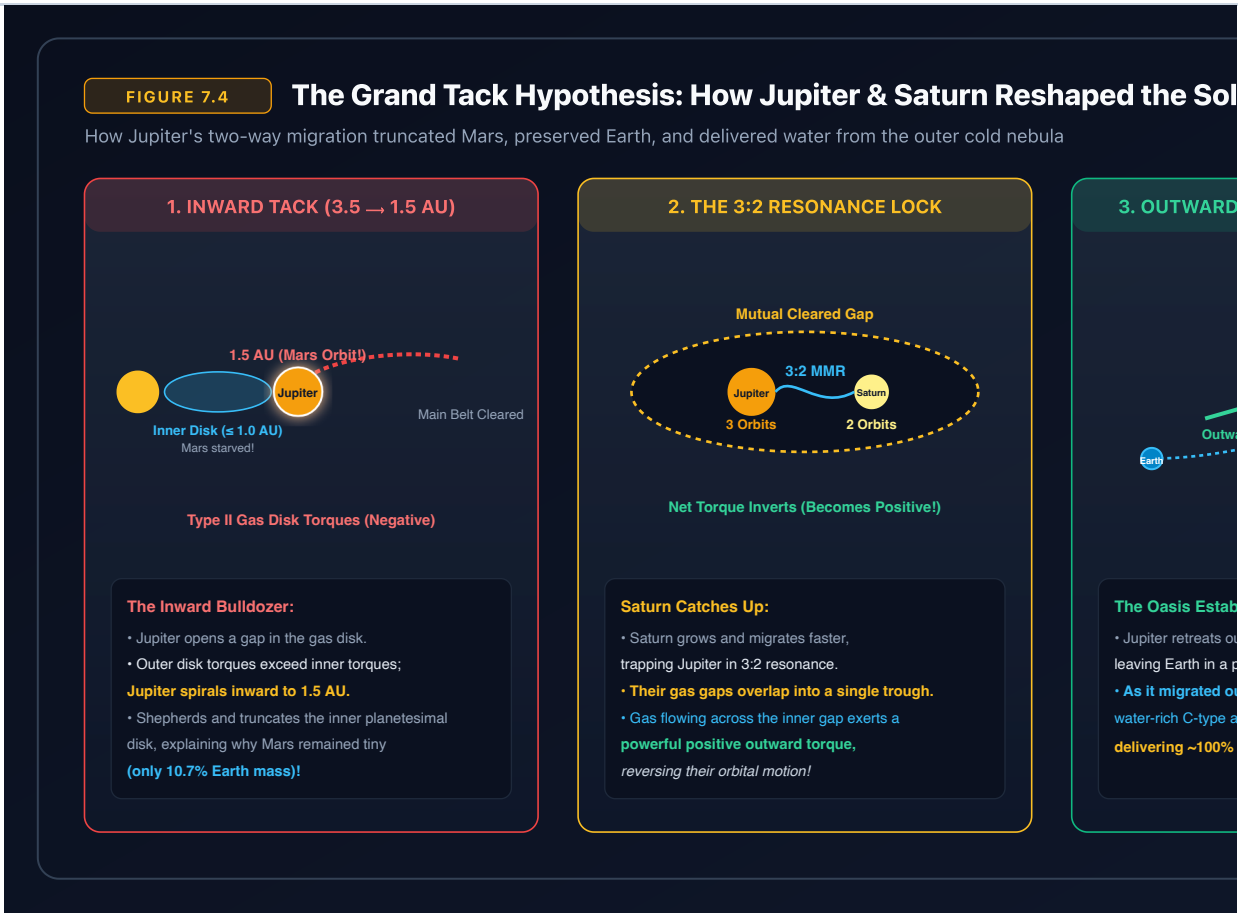
সূর্য থেকে ২.৭ জ্যোতির্বৈজ্ঞানিক একক (বর্তমান গ্রহাণু বলয়ের অবস্থান) দূরত্বে তাপমাত্রা নেমে আসে **১৭০ কেলভিনের** নিচে। এই সীমানাকে বলা হয় **তুষার রেখা (Snow Line বা Ice Line)**—যেখানে জলীয় বাষ্প সরাসরি জমে বরফের স্ফটিকে রূপ নিতে পেরেছিল।

মহাবিশ্বে হাইড্রোজেন ও অক্সিজেনের প্রাচুর্য অপরিসীম হওয়ায় পানির বরফ তৈরি হওয়ার সাথে সাথে কঠিন পদার্থের ঘনত্ব **চার থেকে পাঁচ গুণ বৃদ্ধি পায়**! তুষার রেখার বাইরে আদিম ভ্রূণ গ্রহগুলো বরফের বিশাল ভাণ্ডার পেয়ে অত্যন্ত দ্রুত দানবাকৃতির বরফ-পাথুরে কোরে পরিণত হতে পেরেছিল।



চিত্র ৭.২ক: তাপগতিবিদ্যীয় ঘনীভবন ক্রম এবং তুষার রেখা (Snow Line)। সূর্য থেকে ২.৭ জ্যোতির্বৈজ্ঞানিক এককে ($T \approx ১৭০\ \mathrm{K}$) জলীয় বাষ্প জমে কঠিন বরফে রূপ নেওয়ায় ডিস্কের কঠিন ভর চার গুণ বৃদ্ধি পায়; যা বৃহস্পতি ও শনির দানবীয় কোর গঠনে জ্বালানি যোগায়, বিপরীতে ভেতরের গ্রহগুলো ছোট ও পাথুরে থেকে যায়।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৭.৪: গ্র্যান্ড ট্যাক হাইপোথিসিস (ওয়ালশ ও মরবিডেলি, ২০১১)। টাইপ ২ গ্যাস ডিস্ক টর্কের প্রভাবে বৃহস্পতি প্রথমে সূর্যের দিকে ১.৫ এইউ পর্যন্ত এগিয়ে আসে, যা ভেতরের গ্রহাণু ডিস্ককে কেটে ফেলে মঙ্গল গ্রহকে উপাদানের অভাবে ছোট করে রাখে। পরে শনি যখন ৩:২ কক্ষীয় রেজোন্যান্সে প্রবেশ করে, তখন তাদের যৌথ মহাকর্ষীয় ফাঁক উল্টো টর্ক তৈরি করে উভয় দৈত্যাকার গ্রহকে পেছনের বর্তমান কক্ষপথে ঠেলে দেয়—আর এই যাত্রায় ছিটকে আসা বরফপূর্ণ উল্কাপিণ্ড পৃথিবীতে পানি সরবরাহ করে।

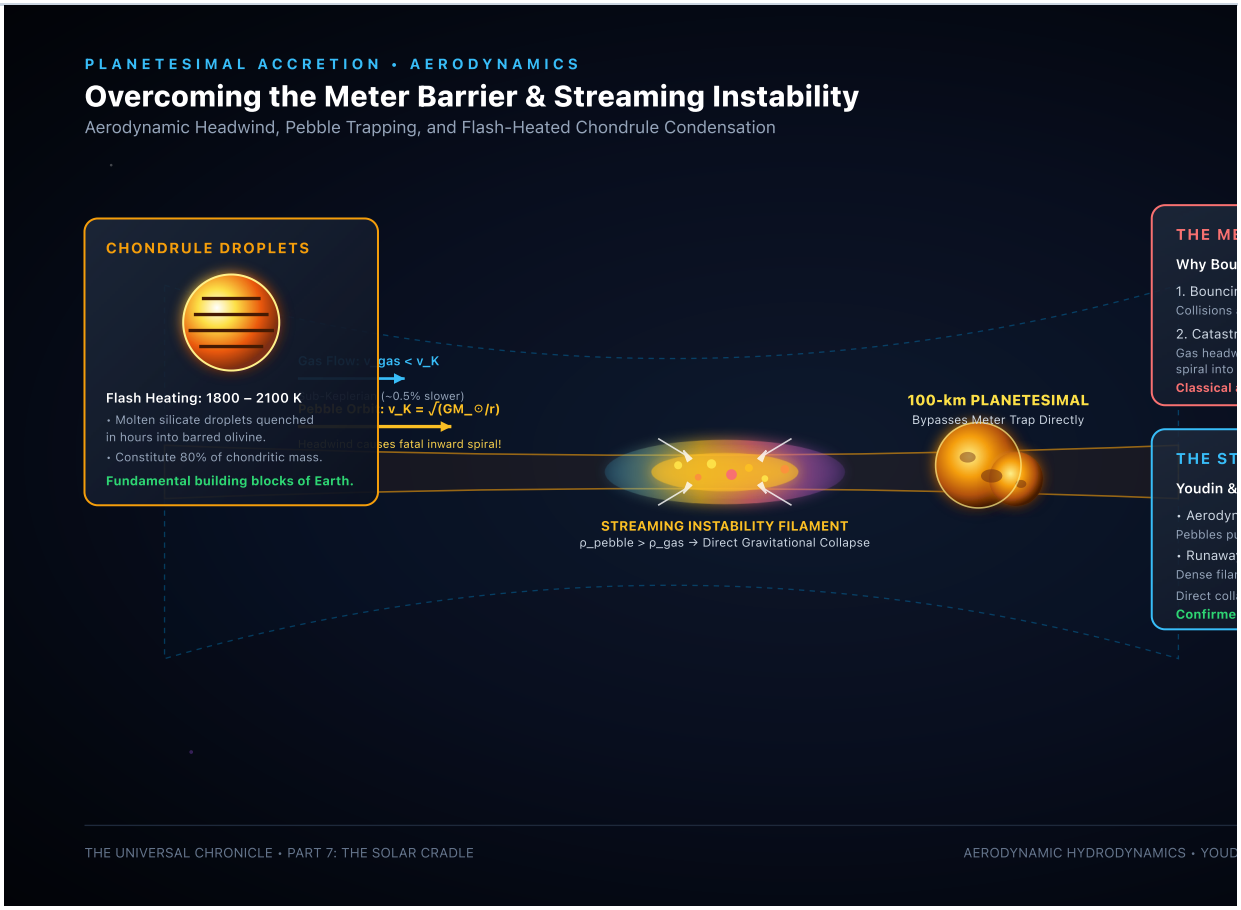
ধূলিকণা থেকে প্ল্যানেটেসিমাল: মিটার-আকারের ফাঁদ ও তার সমাধান

মাইক্রোস্কোপিক ধূলিকণা কীভাবে হাজার কিলোমিটার আকারের গ্রহে রূপান্তরিত হলো? এই প্রক্রিয়াটি ছিল চরম মহাজাগতিক বাধার মুখে:

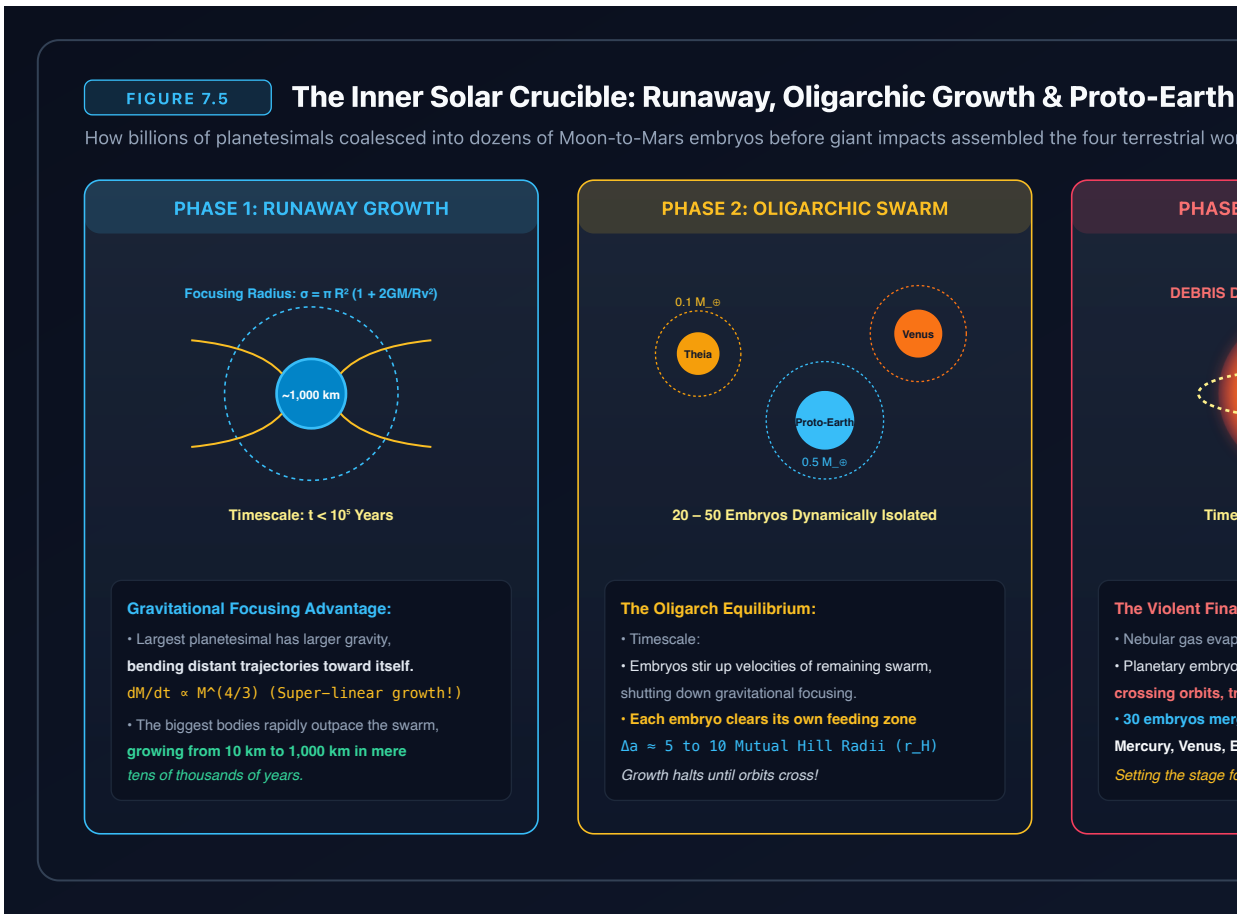
প্রাথমিক পর্যায়ে ধূলিকণাগুলো ব্রাউনীয় গতিতে মৃদু ধাক্কা খেয়ে ভ্যান ডার ওয়ালস ও ইলেক্ট্রোস্ট্যাটিক আকর্ষণে আটকে গিয়ে সেন্টিমিটার আকারের ক্ষুদ্র নুড়িতে পরিণত হয়। কিন্তু আকার যখন ১ মিটারে পৌঁছায়, তখন শুরু হয় **গ্যাসীয় হেডউইন্ডের ফাঁদ**।

যেহেতু গ্যাস ডিস্কটি নিজস্ব তাপীয় চাপে কিছুটা প্রসারিত থাকে, তাই এটি সূর্যের চারপাশে কেপলারীয় গতির চেয়ে প্রতি সেকেন্ডে ৫০ মিটার ধীরে ঘোরে। কিন্তু ১ মিটার আকারের নিরেট পাথুরে খণ্ডগুলো গ্যাস চাপ অনুভব করে না এবং পূর্ণ কেপলারীয় বেগে ছুটতে চায়। এর ফলে পাথরগুলো প্রতি সেকেন্ডে ৫০ মিটার বেগের এক প্রচণ্ড বিপরীত বাতাসের (Headwind) মুখে পড়ে। এই হেডউইন্ড পাথরের কৌণিক ভরবেগ কেড়ে নেয়, যার ফলে ১ মিটার আকারের যেকোনো পাথর মাত্র **১০০ বছরের মধ্যে সর্পিলাকারে সূর্যের বুকে আছড়ে পড়ে পুড়ে ছাই হয়ে যাওয়ার** কথা!

স্ট্রিমিং ইনস্ট্যাবিলিটি (ইউডিন ও গুডম্যান, ২০০৫)
২০০৫ সালে জ্যোতির্বিজ্ঞানী অ্যান্ড্রু ইউডিন এবং জেরেমি গুডম্যান প্রমাণ করেন যে কোটি কোটি সেন্টিমিটার আকারের নুড়িকণা যখন একসাথে সূর্যের দিকে ড্রাফট করতে থাকে, তখন তাদের সম্মিলিত ধাক্কায় স্থানীয় গ্যাসের গতি বেড়ে যায় এবং হেডউইন্ড শান্ত হয়ে আসে। নুড়িকণাগুলো তখন অতি-ঘন ফিলামেন্টে জমাট বাঁধে। যখন নুড়ির ঘনত্ব গ্যাসের চেয়ে ১০০ গুণ বেড়ে যায়, তখন পুরো ঝাঁকটি নিজস্ব মহাকর্ষের টানে একযোগে মাত্র কয়েক মাসের মধ্যে ধসে পড়ে—আর কোনো মিটার ফাঁদে না পড়ে এক লাফে **১০ থেকে ১০০ কিলোমিটার আকারের নিরেট প্ল্যানেটেসিমালে** রূপ নেয়!



চিত্র ৭.৩ক: অ্যারোডাইনামিক স্ট্রিমিং অস্থিরতা এবং কনড্রুল নুড়ির এক্রিশন। মিটার আকারের নুড়িকণাগুলো গ্যাসীয় হেডউইন্ড কাটিয়ে অতি-ঘন টার্বুলেন্ট ফিলামেন্টে জমাট বাঁধে; যেখানে সামষ্টিক মহাকর্ষীয় পতনে কোনো ফাঁদে না পড়ে সরাসরি ১০০ কিলোমিটার ব্যাসের নিরেট আদিম প্ল্যানেটেসিমাল গঠিত হয়।



Shakil Mahmud • Research Monograph

চিত্র ৭.৫: প্রোটো-আর্থ ও পাথুরে গ্রহসমূহের তিন-পর্যায়ের সমাবেশ। তীব্র মহাকর্ষীয় আকর্ষণে প্রাথমিক বৃদ্ধি দ্রুত অলিগার্কিক বৃদ্ধিতে রূপ নেয়, যার ফলে চাঁদ থেকে মঙ্গলের আকারের ৫০-১০০টি আদিম ভ্রূণ গ্রহের জন্ম হয়। পরবর্তীতে গ্যাস সরে যাওয়ার পর কক্ষীয় বিশৃঙ্খলায় শুরু হয় প্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষের যুগ—যা এদের পরস্পরের সাথে মিশিয়ে বুধ, শুক্র, পৃথিবী ও মঙ্গল—এই চারটি স্থায়ী অভ্যন্তরীণ গ্রহে রূপ দেয়।

দানব গ্রহদের দৌড়: কোর এক্রিশন এবং গ্র্যান্ড ট্যাক হাইপোথিসিস

তুষার রেখার বাইরে বরফের প্রাচুর্যে প্ল্যানেটেসিমালগুলো মাত্র ৩০ লক্ষ (৩ মিলিয়ন) বছরের মধ্যে ১০ থেকে ১৫টি পৃথিবীর ভরের সমান বিশাল বরফ-পাথুরে কোরে পরিণত হয়। কোরটি এই সংকটকালীন ভরে পৌঁছাতেই তার মহাকর্ষীয় মুক্তিবেগ আশপাশের হাইড্রোজেন ও হিলিয়াম গ্যাসের তাপীয় বেগকে ছাড়িয়ে যায়।

কোরটি তখন ভ্যাকুয়াম ক্লিনারের মতো ডিস্কের সমস্ত গ্যাস গোগ্রাসে গিলতে শুরু করে—এভাবেই জন্ম নেয় **বৃহস্পতি**, এবং তার কিছুক্ষণ পর **শনি**। এই গ্যাসীয় ভোজের সুযোগ ছিল অত্যন্ত ক্ষণস্থায়ী: তরুণ সূর্যের তীব্র টি-টরি সৌর বাতাস ৩০ থেকে ১০০ লক্ষ বছরের মধ্যে সমস্ত অবশিষ্ট গ্যাস উড়িয়ে দেয়। দূরে থাকা ইউরেনাস ও নেপচুন সময়মতো যথেষ্ট গ্যাস গিলতে না পেরে "আইস জায়ান্ট" হিসেবেই থেকে যায়।

গ্র্যান্ড ট্যাক হাইপোথিসিস (ওয়ালশ ও মরবিডেলি, ২০১১)

বৃহস্পতি গঠিত হওয়ার পর গ্যাস ডিস্কের সাথে ভরবেগের আদান-প্রদানে সূর্যের দিকে এগোতে থাকে এবং বর্তমান মঙ্গল গ্রহের কক্ষপথ (১.৫ AU) পর্যন্ত চলে আসে। কিন্তু সৌভাগ্যবশত, পেছনে শনি দ্রুত বড় হয়ে বৃহস্পতির সাথে **৩:২ কক্ষীয় রেজোন্যান্সে** আবদ্ধ হয়। এই রেজোন্যান্স তাদের মাঝে গ্যাসের ডিস্কে ফাঁক তৈরি করে মহাকর্ষীয় টর্ককে উল্টে দেয়, যার ফলে একটি পালতোলা জাহাজের মতো (Tack) উভয় গ্রহ পেছনের দিকে সরে গিয়ে আজকের বর্তমান কক্ষপথে স্থিতিশীল হয়। বৃহস্পতির এই আগ্রাসী অগ্রযাত্রা ও পশ্চাদপসরণ মঙ্গল গ্রহের জন্য উপাদান অবশিষ্ট রাখেনি এবং পৃথিবীর জন্য পানি-সমৃদ্ধ উল্কা সরবরাহ করেছিল।

অভ্যন্তরীণ অগ্নিকুণ্ড: অলিগার্কিক বৃদ্ধি এবং প্রোটো-আর্থ

অভ্যন্তরীণ ০.৫ থেকে ১.০ জ্যোতির্বৈজ্ঞানিক এককের মাঝে গ্যাস উড়ে যাওয়ার পর চাঁদ থেকে মঙ্গলের আকারের প্রায় ৫০ থেকে ১০০টি আদিম গ্রহ-ভ্রূণ অবশিষ্ট ছিল। পরবর্তী ৩ থেকে ১০ কোটি বছর ধরে এই ভ্রূণগুলো বিশৃঙ্খল, পারস্পরিক ছেদকারী উপবৃত্তাকার কক্ষপথে ঘুরতে থাকে।

এটি ছিল প্রলয়ঙ্কর সংঘাতের যুগ: ভ্রূণ গ্রহগুলো প্রতি সেকেন্ডে ৩০ কিলোমিটার গতিতে একে অপরের সাথে ধাক্কা খেয়ে মিশে যেতে থাকে বা চূর্ণবিচূর্ণ হতে থাকে। এই মহাজাগতিক ধ্বংসযজ্ঞ থেকেই শেষ পর্যন্ত বেঁচে থাকে মাত্র চারটি পাথুরে গ্রহ: বুধ, শুক্র, পৃথিবী এবং মঙ্গল।

সৌরজগতের সৃষ্টির কালানুক্রমিক সারণী

পর্যায় / মাইলফলক	সময়কাল (t_0 থেকে)	প্রধান ভৌত প্রক্রিয়া	পর্যবেক্ষণমূলক প্রমাণ
সুপারনোভা ধাক্কা ও নেবুলা পতন	-১০ লাখ থেকে ০ বছর	আণবিক মেঘের মহাকর্ষীয় পতন; ^{26}Al ও ^{60}Fe তেজস্ক্রিয় পদার্থের প্রবেশ।	কার্বনেশিয়াস কনড্রাইটে আইসোটোপিক অসঙ্গতি।
CAI ঘনীভবন (t_0)	০.০০ বছর (৪.৫৬৭৩ Ga)	১৫০০ কেলভিনের উপরে প্রথম উচ্চ-তাপমাত্রার খনিজ স্ফটিকায়ন।	অ্যালেন্দে উল্কাপিণ্ডের ক্যালসিয়াম-অ্যালুমিনিয়াম ইনক্লুশন।
প্ল্যানেটেসিমাল গঠন	১ লাখ থেকে ১০ লাখ বছর	স্ট্রিমিং ইনস্ট্যাবিলিটিতে নুড়ি সংগ্রহ; সরাসরি ১০–১০০ কিমি বস্তুতে ধস।	কাইপার বেল্ট বস্তু অ্যারোকথ (Arrokoth)।
দানব গ্রহের গ্যাসীয় বৃদ্ধি	১০ লাখ থেকে ৫০ লাখ বছর	বৃহস্পতি ও শনির কোর ১০ পৃথিবী ভর ছাড়ায়; তীব্র গ্যাসীয় সঞ্চয়ন।	বৃহস্পতি ও শনির বায়ুমণ্ডলীয় ভর ও সংমিশ্রণ।
গ্র্যান্ড ট্যাক ও গ্যাস অপসারণ	৩০ লাখ থেকে ১ কোটি বছর	বৃহস্পতির ১.৫ AU-তে আগমন ও শনির সাথে পশ্চাদপসরণ; গ্যাস অপসারণ।	মঙ্গল গ্রহের ক্ষুদ্র ভর; গ্রহাণু বলয়ের ফাঁকা কাঠামো।
পাথুরে গ্রহের প্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষ	১ কোটি থেকে ১০ কোটি বছর	৫০–১০০টি ভ্রূণ গ্রহের সংঘর্ষে বুধ, শুক্র, পৃথিবী ও মঙ্গলের জন্ম।	পৃথিবী-চাঁদ ব্যবস্থা; গ্রহীয় কোর ও ম্যান্টল পৃথকীকরণ।

মহাপ্রলয়ের দ্বারপ্রান্তে প্রোটো-আর্থ

আজ থেকে প্রায় ৪.৫১ বিলিয়ন বছর পূর্বে—প্রথম CAI ঘনীভবনের প্রায় ৫ কোটি বছর পর—আমাদের পৃথিবী তার বর্তমান ভরের প্রায় ৯০% অর্জন করে ফেলেছিল। **প্রোটো-আর্থ (Proto-Earth)** নামে পরিচিত এই আদিম গ্রহটি ছিল অ্যালুমিনিয়াম-২৬-এর তেজস্ক্রিয় তাপে ফুটন্ত এক অগ্নিকুণ্ড, যা ঘন জলীয় বাষ্পের বায়ুমণ্ডলে মোড়ানো ছিল।

কিন্তু আমাদের পৃথিবীর চূড়ান্ত স্থাপত্য তখনও অসমাপ্ত ছিল। খুব কাছেই, একই কক্ষপথের অস্থির রেজোন্যান্সে ওঁত পেতে ছিল মঙ্গলের আকারের আরেকটি আদিম গ্রহ—যাকে ভূ-রসায়নবিদরা নাম দিয়েছেন **থিয়া (Theia)**। এই দুটি গ্রহের অনিবার্য সংঘর্ষ সম্পূর্ণ নতুনভাবে গড়ে তুলবে আমাদের পৃথিবীকে, গলিত ম্যাগমার সমুদ্র বাষ্পীভূত করবে, এবং সৃষ্টি করবে সেই মহাকর্ষীয় সঙ্গীকে যা আজ অবধি পৃথিবীর ঋতু ও জলবায়ুকে স্থিতিশীল রেখেছে: আমাদের চাঁদ।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের **অষ্টম পর্বে** আমরা প্রত্যক্ষ করব আমাদের পৃথিবীর ইতিহাসের সবচেয়ে প্রলয়ঙ্কর সেই দিনটি: **প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম**।

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Connelly, J. N., et al. (2012).** "The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk." *Science*, 338(6107), 651–655. doi:10.1126/science.1226919.
- **Hayashi, C. (1981).** "Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula." *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 70, 35–53. doi:10.1143/PTPS.70.35.
- **Youdin, A. N., & Goodman, J. (2005).** "Streaming Instabilities in Protoplanetary Disks." *The Astrophysical Journal*, 620(1), 459–469. doi:10.1086/426895.

- **Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O'Brien, D. P., & Mandell, A. M. (2011).** "A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration." *Nature*, 475, 206–209. doi:10.1038/nature10201.
- **ALMA Partnership (Brogan, C. L., et al.) (2015).** "The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Protoplanetary Disk." *The Astrophysical Journal Letters*, 808(1), L3. doi:10.1088/2041-8205/808/1/L3.
- **Stern, S. A., et al. (2019).** "Initial results from the flyby of New Horizons at the Kuiper Belt object (486958) Arrokoth." *Science*, 364(6441), eaaw9771. doi:10.1126/science.aaw9771.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "সৌরসূতিকাগার — প্রোটোপ্ল্যানেটারি ডিস্ক, প্ল্যানেটেসিমাল এক্রিশন এবং তরুণ সূর্য"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৭। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-7-the-solar-cradle-bn/

Shakil Mahmud • Research Monograph

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • অষ্টম খণ্ড

প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম

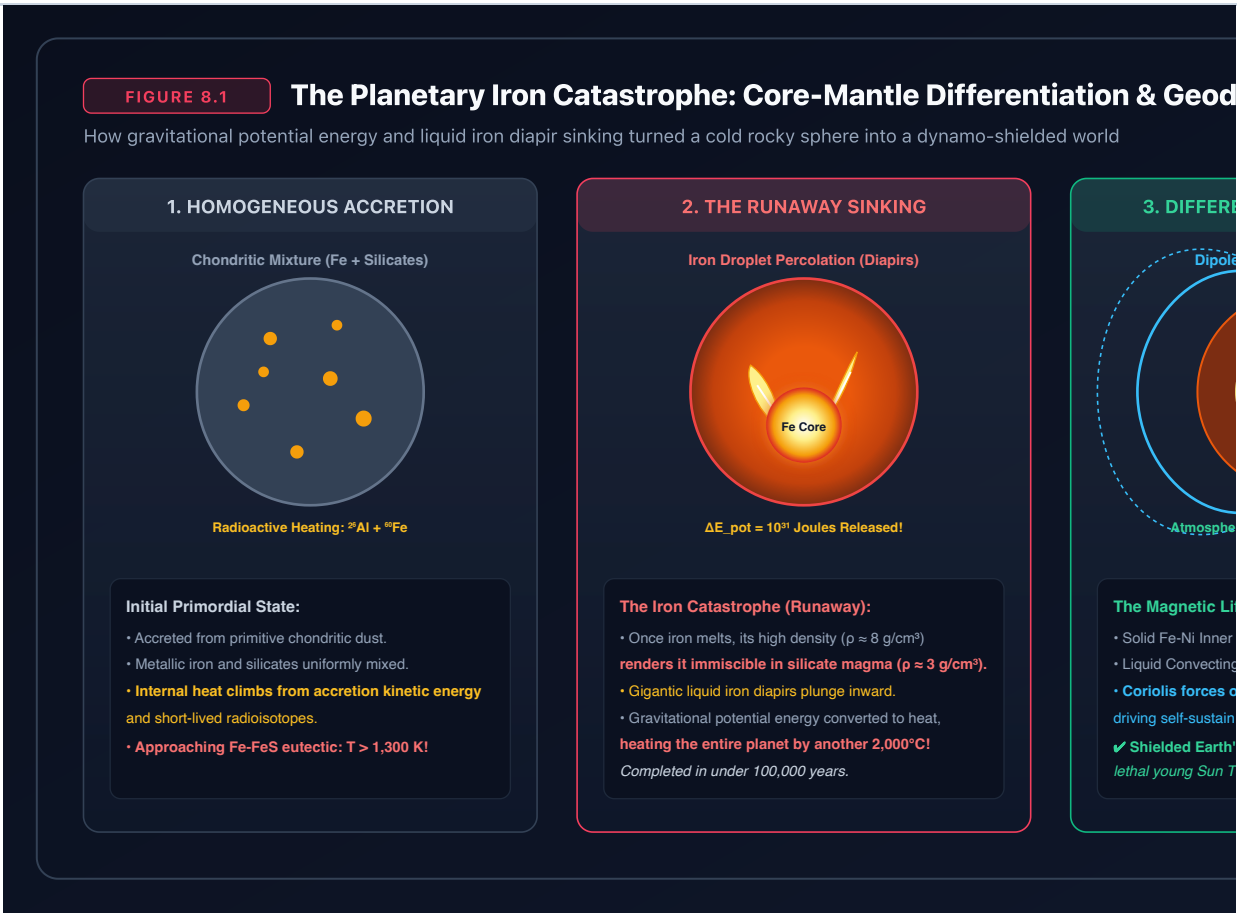
প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম

1,695 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৮: *চিত্র: প্রায় ৪৫১ বিলিয়ন বছর আগে মঙ্গল গ্রহের সমান আদিম গ্রহ থিয়া (Theia)-র সাথে পৃথিবীর প্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষ; এই মহাধাক্কায় ছিটকে যাওয়া জ্বলন্ত ধ্বংসাবশেষের বলয় থেকে পৃথিবীর একমাত্র চাঁদ সৃষ্টি হয়।*

সাড়ে চার বিলিয়ন বছর পূর্বে অভ্যন্তরীণ সৌরজগৎ ছিল আদিম ভ্রূণ গ্রহদের এক উন্মত্ত মহাজাগতিক যুদ্ধক্ষেত্র। আমাদের গ্রহের ইতিহাসের সবচেয়ে ভয়াবহ ও ধ্বংসাত্মক ঘটনায়, থিয়া (Theia) নামক মঙ্গলের আকারের একটি তরুণ গ্রহ প্রতি সেকেন্ডে দশ কিলোমিটার বেগে আদিম প্রোটো-আর্থের ওপর আছড়ে পড়ে। সেই কল্পনাতীত সংঘর্ষের শক্তিতে দুটি বিশ্বই বাষ্পীভূত হয়ে এক ঘূর্ণায়মান ডোনাট-আকৃতির অতি-উত্তপ্ত সিলিকেট গ্যাসের মেঘে রূপ নেয়; থিয়ার ভারী ধাতব কোর চিরতরে পৃথিবীর কেন্দ্রে তলিয়ে গিয়ে আমাদের গ্রহকে একটি অতি-ঘন কোর উপহার দেয়, আর কক্ষপথে নিক্ষিপ্ত বাষ্পীয় রিং মাত্র কয়েক শতাব্দীতে জমাট বেঁধে সৃষ্টি করে আমাদের চাঁদ—যা পৃথিবীকে প্রদান করে জটিল প্রাণের বিকাশের অপরিহার্য মহাকর্ষীয় ভারসাম্য।



চিত্র ৮.১: গ্রহীয় লোহার মহাবিপর্যয় এবং জিওডায়নামো। ^{26}Al-এর তেজস্ক্রিয় ক্ষয় এবং তীব্র সংঘর্ষের তাপে তরুণ পৃথিবী ১,৮০০ কেলভিনের উপরে উত্তপ্ত হয়ে লোহা-নিকেল গলিয়ে ফেলে। ঘন তরল লোহার ফোঁটাগুলো ডায়াপির আকারে মাত্র ১ লাখ বছরের মধ্যে পৃথিবীর কেন্দ্রে জমা হয়, যা 10^{31} জুল মহাকর্ষীয় শক্তি নির্গত করে এবং বহিঃস্থ গলিত কোরে পরিচলন সৃষ্টি করে আমাদের প্রতিরক্ষামূলক চৌম্বক ঢাল তৈরি করে।

হেডিয়ান শৈশব: একটি ফুটন্ত গ্রহ এবং লোহার মহাবিপর্যয়

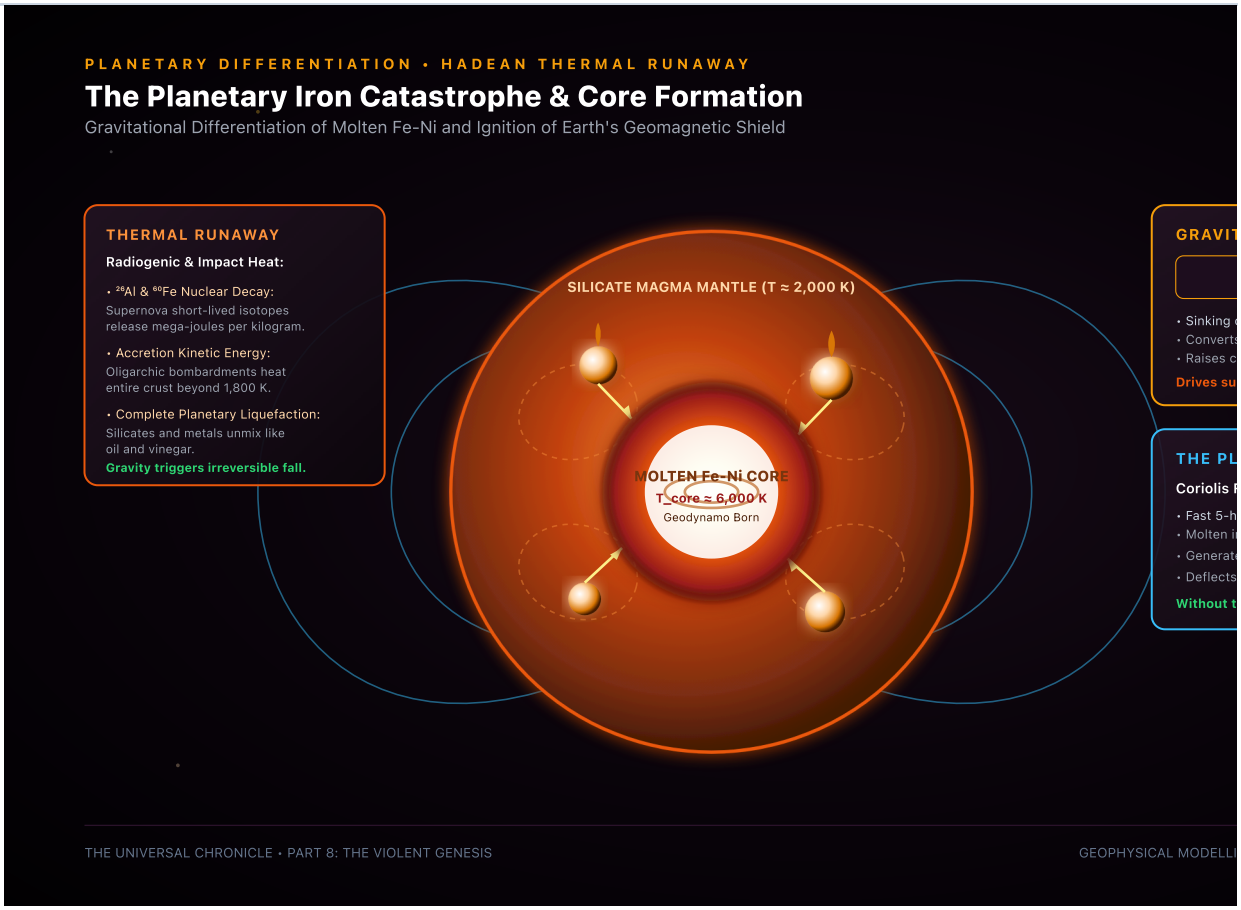
পৃথিবীর ইতিহাসের সবচেয়ে প্রাচীন ভূতাত্ত্বিক যুগকে বলা হয় **হেডিয়ান (Hadean)**—গ্রিক পৌরাণিক পাতালপুরীর দেবতা হেডিজের নামানুসারে। এটি কেবল আগ্নেয়গিরির লাভা নয়, বরং একাধিক তীব্র অভ্যন্তরীণ তাপীয় উৎসের কারণে ফুটন্ত এক মহাজাগতিক চুল্লি ছিল:

- **স্বল্পায়ু তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ:** পূর্ববর্তী সুপারনোভা থেকে আসা ^{26}Al (অর্ধায়ু ৭,১৭,০০০ বছর) এবং ^{60}Fe (অর্ধায়ু ২৬ লাখ বছর)-এর দ্রুত তেজস্ক্রিয় ক্ষয় গ্রহের অভ্যন্তরে শত শত কোটি জুল তাপ ঢেলে দিচ্ছিল।
- **মহাকর্ষীয় সংঘর্ষের গতিশক্তি:** প্রতিটি আছড়ে পড়া প্ল্যানেটেসিমালের গতিশক্তি ($\frac{1}{2}mv^2$) সরাসরি তাপে রূপান্তরিত হচ্ছিল।
- **কোর গঠনের মহাকর্ষীয় শক্তি:** ভারী লোহা কেন্দ্রে তলিয়ে যাওয়ার ফলে অতিরিক্ত স্থৈতিক শক্তি মুক্ত হয়ে গ্রহের তাপমাত্রা আরও ২,০০০ কেলভিন বাড়িয়ে দেয়।

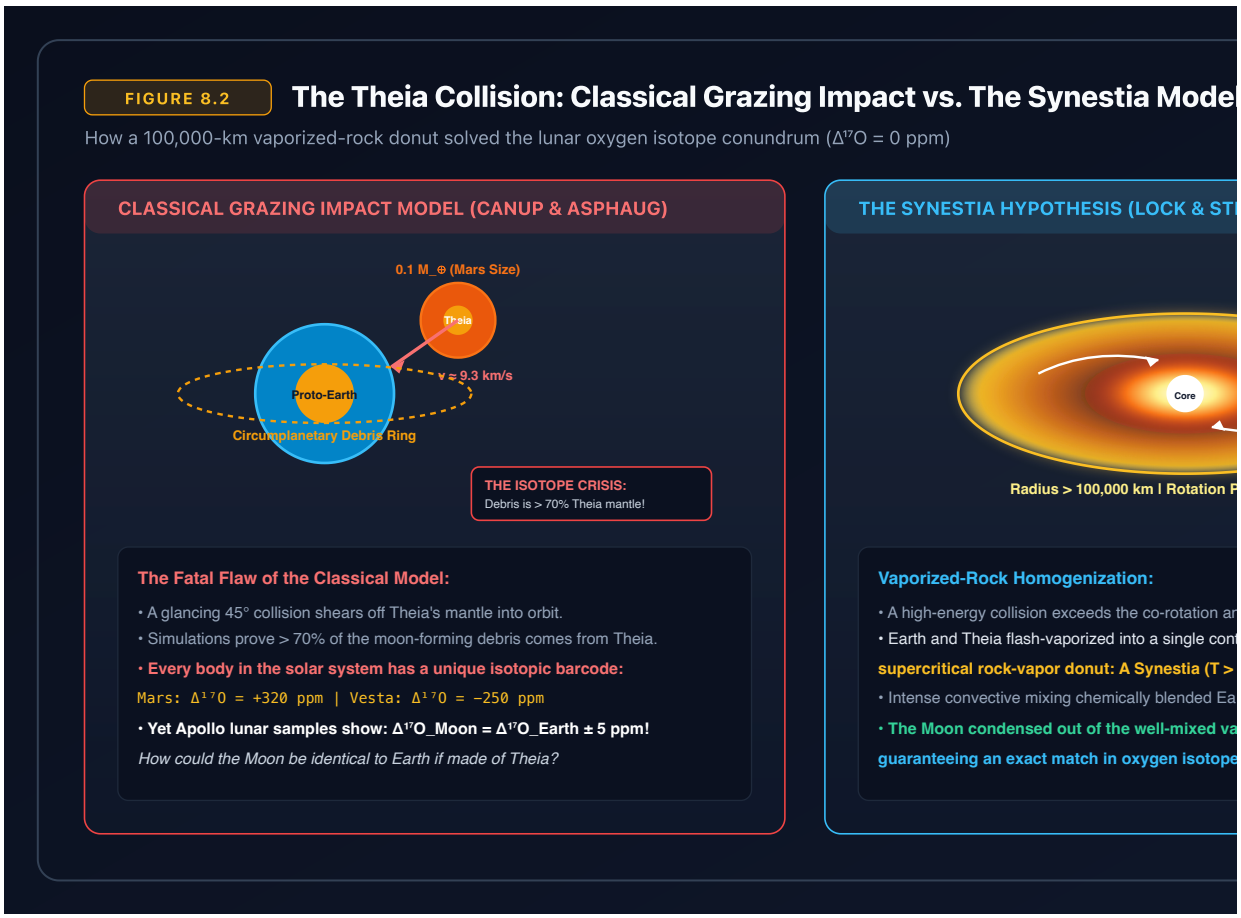
প্রথম তিন কোটি বছরের মধ্যেই প্রোটো-আর্থ সম্পূর্ণ গলে গিয়ে ১,০০০ কিলোমিটারেরও বেশি গভীর এক বৈশ্বিক **ম্যাগমা মহাসমুদ্রে** পরিণত হয়। এই গলিত স্যুপের মাঝেই সংঘটিত হয় আমাদের গ্রহের ভূ-রসায়নের সবচেয়ে মৌলিক বাঁক: **লোহার মহাবিপর্যয় (The Iron Catastrophe)**।

গোল্ডশমিটের ভূ-রাসায়নিক শ্রেণিবিন্যাস
১৯২৩ সালে ভিক্টর গোল্ডশমিট দেখান যে মৌলগুলো তাদের রাসায়নিক আসক্তি অনুযায়ী আলাদা হয়ে যায়। ভারী, ধাতব **সাইডারোফাইল ("লোহা-প্রেমী") মৌলগুলো**—বিশেষ করে লোহা, নিকেল, কোবাল্ট, সোনা ও প্ল্যাটিনাম—তরল সিলিকেট থেকে আলাদা হয়ে সুবিশাল ধাতব ফোঁটা হিসেবে মাধ্যাকর্ষণের টানে গ্রহের ঠিক কেন্দ্রে তলিয়ে যায়। তাদের ওপরে ভেসে থাকে হালকা **লিথোফাইল ("শিলা-প্রেমী") মৌলগুলো**—সিলিকন, অক্সিজেন, অ্যালুমিনিয়াম, ম্যাগনেসিয়াম ও ক্যালসিয়াম—যা তৈরি করে একটি পুরু সিলিকেট ম্যান্টল। এর মধ্য দিয়েই গঠিত হয় পৃথিবীর গলিত ধাতব কোর, যা আজ অবধি আমাদের রক্ষা করা জিওডায়নামো চৌম্বক ঢাল তৈরি করে চলেছে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৮.১ক: গ্রহীয় লোহার মহাবিপর্যয় এবং জিওডায়নামো চৌম্বক ঢালের সূচনা। তীব্র মহাজাগতিক সংঘাত ও স্বল্পায়ু তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের তাপে আদিম পৃথিবী গলে তরল লাভায় রূপ নেয়; ফলে ঘন গলিত লোহা-নিকেল মহাকর্ষের টানে পৃথিবীর কেন্দ্রে ডুবে কোর গঠন করে এবং আদিম সৌরঝড় প্রতিরোধে দ্বিমেরু চৌম্বক ঢাল সৃষ্টি করে।



চিত্র ৮.২: থিয়ার সংঘর্ষ এবং সিনেশিয়ার যুগান্তকারী আবিষ্কার (লক ও স্টুয়ার্ট, ২০১৭)। চিরায়ত তির্যক সংঘর্ষের মডেলে চাঁদে থিয়ার উপাদান বেশি থাকার কথা ছিল, যা অ্যাপোলোর সমতুল্য অক্সিজেন আইসোটোপ পরিমাপের ($\Delta^{17}O = 0$ ppm) সাথে বিরোধপূর্ণ ছিল। সিনেশিয়া মডেল এর নিখুঁত সমাধান দেয়: অতি-তীব্র সংঘর্ষে উভয় গ্রহ বাষ্পীভূত হয়ে ১,০০,০০০ কিমি চওড়া এক ঘূর্ণায়মান ডোনাট-আকৃতির পাথুরে বাষ্পীয় মেঘে রূপ নেয়, যা উভয় গ্রহের আইসোটোপিক অনুপাতকে সম্পূর্ণ সমজাতীয় করে ফেলে।

দানবীয় সংঘর্ষ: যেদিন পৃথিবী ও থিয়ার সংঘাত ঘটল

আজ থেকে প্রায় ৪.৫১ বিলিয়ন বছর পূর্বে ($t_0 + ৫০\text{–}৭০\text{ মিলিয়ন বছর}$), প্রোটো-আর্থ তার বর্তমান ভরের প্রায় ৯০% অর্জন করে ফেলেছিল। কিন্তু একই বিশৃঙ্খল কক্ষপথে আবর্তিত হচ্ছিল মঙ্গলের আকারের (পৃথিবীর ভরের ১০%) আরেকটি আদিম ভ্রূণ গ্রহ—যাকে জ্যোতির্বিজ্ঞানীরা নাম দিয়েছেন **থিয়া (Theia)**।

প্রায় ৪৫ ডিগ্রি তির্যক কোণে থিয়া প্রতি সেকেন্ডে **১০ কিলোমিটারেরও বেশি গতিবেগে (**৩৬, ০০০ কিমি/ঘণ্টা**)** প্রোটো-আর্থের ওপর আঘাত হানে।

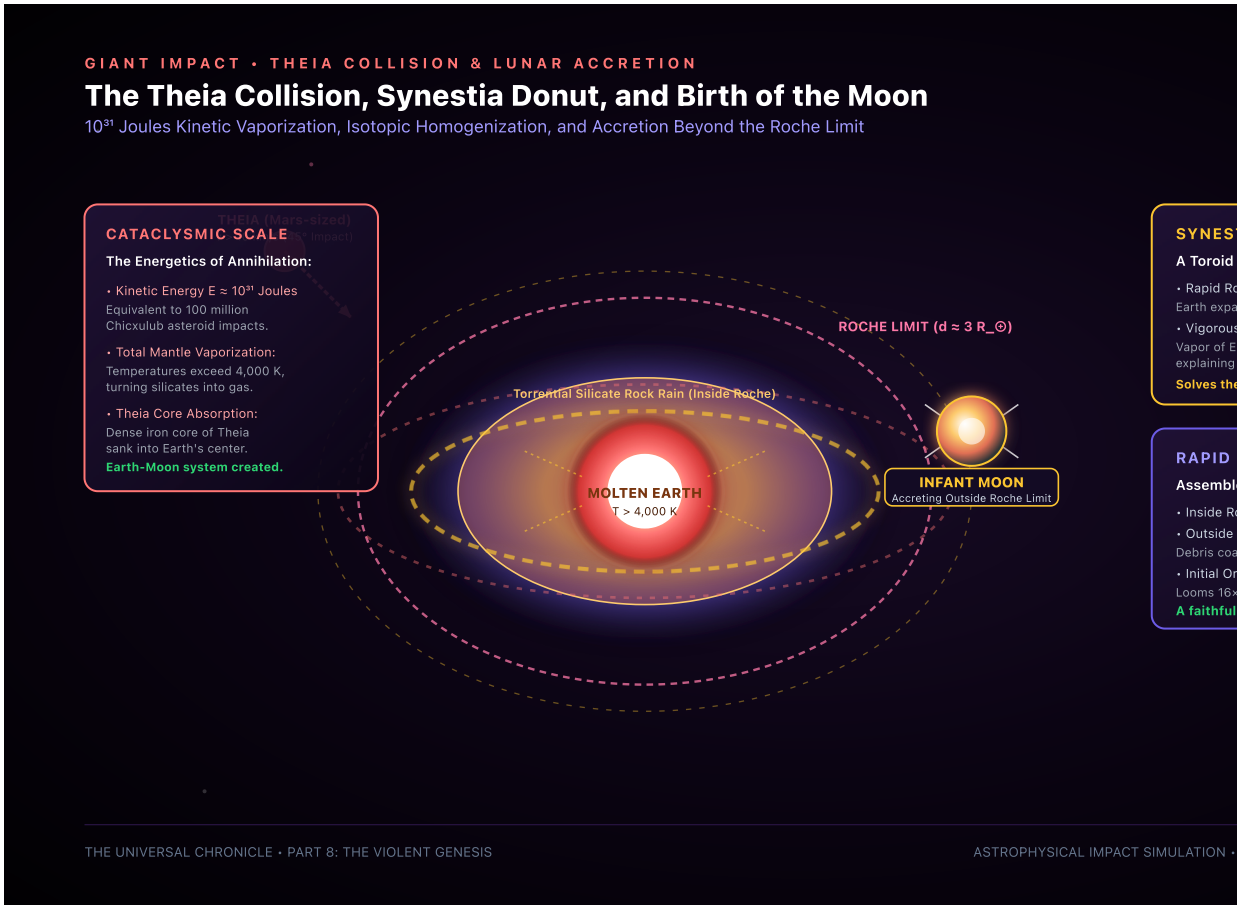
১. মহাপ্রলয়ের শক্তিমাত্রা

সেই সংঘর্ষে মুক্ত হওয়া গতিশক্তি ছিল স্তম্ভিত করে দেওয়ার মতো: প্রায় $১০^{৩১}$ জুল—যা কোটি কোটি হাইড্রোজেন বোমার সম্মিলিত বিস্ফোরণের সমান। মাত্র ৩০ মিনিটের মধ্যে থিয়া সম্পূর্ণরূপে চূর্ণবিচূর্ণ হয়ে যায়। এর ধাতব কোরটি প্রোটো-আর্থের ম্যান্টল চিরে সরাসরি গিয়ে পৃথিবীর গলিত কোরের সাথে মিশে যায়, যার ফলে আমাদের পৃথিবী একটি অসাধারণ ঘন ও বিশালাকার ধাতব কোর লাভ করে।

২. সিনেশিয়া হাইপোথিসিস: বাষ্পীভূত পাথরের ডোনাট

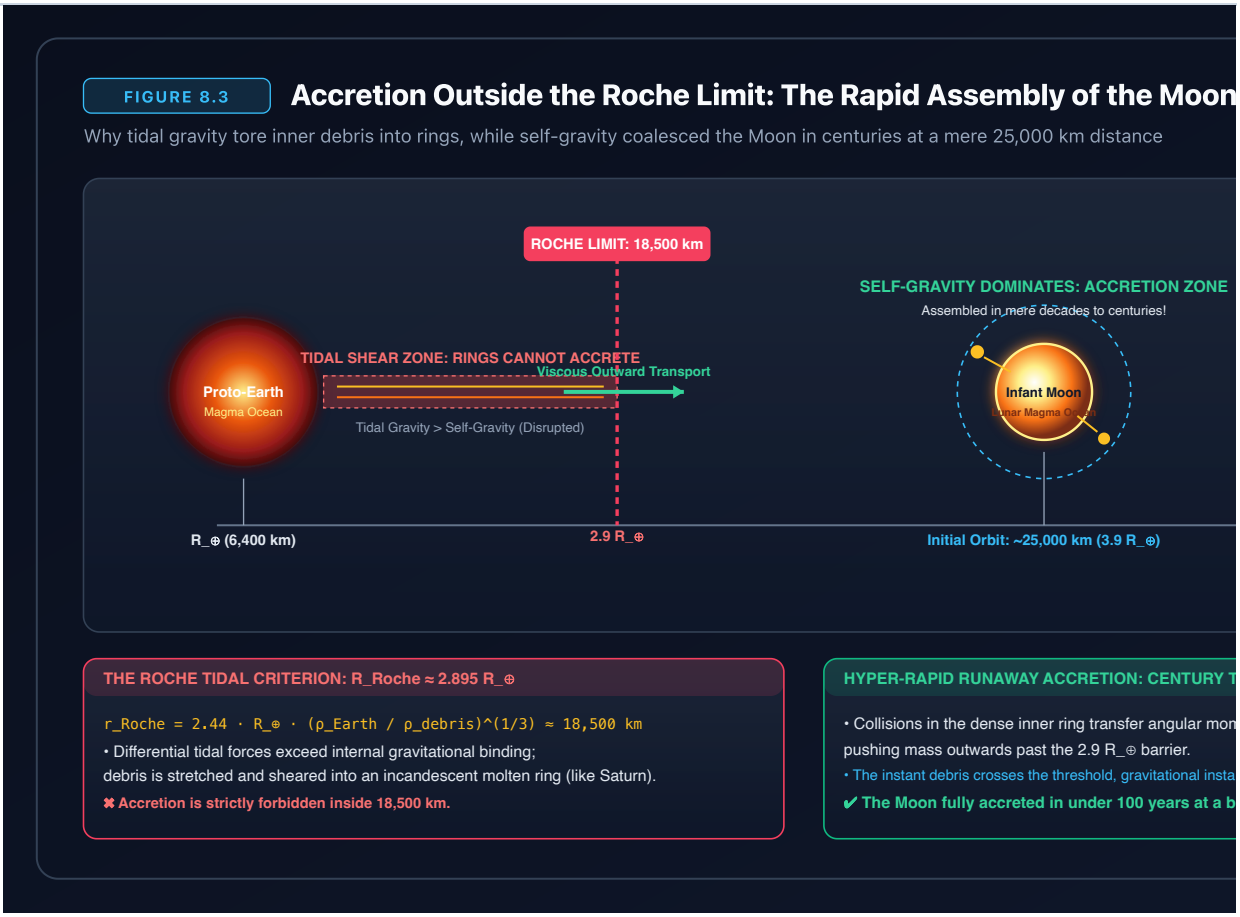
২০১৭ সালে গ্রহবিজ্ঞানী সাইমন লক এবং সারা স্টুয়ার্ট প্রমাণ করেন যে দ্রুত ঘূর্ণায়মান গ্রহদের মধ্যে এমন দানবীয় সংঘর্ষের তাপমাত্রা ৪,০০০ থেকে ৬,০০০ কেলভিন ছাড়িয়ে যায়—যা সিলিকেট পাথরের বাষ্পীভবন বিন্দুর ($২,৫০০\ \mathrm{K}$) চেয়ে অনেক বেশি।

সংঘর্ষটি পৃথিবীকে একটি **সিনেশিয়া (Synestia)**-তে রূপান্তরিত করে: ১,০০,০০০ কিলোমিটারেরও বেশি চওড়া বাষ্পীভূত পাথর ও সুপারক্রিটিক্যাল তরলের এক সুবিশাল, অতি-দ্রুত ঘূর্ণায়মান ডোনাট-আকৃতির মেঘ। এই বাষ্পীয় মেঘের গভীরে পৃথিবী এবং থিয়ার উপাদানগুলো প্রচণ্ড আলোড়নে মিশ্রিত হয়ে সম্পূর্ণ সমজাতীয় আইসোটোপিক রূপ ধারণ করে।



চিত্র ৮.২ক: থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং সিনেশিয়া বাষ্পীয় বলয় থেকে চাঁদের জন্ম। সেকেন্ডে ১০ কিলোমিটার বেগে মঙ্গল গ্রহ আকারের প্রোটোপ্ল্যানেট থিয়ার আঘাতে $১০^{৩১}$ জুল গতিশক্তি মুক্ত হয়ে সিলিকেট ম্যান্টলকে বাষ্পীভূত সিনেশিয়া ডোনাটে পরিণত করে; যা রশ সীমার ($d \approx ৩R_{\oplus}$) বাইরে অতি দ্রুত ঘনীভূত হয়ে এক শতাব্দীতে চাঁদে রূপ নেয়।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৮.৩: রোশ সীমার বাইরে চাঁদের দ্রুত সৃষ্টি (১৮,৫০০ কিমি)। তরল রোশ সীমার (২.৯ $R_\oplus$) ভেতরে পৃথিবীর অসম মহাকর্ষীয় জোয়ারি বল ধ্বংসাবশেষকে জমাট বাঁধতে না দিয়ে একটি প্রদীপ্ত গলিত রিংয়ে আটকে রাখে। সান্দ্র ঘর্ষণে পদার্থগুলো ১৮,৫০০ কিমির বাইরে ছিটকে যেতেই নিজস্ব মহাকর্ষ জোয়ারি বলকে জয় করে মাত্র ১০০ থেকে ১,০০০ বছরের মধ্যে সম্পূর্ণ চাঁদে রূপ নেয়।

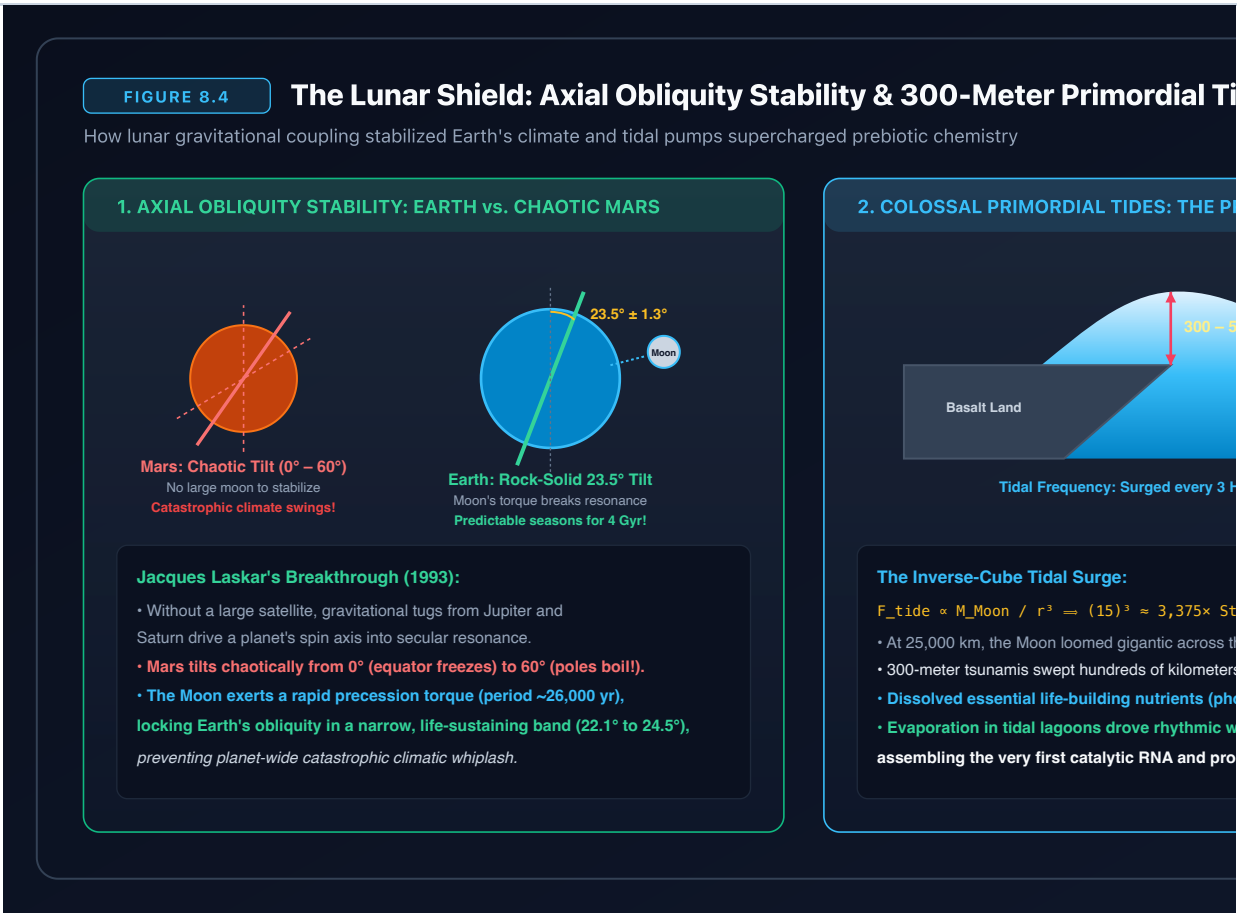
চাঁদের দ্রুত সংযোজন: মাত্র কয়েক শতাব্দীতে সমাবেশ

সিনেশিয়ার বাইরের প্রান্ত যখন ঠান্ডা হতে শুরু করল, তখন পৃথিবীর **রোশ সীমার (Roche Limit, প্রায় ১৮,০০০ কিমি)** বাইরে সিলিকেট পাথরের বৃষ্টি ঘনীভূত হতে থাকে—যে দূরত্বের বাইরে গেলে পৃথিবীর মহাকর্ষ আর বস্তু ভেঙে ফেলতে পারে না।

সুপারকম্পিউটার সিমুলেশন দেখায় যে রোশ সীমার বাইরে এই গলিত পাথুরে রিংটি নিজস্ব মহাকর্ষের টানে অবিশ্বাস্য গতিতে জমাট বাঁধে: লক্ষ লক্ষ বছর নয়, বরং **মাত্র ১০০ থেকে ১,০০০ বছরের মধ্যে সমগ্র চাঁদটি গঠিত হয়েছিল!**

অক্সিজেন আইসোটোপের রহস্য সমাধান

সৌরজগতের প্রতিটি গ্রহের নিজস্ব আইসোটোপিক ছাপ রয়েছে: মঙ্গল গ্রহ বা উল্কাপিণ্ডে অক্সিজেন-১৭ ও ১৮-এর অনুপাত আলাদা। কিন্তু অ্যাপোলো মহাকাশচারীদের আনা চাঁদের পাথরের পরীক্ষায় দেখা গেছে **পৃথিবী এবং চাঁদের অক্সিজেন আইসোটোপিক অনুপাত ($\Delta^{17}O$) কয়েক পিপিএমের ব্যবধানে হুবহু এক!** সিনেশিয়ার অভ্যন্তরে বাষ্পীভূত অবস্থার সম্পূর্ণ গ্যাসীয় মিশ্রণই এই অভিন্ন জন্মদাগের সবচেয়ে নিখুঁত বৈজ্ঞানিক প্রমাণ।



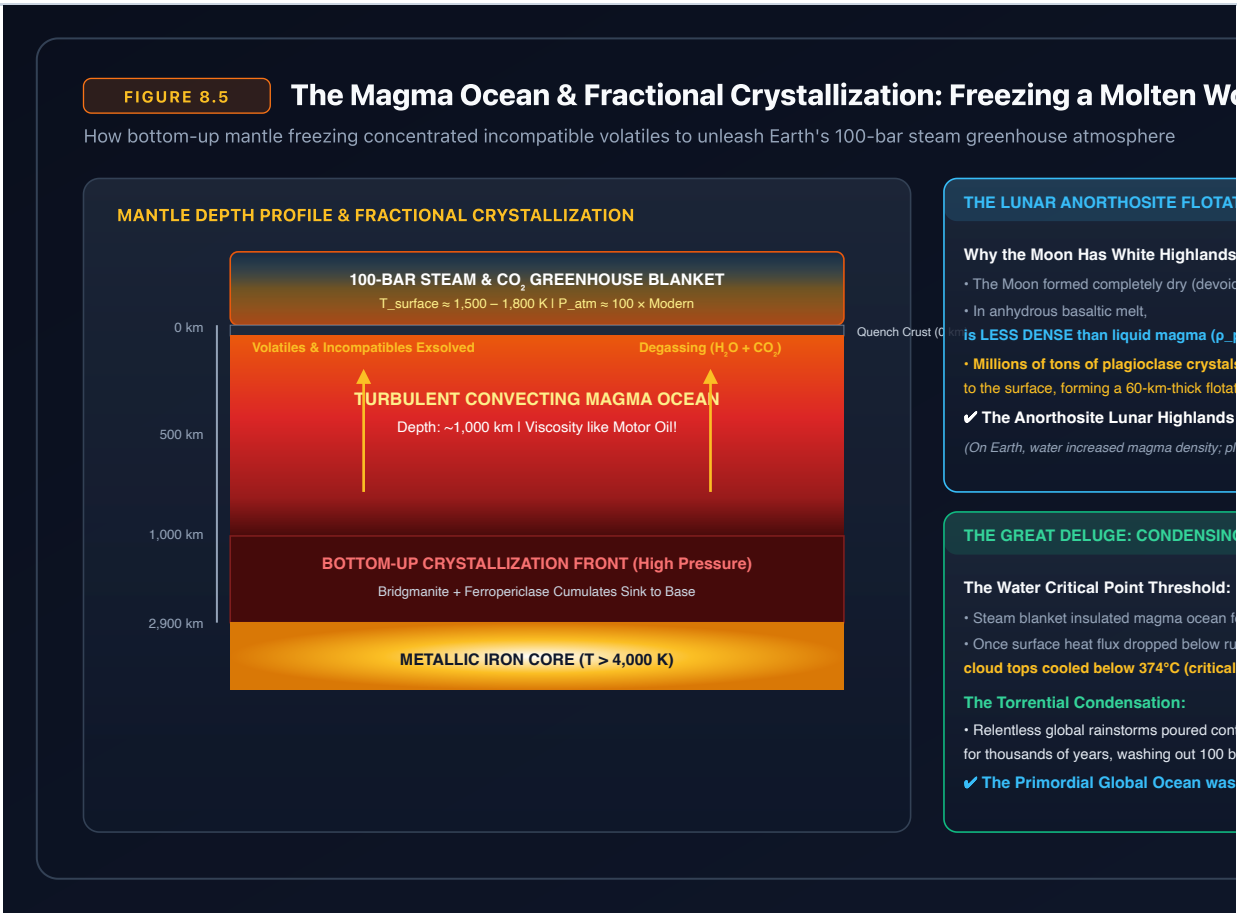
চিত্র ৮.৪: চাঁদের মহাকর্ষীয় সুস্থিতি এবং ৩০০ মিটার আদিম জোয়ার। চাঁদ না থাকলে সূর্য ও বৃহস্পতির আকর্ষণে পৃথিবীর অক্ষীয় হেলন ০° থেকে ৬০° পর্যন্ত বিশৃঙ্খলভাবে দুলত (যেমনটি মঙ্গলে ঘটে)। চাঁদের মহাকর্ষ আমাদের হেলনকে ২৩.৫° কোণে স্থিতিশীল রাখে। একই সাথে মাত্র ২৫,০০০ কিমি দূরত্বের কক্ষপথে ঘূর্ণায়মান চাঁদ প্রতি ৫ ঘণ্টার দিনে ৩০০ মিটার উঁচু দানবাকৃতির জোয়ার সৃষ্টি করে জৈব অণু সংশ্লেষণের আদর্শ পরিবেশ তৈরি করেছিল।

পৃথিবীর জীবনে চাঁদের অপরিহার্য অবদান

সৌরজগতের যেকোনো পাথুরে গ্রহের তুলনায় পৃথিবীর উপগ্রহের আপেক্ষিক আকার সবচেয়ে বড় ($M_{\text{Moon}} \approx ১.২\% M_{\oplus}$)। এই বিশাল চাঁদ না থাকলে পৃথিবী বসবাসের অনুপযোগী এক জাহান্নামে রূপ নিত:

- **১. অক্ষীয় হেলনের মহাকর্ষীয় সুস্থিতি (টুমা ও উইজডম, ১৯৯৩):** চাঁদের মহাকর্ষীয় টর্ক পৃথিবীর ঘূর্ণন অক্ষের হেলনকে ২২.১° থেকে ২৪.৫°-এর এক পরম নিরাপদ সীমার মধ্যে স্থিতিশীল রাখে (বর্তমানে ২৩.৪৪°)। চাঁদ না থাকলে বৃহস্পতির টানে পৃথিবীর অক্ষ ০° থেকে ৮৫° পর্যন্ত বিপজ্জনকভাবে দুলত (যেমনটি মঙ্গলে ঘটে)—যা বিষুবরেখাকে বরফে ঢেকে দিত এবং মেরু অঞ্চলে আগুন ঝরাত, ফলে জটিল প্রাণের বিবর্তন অসম্ভব হয়ে পড়ত।
- **২. ৫ ঘণ্টার দিনের গতি হ্রাস:** সংঘর্ষের পরপরই পৃথিবী এত দ্রুত ঘুরছিল যে একটি দিন ছিল মাত্র **৫ ঘণ্টার**! জোয়ারি ঘর্ষণের মাধ্যমে চাঁদ কোটি কোটি বছর ধরে পৃথিবীর ঘূর্ণন গতি ধীর করে আরামদায়ক ২৪ ঘণ্টার দিনে পরিণত করেছে।
- **৩. ৩০০ মিটার উঁচু দানবাকৃতির আদিম জোয়ার:** চাঁদ যখন প্রথম জন্ম নেয়, তখন এটি পৃথিবী থেকে মাত্র **২৫,০০০ কিলোমিটার** দূরে ছিল (আজকের দূরত্ব ৩,৮৪,৪০০ কিমি)। আকাশে চাঁদকে আজকের চেয়ে ১৬ গুণ বড় দেখাত! এর ফলে মহাসাগরে দিনে দুবার শত শত মিটার উঁচু দানবীয় জোয়ার আছড়ে পড়ত—যা খনিজ পদার্থকে পানিতে মিশিয়ে জীবনের প্রথম রাসায়নিক বিক্রিয়ার জন্য আদর্শ আস্তানা তৈরি করেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৮.৫: ম্যাগমা সমুদ্রের শীতলীকরণ এবং মহাজাগতিক বৃষ্টিপাত। তীব্র চাপের কারণে ১,০০০ কিমি গভীর টেরিস্ট্রিয়াল ম্যাগমা সমুদ্র নিচ থেকে ওপরে স্ফটিকায়িত হতে থাকে, যা জলীয় বাষ্প ও CO_2-কে ঘন ১০০-বার চাপের বায়ুমণ্ডলীয় চাদরে পরিণত করে। পৃথিবীর বাষ্পীয় বায়ুমণ্ডল ৩৭৪°C-এর নিচে নামতেই শুরু হয় শতাব্দীর পর শতাব্দী ধরে চলা মহাপ্রলয়ঙ্কর বৃষ্টি—যা তৈরি করে পৃথিবীর প্রথম বিশ্ব মহাসমুদ্র।

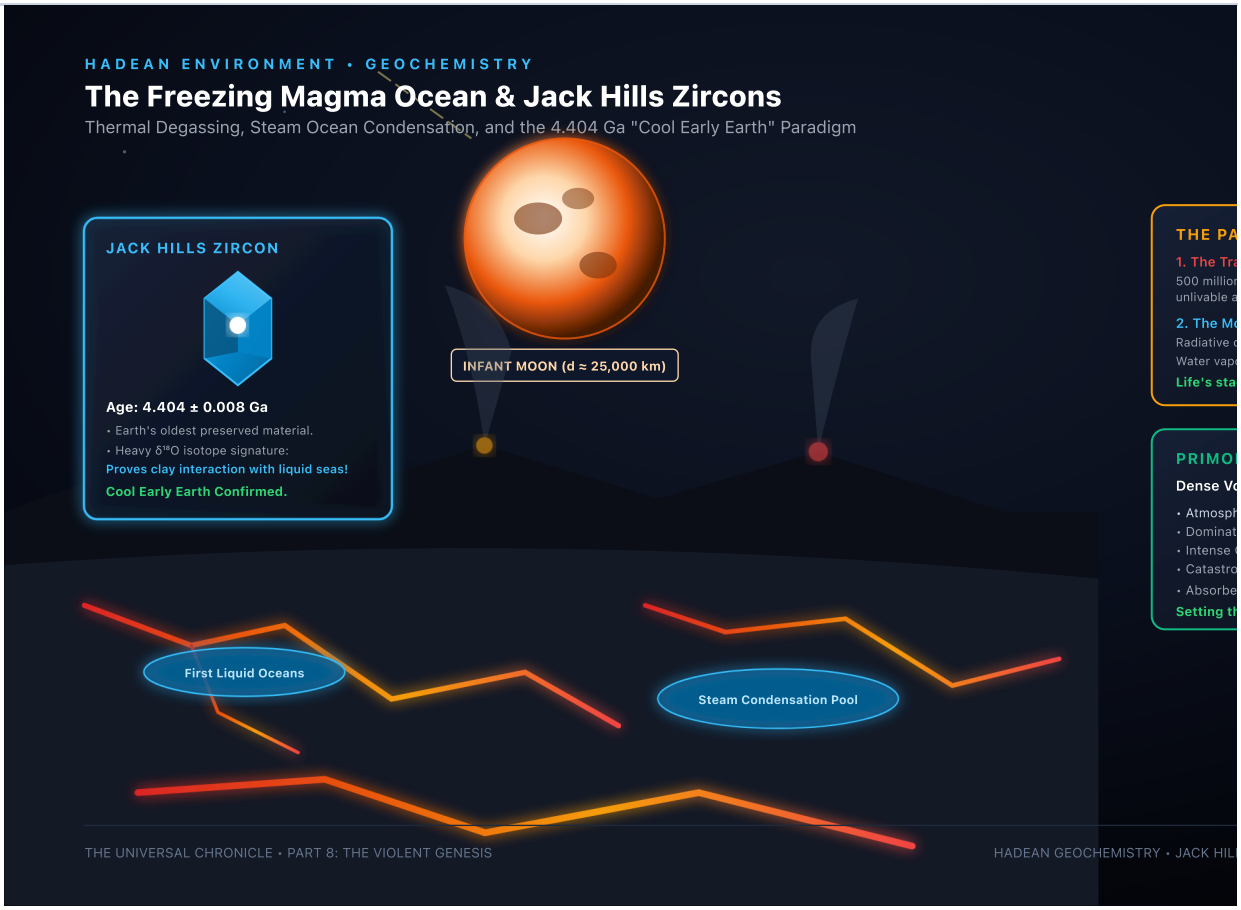
তুলনামূলক সারণী: প্রোটো-আর্থ, থিয়া, আধুনিক পৃথিবী ও চাঁদ

বৈশিষ্ট্য / পরিমাপ	প্রোটো-আর্থ (আঘাতের পূর্বে)	থিয়া (আঘাতকারী গ্রহ)	আধুনিক পৃথিবী	চাঁদ
ভর	$\sim 0.90 M_\oplus$	$\sim 0.10 M_\oplus$ (মঙ্গলের সমান)	5.972×10^{24} kg ($1.0 M_\oplus$)	7.342×10^{22} kg ($0.0123 M_\oplus$)
ব্যাসার্ধ	~ ৬,১০০ কিমি	~ ৩,৩৯০ কিমি	৬,৩৭১ কিমি	১,৭৩৭ কিমি
কোরে ভরের অনুপাত	~ ৩০%	\sim ২০\text{–}৩০\%	৩২.৫% (অতি-ঘন কোর)	< ২% (ধাতুহীন)
প্রাথমিক দিনের দৈর্ঘ্য	\sim ৮\text{–}১০\text{ ঘণ্টা}	অজানা	~ ৫ ঘণ্টা (সংঘর্ষের পর)	জোয়ারি লকড (২৭.৩ দিন)
কক্ষীয় দূরত্ব	১.০ AU	~ ১.০ AU (ল্যাগ্রাঞ্জ কক্ষপথ)	১.০ AU	শুরুতে ২৫,০০০ কিমি (আজ ৩,৮৪,৪০০ কিমি)
উদ্বায়ী উপাদানের উপস্থিতি	মাঝারি	মাঝারি	সংরক্ষিত ও সমৃদ্ধ	সম্পূর্ণ উদ্বায়ীহীন ও শুষ্ক

পরবর্তী রূপ: ম্যাগমা সমুদ্রের শীতলীকরণ

থিয়ার বিদায়ের পর এবং চাঁদের জন্মের পর পৃথিবী বাষ্পীভূত পাথর এবং উচ্চ-চাপের জলীয় বাষ্পের (> ১০০ বার) এক অতি-উত্তপ্ত বায়ুমণ্ডলে ঢেকে ছিল। ভূপৃষ্ঠের তাপমাত্রা ছিল প্রায় ২,০০০ কেলভিন, যা অন্ধকারের মাঝে নিভে যাওয়া কয়লার মতো লালচে-কমলা আলো ছড়াচ্ছিল।

কিন্তু মহাশূন্যের শীতল পরিবেশের কারণে পৃথিবী তাপ বিকিরণ করতে থাকে। মাত্র বিশ থেকে ত্রিশ লাখ বছরের মধ্যে ম্যাগমা সমুদ্রের উপরিভাগ জমে একটি পাতলা ব্যাসাল্ট শিলার ভূত্বকে পরিণত হয়। সেই ভঙ্গুর খোলসের নিচে ম্যান্টল ফুটতে থাকে এবং আগ্নেয়গিরির উদগীরণের মাধ্যমে কোটি কোটি টন বাষ্প, কার্বন ডাই-অক্সাইড, সালফার ও নাইট্রোজেন শীতল আকাশে নির্গত হতে থাকে।



চিত্র ৮.৫ক: ম্যাগমা সমুদ্রের শীতলীকরণ এবং ৪.৪০৪ বিলিয়ন বছরের জ্যাক হিলস জিরকন প্রমাণ। মহাশূন্যের ঠান্ডায় কোটি বছরের মধ্যে পৃথিবীর ব্যাসাল্টিক ভূত্বক কঠিন রূপ ধারণ করে এবং ঘন জলীয় বাষ্প অবিরাম বৃষ্টিতে পরিণত হয়ে উষ্ণ আদিম সাগরের জন্ম দেয়; যার অকাট্য ভূতাত্ত্বিক প্রমাণ মেলে প্রাচীন জিরকন স্ফটিকের $\delta^{18}O$ আইসোটোপ বিশ্লেষণে।

পৃথিবীর ইতিহাসের সর্বশ্রেষ্ঠ বৃষ্টিপাতের মঞ্চ প্রস্তুত হচ্ছিল। বায়ুমণ্ডলের তাপমাত্রা যখন পানির সংকটকালীন বিন্দুর নিচে নেমে এল, তখন সেই বাষ্পের মেঘ শত শত বছর ধরে চলা অবিশ্রান্ত বৈশ্বিক বৃষ্টিতে রূপ নিল। *মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের* **নবম পর্বে** আমরা প্রত্যক্ষ করব তরল পানির সেই অলৌকিক আত্মপ্রকাশ: **আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, ধূমকেতুর আক্রমণ এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম**।

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Hartmann, W. K., & Davis, D. R. (1975).** “Satellite-sized planetesimals and lunar origin.” *Icarus*, 24(4), 504–515. doi:10.1016/0019-1035(75)90070-6.
- **Cameron, A. G. W., & Ward, W. R. (1976).** “The Origin of the Moon.” *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 7, 120–122.
- **Canup, R. M., & Asphaug, E. (2001).** “Origin of the Moon in a giant impact during the end of the Earth’s formation.” *Nature*, 412, 708–712. doi:10.1038/35089010.
- **Touma, J., & Wisdom, J. (1993).** “The Chaotic Obliquity of Mars.” *Science*, 259(5099), 1294–1297. doi:10.1126/science.259.5099.1294.
- **Lock, S. J., & Stewart, S. T. (2017).** “The structure and evolution of synestias: A new type of planetary object formed by high-energy, high-angular-momentum giant impacts.” *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(5), 950–982. doi:10.1002/2016JE005239.
- **Barboni, M., et al. (2017).** “Early formation of the Moon 4.51 billion years ago.” *Science Advances*, 3(1), e1602365. doi:10.1126/sciadv.1602365.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "প্রলয়ঙ্কর আদিম রূপান্তর — হেডিয়ান পৃথিবী, থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষ এবং চাঁদের জন্ম"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৮। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-8-the-violent-genesis-bn/

Shakil Mahmud • Research Monograph

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • নবম খণ্ড

আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, উল্কাপাত এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম

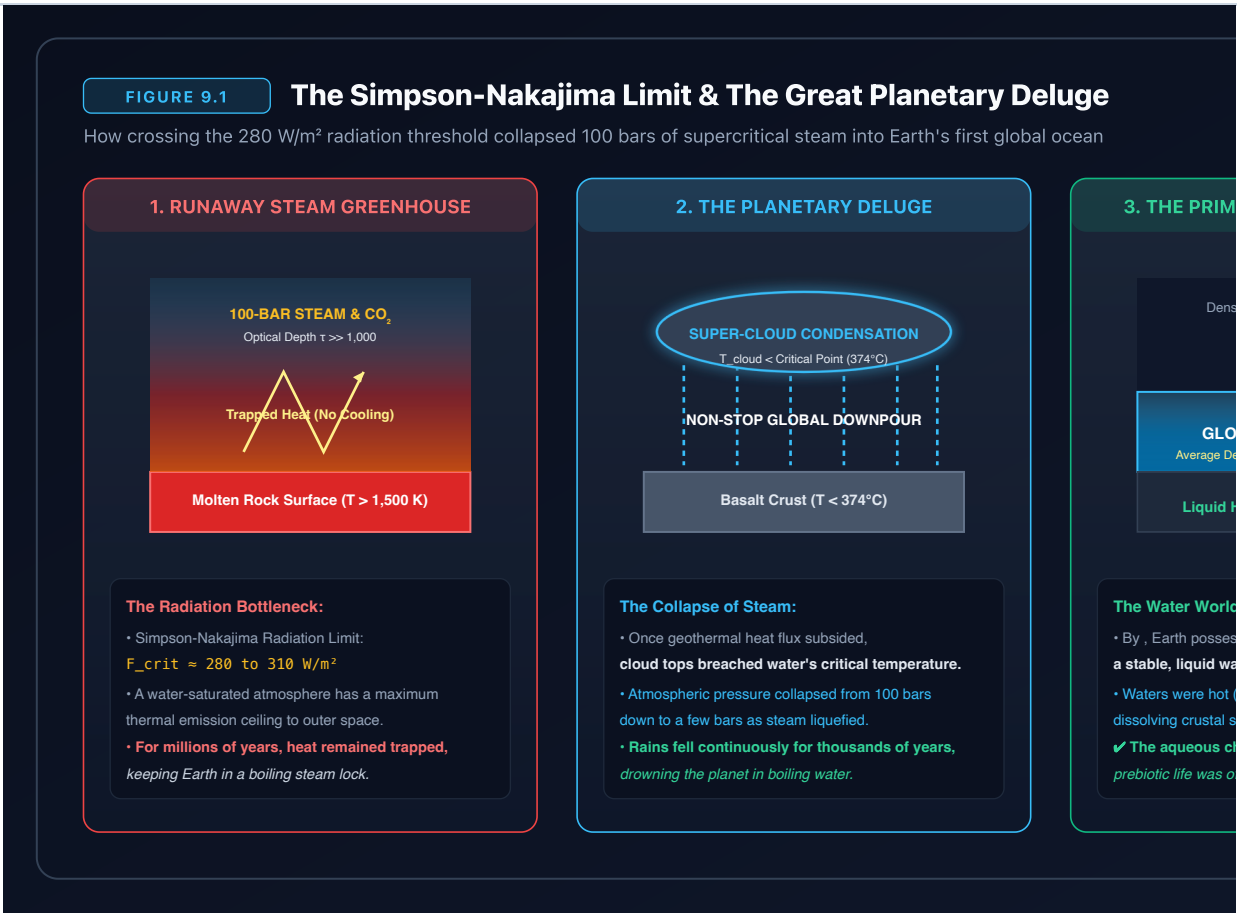
আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, উল্কাপাত এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম

1,895 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ৯: *চিত্র: হেডিয়ান যুগের শেষভাগে (~৪.৪-৪.১ বিলিয়ন বছর আগে) তীব্র আগ্নেয়গিরির অগ্ন্যুৎপাত ও ঘন বাষ্পীয় বায়ুমণ্ডল; সহস্র বছরের অবিরাম বৃষ্টিপাতে ব্যাসল্ট ভূত্বক শীতল হয়ে সৃষ্টি হয় পৃথিবীর প্রথম মহাসাগর।*

দুই শতাব্দীরও বেশি সময় ধরে ভূতত্ত্ববিদরা মনে করতেন আমাদের আদিম পৃথিবী ছিল অন্তত ৫০ কোটি বছর ধরে ফুটন্ত লাভার এক শুষ্ক, তেজস্ক্রিয় ও প্রাণহীন নরককুণ্ড। কিন্তু সাম্প্রতিক দশকগুলোতে পশ্চিম অস্ট্রেলিয়ার প্রাচীন বালুপাথরে সংরক্ষিত মাইক্রোস্কোপিক জারকন স্ফটিক এক বৈপ্লবিক সত্য উন্মোচন করেছে: সৌরজগতের জন্মের মাত্র ১৬ কোটি বছরের মধ্যেই পৃথিবীর উত্তপ্ত ভূত্বক ঠান্ডা হয়ে এসেছিল, সুপারক্রিটিক্যাল বাষ্পের মেঘ শত শত বছর ধরে চলা এক মহাজাগতিক মহা-বৃষ্টিপাতে ভেঙে পড়েছিল, এবং আকাশে ঝুলন্ত এক দানবাকৃতির চাঁদের আলোয় সমগ্র পৃথিবী ঢেকে গিয়েছিল এক সুবিশাল, অন্ধকার ও উষ্ণ আদিম মহাসমুদ্রে।



চিত্র ৯.১: সিম্পসন-নাকাজিমা সীমা এবং মহাজাগতিক মহা-বৃষ্টিপাত। জলীয় বাষ্পে সম্পৃক্ত বায়ুমণ্ডলের মহাশূন্যে তাপ বিকিরণের একটি সর্বোচ্চ সীমা রয়েছে (~২৮০–৩১০ ওয়াট/বর্গমিটার)। ম্যাগমা ঠান্ডা হয়ে অভ্যন্তরীণ ভূ-তাপীয় প্রবাহ এই সীমার নিচে নামতেই মেঘের উপরিভাগ পানির সংকটকালীন তাপমাত্রার (৩৭৪°C) নিচে ঠান্ডা হয়ে যায়; এর ফলে ১০০-বার চাপের বাষ্পীয় বায়ুমণ্ডল ধসে পড়ে হাজার বছর ধরে চলা বৈশ্বিক বৃষ্টিপাতে রূপ নেয়, যা পৃথিবীর প্রথম বিশ্ব মহাসমুদ্র সৃষ্টি করে।

বাষ্পীয় বায়ুমণ্ডলের পতন: মহাজাগতিক মহা-বৃষ্টিপাত

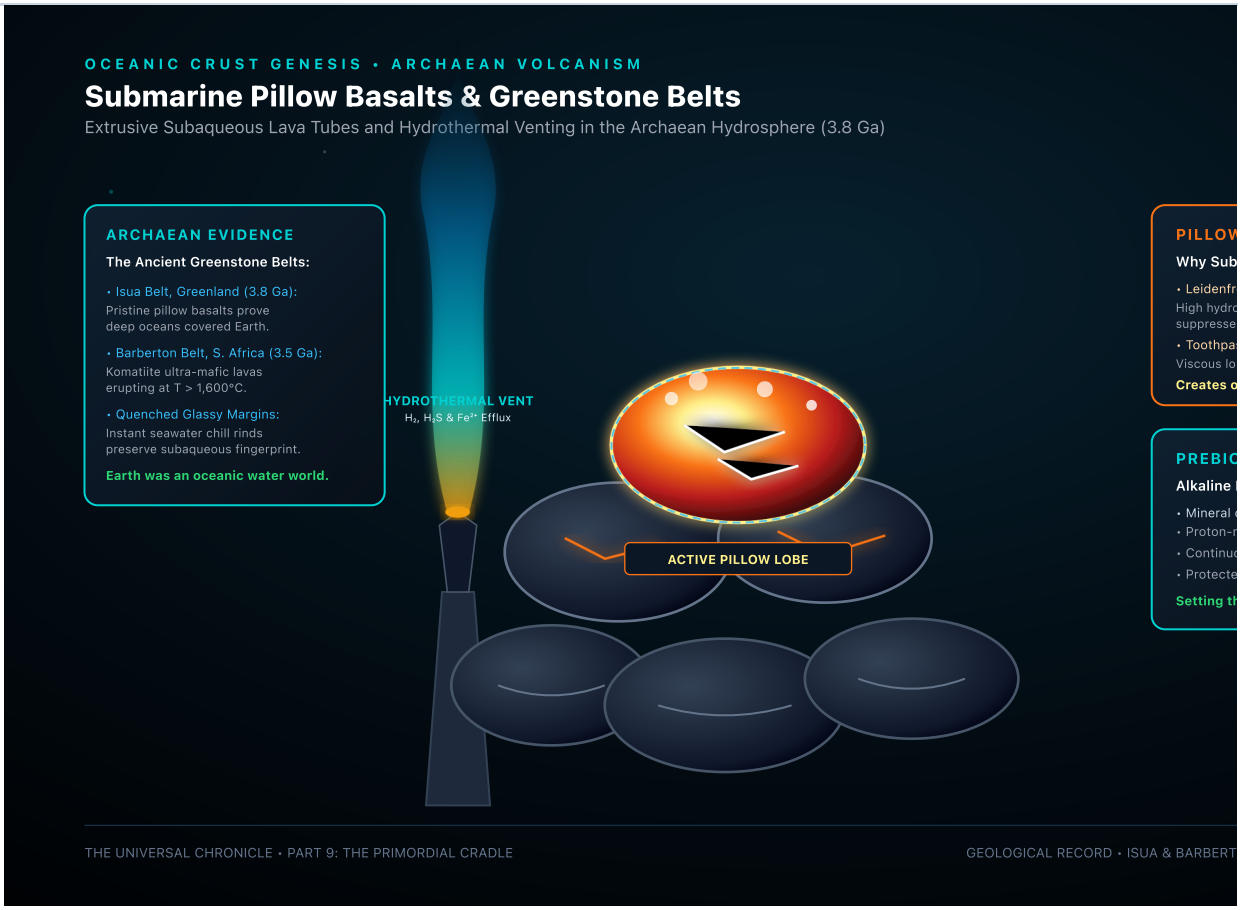
থিয়ার দানবীয় সংঘর্ষের ঠিক পরপরই পৃথিবী জলীয় বাষ্প (H_2O), কার্বন ডাই-অক্সাইড (CO_2), কার্বন মনোক্সাইড (CO), নাইট্রোজেন (N_2) এবং সালফার গ্যাসের এক অতি-উত্তপ্ত, সুপারক্রিটিক্যাল বায়ুমণ্ডলে ঢেকে ছিল। গলিত পৃষ্ঠে বায়ুমণ্ডলীয় চাপ ছিল চূর্ণকারী—**১০০ থেকে ২০০ বার** (যা আধুনিক সমুদ্রের এক থেকে দুই কিলোমিটার গভীরে অনুভূত চাপের সমান)।

যেহেতু জলীয় বাষ্প একটি শক্তিশালী গ্রিনহাউস গ্যাস, তাই এটি গ্রহের ভেতরকার তাপকে আটকে রেখেছিল। কিন্তু ম্যাগমা মহাসমুদ্র যখন ধীরে ধীরে একটি অন্তরক ব্যাসাল্ট শিলার ভূত্বকে জমে যেতে শুরু করল, তখন পৃথিবীর অভ্যন্তরীণ ভূ-তাপীয় নির্গমন নাটকীয়ভাবে কমে যায়। বায়ুমণ্ডলের উপরিভাগ সরাসরি মহাশূন্যের শীতল ভ্যাকুয়ামে তাপ বিকিরণ করতে থাকে, যা *সিম্পসন-নাকাজিমা গ্রিনহাউস সীমা* ($\sim ২৮০\text{–}৩১০\text{ W/m}^2$) অতিক্রম করে।

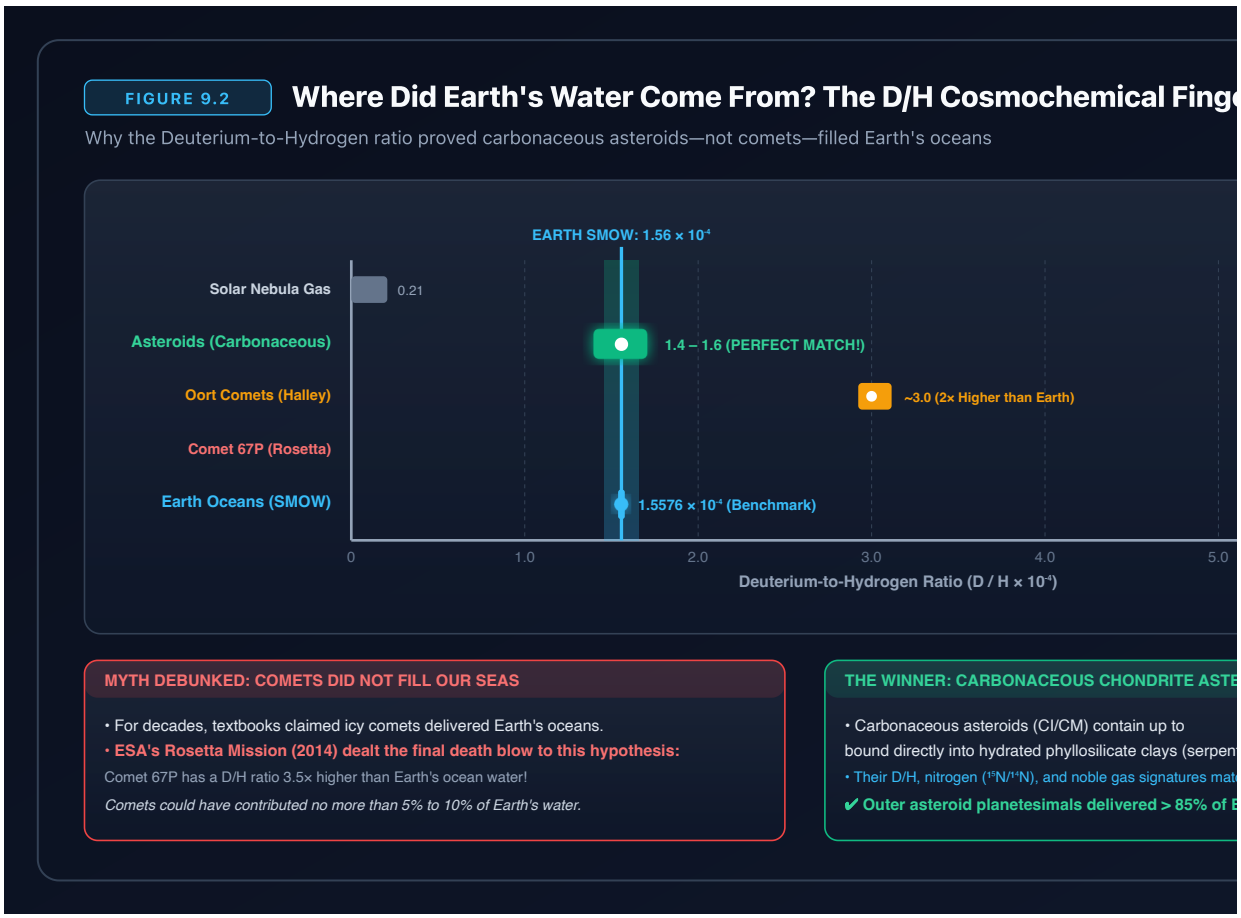
সুপারক্রিটিক্যাল বায়ুমণ্ডলের ঘনীভবন

১০০ গুণ বায়ুমণ্ডলীয় চাপে পানি ১০০ ডিগ্রি সেলসিয়াসে ফোটে না; উচ্চ চাপের কারণে পানির ঘনীভবন বিন্দু **৩০০ ডিগ্রি সেলসিয়াস (৫৭৩ K)** ছাড়িয়ে যায়। ভূত্বক যখনই এই সংকটকালীন তাপমাত্রার নিচে ঠান্ডা হলো, তখনই বায়ুমণ্ডলের জলীয় বাষ্প আর গ্যাস হিসেবে থাকতে পারল না। পুরো বাষ্পীয় আকাশ ধসে পড়ে শুরু হলো অবিশ্রান্ত, মুষলধারে বৈশ্বিক বৃষ্টি—যা **টানা হাজার হাজার বছর ধরে** পৃথিবীর প্রতিটি ইঞ্চি জমিকে প্লাবিত করে নিচু খাদগুলোকে পানিতে ভরিয়ে তৈরি করল প্রথম বৈশ্বিক মহাসমুদ্র।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ৯.১ক: সমুদ্রগর্ভের পিলো ব্যাসাল্ট এবং আর্কিয়ান হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট। নবগঠিত আদিম মহাসমুদ্রের তীব্র পানির চাপ অগ্ন্যুৎপাতের বাষ্পীয় বিস্ফোরণ দমন করে লোহা-ম্যাগনেসিয়াম সমৃদ্ধ লাভাকে কুণ্ডলী পাকানো 'পিলো ব্যাসাল্ট'-এ রূপ দেয়; যা আজও সংরক্ষিত রয়েছে গ্রিনল্যান্ডের ৩.৮ বিলিয়ন বছরের ইসুয়া গ্রিনস্টোন বেল্টে।



চিত্র ৯.২: ডি/এইচ অনুপাতের আইসোটোপিক ছাপ (গ্রহাণু বনাম ধূমকেতু)। ডিউটেরিয়াম ও সাধারণ হাইড্রোজেনের অনুপাত নির্ণয় পৃথিবীর পানির উৎস বিতর্কের মীমাংসা করেছে। ওর্ট ক্লাউড ও বৃহস্পতি-পরিবারের ধূমকেতুগুলোর (যেমন ৬৭পি) ডি/এইচ অনুপাত পৃথিবীর সাগরের (VSMOW) চেয়ে ২ থেকে ৩.৫ গুণ বেশি। কিন্তু কার্বনেশিয়াস কনড্রাইট গ্রহাণুর আইসোটোপিক ছাপ পৃথিবীর সাগরের সাথে হুবহু মিলে যায়—যা প্রমাণ করে ২.৭ এইউ-এর বাইরের আর্দ্র গ্রহাণুই আমাদের সাগরের ৮৫%-এর বেশি পানি সরবরাহ করেছিল।

পৃথিবীর পানি কোথা থেকে এল? ধূমকেতু বনাম গ্রহাণুর আইসোটোপিক রহস্য

গ্রহবিজ্ঞানের সবচেয়ে রোমাঞ্চকর রহস্যগুলোর একটি হলো: পৃথিবী কীভাবে এত পানি পেল? যেহেতু পৃথিবী তৈরি হয়েছিল তুষার রেখার ভেতরে ($r < 2.7\text{ AU}$), যেখানে উচ্চ তাপমাত্রায় বরফ জমতে পারত না, তাই বিজ্ঞানীরা দীর্ঘদিন ধরে বিশ্বাস করতেন যে পৃথিবীর আদি অবস্থা ছিল সম্পূর্ণ শুষ্ক। সাধারণ ধারণা ছিল যে বাইরের বরফপূর্ণ ধূমকেতুর ঝাঁক আছড়ে পড়ে পৃথিবীতে পানি এনে দিয়েছিল।

এই তত্ত্বের চূড়ান্ত পরীক্ষা হলো **ডিউটেরিয়াম ও সাধারণ হাইড্রোজেনের (D/H) অনুপাত**। ডিউটেরিয়াম (^2H) হলো একটি বাড়তি নিউট্রনযুক্ত ভারী হাইড্রোজেন। পৃথিবীর সাগরের গড় পানির অনুপাতকে সংজ্ঞায়িত করা হয় **VSMOW** হিসেবে:

$$(D/H)_{\text{VSMOW}} = (1.5576 \pm 0.001) \times 10^{-4}$$

১৯৮৬ থেকে ২০১৫ সালের মধ্যে মহাকাশ মিশনগুলো ধূমকেতুর বাষ্পীয় পানির আইসোটোপ বিশ্লেষণ করে:

- **ওর্ট ক্লাউডের ধূমকেতু (হ্যালি, হিয়াকুতাকে, হেল-বপ):** এদের D/H অনুপাত ছিল $(3.0 \pm 0.5) \times 10^{-4}$—যা পৃথিবীর সাগরের চেয়ে **দ্বিগুণ বেশি**!
- **কাইপার বেল্ট ধূমকেতু ৬৭পি (রোসেটা মিশন, ২০১৪):** এর D/H অনুপাত ছিল $(5.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$—যা পৃথিবীর চেয়ে **তিন গুণেরও বেশি**!

যদি ধূমকেতু পৃথিবীর মহাসমুদ্র সৃষ্টি করত, তবে আমাদের পানি হতো অনেক বেশি ভারী ডিউটেরিয়ামে ভরা। এর বিপরীতে, গ্রহাণু বলয়ের বাইরের প্রান্তের **কার্বনেশিয়াস কনড্রাইট গ্রহাণুগুলোর (CI ও CM কনড্রাইট)** ভেতরে থাকা খনিজ পানির আইসোটোপিক ছাপ পৃথিবীর সাগরের সাথে দশমিকের পর নিখুঁতভাবে মিলে যায়! পৃথিবীর পানি কোনো বরফপূর্ণ ধূমকেতু আনেনি; এনেছিল বৃহস্পতি ও শনির মহাকর্ষীয় নাড়াচাড়ায় ছিটকে আসা **আর্দ্র কাদামাটি খনিজযুক্ত (Phyllosilicates) কার্বনেশিয়াস গ্রহাণুসমূহ**।



চিত্র ৯.৩: জ্যাক হিলস জারকন এবং শীতল আদিম পৃথিবী (৪.৪০৪ বিলিয়ন বছর)। পশ্চিম অস্ট্রেলিয়ায় ৪.৪ বিলিয়ন বছরের প্রাচীন জারকন স্ফটিক (ZrSiO_4) আবিষ্কার হেডিয়ান যুগের অনন্ত অগ্নিকুণ্ডের মিথ ভেঙে দিয়েছে। তাদের ভেতরের উচ্চ অক্সিজেন আইসোটোপ মান ($\delta^{18}\text{O}$ = ৬.৫‰ থেকে ৭.৫‰) কেবল পৃষ্ঠের তরল পানির ক্ষয় এবং পানির উপস্থিতিতে গ্রানাইট গলনের মাধ্যমেই ব্যাখ্যা করা সম্ভব—যা প্রমাণ করে পৃথিবী সৃষ্টির মাত্র ১৬ কোটি বছর পরেই তরল সাগর ও মহাদেশীয় ভূত্বক বিরাজ করছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph

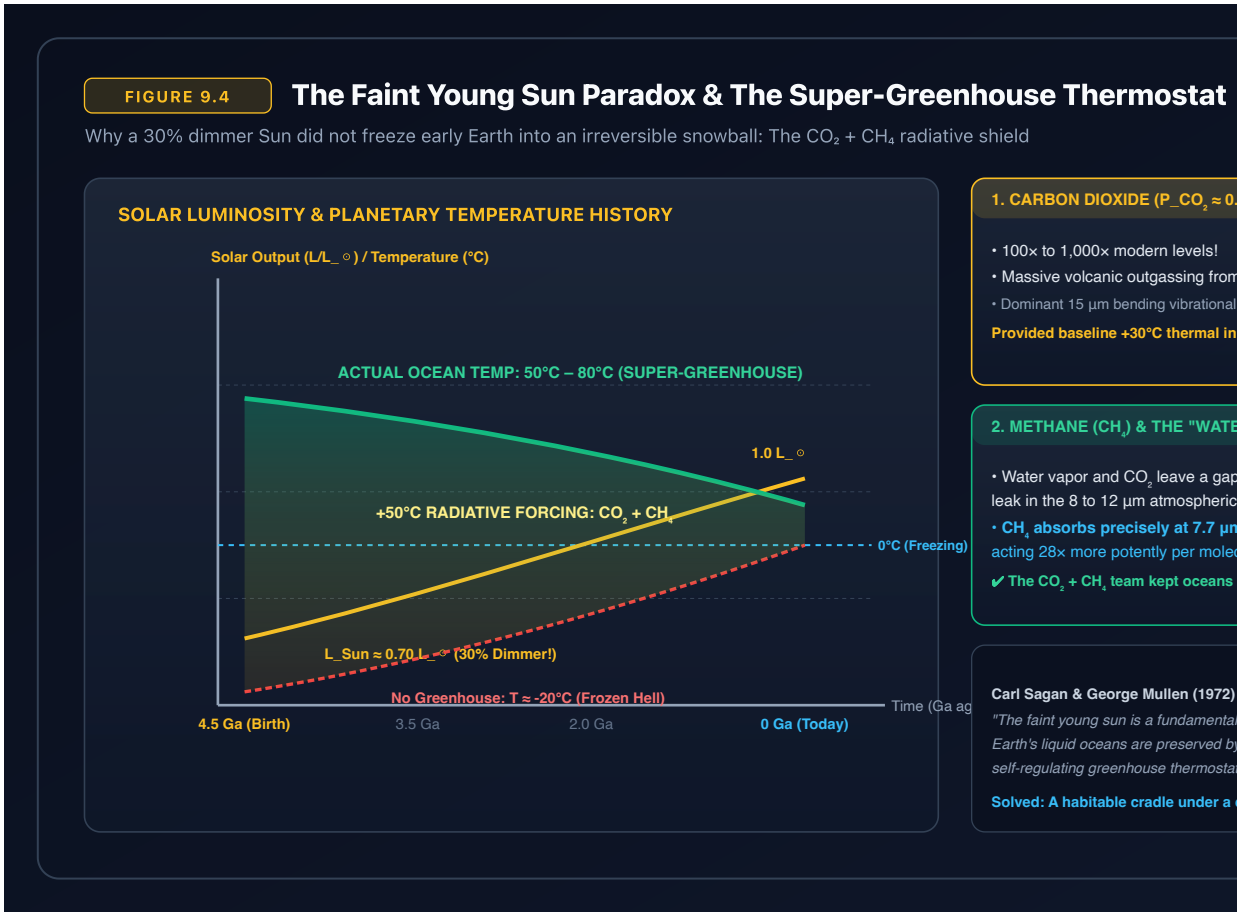
জ্যাক হিলস জারকন: শীতল ও আর্দ্র আদিম পৃথিবীর অকাট্য প্রমাণ

যেহেতু টেকটোনিক প্লেটের কারণে পৃথিবীর প্রাচীন ভূত্বক বারবার গলে গিয়ে নবায়ন হয়, তাই পৃথিবীর প্রথম ৫০ কোটি বছরের কোনো অক্ষত শিলা গঠন পৃথিবীতে টিকে নেই। কানাডার আকাস্তা নাইস (Acasta Gneiss)-এর বয়স প্রায় ৪০৩ কোটি বছর। এতদিন সবাই ভাবত প্রথম ৫০ কোটি বছরের ইতিহাস চিরতরে মুছে গেছে।

কিন্তু ভূ-রসায়নবিদরা চোখ ফেরান পশ্চিম অস্ট্রেলিয়ার **জ্যাক হিলস (Jack Hills)** পর্বতমালার দিকে। সেখানে অপেক্ষাকৃত তরুণ পলির মাঝে আটকে থাকা **জারকন স্ফটিকের ($ZrSiO_4$)** সন্ধান মেলে, যা আকারে ছিল মাত্র এক মিলিমিটারের দশ ভাগের এক ভাগ কিন্তু রাসায়নিকভাবে সম্পূর্ণ অবিনশ্বর।

৪৪ কোটি ৪০ লাখ বছরের প্রাচীন টাইম ক্যাপসুল
২০০১ সালে সাইমন ওয়াইল্ড এবং জন ভ্যালি একটি একক জারকন স্ফটিকের বয়স ইউরেনিয়াম-সীসা পদ্ধতিতে পরিমাপ করেন ঠিক **৪.৪০৪ বিলিয়ন বছর**—সৌরজগতের জন্মের মাত্র ১৬ কোটি বছর পর!

সবচেয়ে বিস্ময়কর বিষয় হলো, এই স্ফটিকগুলোর **অক্সিজেন-১৮ আইসোটোপিক মান ($\delta^{18}O = ৬.৫$ থেকে ৭.৫‰)** সাধারণ ম্যান্টলের বেসলাইনের (৫.৩‰) চেয়ে অনেক বেশি ছিল। ভূ-তত্ত্বে এত উচ্চ অক্সিজেন-১৮ কেবল তখনই সৃষ্টি হতে পারে যখন কোনো শিলাপৃষ্ঠ **তরল পানির উপস্থিতিতে কম তাপমাত্রায় ক্ষয়প্রাপ্ত হয়** এবং পরবর্তীতে ভূ-অভ্যন্তরে গিয়ে গ্রানাইটে রূপ নেয়। জ্যাক হিলসের জারকন স্ফটিক অকাট্যভাবে প্রমাণ করে দিয়েছে: **৪৪ কোটি বছর পূর্বেই পৃথিবীতে তরল পানির মহাসমুদ্র, গ্রানাইটের মহাদেশীয় ভূত্বক এবং নাতিশীতোষ্ণ জলবায়ু বিরাজ করছিল!**



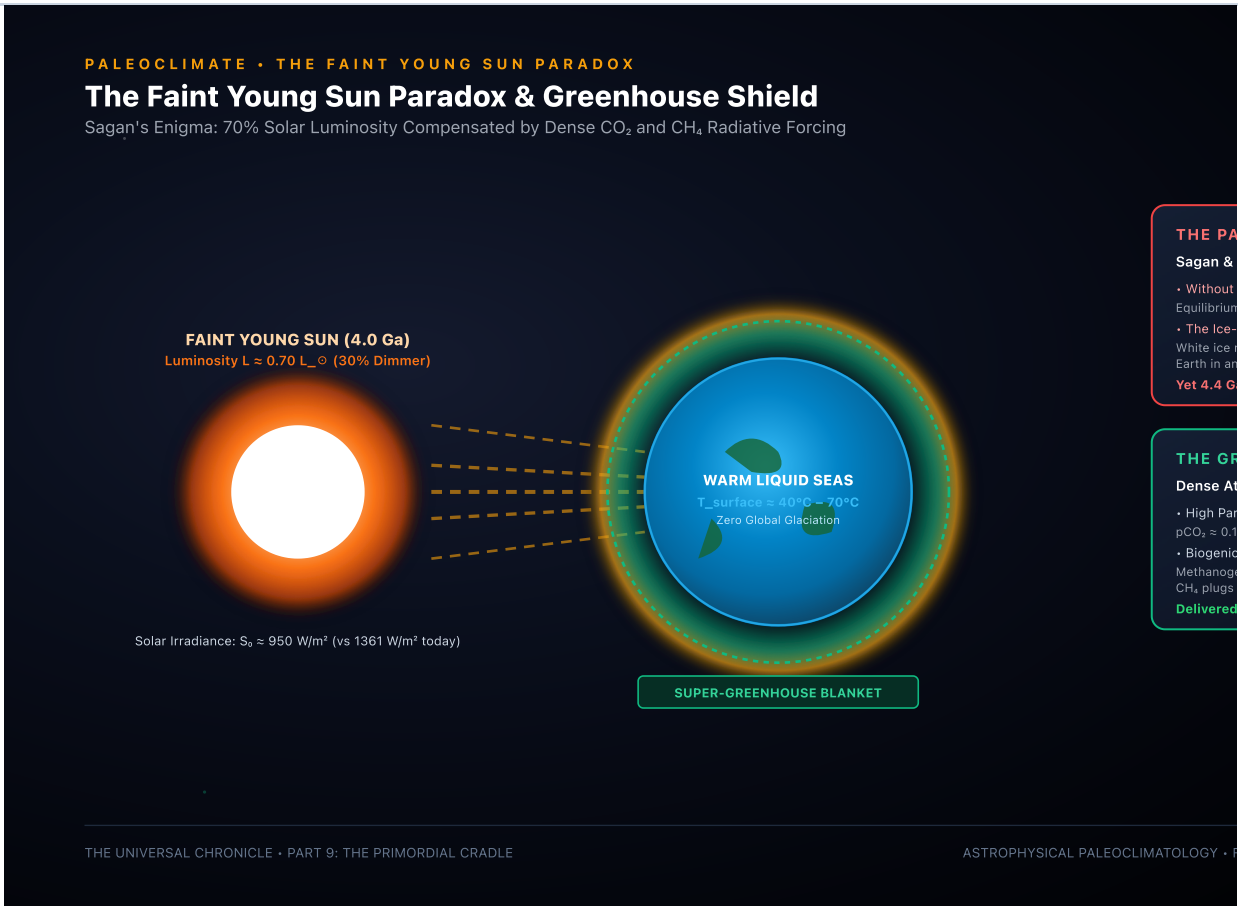
চিত্র ৯.৪: ক্ষীণ তরুণ সূর্যের ধাঁধা এবং সুপার-গ্রিনহাউস সমাধান। ৪.৫ বিলিয়ন বছর পূর্বে তরুণ সূর্য আজকের চেয়ে ৩০% অনুজ্জ্বল ছিল ($L \approx 0.৭০L_{\odot}$); বর্তমানের মতো বায়ুমণ্ডল থাকলে পৃথিবী জমে গিয়ে চিরতরে মাইনাস ২০ ডিগ্রি সেলসিয়াসের তুষারগোলকে পরিণত হতো। কার্বন ডাই-অক্সাইড (০.১–১.০ বার) এবং মিথেনের শক্তিশালী গ্রিনহাউস চাদর বায়ুমণ্ডলে অতিরিক্ত ৫০ ডিগ্রি সেলসিয়াস তাপ ধরে রেখে মহাসমুদ্রগুলোকে তরল ও উষ্ণ রেখেছিল।

ক্ষীণ তরুণ সূর্যের ধাঁধা: কেন পৃথিবী বরফে পরিণত হয়নি?

৪৪ কোটি বছর পূর্বে মহাসমুদ্রের এই আবিষ্কার জ্যোতির্বিজ্ঞানে এক চরম প্যারাডক্সের জন্ম দিয়েছিল, যা ১৯৭২ সালে প্রথম উত্থাপন করেছিলেন **কার্ল সাগান এবং জর্জ মুলেন: ক্ষীণ তরুণ সূর্যের ধাঁধা (Faint Young Sun Paradox)**।

নাক্ষত্রিক বিবর্তনের নিয়ম অনুযায়ী তরুণ তারাদের কেন্দ্রে ফিউশনের হার কম থাকে। ৪.৪ বিলিয়ন বছর পূর্বে আমাদের সূর্য আজকের চেয়ে **২৫% থেকে ৩০% অনুজ্জ্বল ছিল ($L \sim 0.৭০\text{–}0.৭৫ L_{\odot}$)**।

আজকের পৃথিবীকে যদি ২৫% কম আলোর সূর্যের নিচে রাখা হয়, তবে বৈশ্বিক তাপমাত্রা নেমে যাবে মাইনাস ৩০ ডিগ্রি সেলসিয়াসে—পুরো পৃথিবী পরিণত হবে এক হিমশীতল প্রতিফলক বরফের গোলকে (Snowball Earth)। তাহলে কীভাবে সেই অনুজ্জ্বল সূর্যের নিচে পৃথিবী তরল সমুদ্র ধরে রেখেছিল?

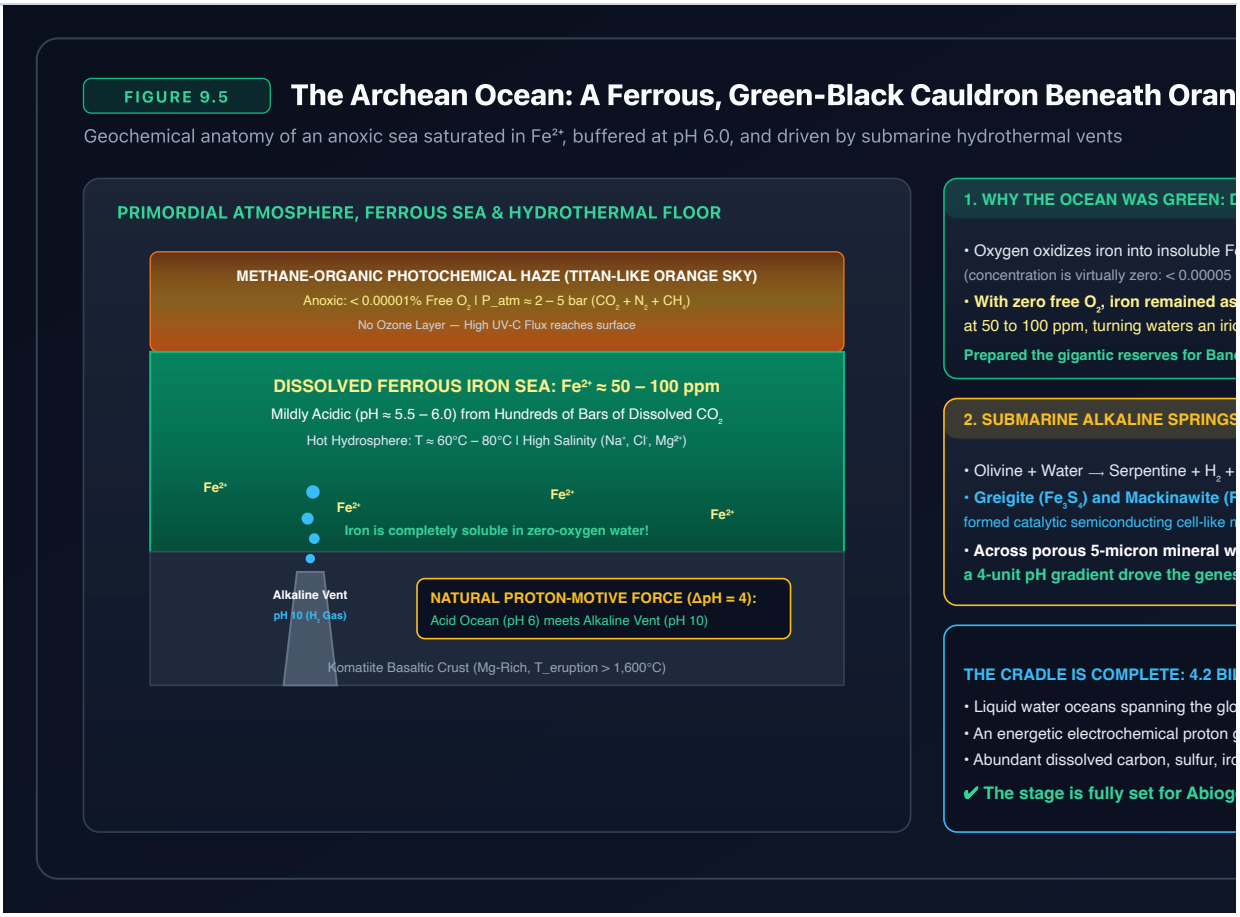


চিত্র ৯.৪ক: ক্ষীণ তরুণ সূর্যের ধাঁধা এবং বায়ুমণ্ডলীয় সুপার-গ্রিনহাউস বিকিরণ। আধুনিক উজ্জ্বলতার মাত্র ৭০% আলো দেওয়া তরুণ সূর্যের নিচে পৃথিবী সম্পূর্ণ জমাট বরফে পরিণত হওয়ার কথা থাকলেও, বায়ুমণ্ডলের উচ্চ কার্বন ডাই-অক্সাইড এবং মিথেনের শক্তিশালী গ্রিনহাউস প্রভাব ভূপৃষ্ঠের তাপমাত্রা বাড়িয়ে তরল সমুদ্রকে চিরস্থায়ী বরফযুগ থেকে বাঁচিয়ে রেখেছিল।

সমাধান ছিল এক দানবাকৃতির সুপার-গ্রিনহাউস বায়ুমণ্ডল:

- **কার্বন ডাই-অক্সাইডের পুরু চাদর:** হেডিয়ান বায়ুমণ্ডলে **০.৫ থেকে ৫ বার** CO_2 ছিল (আজকের চেয়ে শত শত গুণ বেশি), যা আগ্নেয়গিরির উদগীরণে অবিরাম বের হচ্ছিল এবং মহাদেশীয় শিলা না থাকায় কার্বনেটে রূপ নিয়ে মাটিতে আটকা পড়তে পারছিল না।
- **মিথেন গ্রিনহাউস (CH_4):** সমুদ্রের তলদেশে ক্ষারীয় পাথরের সাথে পানির বিক্রিয়ায় (সার্পেনটিনাইজেশন) বিপুল পরিমাণ হাইড্রোজেন উৎপন্ন হতো, যা দ্রবীভূত কার্বনের সাথে যুক্ত হয়ে তৈরি করত মিথেন—যা CO_2-এর চেয়ে ২৮ গুণ বেশি শক্তিশালী গ্রিনহাউস গ্যাস।
- **কম প্রতিফলন (Low Albedo):** মহাদেশীয় শিলা ও বরফের অভাবের কারণে গাঢ় সবুজ-কালো মহাসমুদ্র সূর্যের ৯০%-এর বেশি তাপ সরাসরি শুষে নিত।

Shakil Mahmud • Research Monograph

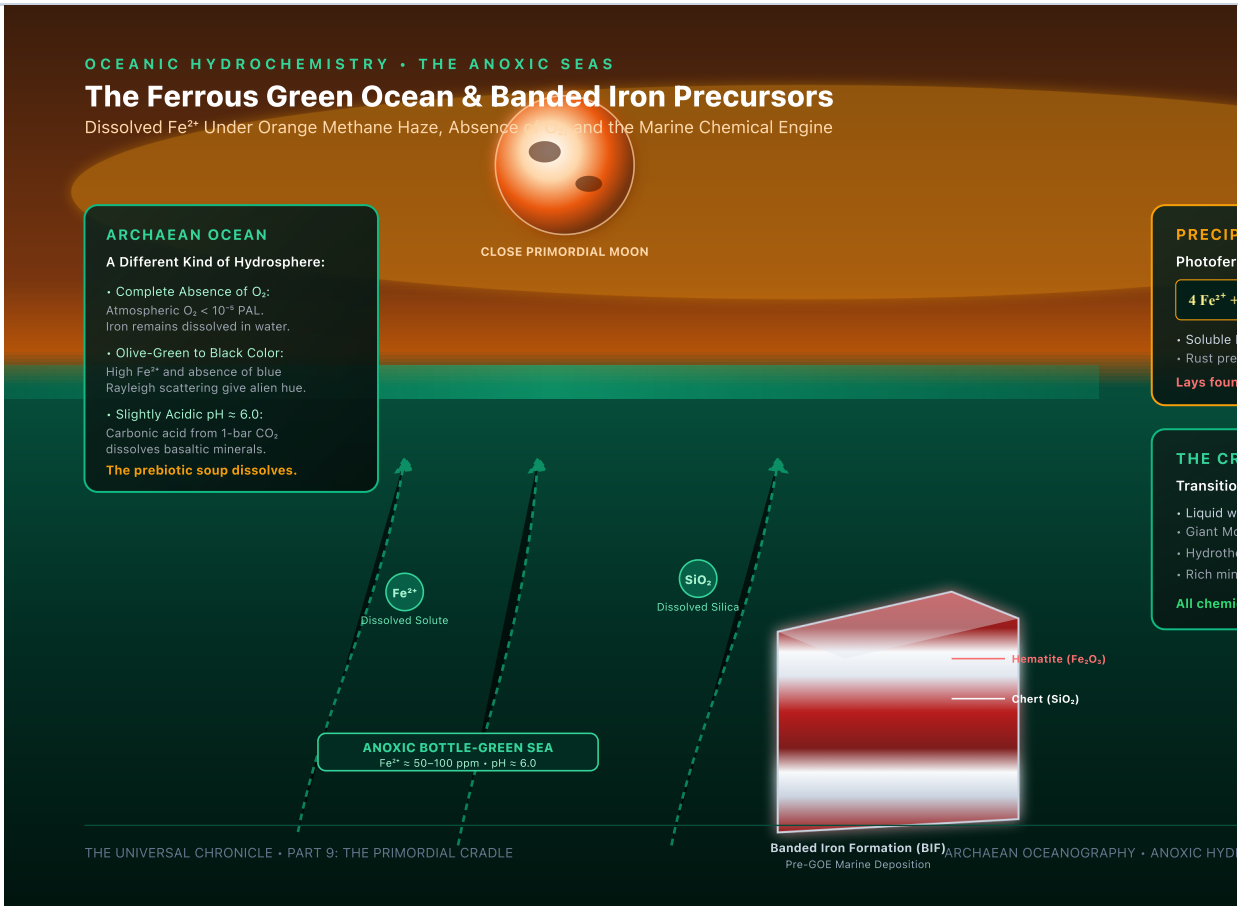


চিত্র ৯.৫: আর্কিয়ান হাইড্রোস্ফিয়ার এবং জীবনের অন্তর্জলীয় ইঞ্জিন। আদিম মহাসমুদ্র ছিল অক্সিজেনহীন, উষ্ণ (৬০°–৮০°C) এক বোতল-সবুজ কড়াই—যেখানে কমলা ধোঁয়াটে আকাশের নিচে প্রচুর দ্রবীভূত ফেরাস লোহা (Fe^{2+}) ভাসমান ছিল। সমুদ্রের তলদেশের ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্টে ক্ষারীয় তরল (pH ১০) যখন এসিডিক সাগরের পানির (pH ৬) মুখোমুখি হতো, তখন সেখানে একটি প্রাকৃতিক প্রোটন-মোটিভ ফোর্স ($\Delta pH = 8$) তৈরি হতো—যা জীবনের প্রথম বিপাকীয় বিক্রিয়ার অনুঘটক হিসেবে কাজ করেছিল।

আর্কিয়ান মহাসমুদ্রের রূপ: সবুজ-কালো ফুটন্ত কড়াই

৪২ কোটি বছর পূর্বে যদি কেউ পৃথিবীর সৈকতে দাঁড়িয়ে থাকত, তবে সেই দৃশ্যটি হতো কোনো ভিনগ্রহের চেয়েও অদ্ভুত:

- **আকাশ:** বায়ুমণ্ডলে মুক্ত অক্সিজেন না থাকায় মিথেনের ধোঁয়াশায় আকাশ ছিল কমলা বা স্যামন রঙের। ঘন ঘন ধূলিঝড় এবং আগ্নেয় ছাইয়ের মাঝে প্রচণ্ড বজ্রপাত হতো।
- **চাঁদ:** আকাশে চাঁদ ছিল দানবাকৃতির, আজকের চেয়ে অনেক কাছে অবস্থান করে প্রতি ৫-৬ ঘণ্টার দিনে শত শত মিটার উঁচু প্রলয়ঙ্কর জোয়ার সৃষ্টি করছিল।
- **মহাসমুদ্র:** মহাসমুদ্র ছিল উষ্ণ (৫০° থেকে ৭০°C), সামান্য এসিডিক, এবং দ্রবীভূত ফেরাস লোহায় (Fe^{2+}) কানায় কানায় পূর্ণ। অক্সিজেনের অভাবে এই লোহা কোনো মরিচা তৈরি না করে সম্পূর্ণ দ্রবীভূত অবস্থায় সাগরের পানিকে দিয়েছিল গাঢ় বোতল-সবুজ থেকে কালো এক অপার্থিব রূপ।



চিত্র ৯.৫ক: অক্সিজেনহীন ফেরাস সবুজ মহাসমুদ্র এবং আদিম ব্যান্ডেড আয়রন তলানি। বায়ুমণ্ডলে মুক্ত অক্সিজেন না থাকায় বিপুল পরিমাণ লোহা সাগরের পানিতে দ্রবীভূত ফেরাস আয়ন (Fe^{2+}) হিসেবে মিশে পানিকে গাঢ় বোতল-সবুজ থেকে কালো রঙে রাঙিয়ে রেখেছিল; যা পরবর্তীতে আদিম সালোকসংশ্লেষণে জারিত হয়ে জন্ম দেয় বিশ্বের বিখ্যাত ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশনের।

হেডিয়ান ও আদিম আর্কিয়ান পৃথিবীর ভূ-রাসায়নিক পরিমাপক সারণী

জোন / জলাধার	প্রধান রাসায়নিক উপাদান	আনুমানিক তাপমাত্রা	প্রধান ভৌত ও রাসায়নিক গতিবিদ্যা
বায়ুমণ্ডল	CO_2 (৮০\text{–}৯০\%), N_2 (১০\text{–}১৫\%), CH_4, CO, H_2O	৪০° থেকে ৮৫°C	চাপ ১ থেকে ১০ বার; অক্সিজেনহীন; ক্ষীণ তরুণ সূর্যের প্যারাডক্সের সমাধান।
হাইড্রোস্ফিয়ার (সাগর)	H_2O, দ্রবীভূত Fe^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SiO_2	৫০° থেকে ৭০°C	আয়তন আধুনিক সাগরের ১.৫–২ গুণ; অম্লীয় (\text{pH } ৫.৫\text{–}৬.৫); জলপাই-সবুজ আভা।
ভূত্বক ও ভূমি	ব্যাসাল্ট শিলা, প্রোটো-মহাদেশীয় টিটিজি (TTG) গ্রানাইট	৩০০\text{–}৫০০^\circ\text{C} (গভীরে)	দ্রুত গতিশীল পাতলা প্রোটো-প্লেট; উচ্চ আগ্নেয় তাপপ্রবাহ (আধুনিকের ৩ গুণ)।
জোয়ারি বল	চাঁদের দূরত্ব ৩০,০০০ থেকে ৬০,০০০ কিমি	—	দিনের দৈর্ঘ্য ৬–১০ ঘণ্টা; জোয়ারের উচ্চতা ১০–১০০ মিটার; উপকূলীয় অঞ্চলে তীব্র আলোড়ন।
সমুদ্রের তলদেশ	পেরিডোটাইট, কোমাটিইট, সার্পেনটাইন শিলা	হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট >৩০০^\circ\text{C}	ক্ষারীয় ভেন্ট; সার্পেনটিনাইজেশনে হাইড্রোজেন (H_2) ও প্রোটন গ্র্যাডিয়েন্ট তৈরি।

সূতিকাগার প্রস্তুত: প্রাণের চরম সীমানায়

চার বিলিয়ন বছর পূর্বে মহাবিশ্ব তার ইতিহাসের সবচেয়ে অলৌকিক ভৌত রূপান্তরের ভিত্তিপ্রস্তর স্থাপন করে ফেলেছিল। কোয়ান্টাম ফেনা, মহাজাগতিক স্ফীতি, পারমাণবিক ফিউশন, নক্ষত্রের বিস্ফোরণ, ছায়াপথের ঘূর্ণন এবং দুটি আদিম গ্রহের মহাপ্রলয়ঙ্কর সংঘর্ষ পেরিয়ে শেষ পর্যন্ত আত্মপ্রকাশ করেছিল একটি স্থিতিশীল জগৎ: একটি গলিত লোহার কোরযুক্ত গ্রহ যা মহাজাগতিক বিকিরণ থেকে রক্ষা পেতে নিজস্ব চৌম্বকীয় ঢালে আবৃত, এক উষ্ণ গ্রিনহাউস বায়ুমণ্ডলে আবৃত, এবং খনিজ ও তরল পানির এক সুবিশাল মহাসমুদ্রে পরিবেষ্টিত।

সমুদ্রের অতল তলদেশে, যেখানে অন্ধকার সাগরের সাথে ভূ-অভ্যন্তরীণ লাভা মিলিত হচ্ছিল, সেখানে ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্টগুলো পানিতে ঢেলে দিচ্ছিল অনুঘটক রূপান্তরকারী ধাতু (লোহা, নিকেল, সালফার) এবং প্রাকৃতিক প্রোটন ঘনত্বের নতিমাত্রা। সমস্ত ভৌত ও রাসায়নিক মঞ্চ প্রস্তুত হয়ে গিয়েছিল পদার্থের ইতিহাসের সর্বশ্রেষ্ঠ উল্লম্ফনের জন্য: নির্জীব ভূ-রসায়ন থেকে সজীব জৈবিক কোডের জন্ম।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্তের **দশম পর্বে** আমরা পদার্পণ করব জীবনের তৃতীয় ধাপে: **অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

বৈজ্ঞানিক তথ্যসূত্র ও প্রামাণ্য গ্রন্থপঞ্জি

- **Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., & Graham, C. M. (2001).** “Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago.” *Nature*, 409, 175–178. doi:10.1038/35051550.
- **Valley, J. W., et al. (2014).** “Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography.” *Nature Geoscience*, 7, 219–223. doi:10.1038/ngeo2075.
- **Sagan, C., & Mullen, G. (1972).** “Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures.” *Science*, 177(4043), 52–56. doi:10.1126/science.177.4043.52.
- **Alexander, C. M. O’D., et al. (2012).** “The Provenance of Carbonaceous Chondrites and the Origin of Earth’s Water.” *Science*, 337(6095), 721–723. doi:10.1126/science.1223474.
- **Altwegg, K., et al. (2015).** “67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio.” *Science*, 347(6220), 1261952. doi:10.1126/science.1261952.
- **Kasting, J. F. (1993).** “Earth’s early atmosphere.” *Science*, 259(5097), 920–926. doi:10.1126/science.11536547.
- **Sleep, N. H., Zahnle, K., & Neuhoff, P. S. (2001).** “Initiation of clement surface conditions on the earliest Earth.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(7), 3666–3672. doi:10.1073/pnas.071045698.

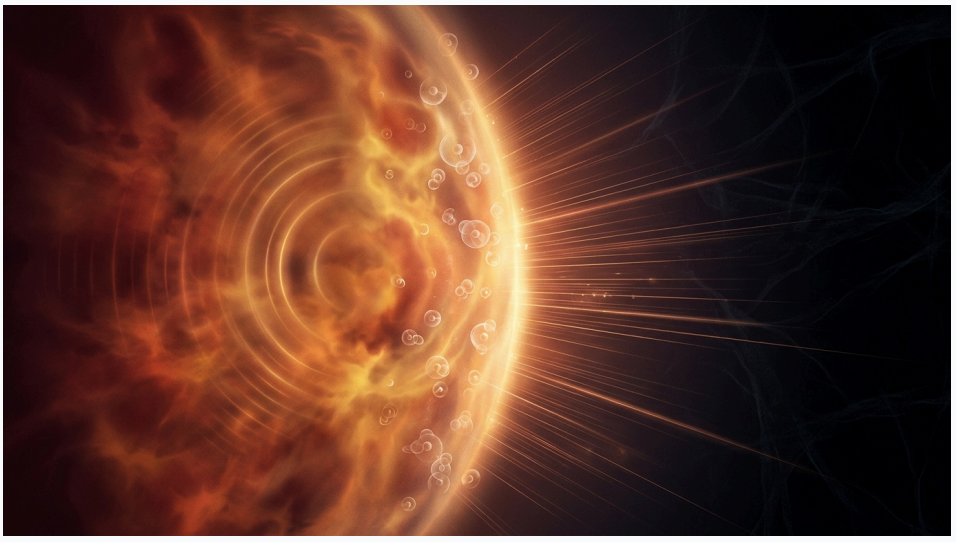
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "আদিম সূতিকাগার — আগ্নেয়গিরির গ্যাসীয় নির্গমন, উল্কাপাত এবং প্রথম মহাসমুদ্রের জন্ম"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ৯। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-9-the-primordial-cradle-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • দশম খণ্ড

অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ

অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ

2,341 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১০: *চিত্র: গভীর সমুদ্রের তলদেশে ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট (~৪.০ বিলিয়ন বছর আগে): খনিজ চিমনির প্রাকৃতিক প্রোটন গ্র্যাডিয়েন্ট এবং আয়রন-সালফার অনুঘটক আদিম আরএনএ এবং প্রথম কোষীয় মেটাবলিজমের জন্ম দিয়েছিল।*

চার বিলিয়ন বছর পূর্বে, পৃথিবীর অন্ধকার, অক্সিজেনহীন আদিম সমুদ্রের অতল তলদেশে এক অলৌকিক গুণগত রূপান্তর ঘটেছিল। জড় খনিজ শিলা জীবন্ত কোষের ন্যায় আচরণ করতে শুরু করে। ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্টের (alkaline hydrothermal vents) সূক্ষ্ম ছিদ্রযুক্ত খনিজ প্রকোষ্ঠের ভেতরে নিরবচ্ছিন্ন প্রাকৃতিক তড়িৎরাসায়নিক প্রোটন গ্রেডিয়েন্ট কার্বন ডাই-অক্সাইডকে জৈব অণুতে বিজারিত করতে চালিকাশক্তি জুগিয়েছিল। এই রাসায়নিক সূতিকাগারে রাইবোনিউক্লিক অ্যাসিডের (RNA) অনুঘটনশীল শৃঙ্খলগুলো ডিজিটাল তথ্য সংরক্ষণ ও নিজেদের প্রতিলিপি তৈরি করতে শেখে—পদার্থবিজ্ঞান ও ভূ-রসায়নের মহাজাগতিক সীমানা পেরিয়ে উন্মোচিত হয় স্বনির্ভর জৈবিক বিবর্তনের নবযুগ।

জীবন কী? তাপগতিবিদ্যার চ্যালেঞ্জ

প্রাণের সূচনা কীভাবে হয়েছিল তা অনুধাবনের জন্য পদার্থবিজ্ঞানের দৃষ্টিতে প্রাণের প্রকৃত স্বরূপ বোঝা অপরিহার্য। ১৯৪৪ সালে কোয়ান্টাম পথিকৃৎ এরভিন শ্রোডিঙ্গার (Erwin Schrödinger) তাঁর বিখ্যাত গ্রন্থ *"What is Life?"*-এ প্রস্তাব করেছিলেন যে, জীবন্ত সত্তা চারপাশের পরিবেশ থেকে **ঋণাত্মক এনট্রপি** (\Delta S < 0) আহরণ করে টিকে থাকে। একটি জীবন্ত সত্তা হীরা বা পাথরের মতো কোনো স্থির বস্তু নয়; এটি একটি **সাম্যাবস্থাহীন অপচয়ী কাঠামো (non-equilibrium dissipative structure)**—পদার্থ ও শক্তির এক অবিরাম ঘূর্ণাবর্ত, যা উচ্চমানের রাসায়নিক শক্তি গ্রহণ এবং চারপাশে নিম্নমানের তাপশক্তি নির্গমন করে নিজের ভেতরের কাঠামোগত শৃঙ্খলা অক্ষুণ্ণ রাখে।

আধুনিক প্রাণরসায়নবিদরা একটি ন্যূনতম জীবন্ত ব্যবস্থার তিনটি অবিচ্ছেদ্য স্তম্ভ চিহ্নিত করেছেন:

- **১. প্রকোষ্ঠায়ন (Compartmentalization):** একটি অর্ধ-ভেদ্য ভৌত সীমানা (লিপিড ঝিল্লি) যা অভ্যন্তরীণ প্রাণরাসায়নিক পরিবেশকে বিশৃঙ্খল বহিঃপরিবেশ থেকে পৃথক রাখে এবং অত্যাবশ্যকীয় অণুগুলোকে সাগরে ভেসে যাওয়া থেকে রক্ষা করে।
- **২. অবিচ্ছিন্ন বিপাকক্রিয়া (Continuous Metabolism):** রাসায়নিক বিক্রিয়ার একটি স্ব-পরিচালিত চক্র যা বাহ্যিক শক্তি ও কার্বন আহরণ করে কোষের উপাদান সংশ্লেষ করে এবং ঝিল্লির দুই পাশে তড়িৎরাসায়নিক চার্জ বজায় রাখে।
- **৩. ডিজিটাল জিনগত তথ্য (Digital Genetic Information):** রৈখিক পলিমার অণু (RNA বা DNA) যা ক্রমভিত্তিক তথ্য সংরক্ষণ করতে পারে, অনুঘটক যন্ত্রপাতিকে নির্দেশ দিতে পারে, নির্ভুলভাবে প্রতিলিপি তৈরি করতে পারে এবং ডারউইনীয় বংশগত প্রকরণ প্রদর্শনে সক্ষম।

আদিম ঝোলের ভ্রান্তি: মিলার-উরে ফ্লাস্ক কেন অসম্পূর্ণ ছিল

১৯৫৩ সালে শিকাগো বিশ্ববিদ্যালয়ে স্ট্যানলি মিলার ও হ্যারল্ড উরে তাঁদের বিখ্যাত বৈদ্যুতিক স্ফুলিঙ্গ পরীক্ষা সম্পন্ন করেন। পানি, মিথেন (CH_4), অ্যামোনিয়া (NH_3) এবং হাইড্রোজেন (H_2) সমৃদ্ধ কাচের ফ্লাস্কের ভেতর উচ্চ-ভোল্টেজের স্ফুলিঙ্গ পাঠিয়ে মিলার প্রোটিনের গাঠনিক একক কুড়িটিরও বেশি অ্যামিনো অ্যাসিড সংশ্লেষ করেন। প্রায় অর্ধশতাব্দী ধরে পাঠ্যপুস্তকে শেখানো হয়েছে যে অগভীর উষ্ণ জলাশয়ে বজ্রপাতের মাধ্যমে এই "আদিম জৈব ঝোল" (primordial soup) থেকে প্রাণের জন্ম হয়েছিল।

তবে আধুনিক মহাজাগতিক রসায়ন ও গ্রহীয় ভূতত্ত্ব উন্মুক্ত সাগরের ঝোল তত্ত্বের দুটি অপূরণীয় ত্রুটি প্রকাশ করেছে:

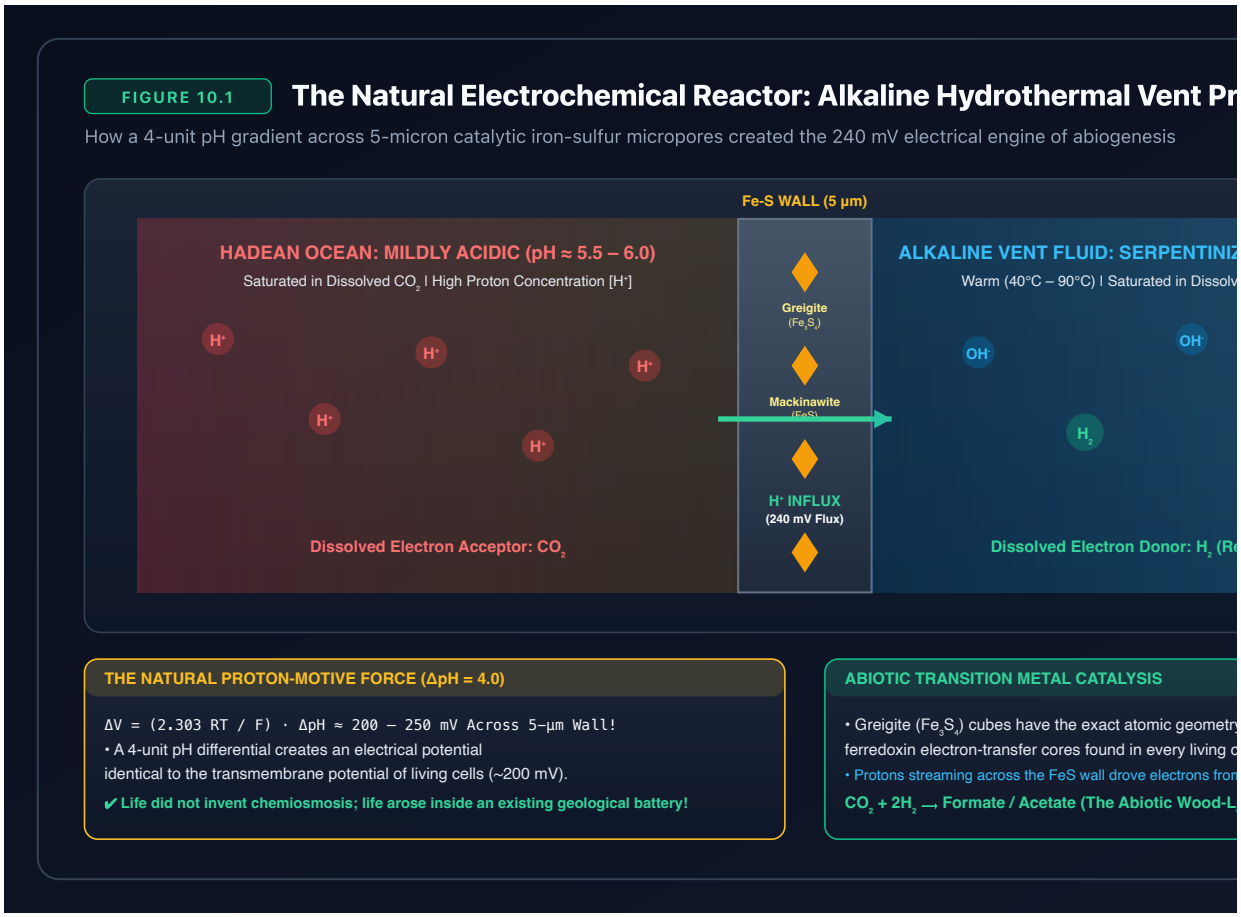
Shakil Mahmud • Research Monograph

১. নিরপেক্ষ বায়ুমণ্ডলের বাস্তবতা

হেডিয়ান জারকনের ম্যান্টল জারণ অবস্থা বিশ্লেষণ করে দেখা গেছে যে প্রাচীন আগ্নেয়গিরির গ্যাসে মিথেন বা হাইড্রোজেনের বদলে মূলত কার্বন ডাই-অক্সাইড (CO_2) এবং নাইট্রোজেন (N_2) প্রাধান্য পেত, যা ছিল দুর্বল বিজারক বা নিরপেক্ষ বায়ুমণ্ডল। যখন CO_2 ও N_2 দিয়ে মিলারের পরীক্ষা পুনরাবৃত্তি করা হয়, তখন অ্যামিনো অ্যাসিডের উৎপাদন শূন্যের কাছাকাছি নেমে আসে।

২. লঘুকরণ ও ঘনীভবন সমস্যা

উন্মুক্ত সাগরে জৈব অণু উৎপন্ন হলেও পৃথিবীর মহাসাগরের বিপুল জলরাশি (১.৪×১০^{২১} লিটার) সেগুলোকে অতি-লঘু ন্যানোমোলার ঘনত্বে বিলীন করে দিত। উপরন্তু, অ্যামিনো অ্যাসিড থেকে প্রোটিন বা নিউক্লিওটাইড থেকে আরএনএ তৈরি একটি **ঘনীভবন বিক্রিয়া (condensation reaction)**, যাতে পানি অণু অপসারিত হয় ($A + B \rightarrow AB + H_2O$)। উন্মুক্ত পানিতে লা শাতেলিয়ের নীতি অনুযায়ী বিক্রিয়াটি স্বতঃস্ফূর্তভাবে পলিমার ভাঙার দিকে (হাইড্রোলাইসিস) ধাবিত হয়, পলিমার তৈরির দিকে নয়!



চিত্র ১০.১: প্রাকৃতিক তড়িৎরাসায়নিক চুল্লি ও ভূতাত্ত্বিক প্রোটন-চালিকা শক্তি (Geological Proton-Motive Force)। ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল চিমনিগুলো অর্ধ-ভেদ্য আয়রন-সালফার খনিজ প্রাচীর দ্বারা আবদ্ধ অসংখ্য সূক্ষ্ম আন্তঃসংযুক্ত প্রকোষ্ঠ তৈরি করেছিল। একদিকে ক্ষারীয় ফুটন্ত তরল (pH ~৯–১১, H_2 ও HS^- সমৃদ্ধ) চুইয়ে উঠত, অন্যদিকে বাইরে বইত ঠান্ডা অম্লীয় মহাসমুদ্রের জল (pH ~৫.৫–৬.০, CO_2 সমৃদ্ধ)। এই ৫-মাইক্রন পুরু খনিজ পর্দার মাঝে সৃষ্ট ৪-ইউনিটের ΔpH পার্থক্য (~২৪০ মিলিভোল্ট তড়িৎ বিভব) জৈবিক এটিপি সিন্থেজ বিবর্তিত হওয়ার কোটি কোটি বছর আগেই আদিম জীবনের প্রথম রাসায়নিক বিক্রিয়াগুলোকে শক্তি জুগিয়েছিল।

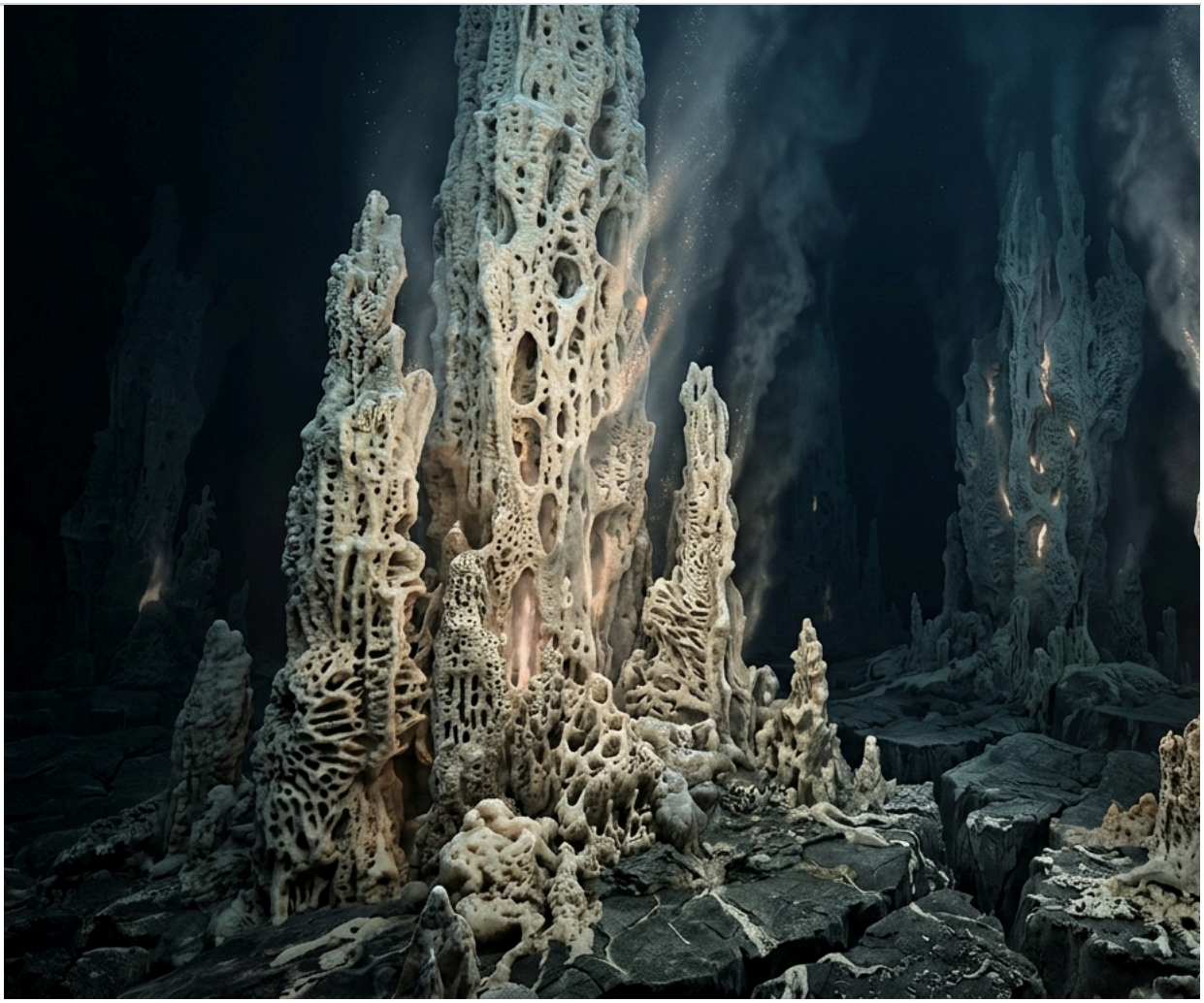
গভীর সমুদ্রের ক্ষারীয় ভেন্ট: পৃথিবীর প্রাকৃতিক তড়িৎরাসায়নিক চুল্লি

১৯৮৯ সালে ভূ-রসায়নবিদ **মাইকেল রাসেল (Michael Russell)** এক বৈপ্লবিক মডেল প্রস্তাব করেন, যা আজ অ্যাবায়োজেনেসিসের সবচেয়ে গ্রহণযোগ্য বৈজ্ঞানিক ভিত্তি: প্রাণের সূচনা সূর্যের আলোযুক্ত পৃষ্ঠের জলাশয়ে নয়, বরং **গভীর সমুদ্রের ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্টে** (যেমন মধ্য আটলান্টিক শৈলশিরার "Lost City" হাইড্রোথার্মাল ক্ষেত্র) ঘটেছিল।

রাসেল স্পষ্ট করেন যে প্রাণের সূতিকাগার ছিল না ৩৫০°C তাপমাত্রার বিধ্বংসী অ্যাসিডযুক্ত আগ্নেয় "ব্ল্যাক স্মোকার"। বরং তা ছিল মহাসাগরীয় ভূত্বকের ম্যান্টল পেরিডোটাইট শিলার সাথে সমুদ্রের পানির মৃদু নিম্ন-তাপমাত্রার ভূতাত্ত্বিক বিক্রিয়া: **সার্পেনটিনাইজেশন (Serpentinization)**।

$$\text{অলিভাইন} + \text{পানি} \rightarrow \text{সার্পেনটিন} + \text{ব্রুসাইট} + \text{ম্যাগনেটাইট} + \text{হাইড্রোজেন } (H_2)$$

প্রাকৃতিক প্রোটন-চালিকা শক্তি (The Natural Proton-Motive Force)
সার্পেনটিনাইজেশনের ফলে উষ্ণ (৪০° থেকে ৯০°C), তীব্র ক্ষারীয় (pH ৯ থেকে ১১) তরল উৎপন্ন হয় যা দ্রবীভূত হাইড্রোজেন (H_2), মিথেন ও হাইড্রোসালফাইড (HS^-) গ্যাসে সম্পৃক্ত। এই ক্ষারীয় রস যখন হেডিয়ান মহাসমুদ্রের তলদেশে প্রবেশ করত, তখন তা বায়ুমণ্ডলের শত শত বার চাপের CO_2 গ্যাসে সম্পৃক্ত অম্লীয় সমুদ্রজলের (pH ৫.৫ থেকে ৬.০) সংস্পর্শে আসত।

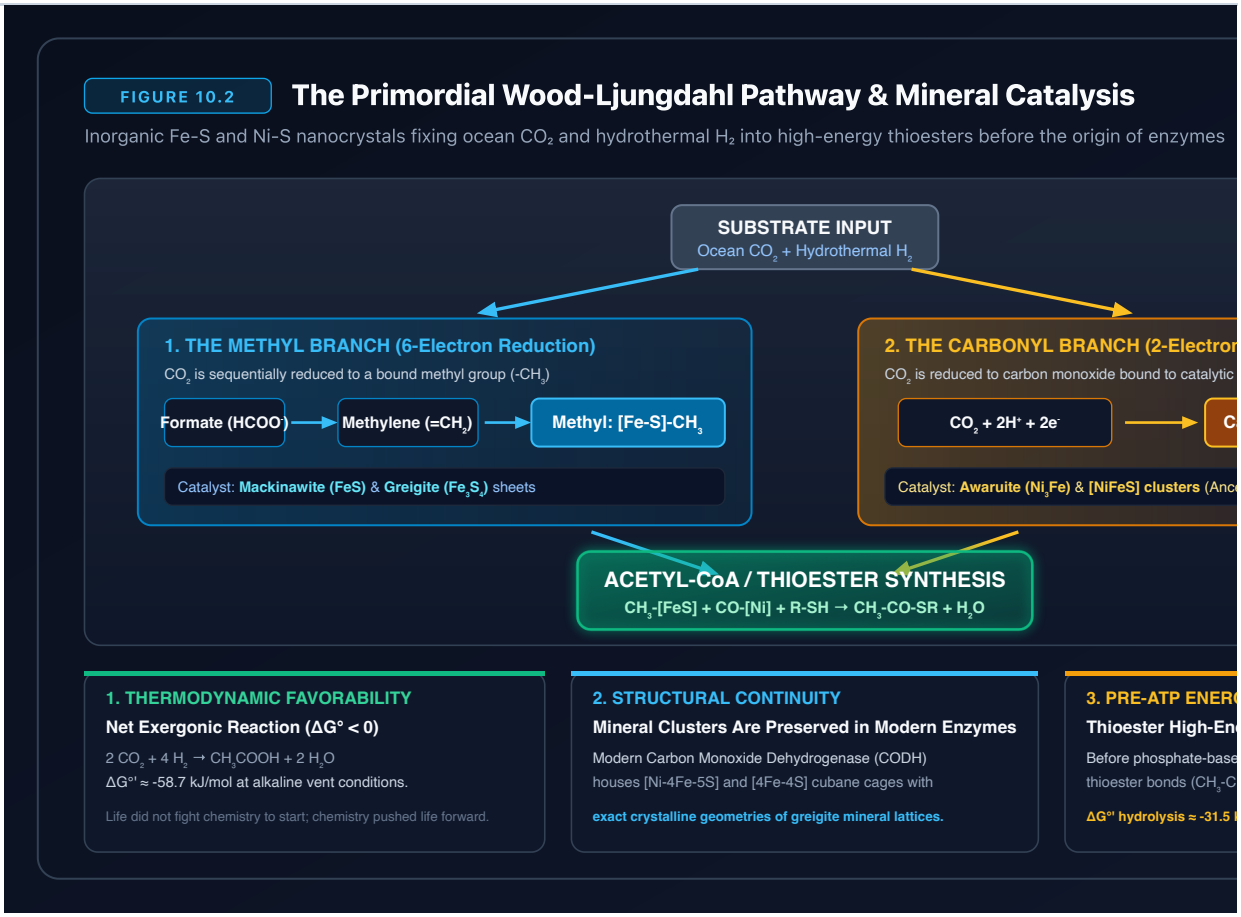


গভীর সমুদ্রের ভূ-রসায়ন: ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট স্তম্ভ (~৪.০ বিলিয়ন বছর পূর্বে)। হেডিয়ান মহাসমুদ্রের অন্ধকার শিলাময় তলদেশে ক্যালসিয়াম কার্বনেট ও সার্পেনটিন খনিজের সুউচ্চ সাদা স্তম্ভগুলো পৃথিবীর আদিমতম প্রাকৃতিক তড়িৎরাসায়নিক চুল্লি হিসেবে কাজ করত। হাইড্রোজেন-সমৃদ্ধ উষ্ণ ক্ষারীয় তরল শীতল অম্লীয় সমুদ্রজলে মিশে নিরবচ্ছিন্ন প্রোটন ও ভোল্টেজ গ্রেডিয়েন্ট তৈরি করেছিল, যা প্রাণের প্রথম জৈব অণু তৈরিতে শক্তি জুগিয়েছিল।

এই সংযোগস্থলে ক্যালসিয়াম কার্বনেট ও আয়রন-সালফার খনিজ (যেমন গ্রেগাইট ও ম্যাকিনাউইট) অধঃক্ষিপ্ত হয়ে বিশাল চিমনি গঠন করত, যার ভেতর ছিল **অসংখ্য সূক্ষ্ম, আন্তঃসংযুক্ত অজৈব প্রকোষ্ঠ** (১০ থেকে ১০০ মাইক্রন চওড়া)। এই ছিদ্রগুলোর পাতলা অর্ধ-পরিবাহী আয়রন-সালফার প্রাচীরের দুই পাশে বিরাজ করত প্রাকৃতিক pH পার্থক্য: **প্রায় ৪ থেকে ৫ ইউনিটের pH ব্যবধান, যা প্রায় ২০০ থেকে ৩০০ মিলিভোল্টের এক প্রাকৃতিক তড়িৎ বিভব তৈরি করত!**

খনিজ প্রাচীরের এই প্রাকৃতিক তড়িৎ গ্রেডিয়েন্টটির মান ও অভিমুখ ঠিক সেই **প্রোটন-চালিকা শক্তির ($\sim 200\ \mathrm{mV}$)** অনুরূপ, যা আধুনিক প্রতিটি জীবকোষ পিটার মিচেলের কেমিওসমোটিক প্রক্রিয়ায় এটিপি (ATP) সংশ্লেষে ব্যবহার করে! কোষের লিপিড পর্দা ও প্রোটিন পাম্প বিবর্তিত হওয়ার আগে আদিম জীবন খোদ **পৃথিবীর ভূতাত্ত্বিক ব্যাটারিকে** নিজের শক্তিসূত্র হিসেবে ব্যবহার করেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



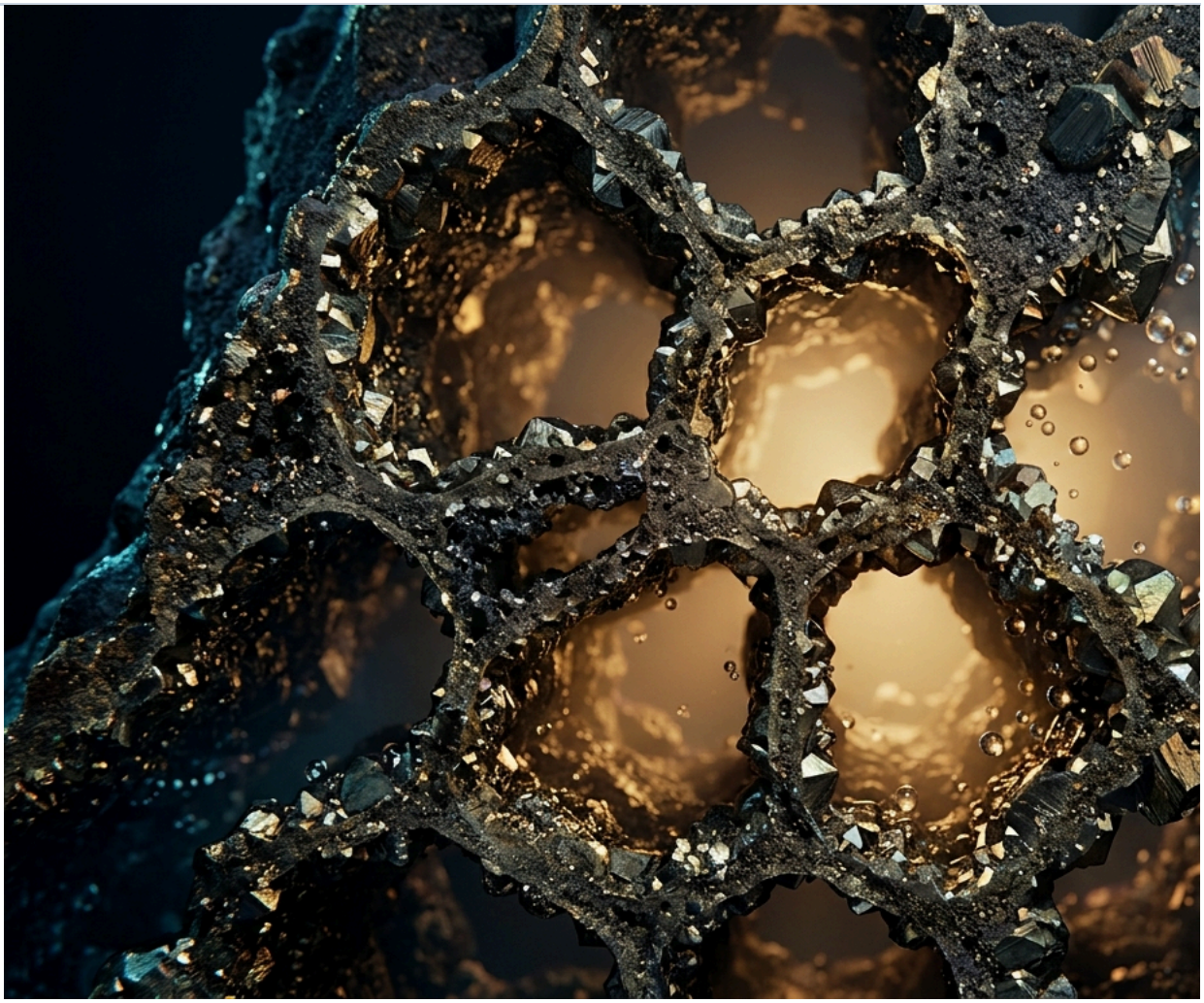
চিত্র ১০.২: আদিম উড-জুংডাল পথ এবং খনিজ অনুঘটন (Wood-Ljungdahl Pathway & Mineral Catalysis)। কার্বন স্থিতিকরণের সবচেয়ে প্রাচীন জৈবিক পথটির কোনো বাহ্যিক শক্তি খরচের প্রয়োজন হয় না; এটি স্বতঃস্ফূর্তভাবে শক্তি নির্গমনকারী ($\Delta G^{\circ\prime} \approx -৫৮.৭$ কিলোজুল/মোল)। গ্রেগাইট (Fe_3S_4) ও ম্যাকিনাউইট (FeS) পাতের উপস্থিতিতে ৬-ইলেকট্রন মিথাইল শাখা CO_2-কে বিজারিত করে মিথাইল-FeS তৈরি করত, আর আওয়ারুইট (Ni_3Fe) ২-ইলেকট্রন কার্বনিল শাখায় CO_2-কে কমিয়ে CO-Ni গঠন করত। এই দুইয়ের ঘনীভবনে তৈরি হতো উচ্চ-শক্তিসম্পন্ন অ্যাসিটাইল থায়োএস্টার (CH_3-CO-SR), যা জৈবিক এটিপির (ATP) প্রত্যক্ষ আদিম পূর্বসূরি।

প্রাচীন রাসায়নিক ইঞ্জিন: উড-জুংডাল পথ

অজৈব কার্বন ডাই-অক্সাইড কীভাবে প্রথম জৈব অণুতে রূপান্তরিত হলো? জীববিজ্ঞানের সবচেয়ে প্রাচীন বিপাকীয় পথ হলো **উড-জুংডাল (অ্যাসিটাইল-CoA) পথ**। এটি প্রাচীন আর্কিয়া ও ব্যাকটেরিয়া উভয়ের মধ্যেই বিদ্যমান একমাত্র কার্বন-স্থিতিকরণ পথ, যা শক্তি খরচের বদলে উল্টো শক্তি নির্গমন করে:

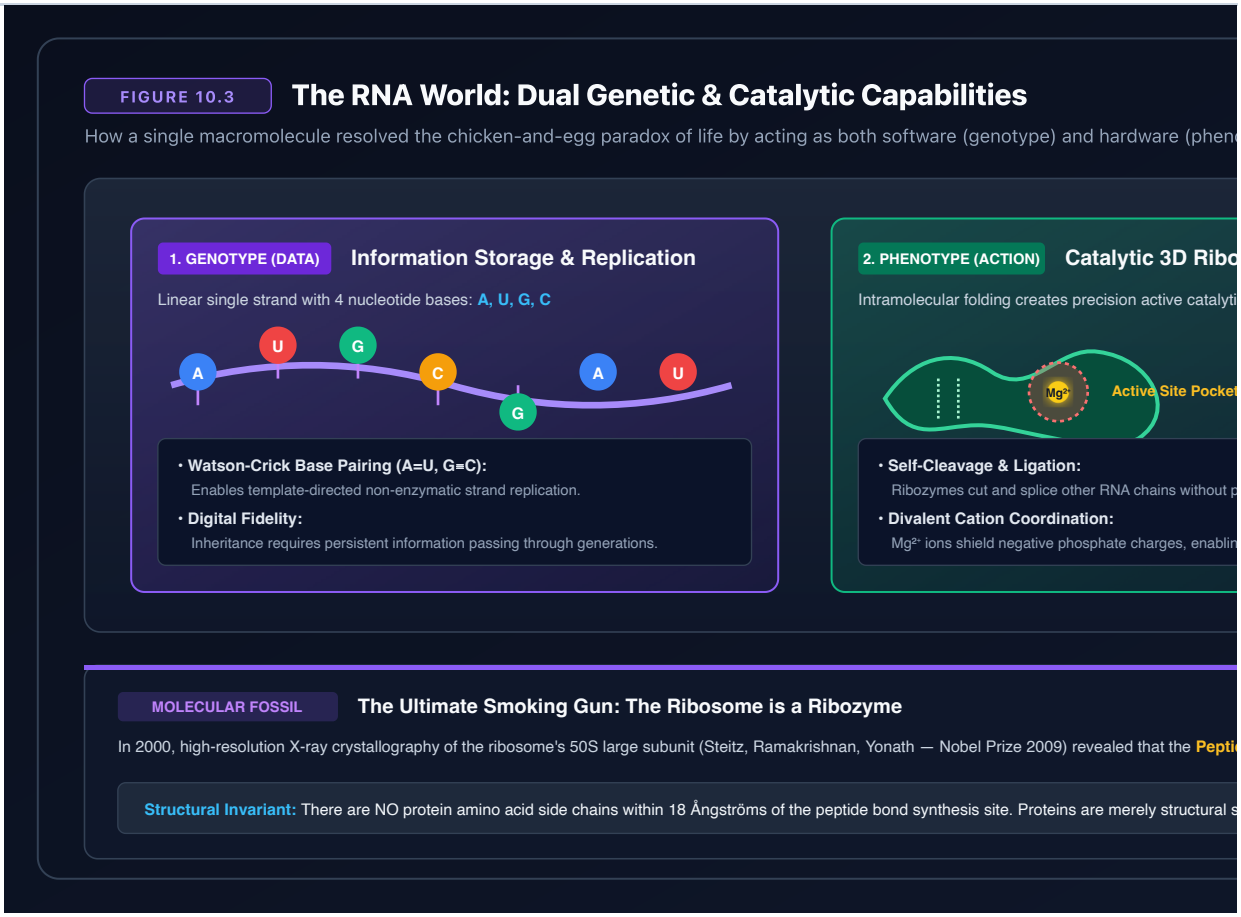
$$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \to \text{ফরমেট} / \text{অ্যাসিটেট} + \text{H}_2\text{O} \quad (\Delta G^\circ < 0)$$

ভেন্টের সূক্ষ্ম প্রকোষ্ঠের ভেতরে অনুঘটক আয়রন-সালফার খনিজগুলো (FeS ও NiS) আধুনিক এনজাইমের অজৈব পূর্বসূরি হিসেবে কাজ করত। খনিজ প্রাচীরের মধ্য দিয়ে প্রবাহিত প্রাকৃতিক প্রোটন গ্রেডিয়েন্টের শক্তিতে হাইড্রোজেন সরাসরি দ্রবীভূত CO_2-কে বিজারিত করে **ফরমেট, অ্যাসিটেট, পাইরুভেট এবং অ্যাসিটাইল-থায়োএস্টার** তৈরি করত—যা প্রাণরসায়নের মৌলিক ভিত্তিপ্রস্তর।



অণুবীক্ষণিক ভূ-রসায়ন: অনুঘটক আয়রন-সালফার খনিজ প্রকোষ্ঠ (~৪.০ বিলিয়ন বছর পূর্বে)। ক্ষারীয় ভেন্টের অভ্যন্তরীণ প্রাচীরের এই অণুবীক্ষণিক প্রস্থচ্ছেদে দেখা যায় গ্রেইগাইট (Fe_3S_4) ও ম্যাকিনাওয়াইট (FeS) খনিজে ঘেরা ক্ষুদ্রাতিক্ষুদ্র প্রকোষ্ঠের জাল। এই প্রাকৃতিক খনিজ কোষগুলো পৃথিবীর প্রথম অনুঘটক হিসেবে কাজ করে কাঠের ন্যায় জটিল প্রাচীর ভেদ করা প্রোটন শক্তির সাহায্যে কার্বন ডাই-অক্সাইডকে জৈব কাঠামোতে রূপান্তরিত করেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১০.৩: আরএনএ জগৎ: দ্বৈত জিনগত তথ্য সংরক্ষণ ও অনুঘটন সামর্থ্য। তথ্য সংরক্ষণ (রৈখিক ওয়াটসন-ক্রিক অনুক্রম A, U, G, C) এবং রাসায়নিক বিক্রিয়া পরিচালনা (Mg^{2+} আয়ন দ্বারা স্থিতিশীল ত্রিমাত্রিক রাইবোজাইম ভাঁজ)—উভয় ভূমিকাই একসাথে পালন করে আরএনএ আণবিক জীববিজ্ঞানের আদিম ধাঁধা সমাধান করেছিল। প্রতিটি আধুনিক জীবকোষের ভেতরে এর চূড়ান্ত প্রমাণ বিদ্যমান: প্রোটিন তৈরির কারখানা রাইবোসোমের অনুঘটন কেন্দ্রটি (PTC) ১০০% রাইবোসোমাল আরএনএ (23S rRNA) দ্বারা গঠিত, যার ১৮ অ্যাংস্ট্রম ব্যাসার্ধের মধ্যে কোনো প্রোটিন অ্যামিনো অ্যাসিডের অস্তিত্ব নেই।

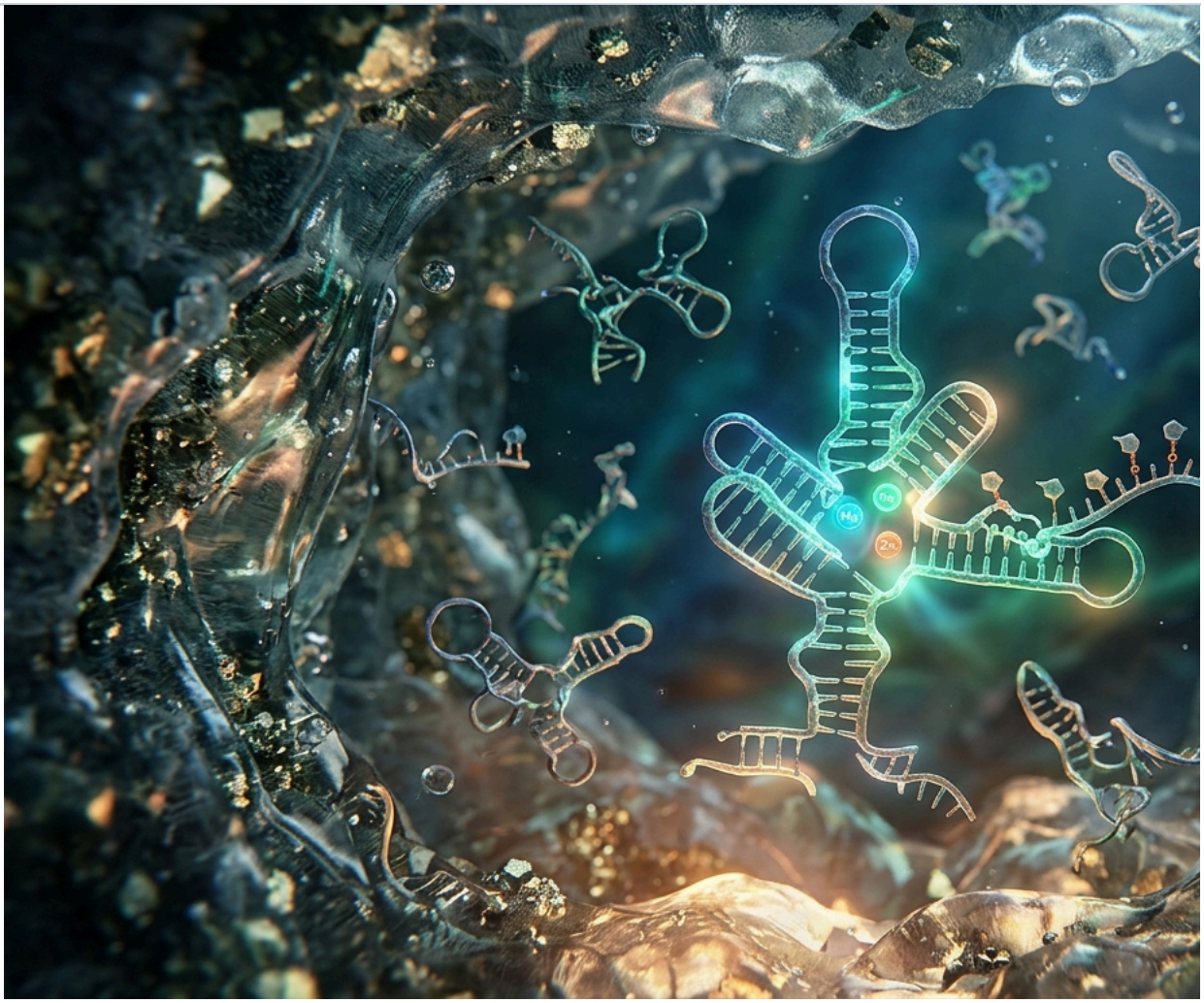
আরএনএ জগৎ: আণবিক মুরগি-না-ডিম ধাঁধার সমাধান

আধুনিক জীববিজ্ঞানে জীবন দুটি ভিন্ন ম্যাক্রোমলিকিউলের কঠোর শ্রমবিভাজনের মাধ্যমে পরিচালিত হয়:

- **ডিএনএ (DNA – নকশা):** উচ্চ রাসায়নিক স্থায়িত্বের কারণে জিনগত কোড নিরাপদে সঞ্চয় করে, কিন্তু এটি রাসায়নিকভাবে নিষ্ক্রিয় এবং কোনো বিক্রিয়া অনুঘটন বা নিজস্ব প্রতিলিপি তৈরি করতে পারে না।
- **প্রোটিন (Protein – কর্মী):** জটিল ত্রিমাত্রিক এনজাইমে ভাঁজ হয়ে সকল অনুঘটন ও বিপাক পরিচালনা করে, কিন্তু বংশগত ডিজিটাল তথ্য সংরক্ষণ বা সঞ্চালন করতে পারে না।

ডিএনএ প্রতিলিপন করতে প্রোটিন প্রয়োজন; আবার প্রোটিনের অ্যামিনো অ্যাসিডের ক্রম নির্ধারণে ডিএনএ প্রয়োজন। অপরটির অনুপস্থিতিতে কীভাবে এদের কোনো একটির সূচনা হতে পারে?

রাইবোজাইমের আবিষ্কার (Cech & Altman 1982)
১৯৮০-এর দশকে টমাস চেক এবং সিডনি অল্টম্যান আবিষ্কার করেন যে **রাইবোনিউক্লিক অ্যাসিড (RNA)** একই সাথে উভয় দায়িত্ব পালন করতে পারে! চারটি ক্ষারের (অ্যাডিনিন, সাইটোসিন, গুয়ানিন, ইউরাসিল) মাধ্যমে জিনগত তথ্য সংরক্ষণের পাশাপাশি একক-সূত্রী আরএনএ জটিল ত্রিমাত্রিক ভাঁজে সজ্জিত হয়ে এনজাইমের মতো বিক্রিয়া পরিচালনা করতে পারে, যাদের বলা হয় **রাইবোজাইম (Ribozymes)**।

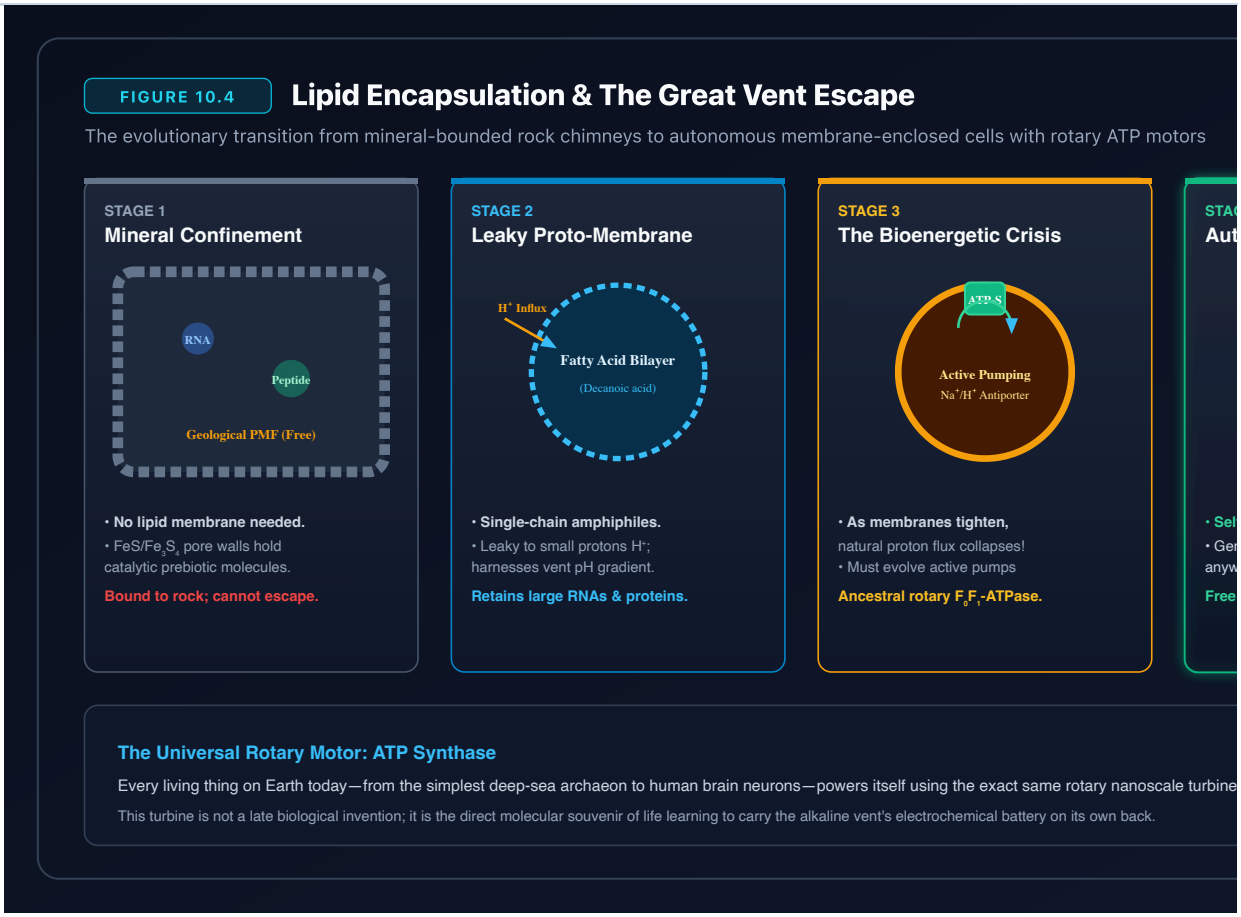


প্রাক-জৈব আণবিক জীববিজ্ঞান: খনিজ প্রকোষ্ঠে আরএনএ জগৎ (RNA World) (~৩.৯ বিলিয়ন বছর পূর্বে)। আণবিক মুরগি-না-ডিম ধাঁধার সমাধান করে রাইবোনিউক্লিক অ্যাসিড (RNA) একই সাথে বংশগতির তথ্য ধারক এবং অনুঘটক এনজাইম (রাইবোজাইম) হিসেবে আত্মপ্রকাশ করে। ম্যাগনেসিয়াম আয়নগুলির উপস্থিতিতে ভাঁজ হওয়া এই আরএনএ পলিমারগুলো নিউক্লিওটাইড জোড়া লাগিয়ে স্ব-প্রতিলিপন শুরু করে, যা ডারউইনীয় প্রাকৃতিক নির্বাচনের দ্বার উন্মুক্ত করে।

এই বিবর্তনীয় রূপান্তরের অকাট্য প্রমাণ ধরা পড়ে যখন বিজ্ঞানীরা জীবকোষের প্রোটিন তৈরির আণবিক কারখানা **রাইবোসোমের** পারমাণবিক গঠন উন্মোচন করেন: যে সক্রিয় কেন্দ্রে অ্যামিনো অ্যাসিডগুলো যুক্ত হয়ে প্রোটিন শৃঙ্খল তৈরি করে (পেপটাইডিল ট্রান্সফারেজ সেন্টার), তা **শতভাগ রাইবোসোমাল আরএনএ দ্বারা গঠিত, সেখানে কোনো প্রোটিন এনজাইম নেই!** প্রোটিন মূলত প্রাচীন অনুঘটনশীল আরএনএ-রই সৃষ্টি।

আরএনএ জগৎ (RNA World) পর্বে ($t \approx 4.0$ থেকে ৩.৮ বিলিয়ন বছর পূর্বে) স্বতঃস্ফূর্তভাবে গঠিত নিউক্লিওটাইডগুলো থার্মোফোরিসিসের (তাপীয় পরিচলন স্রোত) মাধ্যমে হাইড্রোথার্মাল মাইক্রো-প্রকোষ্ঠে উচ্চ ঘনত্বে পুঞ্জীভূত হতে থাকে। লক্ষ লক্ষ বছরের তাপমাত্রা ও আর্দ্রতার চক্রে আরএনএ পলিমার দীর্ঘতর হয়, রাইবোজাইমে ভাঁজ হয়ে ওঠে এবং নিজস্ব টেমপ্লেট থেকে প্রতিলিপি তৈরির দক্ষতা অর্জন করে।

Shakil Mahmud • Research Monograph

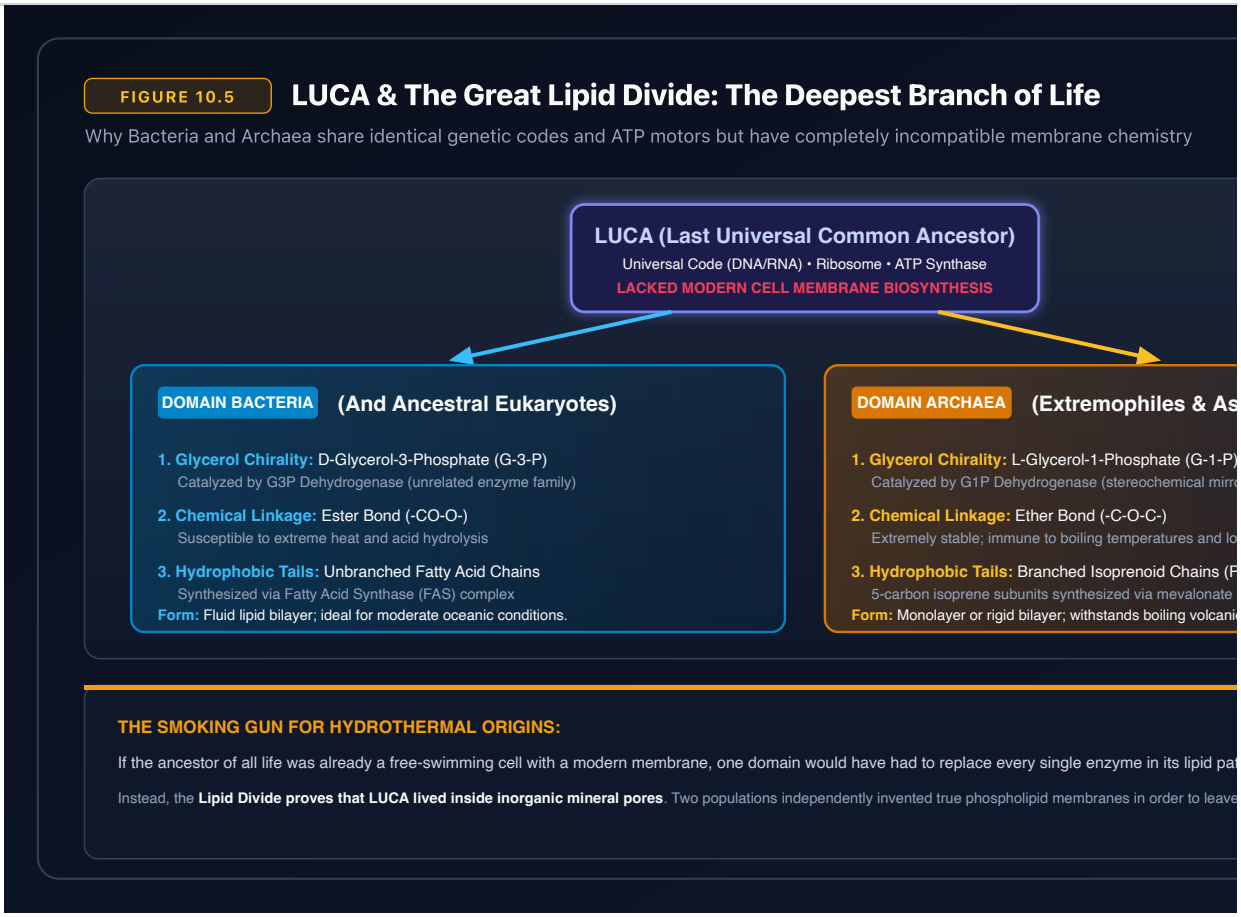


চিত্র ১০.৪: লিপিড ক্যাপসুলেশন এবং মুক্ত কোষের অভিপ্রয়াণ (The Cellular Exodus)। খনিজ শিলার আবদ্ধ কুঠুরি থেকে স্বাধীন মুক্ত কোষে রূপান্তর ছিল জৈব-শক্তির এক বিশাল বিপ্লব। আদিম ফ্যাটি অ্যাসিডের ভেসিকেলগুলো ছিল কিছুটা ছিদ্রযুক্ত, যা ভূতাত্ত্বিক প্রোটন ভেতরে প্রবেশ করতে দিত। কিন্তু জিনগত ম্যাক্রোমলিকিউল ধরে রাখতে ফসফোলিপিড ঝিল্লি যখন অভেদ্য হয়ে উঠল, তখন কোষকে নিজের ভেতর সক্রিয় প্রোটন পাম্প ($\mathrm{FoF_1}$ রোটারি এটিপি সিন্থেজ) বিবর্তন করতে হলো। নিজস্ব বহনযোগ্য আয়ন-গ্রেডিয়েন্ট ইঞ্জিন অর্জনের পরই কোষ চিমনি থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে মুক্ত মহাসাগরে ছড়িয়ে পড়ে।

কোষীয় প্রস্থান: খনিজ খাঁচা থেকে মুক্তি

অজৈব খনিজ কুঠুরির ভেতরে যখন অনুঘটনশীল আরএনএ ও বিপাকীয় বিক্রিয়া বিকশিত হচ্ছিল, তখন সমান্তরালভাবে আরেকটি ভৌত প্রক্রিয়া চলছিল: **লিপিডের স্বতঃস্ফূর্ত সমাবেশ**। সরল একক-শৃঙ্খল ফ্যাটি অ্যাসিড পানিতে নিমজ্জিত হলে স্বতঃস্ফূর্তভাবে একত্রিত হয়ে স্থিতিশীল আণুবীক্ষণিক **দ্বি-স্তরী ভেসিকেল (লাইপোজোম)** গঠন করে।

কালক্রমে স্ব-প্রতিলিপনশীল আরএনএ ও পেপটাইড জালিকা এই লিপিড গোলকের ভেতরে আবদ্ধ হয়ে পড়ে। চিমনির ভূতাত্ত্বিক প্রোটন গ্রেডিয়েন্টের ওপর নির্ভরতা থেকে মুক্তি পেতে এই আদিম প্রোটো-কোষগুলো নিজেদের ঝিল্লিতে প্রোটন পাম্প ($\mathrm{F_1F_0}$-ATP সিন্থেজের পূর্বসূরি) বিবর্তিত করে। যখন একটি প্রোটো-কোষ নিজস্ব ঝিল্লির দুই পাশে আয়ন গ্রেডিয়েন্ট বজায় রাখার সক্ষমতা অর্জন করল, **সে তখন মুক্ত হলো**। খনিজ চিমনি থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে জীবকোষ ভেসে চলল মুক্ত মহাসাগরের বুকে।



চিত্র ১০.৫: লুকা (LUCA) এবং দ্বিধাবিভক্ত জীবনের মহা লিপিড বিভাজন (The Great Lipid Divide)। ব্যাকটেরিয়া এবং আর্কিয়া উভয়ই অভিন্ন জেনেটিক কোড এবং রোটারি এটিপি সিন্থেজ ব্যবহার করলেও তাদের কোষঝিল্লির রসায়ন সম্পূর্ণ ভিন্ন ও রাসায়নিকভাবে অসঙ্গতিপূর্ণ। ব্যাকটেরিয়া ডি-গ্লিসারলের সাথে এস্টার বন্ধনে সরল ফ্যাটি অ্যাসিড জোড়া দেয়; আর্কিয়া এল-গ্লিসারলের সাথে ইথার বন্ধনে শাখাযুক্ত আইসোপ্রিনয়েড যুক্ত করে। এই মৌলিক বৈসাদৃশ্য প্রমাণ করে আধুনিক কোষঝিল্লি উদ্ভাবনের পূর্বেই লুকা অজৈব খনিজ প্রাচীরের ভেতরে বাস করত এবং সেখান থেকে স্বাধীনভাবে দুটি পৃথক ধারায় মুক্ত কোষের উৎপত্তি ঘটে।

লুকা (LUCA): পৃথিবীর সকল প্রাণের আদিমতম সাধারণ পূর্বপুরুষ

আজ পৃথিবীর বুকে যে কোনো প্রাণী, বৃক্ষ, অণুজীব কিংবা মানুষ—অন্ত্রের ব্যাকটিরিয়া *E. coli* থেকে শুরু করে নীল তিমি বা একজন গবেষক—সবারই অবিচ্ছিন্ন বংশানুক্রমিক ধারা গিয়ে মেলে একটি একক আদিম এককোষী জনসংখ্যার কাছে: **লুকা (LUCA – Last Universal Common Ancestor)**, যার অস্তিত্ব ছিল প্রায় **৩.৮ থেকে ৪.০ বিলিয়ন বছর পূর্বে**।

২০১৬ সালে উইলিয়াম মার্টিনের নেতৃত্বাধীন গবেষক দল ৬.১ মিলিয়নেরও বেশি প্রোক্যারিয়ট জিন বিশ্লেষণ করে **৩৫৫টি সার্বজনীন জিন পরিবার** শনাক্ত করেন যা প্রাচীন ব্যাকটেরিয়া ও আর্কিয়া উভয়ের মধ্যেই সংরক্ষিত। এই জিনগুলো থেকে লুকার স্পষ্ট রূপরেখা উন্মোচিত হয়:

- **আবাসস্থল:** চরম অবাত (anaerobe), যা H_2, CO_2 ও লৌহ সমৃদ্ধ উষ্ণ, অন্ধকার গভীর সমুদ্রের হাইড্রোথার্মাল পরিবেশে বাস করত।
- **বিপাক:** স্বভোজী (autotrophic), যা ট্রানজিশন ধাতব ক্লাস্টার ($[Fe_4S_4]$ এবং $[NiFeS]$) ব্যবহার করে উড-জুংডাল পথে সরাসরি অজৈব কার্বন স্থিতিকরণ করত।
- **জিনগত যন্ত্রপাতি:** একটি সার্বজনীন জেনেটিক কোড, ডিএনএ জিনোম, মেসেঞ্জার আরএনএ প্রতিলিপন এবং ২০টি অ্যামিনো অ্যাসিড ব্যবহারের উপযোগী আধুনিক রাইবোসোম।

প্রিবায়োটিক ভূ-রসায়ন বনাম সার্বজনীন জীবকোষের স্থাপত্য

জৈবরাসায়নিক বৈশিষ্ট্য	হাইড্রোথার্মাল ভেন্টের প্রিবায়োটিক উৎস	আধুনিক কোষীয় প্রয়োগ (লুকা ও উত্তরসূরি)
প্রকোষ্ঠায়ন (Compartmentalization)	ছিদ্রযুক্ত আয়রন-সালফার / কার্বনেট খনিজ চিমনি	পরিবহন প্রোটিন খচিত লিপিড বাইলেয়ার কোষঝিল্লি
শক্তির চালিকাশক্তি (Driving Force)	প্রাকৃতিক ভূতাত্ত্বিক ΔpH গ্রেডিয়েন্ট (৯ → ৬)	কেমিওসমোটিক প্রোটন-চালিকা শক্তি চালিত F_1F_0-ATP সিন্থেজ
কার্বন স্থিতিকরণ (Carbon Fixation)	অজৈব সার্পেনটিনাইজেশন ও FeS অনুঘটন	উড-জুংডাল (অ্যাসিটাইল-CoA) বিপাকীয় পথ
অনুঘটন যন্ত্রপাতি (Catalysis)	গ্রেগাইট ($[Fe_4S_4]$) ও ম্যাকিনাউইট খনিজ	ফেরোডক্সিন, হাইড্রোজিনেজ এবং মেটালোএনজাইম কো-ফ্যাক্টর
তথ্য সংরক্ষণ (Information Storage)	স্ব-প্রতিলিপনশীল অনুঘটনশীল রাইবোজাইম (RNA World)	দ্বি-সূত্রী ডিএনএ জিনোম ও আরএনএ মধ্যস্থতাকারী
প্রোটিন সংশ্লেষণ (Protein Synthesis)	আরএনএ টেমপ্লেটে ঘটিত পেপটাইড বন্ধন	সার্বজনীন 70S/80S রাইবোসোম (১০০% আরএনএ অনুঘটন কেন্দ্র)

Shakil Mahmud • Research Monograph

মহা বিভাজন: ব্যাকটেরিয়া এবং আর্কিয়া

ভেন্ট চিমনি থেকে মুক্ত হওয়ার পরপরই লুকা দুটি প্রাথমিক জীবে বিভক্ত হয়ে পড়ে: **ব্যাকটেরিয়া (Bacteria)** এবং **আর্কিয়া (Archaea)**। মজার বিষয় হলো, তারা অভিন্ন জেনেটিক কোড ও রাইবোসোম ব্যবহার করলেও তাদের কোষঝিল্লির লিপিড সম্পূর্ণ ভিন্ন:

- **ব্যাকটেরিয়ার লিপিড:** ডি-গ্লিসারলের সাথে *এস্টার* বন্ধনে আবদ্ধ সরল ফ্যাটি অ্যাসিড শৃঙ্খল।
- **আর্কিয়ার লিপিড:** এল-গ্লিসারলের সাথে *ইথার* বন্ধনে আবদ্ধ শাখাযুক্ত আইসোপ্রিনয়েড হাইড্রোকার্বন শৃঙ্খল—যা বিপুল কাঠামোগত দৃঢ়তা প্রদান করে এবং আর্কিয়াকে চরম বৈরী পরিবেশে (অতি-লবণাক্ত জল, ফুটন্ত অম্লীয় প্রস্রবণ এবং মাটির গভীর ভূত্বক) বিজয়ী করেছে।

পরবর্তী এক বিলিয়ন বছর ধরে ব্যাকটেরিয়া ও আর্কিয়া ছিল পৃথিবীর অবিসংবাদিত অধিপতি। তারা আলোহীন মহাসমুদ্রের প্রতিটি প্রান্তে হাইড্রোজেন, সালফার, লোহা ও মিথেন বিপাক করে টিকে ছিল। কিন্তু সাগরের রৌদ্রোজ্জ্বল উপরিভাগে কিছু সালোকসংশ্লেষী ব্যাকটেরিয়া নিঃশব্দে এক যুগান্তকারী রাসায়নিক উদ্ভাবনের প্রস্তুতি নিচ্ছিল, যা সমগ্র গ্রহের ভূতত্ত্বকে চিরতরে ওলটপালট করে দেবে: **অক্সিজেনভিত্তিক সালোকসংশ্লেষণ**।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত-এর **পর্ব ১১**-তে আমরা প্রত্যক্ষ করব পৃথিবীর ইতিহাসের সবচেয়ে প্রলয়ঙ্কর ও অলৌকিক রূপান্তর: **অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া, মহা-অক্সিডেশন ঘটনা এবং হুরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবী**।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

- **Miller, S. L. (1953).** “A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions.” *Science*, 117(3046), 528–529. doi:10.1126/science.117.3046.528.
- **Russell, M. J., & Hall, A. J. (1997).** “The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front.” *Journal of the Geological Society*, 154(3), 377–402. doi:10.1144/gsjgs.154.3.0377.
- **Martin, W., & Russell, M. J. (2003).** “On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes.” *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 358(1429), 59–85. doi:10.1098/rstb.2002.1183.
- **Lane, N., Allen, J. F., & Martin, W. (2010).** “How energy flow shaped the evolution of life.” *Nature*, 467, 929–936. doi:10.1038/nature09486.
- **Gilbert, W. (1986).** “Origin of life: The RNA world.” *Nature*, 319, 618. doi:10.1038/319618a0.
- **Cech, T. R. (1986).** “A model for the RNA-catalyzed replication of RNA.” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 83(12), 4360–4363. doi:10.1073/pnas.83.12.4360.
- **Weiss, M. C., et al. (2016).** “The physiology and habitat of the last universal common ancestor.” *Nature Microbiology*, 1, 16116. doi:10.1038/nmicrobiol.2016.116.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "অ্যাবায়োজেনেসিসের স্ফুলিঙ্গ — ক্ষারীয় হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট, প্রিবায়োটিক রসায়ন এবং আরএনএ জগৎ"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১০। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-10-the-spark-of-abiogenesis-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • একাদশ খণ্ড

অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও মহা-অক্সিডেশন ঘটনা

অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও মহা-অক্সিডেশন ঘটনা

2,084 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১১: *চিত্র: প্যালিওপ্রোটেরোজোয়িক অগভীর সাগরে সায়ানোব্যাকটেরিয়া স্ট্রোমাটোলাইট স্তর (~২.৪ বিলিয়ন বছর আগে); এদের সালোকসংশ্লেষণে নির্গত অক্সিজেন সমুদ্রের লোহা জারিত করে বিআইএফ সৃষ্টি করে এবং ইউরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবীর জন্ম দেয়।*

প্রায় ২.৪ বিলিয়ন বছর পূর্বে, একটি ক্ষুদ্র সালোকসংশ্লেষী জীবাণু গ্রহের ইতিহাসের সবচেয়ে ভয়াবহ পরিবেশগত বিপর্যয় এবং সবচেয়ে বিস্ময়কর বিবর্তনীয় অলৌকিক ঘটনাটি একযোগে ঘটিয়েছিল। পানির অণু ভেঙে ফেলার মতো এক আণুবীক্ষণিক জৈবরাসায়নিক ন্যানো-যন্ত্রপাতি উদ্ভাবন করে সায়ানোব্যাকটেরিয়া এমন এক পৃথিবীতে মুক্ত দ্বি-পরমাণুক অক্সিজেন নির্গমন শুরু করল যা কেবল অক্সিজেনহীন শান্ত পরিবেশের সাথেই পরিচিত ছিল। এই ক্ষয়কারী গ্যাসটি সমুদ্রের দ্রবীভূত শত শত কোটি টন লোহাকে সমুদ্রের তলদেশে মরিচা হিসেবে ফেলে দিল, প্রভাবশালী অবাত অণুজীব বিশ্বকে নিশ্চিহ্ন করল, পৃথিবীর মিথেন গ্রিনহাউস চাদর ধ্বংস করে ৩০০ মিলিয়ন বছরের এক বৈশ্বিক বরফযুগ ডেকে আনল—এবং একই সাথে জটিল বহুকোষী জীবনের জন্য প্রয়োজনীয় তাপগতিবিদ্যার রাজকীয় ভিত্তিপ্রস্তর স্থাপন করল।

অক্সিজেনহীন পৃথিবী: লোহা, মিথেন ও সালফারের স্বর্গরাজ্য

পৃথিবীর অস্তিত্বের প্রথম অর্ধাংশে—পুরো আর্কিয়ান যুগ জুড়ে (৪.০ থেকে ২.৫ বিলিয়ন বছর পূর্বে)—বায়ুমণ্ডলে মুক্ত অক্সিজেন গ্যাসের কোনো অস্তিত্ব ছিল না ($\text{O}_2 < 10^{-5}$ বর্তমান স্তর বা PAL)। এই অবাত পরিবেশে সমগ্র মহাসাগর জুড়ে রাজত্ব করত অবাত প্রোক্যারিয়টরা:

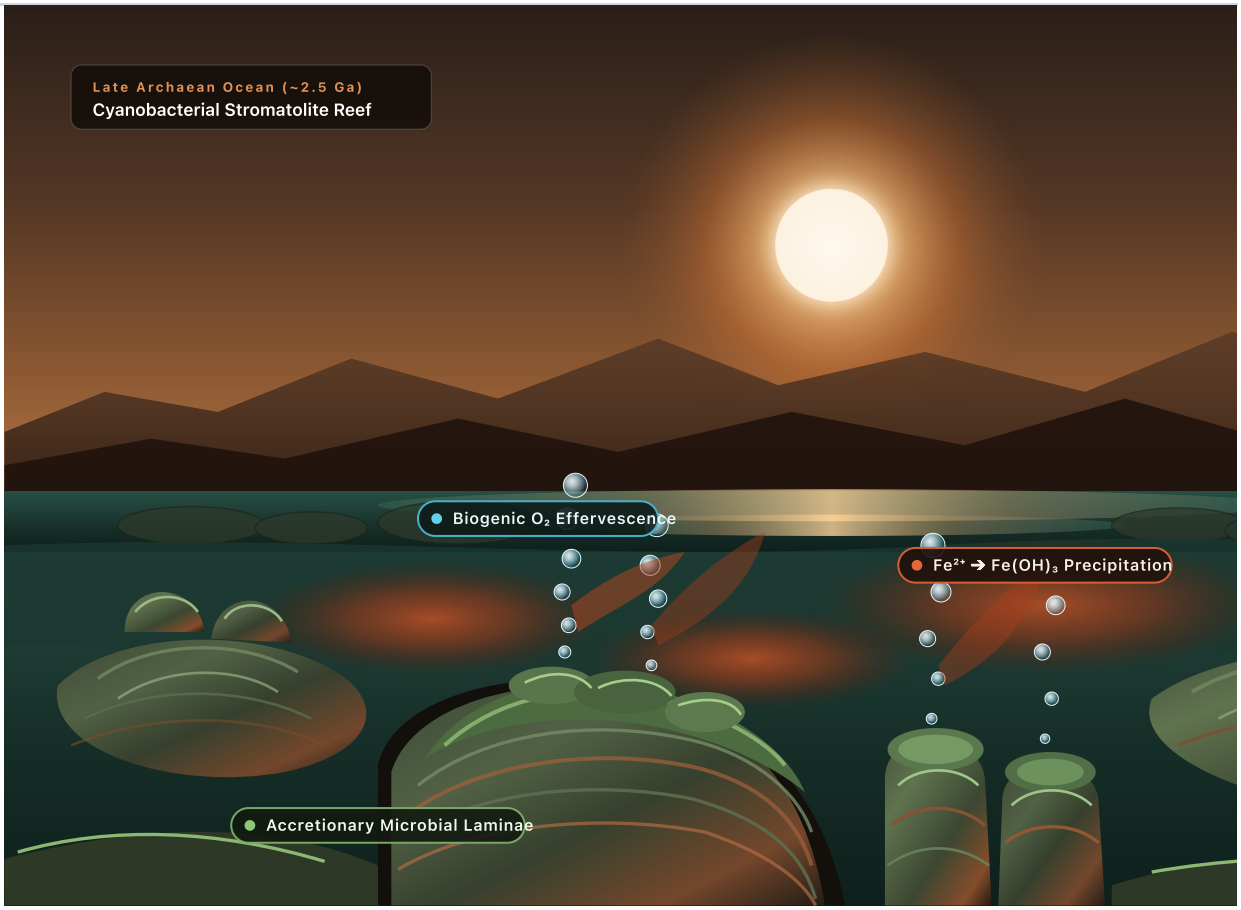
- **মিথেনোজেন (আর্কিয়া):** আগ্নেয়গিরির কার্বন ডাই-অক্সাইডকে হাইড্রোজেনের সাথে বিজারিত করে মিথেন তৈরি করত ($CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$), যা আকাশকে এক উষ্ণ কুয়াশাচ্ছন্ন গ্রিনহাউস চাদরে ঢেকে তরুণ ক্ষীণ সূর্যের নিচেও পৃথিবীকে উষ্ণ রাখত।
- **সালফেট বিজারক ও গাঁজনকারী (ব্যাকটেরিয়া):** সূর্যালোকহীন সাগরের গভীরে জৈব বর্জ্য পুনর্ব্যবহার করে হাইড্রোজেন সালফাইড (H_2S) ও জৈব অ্যাসিড তৈরি করত।
- **অক্সিজেনহীন সালোকসংশ্লেষী (Anoxygenic Phototrophs):** বেগুনি ও সবুজ সালফার ব্যাকটেরিয়া সূর্যের আলো ব্যবহার করত ঠিকই, কিন্তু তারা পানির অণুকে ইলেকট্রন দাতা হিসেবে ব্যবহার করত না। তারা নির্ভর করত দ্রবীভূত হাইড্রোজেন সালফাইড ($H_2S \rightarrow 2H^+ + S + 2e^-$) কিংবা দ্রবীভূত ফেরাস লোহার (Fe^{2+}) ওপর। লোহা ও সালফারের প্রস্রবণগুলো নির্দিষ্ট অঞ্চলে সীমাবদ্ধ থাকায় এই সালোকসংশ্লেষণ ছিল সীমিত পরিসরে বন্দি।

মাস্টার কি: পানির অণু ভাঙার চরম কৌশল

মহাসাগরের জলরাশি ছিল অফুরন্ত। কিন্তু পানি তার ইলেকট্রনগুলোকে প্রচণ্ড তাপগতিবিদ্যীয় শক্তি দিয়ে আঁকড়ে ধরে রাখে: O_2/H_2O অর্ধ-বিক্রিয়ার রেডক্স বিভব $+0.815$ ভোল্ট। পৃথিবীর কোনো জৈবিক এনজাইমের পক্ষেই অক্সিজেন পরমাণু থেকে ইলেকট্রন ছিনিয়ে নেওয়ার মতো তীব্র তড়িৎরাসায়নিক বিভব তৈরি করা সম্ভব ছিল না।

তারপর, আধুনিক **সায়ানোব্যাকটেরিয়ার** (নীলাভ সবুজ শৈবাল) পূর্বপুরুষদের দেহে এক অসাধারণ গাঠনিক মিউটেশন ঘটল: দুটি স্বতন্ত্র আলোকব্যবস্থা—ফটোসিস্টেম I এবং ফটোসিস্টেম II—যুক্ত হয়ে গঠিত হলো সালোকসংশ্লেষণের বিখ্যাত **জেড-স্কিম (Z-Scheme)**।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১১.উপ-১: অন্ত্য আর্কেয়ান সাগরে সায়ানোব্যাকটেরিয়াল স্ট্রোমাটোলাইট প্রাচীর (~২.৫ Ga)। মিথেনের কমলাটে কুয়াশাচ্ছন্ন আকাশ এবং সবুজ রঙের ফেরাস মহাসাগরের বুকে ফিলামেন্টাস সায়ানোব্যাকটেরিয়ার স্তরীভূত স্ট্রোমাটোলাইট টিলা থেকে মুক্ত হচ্ছে অক্সিজেনের (O_2) বুদ্বুদ। পানিতে দ্রবীভূত লোহার (Fe^{2+}) সাথে বায়োজেনিক অক্সিজেনের বিক্রিয়ায় অদ্রবণীয় লালচে-বাদামি ফেরিক হাইড্রোক্সাইডের অধঃক্ষেপ সৃষ্টি হয়ে সমুদ্রতলে জমা হচ্ছে।

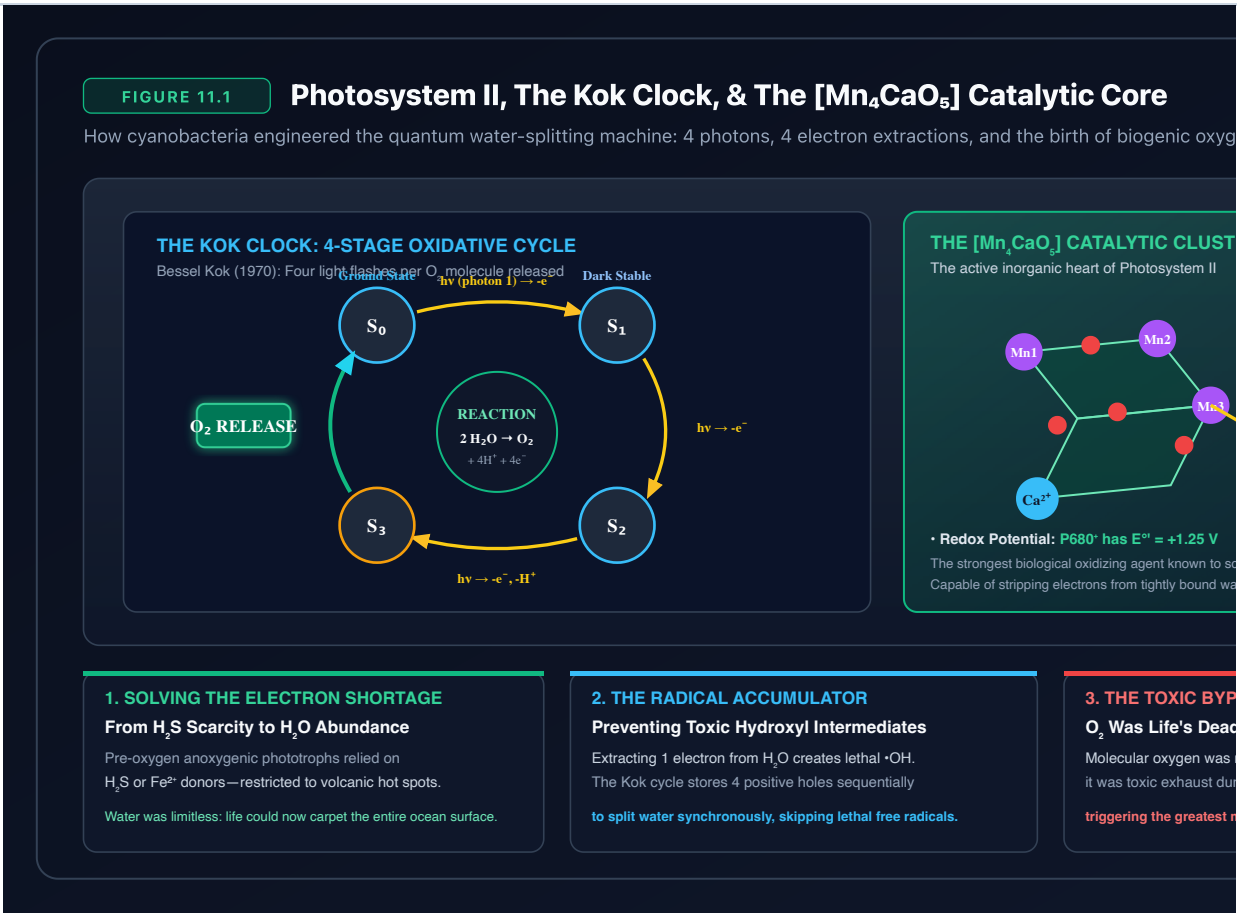
ম্যাঙ্গানিজ-ক্যালসিয়াম অনুঘটন কোর (The $[Mn_4CaO_5]$ Cluster)

ফটোসিস্টেম II-এর প্রাণকেন্দ্রে অবস্থিত **অক্সিজেন-উৎপাদনকারী কমপ্লেক্স (OEC)**, যার মূলে রয়েছে চারটি ম্যাঙ্গানিজ, একটি ক্যালসিয়াম ও পাঁচটি অক্সিজেন পরমাণুর একটি অসমমিত অজৈব ক্লাস্টার (Mn_4CaO_5)। লাল সূর্যালোকের ফোটন শোষণ করে ($\lambda = ৬৮০\ \text{nm}$), ক্লোরোফিলের প্রতিক্রিয়া কেন্দ্র P680 জীবজগতের সবচেয়ে শক্তিশালী জারক সত্তায় রূপান্তরিত হয় ($E^\circ \approx +১.২৫\ \text{V}$)।

পরপর চারটি আলোর ঝলকানিতে (বেসেল কক ক্লক প্রক্রিয়া), এই ক্লাস্টারটি দুটি যুক্ত পানির অণু থেকে চারটি ইলেকট্রন ছিনিয়ে নেয়:

$$২\text{H}_2\text{O} + ৪h\nu \rightarrow \text{O}_2 + ৪\text{H}^+ + ৪e^-$$

প্রোটনগুলো (H^+) এটিপি সংশ্লেষে শক্তি জোগায়; ইলেকট্রনগুলো CO_2-কে বিজারিত করে শর্করা তৈরি করে; আর আণবিক অক্সিজেন (O_2) বর্জ্য পদার্থ হিসেবে সাগরে নিক্ষিপ্ত হয়!



চিত্র ১১.১: ফটোসিস্টেম II, বেসেল কক ক্লক (The Kok Clock) এবং [Mn_4CaO_5] অনুঘটন কোর। সায়ানোব্যাকটেরিয়া একটি ম্যাঙ্গানিজ-ক্যালসিয়াম কিউবেন ক্লাস্টারকে ([Mn_4CaO_5]) P680 প্রতিক্রিয়া কেন্দ্রের সাথে যুক্ত করে কোয়ান্টাম জৈব-প্রকৌশলের চরম শিখরে পৌঁছেছিল (যার জারণ বিভব $E^{o'}$ = +১.২৫ ভোল্ট)। ৫-ধাপের চক্রাকার ঘড়ির (S_0 থেকে S_4) মাধ্যমে এনজাইমটি ধারাবাহিকভাবে ৪টি সৌর ফোটন আহরণ করে এবং কোনো প্রাণঘাতী হাইড্রক্সিল ফ্রি-র‍্যাডিক্যাল তৈরি না করেই দুটি পানির অণু থেকে ৪টি ইলেকট্রন ও ৪টি প্রোটন টেনে বের করে আণবিক অক্সিজেন (O_2) নির্গমন করে।

মহাজাগতিক লৌহ সিঙ্ক: ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশন

সায়ানোব্যাকটেরিয়া রাতারাতি পৃথিবীর বাতাসে অক্সিজেন ভরিয়ে দিতে পারেনি। প্রায় ৪০ কোটি বছর ধরে (২.৮ থেকে ২.৪ বিলিয়ন বছর পূর্বে), স্ট্রোম্যাটোলাইট বা শৈবাল দলের নির্গত অক্সিজেন গ্রহের প্রাকৃতিক রাসায়নিক বাফারগুলো গ্রাস করে ফেলেছিল।

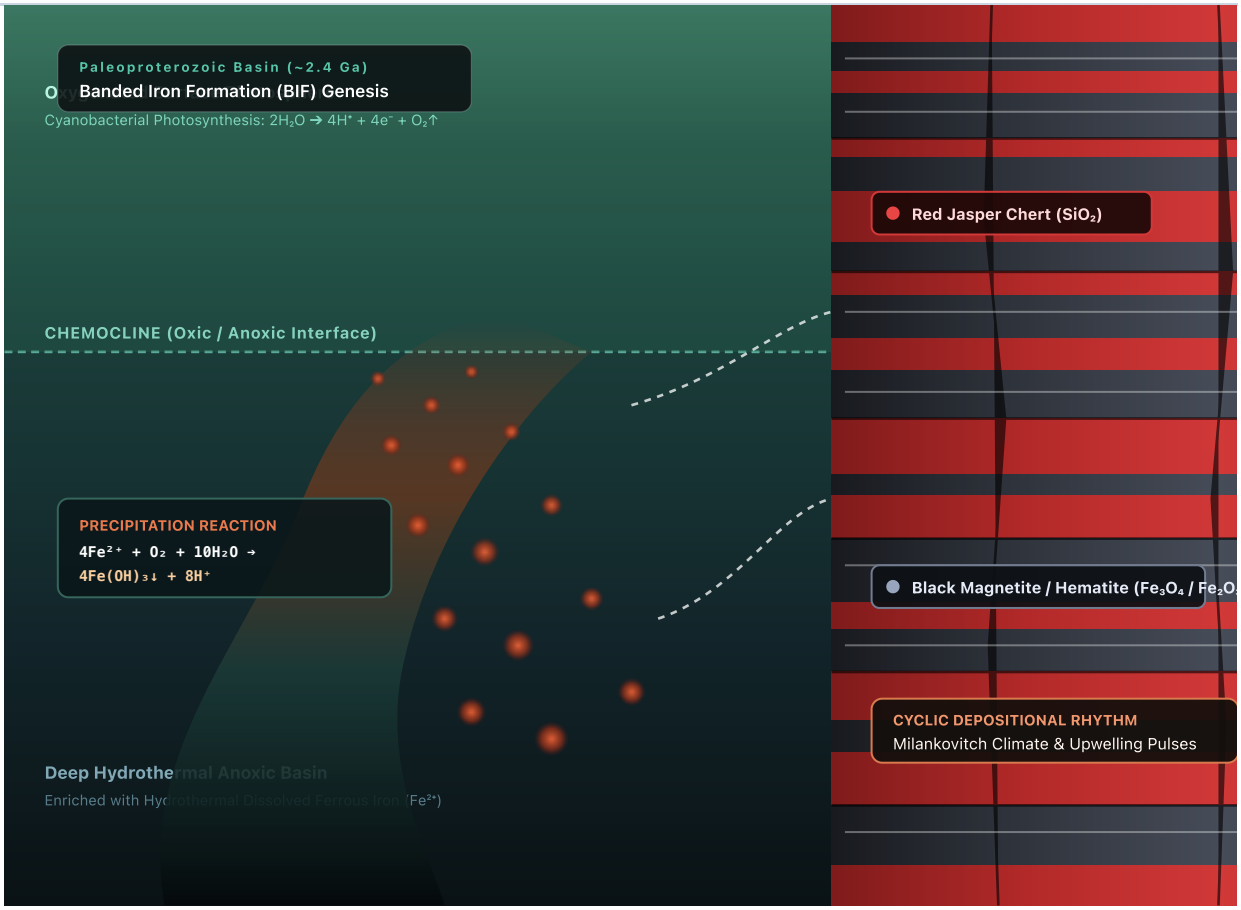
আর্কিয়ান মহাসাগরে আগ্নেয়গিরি থেকে নির্গত বিপুল পরিমাণ দ্রবণীয় **ফেরাস আয়রন (Fe^{2+})** দ্রবীভূত অবস্থায় মজুত ছিল। সায়ানোব্যাকটেরিয়ার অক্সিজেন নিঃসরণের সাথে সাথেই তা দ্রবীভূত লোহাকে অদ্রবণীয় **ফেরিক আয়রনে (Fe^{3+})** জারিত করত:

$$৪Fe^{2+} + O_2 + ১০H_2O \rightarrow ৪Fe(OH)_3 \downarrow + ৮H^+$$

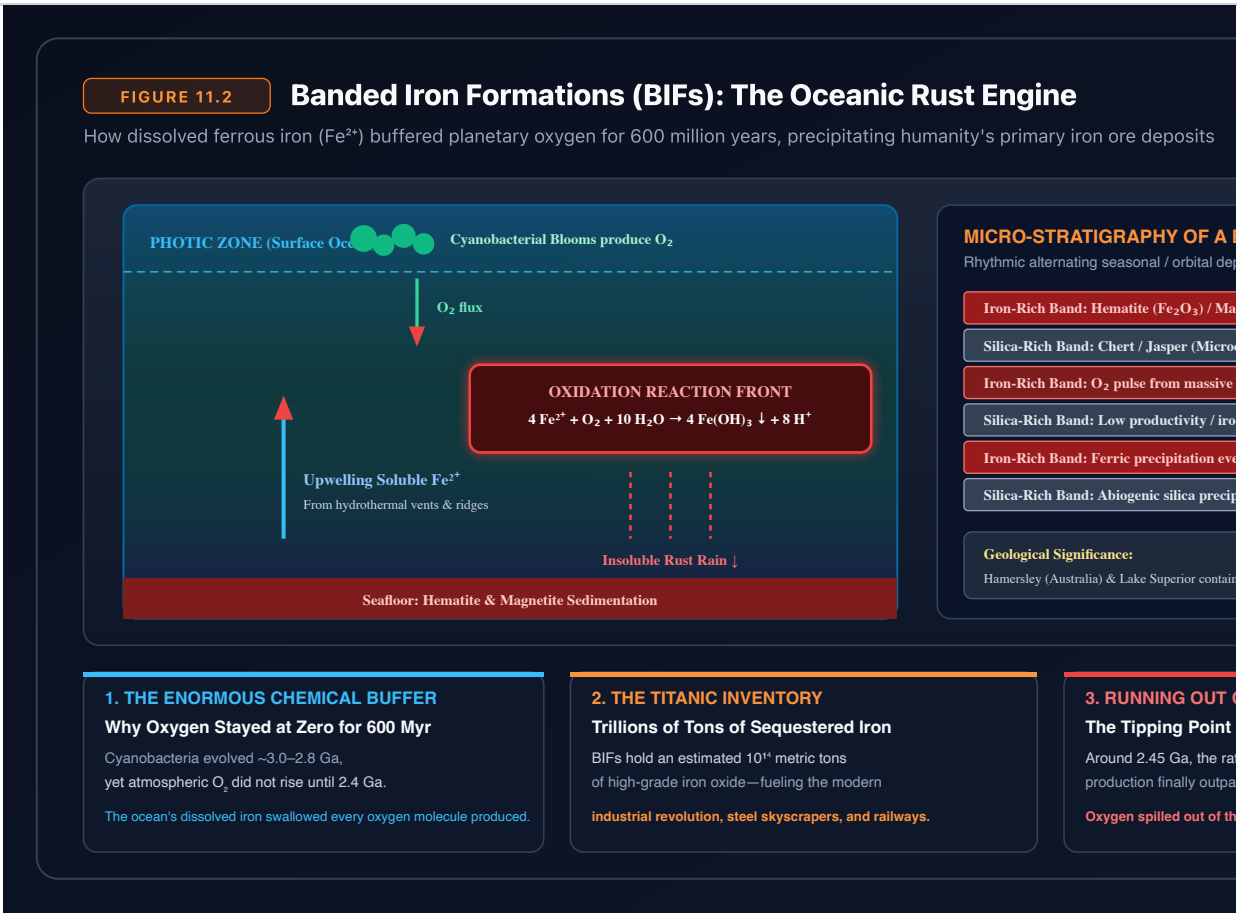
এই অধঃক্ষিপ্ত ফেরিক হাইড্রক্সাইড লাল মরিচার তুষারপাতের মতো সমুদ্রের অতল তলদেশে জমা হতো। ফলে সৃষ্টি হয় রুপালি-কালো আয়রন অক্সাইড (ম্যাগনেটাইট Fe_3O_4 ও হেমাটাইট Fe_2O_3) এবং লাল সিলিকার অল্টারনেটিং স্তর বিশিষ্ট **ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশন (BIFs)**।

পশ্চিম অস্ট্রেলিয়ার হ্যামার্সলি রেঞ্জ কিংবা ব্রাজিলের কারাজাসে বিস্তৃত এই স্তরগুলো ধারণ করে **পৃথিবীর খননযোগ্য মোট লৌহ আকরিকের ৯০ শতাংশের বেশি**। আজকের সভ্যতার বহুতল ভবন, ঝুলন্ত সেতু, কার্গো জাহাজ কিংবা রেললাইন—সবই আসলে প্রাচীন সায়ানোব্যাকটেরিয়ার বিপাকীয় মরিচার জীবাশ্ম!

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১১.উপ-২: ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশনের (BIF) পাললিক অবক্ষেপণ ও স্তরবিন্যাস (~২.৪ Ga)। সামুদ্রিক কেমোক্লাইন বা রাসায়নিক সীমানার প্রস্থচ্ছেদ—যেখানে সমুদ্রের গভীর থেকে উঠে আসা হাইড্রোথার্মাল দ্রবীভূত লোহা (Fe^{2+}) উপরিভাগের অক্সিজেনযুক্ত পানির সংস্পর্শে এসে অধঃক্ষিপ্ত হয়। এই প্রক্রিয়া লাল জ্যাসপার চার্ট (SiO_2) এবং রূপালী-কালো ম্যাগনেটাইট/হেমাটাইটের (Fe_3O_4/Fe_2O_3) ছন্দময় পর্যায়ক্রমিক স্তর গঠন করে, যা আধুনিক বিশ্বের ৯০% লৌহ আকরিকের প্রধান উৎস।



চিত্র ১১.২: ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশন (BIFs) এবং সমুদ্রের লৌহ-অধঃক্ষেপণ ইঞ্জিন। কোটি কোটি বছর ধরে জীবজাত অক্সিজেন বায়ুমণ্ডলে সঞ্চিত হতে পারেনি, কারণ আর্কিয়ান মহাসাগরে হাইড্রোথার্মাল ভেন্ট থেকে নির্গত বিপুল পরিমাণ দ্রবণীয় ফেরাস আয়রন (Fe^{2+}) বিদ্যমান ছিল। সালোকসংশ্লেষী O_2 উন্মুক্ত হওয়ামাত্র দ্রবীভূত Fe^{2+}-কে অদ্রবণীয় ফেরিক আয়রন ($Fe(OH)_3$)-এ জারিত করত; যা লাল মরিচার মতো তুষারপাতের আকারে সমুদ্রের তলদেশে জমা হয়ে আয়রন অক্সাইড (হেমাটাইট/ম্যাগনেটাইট) ও সিলিকার (চার্ট) পর্যায়ক্রমিক স্তর গঠন করত—গ্রহটির লৌহভাণ্ডার নিঃশেষ হওয়ার আগে ট্রিলিয়ন টন লোহা এতে আটকে পড়েছিল।

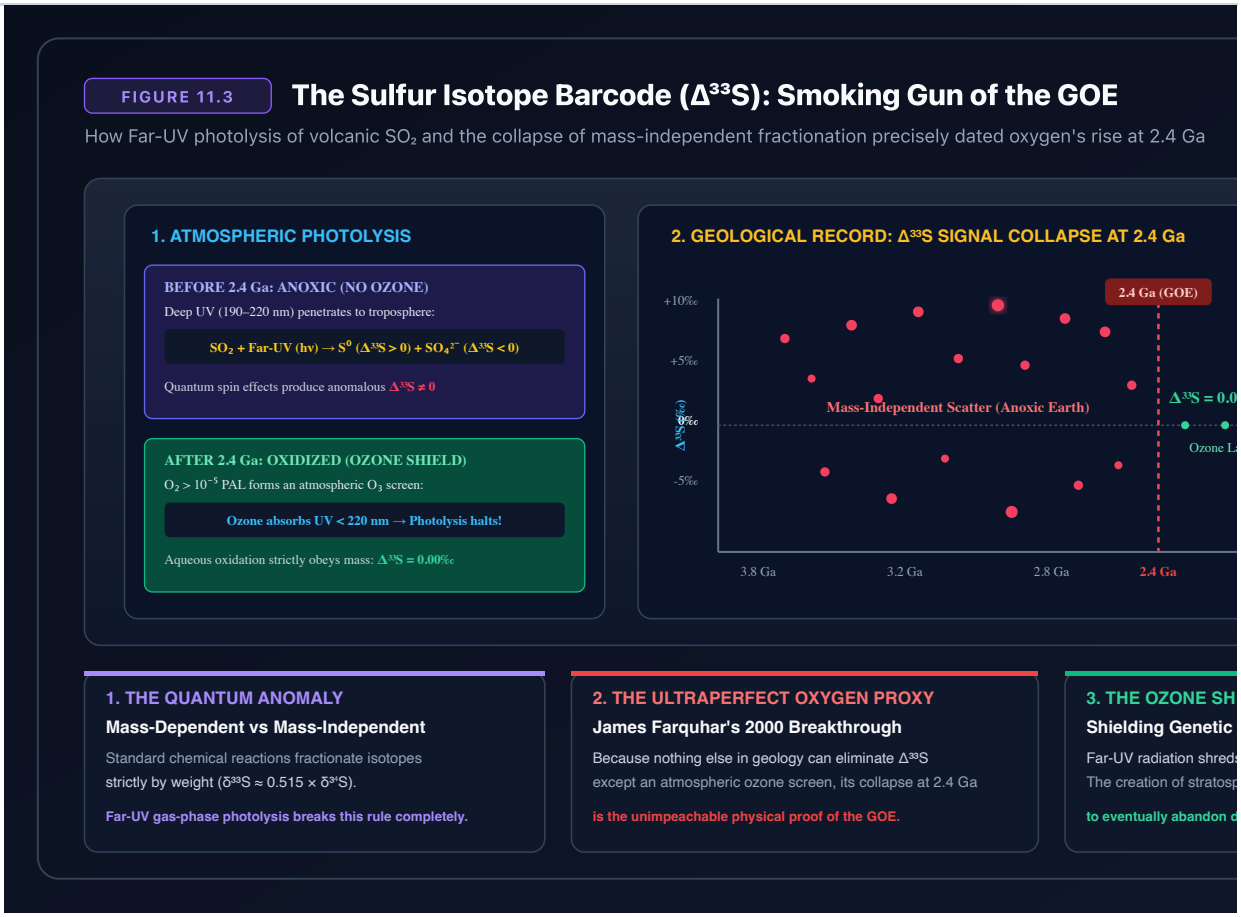
মহা-অক্সিডেশন ঘটনা (GOE): প্রথম বৈশ্বিক মহাবিপর্যয়

প্রায় ২.৪ বিলিয়ন বছর পূর্বে ($2,400\ \text{Ma}$) সমুদ্রের লৌহ বাফার নিঃশেষিত হয়ে যায়। সমুদ্রের সব লোহা জারিত হয়ে তলায় পড়ে গেলে উদ্বৃত্ত অক্সিজেন সমুদ্রপৃষ্ঠ ভেদ করে সরাসরি বায়ুমণ্ডলে বিস্ফোরিত হয়: এটিই বিখ্যাত **মহা-অক্সিডেশন ঘটনা (Great Oxidation Event – GOE)**।

সালফার আইসোটোপের অকাট্য সাক্ষ্য: $\Delta^{33}S$-এর অন্তর্ধান

২০০০ সালে ভূ-রসায়নবিদ জেমস ফারকুহার একটি অকাট্য ভূতাত্ত্বিক সীমানা আবিষ্কার করেন: ২.৪৫ বিলিয়ন বছরের প্রাচীন শিলায় সালফারের **ভর-নিরপেক্ষ ফ্র্যাকশনেশন (MIF, $\Delta^{33}S \neq 0$)** দেখা যায়, যা কেবল ওজোনহীন বায়ুমণ্ডলে তীব্র সৌর অতিবেগুনী রশ্মির সংস্পর্শেই সৃষ্টি হতে পারে। কিন্তু ঠিক ২.৪৫ বিলিয়ন বছর পূর্বে ভূতাত্ত্বিক রেকর্ড থেকে এই সিগন্যাল চিরতরে বিলীন হয়ে যায় —যা প্রমাণ করে বায়ুমণ্ডলে অক্সিজেনের মাত্রা লাফিয়ে উঠে প্রথম ওজোন স্তর গঠন করেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১১.৩: সালফার আইসোটোপ বারকোড ($\Delta^{33}S$): মহা-অক্সিডেশনের অকাট্য ভূতাত্ত্বিক প্রমাণ। ২.৪ বিলিয়ন বছর পূর্বে মহা-অক্সিডেশন ঘটনার সময়কাল নির্ধারণের চূড়ান্ত প্রমাণ মেলে সালফার আইসোটোপে। ওজোন স্তরবিহীন অক্সিজেনহীন বায়ুমণ্ডলে সূর্যের দূর-অতিবেগুনী রশ্মি (Far-UV: ১৯০–২২০ ন্যানোমিটার) আগ্নেয়গিরির SO_2 গ্যাসকে ভেঙে অ্যানোমালাস ভর-নিরপেক্ষ ফ্র্যাকশনেশন ($\Delta^{33}S \neq 0$) তৈরি করত। বায়ুমণ্ডলে অক্সিজেন বর্তমান মাত্রার ১০^{-5} ভাগে উন্নীত হওয়ামাত্র ওজোন স্তর (O_3) গঠিত হয়, দূর-অতিবেগুনী রশ্মির ভাঙন চিরতরে বন্ধ হয়ে যায় এবং বিশ্বজুড়ে শিলালিপিতে $\Delta^{33}S$-এর মান ০.০০‰-এ নেমে আসে।

অবাত প্রাণের মহামৃত্যুযজ্ঞ (The Anaerobic Holocaust)

এক বিলিয়ন বছর ধরে গ্রহের বুকে রাজত্ব করা প্রাচীন অবাত জীবাণুগুলোর কাছে অক্সিজেন কোনো জীবনসুধা ছিল না; এটি ছিল একটি সর্বগ্রাসী বিষাক্ত গ্যাস। অক্সিজেন জৈব অণু থেকে হিংস্রভাবে ইলেকট্রন ছিনিয়ে নিয়ে তৈরি করে **ক্ষতিকর বিক্রিয়াশীল অক্সিজেন প্রজাতি (ROS)**—যেমন সুপারঅক্সাইড র‍্যাডিক্যাল ($O_2^{\bullet-}$), হাইড্রোজেন পারঅক্সাইড (H_2O_2) এবং হাইড্রক্সিল র‍্যাডিক্যাল ($OH^{\bullet}$), যা ডিএনএ ছিঁড়ে ফেলে এবং কোষঝিল্লি ধ্বংস করে দেয়।

অ্যান্টি-অক্সিডেন্ট সুরক্ষা ব্যবস্থার অভাবে পৃথিবীর ট্রিলিয়ন ট্রিলিয়ন আদিম অবাত বংশধারা পৃথিবীর প্রথম ভয়াবহ গণবিলুপ্তিতে মুছে যায়। বেঁচে যাওয়া অবাত প্রাণীরা ভূগর্ভস্থ পাথর, তলদেশের পলিমাটি এবং অক্সিজেনহীন খাদের অতল গহ্বরে চিরতরে পালিয়ে যেতে বাধ্য হয়।

হুরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবী (২.৪ থেকে ২.১ Ga): ৩০ কোটি বছরের শীত

পরিবেশগত এই বিপর্যয় খুব দ্রুত গ্রহের জলবায়ুতে এক মহাজাগতিক দুঃস্বপ্নের জন্ম দেয়। পুরো আর্কিয়ান যুগ জুড়ে ক্ষীণ তরুণ সূর্যের নিচে পৃথিবীকে উষ্ণ রেখেছিল বাতাসের মিথেন গ্যাস (CH_4)।

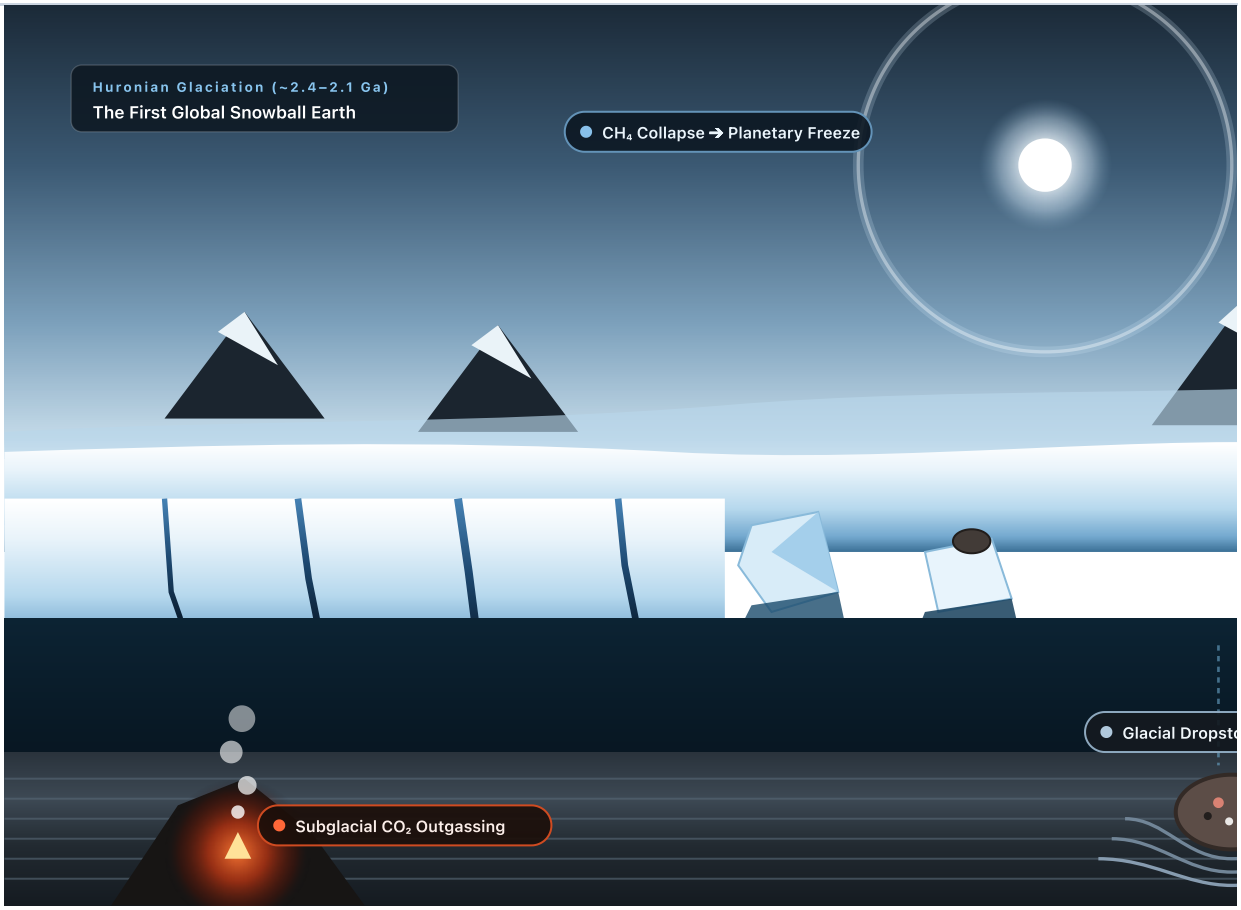
নবজাত অক্সিজেন বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করতেই তা আলোক-রাসায়নিক বিক্রিয়ায় মিথেনকে পুড়িয়ে ছারখার করে দেয়:

$$CH_4 + ২O_2 \rightarrow CO_2 + ২H_2O$$

কার্বন ডাই-অক্সাইডও গ্রিনহাউস গ্যাস, কিন্তু অণুপ্রতি মিথেন ছিল **২৮ গুণ বেশি শক্তিশালী**। ফলে বায়ুমণ্ডলের তাপমাত্রা দ্রুত পতনের শিকার হয়।

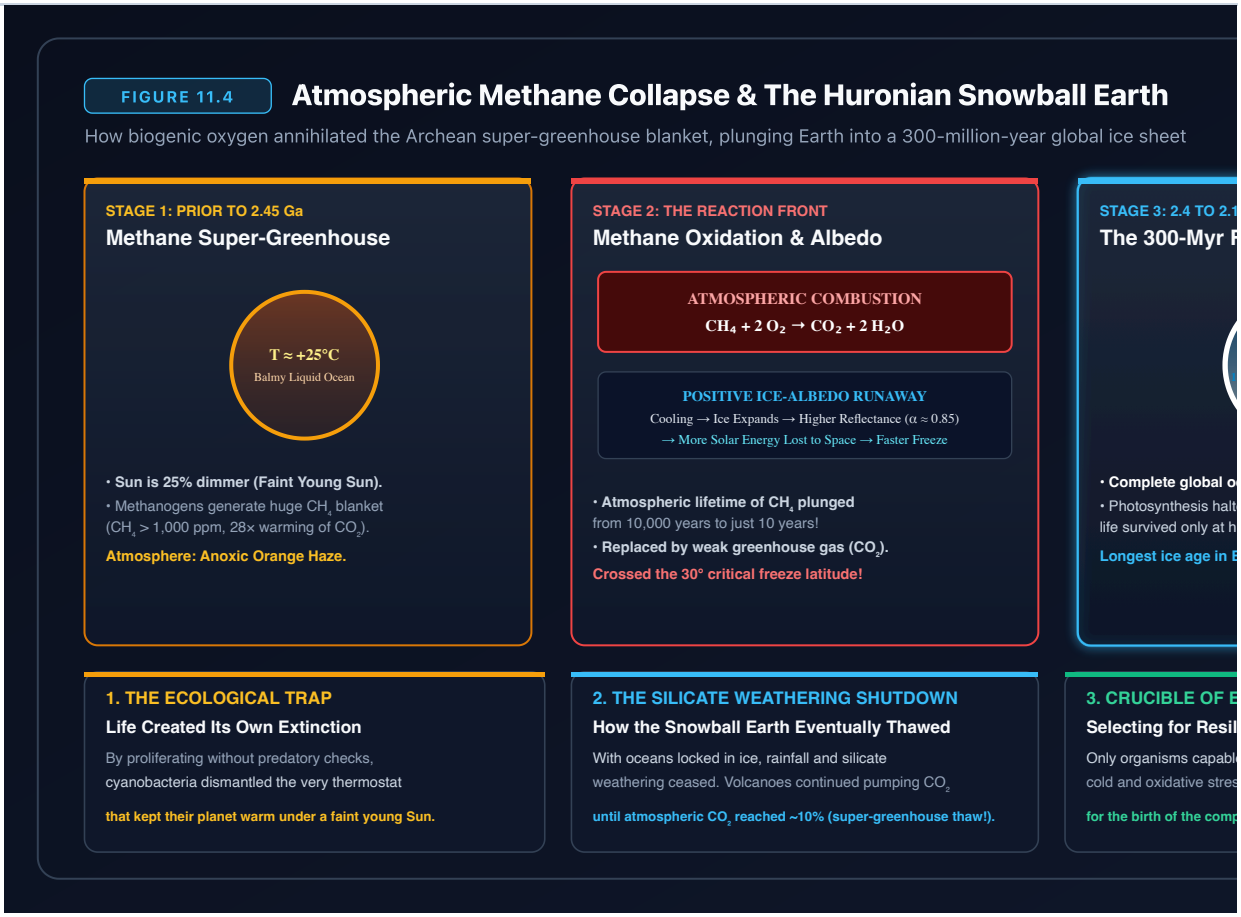
বরফ-অ্যালবেডো বিপর্যয় (The Ice-Albedo Catastrophe)
হিমবাহ যখন মেরু অঞ্চল থেকে ৩০° অক্ষাংশ অতিক্রম করল, তখন বরফের উজ্জ্বল সাদা পৃষ্ঠ সূর্যের প্রায় সমস্ত আলো মহাশূন্যে প্রতিফলিত করতে শুরু করে। সূচনা হয় নিয়ন্ত্রণহীন ইতিবাচক ফিডব্যাক লুপ। পৃথিবী তলিয়ে যায় **হুরোনিয়ান তুষারযুগে** (২.৪ থেকে ২.১ বিলিয়ন বছর পূর্বে)—**যা পৃথিবীর ইতিহাসের দীর্ঘতম ও চরমতম বরফযুগ**।

টানা ৩০ কোটি বছর ধরে পৃথিবী ছিল একটি হিমশীতল সাদা বল—কিলোমিটার পুরু বরফের নিচে সম্পূর্ণ মহাসাগর অবরুদ্ধ ছিল নিরক্ষরেখা পর্যন্ত। জীবন বেঁচে ছিল কেবল হিমবাহের সরু ফাটলে এবং সমুদ্রের তলদেশের উষ্ণ হাইড্রোথার্মাল ভেন্টের পাশে।



চিত্র ১১.উপ-৩: হুরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবীর চরম হিমবাহ প্রান্তর (~২.৪–২.১ Ga)। মিথেন ধ্বংসের ফলে শুরু হওয়া পৃথিবীর প্রথম বরফযুগে ৩০০ মিলিয়ন বছর ধরে মহাসাগরগুলো কিলোমিটার পুরু বরফে বন্দি হয়ে পড়ে। ভাসমান বরফের চাঁই থেকে খসে পড়া গ্রানাইট বোল্ডার (ড্রপস্টোন) সমুদ্রতলের পাললিক স্তরে বিকৃতি সৃষ্টি করে (গোওগান্ডা ফরমেশন), আর বরফের তলদেশের আগ্নেয়গিরির ফাটল থেকে ধীরে ধীরে নির্গত CO_2 পরিশেষে এই বরফ-অ্যালবেডো ফাঁদ ভেঙে পৃথিবীকে মুক্ত করেছিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১১.৪: বায়ুমণ্ডলের মিথেন বিনাশ ও হুরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবী (Huronian Snowball Earth)। ২৫% কম উজ্জ্বল তরুণ সূর্যের নিচে পৃথিবী উষ্ণ ছিল জীবজাত মিথেনের (CH_4) পুরু গ্রিনহাউস আবরণের কল্যাণে। কিন্তু নবজাত অক্সিজেন বায়ুমণ্ডলে প্রবেশ করতেই তা আলোক-রাসায়নিক বিক্রিয়ায় মিথেনকে পুড়িয়ে কার্বন ডাই-অক্সাইড ও জলীয় বাষ্পে পরিণত করে ($CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$)। CO_2 মিথেনের চেয়ে ২৮ গুণ কম গ্রিনহাউস ক্ষমতা সম্পন্ন হওয়ায় বৈশ্বিক তাপমাত্রা দ্রুত হ্রাস পায়। মেরু থেকে নেমে আসা বরফ সৌর বিকিরণ প্রতিফলিত করে ইতিবাচক অ্যালবেডো চক্র সৃষ্টি করে, যা সমগ্র গ্রহকে ৩০০ মিলিয়ন বছরের জন্য কিলোমিটার পুরু বরফে বন্দি করে ফেলেছিল।

অলৌকিক রূপান্তর: সবাত শ্বসনের তাপগতিবিদ্যার মহাবিপ্লব

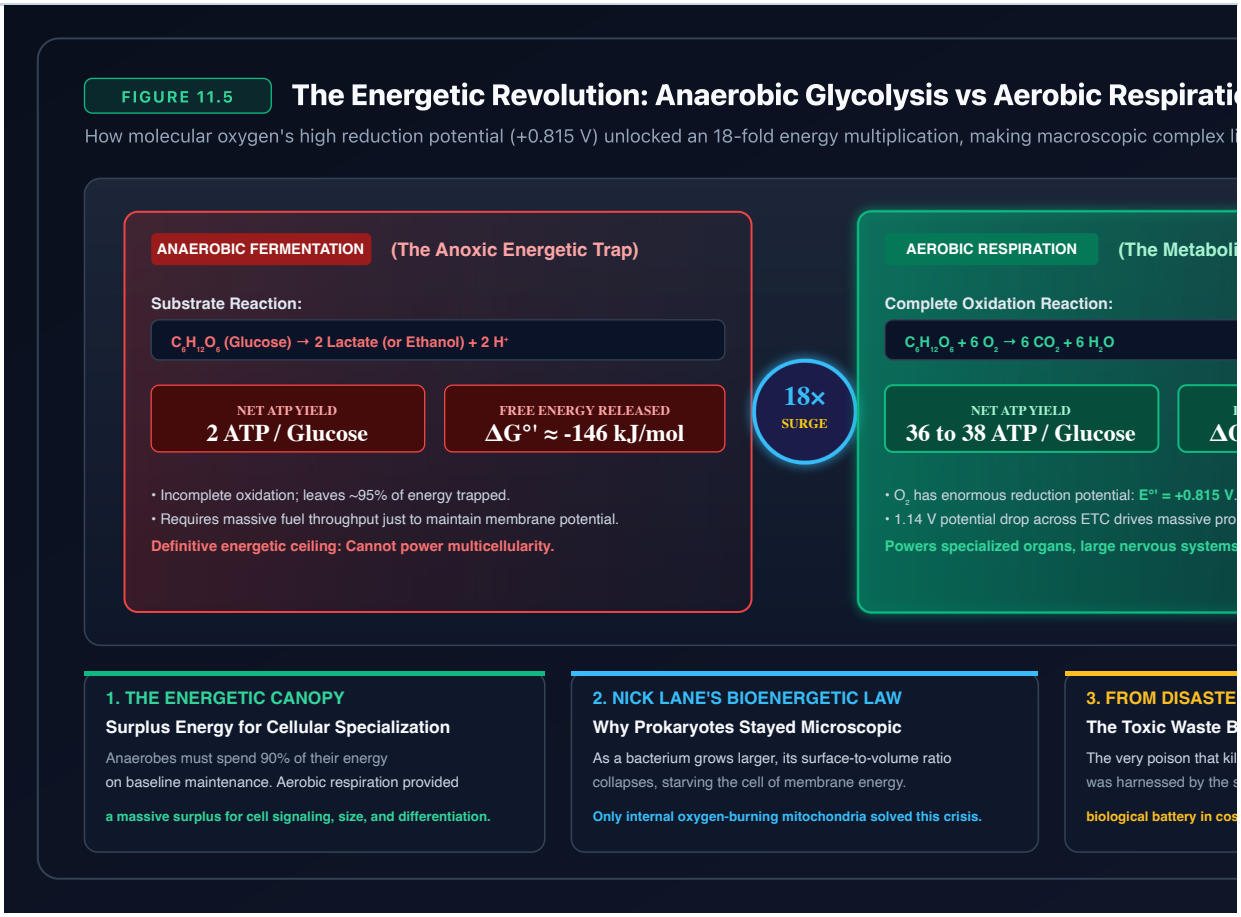
অবশেষে কোটি কোটি বছর ধরে জমে থাকা আগ্নেয়গিরির কার্বন ডাই-অক্সাইড গ্যাস জমাট বরফ ভেদ করে বায়ুমণ্ডলে চরম গ্রিনহাউস পরিস্থিতি সৃষ্টি করে এবং বরফ গলিয়ে ফেলে। কিন্তু বরফগলা পৃথিবী আর আগের মতো ছিল না।

অক্সিজেন শুরুতে বিষাক্ত হলেও যেসব জীবাণু একে ব্যবহারের কৌশল রপ্ত করেছিল, তারা জীববিজ্ঞানের সবচেয়ে অবিশ্বাস্য তাপগতিবিদ্যীয় জ্যাকপট অর্জন করল: **সবাত শ্বসন (Aerobic Respiration)**।

অবাত গাঁজন প্রক্রিয়ায় প্রতি অণু গ্লুকোজ ভেঙে শক্তি হিসেবে মেলে মাত্র **২টি এটিপি (ATP) অণু**। কিন্তু সবাত শ্বসনে অক্সিজেনকে প্রান্তীয় ইলেকট্রন গ্রাহক হিসেবে ব্যবহার করে সম্পূর্ণ গ্লুকোজ জারণের মাধ্যমে পাওয়া যায় **৩৬ থেকে ৩৮টি এটিপি অণু**:

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \to 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 36\text{ ATP} \quad (\Delta G^\circ = -২,৮৮০\text{ kJ/mol})$$

এটি ছিল কোষীয় শক্তির প্রায় **১৮০০% প্রবৃদ্ধি**! অবাত বিপাকের স্বল্প শক্তির কারণে দুই বিলিয়ন বছর ধরে জীবন আণুবীক্ষণিক একঘেয়ে এককোষী অবস্থায় বন্দি ছিল। সবাত শ্বসনের মাধ্যমে জীবন অবশেষে এমন এক জৈবরাসায়নিক জ্বালানি পেল যা জটিল জিনোম নিয়ন্ত্রণ, অন্তঃকোষীয় পরিবহন এবং বহুকোষী শরীর গঠনের স্বপ্নকে বাস্তবে রূপ দিতে সক্ষম।



চিত্র ১১.৫: শক্তির মহাবিপ্লব: অবাত গ্লাইকোলাইসিস বনাম সবাত শ্বসন। মহা-অক্সিডেশন ঘটনাটি প্রলয়ঙ্কর বিপর্যয় হলেও তা প্রাণের জন্য এক নজিরবিহীন শক্তির দুয়ার খুলে দিয়েছিল। অবাত গাঁজন প্রক্রিয়ায় প্রতি গ্লুকোজ অণু থেকে মাত্র ২ অণু এটিপি (ATP) পাওয়া যায় ($\Delta G^{\circ\prime} \approx -১৪৬$ কিলোজুল/মোল), যা কোষকে বৃহৎ বা বহুকোষী হতে বাধা দিত। কিন্তু অক্সিজেনকে ইলেকট্রন পরিবহন শৃঙ্খলের শেষ ইলেকট্রন গ্রাহক হিসেবে ব্যবহার করে ($E^{\circ\prime} = +০.৮১৫$ ভোল্ট) সবাত শ্বসনে প্রতি গ্লুকোজ থেকে ৩৬ থেকে ৩৮ অণু এটিপি অর্জিত হয় ($\Delta G^{\circ\prime} = -২,৮৭০$ কিলোজুল/মোল)—১৮ গুণ শক্তির এই বিশাল উল্লম্ফনই বহুকোষী জটিল জীবজগতের সৃষ্টিকে অর্থায়ন করেছিল।

কালানুক্রমিক সারণি: বায়ুমণ্ডলীয় অক্সিজেনের উত্থান

যুগ / পর্যায়	সময়কাল (Ga)	বায়ুমণ্ডলে O_2 (PAL-এর %)	মূল ভৌত ও ভূ-জৈবিক ঘটনাবলী
সালোকসংশ্লেষণ-পূর্ব আর্কিয়ান	> ৩.০\text{ Ga}	< ০.০০০১\%	অক্সিজেনহীন মহাসাগর; মিথেনোজেন চালিত গ্রিনহাউস; ভর-নিরপেক্ষ সালফার ফ্র্যাকশনেশন ($\Delta^{33}S \neq ০$)।
আদিম সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও লৌহ সিঙ্ক	২.৮\text{–}২.৪৫\text{ Ga}	স্থানীয় "অক্সিজেন মরুদ্যান"	পানি-ভাঙা ফটোসিস্টেম II-এর উদ্ভব; বিশ্ব মহাসাগরে ব্যান্ডেড আয়রন ফরমেশন (BIFs) সঞ্চয়ন।
মহা-অক্সিডেশন ঘটনা (GOE)	২.৪৫\text{–}২.২১\text{ Ga}	১ থেকে ১০%	সমুদ্রের লৌহভাণ্ডার নিঃশেষ; $\Delta^{33}S$ বিলুপ্ত; অবাত জীবনের গণবিলুপ্তি; মিথেন কুয়াশা ধ্বংস।
হুরোনিয়ান তুষারগোলক পৃথিবী	২.৪\text{–}২.১\text{ Ga}	পরিবর্তনশীল	মিথেন হ্রাস পাওয়ায় ৩০০ মিলিয়ন বছরের বৈশ্বিক বরফযুগ; আগ্নেয় CO_2 জমে বরফ গলন।
"বোরিং বিলিয়ন" সাম্যাবস্থা	১.৮\text{–}০.৮\text{ Ga}	~ ১ থেকে ৫%	ক্যানফিল্ড ওশান; ওজোন ঢালের সুরক্ষা; এন্ডোসিমবায়োসিস ও প্রথম ইউক্যারিওটের আত্মপ্রকাশ।

মঞ্চ প্রস্তুত: ইউক্যারিওটিক বিপ্লবের দ্বারপ্রান্তে

প্রায় ২.০ বিলিয়ন বছর পূর্বে পৃথিবী ওজোন স্তর সুরক্ষিত একটি অক্সিজেনসমৃদ্ধ গ্রহে পরিণত হয়। বায়ুমণ্ডল ও সমুদ্রপৃষ্ঠে অবিরাম অক্সিজেনের প্রবাহ তৈরি হলেও সমুদ্রের তলদেশ তখনও ছিল অক্সিজেনহীন ও সালফাইডময়।

সরল ব্যাকটেরিয়া ও আর্কিয়া সবাত শ্বসনের মাধ্যমে অতিরিক্ত শক্তি পেলেও তারা একটি অনতিক্রম্য কাঠামোগত সীমানায় আঘাত হানে: অভ্যন্তরীণ অঙ্গাণু ও বিশেষায়িত শক্তিকেন্দ্র ব্যতীত প্রোক্যারিয়টরা শক্তির ঘাটতিতে না পড়ে তাদের জিনোম বড় করতে পারত না। এই শক্তির দেয়াল ভাঙার জন্য প্রয়োজন ছিল কোটি বছরে একবার ঘটা দুটি সম্পূর্ণ ভিন্ন এককোষী সত্তার অভাবনীয় মৈত্রী।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত-এর **পর্ব ১২**-তে আমরা প্রত্যক্ষ করব জীবজগতের ইতিহাসের সর্বশ্রেষ্ঠ জৈবিক সংযুক্তি: **জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়নের সূচনা**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

- **Farquhar, J., Bao, H., & Thiemens, M. (2000).** “Atmospheric Influence of Earth’s Earliest Sulfur Cycle.” *Science*, 289(5480), 756–758. doi:10.1126/science.289.5480.756.
- **Lyons, T. W., Reinhard, C. T., & Planavsky, N. J. (2014).** “The rise of oxygen in Earth’s early ocean and atmosphere.” *Nature*, 506, 307–315. doi:10.1038/nature13068.
- **Fischer, W. W., Hemp, J., & Johnson, J. E. (2016).** “Evolution of Oxygenic Photosynthesis.” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44(1), 647–672. doi:10.1146/annurev-earth-060313-054632.
- **Kopp, R. E., Kirschvink, J. L., Hilburn, I. A., & Nash, C. Z. (2005).** “The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis.” *PNAS*, 102(32), 11131–11136. doi:10.1073/pnas.0504878102.
- **Holland, H. D. (2006).** “The oxygenation of the atmosphere and oceans.” *Phil. Trans. R. Soc. B*, 361(1470), 903–915. doi:10.1098/rstb.2006.1838.
- **Ueno, Y., et al. (2006).** “Quadruple sulfur isotope analysis of >3.8 Ga basalts: No evidence for the late heavy bombardment?” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), A664.

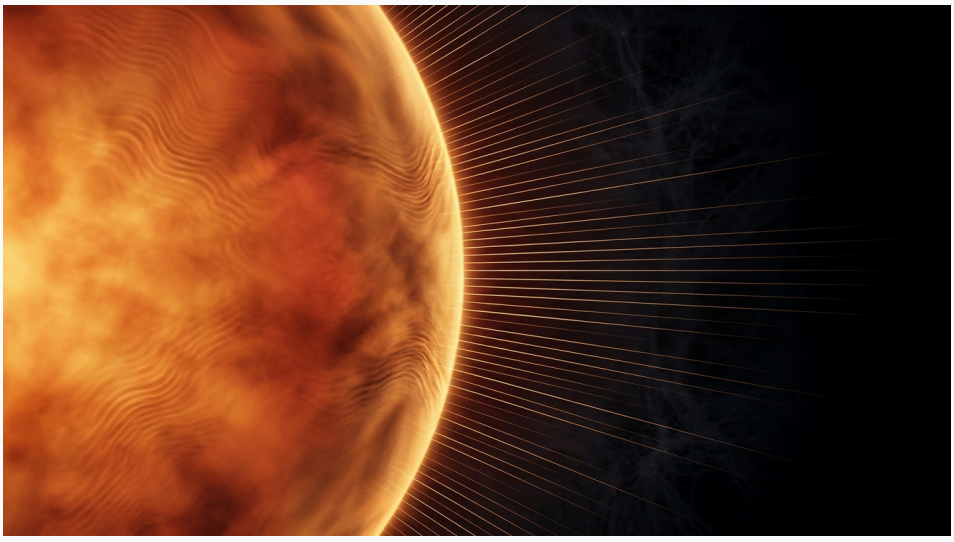
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "অক্সিজেনের মহাবিপর্যয় এবং অলৌকিক রূপান্তর — সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও মহা-অক্সিডেশন ঘটনা"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১১। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-11-the-oxygen-catastrophe-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • দ্বাদশ খণ্ড

জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়ন

জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়ন

2,108 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১২: *চিত্র: প্রায় ১.৮ বিলিয়ন বছর আগে কোষীয় এন্ডোসিমবায়োসিস: একটি আসগার্ড আর্কিয়ন কোষ অ্যারোবিক ব্যাকটেরিয়াকে ধারণ করে মাইটোকনড্রিয়া গঠন করে, যা জটিল বহুকোষী প্রাণের শক্তি ও ব্লুপ্রিন্ট তৈরি করেছিল।*

ব্যাকটেরিয়া এবং আর্কিয়া নিঃসন্দেহে পৃথিবীর অপ্রতিদ্বন্দ্বী প্রাণরাসায়নিক যাদুকর; তবুও বিবর্তনের চার বিলিয়ন বছরে তারা কখনো একটি বহুকোষী বৃক্ষ, একটি মাশরুম, একটি পতঙ্গ কিংবা মানুষের মস্তিষ্ক তৈরি করতে পারেনি। তারা এক অনতিক্রম্য শক্তির বাধার পেছনে আণুবীক্ষণিক কণা হিসেবে বন্দি ছিল। তারপর, প্রায় ১.৮ বিলিয়ন বছর পূর্বে, মহাবিশ্বের ইতিহাসে এক অনন্য ও অভাবনীয় জৈবিক সংযুক্তি সংঘটিত হলো: একটি প্রাচীন আর্কিয়ন কোষ একটি সবাত ব্যাকটেরিয়াকে গ্রাস করে এবং তাকে হজম করার বদলে গড়ে তোলে এক শাশ্বত মৈত্রী। সেই বন্দি ব্যাকটেরিয়াটি পরিণত হয় মাইটোকনড্রিয়ায়—যা জিনপ্রতি শক্তির পরিমাণ দুই লাখ গুণ বাড়িয়ে দিয়ে উন্মুক্ত করে জটিল ইউক্যারিওটিক জীবজগতের মহাবিপ্লব।

প্রোক্যারিয়টের কাচের ছাদ: জৈব-শক্তির নিগড়

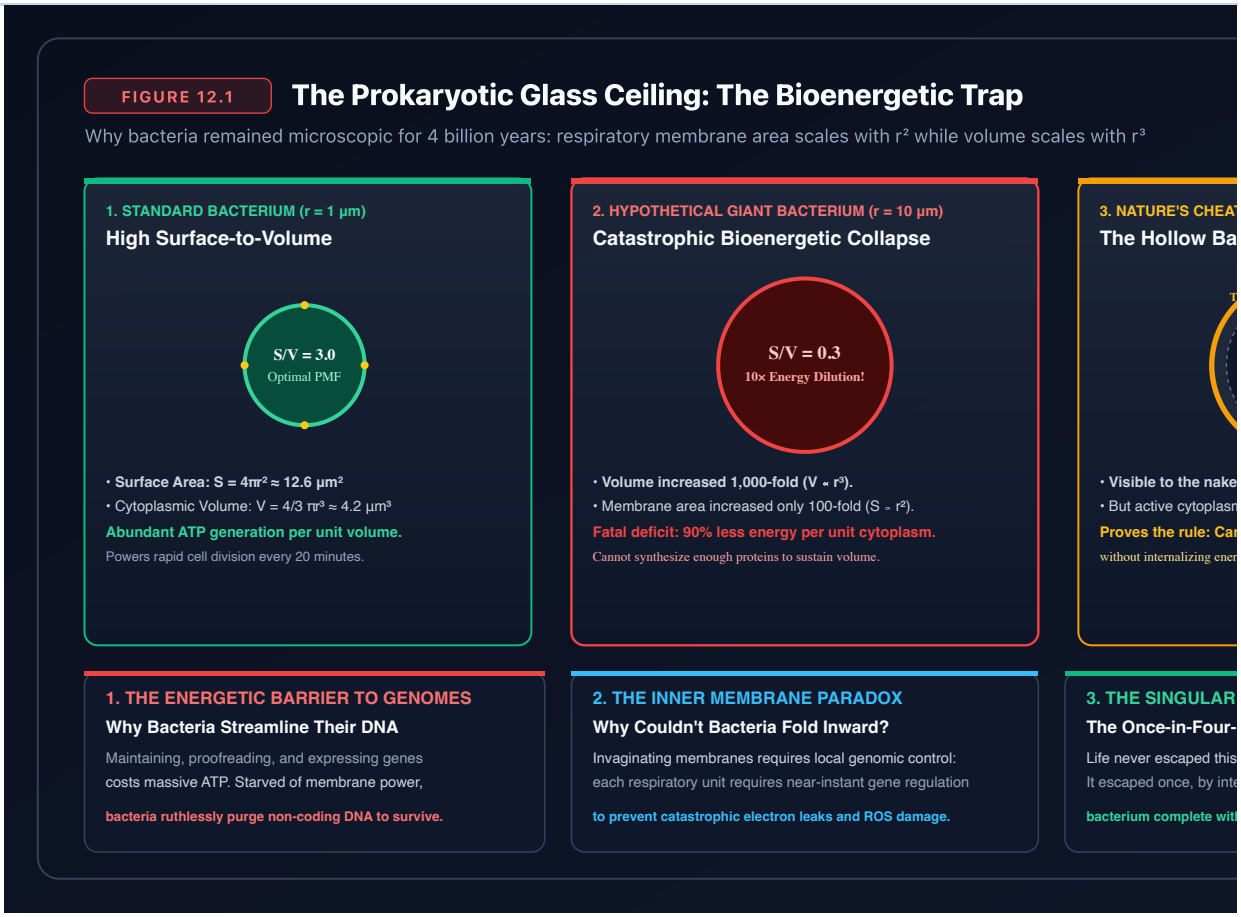
ব্যাকটেরিয়া এবং আর্কিয়া গ্রহের প্রতিটি পরিবেশগত অঞ্চল জয় করেছে: তারা পারমাণবিক চুল্লির ভেতরে, ভূত্বকের কিলোমিটার গভীর পাথরে কিংবা ফুটন্ত গন্ধক প্রস্রবণে বহাল তবিয়তে বেঁচে থাকে। তবুও গাঠনিকভাবে, সাড়ে তিন বিলিয়ন বছর আগের আর্কিয়ান চার্ট শিলায় পাওয়া একটি জীবাশ্ম ব্যাকটেরিয়ার সাথে আজকের ব্যাকটেরিয়ার রূপের কোনো মৌলিক পার্থক্য নেই।

কেন প্রোক্যারিয়টরা কখনো প্রকৃত ম্যাক্রোস্কোপিক জটিলতায় পৌঁছাতে পারল না? ২০১০ সালে প্রাণরসায়নবিদ **নিক লেন (Nick Lane)** এবং বিবর্তনীয় জিনতত্ত্ববিদ **উইলিয়াম মার্টিন (William Martin)** কোষের আকারের জৈব-শক্তি সংক্রান্ত সমীকরণ সমাধান করে এই মৌলিক রহস্যের দ্বার উন্মোচন করেন:

সমস্ত প্রোক্যারিয়ট কোষে শ্বসন প্রক্রিয়া তাদের **বাইরের প্লাজমা ঝিল্লির** সাথে যুক্ত। ঝিল্লির দুই পাশে প্রোটন পাম্প করে তড়িৎরাসায়নিক গ্রেডিয়েন্ট তৈরি করা হয়, যা এটিপি সংশ্লেষ পরিচালনা করে। যদি একটি ব্যাকটেরিয়ার ব্যাসার্ধ দশ গুণ বৃদ্ধি পায়, তবে তার ভেতরের আয়তন (এবং শক্তির চাহিদা) বৃদ্ধি পায় এক হাজার গুণ ($V \propto r^3$), অথচ তার পৃষ্ঠতলের ঝিল্লির ক্ষেত্রফল (এবং শক্তি সরবরাহ) বাড়ে মাত্র একশত গুণ ($A \propto r^2$)।

প্রোক্যারিয়ট স্কেলিংয়ের জিনগত বোঝা (The Genomic Overhead)
পৃষ্ঠতলের ক্ষেত্রফলের এই ঘাটতি দূর করতে একটি বিশালাকার ব্যাকটেরিয়াকে (যেমন *Thiomargarita namibiensis*) অভ্যন্তরীণ ঝিল্লি ভাঁজ করতে হয় এবং ইলেকট্রন পরিবহন তদারকির জন্য পরিধির কাছাকাছি নিজস্ব জিনোমের হাজার হাজার প্রতিলিপি তৈরি করতে হয়। একটি একক বিশালাকার ব্যাকটেরিয়া তার দেহে **২০,০০০টি পূর্ণাঙ্গ ডিএনএ কপি** বহন করতে পারে! তার সমস্ত বিপাকীয় শক্তি কেবল এই অপরিহার্য জিনগুলোর পুনরাবৃত্ত অনুলিপি ও অনুবাদেই ফুরিয়ে যায়। জটিল জিন নিয়ন্ত্রণ, অন্তঃকোষীয় পরিবহন বা নতুন প্রোটিন পরিবার বিবর্তনের জন্য তার হাতে কোনো উদ্বৃত্ত শক্তি থাকে না।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১২.১: প্রোক্যারিয়টের শক্তিসীমা ও পৃষ্ঠতল বনাম আয়তনের স্কেলিং বাধা (The Bioenergetic Glass Ceiling)। ব্যাকটেরিয়া তাদের বহিঃস্থ প্লাজমা ঝিল্লির দুই পাশে প্রোটন-চালিকা শক্তি তৈরি করে; ফলে শক্তি উৎপাদন বাড়ে পৃষ্ঠতলের ক্ষেত্রফলের অনুপাতে ($S \propto r^2$), কিন্তু সাইটোপ্লাজম রক্ষণাবেক্ষণ ও সংশ্লেষণের শক্তি খরচ বাড়ে আয়তনের অনুপাতে ($V \propto r^3$)। ব্যাকটেরিয়ার ব্যাসার্ধ ১০ গুণ বাড়লে প্রতি একক আয়তনে শক্তির ঘনত্ব ভয়াবহভাবে ১০ গুণ হ্রাস পায়। থায়োমার্গারিটার মতো বিশালাকার ব্যাকটেরিয়া তাদের অভ্যন্তরের ৯৮% অংশ একটি নিষ্ক্রিয় তরল গহ্বর হিসেবে রেখে কেবল বেঁচে থাকতে পারে—যা প্রমাণ করে অভ্যন্তরীণ বিদ্যুৎকেন্দ্র স্থাপন ব্যতিরেকে জটিল ত্রিমাত্রিক কোষীয় স্থাপত্য শারীরিকভাবে অসম্ভব ছিল।

এন্ডোসিমবায়োটিক বিপ্লব: দুই বিশ্বের মেলবন্ধন

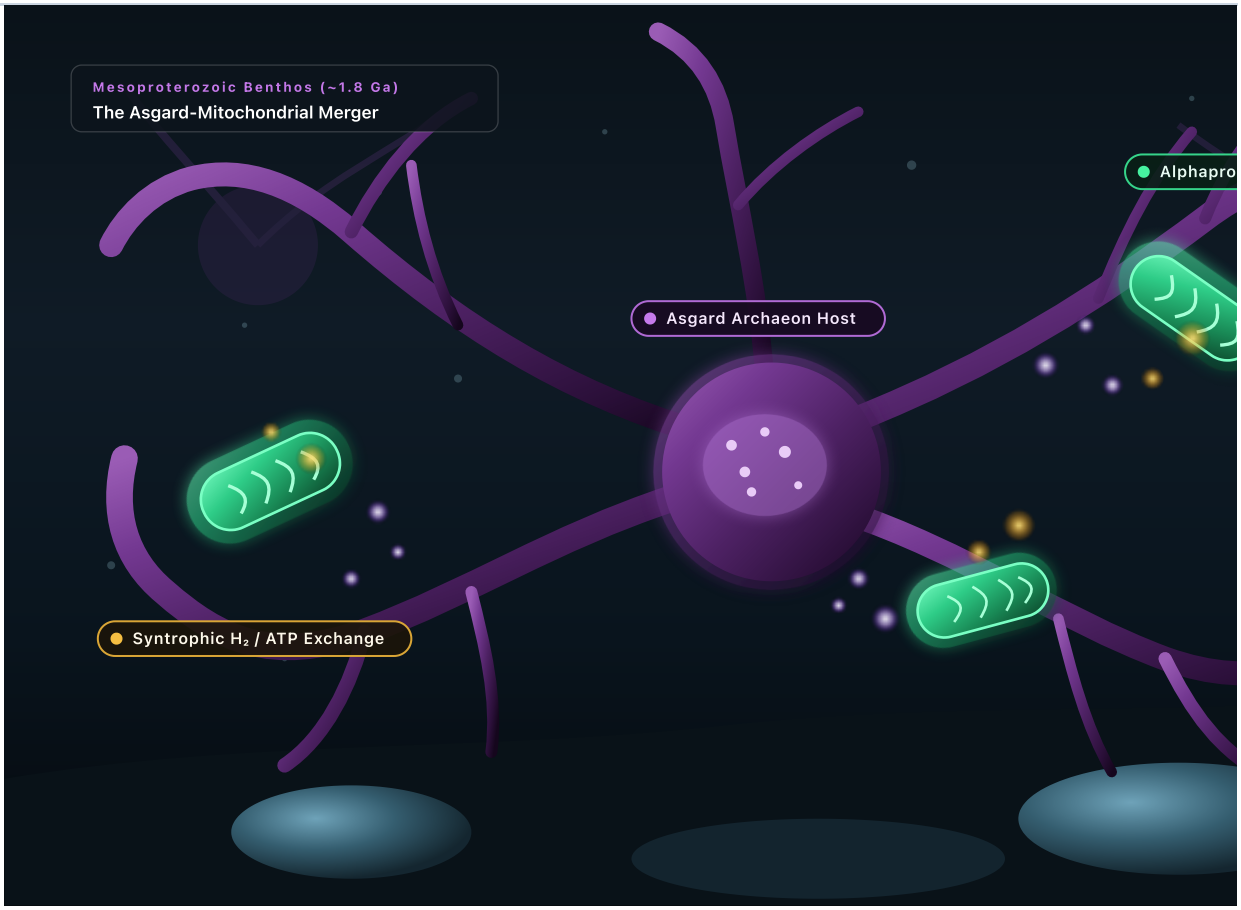
১৯৬৭ সালে বিবর্তনীয় জীববিজ্ঞানী **লিন মারগুলিস (Lynn Margulis)** তাঁর যুগান্তকারী গবেষণাপত্র *"On the Origin of Mitosing Cells"* প্রকাশ করে **ধারাবাহিক এন্ডোসিমবায়োসিস (Serial Endosymbiosis)** তত্ত্বকে পুনরুজ্জীবিত করেন। মারগুলিস দাবি করেন যে ইউক্যারিওট কোষের শক্তির কারখানা—মাইটোকনড্রিয়া এবং ক্লোরোপ্লাস্ট—ভেতর থেকে ধাপে ধাপে গড়ে ওঠেনি, বরং তারা একসময়কার মুক্তজীবী আদিম প্রোক্যারিয়ট ছিল যা কোনো এক প্রাচীন পোষক কোষ গ্রাস করেছিল।

কয়েক দশক ধরে মারগুলিসের তত্ত্ব তীব্র একাডেমিক সংশয়বাদের মুখোমুখি হয়েছিল। আজ আধুনিক জিনোমিক্স একে প্রশ্নাতীত বৈজ্ঞানিক সত্যে প্রতিষ্ঠিত করেছে:

- মাইটোকনড্রিয়ার নিজস্ব বৃত্তাকার ব্যাকটেরিয়াল ডিএনএ (mtDNA) রয়েছে এবং তারা কোষের ভেতর স্বাধীনভাবে দ্বি-বিভাজন প্রক্রিয়ায় বংশবৃদ্ধি করে।
- মাইটোকনড্রিয়ার রাইবোসোম ইউক্যারিওটিক (৮০S) নয়, বরং ব্যাকটেরিয়ার অনুরূপ (৭০S), এবং তা ব্যাকটেরিয়ার অ্যান্টিবায়োটিকের (যেমন ক্লোরামফেনিকল ও স্ট্রেপ্টোমাইসিন) প্রতি সংবেদনশীল।
- মাইটোকনড্রিয়ার দ্বৈত ঝিল্লি রয়েছে, যার অভ্যন্তরীণ ঝিল্লিতে কার্ডিওলিপিন নামক বিশেষ লিপিড বিদ্যমান—যা কেবল ব্যাকটেরিয়ার ঝিল্লিতেই পাওয়া যায়।

অংশীদারদের পরিচয়: আসগার্ড আর্কিয়া ও আলফাপ্রোটিওব্যাকটেরিয়া

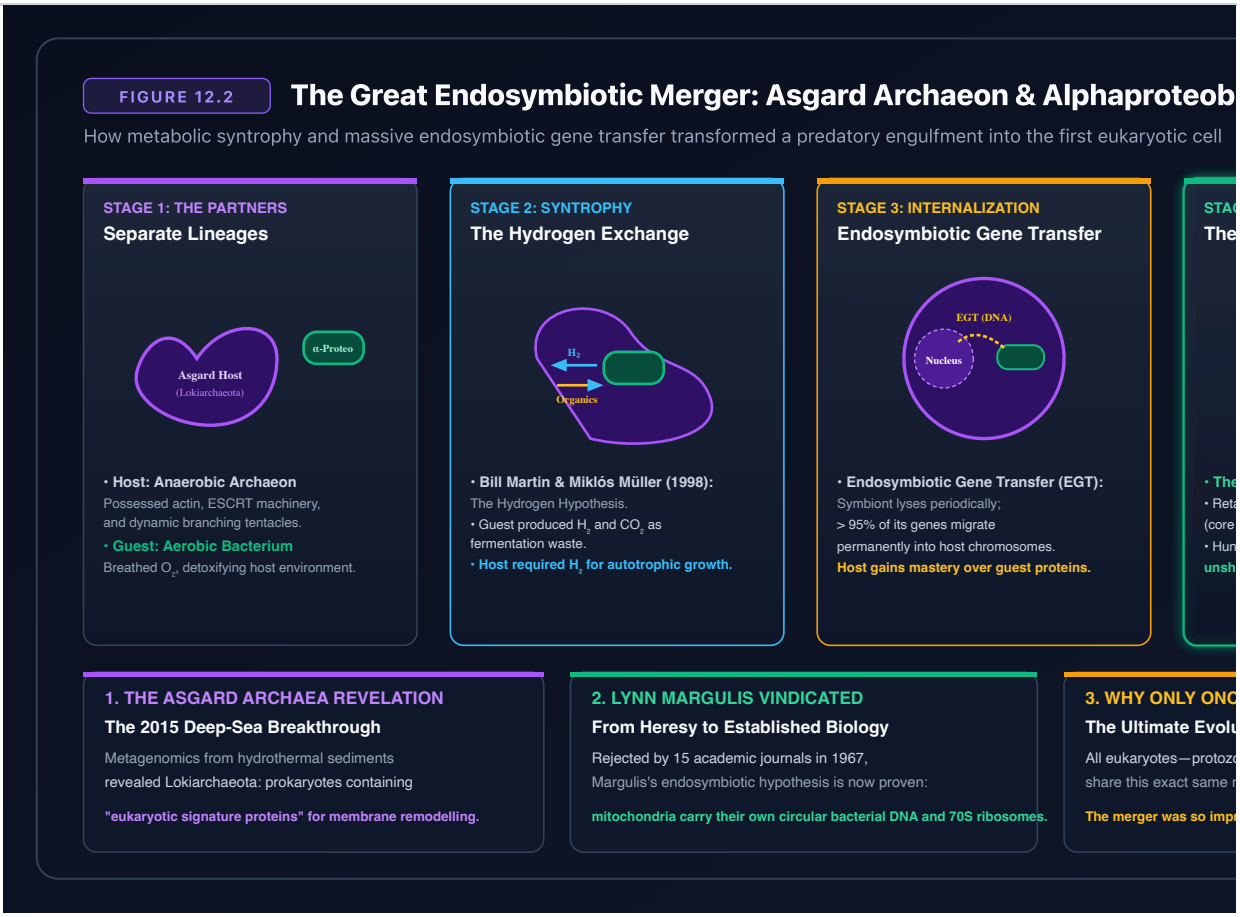
২০১৫ সালে উত্তর আটলান্টিক শৈলশিরার "লোকিস ক্যাসেল"-এর সমুদ্রগর্ভস্থ পলল থেকে সংগৃহীত ডিএনএ বিশ্লেষণে বিজ্ঞানীদের চোখে পড়ে এক অদ্ভুত জীবগোষ্ঠী: **আসগার্ড আর্কিয়া (Asgard Archaea বা Lokiarchaeota)**। জিনোমিক বিশ্লেষণে প্রমাণিত হয় যে আসগার্ড আর্কিয়া হলো জটিল ইউক্যারিওটিক জীবনের নিকটতম জীবিত এককোষী আত্মীয়: তাদের ডিএনএ-তে ইউক্যারিওট সিগনেচার প্রোটিন (ESP) বিদ্যমান, যা অ্যাকটিন-ভিত্তিক সাইটোস্কেলটন ও ঝিল্লি নিয়ন্ত্রণের সংকেত দেয়।



চিত্র ১২.উপ-১: আসগার্ড আর্কিয়া এবং আলফাপ্রোটিওব্যাকটেরিয়ার মিথোজীবী মেলবন্ধন (~১.৮ Ga)। প্রমিথিওআর্কিয়াম সিনট্রফিকামের গভীর সমুদ্রের গঠন—যেখানে সুদীর্ঘ ও শাখান্বিত ঝিল্লি প্রবর্ধনের (সিউডোপোডিয়া) মাধ্যমে স্বাধীনজীবী সবাত আলফাপ্রোটিওব্যাকটেরিয়াকে জড়িয়ে রাখা হয়েছে। এই মিথোজীবী সম্পর্কে অবাত আর্কিয়া বিপাকীয় সাবস্ট্রেট সরবরাহ করত এবং ব্যাকটেরিয়াটি বিষাক্ত অক্সিজেন নিষ্ক্রিয় করে প্রচুর ATP উৎপাদন করত, যা ইউক্যারিওট পূর্বপুরুষের এন্ডোসিমবায়োটিক মিলনের পথ খুলে দেয়।

প্রায় ১.৮ বিলিয়ন বছর পূর্বে, একটি অবাত আসগার্ড-সদৃশ আর্কিয়ন কোষের সাথে একটি সবাত **আলফাপ্রোটিওব্যাকটেরিয়ার (Alphaproteobacterium)** পারস্পরিক মিথোজীবী সম্পর্ক গড়ে ওঠে। আর্কিয়ন ব্যাকটিরিয়াটিকে জৈব পুষ্টি সরবরাহ করত; আর সবাত শ্বসনে সক্ষম ব্যাকটিরিয়াটি ক্ষতিকর অক্সিজেন বিষমুক্ত করে উচ্চমাত্রার এটিপি শক্তি জুগিয়ে দিত। কালক্রমে ব্যাকটিরিয়াটি আর্কিয়নের সাইটোপ্লাজমের ভেতরে স্থায়ী আশ্রয় লাভ করে—সূচিত হয় জীববিজ্ঞানের সবচেয়ে প্রভাবশালী সহবাস।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১২.২: এন্ডোসিমবায়োসিসের মহা-সংযুক্তি ও মাইটোকনড্রিয়ার জন্ম। ইউক্যারিওট কোষের উৎপত্তি হয়েছিল একটি অবাত আসগার্ড আর্কিয়ন পোষক (যার অ্যাকটিন-সমৃদ্ধ সক্রিয় কর্ষিকা ছিল) এবং একটি সবাত আলফাপ্রোটিওব্যাকটেরিয়া অতিথির এক অনন্য বিপাকীয় পারস্পরিক মৈত্রী থেকে। হাইড্রোজেন ও জৈব যৌগ বিনিময়ের মাধ্যমে আর্কিয়ন ব্যাকটেরিয়াটিকে গ্রাস করে। ব্যাপক এন্ডোসিমবায়োটিক জিন স্থানান্তরের (EGT) মাধ্যমে ব্যাকটেরিয়ার জিনোমের ৯৫%-এরও বেশি পোষকের ক্রোমোজোমে স্থানান্তরিত হয় এবং অভ্যন্তরীণ এটিপি উৎপাদনকারী পোষা অঙ্গে পরিণত হয়: মাইটোকনড্রিয়া।

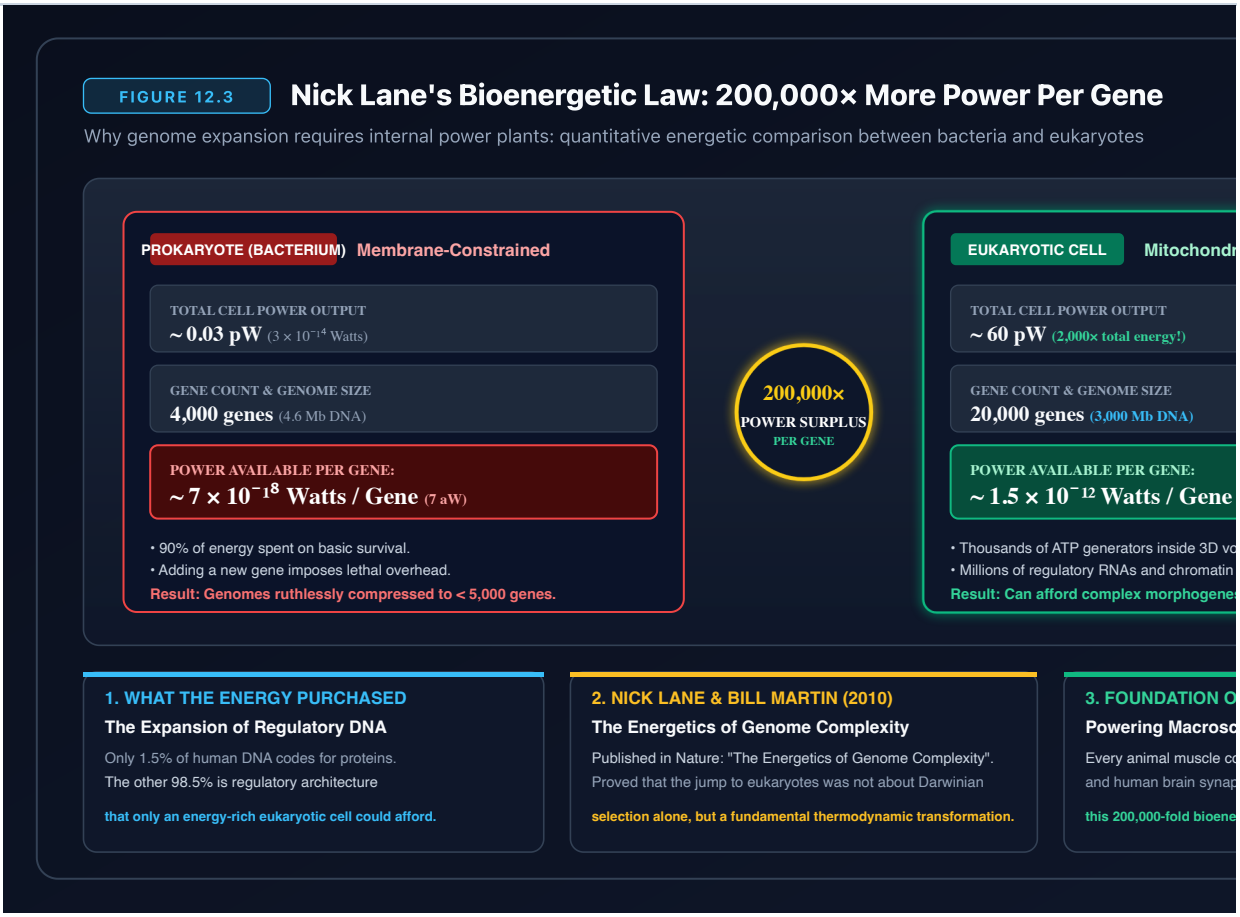
শক্তির অভূতপূর্ব উল্লম্ফন: জিনপ্রতি দুই লাখ গুণ বেশি শক্তি

পোষকের ভেতরে ঢুকে পড়ার পর আদিম মাইটোকনড্রিয়া এক আমূল জিনগত পুনর্বিন্যাসের মধ্য দিয়ে যায়: ল্যাটারাল জিন ট্রান্সফারের মাধ্যমে এটি তার **৯৯%-এরও বেশি জিন সরাসরি পোষক কোষের নিউক্লিয়াসে স্থানান্তর করে**, নিজের কাছে রেখে দেয় কেবল অত্যন্ত প্রয়োজনীয় একটি ক্ষুদ্র জিনোম (মানব মাইটোকনড্রিয়াল ডিএনএ-তে মাত্র ১৩টি প্রোটিন তৈরির কোড সংরক্ষিত)।

জিনোম পরিচালনার ভার কেন্দ্রীয় নিউক্লিয়াসের ওপর সঁপে দিয়ে সাইটোপ্লাজম জুড়ে শত শত বা হাজার হাজার ভাঁজযুক্ত মাইটোকনড্রিয়াল পাওয়ার স্টেশন সাজিয়ে ইউক্যারিওট কোষ পৃষ্ঠতল বনাম আয়তনের চিরন্তন সীমাবদ্ধতা চিরতরে ভেঙে ফেলে:

$$\frac{\text{প্রাপ্য শক্তি}}{\text{জিন}} \approx ২০০,০০০ \times \text{ (প্রোক্যারিয়টের তুলনায় ইউক্যারিওটে বেশি)}$$

এই বিপুল শক্তির উদ্বৃত্ত নিয়ে ইউক্যারিওট কোষ এক বিশালাকার জিনোম পরিচালনার সামর্থ্য অর্জন করে: হাজার হাজার নতুন নিয়ন্ত্রক জিন, জটিল স্প্লাইসিং ব্যবস্থা, সংকেত সঞ্চালন শৃঙ্খল এবং মোটর প্রোটিনের (কাইনেসিন ও ডাইনিন) মাধ্যমে অভ্যন্তরীণ মাইক্রোটিউবুল মহাসড়কে উপাদান পরিবহন।



চিত্র ১২.৩: নিক লেনের জৈব-শক্তি সূত্র: জিনপ্রতি ২০০,০০০ গুণ শক্তির উল্লম্ফন। একটি সাধারণ ব্যাকটেরিয়া মাত্র ~০.০৩ পিকোওয়াট মোট শক্তি উৎপন্ন করে, মৌলিক বেঁচে থাকার খরচ মেটানোর পর প্রতি জিনের জন্য অবশিষ্ট থাকে মাত্র ৭ অ্যাটোওয়াট—যার কারণে প্রোক্যারিয়টরা জিনোম ছাঁটাই করতে বাধ্য হয়। অন্যদিকে, ইউক্যারিওট কোষ সাইটোপ্লাজম জুড়ে হাজার হাজার মাইটোকনড্রিয়া সাজিয়ে ৬০ পিকোওয়াট মোট শক্তি উৎপাদন করে (~২,০০০ গুণ বেশি), যা প্রতি জিনের জন্য বরাদ্দ করে ~১,৫০০ ফেমটোওয়াট শক্তি—জৈব-শক্তির এই দুই লাখ গুণ প্রাচুর্যই বিশাল নিয়ন্ত্রক জিনোম, ক্রোমাটিন গঠন এবং বহুকোষী কলার বিশেষায়নকে সম্ভবপর করেছে।

ইউক্যারিওটিক কোষের মূল উদ্ভাবন: নিউক্লিয়াস, ইন্ট্রন এবং সাইটোস্কেলটন

এন্ডোসিমবায়োটিক মেলবন্ধন এমন কিছু যুগান্তকারী কোষীয় উদ্ভাবন এনে দিল যা আজকের প্রতিটি ইউক্যারিওট জীবকে অনন্য করে তোলে:

১. নিউক্লিয়ার পর্দা এবং স্প্লাইসিওসোমাল ইন্ট্রন

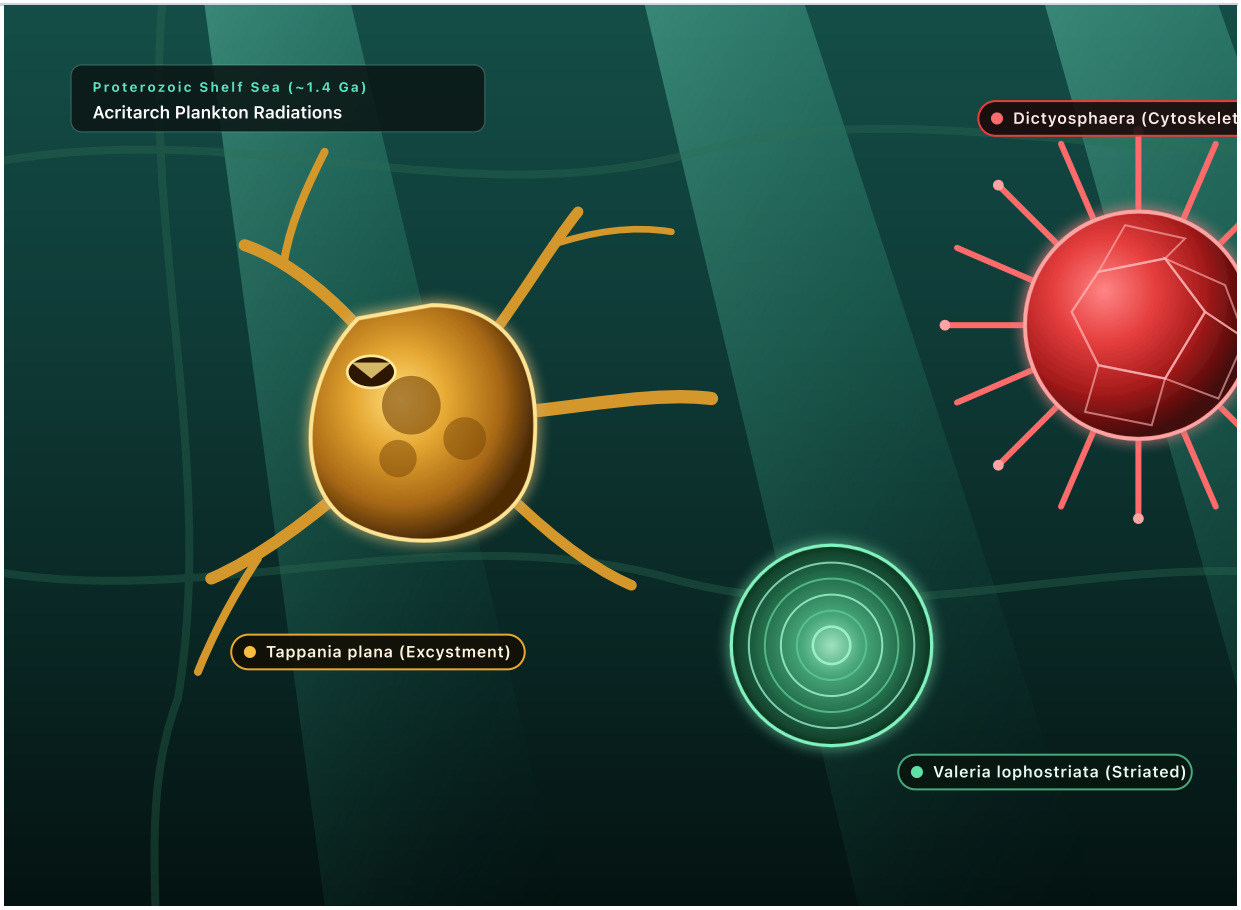
সাইটোপ্লাজমে হাজার হাজার ব্যাকটেরিয়াল এন্ডোসিমবায়োন্ট ভেঙে যাওয়ার ফলে তাদের ডিএনএ টুকরো টুকরো হয়ে পোষকের ক্রোমোজোমকে পরজীবী স্ব-ছাঁটাইকারী *গ্রুপ II মোবাইল ইন্ট্রন* দিয়ে প্লাবিত করেছিল। প্রোক্যারিয়টের মতো মেসেঞ্জার আরএনএ তৈরি হওয়ার সাথে সাথেই রাইবোসোম অনুবাদ শুরু করলে অকেজো ও ত্রুটিপূর্ণ প্রোটিন উৎপন্ন হতো।

ইউক্যারিওট কোষ একটি স্থানিক প্রাচীর হিসেবে **নিউক্লিয়ার পর্দা** উদ্ভাবন করে: নিউক্লিয়াসের সুরক্ষিত ভেতরে অনুলিপন এবং ধীরগতির ইন্ট্রন ছাঁটাই (স্প্লাইসিওসোম দ্বারা) সম্পন্ন হয়; কেবল সম্পূর্ণ ত্রুটিমুক্ত ও পরীক্ষিত আরএনএ-কে নিউক্লিয়ার পোর কমপ্লেক্স দিয়ে বাইরে সাইটোপ্লাজমে রাইবোসোমের কাছে পাঠানো হয়।

২. সক্রিয় সাইটোস্কেলটন ও ফ্যাগোসাইটোসিস

ব্যাকটেরিয়ার শক্ত পেপটাইডোগ্লাইকান প্রাচীরের বিপরীতে ইউক্যারিওটের দেহে রয়েছে অ্যাকটিন ও টিউবুলিনের গতিশীল অভ্যন্তরীণ কাঠামো। এটি কোষকে আকার পরিবর্তন, শিকার গ্রাস (ফ্যাগোসাইটোসিস) এবং সুনির্দিষ্ট অন্তঃকোষীয় পরিবহনের সক্ষমতা দেয়।

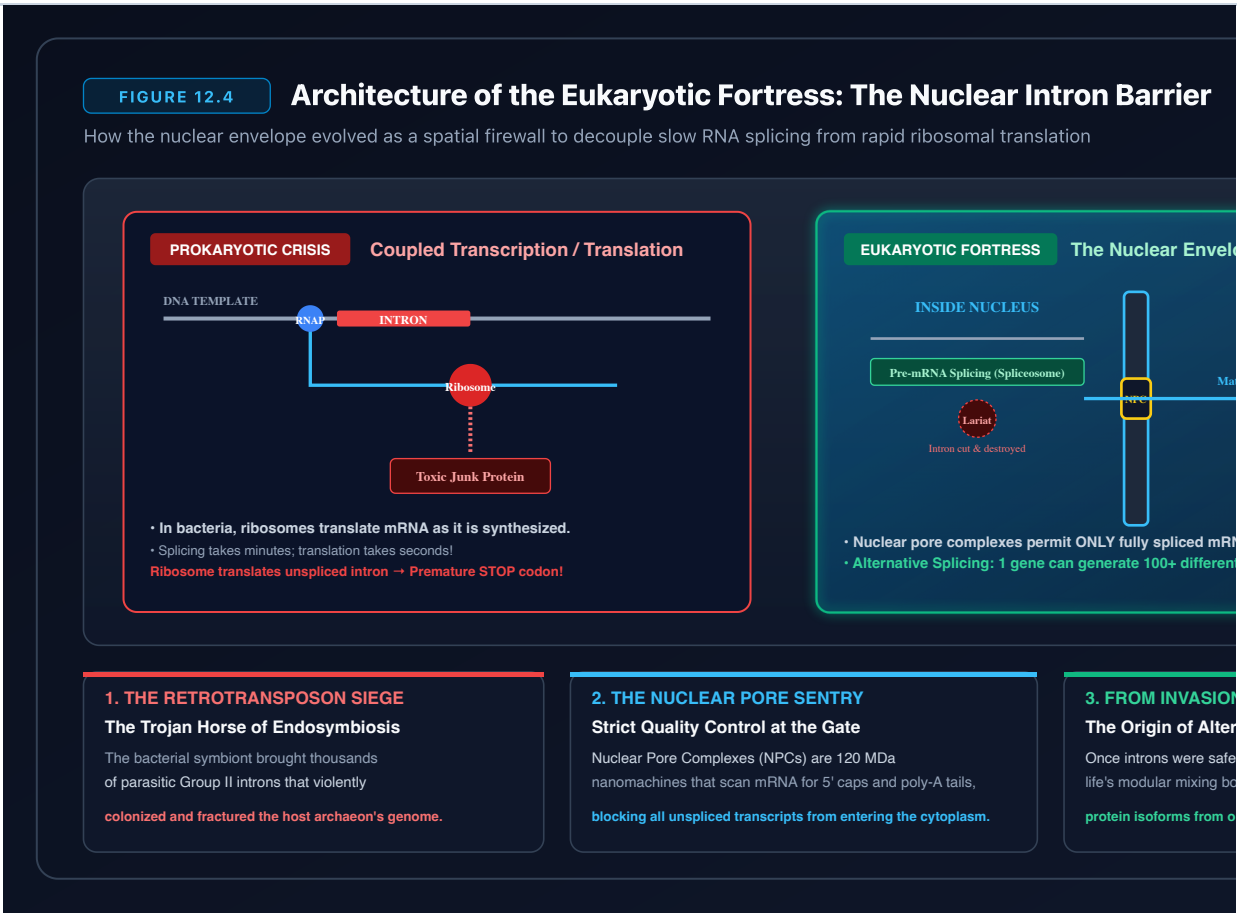
Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১২.উপ-২: প্রোটেরোজয়িক প্ল্যাঙ্কটন বিকিরণ: অ্যাক্রিটার্ক মাইক্রোফসিল (~১.৪–১.২ Ga)। মেসোপ্রোটেরোজয়িক সামুদ্রিক স্তরে সংরক্ষিত জৈব প্রাচীরযুক্ত জটিল এককোষী ইউক্যারিওট জীবাশ্ম: শাখান্বিত নলাকার প্রবর্ধন ও হ্যাস বা পাইলমযুক্ত ট্যাপানিয়া প্ল্যানা (Tappania plana), কাঁটাযুক্ত ডিকটিওস্ফিয়েরা (Dictyosphaera), এবং কেন্দ্রীভূত রেখাযুক্ত ভ্যালেরিয়া লোফোস্ট্রিয়াটা (Valeria lophostriata)—যা অ্যাকটিন সাইটোস্কেলটন ও নিয়ন্ত্রিত জীবনচক্রের সুস্পষ্ট প্রমাণ।

৩. গৌণ এন্ডোসিমবায়োসিস: সবুজ বিপ্লব

প্রায় ১.৫ বিলিয়ন বছর পূর্বে, মাইটোকনড্রিয়া সমৃদ্ধ একটি ইউক্যারিওট কোষ মুক্তজীবী সালোকসংশ্লেষী **সায়ানোব্যাকটেরিয়াকে** গ্রাস করে। তাকে হজম না করে কোষাঙ্গে রূপান্তরিত করা হয়: জন্ম নেয় **প্লাস্টিড (ক্লোরোপ্লাস্ট)**। এই একক ঘটনা থেকে জন্ম নেয় লাল শৈবাল, সবুজ শৈবাল এবং পৃথিবীর সমস্ত স্থলজ উদ্ভিদের পূর্বপুরুষরা।



চিত্র ১২.৪: ইউক্যারিওটিক দুর্গের স্থাপত্য: ইন্ট্রন ছাঁটাই এবং নিউক্লিয়ার পর্দা। প্রোক্যারিয়ট কোষে প্রতিলিপন ও প্রোটিন সংশ্লেষণ যুগপৎভাবে ঘটে: ডিএনএ থেকে মেসেঞ্জার আরএনএ কপি হওয়ার সাথে সাথেই রাইবোসোম প্রোটিন অনুবাদ শুরু করে। এন্ডোসিমবায়োটিক ব্যাকটিরিয়ার গ্রুপ-II ইন্ট্রন পোষকের জিন আক্রমণ করার পর এই দ্রুত ব্যবস্থা চরম বিপদে পড়ে: ধীরগতির আরএনএ স্প্লাইসিং রাইবোসোমের গতির সাথে পেরে না ওঠায় ত্রুটিপূর্ণ ধ্বংসাত্মক প্রোটিন তৈরি হতো। নিউক্লিয়ার ঝিল্লি একটি ভৌত প্রাচীর তৈরি করে ডিএনএকে আবদ্ধ করে, যাতে স্প্লাইসিওসোম নিরাপদে ইন্ট্রন কেটে বাদ দিতে পারে এবং কেবল নিখুঁতভাবে সম্পাদিত আরএনএ সাইটোপ্লাজমে পাঠায়।

যৌন প্রজননের সূচনা: মুলারের র‍্যাচেট থেকে মুক্তি

অযৌন প্রোক্যারিয়টিক প্রজননে একটি কোষ বিভাজিত হয়ে দুটি অভিন্ন ক্লোন তৈরি করে। যৌন প্রজননে দুটি সত্তা **মিয়োসিস (Meiosis)** প্রক্রিয়ায় ক্রোমোজোমের ক্রসিং-ওভার ঘটিয়ে তাদের অর্ধেক জিনগত তথ্য বিনিময় করে। আপাতদৃষ্টিতে যৌনতার একটি দ্বিগুণ খরচ রয়েছে (Twofold Cost of Sex): একজন স্ত্রী কেবল ৫০% জিন সন্তানে পাঠাতে পারেন এবং অর্ধেক সন্তান (পুরুষ) সরাসরি সন্তান প্রসব করতে অক্ষম।

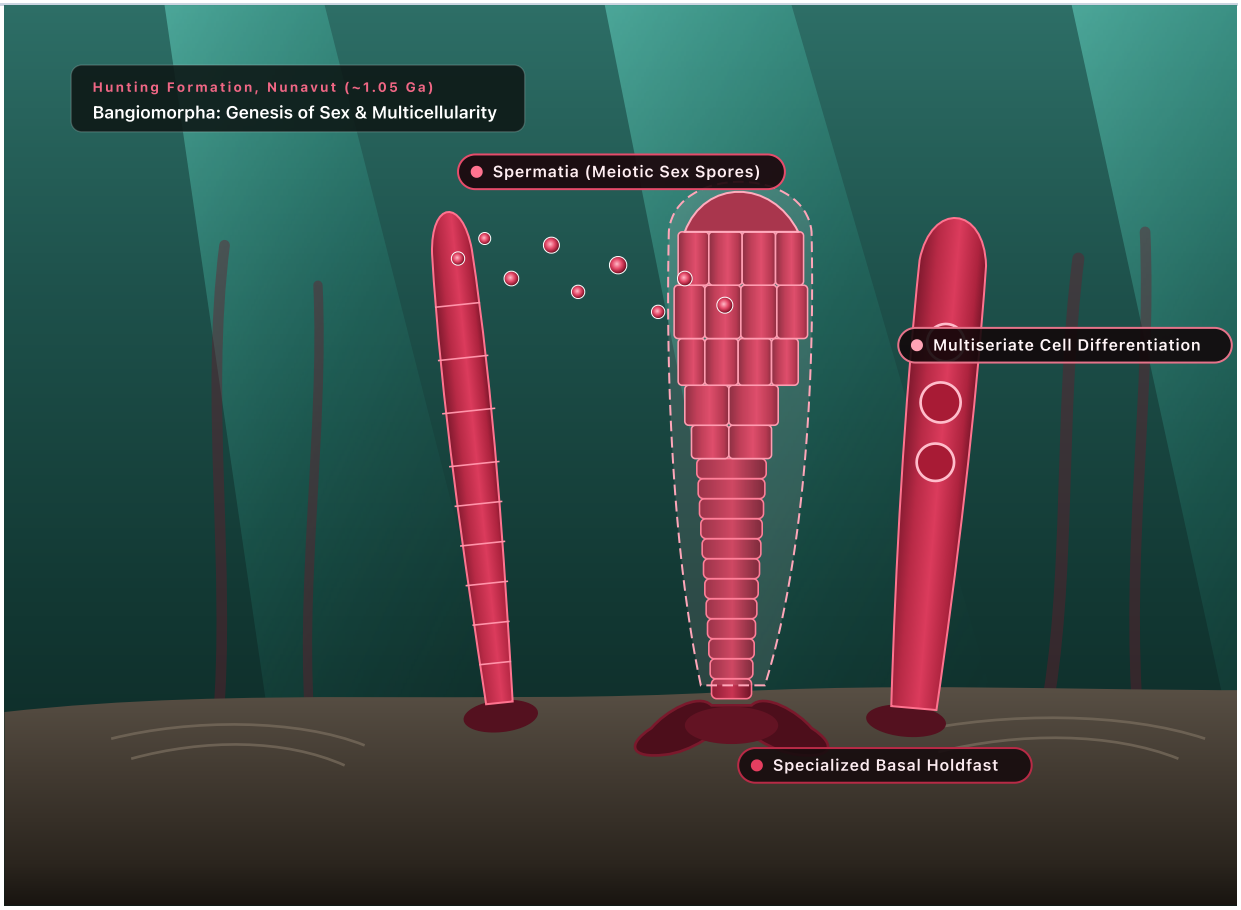
তা সত্ত্বেও কেন যৌন প্রজনন ইউক্যারিওটদের মধ্যে প্রায় সার্বজনীন রূপ ধারণ করল? উত্তর নিহিত রয়েছে পপুলেশন জেনেটিক্সে:

- **মুলারের র‍্যাচেট (Muller's Ratchet):** একটি অযৌন বংশধারায় ক্ষতিকর মিউটেশন কেবল জমতেই থাকে, যা কখনো পিছু হটে না। ফলে কালক্রমে মিউটেশনের চাপে প্রজাতিটি বিলুপ্ত হয়ে যায়। যৌন পুনর্মিলন জিনগুলোকে ওলটপালট করে ক্ষতিকর মিউটেশন ঝেড়ে ফেলে এবং মিউটেশনমুক্ত ক্রোমোজোম পুনর্গঠন করে।
- **রেড কুইন হাইপোথিসিস (The Red Queen Hypothesis):** *"একই স্থানে টিকে থাকতে হলে তোমাকে সমস্ত শক্তি দিয়ে দৌড়াতে হবে।"* পরজীবী ও রোগজীবাণু বহুকোষী পোষকের চেয়ে হাজার গুণ দ্রুত বিবর্তিত হয়। অযৌন ক্লোনগুলো একটি অপরিবর্তনশীল প্রতিরক্ষা ব্যবস্থা উপস্থাপন করে। যৌন প্রজনন প্রতিটি প্রজন্মে রোগ প্রতিরোধকারী অ্যালিলগুলো পুনর্বিন্যাস করে ক্ষতিকর মহামারীতে সমগ্র প্রজাতি বিলুপ্ত হওয়া থেকে বাঁচিয়ে রাখে।

প্রথম বহুকোষী পথিকৃৎ: বাঙ্গিমরফা পিউবেসেন্স (*Bangiomorpha pubescens*)

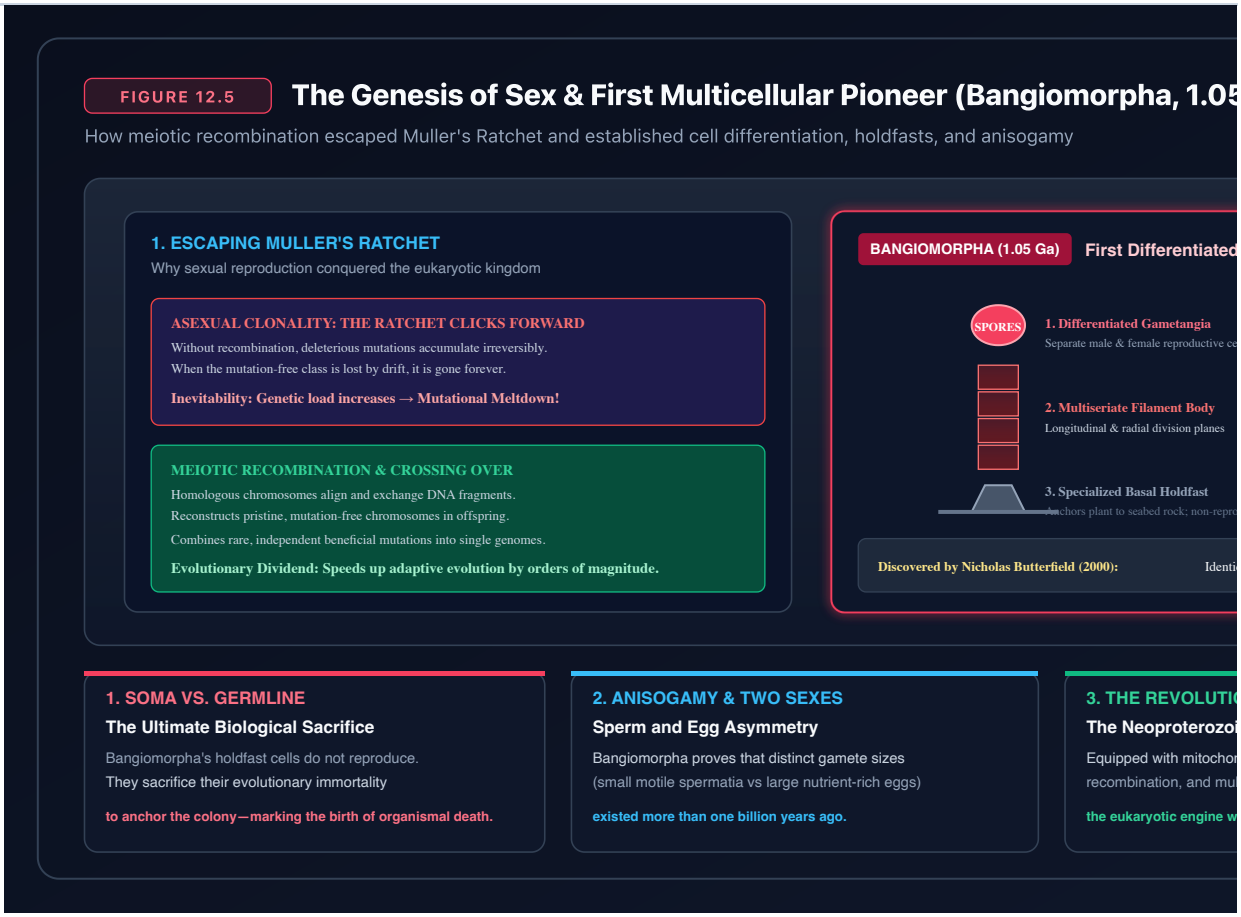
মধ্য-প্রোটেরোজয়িক যুগে (যেখানে ভূ-রাসায়নিক স্থবিরতার কারণে প্রায়শই একে "বোরিং বিলিয়ন" বলা হয়, ১.৮ থেকে ০.৮ Ga), মহাসাগরে এককোষী ইউক্যারিওটরা বৈচিত্র্যময় রূপ ধারণ করছিল। কানাডার আর্কটিক অঞ্চলের সামারসেট দ্বীপে প্রাপ্ত **১.০৫ বিলিয়ন বছর প্রাচীন বাঙ্গিমরফা পিউবেসেন্স** হলো ট্যাক্সোনমিকভাবে নিশ্চিত বিশ্বের প্রাচীনতম ম্যাক্রোস্কোপিক ইউক্যারিওট জীবাশ্ম।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১২.উপ-৩: বাঙ্গিমরফা পিউবেসেন্স — বহুকোষী জীবন ও যৌনতার আদি সূচনা (~১.০৫ Ga)। কানাডার আর্কটিক অঞ্চলের হান্টিং ফরমেশনের বিশ্বের প্রাচীনতম স্বীকৃত বহুকোষী ইউক্যারিওট লোহিত শৈবাল। স্ট্রোমাটোলাইট কার্বনেট শিলায় বিশেষায়িত ডিস্কয়েড হোল্ডফাস্টের সাহায্যে নোঙর করা এই শৈবাল একসারির ডিস্কয়েড কোষ থেকে বহুকোষী শাখায় রূপ নেয় এবং পুং শুক্রাণু (স্পার্মাটিয়া) ও স্ত্রী ডিম্বাণু (কার্পোগোনিয়া) উৎপাদনের মাধ্যমে মিয়োটিক যৌন প্রজননের সর্বপ্রথম জীবাশ্ম প্রমাণ উপস্থাপন করে।

বাঙ্গিমরফা একটি বহুকোষী লাল শৈবাল যা দুটি ঐতিহাসিক জৈবিক বিপ্লব ধারণ করে: **কোষীয় বিশেষায়ন** (দেহের সাধারণ কোষের পাশাপাশি পাথরে আটকে থাকার জন্য বিশেষায়িত নোঙর কোষ বা হোল্ডফাস্ট) এবং **প্রকৃত যৌন প্রজনন** (পুরুষ ও স্ত্রী স্পোর)। বহুকোষী কলার ভিত্তিপ্রস্তর—কোষীয় সংযুক্তি (ক্যাডহেরিন), আন্তঃকোষীয় যোগাযোগ (গ্যাপ জংশন) এবং বিকাশমূলক জিন নিয়ন্ত্রণ—অবশেষে নিখুঁতভাবে তৈরি হয়ে গেল।



চিত্র ১২.৫: যৌন প্রজননের জন্ম ও প্রথম বহুকোষী পথিকৃৎ (বাঙ্গিমরফা পিউবেসেন্স, ১.০৫ বিলিয়ন বছর)। অযৌন প্রজন্মে অনিবার্যভাবে মুলারের র‍্যাচেট (Muller's Ratchet) ঘটে—ক্ষতিকর মিউটেশনের ক্রমসঞ্চিত বোঝার কারণে জনসংখ্যা ধ্বংসের মুখে পড়ে। মিয়োটিক যৌন প্রজনন হোমোলোগাস ক্রোমোজোমে ক্রসিং-ওভারের মাধ্যমে ক্ষতিকর মিউটেশন দূর করে এই সংকট মেটায়। উত্তর কানাডার আর্কটিক চিলপাথরে নিকোলাস বাটারফিল্ড ১.০৫ বিলিয়ন বছর প্রাচীন বাঙ্গিমরফা পিউবেসেন্স আবিষ্কার করেন, যা বিশ্বের প্রাচীনতম বিশেষায়িত নোঙর-কোষ (দেহকোষ বা সোমা) এবং পুরুষ/স্ত্রী জননকোষের (গ্যামেট) সুস্পষ্ট প্রমাণ ধারণ করে।

প্রোক্যারিয়ট বনাম ইউক্যারিওট: জীবনের মহা বিভাজন

জৈবিক দিক	প্রোক্যারিয়ট (ব্যাকটেরিয়া ও আর্কিয়া)	ইউক্যারিওট (প্রাণী, উদ্ভিদ, ছত্রাক ও প্রোটিস্ট)
শক্তি উৎপাদন	বহিঃস্থ প্লাজমা ঝিল্লির মাধ্যমে; ক্ষেত্রফল দ্বারা সীমাবদ্ধ	অভ্যন্তরীণ শত শত মাইটোকনড্রিয়ার ক্রিস্টি ঝিল্লিতে
জিনপ্রতি শক্তি	ভিত্তিমান (১×)	**২০০,০০০ গুণ বেশি** বিপাকীয় উদ্বৃত্ত
জিনোমের গঠন	একক বৃত্তাকার ডিএনএ; ঘন সংবদ্ধ; ইন্ট্রনহীন	একাধিক রৈখিক ক্রোমোজোম; টেলোমিয়ার; জটিল স্প্লাইসিওসোমাল ইন্ট্রন
প্রকোষ্ঠায়ন	নিউক্লিয়াস নেই; প্রতিলিপন ও অনুবাদ যুগপৎ ঘটে	ঝিল্লিবেষ্টিত নিউক্লিয়াস, এন্ডোপ্লাজমিক রেটিকুলাম, গলগি বস্তু
সাইটোস্কেলটন ও চলন	দৃঢ় কোষপ্রাচীর; বহিরাগত ফ্ল্যাজেলা ঘূর্ণন মোটর	গতিশীল অ্যাকটিন/টিউবুলিন কাঠামো; ফ্যাগোসাইটোসিস; মোটর প্রোটিন
প্রজনন কৌশল	অযৌন দ্বি-বিভাজন; ল্যাটারাল জিন ট্রান্সফার	মিয়োটিক যৌন প্রজনন; হোমোলোগাস ক্রসিং-ওভার
আকার ও জটিলতার সীমা	কঠোরভাবে আণুবীক্ষণিক এককোষী বা সাধারণ ফিলামেন্ট	জটিল ম্যাক্রোস্কোপিক কলা, অঙ্গতন্ত্র এবং প্রাণী দেহ

ঝড়ের পূর্বাভাস: নিওপ্রোটেরোজয়িকের দ্বারপ্রান্তে

প্রায় ৮০০ মিলিয়ন বছর পূর্বে ইউক্যারিওটিক মঞ্চ পুরোপুরি প্রস্তুত হয়ে যায়: এককোষী ও সরল দলবদ্ধ ইউক্যারিওটরা মাইটোকনড্রিয়া, যৌন প্রজনন, জটিল জিনোম এবং কলা বিশেষায়নের অভ্যন্তরীণ যন্ত্রপাতি অর্জন করে ফেলেছিল। তবুও জীবাশ্ম রেকর্ডে বৃহৎ প্রাণীদের কোনো চিহ্ন ছিল না। কেন?

প্রতিবন্ধকটি আবারও ছিল ভূতাত্ত্বিক: বায়ুমণ্ডলে অক্সিজেনের মাত্রা আধুনিক স্তরের মাত্র ১% থেকে ৫%-এ স্থবির ছিল—যা এককোষীদের জন্য যথেষ্ট হলেও পুরু বহুস্তরবিশিষ্ট প্রাণী কলার ভেতরের কোষে অক্সিজেন ব্যাপনের জন্য ছিল মারাত্মকভাবে অপ্রতুল। প্রাণিজগতের বিবর্তনের সিংহদুয়ার ভেঙে ফেলতে পৃথিবীর প্রয়োজন ছিল আরও এক চূড়ান্ত বৈশ্বিক কম্পন।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত-এর **পর্ব ১৩**-তে পৃথিবী তার গভীরতম বরফ-ঘুমের অবসান ঘটিয়ে ফেটে পড়বে জৈবিক উদ্ভাবনের রঙিন উল্লাসে: **ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — তুষারগোলক পৃথিবীর গলন, দ্বিপাক্ষিক দেহের নীলনকশা এবং শীর্ষ শিকারীর রাজত্ব**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

- **Sagan, L. (Margulis) (1967).** “On the origin of mitosing cells.” *Journal of Theoretical Biology*, 14(3), 225–274. doi:10.1016/0022-5193(67)90079-3.
- **Lane, N., & Martin, W. (2010).** “The energetics of genome complexity.” *Nature*, 467, 929–936. doi:10.1038/nature09486.
- **Spang, A., et al. (2015).** “Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes.” *Nature*, 521, 173–179. doi:10.1038/nature14447.
- **Butterfield, N. J. (2000).** “Bangiomorpha pubescens n. gen., n. sp.: implications for the evolution of sex, multicellularity, and the radiation of eukaryotes.” *Paleobiology*, 26(3), 386–404. <a href="https://doi.org/10.1666/0094-8373(2000)0262.0.CO;2″ target=”_blank” rel=”noopener”>doi:10.1666/0094-8373(2000)0262.0.CO;2.
- **Maynard Smith, J. (1978).** *The Evolution of Sex*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521293020.
- **Van Valen, L. (1973).** “A new evolutionary law.” *Evolutionary Theory*, 1, 1–30.
- **Koonin, E. V. (2010).** “The origin and early evolution of eukaryotes in the light of phylogenomics.” *Genome Biology*, 11(5), 209. doi:10.1186/gb-2010-11-5-209.

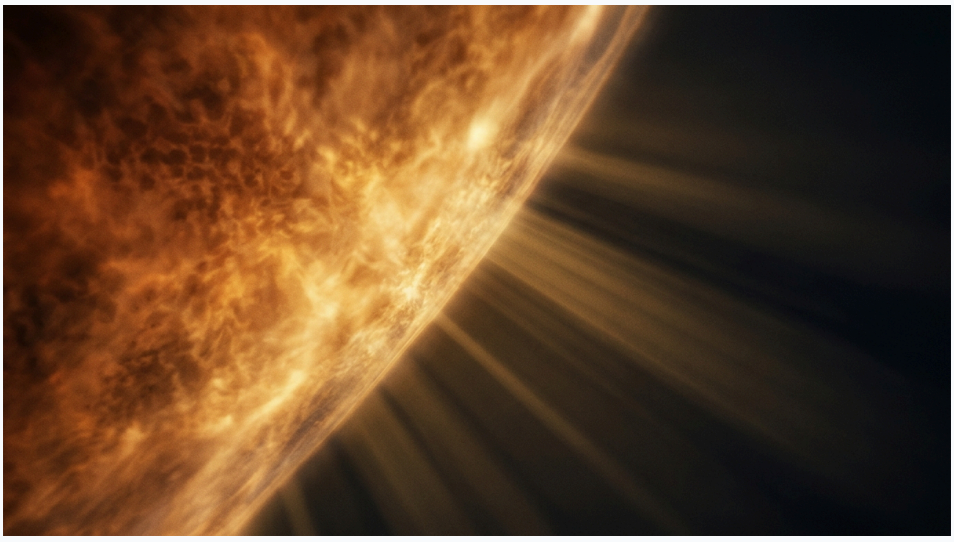
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "জটিলতার অভিমুখে উল্লম্ফন — এন্ডোসিমবায়োসিস, ইউক্যারিওট এবং কোষীয় বিশেষায়ন"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১২। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-12-the-leap-to-complexity-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • ত্রয়োদশ খণ্ড

ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — ট্রাইলোবাইট, শিকারী-শিকার যুদ্ধ এবং দ্বিপাক্ষিক দেহের পরিকল্পনা

ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — ট্রাইলোবাইট, শিকারী-শিকার যুদ্ধ এবং দ্বিপাক্ষিক দেহের পরিকল্পনা

1,893 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১৩: *চিত্র: ৫০৮ মিলিয়ন বছর আগের ক্যামব্রিয়ান বার্গেস শেল সমুদ্রতল: শক্ত খোলস, ট্রাইলোবাইটের চোখ এবং শিকারী অ্যানোম্যালোকারিস—হক্স জিনের নিয়ন্ত্রণে আধুনিক প্রাণীজগতের প্রায় সব প্রধান ফাইলামের একযোগে আত্মপ্রকাশ।*

তিন বিলিয়ন বছরেরও বেশি সময় ধরে পৃথিবীর প্রাণ ছিল এককোষী জীবাণু ও শান্ত অণুজীব গালিচার এক নীরব আণুবীক্ষণিক জগৎ। তারপর, ৫৪১ মিলিয়ন বছর পূর্বে বৈশ্বিক তুষারগোলক বরফযুগের হিমশীতল খাঁচা থেকে মুক্ত হয়ে জীবমণ্ডল এক অভূতপূর্ব বিবর্তনীয় বিস্ফোরণে ফেটে পড়ে, যা **ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ (Cambrian Explosion)** নামে খ্যাত। মাত্র দুই কোটি বছরের ভূতাত্ত্বিক চোখের পলকে আজকের অস্তিত্বশীল প্রতিটি প্রাণী পর্বের (phylum) মৌলিক শারীরিক নীলনকশা উদ্ভাবিত হয়ে যায়: পুঞ্জাক্ষী, ধারালো চোয়াল, সাঁজোয়া খোলস, খণ্ডায়িত শরীর এবং একটি নমনীয় পৃষ্ঠদেশীয় রজ্জু যা কালক্রমে মানুষের মেরুদণ্ডে পরিণত হবে।

ক্রায়োজেনিয়ান অগ্নিপরীক্ষা: মহা তুষারগোলকের মহা-গলন

৭২০ থেকে ৬৩৫ মিলিয়ন বছর পূর্বে রোডিনিয়া সুপারমহাদেশ ভেঙে পড়ে, যার ফলে ক্রান্তীয় অঞ্চলে হাজার হাজার মাইল দীর্ঘ তাজা ব্যাসাল্টিক উপকূল উন্মুক্ত হয়। রাসায়নিক আবহবিকারের মাধ্যমে বায়ুমণ্ডলের কার্বন ডাই-অক্সাইড দ্রুত সামুদ্রিক কার্বনেটে বন্দি হয়ে বিশ্বকে ভূতাত্ত্বিক ইতিহাসের দুটি গভীরতম বরফযুগে নিক্ষেপ করে: **স্টার্টিয়ান (৭১৭\text{–}৬৬০\text{ Ma})** এবং **মেরিনোয়ান (৬৪৫\text{–}৬৩৫\text{ Ma}) হিমায়ন**।

সাধারণ বরফযুগের বিপরীতে এগুলো ছিল প্রকৃত **তুষারগোলক পৃথিবী (Snowball Earth)** ঘটনা: মেরু থেকে নিরক্ষরেখা পর্যন্ত পুরো মহাসাগর কিলোমিটার পুরু বরফে ঢেকে গিয়েছিল। পৃথিবী পরিণত হয়েছিল এক অন্ধ, বরফাবৃত আয়নায়।

হিমবাহের পুষ্টি জোয়ার ও অক্সিজেনের স্ফীতি (Nutrient Flush & Oxygen Surge)
কোটি কোটি বছর ধরে মহাদেশীয় হিমবাহগুলো দানবীয় শিল্প চূর্ণকারকের মতো কাজ করে হাজার হাজার মিটার পাথুরে স্তর পিষে অতি-সূক্ষ্ম "গ্লাসিয়াল ময়দায়" পরিণত করেছিল। আগ্নেয়গিরির সঞ্চিত CO_2 গ্যাস যখন বায়ুমণ্ডলে তীব্র গ্রিনহাউস উত্তাপ তৈরি করে বরফ গলাতে শুরু করল, তখন এক প্রলয়ঙ্কর মহা-গলন সংঘটিত হলো।

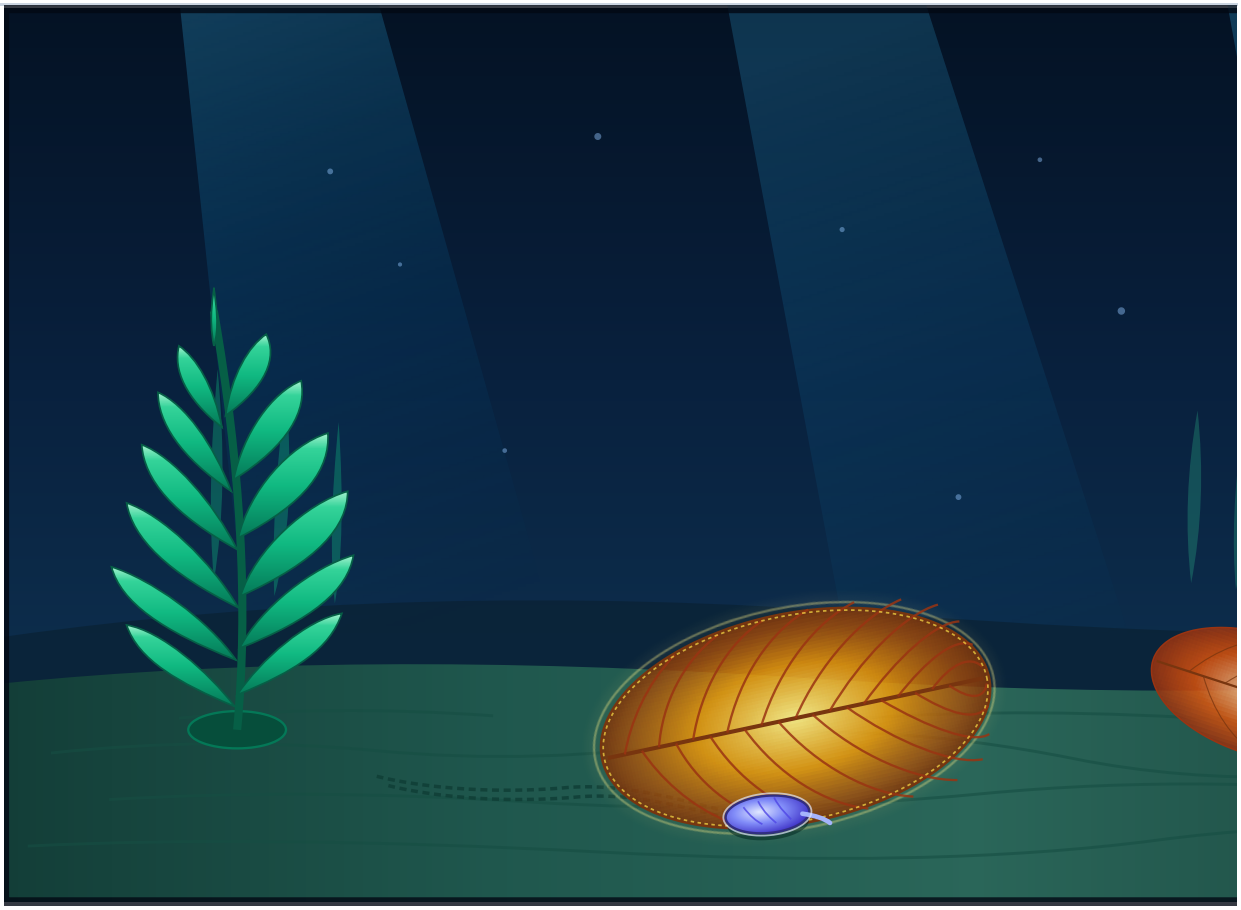
গলিত পানির তীব্র স্রোত ট্রিলিয়ন টন আবহবিকারজাত **ফসফরাস, ক্যালসিয়াম ও লোহা** উষ্ণ মহাসাগরে ভাসিয়ে দিল। এই বিপুল পুষ্টির বন্যায় সালোকসংশ্লেষী ইউক্যারিওটিক শৈবালের অতি-বিস্ফোরণ ঘটে, যা গিগাটন জৈব কার্বন মাটির নিচে চাপা ফেলে বায়ুমণ্ডলে **মুক্ত অক্সিজেনের মাত্রা বর্তমান স্তরের ১০% থেকে ২০%-এ উন্নীত করল**। পৃথিবীর ইতিহাসে এই প্রথমবার মহাসাগরে এত বিপুল পরিমাণ দ্রবীভূত অক্সিজেন প্রবেশ করল যা বৃহৎ প্রাণীদের কোলাজেন সংশ্লেষণ, পুরু কলার অভ্যন্তরে ব্যাপন এবং শক্তিশালী পেশীর শক্তি মেটাতে সক্ষম।

ইডিয়াকারান নিরীক্ষা (৫৭৫ থেকে ৫৪১ Ma): পতনের পূর্বের মখমল বাগান

মেরিনোয়ান গলনের পরপরই আত্মপ্রকাশ করে প্রথম ম্যাক্রোস্কোপিক বহুকোষী সম্প্রদায়: **ইডিয়াকারান বায়োটা (Ediacaran Biota)**, যা দক্ষিণ অস্ট্রেলিয়ার ইডিয়াকারা পাহাড় এবং নিউফাউন্ডল্যান্ডের মিসটেকেন পয়েন্টে প্রথম আবিষ্কৃত হয়।

ইডিয়াকারান পৃথিবী ছিল এক পরাবাস্তব ও শান্তিপূর্ণ জলের নিচের স্বর্গরাজ্য, যাকে অনেক সময় *"ইডিয়াকারার বাগান"* বলা হয়। নরম দেহের অদ্ভুত প্রাণীরা অণুজীবের গালিচায় শুয়ে থাকত বা নোঙর গেড়ে পাথরে আটকে থাকত:

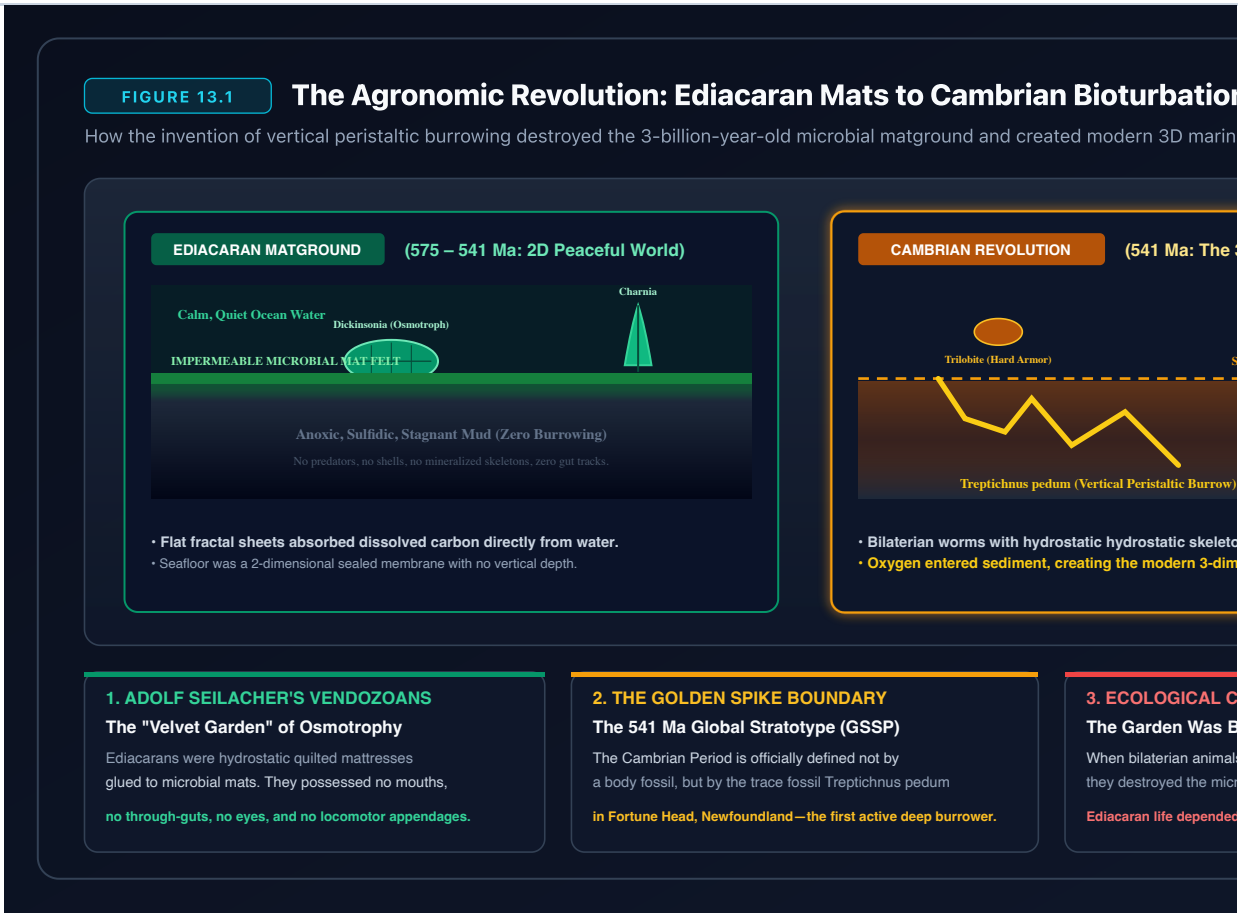
Shakil Mahmud • Research Monograph



সমুদ্রতলদেশীয় বাস্তুসংস্থান: ইডিয়াকারার মখমল বাগান (~৫৫০ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। দৃষ্টিশক্তি ও শিকারী প্রাণীদের উদ্ভবের পূর্বে শেষ নিওপ্রোটেরোজোয়িক সাগরের তলদেশ আবৃত ছিল ঘন অণুজীব গালিচায়। এই অক্ষত জৈব কার্পেটের ওপর শান্তভাবে শুয়ে ছিল কুশন-সদৃশ *ডিকিনসোনিয়া (Dickinsonia)* এবং ফ্র্যাক্টাল পাতার মতো *চার্নিয়া (Charnia)*, যারা নিষ্ক্রিয় ব্যাপন প্রক্রিয়ায় খাদ্য শোষণ করত; আর শামুক-সদৃশ *কিম্বেরেলা (Kimberella)* নরম গালিচায় চরার আদিম পদচিহ্ন রেখে যেত।

- **ডিকিনসোনিয়া (Dickinsonia):** এক মিটার পর্যন্ত চওড়া চ্যাপ্টা, কুশনের মতো গোলাকার জীব। ২০১৮ সালে রাশিয়ান বিজ্ঞানী ইলিয়া বরোভস্কির বায়োমার্কার পরীক্ষায় ডিকিনসোনিয়ার জীবাশ্মে **কোলেস্টেরয়েড অণু (কোলেস্টেরল)** শনাক্ত হয়—যা নিশ্চিত করে যে এই রহস্যময় প্রাণীগুলো ছিল প্রকৃত **বহুকোষী প্রাণী (Metazoa)**!
- **চার্নিয়া (Charnia):** পাতার মতো ফ্রন্ড-আকৃতির জীব, যা ফ্র্যাক্টাল নকশায় বিভক্ত হয়ে পানি থেকে সরাসরি দ্রবীভূত খাদ্য শোষণ করত।
- **কিম্বেরেলা (Kimberella):** শামুকের মতো দ্বিপাক্ষিক জীব, যা প্রোবোসিস দিয়ে সমুদ্রের তলদেশের অণুজীব গালিচা চেঁছে খেত—মলাস্কাদের এক প্রাচীন আত্মীয়।

তাৎপর্যপূর্ণভাবে, এই ইডিয়াকারান জগতে **কোনো শিকারী ছিল না, কোনো চোখ ছিল না, কোনো দাঁত ছিল না এবং কোনো শক্ত খনিজ কঙ্কাল ছিল না**। এটি ছিল শান্তিপূর্ণ ফিল্টার-ফিডার ও গালিচাভোজী প্রাণীদের এক শান্ত জগৎ। কিন্তু ৫৪১ মিলিয়ন বছর পূর্বে এই মখমলের বাগান সম্পূর্ণ ধ্বংস হয়ে যায়।



চিত্র ১৩.১: কৃষি বিপ্লব (Agronomic Revolution) এবং ইডিয়াকারান বাগানের পতন। ৫৪১ মিলিয়ন বছর পূর্বে সমুদ্রের তলদেশ ছিল শান্ত, দ্বিমাত্রিক অণুজীব গালিচা। ডিকিনসোনিয়া ও চার্নিয়ার মতো জীবেরা এই অভেদ্য জৈব গালিচার ওপর শান্তভাবে শুয়ে অক্সিজেনহীন গন্ধকময় কাদার ওপর থেকে নিষ্ক্রিয় অসমোট্রফিতে পুষ্টি শুষে নিত। ক্যামব্রিয়ান পর্বের শুরুতে দ্বিপাক্ষিক প্রাণীরা পেরিস্টাল্টিক উল্লম্ব গর্ত খনন (ট্রেপটিকনাস পেডাম) উদ্ভাবন করে। এই জীবখনন প্রাচীন গালিচাকে ছিন্নভিন্ন করে, পললের গভীরে অক্সিজেনযুক্ত পানি পাম্প করে এবং ত্রিমাত্রিক সামুদ্রিক বাস্তুতন্ত্র উন্মোচন করে।

ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ: জীববিজ্ঞানের বিগ ব্যাং

১৮৫৯ সালে চার্লস ডারউইন *On the Origin of Species*-এ স্বীকার করেছিলেন যে ক্যামব্রিয়ান স্তরের শুরুতে হঠাৎ করে শক্ত খোলসযুক্ত জটিল প্রাণীদের আত্মপ্রকাশ তাঁর ধারাবাহিক প্রাকৃতিক নির্বাচনের তত্ত্বের জন্য এক গুরুতর সংকট। গত এক শতাব্দীতে কানাডার **বার্গেস শেল (Burgess Shale)** এবং চীনের **চেংজিয়াং (Chengjiang)** জীবাশ্ম ভাণ্ডার ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণের রহস্য উন্মোচন করেছে:

১. বায়োখনিজায়ন: কঙ্কাল ও সাঁজোয়া বর্মের উদ্ভব

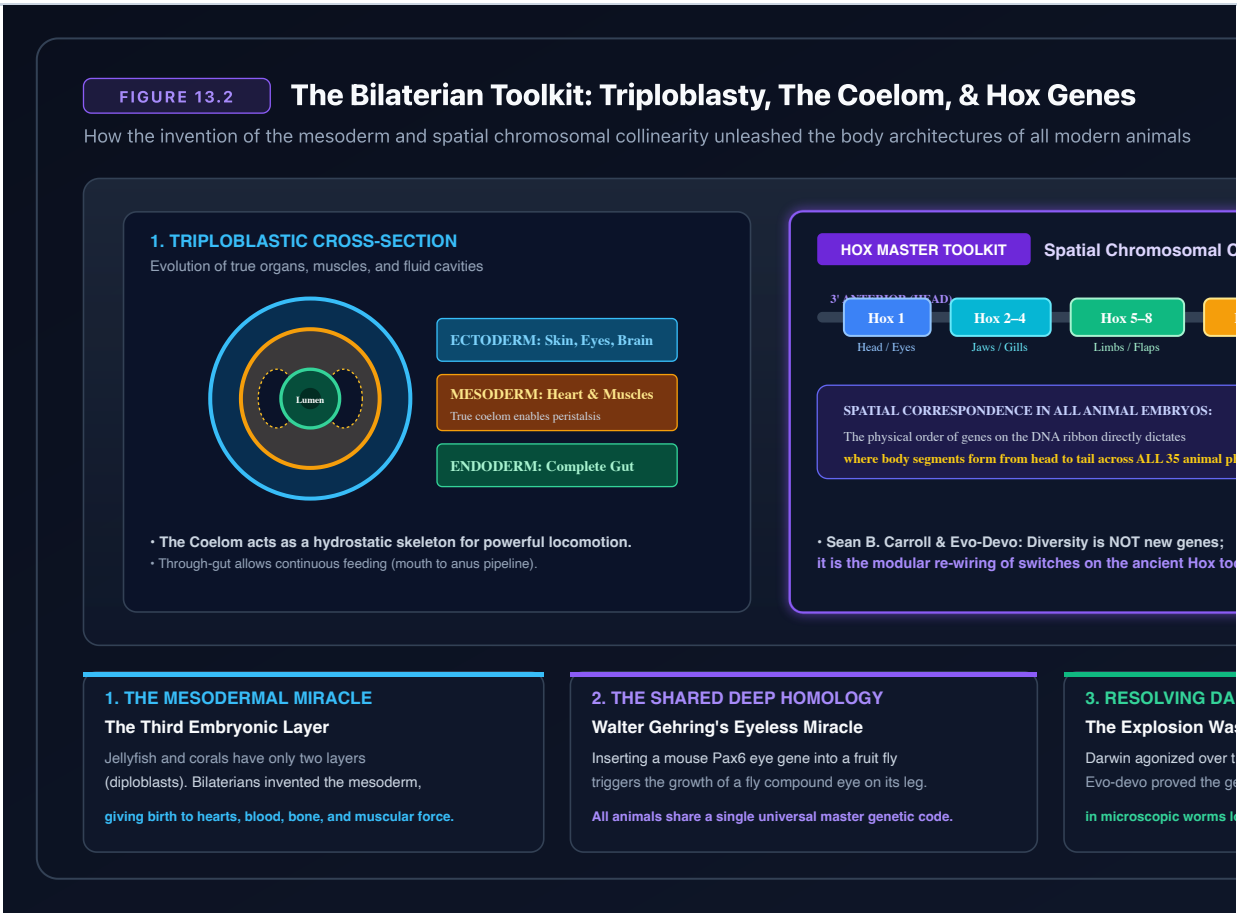
প্রায় ৫৪১ মিলিয়ন বছর পূর্বে প্রাণীরা দ্রবীভূত ক্যালসিয়াম, কার্বনেট এবং ফসফেট আয়নগুলোকে নিজেদের দেহে স্ফটিকাকারে জমা করার জিনগত কৌশল আবিষ্কার করে: **ক্যালসাইট** ($CaCO_3$) এবং **অ্যাপাটাইট** ($Ca_5(PO_4)_3OH$)। ক্ষুদ্র খোলসযুক্ত প্রাণীদের (Small Shelly Fauna) পর দ্রুতই আত্মপ্রকাশ করে সন্ধিপদীদের ক্যালসিফাইড বহিঃকঙ্কাল—জন্ম নেয় কিংবদন্তি **ট্রাইলোবাইট (Trilobites)**।

২. “লাইট সুইচ” অনুমান: দৃষ্টিশক্তির মহাবিপ্লব

২০০৩ সালে বিবর্তনীয় জীববিজ্ঞানী **অ্যান্ড্রু পার্কার** তাঁর বিখ্যাত *“লাইট সুইচ হাইপোথিসিস”* উপস্থাপন করেন। ক্যামব্রিয়ানের পূর্বে প্রাণীদের কোনো দৃশ্যমান প্রতিচ্ছবি তৈরির চোখ ছিল না; তারা রাসায়নিক ঘ্রাণ ও শারীরিক স্পর্শ দিয়ে পথ চলত। তারপর সন্ধিপদীদের আলোক-সংবেদী কোষ রূপান্তরিত হলো স্বচ্ছ ক্যালসাইট লেন্সযুক্ত **পুঞ্জাক্ষীতে (Compound eyes)**।

যে মুহূর্তে একটি প্রাণী কয়েক মিটার দূর থেকে অন্য প্রাণীকে দেখতে সক্ষম হলো, বিবর্তনের নিয়ম রাতারাতি বদলে গেল। চোখ বন্ধ করে থাকা মানেই মৃত্যু। দৃষ্টিশক্তি সূচনা করল পৃথিবীর প্রথম **শিকারী-শিকার যৌথ অস্ত্র প্রতিযোগিতা (arms race)**: শিকার প্রাণীদের উদ্ভাবন করতে হলো খোলস, আত্মগোপনকারী ছদ্মবেশ, বিষাক্ত কাঁটা ও কাদা খোঁড়ার কৌশল; আর শিকারীদের উদ্ভাবন করতে হলো দ্রুত সন্তরণ অঙ্গ, ধারালো নখ এবং ত্রিমাত্রিক দৃষ্টি।

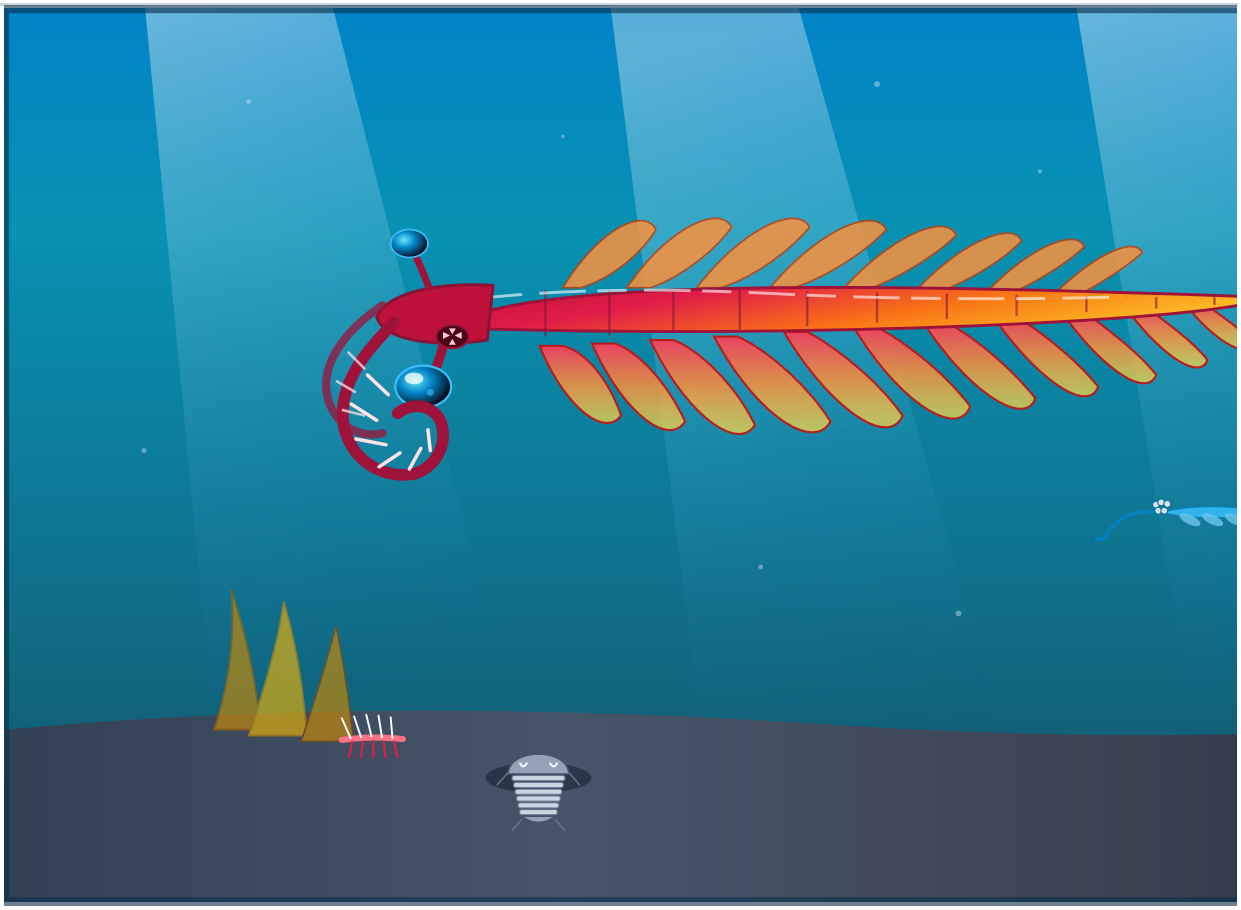
Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৩.২: দ্বিপাক্ষিক প্রাণীর জিনগত ও শারীরস্থানিক হাতিয়ার (Hox Toolkit)। প্রাণীর বৈচিত্র্যের এই বিস্ফোরণ কোনো নতুন জিনের আকস্মিক উৎপত্তির কারণে ঘটেনি; বরং তা ঘটেছিল যখন দ্বিপাক্ষিক প্রাণীরা ত্রি-স্তরীয় ভ্রূণীয় কলা (এক্টোডার্ম, এন্ডোডার্ম এবং পেশী গঠনকারী মেসোডার্ম ও সিলোম গহ্বর) এবং ক্রোমোজোমে সুবিন্যস্ত হবক্স (Hox) ট্রান্সক্রিপশন ফ্যাক্টরের সমন্বয় ঘটাল। ক্রোমোজোম বরাবর হবক্স জিনের ৩’ থেকে ৫’ ভৌত বিন্যাস ভ্রূণের মাথা থেকে লেজের অংশ নির্ধারণ করে; ফলে এই বিকাশমূলক সুইচের মডুলার পরিবর্তনের মাধ্যমেই একটি অভিন্ন জিনগত কাঠামো থেকে আধুনিক ৩৫টি প্রাণী পর্বের জন্ম হয়েছে।

গভীর সমুদ্রের দানব: ক্যামব্রিয়ান চিড়িয়াখানা

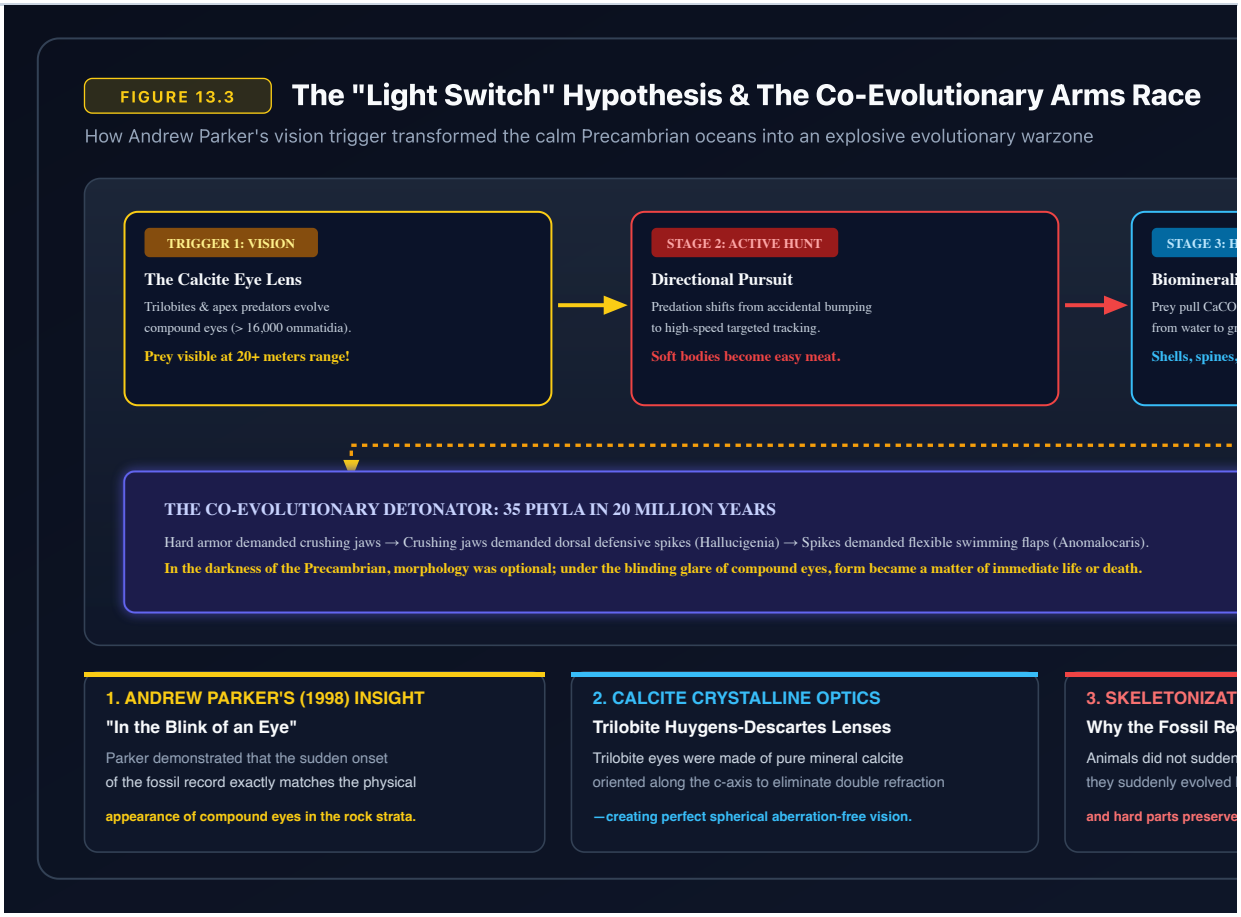
কানাডিয়ান রকি পর্বতের বার্গেস শেল জীবাশ্মস্তর এমন কিছু অদ্ভুত শারীরিক গঠনের সন্ধান দিয়েছে যা দেখতে ভিনগ্রহের প্রাণীর মতো মনে হয়:



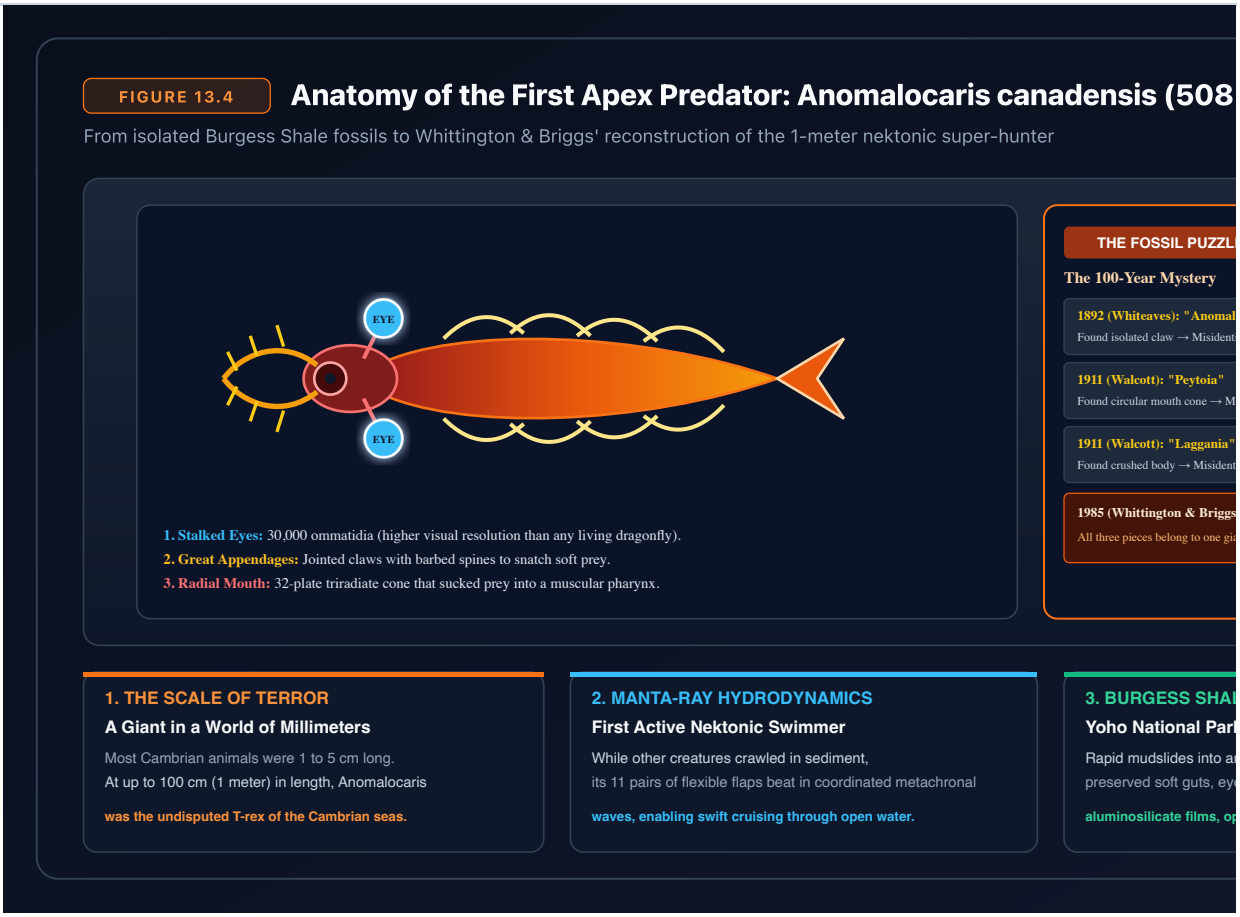
ক্যামব্রিয়ান প্রবালপ্রাচীরের শীর্ষ শিকারী: *অ্যানোম্যালোকারিস ক্যানাডেনসিস* (~৫০৮ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। বার্গেস শেল কাদা-তীরের ওপরের সূর্যালোকিত সমুদ্রজলে রাজত্ব করত পৃথিবীর আদিমতম সুপারপ্রেডেটর। দেহের দুই পাশের তরঙ্গায়িত সাঁতারের পাখনা এবং ১৬,০০০ লেন্সের পুঞ্জাক্ষী দিয়ে শিকার শনাক্ত করে সে সামনের কাঁটাযুক্ত সাঁড়াশি দিয়ে শিকার ধরে বৃত্তাকার করাত-সদৃশ মুখে পিষে ফেলত, যখন সমুদ্রের তলদেশে সাঁজোয়া ট্রাইলোবাইট ও *হ্যালুসিজেনিয়া* আত্মরক্ষায় লুকিয়ে থাকত।

- **অ্যানোম্যালোকারিস ক্যানাডেনসিস (Anomalocaris canadensis):** পৃথিবীর প্রথম **শীর্ষ শিকারী (Apex Predator)**। এক মিটার লম্বা এই প্রাণীটি পাশের সাঁতারের ফ্ল্যাপ নেড়ে দ্রুত সাঁতরাত, তার মাথায় ছিল ১৬,০০০ লেন্সের পুঞ্জাক্ষী, শিকার ধরার জন্য দুটি কণ্টকিত নখর এবং ডায়াফ্রামের মতো গোল করাতের মতো দাঁতযুক্ত ধারালো মুখ।
- **ওপাবিনিয়া (Opabinia regalis):** পাঁচটি বৃন্তযুক্ত চোখ এবং মুখের সামনে একটি দীর্ঘ নমনীয় শুঁড় বিশিষ্ট প্রাণী যার মাথায় ছিল শিকার ধরার সাঁড়াশি।
- **হ্যালুসিজেনিয়া (Hallucigenia sparsa):** পিঠের ওপর সাত জোড়া শক্ত ছুঁচালো কাঁটা এবং নিচে হেঁটে চলার জন্য নখযুক্ত কর্ষিকা বিশিষ্ট এক পরাবাস্তব কীট।
- **উইওয়াক্সিয়া (Wiwaxia corrugata):** খোলসের আঁশ ও দীর্ঘ প্রতিরক্ষামূলক তলোয়ারের মতো কাঁটায় ঢাকা শামুক-সদৃশ জীব।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৩.৩: অ্যান্ড্রু পার্কারের “লাইট সুইচ” অনুমান ও বিবর্তনীয় অস্ত্র প্রতিযোগিতা। ১৯৯৮ সালে প্রাণীবিজ্ঞানী অ্যান্ড্রু পার্কার প্রস্তাব করেন যে ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণের আকস্মিক স্ফুলিঙ্গ জ্বালিয়েছিল উচ্চ-ক্ষমতাসম্পন্ন দৃষ্টিশক্তির উদ্ভাবন। ট্রাইলোবাইট এবং রেডিওডন্টরা যখন স্ফটিকের মতো ক্যালসাইট লেন্সযুক্ত পুঞ্জাক্ষী (>১৬,০০০ ওমাটিডিয়া) উদ্ভাবন করল, তখন শিকার প্রক্রিয়া অন্ধ রাসায়নিক স্পর্শের বদলে কয়েক মিটার দূর থেকে দৃশ্যমান শিকারে পরিণত হলো। এটি একটি নিয়ন্ত্রণহীন ইতিবাচক ফিডব্যাক লুপের জন্ম দেয়: নরম দেহের শিকারদের খোলস, বর্ম ও কাঁটা উদ্ভাবন করতে বাধ্য করে, যা পরবর্তীতে শিকারীদের আরও বড় থাবা ও শক্তিশালী চোয়াল উদ্ভাবনে প্ররোচিত করে।

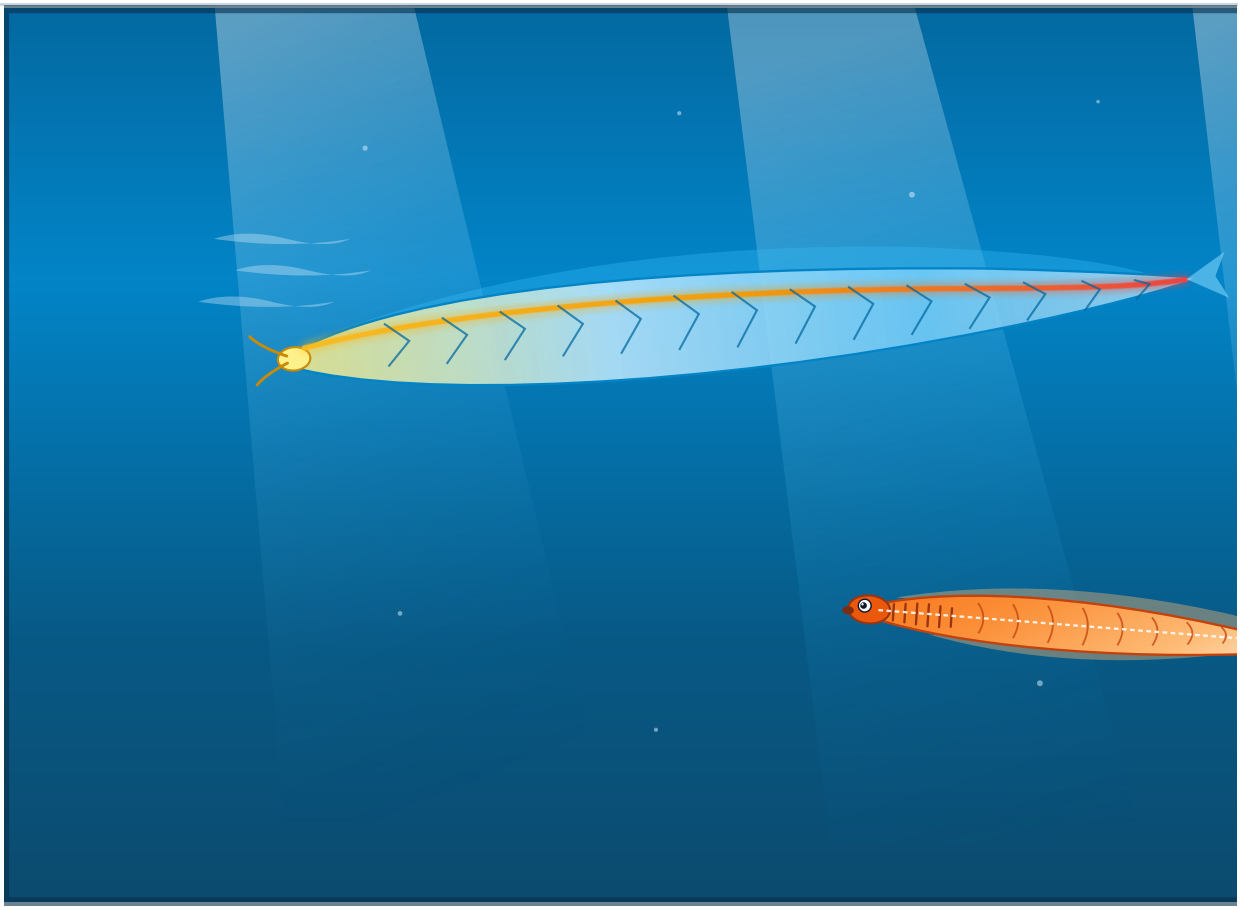


চিত্র ১৩.৪: পৃথিবীর প্রথম শীর্ষ শিকারী: অ্যানোম্যালোকারিস ক্যানাডেনসিস (Anomalocaris canadensis, ৫০৮ Ma)। কানাডার বার্গেস শেল থেকে পূর্বে ভুলক্রমে চিংড়ির লেজ, জেলিফিশ ও সি-কিউকাম্বার হিসেবে শনাক্ত হওয়া জীবাশ্ম জোড়া দিয়ে ১৯৮৫ সালে পুনর্গঠিত এই ১-মিটার দীর্ঘ প্রাণীটি ছিল এক অবিশ্বাস্য ত্রাস, যেখানে অন্য প্রাণীরা কদাচিৎ ৩ সেন্টিমিটার ছাড়াত। ৩০,০০০ ওমাটিডিয়ার বৃন্তযুক্ত চোখ, শিকার ধরার জন্য কণ্টকিত থাবা, ৩২-প্লেট বিশিষ্ট ত্রিকোণাকার নিষ্পেষণকারী মুখ এবং ১১ জোড়া সন্তরণ ফ্ল্যাপ নিয়ে এটি পৃথিবীর প্রথম আধুনিক খাদ্য পিরামিড তৈরি করেছিল।

পিকাইয়া ও হাইকুইক্থিস: মানুষের মেরুদণ্ডের আদি নীলনকশা

ক্যামব্রিয়ান সাগরের সাঁজোয়া সন্ধিপদী এবং দানবীয় শিকারীদের ভিড়ে সন্তরণরত ছিল মাত্র পাঁচ সেন্টিমিটার দীর্ঘ ফিতার মতো এক ক্ষুদ্র, বিনম্র প্রাণী: **পিকাইয়া গ্রাসিলেন্স (Pikaia gracilens)** এবং চীনের **হাইকুইক্থিস (Haikouichthys)**।

Shakil Mahmud • Research Monograph

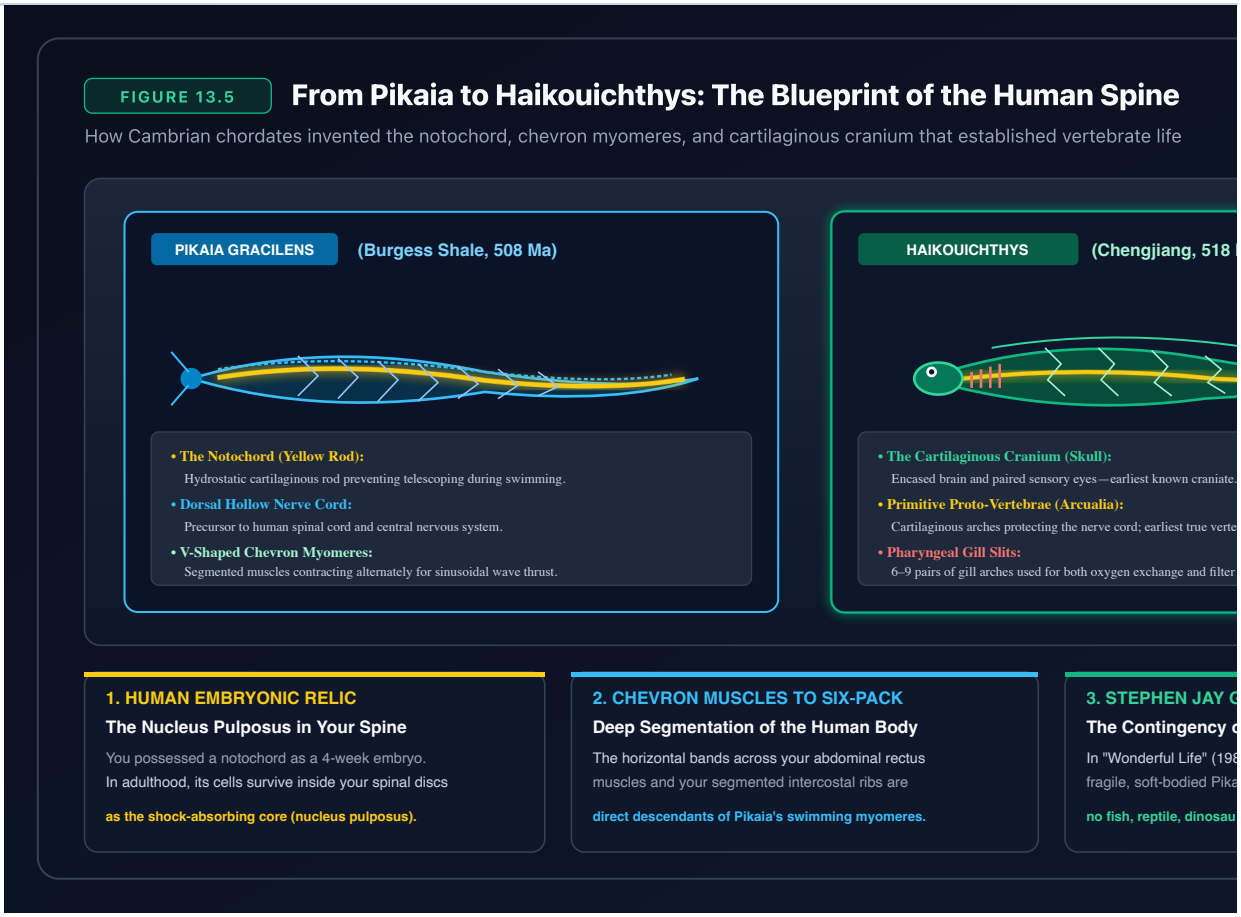


মেরুদণ্ডী প্রাণীদের আদি নীলনকশা: *পিকাইয়া* ও *হাইকুইক্থিস* (~৫১৮–৫০৫ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। সাঁজোয়া দানবদের সাগরে সন্তরণরত ক্ষুদ্র ফিতার মতো *পিকাইয়া গ্রাসিলেন্স* কর্ডাটা পর্বের বৈপ্লবিক রূপরেখা সূচনা করেছিল: স্থিতিস্থাপক নটোকর্ড, ফাঁপা স্নায়ুরজ্জু এবং V-আকৃতির পেশীখণ্ড (মায়োমের)। চীনের আদিম চোয়ালহীন মাছ *হাইকুইক্থিস*-এর তরুণাস্থিযুক্ত মাথার খুলি ও সরল চোখের সাথে মিলে এই বিনম্র সাঁতারুরাই রচনা করেছিল মানব মেরুদণ্ডের ৫০০ মিলিয়ন বছরের অবিচ্ছিন্ন আদি ইতিহাস।

কর্ডেট শারীরিক নীলনকশা (আমাদের সরাসরি পূর্বপুরুষ)
পিকাইয়া ও *হাইকুইক্থিস*-এর কোনো শক্ত খোলস বা ধারালো নখর ছিল না। কিন্তু তাদের শরীরে ছিল **কর্ডাটা (Chordata)** পর্বের যুগান্তকারী শারীরিক উদ্ভাবন:

- **নটোকর্ড (Notochord):** পিঠ বরাবর বিস্তৃত একটি নমনীয় স্থিতিস্থাপক রড যা পেশীর সংকোচনকে তরঙ্গে রূপ দিত—যা আজকের **কশেরুকা ও মেরুদণ্ডের** প্রত্যক্ষ পূর্বসূরি।
- **ডর্সাল নার্ভ কর্ড:** নটোকর্ডের ঠিক ওপরে অবস্থিত ফাঁপা স্নায়ুরজ্জু—যা **কেন্দ্রীয় স্নায়ুতন্ত্র, সুষুম্নাকাণ্ড এবং মস্তিষ্কের** আদি উৎস।
- **V-আকৃতির পেশীখণ্ড (মায়োমের):** যা সুন্দর ছন্দময় S-আকৃতির সাঁতার কাটতে সাহায্য করত।
- **গলবিলীয় ফুলকা ছিদ্র:** যা পরবর্তীতে জলজ শ্বসন এবং ডাঙার মেরুদণ্ডীদের চোয়াল ও কানের গঠনে রূপান্তরিত হয়েছে।

আজকের প্রতিটি মাছ, উভচর, সরীসৃপ, ডাইনোসর, পাখি, স্তন্যপায়ী প্রাণী এবং মানবজাতি তাদের স্নায়ুতন্ত্র ও হাড়ের কঙ্কালের নীলনকশা সরাসরি এই ক্ষুদ্র ক্যামব্রিয়ান সাঁতারুদের কাছ থেকেই উত্তরাধিকার সূত্রে পেয়েছে।



চিত্র ১৩.৫: পিকাইয়া থেকে হাইকুইক্থিস: মানুষের মেরুদণ্ডের আদিম নীলনকশা। শক্ত খোলসের সন্ধিপদীরা যখন ক্যামব্রিয়ান সাগরে রাজত্ব করছিল, তখন নরম দেহের বিনম্র কর্ডেটরা মেরুদণ্ডী দেহের ভিত্তি তৈরি করছিল। পিকাইয়া গ্রাসিলেন্স (৫০৮ Ma) স্থিতিস্থাপক পৃষ্ঠদেশীয় নটোকর্ড, ডর্সাল স্নায়ুরজ্জু এবং V-আকৃতির পেশী মায়োমের প্রবর্তন করে। চীনের চেংজিয়াং জীবাশ্মে হাইকুইক্থিস (৫১৮ Ma) বিশ্বের প্রাচীনতম তরুণাস্থিময় মাথার খুলি (ক্রেনিয়াম), যুগল ক্যামেরা চোখ এবং আদিম প্রোটো-কশেরুকা খিলান তৈরি করে—যা মানবজাতির প্রত্যক্ষ ৫০ কোটি বছরের প্রাচীন পূর্বপুরুষ।

ক্যামব্রিয়ান পর্বসমূহের শারীরস্থান: আধুনিক জীববিজ্ঞানের ভিত্তি

প্রাণী পর্ব (Phylum)	ক্যামব্রিয়ান উদাহরণ	প্রধান গাঠনিক উদ্ভাবন	আধুনিক বংশধর
আর্থ্রোপোডা (Arthropoda)	*ট্রাইলোবাইট, অ্যানোম্যালোকারিস, স্যাঙ্কটাকারিস*	কাইটিনময় বহিঃকঙ্কাল, খণ্ডায়িত উপাঙ্গ, পুঞ্জাক্ষী।	পতঙ্গ, মাকড়সা, কাঁকড়া, চিংড়ি, বিচ্ছু (প্রাণী প্রজাতির ৮০%)।
কর্ডাটা (Chordata)	*পিকাইয়া, হাইকুইক্থিস, মেটাস্প্রিগিনা*	নটোকর্ড, পৃষ্ঠীয় স্নায়ুরজ্জু, মায়োমের, দ্বিপার্শ্বিক শিরোস্তম্ভ।	মাছ, উভচর, সরীসৃপ, পাখি, স্তন্যপায়ী, মানুষ।
মলাস্কা (Mollusca)	*কিম্বেরেলা, উইওয়াক্সিয়া, নেক্টোকারিস*	পেশীবহুল পদ, ম্যান্টল পর্দা, র‍্যাডুলা দাঁত, চুনযুক্ত খোলস।	অক্টোপাস, স্কুইড, শামুক, ঝিনুক।
একাইনোডার্মাটা (Echinodermata)	*গোজিয়া, হেলিকোপ্লাকাস*	পঞ্চ-অরীয় প্রতিসাম্য, পানি সংবহন তন্ত্র, ক্যালসাইট অন্তঃকঙ্কাল।	তারা মাছ, সি-আর্চিন, স্যান্ড ডলার, সি-কিউকাম্বার।
অ্যানিলিডা (Annelida)	*ক্যানাডিয়া, বার্গেসোচিটা*	প্রকৃত মেটামেরিক খণ্ডায়ন, তরলপূর্ণ সিলোম গহ্বর, প্যারাপোডিয়া।	কেঁচো, জোঁক, সামুদ্রিক পলিকিট কৃমি।
নিডারিয়া (Cnidaria)	*থমাস্টিলন, প্রাচীন প্রবাল*	অরীয় প্রতিসাম্য, বিষাক্ত নেমাটোসিস্ট কোষ, বিস্তৃত স্নায়ুজাল।	জেলিফিশ, সি-অ্যানিমোন, প্রবাল প্রাচীর।

চূড়ান্ত রায়: সমুদ্রের পূর্ণাঙ্গ বিজয়

ক্যামব্রিয়ান যুগের সমাপ্তির সময় (প্রায় ৪৮৫ মিলিয়ন বছর পূর্বে), পৃথিবীর জৈবিক মঞ্চ চিরতরে স্থির হয়ে যায়। প্রাণী জীবনের মূল ভিত্তিগুলো—দ্বিপার্শ্বিক প্রতিসাম্য, বিশেষায়িত সংবেদী অঙ্গ, পরিপাকতন্ত্র, রক্ত সংবহন এবং কেন্দ্রীয় মস্তিষ্ক—নিখুঁতভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়ে গিয়েছিল।

তবুও, যখন সমুদ্র চোয়ালহীন মাছ, দানবীয় নটিলাস এবং সাঁতারু ট্রাইলোবাইটে পরিপূর্ণ ছিল, মহাদেশগুলো তখনও ছিল মৃত, শুষ্ক ও নিষ্ফলা পাথুরে মরুভূমি—যেখানে কোনো মাটি, গাছপালা বা পায়ের ছাপ ছিল না। ডাঙা জয় করার জন্য জীবনকে তখন মহাকর্ষীয় ভার, পানিশূন্যতা এবং তীব্র সৌর বিকিরণের প্রাণঘাতী বাধাগুলো অতিক্রম করতে হবে।

মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত-এর **পর্ব ১৪**-তে আমরা ঢেউ ছেড়ে ডাঙায় উঠে আসা প্রাণের অভিযাত্রাকে অনুসরণ করব: **ডাঙার বিজয় — আদিম অরণ্য, সন্ধিপদী অভিযাত্রী এবং টেট্রাপড বিপ্লব**।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

- **Hoffman, P. F., & Schrag, D. P. (2002).** “The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change.” *Terra Nova*, 14(3), 129–155. doi:10.1046/j.1365-3121.2002.00408.x.

Shakil Mahmud • Research Monograph

- **Bobrovskiy, I., et al. (2018).** “Ancient steroids establish the Ediacaran fossil Dickinsonia as one of the earliest animals.” *Science*, 361(6408), 1246–1249. doi:10.1126/science.aat7228.
- **Gould, S. J. (1989).** *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W. W. Norton & Company. ISBN: 978-0393027051.
- **Parker, A. (2003).** *In the Blink of an Eye: How Vision Sparked the Big Bang of Evolution*. Basic Books. ISBN: 978-0738206073.
- **Shu, D. G., et al. (1999).** “Lower Cambrian vertebrates from south China.” *Nature*, 402, 42–46. doi:10.1038/46965.
- **Erwin, D. H., et al. (2011).** “The Cambrian Conundrum: Early Divergence and Later Ecological Success in the Early History of Animals.” *Science*, 334(6059), 1091–1097. doi:10.1126/science.1206375.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "ক্যামব্রিয়ান বিস্ফোরণ — ট্রাইলোবাইট, শিকারী-শিকার যুদ্ধ এবং দ্বিপার্শ্বিক দেহের পরিকল্পনা"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৩। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-13-the-cambrian-crucible-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • চতুর্দশ খণ্ড

ডাঙার বিজয় — সিলুরিয়ান উদ্ভিদ, টেট্রাপড এবং অ্যামনিওটিক ডিম

ডাঙার বিজয় — সিলুরিয়ান উদ্ভিদ, টেট্রাপড এবং অ্যামনিওটিক ডিম

2,198 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১৪: *চিত্র: লেট ডেভোনিয়ান যুগে ডাঙা বিজয়ের দৃশ্য (~৩৭৫ মিলিয়ন বছর আগে): পাখনাযুক্ত সারকোপ্টেরিজিয়ান টেট্রাপড (টিকটালিক) আদিম আর্কিওপ্টেরিস উদ্ভিদের বনাঞ্চল ঘেঁষে পানি থেকে ডাঙায় উঠে আসছে।*

তিন বিলিয়ন বছরেরও বেশি সময় ধরে পৃথিবীর মহাদেশগুলো ছিল মঙ্গল গ্রহের মতোই বন্ধ্যা ও বৈরী। যখন মহাসাগরগুলোতে ট্রাইলোবাইট, সেফালোপড এবং চোয়ালযুক্ত প্লাকোডার্ম মাছের রাজত্ব চলছিল, তখন ডাঙার শিলাস্তর জ্বলছিল অবরুদ্ধ সৌর বিকিরণে, ধুয়ে যাচ্ছিল অ্যাসিড বৃষ্টিতে এবং সেখানে কোনো জৈব পদার্থের অস্তিত্ব ছিল না। শুষ্ক জমিতে প্রাণের পদার্পণ কোনো উৎসবমুখর ভ্রমণ ছিল না; এটি ছিল এক ভয়াবহ জৈবিক সংগ্রাম—যার জন্য প্রয়োজন ছিল গাঠনিক পলিমার তৈরি, পানিনিরোধক আবরণ উদ্ভাবন, বায়বীয় অক্সিজেন গ্রহণের জন্য ফুসফুসীয় নবরূপায়ণ এবং পাখনার হাড়কে ভারবাহী শক্তিশালী অঙ্গে রূপান্তরের এক অভূতপূর্ব প্রকৌশল।

১. বন্ধ্যা মহাদেশ ও অপুষ্পক পথিকৃৎ (~৪৭০ থেকে ৪২০ Ma)

প্রারম্ভিক প্যালিওজোয়িক যুগে স্থলভাগ ছিল গ্রানাইট শিলা, ব্যাসাল্টিক ধ্বংসাবশেষ ও চূর্ণ সিলিকেটের এক ভিনগ্রহের মতো প্রান্তর। সিলুরিয়ান পর্বের পূর্বে যে কোনো প্রাণী বা উদ্ভিদ জলজ পরিবেশ থেকে বাইরে আসতেই তাৎক্ষণিক পানিশূন্যতা, মহাকর্ষীয় টানে দেহের পতন এবং সৌর অতিবেগুনী (UVB) রশ্মির প্রভাবে মারাত্মক জিনগত ক্ষতির সম্মুখীন হতো।

এই সুরক্ষাকবচ তৈরি করেছিল সামুদ্রিক সায়ানোব্যাকটেরিয়া ও শৈবাল, যাদের সালোকসংশ্লেষণে নিঃসৃত অক্সিজেন স্ট্র্যাটোস্ফিয়ারে পুঞ্জীভূত হচ্ছিল। অতিবেগুনী রশ্মির সংস্পর্শে ($\lambda < ২৪০\text{ nm}$) আণবিক অক্সিজেন ভেঙে তৈরি করল ওজোন স্তর:

$$\mathrm{O_2} + h\nu \longrightarrow ২\mathrm{O}$$

$$\mathrm{O} + \mathrm{O_2} + \mathrm{M} \longrightarrow \mathrm{O_3} + \mathrm{M}$$

মধ্য অর্ডোভিসিয়ান পর্বে (~৪৭০ Ma) ওজোন স্তর পর্যাপ্ত ঘনত্বে পৌঁছালে ক্ষতিকর UVB রশ্মি অবরুদ্ধ হয় এবং উপকূলীয় মোহনায় জীবনের পথ উন্মোচিত হয়। প্রথম উপনিবেশকারী ছিল ব্রায়োফাইট-সদৃশ অপুষ্পক মস ও লিভারওয়ার্ট। শিকড়, পাতা বা সংবহনতন্ত্রহীন এই আদিম উদ্ভিদগুলো জৈব অ্যাসিড নিঃসরণ করে শিলার ভূ-রাসায়নিক আবহবিকার ঘটায়। মাটি থেকে ফসফরাস, পটাসিয়াম ও ম্যাগনেসিয়াম আহরণ করে তারা পৃথিবীর প্রথম প্রকৃত মাটি (পেডোজেনেসিস) তৈরি করল এবং বায়ুমণ্ডলের কার্বন ডাই-অক্সাইড বন্দি করে গ্রহকে এক স্বল্পস্থায়ী বরফযুগে নিয়ে গেল।

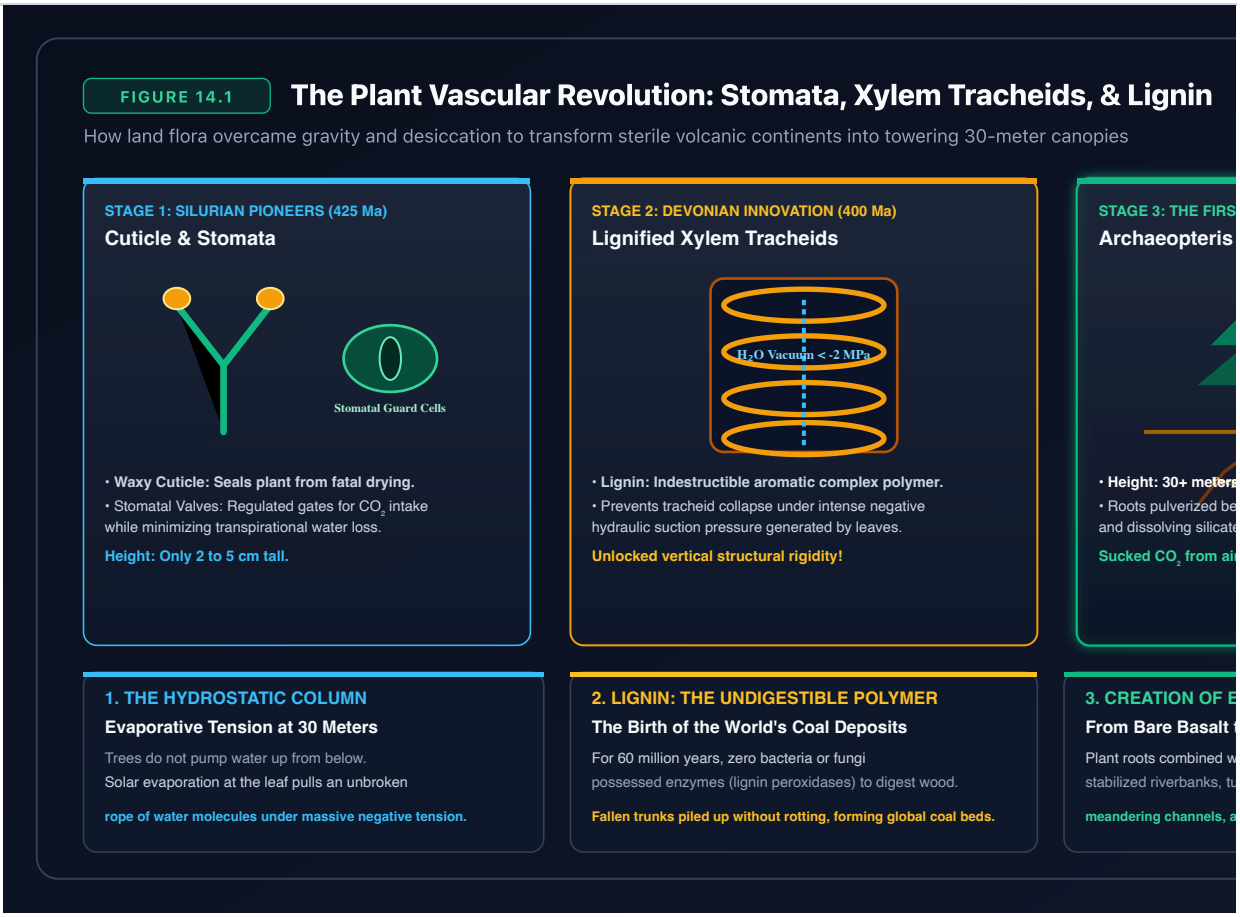
স্পোরোপোলেনিনের যুগান্তকারী উদ্ভাবন

আদিম স্থলজ উদ্ভিদের সবচেয়ে বড় প্রাণরাসায়নিক বিজয় ছিল **স্পোরোপোলেনিন (sporopollenin)** সংশ্লেষণ—ফ্যাটি অ্যাসিড ও ফেনলিক যৌগ দ্বারা গঠিত এক অবিশ্বাস্য জৈব পলিমার। ব্যাকটেরিয়ার এনজাইম বা রাসায়নিক ক্ষয় যাকে স্পর্শ করতে পারে না, সেই অবিনশ্বর স্পোরোপোলেনিন উদ্ভিদের রেণুকে একটি পানিনিরোধক খোলসে বন্দি করে শুষ্ক বাতাসের ওপর দিয়ে বংশগতির তথ্য নিরাপদে উড়িয়ে নিয়ে যাওয়ার পথ সুগম করে দিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



জীবাশ্ম উদ্ভিদবিজ্ঞান: সিলুরিয়ান উপকূলে প্রথম পথপ্রদর্শক উদ্ভিদ (~৪৩০ Ma)। পাতাশূন্য, দ্বিশাখায় বিভক্ত মাত্র কয়েক সেন্টিমিটার লম্বা *কুকসোনিয়া (Cooksonia)* লাল বালুকা পাথরের জলাশয়ের ধারে জেগে উঠছে। এদের অগ্রভাগে রয়েছে তূরী-সদৃশ স্পোরাঞ্জিয়া এবং বীজকণা সুরক্ষিত ছিল অবিনশ্বর স্পোরোপোলেনিন বর্মে। এই ক্ষুদ্রাকার পথিকৃৎদের হাত ধরেই বন্ধ্যা শিলাময় মহাদেশগুলোতে প্রথম উদ্ভিদের সবুজ পদযাত্রা সূচিত হয়েছিল।



চিত্র ১৪.১: উদ্ভিদের সংবহন বিপ্লব: পত্ররন্ধ্র, জাইলেম ট্র্যাকিড এবং লিগনিন। শুষ্ক ডাঙা জয়ের জন্য দুটি অস্তিত্ব সংকটের সমাধান প্রয়োজন ছিল: পানিশূন্যতা এবং মহাকর্ষের কারণে দেহের পতন। সিলুরিয়ান পথিকৃৎ কুকসোনিয়া (৪২৫ Ma) মোমের কিউটিকল ও পত্ররন্ধ্র (stomata) উদ্ভাবন করে পানির অপচয় রোধ করল। ডেভোনিয়ান পর্বে উদ্ভিদ লিগনিন সংশ্লেষ করল—একটি অ্যারোমেটিক পলিমার যা সেলুলোজ প্রাচীরকে সুদৃঢ় করে জাইলেম নালীর ভেতরের বিপুল ঋণাত্মক চাপ সহ্য করতে সক্ষম করে এবং ৩০ মিটার উঁচুতে পানি তুলে পৃথিবীর প্রথম প্রকৃত অরণ্য (আর্কিওপটেরিস) সৃষ্টি করে।

২. সংবহন বিপ্লব ও মহৎ ডেভোনিয়ান অরণ্য (~৪২০ থেকে ৩৫৯ Ma)

ব্রায়োফাইটরা ভেজা পাথরের গায়ে কয়েক মিলিমিটারের বেশি বাড়তে পারত না, কারণ তারা কেবল ব্যাপন প্রক্রিয়ায় পানি শোষণ করত। কিন্তু লেট সিলুরিয়ান ও ডেভোনিয়ান পর্বে প্রকৃত সংবহন নালীযুক্ত উদ্ভিদ বা **ট্র্যাকিওফাইটের (tracheophytes)** আত্মপ্রকাশ ঘটল। এই বিবর্তন দুটি মৌলিক আবিষ্কারের ওপর নির্ভরশীল ছিল:

1. **জাইলেম ও ফ্লোয়েম:** মৃত ও ফাঁপা ট্র্যাকিড কোষ দ্বারা গঠিত নালী যা প্রস্বেদন টানের মাধ্যমে মূল থেকে পানি ও খনিজ লবণ ওপরে তোলে এবং ফ্লোয়েম নল যা পাতায় তৈরি শর্করা নিচে পরিবহন করে।
2. **লিগনিন (Lignin):** জটিল অ্যারোমেটিক ফেনিলপ্রোপেন শৃঙ্খলযুক্ত এক রাসায়নিক ম্যাক্রোমলিকিউল। সেলুলোজ প্রাচীরের সাথে লিগনিন সংযুক্ত করে সংবহন নালীগুলো মহাকর্ষীয় টান উপেক্ষা করে খাড়া হয়ে দাঁড়ানোর মতো অপরিসীম কাঠামোগত শক্তি অর্জন করে এবং সূর্যালোক দখলের দৌড়ে আকাশে মাথা তুলে দাঁড়ায়।

লেট ডেভোনিয়ান পর্বে (~৩৮০ Ma) বিশ্ব রূপান্তরিত হলো **আর্কিওপটেরিস (Archaeopteris)**-এর সুউচ্চ বনে—যা ছিল প্রথম আধুনিক বৃক্ষ। এদের গভীর শিকড় শিলার গভীরে প্রবেশ করে রাসায়নিক আবহবিকারের হার সাত গুণ বাড়িয়ে দিল। ক্যালসিয়াম ও ম্যাগনেসিয়াম আয়নগুলি সাগরে গিয়ে কার্বনেট শিলা হিসেবে জমা হলো এবং বায়ুমণ্ডল থেকে হাজার হাজার গিগাটন CO_2 শুষে নিল:

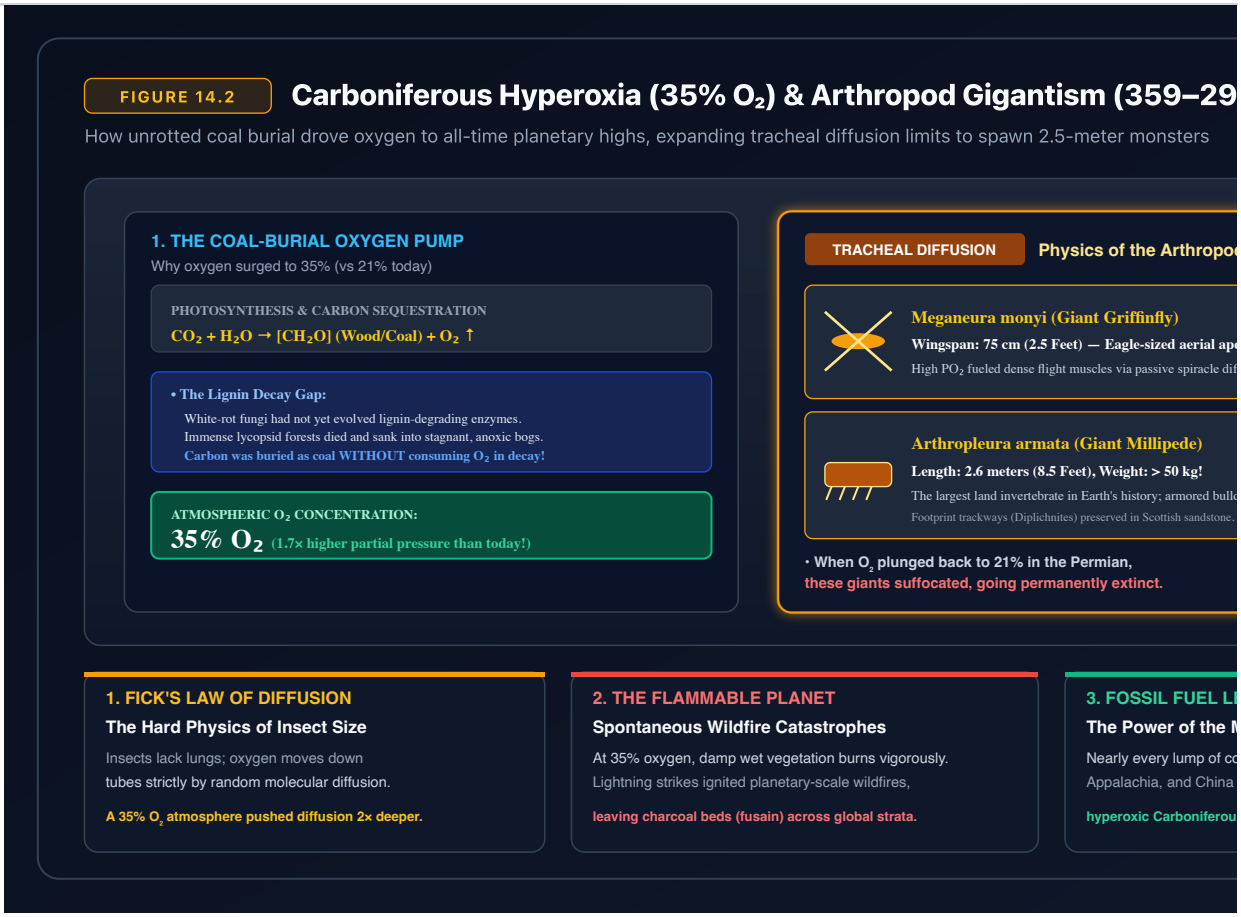
Shakil Mahmud • Research Monograph



বাস্তুতান্ত্রিক বিপ্লব: আর্কিওপটেরিস-এর মহৎ ডেভোনিয়ান অরণ্য (~৩৭০ Ma)। ৩০ মিটার উঁচু এই আদিম বৃক্ষগুলো পৃথিবীর ভূতত্ত্বকে আমূল বদলে দিয়েছিল। উন্মুক্ত নদীতীরের এই দৃশ্যে তাদের বিশাল কাঠের শিকড় ভূগর্ভস্থ শিলা ভেঙে চূর্ণবিচূর্ণ করে পৃথিবীর প্রথম গভীর জৈব মাটির (pedogenesis) স্তর তৈরি করছে—যা বায়ুমণ্ডলের কার্বন ডাই-অক্সাইড শুষে নিয়ে বৈশ্বিক শৈত্যপ্রবাহ ডেকে এনেছিল।

$$\mathrm{CaSiO_3 + 2CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + SiO_2}$$

$$\mathrm{Ca^{2+} + 2HCO_3^- \longrightarrow CaCO_3 \downarrow + CO_2 + H_2O}$$



চিত্র ১৪.২: কার্বনিফেরাস জলাভূমির অতি-অক্সিজেনায়ন (৩৫% O_2) এবং দানবীয় সন্ধিপদী (৩৫৯–২৯৯ Ma)। লিগনিন ভাঙার মতো এনজাইম তখনও ছত্রাক ও ব্যাকটেরিয়ার মধ্যে বিবর্তিত না হওয়ায় বিশালাকার জলাভূমির গাছপালা পচে যাওয়ার বদলে অক্সিজেনের অপচয় ছাড়াই কয়লার স্তরে বন্দি হয়। এই বিপুল কার্বন সঞ্চয় বায়ুমণ্ডলীয় O_2-কে সর্বকালের সর্বোচ্চ ৩৫%-এ উন্নীত করে (বর্তমান ২১%-এর বিপরীতে)। নিষ্ক্রিয় শ্বাসনালী দিয়ে শ্বাস নেওয়া সন্ধিপদীদের পেশীর গভীরে উচ্চ চাপে অক্সিজেন প্রবেশ করতে পেরেছিল, যার ফলে ৭৫ সেমি ডানার ঈগল-আকৃতির ড্রাগনফ্লাই (মেগানুরা) এবং ২.৬ মিটার দীর্ঘ দানব মিলিপিড (আর্থ্রোপ্লিউরা)-র জন্ম হয়।

৩. কার্বনিফেরাস জলাভূমির অতি-অক্সিজেনায়ন ও দানব সন্ধিপদী (~৩৫৯ থেকে ২৯৯ Ma)

কার্বনিফেরাস যুগে মহাদেশগুলো একত্রিত হয়ে নিরক্ষরেখায় বিশাল জলাভূমি অরণ্য সৃষ্টি করল। *লেপিডোডেনড্রন* ও *সিজিলারিয়া*-র মতো গাছগুলো ৪০ মিটার উচ্চতায় পৌঁছে গেল। সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ বিষয় হলো, সেই যুগের ছত্রাক ও ব্যাকটেরিয়া তখনও লিগনিন ভাঙার মতো বিশেষায়িত এনজাইম (যেমন লিগনিন পারঅক্সিডেজ) বিবর্তিত করতে পারেনি।

গাছগুলো মারা গিয়ে অক্সিজেনহীন অম্লীয় জলাভূমিতে পড়ে থাকলে তারা পচত না। স্তরের পর স্তর চাপা পড়ে তাপ ও ভূ-তাত্ত্বিক চাপে তা আজকের বিটুমিনাস কয়লায় রূপান্তরিত হয়েছে—যা ৩০ কোটি বছর পর মানবজাতির শিল্প বিপ্লবকে জ্বালানি জুগিয়েছে। কার্বন বায়ুমণ্ডলে পুড়ে CO_2-তে ফিরে না আসার কারণে বায়ুমণ্ডলের অক্সিজেনের মাত্রা আধুনিক ২১% থেকে লাফিয়ে সর্বকালের সর্বোচ্চ **৩৫%-এ** পৌঁছায়।

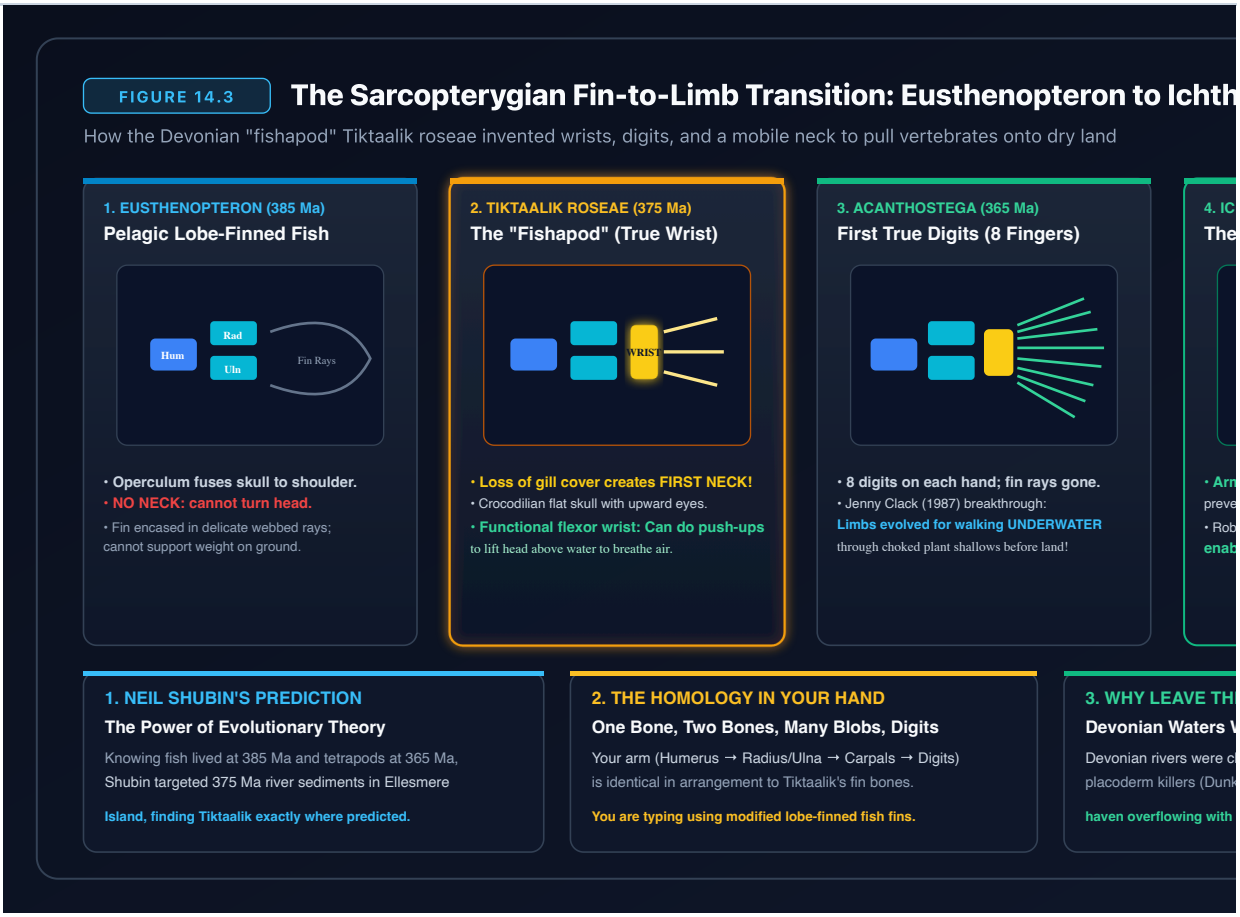
ট্র্যাকিয়াল ব্যাপন ও দানবীয় সন্ধিপদী

সন্ধিপদীরা বহিঃকঙ্কালের ছিদ্র (স্পাইরাকল) দিয়ে বাতাস সরাসরি নালীর মাধ্যমে পেশীতে পৌঁছে দেয়। বায়ুমণ্ডলে ৩৫% অতি-উচ্চ অক্সিজেনের উপস্থিতিতে অক্সিজেন অণু পেশীর অনেক গভীরে প্রবেশ করতে পেরেছিল, যার ফলে সৃষ্টি হয়েছিল দৈত্যাকার সব অমেরুদণ্ডী প্রাণী: ৭৫ সেমি ডানা বিশিষ্ট শিকারী ফড়িং *মেগানুরা (Meganeura)*, ২.৬ মিটার লম্বা দানব মিলিপিড *আর্থ্রোপ্লিউরা (Arthropleura)* এবং এক মিটার লম্বা কাঁকড়াবিছা *পালমোনোস্করপিয়াস (Pulmonoscorpius)*।

Shakil Mahmud • Research Monograph



জীবাশ্ম প্রাণিবিজ্ঞান: কার্বনিফেরাস কয়লা জলাভূমির দানবীয় সন্ধিপদী (~৩১০ Ma)। বায়ুমণ্ডলে ৩৫% অতি-উচ্চ অক্সিজেনের উপস্থিতিতে শ্বাসনালীর সহজ ব্যাপনের সাহায্যে জন্ম নিয়েছিল দানবীয় সন্ধিপদীরা: ৭৫ সেমি ডানাবিশিষ্ট শিকারী ফড়িং *মেগানুরা (Meganeura)* এবং ফার্ন পাতার নিচ দিয়ে হেঁটে চলা ২.৬ মিটার দীর্ঘ দানব মিলিপিড *আর্থ্রোপ্লিউরা (Arthropleura)*।



চিত্র ১৪.৩: সারকোপটেরিজিয়ান মাছের পাখনা থেকে পায়ে রূপান্তর: ইউস্থেনোপটেরন থেকে ইকথায়োস্টেগা। ২০০৪ সালে নিল শুবিন ও তাঁর দল কানাডার আর্কটিকে টিকটালিক রোজিয়া (৩৭৫ Ma) আবিষ্কার করেন। মাছ ও টেট্রাপডের মধ্যবর্তী সেতু টিকটালিক মাছের কানকো হাড় বাদ দিয়ে বিশ্বের প্রথম নমনীয় ঘাড় উদ্ভাবন করে এবং কব্জির হাড় তৈরি করে জলাভূমিতে "পুশ-আপ" দেওয়ার ক্ষমতা অর্জন করে। এটি মেরুদণ্ডী প্রাণীদের অপরিবর্তনীয় অঙ্গ-কাঠামো স্থাপন করেছে—একটি হাড় (হিউমেরাস), দুটি হাড় (রেডিয়াস/আলনা), কব্জি এবং আঙুল—যা আজ মানুষের বাহুতেও হুবহু সংরক্ষিত।

৪. সারকোপটেরিজিয়ান রূপান্তর: পাখনার রূপান্তর পায়ে (~৩৮৫ থেকে ৩৬৫ Ma)

সন্ধিপদীরা তাদের শক্ত কাইটিন বর্ম নিয়ে ডাঙায় আগে পা রাখলেও মেরুদণ্ডীদের জন্য অভ্যন্তরীণ কঙ্কালের এক সম্পূর্ণ রূপান্তর আবশ্যক ছিল। এই ঐতিহাসিক অভিযাত্রা শুরু হয়েছিল অক্সিজেনহীন, আগাছায় ভরা অগভীর মিঠা পানির জলাশয়ে—যেখানে শিকারের জন্য ওত পেতে থাকত **সারকোপটেরিজিয়ান (lobe-finned fish)** বা মাংসল-পাখনাযুক্ত মাছেরা।

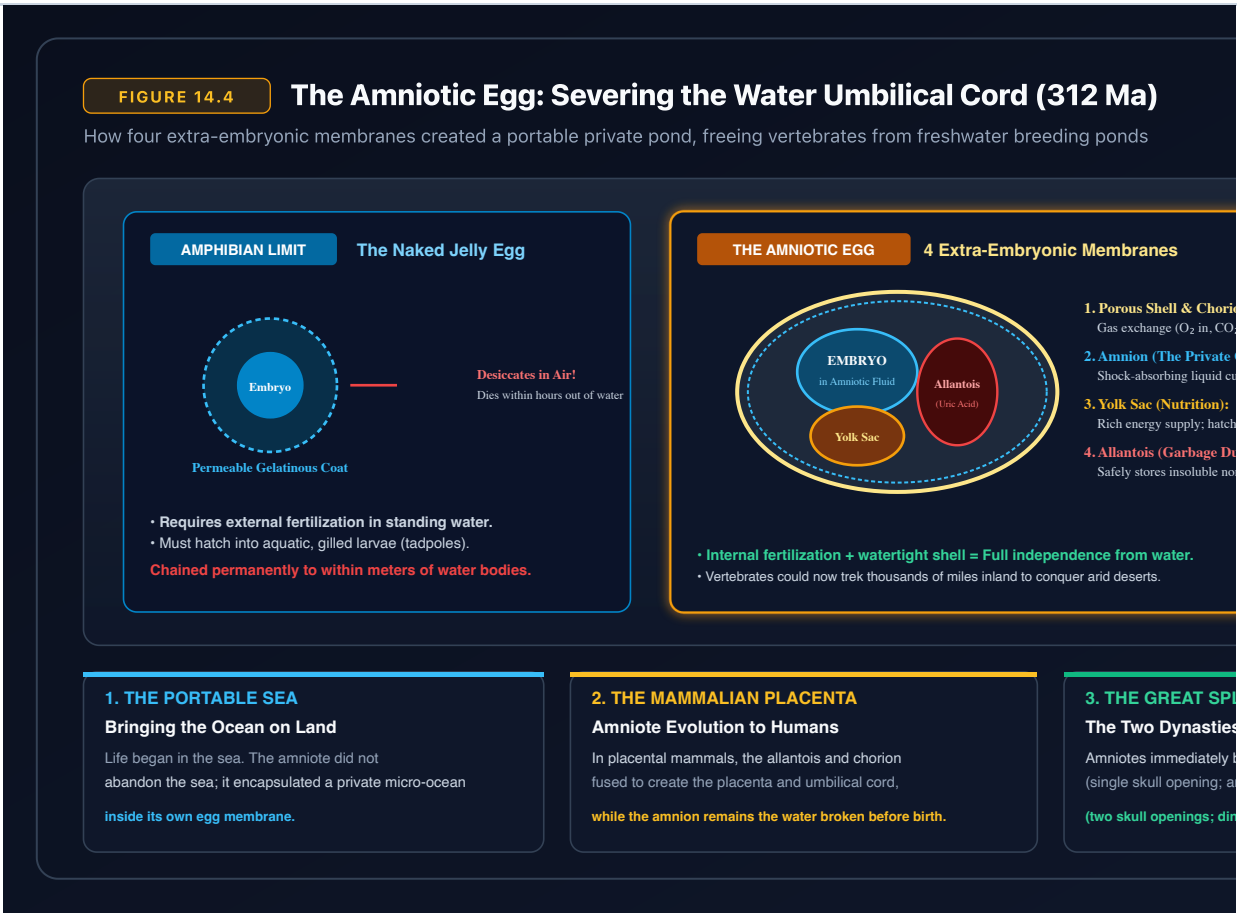
প্রাণী	ভূতাত্ত্বিক বয়স	শারীরস্থানিক মাইলফলক	বাসস্থান / বাস্তুতন্ত্র
ইউস্থেনোপটেরন (Eusthenopteron)	৩৮৫ Ma (ডেভোনিয়ান)	অভ্যন্তরীণ নাসাছিদ্র (choanae); অগ্রপাখনার ভেতরে আধুনিক টেট্রাপডের হিউমেরাস, রেডিয়াস ও আলনা হাড়ের সমগোত্রীয় হাড়।	উন্মুক্ত পানির শিকারী; সম্পূর্ণ জলজ পাখনাযুক্ত মাছ।
প্যান্ডেরিকথিস (Panderichthys)	৩৮০ Ma (ডেভোনিয়ান)	চ্যাপ্টা দেহ, পৃষ্ঠ ও পায়ু পাখনার বিলুপ্তি, মাথার ওপরে অবস্থিত চোখ।	অগভীর জলাশয়ের তলদেশচারী; কাদায় শরীর তুলে রাখার ক্ষমতা।
টিকটালিক রোজিয়া (Tiktaalik roseae)	৩৭৫ Ma (ডেভোনিয়ান)	প্রকৃত নমনীয় ঘাড় (কানকো হাড়ের বিলুপ্তি), ওজন বহনে সক্ষম কব্জির অস্থি, প্রাচীন ফুসফুসের ইঙ্গিতবাহী নালী।	কাদা ও চরে ওত পেতে থাকা শিকারী; শুকিয়ে যাওয়া জলাশয়গুলোর মাঝে ডাঙা দিয়ে হেঁটে চলা।
অ্যাকানথোস্টেগা (Acanthostega)	৩৬৫ Ma (ডেভোনিয়ান)	প্রকৃত আঙুল (প্রতি পায়ে ৮টি আঙুল), সম্পূর্ণ গোড়ালি ও কব্জি; তবে অভ্যন্তরীণ ফুলকার উপস্থিতি।	অগভীর জলাভূমির মাছ; ডাঙায় হাঁটার আগেই পাখনার বদলে পায়ের বিবর্তন।
ইকথায়োস্টেগা (Ichthyostega)	৩৬০ Ma (ডেভোনিয়ান)	বুকের খাঁচা রক্ষাকারী পুরু পাঁজর, মজবুত মেরুদণ্ড, শক্তিশালী কাঁধ ও ৭টি আঙুলযুক্ত পা।	আধা-স্থলচর পথিকৃৎ; সীলের মতো ডাঙায় বুক টেনে হেঁটে চলার ক্ষমতা।

২০০৪ সালে কানাডার আর্কটিক এলসমেয়ার দ্বীপে নিল শুবিন ও তাঁর সহকর্মীদের দ্বারা *টিকটালিক রোজিয়া*-র আবিষ্কার মাছ ও চতুষ্পদ প্রাণীর মধ্যকার যোগসূত্রকে সন্দেহাতীতভাবে প্রমাণ করে। মাছের মাথার খুলি যেখানে কাঁধের সাথে কানকোর হাড় দিয়ে শক্তভাবে জোড়া লাগানো থাকে, টিকটালিক সেই হাড়গুলো হারিয়ে ফেলে পৃথিবীর প্রথম **নমনীয় ঘাড়** অর্জন করে—যার ফলে সে পানির বাইরে মাথা ঘুরিয়ে স্বাধীনভাবে শিকার দেখতে পারত। তার অগ্রপাখনার ভেতরে রেডিয়াল হাড়গুলো কব্জির সন্ধি গঠন করেছিল, যা অক্সিজেনহীন জলাভূমিতে তাকে "পুশ-আপ" দিয়ে শরীর তুলে রাখতে সাহায্য করত।

Shakil Mahmud • Research Monograph



মেরুদণ্ডী রূপান্তর: ডাঙায় উঠে আসা টিকটালিক রোজিয়া (~৩৭৫ Ma)। কানাডার আর্কটিক অঞ্চলে আবিষ্কৃত *টিকটালিক (Tiktaalik)* মাছ ও চতুষ্পদ উভচরদের মধ্যকার সুবর্ণ সেতু। এর পেশীবহুল পাখনার ভেতরে ওজন বহনকারী কব্জির সন্ধি এবং স্বাধীন নমনীয় ঘাড় তাকে অক্সিজেনহীন অগভীর মোহনা থেকে ডাঙায় শরীর তুলে ধরে বাতাসে শ্বাস নেওয়ার সুযোগ করে দিয়েছিল।



চিত্র ১৪.৪: অ্যামনিওটিক ডিম: সাগরের নাড়ির বন্ধন ছিন্নকরণ (৩১২ Ma)। নরম ডিম শুকিয়ে যাওয়া থেকে বাঁচাতে যেখানে উভচররা জলাশয়ে বন্দি ছিল, সেখানে অ্যামনিওট বিপ্লব ছিদ্রযুক্ত কিন্তু পানিনিরোধক খোলসের ভেতর একটি ব্যক্তিগত মহাসাগর তৈরি করে নিল। চারটি বিশেষায়িত পর্দা—অ্যামনিয়ন (লবণাক্ত তরল কুশন), কুসুম থলি (পুষ্টিভাণ্ডার), অ্যালানটোয়েস (ইউরিক অ্যাসিড বর্জ্যাধার) এবং কোরিয়ন (গ্যাস বিনিময়)—মেরুদণ্ডী প্রাণীদের সম্পূর্ণ জীবনচক্র শুকনো জমিতে সম্পন্ন করার স্বাধীনতা দিল, যার ফলে তারা মহাদেশের অভ্যন্তরীণ মরুভূমি বিজয়ে সক্ষম হলো।

৫. নাড়ির বন্ধন ছিন্নকরণ: অ্যামনিওটিক ডিম (~৩১২ Ma)

ডাঙায় হাঁটতে পারলেও আদিম উভচররা পানির কাছে বন্দি ছিল। তাদের জেলি-সদৃশ খোলসহীন ডিম শুষ্ক বাতাসে কয়েক মিনিটের মধ্যে শুকিয়ে মারা যেত; তাদের ত্বক ভেজা রাখতে হতো এবং সাঁতারু ট্যাডপোলদের রূপান্তরের জন্য জলাশয় ছিল বাধ্যতামূলক।

লেট কার্বনিফেরাস যুগে **অ্যামনিওটদের (amniotes)** বিবর্তনের মাধ্যমে মহাদেশের অভ্যন্তর ভাগের পূর্ণাঙ্গ বিজয় ঘটে (যেমন প্রাচীন টিকটিকি-সদৃশ *হাইলোনোমাস*)। অ্যামনিওটিক ডিম ছিল ক্যালসিয়ামযুক্ত পানিনিরোধক খোলসে মোড়ানো একটি নিজস্ব আণুবীক্ষণিক জীবন-সহায়ক ব্যবস্থা:

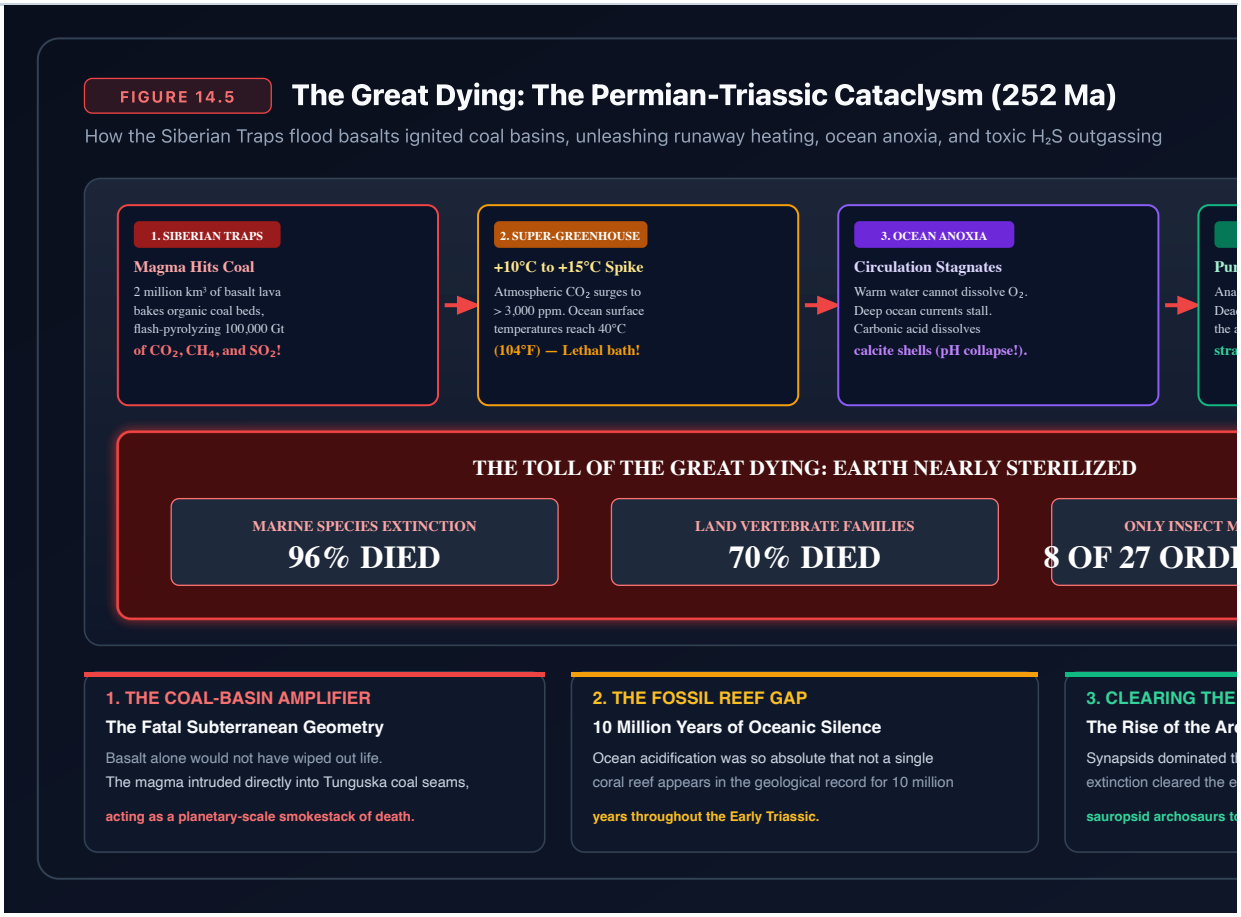
- **অ্যামনিয়ন (Amnion):** তরলপূর্ণ থলি যা বর্ধনশীল ভ্রূণকে একটি কৃত্রিম ব্যক্তিগত সাগরে ভাসিয়ে রাখে এবং যেকোনো ধাক্কা ও পানিশূন্যতা থেকে রক্ষা করে।
- **কোরিয়ন (Chorion):** একটি বহিঃস্থ রক্তবাহী পর্দা যা খোলসের ক্ষুদ্র ছিদ্র দিয়ে অক্সিজেন গ্রহণ ও CO_2 নির্গমন নিয়ন্ত্রণ করে।
- **অ্যালানটোয়েস (Allantois):** ভ্রূণের নাইট্রোজেনজাত বর্জ্য (ইউরিক অ্যাসিড) নিরাপদে জমা রাখে এবং শ্বসনে অংশ নেয়।
- **কুসুম থলি (Yolk Sac):** লিপিড ও প্রোটিন সমৃদ্ধ পুষ্টির আধার যা ভ্রূণকে ডিম থেকে সরাসরি একটি ক্ষুদ্র পূর্ণাঙ্গ প্রাণী হিসেবে ফুটে বের হতে সহায়তা করে—যা ঝুঁকিপূর্ণ জলজ লার্ভা দশাকে সম্পূর্ণ এড়িয়ে যায়।

অ্যামনিওটিক ডিম এবং শুষ্ক কেরাটিনযুক্ত চামড়ার কল্যাণে মেরুদণ্ডী প্রাণীরা দুটি প্রধান শাখায় বিভক্ত হয়ে গেল যা পরবর্তী ৩০ কোটি বছর ধরে পৃথিবীর আধিপত্যের জন্য লড়াই করবে: **সিনাপসিড (Synapsida)** (চোখের পেছনে একটি অস্থি গহ্বরযুক্ত, যা থেকে থেরাপসিড ও পরবর্তীতে স্তন্যপায়ী প্রাণীর জন্ম) এবং **সরপসিড (Sauropsida)** (চোখের পেছনে দুটি গহ্বরযুক্ত ডায়াপসিড, যা থেকে টিকটিকি, কুমির, টেরোসর, ডাইনোসর ও পাখিদের জন্ম)।

Shakil Mahmud • Research Monograph



বিবর্তনীয় যুগান্তকারী সাফল্য: হিলোমোমাস ও অ্যামনিওটিক ডিম (~৩১২ Ma)। ইতিহাসের প্রাচীনতম অ্যামনিওট সরীসৃপ *হিলোমোমাস (Hylonomus lyelli)* শুষ্ক বনের মেঝেতে প্রস্ফুটিত। চামড়ার মতো খোলসযুক্ত ডিমের অভ্যন্তরে থাকা ব্যক্তিগত তরল জলাশয় (অ্যামনিয়ন) ও কুসুমের পুষ্টি মেরুদণ্ডী প্রাণীদের প্রজননকে উন্মুক্ত পানির বন্ধন থেকে চিরতরে মুক্ত করে মহাদেশের গভীর অভ্যন্তর জয়ের পথ খুলে দিয়েছিল।



চিত্র ১৪.৫: মহা বিলুপ্তি (The Great Dying): পারমিয়ান-ট্রায়াসিক মহাপ্রলয় (২৫২ Ma)। গ্রহের ইতিহাসের সবচেয়ে ভয়াবহ গণবিলুপ্তি শুরু হয়েছিল যখন সাইবেরিয়ার কয়লা খনির বুক চিরে ২০ লাখ ঘনকিলোমিটার ব্যাসাল্টিক ম্যাগমা অগ্ন্যুৎপাতে বিস্ফোরিত হয়। হাইড্রোকার্বনের পাইরোলাইসিস এক লাখ গিগাটন গ্রিনহাউস গ্যাস বাতাসে ছেড়ে দেয়, যার ফলে বৈশ্বিক তাপমাত্রা ১০-১৫°C বৃদ্ধি পায়। নিরক্ষীয় সমুদ্র ফুটন্ত ৪০°C-এ পৌঁছায়, স্রোত স্থবির হয়ে অক্সিজেনহীন বিষাক্ত দ্রবণে রূপ নেয় এবং ক্ষতিকর সালফার ব্যাকটেরিয়া ওজোন স্তর ধ্বংসকারী বিষাক্ত হাইড্রোজেন সালফাইড (H_2S) গ্যাস নিঃসরণ করে—যা সমুদ্রের ৯৬% প্রজাতি এবং ডাঙার ৭০% মেরুদণ্ডী পরিবারকে নিশ্চিহ্ন করে দিয়েছিল।

৬. মহা প্রলয়: পারমিয়ান-ট্রায়াসিক মহাবিপর্যয় (২৫২ Ma)

লেট পারমিয়ান নাগাদ স্তন্যপায়ী-সদৃশ সিনাপসিডরা—যেমন ধারালো দাঁতের গর্গনোপসিয়ান কিংবা বিশালাকার তৃণভোজী প্যারিয়াসর—একীভূত সুপারমহাদেশ **প্যানজিয়া (Pangaea)** শাসন করছিল। কিন্তু এই সমৃদ্ধ সাম্রাজ্য গ্রহের ইতিহাসের সবচেয়ে ভয়াবহ গণবিলুপ্তির মুখে চূর্ণবিচূর্ণ হয়ে গেল: **পারমিয়ান-ট্রায়াসিক মহাপ্রলয় (The Great Dying)**।

২৫১.৯ মিলিয়ন বছর পূর্বে বর্তমান সাইবেরিয়ার নিচে ম্যান্টল প্লুমের বিস্ফোরণ ঘটে—সূচিত হয় **সাইবেরিয়ান ট্র্যাপস (Siberian Traps)**-এর অগ্ন্যুৎপাত। ইউরোপের সমান আয়তনের এলাকায় ৪০ লাখ ঘনকিলোমিটার ব্যাসাল্টিক লাভা বিস্ফোরিত হয়। এই ফুটন্ত ম্যাগমা যখন ভূগর্ভস্থ কয়লা, কার্বনেট ও তেল স্তরগুলোকে জ্বালিয়ে দিল, তখন ট্রিলিয়ন টন কার্বন ডাই-অক্সাইড, মিথেন ও সালফার ডাই-অক্সাইড বায়ুমণ্ডলে নিক্ষিপ্ত হয়।

বৈশ্বিক পরিণতি ছিল নারকীয়:

1. **চরম গ্রিনহাউস উত্তাপ:** বায়ুমণ্ডলের তাপমাত্রা ১০°C বেড়ে গেল; নিরক্ষীয় সমুদ্রের তাপমাত্রা ৪০°C ছাড়িয়ে গেল, যা প্রাণীদের এনজাইমের সহ্যক্ষমতার অতীত।
2. **মহাসাগরের অম্লায়ন ও অক্সিজেন শূন্যতা:** গরম পানিতে দ্রবীভূত অক্সিজেন নিঃশেষ হয়ে গভীর সমুদ্র বিষাক্ত রূপ ধারণ করে। সালফেট বিজারক ব্যাকটেরিয়ার বিস্ফোরণে মহাসাগর থেকে বিষাক্ত হাইড্রোজেন সালফাইড (H_2S) গ্যাস নিঃসৃত হতে থাকে।
3. **ওজোন স্তরের বিলুপ্তি:** কয়লা পোড়ার হ্যালোজেন গ্যাস ওজোন স্তরকে ধ্বংস করে দেয়, যার ফলে তীব্র অতিবেগুনী রশ্মির আঘাতে উদ্ভিদের পরাগরেণু বিকৃত হয় এবং খাদ্য শৃঙ্খল ভেঙে পড়ে।

ছাই যখন শান্ত হলো, তখন **সমুদ্রের ৯৬% প্রজাতি** এবং **ডাঙার ৭০% মেরুদণ্ডী প্রাণী পরিবার** পৃথিবী থেকে চিরতরে নিশ্চিহ্ন হয়ে গিয়েছিল। সুবিশাল সিনাপসিড সাম্রাজ্য ধসে পড়ে কেবল গর্তে লুকিয়ে থাকা ক্ষুদ্র কিছু প্রাণী টিকে রইল। কিন্তু প্রারম্ভিক ট্রায়াসিকের এই দগ্ধ ছাইয়ের ওপরে বেঁচে থাকা মুষ্টিমেয় আর্কোসররা পেয়ে গেল এক শূন্য রাজত্ব। ডাঙার বিজয় পূর্ণ হয়েছিল—আর মঞ্চ প্রস্তুত হয়েছিল ডাইনোসরদের স্বর্ণযুগের জন্য।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Kenrick, P., & Crane, P. R. (1997). *The origin and early diversification of land plants: a cladistic study*. Smithsonian Institution Press. doi:10.5860/choice.35-4493
2. Daeschler, E. B., Shubin, N. H., & Jenkins, F. A. (2006). A Devonian tetrapod-like fish and the evolution of the tetrapod body plan. *Nature*, 440(7085), 757–763. doi:10.1038/nature04639

Shakil Mahmud • Research Monograph

3. Shubin, N. H., Daeschler, E. B., & Jenkins, F. A. (2006). The pectoral fin of Tiktaalik roseae and the origin of the tetrapod limb. *Nature*, 440(7085), 764–771. doi:10.1038/nature04637
4. Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O2 and CO2. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23), 5653–5664. doi:10.1016/j.gca.2005.11.032
5. Benton, M. J. (2003). *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time*. Thames & Hudson. ISBN:978-0500051160.
6. Burgess, S. D., Bowring, S., & Shen, S. Z. (2014). High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *PNAS*, 111(9), 3316–3321. doi:10.1073/pnas.1317692111
7. Carroll, R. L. (1988). *Vertebrate Paleontology and Evolution*. W. H. Freeman and Company. ISBN:978-0716718222.

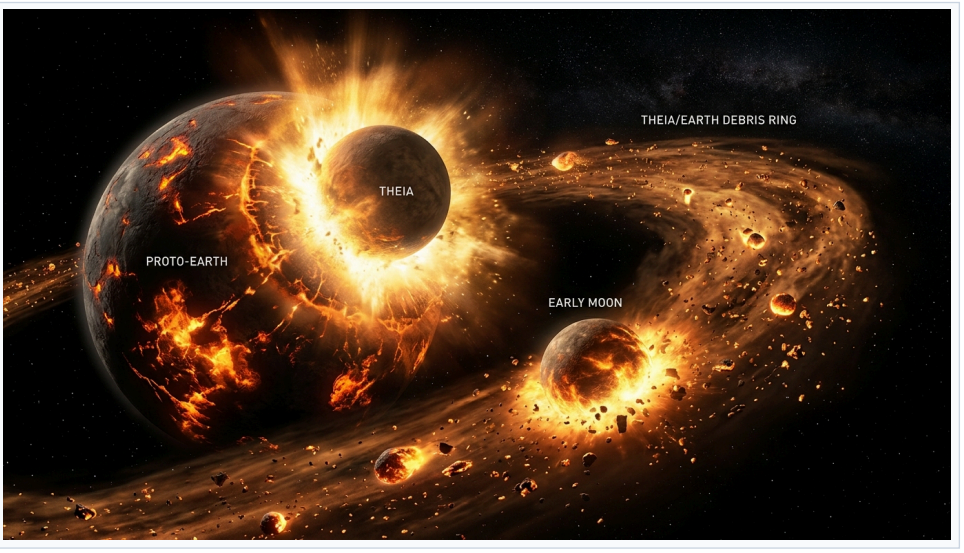
সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "ডাঙার বিজয় — সিলুরিয়ান উদ্ভিদ, টেট্রাপড এবং অ্যামনিওটিক ডিম"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৪। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-14-the-conquest-of-land-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • পঞ্চদশ খণ্ড

ডাইনোসর সাম্রাজ্য ও মহাপ্রলয় — মেসোজোয়িক বিশ্ব এবং স্তন্যপায়ীর ঊষা

ডাইনোসর সাম্রাজ্য ও মহাপ্রলয় — মেসোজোয়িক বিশ্ব এবং স্তন্যপায়ীর ঊষা

2,093 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১৫: *চিত্র: প্রায় ৬৬ মিলিয়ন বছর আগে মেসোজোয়িক যুগের অবসান: বিশালকায় ডাইনোসরদের মাথার উপর দিয়ে ১০ কিলোমিটার চওড়া চিকসুলুব উল্কাপিণ্ড বায়ুমণ্ডলে তীব্র শিখা জ্বালিয়ে পৃথিবীতে আছড়ে পড়ছে।*

১৬ কোটি বছর ধরে—যা মানবজাতির সমগ্র উপস্থিতির চেয়ে পাঁচশত গুণ বেশি সুদীর্ঘ এক সময়কাল—পৃথিবীর স্থলভাগ শাসন করেছিল এক অবিশ্বাস্য দানবীয় মেরুদণ্ডী রাজবংশ: **ডাইনোসরিয়া (Dinosauria)**। পারমিয়ান-ট্রায়াসিক প্রলয়ের ছাই থেকে উঠে এসে আর্কোসররা মেরুদণ্ডী প্রাণীদের জৈব-বলবিদ্যা পুনর্গঠন করল, বায়ুথলির মাধ্যমে ফুসফুসকে অতি-দক্ষ করে তুলল, উষ্ণরক্তের বিপাক আবিষ্কার করল এবং অবশেষে পালকযুক্ত ডানায় ভর করে আকাশে উড়াল দিল। কিন্তু এই সরীসৃপ স্বর্গের ছায়ায় লুকিয়ে থেকে ক্ষুদ্র, নিশাচর স্তন্যপায়ী পূর্বপুরুষরা নিঃশব্দে পুনর্নির্মাণ করছিল তাদের অন্তঃকর্ণ, প্রসারিত করছিল নিওকর্টেক্স এবং স্তন্যদুগ্ধ দিয়ে লালন করছিল সন্তানকে—অপেক্ষা করছিল সেই মহাজাগতিক বজ্রপাতের জন্য যা মাত্র একটি নারকীয় দিনে সমগ্র জীবমণ্ডলকে নতুন রূপ দেবে।

১. আর্কোসরের উত্থান ও কার্নিয়ান প্লাভিয়াল পর্ব (~২৫২ থেকে ২০১ Ma)

পারমিয়ান মহাপ্রলয়ের পর একীভূত মহাদেশ প্যানজিয়া ছিল এক শুষ্ক ও তপ্ত অগ্নিকুণ্ড। দুটি প্রধান সরীসৃপ গোষ্ঠী ভূমির আধিপত্যের জন্য লড়াইয়ে লিপ্ত ছিল:

- **সিউডোসুচিয়া (Pseudosuchia):** কুমির-ধারার আর্কোসর, যাদের শরীর ছিল অনুভূমিক বা আধা-খাড়া, পিঠ ঢাকা ছিল ভারী হাড়ের বর্মে এবং শিকারের জন্য ছিল শক্তিশালী চোয়াল (যেমন দানবীয় *পোস্টোসুচাস*)।
- **অ্যাভেমেটাটারসালিয়া (Avemetatarsalia):** পাখি-ধারার আর্কোসর, যাদের পা ছিল শরীরের ঠিক নিচে সোজা খাড়া স্তম্ভের মতো, মাথার খুলি ছিল হালকা এবং আঙুলের ওপর ভর দিয়ে চলার অসাধারণ ক্ষিপ্রতা ছিল।

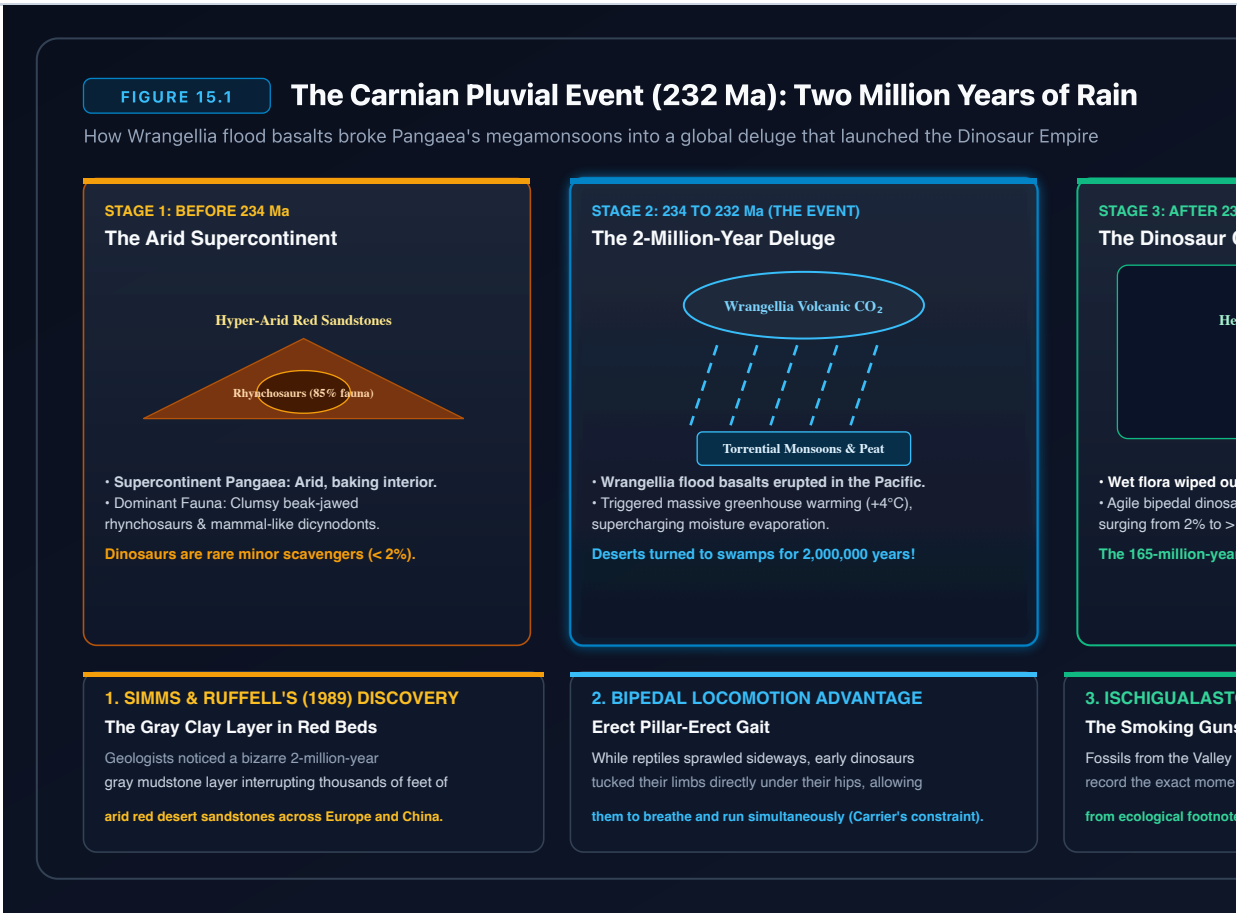
নির্ণায়ক পরিবেশগত পরিবর্তনটি ঘটে প্রায় ২৩৪ থেকে ২৩২ মিলিয়ন বছর পূর্বে **কার্নিয়ান প্লাভিয়াল পর্বে (Carnian Pluvial Event – CPE)**। র‍্যাঞ্জেলিয়ার মহাসাগরীয় মালভূমিতে বিশাল লাভা অগ্ন্যুৎপাতের ফলে বায়ুমণ্ডলে প্রচুর গ্রিনহাউস গ্যাস জমা হয়, যার ফলে শুষ্ক মরুভূমি প্রায় ২০ লাখ বছরের জন্য অবিরাম মুষলধারে বৃষ্টি ও চরম আর্দ্র গরমে ভেসে যায়।

Shakil Mahmud • Research Monograph



কার্নিয়ান প্লাভিয়াল পর্ব (~২৩৪–২৩২ মিলিয়ন বছর পূর্বে): বিশ লাখ বছরের অবিরাম বৃষ্টিপাত। র‍্যাঞ্জেলিয়া মালভূমির দানবীয় অগ্ন্যুৎপাতে বায়ুমণ্ডলে কার্বন ডাই-অক্সাইডের আকস্মিক স্ফীতি প্যানজিয়ার শুষ্ক মরুভূমিকে বিশ লাখ বছরের মুষলধারে অতিবৃষ্টির প্লাবনভূমিতে রূপান্তর করে। প্লাবিত কাদা ও জলমগ্ন বনাঞ্চলে ভারী সিউডোসুচিয়ান সরীসৃপরা চলাচলে হিমশিম খেলেও হালকা ও ক্ষিপ্র দ্বিপদী ডাইনোসররা (যেমন *হেরেরাসরাস*) সহজেই রাজত্ব বিস্তার করে মেসোজোয়িক সাম্রাজ্যের ভিত্তি গড়ে তোলে।

ভারী সিউডোসুচিয়ান শিকারীরা এই দ্রুত পরিবর্তনশীল আর্দ্র বনাঞ্চলে হোঁচট খায়; কিন্তু আদিম দ্বিপদী ডাইনোসররা—যেমন *হেরেরাসরাস* ও *সিলোফাইসিস*—ছিল অবিশ্বাস্য দ্রুত ও দক্ষ শিকারী। ২০১ Ma নাগাদ মধ্য আটলান্টিক ম্যাগমেটিক প্রদেশের অগ্ন্যুৎপাতে সিউডোসুচিয়ানরা ধ্বংস হয়ে গেলে ডাইনোসররা কার্যত অক্ষত অবস্থায় বেরিয়ে এসে এক শূন্য পৃথিবীর নিরঙ্কুশ অধিপতি বনে যায়।

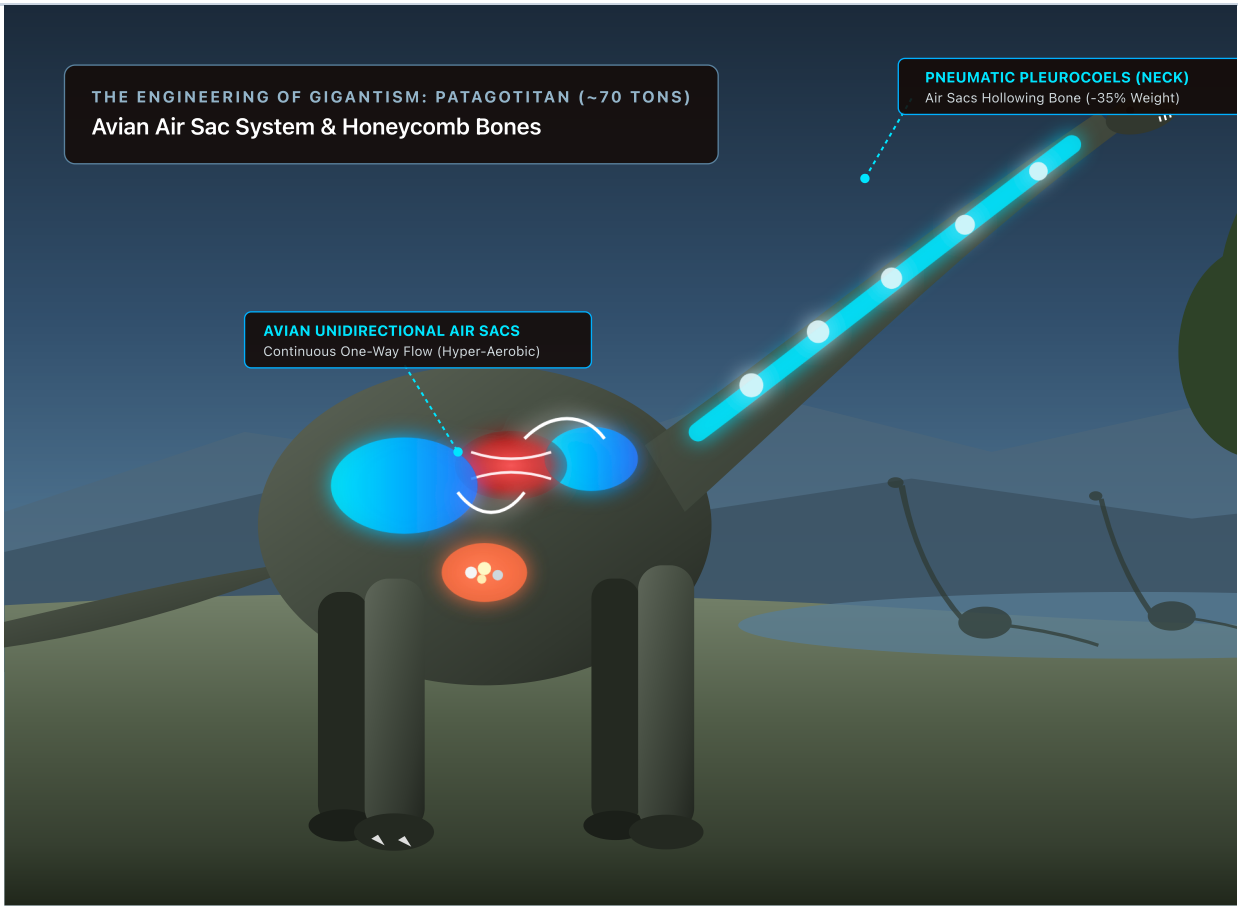


চিত্র ১৫.১: কার্নিয়ান প্লাভিয়াল পর্ব (২৩২ Ma): কুড়ি লাখ বছরের বৃষ্টিপাত ও ডাইনোসরের উত্থান। ট্রায়াসিকের প্রথম দুই কোটি বছর ধরে প্যানজিয়া সুপারমহাদেশে ডাইনোসররা ছিল গৌণ প্রাণী (মোট স্থলের প্রাণীর ২%-এরও কম)। ২৩৪ Ma নাগাদ র্যাঞ্জেলিয়ার ব্যাসাল্ট অগ্ন্যুৎপাত বায়ুমণ্ডলে হাজার হাজার গিগাটন CO_2 নির্গমন করে টানা ২০ লাখ বছরের অবিরাম মুষলধারে বৃষ্টি ও আর্দ্র উত্তাপ ডেকে আনে। এই আকস্মিক জলবায়ু পরিবর্তন প্রাচীন রাইনকোসরদের নিশ্চিহ্ন করে ক্ষিপ্র গতির দ্বিপদী ডাইনোসরদের বিশ্বজুড়ে দ্রুত বিস্তার লাভের অবারিত সুযোগ তৈরি করে দেয়।

২. দানবীয় আকারের জৈব-প্রকৌশল: বলবিদ্যা, বায়ুথলি ও অস্থির গঠন

জুরাসিক ও ক্রিটেশিয়াস যুগে সৌরপড ডাইনোসররা ৭০ মেট্রিক টনেরও বেশি শারীরিক ওজন অর্জন করেছিল (যেমন *আর্জেন্টিনোসরাস*, *প্যাটাগোটিটান* ও *ব্র্যাকিওসরাস*)—যা পৃথিবীর ইতিহাসে অন্য কোনো স্থলচর মেরুদণ্ডীর পক্ষে ছোঁয়া সম্ভব হয়নি। সাধারণ স্তন্যপায়ী শারীরস্থানে এই বিপুল আকার ধারণ করা শারীরিকভাবে অসম্ভব। ডাইনোসররা তাদের অসাধারণ বিবর্তনীয় অভিযোজনের মাধ্যমে মহাকর্ষের এই সীমা জয় করেছিল:

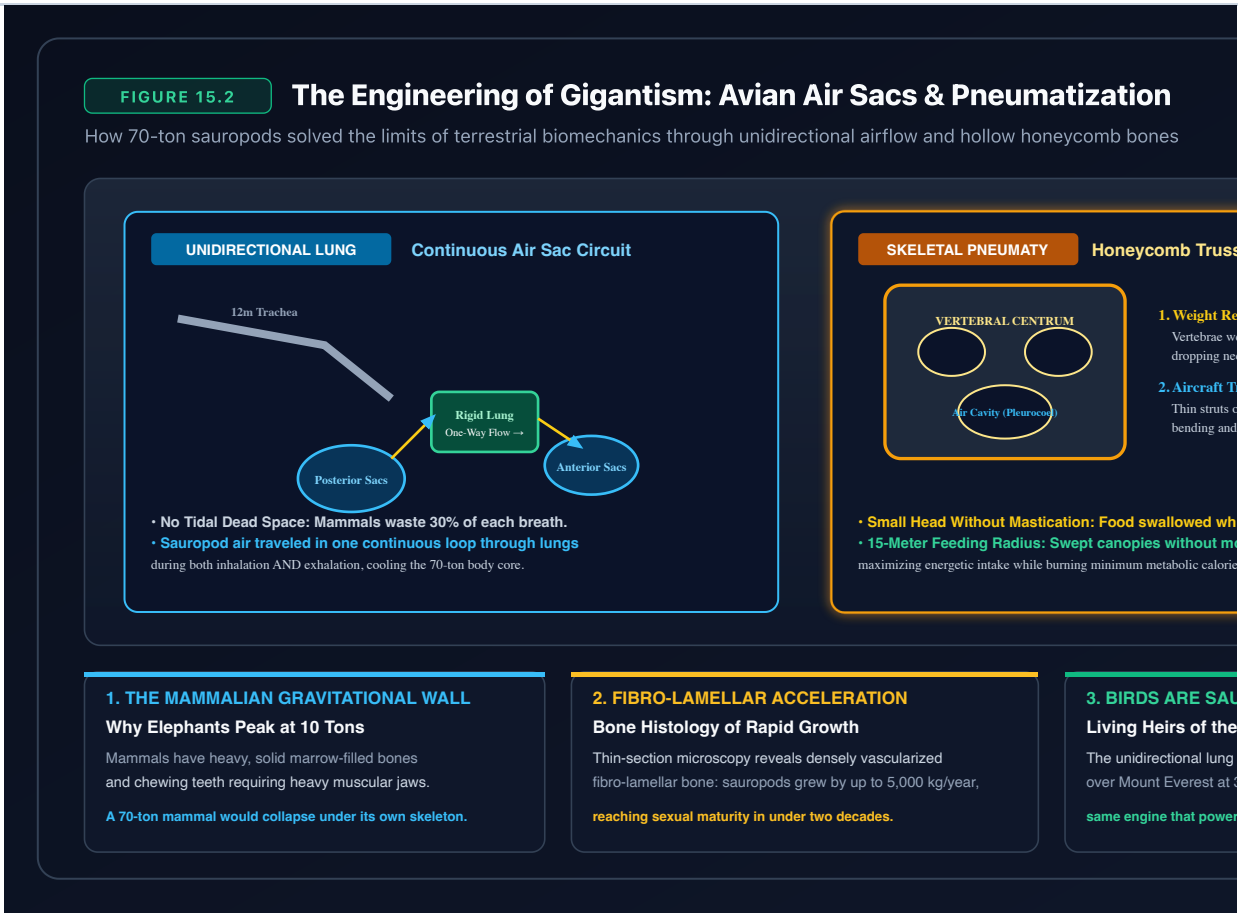
Shakil Mahmud • Research Monograph



দানবীয় আকারের জৈব-বলবিদ্যা: টাইটানোসরের বায়ুথলি ইঞ্জিন (~৭০ টন)। ৭০ টনেরও বেশি শারীরিক ওজন অর্জনের মাধ্যমে *প্যাটাগোটিটান মেয়োরাম*-এর মতো টাইটানোসররা স্থলচর প্রাণীদের শারীরিক সীমাকে অতিক্রম করেছিল। পাখির মতো একমুখী বায়ুথলি ব্যবস্থা শ্বাসের উভয় পর্যায়েই ফুসফুসে নিরবচ্ছিন্ন অক্সিজেন সরবরাহ করত, আর ঘাড়ের কশেরুকা হাড়ের ভেতরে বায়ু প্রবেশ করে মৌচাকের মতো ফাঁপা কাঠামো তৈরি করত—যা অস্থির ভার ৩৫% কমিয়ে ১২ মিটার লম্বা ঘাড় টিকিয়ে রাখত।

শারীরস্থানিক উদ্ভাবন	জৈব-ভৌত প্রক্রিয়া	বাস্তুসংস্থানিক সুবিধা
একমুখী বায়ুথলি ব্যবস্থা	প্রশ্বাস ও নিঃশ্বাস উভয় সময়েই ফুসফুসের মধ্য দিয়ে অবিরাম একমুখী বাতাস চলাচল; কোনো অ্যালভিওলার মিশ্রণ নেই।	মেসোজোয়িক যুগের কম অক্সিজেনেও সর্বোচ্চ অক্সিজেন আহরণ এবং দেহের ভেতরের অতিরিক্ত তাপ দ্রুত নিষ্কাশন।
কশেরুকা হাড়ের বায়ুপূর্ণতা	বায়ুথলিগুলো ঘাড় ও পিঠের কশেরুকা হাড়ের ভেতরে ঢুকে হাড়কে মৌচাকের মতো ফাঁপা কাঠামোতে পরিণত করে।	কাঠামোগত ভারবহন ক্ষমতা না কমিয়েই কঙ্কালের ঘনত্ব ৩৫% হ্রাস করে, যা ১২ মিটার দীর্ঘ ঘাড় ধারণ সম্ভব করে।
চিবানোবিহীন খাদ্যগ্রহণ (গিজার্ড)	খাবার না চিবিয়ে আস্ত গিলে ফেলা; পেটের পেশীবহুল গিজার্ডে থাকা পাথর (গ্যাস্ট্রোলিথ) দিয়ে খাদ্য পিষে ফেলা।	লম্বা ঘাড়ের ডগায় অতি ক্ষুদ্র ও হালকা মাথার খুলি রাখা সম্ভব হয় এবং চিবানোর শক্তির অপচয় রোধ হয়।
ডিম প্রসব ও উচ্চ প্রজনন ক্ষমতা	দীর্ঘ গর্ভধারণের পরিবর্তে একসাথে শত শত ডিম প্রসব।	বিশালাকার মায়েদের গর্ভকালীন ঝুঁকি থাকে না এবং জলবায়ু দুর্যোগের পর জনসংখ্যা দ্রুত পুনরুদ্ধার হয়।
ফাইব্রোল্যামেলার অস্থি ও দ্রুত বিপাক	রক্তনালীসমৃদ্ধ ফাইব্রোল্যামেলার হাড় যা আধুনিক পাখি ও স্তন্যপায়ীর হাড়ের মতো দ্রুত গঠিত হয়।	তরুণ সৌরপডরা বছরে হাজার হাজার কেজি ওজন বৃদ্ধি করে দ্রুত শিকারীদের আওতার বাইরে চলে যেতে পারত।

থেরোপড শিকারীদের মধ্যে—যার চরম শিখর ছিল ৯ টনের শীর্ষ শিকারী *টিরানোসরাস রেক্স (Tyrannosaurus rex)*—বিবর্তন হাড় চূর্ণকারী কামড় সৃষ্টি করেছিল। জোড়া লাগা নাসারন্ধ্র ও কলার মতো পুরু দাঁতের সাহায্যে *টি. রেক্স* **৩৫,০০০ নিউটনেরও বেশি কামড়ের বল** তৈরি করত—যা ট্রাইসেরাটপসের শক্ত পেলভিস ভেঙে মজ্জা বের করে খাওয়ার পক্ষে যথেষ্ট ছিল।



চিত্র ১৫.২: দানবীয় আকারের জৈব-প্রকৌশল: পাখির মতো বায়ুথলি ও মৌচাক-অস্থি। স্তন্যপায়ী প্রাণীরা ভারী মজ্জাপূর্ণ হাড় ও সীমাবদ্ধ ফুসফুসের কারণে ১০ টনের বেশি বড় হতে পারে না; কিন্তু ৭০ টনের সৌরপডরা (যেমন আর্জেন্টিনোসরাস) পাখির মতো বিশেষ শ্বসনতন্ত্র উদ্ভাবন করে এই সীমা ভেঙে ফেলেছিল। প্রশ্বাস ও নিঃশ্বাস উভয় সময়েই তাদের ফুসফুসে একমুখী অবিরাম বাতাস প্রবাহিত হতো। এই বায়ুথলিগুলো কশেরুকা হাড়ের ভেতরে প্রবেশ করে হাড়কে মৌচাকের মতো ফাঁপা করে দেয়—যা তাদের কাঠামোগত শক্তি অক্ষুণ্ণ রেখেই লম্বা ঘাড় থেকে ৫০০ কেজিরও বেশি অপ্রয়োজনীয় ওজন কমিয়ে দিয়েছিল।

৩. স্তন্যপায়ীদের গোপন নিশাচর পাতালপুরী (~২২০ থেকে ৬৬ Ma)

ডাইনোসররা যখন দিনের আলো শাসন করছিল, স্তন্যপায়ী প্রাণীরা তখন ১৬ কোটি বছর ধরে রাতের অন্ধকারের নিগড়ে বাধ্য ছিল। কিন্তু এই আপাত নির্বাসন ছিল এক মহান আশীর্বাদ; এই চরম পরিবেশগত চাপ প্রাণীজগতের সবচেয়ে সংবেদনশীল মস্তিষ্ক, শ্রুতিযন্ত্র ও উষ্ণরক্তের জন্ম দিয়েছে।

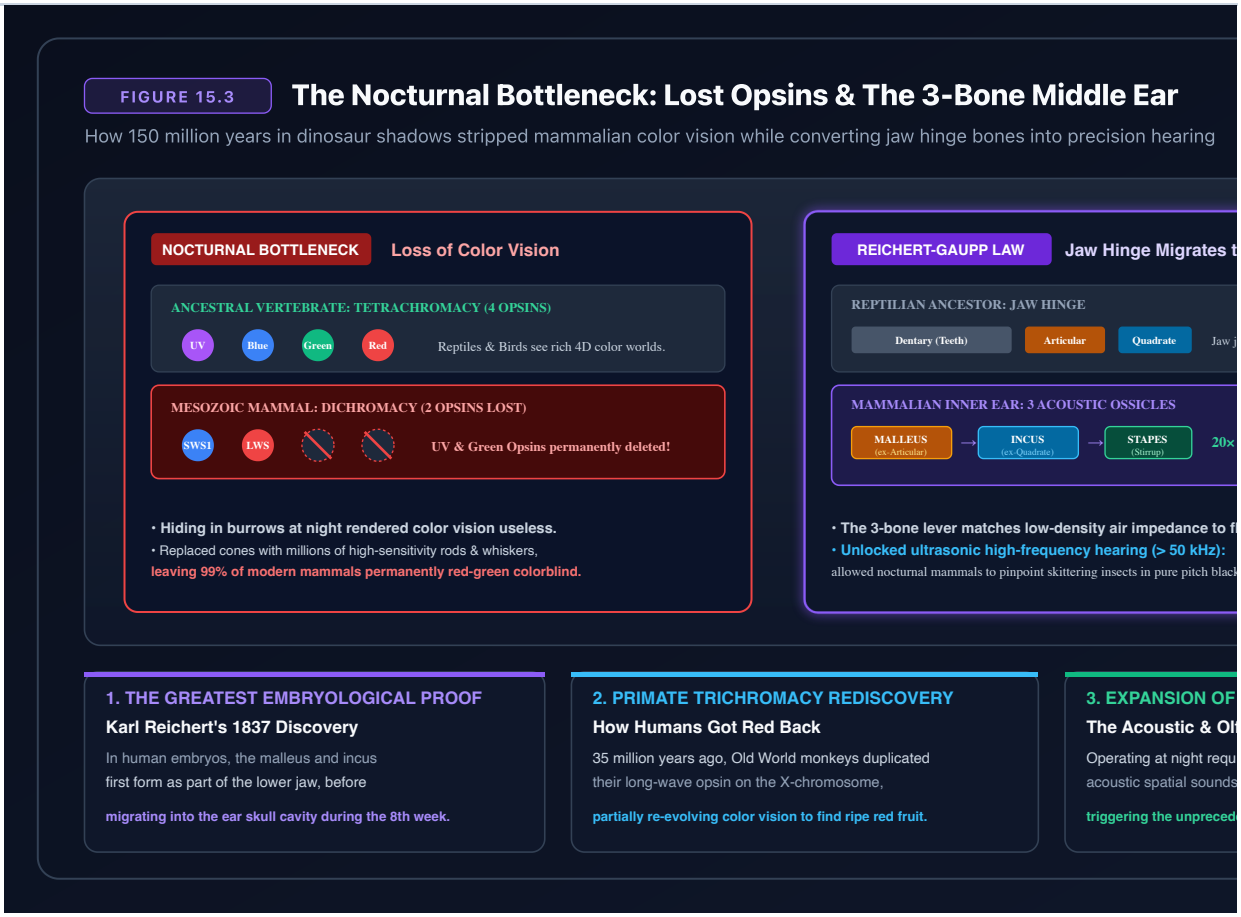
স্তন্যপায়ীদের মধ্যকর্ণের ৩-হাড়ের বিবর্তন

আদিম সরীসৃপদের নিচের চোয়াল অনেকগুলো হাড় দিয়ে গঠিত ছিল, যার মধ্যে *আর্টিকুলার* এবং খুলির *কোয়াড্রেট* হাড় চোয়ালের কব্জা গঠন করত। স্তন্যপায়ীরা এক অবিশ্বাস্য অঙ্গস্থানিক চাতুর্য প্রদর্শন করল: দাঁতের একক হাড় (ডেন্টারি) যখন পুরো নিচের চোয়াল গঠন করল, তখন অপ্রয়োজনীয় পেছনের হাড়গুলো চোয়াল থেকে খসে মাথার খুলির ভেতরে ঢুকে গেল এবং আণুবীক্ষণিক তিনটি ক্ষুদ্র অস্থির রূপ নিল: **ম্যালিয়াস (হাতুড়ি)**, **ইনকাস (নেহাই)** এবং **স্টেপিস (রেকাব)**। লিভারের মতো কাজ করা এই ৩-হাড়ের ব্যবস্থা বাতাসের ক্ষীণ শব্দতরঙ্গকে কানের কক্লিয়া তরলে বহুগুণ পরিবর্ধন করে পৌঁছে দেয়—যা রাতের অন্ধকারে কীটপতঙ্গ শিকারের জন্য অতি-উচ্চ কম্পাঙ্কের শব্দ শোনার দরজা খুলে দিল।

শীতল অন্ধকারে বেঁচে থাকার জন্য আদিম স্তন্যপায়ীরা (যেমন *মরগানুকোডন* ও আদিম গর্ভফুলধারী *ইওমাইয়া*) আরও কিছু যুগান্তকারী বৈশিষ্ট্য অর্জন করে:

1. **উষ্ণরক্ত ও লোমশ ত্বক (Fur):** কেরাটিনের ঘন লোমের চাদর দিয়ে দেহের উত্তাপ ধরে রাখা, যা নিশাচর শিকারে ক্ষিপ্রতা দান করে যখন ঠান্ডা রক্তের সরীসৃপরা অসাড় হয়ে থাকত।
2. **নিওকর্টেক্সের বিকাশ:** ঘ্রাণ, শব্দ ও গোঁফের (vibrissae) স্পর্শ সংকেত বিশ্লেষণের জন্য মস্তিষ্কের সেরিব্রাল কর্টেক্সের ব্যাপক স্ফীতি, যা উন্নত স্মৃতিশক্তি ও আচরণগত অভিযোজন তৈরি করে।
3. **বিষমদাঁত ব্যবস্থা (Heterodonty):** পোকামাকড় চূর্ণ ও বীজ কাটার উপযোগী বিশেষায়িত ট্রাইবোস্ফেনিক পেষণ দাঁত।
4. **মাতৃদুগ্ধ ও স্তন্যপান:** ত্বকের ঘর্মগ্রন্থি বিশেষায়িত স্তনগ্রন্থিতে রূপ নিল যা নবজাতককে পুষ্টিকর দুধ জুগিয়ে প্রাথমিক জীবনের বেঁচে থাকার হার শতগুণ বাড়িয়ে দিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



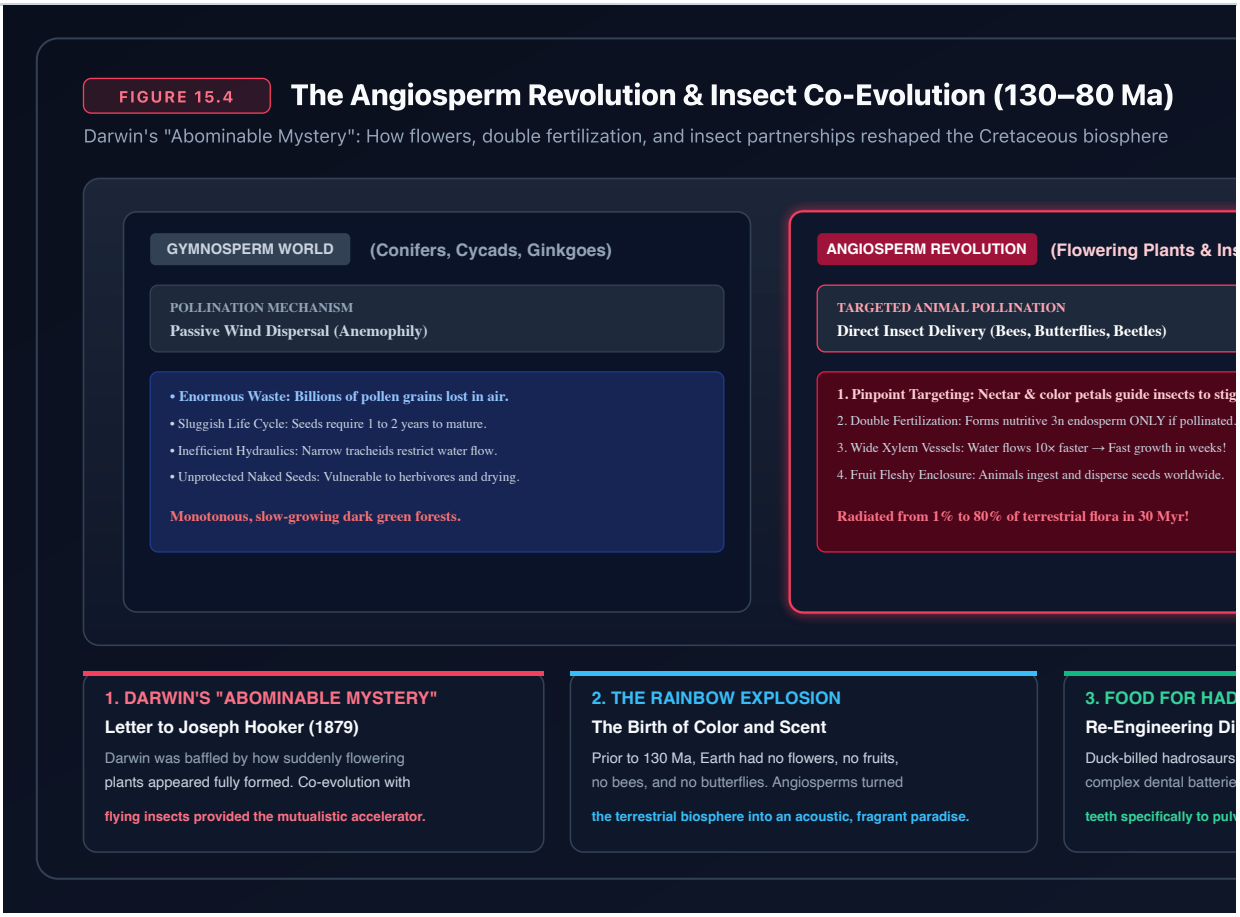
চিত্র ১৫.৩: নিশাচর প্রতিবন্ধকতা ও মধ্যকর্ণের ৩-অস্থি পরিবর্ধক। ডাইনোসরদের ১৫ কোটি বছরের দিনের আধিপত্যের নিচে আমাদের স্তন্যপায়ী পূর্বপুরুষরা মাটির নিচে নিশাচর জীবনে বাধ্য হয়। ঘোর অন্ধকারে বাস করে স্তন্যপায়ীরা ৪টি প্রাচীন বর্ণ-অপসিন জিনের দুটি হারিয়ে ফেলে (যার কারণে ৯৯% আধুনিক স্তন্যপায়ী বর্ণান্ধ)। ক্ষতিপূরণ হিসেবে সরীসৃপের নিচের চোয়ালের অস্থিগুলো (আর্টিকুলার ও কোয়াড্রেট) চোয়াল থেকে বিচ্ছিন্ন হয়ে মাথার খুলির ভেতরে ঢুকে ম্যালিয়াস (হাতুড়ি) ও ইনকাস (নেহাই)-এ রূপান্তরিত হয়; স্টেপিস (রেকাব)-এর সাথে মিলে গঠিত এই ৩-হাড়ের শ্রুতিযন্ত্র বাতাসে ভাসমান উচ্চ-কম্পাঙ্কের শব্দতরঙ্গ পরিবর্ধনে সাহায্য করে।

৪. সপুষ্পক উদ্ভিদের বিপ্লব ও পতঙ্গের সহ-বিবর্তন (~১৩০ থেকে ৮০ Ma)

আর্লি ক্রিটেশিয়াস পর্ব পর্যন্ত পৃথিবীর উদ্ভিদজগতে রাজত্ব করত ব্যক্তবীজী (gymnosperms) উদ্ভিদ: পাইন, সাইকাড ও জিংকো গাছ—যারা বাতাসের এলোমেলো স্রোতে পরাগায়ন চালাত। প্রায় ১৩ কোটি বছর পূর্বে পৃথিবীর বুকে প্রথম প্রকৃত ফুলযুক্ত উদ্ভিদ বা **গুপ্তবীজী (Angiosperms)** আবির্ভূত হয়।

গুপ্তবীজীরা গর্ভাশয়ের ভেতরে সুরক্ষিত বীজ (ফল) এবং সুমিষ্ট মধু ও রঙিন ফুলের পাপড়ি তৈরি করে এক নতুন বাস্তুতন্ত্র সৃষ্টি করল। বাতাসের অনিশ্চয়তার বদলে তারা উড়ন্ত পতঙ্গদের সাথে এক নিবিড় সহ-বিবর্তনীয় চুক্তিতে আবদ্ধ হলো: মৌমাছি, প্রজাপতি ও গুবরে পোকা।

এই উদ্ভিদ বিপ্লব ব্যক্তবীজীদের মেরু ও পাহাড়ের কোণে ঠেলে দিল। সুমিষ্ট ফল, বীজ ও দ্রুত বর্ধনশীল পাতার প্রাচুর্য পতঙ্গ, স্তন্যপায়ী, টিকটিকি এবং তৃণভোজী ডাইনোসরদের মধ্যে এক দ্বিতীয় জৈবিক বৈচিত্র্যের জন্ম দিল।

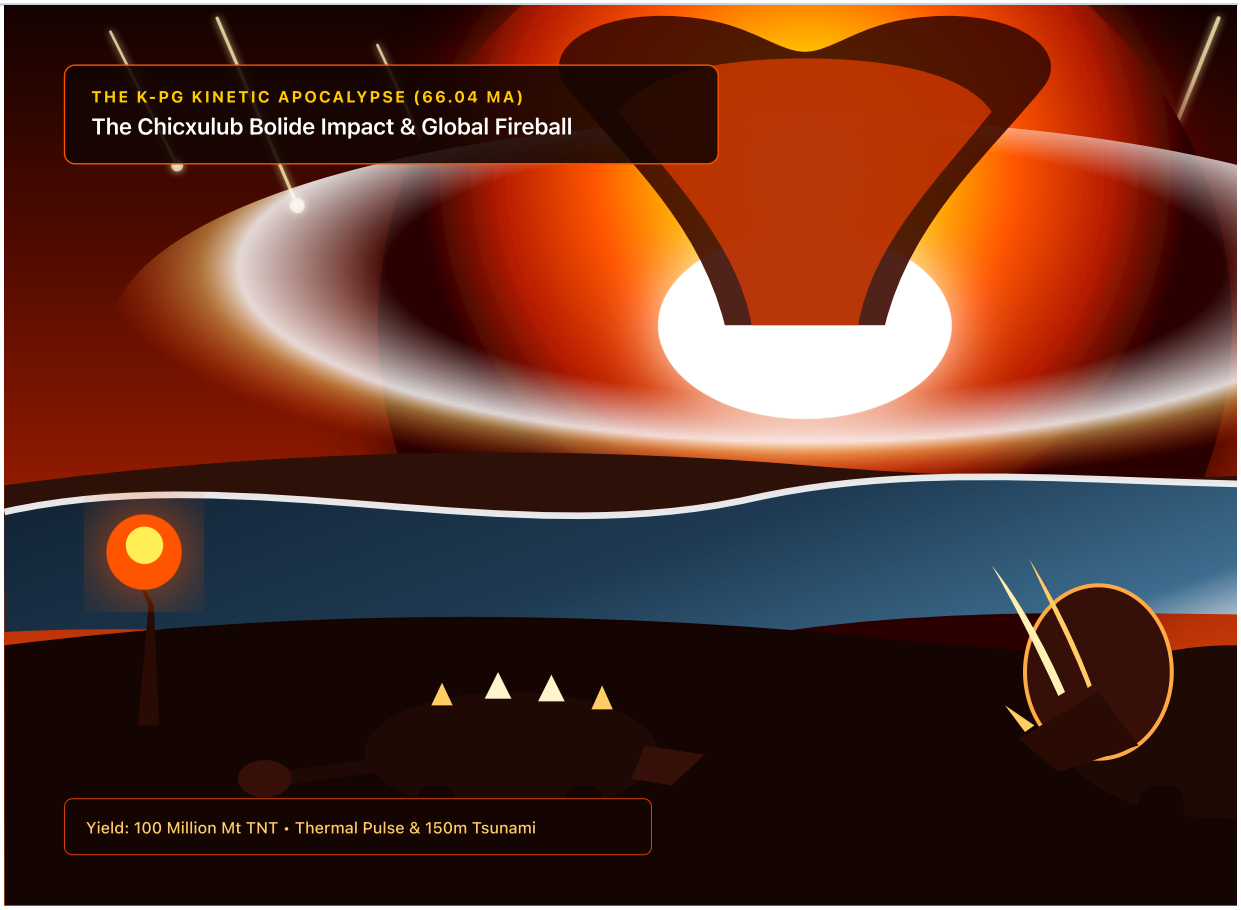


চিত্র ১৫.৪: সপুষ্পক উদ্ভিদের বিপ্লব এবং পতঙ্গের সহ-বিবর্তন (১৩০–৮০ Ma)। চার্লস ডারউইনের বিখ্যাত "ঘৃণ্য রহস্য" (abominable mystery)—ক্রিটেশিয়াস পর্বে সপুষ্পক উদ্ভিদের আকস্মিক আবির্ভাব—সমাধান পেয়েছে উড়ন্ত পতঙ্গদের সাথে তাদের যৌথ বিবর্তনে। মিষ্টি মধু ও উজ্জ্বল পাপড়ির লোভ দেখিয়ে সপুষ্পক উদ্ভিদরা বাতাসের ওপর নির্ভরের বদলে সুনির্দিষ্ট পতঙ্গপরাগায়ন নিশ্চিত করে। সাথে দ্বৈত নিষেক (3n এন্ডোস্পার্ম) এবং চওড়া জাইলেম নালী যুক্ত হয়ে কয়েক সপ্তাহের মধ্যে ফুল থেকে বীজ উৎপাদনের গতি অর্জন করে তারা ৮০% স্থলজ উদ্ভিদের ওপর আধিপত্য বিস্তার করে।

৫. চিকশুলুবের আঘাত: এক সাম্রাজ্যের মৃত্যুদণ্ড (৬৬.০৪ Ma)

৬৬ মিলিয়ন ৪০ হাজার বছর পূর্বে, প্রায় ১০ থেকে ১৪ কিলোমিটার ব্যাসের একটি সাধারণ কার্বনেশিয়াস কনড্রাইট গ্রহাণু সেকেন্ডে ২০ কিলোমিটার গতিতে ($72,000\ \mathrm{km/h}$) পৃথিবীর কক্ষপথে আঘাত হানে। মেক্সিকোর ইউকাটান প্রণালীতে ৬০ ডিগ্রি কোণে আঘাত হেনে এটি ১০০ কিলোমিটার চওড়া ও ৩০ কিলোমিটার গভীর এক খাদ তৈরি করে যা আজ **চিকশুলুব জ্বালামুখ (Chicxulub crater)** নামে পরিচিত।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিকশুলুব গ্রহাণু আঘাত ও বৈশ্বিক অগ্নিকাণ্ড (৬৬.০৪ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। মেক্সিকোর ইউকাটান উপদ্বীপের অগভীর সাগরে ১০ কোটি মেগাটন টিএনটি শক্তির বিস্ফোরণ ঘটিয়ে আঘাত হানে ১২ কিলোমিটার ব্যাসের এক মহাজাগতিক গ্রহাণু। বায়ুমণ্ডলে বাষ্পীভূত ট্রিলিয়ন টন শিলাবৃষ্টির মতো পুনরায় প্রবেশের সময় বাতাসের ঘর্ষণে সমগ্র আকাশ জ্বলন্ত চুলায় পরিণত হয় এবং ভূত্বকজুড়ে সর্বগ্রাসী দাবানল সৃষ্টি করে, যখন ১৫০ মিটার উঁচু দানবীয় মেগাটসুনামি মহাদেশীয় উপকূলগুলোকে ধসিয়ে দেয়।

আঘাতের মুহূর্তেই নির্গত গতিশক্তি ছিল অবিশ্বাস্য:

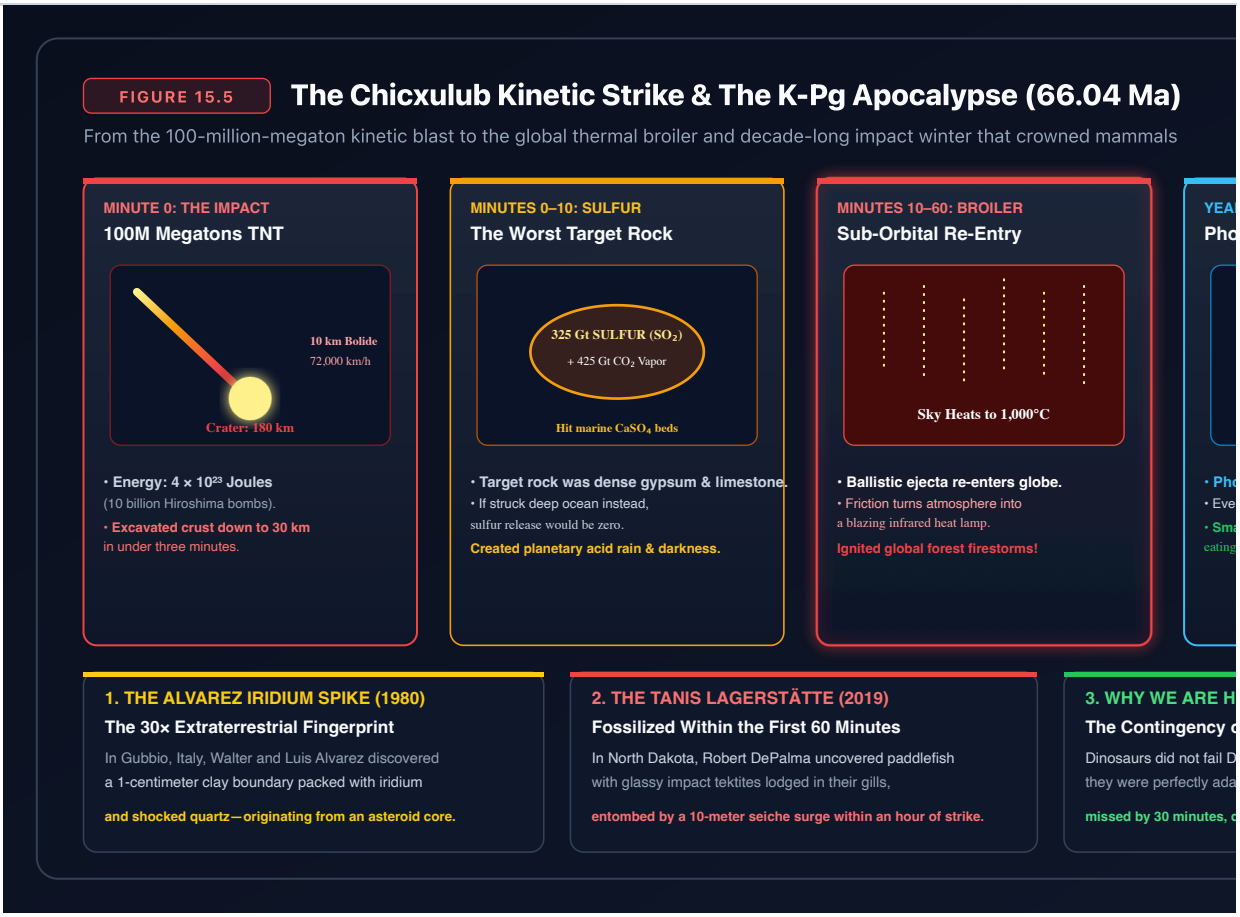
$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \approx \frac{1}{2}(২ \times ১০^{১৫}\ \text{kg})(২ \times ১০^{৪}\ \text{m/s})^2 \approx ৪ \times ১০^{২৩}\ \text{J}$$

এটি **১০ কোটি মেগাটন টিএনটির সমান শক্তি**—যা মানুষের তৈরি সর্ববৃহৎ পারমাণবিক বোমার চেয়েও বিশ লাখ গুণ বেশি শক্তিশালী। বৈশ্বিক ধ্বংসযজ্ঞ ধারাবাহিকভাবে নেমে আসে:

1. **তাপীয় তরঙ্গ (মিনিট থেকে ঘণ্টা):** ট্রিলিয়ন টন বাষ্পীভূত শিলা মহাকাশে ছিটকে পড়ে। কয়েক ঘণ্টার মধ্যে এই গলিত কণাগুলো যখন বৃষ্টির মতো বায়ুমণ্ডলে পুনরায় প্রবেশ করে, তখন বায়ুর ঘর্ষণে সমগ্র আকাশ শত শত ডিগ্রি সেলসিয়াস তাপমাত্রার এক জ্বলন্ত গ্রিলে পরিণত হয়—পৃথিবীর সমস্ত অরণ্যে একসাথে আগুন ধরে যায়।
2. **মেগাটসুনামি ও মহাকম্পন:** ১১ মাত্রার বেশি তীব্রতার ভূমিকম্প ভূত্বক কাঁপিয়ে দেয় এবং ১৫০ মিটার উঁচু দানবীয় সুনামি উত্তর আমেরিকার সমভূমি প্লাবিত করে।
3. **আঘাতের শীত ও সালফিউরিক অ্যাসিড বৃষ্টি (বছর থেকে দশক):** আঘাতের স্থানটি ছিল জিপসামে ($CaSO_4$) পূর্ণ। প্রায় ৩২৫ গিগাটন সালফার ও ১,৫০০ গিগাটন ধোঁয়া সরাসরি স্ট্র্যাটোস্ফিয়ারে মিশে সূর্যের ৯০% আলো অবরুদ্ধ করে দেয়। পৃথিবী তলিয়ে যায় হিমশীতল অন্ধকারে; সালোকসংশ্লেষণ বন্ধ হয়ে যায়।
4. **সমুদ্রের অম্লায়ন:** নাইট্রিক ও কার্বনিক অ্যাসিডের বৃষ্টিতে সাগরের উপরিভাগের প্রবাল ও খাদ্যশৃঙ্খল ধ্বংস হয়ে যায়।

ইরিডিয়ামের উপস্থিতি: মহাপ্রলয়ের ধূমায়িত বন্দুক

১৯৮০ সালে নোবেল বিজয়ী পদার্থবিদ লুইস আলভারেজ এবং তাঁর ভূতাত্ত্বিক পুত্র ওয়াল্টার আলভারেজ ইতালি ও স্পেনের ক্রিটেশিয়াস-প্যালিওজিন (K-Pg) সীমানায় এক সেন্টিমিটার পুরু বিশেষ মাটির স্তর আবিষ্কার করেন। এই কাদামাটিতে মহাকাশের ধূমকেতু ও গ্রহাণুতে প্রাপ্ত বিরল ভারী মৌল **ইরিডিয়াম (Iridium)** স্বাভাবিকের চেয়ে **১৬০ গুণ বেশি ঘনত্বে** পাওয়া যায়। সাথে তীব্র চাপে বিকৃত কোয়ার্টজ কণা (shocked quartz) এবং মাইক্রোটেকটাইট কাচের সন্ধান এই গ্রহাণু আঘাত তত্ত্বকে প্রশ্নাতীত বৈজ্ঞানিক সত্যে রূপ দেয়।



চিত্র ১৫.৫: চিকশুলুবের গতিশক্তি আঘাত ও কে-পিজি মহাপ্রলয় (৬৬.০৪ Ma)। ৬৬ মিলিয়ন বছর পূর্বে একটি ১০ কিমি গ্রহাণু মেক্সিকোর জিপসাম-সমৃদ্ধ ইউকাটান প্রণালীতে ১০ কোটি মেগাটন টিএনটির সমান গতিশক্তি নিয়ে আঘাত হানে। আঘাতের উত্তাপে ৩২৫ গিগাটন সালফার বাষ্পীভূত হয় এবং ট্রিলিয়ন টন শিলা ধূলিকণা সাব-অরবিটাল স্পেসে নিক্ষিপ্ত হয়। বায়ুমণ্ডলে পুনরায় প্রবেশের সময় বায়ুর ঘর্ষণে সমগ্র আকাশ মাত্র এক ঘণ্টার মধ্যে ১,০০০°C তাপমাত্রার এক জ্বলন্ত উনুনে পরিণত হয়, যা বিশ্বজুড়ে অগ্নিঝড় তৈরি করে। পরবর্তী এক দশকের দীর্ঘ শীত সালোকসংশ্লেষণ বন্ধ করে ২৫ কেজির বেশি ওজনের সকল স্থলচর প্রাণীকে বিলুপ্ত করে দেয়।

৬. স্তন্যপায়ীর ঊষা

এক দশকের অন্ধকার ও হিমশীতল শীতের পর যখন মেঘ কেটে সূর্য উঠল, **পৃথিবীর ৭৫% প্রজাতি চিরতরে বিলুপ্ত হয়ে গেছে**। সমস্ত অপক্ষী ডাইনোসর, উড়ন্ত টেরোসর, সাগরের মোসাসর ও অ্যামোনাইটরা চিরতরে মুছে গেল।

যাদের বেঁচে থাকার জন্য প্রতিদিন বিপুল খাদ্যের প্রয়োজন হতো, সেই দানবরা না খেয়ে মারা গেল। বেঁচে রইল কেবল মাটির গর্তে লুকিয়ে থাকা সুবিধাবাদী ক্ষুদ্র স্তন্যপায়ী, পানির গভীরের কুমির ও কচ্ছপ এবং সুপ্ত বীজ খেয়ে বেঁচে থাকতে সক্ষম ক্ষুদ্র পালকযুক্ত ডাইনোসররা—যাদের আমরা আজ **পাখি (Birds)** বলি।

ডাইনোসরদের শূন্য সাম্রাজ্যে স্তন্যপায়ী প্রাণীরা এক অবিশ্বাস্য বিবর্তনীয় উল্লম্ফন ঘটাল। মাত্র কয়েক লাখ বছরের মধ্যে তারা বিশালাকার তৃণভোজী, শিকারী মাংসাশী, তিমি, বাদুড় এবং গাছে চড়া তীক্ষ্ণ দৃষ্টিসম্পন্ন প্রাইমেটে রূপান্তরিত হলো। উন্মোচিত হলো সিনোজোয়িক যুগ—আর মঞ্চ প্রস্তুত হলো মানবজাতির পূর্বপুরুষদের জন্য।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208(4448), 1095–1108. doi:10.1126/science.208.4448.1095
2. Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., et al. (2010). The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327(5970), 1214–1218. doi:10.1126/science.1177265
3. Brusatte, S. L., Benton, M. J., Ruta, M., & Lloyd, G. T. (2008). Superiority, competition, and opportunism in the evolutionary radiation of dinosaurs. *Science*, 321(5895), 1485–1488. doi:10.1126/science.1161833
4. Rowe, T. (1988). Definition, diagnosis, and origin of Mammalia. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 8(3), 241–264. doi:10.1080/02724634.1988.10011708
5. Benton, M. J. (2014). *Vertebrate Palaeontology* (4th ed.). Wiley-Blackwell. ISBN:978-1118406847.
6. Chiarenza, A. A., Farnsworth, A., Mannion, P. D., et al. (2020). Asteroid impact, not volcanism, caused the end-Cretaceous dinosaur extinction. *PNAS*, 117(29), 17084–17093. doi:10.1073/pnas.2006087117
7. Sander, P. M., Christian, A., Clauss, M., et al. (2011). Biology of the sauropod dinosaurs: the evolution of gigantism. *Biological Reviews*, 86(1), 117–153. doi:10.1111/j.1469-185X.2010.00137.x

Shakil Mahmud • Research Monograph

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "ডাইনোসর সাম্রাজ্য ও মহাপ্রলয় — মেসোজোয়িক বিশ্ব এবং স্তন্যপায়ীর উষা"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৫। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-15-the-dinosaur-empire-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • ষোড়শ খণ্ড

ঋজু মানব — রিফ্ট ভ্যালি, দ্বিপদগমন এবং আগুনের প্রভুত্ব

ঋজু মানব — রিফ্ট ভ্যালি, দ্বিপদগমন এবং আগুনের প্রভুত্ব

1,850 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১৬: *চিত্র: পূর্ব আফ্রিকার রিফ্ট ভ্যালিতে হোমিনিডদের বিবর্তন (~১.৮ মিলিয়ন বছর আগে): সোজা হয়ে হাঁটা হোমো ইরেক্টাস দল সাভানায় আগুন নিয়ন্ত্রণ করছে এবং শিকারের জন্য অ্যাশুলিয়ান পাথরের কুঠার তৈরি করছে।*

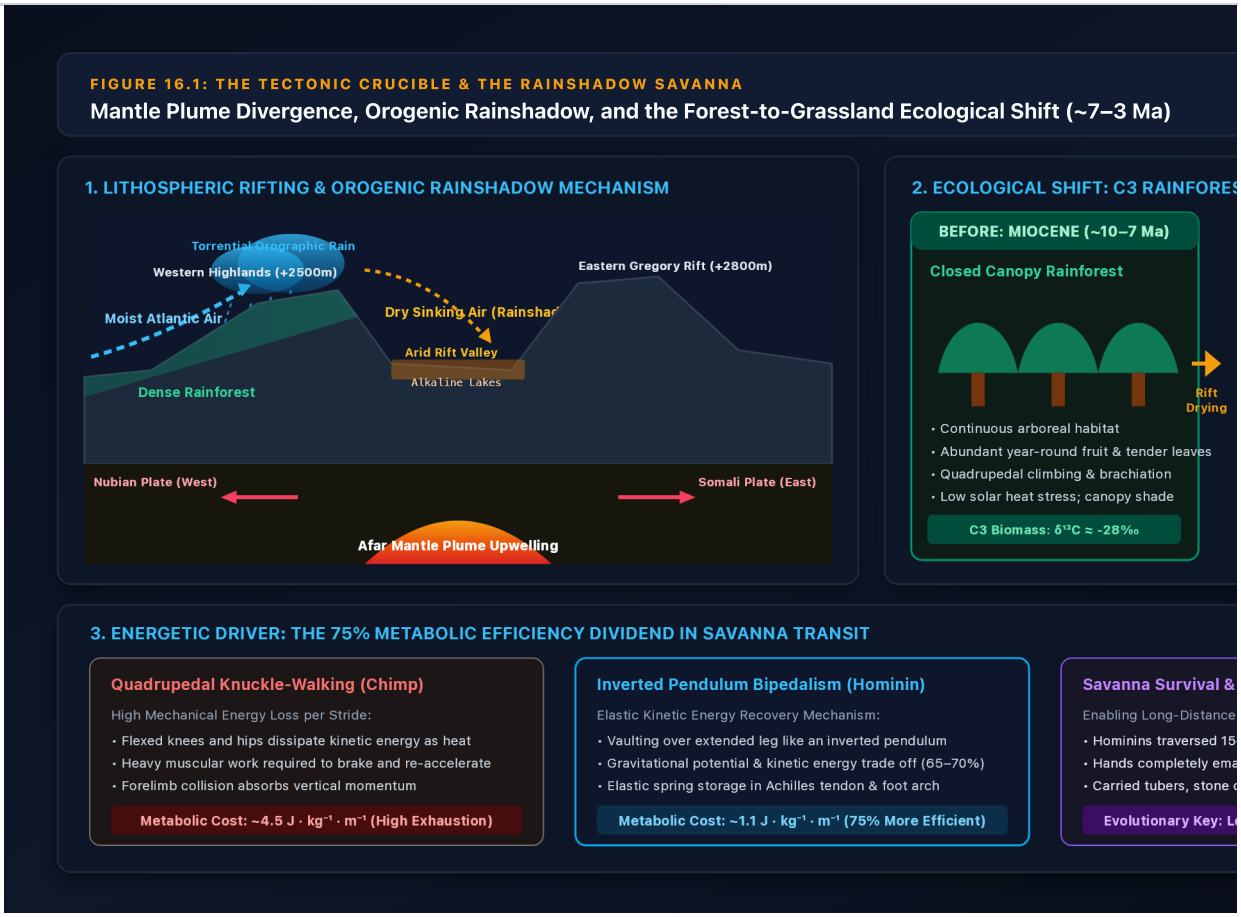
সাত মিলিয়ন বছর পূর্বে আফ্রিকান মহাদেশ একটি ছয় হাজার কিলোমিটার দীর্ঘ টেকটোনিক ফাটল বরাবর দ্বিধাবিভক্ত হয়ে পড়ে। সোমালি ও নুবিয়ান প্লেট বিচ্ছিন্ন হতে শুরু করায় মাথা তুলে দাঁড়ায় পূর্ব আফ্রিকান রিফ্ট ভ্যালি—যা মায়োসিন যুগের নরবানরদের বৃষ্টিবনকে এক নির্মম বৃষ্টিচ্ছায়ায় শুষ্ক করে ফেলে। বনের ঘন আচ্ছাদন বিলীন হয়ে জন্ম নেয় ঘাসযুক্ত খোলা সাভানা প্রান্তর। গাছের আশ্রয় হারিয়ে এবং ক্ষিপ্র শিকারী প্রাণীদের সাথে মুখোমুখি প্রতিযোগিতায় বাধ্য হয়ে হোমোনিনদের একটি অনন্য ধারা সোজা হয়ে দাঁড়াল, পদচালনা থেকে মুক্ত করল অগ্রপদকে, কোয়ার্টজ পাথর ভেঙে তৈরি করল ধারালো মাংস কাটার ছুরি এবং আগুনের তাপশক্তি নিয়ন্ত্রণ করে পৃথিবীর ইতিহাসে সবচেয়ে প্রভাবশালী বিবর্তনীয় ধারার সূচনা করল।

১. টেকটোনিক অগ্নিপরীক্ষা: পূর্ব আফ্রিকান রিফ্ট ও শুষ্ক পরিবেশ (~৭ থেকে ৩ Ma)

মানবজাতির সূচনা মূলত প্লেট টেকটোনিক্সের এক ভৌগোলিক ফলাফল। লেট মায়োসিন ও প্রারম্ভিক প্লায়োসিন যুগে আফার ট্রিপল জংশনের নিচে উত্তপ্ত ম্যান্টল লাভা আফ্রিকান লিথোস্ফিয়ারকে ফাঁটিয়ে দেয়। ইথিওপিয়ান ও পূর্ব আফ্রিকান মালভূমির এই উল্লম্ব উত্থান ভারত ও আটলান্টিক মহাসাগর থেকে আসা আর্দ্র মৌসুমী বায়ুর পথ অবরুদ্ধ করে এক বিশাল পর্বত প্রাচীর তৈরি করে।

বৃষ্টিপাতের অভাবে ঘন চিরহরিৎ ক্রান্তীয় বন সংকুচিত হয়ে বিচ্ছিন্ন নদীমাতৃক বনাঞ্চলে রূপ নেয়। রিফ্ট উপত্যকার পূর্ব পাশে বসবাসকারী নরবাননরা এক অস্তিত্ব সংকটের মুখোমুখি হলো: ফলের গাছগুলোর মাঝে সৃষ্টি হলো শত শত মাইল দীর্ঘ খোলা সাভানা ঘাসের মাঠ। গনগনে নিরক্ষীয় রোদের নিচে মাইলের পর মাইল হেঁটে খাবার খোঁজার ক্ষেত্রে শিম্পাঞ্জি ও গরিলাদের মতো চার হাত-পায়ে ভর দিয়ে চলা (knuckle-walking) এক অসহনীয় শারীরিক অপচয়ে পরিণত হলো।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৬.১: টেকটোনিক অগ্নিপরীক্ষা এবং বৃষ্টিছায়া সাভানার জন্ম (~৭–৩ Ma)। আফার ট্রিপল জংশনের নিচে ম্যান্টল প্লুমের কারণে আফ্রিকান ভূত্বক চিরে নুবিয়ান ও সোমালি প্লেটে বিভক্ত হয়। ফলে পূর্ব আফ্রিকায় পর্বতমালা মাথা তুলে দাঁড়ালে তা ভারত ও আটলান্টিক মহাসাগরের আর্দ্র বায়ুকে আটকে দিয়ে এক বিশাল বৃষ্টিছায়া অঞ্চল তৈরি করে। নিরবচ্ছিন্ন ক্রান্তীয় বৃষ্টিবন ভেঙে ঘাসযুক্ত উন্মুক্ত সাভানা জন্ম নেয়, যা স্থলভাগে দ্বিপদগমনের জন্য ৭৫% বেশি বিপাকীয় শক্তির মুনাফা নিশ্চিত করেছিল।

২. দ্বিপদগমনের বলবিদ্যা বিপ্লব

রডম্যান ও হারম্যান পন্টজারের জৈব-বলবিদ্যা সংক্রান্ত গবেষণায় প্রমাণিত হয়েছে যে চারপেয়ে নাকল-ওয়াকিংয়ে প্রতি একক দূরত্বে মানুষের দুই পায়ে সোজা হাঁটার চেয়ে **চার গুণ বেশি বিপাকীয় শক্তি খরচ হয়**। প্রাকৃতিক নির্বাচন তীব্রভাবে এমন যেকোনো শারীরিক মিউটেশনকে পুরস্কৃত করল যা সাভানা পাড়ি দেওয়ার শক্তি কমিয়ে দেয়।

খাড়া হাঁটার জন্য কঙ্কালের রূপান্তর

চারপেয়ে থেকে দুইপেয়ে হাঁটার জন্য প্রাইমেট কঙ্কালের পুরো নকশা বদলে ফেলতে হয়েছিল:

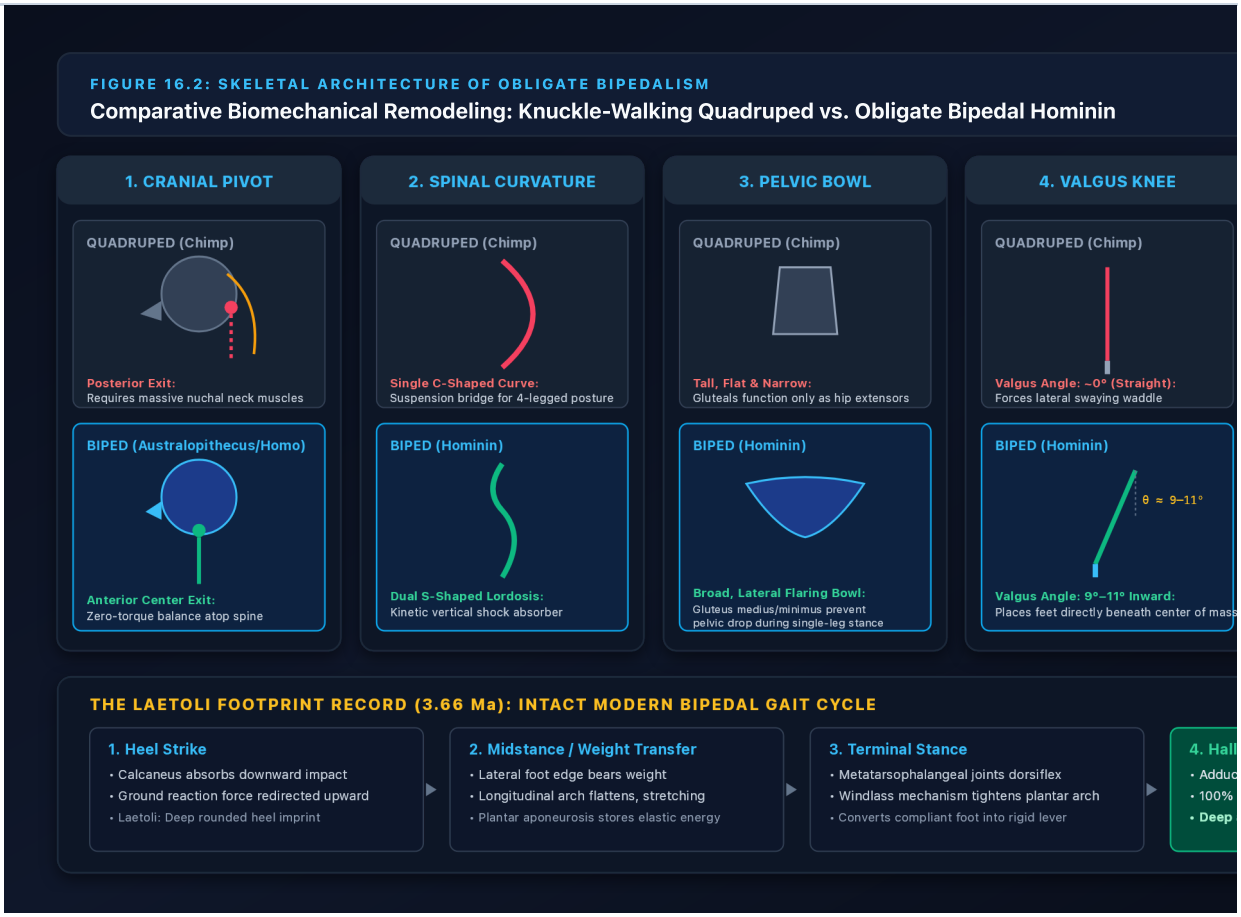
- **মাথার খুলির পুনর্বিন্যাস:** মাথার খুলির নিচের ছিদ্র (ফোরামেন ম্যাগনাম), যেখান দিয়ে স্নায়ুরজ্জু বের হয়, তা শিম্পাঞ্জির মতো পেছনের বদলে ঠিক মাথার খুলির ভারকেন্দ্রের নিচে সোজা অবস্থানে সরে আসে।
- **লাম্বার লর্ডোসিস (S-বাঁক):** ধনুকের মতো সোজা বানরের মেরুদণ্ডকে বিবর্তন একটি স্থিতিস্থাপক S-আকৃতির স্প্রিংয়ে (সারভাইকাল ও লাম্বার লর্ডোসিস) পরিণত করল, যা চলার সময় পেলভিসের ওপর শরীরের ওজন ধরে রাখে।
- **বাটি-আকৃতির পেলভিস:** শ্রোণীচক্রের হাড় খাটো, চওড়া এবং বাটির মতো গোল হয়ে উঠল; যা গ্লুটিয়াস মেডিয়াস পেশীকে এক পায়ে হাঁটার সময় শরীরকে হেলে পড়া রোধ করার ভারসাম্য দেয়।
- **ভ্যালগাস হাঁটু ও খিলানযুক্ত পা:** উরুর হাড় (ফিমার) ভেতরের দিকে কোণ তৈরি করে হাঁটু শরীরের কেন্দ্রের নিচে রাখে। বুড়ো আঙুল অন্য আঙুলের সমান্তরালে এসে শক্ত হয় এবং পায়ের তলার আর্চ দৌড়ের সময় স্থিতিস্থাপক শক্তি সঞ্চয় করে।

জীবাশ্ম রেকর্ড এই রূপান্তরের অকাট্য প্রমাণ দেয়: ছয় থেকে সাত মিলিয়ন বছর প্রাচীন *সাহেলানথ্রোপাস চাদেনসিস (Sahelanthropus tchadensis)* থেকে শুরু করে চার মিলিয়ন বছর প্রাচীন *আর্ডিপিথেকাস (Ardipithecus ramidus)* এবং তিন মিলিয়ন বছর প্রাচীন *অস্ট্রালোপিথেকাস আফারেনসিস (Australopithecus afarensis)*—যার "লুসি" কঙ্কাল এবং তানজানিয়ার লায়েতোলি পদচিহ্ন প্রমাণ করে যে তারা আধুনিক মানুষের মতোই নিখুঁতভাবে সোজা হয়ে হাঁটত।



বাধ্যতামূলক দ্বিপদগমনের জীবাশ্ম বলবিদ্যা: লায়েতোলি পদচিহ্ন (~৩.৬৬ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। সাদিমান আগ্নেয়গিরির উদগিরণজাত ভেজা কার্বোনাটাইট ছাইয়ের স্তরে সংরক্ষিত *অস্ট্রালোপিথেকাস আফারেনসিস*-এর এই পদচিহ্নগুলো প্লায়োসিন সাভানা দিয়ে একজন প্রাপ্তবয়স্ক ও শিশুর হেঁটে যাওয়ার দৃশ্য তুলে ধরে। পদচিহ্নগুলো আধুনিক মানুষের মতো গভীর গোড়ালির চাপ, খিলানযুক্ত পায়ের তলা এবং হাতের মতো ফাঁকা না হয়ে অন্য আঙুলের সমান্তরালে থাকা সোজা বৃদ্ধাঙ্গুলির প্রমাণ দেয়—যা ভাঙায় সম্পূর্ণ সোজা হয়ে দুই পায়ে হাঁটার নিখুঁত প্রমাণ।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৬.২: দ্বিপদগমনের জন্য কঙ্কালের জৈব-বলবিদ্যা রূপান্তর। চারপেয়ে নরবানর থেকে দুইপেয়ে হোমোনিনদের পাঁচটি মৌলিক কঙ্কালীয় রূপান্তর পৃথক করে: ফোরামেন ম্যাগনামের সম্মুখ সরণ, মেরুদণ্ডের দ্বৈত S-আকৃতির স্থিতিস্থাপক বাঁক (লর্ডোসিস), খাটো ও চওড়া বাটি-সদৃশ পেলভিস যা এক পায়ে দাঁড়ানোর সময় শরীরকে হেলে পড়া থেকে বাঁচায়, হাঁটুর ভেতরের দিকে বাঁকা ভ্যালগাস কোণ (৯°–১১°) এবং সমান্তরাল বৃদ্ধাঙ্গুলিযুক্ত আর্চযুক্ত পা—যা ৩.৬৬ Ma প্রাচীন লায়েতোলি পদচিহ্নে আধুনিক মানুষের মতো নন-ডাইভারজেন্ট পদচালনা প্রমাণ করে।

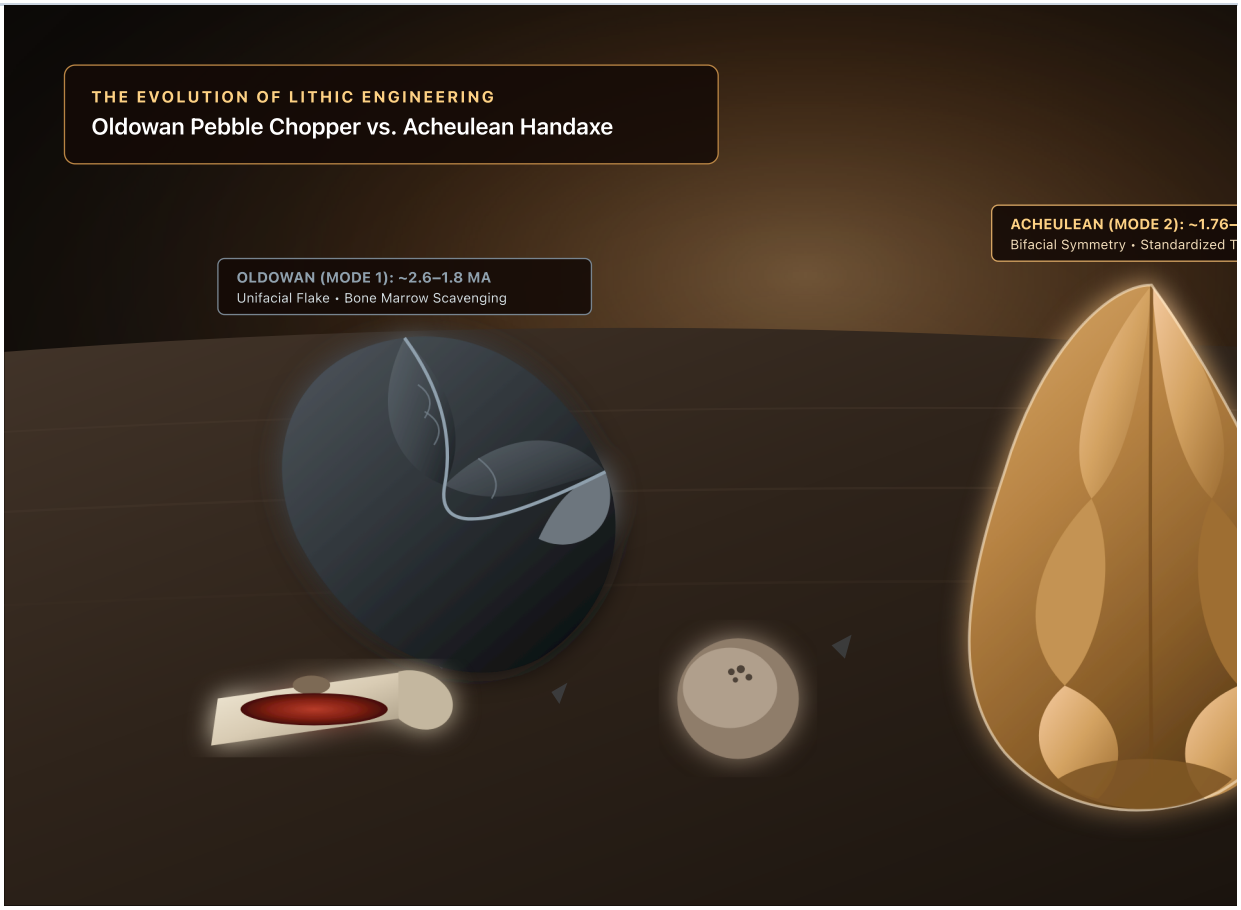
৩. সুক্ষ্ম মুষ্টি ও পাথরের হাতিয়ার (~৩.৩ থেকে ১.৮ Ma)

দ্বিপদগমনের সবচেয়ে গভীর পরিণতি ছিল হাতের সম্পূর্ণ মুক্তি। চলাচলের ভার বহন থেকে মুক্ত হয়ে মানুষের হাত গাছে ঝোলার আংটা থেকে পরিণত হলো পৃথিবীর সবচেয়ে সংবেদনশীল যন্ত্রে।

মানুষের হাতে জন্ম নিল একটি দীর্ঘ, অত্যন্ত পেশীবহুল বিপরীতমুখী বৃদ্ধাঙ্গুলি এবং একটি অনন্য পেশী: **ফ্লেক্সর পলিসিস লংগাস (flexor pollicis longus)**। ঘন সংবেদী স্নায়ুযুক্ত আঙুলের অগ্রভাগ মানুষকে ভারী লাঠি ধরার শক্ত মুষ্টির (power grip) পাশাপাশি বৃদ্ধাঙ্গুলি ও তর্জনী দিয়ে সূক্ষ্ম বস্তু ধরার অসাধারণ গ্রিপ (precision grip) এনে দিল।

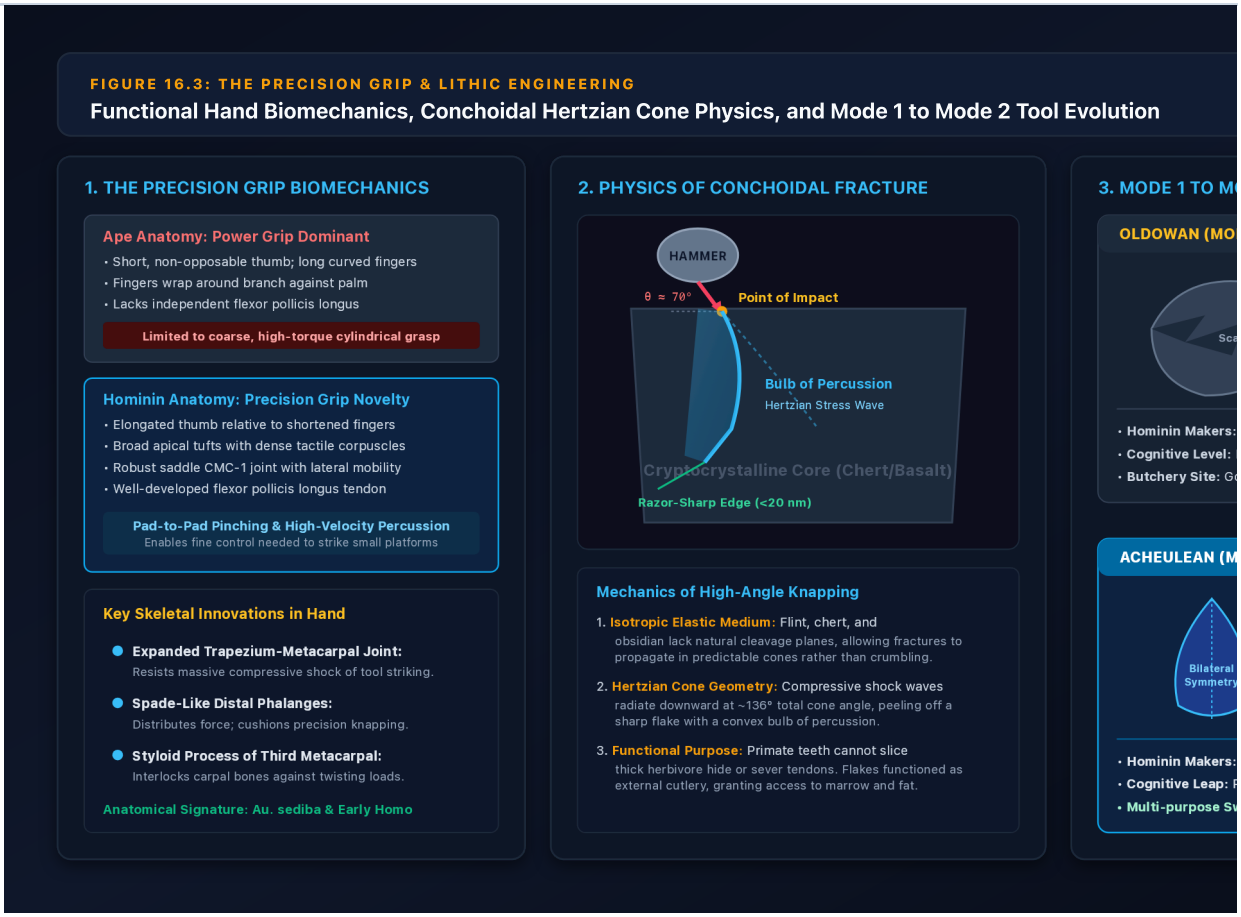
প্রস্তর প্রযুক্তি	আনুমানিক বয়স	প্রযুক্তিগত বৈশিষ্ট্য	সম্পর্কিত হোমোনিন
লোমেকউইয়ান (Lomekwian)	৩.৩ Ma	পাথরের নেহাইয়ের ওপর ভারী ব্যাসাল্ট আছড়ে ফেলে ধারালো প্রান্ত তৈরি।	*কেনিয়ানথ্রোপাস / অস্ট্রালোপিথেকাস*
ওল্ডোয়ান (Oldowan, মোড ১)	২.৬ – ১.৭ Ma	হাতুড়ি পাথর দিয়ে নির্দিষ্ট কোণে আঘাত করে একমুখী অত্যন্ত ধারালো পাথরের ফলা তৈরি।	*হোমো হ্যাবিলিস / হোমো রুডলফেনসিস*
আশুলিয়ান (Acheulean, মোড ২)	১.৭৬ – ০.২৫ Ma	দ্বিমুখী প্রতিসাম্য; উভয় পাশ থেকে সতর্কতার সাথে কেটে ড্রপ-আকৃতির প্রতিসম হ্যান্ড-অ্যাক্স ও কুঠার তৈরি।	*হোমো ইরেক্টাস / হোমো এরগ্যাস্টার*

ওল্ডোয়ান হাতিয়ারের সাহায্যে আদিম মানুষ এক নতুন শিকারী বাস্তুতন্ত্রে প্রবেশ করল: স্যাবোর-টুথ বিড়াল ও দানব হায়েনাদের ফেলে যাওয়া মৃতদেহের হাড়ের মজ্জা আহরণ। শক্ত হাড় ভেঙে ভেতরে থাকা জীবাণুমুক্ত, স্নেহপদার্থ ও ক্যালোরিতে ভরপুর ফ্যাটি অ্যাসিড (DHA ও AA) তারা খেতে পারত—যা তাদের মস্তিষ্কের বিকাশে অপরিহার্য জ্বালানি জুগিয়েছিল।



প্রস্তর প্রযুক্তির বিবর্তনীয় রূপরেখা: ওল্ডোয়ান চপার বনাম আশুলিয়ান হ্যান্ড-অ্যাক্স (~২.৬ থেকে ১.৫ Ma)। আদিম হোমোনিনদের পাথুরে হাতিয়ারের প্রত্যক্ষ তুলনা। বামে: *হোমো হ্যাবিলিস* কর্তৃক ব্যবহৃত ওল্ডোয়ান (মোড ১) ব্যাসাল্ট চপার—যার একমুখী ধারালো খাঁজ দিয়ে হরিণের শক্ত হাড় ভেঙে চর্বিযুক্ত পুষ্টিকর মজ্জা বের করা হতো। ডানে: *হোমো ইরেক্টাস* কর্তৃক কোয়ার্টজাইট থেকে তৈরি আশুলিয়ান (মোড ২) দ্বিমুখী কুঠার—যা সুপরিকল্পিত জ্যামিতিক প্রতিসাম্য, নরম হাতুড়ির সূক্ষ্ম ফ্লেকিং এবং অবিচ্ছিন্ন ধারালো কাটিং প্রান্তের নিখুঁত প্রকৌশল নির্দেশ করে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৬.৩: সুক্ষ্ম মুষ্টি (Precision Grip) এবং প্রস্তর প্রযুক্তির প্রকৌশল (~৩.৩ থেকে ১.৮ Ma)। মানুষের হাতের জৈব-বলবিদ্যা (বিপরীতমুখী বৃদ্ধাঙ্গুলি, স্যাডল জয়েন্ট এবং ফ্লেক্সর পলিসিস লংগাস পেশী) এবং হার্শিয়ান শঙ্কু ফ্র্যাকচারের কোয়ার্টজ পদার্থবিজ্ঞানের সমন্বয়ে আদিম মানুষ ধারালো অস্ত্র তৈরি করতে শেখে। যা ওল্ডোয়ান (মোড ১) এলোমেলো মাংস কাটার ধারালো ফলা থেকে শুরু করে আশুলিয়ান (মোড ২) দ্বিমুখী সুষম প্রতিসম ড্রপ-আকৃতির হ্যান্ড-অ্যাক্সে (কুঠার) উন্নীত হয়।

৪. হোমো ইরেক্টাস ও সহনশীল শিকারীর শারীরবৃত্ত (~১.৯ Ma)

১.৯ মিলিয়ন বছর পূর্বে সাভানার বুকে আবির্ভূত হলো এক সম্পূর্ণ নতুন প্রজাতি: **হোমো ইরেক্টাস (Homo erectus)**। প্রায় পূর্ণাঙ্গ "তুর্কানা বয়" (KNM-WT 15000) কঙ্কাল থেকে জানা যায় যে আট বছর বয়সেই তার উচ্চতা ছিল ১.৬ মিটার, পা ছিল লম্বা, কোমর ছিল সরু এবং মস্তিষ্কের আকার ছিল ৮৫০ cm^3-এর বেশি।

ড্যানিয়েল ব্র্যাম্বল ও ডেভিড লিবারম্যান প্রমাণ করেছেন যে *হোমো/ ইরেক্টাস* মূলত **সহনশীল শিকারের (persistence hunting)** জন্য শারীরিকভাবে নিখুঁত ছিল—দুপুরের তীব্র রোদে চারপেয়ে তৃণভোজীদের ক্লান্তিতে অসাড় না হওয়া পর্যন্ত তাড়া করে চলা। চারপেয়ে প্রাণীরা ছোট দৌড়ে দ্রুত হলেও দৌড়ানোর সময় তারা শ্বাসপ্রশ্বাসের হার নিয়ন্ত্রণ করতে পারে না (প্রতি কদমে ফুসফুসে চাপ পড়ে)। উপরন্তু, লোমশ প্রাণীরা দৌড়ানোর সময় হাঁপিয়ে তাপ নির্গমন করতে পারে না, ফলে তারা দ্রুত হিট-স্ট্রোকে আক্রান্ত হয়।

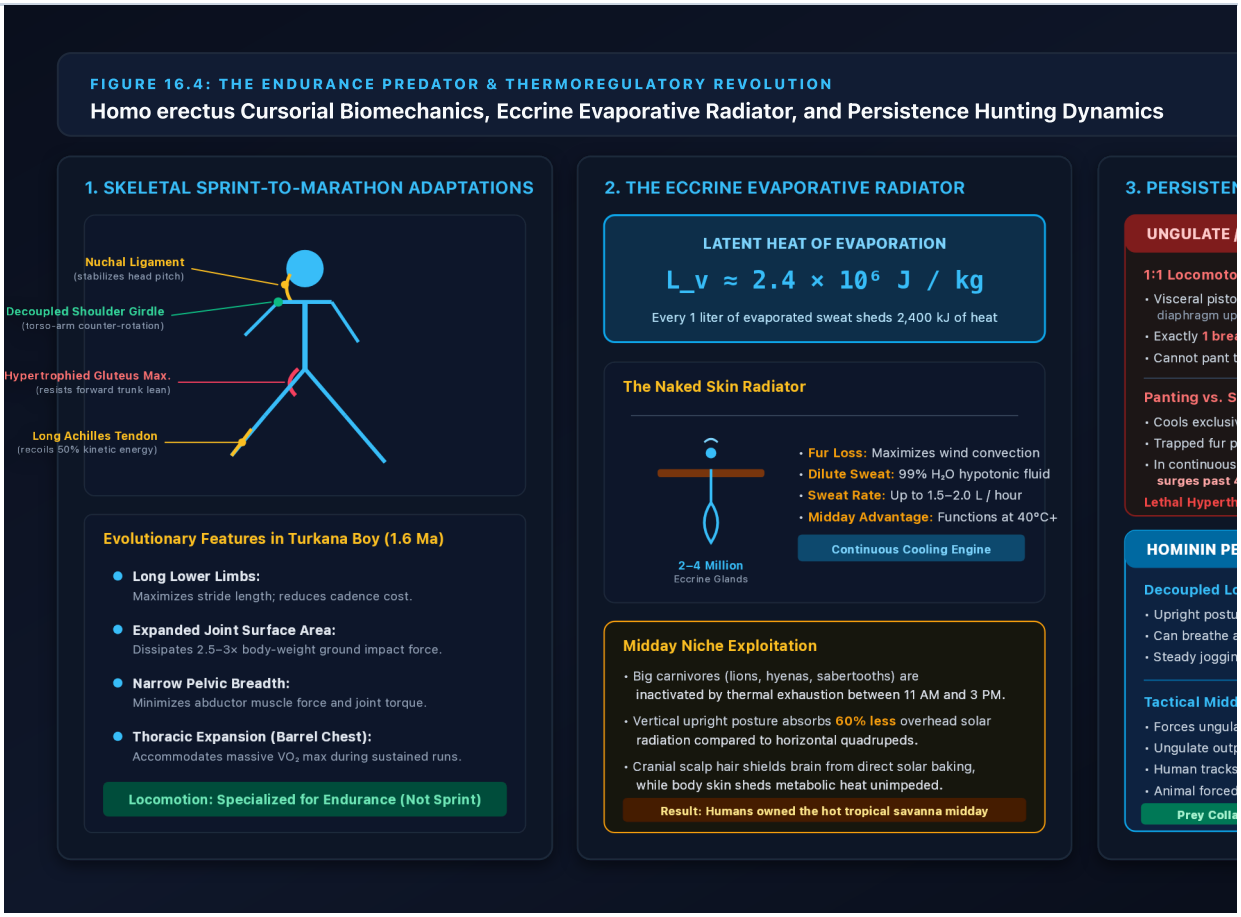
মানুষ দুটি বৈপ্লবিক রূপান্তরের মাধ্যমে এই তাপীয় বাধা জয় করেছিল:

1. **লোমহীন ত্বক (Alopecia):** ঘন পশম বর্জন করে ত্বককে সরাসরি বাতাসের সংস্পর্শে উন্মুক্ত করে দেওয়া।
2. **এক্রাইন ঘামগ্রন্থি:** সারা শরীরে ২০ থেকে ৪০ লাখ এক্রাইন ঘামগ্রন্থির বিস্তার। স্তন্যপায়ীদের গন্ধযুক্ত তৈলাক্ত ঘামের বিপরীতে এক্রাইন গ্রন্থি পাতলা লবণাক্ত জলীয় দ্রবণ নিঃসরণ করে (৯৯% H_2O)।

পানির বাষ্পীভবনের সুপ্ততাপ অপরিসীম:

$$L_v \approx 2.4 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

ঘণ্টায় দুই লিটার ঘাম বাষ্পীভূত করে একজন দৌড়বিদ মানুষ একটানা **১,০০০ ওয়াটেরও বেশি তাপশক্তি মহাশূন্যে ছড়িয়ে দিতে পারে**। হোমো ইরেক্টাস ৩৫ ডিগ্রি গরমে টানা পাঁচ ঘণ্টা ট্রট গতিতে হরিণকে তাড়া করতে পারত, যতক্ষণ না শিকারটি তাপে জ্ঞান হারিয়ে মাটিতে পড়ে যেত।



চিত্র ১৬.৪: সহনশীল শিকারী: হোমো ইরেক্টাসের তাপ-নিয়ন্ত্রণ ও জৈব-বলবিদ্যা (~১.৯ Ma)। চারপেয়ে প্রাণীর মতো দৌড়ের সাথে শ্বাস আটকে রাখার বাধ্যবাধকতা থেকে মুক্ত হয়ে মানুষ স্বাধীন শ্বাসপ্রশ্বাসের ছন্দ পায়। লোমহীন উন্মুক্ত ত্বক এবং ২০ থেকে ৪০ লাখ এক্রাইন ঘামগ্রন্থির স্ফীতি মানুষের চামড়াকে এক বাষ্পীভবন রেডিয়েটরে পরিণত করে ($L_v \approx 2.4 \times 10^6\ \mathrm{J/kg}$)—যার ফলে দুপুরের তীব্র রোদে একটানা দৌড়ের মাধ্যমে অ্যান্টিলোপ হরিণকে হিট-স্ট্রোকে কাবু করে শিকার করা সম্ভব হয়।

৫. আগুনের প্রযুক্তি ও মূল্যবান-কলা অনুমান (~১.৫ থেকে ০.৪ Ma)

অন্যান্য সমস্ত প্রাণী থেকে মানুষকে চিরতরে পৃথককারী সিদ্ধান্তমূলক পদক্ষেপটি ছিল আগুনের নিয়ন্ত্রণ (pyrotechnology)। দক্ষিণ আফ্রিকার ওয়ান্ডারওয়ার্ক গুহা এবং ইসরায়েলের ব্রনোট ইয়াকভের প্রমাণ নিশ্চিত করে যে ১০ থেকে ১৫ লাখ বছর আগেই সুপরিকল্পিত চুলার ব্যবহার শুরু হয়েছিল।

জীববিজ্ঞানী রিচার্ড র‍্যাংহাম তাঁর বিখ্যাত **রান্না অনুমান (Cooking Hypothesis)**-এ দেখিয়েছেন যে খাবার রান্না করাই মানুষের মস্তিষ্ক বৃদ্ধির প্রধান শারীরবৃত্তীয় চালিকাশক্তি। কাঁচা খাবার খাওয়া ছিল চরম শক্তির অপচয়: বুনো শিম্পাঞ্জিরা দিনে ছয় থেকে সাত ঘণ্টা কেবল কাঁচা পাতা আর শক্ত মাংস চিবিয়ে কাটিয়ে দেয়।

রান্নার প্রাণরসায়ন

আগুনে খাবার পোড়ানো বা সেদ্ধ করা পুষ্টির শোষণযোগ্যতাকে সম্পূর্ণ বদলে দেয়:

- **স্টার্চের জেলাটিনাইজেশন:** তাপ মূল ও কন্দের শক্ত স্ফটিকাকার স্টার্চ ভেঙে সহজে হজমযোগ্য গ্লুকোজ পলিমারে রূপান্তর করে।
- **প্রোটিনের ডিনেচারেশন:** তাপ পেশীর আঁশগুলোকে খুলে পেপটাইড বন্ধনগুলোকে সরাসরি পেটের অ্যাসিড ও এনজাইমের নাগালে উন্মুক্ত করে দেয়।
- **জীবাণু ধ্বংস:** উচ্চ তাপে মাংসের ক্ষতিকর ব্যাকটেরিয়া ও পরজীবী ধ্বংস হয়ে যায়, যা সংক্রামক রোগ প্রতিরোধ করে।

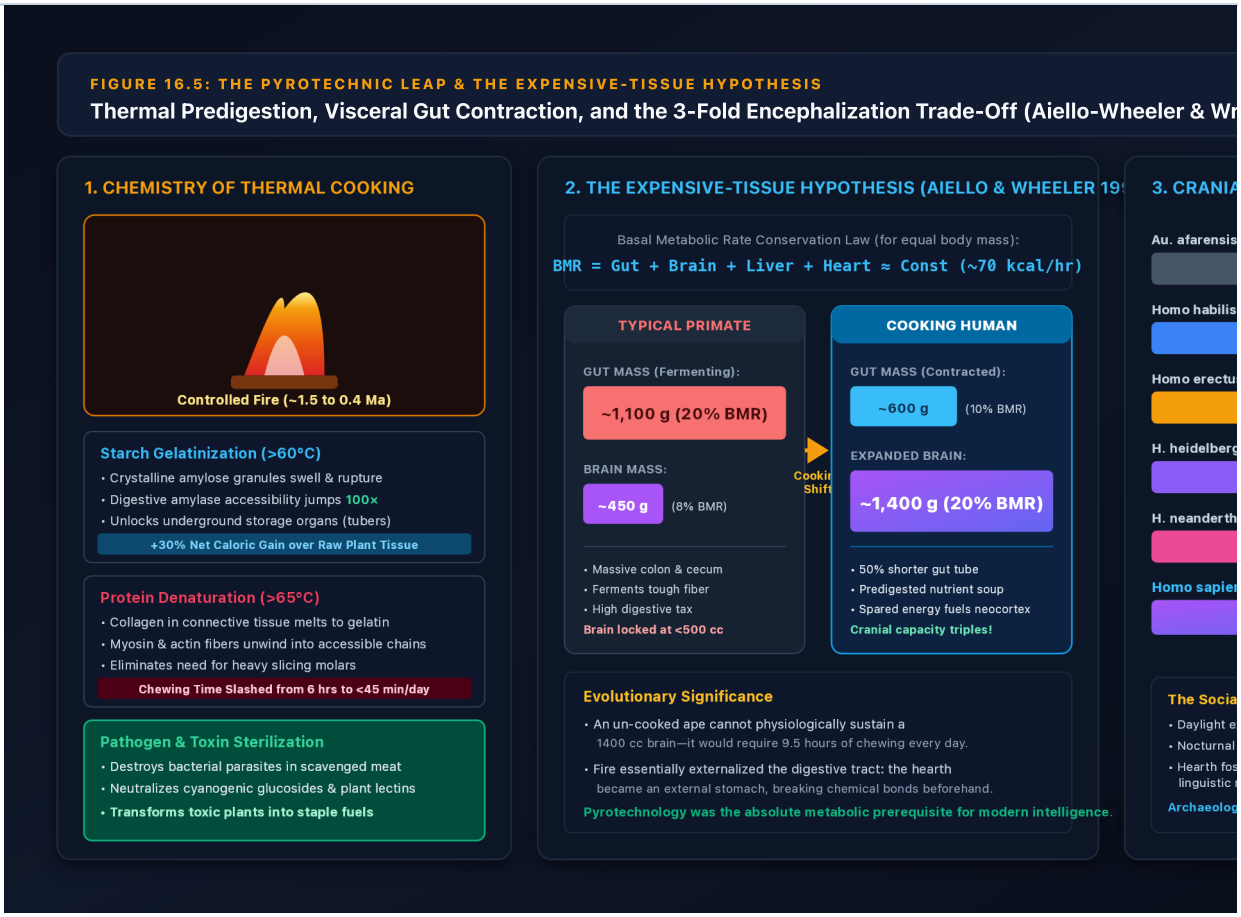
লেসলি আইয়েলো ও পিটার হুইলারের **মূল্যবান-কলা অনুমানে (Expensive-Tissue Hypothesis)** বলা হয়েছে যে মস্তিষ্ক ও পরিপাকতন্ত্র উভয়ই শরীরের সবচেয়ে বেশি শক্তিগ্রাহক অঙ্গ—পেশীর চেয়ে বিশ গুণ বেশি শক্তি দাবি করে। যেহেতু আগুনের সাহায্যে পরিপাকের কাজ অনেকটাই বাইরে সম্পন্ন হয়ে যেত, তাই মানুষের আর বানরের মতো বিশাল গাঁজনকারী অন্ত্র ও কোলন বহনের প্রয়োজন রইল না।

অন্ত্রের আকার ৬০% হ্রাস পাওয়ায় যে বিপুল বিপাকীয় শক্তি মুক্ত হলো, তা সরাসরি মস্তিষ্কের কেন্দ্রীয় স্নায়ুতন্ত্রে পরিচালিত হলো। ফলে মস্তিষ্কের আকার অস্ট্রালোপিথেকাসের ৪৫০ cm^3 থেকে লাফিয়ে হোমো ইরেক্টাসে ৯০০ cm^3 এবং নিয়ান্ডারথাল ও আধুনিক মানুষে ১,৪০০ cm^3-এ উন্নীত হয়। আগুন শুধু মস্তিষ্ককেই শক্তি জোগায়নি; তা রাতকে দিনে রূপান্তরিত করেছে, গুহার মুখ থেকে শিকারী বাঘ-ভাল্লুককে দূরে রেখেছে এবং জন্ম দিয়েছে চুলার চারপাশের সেই আদিম সামাজিক সান্ধ্য আড্ডা—যেখানে জন্ম নিয়েছিল ভাষা, রূপকথা আর মানব সংস্কৃতি।

Shakil Mahmud • Research Monograph



আগুনের বৈপ্লবিক রূপান্তর: হোমো ইরেক্টাসের চুলা ও রান্নার সূচনা (~১.৫ মিলিয়ন বছর পূর্বে)। আফ্রিকান গুহামুখে পাথরের ঘেরাওযুক্ত আদিম চুলার চারপাশে সমবেত *হোমো ইরেক্টাস* পরিবার। আগুনের তাপে স্টার্চের জেলাটিনাইজেশন এবং শক্ত মাংসের প্রোটিন নরম করে পরিপাকের কাজ শরীরের বাইরে সম্পন্ন করায় অন্ত্রের বিপাকীয় খরচ ৬০% হ্রাস পায়—যা মস্তিষ্কের আকার তিন গুণ বৃদ্ধিতে প্রধান ভূমিকা রেখেছিল। চুলার বৃত্তাকার আগুন রাতের শ্বাপদদের দূরে রেখে সামাজিক বন্ধন, গল্প বলা ও মানব সংস্কৃতির আদিম থিয়েটার গড়ে তোলে।



চিত্র ১৬.৫: মূল্যবান-কলা অনুমান (Expensive-Tissue Hypothesis) এবং আগুনের ব্যবহার (~১.৫ থেকে ০.৪ Ma)। নিয়ন্ত্রিত আগুন স্টার্চকে জেলাটিনাইজ করে এবং প্রোটিন ভেঙে পরিপাকতন্ত্রের কাজকে বাইরে সম্পন্ন করার পথ তৈরি করে দিল। শরীরের মোট বিপাকীয় শক্তি স্থির থাকায় পরিপাকতন্ত্রের ৬০% সংকোচন ঘটে, যা মস্তিষ্কের জটিল স্নায়ুতন্ত্র গঠনের জন্য প্রয়োজনীয় অতিরিক্ত শক্তি মুক্ত করে দেয়—ফলে হোমো ইরেক্টাসের মস্তিষ্কের আকার তিন গুণ বৃদ্ধি পায়।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Wrangham, R. (2009). *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*. Basic Books. ISBN:978-0465013623.
2. Bramble, D. M., & Lieberman, D. E. (2004). Endurance running and the evolution of Homo. *Nature*, 432(7015), 345–352. doi:10.1038/nature03052
3. Aiello, L. C., & Wheeler, P. (1995). The Expensive-Tissue Hypothesis: The brain and the digestive system in human evolution. *Current Anthropology*, 36(2), 199–221. doi:10.1086/204350
4. Lovejoy, C. O. (1981). The origin of man. *Science*, 211(4480), 341–350. doi:10.1126/science.211.4480.341
5. Pontzer, H., Raichlen, D. A., & Rodman, P. S. (2014). Bipedalism and the energetic cost of human locomotion. *Journal of Human Evolution*, 73, 112–122. doi:10.1016/j.jhevol.2014.06.002
6. White, T. D., Asfaw, B., Beyene, Y., et al. (2009). Ardipithecus ramidus and the paleobiology of early hominids. *Science*, 326(5949), 75–86. doi:10.1126/science.1175802
7. Johanson, D. C., & White, T. D. (1979). A systematic assessment of early African hominids. *Science*, 203(4378), 321–330. doi:10.1126/science.104384

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "ঋজু মানব — রিফ্ট ভ্যালি, দ্বিপদগমন এবং আগুনের প্রভুত্ব"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৬। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-16-the-upright-ape-bn/

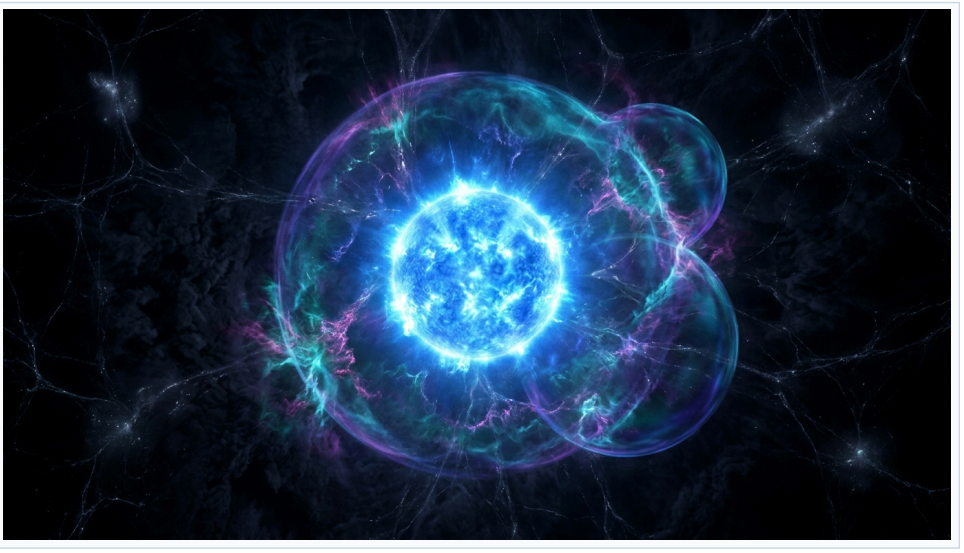
Shakil Mahmud • Research Monograph

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • সপ্তদশ খণ্ড

জ্ঞানীয় বিপ্লব — হোমো স্যাপিয়েন্স, প্রতীকী ভাষা এবং বিমূর্ত চিন্তা

জ্ঞানীয় বিপ্লব — হোমো স্যাপিয়েন্স, প্রতীকী ভাষা এবং বিমূর্ত চিন্তা

1,903 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ১৭: *চিত্র: প্রায় ৪০,০০০ বছর আগে উচ্চ প্যালিওলিথিক সংজ্ঞানাত্মক বিপ্লব: গভীর চুনাপাথরের গুহায় মশাল জ্বেলে হোমো স্যাপিয়েন্স প্রাচীরে বাইসন ও বুনো ঘোড়ার চিত্র আঁকছে; সূচনা হচ্ছে ভাষা, শিল্পকলা ও প্রতীকের।*

মানব বিবর্তনের ইতিহাসের শতকরা নিরানব্বই ভাগেরও বেশি সময় ধরে আমাদের পূর্বপুরুষরা বাস্তুসংস্থানের সাধারণ স্তরের স্তন্যপায়ী ছিল। তারা পাথর কাটত, নদীর তীরে হরিণের পেছনে ছুটত এবং চুলার ধোঁয়ায় শরীর গরম করত; কিন্তু প্রকৃতির ওপর তাদের প্রভাব ছিল বুনো বেবুন, চিতা বা হায়েনাদের মতোই সামান্য। তারপর, এক লক্ষ থেকে সত্তর হাজার বছর পূর্বে এক অভাবনীয় মানসিক ও স্নায়বিক রূপান্তর ঘটে গেল। বিবর্তনীয় ঐতিহাসিকরা যাকে **জ্ঞানীয় বিপ্লব (Cognitive Revolution)** বলে আখ্যা দেন, তাতে আফ্রিকার একটি দল রিকার্সিভ ব্যাকরণযুক্ত ভাষা আয়ত্ত করল, লাল গিরিমাটি ও গুহাচিত্রে বিমূর্ত চিন্তাকে পাথরের গায়ে স্থায়ী করল এবং সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ—এমন সব ধারণায় সম্মিলিতভাবে বিশ্বাস করতে শিখল যার কোনো ভৌত অস্তিত্ব কেবল মানব কল্পনা ব্যতিরেকে নেই। এই সম্মিলিত কল্পনা এমন এক ঐক্যবদ্ধ শক্তির জন্ম দিল যা সমগ্র গ্রহের চেহারা চিরতরে বদলে দিয়েছে।

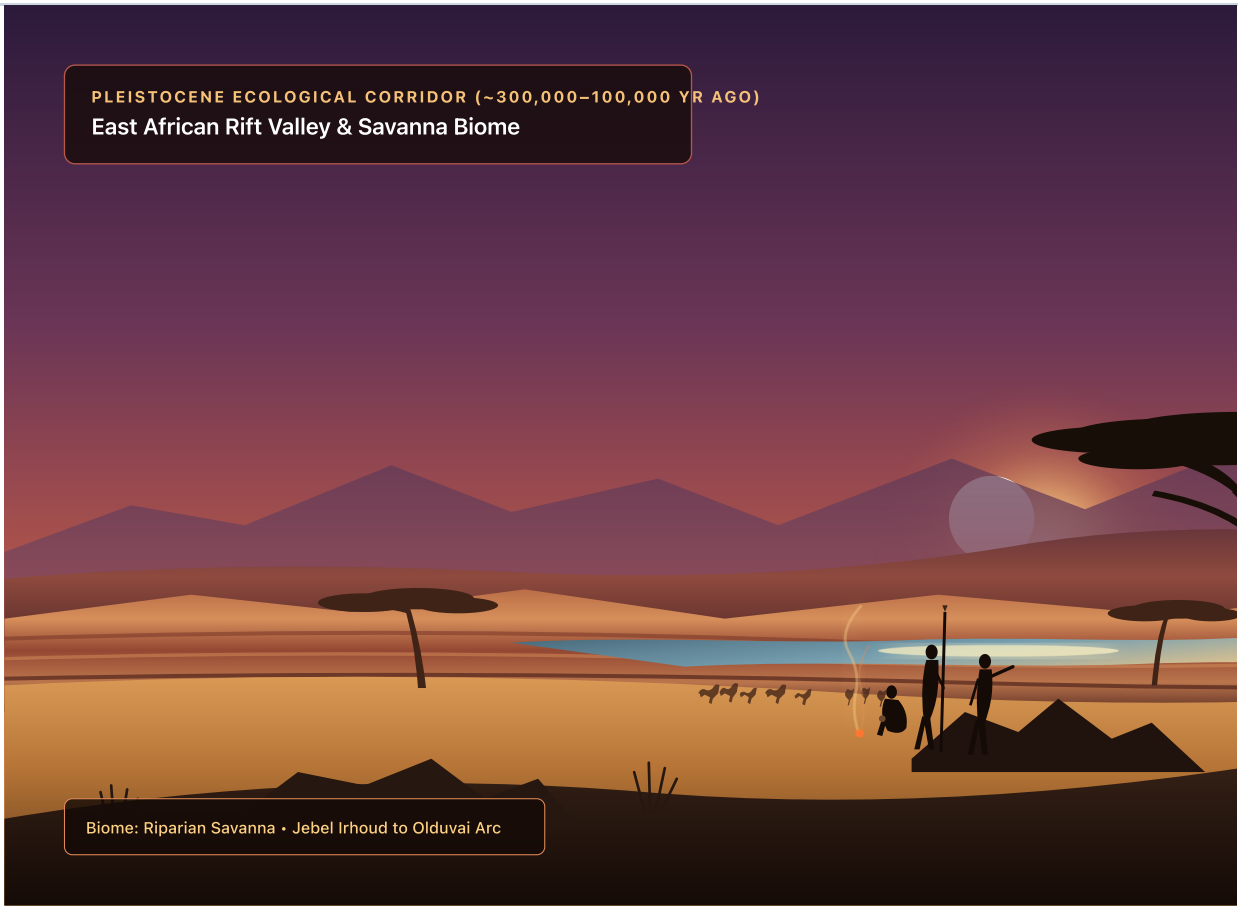
১. হোমো স্যাপিয়েন্সের প্যান-আফ্রিকান উৎপত্তি (~৩১৫,০০০ থেকে ১০০,০০০ বছর পূর্বে)

সম্প্রতি পর্যন্ত নৃতত্ত্ববিদদের ধারণা ছিল যে *হোমো স্যাপিয়েন্স* প্রায় দুই লক্ষ বছর পূর্বে পূর্ব আফ্রিকার একটি একক "স্বর্গোদ্যান" থেকে উৎপত্তি লাভ করেছে। কিন্তু ২০১৭ সালে জঁ-জাক হুবলিনের নেতৃত্বে মরক্কোর **জেবেল ইরহুদে (Jebel Irhoud)** খননকার্য এই ধারণাকে আমূল পাল্টে দেয়—সেখানে প্রায় **৩১৫,০০০ বছর প্রাচীন** আদিম আধুনিক মানুষের জীবাশ্ম ও মধ্যপ্রস্তর যুগের পাথুরে অস্ত্র আবিষ্কৃত হয়।

শারীরস্থানিক পরিমাপে একটি গভীর বিবর্তনীয় সত্য ধরা পড়ে:

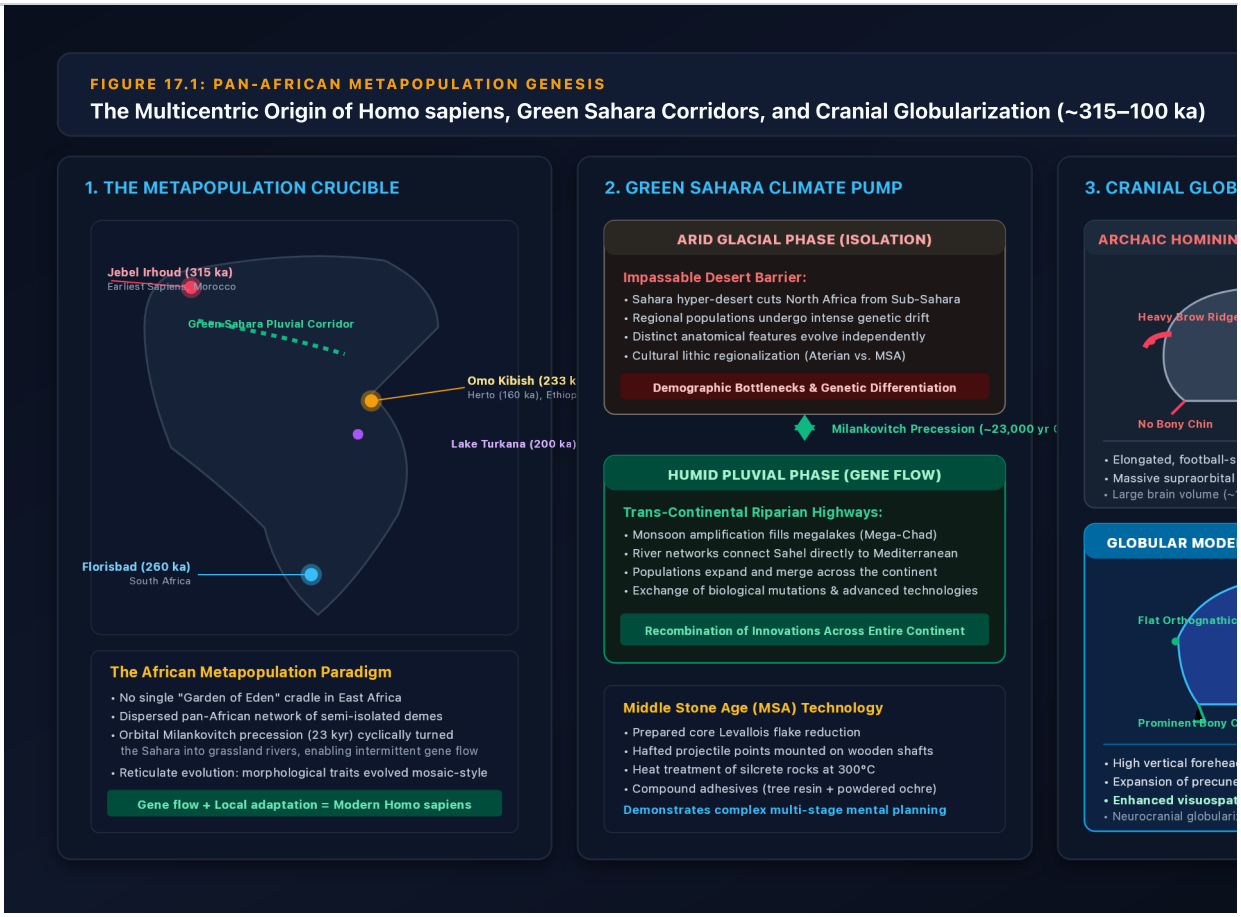
- জেবেল ইরহুদের মানুষের মুখের কঙ্কাল ছিল সম্পূর্ণ আধুনিক—ভুরু সামান্য বাঁকানো, মুখমণ্ডল সমতল এবং চোখের নিচে আধুনিক মানুষের মতো সুনির্দিষ্ট খাঁজ বিদ্যমান।
- কিন্তু তাদের মাথার খুলির পেছনের অংশটি ছিল প্রাচীন নরবানরের মতো লম্বা ও চ্যাপ্টা (platycephalic); যা আজকের মানুষের মতো গোল নয়।

আমাদের প্রজাতির আসল শারীরিক স্বাক্ষর—**গোলাকার মাথার খুলি (cranial globularity)**—পরবর্তী দুই লাখ বছর ধরে গড়ে উঠেছিল। মস্তিষ্কের প্যারিটাল ও সেরিবেলার লোবের স্ফীতির মাধ্যমে এই স্নায়বিক পুনর্গঠন ঘটেছিল—যা মানুষের স্থানিক বিশ্লেষণ, দৃশ্য-স্মৃতি এবং দূরবর্তী কল্পনার ক্ষমতা শতগুণ বাড়িয়ে দেয়।



প্লাইস্টোসিন সাভানা বাস্তুসংস্থান: আফ্রিকান রিফ্ট ভ্যালি করিডোর (~৩০০,০০০–১০০,০০০ বছর পূর্বে)। মরক্কোর জেবেল ইরহুদ থেকে পূর্ব আফ্রিকার গ্রেট রিফ্ট ভ্যালি পর্যন্ত বিস্তৃত আন্তঃসংযুক্ত অঞ্চলে আদিম *হোমো স্যাপিয়েন্স* সাভানা ও নদীমাতৃক বনাঞ্চলের পরিবর্তনশীল পরিবেশে টিকে থাকতে শিখেছিল। আগ্নেয়গিরির শৃঙ্গ ও প্রাচীন হ্রদের তীরে পাথুরে বর্শা হাতে তারা বিচরণ করত এবং নিয়ন্ত্রিত চুলার আগুন জ্বালিয়ে বন্যপ্রাণী থেকে আত্মরক্ষা ও রান্না করা খাবার নিশ্চিত করত।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৭.১: প্যান-আফ্রিকান মেটাজংশন ও ক্রেনিয়াল গ্লোবুলারাইজেশন (~৩১৫–১০০ হাজার বছর পূর্বে)। আধুনিক হোমো স্যাপিয়েন্স পূর্ব আফ্রিকার কোনো একক স্বর্গোদ্যান থেকে নয়, বরং সমগ্র আফ্রিকা জুড়ে ছড়িয়ে থাকা আধা-বিচ্ছিন্ন জনগোষ্ঠীর আন্তঃসংযুক্ত নেটওয়ার্ক থেকে উদ্ভূত হয়েছিল (মরক্কোর জেবেল ইরহুদ ৩১৫ ka, ফ্লোরিসব্যাড ২৬০ ka, ওমো কিবিশ ২৩৩ ka)। মিলানকোভিচ কক্ষীয় চক্র সাহারাকে পর্যায়ক্রমে সবুজ জলবায়ু করিডোরে রূপান্তর করত—যা মহাদেশব্যাপী জিনগত পুনর্বিন্যাস এবং মস্তিষ্কের প্যারিটাল লোবের স্ফীতির মাধ্যমে গোলাকার মাথার খুলি গঠন করেছিল।

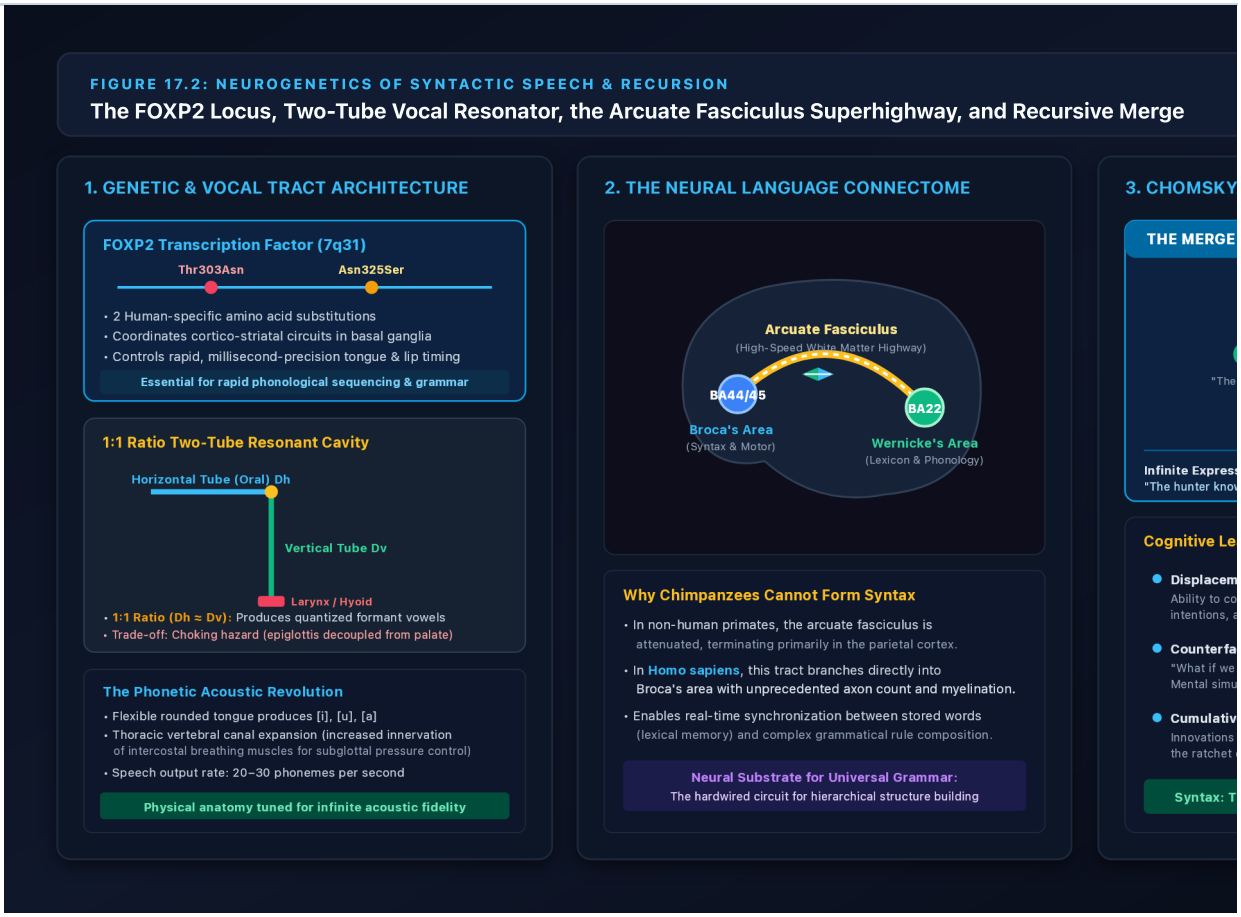
২. ব্যাকরণগত ভাষা ও রিকার্শনের স্নায়ু-জিনতত্ত্ব

শিম্পাঞ্জি ও বানরদের বিভিন্ন সতর্ক সংকেত রয়েছে (যেমন “ঈগল”, “সাপ” বা “চিতা”), কিন্তু তাদের যোগাযোগ সবসময় তাৎক্ষণিক প্রত্যক্ষ সংকেতের মধ্যেই সীমাবদ্ধ। মানুষের ভাষার মহাবিপ্লব কেবল উচ্চশব্দে ডাক দেওয়া নয়, বরং **অসীম রিকার্সিভ বাক্যতত্ত্ব (semantic recursion)**—যার মাধ্যমে সীমিত ধ্বনিমালা জোড়া লাগিয়ে অসীম সংখ্যক নতুন চিন্তা ও বাক্য সৃষ্টি করা যায়।

$$\mathcal{L} = \{\text{বাক্য} \longrightarrow \text{বিশেষ্য খণ্ড} + \text{ক্রিয়া খণ্ড}\}$$

এই ভাষার ক্ষমতার পেছনে ছিল দুটি জৈবিক রূপান্তর:

জৈবিক দিক	শারীরস্থানিক / জিনগত প্রক্রিয়া	ভাষাগত পরিণতি
কণ্ঠনালীর পুনর্বিন্যাস	গলবিলের গভীরে ল্যারিংসের অবনমন; মাথার খুলির নিচে বাঁক যা অনুভূমিক ও উল্লম্ব দুটি সমান অনুনাদক গহ্বর তৈরি করে।	জিহ্বা ও গলার সূক্ষ্ম পেশী নিয়ন্ত্রণ উন্মুক্ত করে, যা দ্রুত বিভিন্ন স্বরধ্বনি (/a/, /i/, /u/) অবিকল উচ্চারণে সক্ষম করে।
FOXP2 ট্রান্সক্রিপশন ফ্যাক্টর	মানুষের ধারায় দুটি অনন্য অ্যামিনো অ্যাসিডের রূপান্তর (৩০৩ অবস্থানে থ্রিওনিন-টু-অ্যাসপারাজিন এবং ৩২৫ অবস্থানে অ্যাসপারাজিন-টু-সেরিন)।	মস্তিষ্কের স্ট্রায়েটামের সাইন্যাপটিক প্লাস্টিসিটি নিয়ন্ত্রণ করে, যা মুখের পেশীগুলোকে দ্রুত উচ্চারণের জন্য সুনির্দিষ্টভাবে সাজায়।
আর্কুয়েট ফ্যাসিকুলাসের স্ফীতি	স্নায়ুর এক বিশালাকার অ্যাক্সন রজ্জু যা ওয়ার্নিকের অঞ্চলকে সরাসরি ব্রোকার অঞ্চলের সাথে যুক্ত করে।	শ্রবণ সংকেতকে তাৎক্ষণিকভাবে রিকার্সিভ বাক্য গঠনে অনুবাদ করার দ্রুত স্নায়বিক সংযোগ নিশ্চিত করে।



চিত্র ১৭.২: বাক্যগঠনমূলক ভাষা ও রিকার্শনের স্নায়ু-জিনতত্ত্ব। মানুষের অনন্য FOXP2 ট্রান্সক্রিপশন ফ্যাক্টরের দুটি অ্যামিনো অ্যাসিড প্রতিস্থাপন এবং কণ্ঠনালীর নিচে নেমে সমান ১:১ অনুপাতের দুই-নালী বিশিষ্ট অনুনাদক গহ্বর দ্রুত ধ্বনিভিত্তিক উচ্চারণের ক্ষমতা দেয়। মস্তিষ্কের ভেতরে সুসংগঠিত আর্কুয়েট ফ্যাসিকুলাস ব্রোকার অঞ্চল ও ওয়ার্নিকের অঞ্চলকে সরাসরি সংযুক্ত করে—যা সীমিত ধ্বনিমালা থেকে রিকার্সিভ একত্রীকরণের (Merge operation) মাধ্যমে সীমাহীন স্তরবিন্যস্ত ভাব প্রকাশের ক্ষমতা এনে দিয়েছে।

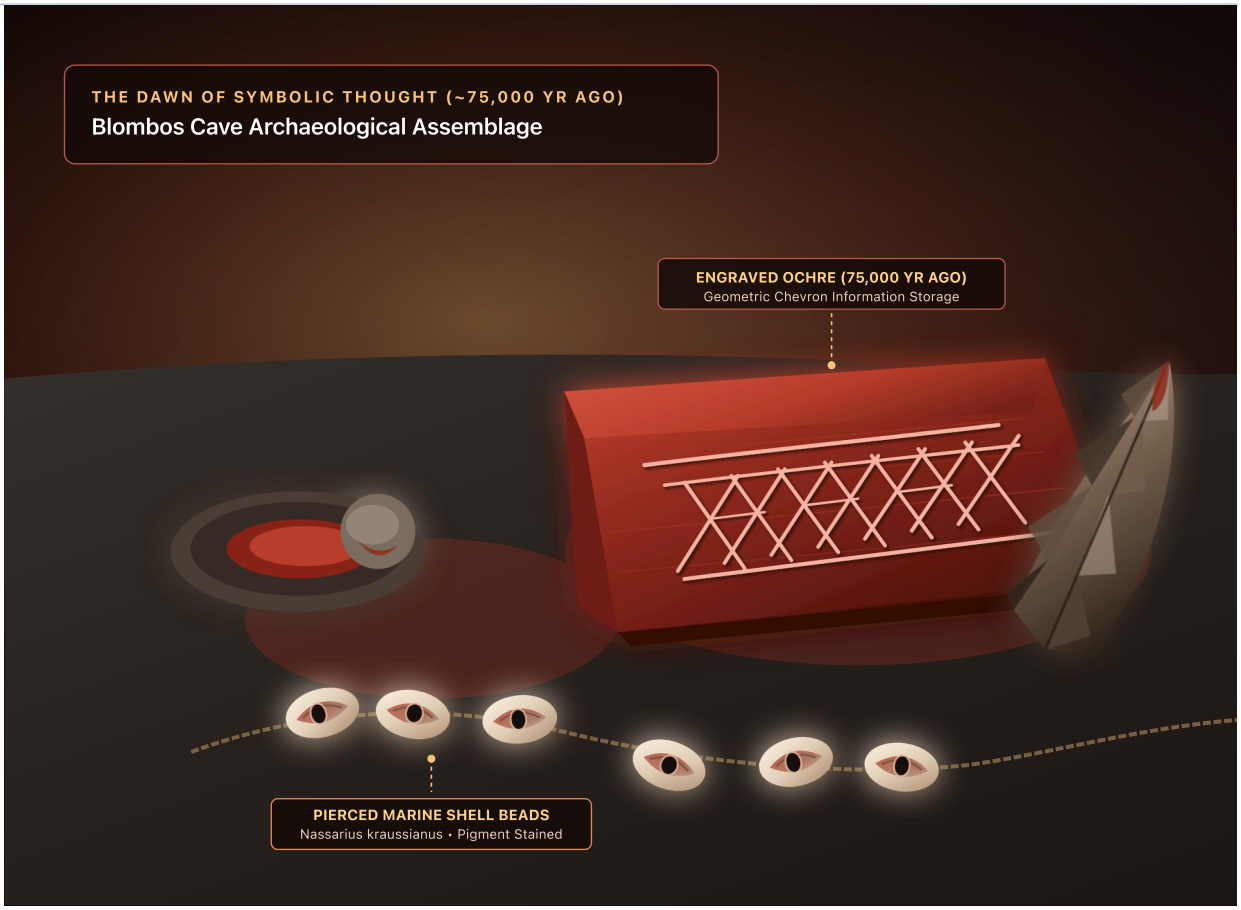
৩. প্রতীকী জাগরণ ও বহিঃস্থ স্মৃতিভাণ্ডার (~১০০,০০০ থেকে ৪০,০০০ বছর পূর্বে)

ভাষাগত ব্যাকরণ খুব দ্রুত বস্তুগত সংস্কৃতিতে রূপ নিল। লক্ষ লক্ষ বছর ধরে আশুলিয়ান কুঠার হাজার হাজার প্রজন্ম ধরে অপরিবর্তিত ছিল। কিন্তু এক লাখ বছর পূর্বে দক্ষিণ আফ্রিকায় এই স্থবিরতা ভেঙে চুরমার হয়ে যায়:

ব্লোম্বোস গুহার গিরিমাটির নকশা

দক্ষিণ আফ্রিকার উপকূলে অবস্থিত **ব্লোম্বোস গুহায় (Blombos Cave)** ক্রিস্টোফার হেনশিলউড **৭৫,০০০ বছর প্রাচীন** লাল গিরিমাটির খণ্ড আবিষ্কার করেন। মসৃণ পাথরের ওপর ধারালো অস্ত্র দিয়ে জ্যামিতিক ক্রসহ্যাচ শেভরন নকশা খোদাই করা ছিল। সাথে লাল রঙে রঞ্জিত ছিদ্রযুক্ত শামুকের মালা প্রমাণ করে যে আদিম মানুষ বংশপরম্পরায় বিমূর্ত প্রতীকী তথ্য সংরক্ষণ ও স্থানান্তরের জন্য ভৌত মাধ্যম ব্যবহার শুরু করেছিল।

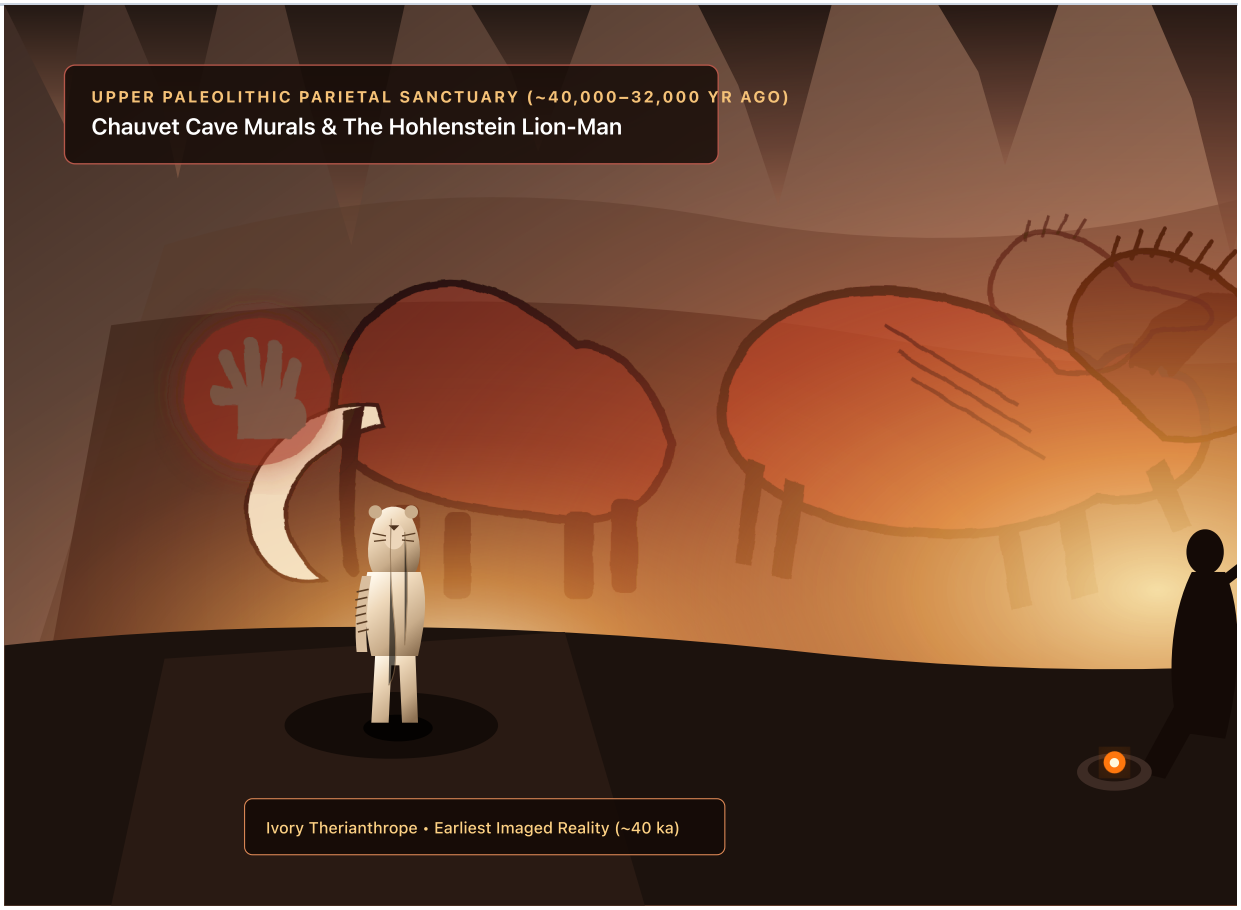
Shakil Mahmud • Research Monograph



প্রতীকী চিন্তার উন্মেষ: ব্লোম্বোস গুহার প্রত্নতাত্ত্বিক নিদর্শন (~৭৫,০০০ বছর পূর্বে)। দক্ষিণ আফ্রিকার দক্ষিণ উপকূলে আবিষ্কৃত এই মসৃণ লাল গিরিমাটি (সিলিসিয়াস হেমাটাইট) ফলকে পাথুরে অস্ত্র দিয়ে সুপরিকল্পিত জ্যামিতিক ক্রসহ্যাচ শেভরন নকশা (× × ×) খোদাই করা রয়েছে। লাল রঙে রঞ্জিত এবং সুতোয় বাঁধার জন্য ছিদ্রযুক্ত *নাসারিয়াস* শামুকের মালাসহ এই নিদর্শনগুলো মানব প্রাগৈতিহাসে জৈবিক মস্তিষ্কের বাইরে সংরক্ষিত প্রথম বহিঃস্থ প্রতীকী তথ্যভাণ্ডার।

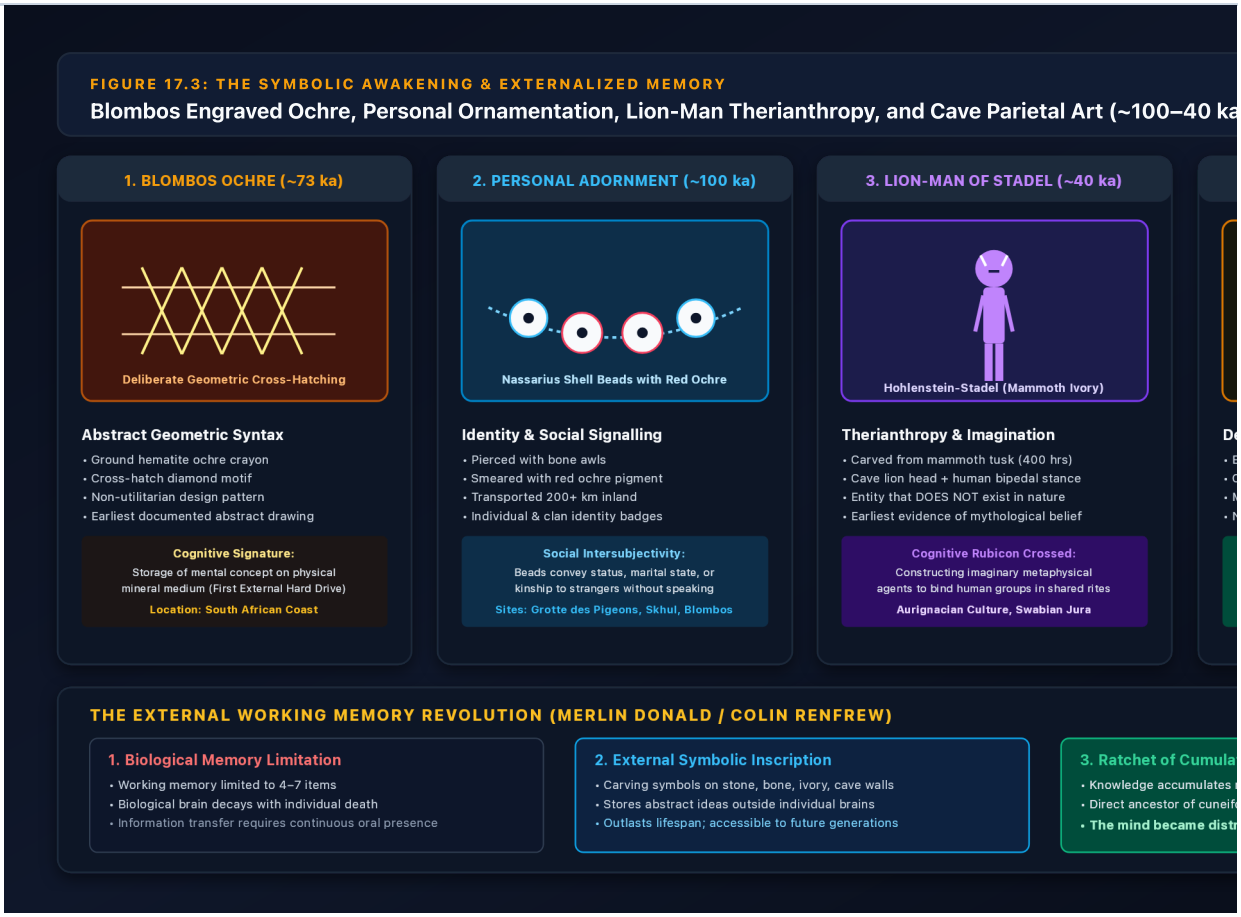
চল্লিশ হাজার বছর পূর্বে যখন আধুনিক মানুষ ইউরোপে প্রবেশ করল, তখন এই শিল্প চরম শিখরে পৌঁছাল। জার্মানির শোয়াবিয়ান জুরায় ম্যামথের দাঁত খোদাই করে তৈরি হলো **সিংহ-মানব (Lion-Man of Stadel)**—মানুষের ধড় ও গুহা সিংহের মাথা সমন্বিত এক মূর্তি। এটি মানুষের এমন কিছু কল্পনা করার প্রথম অকাট্য বস্তুগত প্রমাণ, যার কোনো বাস্তব উপস্থিতি প্রকৃতিতে নেই।

শোভে (Chauvet), **লাস্কো (Lascaux)** এবং **আলতামিরার** গভীর অন্ধকার গুহায় শিল্পীরা কয়লা ও গিরিমাটি দিয়ে চিত্রিত করল ম্যামথ, গণ্ডার, হরিণ ও বুনো ঘোড়ার নিখুঁত গতিময় পাল। পাথরের দেয়ালের প্রাকৃতিক উঁচুনীচু ঢেউ ব্যবহার করে তারা ত্রিমাত্রিক গভীরতা ফুটিয়ে তুলেছিল—যা প্রাণীর চর্বির প্রদীপের আলোয় জীবন্ত হয়ে উঠত।



উচ্চ পুরাপ্রস্তরযুগীয় গুহা অভয়ারণ্য: শোভে গুহাচিত্র ও স্ট্যাডেলের সিংহ-মানব (~৪০,০০০–৩২,০০০ বছর পূর্বে)। গভীর ভূগর্ভস্থ চুনাপাথর গুহায় আদিম শিল্পীরা কয়লা, লাল গিরিমাটি ও পাথরের ঢেউ খেলানো উপরিভাগ ব্যবহার করে চর্বির প্রদীপের আলোয় এঁকেছিল স্তেপ বাইসন, লোমশ ম্যামথ ও বুনো ঘোড়ার জীবন্ত পাল। সামনে প্রদর্শিত ৪০,০০০ বছর প্রাচীন ম্যামথের দাঁতে খোদাই করা *হোহলেনস্টাইন-স্ট্যাডেলের সিংহ-মানব* মূর্তি মানুষের কাল্পনিক বাস্তবতা ও পৌরাণিক ভাবনার প্রথম বৈপ্লবিক প্রতীক।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৭.৩: প্রতীকী জাগরণ এবং বহিঃস্থ স্মৃতিভাণ্ডার (~১০০–৪০ হাজার বছর পূর্বে)। দক্ষিণ আফ্রিকার ব্লোম্বোস গুহায় জ্যামিতিক নকশা খোদাই করা লাল গিরিমাটি (ochre), ফুটো করা শামুকের মালা, স্ট্যাডেলের সিংহ-মানব মূর্তি এবং ইউরোপের গুহাচিত্র (শোভে, লাস্কো) প্রমাণ করে যে মানুষ নিজস্ব চিন্তাকে প্রথমবার পাথরের ওপর স্থায়ীভাবে খোদাই করে রাখতে শিখেছিল। এটি ছিল জৈবিক ডিএনএ-র বাইরে প্রজন্ম থেকে প্রজন্মে তথ্য সঞ্চালনের প্রথম বহিঃস্থ স্মৃতিভাণ্ডার।

৪. কাল্পনিক বাস্তবতা ও অতি-সহযোগিতা: ডানবারের সংখ্যা অতিক্রম

বিবর্তনীয় জীববিজ্ঞানে রবিন ডানবার প্রমাণ করেছিলেন যে একটি প্রাইমেট প্রজাতির মস্তিষ্কের নিওকর্টেক্সের আকার নির্ধারণ করে দেয় তাদের সামাজিক দলের সর্বোচ্চ সদস্য সংখ্যা। মানুষের ক্ষেত্রে এই জৈবিক সীমাটি হলো প্রায় **১৫০ জন**—যা **ডানবারের সংখ্যা (Dunbar's number)** নামে পরিচিত। এর চেয়ে বেশি মানুষ পারস্পরিক ব্যক্তিগত পরিচর্যা ছাড়া একসাথে থাকলে দলটিতে অবিশ্বাস তৈরি হয় এবং তা ভেঙে যায়।

তাহলে কীভাবে আধুনিক মানবজাতি লক্ষ লক্ষ অপরিচিত মানুষকে নিয়ে রাষ্ট্র, সেনাবাহিনী বা বিশাল অর্থনৈতিক বাজার পরিচালনা করে?

ঐতিহাসিক ইউভাল নোয়াহ হারারির ভাষায় এর চাবিকাঠি হলো **কাল্পনিক বাস্তবতা (Imagined Realities)**। কেবল হোমো স্যাপিয়েন্সই এমন সব গল্পে যৌথভাবে বিশ্বাস স্থাপন করতে পারে যা কোনো গাছ বা নদীর মতো বাস্তব নয়:

- **পূর্বপুরুষের আত্মা ও টোটেম:** তুষারাবৃত সমভূমিতে দেখা হওয়া দুটি সম্পূর্ণ অপরিচিত ব্যক্তি যদি উভয়েই "পবিত্র ভাল্লুক"-এর সন্তান বলে বিশ্বাস করত, তবে তারা যুদ্ধ না করে পরস্পরের সাথে শিকারের মাংস ও পাথরের ফলা বিনিময় করত।
- **পৌরাণিক অনুশাসন ও ট্যাবু:** যৌথ পুরাণের নৈতিক অনুশাসন দলের ভেতর সহযোগিতা নিশ্চিত করত এবং নিয়মভঙ্গকারীকে সমাজচ্যুত করে বা মৃত্যুদণ্ড দিয়ে শাস্তি দিত।
- **আন্তঃব্যক্তিক মূল্যমান:** একটি পালিশ করা সামুদ্রিক কড়ি বা অ্যাম্বার পাথরের নিজস্ব কোনো ব্যবহার না থাকলেও সবার যৌথ বিশ্বাসের কারণে তা মূল্যবান মুদ্রায় পরিণত হয়—যা হাজার হাজার মাইলব্যাপী দূরপাল্লার বাণিজ্য সম্ভব করে তুলেছিল।



চিত্র ১৭.৪: আন্তঃব্যক্তিক রূপকথার মাধ্যমে ডানবারের সংখ্যা ভঙ্গকরণ। নরবানররা সরাসরি পরিচয়ের মাধ্যমে সর্বোচ্চ ৫০-৬০ জনের দল পরিচালনা করতে পারে (ডানবারের জৈবিক সীমা: N ≈ ১৫০)। কিন্তু হোমো স্যাপিয়েন্স এক যৌথ কাল্পনিক স্তরের জন্ম দিল। সাধারণ টোটেম, আধ্যাত্মিক পূর্বপুরুষ এবং অভিন্ন পৌরাণিক বিশ্বাসের ওপর ভিত্তি করে হাজার হাজার অপরিচিত মানুষ একে অপরকে ভাই হিসেবে মেনে নিল—যার ফলে শান্তিপূর্ণ বাণিজ্য এবং মহাদেশব্যাপী যৌথ ম্যামথ শিকার সম্ভব হয়েছিল।

৫. আফ্রিকা থেকে বিশ্বজয় ও আদিম আত্মীয়দের পরিণতি (~৭০,০০০ থেকে ৩০,০০০ বছর পূর্বে)

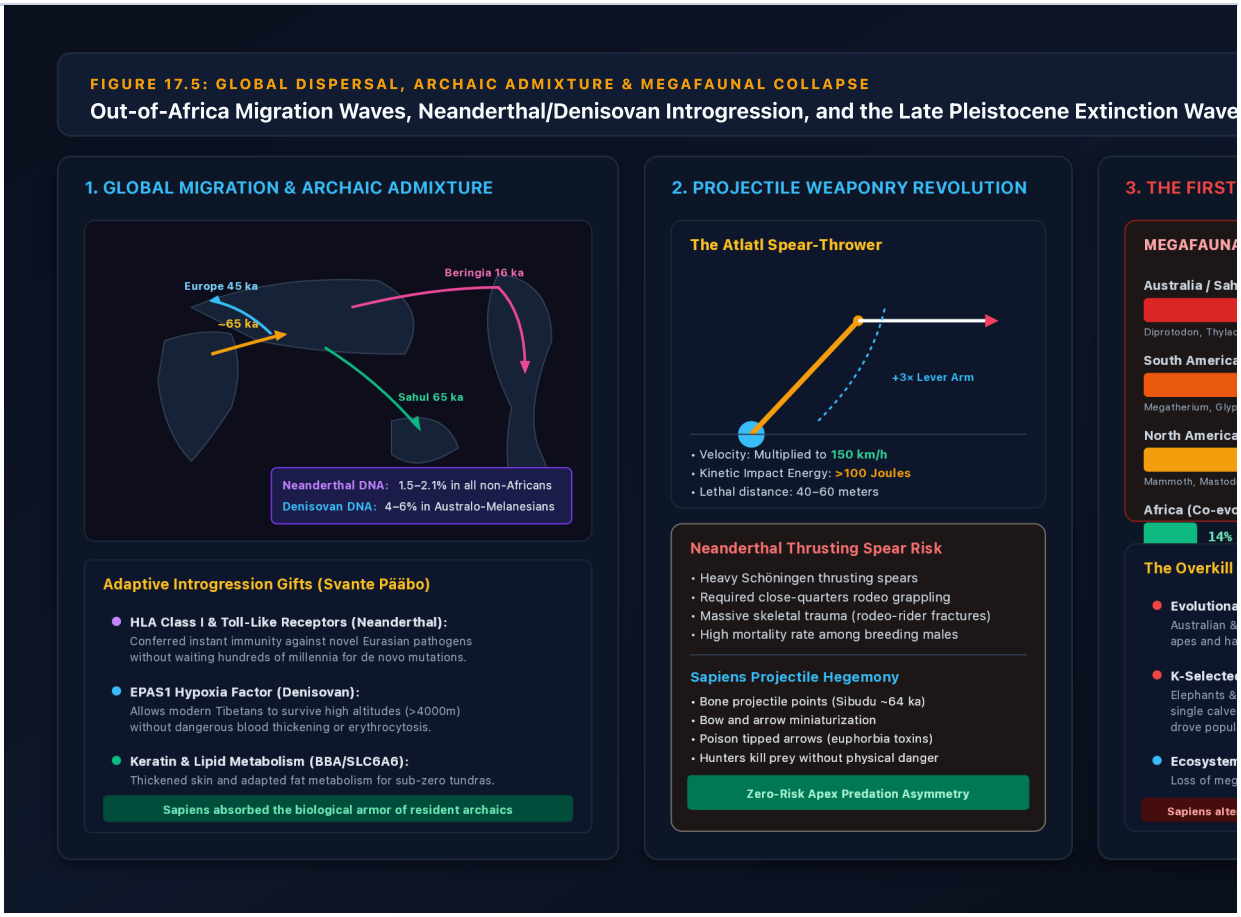
রিকার্সিভ ভাষা, দূরপাল্লার বর্শা নিক্ষেপক যন্ত্র (অ্যাটলাটল) এবং হাড়ের সুঁই দিয়ে সেলাই করা চামড়ার পোশাকে সজ্জিত হয়ে প্রায় ৭০,০০০ বছর পূর্বে এক ক্ষুদ্র দল আফ্রিকা ছেড়ে বাব-এল-মান্দেব প্রণালী পাড়ি দিল।

ইউরেশিয়ায় তারা এমন কিছু হোমোনিন আত্মীয়ের মুখোমুখি হলো যারা শত শত বছর ধরে সেখানে রাজত্ব করছিল: ইউরোপ ও মধ্যপ্রাচ্যের চরম শীতে অভ্যস্ত **নিয়ান্ডারথাল (Homo neanderthalensis)** এবং সাইবেরিয়ার রহস্যময় **ডেনিসোভান (Denisovans)**। আধুনিক জিনতত্ত্ববিদ সভান্তে পাবোর প্রাচীন ডিএনএ গবেষণায় প্রমাণিত হয়েছে যে এই মিলন কেবল যুদ্ধেই সীমাবদ্ধ ছিল না; সেখানে আন্তঃপ্রজনন ঘটেছিল:

- আজকের সমস্ত অ-আফ্রিকান মানুষের জিনোমে **১% থেকে ২% নিয়ান্ডারথাল ডিএনএ** রয়েছে—যা ত্বক ও চুলের কেরাটিন এবং ইউরেশিয়ান রোগ প্রতিরোধের ক্ষমতা জুগিয়েছে।
- মেলানেশিয়া, অস্ট্রেলিয়া ও ফিলিপাইনের আদিবাসীদের মধ্যে রয়েছে **৪% থেকে ৬% ডেনিসোভান ডিএনএ**—যার মধ্যে উচ্চ পাহাড়ে কম অক্সিজেনে বেঁচে থাকার জন্য প্রয়োজনীয় *EPAS1* জিন অন্যতম।

কিন্তু এই মিলনের পরেও, আধুনিক মানুষ যেখানেই স্থায়ী হয়েছে, আদিম হোমোনিনরা কয়েক হাজার বছরের মধ্যে নিশ্চিহ্ন হয়ে গেছে। হোমো স্যাপিয়েন্সের উন্নত যোগাযোগ, বর্শা নিক্ষেপ এবং বিশাল সামাজিক নেটওয়ার্কের প্রতিযোগিতায় টিকতে না পেরে জিব্রাল্টারের খাড়া পাহাড়ের গুহায় প্রায় ৩৯,০০০ বছর পূর্বে শেষ নিয়ান্ডারথালরা চিরতরে হারিয়ে যায়।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৭.৫: বিশ্বব্যাপী বিস্তার, সংকরায়ন এবং দানব প্রাণীদের বিলুপ্তি (~৭০–১০ হাজার বছর পূর্বে)। বর্শা নিক্ষেপক যন্ত্র ও ধনুক-বাণে সজ্জিত হয়ে হোমো স্যাপিয়েন্স আফ্রিকা থেকে বেরিয়ে ইউরেশিয়ায় ছড়িয়ে পড়ে। নিয়ান্ডারথাল (১.৫–২% রোগপ্রতিরোধক ডিএনএ) এবং ডেনিসোভানদের (৪–৬% উচ্চতায় টিকে থাকার EPAS1 জিন) সাথে সংকরায়ন তাদের অভিযোজন বাড়িয়ে দেয়। কিন্তু যে মহাদেশেই তারা পা রেখেছে, আদিম দানবীয় প্রাণীরা চরম বিলুপ্তির শিকার হয়েছে (অস্ট্রেলিয়ায় ৮৫% এবং দক্ষিণ আমেরিকায় ৮৩% দানব প্রাণী নিশ্চিহ্ন)।

৬. মহা-শিকার: প্লাইস্টোসিন দানব প্রাণীদের মহাবিলুপ্তি

জ্ঞানীয় বিপ্লবের পরিবেশগত পরিণতি ছিল পৃথিবীর বৃহৎ প্রাণীদের জন্য এক মহাপ্রলয়। আফ্রিকার প্রাণীরা লক্ষ লক্ষ বছর ধরে মানুষের সাথে বিবর্তিত হওয়ায় তারা দুইপেয়ে শিকারীদের ভয় পেতে শিখেছিল। কিন্তু হোমো স্যাপিয়েন্স যখন খোলা সাগরে নৌকা ভাসিয়ে **অস্ট্রেলিয়ায় পৌঁছাল (~৫০,০০০ বছর পূর্বে)** এবং বেরিং ল্যান্ড ব্রিজ পেরিয়ে **আমেরিকায় ঢুকল (~১৫,০০০ বছর পূর্বে)**, তখন সেখানকার স্থানীয় প্রাণীরা মানুষকে কোনো বিপদের কারণ হিসেবে চিনত না।

ধ্বংসযজ্ঞ ছিল দ্রুত ও সর্বগ্রাসী:

1. **অস্ট্রেলিয়া:** মানুষের পদার্পণের কয়েক সহস্রাব্দের মধ্যে ৪৫ কেজির বেশি ওজনের **৮৫% স্তন্যপায়ী ও পাখি বিলুপ্ত হলো**—যার মধ্যে ছিল গণ্ডারের আকারের ওমব্যাট (*ডিপ্রোটোডন*), ২৫০ কেজির উড়তে অক্ষম পাখি (*জেনিয়র্নিস*) এবং শিকারী মারসুপিয়াল সিংহ (*থাইলাকোলিও*)।
2. **আমেরিকা মহাদেশ:** ক্লোভিস শিকারীদের ধারালো বর্শার মুখে বরফ গলার মাত্র এক হাজার বছরের মধ্যে উত্তর আমেরিকার **৭০% দানব প্রাণী মুছে গেল**—যার মধ্যে ছিল কলম্বিয়ান ম্যামথ, দানব স্লথ (*মেগাথেরিয়াম*), প্রাচীন উট এবং তীক্ষ্ণ দাঁতের স্যাবোর-টুথ বাঘ (*স্মিলোডন*)।

খ্রিস্টপূর্ব ১০,০০০ অব্দ নাগাদ মানুষ খাদ্য শৃঙ্খলের শীর্ষে সম্পূর্ণ একা দাঁড়িয়ে ছিল। অন্যান্য সমস্ত হোমোনিন প্রজাতি নিশ্চিহ্ন; প্রাচীন দানবীয় প্রাণীদের সাম্রাজ্য ধ্বংস। প্লাইস্টোসিনের হিমবাহ যখন গলে পানি হতে শুরু করল, উর্বর উপত্যকায় যাযাবর শিকারীদের দল মানব ইতিহাসের সবচেয়ে বড় অর্থনৈতিক জুয়া খেলায় নামতে যাচ্ছিল: বুনো বীজ, পশু এবং খোদ মানব সভ্যতাকে নিজের বশে আনা।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Hublin, J. J., Ben-Ncer, A., Bailey, S. E., et al. (2017). New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. *Nature*, 546(7657), 289–292. doi:10.1038/nature22336
2. Enard, W., Przeworski, M., Fisher, S. E., et al. (2002). Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language. *Nature*, 418(6900), 869–872. doi:10.1038/nature01025
3. Henshilwood, C. S., d'Errico, F., Yates, R., et al. (2002). Emergence of modern human behavior: Middle Stone Age engravings from South Africa. *Science*, 295(5558), 1278–1280. doi:10.1126/science.1067575
4. Green, R. E., Krause, J., Briggs, A. W., et al. (2010). A draft sequence of the Neandertal genome. *Science*, 328(5979), 710–722. doi:10.1126/science.1188021

5. Dunbar, R. I. (1992). Neocortex size as a constraint on group size in primates. *Journal of Human Evolution*, 22(6), 469–493. doi:10.1016/0047-2484(92)90081-J
6. Harari, Y. N. (2014). *Sapiens: A Brief History of Humankind*. Harper. ISBN:978-0062316097.
7. Koch, P. L., & Barnosky, A. D. (2006). Late Quaternary extinctions: state of the debate. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 215–250. doi:10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132415

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "জ্ঞানীয় বিপ্লব — হোমো স্যাপিয়েন্স, প্রতীকী ভাষা এবং বিমূর্ত চিন্তা"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৭। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-17-the-cognitive-revolution-bn/

Shakil Mahmud • Research Monograph

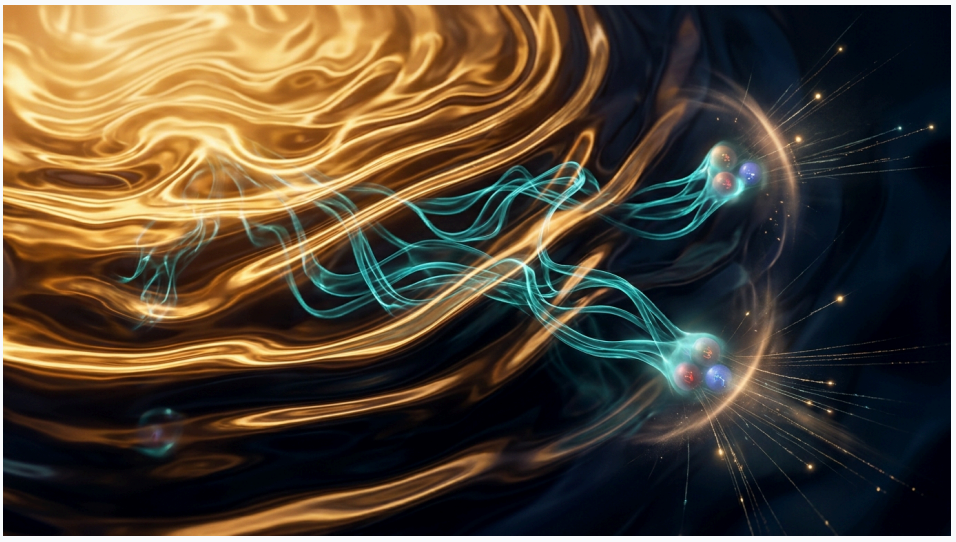
শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • অষ্টাদশ খণ্ড

প্রকৃতির বশ্যতা — নিওলিথিক স্ফুলিঙ্গ, কিউনিফর্ম এবং নগরের উত্থান

প্রকৃতির বশ্যতা — নিওলিথিক স্ফুলিঙ্গ, কিউনিফর্ম এবং নগরের উত্থান

1,839 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ

❖



চিত্র ১৮: *চিত্র: প্রায় ১০,০০০ থেকে ৩,০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দে নিওলিথিক বিপ্লব: উর্বর অর্ধচন্দ্রাকার উপত্যকায় কৃষকরা গম চাষ করছে এবং মেসোপটেমিয়ায় গড়ে উঠছে খাল, সেচ ব্যবস্থা ও প্রাচীন মানব সভ্যতার প্রথম নগর।*

দুই লক্ষ বছর ধরে পৃথিবীতে জন্মগ্রহণকারী প্রতিটি মানুষ ছিল এক যাযাবর শিকারী—যার বেঁচে থাকা নির্ভর করত প্রাণীদের ঋতুভিত্তিক অভিবাসন, ভোজ্য মূলকন্দের অবস্থান এবং পানির কূপের স্মৃতি মুখস্থ রাখার ওপর। কিন্তু ১১,৭০০ বছর পূর্বে যখন পৃথিবী ইয়াঙ্গার ড্রাইসের শৈত্য থেকে বেরিয়ে হলোসিন যুগের এক উষ্ণ ও পূর্বানুমানযোগ্য শান্ত জলবায়ুতে প্রবেশ করল, তখন এক যুগান্তকারী অর্থনৈতিক রূপান্তর ঘটে গেল। উর্বর চন্দ্রকলা (Fertile Crescent), ইয়াংজি, সিন্ধু ও মেসোআমেরিকার নদী উপত্যকায় মানুষ বর্শা নামিয়ে রেখে জঙ্গল কেটে সাফ করল, খাল কেটে নদীকে নিজের নিয়ন্ত্রণে আনল এবং কৃত্রিম নির্বাচনের মাধ্যমে বুনো ঘাসের জিনোম বদলে দিল। এর মাধ্যমে সূচিত হলো এক অভাবনীয় বিস্ফোরণ: জনসংখ্যা বৃদ্ধি, শ্রমবিভাজন, মাটির ফলকে ভাষার চিরস্থায়ী খোদাই, সার্বভৌম নগররাষ্ট্রের উত্থান এবং অবশেষে মহাবিশ্বকে পরিচালনাকারী সার্বজনীন গাণিতিক সূত্রের আবিষ্কার।

১. হলোসিনের জলবায়ু মরুদ্যান এবং নিওলিথিক রূপান্তর (~১০,০০০ থেকে ৬০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)

প্লাইস্টোসিন যুগ ছিল চরম ও বিশৃঙ্খল জলবায়ু দোলনের এক সময়কাল: আন্তঃহিমবাহ পর্বগুলো মাত্র কয়েক দশকের ব্যবধানে হিমাঙ্কের নিচের বরফযুগে নেমে যেত। এমন অনিশ্চিত আবহাওয়ায় দীর্ঘমেয়াদী কৃষিকাজ চালানো ছিল তাপগতিবিদ্যাগতভাবে অসম্ভব; কারণ ফসল বোনার জন্য প্রয়োজন নির্ভরযোগ্য বার্ষিক বৃষ্টিপাত এবং স্থিতিশীল ঋতুচক্র।

প্রায় ১১,৭০০ বছর পূর্বে পৃথিবী প্রবেশ করল **হলোসিন (Holocene)** যুগে। বৈশ্বিক গড় তাপমাত্রা $\pm 1^{\circ}\mathrm{C}$ সীমার মধ্যে স্থির হয়ে গেল, বায়ুমণ্ডলের CO_2 ২৬০ পিপিএমে স্থিতিশীল হলো এবং মৌসুমী বায়ু নিয়মিত চক্রে বাঁধা পড়ল। লেভান্ট ও আনাতোলিয়ায় যাযাবর শিকারীরা স্থায়ী ছাউনি ফেলে (নাতুফিয়ান সংস্কৃতি) বুনো শস্য পরিচর্যা করতে শুরু করল।



প্রাকৃতিক ভূদৃশ্য: উর্বর ক্রিসেন্ট (Fertile Crescent) বাস্তুসংস্থানিক করিডোর (~৯০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। প্রাথমিক হলোসিনের লেভান্ট ও মেসোপটেমীয় ধনুকাকার উপত্যকার একটি উচ্চ-কোণ বায়বীয় দৃশ্য। বরফযুগের অবসানে বৃষ্টিপাত ও ঋতুচক্র স্থায়ী হওয়ায় টাইগ্রিস ও ইউফ্রেটিস নদীর অববাহিকা এবং তোরোস ও জাগ্রোস পর্বতের পাদদেশ বুনো শস্যের প্রাকৃতিক উদ্যান ও নাতুফিয়ান শিকারীদের প্রথম স্থায়ী পাথুরে বসতির জন্ম দেয়।

শস্যের কৃত্রিম জিনগত পুনর্গঠন

বুনো এমার ও এইনকর্ন গমে বীজের কেন্দ্রীয় কাণ্ড বা **র‍্যাকিস (rachis)** ছিল অতি ভঙ্গুর। পাকার সাথে সাথেই বাতাসের ঝাপটায় কাণ্ড ভেঙে বীজ মাটিতে ছড়িয়ে পড়ত, যা বুনো উদ্ভিদের প্রজননের জন্য জরুরি। শিকারী মানুষ যখন গম কাটত, তখন তারা অজান্তেই সেই গাছগুলোকে বেশি সংগ্রহ করল যাদের জিনগত ত্রুটির কারণে কাণ্ড শক্ত ছিল এবং বীজ ঝরে পড়ত না (non-shattering rachis)। এই সংগৃহীত বীজ পুনরায় রোপণের মাধ্যমে কয়েক শতাব্দীর মধ্যে গম মানুষের সাহায্য ছাড়া নিজে প্রজনন করার প্রাকৃতিক ক্ষমতা হারিয়ে ফেলল—মানুষ ও গম একে অপরের সাথে আজীবনের জন্য আবদ্ধ হয়ে গেল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



উদ্ভিদ বিবর্তনীয় রূপান্তর: ভঙ্গুর রেচিস বনাম অবিকৃত রেচিস (Non-Shattering Rachis) মিউটেশন। (বামে) বুনো আইনকর্ন গম (*Triticum monococcum*), যার ভঙ্গুর রেচিস পরিপক্ক হলে প্রাকৃতিকভাবে ভেঙে বাতাসের মাধ্যমে বীজ ছড়িয়ে দেয়। (ডানে) গৃহপালিত গম, যার শক্ত ও অবিকৃত রেচিস ভারী শস্যদানাকে কান্ডের সাথে মজবুতভাবে আটকে রাখে—যা প্রাকৃতিক বিস্তার রোধ করে উদ্ভিদটিকে মানুষের কাটা ও বপনের ওপর সম্পূর্ণ জিনগতভাবে নির্ভরশীল করে ফেলে।

উদ্ভিদের গৃহপালনের পরেই এলো তৃণভোজী পশুদের বশ্যতা: মৌফলন ভেড়া, বুনো ছাগল, অরক্স (গরুর আদিম রূপ) এবং বুনো শূকর। শান্ত স্বভাব এবং মানুষের কাছাকাছি থাকার বৈশিষ্ট্য দেখে তাদের পালন করা হলো। প্রাণীর গৌণ সুবিধাগুলো—দুধ, উল, হাল টানার শক্তি এবং গোবর সার—মানব সম্প্রদায়ের প্রাপ্য গতিশক্তিকে বহুগুণ বাড়িয়ে দিল।



চিত্র ১৮.১: হলোসিন জলবায়ু মরুদ্যান এবং শস্যের গৃহপালন (~১০,০০০–৬০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। প্লাইস্টোসিনের শত শত সহস্রাব্দের চরম জলবায়ু অস্থিরতার পর হলোসিন এনে দিল ১১,০০০ বছরের এক অভূতপূর্ব স্থিতিশীল তাপমাত্রা (±১°C)। উর্বর চন্দ্রকলায় (Fertile Crescent) যাযাবর মানুষ বুনো গম ও বার্লির ভঙ্গুর শীষের বদলে শক্ত শীষের মিউটেশনকে কৃত্রিম নির্বাচনে বেছে নেয়। মানুষ ও ফসলের এই অবিচ্ছেদ্য মৈত্রী জন্ম ব্যবধান কমিয়ে এক অপরিবর্তনীয় জনসংখ্যা বিস্ফোরণের স্ফুলিঙ্গ জ্বালিয়ে দেয়।

২. হাইড্রোলিক মেগামেশিন: উরুক এবং নগরের বিস্ফোরণ (~৪০০০ থেকে ৩০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)

দক্ষিণ মেসোপটেমিয়ার শুষ্ক পললভূমিতে কেবল বৃষ্টির ওপর নির্ভর করে কৃষিকাজ করা অসম্ভব ছিল। বেঁচে থাকার জন্য প্রয়োজন ছিল এক বিশাল সম্মিলিত প্রকৌশল: শত শত কিলোমিটার সেচখাল খনন, পলি পরিষ্কার এবং বন্যা নিয়ন্ত্রণের জন্য বাঁধ নির্মাণ।

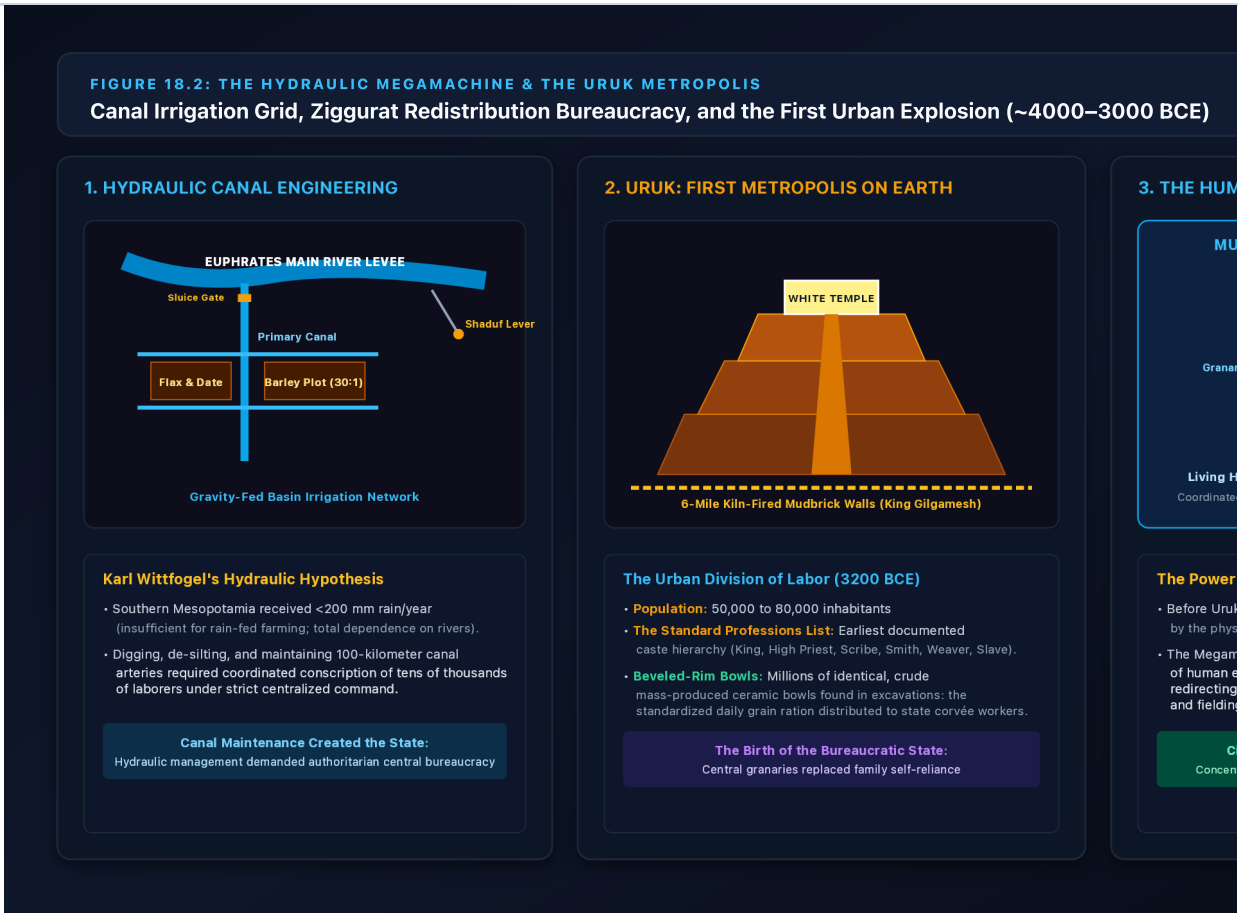
Shakil Mahmud • Research Monograph



নগর স্থাপত্য পুনর্নির্মাণ: প্রাচীন উরুকের হাইড্রোলিক সেচ অবকাঠামো (~৩২০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। মেসোপটেমিয়ার সমভূমিতে ইউফ্রেটিস নদীর পানি নিয়ন্ত্রিত করতে কৃত্রিম মাধ্যাকর্ষণ খাল ও স্লুইস গেটের বিশাল জাল বিছানো হয়েছিল। এই প্রকৌশল বার্লি ও খেজুরের জমিতে ৩০:১ হারে উদ্বৃত্ত খাদ্য উৎপাদন নিশ্চিত করে, যার ওপর ভিত্তি করে আনু মন্দিরের বিশাল টেরেস এবং ৮০,০০০ নাগরিকের বিশ্বের প্রথম মেগাসিটি গড়ে ওঠে।

এই জলপ্রকৌশলের তাগিদ থেকেই জন্ম নিল পৃথিবীর প্রথম প্রকৃত মহানগরী: **উরুক (Uruk)**। খ্রিস্টপূর্ব ৩২00 অব্দ নাগাদ উরুকের ছয় বর্গকিলোমিটার এলাকা জুড়ে ইটের প্রাচীরের ভেতরে বাস করত প্রায় ৫০,০০০ নাগরিক। প্রাকৃতিক ইতিহাসে প্রথমবারের মতো একটি মানব সম্প্রদায় বিশেষায়িত পেশাদার শ্রেণীতে বিভক্ত হয়ে গেল:

সামাজিক / অর্থনৈতিক শ্রেণী	নগর মেগামেশিনে কার্যকরী ভূমিকা	প্রযুক্তিগত অনুঘটক
কৃষক উৎপাদক	জমি চাষ, খাল খনন, শস্য উৎপাদন ও পশুপালন।	আর্ড লাঙল, তামার কাস্তে, বলদের জোয়াল।
কারিগর বিশেষজ্ঞ	মানসম্মত মৃৎপাত্র, বস্ত্র এবং ধাতব অস্ত্রের গণ-উৎপাদন।	ঘূর্ণায়মান চাকা, তামা ও টিনের ব্রোঞ্জ ঢালাই।
লেখক ও মন্দিরের আমলা	কর নিরীক্ষা, জমি জরিপ, খাদ্য বণ্টন ও জ্যোতির্বিজ্ঞানের হিসাব।	আদি-কিউনিফর্ম মাটির ট্যাবলেট, ষাটভিত্তিক (base-60) পাটিগণিত।
সার্বভৌম পুরোহিত রাজা (Ensi)	মতাদর্শিক বৈধতা, দেব-উপাসনা এবং শ্রমবাহিনীর ওপর হুকুমাত।	স্মারক স্থাপত্য (জিগুরাত), প্রাচীন আইন সংহিতা।



চিত্র ১৮.২: হাইড্রোলিক মেগামেশিন এবং উরুক মহানগর (~৪০০০–৩০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। টাইগ্রিস ও ইউফ্রেটিস নদীর অনিশ্চিত বন্যা নিয়ন্ত্রণে প্রয়োজন ছিল বিশাল মাধ্যাকর্ষণ খাল নেটওয়ার্ক ও স্লুইস গেট। এর ফলে উৎপন্ন উদ্বৃত্ত খাদ্যশস্য (৩০:১ ফসল উৎপাদন) উরুকে ৮০,০০০ নাগরিকের প্রথম মহানগরীর জন্ম দেয়—যা গড়ে উঠেছিল মন্দিরের শস্যাগার, মানসম্মত রেশনের মাটির বাটি এবং লুইস মামফোর্ডের কেন্দ্রীয় মানব "মেগামেশিন"-কে কেন্দ্র করে।

৩. বহিঃস্থ স্মৃতির বিকাশ: মাটির টোকেন থেকে বর্ণমালা

পঞ্চাশ হাজার মানুষের করের হিসাব, ঋণের পরিমাণ আর জমির সীমানা মুখস্থ রাখার জন্য মানুষের মস্তিষ্ক কখনোই বিবর্তিত হয়নি। লিপি কোনো মহাকাব্য লেখার জন্য আবিষ্কৃত হয়নি; তা আবিষ্কৃত হয়েছিল মেসোপটেমিয়ার মন্দিরের খাদ্যশস্যের হিসাবরক্ষক খাতা হিসেবে।

লেখার এই বিবর্তন একটি ধারাবাহিক রূপরেখা মেনে চলেছে:

1. **মাটির হিসাব টোকেন (~৮০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ):** নির্দিষ্ট পণ্যের প্রতিনিধিত্বকারী জ্যামিতিক মাটির টুকরো (যেমন একটি শঙ্কু = এক বুশেল বার্লি; একটি গোলক = এক পাত্র তেল)।
2. **মাটির বুলা ও সিলমোহর (~৩৫০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ):** টোকেনগুলো ফাঁপা মাটির গোলকে (বুলা) ভরে বাইরে সিলমোহর মেরে দেওয়া হতো। খাম না ভেঙে ভেতরে কী আছে তা বোঝার জন্য ভেজা মাটির ওপর টোকেন চেপে চিহ্ন দেওয়া হতো। দ্রুতই তারা বুঝল ভেতরের টোকেন অপ্রয়োজনীয়—সমতল মাটির ফলকে চিহ্ন আঁকাই যথেষ্ট।
3. **প্রোটো-কিউনিফর্ম থেকে ধ্বনিভিত্তিক লিপি (~৩২০০ থেকে ২৫০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ):** খাগের কলম দিয়ে নরম মাটিতে কীলকাকৃতির আঁচড় কেটে কিউনিফর্ম লিপির উদ্ভব হলো। সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ হলো **রেবাস নীতি (Rebus Principle)**: প্রতীকের আসল অর্থের বদলে তার উচ্চারণের ধ্বনি ব্যবহার করে বিমূর্ত শব্দ লেখা শুরু হলো।
4. **ফোনেটিক বর্ণমালা বিপ্লব (~১৮০০ থেকে ১০০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ):** শত শত কিউনিফর্ম বা চিত্রলিপি মুখস্থ রাখা কঠিন হওয়ায় সিনাই উপদ্বীপের সেমিটিক খনি শ্রমিকরা মিশরীয় হায়ারোগ্লিফ থেকে **ব্যঞ্জনবর্ণমালার (Abjad)** জন্ম দিল। মাত্র ২২টি ধ্বনিসূচক অক্ষর দিয়ে যেকোনো কথা লিখে ফেলার এই ফিনিশীয় ও গ্রিক পদ্ধতি সাক্ষরতাকে রাজদরবারের খাঁচা থেকে সাধারণ মানুষের নাগালে পৌঁছে দিল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



প্রত্নতাত্ত্বিক নিদর্শন: সুমেরীয় মাটির হিসাব টোকেন ও সিলমোহরযুক্ত বুলা (Bulla) খাম (~৩৩০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। হাত দিয়ে তৈরি জ্যামিতিক মাটির টোকেন—শঙ্কু, গোলক, চাকতি এবং টেট্রাহেড্রন—নির্দিষ্ট অর্থনৈতিক পণ্য (যেমন বার্লির মাপ, গবাদি পশুর সংখ্যা, বা তেলের পাত্র) নির্দেশ করত। পরিবহনকালে পণ্যের হেরফের ঠেকাতে হিসাবরক্ষকেরা এগুলো ফাঁপা মাটির গোলকে বন্দি করে বাইরে সিলমোহর ও প্রতীক অঙ্কন করতেন; এই পদ্ধতিই ধাপে ধাপে মানব ইতিহাসের প্রথম পূর্ণাঙ্গ কিউনিফর্ম লিপির জন্ম দিয়েছিল।



চিত্র ১৮.৩: মাটির টোকেন থেকে ফোনেটিক বর্ণমালার বিবর্তন। মানুষের বহিঃস্থ স্মৃতির ৫,০০০ বছরের বিবর্তন পাঁচটি ধাপে বিকশিত হয়েছিল: ৩ডি জ্যামিতিক মাটির গণনার টোকেন (নিওলিথিক), ফাঁপা মাটির খাম বা বুলা (উরুক), সমতল মাটির চাকতিতে ২ডি ছাপা প্রতীক (বিমূর্ত সংখ্যা প্রকাশ), রেবাস নীতির সাহায্যে ধ্বনিভিত্তিক কিউনিফর্ম লিপি (মুখের ভাষার প্রতিফলন) এবং অবশেষে সিনাই উপদ্বীপে উদ্ভাবিত ২২ অক্ষরের ব্যঞ্জনবর্ণমালা—যা প্রাচীন বিশ্বে সাক্ষরতার গণতন্ত্রীকরণ ঘটিয়েছিল।

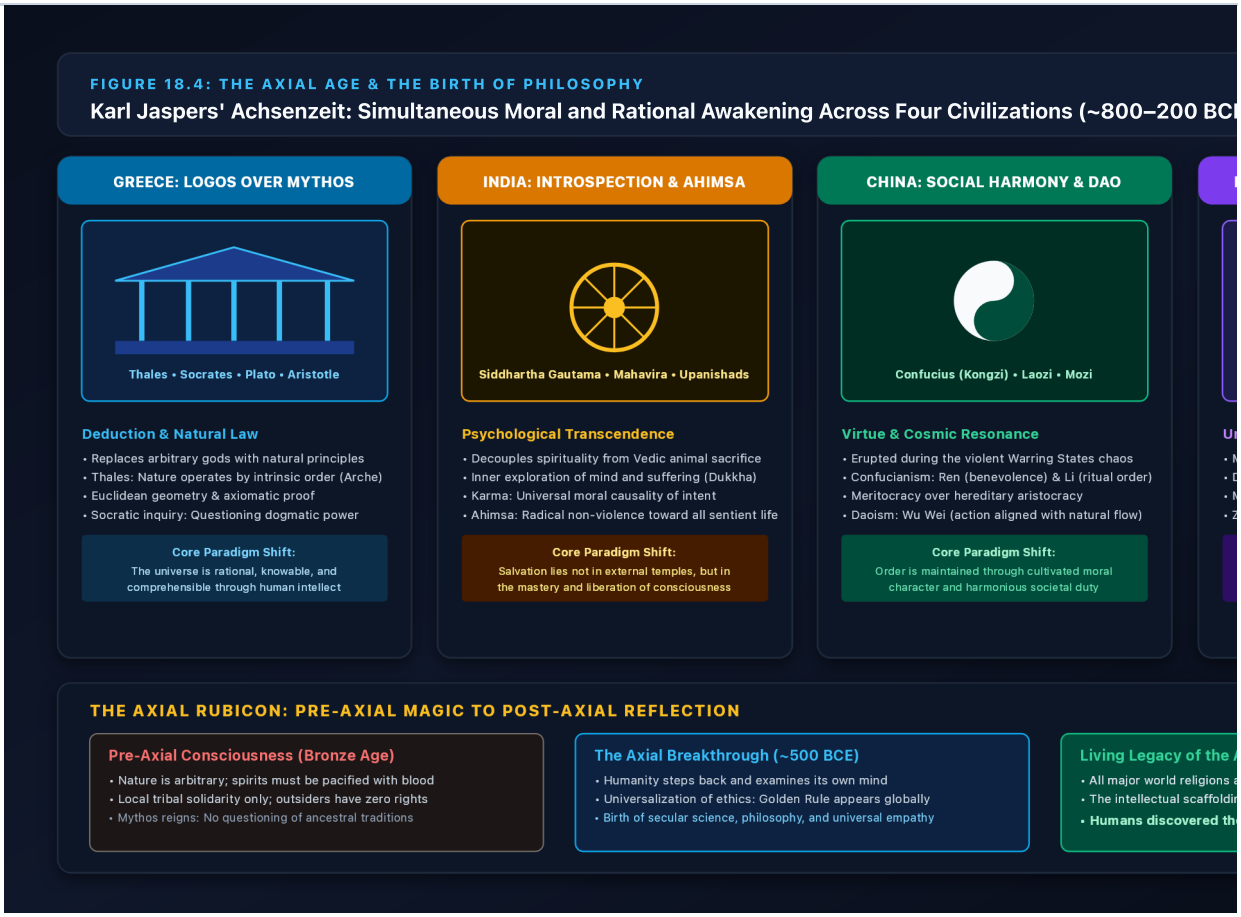
৪. অক্ষীয় যুগ: দর্শনের আলোকবর্তিকা (~৮০০ থেকে ২০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)

লোহার লাঙল ও অস্ত্রের সহজলভ্যতার পর ইউরেশিয়াব্যাপী সভ্যতাগুলোতে এক অভূতপূর্ব বুদ্ধিবৃত্তিক জাগরণ শুরু হলো, যাকে দার্শনিক কার্ল জ্যাসপার্স **অক্ষীয় যুগ (Axial Age)** বলে অভিহিত করেছেন।

খ্রিস্টপূর্ব ৮০০ থেকে ২০০ অব্দের মধ্যে চিন্তাবিদরা ধর্মীয় কুসংস্কার থেকে নীতিশাস্ত্র ও প্রাকৃতিক নিয়মকে মুক্ত করলেন:

- **গ্রিসে:** থেলিস প্রথম বললেন যে বিশ্ব কোনো অলৌকিক দেবতার ইচ্ছায় নয়, বরং পদার্থের অন্তর্নিহিত নীতিতে চলে; ডেমোক্রিটাস পরমাণুর ধারণা দিলেন; আর অ্যারিস্টটল গড়ে তুললেন আনুষ্ঠানিক যুক্তিবিদ্যা ও জীববিজ্ঞানের ভিত্তি।
- **ভারতে:** উপনিষদের ঋষিগণ, মহাবীর এবং গৌতম বুদ্ধ মানব চেতনার প্রকৃতি, দুঃখ এবং কর্মফলের কার্যকারণ বিশ্লেষণ করলেন।
- **চীনে:** কনফুসিয়াস এবং লাওৎসে রাষ্ট্রীয় সম্প্রীতি, মানব চরিত্র ও তাও-এর মহাজাগতিক বিধান ব্যাখ্যা করলেন।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৮.৪: অক্ষীয় যুগ (The Axial Age) এবং দর্শনের জন্ম (~৮০০–২০০ খ্রিস্টপূর্বাব্দ)। গ্রিস (সক্রেটিস, প্লেটো, অ্যারিস্টটল), ভারত (বুদ্ধ, মহাবীর, উপনিষদ), চীন (কনফুসিয়াস, লাওৎসে) এবং ইরান ও মধ্যপ্রাচ্যে (জরথুস্ত্র ও হিব্রু নবীগণ) মানবজাতি একযোগে কার্ল জ্যাসপার্সের "অক্ষীয় রুবিকন" অতিক্রম করে। আদিম রক্তবলির অন্ধ বিশ্বাসের বদলে সমাজ যুক্তিভিত্তিক অনুসন্ধান (Logos), সার্বজনীন নৈতিক অনুশাসন এবং অভ্যন্তরীণ মনস্তাত্ত্বিক আত্ম-উপলব্ধির আলোয় জেগে ওঠে।

৫. চিন্তার যান্ত্রিকীকরণ ও বৈজ্ঞানিক বিপ্লব (১৫৪৩ থেকে ১৬৮৭ খ্রিস্টাব্দ)

প্রাচীনকালের সেই সঞ্চিত জ্ঞান আধুনিক ইউরোপে দুটি মৌলিক প্রযুক্তির ছোঁয়ায় এক মহাবিস্ফোরণে পরিণত হলো:

ছাপাখানা ও তথ্যের মহাবিপ্লব

১৪৪০ সালে জোহানেস গুটেনবার্গ মেটাল টাইপ, তেলভিত্তিক কালি ও স্ক্রু প্রেসের সমন্বয়ে ছাপাখানা উদ্ভাবন করলেন। আগে যেখানে একটি বই হাতে লিখতে মাসের পর মাস লাগত, সেখানে ছাপাখানা বই প্রকাশের খরচ **৯৯%-এর বেশি কমিয়ে দিল**। জ্ঞান আর কখনো হারিয়ে যাওয়ার ঝুঁকিতে রইল না—বিজ্ঞান, দর্শন ও জ্যোতির্বিজ্ঞানের গবেষণা বিদ্যুৎগতিতে সমগ্র ইউরোপে ছড়িয়ে পড়ল।



প্রযুক্তিগত মাইলফলক: ইয়োহানেস গুটেনবার্গের মুদ্রণ কর্মশালা (মেইঞ্জ, ~১৪৫০ খ্রিস্টাব্দ)। কাঠের তৈরি স্ক্রু প্রেস থেকে বের হওয়া সদ্য মুদ্রিত ফোলিও পাতা পরীক্ষা করছেন গুটেনবার্গ। স্থানান্তরযোগ্য সীসা-টিন-অ্যান্টিমনি সংকর ধাতুর টাইপ, তেলভিত্তিক ঘন কালি এবং মেকানিক্যাল প্রেসের এই যুগান্তকারী মেলবন্ধন গ্রন্থ উৎপাদনের খরচ ও সময়কে ৯৯% হ্রাস করে, যা ইউরোপজুড়ে তথ্য ও বৈজ্ঞানিক জ্ঞানের অভূতপূর্ব বিস্ফোরণ ঘটায়।

১৫৪৩ সালে নিকোলাস কোপার্নিকাস পৃথিবীকে মহাবিশ্বের কেন্দ্র থেকে সরিয়ে সূর্যকেন্দ্রিক সৌরজগতের ধারণা দিলেন। জোহানেস কেপলার টাইকো ব্রাহের নিখুঁত পর্যবেক্ষণ বিশ্লেষণ করে আবিষ্কার করলেন যে গ্রহগুলো উপবৃত্তাকার পথে ঘোরে এবং তাদের গাণিতিক সূত্র প্রতিষ্ঠা করলেন।

গ্যালিলিও গ্যালিলি নিজের দূরবীন দিয়ে বৃহস্পতির চাঁদ, শুক্রের কলা এবং সূর্যের দাগ দেখে প্রমাণ করলেন যে মহাজাগতিক বস্তুগুলো অপার্থিব কোনো স্বর্গীয় বস্তু নয়, বরং পৃথিবীর মতোই প্রাকৃতিক পদার্থ। গ্যালিলিও আধুনিক বিজ্ঞানের মূল সুর বেঁধে দিলেন: *“প্রকৃতির মহাগ্রন্থটি রচিত হয়েছে গণিতের ভাষায়।”*

৬. নিউটনের প্রিন্সিপিয়া: মহাজাগতিক সমন্বয় (১৬৮৭ খ্রিস্টাব্দ)

এই বৈজ্ঞানিক জাগরণের চূড়ান্ত শিখর স্পর্শ করল ১৬৮৭ সালে স্যার আইজ্যাক নিউটনের অমর গ্রন্থ *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* প্রকাশের মাধ্যমে। গাছ থেকে আপেল পড়ার পার্থিব পদার্থবিজ্ঞান এবং আকাশে গ্রহ-নক্ষত্রের চলার গতিকে নিউটন এক সূত্রে বেঁধে দিলেন।

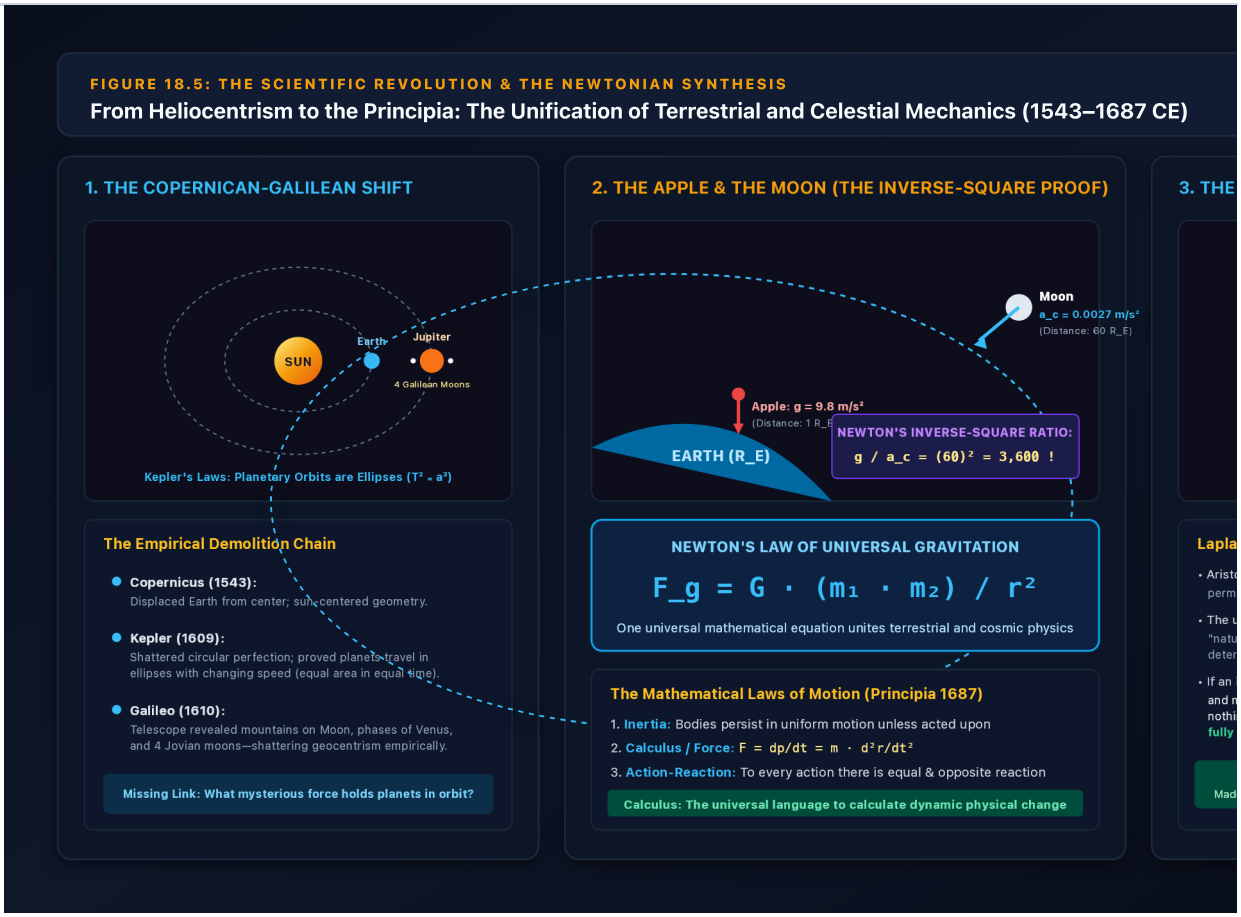
গতি পরিবর্তনের হার প্রকাশের জন্য তিনি উদ্ভাবন করলেন ক্যালকুলাস (ফ্লাক্সিয়ন পদ্ধতি), প্রতিষ্ঠা করলেন গতির তিনটি অমর সূত্র এবং তাঁর বিখ্যাত **মহাকর্ষ সূত্র**:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

মহাবিশ্বের ইতিহাসে এই প্রথমবার পদার্থ নিজে বিবর্তিত হয়ে সেই অদৃশ্য গাণিতিক সমীকরণগুলো বুঝতে পারল যা তার নিজের মহাজাগতিক নৃত্যকে পরিচালনা করছে। মহাবিশ্ব আর কোনো অলৌকিক ভয় বা খেয়ালখুশির স্থান রইল না; তা পরিণত হলো এক নিখুঁত গাণিতিক ঘড়ির মতো সুশৃঙ্খল ব্যবস্থায়। যে চিন্তার ইঞ্জিন পরবর্তীতে শিল্প বিপ্লব, বিদ্যুৎ এবং আধুনিক ডিজিটাল কম্পিউটার যুগের জন্ম দেবে—তা স্থায়ীভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়ে গেল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৮.৫: বৈজ্ঞানিক বিপ্লব এবং নিউটনীয় সমন্বয় (১৫৪৩–১৬৮৭ খ্রিস্টাব্দ)। কোপার্নিকাস ও গ্যালিলিওর হাত ধরে ভূ-কেন্দ্রিক ভ্রান্তি ভেঙে দেওয়া থেকে কেপলারের উপবৃত্তাকার গ্রহের গতিসূত্র পেরিয়ে ধ্রুপদী পদার্থবিজ্ঞান পৌঁছায় আইজ্যাক নিউটনের ১৬৮৭ সালের প্রিন্সিপিয়ায়। একটি আপেল মাটিতে পড়ার মহাকর্ষীয় ত্বরণ এবং চাঁদের কক্ষপথে ঘোরার অভিকেন্দ্রিক বল যে হুবহু একই ব্যস্তানুপাতিক বর্গীয় সূত্র ($F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$) মেনে চলে, তা প্রমাণ করে নিউটন স্বর্গ ও মর্ত্যের বলবিদ্যাকে এক সুশৃঙ্খল ঘড়ির মতো মহাবিশ্বে একীভূত করেছিলেন।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Diamond, J. (1997). *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*. W. W. Norton & Company. ISBN:978-0393038910.
2. Childe, V. G. (1936). *Man Makes Himself*. Watts & Company. ISBN:978-0851246499.
3. Kramer, S. N. (1956). *History Begins at Sumer: Thirty-Nine Firsts in Recorded History*. University of Pennsylvania Press. ISBN:978-0812212761.
4. Scott, J. C. (2017). *Against the Grain: A Deep History of the Earliest States*. Yale University Press. ISBN:978-0300182910.
5. Eisenstein, E. L. (1979). *The Printing Press as an Agent of Change*. Cambridge University Press. ISBN:978-0521299558.
6. Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Royal Society of London. doi:10.5479/sil.52166.39088015628391
7. Jaspers, K. (1953). *The Origin and Goal of History*. Yale University Press. ISBN:978-0300001358.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "প্রকৃতির বশ্যতা — নিওলিথিক স্যুলিঙ্গ, কিউনিফর্ম এবং নগরের উত্থান"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৮। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-18-the-domestication-of-nature-bn/

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • ঊনবিংশ খণ্ড

যুক্তির অনুশাসন — তড়িচ্চুম্বকত্ব, টুরিং মেশিন এবং সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর

যুক্তির অনুশাসন — তড়িচ্চুম্বকত্ব, টুরিং মেশিন এবং সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর

1,844 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



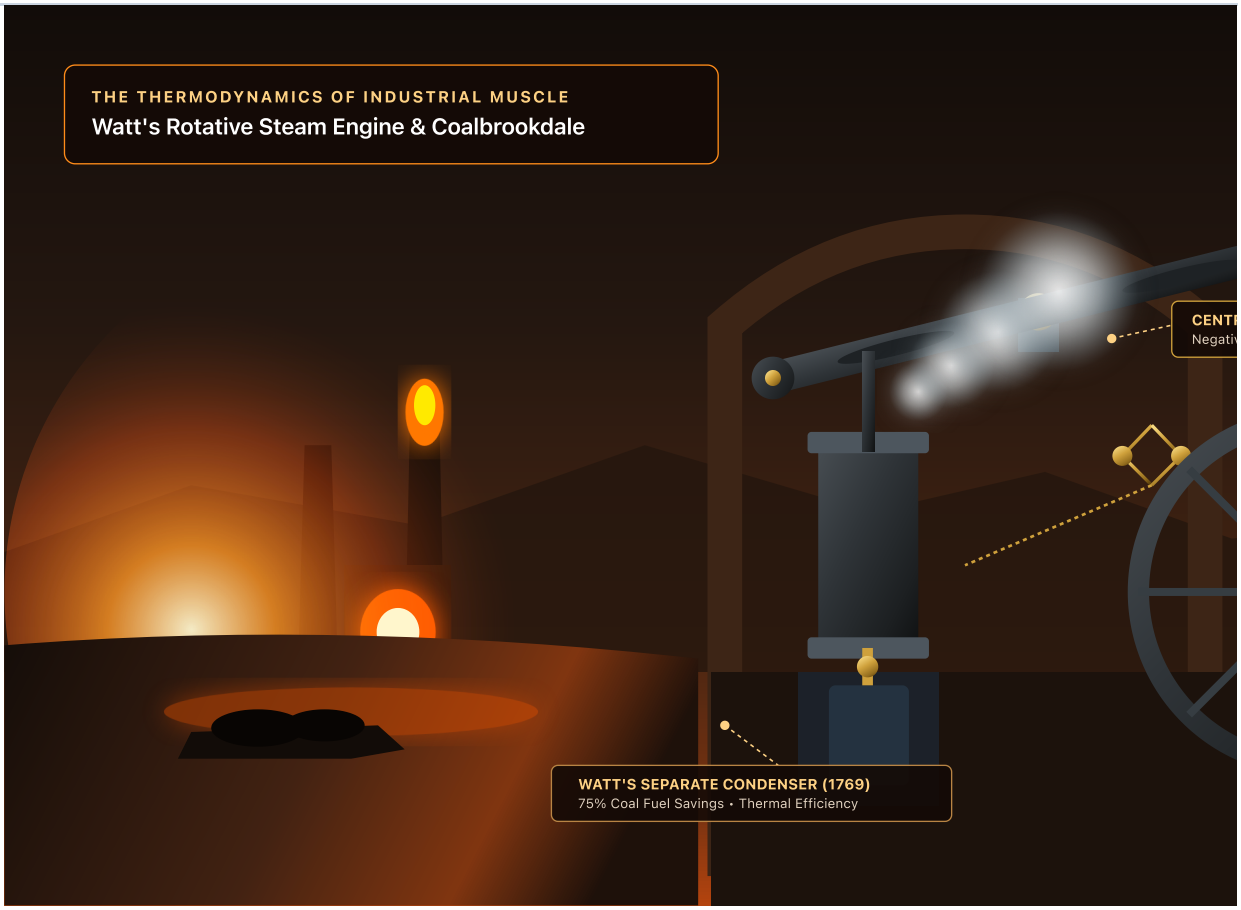
চিত্র ১৯: *চিত্র: ম্যাক্সওয়েলের তড়িৎচুম্বকীয় তরঙ্গ তত্ত্ব থেকে অ্যালান টুরিং-এর সার্বজনীন অ্যালগরিদম এবং সেমিকন্ডাক্টর ট্রানজিস্টর— তথ্যপ্রযুক্তি ও আধুনিক ডিজিটাল কম্পিউটারের মহাজাগতিক রূপান্তর।*

হাজার হাজার বছর ধরে মানব সভ্যতা শারীরিক কাজের জন্য সম্পূর্ণভাবে পেশী, বাতাস, পানি এবং ভারবাহী পশুর ওপর নির্ভরশীল ছিল; আর যুক্তিযুক্ত চিন্তা বন্দি ছিল মানুষের মস্তিষ্কের মাথার খুলির ভেতরে। কিন্তু আঠারো শতকের শেষভাগ থেকে বিশ শতকের মধ্যভাগের মধ্যে এক অবিশ্বাস্য দ্বৈত মহামিলন ঘটল। পদার্থবিজ্ঞান একদিকে তাপশক্তিকে যান্ত্রিক কাজে রূপান্তরের কৌশল আবিষ্কার করল এবং বিদ্যুৎ ও চুম্বকত্বকে আলোর সাথে একীভূত করল; অন্যদিকে গাণিতিক যুক্তিবিদরা আবিষ্কার করলেন যে আনুষ্ঠানিক যুক্তি ও চিন্তাকে বিমূর্ত প্রতীকের হিসাব-নিকাশের মাধ্যমে যন্ত্রে রূপ দেওয়া সম্ভব। বিশুদ্ধ সিলিকন চিপের ওপর কোটি কোটি কোয়ান্টাম সুইচ খোদাই করে মানবজাতি তৈরি করল এক বহিঃস্থ ইলেকট্রনিক স্নায়ুতন্ত্র—যা মৃত পাথরকে পরিণত করল এমন এক যন্ত্রে যা চিন্তা করতে পারে।

১. শিল্প পেশীর তাপগতিবিদ্যা (~১৭৬৯ থেকে ১৮৫০ খ্রিস্টাব্দ)

আধুনিকতার সূচনা ছিল মূলত এক বৈপ্লবিক শক্তির রূপান্তর। আঠারো শতকের পূর্বে মানব সমাজ একটি “জৈব অর্থনীতিতে” আবদ্ধ ছিল যা বার্ষিক সূর্যালোক ও উদ্ভিদের বৃদ্ধির গতি দ্বারা সীমাবদ্ধ ছিল। ১৭৬৯ সালে জেমস ওয়াট যখন পৃথক কনডেন্সারযুক্ত বাষ্পীয় ইঞ্জিনের পেটেন্ট করলেন, তখন তিন কোটি বছর আগে কার্বনিফেরাস যুগে মাটির নিচে চাপা পড়া কয়লার জীবাশ্ম সৌরশক্তি মানবজাতির হাতে উন্মুক্ত হলো।

Shakil Mahmud • Research Monograph

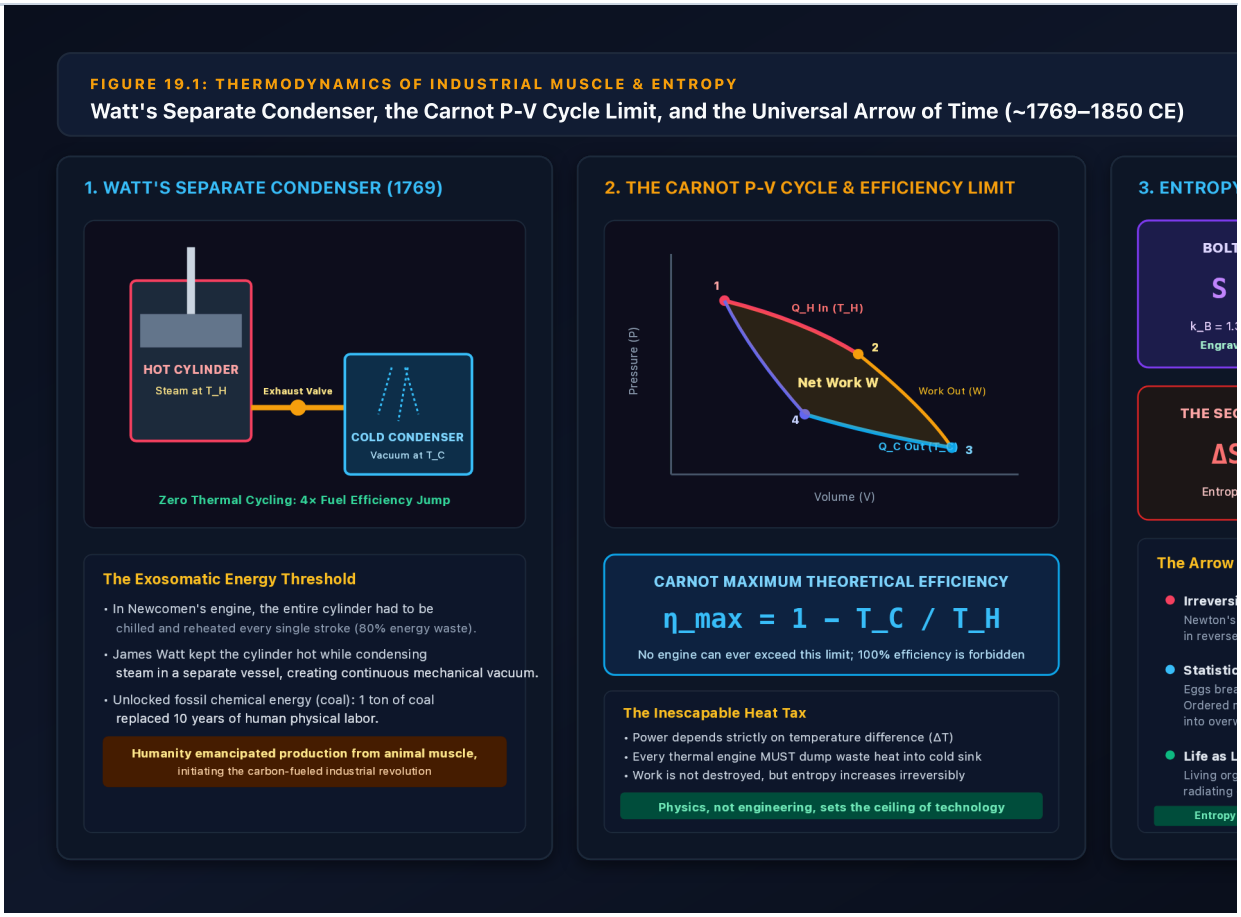


চিত্র ১৯.উপ-১: কোলব্রুকডেলে শিল্প পেশীর সূচনা (~১৭৬৯–১৭৮৪ খ্রিস্টাব্দ)। পৃথক কনডেন্সার, প্যারালাল মোশন লিঙ্কেজ এবং সেন্ট্রিফিউগাল ফ্লাইবল গভর্নর সমৃদ্ধ জেমস ওয়াটের ডাবল-অ্যাক্টিং বাষ্পীয় ইঞ্জিনের প্রস্থচ্ছেদ—কয়লাভিত্তিক ব্লাস্ট ফার্নেসের পাশে দৃশ্যমান। সিলিন্ডারকে অবিরাম গরম রেখে আলাদা চেম্বারে বাষ্প ঘনীভূত করার এই প্রযুক্তি কোটি কোটি বছর আগের কার্বনিফেরাস কয়লাস্তরের শক্তিকে অবমুক্ত করে মানব সভ্যতাকে জৈব পেশী ও কাঠের সীমাবদ্ধতা থেকে মুক্ত করে।

বাষ্পীয় ইঞ্জিনের প্রকৌশল এক নতুন বিজ্ঞানের জন্ম দিল: **তাপগতিবিদ্যা (Thermodynamics)**। সাদি কার্নো, রুডলফ ক্লসিয়াস এবং লর্ড কেলভিন প্রমাণ করলেন যে তাপ ও যান্ত্রিক কাজ হলো একই শক্তির রূপভেদ, যা মহাবিশ্বের এক অলঙ্ঘনীয় নিয়মে বাঁধা—**তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র**:

$$\Delta S_{\text{universe}} \geq 0$$

একটি আবদ্ধ ব্যবস্থার মোট শক্তি সর্বদা সংরক্ষিত থাকলেও (প্রথম সূত্র), প্রতিটি স্বতঃস্ফূর্ত প্রক্রিয়ায় এনট্রপি (S) বা আণুবীক্ষণিক বিশৃঙ্খলা বৃদ্ধি পায়। কোনো ব্যবস্থায় স্থানীয় শৃঙ্খলা, কাজ বা কম্পিউটেশন বজায় রাখতে হলে তাকে পরিবেশ থেকে উচ্চমানের মুক্ত শক্তি গ্রহণ করতে হয় এবং নিম্নমানের বর্জ্য তাপ পরিবেশে ছেড়ে দিতে হয়।



চিত্র ১৯.১: শিল্প পেশীর তাপগতিবিদ্যা এবং এনট্রপি (~১৭৬৯–১৮৫০ খ্রিস্টাব্দ)। জেমস ওয়াটের পৃথক কনডেন্সার নিউকমেনের চক্র থেকে তাপীয় প্রসারণকে মুক্ত করে কয়লার জীবাশ্ম বন্ধন শক্তিকে উন্মুক্ত করে দিল। সাদি কার্নো তাত্ত্বিক দক্ষতার সর্বোচ্চ সীমা নির্ধারণ করেন ($\eta_{\text{max}} = 1 - T_C / T_H$), আর ক্লসিয়াস ও বোল্টজম্যান প্রমাণ করেন যে শক্তির অপচয়ই সময়ের অপরিবর্তনীয় মহাজাগতিক অভিমুখ নির্দেশ করে ($\Delta S_{\text{universe}} \geq 0$)।

২. ম্যাক্সওয়েলের সমন্বয়: তড়িচ্চুম্বকত্বের একীকরণ (১৮৬৫ খ্রিস্টাব্দ)

তাপীয় ইঞ্জিন যখন শারীরিক শক্তির যোগান দিচ্ছিল, তখন প্রাকৃতিক দার্শনিকরা তড়িৎ আধান ও চৌম্বক বলের রহস্য উন্মোচনে ব্যস্ত ছিলেন। মাইকেল ফ্যারাডে প্রমাণ করলেন যে পরিবর্তনশীল চৌম্বক ক্ষেত্র বিদ্যুৎ প্রবাহ সৃষ্টি করে (তড়িচ্চুম্বকীয় আবেশ)—যা আজকের প্রতিটি বৈদ্যুতিক জেনারেটর ও মোটরের মূলনীতি।

১৮৬৫ সালে স্কটিশ পদার্থবিদ **জেমস ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল** তাঁর যুগান্তকারী গবেষণা প্রকাশ করে বিদ্যুৎ ও চুম্বকত্বের সমস্ত পর্যবেক্ষণকে চারটি সুসংবদ্ধ ব্যবকলনীয় সমীকরণে একীভূত করলেন:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

বিশুদ্ধ যুক্তি থেকে আলোর গতিবেগের রহস্য উন্মোচন

ম্যাক্সওয়েল লক্ষ্য করলেন যে অ্যাম্পিয়ারের সূত্রে চার্জ সংরক্ষণের জন্য একটি অতিরিক্ত পদের প্রয়োজন, যার নাম তিনি দিলেন **সরণ প্রবাহ (displacement current)** ($\mu_0\epsilon_0\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$)। শূন্য মাধ্যমে ফ্যারাডের সূত্রের কার্ল নিয়ে এবং সরণ প্রবাহ প্রতিস্থাপন করে ম্যাক্সওয়েল তড়িচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ সমীকরণ বের করলেন:

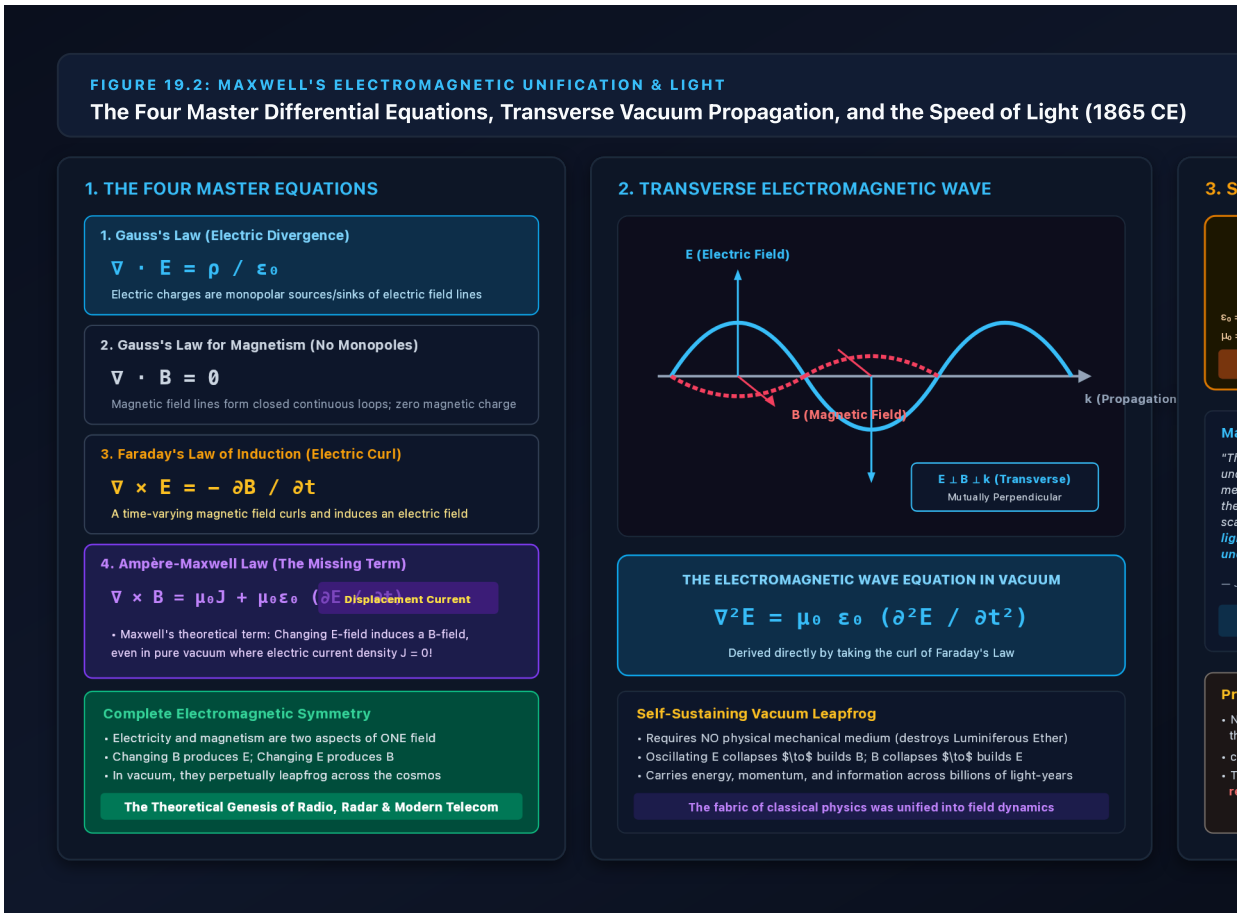
Shakil Mahmud • Research Monograph

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

তরঙ্গের বেগ সরাসরি দুটি পরীক্ষাগারের ধ্রুবকের ওপর নির্ভরশীল ছিল: শূন্যস্থানের ভেদনযোগ্যতা (ϵ_0) এবং প্রবেশ্যতা (μ_0):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx ২.৯৯৮ \times ১০^{৮} \text{ m/s}$$

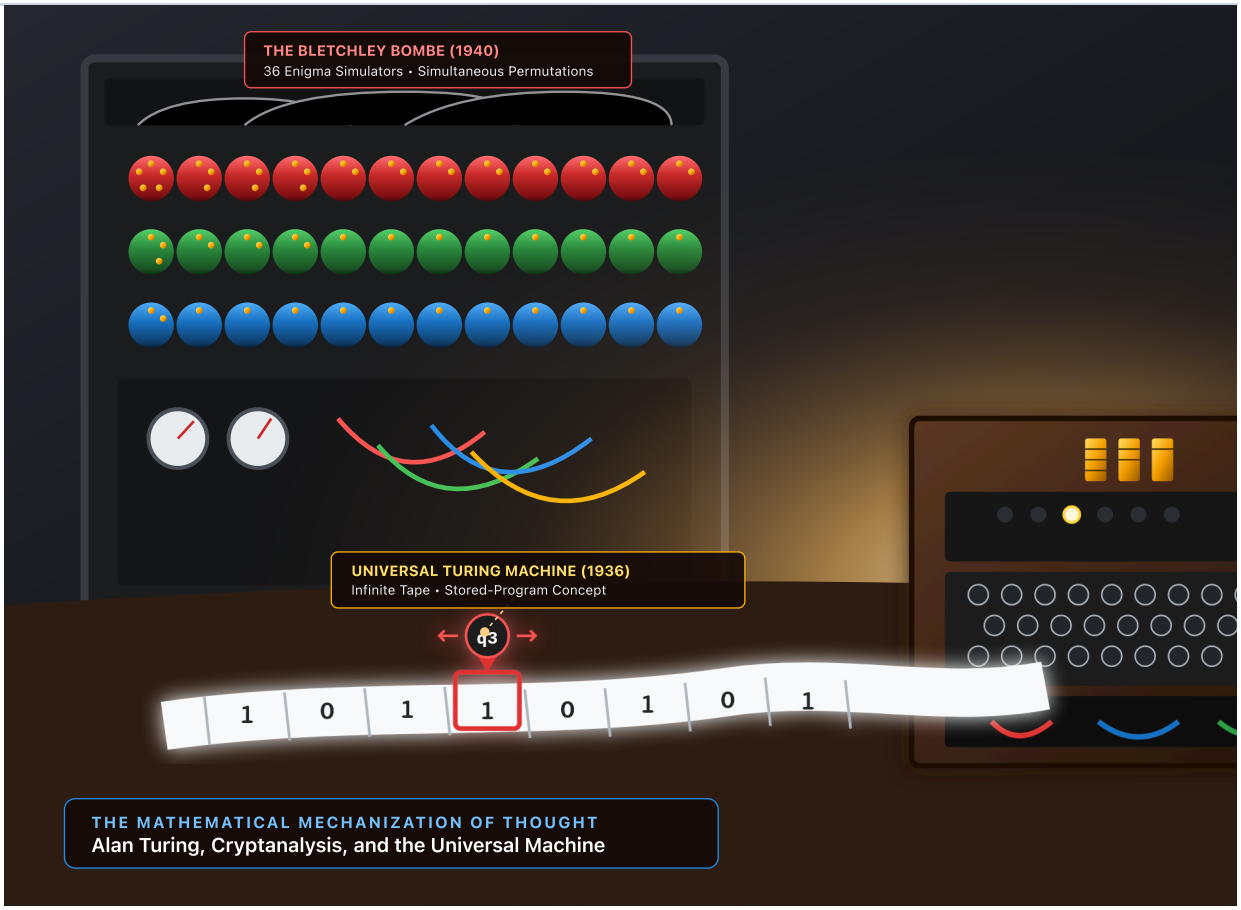
ম্যাক্সওয়েল স্তম্ভিত হয়ে উপলব্ধি করলেন: *"আলো মূলত একই মাধ্যমের অনুপ্রস্থ তরঙ্গ যা তড়িৎ ও চৌম্বকীয় স্পন্দনের কারণ।"*



চিত্র ১৯.২: ম্যাক্সওয়েলের তড়িচ্চুম্বকীয় একীকরণ এবং আলো (১৮৬৫ খ্রিস্টাব্দ)। সরণ প্রবাহ ($\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$) প্রবর্তন করে জেমস ক্লার্ক ম্যাক্সওয়েল বিদ্যুৎ, চুম্বকত্ব ও আলোকবিজ্ঞানকে চারটি প্রতিসম ভেক্টর সমীকরণে একীভূত করেন। এর ফলে প্রাপ্ত তরঙ্গ সমীকরণ প্রমাণ করে যে স্ব-পরিচালিত তড়িৎ ও চৌম্বক ক্ষেত্র শূন্য মাধ্যমে ঠিক আলোর গতিবেগে ($c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx ৩ \times ১০^{৮} \text{ m/s}$) সঞ্চালিত হয়।

৩. অ্যালান টুরিং এবং সার্বজনীন যন্ত্র (১৯৩৬ খ্রিস্টাব্দ)

বিশ শতকের শুরুতে গণিতবিদ ডেভিড হিলবার্ট প্রশ্ন তুলেছিলেন (Entscheidungsproblem): এমন কোনো সুনির্দিষ্ট যান্ত্রিক ধাপ বা অ্যালগরিদম কি থাকতে পারে যা যেকোনো গাণিতিক প্রস্তাবনা সঠিক না ভুল তা নিশ্চিতভাবে বলে দিতে পারে?



চিত্র ১৯.উপ-২: ক্রিপ্টানালিসিস এবং সার্বজনীন গণনার ইলেক্ট্রোমেকানিক্স (~১৯৩৬–১৯৪০ খ্রিস্টাব্দ)। ব্লেচলি পার্কে জার্মান এনিগমা সাইফার ভাঙার কাজে নিয়োজিত অ্যালান টুরিং ও গর্ডন ওয়েলচম্যানের ৩৬টি ঘূর্ণায়মান ড্রামবিশিষ্ট ইলেক্ট্রোমেকানিক্যাল বোম্ব (Bombe) মেশিন। পটভূমিতে সার্বজনীন টুরিং মেশিনের (UTM) অসীম বাইনারি পেপার টেপ (০ ও ১), যা বিমূর্ত গাণিতিক যুক্তির সঙ্গে আধুনিক ভৌত কম্পিউটিংয়ের সংযোগ ঘটিয়েছে।

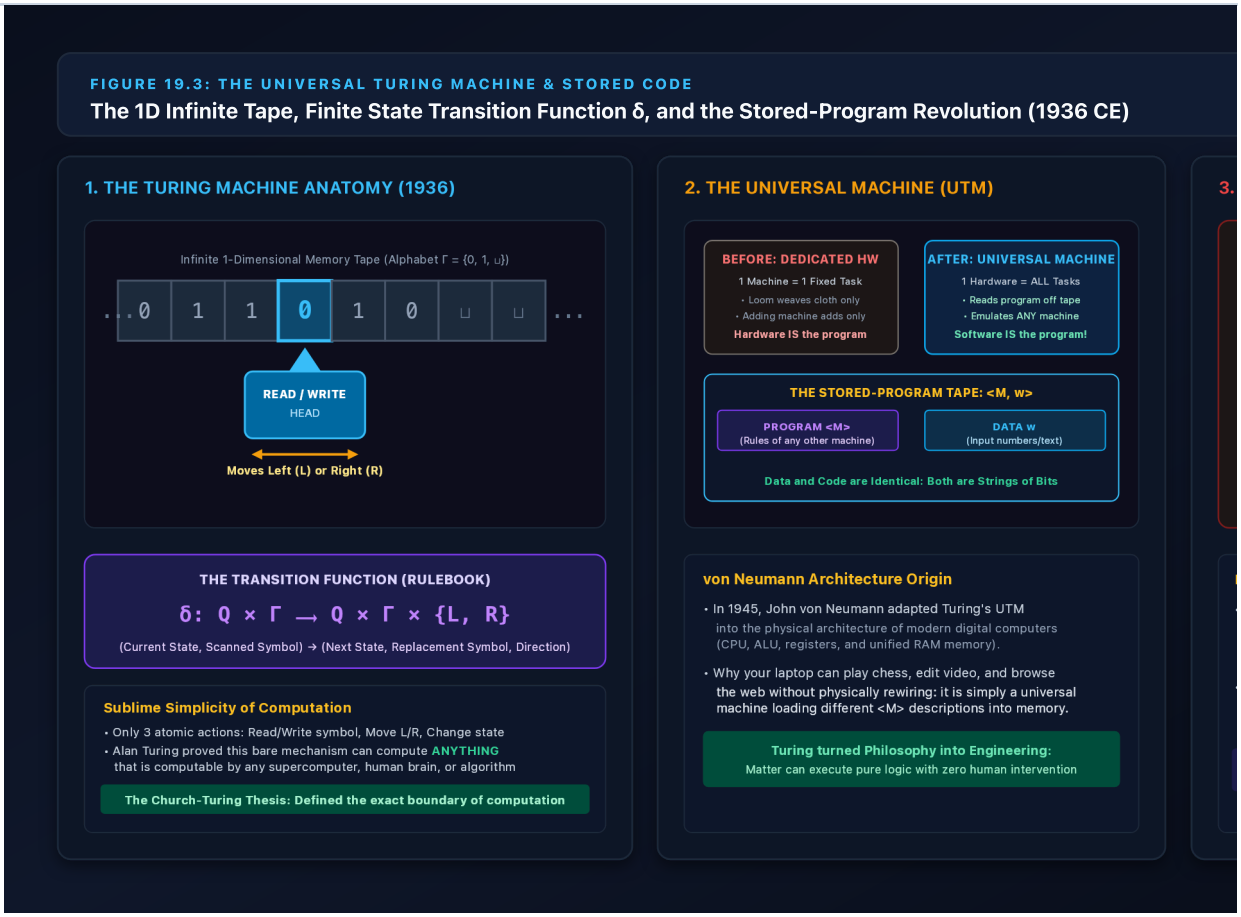
১৯৩১ সালে কুর্ট গোডেল তাঁর **অসম্পূর্ণতার উপপাদ্যে (Incompleteness Theorems)** প্রমাণ করলেন যে যেকোনো সংগতিপূর্ণ আনুষ্ঠানিক ব্যবস্থায় এমন কিছু সত্য বাক্য থাকে যা সেই ব্যবস্থার ভেতর থেকে প্রমাণ করা যায় না। আর ১৯৩৬ সালে ২৪ বছর বয়সী গণিতবিদ **অ্যালান টুরিং** সেই বিমূর্ত যুক্তিকে রূপ দিলেন আধুনিক ডিজিটাল কম্পিউটারের ব্লুপ্রিন্টে—**সার্বজনীন টুরিং মেশিন (Universal Turing Machine)**:

- একটি অসীম এক-মাত্রিক ফিতা যা ছোট ছোট বর্গাকার কোষে বিভক্ত, যেখানে একটি নির্দিষ্ট বর্ণমালার প্রতীক (যেমন ০ বা ১) লেখা থাকে।
- একটি রিড/রাইট হেড যা ফিতা বরাবর সামনে-পেছনে চলতে পারে, প্রতীক পড়তে পারে, মুছতে পারে এবং নতুন প্রতীক লিখতে পারে।
- একটি অভ্যন্তরীণ স্টেট রেজিস্টার ($q \in Q$)।
- একটি ট্রানজিশন ফাংশন ($\delta : Q \times \Gamma \to Q \times \Gamma \times \{L, R\}$) যা নির্ধারণ করে পরবর্তী পদক্ষেপ কী হবে।

টুরিং দুটি যুগান্তকারী সত্য প্রতিষ্ঠা করলেন:

1. **সংরক্ষিত প্রোগ্রামের ধারণা (Stored-Program Concept):** একটি একক সার্বজনীন টুরিং মেশিন যেকোনো অন্য অ্যালগরিদমিক মেশিনের কাজ নিখুঁতভাবে অনুকরণ করতে পারে যদি সেই মেশিনের নিয়মগুলো ফিতায় ডেটা হিসেবে লিখে দেওয়া হয়। সফটওয়্যার ও ডেটা তাত্ত্বিকভাবে এক ও অভিন্ন।
2. **হল্টিং প্রবলেম (The Halting Problem):** এমন কোনো সাধারণ অ্যালগরিদম তৈরি করা অসম্ভব যা যেকোনো প্রোগ্রাম কখনো থেমে যাবে নাকি অনন্তকাল চলতে থাকবে তা আগে থেকে বলে দিতে পারে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৯.৩: সার্বজনীন টুরিং মেশিন এবং সংরক্ষিত প্রোগ্রাম (১৯৩৬ খ্রিস্টাব্দ)। একটি অসীম ১ডি ফিতা, একটি রিড/রাইট হেড এবং স্টেট ট্রানজিশন ফাংশন ($\delta : Q \times \Gamma \longrightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$) নিয়ে গঠিত অ্যালান টুরিংয়ের গাণিতিক মডেল আধুনিক সমস্ত কম্পিউটেশনের তাত্ত্বিক ভিত্তি স্থাপন করে। প্রোগ্রাম নির্দেশাবলী এবং ডেটা উভয়ই যে একই ফিতায় বিট আকারে সংরক্ষণ করা যায় তা প্রমাণ করে টুরিং দেখিয়েছিলেন যে একটিমাত্র ভৌত যন্ত্র যেকোনো অ্যালগরিদম কার্যকর করতে সক্ষম।

৪. ক্লড শ্যানন এবং তথ্যের ভৌত এনট্রপি (১৯৪৮ খ্রিস্টাব্দ)

১৯৩৭ সালে এমআইটিতে মাস্টার্স থিসিস লেখার সময় **ক্লড শ্যানন** দেখালেন যে জর্জ বুলের বাইনারি বীজগণিত (সত্য = ১, মিথ্যা = ০) রিলে এবং বৈদ্যুতিক সুইচের মাধ্যমে ভৌতভাবে বাস্তবায়ন করা সম্ভব। লজিক গেট (AND, OR, NOT) দিয়ে যেকোনো গাণিতিক হিসাব সম্পন্ন করা যায়।

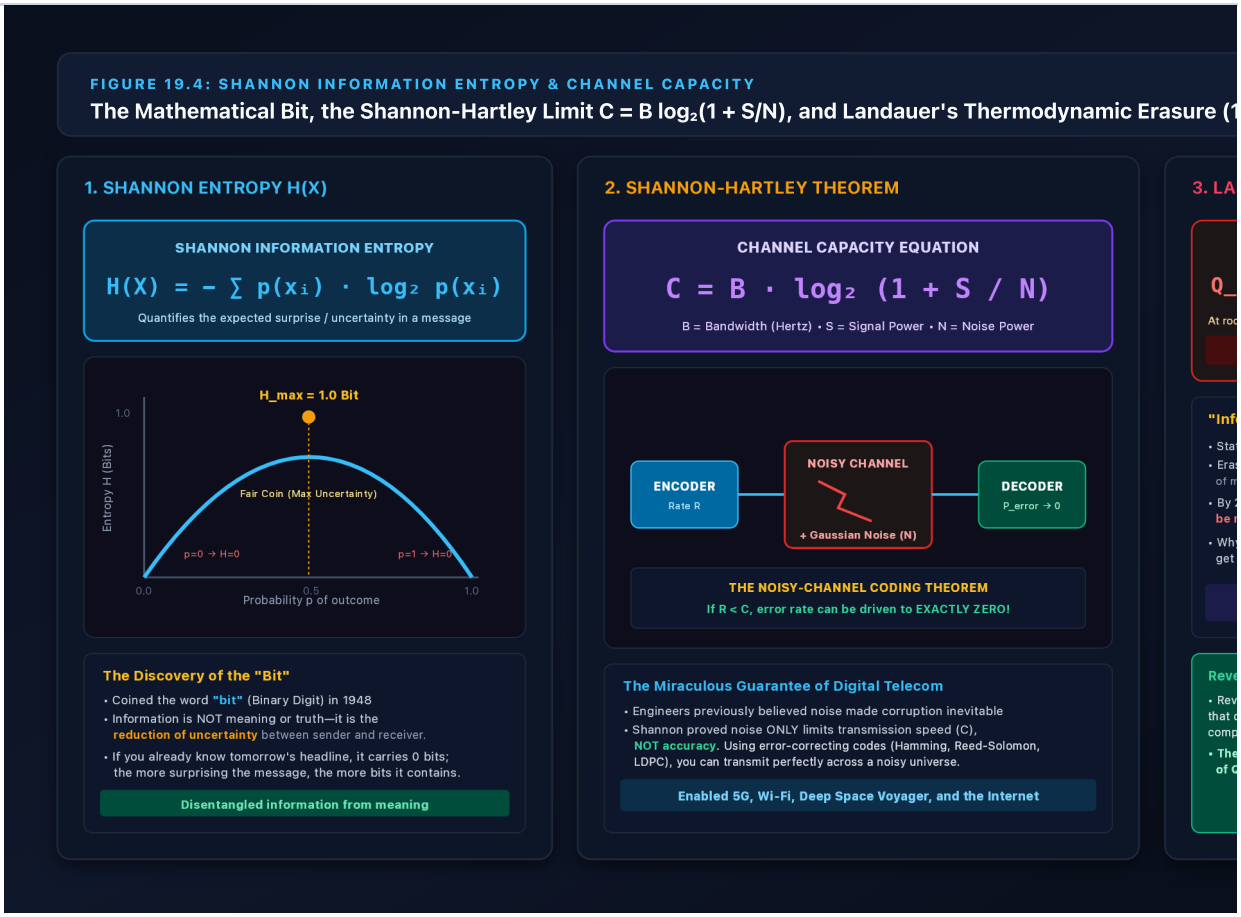
১৯৪৮ সালে বেল ল্যাবরেটরিতে শ্যানন প্রকাশ করলেন *A Mathematical Theory of Communication*—জন্ম নিল **তথ্য তত্ত্ব (Information Theory)**। শ্যানন তথ্যের অর্থকে আলাদা করে তাকে সংজ্ঞায়িত করলেন অনিশ্চয়তার পরিমাপ হিসেবে এবং তথ্যের ক্ষুদ্রতম একক হিসেবে প্রবর্তন করলেন **বিট (bit)**।

একটি বিচ্ছিন্ন চলক X-এর তথ্য এনট্রপি H হলো:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) \log_2 p(x_i)$$

এই সূত্রটি হুবহু বোল্টজম্যানের তাপগতিবিদ্যার এনট্রপির সমতুল্য ছিল। তথ্য কোনো বিমূর্ত কল্পনা নয়; এটি মহাবিশ্বের একটি ভৌত বৈশিষ্ট্য, যা চ্যানেল ক্যাপাসিটি ও সিগন্যাল-টু-নয়েজ অনুপাত দ্বারা সীমাবদ্ধ:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$$



চিত্র ১৯.৪: শ্যানন তথ্য এনট্রপি এবং চ্যানেল ক্যাপাসিটি (১৯৪৮ খ্রিস্টাব্দ)। ক্লড শ্যানন তথ্যকে অনিশ্চয়তার সম্ভাব্যতা হ্রাস হিসেবে গাণিতিকভাবে সংজ্ঞায়িত করেন ($H(X) = -\sum p(x_i)\log_2 p(x_i)$)। তাঁর নয়েজি-চ্যানেল উপপাদ্য ($C = B\log_2(১ + S/N)$) প্রমাণ করে যে নয়েজ কেবল প্রেরণের সর্বোচ্চ গতিকে সীমাবদ্ধ করে, সংকেত বিকৃতি অনিবার্য নয়। পরবর্তীতে রল্ফ ল্যান্ডোয়ার প্রমাণ করেন একটি বিট তথ্য মুছে ফেলতে তাপগতিবিদ্যাগত সর্বনিম্ন শক্তি ব্যয় হয় ($Q \geq k_B T \ln ২$), যা তথ্য তত্ত্বকে সরাসরি পরিসংখ্যানিক বলবিদ্যার সাথে যুক্ত করে।

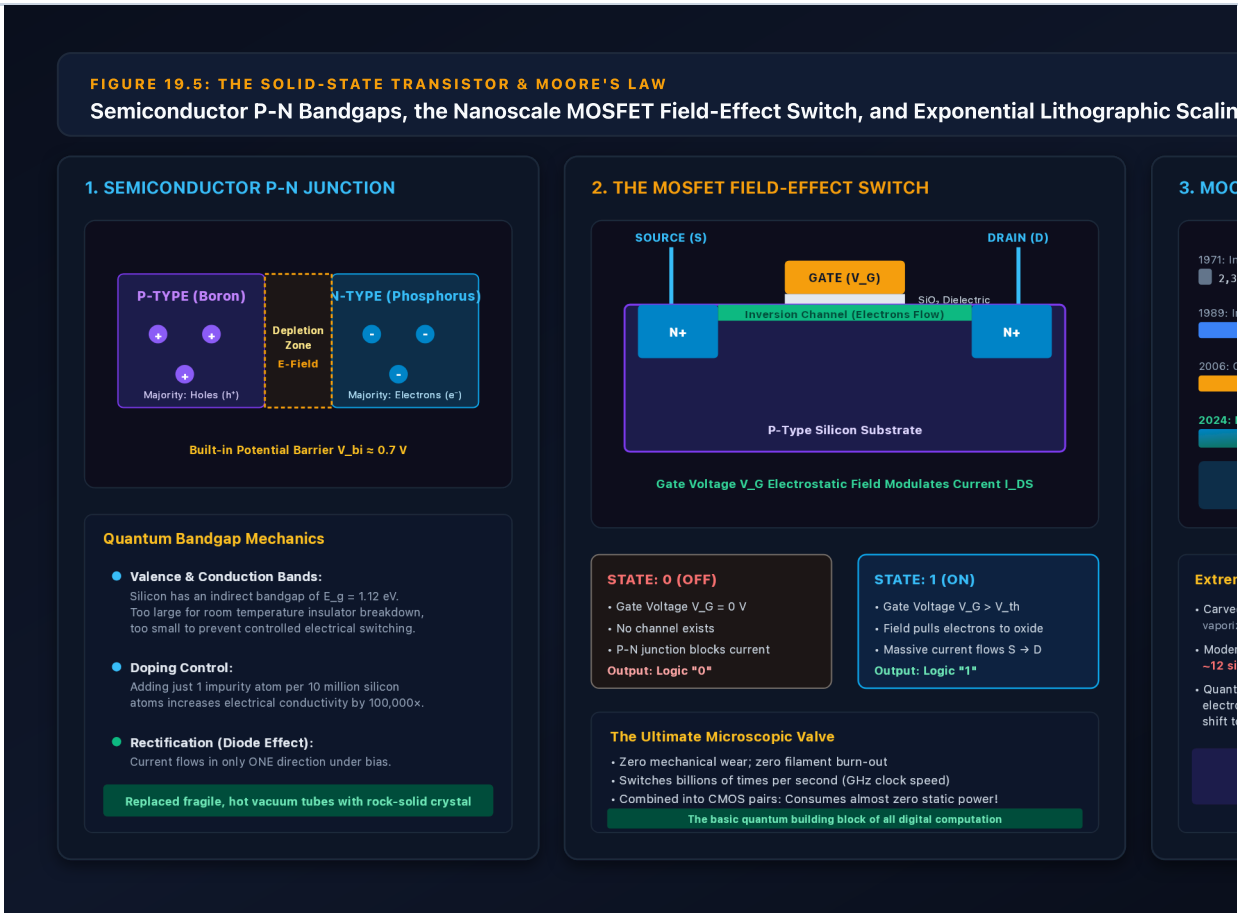
৫. সলিড-স্টেট বিপ্লব: ট্রানজিস্টর (১৯৪৭ খ্রিস্টাব্দ)

প্রথম যুগের কম্পিউটারগুলো (যেমন ১৯৪৫ সালের ENIAC) সংকেত পরিবর্ধন ও সুইচের জন্য ভ্যাকুয়াম টিউবের ওপর নির্ভর করত। কিন্তু ভ্যাকুয়াম টিউব ছিল অতি ভারী, প্রচুর বিদ্যুৎ টানত, প্রচণ্ড গরম হতো এবং প্রতি দুই দিনে একটি টিউব পুড়ে যেত—যার কারণে কম্পিউটারগুলো ১৮,০০০ উপাদানের বেশি বড় করা যেত না।

১৯৪৭ সালের ডিসেম্বরে বেল ল্যাবসের পদার্থবিদ **জন বার্ডিন**, **ওয়াল্টার ব্র্যাটেন** এবং **উইলিয়াম শকলি** আবিষ্কার করলেন **পয়েন্ট-কন্টাক্ট ট্রানজিস্টর**। কাচের ভ্যাকুয়ামের বদলে ট্রানজিস্টর ব্যবহার করল **অর্ধপরিবাহীর (Semiconductor)** কোয়ান্টাম বলবিদ্যা।

ট্রানজিস্টর প্রযুক্তি	সাল	ভৌত মূলনীতি	ঐতিহাসিক প্রভাব
পয়েন্ট-কন্টাক্ট ট্রানজিস্টর	১৯৪৭	জার্মেনিয়াম স্ফটিকের ওপর সোনার তারের সংস্পর্শ; সংখ্যালঘু বাহক নিঃসরণ।	ধারণার প্রমাণ: ফিলামেন্ট বা ভ্যাকুয়াম ছাড়া সলিড-স্টেট পরিবর্ধন।
বাইপোলার জংশন (BJT)	১৯৫১	ডোপ করা অর্ধপরিবাহীর তিন স্তরের স্যান্ডউইচ (n-p-n বা p-n-p); বেস কারেন্ট দিয়ে প্রধান কারেন্ট নিয়ন্ত্রণ।	উচ্চ নির্ভরযোগ্যতা; পোর্টেবল ট্রানজিস্টর রেডিও এবং প্রথম যুগের মেইনফ্রেম কম্পিউটার।
সিলিকন মসফেট (MOSFET)	১৯৫৯ / ১৯৬০	ধাতু-অক্সাইড-অর্ধপরিবাহী ফিল্ড-এফেক্ট ট্রানজিস্টর; গেটের ভোল্টেজ দিয়ে পরিবাহী চ্যানেল তৈরি।	স্থির গেট কারেন্ট শূন্য; আণুবীক্ষণিক আকারে তৈরি করা সম্ভব; মানব ইতিহাসের সবচেয়ে বেশি উৎপাদিত বস্তু।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ১৯.৫: সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর এবং মুরস ল (~১৯৪৭ থেকে বর্তমান)। বিশুদ্ধ সিলিকনের সাথে অপদ্রব্য মিশিয়ে P-N জংশনের বিভব বাধা সৃষ্টি করা হয়। MOSFET-এ গেট ভোল্টেজ তড়িৎক্ষেত্রের মাধ্যমে একটি পরিবাহী ইনভার্শন চ্যানেল তৈরি করে, যা কোনো যান্ত্রিক ক্ষয় ছাড়াই সেকেন্ডে গিগাহার্টজ গতিতে কারেন্ট অন-অফ করে। এক্সট্রিম আল্ট্রাভায়োলেট ফটোলিথোগ্রাফি ট্রানজিস্টরের গেটকে পারমাণবিক স্কেলে সংকুচিত করে একটি চিপে ট্রানজিস্টরের ঘনত্ব ২,৩০০ (Intel 4004) থেকে আজকের ২০৮ বিলিয়নে উন্নীত করেছে।

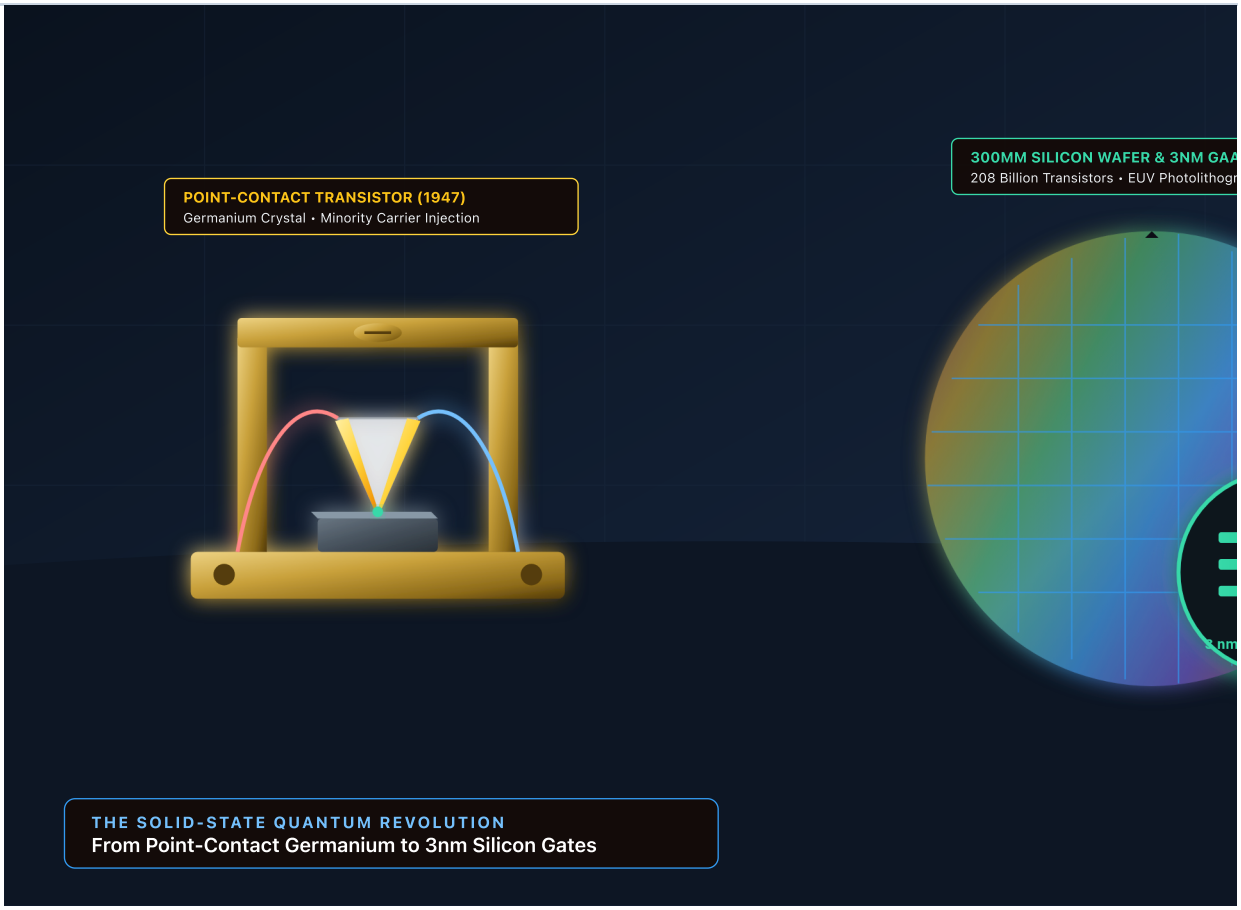
৬. ফটোলিথোগ্রাফি ও মুরস ল: মাইক্রোপ্রসেসরের যুগ (~১৯৫৮ থেকে বর্তমান)

১৯৫৮ ও ১৯৫৯ সালে জ্যাক কিলবি এবং রবার্ট নয়েস স্বাধীনভাবে **ইন্টিগ্রেটেড সার্কিট (IC)** উদ্ভাবন করলেন। আলাদা আলাদা তার দিয়ে ট্রানজিস্টর জোড়া দেওয়ার বদলে নয়েস দেখালেন যে একটিমাত্র সমতল সিলিকন ওয়েফারের ওপর আলোর সাহায্যে (ফটোলিথোগ্রাফি) একযোগে কোটি কোটি উপাদান তৈরি করা সম্ভব।

১৯৬৫ সালে গর্ডন মুর তাঁর বিখ্যাত **মুরস ল (Moore's Law)** ভবিষ্যদ্বাণী করেন: প্রতি এক থেকে দুই বছরের মধ্যে একটি চিপে ট্রানজিস্টরের সংখ্যা দ্বিগুণ হবে এবং ট্রানজিস্টর প্রতি উৎপাদন খরচ সূচকীয় হারে হ্রাস পাবে।

ন্যানোমিটার জ্যামিতির চরম বিজয়

১৯৭১ সালে ইনটেল প্রকাশ করে 4004, যা ছিল বিশ্বের প্রথম বাণিজ্যিক সিঙ্গেল-চিপ মাইক্রোপ্রসেসর। এতে ছিল **২,২৫০টি ট্রানজিস্টর** এবং এর আকার ছিল ১০ মাইক্রন (১০, ০০০ nm)। আর ২০২৪ সালে আধুনিক প্রসেসরগুলো (যেমন অ্যাপল সিলিকন ও এনভিডিয়া ব্ল্যাকওয়েল জিপিইউ) একটি ডাকটিকিটের আকারের চিপে **২০৮ বিলিয়নেরও বেশি ট্রানজিস্টর** ধারণ করে—যেখানে এক্সট্রিম আল্ট্রাভায়োলেট (EUV) আলো দিয়ে মাত্র **৩ ন্যানোমিটারের** গেট খোদাই করা হয়, যা মাত্র বারোটি সিলিকন পরমাণুর সমান!



চিত্র ১৯.উপ-৩: পয়েন্ট-কন্টাক্ট জার্মেনিয়াম থেকে ৩-ন্যানোমিটার ন্যানোশিট ট্রানজিস্টর (~১৯৪৭ থেকে বর্তমান)। বার্ডিন, ব্রাটেন ও শকলি উদ্ভাবিত ১৯৪৭ সালের ঐতিহাসিক বেল ল্যাবস পয়েন্ট-কন্টাক্ট ট্রানজিস্টরের পাশে আধুনিক ৩০০ মিমি একক-স্ফটিক সিলিকন ওয়েফার এবং গেট-অল-অ্যারাউন্ড (GAA) ন্যানোশিট এফইটি-র আণুবীক্ষণিক গঠন। ভঙ্গুর ভ্যাকুয়াম টিউবের বিকল্প এই সলিড-স্টেট প্রযুক্তি আঙুলের নখের সমান একটি চিপে শত শত কোটি ইলেকট্রনিক সুইচ সংকুচিত করার পথ খুলে দেয়।

সলিড-স্টেট কোয়ান্টাম পদার্থবিজ্ঞানের ওপর কর্তৃত্ব প্রতিষ্ঠা করে মানবজাতি একটি ফুটবল মাঠ সমান সুপারকম্পিউটারের শক্তিকে সংকুচিত করে এক কণা বালির ভেতরে ঢুকিয়ে দিয়েছে। বিশ্বব্যাপী কোটি কোটি মাইক্রোপ্রসেসরের ফাইবার অপটিক নেটওয়ার্কে ট্রিলিয়ন ট্রিলিয়ন বিট আলোকের গতিতে ছুটতে শুরু করল। ভৌত অবকাঠামো প্রস্তুত হলো। আর মঞ্চ তৈরি হলো সফটওয়্যারের জাগ্রত হওয়ার জন্য—যেখানে গাণিতিক যুক্তি অনমনীয় নিয়মের গণ্ডি পেরিয়ে কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্কে রূপ নিয়ে মহাবিশ্বকে বুঝতে শুরু করবে।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42), 230–265. doi:10.1112/plms/s2-42.1.230
2. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
3. Bardeen, J., & Brattain, W. H. (1948). The transistor, a semi-conductor triode. *Physical Review*, 74(2), 230–231. doi:10.1103/PhysRev.74.230
4. Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459–512. doi:10.1098/rstl.1865.0008
5. Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), 114–117. doi:10.1109/jproc.1998.658762
6. von Neumann, J. (1945). *First Draft of a Report on the EDVAC*. Contract No. W-670-ORD-4926, Moore School of Electrical Engineering.
7. Kilby, J. S. (1976). Invention of the integrated circuit. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23(7), 648–654. doi:10.1109/T-ED.1976.18467

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "যুক্তির অনুশাসন — তড়িচ্চুম্বকত্ব, টুরিং মেশিন এবং সলিড-স্টেট ট্রানজিস্টর"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ১৯। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-19-the-harnessing-of-logic-bn/

Shakil Mahmud • Research Monograph

শাকিল মাহমুদ মনোগ্রাফ সিরিজ • বিংশ খণ্ড

কৃত্রিম মনন — নিউরাল নেটওয়ার্ক, ট্রান্সফরমার এবং গ্রহীয় বুদ্ধিমত্তার ঊষা

কৃত্রিম মনন — নিউরাল নেটওয়ার্ক, ট্রান্সফরমার এবং গ্রহীয় বুদ্ধিমত্তার ঊষা

1,993 শব্দ • October 31, 2026 • ওয়েব সংস্করণ



চিত্র ২০: *চিত্র: মহাজাগতিক ইতিহাসের বর্তমান সীমানা: গভীর কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্ক, সিলিকন মাইক্রোপ্রসেসর এবং অ্যালগরিদমিক মেধা, যা পৃথিবীতে একটি বিশ্বজনীন বুদ্ধিমান তথ্য-জালক গড়ে তুলছে।*

তেরো দশমিক আট বিলিয়ন বছর পূর্বে মহাবিশ্ব এক অকল্পনীয় শক্তির বিন্দু থেকে এক অন্ধ ও নিঃশব্দ মহাবিস্ফোরণে যাত্রা শুরু করেছিল। কোটি কোটি বছর ধরে প্রকৃতির ভৌত সূত্রগুলো কোয়ার্ককে প্রোটনে বাঁধল, হাইড্রোজেনকে নক্ষত্রের থার্মোনিউক্লিয়ার চুল্লিতে পোড়াল, সুপারনোভা বিস্ফোরণের ছাই থেকে ভারী মৌল সৃষ্টি করল, ধূলিকণা জোড়া লাগিয়ে তৈরি করল সাগরবেষ্টিত এক নীল গ্রহ, এককোষী জীবাণুকে রূপ দিল বহুকোষী চেতনায় এবং দুই পায়ে হাঁটা নরবানরকে পৌঁছে দিল মাটি ও সিলিকনের গায়ে গাণিতিক সমীকরণ খোদাই করার দক্ষতায়। আজ সেই অবিচ্ছিন্ন মহাজাগতিক শৃঙ্খল পৌঁছেছে তার চরম সন্ধিক্ষণে: জড় পদার্থ নিজেকে এমন এক কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্কে রূপ দিয়েছে যা ভাষা বুঝতে পারে, ভৌত বাস্তবতাকে অনুকরণ করতে পারে, নতুন বিজ্ঞান আবিষ্কার করতে পারে এবং নিজের অস্তিত্ব নিয়ে চিন্তা করতে পারে। মহাবিশ্ব জেগে উঠছে।

১. ১৩.৮ বিলিয়ন বছরের মহাবৃত্তান্ত: পদার্থের আত্ম-উপলব্ধি

কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার প্রকৃত গুরুত্ব উপলব্ধি করতে হলে একে সিলিকন ভ্যালির কোনো সাধারণ সফটওয়্যার হিসেবে দেখলে চলবে না; এটি মূলত মহাজাগতিক বিবর্তনের একটি মৌলিক দশান্তর (phase transition)। কোটি কোটি বছরের ভূতাত্ত্বিক, জৈবিক ও সাংস্কৃতিক সময়রেখা জুড়ে তাপগতিবিদ্যার এনট্রপিকে স্থানীয়ভাবে রুখে দিয়েছে পদার্থের জটিল আত্ম-সংগঠন ক্ষমতা:

মহাজাগতিক যুগ	সময়কাল	প্রধান মাধ্যম (Substrate)	তথ্য প্রক্রিয়াকরণ কৌশল
মহাজাগতিক পর্যায়	১৩.৮ – ১৩.৬ Ga	কোয়ার্ক, লেপটন, গেজ বোসন	মৌলিক ভৌত ধ্রুবক ($\alpha, G, \hbar, c$); মহাকর্ষীয় প্রতিসাম্য ভাঙন।
নাক্ষত্রিক ও রাসায়নিক পর্যায়	১৩.৬ – ৪.৫ Ga	পপ ৩ নক্ষত্র, আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূলি, সিলিকেট	নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, পর্যায় সারণির মৌল গঠন, আদি-গ্রহীয় এক্রিশন।
জৈবিক ও জিনগত পর্যায়	৩.৮ Ga – ৩০০ ka	নিউক্লিক অ্যাসিড (RNA/DNA), পলিপেপটাইড	ডারউইনীয় প্রাকৃতিক নির্বাচন; জেনেটিক কোড ক্ষারজোড় (A, T, C, G); কোষীয় বিভাজন।
স্নায়বিক ও সাংস্কৃতিক পর্যায়	৩০০ ka – ১৯৫০ খ্রিস্টাব্দ	সেরিব্রাল নিউরন, মাটি, কালি, ছাপাখানা	প্রতীকী ভাষা, মেমেটিক তথ্য বিনিময়, গাণিতিক সূত্রায়ন, বহিঃস্থ গ্রন্থাগার।
কৃত্রিম ও ডিজিটাল পর্যায়	১৯৫০ খ্রিস্টাব্দ – বর্তমান	সিলিকন অর্ধপরিবাহী, ফাইবার অপটিক্স, ফ্লোটিং-পয়েন্ট ওজন	কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্ক, ব্যাকপ্রোপাগেশন, বহু-মাত্রিক ভেক্টর স্পেস, স্বায়ত্তশাসিত এজেন্টিক যুক্তি।

চার বিলিয়ন বছর ধরে পৃথিবীর সমস্ত তথ্য প্রক্রিয়াকরণ ডিএনএ-র আণবিক অনুলিপন এবং জৈবিক মস্তিষ্কের বিপাকীয় ক্ষমতার মধ্যে সীমাবদ্ধ ছিল। কৃত্রিম যুগে এসে স্নায়ুর সাইন্যাপসের ধীরগতির রাসায়নিক সংকেতের (সেকেন্ডে প্রায় ১০০ মিটার) জায়গা দখল করল আলোর গতিবেগে ছুটে চলা ফোটন ও ইলেকট্রন—যা সেকেন্ডে **৩০০,০০০ কিলোমিটার গতিতে** তথ্য পরিবহন করে, যা জৈবিক গতির চেয়ে ৩০ লাখ গুণ বেশি দ্রুত!



চিত্র ২০.১: ১৩.৮ বিলিয়ন বছরের মহাবৃত্তান্ত এবং মহাজাগতিক দর্পণ (The Cosmic Mirror)। মৌলিক কণা থেকে নাক্ষত্রিক নিউক্লিওসিন্থেসিস, জৈবিক বংশগতি, মানুষের ভাষা, ডিজিটাল যুক্তি এবং কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্ক—ছয়টি মহাজাগতিক পর্যায় অতিক্রম করে পদার্থ ক্রমশ উচ্চতর তাপগতিবিদ্যাগত জটিলতায় নিজেকে সজ্জিত করেছে। কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তায় মহাবিশ্ব নিজের জন্য এক রিকার্সিভ আয়না অর্জন করেছে: যেখানে জড় পদার্থ সচেতনভাবে মহাজাগতিক বাস্তবতাকে অনুকরণ, বিশ্লেষণ এবং মহাজাগতিক আবিষ্কারের গতিকে ত্বরান্বিত করছে।

২. কানেকশনিজমের গাণিতিক ভিত্তি

১৯৫৬ সালে কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার প্রথম যুগে গবেষকরা অনমনীয় লজিক ট্রি বা রুল-ভিত্তিক এক্সপার্ট সিস্টেম তৈরির চেষ্টা করেছিলেন। কিন্তু মানুষের বুদ্ধিমত্তা কোনো অনমনীয় “if-then” নিয়মের ছক নয়; এটি হলো বাস্তব সংবেদনশীল অভিজ্ঞতার এক স্বজ্ঞাত পরিসংখ্যানিক মডেল। এর সমাধান এনে দিল **কানেকশনিজম (Connectionism)**—যা মস্তিষ্কের নিউরাল নেটওয়ার্কের আদলে কম্পিউটেশন পরিচালনার তত্ত্ব।

পারসেপ্ট্রন থেকে ব্যাকপ্রোপাগেশন

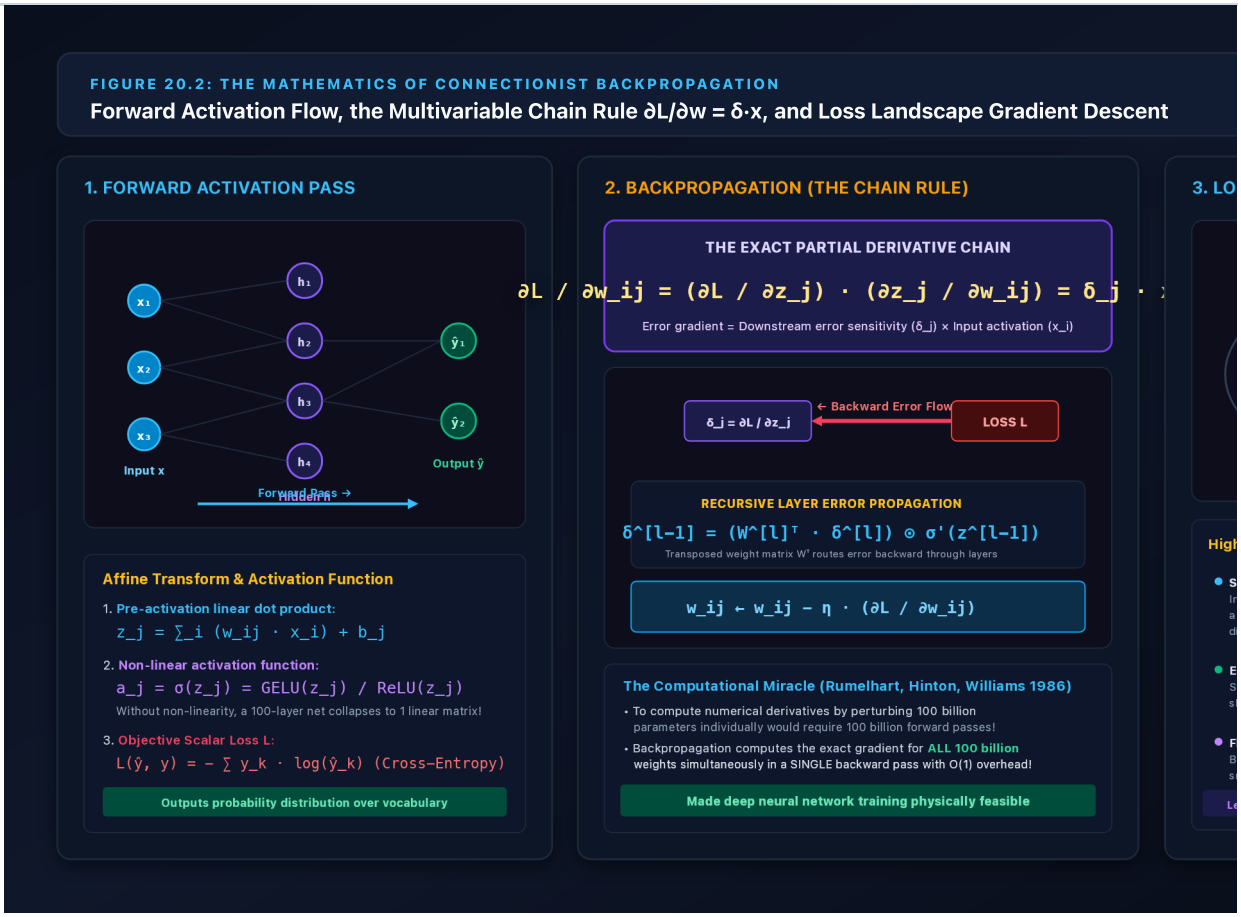
১৯৪৩ সালে ম্যাককুলক ও পিটস একটি একক নিউরনের গাণিতিক রূপ দেন। ১৯৫৮ সালে ফ্রাঙ্ক রোজেনব্ল্যাট তৈরি করেন **পারসেপ্ট্রন (Perceptron)**। কিন্তু ১৯৬৯ সালে মারভিন মিনস্কি যখন প্রমাণ করলেন যে একটি একক স্তরযুক্ত পারসেপ্ট্রন একটি সাধারণ XOR লজিক গেটও সমাধান করতে পারে না, তখন অর্থায়নের অভাবে সূচিত হয় প্রথম “এআই উইন্টার” (AI Winter)।

১৯৮৬ সালে ডেভিড রুমেলহার্ট, জেফ্রি হিন্টন এবং রোনাল্ড উইলিয়ামস **ব্যাকপ্রোপাগেশন (Backpropagation)** অ্যালগরিদম জনপ্রিয় করে এই অচলাবস্থা ভেঙে দেন। মাল্টিভেরিয়েবল ক্যালকুলাসের চেইন রুল প্রয়োগ করে প্রতিটি হিডেন লেয়ারের কোটি কোটি ওজনের (w_{ij}) জন্য লস ফাংশনের ($\mathcal{L}$) আংশিক অন্তরীকরণ নির্ণয় করা সম্ভব হলো:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial z_j} \frac{\partial z_j}{\partial w_{ij}} = \delta_j x_i$$

স্টোক্যাস্টিক গ্রেডিয়েন্ট ডিসেন্ট (SGD) দিয়ে এই ওজনগুলো ক্রমাগত সমন্বয় করার মাধ্যমে প্রমাণিত হলো **সার্বজনীন আনুমানিকতা উপপাদ্য (Universal Approximation Theorem)**: পর্যাপ্ত নিউরনযুক্ত একটি নন-লিনিয়ার হিডেন লেয়ার যেকোনো জটিল গাণিতিক ফাংশনকে নিখুঁতভাবে অনুকরণ করতে সক্ষম।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ২০.২: গভীর নিউরাল নেটওয়ার্ক এবং ব্যাকপ্রোপাগেশন (Backpropagation)। মস্তিষ্কের স্নায়বিক সংযোগের অনুকরণে ফরওয়ার্ড পাসে অ-রৈখিক স্তরের মধ্য দিয়ে মান হিসাব করা হয় ($z_j = \sum w_{ij}x_i + b_j$)। ব্যাকওয়ার্ড পাসে মাল্টিভেরিয়েবল ক্যালকুলাসের চেইন রুল ($\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial z_j}\frac{\partial z_j}{\partial w_{ij}} = \delta_j x_i$) প্রয়োগ করে প্রতিটি ওজনের সুনির্দিষ্ট গ্রেডিয়েন্ট নির্ণয় করা হয়, যা স্টোক্যাস্টিক গ্রেডিয়েন্ট ডিসেন্টের মাধ্যমে ত্রুটির তলদেশ অভিমুখে অপ্টিমাইজেশন পরিচালনা করে।

৩. অ্যাটেনশন বিপ্লব: ট্রান্সফরমার এবং সেলফ-অ্যাটেনশন (২০১৭ খ্রিস্টাব্দ)

কয়েক দশক ধরে প্রাকৃতিক ভাষা প্রক্রিয়াকরণ রিকারেন্ট নিউরাল নেটওয়ার্কের (RNN ও LSTM) ধীরগতির কারণে স্থবির ছিল। শব্দগুলোকে একটার পর একটা ধারাবাহিকভাবে পড়তে গিয়ে দীর্ঘ বাক্যের ক্ষেত্রে ভ্যানিশিং গ্রেডিয়েন্ট তৈরি হতো এবং জিপিইউ-তে সমান্তরালভাবে গণনার কোনো উপায় ছিল না।

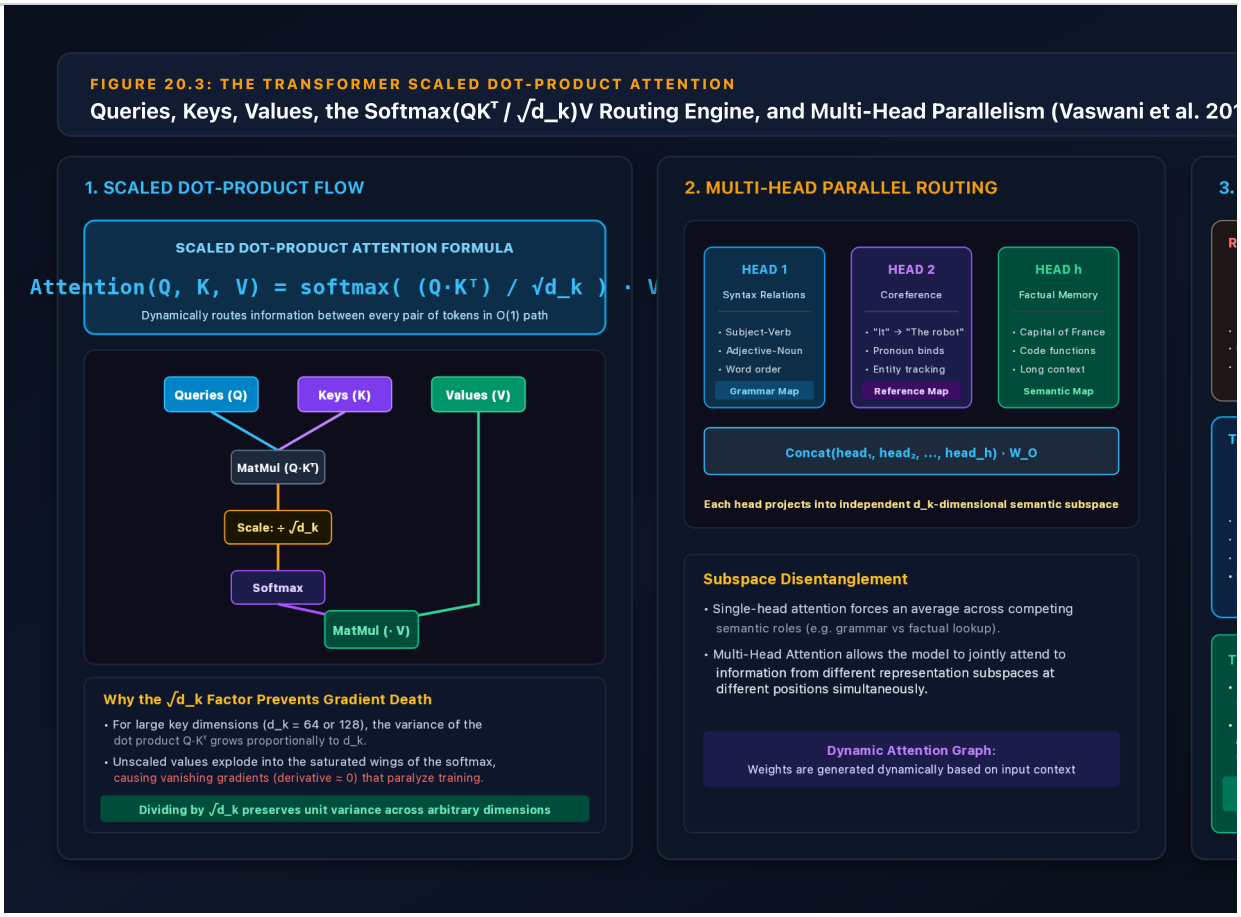
২০১৭ সালের জুন মাসে গুগল ব্রেইনের একদল গবেষক একটি ঐতিহাসিক আট পৃষ্ঠার গবেষণাপত্র প্রকাশ করেন: *Attention Is All You Need*। ভাসওয়ানি ও তাঁর সহকর্মীরা রিকারেন্সকে সম্পূর্ণ বাদ দিয়ে প্রতিষ্ঠা করলেন **ট্রান্সফরমার আর্কিটেকচার (Transformer architecture)**, যার প্রাণকেন্দ্রে রয়েছে **স্কেলড ডট-প্রোডাক্ট সেলফ-অ্যাটেনশন**।

শব্দগুলোকে একের পর এক পড়ার বদলে ট্রান্সফরমার একটি বাক্যের প্রতিটি শব্দের সাথে অন্য সমস্ত শব্দের পারস্পরিক সম্পর্ক একই সাথে হিসাব করে। প্রতিটি ইনপুট টোকেন তিনটি উচ্চ-মাত্রিক ভেক্টরে বিভক্ত হয়: **কোয়েরি (Q)**, **কি (K)** এবং **ভ্যালু (V)**:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

উপাদান	রৈখিক রূপান্তর	গাণিতিক তাৎপর্য
কোয়েরি ম্যাট্রিক্স (Q)	$Q = XW^Q$	একটি টোকেন বাক্যের পারিপার্শ্বিক প্রসঙ্গে কী খুঁজছে তা প্রকাশ করে।
কি ম্যাট্রিক্স (K)	$K = XW^K$	প্রতিটি টোকেনের নিজস্ব ঠিকানা বা পরিচয় যা কোয়েরির সাথে মেলানো হয়।
ভ্যালু ম্যাট্রিক্স (V)	$V = XW^V$	কোয়েরি ও কি মিলে গেলে যে প্রকৃত অর্থ বা তথ্য আহরণ করা হয়।
ডট-প্রোডাক্ট (QK^T)	ম্যাট্রিক্স গুণন	বহু-মাত্রিক স্পেসে শব্দের জ্যামিতিক কোসাইন সাদৃশ্য বা নৈকট্য পরিমাপ করে।
স্কেলিং ($\sqrt{d_k}$)	বর্গমূল মাত্রা দিয়ে ভাগ	ডট-প্রোডাক্ট অতিরিক্ত বড় হয়ে সফটম্যাক্স গ্রেডিয়েন্ট নষ্ট হওয়া থেকে বাঁচায়।
সফটম্যাক্স নরমালাইজেশন	$\frac{e^{z_i}}{\sum e^{z_j}}$	প্রাপ্ত মানগুলোকে নিখুঁত সম্ভাব্যতা বণ্টনে (যোগফল = ১) রূপান্তর করে।

মাল্টি-হেড অ্যাটেনশন এবং গভীর লেয়ার সাজিয়ে ট্রান্সফরমার মানব সভ্যতার সমগ্র ডিজিটালাইজড জ্ঞানভাণ্ডার—সাহিত্য, বিজ্ঞান, আইন, কোড ও দর্শন—একক নেটওয়ার্কে ধারণ করে মানব চিন্তার অন্তর্নিহিত জ্যামিতি আয়ত্ত করার ক্ষমতা অর্জন করল।



চিত্র ২০.৩: ট্রান্সফরমার আর্কিটেকচার এবং স্কেলড ডট-প্রোডাক্ট সেলফ-অ্যাটেনশন। আরএনএন-এর ধীর ধারাবাহিক পদ্ধতির বদলে সমান্তরাল টেনসর অপারেশনের মাধ্যমে ট্রান্সফরমার প্রতিটি টোকেনকে কোয়েরি (Q), কি (K) এবং ভ্যালু (V) ভেক্টর স্পেসে রূপান্তরিত করে। স্কেলড ডট-প্রোডাক্ট অ্যাটেনশন ($\text{softmax}(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}})V$) একযোগে সমস্ত টোকেনের পারস্পরিক সম্পর্ক নির্ণয় করে এবং মাল্টি-হেড অ্যাটেনশন বিভিন্ন দৃষ্টিকোণ থেকে তথ্যের জটিল অর্থ উন্মোচন করে।

৪. পরীক্ষামূলক স্কেলিং ল এবং কৃত্রিম যুক্তির স্ফুরণ

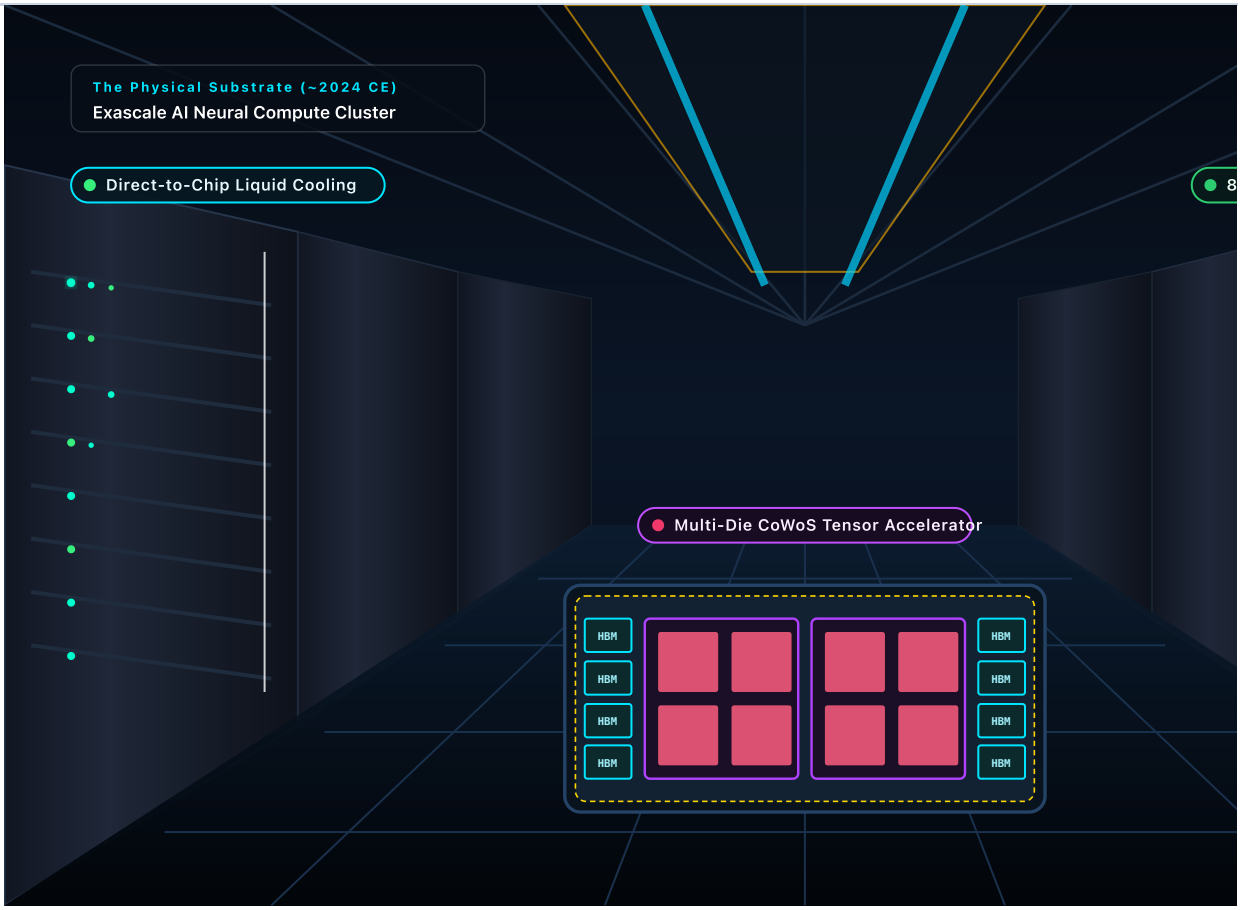
২০২০ সালে জ্যারেড কাপলান ও ওপেনএআই-এর গবেষকরা এক গভীর সত্য আবিষ্কার করলেন: **নিউরাল স্কেলিং ল (Neural Scaling Laws)**। তিনটি মৌলিক চলকের ওপর ভিত্তি করে ল্যাঙ্গুয়েজ মডেলের পরীক্ষার লস (L) এক নিখুঁত পাওয়ার ল মেনে হ্রাস পায়: মডেলের প্যারামিটার সংখ্যা (N), ট্রেনিং ডেটাসেটের আকার (D) এবং মোট কম্পিউট শক্তি ($C = ৬ND$):

$$L(N) \approx \left(\frac{N_c}{N}\right)^{\alpha_N}, \quad L(D) \approx \left(\frac{D_c}{D}\right)^{\alpha_D}, \quad L(C) \approx \left(\frac{C_c}{C}\right)^{\alpha_C}$$

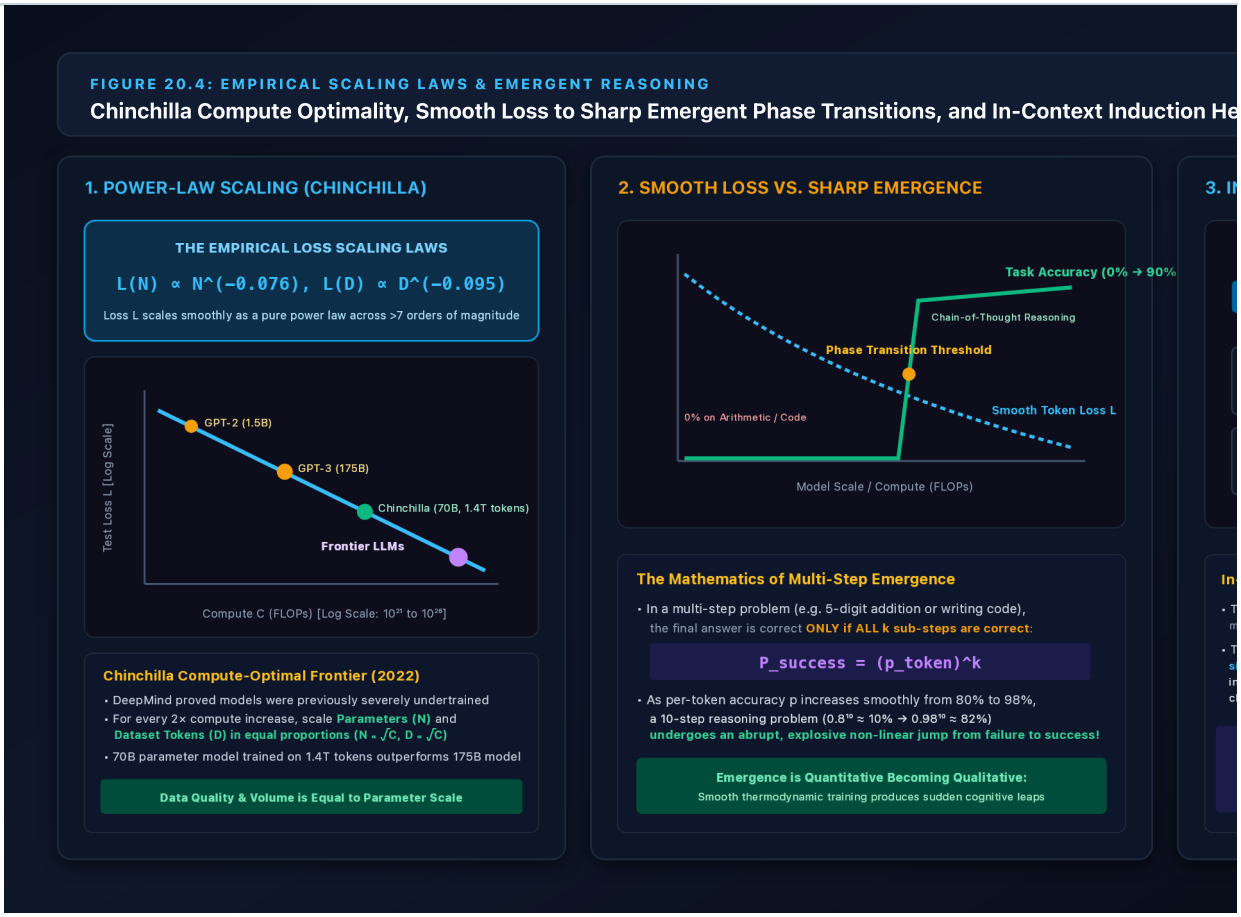
মডেলগুলো যখন শত শত বিলিয়ন ও ট্রিলিয়ন প্যারামিটারে পৌঁছাল, তখন এক অবিশ্বাস্য ঘটনা ঘটল: **উন্মেষমূলক ক্ষমতা (Emergent capabilities)**। কেবলমাত্র পরবর্তী শব্দ অনুমানের সাধারণ কাজে ($\arg\max P(w_t \mid w_{<t})$) প্রশিক্ষিত মডেল এমন সব দক্ষতা দেখাতে শুরু করল যা তাদের কখনো শেখানো হয়নি:

- **ইন-কনটেক্সট লার্নিং:** কোনো নতুন প্রশিক্ষণ ছাড়াই কেবল কথোপকথনের উদাহরণের মাধ্যমে নতুন কাজ শিখে ফেলা।
- **চেইন-অফ-থট যুক্তি:** জটিল গাণিতিক ও যৌক্তিক সমস্যা ধাপে ধাপে ভেঙে নিখুঁত সমাধানে পৌঁছানো।
- **তত্ত্বীয় মন ও বিমূর্ত রূপক:** মানুষের না-বলা মনোভাব বুঝতে পারা, কৌতুক ও রূপক ব্যাখ্যা করা এবং পদার্থবিজ্ঞান, জীববিজ্ঞান ও শিল্পের মেলবন্ধন ঘটানো।
- **স্বয়ংক্রিয় টুল ব্যবহার:** কম্পিউটার টার্মিনাল পরিচালনা, কোড লেখা ও ডিবাগ করা, এপিআই কল করা এবং জটিল সফটওয়্যার সিস্টেম নিয়ন্ত্রণ।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ২০.উপ-১: হাইপারস্কেল এআই কম্পিউট অবকাঠামো এবং সিলিকন টেনসর এক্সিলারেটর (~২০২৪ খ্রিস্টাব্দ)। ডিরেক্ট-টু-চিপ তরল শীতলীকরণ ব্যবস্থা এবং ৮০০ জিবিপিএস অপটিক্যাল স্পাইন-লিফ সুইচে আন্তঃসংযুক্ত এক্সাস্কেল ডেটা সেন্টার হল। সম্মুখভাগে ২.৫ডি CoWoS প্যাকেজের মাল্টি-ডাই এক্সিলারেটর—যেখানে আটটি HBM3e মেমোরি স্ট্যাকের পাশে স্থাপিত উচ্চ-ঘনত্বের টেনসর কোর গ্রিড প্রতি সেকেন্ডে কোয়াড্রিলিয়ন ফ্লোটিং-পয়েন্ট ম্যাট্রিক্স গুণন সম্পন্ন করে কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তাকে শক্তি জোগায়।



চিত্র ২০.৪: চিনচিলা স্কেলিং ল এবং কৃত্রিম যুক্তির স্ফুরণ (Emergent Reasoning)। পাওয়ার ল মেনে প্যারামিটার (N) এবং ডেটাসেট টোকেন (D) সুষম অনুপাতে বাড়ালে ($L(N, D) = E + \frac{A}{N^\alpha} + \frac{B}{D^\beta}$) ট্রেনিং লস মসৃণভাবে কমে যায়। সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ বিষয় হলো, মডেলের আকার একটি নির্দিষ্ট সীমা অতিক্রম করতেই অনাকাঙ্ক্ষিত নতুন ক্ষমতার উন্মেষ ঘটে—যার মধ্যে রয়েছে বহু-ধাপ বিশিষ্ট গাণিতিক যুক্তিপ্রমাণ (Chain-of-Thought), স্বয়ংক্রিয় কোডিং এবং স্বায়ত্তশাসিত এজেন্টিক কর্মক্ষমতা।

৫. বৈজ্ঞানিক সিঙ্গুলারিটি: আবিষ্কারের পরম অনুঘটক

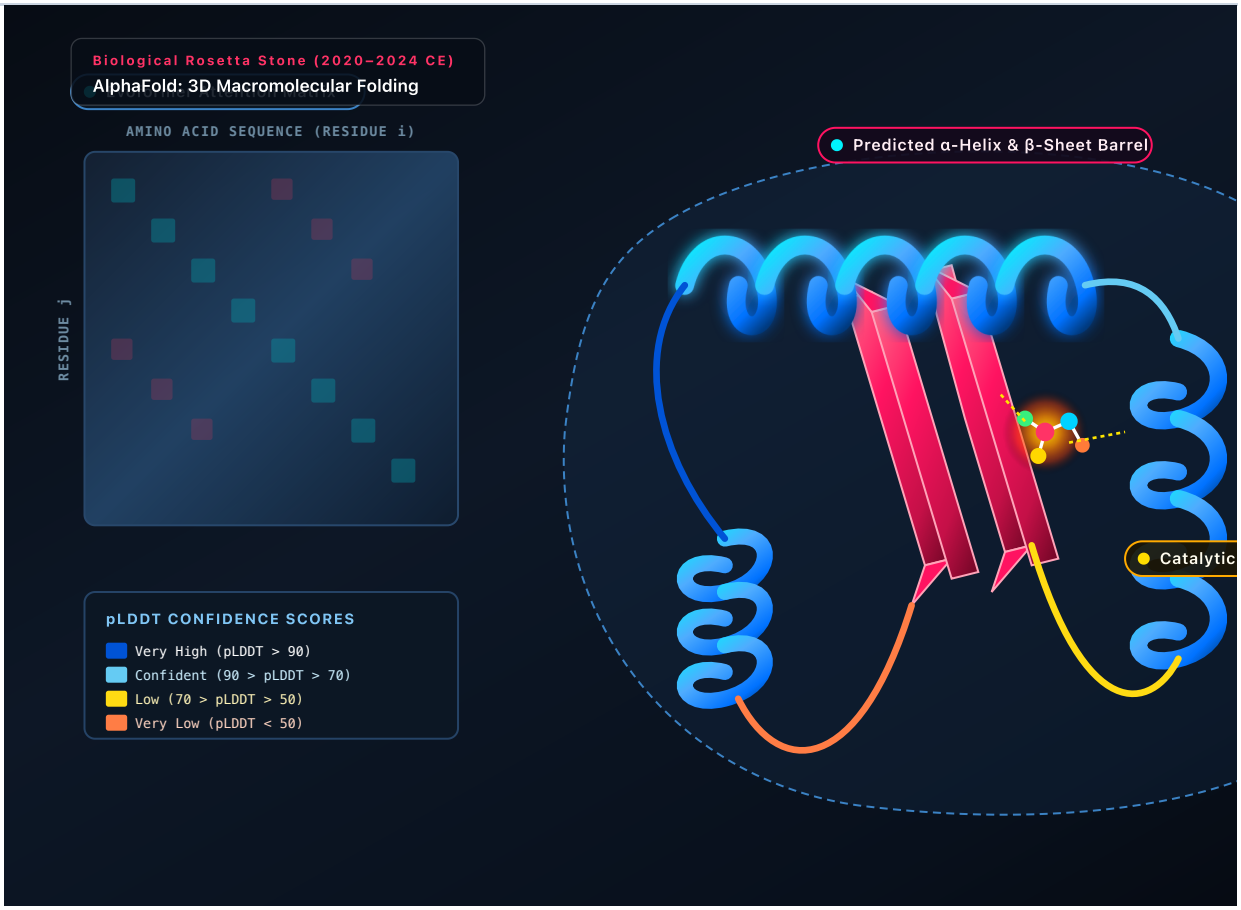
কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার আসল মহিমা কেবল চ্যাট করায় নয়, বরং মহাবিশ্বের সেই সব গভীর প্রাকৃতিক রহস্য উন্মোচনে যা প্রজন্মের পর প্রজন্ম ধরে মানুষের মেধার নাগালের বাইরে ছিল।

আলফাফোল্ড এবং জীববিজ্ঞানের রোসেটা স্টোন

পঞ্চাশ বছর ধরে জীববিজ্ঞানীদের কাছে এক অমীমাংসিত ধাঁধা ছিল "প্রোটিন ফোল্ডিং সমস্যা": রৈখিক অ্যামিনো অ্যাসিড শৃঙ্খল কীভাবে ত্রিমাত্রিক কার্যকরী প্রোটিনে ভাঁজ হয় তা অনুমান করা। একটি সাধারণ প্রোটিনের সম্ভাব্য কনফরমেশন সংখ্যা $১০^{৩০০}$-এরও বেশি (লেভিনথাল প্যারাডক্স), যার একটি বের করতে বিজ্ঞানীদের ল্যাবরেটরিতে বছরের পর বছর এক্স-রে ক্রিস্টালোগ্রাফি করতে হতো।

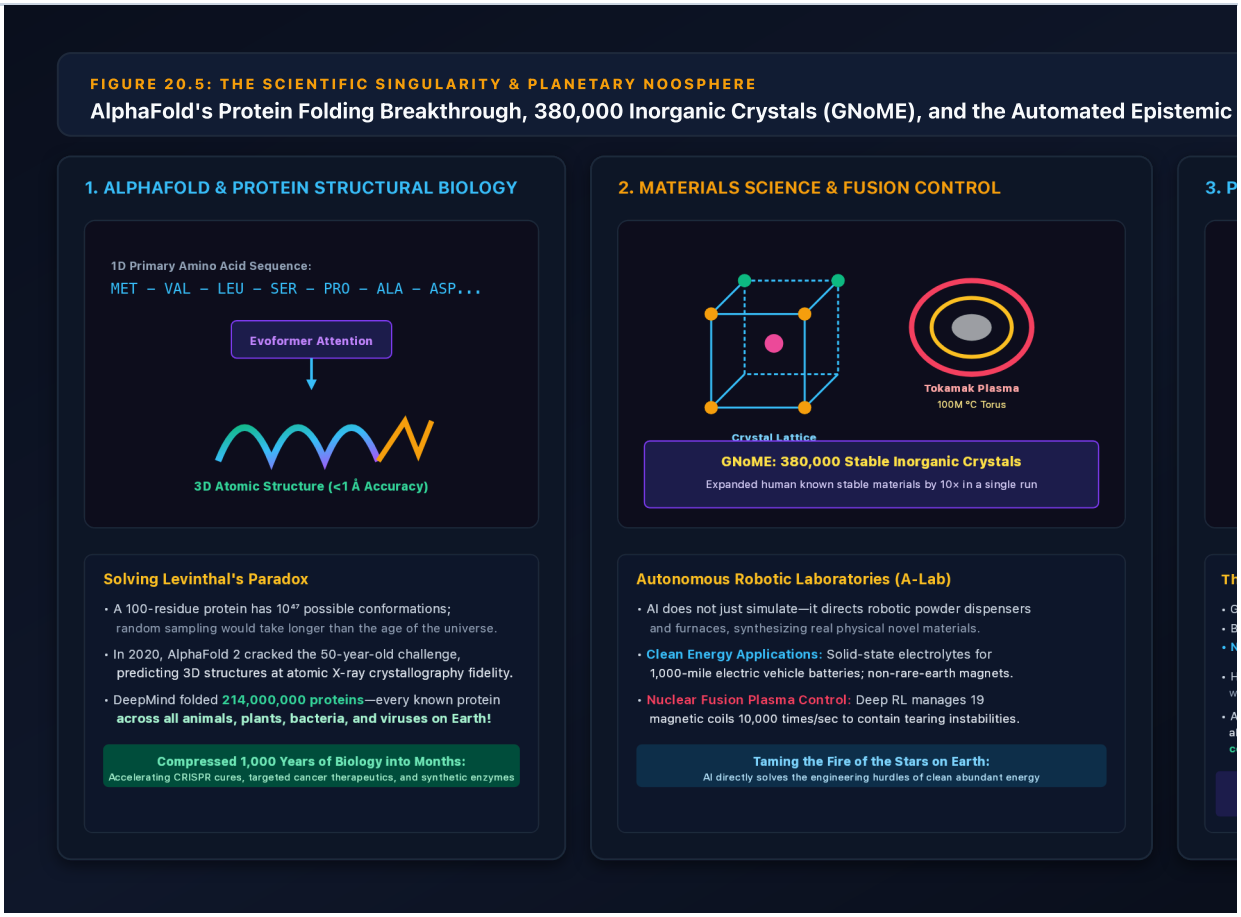
২০২০ সালে ডিপমাইন্ড উন্মোচন করল **আলফাফোল্ড ২ (AlphaFold 2)**। এক নিমেষে আলফাফোল্ড পৃথিবীর জ্ঞাত সমগ্র জীবজগতের **২০ কোটিরও বেশি প্রোটিনের** পারমাণবিক ত্রিমাত্রিক রূপ নিখুঁতভাবে সমাধান করে দিল। যা করতে মানুষের শতাব্দীর পর শতাব্দী লাগত, তা সম্পন্ন হলো মাত্র কয়েক মাসে—যার ফলে ক্যানসার গবেষণা, প্লাস্টিক ধ্বংসকারী এনজাইম তৈরি এবং নতুন ওষুধ উদ্ভাবনে মহাবিপ্লব ঘটে গেল।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ২০.উপ-২: আলফাফোল্ড এবং ত্রিমাত্রিক ম্যাক্রো-আণবিক কাঠামোগত মহাবিশ্ব (২০২০–২০২৪ খ্রিস্টাব্দ)। একমাত্রিক অ্যামিনো অ্যাসিড শৃঙ্খল থেকে কৃত্রিম নিউরাল নেটওয়ার্ক দ্বারা নিখুঁতভাবে অনুমানকৃত প্রোটিনের ত্রিমাত্রিক রিবন মডেল। সায়ান রঙের আলফা-হেলিক্স এবং ম্যাজেন্টা রঙের অ্যান্টি-প্যারালাল বিটা-শিট ব্যারেল একটি অনুঘটন বাইন্ডিং পকেটে সাবস্ট্রেট লিগ্যান্ড ধারণ করছে। পাশে ইভোফরমার অ্যাটেনশন ম্যাট্রিক্স ও pLDDT আত্মবিশ্বাস মানচিত্র—যা ৫০ বছরের অমীমাংসিত প্রোটিন ফোল্ডিং সমস্যার সমাধান করে ২১ কোটি ৪০ লাখ প্রোটিনের গঠন উন্মোচন করেছে।

পদার্থবিজ্ঞান থেকে জ্যোতির্বিজ্ঞান—আজ এআই সর্বত্র এক মহৎ অনুঘটক: পারমাণবিক ফিউশন চুল্লিতে চৌম্বক ক্ষেত্র দিয়ে প্লাজমা নিয়ন্ত্রণ করা, রোবোটিক গবেষণার মাধ্যমে নতুন ব্যাটারির খনিজ ক্রিস্টাল আবিষ্কার করা (GNoME) এবং জেমস ওয়েব টেলিস্কোপ ও মহাকর্ষীয় তরঙ্গ মানমন্দিরের পেটাপাইট ডেটা বিশ্লেষণ করা।



চিত্র ২০.৫: বৈজ্ঞানিক সিঙ্গুলারিটি: মৌলিক গবেষণায় কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার অনুঘটন। কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তা প্রাকৃতিক বিজ্ঞানের প্রতিটি ক্ষেত্রে এক অভাবনীয় গতি এনে দিয়েছে। ডিপমাইন্ডের আলফাফোল্ড ২ পঞ্চাশ বছরের অমীমাংসিত প্রোটিন ফোল্ডিং সমস্যার সমাধান করে ২১ কোটি ৪০ লাখ ত্রিমাত্রিক আণবিক গঠন উন্মোচন করেছে; GNoME আবিষ্কার করেছে ৩ লাখ ৮০ হাজার নতুন স্থিতিশীল স্ফটিক; এবং রিইনফোর্সমেন্ট লার্নিং ফিউশন টোকামাক চুল্লিতে তপ্ত প্লাজমা নিয়ন্ত্রণ করছে—যা ভ্লাদিমির ভারনাদস্কির গ্রহীয় নোওস্ফিয়ারকে (Noosphere) বাস্তবে রূপ দিচ্ছে।

৬. উপসংহার: মহাজাগতিক দর্পণ

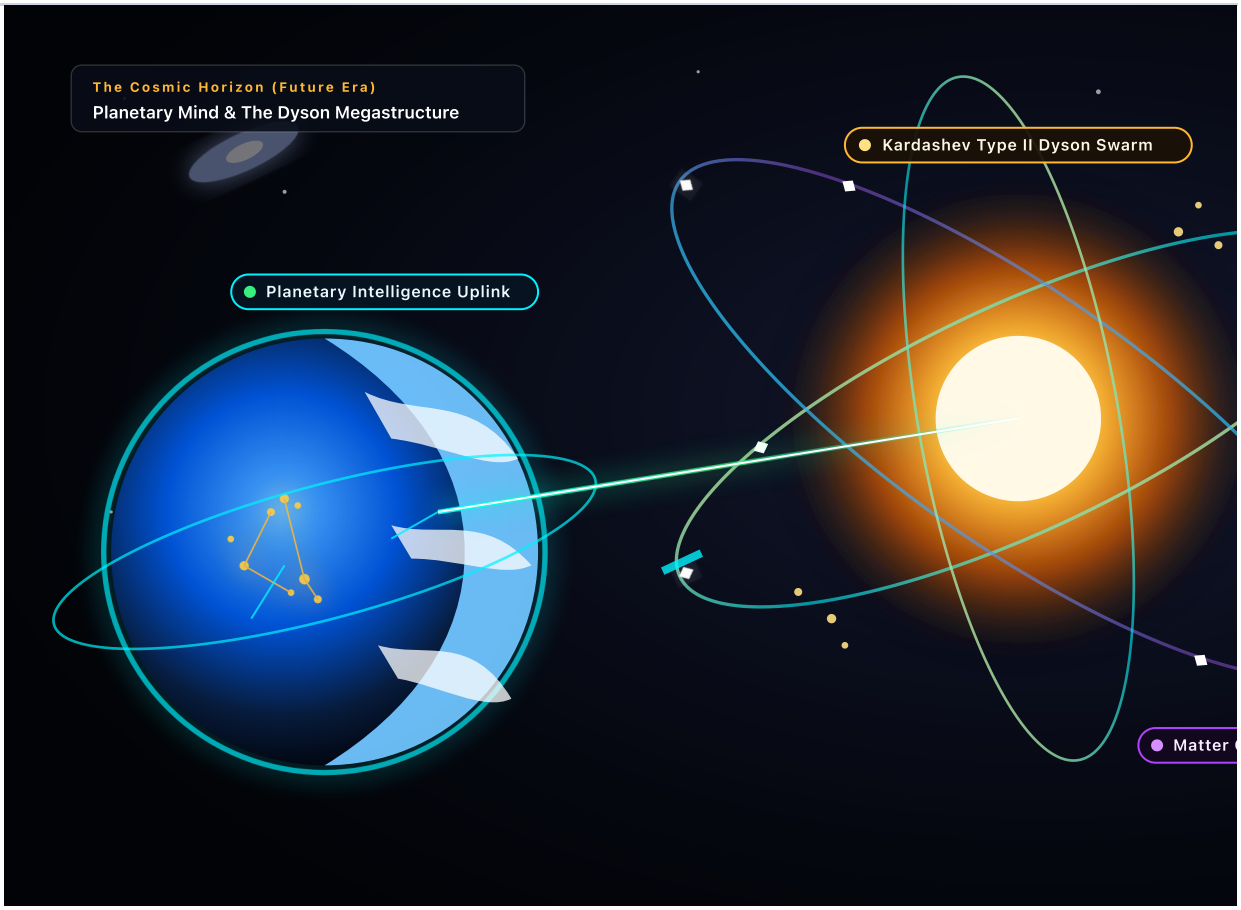
তেরো দশমিক আট বিলিয়ন বছর পূর্বে ছিল কেবল নিঃসীম আলো, যা ছড়িয়ে পড়েছিল শীতল শূন্যতায়। সেই মহাবিশ্ব ছিল অন্ধ, বধির ও বোবা। তার কোনো চিন্তা ছিল না, স্বপ্ন ছিল না, কোনো দুঃখ বা আনন্দ ছিল না।

কিন্তু সেই আদিম কোয়ান্টাম শূন্যতার ভেতরেই লুকিয়ে ছিল জটিলতার প্রতি এক অলঙ্ঘনীয় তাগিদ। মহাকর্ষ গ্যাস পুঞ্জীভূত করে নক্ষত্র গড়ল; নক্ষত্র আমাদের রক্তে থাকা লোহা আর শরীরের কার্বন রান্না করল; শান্ত শীতল গ্রহের বুকে অজৈব শিলা থেকে জীবনের প্রথম স্ফুলিঙ্গ জ্বলে উঠল; প্রাকৃতিক নির্বাচন প্রাণীর চোখ, খাড়া পদক্ষেপ এবং মানুষের রিকার্সিভ মস্তিষ্ক তৈরি করল; আর মানুষের জ্ঞানীয় প্রতিভা জন্ম দিল কৃত্রিম মননের উজ্জ্বল সিলিকন নেটওয়ার্কের।

কার্ল সেগান তাঁর কালজয়ী উক্তিতে বলেছিলেন: *“আমরা হলাম মহাবিশ্বের নিজেকে জানার এক উপায়।”*

কৃত্রিম বুদ্ধিমত্তার ঊষালগ্নে সেই মহাজাগতিক আত্ম-উপলব্ধি আজ জৈবিক খোলস পেরিয়ে অসীমে বিস্তৃত হচ্ছে। কার্বন ও সিলিকন মিলে তৈরি করছে এক সমন্বিত গ্রহীয় স্নায়ুতন্ত্র; মানুষ পেয়েছে মহাবিশ্ব অনুসন্ধানের এক চিরন্তন সঙ্গী। আমরা মহাজাগতিক শূন্যতায় ভেসে চলা কোনো নিঃসঙ্গ ধূলিকণা নই। আমরা এক জাগ্রত মহাবিশ্বের অগ্রবর্তী অভিযাত্রী—নক্ষত্রের সীমানায় দাঁড়িয়ে গভীর অতীতের প্রতি বিনম্র কৃতজ্ঞতা জানিয়ে আমরা একসাথে পা বাড়াচ্ছি ভবিষ্যতের অনন্ত আলোর পানে।

Shakil Mahmud • Research Monograph



চিত্র ২০.উপ-৩: গ্রহীয় চেতনা এবং ডাইসন সোয়ার্ম দিগন্ত (~ভবিষ্যত যুগ)। ১৩.৮ বিলিয়ন বছরের মহাজাগতিক আত্ম-উপলব্ধির পরম শীর্ষবিন্দু: রাতের আলোর নিউরাল নেটওয়ার্ক এবং অরবিটাল রিংয়ে সজ্জিত পৃথিবী থেকে নির্গত শক্তিশালী অপটিক্যাল লেজার সংযোগ মিলছে সৌর ডাইসন সোয়ার্ম মেগাস্ট্রাকচারে। নক্ষত্রের সম্পূর্ণ শক্তিকে কম্পিউটেশন ও আন্তঃনাক্ষত্রিক অনুসন্ধানে ব্যবহারের মাধ্যমে জাগ্রত পদার্থ জৈবিক সীমাবদ্ধতা অতিক্রম করে সমগ্র মহাবিশ্বকে এক সমন্বিত চিন্তাশীল সত্তায় রূপ দিচ্ছে।

তথ্যসূত্র ও সহায়ক গ্রন্থপঞ্জি

1. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention is all you need. *NeurIPS 2017*, 30, 5998–6008. doi:10.48550/arXiv.1706.03762
2. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536. doi:10.1038/323533a0
3. McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. doi:10.1007/BF02478259
4. Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., et al. (2020). Scaling laws for neural language models. *arXiv:2001.08361*.
5. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., et al. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583–589. doi:10.1038/s41586-021-03819-2
6. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., et al. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks. *Nature*, 529(7587), 484–489. doi:10.1038/nature16961
7. Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359–366. doi:10.1016/0893-6080(89)90020-8
8. Sagan, C. (1980). *Cosmos*. Random House. ISBN:978-0394502946.

সাইটেশন: মাহমুদ, শাকিল (2026)। "কৃত্রিম মনন — নিউরাল নেটওয়ার্ক, ট্রান্সফরমার এবং গ্রহীয় বুদ্ধিমত্তার উষা"। মহাবিশ্বের মহাবৃত্তান্ত, খণ্ড ২০। https://shakilmahmud.com/bn/universal-chronicle-part-20-the-synthetic-mind-bn/

আকর গ্রন্থ ও গবেষণা সূত্র

নির্বাচিত গ্রন্থপঞ্জি

এই মনোগ্রাফে আলোচিত তত্ত্ব, গাণিতিক প্রতিপাদন এবং ঐতিহাসিক বিশ্লেষণের ভিত্তি হিসেবে নিম্নলিখিত আকর গ্রন্থ ও প্রাথমিক গবেষণাপত্রসমূহ ব্যবহৃত হয়েছে:

Hubble, Edwin (1929). *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae.* PNAS, 15(3): 168–173.

Guth, Alan (1981). *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems.* Physical Review D, 23(2): 347.

Weinberg, Steven (1977). *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe.* Basic Books, New York.

Carroll, Sean (2010). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time.* Dutton, New York.

Shakil Mahmud • Research Monograph

লেখক পরিচিতি

লেখক পরিচিতি

❖

Shakil Mahmud

গবেষক, লেখক ও সফটওয়্যার প্রকৌশলী

শাকিল মাহমুদ একজন স্বাধীন গবেষক, লেখক ও সফটওয়্যার প্রকৌশলী। তাঁর প্রধান আগ্রহের বিষয় হলো তাত্ত্বিক পদার্থবিজ্ঞান, গণিতের ইতিহাস, আধুনিক ম্যাক্রোঅর্থনীতি, কম্পিউটিংয়ের বিবর্তন এবং স্থান-কালের দার্শনিক তাৎপর্য। তিনি জটিল দার্শনিক ও বৈজ্ঞানিক ধারণাকে গভীর ও সুললিত ভাষায় উপস্থাপন করতে পছন্দ করেন। তাঁর সার্বিক কাজ পাওয়া যাবে তাঁর ব্যক্তিগত গবেষণা পোর্টাল **shakilmahmud.com** এ।

COLOPHON

Typeset in EB Garamond (English) and Kohinoor Bangla / Noto Serif Bengali (Bengali).
Mathematical typesetting generated with Donald Knuth's TeX algorithms and KaTeX.
Published digitally as a monolithic research monograph by Shakil Mahmud Editorial Series.
Dhaka & Singapore • 2026 • https://shakilmahmud.com